

بررسی جمع‌شدگی طولانی مدت بتن سبک خودتراکم حاوی اسکوریا و لیکا

نیکتا لقمانی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

محمود نیلی *

دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

یکی از ویژگی‌های مهم بتن سبک خودتراکم که بر دوام آن مؤثر است، جمع‌شدگی است. در تحقیق حاضر، بتن‌های سبک خودتراکم با سبک‌دانه‌های لیکا و اسکوریا در دو نسبت آب به سیمن ۰/۳۵ و ۰/۴ و دو درصد درشت‌دانه به کل سنگ‌دانه ۳۵٪ و ۴۰٪ ساخته شده‌اند. کارایی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته طرح‌ها ارزیابی شده‌اند. همچنین، جمع‌شدگی یک ساله طرح‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که ساخت بتن‌های سبک خودتراکم با سبک‌دانه‌های لیکا و اسکوریا با کارایی مناسب، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بیشتر از ۳۰ مگاپاسکال و ۱۷ گیگاپاسکال امکان‌پذیر است. جمع‌شدگی ۳۶۵ روزه بتن‌های سبک خودتراکم از بتن‌های خودتراکم حدوداً ۳۸ درصد کمتر بوده است. کاهش نسبت آب به سیمن و افزایش درصد درشت‌دانه به ترتیب باعث کاهش ۵۰ و ۳۶ درصدی جمع‌شدگی شده است. نتایج نشان داده است که بیش از ۸۰ درصد میزان جمع‌شدگی تا سن ۲۵۰ روز رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: بتن سبک خودتراکم، جمع‌شدگی طولانی مدت، لیکا، اسکوریا.

* نویسنده مسئول: nili36@yahoo.co.uk & m-nili@basu.ac.ir

۱- مقدمه

بتن به دلیل مزایای متعددی که دارد به عنوان اصلی ترین مصالح ساختمانی مورد استفاده بشر برای ساخت و ساز قرار گرفته است. یکی از ضعف های بتن معمولی وزن زیاد آن بوده که برای ساخت برج ها، دهانه های بزرگ پل ها و سازه های شناور به عنوان یک مشکل فنی-اقتصادی محسوب می شود. در سازه های معمولی وزن سازه ۵۰ تا ۷۰ درصد بار طراحی را تشکیل داده که می تواند تا ۸۵ درصد برای پل نیز افزایش یابد [۱].

یک راهکار جهت حل این مشکل، استفاده از بتن سبک می باشد. مزایای بتن سبک شامل کاهش وزن، کاهش ابعاد سازه، عایق حرارت و کاهش هزینه های ساخت است. [۲]. علاوه بر این، معمولاً در این سازه ها حجم آرماتورها زیاد بوده و تراکم به سختی انجام می شود. استفاده از بتن خودتراکم به عنوان بتنی که می تواند تحت وزن خود جاری شده و نیاز به تراکم ندارد، برای این نوع سازه ها پیشنهاد شده است. یک گزینه مناسب برای این نوع سازه ها بتن سبک خودتراکم بوده که همزمان از مزایای بتن خودتراکم و بتن سبک بهره مند است [۳]. گستردگی منابع و نحوه تولید سبک دانه ها و وجود مصالح مختلف در ساخت بتن سبک خودتراکم باعث می شود که خصوصیات این بتن از قبل قابل پیش بینی نبوده و نیاز به بررسی مخلوط های آزمایشی باشد. یکی از ویژگی های مهم سازه های بتنی که مستقیماً بر دوام آن مؤثر است، جمع شدگی است. جمع شدگی کاهش حجم یا طول بتن سخت شده در طول زمان است که عمدتاً به علت انتقال رطوبت رخ می دهد [۴].

جمع شدگی وابسته به عوامل متعددی از جمله مقدار و نوع مواد چسباننده، نوع سنگ دانه ها و مدول الاستیسیته آن ها، نسبت آب به سیمان، نحوه عمل آوری و رطوبت نسبی است [۵].

در بتن سبک سازه ای، حجم سیمان بیشتر از بتن های معمولی بوده تا بتوان خصوصیات مکانیکی مناسبی را به دست آورد. علاوه بر این، سبک دانه ها سختی کمتری داشته و به نظر می رسد که در جلوگیری از انقباضات از سنگ دانه های معمولی ضعیف تر عمل کنند. در نتیجه، جمع شدگی بتن سبک حائز اهمیت است [۵]. مطالعات صورت گرفته در خصوص جمع شدگی بتن سبک خودتراکم محدود بوده و حاکی از اختلاف نظر در این زمینه می باشد. نوع سبک دانه و جذب آب آن عامل مهمی در میزان

جمع شدگی ناشی از خشک شدن است [۶]. سبک دانه ها به علت ساختار متخلخل خود قادرند که آب را درون حفرات خود نگه دارند. با پیش اشباع کردن سبک دانه ها، آب داخل سبک دانه ها در طول زمان خارج شده و باعث ادامه یافتن هیدراسیون پس از اتمام مراقبت خارجی می شود. این فرایند عمل آوری درونی یا ذاتی نامیده می شود [۷].

رادلینسکا و همکاران [۸] جمع شدگی ناشی از خشک شدن و ترک خوردگی بتن سبک خودتراکم را بررسی نمودند. آن ها جمع شدگی بتن خودتراکم با سنگ دانه معمولی را ۶۰۰ میکرو کرنش، بتن خودتراکم با درصدی سبک دانه را ۷۵۰ میکرو کرنش و بتن خودتراکم تماماً با سبک دانه را ۱۰۰۰ میکرو کرنش گزارش نموده اند و علت این افزایش را کاهش مدول الاستیسیته یا افزایش خزش دانسته اند. علاوه بر این، تحقیقات آن ها نشان می دهد که جمع شدگی با افزایش درصد سبک دانه ها افزایش یافته است.

وندلینگ و همکاران [۹] جمع شدگی بتن سبک خودتراکم را با بتن خودتراکم مقایسه نمودند و تحقیقات آن ها نشان دهنده یک انبساط اولیه در ۲۴ ساعت اولیه بوده است، اما پس از یک سال جمع شدگی بتن سبک خودتراکم حدود ۱۰۰ الی ۳۰۰ میکرو کرنش بیشتر از بتن خودتراکم بوده است. اگرچه در تحقیقاتی هم جمع شدگی بتن سبک خودتراکم از بتن خودتراکم کمتر گزارش شده است.

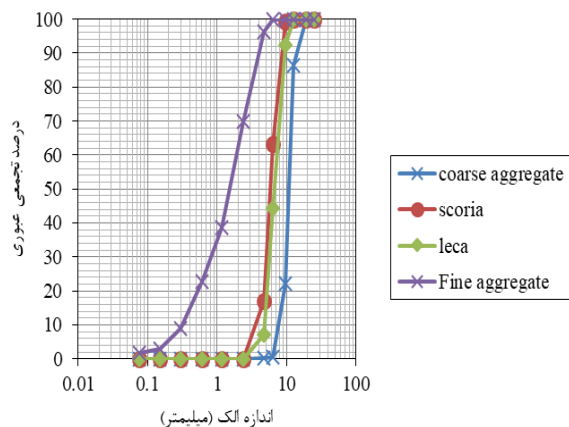
بایمستر و همکاران [۱۰] جمع شدگی بتن سبک خودتراکم حاوی شیل و لیکا را به ترتیب ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرو کرنش کمتر از بتن خودتراکم با سنگ دانه معمولی به دست آورده و علت آن را عمل آوری درونی ذکر کردند. چن و همکاران [۱۱] جمع شدگی بتن سبک خودتراکم با سه سبک دانه متفاوت را به مدت ۵۶ روز بررسی نموده و نتایج آن ها حاکی از کاهش ۳۲ تا ۶۶ درصدی جمع شدگی بتن سبک خودتراکم نسبت به بتن خودتراکم بوده است.

امروزه، بتن سبک خودتراکم به علت مزایای کاهش وزن و تراکم پذیری مورد استقبال بیشتر مهندسان و محققان قرار گرفته است. در کشور ایران منابع مختلف سبک دانه وجود داشته اما اطلاعات کافی در زمینه رفتار بلند مدت بتن های ساخته شده با این سبک دانه ها از جمله جمع شدگی وجود ندارد. لذا در تحقیق حاضر با توجه به

و ۰/۴ و دو درصد درشت‌دانه به کل سنگ‌دانه ۳۵٪ و ۴۰٪ در نظر گرفته شده است. پودرسنگ به میزان ۵ درصد حجم کلی سنگ‌دانه استفاده شده است. کدگذاری طرح‌های مخلوط به این صورت است که عدد قبل از حرف لاتین نسبت آب به سیمان و عدد بعد از آن درصد درشت‌دانه به کل سنگ‌دانه است. حرف لاتین "L" مربوط به لیکا، "S" مزبوط به اسکوریا و "N" مربوط به سنگ‌دانه معمولی است. به عنوان مثال، 0.4L40 بتن با سنگ‌دانه لیکا، با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و درصد درشت‌دانه ۴۰ درصد است.

جدول ۱- مشخصات سنگ‌دانه‌ها و سبک‌دانه‌های مصرفی

نوع سبک‌دانه	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	جذب آب (%)
شن	۲/۶۳	۰/۳
ماسه	۲/۵۹	۲/۴۶
لیکا	۱/۲۵	۱۱/۲
اسکوریا	۱/۶۷	۱۸/۳



شکل ۱- دانه‌بندی مصالح

قبل از ساخت، سبک‌دانه‌ها سی دقیقه در آب قرار گرفته و سپس اجازه داده شده که به صورت اشباع با سطح خشک درآیند. برای اختلاط بتن، ابتدا مواد پودری و ماسه مخلوط و سپس سبک‌دانه به صورت اشباع با سطح خشک به آن‌ها اضافه شده و در انتها آب و افزودنی نیز اضافه گشته و مخلوط کردن به مدت ۲ دقیقه ادامه داشته است. در انتها، جهت ایجاد کارایی مناسب هوازا اضافه شده است.

اهمیت جمع‌شدگی بر ترک خوردگی و پایداری سازه‌های بتنی، بتن-های سبک خودتراکم با سبک‌دانه‌های لیکا و اسکوریا ساخته شده و جمع‌شدگی طولانی مدت آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج این تحقیق، اطلاعات جامعی از تأثیر عوامل مختلف از جمله نوع سبک‌دانه، نسبت آب به سیمان و درصد درشت‌دانه به کل سنگ‌دانه بر کارایی، چگالی، مقاومت فشاری و جمع‌شدگی طولانی مدت بتن سبک خودتراکم در اختیار مهندسین قرار گیرد.

۲- مصالح مورد استفاده

در ساخت طرح‌های بتنی سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان هگمتان مطابق با ASTM C150-22 [۱۲]، خاکستر بادی محصول کشور آفریقای جنوبی و دوده سیلیسی ازنا مورد استفاده قرار گرفته است. سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل دو بخش درشت‌دانه شرکت زرین ساوه و ریزدانه شرکت نگین ماسه همدان می‌باشد. سبک‌دانه مصنوعی لیکا سازه‌ای شرکت لیکا ساوه و سبک‌دانه طبیعی اسکوریا معادن قروه کردستان در این تحقیق استفاده شده‌اند. دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق با استاندارد ASTM C136-19 [۱۳] انجام گرفته است. حداکثر اندازه دانه ۱۲/۵ میلی‌متر و مدول نرمی ماسه ۳/۶ است.

آزمایش تعیین چگالی و جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C127-24 [۱۴] برای درشت‌دانه‌های معمولی و سبک‌دانه‌ها و ASTM C128-22 [۱۵] برای ریزدانه‌ها انجام گرفته است. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی و سبک‌دانه‌ها در جدول ۱ و دانه‌بندی مصالح در شکل ۱ نشان داده شده است. پودرسنگ با چگالی ۲/۷۱ به عنوان ماده اصلاح کننده لزجت استفاده شده است. به منظور تنظیم کارایی از فوق روان کننده P10N بر پایه پلی کریکسیلات محصول شرکت شیمی ساختمان و هوازا استفاده شده است.

۳- طرح مخلوط و نحوه ساخت آزمونه‌ها

جدول ۲ مشخصات طرح مخلوط استفاده شده را نشان می‌دهد. در کلیه طرح‌ها، عیار مواد سیمانی ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. سیمان به میزان ۲۰٪ و ۱۰٪ وزنی به ترتیب با خاکستر بادی و دوده سیلیسی جایگزین شده است. دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۵

جدول ۲- مشخصات طرح‌های مخلوط (کیلوگرم بر مترمکعب)

کد طرح	سیمان	خاکستر بادی	دوده سیلیسی	نسبت آب به سیمان	نوع درشت‌دانه	درشت‌دانه	پودر سنگ	فوق روان کننده (%)	هوازا (%)
0.4L40	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۴	لیکا	۲۵۴/۶۳	۳۱/۸۳	۰/۷۵	۰/۰۱
0.4L35	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۴	لیکا	۲۲۲/۸	۳۱/۸۳	۰/۷۵	۰/۰۱
0.35L40	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۳۵	لیکا	۲۲۹/۶	۳۲/۸	۱/۵	۰/۰۱
0.35L35	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۳۵	لیکا	۲۶۲/۴	۳۲/۸	۱/۵	۰/۰۱
0.4S40	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۴	اسکوریا	۲۵۴/۶۳	۳۱/۸۳	۰/۷۵	۰/۰۱
0.4S35	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۴	اسکوریا	۲۲۲/۸	۳۱/۸۳	۰/۷۵	۰/۰۱
0.35S40	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۳۵	اسکوریا	۲۲۹/۶	۳۲/۸	۱/۵	۰/۰۱
0.35S35	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۳۵	اسکوریا	۲۶۲/۴	۳۲/۸	۱/۵	۰/۰۱
0.4N40	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۴	معمولی	۲۵۴/۶۳	۳۱/۸۳	۰/۷۵	۰/۰۱
0.4N35	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۴	معمولی	۲۲۲/۸	۳۱/۸۳	۰/۷۵	۰/۰۱
0.35N40	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۳۵	معمولی	۲۲۹/۶	۳۲/۸	۱/۵	۰/۰۱
0.35N35	۳۱۵	۹۰	۴۵	۰/۳۵	معمولی	۲۶۲/۴	۳۲/۸	۱/۵	۰/۰۱

۴- آزمایش‌ها

سانتی‌متری (۳ عدد) برای آزمایش مقاومت فشاری [۱۹] و چگالی خشک [۲۰] در سن ۲۸ روز و نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر (۲ عدد) برای آزمایش مدول الاستیسیته [۲۱] در سن ۲۸ روز در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از تصاویر آزمایش‌های انجام گرفته در شکل ۲ نشان داده شده است.

پس از ساخت بتن، آزمایش‌های بتن تازه شامل جریان اسلامپ و حلقه جی مطابق با EFNARC [۱۶]، شاخص جدایش چسبی مطابق با ASTM C1611-21 [۱۷] و چگالی بتن تازه بر اساس ASTM C138-2024 [۱۸] انجام شده است. نمونه‌های مکعبی ۱۰



ب) حلقه جی



الف) جریان اسلامپ



د) مدول الاستیسیته



ج) مقاومت فشاری

شکل ۲- تصاویر آزمایش‌های انجام گرفته

۵- نتایج، بحث و بررسی

۵-۱- بتن تازه

نتایج آزمایشات بتن تازه در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق جدول، نتایج جریان اسلامپ در محدوده مجاز EFNARC (۶۵۰ تا ۸۰۰ میلیمتر) بوده است. جریان اسلامپ بتن‌های سبک خودتراکم در محدوده ۶۶۱ تا ۷۱۴ (طبقه SF2) و بتن‌های خودتراکم در محدوده ۷۳۲ تا ۷۷۳ میلیمتر (طبقه SF3) می‌باشد. بتن‌های سبک خودتراکم جریان اسلامپ کمتری را نسبت به بتن خودتراکم داشته که می‌تواند به علت وزن کمتر آن‌ها و در نتیجه توانایی کمتر جهت جریان‌پذیری باشد. جریان اسلامپ با افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش درصد درشت‌دانه (ریزتر شدن) افزایش یافته است. نتایج آزمایش حلقه جی و زمان T50 نیز در محدوده مجاز EFNARC (۲ تا ۵ ثانیه برای T50 و صفر تا ۱۰ میلیمتر برای حلقه جی) بوده است. بتن‌های خودتراکم نتایج بهتری را نسبت به بتن‌های سبک خودتراکم در این دو معیار داشته‌اند. اختلاف قابل توجهی در نتایج حلقه جی بتن‌های خودتراکم و بتن‌های سبک خودتراکم مشاهده نگردید. در بین بتن‌های سبک خودتراکم، بتن‌های ساخته شده با لیکا جریان اسلامپ بیشتر و زمان T50 کمتری را داشته‌اند که می‌تواند به علت شکل کرووی آن‌ها بوده که حرکت را راحت‌تر می‌کند.

برای انجام آزمایش جمع‌شدگی از نمونه‌های $10 \times 10 \times 40$ سانتی متر (۱ عدد) استفاده شده است. کلیه نمونه‌ها بعد از قالب‌برداری در محیط آزمایشگاه نگه داشته شده‌اند. بعد از سه روز، بر روی نمونه‌های جمع‌شدگی کرنش سنج PFL30-11 دارای طول ۳۰ میلی‌متر، مقاومت الکتریکی ۱۲۰ اهم و گیج فاکتور ۲/۱۳ می‌باشد. نصب گشته و به دستگاه ثبت داده‌ها (دیتالاگر) متصل شده است (شکل ۳).

در طول آزمایش دمای اتاق در محدوده 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 50 ± 2 درصد بوده است. ثبت داده‌های جمع‌شدگی تا ۳۶۵ روز ادامه داشته است.



شکل ۳- اندازه‌گیری جمع‌شدگی

جدول ۳- نتایج بتن تازه

کد طرح	جریان اسلامپ (میلیمتر)	T50 (ثانیه)	حلقه جی (میلیمتر)	شاخص جدایش چشمی	چگالی بتن تازه (Kg/m ³)
0.4L40	۷۰۳	۴/۲	۷	۱	۱۸۴۰
0.4L35	۷۱۴	۴	۶	۱	۴۸۶۷
0.35L40	۶۸۶	۳/۶	۵	۰	۲۰۰۰
0.35L35	۶۹۰	۳/۴	۶	۰	۲۰۳۰
0.4S40	۶۷۷	۴/۷	۵	۱	۲۰۰۳
0.4S35	۶۹۵	۴/۵	۵	۱	۲۰۵۰
0.35S40	۶۶۱	۳/۸	۴	۱	۲۰۷۶
0.35S35	۶۷۴	۳/۶	۶	۱	۲۰۸۷
0.4N40	۷۵۵	۳/۵	۶	۰	۲۳۱۲
0.4N35	۷۷۳	۳/۲	۸	۰	۲۳۰۰
0.35N40	۷۳۲	۲/۸	۷	۰	۲۳۹۸
0.35N35	۷۴۴	۲/۵	۸	۰	۲۳۸۵

و ۲۴]. کمترین و بیشترین چگالی مربوط به طرح‌های 0.4L40 و 0.35S35 بوده است. چگالی خشک در طرح‌های حاوی لیکا کمتر از طرح‌های حاوی اسکوریا بوده است که به علت کمتر بودن چگالی لیکا نسبت به اسکوریا است. چگالی خشک طرح‌های بتن سبک خودتراکم در محدوده ۱۷۴۵ تا ۱۹۵۶ بوده است که در محدوده مجاز در آیین‌نامه‌های EN206-1 [۲۵] (کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و ACI 318-19 [۲۶] (کمتر از ۲۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب) بوده است.

کاهش نسبت آب به سیمان در هر نوع سنگ‌دانه و درصد جایگزینی باعث افزایش چگالی خشک شده است که می‌تواند به علت کاهش تخلخل و تشکیل ساختار متراکم‌تر باشد. تأثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر افزایش چگالی خشک در طرح‌های حاوی سبک‌دانه‌ها بیشتر از سنگ‌دانه معمولی بوده است، به طوری که باعث افزایش ۳/۷ تا ۹ درصدی در طرح‌های حاوی لیکا، ۳/۲ تا ۷/۶ درصدی در طرح‌های حاوی اسکوریا و ۲/۹ تا ۳/۷ درصدی در طرح‌های حاوی سنگ‌دانه معمولی شده است. افزایش درصد سبک‌دانه‌ها به علت کمتر بودن چگالی سبک‌دانه‌ها نسبت به ماسه باعث کاهش چگالی در طرح‌های حاوی اسکوریا و لیکا شده است، در حالی که در طرح‌های حاوی سنگ‌دانه معمولی با افزایش درصد درشت‌دانه‌ها چگالی نیز افزایش پیدا کرده است. زیرا در این حالت چگالی درشت‌دانه از ماسه بیشتر بوده است.

۳-۵- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری طرح‌ها در سن ۲۸ روز در شکل ۴ نشان داده شده است. جایگزینی سبک‌دانه‌ها در بتن سبک خودتراکم باعث کاهش ۷ تا ۲۷ درصدی مقاومت فشاری شده است. کاهش مقاومت فشاری در بتن‌های سبک خودتراکم می‌تواند به این علت باشد که سبک‌دانه‌ها از ملات سیمان ضعیف‌تر هستند [۲۷ و ۲۸]. در کلیه طرح‌های بتن سبک خودتراکم به جز 0.4L40 مقاومت فشاری بیشتر از ۳۰ مگاپاسکال بوده است. حداکثر مقاومت فشاری بتن‌های سبک خودتراکم مربوط به طرح‌های 0.35L35 و 0.35L40 بوده که با رسیدن به بیش از ۴۰ مگاپاسکال می‌توانند به عنوان بتن سبک خودتراکم پرمقاومت طبقه‌بندی شوند. لایه مرزی قوی‌تر در بتن‌های سبک خودتراکم به علت چسبندگی مناسب سبک‌دانه‌ها با خمیر سیمان منجر به کسب مقاومت فشاری

این نتایج مطابق با تحقیق دولت آباد و همکاران [۲۲] بوده که نوع سبک‌دانه تعیین کننده کارایی بوده و در بین سبک‌دانه‌ها، لیکا کارایی بهتری داشته است. نتایج چگالی بتن تازه وابسته به نوع سنگ‌دانه استفاده شده در طرح‌ها بوده است. به طوری که، بتن‌های خودتراکم ساخته شده با سنگ‌دانه معمولی، اسکوریا و لیکا به ترتیب بیشترین چگالی تازه را داشته‌اند. شاخص جدادگی چشمی نیز در محدوده مجاز EFNARC (صفر و یک) می‌باشد. در طرح‌های حاوی اسکوریا احتمالاً به دلیل تیز گوشه بودن سنگ‌دانه‌ها، شاخص جدادگی چشمی افزایش داشته است. افزایش نسبت آب به سیمان نیز باعث افزایش شاخص جدادگی چشمی در طرح‌های حاوی لیکا شده است.

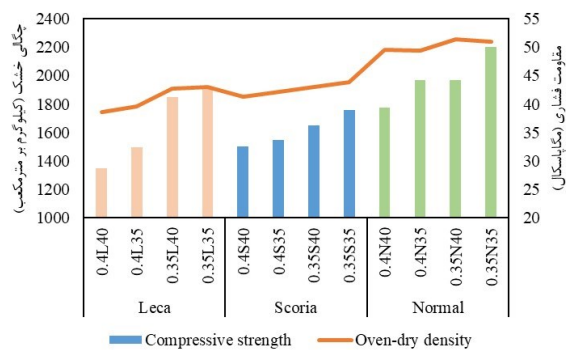
۲-۵- چگالی بتن سخت شده

چگالی خشک بتن سخت شده یکی از ویژگی‌های مهم در بتن‌های سبک خودتراکم است. در جدول ۴ نتایج چگالی خشک بتن سخت شده در سن ۲۸ روز و نسبت چگالی هر طرح به طرح شاهد متناظر آن نشان داده شده است.

کد طرح	چگالی بتن سخت شده	نسبت چگالی هر طرح به طرح شاهد متناظر
0.4L40	۱۷۴۵	۰/۸
0.4L35	۱۷۸۴	۰/۸۲
0.35L40	۱۹۰۸	۰/۸۶
0.35L35	۱۹۲۰	۰/۸۵
0.4S40	۱۸۵۴	۰/۸۵
0.4S35	۱۸۵۵	۰/۸۷
0.35S40	۱۹۲۲	۰/۸۷
0.35S35	۱۹۵۶	۰/۸۵
0.4N40	۲۱۸۵	-
0.4N35	۲۱۷۷	-
0.35N40	۲۲۵۶	-
0.35N35	۲۲۳۹	-

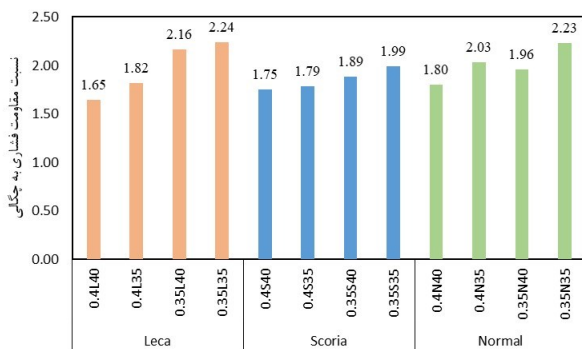
همان گونه که مشاهده می‌شود، جایگزینی سبک‌دانه‌ها به جای سنگ‌دانه‌های معمولی در بتن خودتراکم باعث کاهش چگالی بین ۱۳ تا ۲۰ درصد شده است. در تحقیقات قبلی نیز با توجه به نوع سبک‌دانه کاهش ۷ تا ۳۱ درصدی چگالی گزارش شده است [۲۳]

می‌تواند بیانگر اهمیت نوع سبک‌دانه در تعیین مقاومت فشاری و چگالی بتن سبک باشد. در بتن‌ها با سنگ‌دانه معمولی، با افزایش چگالی مقاومت فشاری کاهش یافته است. همانطور که قبلاً گفته شد، افزایش چگالی در این بتن‌ها به علت افزایش درصد درشت‌دانه بوده است و با درشت شدن دانه‌بندی لایه مرزی بزرگ‌تر شده و مقاومت فشاری کاهش یافته است.



شکل ۵- رابطه مقاومت فشاری و چگالی

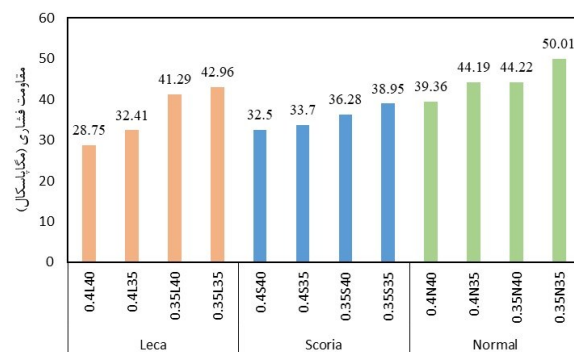
مزیت اصلی بتن سبک کاهش وزن سازه می‌باشد اما این کاهش وزن باید ضمن دستیابی به مقاومت مناسب حاصل گردد. یکی از پارامترهای مهم در بتن سبک نسبت مقاومت به چگالی است. در شکل ۶ نسبت مقاومت ۲۸ روزه به چگالی خشک برای همه طرح‌ها آورده شده است.



شکل ۶- نسبت مقاومت فشاری به چگالی خشک

در بین طرح‌های بتن سبک خودتراکم طرح 0.35L35 بیشترین نسبت مقاومت فشاری به وزن (۲/۲۴) را داشته است که تقریباً برابر با طرح 0.35N35 با نسبت مقاومت فشاری به چگالی ۲/۲۳ می‌باشد. نوع سنگ‌دانه عامل مهمی بر نسبت مقاومت فشاری به چگالی می‌باشد. بتن‌های خودتراکم ساخته شده با لیکا در دو نسبت آب به سیمان نسبت مقاومت به چگالی بالاتری از طرح‌های حاوی اسکوریا داشته‌اند. در تمامی طرح‌ها، با کاهش درصد درشت‌دانه و ریزتر شدن دانه‌بندی و کاهش نسبت آب به سیمان افزایش نسبت مقاومت به چگالی مشاهده شده است.

مناسب شده است [۶]. به طور کلی، تفاوت مقاومت فشاری بتن‌های حاوی اسکوریا و لیکا زیر ۱۳ درصد می‌باشد. کاهش نسبت آب به سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. با کاهش نسبت آب به سیمان میزان آب آزاد کاهش یافته و تخلخل کمتر و مقاومت فشاری افزایش یافته است [۲۹]. تأثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر افزایش مقاومت فشاری در بتن‌های سبک خودتراکم بیشتر از بتن‌های خودتراکم مشاهده شده است. کاهش ۵ درصدی نسبت آب به سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۲ تا ۴۴ درصدی در بتن‌های حاوی لیکا، ۱۲ تا ۳۳ درصدی در بتن‌های حاوی اسکوریا و ۱۳ تا ۱۶ درصدی بتن‌های حاوی سنگ‌دانه معمولی شده است. کاهش درصد درشت‌دانه و ریزتر شدن دانه‌بندی نیز باعث افزایش مقاومت فشاری شده است، اگرچه تأثیر آن کمتر از کاهش نسبت آب به سیمان بوده است. با کاهش درصد درشت‌دانه از ۴۰ درصد به ۳۵ درصد، مقاومت فشاری بتن‌های حاوی لیکا ۴ تا ۱۳ درصد، بتن‌های حاوی اسکوریا ۴ تا ۷ درصد و بتن‌های حاوی سنگ‌دانه معمولی ۱۳ درصد افزایش یافته‌اند. در تحقیقات گذشته نیز کاهش قابل توجه مقاومت فشاری به علت افزایش جایگزینی سبک‌دانه‌ها گزارش شده است [30].



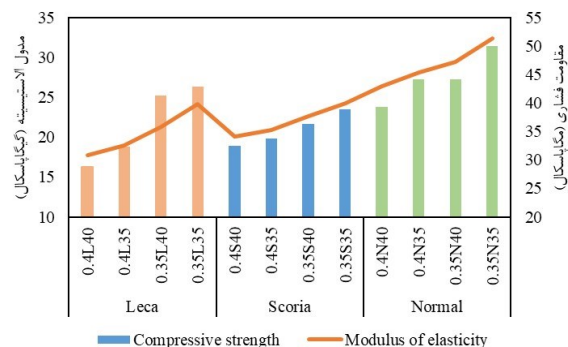
شکل ۷- نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه

شکل ۵ رابطه مقاومت فشاری و چگالی را نشان می‌دهد. مطابق این دو نمودار، افزایش چگالی بتن الزاماً به معنای افزایش مقاومت فشاری نمی‌باشد و عوامل دیگری از جمله نسبت آب به سیمان و نوع سنگ‌دانه از عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری می‌باشند. با مقایسه رابطه چگالی و مقاومت فشاری می‌توان برداشت نمود که افزایش چگالی در طرح‌های حاوی لیکا و اسکوریا باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. اگرچه طرح‌های حاوی اسکوریا چگالی بیشتری نسبت به لیکا داشته‌اند، مقاومت فشاری آن‌ها بیشتر نمی‌باشد که

۵-۴- مدول الاستیسیته

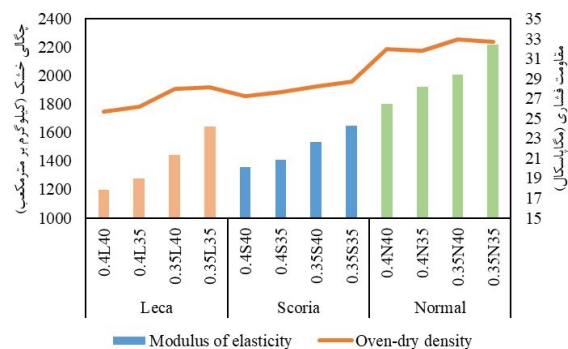
کاهش نسبت آب به سیمان بر افزایش مدول الاستیسیته بیشتر از کاهش درصد درشت‌دانه بوده است.

شکل ۸ رابطه مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، افزایش مقاومت فشاری به تنهایی نمی‌تواند بیانگر افزایش مدول الاستیسیته باشد و نوع سبک‌دانه نیز بر مدول الاستیسیته مؤثر است. به طور کلی، در سنگ‌دانه یکسان، با افزایش مقاومت فشاری هر طرح مدول الاستیسیته افزایش یافته است.



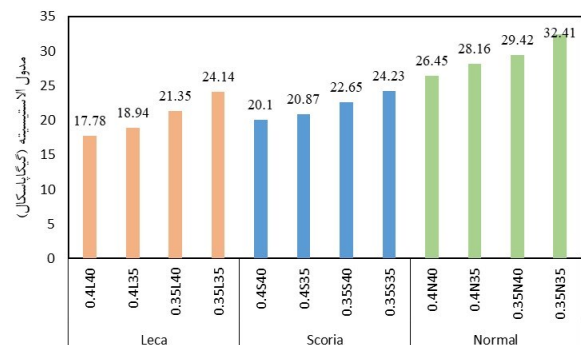
شکل ۸- رابطه مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری

چگالی بتن نیز از عوامل مؤثر بر مدول الاستیسیته آن است. شکل ۹ رابطه مدول الاستیسیته و چگالی بتن را بررسی می‌کند. همانگونه که از نمودار مشخص است، افزایش چگالی بتن به تنهایی باعث افزایش مدول الاستیسیته نمی‌گردد و نوع سنگ‌دانه نیز در تعیین مدول الاستیسیته نقش دارند. افزایش چگالی بتن‌های ساخته شده با هر سبک‌دانه‌ای باعث افزایش مدول الاستیسیته آن شده است. در واقع، افزایش چگالی در سبک‌دانه ثابت باعث افزایش مدول الاستیسیته می‌گردد. هرچند در مورد بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه معمولی این موضوع صادق نمی‌باشد. کاهش درصد درشت‌دانه معمولی باعث کاهش چگالی گشته اما با ریزتر شدن دانه‌بندی لایه مرزی بهبود یافته و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد.



شکل ۹- رابطه مدول الاستیسیته و چگالی خشک

نتایج مدول الاستیسیته ۲۸ نمونه‌ها در سن ۲۸ روز در شکل ۷ نشان داده شده است. جایگزینی درشت‌دانه معمولی با سبک‌دانه باعث کاهش ۲۳ تا ۳۳ درصدی مدول الاستیسیته شده است. مدول الاستیسیته بتن‌های سبک به علت سختی کمتر سبک‌دانه‌ها نسبت به سنگ‌دانه نرمال کاهش می‌یابد [۳۱] و در تحقیقات گذشته در محدوده ۲۲ تا ۳۰ گیگاپاسکال گزارش شده است [۳۲].



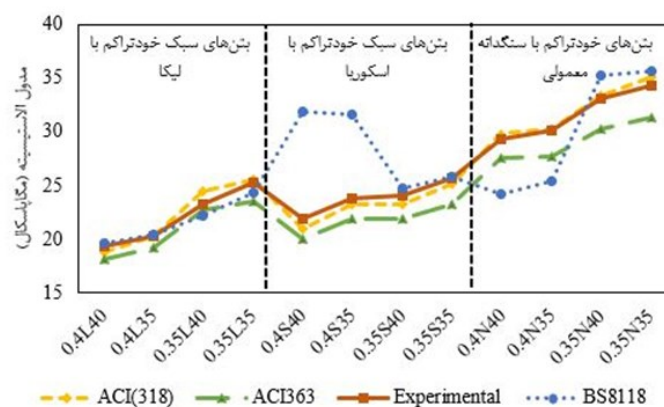
شکل ۷- مدول الاستیسیته ۲۸ روزه

بیشترین مدول الاستیسیته در بین طرح‌های بتن سبک خودتراکم را طرح 0.35S35 کسب کرده است. نوع سبک‌دانه عامل مهمی در مدول الاستیسیته است. بتن‌های سبک خودتراکم حاوی اسکوریا مدول الاستیسیته بیشتری را نسبت به لیکا کسب کرده‌اند که می‌تواند به علت بالاتر بودن چگالی بتن‌های حاوی اسکوریا و شکل تیز گوشه این سبک‌دانه باشد. کاهش نسبت آب به سیمان باعث افزایش مدول الاستیسیته شده است. کاهش نسبت آب به سیمان هم‌زمان می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری و چگالی بتن شود که منجر به افزایش مدول الاستیسیته نیز خواهد شد. تأثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر افزایش مدول الاستیسیته در بتن‌های سبک خودتراکم بیشتر از بتن‌های خودتراکم بوده است. کاهش نسبت آب به سیمان در بتن‌های سبک خودتراکم باعث افزایش ۱۱ تا ۲۷ درصدی و در بتن‌های خودتراکم با سنگ‌دانه معمولی باعث افزایش ۱۶ درصدی شده است. در بین بتن‌های سبک خودتراکم نیز افزایش مدول الاستیسیته به علت کاهش نسبت آب به سیمان در بتن‌های ساخته شده با سبک‌دانه اسکوریا بیشتر بوده است. کاهش درصد درشت‌دانه و ریزتر شدن دانه‌بندی باعث افزایش ۴ تا ۱۳ درصدی مدول الاستیسیته شده است. به طور میانگین تأثیر کاهش درصد درشت‌دانه بر افزایش مدول الاستیسیته در بتن‌های سبک خودتراکم بیشتر بوده است. همچنین، مشخص است که تأثیر

آیین‌نامه‌ها روابطی را به منظور تخمین مدول الاستیسیته پیشنهاد داده‌اند. با توجه به اهمیت چگالی در تخمین مدول الاستیسیته بتن سبک خودتراکم، مدول الاستیسیته با روابط نشان داده شده در جدول ۵ محاسبه و مقادیر محاسبه شده توسط این روابط با مقادیر آزمایشگاهی در شکل ۱۰ مقایسه شده است. در این رابطه‌ها W_c چگالی بتن خشک شده در هوا، f'_c : مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای 150×300 میلی‌متر و f_{cu} : مقاومت فشاری نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری است.

جدول ۵- روابط مدول الاستیسیته در استانداردهای مختلف

استاندارد	رابطه پیشنهادی
ACI 318-19 [۲۶]	$E_c = 0.043 W_c^{1.5} \cdot \sqrt{f'_c}$
ACI 363-10 [۳۳]	$E_c = \left(3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \right) \cdot \left(\frac{W_c}{2320} \right)^{1.5}$
BS 8110-97 [۳۴]	$E_c = 0.0017 W_c^2 f_{cu}^{0.33}$



شکل ۱۰- مقایسه مدول الاستیسیته آزمایشگاهی با روابط آیین‌نامه

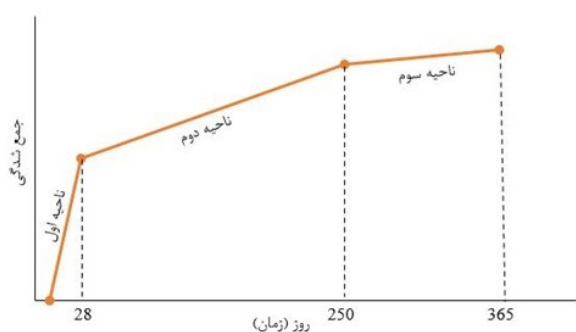
همانگونه که مشخص است، مدول‌های الاستیسیته محاسبه شده توسط رابطه ACI318-19 کمترین خطا را داشته‌اند. خطای محاسبه شده در روابط ACI363-10، CI318-19 و BS8110-97 به طور میانگین به ترتیب ۲۷٪، ۲۷٪ و ۱۱٪ می‌باشد. نوع سنگ‌دانه نیز بر میزان خطای روابط آیین‌نامه مؤثر بوده است. بیشترین خطا مربوط به بتن‌های سبک حاوی اسکوریا است. در نتیجه، اعمال نوع سنگ‌دانه در روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها می‌تواند در دقت پیش‌بینی مؤثر باشد.

۵-۵- جمع‌شدگی

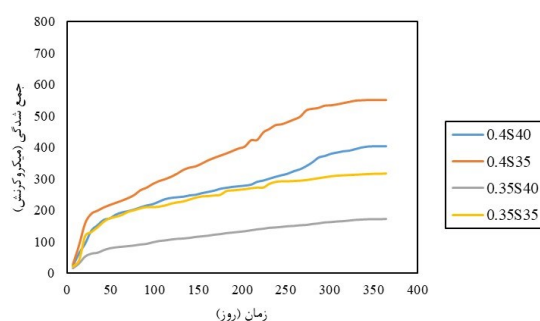
جمع‌شدگی طرح‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در همه طرح‌ها سه ناحیه با شیب‌های متفاوت قابل تفکیک است. ناحیه اول متعلق به سنین اولیه جمع‌شدگی (بین ۳ تا ۲۸ روز) می‌باشد. در این ناحیه جمع‌شدگی

با شیب زیادی افزایش یافته است. به طور میانگین، در بتن‌های خودتراکم و خودتراکم سبک با اسکوریا و لیکا به ترتیب ۳۵٪، ۳۶٪ و ۲۱٪ کل جمع‌شدگی در این ناحیه رخ داده است. نهاب و کتاب [۳۶] با بررسی جمع‌شدگی به مدت ۹۰ روز نشان دادند که ۴۰٪ جمع‌شدگی تا سن ۲۸ روز رخ داده است. در ناحیه دوم (۲۸ تا ۲۵۰ روز)، از سرعت رشد جمع‌شدگی کاسته شده و نمودار با شیب کمتری ادامه یافته است. تا سن ۲۵۰ روز به طور میانگین، ۹۴٪، ۸۶٪ و ۸۷٪ کل جمع‌شدگی برای بتن‌های خودتراکم و سبک خودتراکم با اسکوریا و لیکا به ترتیب رخ داده است. در بخش سوم، از ۲۵۰ تا ۳۶۵ روز شیب نمودار بسیار کم شده و به نظر می‌رسد جمع‌شدگی به حداکثر مقدار خود رسیده است و نمودار به خط افقی متمایل است. نکته قابل توجه در این مطالعه حاکی از این است که به نظر می‌رسد برای اطمینان از عملکرد بتن‌ها در مقابل پدیده جمع‌شدگی حداقل ۲۵۰ روز زمان نیاز است.

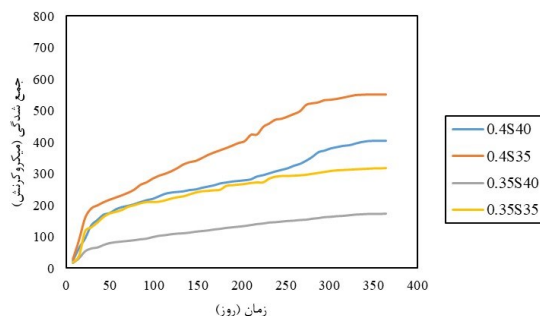
باتوجه به نمودارها به نظر می‌رسد که میتوان جمع‌شدگی هر طرح را با سه خط پیشنهادی ($y = Ax + B$) ر سنین ۳ تا ۲۸ روز، ۲۸ تا ۲۵۰ روز و ۲۵۰ تا ۳۶۵ روز مطابق شکل ۱۲ نشان داد. در جدول ۶، شیب خطوط (A)، عرض از مبدا (B) و ضریب همبستگی (R^2) برای هر طرح مخلوط در هر سه ناحیه نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی مناسبی برای معادله خطوط پیشنهادی وجود دارد که نشانگر مناسب بودن رابطه پیشنهادی جهت تخمین جمع‌شدگی برای هر قسمت می‌باشد. در هر طرح مخلوط با گذشت زمان شیب نمودار کاهش یافته و بعد از ۲۵۰ روز شیب کمتر از یک شده است. در بتن‌های خودتراکم شیب ناحیه اول از بتن‌های سبک خودتراکم بیشتر بوده است که نشان‌دهنده سرعت زیاد افزایش جمع‌شدگی در روزهای اولیه بوده است. بتن‌های سبک خودتراکم با لیکا در ناحیه اول شیب کمتری را از بتن‌های ساخته شده با اسکوریا داشته‌اند که بیانگر سرعت رشد کمتر جمع‌شدگی در این بتن‌ها می‌باشد.



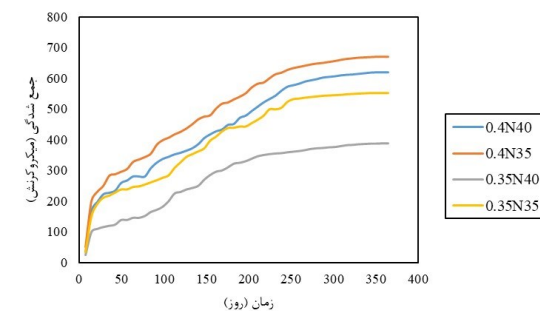
شکل ۱۲- نمودار شماتیک جمع‌شدگی به صورت سه خط مجزا



(الف)



(ب)



(ج)

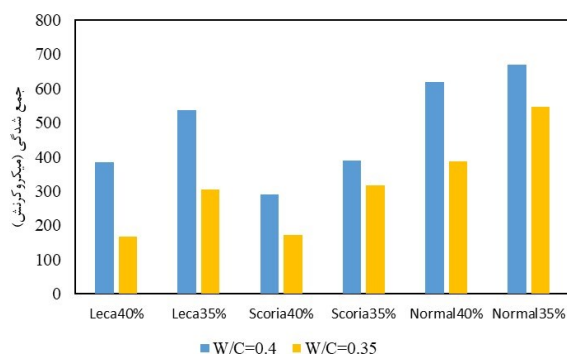
شکل ۱۱- جمع‌شدگی ۳۶۵ روزه

جدول ۶- شیب، عرض از مبدا و ضریب همبستگی خطوط پیشنهادی برای ناحیه‌های مختلف نمودار جمع‌شدگی

کد طرح	ناحیه اول (۳ تا ۲۸ روز)			ناحیه دوم (۲۸ تا ۲۵۰ روز)			ناحیه اول (۲۵۰ تا ۳۶۵ روز)		
	R^2	B	A	R^2	B	A	R^2	B	A
0.4L40	۰/۸۳	۸/۵	۸/۴۵۷۱	۰/۹۹	۱۷۱/۶۹	۱/۱۵۹۸	۰/۹۲	۵/۹۵	۰/۳۳۳۶
0.4L35	۰/۸	۲۵/۵	۸/۹۵۷	۰/۹۹	۲۲۱/۰۶	۱/۶۹۳۹	۰/۹۴	۵/۰۳	۰/۳۲۸۲
0.35L40	۰/۷۴	۱۷	۴/۰۴۲۹	۰/۹۷	۷۱/۸۱۷	۱/۲۶۹۳	۰/۹۵	۳۰/۶	۰/۲۴۱۲
0.35L35	۰/۸۷	۳	۸/۱۵۷۱	۰/۹۸	۱۴۶/۰۹	۱/۵۳۹۲	۰/۹۳	۴/۱۳	۰/۱۶۹۵
0.4S40	۰/۹۹	-۱۲	۵/۲۴۲۹	۰/۹۸	۱۵۰/۹۷	۰/۶۶۱۳	۰/۹	۱/۱۵	۰/۷۶۵۸
0.4S35	۰/۹۸	-۲۱	۷/۹	۰/۹۹	۱۵۳/۵۸	۱/۲۹۰۴	۰/۸۳	۳/۳۴	۰/۵۲۹۲
0.35S40	۰/۹۸	۱/۵	۲/۲۸۵۷	۰/۹۹	۶۱/۹۰۹	۰/۳۵۹۷	۰/۹۶	۵/۳۷	۰/۲۲۰۶
0.35S35	۰/۹۱	-۲۵	۵/۸۲۸۶	۰/۹۸	۱۴۷/۴۷	۰/۵۹۵۶	۰/۹۳	۲۳/۵	۰/۲۴۱
0.4N40	۰/۹۵	۸/۵	۲/۲۱۴۳	۰/۹۸	۴۹/۲۰۶	۰/۱۱۳۸	۰/۹۵	۱/۴۸	۰/۶۶۲۲
0.4N35	۰/۹۳	۱۳	۲/۴۸۵۷	۰/۹۹	۵۴/۳۷	۱/۶۹۶۹	۰/۹۳	۳/۱۴	۰/۶۳۲۸
0.35N40	۰/۹۹	-۲/۵	۱/۹۲۸۶	۰/۹۸	۵۸/۶۲۸	۰/۳۵۴۳	۰/۹۴	۳/۶۶	۰/۱۹۷۱
0.35N35	۰/۹۹	-۳/۵	۲/۶۷۱	۰/۹۹	۶۳/۳۰۸	۰/۹۰۰۳	۰/۹۸	۲/۲۲	۰/۲۰۷۴

سنگ‌دانه‌ها در درصد درشت‌دانه ۴۰ درصد بیشتر از ۳۵ درصد بوده است. همچنین، جمع‌شدگی بتن‌های سبک با لیکا کاهش بیشتری را نسبت به بتن‌های سبک خودتراکم حاوی اسکوریا داشته‌اند. در تحقیقی مشابه نیز با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۵ به ۰/۳۷ جمع‌شدگی ۱۰۰ میکرو کرنش کاهش داشته است [۳۹].

در شکل ۱۴ تأثیر درصد درشت‌دانه بر جمع‌شدگی نشان داده شده است. کاهش درصد درشت‌دانه باعث افزایش جمع‌شدگی شده است. به نظر می‌رسد که درشت‌دانه‌ها در جلوگیری از انقباضات ملات نقش داشته و با کاهش آن‌ها جمع‌شدگی افزایش داشته است [۳۸]. تأثیر کاهش درصد درشت‌دانه بر افزایش جمع‌شدگی در بتن خودتراکم با سنگ‌دانه معمولی کمتر از بتن خودتراکم با سبک‌دانه بوده است. کاهش ۵ درصدی درشت‌دانه باعث افزایش جمع‌شدگی به میزان ۸ تا ۴۱ درصد در بتن‌های خودتراکم و ۳۷ تا ۸۳ درصد در بتن‌های سبک خودتراکم شده است. در بتن‌های سبک خودتراکم علت کاهش جمع‌شدگی با افزایش درصد درشت‌دانه سبک را میتوان به عمل‌آوری درونی نیز مرتبط دانست. هرچه درصد سبک‌دانه بیشتر شده آب بیشتری نیز به علت عمل‌آوری سبک‌دانه‌ها در اختیار بتن قرار گرفته و جمع‌شدگی کاهش یافته است. تأثیر کاهش درصد درشت‌دانه بر افزایش جمع‌شدگی در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ بیشتر از ۰/۴ بوده است. تأثیر درصد درشت‌دانه بر جمع‌شدگی بتن‌های سبک خودتراکم با لیکا و اسکوریا تقریباً یکسان بوده است. با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ به نظر می‌رسد که تأثیر درصد درشت‌دانه بر جمع‌شدگی از نسبت آب به سیمان کمتر بوده است.



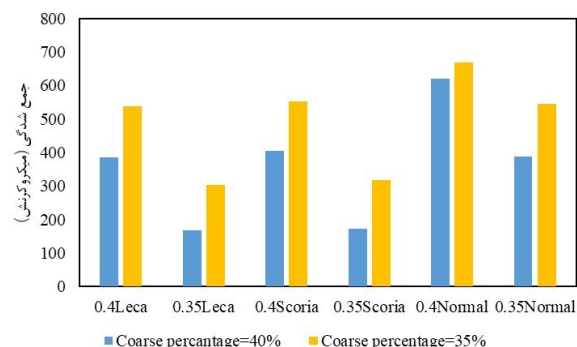
شکل ۱۴- تأثیر درصد درشت‌دانه بر جمع‌شدگی

رابطه مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته با جمع‌شدگی به ترتیب در شکل‌های ۱۵-الف و ۱۵-ب نشان داده شده است. همانگونه

به‌طور کلی، جایگزینی درشت‌دانه معمولی در بتن خودتراکم با سبک‌دانه باعث کاهش قابل ملاحظه جمع‌شدگی شده است. جایگزینی درشت‌دانه معمولی با اسکوریا و لیکا به ترتیب باعث کاهش ۱۸ تا ۵۵ درصدی و ۲۰ تا ۵۷ درصدی جمع‌شدگی شده است. سبک‌دانه‌ها به علت ساختار متخلخل خود قادرند آب را در حفرات حفظ کرده و با گذشت زمان در اختیار بتن قرار دهند [۷]. این فرایند که به عمل‌آوری درونی معروف است می‌تواند علت کاهش جمع‌شدگی در بتن‌های سبک خودتراکم نسبت به بتن خودتراکم باشد.

در هر دو نسبت آب به سیمان و درصد جایگزینی، بتن‌های خودتراکم ساخته شده با سبک‌دانه لیکا جمع‌شدگی کمتری نسبت به بتن‌های خودتراکم با سبک‌دانه اسکوریا داشته‌اند. وهابی و همکاران [۳۶] جمع‌شدگی بتن سبک خودتراکم با لیکا را ۴۰۰ میکرو کرنش و با اسکوریا را ۵۰۰ میکرو کرنش به دست آوردند و علت آن را جذب آب بیشتر این سبک‌دانه دانسته‌اند.

شکل ۱۳ تأثیر نسبت آب به سیمان را بر جمع‌شدگی طرح‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- تأثیر نسبت آب به سیمان بر جمع‌شدگی

کاهش نسبت آب به سیمان باعث کاهش جمع‌شدگی گشته است. علت امر این می‌تواند این باشد که با کاهش نسبت آب به سیمان ساختار متراکم‌تری تشکیل شده که منجر به کاهش جمع‌شدگی شده است [۳۷]. تأثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر کاهش جمع‌شدگی در نمونه‌های بتن سبک خودتراکم بیشتر از بتن خودتراکم بوده است. کاهش ۵ درصدی نسبت آب به سیمان باعث کاهش ۱۹ تا ۵۷ درصدی جمع‌شدگی در بتن‌های سبک خودتراکم و ۱۹ تا ۳۷ درصدی در بتن‌های خودتراکم شده است. تأثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر کاهش جمع‌شدگی در همه

این موضوع احتمالا می‌تواند به علت اثر مثبت درشت‌دانه‌ها در جلوگیری از انقباض خمیر سیمان باشد. مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن‌های سبک خودتراکم به علت کاهش درصد درشت‌دانه حدودا ۴ تا ۱۳ درصد رشد یافته در حالی که جمع‌شدگی آن‌ها ۳۷ تا ۸۳ درصد افزایش داشته است. در بتن‌های خودتراکم مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بین ۶ تا ۱۳ درصد و جمع‌شدگی ۸ تا ۴۱ افزایش یافته است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بتن‌های سبک خودتراکم با سبک‌دانه‌های لیکا و اسکوریا در دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ و دو درصد درشت‌دانه ۳۵ و ۴۰ درصد ساخته شده و مشخصات مکانیکی و جمع‌شدگی ۳۶۵ روزه آن‌ها بررسی شده است. نتیجه‌گیری زیر قابل ارائه می‌باشد:

۱- با استفاده از سبک‌دانه‌های لیکا و اسکوریا امکان ساخت بتن‌های سبک خودتراکم با مقاومت فشاری بیشتر از ۳۰ مگاپاسکال وجود دارد.

۲- نوع سبک‌دانه عامل مهمی در کارایی، مشخصات مکانیکی و جمع‌شدگی بتن‌های سبک خودتراکم است.

۳- کاهش نسبت آب به سیمان و کاهش درصد درشت‌دانه باعث بهبود مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن‌های سبک خودتراکم شده است.

۴- جمع‌شدگی بتن‌های سبک خودتراکم نسبت به بتن‌های خودتراکم به‌طور میانگین ۳۸ درصد کاهش یافته که می‌تواند به علت عمل‌آوری درونی سبک‌دانه‌ها باشد.

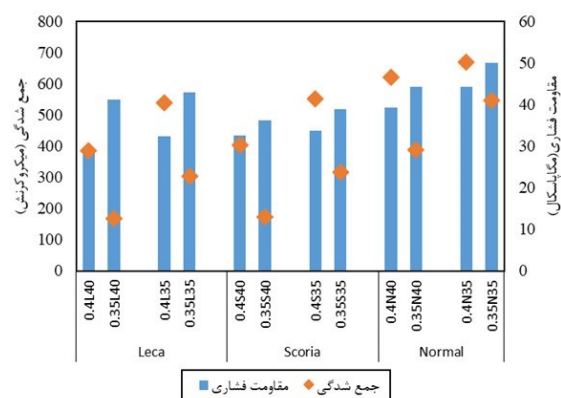
۵- کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴ به ۰/۳۵ منجر به کاهش ۵۰ درصدی جمع‌شدگی شده است. افزایش پنج درصدی درشت‌دانه نیز باعث کاهش ۳۶ درصدی جمع‌شدگی بتن‌های سبک خودتراکم شده است.

۶- بررسی نرخ رشد جمع‌شدگی حاکی از رخداد بیشتر از ۸۶ درصد کل جمع‌شدگی تا سن ۲۵۰ روز است.

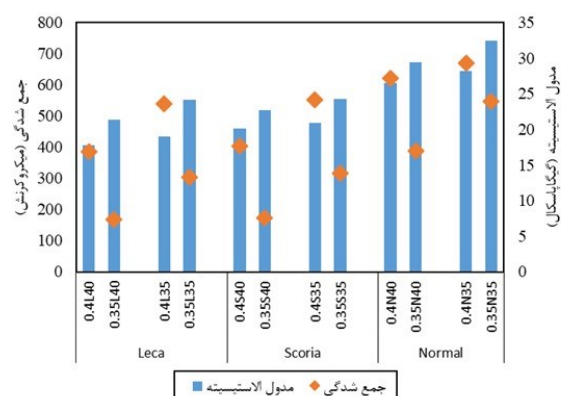
۷- منابع

[1] Hassoun, M. N., & Al-Manaseer, A. Structural concrete: theory and design. John wiley & sons. (2020).

که مشخص است، رابطه جمع‌شدگی با مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته مشابه است. در واقع، افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در طرح‌ها الزاما منجر به کاهش جمع‌شدگی نشده است. در صورتی که افزایش مقاومت فشاری یا مدول الاستیسیته به علت کاهش نسبت آب به سیمان باشد، جمع‌شدگی کاهش یافته است. با افزایش ۱۲ تا ۴۴ درصدی مقاومت فشاری و ۱۳ تا ۲۷ درصدی مدول الاستیسیته بتن‌های سبک خودتراکم به علت کاهش نسبت آب به سیمان، جمع‌شدگی ۴۳ تا ۵۷ درصد کم شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- رابطه جمع‌شدگی و مقاومت فشاری (الف) و مدول الاستیسیته (ب)

همچنین، در بتن‌های خودتراکم افزایش حدودا ۱۳ درصدی مقاومت فشاری و ۱۱ تا ۱۵ درصدی مدول الاستیسیته باعث کاهش ۱۹ تا ۳۷ درصدی جمع‌شدگی شده است. علت این امر می‌تواند این باشد که با کاهش نسبت آب به سیمان، آب در دسترس کاهش یافته و ساختار متراکم‌تری ایجاد شده که باعث کاهش جمع‌شدگی شده است. اگرچه، افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به علت ریزتر شدن بافت بتن منجر به افزایش جمع‌شدگی شده است.

- [12] ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement. American Society for Testing and Materials. (2022).
- [13] ASTM C136. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, American Society for Testing and Materials. (2019).
- [14] ASTM C127-24. Standard test method for Relative Density (Specific Gravity) and absorption of coarse aggregate, American Society for Testing and Material. (2024).
- [15] ASTM C128. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. American Society for Testing and Material. (2022).
- [16] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. <http://www.efnarc.org> (32 pp.). (2005).
- [17] ASTM C1611. Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. American Society for Testing and Materials. (2021).
- [18] ASTM C138. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. American Society for Testing and Materials. (2024).
- [19] BS-EN-12390-3. Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens. BSI. (2019).
- [20] ASTM C642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials. (2021).
- [21] ASTM C469. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson ratio of concrete in compression. ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. (2022).
- [22] Dolatabad, Y. A., Kamgar, R., & Tazangi, M. A. J. Effects of perlite, leca, and scoria as lightweight aggregates on properties of fresh and hard self-Compacting concretes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18(10), 633-647. (2020)
- [23] Wan, Dominic & Aslani, Farhad & Ma, Guowei. Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Perlite, Scoria, and Polystyrene Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002350. (2018).
- [24] Andiç-çakır, Ö., E. Yoğurtcu, Ş. Yazıcı, and K. Ramyar. Selfcompacting lightweight aggregate concrete: Design and experimental study. *Mag. Concr. Res.* 61 (7): 519–52. (2009).
- [25] European Standard (EN), Concrete, specification, performance, production and conformity, EN 206-1.(2021).
- [2] Tsintskaladze, Giorgi & Kordzakhia, Teimuraz & Skhvitaridze, Rajden & Sharashenidze, Tinatin & Zautashvili, Marine & Beridze, Giorgi.. Physical and Chemical Characteristics of Pumice from Some Regions of Georgia and the Prospects for its Use in Lightweight Concrete with Environmental Advantages. 10.1201/9781003397960-16. (2024).
- [3] Sousa, J.T.F.d.; Anjos, M.A.S.d.; Neto, J.A.d.S.; Farias, E.C.d.; Branco, F.G.; Maia Pederneiras, C. Self-Compacting Concrete with Artificial Lightweight Aggregates from Sugarcane Ash and Calcined Scheelite Mining Waste. *Appl. Sci.* 15, 452. (2025).
- [4] Maghfouri, M., et al. "Quality control of lightweight aggregate concrete based on initial and final water absorption tests." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 210. No. 1. IOP Publishing. (2017).
- [5] Maghfouri, Mehdi, et al. "Appropriate drying shrinkage prediction models for lightweight concrete containing coarse agro-waste aggregate." *Journal of Building Engineering* 29 (2020): 101148.
- [6] Vahabi, M. Y., Tahmouresi, B., Mosavi, H., & Fakhretaha Aval, S. Effect of pre-coating lightweight aggregates on the self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 23(4), 2120-2131. (2022).
- [7] Bentz, D. P., & Weiss, W. J. Internal curing: a 2010 state-of-the-art review (pp. 1-82). Gaithersburg: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. (2011).
- [8] Radlińska, A., Kaszyńska, M., Zieliński, A., & Ye, H. Early-age cracking of self-consolidating concrete with lightweight and normal aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018242. (2018).
- [9] Wendling, A., Sadhasivam, K., & Floyd, R. W. Creep and shrinkage of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. *Construction and Building Materials*, 167, 205-215. (2018).
- [10] Bymaster, J. C., Dang, C. N., Floyd, R. W., & Hale, W. M. Prestress losses in pretensioned concrete beams cast with lightweight self-consolidating concrete. In *Structures* (Vol. 2, pp. 50-57). (2015, June).
- [11] Chen, H. J., Wu, K. C., Tang, C. W., & Huang, C. H. Engineering properties of self-consolidating lightweight aggregate concrete and its application in prestressed concrete members. *Sustainability*, 10(1), 142. (2018).

- [26] American Concrete Institute (ACI), Building code requirements for structural concrete and commentary, An ACI standard.ACI318-19 (2019).
- [27] Floyd, R. W., Hale, W. M., & Bymaster, J. C. Effect of aggregate and cementitious material on properties of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. *Construction and Building Materials*, 85, 91-99. (2015).
- [28] Grabois, T. M., Cordeiro, G. C., & Toledo Filho, R. D. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 284-292. (2016).
- [29] Adhikary, S. K., Ashish, D. K., Sharma, H., Patel, J., Rudžionis, Ž., Al-Ajamee, M., ... & Khatib, J. M. Lightweight self-compacting concrete: A review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200107. (2022).
- [30] Kurt, M., Aydin, A. C., Gül, M. S., Gül, R., & Kotan, T. The effect of fly ash to self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Sadhana*, 40, 1343-1359. (2015).
- [31] Neville, A. Properties of concrete CTP-VVP. Malaysia. (2008).
- [32] Cui, H. Z., Lo, T. Y., & Xing, F. Properties of self-compacting lightweight concrete. *Materials Research Innovations*, 14(5), 392-396. (2010).
- [33] American Concrete Institute (ACI), Report on high- strength concrete, An ACI standard. (2010)
- [34] British Standard (BS), Structural use of concrete. Code of practice for design and construction, BS 8110- 97. (1997).
- [35] Nahhab, A. H., & Ketab, A. K. Influence of content and maximum size of light expanded clay aggregate on the fresh, strength, and durability properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with micro steel fibers. *Construction and Building Materials*, 233, 117922. (2020).
- [36] Vahabi, M. Y., Tahmouresi, B., Mosavi, H., & Fakhretaha Aval, S. (2022). Effect of pre-coating lightweight aggregates on the self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 23(4), 2120-2131.
- [37] J.A. Bogas, R. Nogueira, N.G. Almeida, Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete, *Mater. Des.* 56 1039–1048. (2014).
- [38] Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O. A., & Öz, H. Ö. Physico-mechanical properties of self-compacting concrete containing treated cold-bonded fly ash lightweight aggregates and SiO₂ nano-particles. *Construction and Building Materials*, 101, 1142-1153. (2015).

An investigation of the long-term shrinkage of self-compacted lightweight concretes with Scoria and Leca

Nikta Loghmani

PhD candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Islamic Republic of Iran.

Mahmoud Nili *

Associate professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Islamic Republic of Iran.

Abstract

One of the important features of self-compacted lightweight concrete is shrinkage, which affects durability and service life of the structures. In the present study, self-compacted lightweight concretes containing Scoria and Leca were produced with two water-cement ratios (0.35, 0.4) and two coarse percentages (35%, 40%). Workability, compressive strength and modulus of elasticity of the specimens were evaluated. Moreover, the long term shrinkage strain was monitored during one year. The results indicated that it is possible to produce self-compacted lightweight containing Scoria and Leca with proper workability, compressive strength and modulus of elasticity of more than 30 MPa and 17 GPa, respectively. Also, the shrinkage value of self-compacted lightweight concretes was 38% lower than those for self-compacted ones. Reducing the water to cement ratio and increasing coarse percentage resulted into 50% and 36% decreases in the shrinkage, in turn. Monitoring of the results revealed that 80% of the total shrinkage strain occurred until 250 days.

Keywords: Self-compacted lightweight concrete, long-term shrinkage, Leca, Scoria.

* Corresponding Author nili36@yahoo.co.uk & m-nili@basu.ac.ir

