تحقیقات بتن
سال هفدهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۱۴۰۳
ص ۵۹ – ۴۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

مقایسه تأثیر استفاده از ریزدانه‌های سبک با پلیمر فوق جاذب بر روی جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن بتن خودتراکم

عطاالله حاجتی مدارایی
استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
میلاد رجبی جورشری *
دانشجوی دکتری عمران، گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده
استفاده از عمل‌آوری درونی در بتن‌های خودتراکم به منظور رفع برخی مشکلات فنی مانند جمع‌شدگی ناشی از نسبت پایین آب به مواد سیمانی مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق تأثیر کاربرد درصدهای مختلف ریزدانه سبک بازیافتی از خرده بلوک های بتن هوادار اتوکلاو شده و لیکا بعنوان ماده عمل‌آوری درونی در بتن خودتراکم بررسی و با خصوصیات بتن خودتراکم حاوی پلیمر فوق جاذب مقایسه شده است. آزمایش های انجام شده شامل آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جمع‌شدگی آزاد و مقید ناشی از خشک شدن، سرعت عبور امواج مافوق صوت می باشد. استفاده از مواد عمل‌آوری درونی موجب افزایش مقاومت های فشاری و خمشی و همچنین سرعت عبور امواج مافوق صوت بتن‌های خودتراکم در معرض شرایط خشک شدن شده اند. جمع‌شدگی آزاد بتن خودتراکم حاوی ۰٫۱ درصد وزنی پلیمر فوق جاذب، بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی ریزدانه سبک بازیافتی و بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی لیکا نسبت به بتن شاهد بعد از ۱۸۰ روز خشک شدن در رطوبت نسبی ۵۰ درصد به ترتیب ۱۵ درصد، ۱۲ درصد و ۹ درصد کاهش یافته است. متوسط عرض ترک جمع‌شدگی مقید بتن خودتراکم حاوی ۰٫۱ درصد وزنی پلیمر فوق جاذب، بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی ریزدانه سبک بازیافتی و بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی لیکا نسبت به بتن شاهد در سن ۲۸ روز به ترتیب ۳۵ درصد، ۲۱ درصد و ۱۵ درصد کاهش یافته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد تأثیر پلیمر فوق جاذب بر کاهش جمع‌شدگی و عرض ترک خوردگی بتن خودتراکم بیشتر از ریزدانه‌های سبکدانه مورد بررسی است.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، عمل‌آوری داخلی، پلیمر فوق جاذب، ریزدانه سبک بازیافتی، سبکدانه لیکا.

* نویسنده مسئول: miladcivil.r84@gmail.com

۱- مقدمه

بتن خودتراکم به‌دلیل حجم خمیر بالاتر و نسبت پایین‌تر آب به مواد سیمانی دارای خطر جمع‌شدگی (انقباض) بیشتری در مقایسه با بتن معمولی است [۱]. استفاده از روش عمل‌آوری درونی برای رفع برخی از معایب بتن مورد توجه است [۱و۲]. مصالح عمل‌آوری درونی استفاده شده در بتن، شامل انواع مختلفی از مصالح مانند سبکدانه های طبیعی و مصنوعی، سنگ‌دانه‌های بازیافتی، مواد پودری مانند زئولیت، خاکسترپوسته شلتوک برنج و پلیمر فوق جاذب (SAP[1]) می باشند. این مواد با ذخیره سازی آب درون خود و رها سازی تدریجی آن در طی زمان مانع کاهش رطوبت حفرات منافذ درونی بتن شده و باعث تداوم عمل‌آوری می شوند [۱و۲و۳]. مواد SAP با قابلیت جذب آب بالا از مواد مناسب برای عمل‌آوری درونی می باشند. اما از اشکالات آنها هزینه بالای و عدم اتصال مناسب با بتن است. سبکدانه ها دارای اتصال مناسب تری با خمیر بتن در مقایسه با SAP هستند ولی قابلیت جذب آنها پایین‌تر است و برای دستیابی به مقدار مناسب آب عمل‌آوری درونی نیاز به استفاده از مقادیر بالاتر این مواد است که می‌تواند باعث کاهش قابل توجه خواص مکانیکی بتن گردد. همچنین سبکدانه ها بدلیل تنوع در ساختار می توانند دارای مقادیر جذب آب متفاوت با یکدیگر باشند. لذا تأثیر مواد عمل‌آوری مختلف بر خواص بتن به نوع، اندازه ذرات و مقدار استفاده وابسته است [۱و۲و۳و۴]. لذا بررسی تأثیر مواد عمل‌آوری درونی شامل سبک‌دانه های مختلف بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم و مقایسه آن با تأثیر ماده SAP می تواند منجر به انتخاب ماده عمل‌آوری درونی مناسب تر برای بتن خودتراکم گردد. لازم بذکر است روش های سنتی مانند کاربرد مواد انبساط زا و یا ماده کاهنده جمع‌شدگی در مقایسه با مواد عمل‌آوری درونی دارای هزینه بسیار بالاتر بوده و کاربرد آنها دارای پیچیدگی زیادی می باشد.

استفاده از مواد عمل‌آوری داخلی باعث افت خصوصیات مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری در شرایط عمل‌آوری استاندارد شده است. اما در شرایط قرارگیری در محیط بدون عمل‌آوری بیرونی باعث بهبود و افزایش مقاومت در مقایسه با مخلوط شاهد شده است. برای کاهش تأثیر منفی استفاده از مواد عمل‌آوری درونی بر روی خصوصیات مکانیکی بتن علاوه بر محدودسازی مقدار، استفاده از مواد عمل‌آوری با اندازه های ریزتر نیز پیشنهاد شده است [۳و۴].

مواد عمل‌آوری درونی باعث کاهش جمع‌شدگی خودبخودی بتن های با نسبت آب به سیمان پایین شده است[۱و۳]. اما در خصوص تأثیر مواد عمل‌آوری درونی مختلف بر روی جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک شدن اختلاف نظر وجود دارد. نتایج یانگ و همکاران [۵] نشان می دهد که انقباض خشک شدن آزاد بتن حاوی ۰/۶٪ وزنی سیمان ماده SAP در مخلوط تقریباً مشابه بتن شاهد شده است. نتایج تحقیق Soliman و Nehdi [۶] نیز نشان می‌دهد که استفاده از ماده SAP در بتن منجر به انقباض آزاد خشک شدن بیشتر در مقایسه با بتن شاهد شده است. اما نتایج تحقیق Tutkun و همکاران [۷]، نشان داده است که استفاده از SAP انقباض آزاد ناشی از خشک شدن بتن را تا ۹۰ روز کاهش می‌دهد. همچنین نتایج تحقیق Arayeshgar و همکاران [۸] نشان می دهد که استفاده از ماده عمل‌آوری درونی SAP و ریزدانه سبک بازیافتی بتن سبک هوادار باعث کاهش خطر جمع‌شدگی مقید بتن پرمقاومت شده است. مهمترین دلیل اختلاف در اثر مواد عمل‌آوری مورد بررسی بر روی جمع‌شدگی تفاوت در مقدار آب عمل‌آوری درونی و نرخ آزاد سازی رطوبت این مواد در بتن است. هردو این عوامل تحت تأثیر نوع، اندازه ذرات و مقدار استفاده ماده عمل‌آوری درونی است.

ماده عمل‌آوری داخلی لیکای درشت دانه باعث کاهش مقاومت فشاری تا ۱۸ درصد در تحقیق Famili و همکاران [۹] شده است. جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک شدن بتن خودتراکم حاوی ماده عمل‌آوری لیکای درشت دانه در مدت ۲۱ روز خشک شدن به میزان ۲۵ درصد کمتر از بتن شاهد بوده است. نتایج تحقیق Bymaster و همکاران [۱۰] نیز نشان می دهد استفاده از درشت دانه لیکا پیش مرطوب شده موجب کاهش جمع‌شدگی آزاد بتن خودتراکم شده است.

در تحقیق Rajamanickam و Vaiyapuri [۱۱] استفاده از ۵ درصد حجمی ریزدانه سبک لیکا باعث کاهش قطر پخش از ۷۰

[1] Superabsorbent polymers

سانتی متر به ۶۸ سانتیمتر و افزایش زمان پخش ۵۰ سانتیمتر از ۳/۱ ثانیه به ۳/۴ ثانیه شده است. اما افزایش مقدار ریزدانه سبک لیکا تا ۲۵ درصد حجمی باعث افزایش قطر پخش نهایی و کاهش مدت زمان پخش ۵۰ سانتیمتر شده است. مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته بتن با استفاده از ریزدانه سبک لیکا نسبت به بتن شاهد عمل‌آوری شده درون آب کاهش یافته است. نتایج Gopi و Revathi [۱۲] نشان می دهد که استفاده از ۱۵ درصد ریزدانه لیکا اشباع شده در بتن خودتراکم باعث بهبود مقاومت فشاری بتن خودتراکم عمل‌آوری شده درون آب شده است. نتایج تحقیق Madduru و همکاران [۱۳] نشانگر آن است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن خودتراکم حاوی ماده عمل‌آوری درونی پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰۰ مشابه با بتن خودتراکم بدون ماده عمل‌آوری درونی در شرایط عمل‌آوری درون آب است. اما مقاومت کششی و خمشی بتن خوتراکم با ماده عمل‌آوری درونی در شرایط عمل‌آوری درون آب نسبت به بتن خودتراکم شاهد کاهش یافته است. نتایج تحقیق Güneyisi و همکاران [۱۴] نشانگر آن است که جایگزینی ریزدانه خاکستربادی با ریزدانه طبیعی باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش نفوذپذیری ملات خودتراکم شده است. همچنین نتایج تحقیق Saravanan و همکاران [۱۵] نشان می دهد میزان جمع‌شدگی ۹۰ روزه بتن خودتراکم با جایگزینی ریزدانه معمولی با ریزدانه اسکوریا و خاکستربادی در حدود ۱۸ تا ۲۷ درصد کاهش پیدا کرده است.

با توجه به اختلاف در خصوص تأثیر مواد عمل‌آوری درونی بر روی مقاومت فشاری بتن خودتراکم در شرایط استاندارد و محدود بودن تحقیق های انجام شده در خصوص بتن خود تراکم، انجام تحقیق های بیشتر در این زمینه ضروری بنظر می رسد. لذا در تحقیق حاضر تأثیر استفاده از مواد عمل‌آوری درونی ریزدانه سبک بازیافتی از خرده بلوک های بتن هوادار اتوکلاو شده (RAAC[1]) و لیکا بر روی مقاومت های فشاری، خمشی و سرعت عبور امواج مافوق صوت بتن خودتراکم بررسی شده است. همچنین اثر استفاده از این سبکدانه ها با تأثیر ماده عمل‌آوری شیمیایی SAP بر روی این خواص بتن خودتراکم مقایسه شده است. برای این منظور آزمایش های مقاومت فشاری، خمشی و سرعت عبور امواج مافوق صوت بتن خودتراکم بر روی آزمونه های بتن قرار گرفته درون آب آهک اشباع و آزمونه های قرار گرفته در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد صورت گرفته است. همچنین آزمایش های جمع‌شدگی آزاد و مقید بتن خودتراکم به منظور مقایسه تأثیر مواد عمل‌آوری درونی مختلف با یکدیگر انجام شده است.

۲- معرفی مصالح مصرفی و آزمایش های مد نظر جهت پردازش

در این تحقیق از سیمان نوع ۱ کارخانه سیمان سپاهان استفاده شده است. آنالیز شیمیایی سیمان انجام شده در آزمایشگاه در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیبات اصلی سیمان شامل ۲۴٪ C_2S[2]، ۵۲٪ C_3S[3]، ۹٫۵٪ C_3A[4] و ۹٪ C_4AF[5] است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان

ترکیب	درصد
SiO_2	۲۲/۰
Al_2O_3	۵/۵
Fe_2O_3	۲/۹
CaO	۶۴/۳
MgO	۲/۱
SO_3	۲/۰
Na_2O	۰/۷
K_2O	۰/۳

همچنین سطح ویژه سیمان برابر با ۲۸۶۰ سانتیمتر مربع بر گرم و مقاومت فشاری ملات استاندارد آن ۳۸۹ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بوده است. مقایسه نتایج آنالیز شیمیایی، مقاومت فشاری، سطح ویژه و زمان گیرش با الزامات استاندارد ملی ایران ۳۸۹ نشان می دهد که سیمان مورد استفاده مطابق با الزامات استاندارد سیمان نوع ۱ است.

از فوق روان کننده ی نسل جدید بر پایه تکنولوژی پلی کربوکسیلات اتر تولیدی شرکت شیمی ساختمان با نام تجاری P10N و آب شرب شهر رشت در ساخت مخلوط ها استفاده شده

[1] lightweight fine aggregate recycled from autoclaved aerated concrete block debris
[2] Dicalcium Silicate
[3] Tricalcium Silicate
[4] Tricalcium Aluminate
[5] Calcium Aluminoferrite

است. ریزدانه و درشت دانه معمولی از کارخانه لوله سازی شمال تهیه شده‌است. مصالح ریزدانه (ماسه)، از نوع طبیعی با جرم حجمی اشباع با سطح خشک gr/cm^3 ۲/۶۱ و درصد جذب آب ۳/۱۳ درصد طبق روش استاندارد ASTM C128 و درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ برابر با ۱/۱۴ درصد طبق روش استاندارد ASTM C117 و مصالح سنگی درشت دانه با اندازه حداکثر اسمی ۱۲/۵ میلی متر از نوع شکسته با جرم حجمی اشباع با سطح خشک gr/cm^3 ۲/۶۵ و درصد جذب آب ۱/۷۴ درصد طبق روش استاندارد ASTM C127 و درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ برابر با ۰/۱۶ درصد طبق روش استاندارد ASTM C117 هستند. دانه بندی نمونه های ماسه و شن مورد استفاده مطابق با الزامات استاندارد ملی ایران ۳۰۲ بوده است. محدوده اندازه ذرات ریزدانه RAAC و لیکا بین ۱/۱۸ تا ۰/۰۷۵ میلی متر و جرم حجمی اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر با ۰/۸۳۶ و ۰/۸۰۲ gr/cm^3 طبق روش استاندارد ASTM C128 بوده است. لازم بذکر است که بخش های ریزتر از ۰،۰۷۵ بدلیل قرار گیری در محدوده پودری و نبود حفرات قابل توجه برای ذخیره‌سازی آب حذف شده اند. در این پژوه از SAP بر پایه پلی اکرلیک با نام تجاری TAISAP با اندازه ذرات بین ۰/۳ تا ۰/۰۷۵ میلی متر استفاده شده است.

یکی از نکات مهم در خصوص استفاده از مواد عمل‌آوری درونی در بتن، تعیین مقدار آب آزاد شده در مخلوط سیمانی است. با توجه به تنوع مواد عمل‌آوری درونی روش های متعددی برای تعیین مقدار آب آزاد شده در مخلوط سیمانی پیشنهاد شده است. مقدار آب عمل‌آوری درونی آزاد شده ریزدانه‌های سبک در مخلوط سیمانی با توجه به درصد جذب آب تعیین شده در روش استاندارد آزمایش ASTM C1761 تعیین می شود. در این روش استاندارد اختلاف بین جرم ریزدانه در وضعیت اشباع با سطح خشک (آزمونه هاییکه از درون آب بیرون آورده شده و رطوبت سطحی آنها با دستمال کاغذی خشک شده است) با جرم به ثبات رسیده در رطوبت نسبی ۹۴ درصد بعنوان میزان آبی که توسط ریزدانه سبکدانه در مخلوط آزاد می شود تعیین می شود. برای ایجاد محیط با رطوبت نسبی ۹۴ درصد از دستگاه با قابلیت تنظیم دما و رطوبت استفاده شده است. نتایج آزمایش درصد جذب آب اشباع با سطح خشک ریزدانه RAAC و لیکا طبق روش استاندارد آزمایش ASTM C1761 به ترتیب برابر با ۱۹/۳ و ۲۲/۴ درصد است. همچنین درصد آب آزاد شده در رطوبت نسبی ۹۴ درصد ریزدانه RAAC و لیکا برابر با ۶۶/۳ و ۵۴/۸ درصد است.

در تحقیق های قبلی برای تعیین جذب و واجذب ماده SAP از روش های مختلفی مانند غوطه وری درون آب، مخلوط آب و سیمان با غلظت های مختلف و ... استفاده شده است [۵و۷و۱۶و۱۷و۱۸و۱۹]. در این تحقیق از روش مطرح شده در تحقیق Huang و همکاران [۱۶] و Lothenbach و همکاران [۱۷] استفاده شده است. با استفاده از روش چای کیسه ای[1] میزان آب عمل‌آوری درونی تامین شده توسط ماده SAP تعیین شده است. ابتدا SAP درون کیسه های چای ریخته شده و سپس درون آب به مدت ۷۲ قرا داده شده است. بعد از این مدت زمان، کیسه از درون آب بیرون آورده شده و بعد از خشک کردن آب اضافی روی کیسه، جرم آن تعیین شده است. سپس کیسه حاوی SAP اشباع شده درون محلول محلول ۰/۷ مول در لیتر کلرید سدیم قرار گرفته و جرم آن بعد از ۷۲ ساعت مجددا اندازه گیری شده است. میزان کاهش جرم اندازه گیری شده نشانگر مقدار آب عمل‌آوری درونی آزاد شده در مخلوط سیمانی است. میزان جذب آب ماده SAP مورد استفاده ۶۵/۳ برابر جرم خشک آن و کاهش جرم آن در محلول ۰/۷ مول در لیتر کلرید سدیم، ۵۰/۲ درصد جرم اشباع SAP می باشد. با توجه به اینکه غلظت محلول حفره ای در منافذ خمیر سیمان قبل از گیرش سیمان در حدود ۰،۷ مول در لیتر باقی می ماند، لذا از محلول ۰،۷ مول در لیتر کلرید سدیم، برای شبیه سازی محیط مخلوط سیمان و تعیین واجذب SAP استفاده شده است [۱۶و۱۷].

۲-۱- مخلوط های بتن

مخلوط های بتنی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و عیار سیمان $500 kg/m^3$ ساخته شده اند. لازم بذکر است عیار سیمان در مخلوط های بتن خودتراکم بدون مواد افزودنی معدنی مانند دوده سیلیسی عرضه شده توسط کارخانه های بتن آماده در سطح شهر

[1] Tea bag

تهران در محدوده ۴۵۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب است. طرح اختلاط های مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است. علاوه بر مخلوط شاهد طرح های ساخته شده شامل مخلوط حاوی ۰/۱ درصد وزنی سیمان ماده SAP (با کد S)، دو مخلوط با جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی ریزدانه طبیعی با ریزدانه RAAC (با کد R) و دو مخلوط با جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد حجمی ریزدانه طبیعی با ریزدانه لیکا (با کد L) است. قبل از ساخت مخلوط، مواد عمل‌آوری درونی شامل ریزدانه RAAC، لیکا و SAP درون آب به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شده است. جهت یکنواخت شدن رطوبت موجود در مواد عمل‌آوری درونی قبل از ساخت به مدت ۳ ساعت بر روی زهکش قرار داده شده و چند بار در این مدت هر ماده بر روی زهکش جابجا شده است. سپس طبق استاندارد ASTM C192 رطوبت موجود مصالح سنگی قبل از ساخت بتن تعیین شده و درصورت نیاز، اصلاحات رطوبتی جهت حفظ نسبت آب آزاد به سیمان مخلوط ها انجام شده است. رطوبت مصالح موجود مصالح با استفاده از رطوبت سنج پرتابل اندازه‌گیری شده است. لازم بذکر است نتایج دستگاه با روش استاندارد کالیبره شده است.

مقدار کاربرد مواد عمل‌آوری درونی در بتن خودتراکم بدلیل تأثیر آنها بر روی خواص بتن تازه محدود می باشد. کاربرد مقادیر زیاد این مواد باعث جداشدگی بتن خودتراکم می شود. لذا در انتخاب مقادیر مواد مختلف عمل‌آوری درونی با توجه به نتایج تحقیقات قبلی سعی شده است که در کنار توجه به برآورده شدن الزامات بتن خودتراکم، میزان آب عمل‌آوری درونی تخمینی ماده SAP، نزدیک به مقادیر آب عمل‌آوری درونی ریزدانه‌های سبک مورد بررسی، نزدیک باشد.

بعد از ساخت بتن آزمونه های مورد نظر طبق استاندارد ASTM C192 قالبگیری شده و در محیط با رطوبت نسبی بالای ۹۵ درصد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شده اند. بعد از ۲۴ ساعت آزمونه ها از قالب خارج شده و تحت دو عمل‌آوری مختلف قرار گرفته اند. در شرایط عمل‌آوری بیرونی، آزمونه ها تا سنین ۲۸ و ۹۰ روز درون آب آهک اشباع قرار گرفته اند. در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی، آزمونه ها بعد از بیرون آوردن از قالب درون محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد تا سنین ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری شده اند. جهت ایجاد محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای محیط از کابینت مخصوص استفاده شده است. این کابینت قابلیت تنظیم دما و رطوبت نسبی محیط را دارد.

جدول ۲- اجزای مخلوط بتن های خودتراکم مورد بررسی

نام مخلوط	سیمان (kgf/m^3)	مصالح سنگی در وضعیت اشباع با سطح خشک (kgf/m^3)				SAP (kgf/m^3)	نسبت وزنی فوق روانساز (درصد)	آب آزاد (kgf/m^3)	آب عمل‌آوری درونی (kgf/m^3)
		ریزدانه معمولی	درشت دانه معمولی	RAAC	ریزدانه لیکا				
Ref	۵۰۰/۰	۹۸۸/۰	۶۶۹/۰	–	–	–	۱/۱۹	۲۰۰/۰	–
0.1SAP	۵۰۰/۰	۹۷۶/۰	۶۵۱/۰	–	–	۰/۵	۱/۱۹	۲۰۰/۰	۱۶/۰
15R	۵۰۰/۰	۸۴۰/۰	۶۶۹/۰	۴۷/۰	–	–	۱/۱۹	۲۰۰/۰	۷/۳
30R	۵۰۰/۰	۶۹۱/۰	۶۶۹/۰	۹۵/۰	–	–	۱/۱۹	۲۰۰/۰	۱۴/۵
15L	۵۰۰/۰	۸۴۰/۰	۶۶۹/۰	–	۴۶/۰	–	۱/۱۹	۲۰۰/۰	۷/۰
30L	۵۰۰/۰	۶۹۱/۰	۶۶۹/۰	–	۹۱/۰	–	۱/۱۹	۲۰۰/۰	۱۳/۹

۲-۲- آزمایش های مورد نظر جهت پردازش

در این تحقیق، آزمایش های بتن تازه خودتراکم، شامل قطر پخش نهایی و زمان رسیدن به قطر پخش ۵۰ سانتیمتر طبق روش استاندارد ASTM C1611 انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری، طبق استاندارد BS EN 12390 Part 3 در سنین ۲۸ و ۹۰ روز برای هر دو حالت مختلف عمل‌آوری، بر روی ۳ آزمونه مکعبی با ابعاد ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی متر و آزمایش مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C78 در سن ۲۸ روز برای هر دو حالت

مختلف عمل‌آوری، بر روی ۳ آزمونه با ابعاد ۱۰*۱۰*۵۰ سانتی متر و آزمایش تعیین سرعت عبور امواج مافوق صوت طبق استاندارد ASTM C597-16 در سنین ۲۸ و ۹۰ روز برای هر دو حالت مختلف عمل‌آوری، بر روی سه آزمونه مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی متر انجام شده اند.

جهت تعیین میزان جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک‌شدن، آزمایش تغییر طول بتن مطابق با استاندارد ASTM C157 بر روی ۳ آزمونه با ابعاد ۲۸۵×۷۵×۷۵ میلی‌متر انجام شده اند. پس از بیرون آوردن آزمونه از درون قالب، قرائت طول اولیه آزمونه‌ها بعد از باز کردن قالب، توسط دستگاه کامپراتور (شکل ۲) با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر انجام شد. آزمونه ها در درون آب آهک اشباع به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شد. بعد از ۲۸ روز آزمونه‌ها به محفظه‌ای با دمای ۲±۲۳ °C و رطوبت نسبی ۵±۵۰ (شکل (۱)) درصد منتقل شده و به مدت ۱۸۰ روز در این شرایط نگهداری و در فواصل زمانی ۲ هفته ای طول آزمونه ها اندازه گیری شده است.

(الف) (ب)

شکل ۱- (الف)کابینت نگهداری آزمونه‌های جمع‌شدگی آزاد، (ب)دستگاه کامپراتور و آزمونه‌ی اندازه گیری

آزمایش جمع‌شدگی مقید طبق استاندارد ASTM C1581 بر روی ۲ آزمونه انجام شده است. در این آزمایش آزمونه ها بعد از یک روز عمل‌آوری در رطوبت نسبی بالای ۹۵ درصد، در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد تا سن ۲۸ روز قرار داده شده اند. برای اندازه گیری متوسط عرض بازشدگی ترک در آزمایش جمع‌شدگی مقید از دستگاه کرک اسکوپ استفاده شده است. در راستای طول ترک در فواصل ۱ سانتیمتر عرض نمونه با دقت ۰/۰۵ میلی متر اندازه گیری و سپس متوسط عرض ترک هر نمونه محاسبه شده است.

۳- انجام آزمایش های مورد نظر و نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش خواص بتن خودتراکم تازه

با توجه به ثابت بودن مقدار فوق روانساز و نسبت آب به سیمان تغییر حداکثر قطر پخش و مدت زمان رسیدن به قطر پخش ۵۰ سانتیمتر (T50) فقط مربوط به تأثیر مواد عمل‌آوری درونی بر روی خصوصیات بتن تازه خودتراکم می باشد. در جدول (۳) نتایج حداکثر قطر پخش و زمان T50 مخلوط های مورد بررسی ارائه شده است. در شکل (۲) حداکثر پخش بتن خودتراکم مخلوط شاهد نشان داده شده است.

جدول ۳- حداکثر قطر پخش و T50 مخلوط های مورد بررسی

کدشناسایی	حداکثر قطر پخش (mm)	T50 (ثانیه)	شاخص پایداری ظاهری (VSI[1])
Ref	۶۳۰	۲,۱۱	۰
0.1SAP	۶۳۳	۲,۰۶	۰
15R	۶۱۵	۲,۱۲	۰
30R	۵۹۲	۲,۲۱	۱
15L	۶۲۰	۲,۱۱	۰
30L	۶۰۱	۲,۱۸	۱

شکل ۲- آزمایش جریان اسلامپ بتن خودتراکم

کاربرد مواد عمل‌آوری درونی مورد بررسی تأثیر زیادی بر روی حداکثر قطر پخش و زمان T50 بتن خودتراکم نداشته است. حداکثر کاهش قطر پخش در حدود ۶ درصد و حداکثر افزایش زمان T50 در حدود ۴ درصد است. استفاده از SAP تأثیر

[1] Visual Stability Index

محسوسی بر روی قطر پخش و زمان T50 نداشته است. ریزدانه سبک لیکا بدلیل سطح صاف تر ذرات در مقایسه با ریزدانه RAAC، تأثیر بهتری بر روی خصوصیات بتن تازه خودتراکم داشته است. جایگزینی ۱۵ درصد حجمی ریزدانه طبیعی با ریزدانه‌های سبک باعث کاهش حداکثر قطر پخش و افزایش زمان T50 شده است. افزایش جایگزینی به ۳۰ درصد حجمی موجب کاهش بیشتر حداکثر قطر پخش و افزایش بیشتر زمان T50 شده است. در تحقیق Rajamanickam و Vaiyapuri [۱۱] تا ۱۵ درصد جایگزینی لیکا باعث افزایش کم حداکثر قطر پخش و افزایش مقدار جایگزنی لیکا تا ۲۵ درصد باعث کاهش حداکثر قطر پخش و کمتر شدن آن از مخلوط شاهد شده است. اما نتایج تحقیق های Kamal و همکاران [۲۰] و Madduru و همکاران [۱۳] و Gopi و Revathi [۱۲] نشانگر کاهش حداکثر قطر پخش بتن خودتراکم با استفاده از سبکدانه لیکا است. لازم بذکر است که در تحقیق های منتشر شده قبلی بر روی بتن های با نسبت آب به مواد سیمانی کم نیز استفاده از SAP پیش مرطوب سازی شده باعث افزایش کم کارآیی بتن شده [۱۶] ولی استفاده از ریزدانه‌های سبک باعث کاهش کارآیی بتن شده است [۲۱و۲۲و۲۳].

نکته قابل توجه آن است که استفاده از ۳۰ درصد حجمی ریزدانه‌های سبک بدلیل تغییر دانه بندی باعث کاهش شاخص پایداری و مشاهده جداشدگی در مخلوط بتن خودتراکم شده است. علیرغم آنکه مقدار آب عمل‌آوری درونی مورد نیاز برای این بتن خودتراکم در حدود ۳۰ لیتر در مترمکعب تخمین زده می شود ولی امکان تامین این مقدار آب عمل‌آوری درونی با ریزدانه‌های سبک مورد بررسی بدلیل برآورده نشدن الزامات بتن خودتراکم میسر نمی باشد.

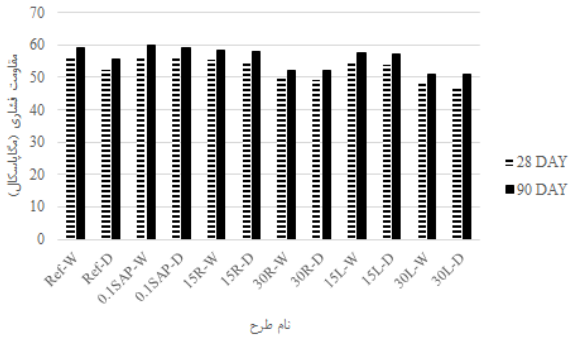
۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط های مورد مطالعه در شکل (۳) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ارائه شده اند. نتایج آزمونه های عمل‌آوری بیرونی (عمل‌آوری شده درون آب آهک) تا سنین مورد نظر با کد W و آزمونه های بدون عمل‌آوری بیرونی (قرار گرفته در شرایط رطوبت نسبی ۵۰ درصد) با کد D نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند، قرار گیری در رطوبت نسبی ۵۰ درصد در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب موجب کاهش ۷ و ۶ درصدی مقاومت فشاری بتن خودتراکم نسبت به شرایط عمل‌آوری استاندارد شده است. دلیل کاهش مقاومت مربوط به ایجاد ریزترک ناشی از قید سنگ‌دانه در اثر جمع‌شدگی می باشد [۲۴]. علاوه بر آن کاهش رطوبت درون آزمونه های بتن باعث کاهش واکنش های هیدراته شدن و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری می شود [۲و۲۴].

استفاده از SAP در شرایط عمل‌آوری استاندارد تأثیر محسوسی بر روی مقاومت فشاری نداشته است. زیرا هرچند عمل‌آوری درونی باعث انجام بیشتر واکنش‌های درون بتن می شود ولی تخلخل ناشی از کاربرد پلیمر جاذب این تأثیر را خنثی می کند. اما استفاده از SAP باعث ۶ درصد افزایش مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه نسبت به بتن شاهد در شرایط محیطی با رطوبت نسبی ۵۰ درصد شده است. جایگزینی ۱۵درصد حجمی ریزدانه با ریزدانه‌های سبکدانه باعث کاهش مقاومت فشاری در شرایط با عمل‌آوری بیرونی شده است. استفاده از ۳۰ درصد حجمی مواد عمل‌آوری داخلی ریزدانه بازیافتی و لیکا در سن ۲۸ روز در شرایط با عمل‌آوری بیرونی به ترتیب باعث کاهش ۱۲/۵ و ۱۵/۵ درصد کاهش مقاومت فشاری شده است. در سن ۹۰ روز کاهش مقاومت فشاری این مخلوط ها نسبت به مخلوط شاهد در حدود یک تا ۲ درصد کمتر می شود. دلیل این موضوع کاهش ذرات واکنش نداده سیمان در مخلوط حاوی ماده عمل‌آوری درونی می باشد. در بتن های با نسبت آب به سیمان پایین بدلیل عدم نفوذ آب عمل‌آوری بیرونی به داخل بتن در سنین بالا، بخشی از ذریات سیمان بصورت واکنش نداده در مخلوط باقی می ماند [۲و۳]. اما در مخلوط های حاوی ماده عمل‌آوری درونی شرایط برای انجام واکنش این ذرات سیمان فراهم است. لذا میزان افزایش مقاومت از سن ۲۸ روز به ۹۰ روز برای مخلوط حاوی ماده عمل‌آوری درونی نسبت به مخلوط شاهد کمی بیشتر است.

استفاده از ۱۵ درصد حجمی مواد عمل‌آوری درونی ریزدانه بازیافتی و لیکا در سن ۲۸ روز در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی به ترتیب باعث افزایش حدود ۵ و ۳ درصد مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز نسبت به مقاومت فشاری مخلوط شاهد شده است. زیرا وجود ماده عمل‌آوری ریزدانه بازیافتی و یا لیکا مانع کاهش رطوبت درونی بتن شده و باعث انجام بیشتر واکنش های هیداراته

شدن نسبت به مخلوط شاهد می شود. اما در سن ۹۰ روز افزایش مقاومت طرح های حاوی مواد عمل‌آوری درونی در شرایط بدون عمل‌آوری نسبت به مقاومت فشاری طرح شاهد کاهش یافته است. زیرا در سن ۹۰ روز رطوبت بیشتری از مخلوط بتن خارج شده و با توجه به اینکه مقدار آب عمل‌آوری درونی تامین شده توسط این مواد کمتر از مقادیر مورد نیاز است، لذا میزان پیشرفت واکنش های هیدراته شدن و جلوگیری از ایجاد ریزترک ها ناشی از قید سنگ‌دانه ها کمتر شده است [۲و۲۴و۲۵]. لذا نتایج نشان می دهد که علیرغم تأثیر مثبت عمل‌آوری درونی سبکدانه بازیافتی و لیکا بر روی مقاومت فشاری در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی، کاربرد این مواد نمی تواند کاهش مقاومت بتن خودتراکم بدلیل عمل‌آوری غیر مطلوب را مرتفع سازد.

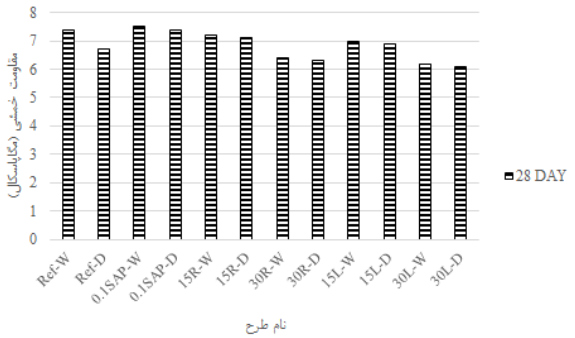


شکل ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شرایط درون آب و رطوبت نسبی ۵۰ درصد

مشابه نتایج تحقیق حاضر در تحقیق Gopi و Revathi [۱۲] نشان داده شده است که کاربرد ۱۵ درصد لیکا باعث بهبود مقاومت فشاری نسبت به شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی شده است اما کماکان مقاومت فشاری بتن خودتراکم دارای ماده عمل‌آوری درونی کمتر از مخلوط شاهد عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد است. همچنین نتایج تحقیق Rajamanickam و Vaiyapuri [۱۱] نشان می دهد که افزایش مقدار جایگزینی لیکا بین ۱۵ تا ۲۵ درصد، باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خودتراکم در شرایط با عمل‌آوری بیرونی در مقایسه با مخلوط شاهد شده است. لازم بذکر است نتایج تحقیق های منتشر شده در خصوص تأثیر مواد عمل‌آوری SAP، سبکدانه بازیافتی و لیکا در بتن های با نسبت آب به مواد سیمانی پایین نشان می دهد که مشابه نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر، مقاومت فشاری بتن در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی با استفاده مواد عمل‌آوری درونی بهبود یافته است اما استفاده از این مواد نتوانسته است نیاز به عمل‌آوری بیرونی را حذف کند [۱۶و۲۳و۲۵و۲۷و۲۸].

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی مخلوط های مورد مطالعه در شکل (۴) در سن ۲۸ روز ارائه شده است. مقاومت خمشی بتن شاهد بدون عمل‌آوری بیرونی در حدود ۱۰ درصد کمتر از مقاومت خمشی با عمل‌آوری بیرونی است. زیرا بدلیل شرایط بارگذاری تأثیر ریزترک های ایجاد شده ناشی از جمع‌شدگی بر روی مقاومت خمشی بیشتر از مقاومت فشاری است [۲۹]. کاربرد مواد عمل‌آوری درونی باعث شده است که مقاومت خمشی بتن خودتراکم در شرایط قرار گیری در رطوبت نسبی ۵۰ درصد بهبود یابد و برخلاف مقاومت فشاری تقریبا برابر با مقاومت خمشی این مخلوط ها در شرایط عمل‌آوری استاندارد برابر شود. لازم بذکر است که استفاده از مواد عمل‌آوری درونی در شرایط عمل‌آوری استاندارد باعث کاهش جزئی مقاومت خمشی در مقایسه با بتن خودتراکم بدون این مواد شده است.



شکل ۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی در شرایط درون آب و رطوبت نسبی ۵۰ درصد

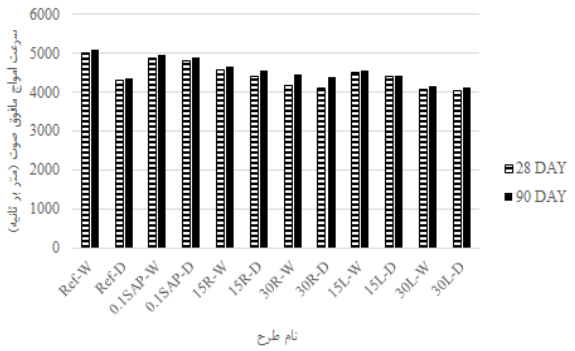
استفاده از ماده عمل‌آوری درونی SAP در بتن خودتراکم در شرایط عمل‌آوری بیرونی تأثیر محسوسی بر روی مقاومت خمشی نداشته است. بنظر می رسد که اثر ایجاد تخلخل ناشی از کاربرد SAP با تأثیر این ماده بر روی انجام واکنش های بیشتر سیمان و همچنین کاهش ریزترک های ناشی از خودجمع شوندگی بتن خنثی شده است. استفاده از SAP در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی باعث ۱۰ درصد افزایش مقاومت خمشی نسبت به مقاومت

خمشی مخلوط شاهد شده است. مقاومت خمشی بتن خودتراکم حاوی ۱۵ درصد ریزدانه بازیافتی و لیکا بدون عمل‌آوری بیرونی به ترتیب حدود ۶٪ و ۳٪ بیشتر از مخلوط شاهد در این وضعیت است. دلیل تأثیر کمتر این دو ماده عمل‌آوری درونی نسبت به ماده SAP آن است که میزان آب عمل‌آوری درونی تامین شده توسط این دو ماده جدول (۲) کمتر است. نتایج تحقیق Kamal و همکاران [۲۰] نشان می دهد که مقاومت خمشی بتن خودتراکم حاوی سبکدانه لیکا در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی و بدون تبادل رطوبت با محیط از بتن خودتراکم شاهد در این شرایط کمتر است.

نتایج تحقیق Rajamanickam و Vaiyapuri [۱۱] نشان می دهد که افزایش مقدار لیکا تا ۱۵ درصد باعث افزایش مقاومت خمشی در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی و بدون تبادل رطوبت با محیط در مقایسه با مخلوط شاهد در شرایط مشابه شده و افزایش بین ۱۵ درصد تا ۲۵ درصد، باعث کاهش مقاومت خمشی بتن شده است. روند تغییرات مقاومت خمشی بدست آمده در تحقیق حاضر بصورت کلی انطباق خوبی با نتایج تحقیق Rajamanickam و Vaiyapuri [۱۱] دارد.

۳-٤- نتایج آزمایش تعیین سرعت عبور امواج مافوق صوت

در شکل (۵) نتایج سرعت عبور امواج مافوق صوت در بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در شرایط درون آب و رطوبت نسبی ۵۰ درصد ارائه شده اند. این آزمایش به منظور ارزیابی روند نسبی ایجاد ریزترک ها و تخلخل های درون بتن استفاده شده است. سرعت عبور امواج مافوق صوت بتن خودتراکم عمل‌آوری شده در شرایط با عمل‌آوری بیرونی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۴۹۹۴ و ۵۰۸۹ متر بر ثانیه است. در سن ۹۰ روز بدلیل پیشرفت واکنش های سیمان و تکمیل ساختار آن، تخلخل داخلی کاهش پیدا کرده و لذا سرعت عبور امواج مافوق صوت افزایش کمی داشته است. اما برای نمونه های در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد، سرعت عبور امواج مافوق صوت در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۴۲۹۴ و ۴۳۵۰ متر بر ثانیه است. همانطور که مشاهده می شود، قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد، باعث ایجاد ریزترک های بیشتری در آزمونه بتن شده و لذا سرعت عبور امواج مافوق صوت در حدود ۹ درصد کاهش داشته است. همانطور که مشاهده می شود افزایش سرعت عبور امواج از سن ۲۸ به ۹۰ روز در شرایط بدون عمل‌آوری کمتر از شرایط با عمل‌آوری بیرونی است. استفاده از مواد عمل‌آوری درونی باعث ایجاد تخلخل در بتن می شود. لذا سرعت عبور امواج مافوق صوت در این شرایط کاهش می یابد. سرعت عبور امواج مافوق صوت آزمونه های SAP بدلیل میزان آب عمل‌آوری درونی بیشتر کمی بیشتر، از سرعت عبور امواج مافوق صوت مخلوط های حاوی ریزدانه بازیافتی و لیکا است.



شکل ۵- نتایج آزمایش تعیین سرعت عبور امواج مافوق صوت در شرایط درون آب و رطوبت نسبی ۵۰ درصد

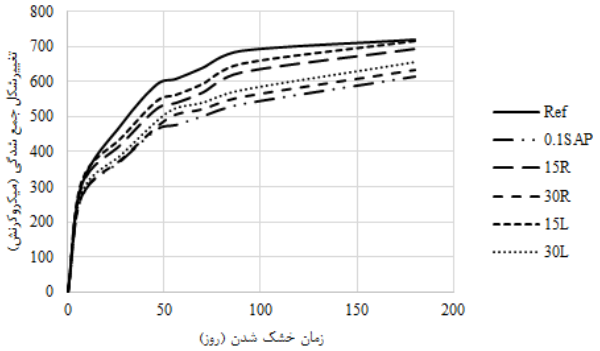
مشابه نتایج مقاومت فشاری و خمشی، نتایج سرعت عبور امواج مافوق صوت آزمونه ها در محیط با رطوبت ۵۰ درصد کمتر از آزمونه های با عمل‌آوری بیرونی است. اما تغییر سرعت عبور امواج مافوق صوت بدلیل تفاوت در شرایط نگهداری آزمونه ها بیشتر از تغییرات مقاومت فشاری و خمشی است. مقاومت فشاری و خمشی ۲۸ روزه مخلوط شاهد در محیط با رطوبت ۵۰ درصد نسبت مخلوط شاهد با عمل‌آوری بیرونی به ترتیب حدود ۷ و ۱۰ درصد کمتر است. اما سرعت عبور امواج مافوق صوت مخلوط شاهد در محیط با رطوبت ۵۰ درصد نسبت مخلوط شاهد با عمل‌آوری بیرونی در حدود ۱۵ درصد کمتر است. مشابه روند مشاهده شده در خصوص نتایج مقاومت فشاری و خمشی، استفاده از مواد عمل‌آوری درونی باعث کاهش تغییرات سرعت عبور امواج مافوق صوت آزمونه های حاوی مواد عمل‌آوری درونی در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد نسبت به آزمونه های دارای عمل‌آوری بیرونی شده است. لازم بذکر است بصورت کلی با افزایش مقاومت فشاری و خمشی سرعت عبور امواج مافوق صوت افزایش یافته

است.

همانطور که نتایج نشان می دهند هرچند استفاده از مواد عمل‌آوری درونی باعث شده است که افت سرعت عبور امواج مافوق صوت برای آزمونه های بدون عمل‌آوری نسبت به شرایط با عمل‌آوری بیرونی کمتر باشد، اما کماکان سرعت عبور امواج مافوق صوت از آزمونه های شاهد و حاوی مواد عمل‌آوری درونی در شرایط عمل‌آوری بیرونی، کمتر است. روند تغییرات سرعت عبور امواج مافوق صوت در شرایط با عمل‌آوری بیرونی و بدون عمل‌آوری بیرونی تایید کننده نتایج مقاومت فشاری و خمشی بدست آمده است. در تحقیق Saravanan و همکاران [۱۵] سرعت عبور امواج مافوق صوت بتن خودتراکم با و بدون مواد عمل‌آوری درونی در شرایط بدون تبادل رطوبت با محیط اندازه گیری شده است. نتایج بدست آمده نشانگر آن است که استفاده از مواد عمل‌آوری درونی باعث افزایش سرعت عبور امواج مافوق صوت شده است. اما استفاده از مقادیر زیاد سبکدانه های عمل‌آوری درونی، باعث کاهش سرعت عبور امواج مافوق صوت بدلیل افزایش تخلخل شده است. لازم بذکر است نتایج تحقیق Mousa و همکاران [۳۰] نیز نشانگر آن است که منافذ بتن حاوی سبکدانه لیکا بعنوان عمل‌آوری درونی بیشتر از مخلوط شاهد است.

۳-۵- نتایج آزمایش جمع‌شدگی آزاد

در شکل (۶) نتایج بدست آمده از آزمایش جمع‌شدگی آزاد ارائه شده است. تأثیر کاربرد مواد عمل‌آوری درونی در کاهش کرنش های انقباض بتن، تحت شرایط خشک شدن را می توان با عواملی مانند افزایش تنش موثر، کاهش عمق خشک شدن، و به حداقل رساندن اختلاف رطوبت در داخل نمونه، مرتبط دانست. ماده عمل‌آوری درونی به عنوان مخزن داخلی در بتن عمل می کند [۷]. کاربرد ماده عمل‌آوری درونی باعث کاهش جمع‌شدگی بتن خودتراکم در محدوده مورد بررسی شده است. جمع‌شدگی آزاد طرح های 0.1SAP، 15R، 30R، 15L و 30L بعد از ۹۰ روز خشک شدن در مقایسه با مخلوط شاهد به ترتیب ۲۲، ۹، ۱۹، ۵ و ۱۶ درصد کاهش و بعد از ۱۸۰ روز خشک شدن در مقایسه با مخلوط شاهد به ترتیب ۱۵، ۳، ۱۲، ۰ و ۹ درصد کاهش داشته اند. در روزهای اول قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد، تغییر طول آزمونه های حاوی مواد عمل‌آوری درونی با بتن شاهد تقریبا مشابه یکدیگر است. با ادامه قرارگیری در رطوبت ۵۰ درصد بدلیل ایجاد اختلاف رطوبت درونی آب از منافذ مواد عمل‌آوری درونی خارج شده و تاحدودی مانع جمع‌شدگی بتن می شود. لذا در حدود ۵۰ روز در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد همانطور که مشاهده می شود اختلاف بین جمع‌شدگی آزاد مخلوط های حاوی مواد عمل‌آوری درونی با مخلوط شاهد بیشترین مقدار است. با افزایش مدت زمان قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد، شدت تغییر طول آزمونه بتن شاهد کاهش یافته و تقریبا بعد از ۱۲۰ روز قرارگیری در محیط با رطوبت ۵۰ درصد، آزمونه مورد بررسی دارای طول ثابتی است. اما مخلوط های حاوی مواد عمل‌آوری درونی دارای تغییر می باشند. لذا در ارزیابی میزان جمع‌شدگی آزاد آزمونه های بتن، علاوه بر ابعاد و رطوبت محیط، باید به مدت زمان قرارگیری در محیط نیز توجه شود. در مدت ۱۸۰ روز در معرض محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد بودن مخلوط خودتراکم حاوی SAP دارای کمترین جمع‌شدگی آزاد است و مخلوط های حاوی مواد عمل‌آوری درونی با کاهش میزان ظرفیت تامین آب عمل‌آوری درونی جدول (۲) جمع‌شدگی آن ها نیز افزایش یافته است.



شکل ۶- نتایج آزمایش جمع‌شدگی آزاد

نتایج تحقیق Alaskar و همکاران [۳۰] نیز نشانگر آن است که استفاده از سبکدانه ریز بعنوان ماده عمل‌آوری درونی در بتن با نسبت آب به سیمان پایین تا سن ۱۸۰ روز، باعث کاهش جمع‌شدگی آزاد شده است. جمع‌شدگی آزاد مخلوط حاوی ۲۰ درصد ریزدانه سبک نسبت به مخلوط شاهد بعد از ۲۱٪ و ۱۷۳ روز در محیط با رطوبت ۵۰ درصد بودن به ترتیب ۳۴٪ و ۲۳ ٪ کاهش داشته است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش مدت زمان در شرایط خشک شدن بودن بتن، اختلاف بین جمع‌شدگی مخلوط

حاوی ماده عمل‌آوری درونی با مخلوط شاهد کاهش پیدا کرده است. روند تغییرات جمع‌شدگی آزاد مخلوط های حاوی مواد عمل‌آوری درونی در تحقیق های Alaskarو همکاران [۳۱] و Tutkanو همکاران [۷] و Saravanan و همکاران [۱۵] مشابه با این تحقیق انجام شده است.

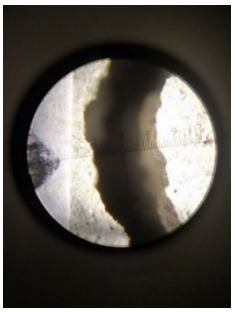
لازم بذکر است کاربرد مواد متخلخل مانند سبکدانه ها باعث افزایش جمع‌شدگی آزاد بتن در شرایط قرارگیری در شرایط خشک شدن می شود [۳۲]. اما استفاده از این مواد بصورت ماده عمل‌آوری درونی بدلیل مقادیر کم کاربرد و همچنین تأثیر آنها بر رطوبت داخلی آزمونه می تواند با توجه به ابعاد آزمونه و شرایط رطوبتی و مدت زمان خشک شدن باعث کاهش یا افزایش جمع‌شدگی بتن گردد [۷]. لذا برخی از تحقیق ها نشانگر تأثیر مثبت استفاده از عمل‌آوری درونی در کاهش جمع‌شدگی آزاد بتن [۵] و برخی از تحقیق های نیز نشانگر تأثیر منفی عمل‌آوری درونی بر جمع‌شدگی آزاد بتن [۶] می باشند.

۳-۶- نتایج آزمایش جمع‌شدگی مقید

درشکل (۷) اندازه گیری عرض ترک آزمونه در آزمایش جمع‌شدگی مقید نشان داده شده است. در جدول (۴) نتایج بدست آمده از آزمایش جمع‌شدگی مقید ارائه شده است. استفاده از مواد عمل‌آوری درونی باعث بهبود مقاومت بتن خودتراکم در برابر ایجاد ترک در آزمایش جمع‌شدگی مقید شده است. زمان ایجاد ترک طرح های 0.1SAP، 15R، 30R، 15L و 30L در مقایسه با مخلوط شاهد به ترتیب ۴۴، ۱۱، ۲۵، ۵ و ۲۴ درصد افزایش یافته است. عرض ترک طرح های 0.1SAP، 15R، 30R، 15L و 30L در مقایسه با مخلوط شاهد به ترتیب ۳۱، ۱۶، ۲۱، ۹ و ۱۵ درصد کاهش یافته است. زمان ایجاد ترک در آزمونه علاوه بر میزان رطوبت داخلی به مقاومت بتن در برابر تنش های کششی نیز ارتباط دارد. اما عرض ترک تحت تأثیر خروج رطوبت از آزمونه بتن می باشد. لذا تأثیر عمل‌آوری درونی بر کاهش عرض ترک های ایجاد شده در سن ۲۸ روز بیشتر از افزایش مدت زمان ایجاد ترک است.

نتایج نشان می دهند که تأثیر سبکدانه بازیافتی بر روی افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی مقید بتن خودتراکم کمی بهتر از سبکدانه لیکا است. زیرا ریزدانه بازیافتی دارای قابلیت نگهداری آب عمل‌آوری درونی بیشتر از ریزدانه لیکا است. اما تأثیر ماده عمل‌آوری درونی SAP بر روی افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی مقید بتن خودتراکم بیشتر از سبکدانه های مورد بررسی است.

(الف)



(ب)

شکل ۷- الف) آزمونه ترک خورده ب) تصویر عرض ترک در دستگاه کرک اسکوپ

جدول ۴- نتایج آزمایش جمع‌شدگی مقید

کد مخلوط	زمان خالص تا ایجاد ترک	متوسط عرض ترک در ۲۸ روز (mm)	حداکثر عرض ترک در ۲۸ روز (mm)	پتانسیل ایجاد ترک در بتن
Ref	۶/۸	۲,۵۳	۲/۷۵	زیاد
0.1SAP	۱۰/۴	۱/۶۵	۱/۸۵	متوسط-زیاد
15R	۷/۳	۲/۱۳	۲/۵۰	متوسط-زیاد
30R	۸/۱	۲/۰۱	۲/۴۰	متوسط-زیاد
15L	۷/۱	۲/۳۱	۲/۶۵	متوسط-زیاد
30L	۷/۹	۲/۱۵	۲/۶۰	متوسط-زیاد

نتایج تحقیق های قبلی نشان می دهند که استفاده از SAP و یا مواد سبکدانه بعنوان ماده عمل‌آوری درونی باعث ایجاد تاخیر در زمان

ایجاد ترک در آزمایش جمع‌شدگی مقید بتن با نسبت آب به مواد سیمانی پایین شده است [۸و۳۱و۳۳]. سه عامل در بهبود عملکرد مخلوط های حاوی ماده عمل‌آوری درونی در آزمایش حلقه جمع‌شدگی موثر است. یک عامل، کاهش نرخ از دست دادن رطوبت در قسمت های داخلی بتن است که باعث پیشرفت بیشتر واکنش ها در آزمونه می شود. عامل دوم به کاهش مدول الاستیسیته بتن (سختی) بدلیل استفاده از مواد عمل‌آوری درونی که ماهیت متخلخل دارند ارتباط دارد. عامل سوم، تأثیر عمل‌آوری درونی برکاهش جمع‌شدگی خودبخودی بتن است [۳۳].

٤- نتیجه گیری

براساس نتایج بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی انجام شده بر روی مخلوط های حاوی ماده عمل‌آوری درونی SAP و ریزدانه‌های سبک بازیافتی از خرده بلوک های بتن هوادار اتوکلاو شده و لیکا نتایج زیر قابل دستیابی است:

- استفاده از ۳۰ درصد حجمی ریزدانه‌های سبک مورد بررسی باعث کمی جداشدگی در مخلوط بتن خوتراکم شده است. لذا امکان استفاده درصد های بالاتر از این مواد در این تحقیق فراهم نشده است. لذا در بتن های خودتراکم در انتخاب مواد عمل‌آوری درونی علاوه بر تأثیر آنها بر خواص مکانیکی و دوام باید به تأثیر آنها بر خواص بتن تازه نیز توجه نمود.

- در بتن خودتراکم استفاده از مواد عمل‌آوری درونی بدلیل ایجاد منافذ باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی در شرایط عمل‌آوری بیرونی شده است. حداکثر کاهش مقاومت فشاری و خمشی با مواد عمل‌آوری درونی مورد بررسی به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۶ درصد بوده است.

- در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی استفاده از مواد عمل‌آوری درونی موجب بهبود مقاومت فشاری و خمشی بتن شده است. حداکثر افزایش مقاومت فشاری و خمشی با مواد عمل‌آوری درونی مورد بررسی به ترتیب برابر با ۶ و ۱۰ درصد بوده است. اختلاف قابل ملاحظه ای بین تأثیر لیکا و سبکدانه ریز بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق بر روی مقاومت فشاری بتن دیده نشده است. لذا در کارهای اجرایی سبکدانه بازیافتی می تواند گزینه مناسبی برای جایگزینی لیکا باشد. لازم بذکر است که عرضه ریزدانه لیکا در کشور بسیار محدود می باشد.

- مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن خودتراکم بدون ماده عمل‌آوری، ۱۰ درصد در شرایط بدون عمل‌آوری بیرونی کاهش یافته است. اما مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن خودتراکم حاوی مواد عمل‌آوری درونی در شرایط با عمل‌آوری بیرونی و در شرایط محیطی با رطوبت ۵۰ درصد تقریبا مشابه با یکدیگر است.

- بررسی تغییرات سرعت عبور امواج مافوق صوت نشان می دهد قرارگیری در محیط با رطوبت ۵۰ درصد موجب افزایش ترک های درون بتن شده است. اما کاربرد مواد عمل‌آوری درونی باعث کاهش ترک های ایجاد شده در شرایط قرارگیری در محیط با رطوبت ۵۰ درصد شده است.

- جمع‌شدگی آزاد بتن خودتراکم حاوی ۰٫۱ درصد وزنی پلیمر فوق جاذب، بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی ریزدانه سبک بازیافتی و بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی لیکا نسبت به بتن شاهد بعد از ۱۸۰ روز خشک شدن در رطوبت نسبی ۵۰ درصد به ترتیب ۱۵ درصد، ۱۲ درصد و ۹ درصد کاهش یافته است. بیشترین تأثیر در کاهش جمع‌شدگی آزاد مربوط به طرح حاوی SAP است. عملکرد ریزدانه سبک بازیافتی از خرده بلوک های بتن هوادار اتوکلاو شده در کاهش جمع‌شدگی آزاد در حدود ۳ درصد بیشتر از ریزدانه سبک لیکا است.

- متوسط عرض ترک جمع‌شدگی مقید بتن خودتراکم حاوی ۰٫۱ درصد وزنی پلیمر فوق جاذب، بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی ریزدانه سبک بازیافتی و بتن خودتراکم حاوی ۳۰ درصد حجمی لیکا نسبت به بتن شاهد در سن ۲۸ روز به ترتیب ۳۵ درصد، ۲۱ درصد و ۱۵ درصد کاهش یافته است. نتایج نشان می دهد تأثیر پلیمر فوق جاذب بر کاهش عرض ترک خوردگی بتن خودتراکم بیشتر از ریزدانه‌های سبکدانه مورد بررسی است.

- حداکثر مقدار کاربرد مواد عمل‌آوری درونی شامل ریزدانه سبک بازیافتی و لیکا با مشخصات بررسی شده در بتن خودتراکم ۳۰ درصد حجمی است و با کاربرد مقادیر بیشتر از این ماده بتن خودتراکم دارای جداشدگی غیرقابل قبول است.

در مجموع بررسی نتایج آزمایش های این تحقیق نشان می دهد که ریزدانه سبک بازیافتی از خرده بلوک های بتن هوادار اتوکلاو شده بعنوان عمل‌آوری درونی کمی موثرتر از ریزدانه سبک لیکا است و قابلیت استفاده از آن در ساخت بتن خودتراکم بعنوان جایگزین لیکا وجود دارد. اما باید توجه شود در تحقیق های آتی باید اید به

بررسی تأثیرات طولانی‌مدت استفاده از مواد SAP و ریزدانه‌های سبک در بتن خودتراکم پرداخته و عواملی مانند دوام، مقاومت در برابر شرایط محیطی خشن ارزیابی گردد.

۵- مراجع

[1] Athiyamaan, V., Admixture-based self-compacted concrete with self-curing concrete techniques a state of art of review, Cleaner Engineering and Technology, 5, 100250, 2021.

[2] Tang, C., Dong, R.R., Tang, Zh., Long, G., Ma, G., Wang, H., Huang, Y., Effect of SAP on the properties and microstructure of cement-based materials in the low humidity environment, Case Studies in Construction Materials, 20, e03001, 2024.

[3] Ma, X., Liu, J., Shi, C., A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials, Construction and Building Materials, 2018, 358-393, 2019.

[4] Yang L., Ma X., Jianhui Liu, J., Hu, X., Wu, Z., Shi, C., Improving the effectiveness of internal curing through engineering the pore structure of lightweight aggregates, Cement and Concrete Composites, 134, 104773, 2022.

[5] Yang, J., Liu, L., Liao, Q., Wu, J., Li, J., Zhang, L., Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar, Construction and Building Materials, 201, 401–407, 2019.

[6] Soliman, A.M., Nehdi, M.L., Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC, Construction and Building Materials, 41, 270–275, 2013.

[7] Tutkun, B., Barlay, E.S., Yalçınkaya, C., Yazıcı, H., Effect of internal curing on shrinkage and cracking potential under autogenous and drying conditions, Construction and Building Materials, 409, 134078, 2023.

[8] Arayeshgar, M., Madandoust, R., Ranjbar, M. M.., A comparative study on superabsorbent polymer (SAP) and recycled lightweight aggregate (LWA) as internal curing agents for high-strength concrete (HSC). International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024.

[9] Famili, H., Saryazdi, M. K., and Parhizkar, T., Internal curing of high strength self consolidating concrete by saturated lightweight aggregate-effects on material properties, International Journal of Civil Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 210-221, 2012.

[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, Structures, 2, 50–57, 2015.

[11] Rajamanickam, G. and Vaiyapuri, R., Self compacting self curing concrete with lightweight aggregates, Građevinar, vol. 68, no. 04., pp. 279-285, 2016.

[12] Gopi, R., Revathi, V., Influence of presaturated light expanded clay and fly ash aggregate in slef compcating concrete, Revista Romana de Materiale, vol. 49, no. 3, pp. 370-378, 2019.

[13] Madduru, S. R. C., Shaik, K. S., Velivela, R., and Karri, V. K., Hydrophilic and hydrophobic chemicals as self curing agents in self compacting concrete, Journal of Building Engineering, vol. 28, p. 101008, 2020.

[14] Güneyisi, E., Gesólu, M., Altan, I., Öz, H.Ö., Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars, Construct. Build. Mater., 74, 9–16, 2015.

[15] Saravanan, M., Gopi, R., Harihanandh, M., Durability properties of self compacting self curing concrete with presaturated light weight aggregates, Materials Today: Proceedings 45, 7805–7809, 2021.

[16] Huang, X., Liu, X., Rong, H., Yang, X., Duan, Y., Ren, T., Effect of super-absorbent polymer (SAP) incorporation method on mechanical and shrinkage properties of internally cured concrete, Materials, 15, 7854, 2022.

[17] Lothenbach, B.; Winnefeld, F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. Cem. Concr. Res., 36, 209–226, 2006.

[18] Wang, K., Dong, K., Guo, J., Du H., Absorption and Release mechanism of superabsorbent polymers and its impact on shrinkage and durability of internally cured concrete – A review, Case Studies in Construction Materials, 21, e03909, 2024.

[19] Zhao, S., Jensen, O. M., & Hasholt, M. T., Measuring absorption of superabsorbent polymers in cementitious environments. Materials and Structures, 53(1), 2020.

[20] Kamal M.M., Safana M.A., Bashandya A.A., Khalil A.M., Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete, Journal of Building Engineering, 16, 79–93, 2018.

[21] Hong, S.-H.; Choi, J.-S., Yuan, T.-F.; Yoon, Y.-S. Mechanical and Electrical Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Steel Fibers. Materials, 14, 6505, 2021.

[22] Milla, J, Rupnow, T, Saunders, W.J., Cooper S., Measuring the influence of Pre-Wetted

Lightweight aggregates on concrete's surface resistivity. Construction and Building Materials, 2021.
[23] Abadel, A.A., Physical, mechanical, and microstructure characteristics of ultra-high-performance concrete containing lightweight aggregates. Materials, 16(13), p. 4883, 2023.
[24] Korda, E., De-Schutter, G., Aggelis, D.G., Acoustic signatures of hydration and microcracking in early-age concrete, Developments in the Built Environment, 17, 100353, 2024.
[25] Shen, D., Cracking control on early-age concrete through Internal Curing, springer, 2022.
[26] Alanazi, H., Elalaoui, O., Adamu, M., Alaswad, S.O., Ibrahim, Y.E., Abadel, A.A., Al-Fuhaid, A.F., Mechanical and microstructural properties of ultra-high performance concrete with lightweight aggregates, Buildings, 12, 1783, 2022.
[27] Venkateswarlu, K., Deo, S.V., Murmu, M., Effect of Super Absorbent Polymer on Workability, Strength and Durability of Self Consolidating Concrete, International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, Vol. 34, No. 05, 1118-123, 2021.
[28] Kumar, P., Pasla, D., Saravanan, T.J., Self-compacting lightweight aggregate concrete and its properties: A review, Construction and Building Materials, 375, 130861, 2023.
[29] Zeng, X., Deng, Q., Li, S., Gao, H., & Yu, Q., Effects of autogenous shrinkage microcracks on UHPC: Insights from a machine learning based crack quantification approach, Construction and Building Materials, 428, 136400, 2024.
[30] Mousa, M.I., Mohamed, G., Mahdy, M.G., Ahmed, H., Abdel-Reheem, A.H., Yehia, A.Z., Self-curing concrete types; water retention and durability, Alexandria Engineering Journal, 54, 565–575, 2015.
[31] Alaskar, A, Alshannag, M, Higazey, M., Mechanical properties and durability of high-performance concrete internally cured using lightweight aggregates. Construction and Building Materials, 288,122998, 2021.
[32] Maghfouri, M., Shafigh, P., Alimohammadi, V., Doroudi, Y., Aslam, M., Appropriate drying shrinkage prediction models for lightweight concrete containing coarse agro-waste aggregate, Journal of Building Engineering, 29, 101148, 2020.
[33] Liu Y., Wei Y., Ma L., Wang L., Restrained shrinkage behavior of internally-cured UHPC using calcined bauxite aggregate in the ring test and UHPC-concrete composite slab, Cement and Concrete Composites, 134, 104805, 2022.
[34] Arckarapunyathorn, W., Markpiban, P., Sahamitmongkol, R., Impact of superabsorbent polymer on shrinkage and compressive strength of mortar and concrete, Sustainability, 16, 2158, 2024.

Comparison of the effect of using lightweight fine aggregate with superabsorbent polymer on drying shrinkage caused by drying of self-compacting concrete

Ataollah Hajati Modaraei
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
Milad Rajabi Jorshari*
Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, International campus, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

The use of internal curing in self-compacting concrete to address technical issues such as shrinkage caused by a low water-to-cement ratio has been a focus of attention. This study, the effect of different percentages of recycled lightweight aggregate from autoclaved aerated concrete blocks (RAAC) and LECA (Light Expanded Clay Aggregate) as an internal curing agent in self-compacting concrete was investigated and compared with the properties of self-compacting concrete containing superabsorbent polymer (SAP). The tests include compressive strength, flexural strength, free and constrained shrinkage due to drying, and pulse velocity of ultrasonic waves. The use of internal curing materials has increased the compressive and flexural strengths, as well as the pulse velocity of ultrasonic waves, of self-compacting concrete exposed to drying conditions. The free shrinkage of self-compacting concrete containing 0.1% by weight of superabsorbent polymer, self-compacting concrete containing 30% by volume of recycled lightweight fine aggregate, and self-compacting concrete containing 30% by volume of LECA decreased by 15%, 12%, and 9%, respectively, compared to the control concrete after 180 days of drying at 50% relative humidity. The average width of the constrained shrinkage crack of self-compacting concrete containing 0.1% by weight of superabsorbent polymer, self-compacting concrete containing 30% by volume of recycled lightweight fine aggregate, and self-compacting concrete containing 30% by volume of LECA decreased by 35%, 21%, and 15%, respectively, compared to the control concrete at the age of 28 days. The results of this study show that the effect of superabsorbent polymer on reducing shrinkage and crack width of self-compacting concrete is greater than that of the lightweight fine aggregates under study.

Keywords: Self-compacting concrete, internal curing, superabsorbent polymer, recycled lightweight fine aggregate, Leca.

* Corresponding Author: miladcivil.r84@gmail.com