

## تاثیر عمل آوری در میزان جمع شدگی بتن خود متراکم با مقاومت پایین

### نکات برجسته :

- نتایج آزمایشگاهی روی جمع شدگی بتن با مقاومت پایین ارائه شده اند.
- اثر عمل آوری بر روی ترکیب های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.
- جمع شدگی بالاتر ، به بهسازی تخلخل ساختاری مرتبط شده است.
- نتایج نشان می دهند که زمان عمل آوری برای به حداقل رساندن جمع شدگی در سنین اولیه دارای اهمیت است .

### چکیده :

بتن خود متراکم دارای شاخصه های ویژه ای است از این رو کاربرد آن در بسیاری از کارهای تعمیراتی توصیه می شود. با این وجود در برخی موارد عملی ، عملکرد نامناسب مواد تعمیری در مراحل اولیه هیدراسیون شامل ترک و تورق ناشی از جمع شدگی مشاهده است. با بیشتر رایج شدن استفاده از بتن خود متراکم ، برخی روش های نوین برای مقابله با این پدیده به وجود آمدند ، اما همچنان کنترل فرایند عمل آوری به عنوان پیش نیاز به حیات خود ادامه می دهد. در این مطالعه ، یک کار تجربی بر روی اثر عمل آوری روی جمع شدگی کلی یک بتن خود متراکم با مقاومت پایین ارائه شده است . اثر عمل آوری بر روی ترکیباتی که با محصولات مختلف تجاری متعادل کننده ی جمع شدگی ساخته شده اند ، مورد ارزیابی قرار گرفته است .

نتایج بدست آمده نشان می دهند ، که همه ی ترکیبات ( با و بدون افزودنی های کاهش دهنده ی جمع شدگی و محصولات منبسط شونده ) در صورت عمل آوری ، طول دوره ی جمع شدگی کلی بالاتری خواهند داشت . فهمیده شد که نمونه هایی که تحت عمل آوری طولانی تری بوده اند ، قطر منافذ میانی آنها کمتر است . جمع شدگی بالاتر به بهسازی تخلخل ساختاری مرتبط شده است .

همچنین نتایج این موضوع تایید می کنند که زمان عمل آوری برای به حداقل رساندن جمع شدگی در سنین اولیه ضروری است این امر موجب کاهش از دست دادن جرم ناشی از خشک شدن می گردد که سبب اثر تاخیری در گسترش جمع شدگی می شود و اجازه می دهد مقاومت به طور طبیعی بالا برود.

### ۱- مقدمه

بتن خود متراکم به عنوان یک مصالح نوآورانه ارائه شده است که نشان داده است در زمینه های تولید، شرایط کار ، و حتی در مسائلی که ناشی از شاخصه های ذاتی آن ها است دارای توان بالقوه بالایی هستند. این گونه از بتن دارای شاخصه های ویژه ای است که کاربرد آن را در بسیاری از کارهای تعمیراتی توجیه می کند. با این وجود ، در برخی نمونه های عملی ، رفتار نامناسب مواد تعمیری در مراحل اولیه هیدراسیون شامل ترک و تورق ناشی از جمع شدگی مشاهده شده است . با بیشتر رایج شدن استفاده از بتن خود متراکم ، برخی روش های نوین برای مقابله با این جنبه گسترش یافته است . ابزار و روش های کاهش جمع شدگی شامل اصلاح سیمان ، افزودنی های معدنی ، افزودنی های شیمیایی ، فیبر ها ، کنترل شرایط عمل آوری و روش های پیشرفته عمل آوری داخلی می شوند.

در دو دهه ی اخیر ، افزودنی های کاهنده ی جمع شدگی (SRA) توسعه یافته اند و با موفقیت در کاهش جمع شدگی مورد استفاده قرار گرفته اند. [۵-۲]

Ribeiro et al [۶]، با هدف دستیابی به کاهش جمع شدگی بالاتر، همسازی (همکاری) دو SRA مختلف را مورد آزمایش قرار داد و نتایج بدست آمده نشان دهنده ی تاثیر فزاینده در کاهش جمع شدگی می باشد. با این وجود در کار انجام شده ی دیگری [۷]، مرز های کاهش جمع شدگی با استفاده از دوز های فزاینده SRA شناسایی شده است.

پیش از پیشرفت افزودنی های کاهنده ی جمع شدگی، سیمان های منبسط شونده برای بیش از ۴ دهه به منظور به حداقل رساندن اثرات جمع شدگی ناشی از خشک شدن مورد استفاده قرار می گرفتند [۸-۱۱]. این روش نتایج خوبی را به وسیله ی بهبود فضای اتصال و حد عمل آوری نشان داده است اما کاربرد آن نیازمند اقدامات احتیاطی ویژه ای می باشد [۱۲].

برای غلبه بر محدودیت های ناشی از استفاده ی منفرد محصولات برای به حداقل رساندن جمع شدگی، در سالهای اخیر اثر استفاده ی ترکیبی از مواد منبسط شونده و SRA مورد آزمایش قرار گرفته است. در تمامی نوشته هایی که مورد بررسی قرار گرفته اند، اثر همسازی ناشی از استفاده ی ترکیبی مواد منبسط شونده و SRA گزارش شده است، که استفاده از آن را در کنترل جمع شدگی توجیه می کند [۱۸-۱۳].

از آنجاییکه عمل آوری بر روی جمع شدگی و ترک خوردگی اثرگذار است، برای به حداقل رساندن اثر کاهش جمع شدگی، معمولاً یک عمل آوری مناسب توصیه می شود [۲۰-۱۹]. در این مطالعه، کار تجربی روی اثر عمل آوری در جمع شدگی کلی یک بتن خود متراکم مقاومت پایین ارائه شده است. اثر عمل آوری بر روی ترکیبات ساخته شده با محصولات تجاری مختلف متعادل کننده ی جمع شدگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در واقع کار آزمایشگاهی برای شناسایی شرایط مناسب دستیابی به بهترین کاهش جمع شدگی، با استفاده از مصالح موجود و روش های استاندارد ساخت، انجام گرفته است، اما مقاله ی حاضر تنها روی تحلیل اثرات فرایند عمل آوری تاکید دارد.

## ۲- مواد و روش ها

در این مطالعه، ۶ ترکیب مختلف بتن مورد مطالعه قرار گرفت. آماده سازی نمونه ها (۴۰×۴۰×۴۰mm) بر اساس استاندارد EN-۱۹۶-۱ انجام گرفت، در یک اتاق با دمای  $20 \pm 2$  °C و رطوبت نسبی  $55 \pm 5$ ٪. با این وجود، سنگدانه ها و نسبت های اختلاط که در مطالعه مورد استفاده قرار گرفت با آنهایی که در EN-۱۹۶ آمده است، تفاوت دارد. با توجه به ویسکوزیته ی پایین ترکیب (SCC) نمونه های آزمایش به طور مکانیکی مورد تراکم قرار نگرفتند.

جداسازی قالب ها حدود ۲۶ ساعت پس از اختلاط صورت گرفت. این بازه ی زمانی بر اساس حداقل نیاز به اطمینان از مقاومت بین ۲ تا ۵ MPa بتن مشخص شده است، بدین نحو از خرابی نمونه ها هنگام جداکردن قالب ها جلوگیری می گردد. متعاقباً نمونه ها وزن شدند و طول آنها ثبت گردید.

پس از جداسازی قالب، ۳ مرحله برای عمل آوری مشخص شد:

- عمل آوری نشده (عمل آوری در هوا با دمای  $20 \pm 2$  °C و رطوبت نسبی  $55 \pm 5$ ٪)
- عمل آوری تا زمانیکه بتن تقریباً به ۵۰٪ مقاومت متوسط ۲۸ روزه برسد.
- عمل آوری تا زمانیکه بتن به حدود ۷۰٪ مقاومت متوسط ۲۸ روزه برسد.

برای این ۳ مرحله عمل آوری ، نمونه های مشابه با یک لایه پلاستیک برای ۰ ، ۳ یا ۷ روز مورد حفاظت قرار گرفتند.

برای اهداف مقایسه ای ، جمع شدگی خودزاینده و انبساط در حالت غوطه وری نیز در نمونه های اضافی اندازه گیری شد.

تغییر شکل های ناشی از جمع شدگی هر نمونه با استفاده از سنجشگر طولی با حساسیت  $1\text{ }\mu\text{m}$  و گیج های قائم درقسمت های انتهایی منشور بتنی اندازه گیری شد. پایداری سنجشگر طولی توسط یک میله ی تغییر ناپذیر مبنا بررسی می شد.

نمونه ها در زمان های ۱، ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ ماه وزن و اندازه گیری می شدند.

نمونه ها با استفاده از سیمان پرتلند نوع ۲ ( جداول ۱ و ۲ ) ، طبق استاندارد EN ۱۹۷-۱ ، خاکستر بادی سیلیسی از کامپوستیا (Compostilla) در اسپانیا (جداول ۳ و ۴ ) ، ماسه سیلیسی طبیعی رودخانه و سنگدانه درشت سنگ آهک خرد شده از الجارو (Algarve) در پرتغال (جدول ۵) ، آب قابل شرب لوله ، ۲مورد SRA ، یک فوق روان کننده و یک ماده ی افزودنی معدنی منبسط شونده (جدول ۶).

جدول ۷ ترکیبات بتن را نشان می دهد. ترکیب مبنا (Ref) شامل محصولات کاهنده ی جمع شدگی نمی باشد. در ۵ ترکیب دیگر ، افزودنی های شیمیایی برای کنترل جمع شدگی مورد استفاده قرار گرفته اند. دو محصول SRA به صورت مجزا استفاده شده اند (SRA ۱ و SRA ۲ ) یا با یکدیگر (SRA ۱+۲) . دو مورد از این ترکیبات نیز با عامل منبسط شونده ترکیب شده اند (  $E + 20$  ،  $E + 40$  ). مقدار فوق روان کننده بین  $(3.5 - 2.9\text{ l/m}^3)$  تنظیم شد تا نسبت آب به پودر و گسترش جریان (۷۰-۶۸ cm) را ثابت نگه دارد.

جدول ۱ - مشخصات شیمیایی سیمان			
مقدار	واحد	استاندارد	ویژگی
11.17	%	EN 196-2	تلفات حین گیرش
1.60	%		پسماند نامحلول
16.05	%		$SiO_2$
4.46	%		$Al_2O_3$
2.53	%		$Fe_2O_3$
60.29	%		$SO_3$
1.10	%		CaO
3.02	%		MgO
0.02	%		$Cl^-$
1.00	%	ASTM C 114	آهک آزاد

جدول ۲ - مشخصات فیزیکی سیمان			
مقدار	واحد	استاندارد	ویژگی
3020	$Kg/m^3$	LNEC E64	چگالی
428	$m^2/Kg$	EN 196-6	ریزی (بلین)
26.1	%	EN 196-3	غلظت نرمال
120	min		زمان گیرش اولیه
175	min		زمان گیرش ثانویه
1.2	mm		سلامت
19.0	Mpa	EN 196-1	مقاومت فشاری ۲ روزه
30.9	Mpa		مقاومت فشاری ۷ روزه
38.8	Mpa		مقاومت فشاری ۲۸ روزه

جدول ۳ - مشخصات شیمیایی خاکستر بادی		
مقدار	واحد	ویژگی
41.65	%	$SiO_2$
92.71	%	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$
0.02	%	آهک آزاد
2.80	%	آهک واکنش پذیر
2.10	%	MgO
0.27	%	$SO_3$
0.00	%	$Cl^-$

جدول ۴ - مشخصات فیزیکی خاکستر بادی		
مقدار	واحد	ویژگی
2330	$Kg/m^3$	چگالی
428	$m^2/Kg$	ریزی (بلین)
11.1	%	ذرات بزرگتر از $45\text{ }\mu\text{m}$ میلیمتر
85.5	%	درجه فعالیت ۲۸ روزه
104.3	%	درجه فعالیت ۹۰ روزه

جدول ۵ - مشخصات سنگدانه			
شن		ماسه	
8-12.5	ابعاد ذرات (mm)	0.125-1	ابعاد ذرات (mm)
2620	چگالی SSD ( $Kg/m^3$ )	2660	چگالی SSD ( $Kg/m^3$ )

جدول ۶ - مشخصات افزودنی ها					
افزودنی	نوع	حالت مصرف	چگالی ( $Kg/m^3$ )	جزء اصلی	درصد مصرف پیشنهادی
SP 1	فوق روان کننده	مایع	1070	پلی کریوکسیلات اتر	۰.۶ تا ۱.۲ کیلوگرم در ۱۰۰ کیلوگرم منعقد کننده
SRA 1	کاهنده جمع شدگی	مایع	980	بیوتوکسیتانول	$7.5 l/m^3$
SRA 2	کاهنده جمع شدگی	مایع	1010	آلکیل اتر	۰.۵ تا ۲ درصد وزن سیمان
EXP	منبسط کننده	پودر	3090	کلینکر با آهک آزاد	$20 (Kg/m^3)$

جدول ۷ - طرح اختلاط بتن های آزمایش شده							
بتن		Ref	SRA 1	SRA 2	SRA (1+2)	SRA (1+2)+20E	SRA (1+2)+40E
نسبت آب به پودر		۰.۴۵۸					
( $Kg/m^3$ )	سیمان	۲۶۵	۲۶۳	۲۶۳	۲۶۱	۲۶۰	۲۵۸
( $Kg/m^3$ )	خاکستر بادی	۱۷۳	۱۷۲	۱۷۲	۱۷۱	۱۷۰	۱۶۸
( $Kg/m^3$ )	ماسه	۷۸۰	۷۷۴	۷۷۶	۷۷۰	۷۶۵	۷۶۰
( $Kg/m^3$ )	شن	۷۶۸	۷۶۳	۷۶۵	۷۵۹	۷۵۴	۷۴۹
( $Kg/m^3$ )	منبسط کننده					۱۹.۶	۳۹
$l/m^3$	فوق روان کننده	۳.۵	۲.۶۵	۲.۶۶	۲.۳۱	۲.۲۹	۲.۶۷
$l/m^3$	SRA 1		۷.۴۵		۷.۴۱	۷.۳۷	۷.۳۱
$l/m^3$	SRA 2			۵.۳۱	۵.۲۷	۵.۲۴	۵.۲
$l/m^3$	آب آزاد	۲۰۰	۱۹۹	۱۹۹	۱۹۸	۱۹۷	۱۹۵

از آنجاییکه کل ترکیبات با  $\frac{W}{C+F} = 0.457 \pm 0.01$  و با مقدار ثابت سیمان  $C = 260 \pm 5 \frac{Kg}{m^3}$  ساخته شده اند ، تغییرات کوچکی روی ماده ی منعقدکننده و مقادیر آب مورد نیاز است تا کارایی بتن را ثابت نگه دارد ، اما به حد کافی کم هستند تا در تحلیل به حساب نیایند.

با توجه به این که پودر منبسط شونده یک ماده ی سیمانی می باشد ، نظریه استفاده از این محصول به عنوان جایگزین بخشی از سیمان را در نظر گرفتیم . با این وجود ، از آنجاییکه اساس این کار مشخص کردن یک ترکیب مینا و تحلیل کاهش جمع شدگی با استفاده از محصولات گوناگون می باشد ، افزودن محصول منبسط شونده گزینه ی انتخاب شده بود. این انتخاب همچنین این مزیت را دارد که از مشکل عدم اطمینان از مقادیر کلینکر سیمان و محصول منبسط شونده جلوگیری می کند.

جدول ۸ برخی شاخصه های اندازه گیری شده در حالت تازه و سخت شده ترکیب مینا را نشان می دهد.

نتیجه آزمایش سایر بتن ها در بازه ۶۸۰ تا ۷۰۰ mm بود.

جدول ۸ - ویژگی های بتن خود متراکم با طرح اختلاط مینا (Ref)				
کارایی بتن تازه		مقاومت فشاری بتن سخت شده (Mpa)		
روش اندازه گیری		زمان (روز)	میانگین (۳ نمونه)	انحراف معیار
میز لرزه (۸-۱۲۳۵۰ EN)	680mm SF2	۱	۹	۱.۵
قیف (۹-۱۲۳۵۰ EN)	4s VF1	۷	۲۰	۲.۷
سه لوله (۱۰-۱۲۳۵۰ EN)	0.84 PA2	۲۸	۲۷	۱.۸

استفاده از SRA ها به ویژه در سنین اولیه ، منجر به کاهش مقاومت مکانیکی می گردد. در حالیکه استفاده از مواد منبسط شونده تاثیر مخالف دارد . شکل ۱ میزان تغییرات معمول بدست آمده در مخلوط ها را نشان می دهد.

در غیاب عامل منبسط شونده ، استفاده همزمان دو محصول SRA باعث کاهش ۳۱.۲٪ در مقاومت فشاری ۲۸ روزه گردید. در آزمایشاتی که پس از ۹ ماه صورت گرفت ، کاهش مقاومت به میزان ۳۰٪ بود. کاهش مقاومت ۵٪ تا ۱۰٪ ناشی از مصرف یک

SRA ، معمول است اما کاهش تا حدود ۲۰٪ هم گزارش شده است [۶،۷،۲۱]. درصد بالاتری که در این کار بدست آمده است باید وابسته به سطح مقاومت پایین تر بتن باشد که تفاوت مقادیر مطلق آن ۸ MPa است . باید به این موضوع اشاره شود که اندازه کوچک نمونه ها (۱۶×۴×۴ cm) و مقدار بالای  $\frac{w}{c}$  (۰،۷۶) ممکن است به آب انداختگی نمونه هایی که در آب غوطه ورنند ، کمک کرده باشد ، که این امر کمک پوزولانی خاکستر بادی را کاهش می دهد . این امر می تواند افت بالا و غیرعادی مقاومت فشاری را توضیح دهد.

استفاده ی همزمان SRA ها در ترکیب با دوز  $\frac{Kg}{m^3}$  ۲۰ از عامل منبسط شونده منجر به کاهش مقاومت ۱۳،۳٪ در ۲۸ روز گردید. در آزمایشاتی که در سن ۹ ماهگی انجام شد تنها کاهش ۱،۶٪ مشاهده گردید. این عملکرد بهتر ترکیب همراه با ماده منبسط شونده می تواند وابسته به افزایش مقدار کلینکر و نتیجه ی کاهش نسبت آب به منعقد کننده ( $\frac{w}{b}$ ) باشد. به نظر می رسد این امر تنها اثر مستقیم روی مقاومت ندارد اما یک منفعت غیرمستقیم در رابطه با آب انداختگی دارد.

به هر حال ، برخی نویسندگان نیز به کاهش درجه ی هیدراسیون سیمان ناشی از حضور SRA اشاره می کنند. در سنین اولیه افت چشمگیر در مقاومت مکانیکی گزارش شده است .

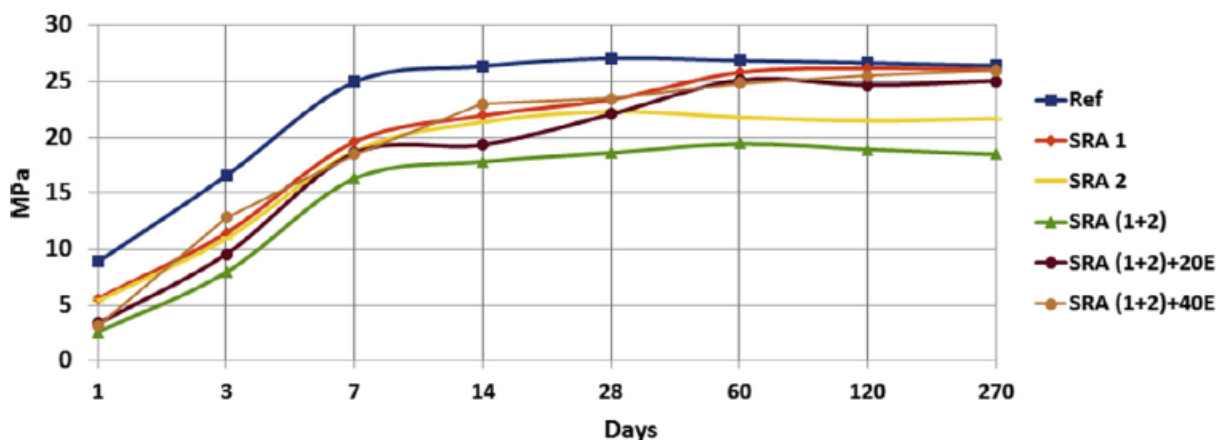


Fig. 1. Compressive strength.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج بدست آمده آزمایش روی ۶ سری نمونه امکان مقایسه رفتار نسبی آنها شامل تغییر جرم ، جمع شدگی کلی و تخلخل را فراهم کرد.

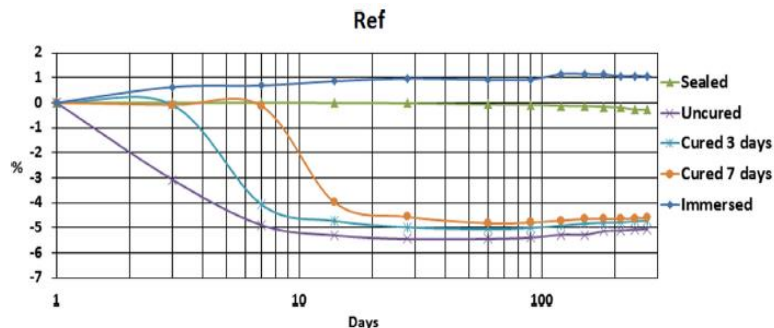


Fig. 2. Mass change of mixture Ref.

#### ۳-۱- تغییر جرم

نمودار های شکل بعد (شکل ۷-۲) تغییر جرم ترکیبات Ref ، SRA<sub>۱</sub> ، SRA<sub>۲</sub> ، SRA(۱+۲) ، SRA(۱+۲)+۲۰E و SRA(۱+۲)+۴۰E که در طی ۹ ماه ثبت شده اند ( هر عدد ارائه شده میانگین ۷

### SRA 1

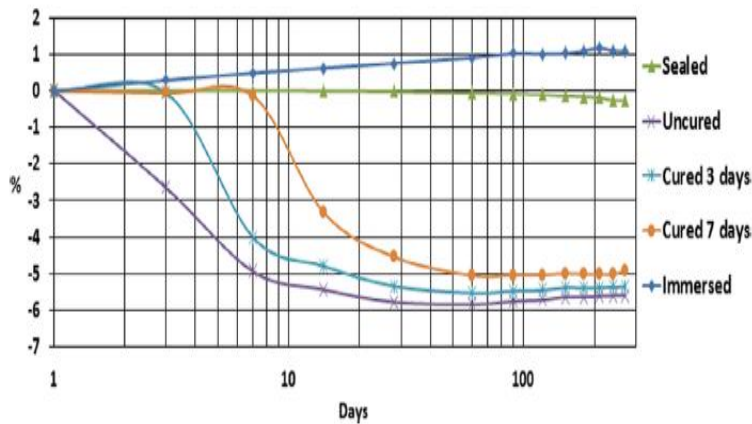


Fig. 3. Mass change of mixture SRA1.

### SRA 2

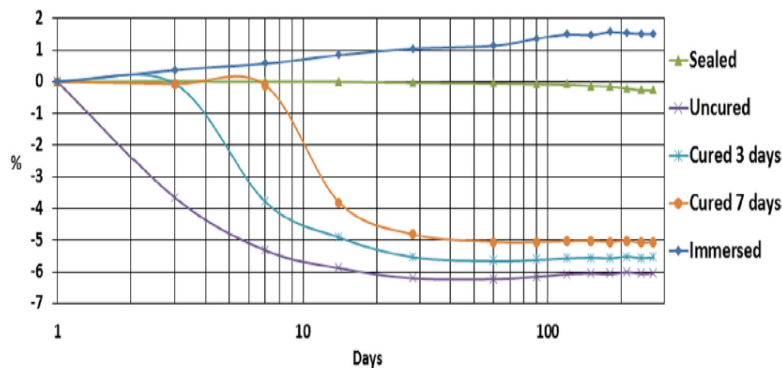


Fig. 4. Mass change of mixture SRA2.

### SRA (1+2)

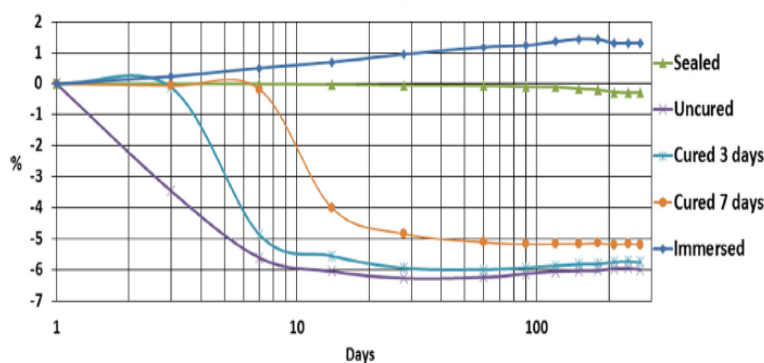


Fig. 5. Mass change of mixture SRA (1+2).

نمونه است) را نشان می دهند. تغییر جرم های ارائه شده به عنوان درصدی از جرم اولیه که بلافاصله پس از جداسازی قالب ثبت شده اند، محاسبه شده اند. میزان انحراف نتایج منفرد بسیار کوچک است ( $SD < 15\%$ ).

همان طور که انتظار می رفت، تمامی شکل ها به وضوح آغاز از دست دادن جرم را در انتهای عمل آوری نشان می دهند. نتایج همچنین این موضوع را تایید می کنند که نمونه های عمل آوری شده (۳ یا ۷ روز) از دست دادن جرم کمتری نسبت به نمونه های عمل آوری نشده دارند.

با توجه به اثر عمل آوری، برخی ممکن است مشاهده کنند که نمونه های آزمایش در معرض عمل آوری (۳ یا ۷ روز) پس از ۹ ماه، از دست دادن جرم کمتری از خود نشان می دهند. در واقع، دوره ی عمل آوری طولانی تر، هیدراسیون سیمان را بهتر پیش می برد که منجر به ساختار با منافذ بسته تر می گردد و در نتیجه از تبادل رطوبت با محیط جلوگیری می کند.

طبق انتظار، نمونه های مهر و موم شده تقریباً هیچ تغییر جرمی را نشان نمی دهند و نمونه های مستغرق افزایش جرم را نشان می دهند. افزایش جرم در نمونه های حاوی پودر منبسط شونده بالاتر است که می تواند وابسته به مقادیر بالاتر خمیر و حضور محصولات هیدراسیون منبسط شونده باشد.

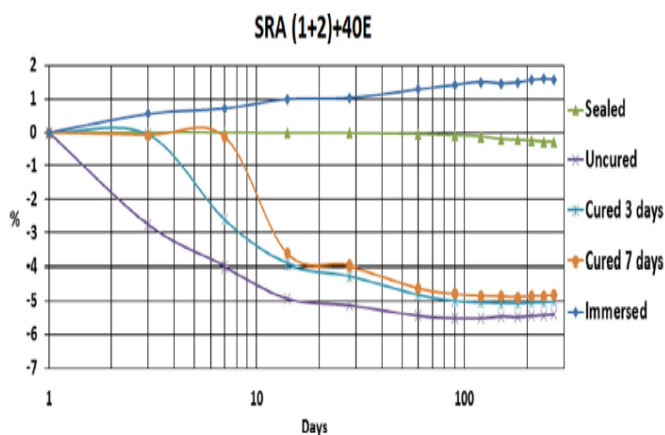


Fig. 7. Mass change of mixture SRA (1+2)+40E.

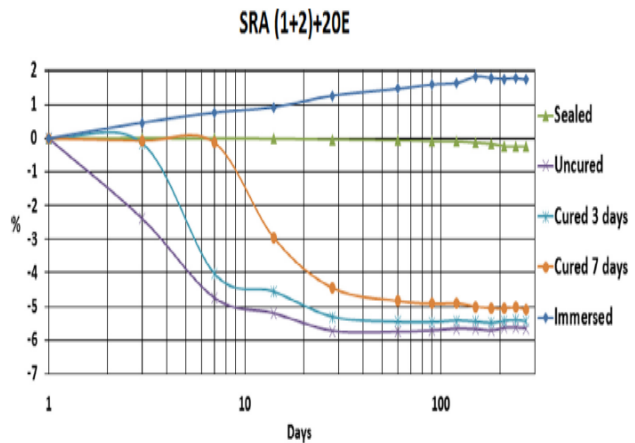


Fig. 6. Mass change of mixture SRA (1+2)+20E.

## ۲-۳- جمع شدگی کلی

نتایجی که در ادامه می آیند ، به شکل نمودار هایی ارائه شده اند ، که با استفاده از اندازه گیری میانگین ۷ نمونه برای هر ترکیب بدست آمده اند. برای هر ترکیب ، منحنی های توپر مقادیر میانگین و منحنی های خط چین مقادیر میانگین + یا - یک انحراف معیار را نشان می دهند.

شکل ۱۳-۸ جمع شدگی کلی که تا سن ۹ ماهگی برای ترکیبات مختلف ثبت شده است ، با شکل نشان می دهد.

شکل ۸ نتایج بدست آمده از ترکیب مبنا که حاوی هیچ SRA یا پودر منبسط شونده ای نیست را نشان می دهد. نمونه های مستغرق در آب به علت به دست آوردن جرم از خود افزایش حجم نشان می دهند و نمونه های مهر و موم شده ، مقادیر جمع شدگی کمی را به سبب عدم خشک شدن تقریبی نشان می دهند.

با تمرکز روی نمونه های در معرض خشک شدن ، پس از مدت ۱۰ روز بالاترین جمع شدگی در نمونه های عمل آوری نشده مشاهده شده است ، پس از آن نمونه های با عمل آوری ۳ روزه و کمترین جمع شدگی در نمونه هایی مشاهده شده است که ۷ روز عمل آوری شده اند. رفتار مشاهده شده مطابق با روند از دست دادن جرم که در شکل ۲ ارائه شده است ، می باشد ، یا به عبارت دیگر ، زمانیکه خشک شدن بیشتری وجود دارد ، به تبع آن جمع شدگی گسترده تر است . این امر مورد توافق است که ساز و کار های جمع شدگی وابستگی بیشتری به سطوح رطوبت بالاتر دارند(کشش موئینگی و فشار از هم گسیختگی ) ، و ساختار های متخلخل یکسانی برای نمونه هایی که در معرض فرایند های مختلف عمل آوری بوده اند، می پذیرد.

با این وجود ، برای نمونه های در معرض خشک شدن ، از ۱۰ روز تا اندازه گیری نهایی یک وارونگی در منحنی های عمل آوری نشده و ۷ روز عمل آوری شده وجود دارد. بر خلاف مورد از دست دادن جرم ، در بلند مدت ، جمع شدگی نمونه های عمل آوری نشده بالاتر از نمونه های با عمل آوری ۷ روزه است . علت این نتیجه ی متناقض بعداً در بخش تخلخل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

شکل ۹ و ۱۰ نتایج بدست آمده از ترکیبات شامل SRA را ارائه می دهند. در سنین اولیه ، تفاوت های نه چندان بزرگی بین نمونه های با ۱ SRA (شکل ۹) و نمونه های ساخته شده با ۲ SRA (شکل ۱۰) وجود دارد ، که نمی تواند به تفاوت های از دست دادن جرم نسبت داده شود ، اما نسبتاً به اثر SRA وابسته است . برای هر دو ترکیب ، و برای نمونه های در معرض خشک شدن ، از



۱۰ روز تا اندازه گیری نهایی در موقعیت نسبی منحنی های عمل آوری نشده و ۷ روز عمل آوری شده یک وارونگی وجود دارد ، مشابه حالتی که برای ترکیب مبنا مشاهده شد، که به معنای جمع شدگی بالاتر برای دوره ی عمل آوری طولانی تر می باشد ، که یک تمایل غیرمنتظره است .

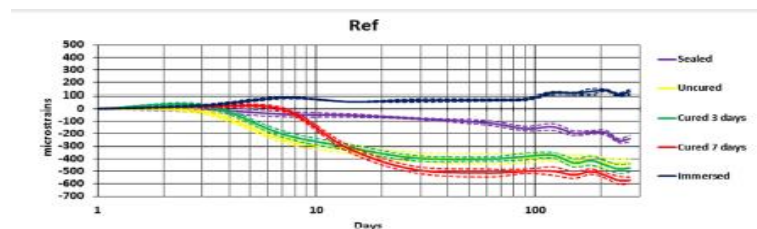


Fig. 8. Length variation of mixture Ref.

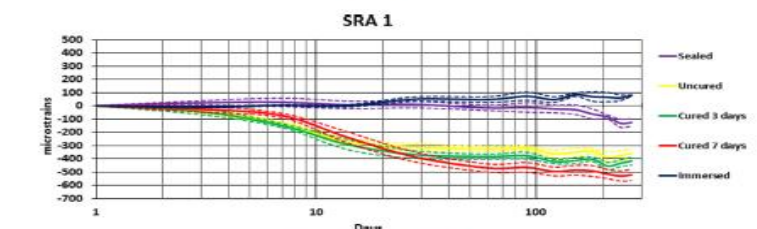


Fig. 9. Length variation of mixture SRA1.

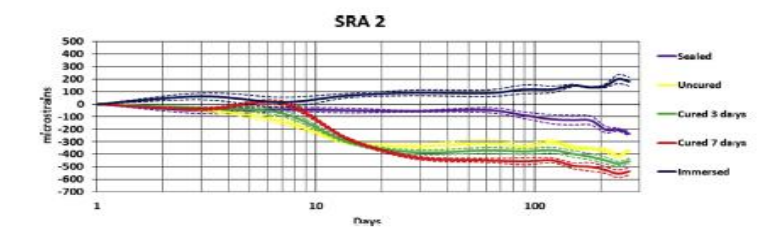


Fig. 10. Length variation of mixture SRA2.

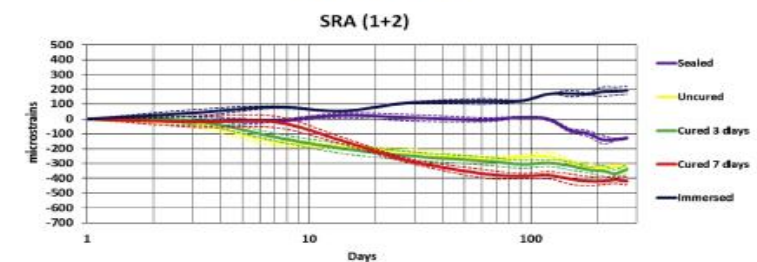


Fig. 11. Length variation of mixture SRA (1 + 2).

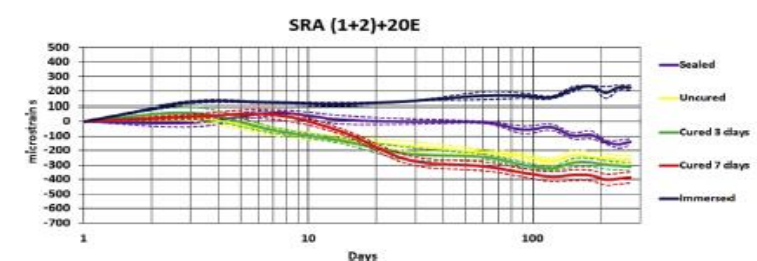


Fig. 12. Length variation of mixture SRA (1 + 2) + 20E.

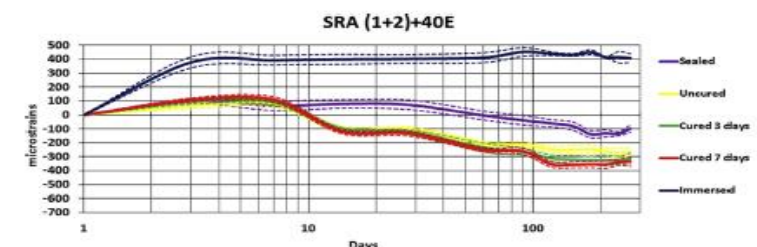


Fig. 13. Length variation of mixture SRA (1 + 2) + 40E.

شکل ۱۱ نتایج جمع شدگی بدست آمده از هر دو SRA را ارائه می کند. منحنی ها الگویی مشابه منحنی های ارائه شده در شکل های ۹ و ۱۰ اما با یک تاثیر متقابل و مطابق با کار قبلی [۶] را نشان می دهند. وارونگی در جایگیری نسبی منحنی های عمل آوری نشده و ۷ روز عمل آوری نیز قابل رؤیت است که تاثیر متداوم فرایند های مختلف عمل آوری را نشان می دهد.

شکل ۱۲ نتایج جمع شدگی بدست آمده از ترکیب ساخته شده از هر دو SRA و پودر منبسط شونده با دوز کمتر ( $20 \frac{Kg}{m^3}$ ) را ارائه می دهد. مزیت وابسته به استفاده از پودر منبسط شونده در سنین اولیه قابل رؤیت است . در واقع پس از ۱۰ روز، جمع شدگی نمونه هایی که طی ۷ روز عمل آوری شده اند، صفر و جمع شدگی نمونه های عمل آوری نشده و ۳ روز عمل آوری شده فقط ۱۰۰ میکرواسترین است . در بلند مدت همچنین می توانیم وارونگی در جایگیری نسبی منحنی های عمل آوری نشده و ۷ روز عمل آوری شده را مشاهده کنیم .

شکل ۱۳ نتایج بدست آمده از ترکیب ساخته شده از هر دو SRA و پودر منبسط شونده با دوز بالاتر ( $40 \frac{Kg}{m^3}$ ) را ارائه می دهد. انبساط اولیه مربوط به استفاده ی بیشتر از پودر منبسط شونده ، بالاتر است ، و پس از ۱۰ روز ، هیچ یک از منحنی ها ، جمع شدگی را نشان نمی دهند. به هر حال ، نمونه های مستغرق انبساط قابل توجه ، ۴۰۰ میکرواسترین از خود نشان می دهند و خطر ترک خوردگی برای نمونه های در شرایط مشابه افزایش می یابد. برای نمونه های در معرض خشک شدن ،



در بلند مدت ، مجدداً بالاترین جمع شدگی را در نمونه های ۷ روز عمل آوری شده وپایین ترین جمع شدگی را در نمونه های عمل آوری نشده مشاهده کردیم .

جدول ۹ نتایج جمع شدگی کلی بدست آمده در ۱، ۳، ۶ و ۹ ماه و بدون عمل آوری و در معرض بیشترین حد عمل آوری را نشان می دهد. در جدول ۹ ، مقادیر درون پرانتز تفاوت نمونه های عمل آوری نشده را نشان می دهند. به عنوان یک مثال ، مقدار (۳۲٪ +) داده شده در سلول منطبق با اندازه گیری در ۹ ماه ترکیب مبنا بدین وسیله بدست آمده است :

$$\frac{-573}{-435} \times 100 - 100 = +32$$

۵۷۳- میکرو استرین جمع شدگی در ۹ ماه نمونه های با ترکیب مبنا و عمل آوری ۷ روزه است .

۴۳۵- میکرواسترین جمع شدگی در ۹ ماه نمونه های با ترکیب مبنا و بدون عمل آوری است .

۳۲+ درصد جمع شدگی که به سبب عمل آوری ۷ روزه افزایش می یابد.

این موضوع مشخص شد که نمونه های عمل آوری شده جمع شدگی کلی بلند مدت بالاتری نسبت به نمونه های عمل آوری نشده دارند و تفاوت برای این بتن مقاومت پایین بسیار قابل توجه است . علاوه بر مقایسه اثر عمل آوری بلند مدت ، تحلیل جمع شدگی در سنین اولیه (جدول ۱۰ ) نیز دارای اهمیت است . تحلیل نتایج نشان می دهد که فرایند های عمل آوری منجر به کاهش قابل توجه در جمع شدگی کلی می شوند.

جدول ۹ - اثر عمل آوری در دراز مدت بر جمع شدگی کلی										
Mixture		Total shrinkage ( $\times 10^{-6}$ )								Compared average
		Uncured				Cured 7 days				
		Age (months)				Age (months)				
		1	3	6	9	1	3	6	9	
SCC	Ref	-386	-394	-409	-435	-486 (+26%)	-500 (+27%)	-502 (+23%)	-573 (+32%)	+27
	SRA1	-313	-320	-343	-359	-387 (+24%)	-465 (+45%)	-493 (+44%)	-522 (+45%)	+40
	SRA2	-336	-336	-353	-374	-424 (+26%)	-455 (+35%)	-500 (+42%)	-536 (+43%)	+37
	SRA (1 + 2)	-224	-258	-321	-324	-280 (+25%)	-384 (+49%)	-419 (+31%)	-419 (+29%)	+34
	SRA(1 + 2) + 20E	-170	-238	-244	-260	-265 (+56%)	-353 (+48%)	-371 (+52%)	-385 (+48%)	+51
	SRA (1 + 2) + 40E	-103	-213	-246	-265	-133 (+29%)	-260 (+22%)	-354 (+44%)	-334 (+26%)	+30

جدول ۹ - اثر عمل آوری در سنین اولیه بر جمع شدگی کلی								
Mixture		Total shrinkage (×10 <sup>-6</sup> )						Compared average
		Uncured			Cured 7 days			
		Age (days)			Age (days)			
		3	7	14	3	7	14	
SCC	Ref	-24	-246	-324	+17 (-170%)	-5 (-98%)	-318 (-2%)	-90
	SRA1	-42	-138	-274	-26 (-38%)	-74 (-46%)	-241 (-12%)	-32
	SRA2	-40	-137	-304	-39 (-3%)	+8 (-106%)	-277 (-9%)	-39
	SRA (1 + 2)	-32	-151	-189	-19 (-41%)	-19 (-87%)	-145 (-23%)	-50
	SRA (1 + 2) + 20E	+28	-68	-123	+35 (-25%)	+47 (-169%)	-69 (-43%)	-79
	SRA (1 + 2) + 40E	+68	+79	-102	+108 (-59%)	+111 (-41%)	-118 (+16%)	-28

### ۳-۳-تخلخل

در بخش قبل مشاهده شد که نمونه هایی که ۳ یا ۷ روز عمل آوری شده اند ، جمع شدگی بالاتری نسبت به نمونه های عمل آوری نشده نشان می دهند . از آنجاییکه که نتایج به نظر مخالف با آنچه که به عنوان روش مناسب ساخت و ساز پیشنهاد می گردد اشاره دارند[۱،۶] ، این موضوع دارای اهمیت است که بررسی کنیم آیا این افزایش جمع شدگی با زمان عمل آوری ، با اصلاح ساختار

خلل و فرج همان طور که در مواد سیمانی انتظار داشتیم ، مرتبط بوده است یا نه ؟ نمودار شکل ۱۴ ، اندازه خلل و فرج دو نمونه ، که با استفاده از روش پیشرانی جیوه بدست آمده اند ، را نشان می دهد.

هر دو نمونه متعلق به ترکیب SRA۲ بوده اند. یکی از نمونه ها در معرض دوره ی عمل آوری اضافی بلافاصله پس از جداسازی قالب نبوده است ، در حالیکه نمونه ی دیگر در معرض یک دوره ی ۷ روزه ی عمل آوری اضافی بوده است .

از تحلیل شکل ۱۴ و داده های ارائه شده در جدول ۱۱، این موضوع را می توان نتیجه گرفت که قطر میانگین منافذ در نمونه ی در معرض دوره ی عمل آوری ۷ روزه اضافی کمتر است.

جدول ۱۱ - قطر حفرات در نمونه SRA۲			
عمل آوری نشده		۷ روز عمل آوری شده	
قسمت	$D_m (\mu m)$	قسمت	$D_m (\mu m)$
۱	۰.۳۵	۱	۰.۱۴
۲	۰.۳	۲	۰.۰۹
۳	۰.۳۲	۳	۰.۱۵
۴	۰.۳	۴	۰.۱۹
۵	۰.۳۷	۵	۰.۱۴
۶	۰.۳	۶	۰.۱۶
۷	۰.۳	۷	۰.۱۷
۸	۰.۳۸	۸	*
۹	۰.۳۲	۹	۰.۱۲

\* اندازه گیری نشده است

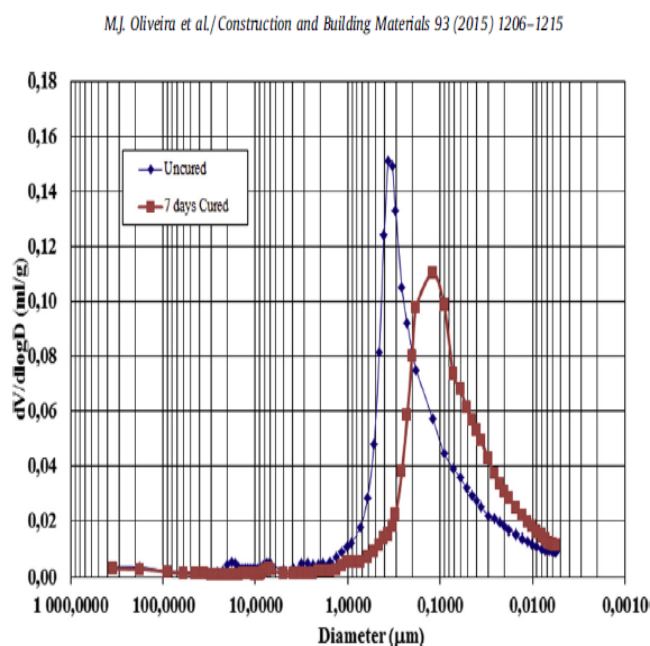


Fig. 14. Pore diameter of the section 1 for the uncured and 7 days cured samples.

به علت بودجه محدود و به این دلیل که هدف تایید یک تغییر مورد انتظار در ریزساختار به واسطه ی عمل آوری بهتر بود، آزمایش تنها روی یک ترکیب انجام گرفت .

برای مقادیر معمول رطوبت نسبی محیط ، جمع شدگی ناشی از خشک شدن معمولاً به عنوان نتیجه ی اصلی کشش موئینگی و فشار از هم گسیختگی معرفی می گردد. با آغاز خشک شدن بتن ، فرایند با خالی شدن منافذ بزرگتر آغاز می گردد ، و توسط منافذ با ابعاد کوچکتر به صورت متوالی ادامه می یابد، که منجر به افزایش کشش مایع در منافذ موئینه می شود . آزاد شدن آب ژله ای در منافذ بسیار کوچک نیز به علت فشار از هم گسیختگی ، جمع شدگی را افزایش می دهد.

به عنوان مثال برای فشار موئینگی یک منفذ استوانه ای ایده آل ، فشار موئینگی به وسیله معادله لاپلاس ((Eq.(۱)) مقدار سنجی می گردد:

$$P'' - P' = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (۱)$$

شعاع انحنای منسیوس  $r =$  کشش سطحی مایع روزه ای  $\sigma =$  کشش بخار  $P'' =$

زاویه تر شدگی  $\theta =$  کشش مایع  $P' =$

اگر فرض شود که مایع تمامی دیواره های منافذ را مرطوب می سازد و ترشده گی کامل (  $\theta=0$  ) قابل در نظر گرفتن است ، شعاع انحنای منسیوس برابر با شعاع منفذ است. با به کارگیری معادله (۱) می توانیم کشش موئینگی را برای دو شعاع متوسط منافذ نمونه های آزمایش شده تخمین بزنیم . با در نظر گرفتن کشش سطحی مایع میانی برابر  $\frac{N}{m} = 10^{-3} \times 60$  :

$$dP_{Air\ dry} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} = \frac{2 \times 60}{0.35 \times 10^{-6}} = 0.34\ MPa$$

$$dP_{Cured} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} = \frac{2 \times 60}{0.14 \times 10^{-6}} = 0.86\ MPa$$

تفاوت فشار از یک مورد تا یک مورد دیگر بیشتر از دو برابر است. از این رو ، وجود منافذ کوچکتر در هماهنگی با وقوع یک جمع شدگی بزرگتر است .

#### ۴ - نتایج

همان طور که انتظار می رفت ، کاهش جمع شدگی بتن ناشی از حضور SRA مشاهده شد. همان طور که پیش از این به اثبات رسید ، کاهش با استفاده از دو محصول SRA سازگار بهبود یافت ، و کاهش جمع شدگی بیشتری هنگامیکه پودر منبسط شونده در ترکیب با دو SRA استفاده می شود ، به ویژه در سنین اولیه مشاهده شده است . تمرکز اصلی در این کار روی تاثیر فرایند عمل آوری بر جمع شدگی کلی بتن خودمتراکم کم مقاومت بوده است .

آزمایش ها بر روی نمونه های عمل آوری نشده ، در معرض عمل آوری ۳ روزه و عمل آوری ۷ روزه انجام گرفته است . نتایج بدست آمده نشان می دهند که در تمام ترکیبات بتن مورد آزمایش ( با یا بدون افزودنی های کاهنده جمع شدگی و محصول منبسط شونده ) بالاترین جمع شدگی کلی بلندمدت در نمونه های ۷ روز عمل آوری شده و پایین ترین جمع شدگی کلی بلند مدت در نمونه های عمل آوری نشده حاصل شده است.

جمع شدگی کلی بالاتر به اصلاح تخلخل ساختاری مرتبط بوده است.

نتایج همچنین نشان می دهند که زمان عمل آوری برای به حداقل رساندن جمع شدگی در سنین اولیه ضروری است . این امر موجب کمتر شدن کاهش جرم ناشی از خشک شدن می شود که سبب اثر تاخیری در گسترش جمع شدگی می گردد. این موضوع برای تمایل به ترک خوردگی اولیه دارای اهمیت است.