



دانشگاه تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۰  
نالز شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی  
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



# اولین کنفرانس ملی سبک

## تأثیر استفاده از سنگدانه سبک‌وزن لیکا در کاهش جمع‌شدگی ملات

صادق قورچیان<sup>۱\*</sup>، محمد شکرچی‌زاده<sup>۲</sup>، بابک احمدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس انستیتو مصالح ساختمانی پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

از چند سال گذشته، جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های معمولی توسط سنگدانه‌های سبک‌وزن به عنوان راه حلی برای کنترل جمع‌شدگی بتن مطرح شده است. سنگدانه‌های سبک‌وزن اشباع مانند منابع آب داخلی که رطوبت را تدریجاً به داخل خمیر سیمان آزاد می‌کنند، عمل می‌کنند. در واقع آنها رطوبت از دست رفته بتن را تأمین کرده و منجر به عمل‌آوری داخلی می‌شوند. همچنین، سنگدانه‌های سبک‌وزن با توجه به ریزساختار متخلخلی که دارند باعث کاهش فشار مویینگی در منافذ می‌شوند که این امر نقش مهمی را در کاهش جمع‌شدگی ایفا می‌کند. در این تحقیق از لیکا به عنوان سنگدانه سبک‌وزن متخلخل با نسبت‌های جایگزینی مختلف استفاده شده است. اندازه‌گیری جمع‌شدگی طبق استاندارد ASTM C 157 بر روی نمونه‌های ملات با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۴ انجام گرفت. این نمونه‌ها ۴۳ روز در معرض خشک‌شدگی قرار داشتند. نتایج به‌دست آمده به‌طور آشکار نشان‌دهنده کاهش جمع‌شدگی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جمع‌شدگی، سنگدانه سبک‌وزن، لیکا، عمل‌آوری داخلی، فشار مویینگی، ریزساختار متخلخل

### ۱- مقدمه

در ابتدای قرن بیست و یکم میلادی، عمل‌آوری داخلی به عنوان فن‌آوری جدیدی برای ارتقای کیفیت و دوام بتن‌های فوق‌توانمند مطرح شد. در فرایند عمل‌آوری داخلی، آب مورد نیاز بتن توسط منابع آب داخلی تأمین می‌شود. یکی از موادی که به عنوان منابع آب داخلی به کار رفته است، سنگدانه‌های سبک‌وزن می‌باشد. سنگدانه‌های سبک‌وزن از جمله لیکا، به دلیل ساختار متخلخلی که دارند قادرند آب قابل توجهی جذب کنند و آب جذب شده را بعد از اختلاط با بقیه مصالح بتن، به مرور رها کرده و موجب عمل‌آوری داخلی بتن شوند [۱]. ابتدا عمل‌آوری داخلی برای بتن‌های با آب به سیمان کم مطرح شد ولی اخیراً برخی محققین این فن‌آوری را به بتن‌های با نسبت آب به سیمان زیاد نیز بسط داده‌اند [۲].

با اینکه معمولاً زمان زیادی لازم است تا از تکنولوژی‌های نوظهور در زمینه بتن در پروژه‌های اجرایی استفاده شود، تا کنون در

\* تهران، خیابان انقلاب، خ وصال، کوچه بهنام، پلاک ۸، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، تلفن: ۰۰۹۱۲۲۴۷۱۷۹۰، [sghourchian@ut.ac.ir](mailto:sghourchian@ut.ac.ir)

ایالات متحده آمریکا پروژه های مختلفی از تکنولوژی عمل آوری داخلی بهره جسته اند. در منطقه تگزاس شمالی، تا تابستان سال ۲۰۰۷ میلادی، بیش از ۱/۵ میلیون متر مکعب بتن عمل آوری شده به صورت داخلی به وسیله سنگدانه های سبک وزن در پروژه های مختلف به کار گرفته شد [۳]. در سال ۲۰۰۵، حدود ۱۹۰۰۰۰ متر مکعب بتن عمل آوری شده به صورت داخلی، فقط در یک پروژه در شهر هاتچینز<sup>۱</sup> واقع در ایالت تگزاس<sup>۲</sup> آمریکا به کار رفت که احتمالاً بزرگترین پروژه‌ای است که تا به حال از مزیت عمل آوری داخلی به وسیله سنگدانه های سبک‌وزن در آن استفاده شده است. نتایج حاکی از بهبود خواص بتن در اثر عمل آوری داخلی بوده است [۴، ۵].

سالیانه در کشور ما عمل آوری خارجی نامطلوب در پروژه های عمرانی مختلف باعث به خطر افتادن روند کسب مقاومت بتن همچنین کاهش دوام طولانی مدت بتن می شود. تکنولوژی عمل آوری داخلی بتن به وسیله سنگدانه سبک وزن به عنوان یک فن آوری جدید که هم از لحاظ علمی و هم اجرایی در جهان تایید شده است می تواند باعث بهبود عملکرد و افزایش طول عمر سازه های بتنی داخل کشور شود.

در این تحقیق، تاثیر عمل آوری داخلی به وسیله سنگدانه سبک وزن لیکا بر روی جمع شدگی ناشی از خشک شدن ملات های با نسبت آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۴ بررسی شده است. در ادامه این مقاله مصالح به کار رفته و روش آزمایش توضیح داده شده است. سپس در انتها نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مکانیزم اثر لیکا به عنوان سبک دانه سبک وزن برای کاهش جمع شدگی

همانطور که در بخش قبل گفته شد لیکا به عنوان سنگدانه سبک وزن در صورت از پیش مرطوب شدن قادر به عمل آوری داخلی بتن می باشد. مکانیزم اثر عمل آوری داخلی به صورت زیر می باشد:

قبل از گیرش خمیر سیمان، جمع شدگی شیمیایی سبب کاهش حجم خمیر سیمان تازه می شود [۷]. در بتن های با نسبت آب به سیمان بالای ۰/۳۸، بعد از گیرش خمیر سیمان و تولید یک مقاومت محدود در مقابل تغییر شکل، جمع شدگی شیمیایی در غیاب منابع آب اضافی باعث خود خشک شدگی در بتن می شود [۸]. این پدیده خودخشک شدگی نام دارد به این دلیل که رطوبت نسبی داخلی کاهش می یابد بدون اینکه انتقال جرمی به خارج صورت گیرد. سنگ دانه های سبک وزن قادرند آب جذب شده خود را رها کرده و خودخشک شدگی را کاهش دهند.

در اثر خود خشک شدگی (که برای بتن های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ رخ می دهد) و یا خشک شدن بتن در اثر شریط محیطی، منافذ داخل بتن به حالت نیمه اشباع درمی آید. هلالی محلول داخل منافذ، فشار مویینه قابل توجهی ایجاد خواهد کرد، که به طور مستقیم با کشش سطحی محلول داخل منافذ و به طور معکوس با اندازه بزرگترین منفذ نیمه اشباع متناسب است.

معادله (۱) نشان دهنده معادله یانگ است که این رابطه را توصیف می کند [۹]:

$$\sigma = (-2\gamma \cos\theta)/r \quad (1)$$

که  $\sigma$  فشار مویینه یا تنش،  $\gamma$  کشش سطحی محلول داخل منفذ،  $\theta$  زاویه تماس و  $r$  شعاع منفذ می باشد. از معادله (۱)، واضح است که دو راه عملی برای کاهش بزرگی تنش های مویینه وجود دارد. اولین راه کاهش کشش سطحی محلول داخل منفذ به وسیله استفاده از مواد افزودنی شیمیایی کاهنده جمع شدگی [۱۰ و ۱۱] می باشد و راه دوم عمل آوری داخلی با استفاده از سنگدانه های سبک وزن به عنوان منابع آب داخلی با شعاع منافذ بزرگتر است. وقتی منافذ بزرگتر، موجود نیستند، تنش های مویینه در طول زمان سریعاً افزایش پیدا می کنند، در نتیجه، منافذ کوچکتر درون سیمان در حال هیدراته شدن خشک شده و در ادامه هیدراتاسیون اندازه منافذ مویینه پر از آب کاهش پیدا می کند.

<sup>1</sup> Hutchins

<sup>2</sup> Texas

<sup>3</sup> Menisci

<sup>4</sup> Young's equation

این فشار موئینه به طور همزمان جمع‌شدگی قابل توجهی در ریزساختار خمیر سیمانی ایجاد خواهد کرد که می‌توان آن را با استفاده از نسخه اصلاح شده معادله مکنزی<sup>۱</sup> تخمین زد [۱۲ و ۱۳]:

$$\varepsilon = (\sigma S/3) [(1/K) - (1/K_0)] \quad (2)$$

که در آن  $\varepsilon$  کرنش خطی اندازه‌گیری شده،  $K$  مدول حجمی مواد متخلخل،  $K_0$  مدول اسکلت جامد و  $S$  سطح اشباع در فضای منفذی (دارای مقادیر ۰ تا ۱) می‌باشد. وقتی این تنش‌ها و کرنش‌های تولید شده به صورت خودبه‌خودی، به اندازه کافی قابل توجه می‌شوند، ممکن است باعث ایجاد ترک در سنین اولیه شوند که این ترک‌ها با ایجاد مسیرهای بازی برای نفوذ مواد مخرب، طراحی مورد نظر و عمر مفید سازه‌های بتنی را در معرض خطر قرار می‌دهند.

هنگامی که خودخشک‌شدگی و یا خشک شدن به دلیل شرایط محیطی اتفاق می‌افتد و  $\sigma$  افزایش می‌یابد، کاهش هم‌زمان رطوبت نسبی در خمیرسیمان در حال هیدراته شدن رخ می‌دهد، که توسط معادله کلونین<sup>۲</sup> بیان شده است [۹]:

$$\sigma = [RT \ln(RH)] / V_m \quad (3)$$

که  $R$  ثابت گازها،  $T$  دمای مطلق،  $RH$  رطوبت نسبی، و  $V_m$  حجم مولی محلول داخل منافذ می‌باشد. لیکا از پیش اشباع شده قادر است بعد از اختلاط آب جذب شده را رها کرده و رطوبت نسبی را افزایش دهد. با افزایش رطوبت نسبی بتن، طبق رابطه (۳) تنش کاهش یافته در نتیجه جمع‌شدگی کاهش می‌یابد.

### ۳- مصالح

#### ۳-۱- سیمان

از سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدی کارخانه سیمان تهران استفاده شد. فازهای اصلی سیمان به کار رفته در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- ترکیبات اصلی سیمان مصرفی

نام ترکیب	مقدار (درصد)
C <sub>3</sub> S	۶۲/۷
C <sub>2</sub> S	۱۳/۶
C <sub>3</sub> A	۲/۹
C <sub>4</sub> AF	۱۰/۸

#### ۳-۲- سنگدانه

##### ۳-۲-۱- ماسه

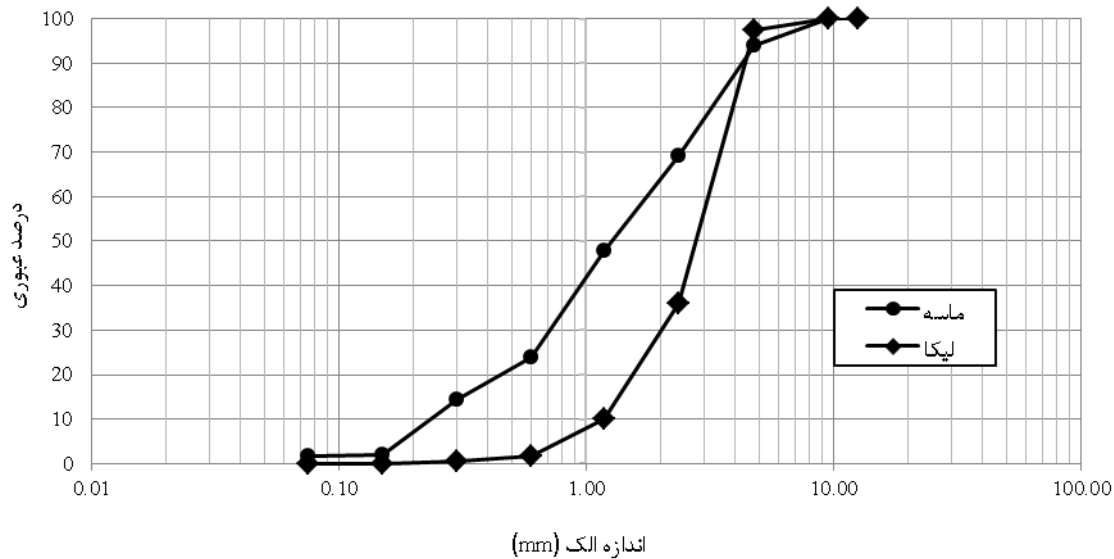
در این تحقیق، از ماسه معمولی به عنوان سنگدانه اصلی و لیکا به عنوان سنگدانه سبک وزن برای عمل‌آوری داخلی استفاده شد. جذب آب و وزن مخصوص ظاهری سنگ دانه‌ها طبق آزمایش استاندارد ASTM C 128 اندازه‌گیری شده است و نتایج آن در جدول (۲) آمده است. همچنین نمودار دانه بندی سنگدانه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات سنگدانه‌ها بدست آمده بر اساس ASTM C 128

سنگدانه	درصد جذب آب	وزن مخصوص ظاهری
ماسه	۲/۷	۲/۶۷
لیکا	۱۱	۱/۴۷

<sup>1</sup> MacKenzie's equation

<sup>2</sup> Kelvin equation



شکل ۱- نمودار دانه بندی سنگدانه ها

### ۳-۲-۲-۳- لیکا

واژه لیکا از عبارت Light Expanded Clay Aggregate (دانه رس منبسط شده) گرفته شده است. در روش تولید این دانه‌ها، ابتدا خاک رس به عنوان ماده اولیه سبکدانه از معادن خاک رس به واحد فرآوری کارخانه حمل شده، بعد از نمونه گیری و کنترل دقیق مواد شیمیایی و حصول اطمینان از نداشتن مواد شیمیایی و آهکی و پس از آبدهی به صورت گل رس وارد کوره گردان می‌شود. وقتی گل رس در درجه حرارتی حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد قرار می‌گیرد، گازهای ایجاد شده دانه‌ها را منبسط می‌کند و هزاران سلول هوای ریز درون آنها تشکیل می‌شود. با سرد شدن مصالح، حباب‌های هوا به صورت فضاهای منفک باقی مانده و سطح آنها سخت می‌شود. لیکا ظرفیت جذب زیادی دارد و قادر است آب جذب شده را در موقع مناسب به خمیر سیمان منتقل کرده و موجب عمل آوری داخلی بتن شود [۱].

در جدول (۳) نتایج جذب آب اندازه گیری شده لیکا آمده است. روش کار آزمایش تعیین جذب آب در زمان های مختلف به این صورت بوده است که لیکا ابتدا در آون به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. سپس به ترتیب ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت در آب خیسانده شدند. سپس به روش گفته شده در آزمایش ASTM C 128 به حالت سطح خشک<sup>۱</sup> رسانیده شده و حدود ۵۰۰ گرم از لیکا با سطح خشک داخل آون به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. درصد رطوبت از رابطه زیر بدست آمد:

$$\text{درصد جذب آب لیکا در زمان } t=100 * (\text{جرم خشک} / \text{جرم خشک-جرم لیکا با سطح خشک در زمان } t)$$

جدول ۳- جذب آب لیکا در زمان های مختلف

زمان (ساعت)	۶	۱۲	۲۴	۴۸
درصد جذب آب	۹/۸۹	۱۰/۲	۱۱	۱۱/۷

کاسترو<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۱ جذب آب نسبی (S) را برای شیل<sup>۳</sup> منبسط شده، رس منبسط شده و اسلیت<sup>۴</sup> منبسط شده تعریف کردند که طبق رابطه (۴) با زمان t (بر حسب روز) متناسب است [۱۴]. در این رابطه A برای زمان ۰ الی ۴۸ ساعت، مقداری بین ۰/۰۷ الی ۰/۱۳ را داراست.

$$S = t^A \quad (4)$$

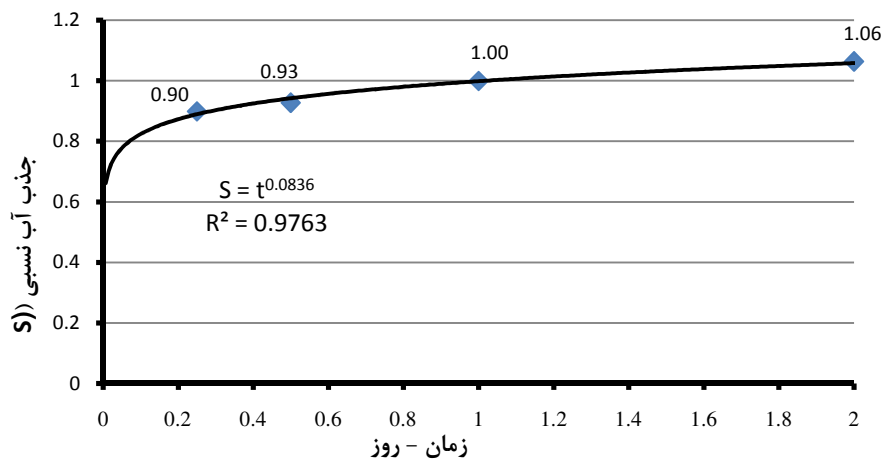
<sup>1</sup> Surface Dry  
<sup>2</sup> Castro  
<sup>3</sup> Shale  
<sup>4</sup> Slate

طبق تعریف، جذب آب نسبی (S) برابر است با جذب آب در هر زمان تقسیم بر جذب آب ۲۴ ساعته که برای سنگدانه لیکا در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- جذب آب نسبی لیکا در زمان های مختلف

زمان (ساعت)	۶	۱۲	۲۴	۴۸
جذب آب نسبی	۰/۹	۰/۹۳	۱	۱/۰۶

اگر رابطه ۴ را برای لیکا بدست آوریم ضریب A برابر ۰/۰۸۳۶ بدست می آید (شکل ۲).



شکل ۲- جذب آب وابسته به زمان سنگدانه لیکا

### ۳-۳- فوق روان کننده

از فوق روان کننده پایه پلی کربوکسیلاتی برای افزایش روانی ملات ها استفاده شد.

### ۴- طرح اختلاط نمونه ها

در مرحله اول، سه نمونه مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۳ و در مرحله بعد سه نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۴ ساخته شد. برای هر نسبت آب به سیمان، یک نمونه شاهد بدون لیکا و دو نمونه حاوی لیکا ساخته شد. نمونه های حاوی لیکا به این ترتیب نام گذاری شده است که درصد نشان داده شده در کنار کلمه لیکا نشان دهنده درصد حجمی لیکا در کل نمونه می باشد. آب عمل آوری داخلی میزان آبی است که لیکا قبل از اختلاط در مدت ۲۴ ساعت جذب کرده است و بعد از اختلاط به مرور آب مذکور را رها کرده و باعث عمل آوری داخلی بتن می شود. مقدار آن از ضرب مقدار لیکا در ظرفیت جذب آب لیکا بدست می آید. اسلامپ طبق آزمایش ASTM C 1437 اندازه گیری شد. برای داشتن نمونه های یکسان از نظر کارپذیری، اسلامپ تمامی نمونه ها به کمک فوق روان کننده (در صورت نیاز) در محدوده ۱۹ الی ۲۱ سانتیمتر تنظیم شد. طرح اختلاط نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۴ به ترتیب در جدول ۵ و ۶ نشان داده شده است.

جدول ۵- طرح اختلاط نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۳

نمونه	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	لیکا خشک (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	اسلامپ (cm)	آب عمل آوری داخلی (kg/m <sup>3</sup> )
شاهد	۷۰۰	۲۱۰	۱۵۱۷	۰	۲/۸	۲۱	۰
لیکا ۲۰٪	۷۰۰	۲۱۰	۹۸۲	۲۹۲	۳/۸۵	۲۰	۳۲/۱۲
لیکا ۳۰٪	۷۰۰	۲۱۰	۷۱۵	۴۲۸	۳/۵	۲۱	۴۸/۱۸

جدول ۶- طرح اختلاط نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۴

نمونه	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	لیکا خشک (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان- کننده (kg/m <sup>3</sup> )	اسلامپ (cm)	آب عمل آوری داخلی (kg/m <sup>3</sup> )
شاهد	۷۰۰	۲۸۰	۱۳۴۰	۰	۰	۲۱	۰
لیکا ۲۰٪	۷۰۰	۲۸۰	۷۹۵	۲۹۲	۰	۱۹	۳۲/۱۲
لیکا ۳۰٪	۷۰۰	۲۸۰	۵۲۸	۴۳۸	۰	۲۰	۴۸/۱۸

## ۵- روش اختلاط

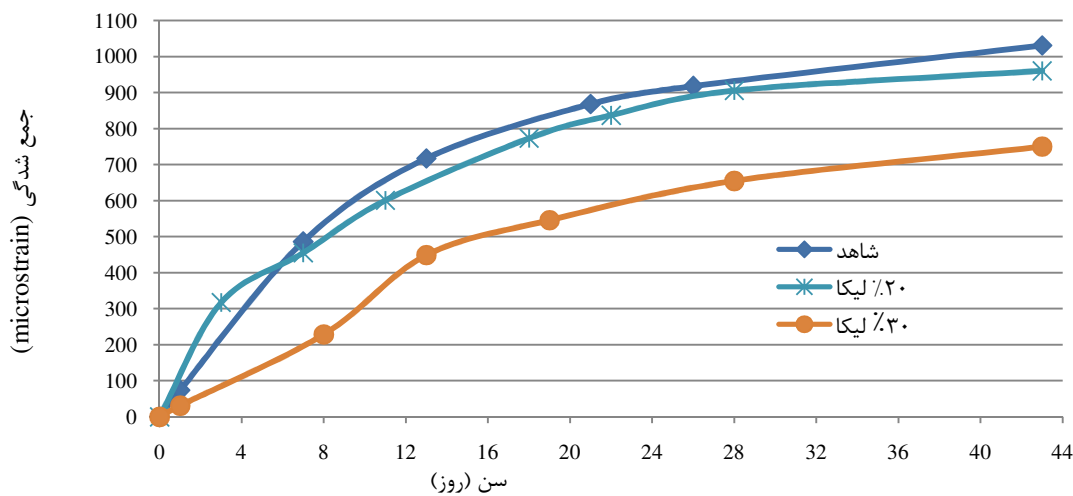
روش اختلاط بر اساس ASTM C 192 انجام گرفت. سنگدانه های لیکا در آون خشک شده و قبل از اختلاط به مدت ۲۴ ساعت در آب خیسانده شدند. ماسه در آون خشک شد و در هوای آزاد نگه داشته شد تا کامل خنک شود. آبی که برای خیساندن لیکا به کار رفت، شامل آبی بود که سنگدانه های لیکا در مدت ۲۴ ساعت جذب می کنند به علاوه آب طرح اختلاط. هنگام طرح اختلاط سنگدانه های لیکا به همراه آبی که در آن خیسانده شده بودند تماما به میکسر اضافه شدند.

## ۶- روش آزمایش جمع شدگی

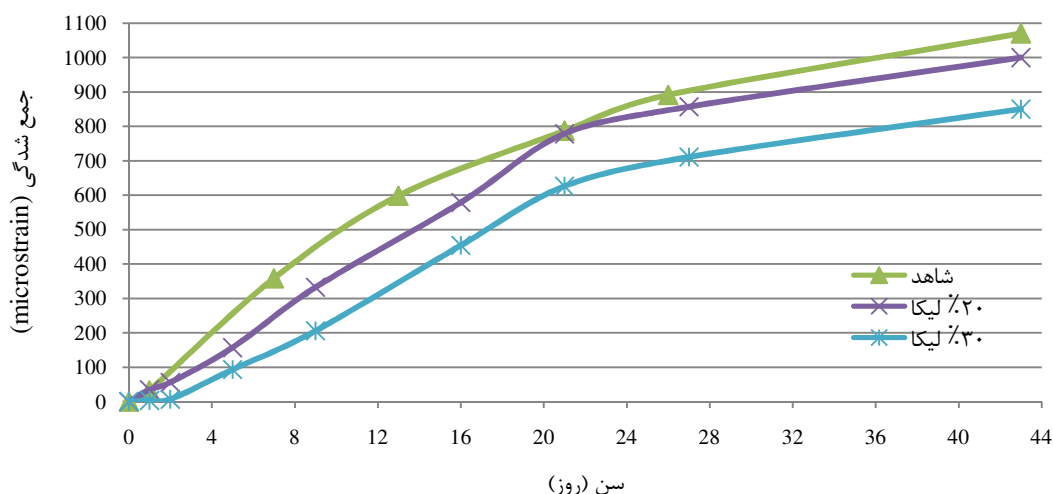
آزمایش جمع شدگی طبق روش استاندارد ASTM C 157 بر روی نمونه های با ابعاد mm 285 × mm 75 × mm 75 انجام شد. نمونه ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب باز شدند و درون اتاقی با دمای  $25 \pm 2^{\circ}C$  و درصد رطوبت  $50 \pm 4\%$  قرار داده شدند. اتاق با دما و رطوبت کنترل شده شرایط عمل آوری نامطلوب را مدل می کند که آزمون ها در معرض خشک شدن قرار دارند. قرائت طول آزمون ها بلافاصله بعد از بازشدن از قالب و در فواصل زمانی معین صورت گرفت.

## ۷- نتایج آزمایش جمع شدگی و کاهش جرم

نتایج مربوط به جمع شدگی نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۴ به ترتیب در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شده است. نمونه ها به مدت ۴۳ روز در معرض خشک شدن قرار داشتند. در شکل های (۳) الی (۶) سن نمونه ها از زمان باز شدن از قالب محاسبه شده است.

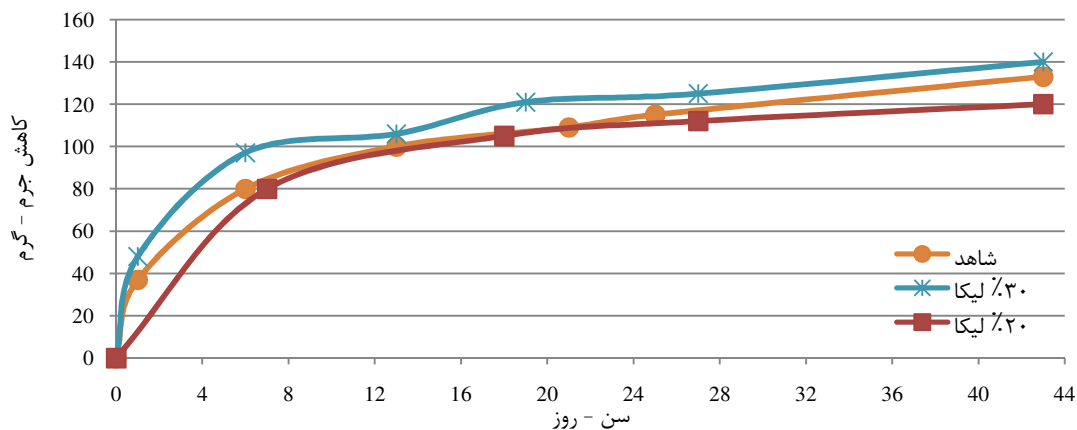


شکل ۳- نمودار جمع شدگی نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۳

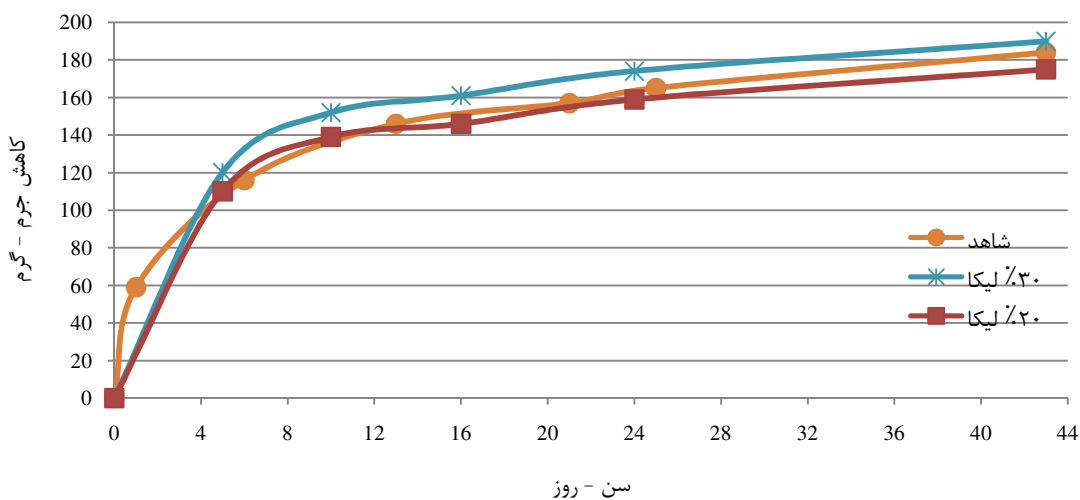


شکل ۴- نمودار جمع شدگی نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۴

همان طور که مشاهده می شود در هر دو نسبت آب به سیمان نمونه های حاوی ۳۰ درصد لیکا کمترین جمع شدگی را دارند. در شکل های (۵) و (۶)، به ترتیب نمودار کاهش جرم نمونه ها نشان داده شده است. نمونه ها به مدت ۴۳ روز در معرض خشک شدن قرار داشتند.



شکل ۵- نمودار کاهش جرم نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۳



شکل ۶- نمودار کاهش جرم نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۴

همان طور که در شکل (۵) و (۶) مشاهده می شود نمونه های حاوی ۳۰٪ لیکا دارای بیشترین کاهش جرم هستند.

## ۸- تفسیر نتایج آزمایش

با افزایش جایگزینی لیکا کاهش جمع شدگی در تمام نمونه ها مشاهده می شود. در تحقیقات گذشته اندازه متوسط منافذ لیکا حدود ۴۰۰ میکرومتر و اندازه تمامی منافذ آن بزرگتر از ۱۰۰ میکرومتر بدست آمده است [۱]. سنگدانه ای که دارای اندازه منافذ بزرگتر از ۰/۱ میکرومتر باشد برای عمل آوری داخلی مناسب است و قادر است آب جذب شده را به راحتی به خمیر سیمان اطراف خود انتقال داده و موجب عمل آوری داخلی بتن شوند [۱۵]. آب آزاد شده از طرف سنگدانه سبک وزن قادر است آب از دست رفته نمونه ای که در معرض خود خشک شدگی و یا خشک شدن در اثر شرایط محیطی قرار دارد را تامین کند و جمع شدگی خود به خودی و جمع شدگی ناشی از خشک شدن و در نتیجه جمع شدگی کلی را کاهش دهد. همچنین لیکا با قطر زیاد قادر است فشار مویینه بوجود آمده در خمیر سیمان که از عوامل ایجاد جمع شدگی می باشد را کاهش دهد. زیرا بر اساس رابطه (۱) که فرمول یانگ را نشان می دهد، فشار مویینه با قطر منافذ رابطه عکس دارد.

در هر دو طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳ افزایش جایگزینی لیکا باعث کاهش بیشتر جمع شدگی است. این خود نشان دهنده عمل آوری داخلی بوسیله مخازن آب داخلی تامین شده توسط لیکا می باشد زیرا با اضافه شدن لیکا از پیش مرطوب شده، مخازن آب داخلی بیشتری در دسترس است و بنابراین جمع شدگی بیشتر کاهش یافته است.

در آب به سیمان ۰/۳ لیکا توانسته جمع شدگی را بیشتر کنترل کند. بازدهی لیکا در کنترل جمع شدگی بتن های با نسبت آب به سیمان کم بیشتر است. زیرا آنها در معرض خودخشک شدگی قرار دارند و توانایی اصلی سنگدانه سبک وزن از جمله لیکا در کاهش خود خشک شدگی می باشد [۱۶ و ۱۷ و ۱۸].

بیشترین کاهش جرم مربوط است به نمونه هایی که دارای ۳۰٪ لیکا می باشند. زیرا دارای مجموع آب اختلاط و عمل آوری بیشتری نسبت به نمونه های دیگر هستند و به این دلیل نسبت به سایر نمونه ها بیشتر آب از دست داده اند [۱۸].

## ۹- نتیجه گیری

۱- سنگدانه سبک وزن قادر به عمل آوری داخلی بتن می باشد. جذب آب زیاد و توانایی زیاد برای واجذب آب و همچنین اندازه منافذ بزرگتر نسبت به منافذ خمیر سیمان، سنگدانه سبک وزن مانند لیکا را قادر به عمل آوری داخلی بتن می کند.

۲- لیکا جمع شدگی را کاهش می دهد. میزان کاهش در نمونه های با آب به سیمان کم، بیشتر است.

۳- با افزایش میزان جایگزینی سنگ دانه سبک وزن، میزان کاهش جمع شدگی بیشتر خواهد بود.

۴- با جایگزینی بخشی از ماسه به وسیله لیکا قادر خواهیم بود اثرات ناشی از عمل آوری نامطلوب را به حداقل برسانیم.

۵- باید توجه داشت اضافه کردن لیکا می تواند تاثیراتی بر مقاومت فشاری داشته باشد که جداگانه قابل ارائه خواهد بود.

## ۱۰- منابع

1. Jensen, O.M., *Internal Curing of Concrete*, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 196-ICC, RILEM Publications S.A.R.L., June 2007, 50 pp
2. Espinoza-Hijazin, G., and Lopez, M., *Extending Internal Curing to Concrete Mixtures with W/C Higher than 0.42*, Construction and Building Materials, V.25, No.3, March 2011, pp. 1236-1242
3. Villareal, V., *Internal Curing - Real World Ready Mix Production and Applications: A Practical Approach to Lightweight Modified Concrete*. ACI SP-256, Internal Curing of High-Performance Concrete: Laboratory and Field Experiences. Farmington Hills: American Concrete Institute. (pp. 45-56)
4. Cusson, D., and Hoogeveen, T., *Internal Curing of High-Performance Concrete with Pre-soaked Lightweight Aggregate Sand for Prevention of Autogenous Shrinkage Cracking*, Cement and Concrete Research, V.38, No.6, June 2008, pp. 757-765.
5. Villarreal, V., and Crocker, D., *Better Pavements through Internal Hydration*, Concrete International, Vol.29, No.2, February 2007, pp. 32-36.



6. Barcelo, L., Boivin, S., Rigaud, S., Acker, P., Clavaud, B., & Boulay, .*Linear vs. volumetric autogenous shrinkage measurement: Material behavior or Experimental artefact?* In B. Persson, & G. Fagerlund (Ed.), *Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, Lund: Lund University, 1999, pp. 109-125
7. Sant, G., Dehadrai, M., Lura, P., Bentz, D., Ferraris, C., Bullard, J., et al. (2009). *Detecting the Fluid-to-Solid transition in cement pastes: Part I - Assessment techniques*. *Concrete International*, 31 (6), 53-58.
8. P. Lura, J. Couch, O.M. Jensen, J. Weiss. *Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation*. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39, 10, 861-867
9. Alberty, R., & Daniels, F. (1980). *Physical Chemistry*. New York: John Wiley & Sons.
10. Shah, S., Weiss, W., & Yang, W. (1998). *Shrinkage cracking - Can it be prevented?* *Concrete International*, 20 (4), 51-55.
11. Bentz, D., Geiker, M., & Hansen, K. (2001). *Shrinkage-Reducing admixtures and early age desiccation in cement pastes and mortars*. *Cement and Concrete Research*, 31 (7), 1075-1085.
12. Mackenzie, J. (1950). *The elastic constants of a solid containing spherical holes*. *Proceedings of the Physics Society*, 683, 2-11.
13. Bentz, D., Garboczi, E., & Quenard, D. (1998). *Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials: Application to porous vycor glass*. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 6, 211-236.
14. Castro, J., Keiser, L., Golias, M., & Weiss, W. (2011). *Absorption and Desorption of Fine Lightweight Aggregate for Applications to Internally Cured Concrete Mixtures*. *Cement and Concrete Composites*, 33, 10, pp. 1001-1008.
15. Lura, P., Bentz, D.P., Lange, D.A., and Kovler, K., *Pumice Aggregates for Internal Water Curing*, *Proceedings of International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur, Evanston, IL, March 22-24, 2004*, pp. 137-151
16. Bentz, D., & Snyder, K. (1999). *Protected paste volume in concrete: Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate*. *Cement and Concrete Research*, 29 (11), 1863-1867.
17. Jensen, O., & Hansen, P. (2001). *Water-entrained cement-based materials: I. Principle and theoretical background*. *Cement and Concrete Research*, 31 (4), 647-654.
18. Henkensiefken, R. *Internal curing in cementitious systems made using saturated lightweight aggregate*, M.Sc. Thesis, Purdue University, December 2008