

## Experimental and numerical investigation of creep in lightweight aggregate concrete prepared from scoria and pumice aggregates

A. Entezari<sup>1\*</sup>

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

### ABSTRACT

Creep and drying shrinkage are two time-dependent features of concrete. In this study, the creep in four types of lightweight aggregate concrete (LWAC) made from scoria and pumice aggregates is examined. The strain due to the creep of LWAC is measured over a course of one year based on ASTM C512 standard. For a numerical assessment of creep, experimental findings are simulated in ABAQUS and the obtained outputs are compared with empirical results and proposed equations in ACI and CEB regulations. Analysis of empirical and numerical results shows that the long-term concrete behaviour depends on aggregate type, concrete compressive strength and applied stress on the samples. The comparison of the creep-induced strain between this type of concrete and ACI and CEB regulations indicates that during one year, the relationship proposed by ACI is consistent with concrete S1 and CEB with concrete P2, and after 365 days age, the relationship proposed by ACI is about %14 less than S1 and the relationship proposed by CEB is about %7 less than P2. The one-year study of LWAC aided by ABAQUS clarifies by defining appropriate parameters with experimental results in ABAQUS, the analytical long-term creep strain of concrete will be in good agreement with the experimental results.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 25 December 2023

**Revise Date:** 10 April 2024

**Accept Date:** 27 August 2024

### Keywords:

Scoria

Lightweight concrete

Pumice

Lightweight aggregate

Creep

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.426713.3282](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.426713.3282)

\*Corresponding author: Alireza Entezari.

Email address: [a.entezari@azaruniv.ac.ir](mailto:a.entezari@azaruniv.ac.ir)

## بررسی تجربی و عددی خزش بتن سبکدانه تهیه شده با سنگدانه‌های سبک اسکوریا (سنگ پا) و پومیس (سنگ پوکه)

علی‌رضا انتظاری<sup>\*</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

### چکیده

خزش و جمع شدگی ناشی از انقباض (افت) دو ویژگی وابسته به زمان بتن می‌باشند. در این تحقیق، بصورت تجربی و تحلیل عددی خزش بتن سبک‌دانه که از سنگدانه‌های سبک اسکوریا (سنگ پا) و پومیس (سنگ پوکه) تهیه شده بود مورد ارزیابی قرار گرفته است. کرنش ناشی از خزش بتن سبک‌دانه با استفاده از استاندارد *ASTM C512* برای مدت زمان یک سال اندازه‌گیری شده است. برای بررسی عددی خزش بتن نتایج حاصل از آزمایش در نرم‌افزار *ABAQUS* شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج تجربی و روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های *ACI* و *CEB* مقایسه گردید. تجزیه و تحلیل نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که رفتار بتن در دراز مدت تابع نوع سنگدانه، مقاومت فشاری بتن و تنش وارد بر نمونه‌ها می‌باشد. مقایسه کرنش ناشی از خزش پایه بتن سبک‌دانه با روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های *ACI* و *CEB* نشان می‌دهد در مدت یک سال رابطه پیشنهادی آیین‌نامه *ACI* با طرح اختلاط بتن *S1* (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه ماسه معمولی) و آیین‌نامه *CEB* با بتن *P2* (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه اسکوریا) مطابقت داشته و بعد از ۳۶۵ روز رابطه پیشنهادی *ACI* نسبت به *S1* حدود ۱۴٪ و رابطه پیشنهادی *CEB* نسبت به *P2* حدود ۷٪ کرنش کمتری نشان داده‌اند. با مطالعه خزش یک‌ساله بتن سبک‌دانه با نرم‌افزار *ABAQUS* مشخص گردید تعریف پارامترهای وادادگی مناسب با نتایج تجربی در نرم‌افزار *ABAQUS*، کرنش خزشی دراز مدت تحلیلی بتن مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی خواهد داشت.

کلمات کلیدی: اسکوریا، بتن سبک، پومیس، سنگدانه سبک، خزش

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.426713.3282">10.22065/jsce.2024.426713.3282</a>					
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.426713.3282">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.426713.3282</a>	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۰۶	۱۴۰۳/۰۶/۰۶	۱۴۰۳/۰۱/۲۲	۱۴۰۲/۱۰/۰۴
علی‌رضا انتظاری					*نویسنده مسئول:	
<a href="mailto:a.entezari@azaruniv.ac.ir">a.entezari@azaruniv.ac.ir</a>					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در زمینه مصالح بتنی، جمع‌شدگی (انقباض یا افت) به کاهش حجم بتن موقع سخت شدن خمیر سیمان اشاره می‌کند و خزش<sup>۱</sup> (وارفتگی) به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که کرنش بتن با گذشت زمان تحت تنش مستمر افزایش می‌یابد. خزش و جمع‌شدگی هر دو متغیرهای ذاتی بتن بوده که وابسته به زمان می‌باشند [۱]. هنگامی که بتن تحت بار ثابت فشاری و کششی قرار می‌گیرد در بتن خزش ایجاد می‌شود. مفهوم خزش بتن، تغییر شکل بتن سخت شده در اثر یک بار ثابت طولانی مدت بکار برده می‌شود. کرنش ناشی از خزش ارتباط مستقیم با خواص و مشخصات بتن مورد استفاده در سازه دارد. باران و رطوبت می‌تواند تا حد زیادی از پیشرفت جمع‌شدگی و خزش بتن جلوگیری کند در حالی که تابش خورشید و گرمای محیط احتمالاً ترک خوردگی و خزش را افزایش می‌دهد [۲]. پیش‌بینی واقع‌بینانه خزش و جمع‌شدگی بتن برای دوام و قابلیت استفاده طولانی مدت سازه‌های بتنی و در برخی موارد برای پایداری طولانی مدت و ایمنی در برابر ریزش، اهمیت حیاتی دارد. خزش و جمع‌شدگی باعث افزایش انحراف و انحنای ترک خوردگی، کاهش پیش‌تنیدگی و توزیع مجدد تنش‌ها می‌شود [۳]. خزش بتن، خیز تیرهای بتن‌آرمه را افزایش می‌دهد و در بعضی شرایط ممکن است یک معیار بحرانی برای طراحی باشد و در تیرهای بتنی پیش‌تنیده، باعث کاهش پیش‌تنیدگی نیروی پیش‌تنیده می‌شود. در ستون‌های بتن‌آرمه، خزش باعث انتقال تدریجی بار از بتن به آرماتورها می‌گردد در این شرایط با جاری شدن فولاد، هر نوع افزایش بار صرفاً توسط بتن تحمل خواهد شد.

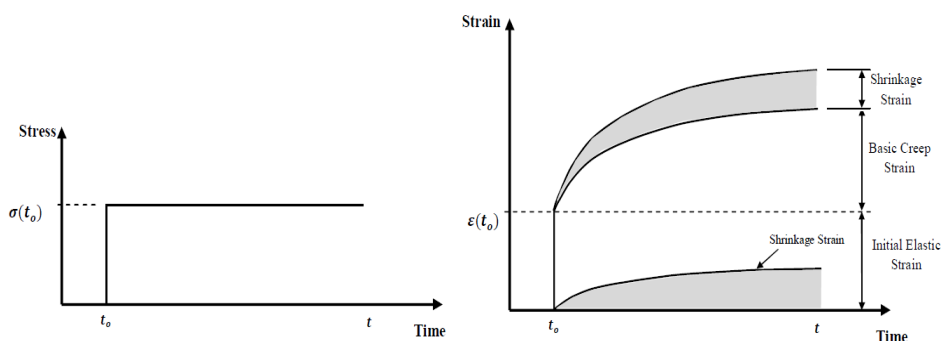
پیش‌بینی تغییرشکل دراز مدت بتن یک مشکل اساسی در طراحی سازه‌ها می‌باشد. انجام آزمایش‌های خزش روی بتن طولانی و دشوار می‌باشد، بنابراین باید در انتخاب تابع خزش دقت زیادی لحاظ گردد تا با نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری را داشته باشد. ضمناً با توجه به نتایج آزمایشگاهی، که معمولاً کوتاه مدت می‌باشند، تابع خزش انتخاب شده باید قادر باشد تغییرشکل بلند مدت را پیش‌بینی کند. اگر برآورد دقیق از تغییر شکل بلند مدت بتن مد نظر می‌باشد، لازم است بر روی نمونه بتن آزمایش کوتاه مدت انجام داده و نتایج برای رفتار دراز مدت بتن تعمیم داده شود [۴]. درجه حرارت عمل‌آوری بتن به عنوان یک عامل مهم در افزایش مقاومت فشاری بتن شناخته شده است. این موضوع به خوبی مشخص شده که درجه حرارت بالای عمل‌آوری موجب تسریع واکنش هیدراتاسیون، ایجاد ماتریس سیمانی متراکم و بهبود مقاومت در برابر خزش شده و در نتیجه مقدار کرنش خزشی را کاهش می‌دهد [۵].

در چند دهه گذشته تحقیقات گسترده‌ای در مورد پیش‌بینی خزش فشاری طولانی مدت بتن انجام شده و چندین مدل برای پیش‌بینی خزش توسط آیین‌نامه‌ها و محققان مختلف ارائه شده است. به دلیل تغییرپذیری و عدم قطعیت که برای خواص بتن و طرح‌های اختلاط بتن نسبت داده شده است، هیچ مدل قابل اعتماد کلی برای پیش‌بینی خزش بتن‌های مختلف وجود ندارد. به منظور ارائه پیش‌بینی‌های بهتر تغییر شکل‌های وابسته به زمان، باید مقادیر خزش کوتاه مدت از نمونه‌های آزمایشگاهی تعیین شده باشند [۴-۱۱]. پس از تعیین خزش کوتاه مدت بتن، جهت افزایش دقت رابطه پیش‌بینی خزش، از روش تحلیل معکوس استفاده می‌شود. در روش تحلیل معکوس، پارامترهای مجهول که در رابطه دیده شده، از داده‌های موجود از آزمایش تخمین زده و الگوریتم‌هایی که منجر به بهترین ارتباط بین مقادیر آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی است تولید می‌شود. در رابطه انتخابی بتن، پارامترهای لحاظ شده با استفاده از روش تحلیل معکوس و با کالیبره کردن آنها با مقادیر آزمایشگاهی مشخص شده و در نهایت رفتار بلند مدت بتن تحت شرایط مشابه تخمین زده می‌شود [۶ و ۱۲]. در زمینه‌های مختلف مهندسی، ثابت شده با استفاده از تحلیل معکوس می‌توان خطای پیش‌بینی طولانی مدت را به میزان قابل توجهی کاهش داد. در روابط پیشنهادی برای تعیین خزش دراز مدت بتن، شرایط و ساختار روابط و پارامترهای ورودی هر مدل با مدل‌های دیگر متفاوت می‌باشند. آیین‌نامه‌های ACI ۲۰۹-۲R-۰۸ [۸] و CEB-FIP ۲۰۱۰ [۹] برای پیش‌بینی کرنش ناشی از خزش دراز مدت بتن روابط متفاوتی را پیشنهاد داده‌اند. روابط پیشنهادی این آیین‌نامه‌ها در بخش‌های ۱-۱ و ۲-۱ توضیح داد شده است. کل کرنش بتن از سه قسمت کرنش مربوط به کرنش الاستیک اولیه، کرنش ناشی از خزش پایه (بدون لحاظ کرنش جمع‌شدگی) و کرنش جمع‌شدگی (افت یا انقباض) تشکیل می‌شود. شکل (۱) رابطه بین کرنش الاستیک اولیه، کرنش ناشی از خزش پایه و کرنش جمع‌شدگی را نشان می‌دهد. کرنش نمونه بتنی در زمان  $t$  پس از بارگذاری ثابت در زمان  $t_0$  برابر است با:

<sup>1</sup> Creep

$$\varepsilon_{total}(t, t_0) = \varepsilon_{elastic}(t_0) + \varepsilon_{creep}(t, t_0) + \varepsilon_{shrinkage}(t, t_0) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، کرنش الاستیک اولیه در اثر بار ثابت و  $\varepsilon_{creep}$  کرنش ناشی از خزش پایه که وابسته به تنش اعمال شده بوده و  $\varepsilon_{shrinkage}$  کرنش ناشی از جمع شدگی که مستقل از تنش وارد می‌باشد.



شکل ۱ - تغییر شکل وابسته به زمان بتن تحت بار ثابت (رطوبت نسبی کمتر از ۱۰۰٪)

$\sigma(t_0)$  تنش وارد بر نمونه در آزمایش خزش معادل  $0.4f'_c$  بوده، بنابراین مقدار تنش در محدوده خطی رفتار تنش - کرنش بتن قرار دارد، که می‌توان یک رابطه خطی بین کرنش ناشی از خزش پایه و تنش برقرار نمود که به خزش ویژه ( $J_0$ ) مرسوم است. خزش ویژه به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$J_0(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{creep}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \quad (2)$$

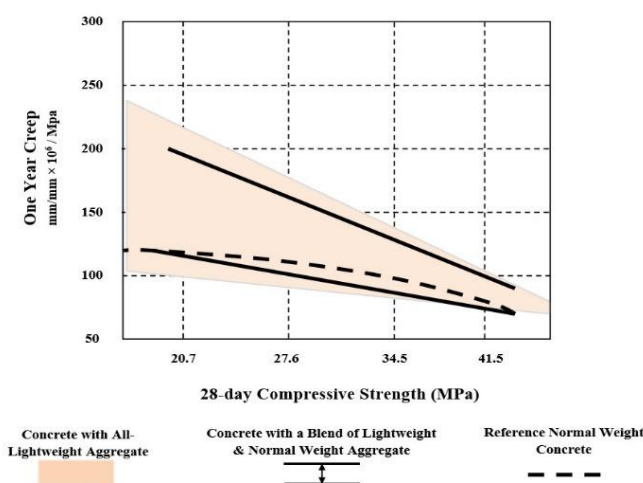
در صورتی که از کل کرنش‌ها، از کرنش جمع شدگی صرف نظر شود نسبت کرنش به تنش، تابع انطباق خزش نامیده می‌شود (رابطه ۳):

$$J(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{total}(t, t_0) - \varepsilon_{shrinkage}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} = \frac{\varepsilon_{elastic}(t_0) + \varepsilon_{creep}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \quad (3)$$

با توسعه استفاده از بتن سازه‌ای با سنگدانه‌های سبک (LWAC) در سازه‌ها به ویژه سازه با دهانه‌های بزرگ نظیر پلسازی، ضرورت توجه به رفتار سازه با LWAC در برابر کرنش ناشی از خزش اهمیت بیشتری یافته است. علاوه بر خمیر سیمان که نقش اصلی روی خزش دارد مقدار حجمی و سختی سنگدانه‌ها و مشخصات چسبندگی لایه مرزی (ITZ) روی خزش موثر هستند. دانه‌بندی، حداکثر اندازه، شکل دانه‌ها و مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها و سایر خواص فیزیکی سنگدانه‌ها به عنوان عواملی موثر بر خزش پیشنهاد شده‌اند. از بین عوامل توصیه شده مدول الاستیسیته سنگدانه‌های استفاده شده در تهیه بتن، مهمترین این خواص است. هرچه مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها بیشتر باشد اثر مهار کننده بیشتری توسط سنگدانه‌ها روی خمیر سیمان ایجاد کرده و اجازه تغییر شکل کمتری را به خمیر سیمان می‌دهد در نتیجه خزش کمتری در بتن بوجود می‌آید. تخلخل سنگدانه‌ها نیز بر خزش بتن تاثیر می‌گذارد اما از آنجا که معمولاً سنگدانه‌ها با تخلخل بیشتر دارای مدول الاستیسیته کمتری می‌باشند، امکان دارد که تخلخل عامل مستقیمی در خزش نداشته نباشد. بنابر این می‌توان خزش بتن را در خزش خمیر سیمان، نسبت حجمی سنگدانه و اثر مهار کننده سنگدانه که به مدول الاستیسیته سنگدانه وابسته است بیان کرد. عموماً مدول الاستیسیته سنگدانه‌های سبک (LWA) کمتر از مدول الاستیسیته سنگدانه‌های معمولی (NWA) می‌باشد. مدول الاستیسیته LWA در محدوده ۸-۴/۲۰ GPa بوده در حالی که مدول الاستیسیته NWA در محدوده ۱۲۰-۴۰ GPa قرار دارد [۱۳]. بنابر این انتظار می‌رود که خزش در بتن با سنگدانه‌های سبک از خزش بتن با سنگدانه‌های معمولی بیشتر باشد.

آیین نامه ACI ۲۱۳R-۱۴ [۱۴] بیان نموده که در LWAC و NWC با افزایش مقاومت فشاری بتن، میزان خزش ویژه پس از یک سال کاهش می‌یابد. در شکل (۲) خزش ویژه یک سال سه نوع بتن تهیه شده با شن و ماسه سبک (LWAC)، بتن با ترکیب سنگدانه‌های سبک و معمولی و بتن تهیه شده با سنگدانه‌های معمولی (NWC) با عمل‌آوری متعارف و مقاومت‌های فشاری مختلف مقایسه شده است. مقدار خزش ویژه NWC بعد از یک سال برای بتن با مقاومت فشاری ۲۰/۷، ۲۷/۶، ۳۴/۵ و ۴۱/۵ MPa بترتیب ۱۲۰، ۱۱۰،

۱۰۰ و  $80 \text{ mm/mm} \times 10^{-6} / \text{MPa}$  (  $\mu\epsilon$  ،  $80 \mu\epsilon / \text{MPa}$  ) میکرواسترین) و برای LWAC با همین مقاومت‌های فشاری مقدار خزش ویژه به ترتیب در محدوده ۲۲۰-۱۰۰ ، ۱۸۰-۹۰ ، ۱۴۰-۸۵ و  $105-75 \mu\epsilon / \text{MPa}$  قرار دارد.



شکل ۲- میزان خزش ویژه یک سال بتن با عمل‌آوری متعارف برای مقاومت‌های فشاری مختلف (ACI ۲۱۳)

تانگ و همکاران [۱۵] با تحقیق روی خزش بتن با سنگدانه‌های پلی‌استایرن (PAC) به این نتیجه رسیدند که به ازای مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد بتن معمولی (NC) و بتن PAC۲۰ (۲۰٪ حجمی سنگدانه‌های بتن از نوع پلی‌استایرن و بقیه سنگدانه‌ها معمولی)، PAC۴۰ ، PAC۶۰ ، PAC۸۰ به ترتیب ۹/۳ ، ۱۵/۲ ، ۲۱ ، ۳۲ و ۵۵ MPa و با مدول الاستیسیته به ترتیب ۹/۱ ، ۱۴/۵ ، ۱۸/۱ ، ۲۴/۱ و ۳۴/۲ GPa کرنش خزش پایه پس از ۲۷۰ روز به ترتیب ۱۰۰۵ ، ۹۰۰ ، ۸۱۵ ، ۷۱۰ و  $605 \mu\epsilon$  می‌باشد. آنها در این تحقیق پس از ۲۷۰ روز ضریب خزش را برای بتن NC ، PAC۲۰ ، PAC۴۰ ، PAC۶۰ و PAC۸۰ به ترتیب ۳/۱۴ ، ۲/۷۲ ، ۲/۲۳ ، ۱/۷۷ و ۱/۲۸ و خزش ویژه را به ترتیب ۳۶۰ ، ۱۹۷ ، ۱۲۹/۴ ، ۷۴ و  $367 \mu\epsilon / \text{MPa}$  بدست آوردند.

جانگ و همکاران [۱۶] بر روی بتن معمولی (NC) ، بتن خود تراکم با سنگدانه‌های معمولی (SCC) و بتن خودتراکم با سنگدانه‌های سبک (SCLC) آزمایش خزش را انجام دادند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$  را برای بتن NC ، SCC و SCLC به ترتیب ۴۶/۴ ، ۴۶/۸ و ۴۷/۲ MPa و مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی را نیز به ترتیب ۲۷/۱ ، ۲۶/۹ و ۲۴ GPa تعیین کردند. آنها در این تحقیق پس از ۳۶۵ روز ضریب خزش را برای بتن NC ، SCC و SCLC را به ترتیب ۱/۰۵۱ ، ۱/۰۰۲ و ۰/۹۵۵ و مقدار خزش ویژه را به ترتیب ۳۰ ، ۳۳ و  $34 \mu\epsilon / \text{MPa}$  بدست آوردند.

وو و همکاران [۱۷] با آزمایش بر روی بتن با سنگدانه‌های معمولی (NC) و همچنین بتن با خرد شده پوسته هسته زردالو (ASC) با وزن مخصوص  $1/42 \text{ g/cm}^3$  به عنوان جایگزین سنگدانه‌های معمولی، کرنش خزشی نمونه‌ها را پس از ۱۶ روز تعیین کردند. در این تحقیق مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$  برای بتن NC ، بتن ASC۲۵ (۲۵٪ حجمی سنگدانه‌های بتن از نوع پوسته هسته زردالو جایگزین سنگدانه‌ها معمولی)، ASC۵۰ ، ASC۷۵ و ASC۱۰۰ را به ترتیب ۳۸/۷ ، ۳۵/۵ ، ۳۱ ، ۲۶/۷ و ۲۶/۱ MPa و مدول الاستیسیته نمونه‌ها را نیز به ترتیب ۱۴/۲ ، ۱۳/۸ ، ۱۲/۵ ، ۱۰/۹ و ۹/۳ GPa تعیین کردند. وو و همکاران [۱۷] گزارش دادند وجود هسته زردالو (AS) در بتن بدلیل ضعیف بودن مقاومت دانه‌های هسته و ناحیه انتقال بتن (ITZ) باعث کاهش مدول الاستیسیته بتن می‌شود. آنها در این تحقیق پس از ۱۶ روز کرنش خزشی را برای بتن NC ، ASC۲۵ ، ASC۵۰ ، ASC۷۵ و ASC۱۰۰ به ترتیب ۱۷۳ ، ۳۵۷ ، ۱۲۸۳ ، ۱۶۴۸ و  $1684 \mu\epsilon$  بدست آوردند.

شیدلوسکی و لایزوک [۱۸] با آزمایش خزش روی بتن با سنگدانه‌های مصنوعی سبک با مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای استاندارد ۵۶/۹ MPa و مدول الاستیسیته ۲۲/۱ GPa مشخص کردند پس از ۳۶۵ روز کرنش ناشی از خزش پایه بتن برابر  $۵۰۹ \mu\epsilon$  می‌باشد.

وندلینگ و همکاران [۱۹] با آزمایش خزش روی بتن خود تراکم با سنگدانه‌های معمولی (SCC) با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۵۲/۶ MPa و بتن خودتراکم با سنگدانه‌های سبک (LWSCC) با مقاومت فشاری ۴۶ MPa مشخص کردند کرنش خزشی پس از ۳۶۵ روز برای SCC و LWSCC به ترتیب برابر ۳۶۲ و  $۶۰۵ \mu\epsilon$  و ضریب خزش نیز به ترتیب ۰/۷۸۵ و ۰/۹۶۰ می‌باشد. آنها با مقایسه نتایج تجربی با روابط پیشنهادی ACI ۲۰۹ به این نتیجه رسیدند که روابط پیشنهادی ACI ۲۰۹ نسبت به نتایج تجربی SCC پس از یک سال ۳۹٪ و نسبت به نتایج LWSCC، ۲۳٪ ضریب خزش بیشتری را پیش‌بینی می‌کند.

### ۱-۱- آیین‌نامه ۲۰۹-۲R-۰۸ ACI

آیین‌نامه ۲۰۹-۲R-۰۸ ACI [۸] کرنش ناشی از خزش برای بتن معمولی و بتن سبک‌دانه با عمل‌آوری در آب و بخار و با نوع سیمان I و III که از دو عبارت کرنش الاستیک اولیه و کرنش خزش پایه تشکیل شده را بصورت رابطه (۴) پیشنهاد داده است:

$$\varepsilon_{total}(t, t_0) = \varepsilon_{elastic}(t_0) + \varepsilon_{creep}(t, t_0) \quad (4)$$

$\varepsilon_{creep}(t, t_0)$  کرنش مربوط به خزش پایه در زمان  $t$ ،  $\varepsilon_{elastic}(t_0)$  کرنش الاستیک اولیه در موقع بارگذاری،  $t$  سن بتن بعد از باز کردن از قالب (بر حسب روز) و  $t_0$  سن بتن در هنگام اعمال بار ثابت (بر حسب روز) می‌باشند.

$$\varepsilon_{elastic}(t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_{cmt_0}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $\sigma(t_0)$  تنش ثابت وارده در زمان  $t_0$  معادل  $0.4f'_c$  بوده و  $E_{cmt_0}$  مدول الاستیسیته بتن در سن بارگذاری ( $t_0$ ) می‌باشد. آیین‌نامه ACI برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته متوسط بتن در سن بارگذاری ( $t_0$ ) رابطه (۶) را پیشنهاد داده است:

$$E_{cmt_0} = 0.043\gamma_c^{1.5} \sqrt{f_{cmt_0}} \quad (MPa) \quad (6)$$

$E_{cmt_0}$  مدول الاستیسیته متوسط بتن در شروع زمان بارگذاری ( $t_0$ )،  $\gamma_c$  وزن مخصوص بتن بر حسب  $kg/m^3$  و  $f_{cmt_0}$  مقاومت فشاری بتن در زمان بارگذاری ( $t_0$ ) بر حسب MPa می‌باشد.

معادله پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در زمان  $t$  از رابطه (۷) تعیین می‌شود.

$$f_{cmt} = \left[ \frac{t_0}{a + bt} \right] f_{cm28} \quad (MPa) \quad (7)$$

$f_{cm28}$  مقاومت فشاری متوسط ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای بتن (MPa) و  $a$  و  $b$  ضرایبی بوده که بر اساس نوع نوع سیمان مصرفی از جدول (۱) استخراج می‌شود.

جدول ۱- مقدار ضرایب  $b$  و  $c$  بر حسب نوع سیمان و عمل‌آوری بتن

(آیین‌نامه ۲۰۹ ACI)

عمل‌آوری در بخار		عمل‌آوری در آب		نوع سیمان
$a = 1.0$	$b = 0.95$	$a = 4.0$	$b = 0.85$	سیمان نوع I
$a = 0.70$	$b = 0.98$	$a = 2.30$	$b = 0.92$	سیمان نوع III

طبق آیین‌نامه ۲۰۹ ACI کرنش مربوط به خزش پایه  $\varepsilon_c(t, t_0)$  در زمان  $t$  از رابطه (۸) تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_{cmt_0}} \phi(t, t_0)$$

(۸)

$\phi(t, t_0)$  ضریب خزش (بدون بُعد) در زمان  $t$  بوده که از رابطه (۹) محاسبه خواهد شد.

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^\psi}{d + (t - t_0)^\psi} \phi_u \quad (9)$$

در رابطه (۹)  $\phi_u$  ضریب خزش نهایی بوده که بر اساس پیشنهاد ACI برای شرایط استاندارد و در صورت عدم وجود مشخصات خزش و سنگدانه‌ها مقدار آن ۲/۳۵ در نظر گرفته می‌شود.

$d$  و  $\psi$  ضرایب ثابتی هستند که بر اساس شکل و اندازه نمونه مورد آزمایش تعیین می‌شوند. در آیین‌نامه ۲۰۹R-۹۲-ACI برای  $d$  و  $\psi$  به ترتیب ۱۰ و ۰/۶ در نظر گرفته شده بود. آیین‌نامه ۲۰۹R-۰۸-۲۰۹-ACI اشاره کرده، اثر شکل و اندازه را می‌توان با قرار دادن  $\psi = 1$  و  $d = f$  مشخص نمود:

$$f = 26e^{\left(1.42 \times 10^{-2} \left(\frac{V}{S}\right)\right)} \quad (10)$$

$V$  و  $S$  به ترتیب حجم ( $\text{mm}^3$ ) و سطح پیرامونی ( $\text{mm}^2$ ) نمونه بتنی که مورد آزمایش قرار می‌گیرد می‌باشد. در صورتی که کلیه مشخصات خزش و سنگدانه‌ها و ... مشخص باشند مقدار  $\phi_u$  از رابطه (۱۱) تعیین می‌شود:

$$\phi_u = 2.35 \gamma_c \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) مقدار ضریب اصلاحی  $\gamma_c$  برابر است با:

$$\gamma_c = \gamma_{c,t_0} \times \gamma_{c,RH} \times \gamma_{c,vs} \times \gamma_{c,s} \times \gamma_{c,\psi} \times \gamma_{sh,\alpha} \quad (12)$$

$\gamma_{c,t_0}$  ضریب اصلاح سن در زمان بارگذاری  $t_0$ ، برای عمل آوری در آب بیش از ۷ روز و عمل آوری در بخار آب بیش از ۱ روز از رابطه (۱۳) و (۱۴) تعیین می‌شود:

$$\gamma_{c,t_0} = 1.25 t_0^{-0.118} \quad \text{برای عمل آوری آب:} \quad (13)$$

$$\gamma_{c,t_0} = 1.13 t_0^{-0.094} \quad \text{برای عمل آوری بخار آب:} \quad (14)$$

ضریب اصلاح رطوبت نسبی محیط  $\gamma_{c,RH}$  به ازای رطوبت محیط ( $h$ ) برابر است با:

$$h \geq \%40 \Rightarrow \gamma_{c,RH} = 1.27 - 0.67h \quad (15)$$

$$h < \%40 \Rightarrow \gamma_{c,RH} = 1.0$$

ضریب  $\gamma_{c,vs}$  برای اندازه نمونه بیان شده و برای نسبت حجم به سطح نمونه بیشتر از ۳۸ میلیمتر رابطه (۱۶) پیشنهاد شده است:

$$\gamma_{c,vs} = \frac{2}{3} \left[ 1 + 1.13 e^{\left(-0.0213 \left(\frac{V}{S}\right)\right)} \right] \quad (16)$$

روش دیگر برای تعیین اثر اندازه نمونه روی  $\phi_u$ ، روش متوسط ضخامت می‌باشد. این ضریب اصلاحی بر اساس نسبت حجم به سطح نمونه کمتر از ۳۷/۵ میلیمتر و مدت زمان بارگذاری ( $t - t_0$ ) بر حسب سال تعریف شده است:

$$(t - t_0) \leq 1 \Rightarrow \gamma_{c,d} = 1.14 - 0.00363 \left(\frac{V}{S}\right) \quad (17)$$

$$(t - t_0) > 1 \Rightarrow \gamma_{c,d} = 1.10 - 0.00268 \left(\frac{V}{S}\right)$$

ضریب سنگدانه ریز  $\gamma_{c,\psi}$  بر اساس  $\psi$  که درصد وزنی ریزدانه به کل وزن سنگدانه است ارائه شده است:

$$\gamma_{c,\psi} = 0.88 + 0.0024\psi$$

(۱۸)

ضریب مقدار اسلامپ بتن  $\gamma_{c,s}$  بر اساس مقدار اسلامپ S (mm) برابر است با:

$$\gamma_{c,\alpha} = 0.82 + 0.00264s \quad (۱۹)$$

 $\gamma_{c,\alpha}$  ضریب مقدار هوای بتن بر اساس  $\alpha$  درصد هوای بتن از رابطه (۲۰) تعیین می‌شود:

$$\gamma_{c,\alpha} = 0.46 + 0.09\alpha \geq 1 \quad (۲۰)$$

با تعیین ضریب خزش  $\phi(t, t_0)$ ، مقدار کل کرنش خزشی بتن برابر است با

$$\varepsilon_{total}(t, t_0) = \varepsilon_{elastic}(t_0) + \varepsilon_{creep}(t, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_{cmt_0}} + \frac{\sigma(t_0)}{E_{cmt_0}} \phi(t, t_0) \quad (۲۱)$$

و یا

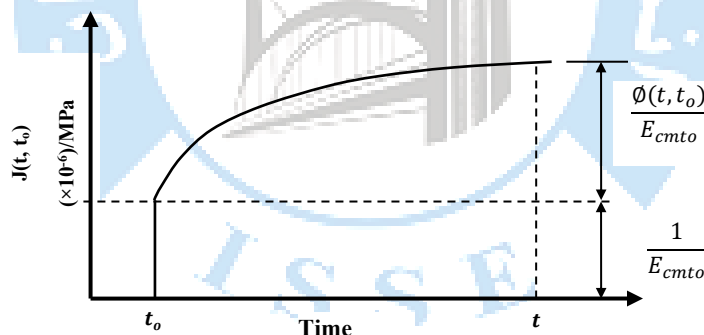
$$\varepsilon_{total}(t, t_0) = \sigma(t_0) \left[ \frac{1}{E_{cmt_0}} + \frac{1}{E_{cmt_0}} \phi(t, t_0) \right] \quad (۲۲)$$

با توجه به رابطه (۲۱) کرنش مربوط به خزش پایه در زمان t برابر است با:

$$\varepsilon_{creep}(t, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_{cmt_0}} \phi(t, t_0) \quad (۲۳)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۲۲) تابع انطباق خزش  $J(t, t_0)$  بصورت رابطه (۲۴) قابل بیان می‌باشد:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_{cmt_0}} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{cmt_0}} = \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E_{cmt_0}} \quad (۲۴)$$

در رابطه (۲۲) عبارت  $\phi(t, t_0)/E_{cmt_0}$  را خزش ویژه بتن ( $J_o(t, t_0)$ ) می‌نامند.

شکل ۳- عوامل تابع انطباق بر اساس آیین نامه ACI

## ۲-۱- مدل CEB-FIP ۲۰۱۰

آیین نامه CEB-FIP ۲۰۱۰ [۹] روش جدیدی را برای ارزیابی خزش و جمع شدگی سازه‌های بتنی بیان کرده و برخی اصلاحات را نسبت به مدل اصلی CEB-FIP ۱۹۹۰ انجام داده و برای شناسایی بهتر رفتار بلند مدت بتن، برخی مقررات اضافی را برای تشخیص بخش‌های مختلف خزش و جمع شدگی معرفی کرده است.

آیین نامه CEB برای تعیین کرنش مربوط به خزش پایه بتن رابطه (۲۵) را پیشنهاد داده است:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \phi(t, t_0) \quad (۲۵)$$

$\sigma(t_0)$  تنش ثابت و مستمر اعمال شده به نمونه در زمان  $t_0$  (MPa)،  $E_{ci}$  مدول الاستیسیته بتن در سن ۲۸ روز (MPa) و  $\phi(t, t_0)$  ضریب خزش در زمان t می‌باشد.

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 R_c(t, t_0)$$



(۲۶)

$\phi_o$  ضریب خزش پایه و  $\beta_c(t, t_o)$  معادله توصیف گسترش خزش با زمان بعد از بارگذاری می باشد:

$$\beta_c(t, t_o) = \left( \frac{t - t_o}{\beta_H + t - t_o} \right)^{0.3} \quad (27)$$

$\beta_H$  عامل رطوبت نسبی روی ضریب خزش پایه ،  $t$  سن بتن بعد از باز کردن از قالب (بر حسب روز) و  $t_o$  سن بتن در هنگام اعمال بار ثابت (بر حسب روز) است.

$$\beta_H = 1.5h_e \left[ 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{100} \right)^{18} \right] + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3 \quad (28)$$

$$\alpha_3 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.5}$$

$f_{cm}$  مقاومت فشاری متوسط ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای بتن (MPa) می باشد.

$RH$  رطوبت نسبی محیط بر حسب درصد و  $h_e$  ضخامت موثر نمونه (mm) بوده که از رابطه (۲۹) تعیین می شود:

$$h_e = 2 \frac{V}{S} = 2 \frac{(b \times h)}{2(h+b)} = 2 \frac{A_c}{u} \quad (29)$$

ضریب خزش پایه ( $\phi_o$ ) نیز از رابطه (۳۰) محاسبه می شود:

$$\phi_o = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_o) \quad (30)$$

$\beta(f_{cm})$  عامل مقاومت بتن و  $\beta(t_o)$  عامل سن بتن در زمان بارگذاری موثر روی ضریب خزش پایه بوده و  $\phi_{RH}$  عامل رطوبت نسبی روی ضریب خزش پایه از رابطه (۳۱) تعیین می شود:

$$\phi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \times \sqrt[3]{h_e}} \times \alpha_1 \right] \times \alpha_2 \quad (31)$$

$$\alpha_1 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.7} \quad \alpha_2 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.2}$$

$\beta(f_{cm})$  عامل مقاومت بتن روی ضریب خزش پایه برابر است با:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (32)$$

$\beta(t_o)$  عامل موثر سن بتن در زمان بارگذاری روی ضریب خزش پایه از رابطه (۳۳) محاسبه می شود:

$$\beta(t_o) = \frac{1}{0.1 + t_o^{0.2}} \quad (33)$$

با تعیین ضریب خزش  $\phi(t, t_o)$  ، مقدار کرنش خزشی کل بتن برابر است با

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_o) = \varepsilon_{ci}(t_o) + \varepsilon_c(t, t_o) = \frac{\sigma(t_o)}{E_{ci}(t_o)} + \frac{\sigma(t_o)}{E_{ci}} \phi(t, t_o) \quad (34)$$

و یا

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_o) = \sigma_c(t_o) \left[ \frac{1}{E_{ci}(t_o)} + \frac{\phi(t, t_o)}{E_{ci}} \right] = \sigma_c(t_o) j(t, t_o) \quad (35)$$

$E_{ci}$  مدول الاستیسیته نمونه بتن استوانه‌ای در سن ۲۸ روز (MPa) و  $E_{ci}(t_o)$  مدول الاستیسیته نمونه بتن استوانه‌ای در سن بارگذاری ( $t_o$ ) می باشد.

$$E_{ci} = 21500 \sqrt[3]{\frac{f_{cmi}}{10}} \quad (36)$$

$$E_{ci}(t_o) = E_{ci} \exp \left[ 0.35 \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t_o}} \right) \right]$$

(۳۷)

$S$  ضریبی است که به نوع سیمان مصرفی در بتن وابسته بوده و مقدار آن برای سیمان نوع I و II و نوع III به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۲۵ و ۰/۲۰ می‌باشد. کرنش مربوط به خزش پایه بتن در زمان  $t$  از رابطه (۳۸) تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_o) = \frac{\sigma(t_o)}{E_{ci}} \phi(t, t_o) \quad (38)$$

در نتیجه تابع انطباق خزش  $J(t, t_o)$  برابر است با:

$$J(t, t_o) = \frac{I}{E_{ci}(t_o)} + \frac{\phi(t, t_o)}{E_{ci}} \quad (39)$$

در رابطه (۳۹) عبارت  $\phi(t, t_o)/E_{ci}$  را خزش ویژه بتن ( $J_o(t, t_o)$ ) می‌نامند.

کرنش خزشی کل بتن که از مجموع کرنش الاستیک و کرنش خزش پایه تشکیل شده از رابطه (۴۰) تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_{total}(t, t_o) = \sigma(t_o) J(t, t_o) = \sigma(t_o) \left[ \frac{I}{E_{ci}(t_o)} + \frac{\phi(t, t_o)}{E_{ci}} \right] \quad (40)$$

اگر سن بارگذاری نمونه بتن ۲۸ روز باشد (یعنی  $t_o = 28$ ) تابع انطباق خزش  $J(t, t_o)$  برابر خواهد بود با:

$$J(t, t_o) = \frac{I + \phi(t, t_o)}{E_{ci}} \quad (41)$$

## ۲- روش‌های آزمایشگاهی و عددی

### ۲-۱- روش آزمایشگاهی

#### ۲-۱-۱- مصالح مصرفی

در کلیه نمونه‌های مورد آزمایش از سیمان پرتلند نوع II (PC) صوفیان با چگالی ۳/۱۵ و نرمی  $293 \text{ m}^2/\text{kg}$  استفاده شده است. مقاومت ۲۸ روزه ملات مکعبی ساخته شده با PC-II،  $39/3 \text{ Mpa}$  و زمان گیرش اولیه ۷۰ دقیقه و نهایی ۴/۰۵ ساعت تعیین شده‌اند. ترکیبات شیمیایی سیمان در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲ - تجزیه شیمیایی مواد (درصد اکسیدها)

نوع اکسید	سیمان (PC)	میکروسیلیس (SF)	سنگدانه اسکوریا		سنگدانه پومیس	
			سیاه	قرمز	درشت	ریز
			(SA)	(SA)	(PA)	(PA)
SiO <sub>2</sub>	21.45	95.5	59.14	60.95	62.77	58.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.88	1.32	15.57	13.9	17.12	17.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.58	0.87	6.68	7.09	4.88	4.48
CaO	64.33	0.49	5.47	6.47	4.90	1.35
Na <sub>2</sub> O	0.41	0.31	3.65	2.29	3.32	3.12
MgO	1.75	0.97	2.97	2.76	1.11	1.11
K <sub>2</sub> O	0.91	1.01	2.92	2.23	1.36	1.44
SO <sub>3</sub>	1.94	0.1	-	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	0.97	1.07	-	-
MnO	-	-	0.11	0.12	-	-
L.O.I	0.62	-	1.79	2.37	1.88	2.10

افزودنی‌های معدنی، نظیر میکروسیلیس (SF)، تخلخل بتن را کاهش داده و موجب بهبود ناحیه مرزی (ITZ) می‌شود. SF پودری است به رنگ خاکستری روشن یا تیره که حاوی حدود ۹۶-۹۴٪ دی اکسید سیلیسیم ( $\text{SiO}_2$ ) می‌باشد که از فرآیند تولید فروسیلیس در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می‌آید. SF خاصیت جذب آب دارد، بنابراین باید به همراه مواد کاهنده آب مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق از SF که با استاندارد ASTM C1240 [۲۰] مطابقت دارد استفاده شد. چگالی ویژه و وزن مخصوص SF به ترتیب ۲/۳۲ و  $245 \text{ kg/m}^3$  بودند. ترکیبات شیمیایی SF در جدول (۲) درج شده است.

برای کسب مقاومت فشاری بیشتر در بتن باید آب بتن کاهش داده شود. با استفاده از فوق روان کننده می‌توان با حفظ کارایی بتن مقدار آب آن را کاهش داد. استاندارد ASTM C494 [۲۱] میزان فوق روان کننده را  $1/5 - 1/8$  درصد وزن مواد سیمانی تعیین کرده است. بر این اساس در این تحقیق با توجه به نوع سنگدانه‌های استفاده شده در همه طرح‌های اختلاط فوق روان کننده با چگالی  $\text{g/m}^3$  ۱/۲۱ به مقدار ۷/۵ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن انتخاب شد.

در تهیه بتن LWAC از سنگدانه پومیس (سنگ پوک) با چگالی  $1/38 \text{ g/m}^3$  و جذب آب ۲۷٪ از معدن طبیعی اسکندان در نزدیکی تبریز (آذربایجان شرقی- ایران) و سنگدانه اسکوریا (سنگ پا) که درشت‌دانه دارای چگالی  $1/84 \text{ g/m}^3$  و جذب آب ۱۵٪ و ریزدانه دارای چگالی  $1/72 \text{ g/m}^3$  و جذب آب ۱۴٪ است از معدن طبیعی آجواج در نزدیکی سلماس (آذربایجان غربی - ایران) تهیه شد. در این تحقیق اندازه بزرگترین سنگدانه سبک که در تهیه بتن استفاده شد  $12/5 \text{ mm}$  بود.

جدول ۳- مقادیر اجزای تشکیل دهنده مخلوط‌های بتن سبک ( $\text{Kg/m}^3$ )

اسلامپ (mm)	نسبت آب به مواد سیمانی	فوق روان کننده	سنگدانه ریز		سنگدانه درشت		میکروسیلیس	سیمان	طرح اختلاط	
			ماسه	سبک	سبک	اسکوریا				
										پومیس
71	0.35	7.5	653	-	-	700	50	450	S1	
85	0.32	7.5	-	-	603	-	685	50	450	S2
52	0.33	7.5	610	-	-	584	50	450	P1	
50	0.33	7.5	-	-	548	585	50	450	P2	

وزن سنگدانه‌های سبک و معمولی به صورت اشباع با سطح خشک (SSD) می‌باشند.

## ۲-۱-۲- مخلوط‌های بتن LWAC

در طرح اختلاط بتن با سنگدانه‌های سبک از توصیه‌های مندرج در آیین‌نامه ۴R-۰۸-۲۱۱ ACI [۲۲] استفاده شد. برای تمامی مخلوط‌ها بزرگترین اندازه سنگدانه  $12/5 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده بود. برای انجام آزمایش‌ها چهار طرح اختلاط S1 (سنگدانه درشت اسکوریا و ریزدانه ماسه معمولی)، S2 (سنگدانه درشت اسکوریا و ریزدانه اسکوریا)، P1 (سنگدانه درشت پومیس و ریزدانه ماسه معمولی) و P2 (سنگدانه درشت پومیس و ریزدانه اسکوریا) طبق جدول (۳) در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مطالعات روی بتن سبک سازه‌ای بوده میزان سیمان در طرح اختلاط ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب تعیین گردید. بر اساس تحقیقات انجام گرفته، مناسب‌ترین مقدار مورد استفاده میکروسیلیس در بتن‌های سبک‌دانه ۵ تا ۲۵ درصد وزن سیمان بوده لذا در این تحقیق ۱۰٪ وزن سیمان میکروسیلیس لحاظ شد. از آنجایی که مقدار ۱۰٪ وزن سیمان میکروسیلیس به صورت جایگزین سیمان استفاده خواهد شد، مقدار سیمان استفاده شده در بتن ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد.

## ۲-۱-۳ - مشخصات مکانیکی بتن LWAC

برای تعیین مشخصات مکانیکی LWAC پس از ریختن بتن در قالب‌های فلزی استاندارد، جهت تراکم کامل نمونه بتنی از میز ارتعاشی (ویبره) استفاده شد. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در داخل حوض پر از آب در درجه حرارت  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  جهت عمل‌آوری قرار داده شدند. در این تحقیق از هر طرح اختلاط S1، S2، P1 و P2 سه نمونه برای انجام هر کدام از آزمایش‌ها تهیه شده بود. با استفاده از دستگاه هیدرولیکی ۲۰۰۰ ELE-ADR با آهنگ بارگذاری  $0.32 \text{ Mpa/sec}$  ( $5/3 \text{ kN/sec}$ )، مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای  $150 \times 300 \text{ mm}$  طبق استاندارد ASTM C39 [۲۳] و مدول الاستیسیته نمونه‌های استوانه‌ای  $150 \times 300 \text{ mm}$  با آهنگ بارگذاری  $255 \text{ kpa/sec}$  ( $4/5 \text{ kN/sec}$ ) مطابق با ASTM C469 [۲۴] مشخص شدند (جدول ۴). همزمان با آزمایش مقاومت فشاری، دستگاه تعیین مدول الاستیسیته (Compressometer) که دارای دو سنسور جابجایی (LVDT) بوده و کرنش (تغییر طول) ناحیه  $150$  میلی‌متر میانی نمونه‌های استوانه‌ای را با دقت  $0.3\%$  را اندازه‌گیری می‌کرده به نمونه بتنی متصل و اطلاعات از طریق کابل به دستگاه ثبت کننده داده‌ها (دیتالاگر) منتقل و در رایانه ذخیره می‌شد (شکل ۴). موقع تعیین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای از بین بردن اثر ناصافی و تمرکز تنش روی بدنه بتن، ابتدا و انتهای همه نمونه‌ها طبق توصیه‌های ASTM C617 [۲۵] با ماده گوگردی کلاهدک گذاری شده بودند.

مدول گسیختگی ( $f_r$ ) نمونه‌های منشوری  $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$  به روش بارگذاری سه نقطه‌ای و با آهنگ بارگذاری  $\text{Mpa/min}$   $0.19$  ( $0.2 \text{ N/sec}$ ) طبق ASTM C293 [۲۶] تعیین شد و با رعایت استاندارد توصیه شده توسط ASTM C496 [۲۷] مقاومت کششی ( $f_{ct}$ ) روی نمونه‌های استوانه‌ای  $150 \times 300 \text{ mm}$  با آهنگ بارگذاری  $1000 \text{ kPa/min}$  ( $1/2 \text{ kN/sec}$ ) انجام شد (جدول ۴).



شکل ۴- آزمایش تعیین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته LWAC

جدول ۴ - خصوصیات مکانیکی LWAC

فشار اعمالی به نمونه‌ها (bar)	مدول الاستیسیته $E_c$ (MPa)	مدول گسیختگی $f_r$ (MPa)	مقاومت کششی $f_{ct}$ (MPa)	مقاومت فشاری $f'_c$ (MPa)	شماره نمونه	طرح اختلاط
100	14895	3.45	2.95	36.90	S1-1	S1
	14872	3.44	2.95	36.75	S1-2	
	14744	3.42	2.92	36.16	S1-3	
78	13402	3.12	2.67	30.25	S2-1	S2
	12674	2.96	2.54	27.23	S2-2	
	12992	3.03	2.60	28.54	S2-3	
66	11850	2.79	2.38	24.06	P1-1	P1
	11958	2.81	2.40	24.46	P1-2	
	11864	2.79	2.39	24.10	P1-3	
63	11602	2.73	2.34	23.10	P2-1	P2
	11568	2.72	2.33	23.00	P2-2	
	11614	2.73	2.34	23.16	P2-3	

## ۲-۱-۴ - اندازه‌گیری خزش بتن LWAC

برای تعیین میزان خزش LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس از چهار نوع طرح اختلاط S1، S2، P1 و P2 و از هر طرح اختلاط سه نمونه که مشخصات مکانیکی آن در جدول (۴) ارائه شد استفاده گردید. در تهیه نمونه‌ها از قالب‌های استوانه‌ای  $150 \times 300$  mm استفاده شد. پس از ریختن بتن در قالب‌های فلزی، جهت تراکم کامل نمونه بتنی از میز ارتعاش دهنده استفاده شد. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در داخل حوض پر از آب در درجه حرارت  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  قرار داده شدند. بعد از خارج کردن نمونه‌ها از حوضچه آب در ناحیه میانی نمونه و به فاصله  $200$  mm دو سوراخ با دستگاه برقی ایجاد کرده آنگاه پین‌هایی که از قبل آماده شده بودند با استفاده از چسب شیمیایی در محل سوراخ‌ها چسبانده شدند (شکل ۵). برای اندازه‌گیری کرنش ناشی از خزش از هر مخلوط بتن سه نمونه مطابق استاندارد ASTM C512 [۲۸] داخل دستگاه اعمال فشار بار قرار داده شد. پس از استقرار نمونه‌ها در دستگاه در طول مدت آزمایش معادل ۴۰٪ مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای، بار بطور یکنواخت و قائم به نمونه‌ها وارد می‌شد. دستگاه طوری ساخته شده بود که با کاهش فشار در حدود ۵ bar فشار را مجدداً افزایش داده و به فشار اولیه که برای هر مخلوط بتن تنظیم شده بود می‌رساند (شکل ۷). جهت مشخص کردن کرنش الاستیک، قبل از استقرار نمونه‌ها درون دستگاه (قبل از بارگذاری)، رقم اولیه دستگاه کرنش سنج مکانیکی قرائت گردید. در مراحل مختلف بارگذاری تا مدت یک سال با استفاده از کرنش سنج مکانیکی<sup>۲</sup> (DEMEC) با دقت  $10^{-5} \times 1/85$  کرنش نمونه‌ها (تغییر طول نمونه بتنی در فاصله بین دو پین نصب شده) اندازه‌گیری شد (شکل‌های ۵ و ۸). از اولین قرائت کرنش سنج در همان لحظه شروع بارگذاری جهت تعیین کرنش الاستیک استفاده می‌شود. برای از بین بردن اثر ناصافی و تمرکز تنش روی بدنه بتن، ابتدا و انتهای همه نمونه‌ها طبق توصیه‌های ASTM C 617 [۲۵] با ماده گوگردی کلاهدک گذاری شدند. موقع اندازه‌گیری کرنش‌ها در حین آزمایش خزش، کرنش مربوط به افت (جمع‌شدگی) بتن نیز دخالت داشته که برای تعیین کرنش واقعی مربوط به خزش (خزش پایه)، کرنش جمع‌شدگی از مقادیر اندازه‌گیری شده کسر شد.

<sup>۲</sup> - Demountable Mechanical (DEMEC)



شکل ۶- کرنش سنج مکانیکی (DEMEC)



شکل ۵- موقعیت نصب پین روی نمونه‌های بتنی استوانه‌ای



شکل ۸- قرائت کرنش الاستیک و خزش بوسیله کرنش مکانیکی



شکل ۷- آزمایش خزش LWAC

## ۲-۲- روش عددی (نرم‌افزار ABAQUS)

بمنظور مدل‌سازی خزش بتن در نرم‌افزار ABAQUS، بتن بصورت یک ماده ویسکوالاستیک در دامنه زمان تعریف می‌شود. یکی از روش‌هایی که امکان پیاده‌سازی خزش بتن در نرم‌افزار ABAQUS را فراهم می‌کند استفاده از داده‌های تجربی وادادگی یا آسودگی می‌باشد.

در این روش رفتار ویسکوالاستیک بتن با استفاده از مدول بدون بعد وادادگی برشی  $g_R(t)$  و حجمی  $k_R(t)$  تعریف می‌شود. مدول  $g_R(t)$  و  $k_R(t)$  بصورت روابط (۴۲) و (۴۳) تعریف می‌شود:

$$g_R(t) = \frac{G_R(t)}{G_o} \quad (42)$$

$$k_R(t) = \frac{K_R(t)}{K_o} \quad (43)$$

مدول وادادگی برشی و حجمی وابسته به زمان بوده که برای مواد الاستیک خطی از حاصل ضرب مدول‌های وادادگی اولیه  $G_R(0)$  و  $K_R(0)$  با یک تابع وادادگی که بدون بعد نیز می‌باشد تعیین می‌شود. از آنجایی که  $G_R(0) = G_o$  و  $K_R(0) = K_o$  می‌باشند مدول‌های وادادگی اولیه از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1+\nu_0)} \quad (44)$$

$$K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)} \quad (45)$$

با توجه به مطالب بیان شده مدول الاستیسیته بتن نیز وابسته به زمان بوده و مقدار آن در زمان  $t$  برابر خواهد بود با:

$$E_C(t, t_0) = \frac{E_C(t_0)}{1+\phi(t, t_0)} = \frac{E_0}{1+\phi(t, t_0)} \quad (46)$$

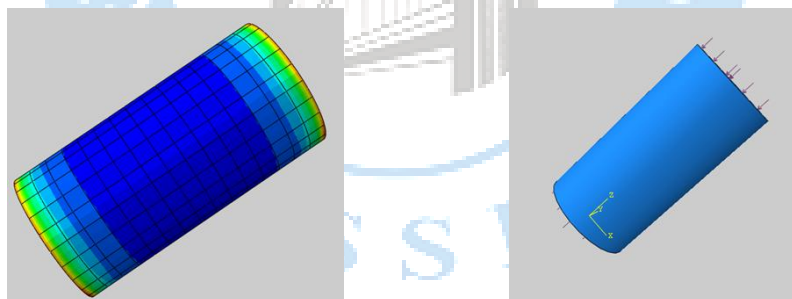
در این روش مدول  $g_R(t)$  و  $k_R(t)$  بر اساس ضریب خزش  $\phi(t, t_0)$  نرمالیزه شده و برابر خواهد بود با:

$$g_R(t) = \frac{G_R(t)}{G_0} = \frac{\frac{E_0}{2(1+\nu_0)}(1+\phi(t, t_0))}{\frac{E_0}{2(1+\nu_0)}} = \frac{1}{1+\phi(t, t_0)} \quad (47)$$

$$k_R(t) = \frac{K_R(t)}{K_0} = \frac{\frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}(1+\phi(t, t_0))}{\frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}} = \frac{1}{1+\phi(t, t_0)} \quad (48)$$

در روابط (47) و (48)  $1/(1+\phi(t, t_0))$  تابع وادادگی بتن بوده که در تعیین  $g_R(t)$  و  $k_R(t)$  مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ماده ویسکوالاستیک ماده‌ای است که در طول زمان هردو رفتار الاستیک و ویسکوز را از خود بروز می‌دهد. مدل ماده ویسکوالاستیک را تنها در ارتباط با رفتار الاستیک خطی و یا مواد پلاستیک مانند هایپرالاستیک می‌توان بکار برد و امکان معرفی ماده ویسکوالاستیک در ترکیب با سایر حالت‌های ماده مانند رفتار پلاستیک و سایر حالت‌های مواد وجود ندارد. برای معرفی مشخصات ویسکوالاستیک ماده در نرم‌افزار ABAQUS دو گزینه اصلی شامل حوزه زمان و حوزه فرکانس وجود دارد. با توجه به اینکه پدیده خزش بتن در حوزه زمان بررسی می‌شود، در نتیجه تنها بخش حوزه زمان برای مدل‌سازی خزش بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۸ - مدل نمونه بتنی در ABAQUS

برای معرفی مشخصات خزشی بتن در نرم‌افزار ABAQUS در حوزه زمان چهار روش تعریف شده است که یکی از روش‌ها، روش creep test data می‌باشد. اگر اطلاعات آزمون خزش ماده در دست باشد با استفاده از روش‌های تعریف شده می‌توان نسبت به مدل‌سازی خزشی ماده در نرم‌افزار اقدام نمود. حداقل مقادیر عددی که در این روش به نرم‌افزار معرفی می‌شود باید عددی بیشتر از یک باشد. زیر مجموعه‌های روش creep test data که در نرم‌افزار گنجانده شده است شامل روش shear test data، روش volumetric test data و نیز روش combined test data می‌باشند. در این تحقیق از روش combined test data برای وارد نمودن نتایج حاصل از آزمایش خزش استفاده شده است.

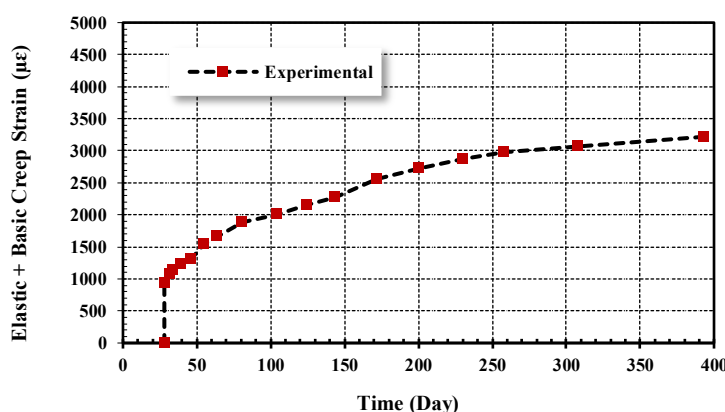
## ۲-۳- صحت سنجی مدل عددی

در علوم مهندسی ماده ویسکوالاستیک ماده‌ای است که در طول زمان هر دو رفتار الاستیک و ویسکوز را از خود بروز می‌دهد. بتن به ازای اعمال تنش ثابت  $0.4f'_c$ ، ابتدا رفتار الاستیک و در ادامه در طول زمان رفتار ویسکوز را از خود نشان می‌دهد. به منظور صحت سنجی رفتار خزشی بتن در نرم افزار ABAQUS، از مشخصات مکانیکی مندرج در جدول (۵) که از نتایج آزمایشگاهی تعیین شده‌اند استفاده می‌شود.

جدول ۵ - خصوصیات مکانیکی نمونه آزمایشگاهی

وزن مخصوص بتن	مدول الاستیسیته	$\sigma_o = \%40 f'_c$	مقاومت فشاری
$\gamma_c$	$E_c(t_0=28)$		$f'_c(t_0=28)$
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1850	14837	14.64	36.60

برای تعریف مشخصات ماده ویسکوالاستیک بتن در نرم‌افزار باید طوری عمل شود تا کرنش تحلیلی حاصل از نرم‌افزار با کرنش خزش پایه حاصل از آزمون تجربی مطابقت داشته باشد. از نمودار کرنش وابسته به زمان مطابق شکل (۹) که از آزمایش بر روی نمونه استوانه‌ای بتن بدست آمده کرنش الاستیک اولیه  $\varepsilon_e$  و خزش پایه  $\varepsilon_c$  که وابسته به زمان می‌باشد استخراج شده و از روی این اطلاعات و با استفاده از روابط (۴۹) تا (۵۳) ضریب خزش  $\phi(t_0, t)$ ، تابع وادادگی  $l/l + \phi(t, t_0)$ ، مدول بدون بعد وادادگی برشی  $g_R(t)$  و حجمی  $k_R(t)$  و تابع انطباق خزش  $J(t, t_0)$  و خزش ویژه  $J_o(t, t_0)$  محاسبه می‌شوند (جدول ۶).



شکل ۹ - نتایج آزمایشگاهی کرنش الاستیک اولیه و کرنش ناشی از خزش پایه نمونه بتن

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_{ec}(t, t_0) - \varepsilon_e \quad (49)$$

$$\phi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_c(t, t_0)}{\varepsilon_e} \quad (50)$$

$$g_R(t) = k_R(t) = \frac{l}{l + \phi(t, t_0)} \quad (51)$$

$$J(t, t_0) = \frac{l + \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \quad (52)$$



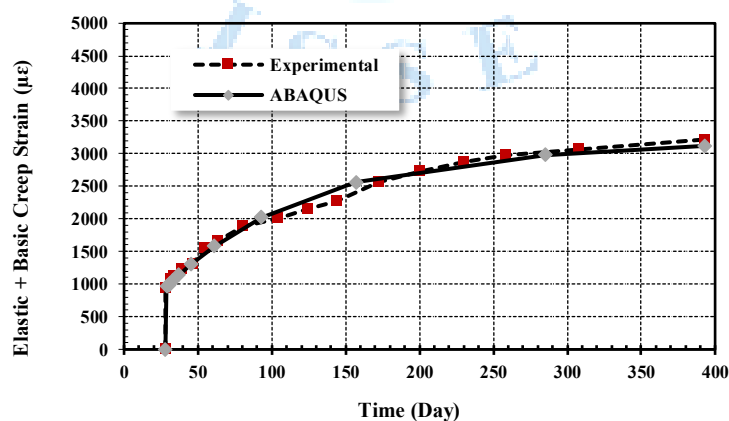
$$J_o(t, t_o) = \frac{\phi(t, t_o)}{E_c(t_o)} \quad (53)$$

جدول ۶ - مشخصات وابسته به زمان بتن ( $\epsilon_c = 939 \mu\epsilon$ ,  $E_c(t_o) = 14837 \text{ MPa}$ )

خزش ویژه $J_o(t, t_o)$ ( $\mu\epsilon/\text{MPa}$ )	تابع انطباق خزش $J(t, t_o)$ ( $\mu\epsilon/\text{MPa}$ )	مدول برشی و حجمی $g_R(t) = k_R(t)$	ضریب خزش $\phi(t, t_o)$	کرنش خزش پایه $\epsilon_c$ ( $\mu\epsilon$ )	زمان (روز) $(t - t_o)$
0	67	1	0	0	0
9	77	0.877	0.14	131	4
14	81	0.833	0.20	189	6
20	88	0.769	0.30	285	11
27	95	0.709	0.41	381	18
43	111	0.610	0.64	603	27
52	119	0.565	0.77	724	36
68	135	0.498	1.01	948	53
76	144	0.469	1.13	1064	76
87	154	0.437	1.29	1208	96
96	163	0.413	1.42	1333	116
117	184	0.366	1.73	1624	144
128	196	0.344	1.91	1790	172
138	206	0.328	2.05	1928	202
146	214	0.315	2.17	2040	230
152	220	0.307	2.26	2125	280
164	231	0.292	2.43	2279	365

میکرواسترین  $\mu\epsilon$   
 $10^{-6} \text{ mm/mm} = 1 \mu\epsilon$

در روش combined test data اطلاعات ویسکوالاستیک بتن که شامل زمان و مدول بدون بعد وادادگی برشی  $g_R(t)$  و حجمی  $k_R(t)$  بوده و در جدول (۶) به آنها اشاره شد به نرم افزار ABAQUS انتقال داده و پس از تحلیل مدل، مقدار کرنش خزش پایه بتن در زمان‌های مختلف تعیین می‌شود. اطلاعات بدست آمده از نرم‌افزار در شکل (۱۰) نشان داده شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به شکل (۱۰) مشخص می‌شود میزان کرنش ناشی از خزش پایه حاصل از نرم‌افزار ABAQUS که با روش combined test data تعیین شده با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد.

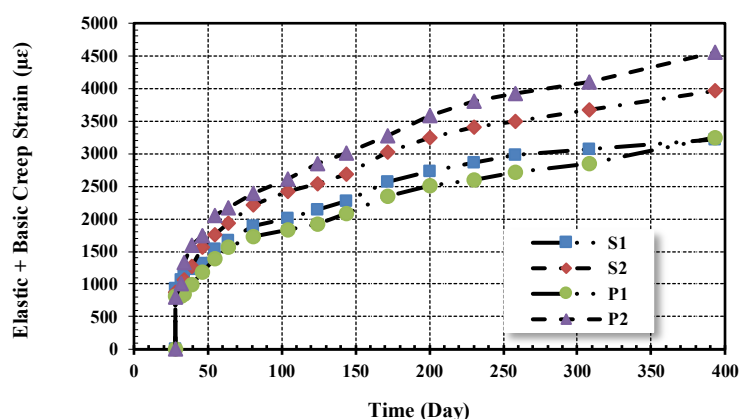


شکل ۱۰ - مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی (ABAQUS) کرنش ناشی از خزش نمونه بتن

## ۳- بررسی نتایج

شکل (۱۱) کرنش الاستیک اولیه  $\epsilon_e$  و کرنش ناشی از خزش پایه  $\epsilon_c$  برای طرح‌های اختلاط LWAC که پس از ۲۸ روز عمل-آوری بارگذاری شده بودند را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش، کرنش الاستیک چهار طرح اختلاط S1، S2، P1 و P2 به ترتیب ۹۳۹، ۸۷۷، ۸۱۸ و  $805 \mu\epsilon$  و کرنش ناشی از خزش پایه بعد از ۳۶۵ روز به ترتیب ۲۲۷۹، ۳۰۸۴، ۲۴۳۱ و  $3784 \mu\epsilon$  ثبت گردید. کمترین کرنش خزش پایه پس از ۳۶۵ روز مربوط به بتن S1 (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه ماسه معمولی) و بیشترین کرنش مربوط به بتن P2 (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه اسکوریا) می‌باشد، بعد از ۳۶۵ روز در طرح اختلاط P2 نسبت به S1 حدود ۶۶٪ کرنش بیشتری ایجاد شده است.

در طول مدت یک سال کرنش ناشی از خزش پایه بتن S1 (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه معمولی) و بتن P1 (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه معمولی) اختلاف کمتری با هم داشته و این موضوع نشان می‌دهد نوع درشت‌دانه اسکوریا و پومیس تاثیر کمتری در کرنش خزشی داشته و بیشترین عامل موثر ریزدانه می‌باشد. پس از ۳۶۵ روز اختلاف کرنش خزشی پایه بتن S1 با P1 که در هر دو مورد از ماسه معمولی استفاده شده، حدود ۷٪ می‌باشد.



شکل ۱۱ - مجموع کرنش الاستیک و کرنش خزش پایه طرح اختلاط LWAC

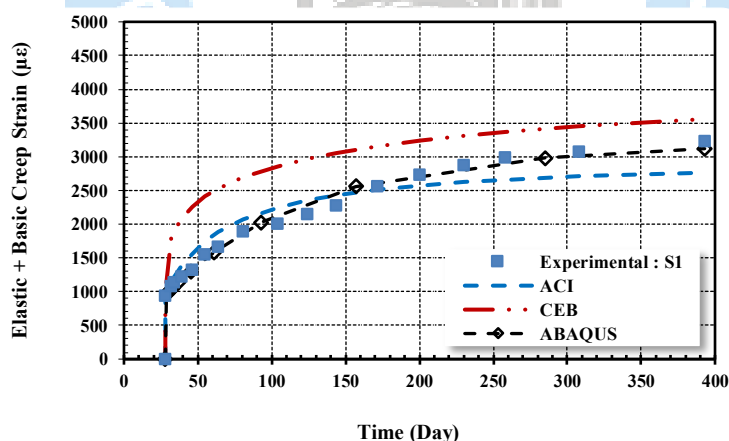
جدول ۷ - نتایج آزمایش خزش طرح اختلاط LWAC

نمونه P2 $\epsilon_e = 805 \mu\epsilon$			نمونه P1 $\epsilon_e = 818 \mu\epsilon$			نمونه S2 $\epsilon_e = 877 \mu\epsilon$			نمونه S1 $\epsilon_e = 939 \mu\epsilon$			زمان $t - t_0$ (روز)
مدول برشی و حجمی $\frac{l}{l + \phi(t, t_0)}$	ضریب خزش $\phi(t, t_0)$	کرنش خزش پایه $\epsilon_c$ ( $\mu\epsilon$ )	مدول برشی و حجمی $\frac{l}{l + \phi(t, t_0)}$	ضریب خزش $\phi(t, t_0)$	کرنش خزش پایه $\epsilon_c$ ( $\mu\epsilon$ )	مدول برشی و حجمی $\frac{l}{l + \phi(t, t_0)}$	ضریب خزش $\phi(t, t_0)$	کرنش خزش پایه $\epsilon_c$ ( $\mu\epsilon$ )	مدول برشی و حجمی $\frac{l}{l + \phi(t, t_0)}$	ضریب خزش $\phi(t, t_0)$	کرنش خزش پایه $\epsilon_c$ ( $\mu\epsilon$ )	
1	0.00	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
0.794	0.26	209	0.990	0.01	1	0.943	0.06	55	0.877	0.14	131	4
0.606	0.65	523	0.971	0.03	21	0.826	0.21	184	0.833	0.20	189	6
0.505	0.98	786	0.826	0.21	172	0.690	0.45	391	0.769	0.30	285	11
0.461	1.17	939	0.694	0.44	363	0.562	0.78	687	0.709	0.41	381	18
0.394	1.54	1243	0.588	0.70	570	0.500	1.00	874	0.610	0.64	603	27
0.372	1.69	1358	0.521	0.92	753	0.452	1.21	1063	0.565	0.77	724	36
0.337	1.97	1588	0.474	1.11	908	0.395	1.53	1345	0.498	1.01	948	53
0.308	2.25	1811	0.446	1.24	1012	0.362	1.76	1541	0.469	1.13	1064	76
0.283	2.53	2041	0.427	1.34	1096	0.345	1.90	1662	0.437	1.29	1208	96
0.267	2.74	2202	0.392	1.55	1270	0.326	2.07	1811	0.413	1.42	1333	116
0.246	3.07	2468	0.350	1.86	1524	0.291	2.44	2142	0.366	1.73	1624	144
0.225	3.45	2777	0.326	2.07	1693	0.270	2.70	2368	0.344	1.91	1790	172
0.212	3.72	2995	0.315	2.17	1777	0.257	2.89	2535	0.328	2.05	1928	202
0.205	3.88	3123	0.301	2.32	1900	0.251	2.99	2619	0.315	2.17	2040	230
0.197	4.08	3287	0.288	2.47	2024	0.239	3.19	2801	0.307	2.26	2125	280
0.177	4.66	3748	0.252	2.97	2431	0.221	3.52	3084	0.292	2.43	2279	365

با توجه به این که در این تحقیق در تمامی طرح‌های اختلاط LWAC مقدار مواد سیمانی (سیمان و میکروسیلیس)، روان کننده، زمان بارگذاری در آزمایش خزش و شرایط نگهداری یکسان بوده و متغیر فقط نوع سنگده‌ها می‌باشد لذا نتایج این تحقیق و نتایج تحقیق محققان دیگر [۱۴-۱۹] نشان می‌دهد که علاوه بر خمیر سیمان که نقش اصلی روی خزش دارد مدول الاستیسیته و سختی سنگدانه‌ها و سایر خواص فیزیکی سنگدانه‌ها عامل موثر در خزش بتن می‌باشند. هرچه سختی سنگدانه‌ها بیشتر باشد اثر مهار کننده بیشتری توسط سنگدانه‌ها روی خمیر سیمان ایجاد کرده و اجازه تغییر شکل کمتری را به خمیر سیمان می‌دهد در نتیجه خزش کمتری در بتن بوجود می‌آید. با توجه به این که چگالی سنگدانه پومیس (چگالی  $1/38 \text{ g/m}^3$ ) کمتر از چگالی اسکوریا (چگالی  $1/84 \text{ g/m}^3$ ) می‌باشد لذا پیش-بینی می‌شود سختی و مدول الاستیسیته سنگدانه پومیس کمتر از اسکوریا باشد.

همانطوری که در بخش (۲-۳) بیان شد برای مدل سازی خزش در نرم‌افزار ABAQUS لازم است بعضی مشخصات بتن که وابسته به زمان هستند مشخص باشند. با استفاده از نتایج آزمایش که در شکل (۱۱) نشان داده شد می‌توان کرنش ناشی از خزش پایه، ضریب خزش و مدول برشی و حجمی را به ترتیب از روابط (۴۹)، (۵۰) و (۵۱) تعیین نمود. نتایج محاسبات در جدول (۷) ارائه شده است.

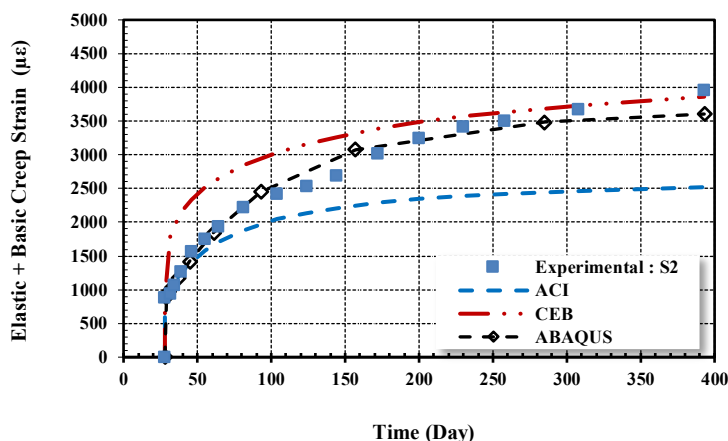
با توجه به اطلاعات مندرج در جدول (۷)، با استفاده از رابطه (۵۰) ضریب خزش برای بتن S1، S2، P1 و P2 پس از ۳۶۵ روز به ترتیب  $2/43$ ،  $3/52$ ،  $2/97$  و  $4/66 \mu\epsilon$  و با استفاده از رابطه (۵۳) خزش ویژه به ترتیب  $164$ ،  $270$ ،  $250$  و  $402 \mu\epsilon/MPa$  تعیین شده است. آیین‌نامه ۲۱۳R-۰۳ ACI [۱۴] مقدار خزش ویژه را بعد از ۳۶۵ روز برای NWC با مقاومت فشاری  $20/7$ ،  $27/6$ ،  $34/5$  و  $41/5 \text{ MPa}$  به ترتیب  $120$ ،  $110$ ،  $100$  و  $80 \mu\epsilon/MPa$  و برای LWAC با همین مقاومت فشاری به ترتیب در محدوده  $220-100$ ،  $175-90$ ،  $140-80$  و  $75-105 \mu\epsilon/MPa$  تعیین کرده است. آیین‌نامه ۲۳۴R-۰۶ ACI [۲۹] بر اساس تحقیقات دیگران گزارش می‌دهد که خزش بتن معمولی دارای میکروسیلیس در مقایسه با بتن فاقد میکروسیلیس با شرایط مقاومتی یکسان، تغییر محسوسی نداشته و در مورد بتن با مقاومت بالا (۸۰ تا ۱۰۰ MPa) با مقدار میکروسیلیس تا ۱۵٪ در مقایسه با بتن بدون میکروسیلیس هیچ تفاوتی در مقدار خزش ایجاد نشده است.



شکل ۱۲ - مقایسه مجموع کرنش الاستیک و کرنش خزش پایه طرح اختلاط S1 با روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI و CEB و مدل سازی ABAQUS

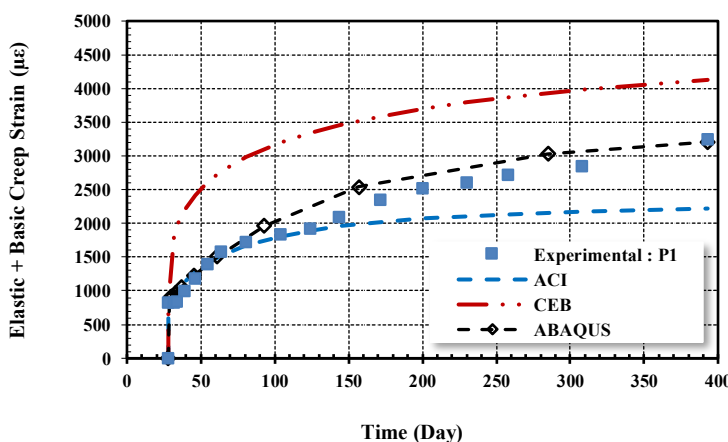
با توجه به شکل (۱۲) که مربوط به کرنش ناشی از خزش پایه طرح اختلاط S1 (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه ماسه معمولی) می‌باشد نشان می‌دهد رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ۲۰۹ ACI در طول مدت یک سال، با نتایج تجربی تا حدودی مطابقت داشته و بعد از ۳۶۵ روز نسبت به کرنش ناشی از خزش پایه S1 حدود ۱۴٪ کمتر پیش‌بینی می‌کند. در مدت یک سال رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ۲۰۱۰ CEB نسبت به طرح اختلاط S1 خزش بیشتری را می‌دهد. با توجه به تحلیل عددی روی نمونه S1 در نرم‌افزار ABAQUS، مشخص شد روش combined test data مطابقت خوبی با نتایج تجربی برای طرح اختلاط S1 دارد.

در شکل (۱۳) کرنش ناشی از خزش پایه طرح اختلاط S2 (درشت دانه و ریزدانه اسکوریا) با رابطه‌های پیشنهادی آیین‌نامه ACI 209 و CEB 2010 مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان کرنش خزشی حاصل از رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ACI 209 نسبت به خزش تجربی S2 کمتر بوده در حالی که رابطه پیشنهادی آیین‌نامه CEB 2010 در 3 ماه اول نسبت به خزش بیشتری را می‌دهد و پس از 3 ماه مقادیر تجربی و آیین‌نامه CEB اختلاف کمتری با هم دارند. بعد از 365 روز آیین‌نامه CEB 2010 نسبت به S2 حدود 3٪ کرنش خزشی بیشتر و ACI 209 حدود 36٪ کرنش کمتر پیش‌بینی می‌کند. در طول مدت یک سال روش مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS مطابقت خوبی با نتایج تجربی برای طرح اختلاط S2 دارد.



شکل ۱۳ - مقایسه مجموع کرنش الاستیک و کرنش خزش پایه طرح اختلاط S2 با روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI و CEB و مدل‌سازی ABAQUS

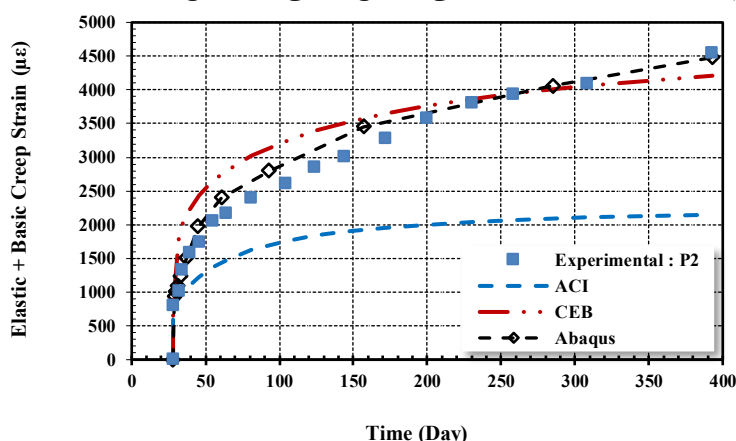
با توجه به شکل (۱۴) مشخص گردید میزان خزش پایه تعیین شده با رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ACI 209 در مقایسه با نتایج تجربی P1 (درشت دانه پومیس و ریزدانه ماسه معمولی) در طول مدت یک سال کمتر بوده در حالی که رابطه پیشنهادی آیین‌نامه CEB 2010 خزش بیشتری می‌دهد. کرنش ناشی از خزش پایه بعد از 365 روز بر اساس رابطه پیشنهادی آیین‌نامه CEB 2010 نسبت به نتایج تجربی P1 حدود 27٪ بیشتر و آیین‌نامه ACI 209 حدود 32٪ کمتر پیش‌بینی می‌کند. کلاً نتیجه گرفته می‌شود پارامترهای تعریف شده در آیین‌نامه‌های ACI 209 و CEB 2010 برای طرح اختلاط P1 پاسخگو نمی‌باشد. با توجه به تحلیل عددی روی نمونه P1 در نرم‌افزار ABAQUS، مشخص شد روش combined test data مطابقت خوبی با نتایج تجربی برای طرح اختلاط P1 دارد.



شکل ۱۴ - مقایسه مجموع کرنش الاستیک و کرنش خزش پایه طرح اختلاط P1

با روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI و CEB و مدل سازی ABAQUS

در شکل (۱۵) کرنش ناشی از خزش پایه طرح اختلاط P۲ (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه اسکوریا) با رابطه‌های پیشنهادی آیین‌نامه ۲۰۹ ACI و ۲۰۱۰ CEB مقایسه شده است. شکل نشان می‌دهد در طول مدت یک سال رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ۲۰۹ ACI با نتایج تجربی P۲ مطابقت نکرده و اختلاف بیشتری را داشته در حالی که رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ۲۰۱۰ CEB با این طرح اختلاط در طول مدت یک سال مطابقت دارد. بعد از ۳۶۵ روز رابطه پیشنهادی CEB نسبت به P۲ حدود ۷٪ کمتر پیش‌بینی می‌کند. در طول مدت یک سال روش مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS مطابقت خوبی با نتایج تجربی برای طرح اختلاط P۲ دارد.



شکل ۱۵- مقایسه مجموع کرنش الاستیک و کرنش خزش پایه طرح اختلاط P۲ با روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI و CEB و مدل سازی ABAQUS

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه در طرح‌های اختلاط این تحقیق ( $S_1, S_2, P_1$  و  $P_2$ ) مقدار مواد سیمانی، روان کننده، زمان شروع بارگذاری آزمایش خزش ( $t_0$ ) و شرایط نگهداری یکسان بوده و متغیر فقط نوع سنگدانه‌ها می‌باشد بنابراین در نتیجه‌گیری این تحقیق عمدتاً روی نوع سنگدانه‌ها متمرکز شده و موارد زیر را می‌توان به عنوان نتایج این تحقیق بیان کرد:

۱- میزان کرنش ناشی از خزش پایه بتن با سنگدانه‌های سبک (LWAC) که در این تحقیق اندازه‌گیری شده در مقایسه با خزش بتن با سنگدانه‌های معمولی (NWC) که توسط محققان دیگر اعلام شده بیشتر بوده که این تفاوت به نوع و مقاومت فشاری سنگدانه و نوع و میزان ریزدانه مصرف شده در بتن وابسته است. لذا علاوه بر خمیر سیمان که نقش اصلی روی خزش دارد سختی سنگدانه‌ها و سایر خواص فیزیکی سنگدانه‌ها عوامل موثر بر خزش می‌باشند. هرچه سختی سنگدانه‌ها بیشتر باشد اثر مهار کننده بیشتری توسط سنگدانه‌ها روی خمیر سیمان ایجاد کرده و اجازه تغییر شکل کمتری را به خمیر سیمان می‌دهد در نتیجه خزش کمتری در بتن بوجود می‌آید.

۲- در طول مدت یک سال کرنش ناشی از خزش پایه بتن  $S_1$  (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه معمولی) و بتن  $P_1$  (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه معمولی) اختلاف کمتری با هم داشته و این موضوع نشان می‌دهد نوع درشت‌دانه اسکوریا و پومیس تاثیر کمتری در کرنش خزشی داشته و بیشترین عامل موثر ریزدانه می‌باشد. اختلاف کرنش خزشی  $S_1$  با  $P_1$  پس از ۳۶۵ روز حدود ۷٪ می‌باشد.

۳- بعد از ۳۶۵ روز کمترین کرنش ناشی از خزش پایه مربوط به  $S_1$  (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه ماسه معمولی) و بیشترین کرنش مربوط به  $P_2$  (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه اسکوریا) بوده است. بعد از ۳۶۵ روز در طرح اختلاط P۲ نسبت به  $S_1$  حدود ۶۶٪ کرنش بیشتری ایجاد شده است. از این تحقیق نتیجه گرفته می‌شود تاثیر نوع ریزدانه در افزایش مقدار کرنش خزشی بیشتر است.

۴- در طول مدت یک سال رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ۲۰۹ ACI با نتایج تجربی طرح اختلاط  $S_1$  و رابطه پیشنهادی آیین‌نامه ۲۰۱۰ CEB با طرح اختلاط P۲ مطابقت داشته و بعد از ۳۶۵ روز رابطه ACI نسبت به کرنش ناشی از خزش پایه بتن  $S_1$  حدود ۱۴٪ و رابطه CEB نسبت به بتن P۲ حدود ۷٪ کمتر پیش‌بینی کرده‌اند.

۵ - با مطالعه خزش یک ساله بتن سبک دانه با نرم افزار ABAQUS مشخص گردید تعریف پارامترهای وادادگی مناسب با نتایج تجربی در نرم افزار ABAQUS، کرنش خزشی دراز مدت تحلیلی بتن مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی خواهد داشت.

## ۵ - مراجع

- [1] Gailitis, R. Figiela, B. Abelkalns, K. (2021). Creep and shrinkage behaviour of disintegrated and non-disintegrated cement mortar. *Materials, MDPI*.
- [2] Asamoto, S. Ohtsuka, A. Kuwahara, Y. and Miura, C. (2011). Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol 41, pp. 590-691.
- [3] Vandewalle, L. (2000). Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, pp. 201-208.
- [4] Mazloom, M. (2008). Estimating long-term creep and shrinkage of high-strength concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 316-326.
- [5] Hong, S. Choi, S. Yuan, T. Yoon, Y. (2023). A review on concrete creep characteristics and its evaluation on high-strength lightweight concrete. *journal of materials research and technology*, Vol. 22, pp. 230-251.
- [6] Bazant, Z. P. (2001). Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future. *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 203, pp. 27-38.
- [7] Gilbert, R.I. (2005). AS3600 Creep and Shrinkage Models for Normal and High Strength Concrete. *American Concrete Institute*, pp. 27-40.
- [8] ACI Committee 209-2R-08. (2008). *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*.
- [9] Comité Euro-International Du Béton (CEB). (2010). *CEB-FIP Model Code 2010 for Concrete Structures*.
- [10] Gardner, N.J. (2004). Comparison of prediction provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concretes, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, pp. 767-775.
- [11] Huo, Z.X. Al-Omaishi, N. and Tadros, M.K. (2001). Creep, shrinkage, and modulus of elasticity of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 98, pp. 440-449.
- [12] Jung, S. Ghaboussi, J. (2010). Inverse identification of creep of concrete from in situ load-displacement monitoring, *Engineering Structures*. Vol. 32, pp. 1437-1445.
- [13] Nilsen, A.U. Monteiro, P.J.M. and Gjörv, O.E. (1995). Estimation of the Elastic-Moduli of Lightweight Aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 276-280.
- [14] ACI Committee 213R-14. (2014). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*.
- [15] Tang, W.C. Cui, H.Z. Wu, M. (2014). Creep and creep recovery properties of polystyrene aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 51, pp. 338-343.
- [16] Zhang, Y. Wu. Z. Wu, X. (2014). Experimental Investigation on the Shrinkage and Creep Performance of Self-Compacting Lightweight Concrete. *Advanced Materials Research*, Vol. 860-863, pp 1346-1353
- [17] Wu, F. Liu, C. Wei Sun, W. Zhang, L. and Ma, Y. (2019). Mechanical and Creep Properties of Concrete containing Apricot Shell Lightweight Aggregate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.23(7), pp. 2948-2957.
- [18] Szydłowski, R. Labuzek, B. (2021). Experimental Evaluation of Shrinkage, Creep and Prestress Losses in Lightweight Aggregate Concrete with Sintered Fly Ash. *Materials, MDPI*.
- [19] Wendling, A. Sadhasivam, K. Floyd, R. (2018). Creep and shrinkage of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. *Construction and Building Materials*. Vol.167, pp.205-215.
- [20] ASTM C1240. (2005). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*.
- [21] ASTM C494. (2008). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*.
- [22] ACI Committee 211.4R-08. (2008). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*.
- [23] ASTM C39. (2001). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

- [24] ASTM C469. (2002). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
- [25] ASTM C617. (2003). *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens*.
- [26] ASTM C293. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)*.
- [27] ASTM C496. (2005). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [28] ASTM C512. (2002). *Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression*.
- [29] ACI Committee 234R-06. (2006). *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*.

