

## Internal Curing of Self-Compacting Concrete Using Superabsorbent Polymers Based on Sodium and Potassium

Morteza Mehrvand<sup>1</sup>, Hossein Parastesh<sup>2\*</sup>, Mohamadhossein Mobini<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, dept. of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran  
2- Associate Professor, dept. of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran  
2- Assistant Professor, dept. of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

### ABSTRACT

One Of the effective parameters in the final strength and durability of self-compacting concrete is post-fabrication curing. External Curing with water Supply and moisture retaining coating are commonly used despite the limitation of these methods. Internal curing is one of the main issues in the implementation of reinforced concrete and bulk concrete structures with much less restrictions, especially in high performance concrete. The aim of this study was to investigate the effect of internal curing of self-compacting concrete using superabsorbent polymers on mechanical properties and durability of concrete. These polymers absorb some water and gradually release it during the hydration process. Using this method, the curing process is performed more efficiently, not only on the surface but also in the depth of concrete elements. Two types of superabsorbent polymer powders based on sodium and potassium with two different amounts have been used in this research. Concrete samples at 7 and 28 days of age were subjected to compressive strength, electrical resistance, water permeability, thaw-freeze cycle and microstructure tests including SEM, XRD and XRF. Compressive strength of samples with internal curing increased by 11.4% compared to control samples. In terms of durability parameters, the samples with internal curing show a reduction of more than 100% in water permeability and 16.7% improvement in electrical resistance. The result of microstructural experiments showed an improvement in evolution of the hydration process by at least 2.4% and at most 8.3% due to internal curing.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 May 2022  
**Revise Date:** 01 August 2022  
**Accept Date:** 03 August 2022

### Keywords:

Internal curing  
Self-compacting concrete  
Superabsorbent polymers  
Microstructure  
SEM  
XRD  
XRF

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.343115.2817>

\*Corresponding author: Hossein Parastesh.  
Email address: Parastesh@usc.ac.ir

## عمل آوری داخلی بتن‌های خودتراکم با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب بر پایه سدیم و

### پتاسیم

مرتضی مهروند<sup>۱</sup>، حسین پرستش<sup>۲\*</sup>، محمد حسین مبینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

### چکیده

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در مقاومت نهایی و دوام بتن‌های خودتراکم، عمل آوری پس از ساخت می‌باشد. عمل آوری با استفاده از آب-رسانی و پوشش‌های حافظ رطوبت به صورت خارجی و سطحی، با در نظر داشتن محدودیت این روش‌ها، به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمل آوری داخلی به عنوان یکی از مباحث اساسی، در اجرای سازه‌های بتن آرمه و بتن حجیم، با محدودیت‌های بسیار کمتر به خصوص در بتن‌های ویژه و با مقاومت‌های بالا مطرح می‌باشد. بررسی تاثیر عمل آوری داخلی بتن خودتراکم با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب، بر روی مشخصات مکانیکی و دوام بتن، هدف این تحقیق می‌باشد. پلیمرهای سوپرجاذب مقداری از آب را به خود جذب کرده و طی فرآیند هیدراسیون به تدریج آن را آزاد می‌نمایند. با استفاده از این روش، فرآیند عمل آوری، نه تنها در سطح بلکه در عمق المانهای بتنی نیز به نحو موثرتری انجام می‌شود. دو نوع پودر پلیمر سوپرجاذب بر پایه سدیم و پتاسیم با دو مقدار مختلف در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. آزمون‌های بتن در سنین ۷ و ۲۸ روز تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، نفوذپذیری آب، چرخه ذوب-یخبندان و آزمایش‌های بررسی ریزساختار از جمله SEM، XRD و XRF قرار گرفتند. مقاومت فشاری آزمون‌ها با عمل آوری داخلی نسبت به آزمون‌های کنترل به میزان ۱۱/۴٪ افزایش داشته است. از منظر پارامترهای دوام نیز آزمون‌ها با عمل آوری داخلی، کاهش بیش از ۱۰۰٪ در میزان نفوذپذیری آب و ۱۶/۷٪ بهبود در مقاومت الکتریکی نشان می‌دهند. با بررسی نتایج آزمایش‌های ریزساختار، بهبود تکامل فرآیند هیدراسیون به میزان حداقل ۲/۴٪ و حداکثر ۸/۳٪ در اثر عمل آوری داخلی مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: عمل آوری داخلی، بتن خودتراکم، پلیمرهای سوپرجاذب، ریزساختار، SEM، XRD، XRF.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.343115.2817	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.343115.2817	۱۴۰۲/۰۳/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۱۲	۱۴۰۱/۰۵/۱۲	۱۴۰۱/۰۵/۱۰	۱۴۰۱/۰۳/۰۲
				*نویسنده مسئول:		
				حسین پرستش		
				parastesh@usc.ac.ir		پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

پیشنهاد ساخت بتن خودتراکم<sup>۱</sup> در کشور ژاپن توسط هاشیمه اوکامورا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۶ ارائه گردید [۱]. امروزه با اصلاحات بعمل آمده، این نوع بتن در راستای اهدافی نظیر، حذف عملیات تراکم و کاهش آلودگی صوتی، جایگیری بهینه در قالبها با تراکم میلگرد و اشکال مختلف، کاهش هزینه، نیروی انسانی و زمان بتن‌ریزی و ... با تنظیم میزان لزجت و کاهش خطر جداسازی سنگدانه‌ها، موفق عمل نموده است [۲]. توجه ویژه به طرح مخلوط بتن خودتراکم، دانه‌بندی سنگدانه‌ها، استفاده از فوق روان‌کننده، میکروسیلیس، فیلر خنثی مناسب، از عمده دلایل پایداری، مقاومت، کارایی و در نهایت تراکم ریزساختار هیدرات سیلیکات کلسیم<sup>۳</sup>، C-S-H، به‌عنوان محصول اصلی هیدراسیون در این نوع بتن می‌باشد [۳-۵].

روش‌های متعددی برای عمل‌آوری بتن از جمله آب‌رسانی، افزایش دما و .. و تاثیرات آن بر روی مشخصات مکانیکی و دوام بتن مورد بررسی قرار گرفته است [۶،۷]. عمل‌آوری داخلی بتن در سال‌های اخیر موضوع بحث در جوامع علمی بوده [۸] و به طور ویژه‌ای در خصوص بتن معمولی، خودتراکم و بتن با مقاومت و کارایی بالا<sup>۴</sup>، HPC، هدف تحقیقات جدید می‌باشد. هرچند تکنیک‌های متعددی برای استفاده از روش عمل‌آوری داخلی در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر تاکید بر روی استفاده از روش عمل‌آوری داخلی با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب<sup>۵</sup>، SAP، می‌باشد. پلیمرهای سوپر جاذب قادر به جذب مقدار قابل توجهی مایع از محیط اطراف است و می‌توانند بدون حل شدن، مایع جذب شده را در داخل ساختار خود نگهداری نمایند. در شکل ۳ نمونه پلیمر سوپر جاذب، مورد استفاده در این تحقیق نمایش داده شده است که با جذب مایع تا چند برابر وزن خود ساختار ژل ماندنی را به وجود آورده و طی فرآیند هیدراسیون، آب نگهداری شده را به مرور آزاد می‌نماید [۹].

اکثر پلیمرهای سوپر جاذب، پلی‌الکترولیت‌های متقاطع می‌باشند. به دلیل ماهیت یونی و ساختار متصل، آن‌ها می‌توانند مقادیر زیادی آب و سایر محلول‌های آبی را بدون حل شدن در خود جذب نمایند. پلیمرهای سوپر جاذب، کاربردهای گسترده‌ای را به عنوان یک ماده با تکنولوژی بالا پیدا کرده‌اند، به عنوان مثال در لنزهای تماسی، ایمپلنت‌های بدن، آتش‌سوزی، پوشک کودکان و صنعت کشاورزی از این مواد استفاده شده است. امروزه تولید جهانی SAP بیش از ۵۰۰،۰۰۰ تن در سال است که حدود ۸۵ درصد آن در تولید پوشک کودکان استفاده می‌شود. شرح استفاده از SAP جهت استفاده برای عمل‌آوری داخلی بتن در پژوهش‌های انجام شده مختلفی ذکر شده است [۱۰]. پلیمرهای سوپر جاذب SAP می‌توانند به طرح مخلوط بتن به صورت خشک اضافه شده و در طول اختلاط آب مورد نیاز خود را جذب کنند. نتایج یک تحقیق نشان می‌دهد که در شدیدترین و بحرانی‌ترین حالت، بتن تا ۵۰ کیلوگرم در مترمکعب آب داخلی برای جلوگیری از خشکیدگی و جمع‌شدگی ناشی از خشکیدگی نیاز دارد [۹]. در تحقیقی دیگر نیز تاثیر مثبت عمل‌آوری داخلی با آب، علاوه بر هیدراسیون و توزیع رطوبت، بر روی مشخصات بتن نظیر مقاومت، جمع‌شدگی، ترک‌خوردگی و دوام بتن نیز قید شده است [۱۱].

پلیمرهای سوپر جاذب عمدتاً برای جذب آب و محلول‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حداکثر آب قابل جذب ۵۰۰ برابر وزن پلیمرهای سوپر جاذب می‌باشد. با این حال میزان جذب آب پلیمرهای سوپر جاذب تجاری موجود در بازار، حدود ۵۰ gr/gr در محلول نمک رقیق مانند ادرار می‌باشد و در محلول‌های با قابلیت یونی بالا مانند آب یونیزه شده موجود در خمیر سیمان مقدار جذب آب کمتر از ۲۰ gr/gr است [۱۲].

پلیمرهای سوپر جاذب به تدریج در تولید بتن به عنوان یک عامل عمل‌آوری داخلی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این مواد سوپر جاذب به طور موثری انقباض یا جمع‌شدگی سنین اولیه بتن را کاهش داده و باعث کاهش ریسک خطرات ناشی از ترک‌خوردگی و بهبود مقاومت در برابر یخ‌زدگی بتن نیز می‌شوند. با این حال، می‌توان بیان کرد که مقدار SAP، اندازه اجزاء SAP و نسبت آب به سیمان بتن تاثیرات مشخصی بر روی ارزیابی بتن ساخته شده با SAP دارد. در تحقیقی دیگر، آزمایشاتی برای بررسی رابطه بین نسبت آب به

<sup>1</sup> Self-Compacting Concrete (SCC)

<sup>2</sup> Hajime Okamura

<sup>3</sup> Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)

<sup>4</sup> High Performance Concrete (HPC)

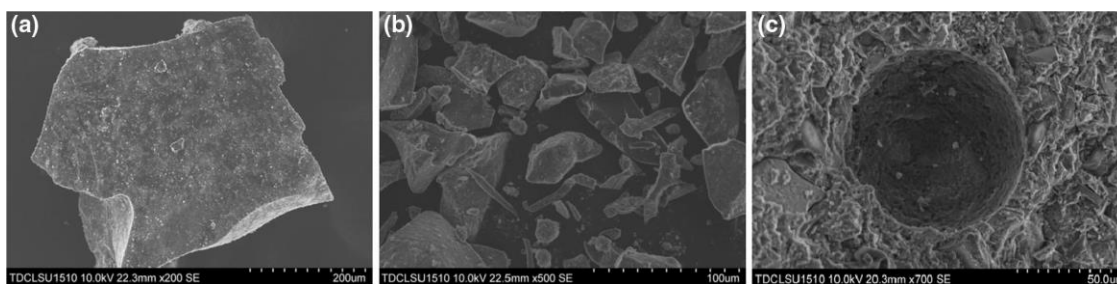
<sup>5</sup> Super Absorbent Polymers (SAP)

سیمان بتن، مقدار و اندازه ذرات SAP به عنوان معیار تاثیرگذار بر روی مقاومت بتن انجام و روابطی برای پیش بینی مقاومت بتن ساخته شده با SAP برای سنین ۳ و ۷ و ۲۸ روزه پیشنهاد شده است. مقدار SAP برای استفاده در عمل آوری داخلی بتن ۰/۲٪ وزنی سیمان پیشنهاد شده است [۱۳].

بتن خودتراکم و بتن با کارایی بالا، HPC، با نسبت های پایین آب به سیمان، ساختار فشرده و متراکمی دارند که باعث می شود ورود آب خارجی به شدت مشکل گردد و این موضوع به نوبه خود باعث بروز پدیده جمع شدگی بعد از هیدراسیون خواهد شد. عمل آوری داخلی یک راه حل جدید برای رفع این مشکل است که جنسن و همکاران<sup>۷</sup> [۱۴، ۱۵] و همچنین مچت چرین و همکاران<sup>۸</sup> [۱۶، ۱۷] در پژوهش های خود این موضوع را بررسی و تایید کرده اند. کرآی<sup>۹</sup> [۱۸] دریافت زمانی که آب اضافی با مقداری در حدود ۳۰ الی ۵۰ کیلوگرم در مترمکعب به بتن اضافه شود، جمع شدگی خودبخودی بتن ۵۱٪ تا ۵۸٪ کاهش می یابد. یاو و همکاران<sup>۱۰</sup> [۱۹] دریافتند که استفاده از پلیمرهای SAP در عمل آوری داخلی باعث کاهش عرض ترک و جمع شدگی در بتن می گردد. جیاو<sup>۱۱</sup> [۲۰] بر روی موضوع تاثیر مواد سوپر جاذب بر روی انقباض آزاد ملات مطالعه نمود؛ نتایج این تحقیق نشان می دهد که پلیمرهای SAP مقادیر آب را با نسبت ۱ به ۳۰ جذب می کند و اضافه نمودن ماده SAP به بتن به مقادیر ۰/۲٪-۰/۴٪ وزنی سیمان، می تواند به صورت قابل توجهی جمع شدگی ملات را کاهش دهد و یا حتی آنرا از میان ببرد. کین و همکاران<sup>۱۲</sup> [۲۱] استفاده از مقادیر ۰/۳٪-۰/۲٪ پلیمرهای SAP را مبنا قرار داده و دریافتند که خواص مکانیکی، مشخصات تغییر شکل، مقاومت ترک خوردگی پلاستیک و دوام بتن به طور گسترده ای بهبود یافتند.

چن و همکاران<sup>۱۳</sup> [۲۲] ترک خوردگی در سنین اولیه<sup>۱۴</sup> و پدیده انقباض و جمع شدگی<sup>۱۵</sup> را در آزمون های بتنی ساخته شده با پلیمرهای سوپر جاذب مورد آزمایش قرار دادند و مشخص گردید که استفاده از این مواد، تاثیر بسیاری در بهبود انقباض و جمع شدگی و مقاومت ترک خوردگی بتن دارد. طی پژوهشی دیگر دینگ و همکاران<sup>۱۶</sup> [۲۳] یافتند که پلیمرهای SAP رطوبت داخلی بتن را با توزیع آب داخلی بهبود می بخشد، این موضوع گرادیان رطوبت نسبی داخلی بتن را بهبود می بخشد و باعث خود عمل آوری<sup>۱۷</sup> بتن می گردد.

استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب در عمل آوری داخلی بتن می تواند مقاومت یخ زدگی بتن را نیز بهبود بخشد. بنتز و همکاران<sup>۱۸</sup> [۲۴] و جنسن<sup>۱۹</sup> [۲۵] گزارش کردند که خروج آب از این پلیمرها و فضای خالی ناشی از آن، باعث تولید حباب می شوند. بالا رفتن میزان حباب هوا در بتن، مقاومت بتن در برابر یخبندان را افزایش می دهد. اکثر منافذ ایجاد شده در تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی<sup>۲۰</sup> بر اثر وجود پلیمرهای سوپر جاذب در بتن، مشابه شکل ۱، به صورت کروی هستند.



شکل ۱: حفره ها و منافذ تشکیل شده (c) در اثر افزودن پلیمرهای سوپر جاذب (a, b) در تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی [۲۵].

<sup>6</sup> High-Performance Concrete (HPC)

<sup>7</sup> Jensen et al.

<sup>8</sup> Mechtcherine et al.

<sup>9</sup> Craeye

<sup>10</sup> Yao et al.

<sup>11</sup> Jiao

<sup>12</sup> Qin et al.

<sup>13</sup> Chen et al.

<sup>14</sup> Early Stage Cracking

<sup>15</sup> Shrinkage

<sup>16</sup> Ding et al.

<sup>17</sup> Self-Curing

<sup>18</sup> Bentz et al.

<sup>19</sup> Jensen

<sup>20</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

افزافه نمودن پلیمرهای سوپرجاذب به طور قطع بر روی مقاومت بتن تاثیرگذار می باشد. هر چند به دلیل تفاوت در نوع، مقدار، اندازه، قابلیت جذب آب، تفاوت نسبت آب به سیمان و دیگر شرایط تجربی این تاثیر به طور کامل و به درستی مشخص نگردیده است. بر همین اساس، محققین مختلف در مورد تاثیر پلیمرهای سوپرجاذب بر خواص مکانیکی بتن، نتایج متضادی بدست آورده اند. برخی از مطالعات بر روی نمونه های ملات و بتن نشان داده است که افزودن این پلیمرها می تواند مقاومت بتن در سنین بالاتر را بهبود ببخشد. بنتز و همکاران [۲۴] یافتند که بعد از افزودن SAP به میزان ۰/۴٪ به ملات سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزه ملات ۰/۷٪ کاهش یافت حال آنکه مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن به میزان ۱۹٪ بیشتر از نمونه ساخته شده بدون استفاده از SAP بدست آمد. نتایج آزمایش های جیکر و همکاران [۲۶] نشان داد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات عمل آوری شده با پلیمرهای سوپرجاذب SAP، تقریباً ۲۰٪ بهبود می یابد.

عدم تاثیر منفی بر روی مقاومت بتن در استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب توسط شروف و همکاران [۲۷] نشان داده شد. گآو و همکاران [۲۸] دریافتند که بعد از افزودن SAP به میزان ۰/۲٪ و ۰/۶٪ به سیمان آلومیناته [۲۴] مقاومت فشاری بتن به ترتیب به میزان ۱۲ و ۲۳ درصد افزایش می یابد. پورجوادی و همکاران [۲۹] خواص مکانیکی ملات کامپوزیت ساخته شده از کلئید نانو سیلیکا و SAP را مطالعه نموده و متوجه شدند که مقاومت فشاری بهبود یافته اما مقاومت خمشی کاهش یافته است.

هوانگ و وانگ [۳۰] یافتند که بعد از افزودن مقدار مناسب پلیمرهای سوپرجاذب مقاومت فشاری و خمشی بتن پرمقاومت با کارایی بالا، کاهش نمی یابد. پنگ [۳۱] دریافت که بعد از اضافه نمودن SAP به بتن مقاومت فشاری در سنین اولیه قدری کاهش می یابد اما مقاومت فشاری ۲۸ روزه حتی از مقاومت نمونه های بدون پلیمر، بیشتر می شود. کین و همکاران [۲۱] با بررسی تاثیر این پلیمرها بر مقاومت بتن دریافتند که SAP تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی مقاومت فشاری ندارد اما مقاومت خمشی و کششی بتن را به میزان ۵٪-۹٪ افزایش می دهد.

در تحقیقات بنتز و جنسن [۳۲]، انتقال رطوبت توسط پلیمرهای SAP در ملات سیمان مورد بررسی قرار گرفت و از تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای مشاهده ریزساختار و آشکارسازی پیشرفت هیدراسیون سیمان استفاده شد. با بررسی ریزساختار مشاهده گردید که وجود SAP در فرآیند تولید ساختار C-S-H و افزایش راندمان هیدراسیون سیمان در بتن موثر بوده، تعداد ترک های اصلی در سنین اولیه کاهش و استحکام ماتریس سیمان افزایش یافته است، به نحوی که بتن می تواند به طور موثرتری در مقابل انتقال رطوبت و تحمل بار مقاومت نماید.

در فرآیند ساخت بتن از پودر پلیمر سوپرجاذب به صورت خشک و هم به صورت اشباع شده استفاده شده است. البته به دلیل توزیع مناسب تر این پلیمرها در مخلوط به صورت خشک، برخی محققان این روش را ترجیح داده اند [۳۳، ۳۴]. به عنوان جمع بندی انتظار می رود عمل آوری داخلی در کاهش ترک های داخلی بتن، تکمیل فرآیند هیدراسیون، کاهش انقباض بتن، افزایش مقاومت بتن در چرخه ذوب و یخبندان، افزایش مقاومت مکانیکی بتن اعم از مقاومت فشاری، خمشی و ... کمک شایانی نماید [۳۵-۳۸].

در تحقیقات اخیر نیز کاربرد پلیمرهای سوپرجاذب و تاثیرات آن ها در خواص رئولوژی بتن، عمل آوری داخلی و تاثیر آن بر جمع شدگی خودبخودی و پلاستیک [۲۸]، خود آب بندی [۲۹]، خود ترمیمی ترک ها [۳۰] و بهبود دوام و عملکرد در شرایط ذوب و یخبندان مورد تایید قرار گرفته است [۳۹]. همچنین در تحقیقات جدید، استفاده از تحلیل ریزساختار و تخلخل سنجی نفوذ جیوه در بتن های فوق توانمند [۳۱]، نشان داده است که عمل آوری داخلی با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب می تواند ساختار منافذ در بتن را اصلاح نماید. با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب در این بتن ها ابتدا کاهش جمع شدگی خودبخودی و با افزایش پلیمرها، افزایش جمع شدگی خودبخودی مشاهده گردید، این در

<sup>21</sup> Geiker et al.

<sup>22</sup> Schroeff et al.

<sup>23</sup> Gao et al.

<sup>24</sup> Aluminate Cement

<sup>25</sup> Huang and Wang

<sup>26</sup> Peng

<sup>27</sup> Bentz, D.P. and Jensen

<sup>28</sup> Plastic and Autogenous Shrinkage

<sup>29</sup> Self-Sealing

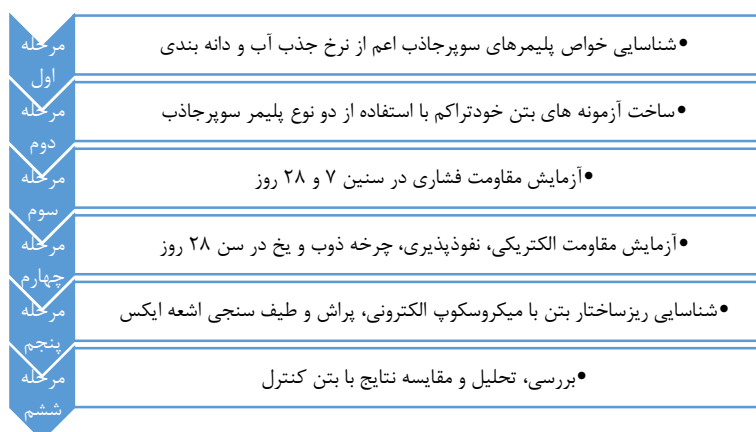
<sup>30</sup> Self-Healing of Cracks

<sup>31</sup> Ultra-High Performance Concrete (UHPC)

حالی است که با افزایش پلیمرهای سوپرچاذب جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن<sup>۳۲</sup> در همه حال افزایش نشان می‌دهد. در این تحقیق بهترین عملکرد در کاهش جمع‌شدگی هنگام استفاده از پلیمرهای سوپرچاذب به میزان ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان به دست آمد. علاوه بر آن مقاومت کششی بتن فوق توانمند با ارتقاء و بهبود هیدراسیون و تراکم بیشتر در ریزساختار بتن، بهبود پیدا کرد. افزایش بیشتر میزان پلیمرهای سوپرچاذب در زمینه مقاومت کششی بتن، به دلیل تاثیر منفی بر ساختار و افزایش منافذ و تخلخل، تاثیر منفی در بتن فوق توانمند به همراه داشته است [۴۰].

پلیمرهای سوپرچاذب بر پایه آلژینات و سولفونات<sup>۳۳</sup> و کاربرد انواع مختلف آن‌ها در خمیر سیمان از دیگر موضوعات مطرح شده در پژوهش‌های اخیر می‌باشد. شناخت ترکیبات شیمیایی و رفتار این پلیمرها در عمل‌آوری داخلی، جهت انتخاب پلیمر سوپرچاذب مناسب برای کاربردهای مختلف در محیط‌های سیمانی کمک شایانی می‌نماید [۴۱].

با توجه به افزایش اهمیت عمل‌آوری داخلی در دستیابی به بتن با کارایی و دوام بالا، در تحقیق حاضر طی یک برنامه آزمایشگاهی مطابق با نمودار شکل ۲، ابتدا به بررسی خواص پلیمرهای سوپرچاذب بر پایه سدیم و پتاسیم از جمله نرخ جذب آب پرداخته شد. سپس ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتن خودتراکم با استفاده از هر دو نوع پلیمرهای سوپرچاذب صورت گرفت. در ادامه با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، چرخه ذوب و یخبندان، آزمایش نفوذپذیری، آزمایش میکروسکوپ الکترونی، SEM، طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس<sup>۳۴</sup>، XRF، پراش اشعه ایکس<sup>۳۵</sup>، XRD، به بررسی اثرات عمل‌آوری داخلی با استفاده از پلیمرهای سوپرچاذب بر پایه سدیم و پتاسیم، بر مشخصات بتن خودتراکم و مقایسه نتایج با بتن کنترل پرداخته شد. نتایج حاصل از منظر مقاومت، دوام و ریزساختار مورد بررسی، تحلیل و مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۲: نمودار روند انجام عملیات آزمایشگاهی تحقیق حاضر.

## ۲- مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق جهت ساخت بتن خودتراکم از سیمان پرتلند معمولی نوع ۲ با مشخصات ارایه شده توسط کارخانه سازنده وفق جدول ۱، آب شرب شهری، شن با اندازه ۱۹-۴/۷۵ میلی‌متر و ماسه مصرفی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر، دوبر شسته شده با دانه‌بندی پیوسته وفق استاندارد ASTM C136 [۴۲]، میکروسیلیس با مشخصات ارایه شده توسط کارخانه سازنده مندرج در جدول ۲، پودر سنگ آهک به عنوان فیلر خنثی، فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات-اثر و دو نوع پودر پلیمر سوپرچاذب بر پایه سدیم و پتاسیم، شکل ۳، استفاده شده است.

<sup>32</sup> Drying Shrinkage

<sup>33</sup> Alginate and Sulfonate

<sup>34</sup> X-Ray Fluorescence Spectroscopy

<sup>35</sup> X-Ray Diffraction

جدول ۱: مشخصات سیمان مصرفی

مقدار	عنوان	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب
۳۲۵۰	سطح مخصوص cm <sup>2</sup> /gr	۰/۳	Na <sub>2</sub> O(%)	۲/۵	SO <sub>3</sub> (%)	۲۰/۸	SiO <sub>2</sub> (%)
۰/۱	انبساط (اتوکلاو) %	۱/۲	F <sub>2</sub> CaO(%)	۱/۸	MgO (%)	۵/۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
۱۷۰-۲۱۰	زمان گیرش (دقیقه)	۶۳/۳	CaO(%)	۰/۵۵	K <sub>2</sub> O (%)	۳/۶۵	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)

جدول ۲: مشخصات میکروسیلیس

درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب
۹۴/۵۵	SiO <sub>2</sub>	۱/۳۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۸	MgO	۰/۱۵	Na <sub>2</sub> O
۰/۲۶	CaO	۰/۲۱	K <sub>2</sub> O	۰/۰۶	S	۰/۱۷	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
کمتر از ۱	La&Lu	۲/۱۷	L.O.I	۰/۸۹	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۴	TiO <sub>2</sub>



شکل ۳: پودر و ژل پلیمر سوپرجاذب بر پایه سدیم (سمت راست)، بر پایه پتاسیم (سمت چپ) مورد استفاده در این تحقیق.

### ۳- روش تحقیق و آزمایش‌ها

این تحقیق بر اساس ساخت آزمون‌های بتنی، انجام آزمایش و تحلیل نتایج طی یک برنامه آزمایشگاهی می‌باشد. طرح مخلوط مندرج در جدول ۳ جهت ساخت بتن خودتراکم، با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب بر پایه سدیم و پتاسیم با دو مقدار ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی سیمان و همچنین آزمون‌های کنترل مورد استفاده قرار گرفته است [۴۳].

جدول ۳: طرح مخلوط بتن خودتراکم و کنترل

طرح اختلاط	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	پودر سنگ (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده %	میکروسیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	W/C %	پلیمر سوپرجاذب	مقدار پلیمر سوپرجاذب /وزنی سیمان
۱	۶۶۸	۸۶۷	۱۵۵	۱/۲	۴۵	۴۵۰	۰/۳۵	پایه سدیم	۰/۲
۲	۶۶۸	۸۶۷	۱۵۵	۱/۲	۴۵	۴۵۰	۰/۳۵	پایه سدیم	۰/۳
۳	۶۶۸	۸۶۷	۱۵۵	۱/۲	۴۵	۴۵۰	۰/۳۵	پایه پتاسیم	۰/۲
۴	۶۶۸	۸۶۷	۱۵۵	۱/۲	۴۵	۴۵۰	۰/۳۵	پایه پتاسیم	۰/۳
۵	۸۲۳	۸۶۷	-	-	-	۵۰۰	۰/۳۵	-	-
۶	۶۶۸	۸۶۷	۱۵۵	۰/۴	-	۵۰۰	۰/۳۵	-	-

آزمون‌های بتن خودتراکم و کنترل پس از ساخت و قالب‌گیری، جهت جلوگیری از تبادل رطوبت با محیط، با استفاده از پوشش‌های نایلونی مشابه شکل ۴، به طور کامل پوشانده و در دمای ۱±۲۴ سانتی‌گراد در محیط آزمایشگاه نگهداری شد. آزمون‌های مکعبی در ابعاد ۱۵ سانتی‌متر و آزمون‌های استوانه در ابعاد ۱۰\*۲۰ سانتی‌متر ساخته شد. صرف‌نظر از آزمایش‌های جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب، طی فرآیند انجام این تحقیق، تعداد ۱۲۶ آزمون بتنی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت.

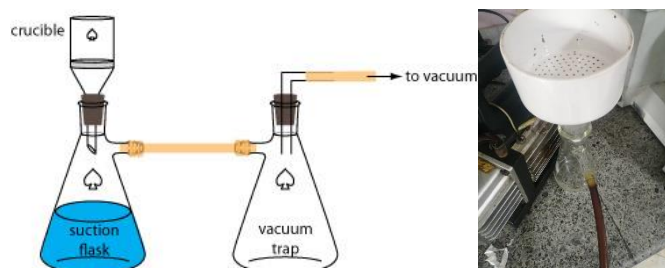


شکل ۴: ساخت و نگهداری آزمون‌های بتنی در محیط آزمایشگاه و برخی دستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق.

پس از ساخت آزمون‌های بتن خودتراکم و کنترل، آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز، آزمایش‌های مقاومت الکتریکی، چرخه ذوب-یخبندان، نفوذپذیری آب و آزمایش‌های بررسی ریزساختار از جمله SEM، XRD و XRF در سن ۲۸ روز با استفاده از دستگاه‌های نشان داده شده در اشکال ۴، ۹ و ۱۲، بر اساس استانداردهای ذکر شده در بخش مربوط به هر آزمایش، انجام و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است.

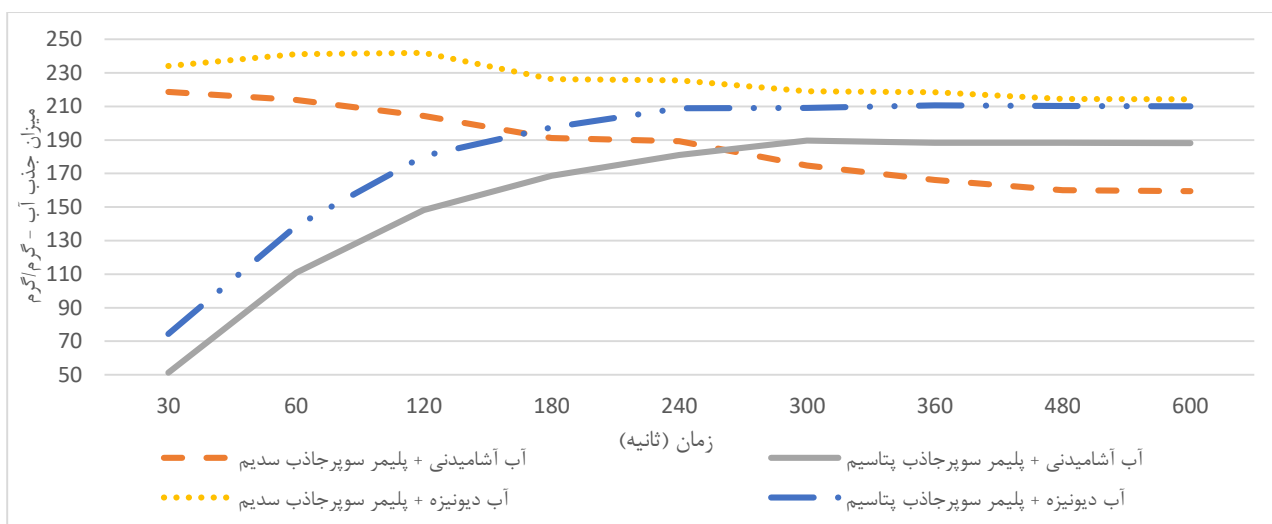
### ۳-۱ آزمایش جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب

برای شناخت خواص پلیمرهای سوپرجاذب استفاده شده در این تحقیق ابتدا میزان و نرخ جذب آب دو نوع پودر پلیمری سوپرجاذب در آب شرب شهری تهران و همچنین آب دیونیزه مورد آزمایش قرار گرفت. سپس جهت بررسی میزان و نرخ جذب آب پلیمرهای مذکور در بتن، خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان مندرج در طرح اختلاط تهیه و با استفاده از پمپ خلاء و قیف بوختر، مطابق شکل ۵، آب مخلوط به همراه یونهای سیمان استخراج و میزان جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب در محلول به دست آمده مورد آزمایش قرار گرفت.

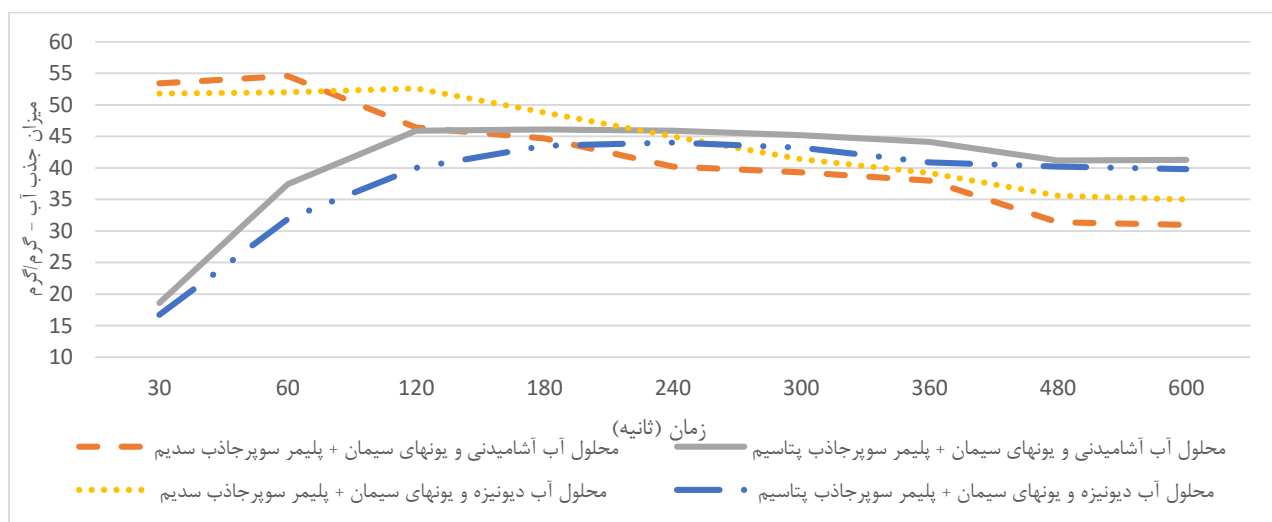


شکل ۵: قیف بوختر و پمپ وکیوم جهت استخراج آب یونیزه از خمیر سیمان.





شکل ۶: نتایج آزمایش میزان و نرخ جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب در آب شرب و آب دیونیزه.

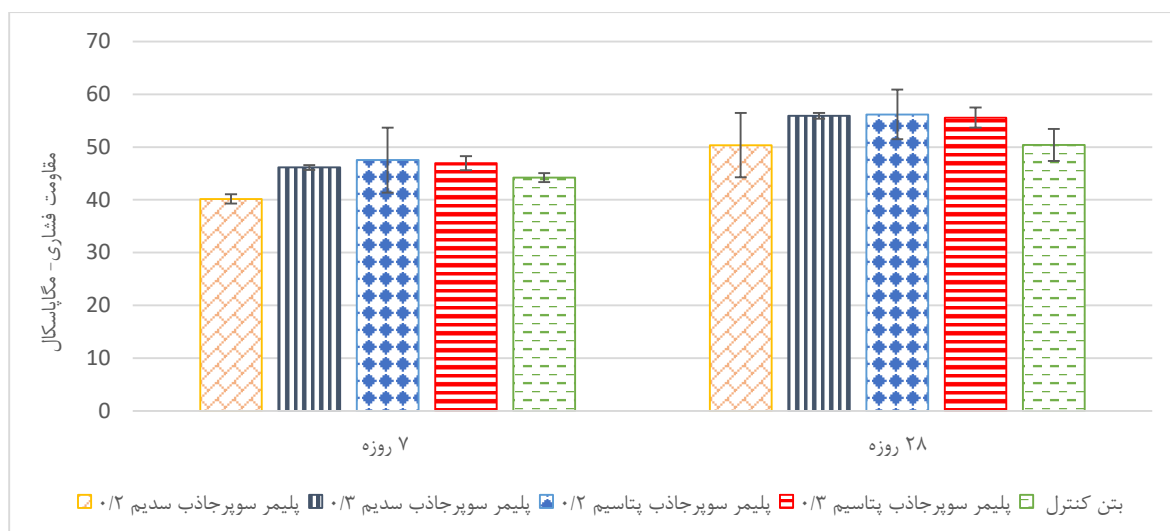


شکل ۷: نتایج آزمایش میزان و نرخ جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب در محلول آب یونیزه به دست آمده از خمیر سیمان.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان و نرخ جذب آب در دو نوع الیاف سوپرجاذب به کار رفته در این تحقیق، مندرج در شکل ۶ و ۷، نشان می‌دهد که مقدار جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب بر پایه سدیم در آب شرب و دیونیزه بیش از ۲۰۰ برابر وزنی پلیمرها می‌باشد و بسیار سریع اتفاق می‌افتد، این در حالی است که حداکثر میزان جذب آب در پلیمرهای سوپرجاذب پتاسیم از لحاظ وزنی به میزان ۱۵٪ کمتر و مابین دقایق سه و پنج آزمایش رخ می‌دهد. انجام آزمایش جذب آب در حضور یون‌های سیمان، ناشی از استخراج آب خمیر سیمان، نشان می‌دهد که توانایی جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب سدیم تا ۵۵ برابر وزنی پلیمرها کاهش داشته است ولی سرعت جذب آب مشابه حالت قبل بسیار سریع می‌باشد، این میزان جذب آب در هنگام استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب پتاسیم با حضور یون‌های سیمان، به میزان ۱۸/۵٪ کمتر و مابین دقایق دو و سه آزمایش رخ می‌دهد. میزان حداکثر جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب در تحقیقات سایر محققین [۱۲] در شرایط عادی  $500 \text{ g/g}$  و در شرایط وجود آب یونیزه حاصل از خمیر سیمان  $20 \text{ g/g}$  قید شده است، این در حالی است که نتایج حاصل از آزمایش‌های این پژوهش، حداکثر آب قابل جذب توسط پلیمرهای سوپرجاذب در شرایط عادی را قدری کمتر از  $250 \text{ g/g}$  و حداکثر آب قابل جذب در شرایط آب یونیزه ناشی از خمیر سیمان را حدود  $50 \text{ g/g}$  نشان داده است.

## ۳-۲ آزمایش مقاومت فشاری

پس از ساخت، عایق نمودن و نگهداری آزمون‌های مکعبی (با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر) در دمای  $24 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد، در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 [۴۴] انجام شد. نتایج آزمایش در شکل ۸ نمایش داده شده است.



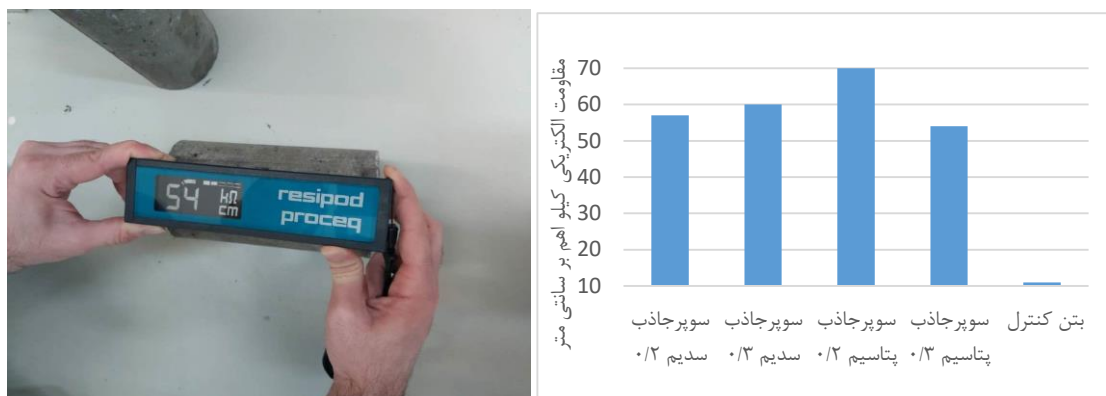
شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز.

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که عمل‌آوری داخلی با استفاده از الیاف سوپر جاذب پتاسیم با مقدار ۰/۲٪ وزنی سیمان در روند کسب مقاومت، عملکرد بهتری داشته است. مقدار افزایش مقاومت فشاری در این حالت در مقایسه با استفاده از پلیمر سوپر جاذب سدیم به میزان ۰/۲٪ وزنی سیمان، در سنین ۷ و ۲۸ روز به میزان ۱۸/۳٪ و ۱۱/۵٪ رشد را نشان می‌دهد. این مقدار افزایش نسبت به بتن کنترل در سنین مشابه به میزان ۷/۵٪ و ۱۱/۴٪ بوده است. میزان تاثیر استفاده از پلیمر سوپر جاذب سدیم و پتاسیم با میزان ۰/۳٪ وزنی سیمان در سنین ۷ و ۲۸ روز مشابه یکدیگر بوده و به میزان ۶ الی ۱۰ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن کنترل را نشان می‌دهد. می‌توان افزایش مقاومت فشاری با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب در عمل‌آوری داخلی را با توجه به نتایج سایر آزمایش‌های این تحقیق، از جمله آزمایش‌های ریزساختار، به افزایش تکامل روند هیدراسیون و انسجام ساختار کلی بتن خودتراکم حاصل، مرتبط دانست.

نتایج حاصل از پژوهش سایر محققین افزایش مقاومت فشاری ملات سیمان [۲۴] به میزان ۷٪ در سن ۷ روز و ۱۹٪ در سن ۲۸ روز را نشان می‌دهد، این در حالی است که در تحقیق حاضر افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن عمل‌آوری شده با پلیمرهای سوپر جاذب پتاسیم نسبت به بتن کنترل، افزایشی حداکثر معادل ۷/۵٪ در سن ۷ روز و ۱۱/۴٪ در سن ۲۸ روز را نشان می‌دهد. این در حالی است که در سایر تحقیقات [۳۰، ۳۱، ۲۱] افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های عمل‌آوری شده توسط پلیمرهای سوپر جاذب ثبت نگردیده است.

## ۳-۳ آزمایش مقاومت الکتریکی

سنجش مقاومت الکتریکی چهار نقطه‌ای آزمون‌های بتنی استوانه‌ای، با استفاده از دستگاه Resipod Proceq طبق استاندارد AASHTO TP95-14 [۴۵] انجام شد. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش و نتایج حاصل در شکل ۹ نمایش داده شده است. قانون اهم، در این آزمایش برقرار می‌باشد، لذا با توجه به اختلاف ولتاژ بین دو الکترود داخلی و شدت جریان بین دو الکترود بیرونی، با انجام سه تکرار، مقاومت الکتریکی آزمون بتنی استوانه‌ای با ابعاد  $10 \times 20$  سانتی‌متر بر حسب کیلو اهم-سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید.



شکل ۹: آزمایش مقاومت الکتریکی و نمودار نتایج.

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی مشاهده شد که آزمون‌های عمل‌آوری شده با استفاده از پلیمر سوپرچاذب پتاسیم به میزان ۰/۲ درصد وزنی سیمان مقاومت الکتریکی بیشتری را از خود نشان می‌دهند. مقاومت الکتریکی حاصل، نسبت به حالت استفاده از پلیمر سوپرچاذب سدیم با مقدار ۰/۲٪ وزنی سیمان، به میزان ۲۲/۸٪ افزایش داشته است. تکامل بیشتر روند هیدراسیون و همچنین افزایش تراکم در ساختار بتن از دلایل نتایج کسب شده به شمار می‌روند. با توجه به نتایج حاصل و استفاده از جداول استانداردهای AASHTO TP95-14 و AASHTO T358 [۴۶]، احتمال نفوذ یون کلر در بتن با عمل‌آوری داخلی توسط پلیمرهای سوپرچاذب، در محدوده "قابل چشم‌پوشی" ارزیابی می‌گردد.

#### ۳-۴ آزمایش ذوب و یخبندان

در این تحقیق آزمایش ذوب و یخبندان با ۲۸ چرخه ذوب و یخ بر اساس استاندارد ملی ایران ISIRI 12728 [۴۷]، با استفاده از دستگاه نشان داده شده در شکل ۴ بر روی آزمون‌های ۲۸ روزه در بازه دمایی ۲۰- تا ۲۰+ درجه سانتی‌گراد انجام شد. آزمون‌ها، به دلیل محدودیت قالب‌های مورد استفاده، پس از یک برش به میزان ۱۰ سانتی‌متر و آماده‌سازی مشابه روند نمایش داده شده در شکل ۱۰، داخل دستگاه قرار گرفتند. با توجه به کیفیت ساخت آزمون‌های بتن و دقت در نگهداری و عمل‌آوری، مشاهده شد که میزان افت وزن در واحد سطح آزمون‌ها پس از گذراندن دوره‌های ذوب و یخبندان در کلیه طرح اختلاط‌های ساخته شده (حتی بتن کنترل)، صفر می‌باشد.

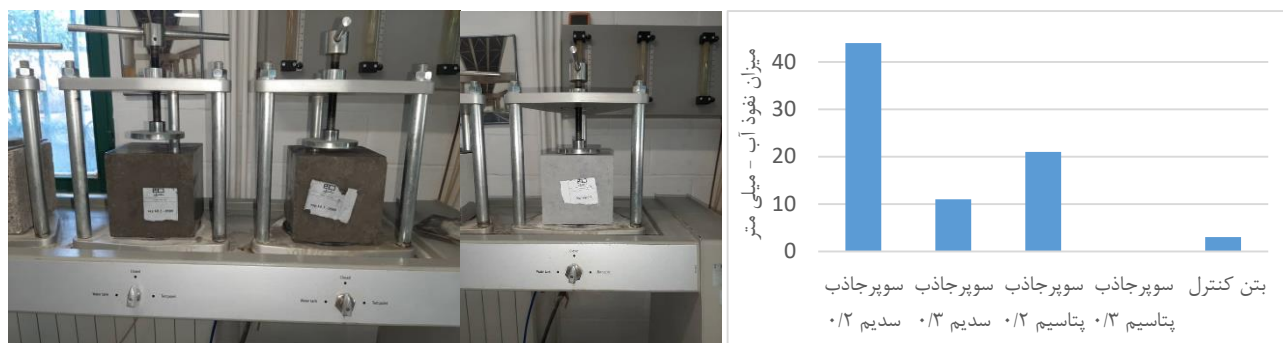


شکل ۱۰: برش و آماده‌سازی آزمون جهت آزمایش چرخه ذوب و یخبندان.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش چرخه‌های ذوب و یخبندان، تاثیر نامطلوبی در اثر عمل‌آوری داخلی با استفاده از پلیمرهای سوپرچاذب بر دوام بتن در شرایط آزمایش، مشاهده نگردید. در تحقیقات سایر محققین [۲۴،۲۵] نیز خروج آب از پلیمرهای سوپرچاذب، ایجاد فضای خالی و تولید حباب در بتن در تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی مشاهده شده است و این امر به عنوان دلیل افزایش مقاومت بتن در برابر شرایط جوی و ذوب و یخ عنوان شده است.

## ۳-۵ آزمایش نفوذپذیری آب

سنجش میزان نفوذ آب تحت فشار در آزمون‌های بتن ساخته شده، بر اساس استاندارد BS-EN12390-8:2000 [۴۸]، تحت فشار ۵۰۰ کیلوپاسکال و طی زمان ۷۲ ساعت در سن ۲۸ روز، انجام شد. نحوه انجام آزمایش و نتایج حاصل در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

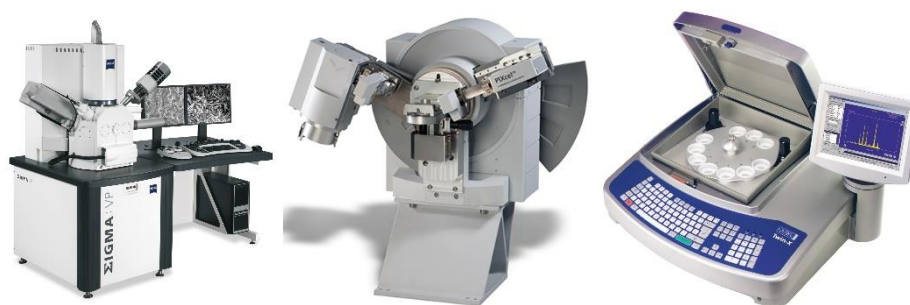


شکل ۱۱: انجام آزمایش جهت بررسی میزان نفوذ آب و نمودار نتایج.

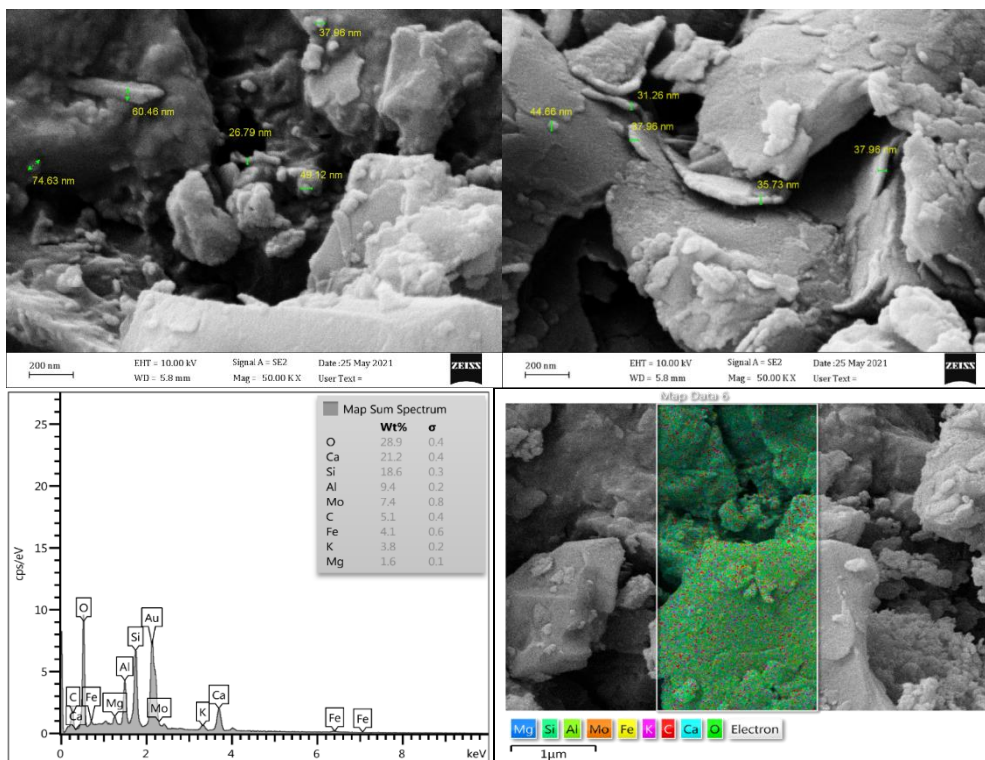
بررسی نتایج آزمایش، کاهش نفوذپذیری آب در آزمون‌های بتنی عمل‌آوری شده با استفاده از پلیمر سوپرجاذب پتاسیم نسبت به آزمون‌های عمل‌آوری شده با پلیمر سوپرجاذب سدیم، در مقادیر وزنی مشابه، به میزان بیش از ۱۰۰٪ را نشان داد. به عنوان دلایل کاهش نفوذپذیری می‌توان از افزایش تراکم در ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم، C-S-H، همچنین افزایش تکامل فرآیند هیدراسیون نام برد. نفوذ آب به میزان کمتر از ۴۵ میلی‌متر در کلیه آزمون‌های عمل‌آوری شده با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب، نشان‌دهنده امکان استفاده از این روش عمل‌آوری در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، وفق معیارهای پیشنهادی در خصوص پایایی بتن، می‌باشد.

## ۳-۶ بررسی ریزساختار

در این تحقیق از آزمایش میکروسکوپ الکترونی، SEM، مجهز به آشکارساز EDS جهت تصویربرداری میکروسکوپی از آزمون و تحلیل کمی عناصر، آزمایش پراش اشعه ایکس، XRD، جهت تشخیص فاز کریستال و خصوصیات آن، به همراه آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس، XRF، جهت تعیین ترکیب شیمیایی موجود در آزمون‌ها، استفاده شد. دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی، پراش اشعه ایکس و طیف‌سنجی فلورسانس مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نمونه نتایج حاصل از آزمایش‌های بررسی ریزساختار در شکل ۱۳ و ۱۴ درج گردیده است. با استفاده از تصاویر و اطلاعات حاصل از Mapping انجام شده عناصر، ترکیبات شیمیایی و میزان آن‌ها شناسایی می‌گردد و بر اساس ترکیبات شیمیایی مهم شناسایی شده در بتن، میزان پیشرفت فرآیند هیدراسیون و ... ارزیابی می‌گردد.



شکل ۱۲: دستگاه SEM (راست)، XRD (وسط) و XRF (چپ) مورد استفاده در این تحقیق.



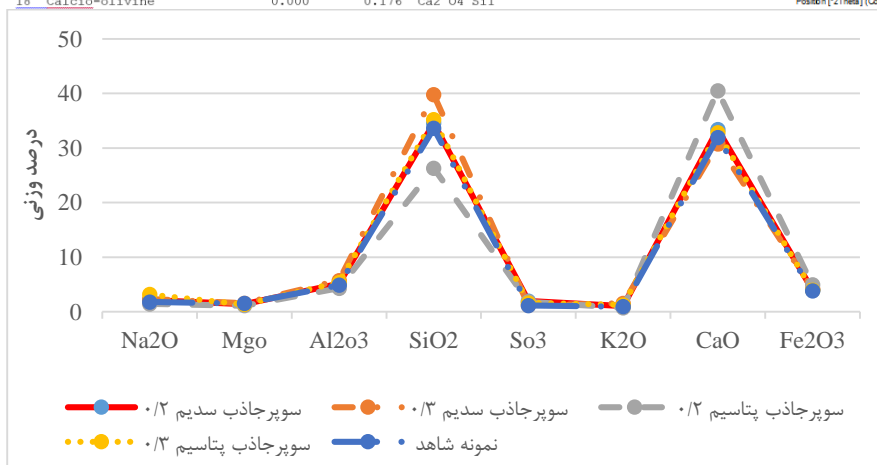
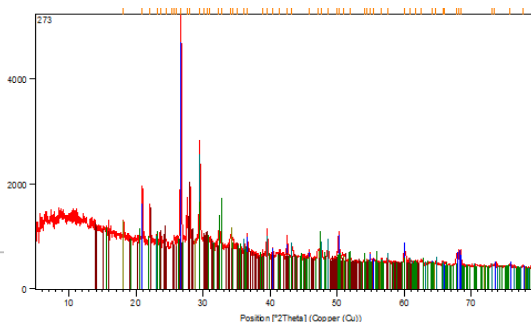
شکل ۱۳: تصاویر SEM و Mapping یکی از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق.

**Anchor Scan Parameters**

Start Position [°2Th.]: 5.0151  
 End Position [°2Th.]: 79.9471  
 Step Size [°2Th.]: 0.0260  
 Anode Material: Cu  
 Generator Settings: 40 mA, 40 kV

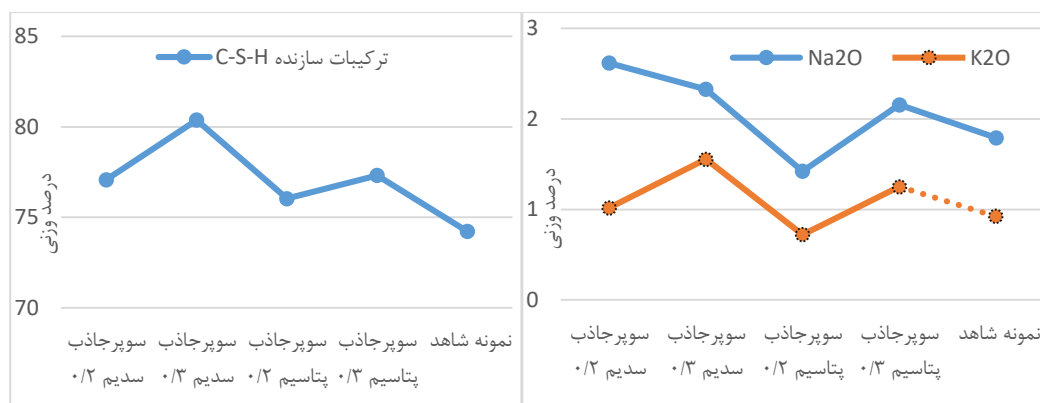
**Pattern List**

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displ. [°2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	98-004-6143	57	Quartz low	0.000	0.731	O2 Si1
*	98-007-8860	47	Calcite	0.000	0.318	Cl Cal O3
*	01-072-0156	32	Calcium Hydroxide	0.000	0.075	Ca ( O H ) 2
*	98-006-1785	22	Albite low	0.000	0.222	Al1 Na1 O8 Si3
*	98-002-8587	18	Calcio-olivine	0.000	0.176	Ca2 O4 Si1



شکل ۱۴: نمونه‌ای از تحلیل نتایج بدست آمده و شناسایی ترکیبات موثر حاصل از آزمایش XRF و XRD.

از نتایج حاصل و ترکیبات شیمیایی تشخیص داده شده در آزمایش‌های ریزساختار، عوامل اصلی تشکیل ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم، C-S-H، و قلیائیت معادل بر اساس ترکیبات  $Na_2O$  و  $K_2O$  شناسایی و نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نمونه‌ای از تحلیل نتایج بدست آمده حاصل از بررسی ریزساختار

بررسی ریزساختار طی آزمایش‌ها و نتایج حاصل نشان می‌دهند که ترکیبات سازنده C-S-H در آزمون‌های بتنی عمل‌آوری شده با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب سدیم و پتاسیم، نسبت به آزمون کنترل از مقادیر بیشتری برخوردار هستند. این موضوع نشان دهنده تکمیل بیشتر فرآیند هیدراسیون در اثر عمل‌آوری داخلی می‌باشد. این مقدار افزایش در حالت عمل‌آوری داخلی با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب سدیم ۰/۳٪ و در حالت استفاده از پلیمرهای پتاسیم به میزان ۰/۴٪ مشاهده شد.

جهت بررسی احتمال بروز واکنش قلیایی در اثر عمل‌آوری بتن با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب بر پایه سدیم و پتاسیم، میزان قلیائیت معادل شناسایی شده در ریزساختار بتن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به وجود یون‌های سدیم و پتاسیم در پلیمرهای سوپرجاذب و میزان Na<sub>2</sub>O شناسایی شده حاصل از آزمایش‌های شناسایی ریزساختار بتن، جهت کاهش احتمال بروز واکنش قلیایی توصیه می‌گردد ضمن استفاده از سیمان با قلیایی کم، واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌ها نیز کنترل گردد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیرات عمل‌آوری داخلی با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب در بتن خودتراکم، پس از ساخت آزمون‌ها و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، ذوب و یخبندان، نفوذپذیری بتن و بررسی ریزساختار بتن با آزمایش‌های XRD، XRF و SEM طی یک برنامه آزمایشگاهی، انجام و اهم نتایج به شرح ذیل حاصل گردید:

۱- پلیمرهای سوپرجاذب بر پایه پتاسیم سرعت جذب آب کمتری نسبت به پلیمرهای سوپرجاذب بر پایه سدیم دارند. حداکثر میزان جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب در آب شرب و دیونیزه بیش از ۲۰۰ برابر وزن پلیمر بوده و در پلیمرهای سوپرجاذب پتاسیم به میزان ۱۵٪ کمتر می‌باشد. حضور یون‌های سیمان باعث کاهش حداکثر میزان جذب آب پلیمرهای سوپرجاذب سدیم تا ۵۵ برابر وزن پلیمر و ۱۸/۵٪ کاهش بیشتر در پلیمرهای سوپرجاذب پتاسیم می‌گردد.

۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری آزمون‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز نشان می‌دهد که عمل‌آوری داخلی و روند کسب مقاومت با استفاده از پلیمر سوپرجاذب پتاسیم با میزان ۰/۲ درصد وزنی سیمان، نتایج بهتری را کسب کرده است. این افزایش به طور میانگین، نسبت به مقاومت فشاری آزمون‌های عمل‌آوری شده با پلیمر سوپرجاذب سدیم به ترتیب در سنین ۷ و ۲۸ روز معادل ۱۸/۳٪ و ۱۱/۵٪ و نسبت به آزمون کنترل معادل ۷/۵٪ و ۱۱/۴٪ می‌باشد.

۳- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی آزمون‌های عمل‌آوری شده با استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب پتاسیم به میزان ۰/۲ درصد وزنی سیمان، نیز نشان دهنده عملکرد بهتر عمل‌آوری داخلی در روند کسب مقاومت و تکمیل فرآیند هیدراسیون می‌باشد. مقاومت الکتریکی در این حالت نسبت به استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب بر پایه سدیم به میزان ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی به ترتیب ۲۲/۸٪ و ۱۶/۷٪ افزایش را نشان داده و احتمال نفوذ یون کلر در بتن با عمل‌آوری داخلی توسط پلیمرهای سوپرجاذب، در محدوده "قابل چشم-پوشی" ارزیابی می‌گردد.

- ۴- مشاهده نتایج آزمایش ذوب و یخبندان در آزمون‌های کنترل و عمل‌آوری شده با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب نشان می‌دهد که ساخت و عمل‌آوری با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب خللی در دوام بتن حاصل به وجود نمی‌آورد.
- ۵- آزمایش نفوذپذیری آب تحت فشار در آزمون‌های بتن نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر سوپر جاذب بر پایه پتاسیم، با درصد‌های وزنی مشابه نسبت به پلیمر سوپر جاذب سدیم، در کاهش نفوذپذیری بتن به میزان بیش از ۱۰۰٪ تاثیر داشته است.
- ۶- بررسی ریزساختار آزمون‌های عمل‌آوری شده با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب و تحلیل ترکیبات شیمیایی آنها، نشان می‌دهد که فرآیند هیدراسیون در این آزمون‌ها نسبت به بتن کنترل تکامل بیشتری داشته و ترکیبات سازنده C-S-H بیشتری در هنگام استفاده از پلیمرهای پایه سدیم و پتاسیم به میزان حداقل ۲/۴۴٪ و حداکثر ۸/۳٪ مورد شناسایی واقع شدند.
- ۷- با توجه به نتایج آزمایش‌های ریزساختار و میزان قلیائیت معادل شناسایی شده در ترکیبات نهایی بتن بر پایه  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  استفاده از سیمان با قلیایی کم و انجام آزمایش واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌ها توصیه می‌گردد.

## سپاسگزاری

کلیه مراحل ساخت، عمل‌آوری و آزمایش‌های بتن خودتراکم در آزمایشگاه شرکت شنزار انجام شده است، لذا از مدیریت، پرسنل فنی و مهندسی آزمایشگاه شرکت شنزار که در این تحقیق دلسوزانه همکاری نموده‌اند تشکر می‌گردد.

## مراجع

- [1] Okamura, H. (1997). Self- Compacting high performance Concrete. *Concrete International*, pp. 50-54.
- [2] Nunes, S. and Figueiras, H. and Oliveira, P.M. and Coutinho, J.S. and Figueiras, J. (2006). A methodology to Assess robustness of SCC mixtures. *Cement and Concrete Research*, Vol (36), pp. 2115- 2122.
- [3] Heikal, M. and Zohdy, K. and Abdelkreem, M. (2012). Mechanical, Microstructure and Rheological Characteristics of High Performance Self-Compacting Cement Pastes and Concrete Containing Ground Clay Bricks. *Construction and Building Materials*, Vol (38), pp.101-109.
- [4] Yang, H. and Bi, Z. and Chen, J. and Cao, Y. and Jiang, Q. and Yang, G. and Jiang, Y. (2009). Summarization on influence of water to concrete performance. *Concrete Materials*, Vol (8), pp. 115-116.
- [5] Kucche, K.J. and Jamkar, S.S. and Sadgir, P.A. (2015). Quality of water for making concrete. *International Journal of Scientific and Research Publication*, Vol (5), pp. 1-10.
- [6] Pachideh, G. and Gholhaki, M. (2021). An Experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*, Vol (22), pp. 550-565, DOI: 10.1002/suco.201900274.
- [7] Pachideh, G. and Gholhaki, M. and Moshtagh, A. (2020). Experimental study on mechanical strength of porous concrete pavement containing pozzolans. *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol (9), pp. 38-52, DOI: 10.1520/ACEM20180111.
- [8] Philleo, R. (1991). Concrete science and reality. *Materials science of concrete II*, pp. 1-8.
- [9] Mejlhede, O. and Jensen, P. (2006). Techniques and materials for internal water curing of concrete. *Materials and Structures*, Vol (39), pp. 817-825, DOI: 10.1617/s11527-006-9136-6.
- [10] Jensen, O.M. and Hansen, P.F. (2002). Water-entrained cement-based materials-II. Implementation and experimental results. *Cement and Concrete Research*, Vol (32), pp. 973-978.
- [11] Mejlhede, O. and Jensen, P. and Lura, S. and Igarashi, I. (2007). Experimental observation of internal water curing of concrete. *Materials and Structures*, Vol (40), pp. 211-220, DOI: 10.1617/s11527-006-9132-x.
- [12] Buchholz, F. and Graham, A. (1998). *Modern superabsorbent polymer technology*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Ding, H. and Zhan, L. and Zhang, P. (2017). Factors Influencing Strength of Super Absorbent Polymer (SAP) Concrete. *Transactions of Tianjin University*, Vol (23), pp. 245-257, DOI: 10.1007/s12209-017-0049-y.
- [14] Jensen, O.M, and Lura, P. (2006). Techniques and materials for internal water curing of concrete. *Materials and Structures*, Vol (39), pp. 817-825, DOI: 10.1617/s11527-006-9136-6.
- [15] Kovler, K. and Jensen, O.M. (2007). *Internal Curing of Concrete. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 196-ICC*. France: RILEM Publications SARL.

- [16] Mechtcherine, V. and Dudziak, L. and Schulze, J. (2006). Internal curing by super absorbent polymers (SAP)–Effects on material properties of self-compacting fiber-reinforced high performance concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*. Lyngby, Denmark, pp. 87–96.
- [17] Mechtcherine, V. and Dudziak, L. and Hempel, S. (2009). Mitigating early age shrinkage of ultra-high performance concrete by using super absorbent polymers (SAP). *Creep Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures–CONCREEP-8*. Taylor & Francis Group, London, pp. 847–853.
- [18] Craeye, B. (2006). *Reduction of Autogenous Shrinkage of Concrete by Means of Internal Curing*. M.s Thesis, Ghent University, Ghent Belgium.
- [19] Yao, Y. and Zhu, Y. and Yang, Y. (2012). Incorporation superabsorbent polymer (SAP) particles as controlling pre-existing flaws to improve the performance of engineered cementitious composites (ECC). *Construction and Building Materials*, Vol (28), pp. 139–145, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.032.
- [20] Jiao, H. (2007). *Research on Influence of Super-Absorbent Polymer on Shrinkage Performance of Hardening Concrete*. M.s Dissertation, Harbin Institute of Technology, Harbin, China.
- [21] Qin, H. and Gao, M. and Pang, C. (2011). Research on performance improvement of expansive concrete with internal curing agent SAP and its action mechanism. *Journal of Building Materials*, Vol (14), pp. 394–399, DOI: 10.3969/jssn.1007-9629.2011.03.021.
- [22] Chen, D. and Qian, C. and Gao, G. and Zhao, H. (2007). Mechanism and effect of SAP for reducing shrinkage and cracking of concrete. *Journal of Functional Materials*, Vol (38), pp. 475–478.
- [23] Ding, Y. and Zhan, B. and Huang, Q. (2007). Study of the frost resistance and impermeability of high-performance concrete under self-curing. *Journal of Hefei University of Technology*, Vol (30), pp. 603–606.
- [24] Bentz, D.P. and Geiker, M. and Jensen, O.M. (2002). On the Mitigation of early age cracking. *International Seminar on Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology*. Lund, Sweden, Vol (15), pp. 195–204.
- [25] Jensen, O.M. (2008). Use of superabsorbent polymers in construction materials. *1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, Nanjing, China, Rilem Publication, pp. 754–763.
- [26] Geiker, M.R. and Bentz, D.P. and Jensen, O.M. (2004). Mitigating autogenous shrinkage by internal curing. *American Concrete Institute Special Publication*, Vol (218), pp. 143–148.
- [27] Schroefl, C. and Mechtcherine, V. and Gorges, M. (2012). Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, Vol (42), pp. 865–87, DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.03.011.
- [28] Gao, D. and Heimann, R.B. and Alexander, D.B. (1997). Box-Beam design applied to study the strengthening of aluminate concrete modified by a superabsorbent polymer/clay composite. *Advances in Cement Research*, Vol (9), pp. 93–97, DOI: 10.1680/adcr.1997.9.35.93.
- [29] Pourjavadi, A. and Fakoorpoor, S.M. and Hosseini, P. and Khaloo, A. (2013). Interactions between superabsorbent polymers and cement-based composites incorporating colloidal silica nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, Vol (37), pp. 196–20, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.10.005.
- [30] Huang, Z. and Wang, J. (2012). Effect of Super absorbent Polymer on the Performance of UHPC. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, Vol (3), pp. 539–544.
- [31] Peng, L. (2013). *Study on the Performance and Mechanism of Internal Curing High-Performance Concrete with Super Absorbent Polymer*. M.s Dissertation, China University of Mining and Technology, Beijing, China.
- [32] Bentz, D.P. and Jensen, O.M. (2004). Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Composites*, Vol (26), pp. 677–685.
- [33] Ma, X. and Yuan, Q. and Liu, J. and Shi, C. (2019). Effect of water absorption of SAP on the rheological properties of cement-based materials with ultra-low w/b ratio. *Construction and Building Material*, Vol (195), pp. 66–7, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.050.
- [34] Wong, H.S. (2018). Concrete with superabsorbent polymer. *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, pp. 467-499, DOI: 10.1016/B978-0-08-102181-1.00017-4.
- [35] Sun, B. and Wu, H. and Song, W. and Li, Z. and Yu, J. (2019). Design methodology and mechanical properties of superabsorbent (SAP) cement-based materials. *Construction and Building Material*, Vol (204), pp. 440–44, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.206.
- [36] Lyu, Z. and Guo, Y. and Chen, Z. and Shen, A. and Qin, X. and Yang, J. and Zhao, M. and Wang, Z. (2019). Research on shrinkage development and fracture properties of internal curing pavement concrete based on humidity compensation. *Construction and Building Materials*, Vol (203), pp. 417–431, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.115.
- [37] Liu, J. and Farzadnia, N. and Shi, C. and Ma, X. (2019). Shrinkage and strength development of UHSC incorporating a hybrid system of SAP and SRA. *Cement and Concrete Composites*, Vol (97), pp. 175-189, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.029.



- [38] Zhu, H. and Wang, Z. and Xu, J. and Han, Q. (2019). Microporous structure and compressive strength of high-performance rubber concrete with internal curing agent. *Construction and Building Materials*, Vol (215), pp. 128–134, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.184.
- [39] Schrofl, C. and Kendra, A. and Siriwatwechakul, W. and Wyrzykowski, M. and Snoeck, D. (2022). Recent progress in superabsorbent polymers for concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol (151), DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106648.
- [40] Zhihui, Y. and Lishan, W. and Cong, Z. and Qingzuo, C. and Toshiyuki, B. (2022). Investigation of SAP content on the shrinkage and tensile properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, Vol (345), DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128402.
- [41] Tenorio filho, J. and Pereira gomes, M. and Mannekens, E. and Belie, N. and Snoeck, D. (2022). Alginate- and sulfonate-based superabsorbent polymers for application in cementitious materials: Effects of kinetics on internal curing and other properties. *Cement and Concrete Research*, Vol (159), DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106889.
- [42] American Society for Testing and Materials (ASTM-C136), (2007). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Pennsylvania: ASTM int'l, pp. 1-5.
- [43] Mazloom, M. And Saffari, A. and Mehrvand, M. (2015). Compressive, shear and torsional strength of beams made of self-compacting concrete. *Computers and Concrete*, Vol (15), pp. 935-950, DOI: 10.12989/cac.2015.15.6.935.
- [44] British Standard (BS EN 12390-3), (2019). *Testing Hardened Concrete Part3: Compressive strength of test specimens*. London: BSI Standards, pp. 5-18.
- [45] American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO TP95-14), (2014). *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington, D.C: ASTM Standards, pp. 1-10.
- [46] American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO T358-15), (2015). *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington, D.C: ASTM Standards, pp. 1-10.
- [47] Institute of Standards and Industrial Research of Iran Amendment No.1 (ISIRI-12728), (2013). *Concrete Kerb Units-Specifications and Test Methods*. Tehran, Iranian National Standardization Organization, pp. 31-37.
- [48] British Standard (BS EN 12390-8), (2000). *Testing Hardened Concrete Part8: Depth of Penetration of Water Under Pressure*. London: BSI Standards, pp. 1-10.