

## Investigating the mechanical properties, shrinkage and microstructure of self-compacting earth concrete containing silica fume

Mehrzaad azizi<sup>1</sup>, Kianoosh Samimi<sup>2</sup> \*

1- Masters student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2\*- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

The use of self-compacting earth concrete, despite the advantage of reducing the effects of greenhouse gas emissions, has always been less favored by employers in the construction industry due to the weakness of its mechanical properties. Therefore, in this research, the synergistic effect of silica fume with clay and cement on the mechanical properties, shrinkage, and microstructure of self-compacting earth concrete has been investigated. At first, the optimal composition was determined based on the amount of different percentages of silica fume (7.5%, 10%, and 12.5%) and the selection of different curing methods based on increasing the compressive strength of cement paste containing clay. Then, based on the results of the highest compressive strength of cement paste, the optimal mix design was selected for the production of concrete samples, and subsequently, the mechanical properties, shrinkage, and microstructure were investigated. Based on the results, the compressive strength of two-component mixtures (clay and cement) showed better performance in dry curing, while wet curing was more suitable for mixtures containing silica fume. The compressive strength of the concrete sample containing 50% of clay instead of cement decreased by 56.96% and 60.88% respectively after 28 and 90 days of curing in air conditions compared to the control sample. On the other hand, the mixture containing 50% clay and 10% silica fume improved the compressive strength by 28.08% in 28 days and 35.18% in 90 days compared to the mixture containing 50% clay. Finally, the microstructural analysis showed that the presence of a silica compound in silica fume causes the production of more hydrated calcium silicate gel (CSH) and subsequently creates a denser microstructure.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 12 May 2024

**Revise Date:** 07 July 2024

**Accept Date:** 04 August 2024

### Keywords:

Clay,  
Silica fume,  
Microstructure,  
Environment,  
Mechanical strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.454948.3399](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.454948.3399)

\*Corresponding author: Kianoosh Samimi

Email address: [k\\_samimi@sbu.ac.ir](mailto:k_samimi@sbu.ac.ir)

## بررسی خواص مکانیکی، انقباض و ریزساختار بتن حاکی خودمتراکم

### حاوی دوده سیلیس

مهرزاد عزیزی<sup>۱</sup>، کیانوش صمیمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

### چکیده

استفاده از بتن حاکی خودمتراکم علیرغم مزیت کاهش اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای به دلیل ضعف خواص مکانیکی همواره از اقبال کمتری از سوی کارفرمایان در صنعت ساخت‌وساز برخوردار بوده است. لذا، در این تحقیق اثر هم‌افزایی دوده سیلیس با خاک رس و سیمان بر خواص مکانیکی، انقباض و ریزساختار بتن حاکی خودمتراکم مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، ترکیب بهینه بر مبنای میزان درصدهای مختلف دوده سیلیس (۷/۵٪، ۱۰٪ و ۱۲/۵٪) و انتخاب روش‌های مختلف عمل‌آوری بر مبنای افزایش مقاومت فشاری خمیر سیمان حاوی رس تعیین گردید. سپس بر اساس نتایج بالاترین مقاومت فشاری خمیر سیمان، طرح مخلوط بهینه برای تولید نمونه‌های بتنی انتخاب شد و متعاقباً خواص مکانیکی، انقباض و ریزساختار بررسی گردید. بر اساس نتایج، مقاومت فشاری مخلوط‌های دوجزئی (خاک رس و سیمان) در عمل‌آوری خشک عملکرد بهتری از خود نشان دادند، در صورتی که برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس عمل‌آوری تر مناسب‌تر بود. مقاومت فشاری نمونه بتنی حاوی ۵۰ درصد خاک رس جایگزین سیمان نسبت به نمونه شاهد به میزان ۵۶/۹۶٪ و ۶۰/۸۸٪ به ترتیب پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در شرایط خشک کاهش یافت. از طرفی مخلوط حاوی ۵۰ درصد خاک رس و ۱۰ درصد دوده سیلیس مقاومت فشاری را در ۲۸ روز ۲۸/۰۸٪ و در ۹۰ روز ۳۵/۱۸٪ در مقایسه با مخلوط حاوی ۵۰ درصد خاک رس در عمل‌آوری تر بهبود بخشید. در نهایت، تجزیه و تحلیل ریزساختاری نشان داد که وجود یک ترکیب سیلیکا در دوده سیلیس باعث تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) بیشتر و متعاقباً ایجاد ریزساختار متراکم‌تر می‌گردد.

کلمات کلیدی: خاک رس؛ دوده سیلیس؛ ریزساختار؛ محیط‌زیست؛ مقاومت فشاری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.454948.3399	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.454948.3399	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۵/۱۴	۱۴۰۳/۰۵/۱۴	۱۴۰۳/۰۴/۱۷	۱۴۰۳/۰۲/۲۳
			کیانوش صمیمی		*نویسنده مسئول:	
			k_samimi@sbu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

امروزه مسائل زیست‌محیطی در زمینه ساخت‌وساز و مهندسی عمران اهمیت ویژه‌ای دارد. در دهه‌های گذشته، حجم زیادی از منابع طبیعی توسط بخش ساختمانی مصرف شده است که با انتشار مقدار زیادی گاز کربن دی‌اکسید ناشی از تولید سیمان همراه بوده است. سیمان با تولید کل حدود ۳۰۰۰ تن در سال، چسب غالب مورد استفاده در صنایع ساختمانی است و تخمین زده می‌شود که در ۵۰ سال آینده به نزدیک به ۶۰۰۰ تن در سال برسد [۱-۳]. برای دستیابی به هدف توافق‌نامه آب و هوایی پاریس برای حفظ میانگین افزایش دمای جهان به کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد تلاش‌ها و محدودیت‌های قابل توجهی در صنعت ساخت‌وساز مورد نیاز است که هنوز محقق نشده است. اگر می‌خواهیم تا سال ۲۰۵۰ انتشار گازهای گلخانه‌ای را به صفر برسانیم، باید از هم اکنون برای کنترل کربن تجسم یافته اقدام کنیم. از این رو، با توجه به افزایش آگاهی، مطالعات بسیاری برای یافتن یک ماده جایگزین سیمان که سازگار با محیط‌زیست باشد در حال انجام می‌باشد. مواد خام مبتنی بر خاک در سال‌های اخیر با جست‌وجوی مصالح ساختمانی جایگزین، یعنی مصالح بوم‌شناختی و اقتصادی، مورد توجه مجدد قرار گرفته‌اند. مزایای اصلی این مواد مصرف انرژی پایین آن‌ها برای تولید، در دسترس بودن آن‌ها در مقادیر زیاد، قابلیت بازیافت آن‌ها، ساخت کم هزینه آن‌ها و اجرای آسان آن‌ها در محل است [۴، ۵]. از آنجایی که خاک‌های رسی دارای خواص حرارتی عالی در مناطق گرمسیری مانند بیابان‌ها و سواحل دریا هستند، قرن‌هاست که خاک رس به‌طور گسترده برای ساخت‌وساز در این مناطق مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، صرفه‌جویی در هزینه به دلیل استفاده از خاک در تولید بلوک در مقایسه با ساخت بلوک معمولی تقریباً ۴۰٪ در هر مترمربع است [۶]. جدول ۱ مقایسه کیفی خلاصه‌ای از عملکرد ساخت خاکی و روش‌های ساخت مرسوم را ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه کیفی ساخت‌وساز خاکی و ساخت‌وساز متعارف [۷].

کیفیت	ساخت‌وساز خاکی	ساخت‌وساز متعارف
نیروی کار درگیر	متوسط	متوسط
هزینه مصالح	کم	بالا
دوام	متوسط	بالا
انرژی موردنیاز	کم	خیلی بالا
تولید CO <sub>2</sub>	خیلی کم	خیلی بالا

باین حال، با وجود مزایای متعددی که برای ساخت‌وسازهای خاکی وجود دارد، این رویکرد با دو چالش اساسی مواجه است. یکی مقاومت فشاری کم و دیگری استحکام طولانی مدت که منجر به عدم استقبال شرکت‌های بزرگ ساختمانی و کارفرمایان شده است. از آنجایی که دنیای تحقیقات هنوز علاقه کمی به بتن خاکی نشان داده است، داده‌های تجربی قابل اعتماد کمی برای این مصالح ساختمانی با پتانسیل بالا در دسترس است. بیشتر مطالعات تحقیقاتی در ادبیات موجود بر بررسی اثر کاهش مقاومت فشاری کانی‌های رسی متمرکز شده‌اند. به‌عنوان مثال، دلگادو و گوئرو<sup>۱</sup> [۸]، در یک مقاله مروری در مورد ساخت‌وساز خاکی در اسپانیا، محدوده مقاومت فشاری را برای خاک خام تثبیت شده و ناپایدار، به ترتیب ۱/۸ تا ۸/۲۸ مگاپاسکال و ۰/۶ تا ۲/۲۵ مگاپاسکال ارائه کردند. همچنین کوتا<sup>۲</sup> و همکاران [۹] تأثیر الیاف کتان و سیمان بر مقاومت فشاری بتن خاکی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که الیاف کتان مقاومت فشاری را در ۲۸ روز کمی افزایش داده است. از سوی دیگر از چسب‌هایی مانند آهک و سیمان برای افزایش خواص مکانیکی بتن خاکی به دلیل

<sup>1</sup> Delgado and Guerrero.<sup>2</sup> Kouta et al.

واکنش‌های هیدراتاسیون استفاده می‌شود. این واکنش‌ها پیوندهای شیمیایی ایجاد می‌کند که باعث تقویت خاک و عملکرد طولانی‌مدت آن می‌شود [۹]. به‌عنوان مثال باربرو باریرا<sup>۳</sup> و همکاران در مطالعه خود [۱۰] تأثیر آهک بر بلوک‌های خاکی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که ترکیب ۶ درصد آهک نسبت به وزن خاک، مقاومت فشاری بلوک‌های خاک را تا ۲۷ درصد افزایش می‌دهد. اگرچه از سیمان و آهک به‌عنوان افزودنی‌های سنتی برای تثبیت خاک‌های رسی استفاده می‌شود، اما نمی‌توانند خواص مقاومتی خاک‌های رسی را به میزان قابل توجهی افزایش دهند. بنابراین استفاده از افزودنی‌های جدید مانند دوده سیلیس (SF) برای تسریع فرآیند ادغام و افزایش استحکام مکانیکی ضروری به نظر می‌رسد.

دوده سیلیس یک پلی مورف غیر کریستالی بسیار ریزتر از سیلیس است و در کوره‌های قوس الکتریکی (EAFs) به‌عنوان محصول جانبی تولید سیلیکون و آلیاژ فروسیلیس تولید می‌شود. SF به دلیل نرمی بسیار زیاد و محتوای سیلیس بالا، به‌عنوان ماده سیمانی مکمل برای استفاده در ملات سیمان و بتن برای افزایش خواص مکانیکی و دوام شناخته شده است. افزودن دوده سیلیس بر ضخامت ناحیه انتقال سطحی (ITZ) در کامپوزیت‌های سیمانی و درجه جهت‌گیری کریستال‌های هیدروکسید کلسیم (CH) تأثیر می‌گذارد [۱۱]. بنابراین، بهبود ITZ به دلیل این تغییرات، منجر به بهبود خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی می‌شود [۱۲، ۱۳]. سید نواب و همکاران [۱۴] در مطالعه خود به بررسی تأثیر هم‌افزایی متاکائولن و دوده سیلیس پرداختند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که از شش مخلوط دوده سیلیس و متاکائولن برای جایگزینی ۲۰ درصد سیمان، مخلوطی که بهترین مقاومت فشاری را در ملات سیمان ایجاد کرد، ۱۰ درصد دوده سیلیس و ۱۰ درصد متاکائولن بود. همچنین محمد اشرف و همکاران [۱۵] پتانسیل استفاده از خاک رس بنتونیت (BC) و دوده سیلیس را به‌عنوان یک جایگزین ترکیبی برای سیمان بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که اثر ترکیبی خاک رس بنتونیت و دوده سیلیس می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین برای سیمان عمل کند و بر دوام و ریزساختار تأثیر بگذارد. علیرغم اثربخشی ثابت شده دوده سیلیس در افزایش مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی، فقدان قابل توجهی از تحقیقات در مورد بررسی اثرات هم‌افزایی دوده سیلیس و خاک رس در بتن خاکی وجود دارد.

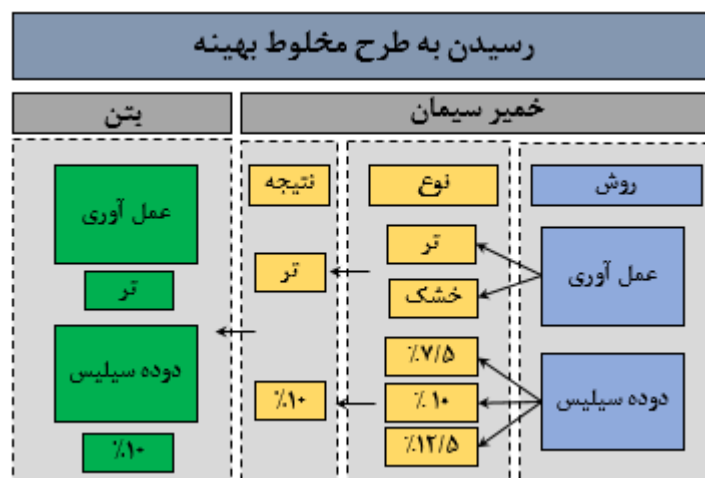
این تحقیق روش جدیدی را برای ایجاد مصالح ساختمانی پایدار و مقرون به صرفه با ترکیب سیمان و دوده سیلیس با خاک رس پیشنهاد می‌کند. در حالی که تحقیقات قبلی مواد جایگزین را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان مورد بررسی قرار داده‌اند، تاکنون هیچ گزارشی در مورد تولید بتن خاکی با مقاومت فشاری و کارایی قابل قبول وجود نداشته است. نوآوری اصلی این تحقیق، معرفی و دستیابی به بتن خاکی خودمتراکمی است که دارای مقاومت فشاری قابل قبولی باشد. این تحقیق با بررسی ترکیب بهینه این مؤلفه‌ها، به دنبال این است که امکان استفاده از بتن خاکی خودمتراکم را در المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای برای مناطق مستعد زلزله مرتفع سازد. از این رو، در این مطالعه ابتدا ترکیب بهینه دوده سیلیس و میزان رس در مخلوط‌های مختلف خمیر سیمانی با توجه به بالاترین مقادیر مقاومت فشاری در شرایط عمل‌آوری تر و خشک تعیین شد (شکل ۱). سپس مقاومت فشاری، جذب آب حجمی، جذب مؤینگی و انقباض مخلوط‌های بتنی خودمتراکم مبتنی بر خاک در مقایسه با مخلوط بتن خودمتراکم بدون خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، تحلیل‌های ریزساختاری مانند تحلیل ترموگراویمتری<sup>۴</sup> (TGA)، میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۵</sup> (FESEM) و تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس<sup>۶</sup> (XRD) برای شناسایی ساختارهای CH و C-S-H مربوط به مکانیسم هیدراتاسیون و صحت سنجی نتایج صورت گرفت. یافته‌های این مطالعه، پتانسیل بالایی برای هموار کردن راه برای استفاده از بتن خاکی به جای بتن کلاسیک در ساخت ساختمان‌های مسکونی در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سیمان خواهد داشت.

<sup>3</sup> Barbero-Barrera et al.

<sup>4</sup> Thermo-gravimetric analysis (TGA).

<sup>5</sup> Field emission scanning electron microscopy (FESEM).

<sup>6</sup> X-ray diffraction (XRD).



شکل ۱: نمودار روش مورد استفاده برای تعیین مخلوط بهینه.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

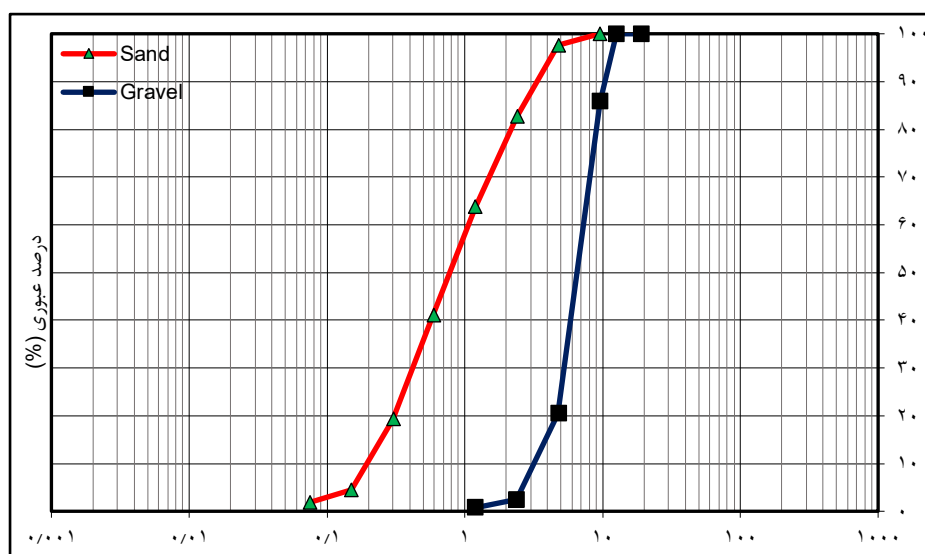
### ۲-۱- مصالح

در این مطالعه، سیمان پرتلند نوع II با بلین  $290 \text{ m}^2/\text{kg}$  و چگالی  $315 \text{ gr/cm}^3$  بر اساس استاندارد [۱۶] ASTM-C150 از کارخانه سیمان تهران و دوده سیلیس مصرفی با سطح مخصوص  $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$  و چگالی  $224 \text{ gr/cm}^3$  از کارخانه ژیکاو در مشهد تهیه شد. خاک رس مورد استفاده، از معادن تهران استخراج گردید. شن و ماسه مورد استفاده در این تحقیق با وزن مخصوص  $271 \text{ gr/cm}^3$  و  $265 \text{ gr/cm}^3$  و میزان جذب آب به ترتیب  $0.68\%$  و  $1.8\%$  از معادن اطراف سد هراز تهیه گردیدند. سنگدانه‌های درشت مورد استفاده در همه مخلوط‌ها، اندازه اسمی بین ۶ تا ۱۲ میلی‌متر داشتند، در حالی که سنگدانه‌های ریز طبیعی حداکثر اندازه ۶ میلی‌متر داشتند. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است. همچنین برای بهبود کارایی مخلوط‌ها از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر (PCE) ساخته شده توسط Sika (ViscoCrete®-5110 IR) با  $\text{pH} = 7 \pm 1$  و وزن مخصوص  $111 \text{ gr/cm}^3$  استفاده شد. تحلیل‌های شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان، دوده سیلیس و خاک رس در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان، دوده سیلیس و خاک رس.

عناصر (/.)	سیمان پرتلند (نوع II)	خاک رس	دوده سیلیس
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۴۲	۵۲/۹۸	۹۴/۱۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۹	۱۴/۲۷	۰/۵۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۹۳	۴/۷۶	۱/۲۹
CaO	۶۳/۵۶	۱۰/۳۶	۱
MgO	۱/۶۸	۳/۴۹	۰/۳۱
SO <sub>3</sub>	۲/۱۳	۰/۱۱۸	۰/۴۵
TiO <sub>2</sub>	—	۰/۶۱۸	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	۰/۱۹۸	—
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۴	۱/۱۶	۰/۲۲
K <sub>2</sub> O	۰/۵۳	۲/۵۶	۰/۸۱
C <sub>3</sub> S	۵۱/۳۵	—	—

C <sub>2</sub> S	۲۲/۷۱	-	-
C <sub>3</sub> A	۶/۳۴	-	-
C <sub>4</sub> AF	۸/۹۲	-	-
Attenberg limits:			
Liquid limit, %	-	۲۸	-
Plastic limit, %	-	۱۱	-
Plasticity index	-	۱۷	-
Physical characteristics:			
specific surface area (m <sup>2</sup> /kg)	۲۹۰	۵۱۲	۲۰۰۰۰
specific gravity (gr/cm <sup>3</sup> )	۳/۱۵	۲/۶۳	۲/۲۴



شکل ۲: منحنی‌های توزیع اندازه ذرات شن و ماسه.

## ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

### ۲-۲-۱- روند اختلاط خمیر سیمان

در این تحقیق مخلوط‌های خمیری با استفاده از یک مخلوط‌کن ۶ لیتری تهیه شدند. روش آماده‌سازی برای همه مخلوط‌های خمیری ثابت بود. بدین صورت که در ابتدا، مواد پودری (سیمان، خاک رس و دوده سیلیس) در مخلوط‌کن با سرعت کم به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. سپس آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه با سرعت کم مخلوط گردیدند. به دنبال آن یک دقیقه اختلاط با سرعت بالا انجام شد. در نهایت مخلوط‌های به دست آمده در قالب‌های فولادی با ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  mm<sup>3</sup> ریخته شدند. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و تا رسیدن به سن آزمایش تحت عمل‌آوری مناسب قرار گرفتند. عمل‌آوری شامل هر دو روش تر و خشک برای مخلوط‌های خمیری بود. باین‌حال، با توجه به عملکرد برتر مشاهده شده در مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس در شرایط عمل‌آوری تر از نظر مقاومت فشاری، این روش برای انجام بقیه آزمایشات انتخاب گردید.

## ۲-۲-۲- روند اختلاط بتن

برای مخلوط‌های بتنی از مخلوط‌کن ۱۵۰ لیتری استفاده شد. فرآیند پیمانه کردن با افزودن سنگدانه‌های ریز و درشت به مخلوط‌کن و مخلوط کردن به مدت ۳ دقیقه آغاز شد و در طی آن یک‌سوم آب لازم برای اختلاط اضافه شد. به دنبال آن مواد پودری وارد مخلوط‌کن شده و اختلاط ۱ دقیقه دیگر ادامه یافت. سپس فوق روان کننده و آب باقی‌مانده اضافه شد و مخلوط به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شد. در نهایت، نمونه‌ها با ورقه‌های پلاستیکی پوشانده شدند و به مدت ۲۴ ساعت در اتاقی با دمای کنترل شده در دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

## ۲-۳- طرح اختلاط

در این پژوهش هدفه طرح مخلوط خمیری با نسبت آب به مواد پودری (وزن کل سیمان، خاک رس و دوده سیلیس مصرفی) " $W/C_m$ " برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شد. یک طرح مخلوط بر پایه خاک رس، آب و فوق روان کننده با عنوان P100 به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. سایر مخلوط‌ها به دو گروه مختلف تقسیم شدند. گروه اول شامل مخلوط‌های دوجزئی (سیمان و خاک رس) با نسبت وزنی ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد خاک رس جایگزین سیمان با عنوان P50، P60، P70 و P80 می‌باشد. گروه دوم، دوده سیلیس (SF) با سیمان باقی‌مانده در نسبت‌های وزنی مختلف (۷/۵٪، ۱۰٪ و ۱۲/۵٪) در چهار مخلوط گروه اول جایگزین شدند. همچنین شرایط عمل‌آوری تر و خشک برای هر مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت مخلوط بهینه حاوی بهترین میزان جایگزینی دوده سیلیس و روش نگهداری مناسب بر اساس مقاومت فشاری بالا برای طراحی مخلوط بتن انتخاب شد. جدول ۲ طرح اختلاط تمام مخلوط‌های خمیری را نشان می‌دهد.

طرح اختلاط خمیری	گروه	نام	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	خاک رس (kg/m <sup>3</sup> )	دوده سیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	W/Cm	جدول ۲: نمونه‌های
									مخلوط کنترل
		P100	۰	۴۵۰	۰	۱۸۰	۶/۸۹۵	۰/۴	
	گروه اول	P50	۲۲۵	۲۲۵	۰	۱۸۰	۱/۹۷۶	۰/۴	
		P60	۱۸۰	۲۷۰	۰	۱۸۰	۲/۶۳۵	۰/۴	
		P70	۱۳۵	۳۱۵	۰	۱۸۰	۳/۵۱۲	۰/۴	
		P80	۹۰	۳۶۰	۰	۱۸۰	۳/۹۵۲	۰/۴	
	گروه دوم	P50S7.5	۲۰۸/۱۳	۲۲۵	۱۶/۸۷۵	۱۸۰	۱/۹۷۶	۰/۴	
		P60S7.5	۱۶۶/۵	۲۷۰	۱۳/۵	۱۸۰	۲/۶۳۵	۰/۴	
		P70S7.5	۱۲۴/۸۸	۳۱۵	۱۰/۱۲۵	۱۸۰	۳/۵۱۲	۰/۴	
		P80S7.5	۸۳/۲۵	۳۶۰	۶/۷۵	۱۸۰	۳/۹۵۲	۰/۴	
		P50S10	۲۰۲/۵	۲۲۵	۲۲/۲	۱۸۰	۹۷۶	۰/۴	
		P60S10	۱۶۲	۲۷۰	۱۸	۱۸۰	۶۳۵	۰/۴	
		P70S10	۱۲۱/۵	۳۱۵	۱۳/۵	۱۸۰	۳/۵۱۲	۰/۴	
		P80S10	۸۱	۳۶۰	۹	۱۸۰	۳/۹۵۲	۰/۴	
		P50S12.5	۱۹۶/۹	۲۲۵	۲۸/۱۲۵	۱۸۰	۹۷۶	۰/۴	
		P60S12.5	۱۵۷/۵	۲۷۰	۲۲/۵	۱۸۰	۲/۶۳۵	۰/۴	

P70S12.5	۱۱۸/۱	۳۱۵	۱۶/۸۷۵	۱۸۰	۳/۵۱۲	۰/۴
P80S12.5	۷۸/۸	۳۶۰	۱۱/۲۵	۱۸۰	۳/۹۵۲	۰/۴



سپس، نه مخلوط بتنی با همان محتوای مواد پودری ( $450 \text{ kg/m}^3$ ) تهیه شد (شکل ۳). نسبت آب به مواد پودری در  $0/4$  ثابت نگه داشته شد. مخلوط بر پایه سیمان پرتلند بدون خاک رس و دوده سیلیس به عنوان طرح شاهد (CC) در نظر گرفته شد. در چهار مخلوط دیگر، سیمان و خاک رس (از نظر وزنی) به ترتیب در مقادیر ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد در مخلوط‌های C50، C60، C70 و C80 جایگزین سیمان شدند. علاوه بر این، چهار مخلوط دیگر با جایگزینی ۱۰٪ دوده سیلیس (SF) با سیمان باقی‌مانده در چهار گروه قبلی با عنوان C50S10، C60S10، C70S10 و C80S10 تهیه گردیدند. کارایی تمامی نمونه‌های بتن خاکی خود متراکم برای دستیابی به قطر جریان اسلامپ  $30 \pm 700$  میلی‌متر تنظیم شد. جدول ۳ طرح اختلاط مخلوط‌های SCEC را نشان می‌دهد.

جدول ۳: طرح اختلاط نمونه‌های SCEC.

نام	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	خاک رس (kg/m <sup>3</sup> )	دوده سیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	W/Cm
CC	۴۵۰	—	—	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۲/۵	۰/۴
C50	۲۲۵	۲۲۵	—	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۸/۳	۰/۴
C60	۱۸۰	۲۷۰	—	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۹/۱	۰/۴
C70	۱۳۶	۳۱۵	—	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۰	۰/۴
C80	۹۰	۳۶۰	—	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۴	۰/۴
C50S10	۲۰۲/۵	۲۲۵	۲۲/۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۸/۳	۰/۴
C60S10	۱۶۲	۲۷۰	۱۸	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۹/۱	۰/۴
C70S10	۱۲۱/۵	۳۱۵	۱۳/۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۰	۰/۴
C80S10	۸۱	۳۶۰	۹	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۴	۰/۴



شکل ۳: نمونه های بتن خاکی خودمتراکم.

### ۳- روش آزمایش

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری تمام مخلوط‌های خمیری بر اساس استاندارد [۱۷] ASTM C109/C109M بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  mm<sup>3</sup> در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ روزه آزمایش شد. همچنین در مجموع ۸۱ نمونه مکعبی با ابعاد  $100 \times 100 \times 100$  mm<sup>3</sup> برای تعیین مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف SCEC پس از ۷، ۲۸، ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. این آزمایش مطابق با استاندارد [۱۸] ASTM C39 انجام شد. مقاومت فشاری همه مخلوط‌های خمیری و همچنین بتنی بر روی سه نمونه ارزیابی شد و مقدار متوسط به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش شد.

## ۳-۲- نفوذپذیری

## ۳-۲-۱- جذب آب حجمی

آزمایش جذب آب حجمی بر اساس استاندارد [۱۹] ASTM C642-13 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد  $\Phi 100 \times H50$  میلی‌متر بریده شده از نمونه‌های استوانه‌ای  $\Phi 100 \times H200$  میلی‌متر در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. طبق استاندارد، نمونه‌ها ابتدا در کوره‌ای با دمای  $2 \pm 80$  درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و هر ۲۴ ساعت یکبار توزین شدند. فرآیند توزین تا زمانی تکرار شد که اختلاف مقادیر به دست آمده از دو مقدار جرم متوالی کمتر از ۰/۵ درصد باشد. سپس نمونه‌ها در آب غوطه‌ور شدند تا جرم اشباع به دست آید. این روش نیز تا زمانی که دو مقدار متوالی از جرم نمونه در فواصل ۲۴ ساعت، افزایش جرم کمتر از ۰/۵ درصد از مقدار بزرگ تر را نشان داد، تکرار شد. سه نمونه برای هر سن مورد ارزیابی قرار گرفت و میانگین این سه نمونه به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. در نهایت میزان درصد جذب آب نمونه‌ها با استفاده از فرمول ۱ بدست محاسبه شد.

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{B - A}{A} \quad (1)$$

A: جرم نمونه خشک شده در آون (g) ؛ B: جرم نمونه پس از غوطه‌وری (g).

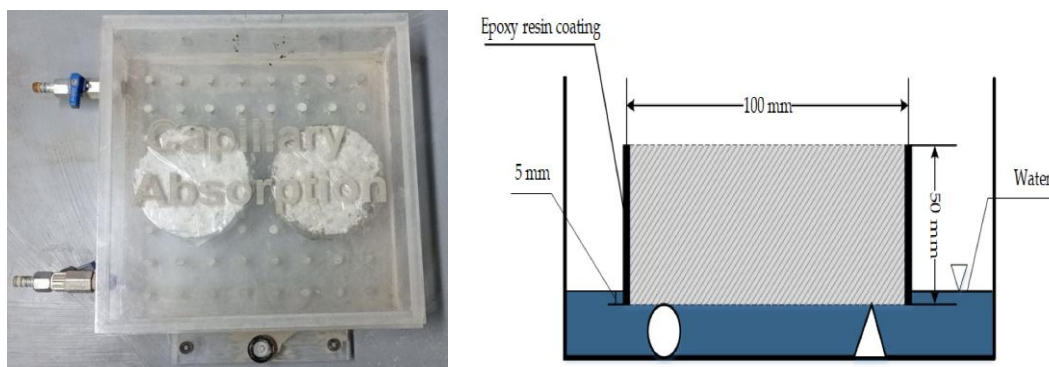
## ۳-۲-۲- جذب آب موئینه

در این مطالعه میزان جذب آب موئینه، مطابق با استاندارد [۲۰] ASTM C1585 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد  $\Phi 100 \times H50$  میلی‌متر بریده شده از نمونه‌های استوانه‌ای  $\Phi 100 \times H200$  میلی‌متر برای سه نمونه در هر طرح مخلوط پس از ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. برای جلوگیری از تبخیر آب از طرفین، سطح جانبی هر نمونه با رزین اپوکسی پوشانده شد. سپس نمونه در آب غوطه‌ور شد و سطح آب در فاصله  $1 \pm 2$  میلی‌متر از کف نمونه حفظ شد. جرم نمونه با استفاده از ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۰۱ گرم تعیین شد. در هر مرحله از فرآیند توزین، خشک نمودن آب موجود بر روی سطح نمونه با یک دستمال عاری از رطوبت در عرض ۱۰ ثانیه به پایان رسید. در نهایت میانگین اندازه‌گیری سه نمونه به‌عنوان نتیجه جذب آب موئینه در نظر گرفته شد. نحوه انجام آزمایش در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. ضریب جذب (S) به‌عنوان شیب رابطه خطی بین  $CWA^7$  و جذر زمان با استفاده از فرمول ۲ محاسبه شد:

$$I = \frac{m_t}{a \times d} = S_i \sqrt{t} + b \quad (2)$$

I: جذب (mm) ؛  $m_t$ : تغییر در جرم نمونه در زمان t (g) ؛ a: سطح در معرض نمونه ( $mm^2$ ) ؛ d: چگالی آب ( $g/cm^3$ ) ؛ S: ضریب جذب موئینه ( $mm/s^{0.5}$ ) و t: زمان جذب آب (s).

<sup>7</sup> Capillary Water Absorption



شکل ۴: آزمایش جذب موئینه.

### ۳-۳- انقباض

در این مطالعه، آزمایش انقباض خشک شدگی نمونه‌های بتنی با استفاده از استاندارد [۲۱] ASTM C157 ارزیابی شد. برای هر طرح مخلوط، سه نمونه منشوری با ارتفاع ۷۵ میلی‌متر، طول ۲۸۵ میلی‌متر و عرض ۷۵ میلی‌متر تهیه شد. تغییرات طولی نمونه‌های منشوری در امتداد جهت محوری، با استفاده از کمپراتور طولی با دقت ۰/۱ میلی‌متر، اندازه‌گیری شد. با مقایسه اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در روزهای ۱، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸، ۶۰ و ۹۰، تفاوت در اندازه برای هر نمونه منشوری مشخص شد که امکان ارزیابی انقباض خشک شدگی را در طول زمان فراهم می‌کند. شکل ۵ نحوه اندازه‌گیری طول نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵: (الف) قالب انقباض. (ب) تنظیم مقایسه کننده طول با میله مرجع. (ج) اندازه‌گیری طول نمونه.

## ۳-۴- تحلیل ریزساختار

## ۳-۲-۱- تحلیل FESEM-EDX

مشاهدات میکروسکوپی اسکن الکترونی به همراه میکرو تحلیل المانها توسط طیفسنجی اشعه X بر روی نمونه‌های خمیر سیمان با استفاده از FEI ESEM Quanta 200 انجام گرفت (شکل ۶). قبل از تحلیل، نمونه‌ها با طلای پالادیوم به منظور ایجاد رسانایی سطحی متالیزه گردیدند. همچنین طیفسنجی اشعه ایکس (EDX-MAP) برای تحلیل عنصری بر روی نمونه بهینه انجام شد.



شکل ۶: دستگاه مورد استفاده برای میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM)

## ۳-۲-۲- تحلیل TGA

در این تحقیق، تحلیل وزن سنجی حرارتی (TGA) با استفاده از Mettler-Toledo (TGA-DSC 1) برای محاسبه درجه هیدراتاسیون مخلوط‌های CC, C50, C50S10, C80, C80S10 انجام شد. روش آزمایشی شامل قرار دادن نمونه‌های پودری با وزن تقریبی ۱۰ میلی‌گرم در یک بوتله آلومینا بود. سپس دما به تدریج از ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش یافت. در این آزمایش به منظور ایجاد محیطی بدون اکسیژن و محافظت از نمونه‌ها از اثرات هوای محیط و اکسیداسیون، از اتمسفر آرگون با دبی ۱۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه استفاده شد.

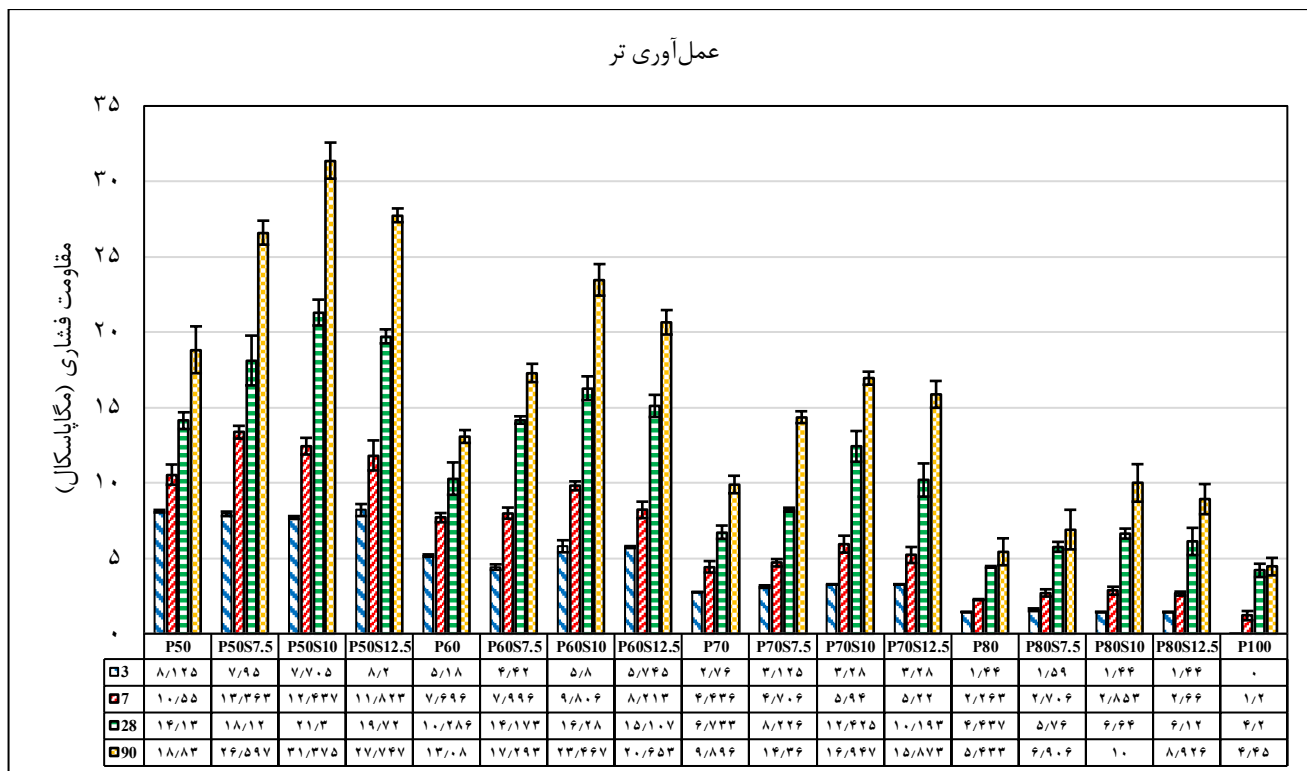
## ۳-۲-۳- تحلیل XRD

نمونه‌های مختلف خمیر سیمان با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل XRD با استفاده از دستگاه کریستالوگرافی فیلیپس Xpert، با منبع تابش Cu K ( $\lambda = 1.5406$ ) انجام شد. آزمایش تحت شرایط اعمالی ۴۰ کیلوولت و ۳۰ میلی‌آمپر انجام شد. محدوده اسکن برای هر اندازه‌گیری از ۱۰ تا ۹۰ درجه، با اندازه گام  $0.2^\circ$  درجه (2 $\theta$ ) و سرعت اسکن ۲ ثانیه بود.

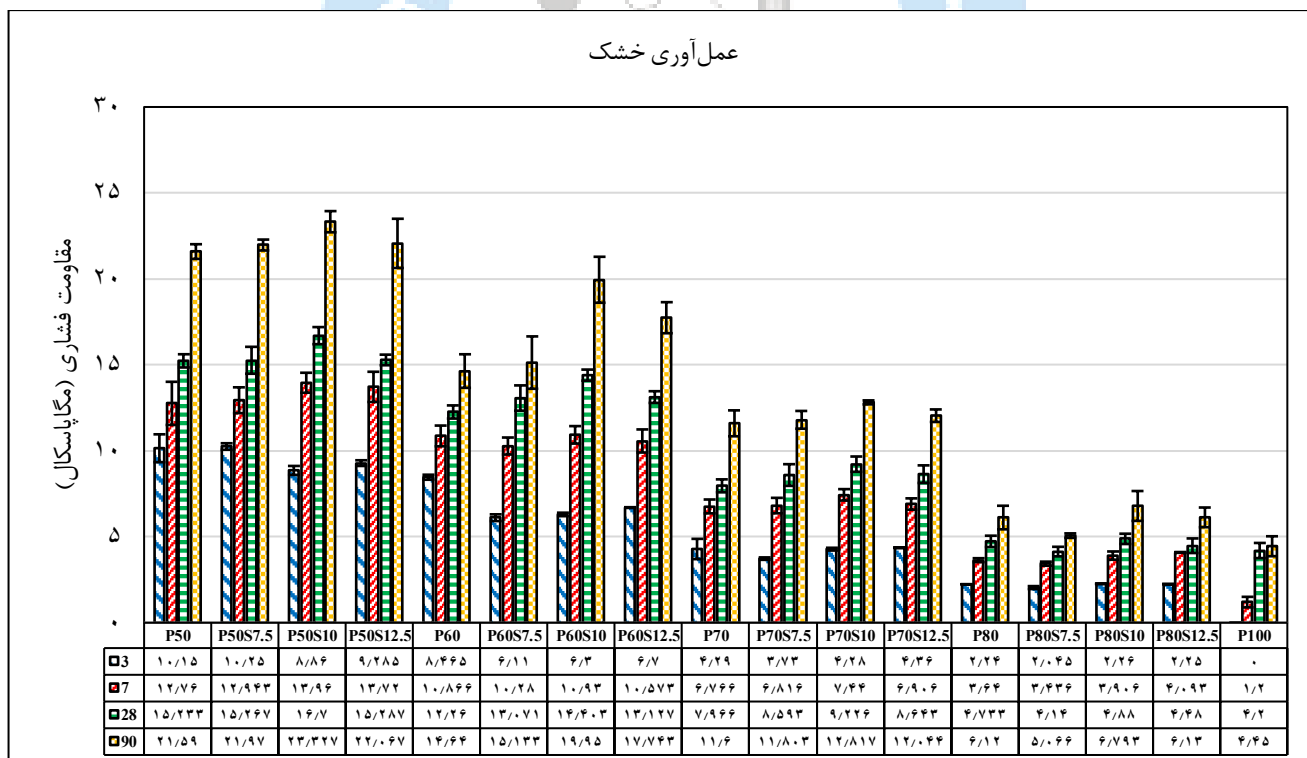
## ۴- بحث و نتایج

## ۴-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های خمیری تحت عمل‌آوری تر و خشک در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج، مخلوط‌های P50S10 و P80 بیشترین و کمترین مقاومت را در سنین ۷ تا ۹۰ روزگی نشان دادند. هر چه جایگزینی سیمان با خاک رس بیشتر باشد، مقاومت فشاری مخلوط بیشتر کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۷، مقاومت فشاری مخلوط P80 در ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی به ترتیب ۸۸/۶٪، ۵/۶٪ و ۲۲/۱٪ بیشتر از مقاومت فشاری مخلوط P100 است. در صورتی که مقاومت فشاری مخلوط P50 در همان سنین به ترتیب ۱۲۰٪، ۲۳۶٪ و ۳۲۳٪ بیشتر از مقاومت فشاری مخلوط P100 است. کاهش محتوای سیمان در مخلوط P80 نسبت به مخلوط P50 موجب کاهش واکنش هیدراتاسیون می‌شود و پرتلندیت کمتری برای واکنش با آلومینا و سیلیس موجود در خاک رس تولید می‌شود. این را می‌توان عامل اصلی کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی خاک رس دانست [۲۲]. با توجه به نتایج ارائه شده، مخلوط‌های حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس مقاومت فشاری بالاتری نسبت به مخلوط‌های حاوی ۷/۵٪ و ۱۲/۵٪ دوده سیلیس داشتند. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، مقاومت فشاری مخلوط P50S10 در ۹۰ روزگی ۶۰۵٪ بیشتر از مخلوط P100 بود. در صورتی که مقاومت فشاری مخلوط‌های P50S7.5 و P50S12.5 در سن ۹۰ روز در مقایسه با مخلوط P100 به ترتیب ۴۹۷٪ و ۵۲۳٪ بود. علت کمتر بودن مقاومت فشاری مخلوط P50S10 در سن ۳ روز نسبت به مخلوط P50، شروع نشدن واکنش پوزولانی دوده سیلیس است. با این حال، در روزهای ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی، مقاومت فشاری مخلوط P50S10 ۱۷/۸۸٪، ۵۰/۷۴٪ و ۶۶/۶۲٪ بیشتر از مخلوط P50 است. در واقع دوده سیلیس با هیدروکسید کلسیم تولید شده در طول هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و با ایجاد هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) ثانویه نقش مهمی در افزایش استحکام مخلوط‌ها دارد. همچنین ذرات دوده سیلیس بسیار کوچک‌تر از ذرات سیمان است. این ذرات می‌توانند فضای خالی بین ذرات سیمان را پر کنند و در نتیجه ریزساختار متراکم‌تری ایجاد کنند [۱۳]. به طور کلی، مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس استحکام فشاری بهتری نسبت به مخلوط‌های بدون دوده سیلیس در تمام سنین بلوغ نشان دادند. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۸، مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دوجزئی (سیمان و خاک رس) در عمل‌آوری خشک بیشتر از عمل‌آوری تر است. به‌عنوان مثال، مقاومت فشاری مخلوط P50 با عمل‌آوری خشک نسبت به مخلوط P50 با عمل‌آوری تر در ۷ روز ۲۱٪ افزایش یافت. بنابراین، به طور کلی می‌توان گفت که برای خمیرهای سیمانی متشکل از مخلوط‌های دوجزئی (سیمان و خاک رس)، عمل‌آوری خشک اغلب مناسب است و می‌تواند به افزایش مقاومت فشاری آن‌ها کمک کند. از سوی دیگر، برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس، عمل‌آوری تر به دلیل واکنش‌های پوزولانی بیشتر در مقایسه با شرایط نگهداری خشک مناسب است.



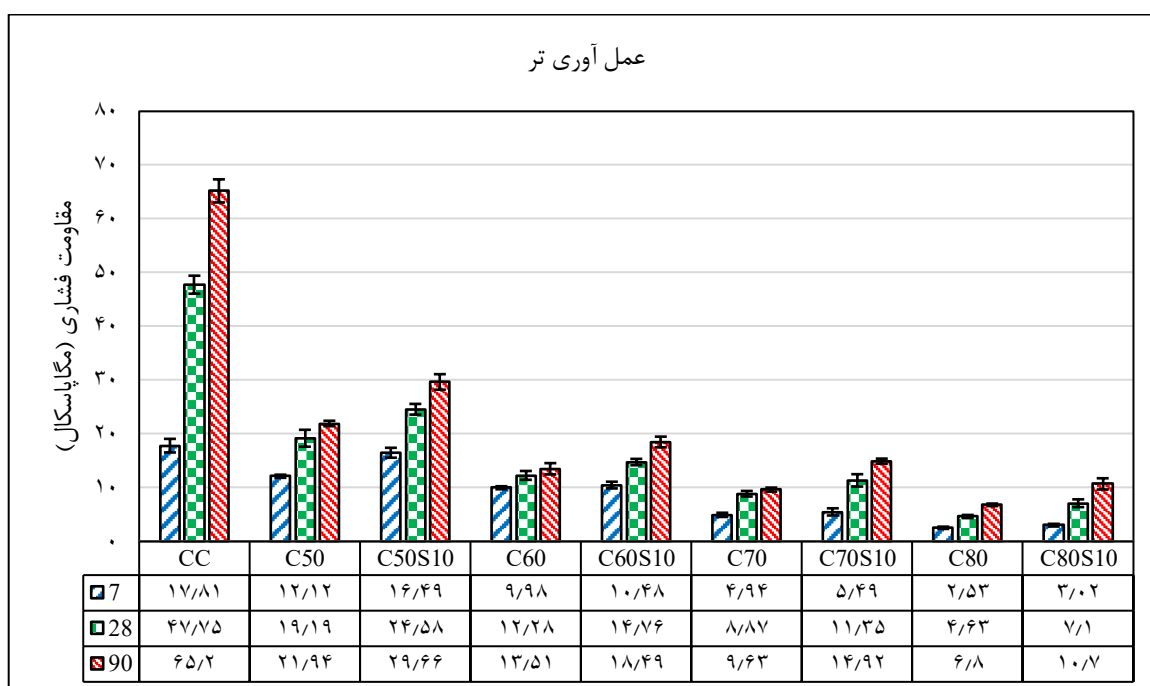
شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری خمیر سیمان پس از ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری تحت عمل آوری تر.



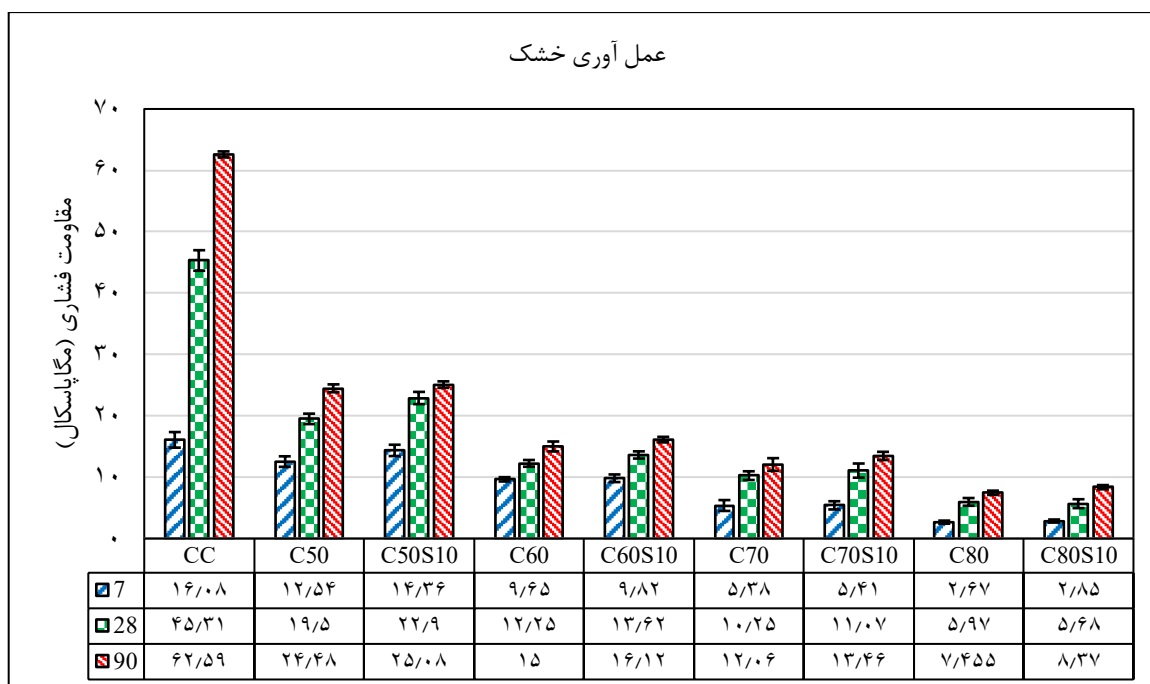
شکل ۸: نتایج مقاومت فشاری خمیر سیمان پس از ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری تحت عمل آوری خشک.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های SCEC را در دو شرایط عمل‌آوری تر و خشک نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، مقاومت فشاری مخلوط C50 به ترتیب ۳۱/۹۴٪، ۵۹/۸۱٪ و ۶۸/۱۳٪ کمتر از بتن شاهد در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه است. با این حال افزودن ۱۰٪ دوده سیلیس به بتن مقاومت آن را تا حد زیادی بهبود بخشید. به طوری که برای مخلوط C50S10 مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۳۶/۰۵٪، ۲۸/۰۸٪ و ۳۵/۱۸٪ نسبت به مخلوط C50 افزایش یافت.

شکل ۱۰ نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌ها را تحت عمل‌آوری خشک نشان می‌دهد. در مقایسه با نمونه شاهد، شاهد افت ۲۲٪، ۵۶/۹۶٪ و ۶۰/۸۸٪ برای مخلوط C50 در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روزگی هستیم. در حالی که این میزان کاهش برای مخلوط C50S10 به ترتیب ۱۰/۷٪، ۴۹/۴۶٪ و ۵۹/۹۳٪ در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روز بود. نتایج مشاهده شده نشان می‌دهد که ترکیبات دوجزئی سیمان و خاک رس با عمل‌آوری خشک بهتر عمل می‌کنند، در حالی که مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس عملکرد بهتری را با عمل‌آوری تر نشان می‌دهند. این نتیجه با یافته‌های Atis و همکاران [۱۵] مطابقت دارد.



شکل ۹: نتایج مقاومت فشاری بتن پس از ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری تحت عمل‌آوری تر.

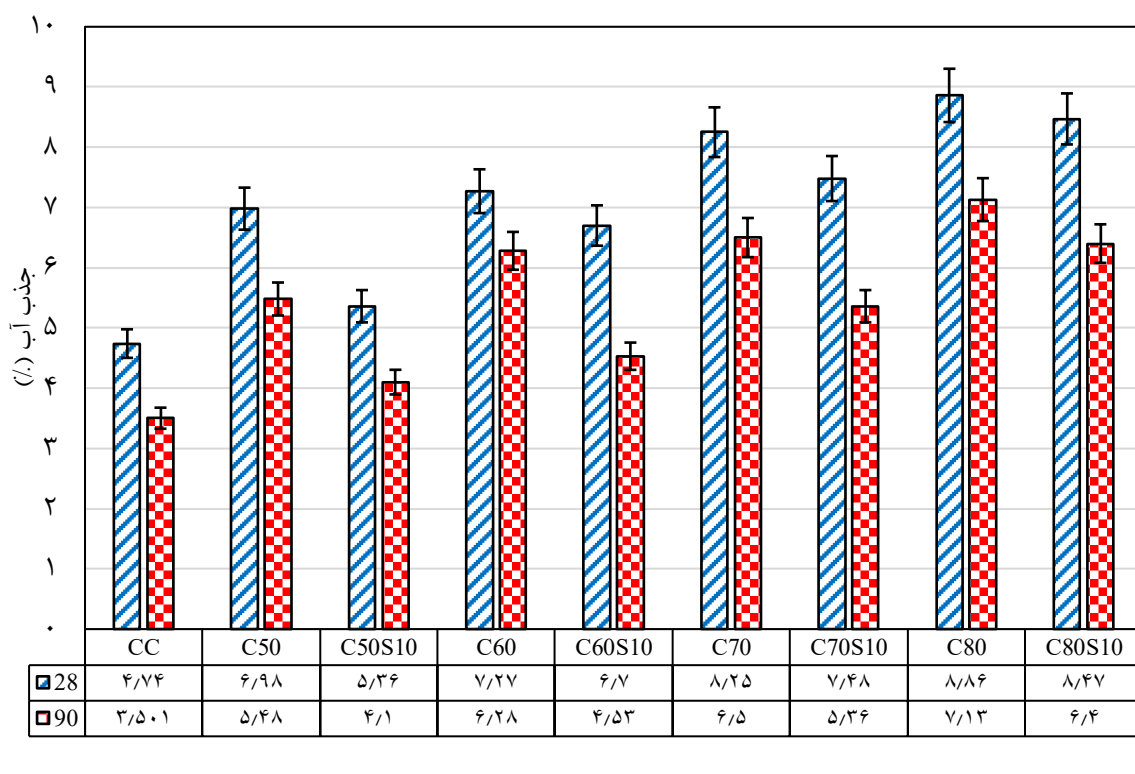


شکل ۱۰: نتایج مقاومت فشاری بتن پس از ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری تحت عمل آوری خشک.

#### ۴-۲- نفوذپذیری

#### ۴-۲-۱- جذب آب حجمی

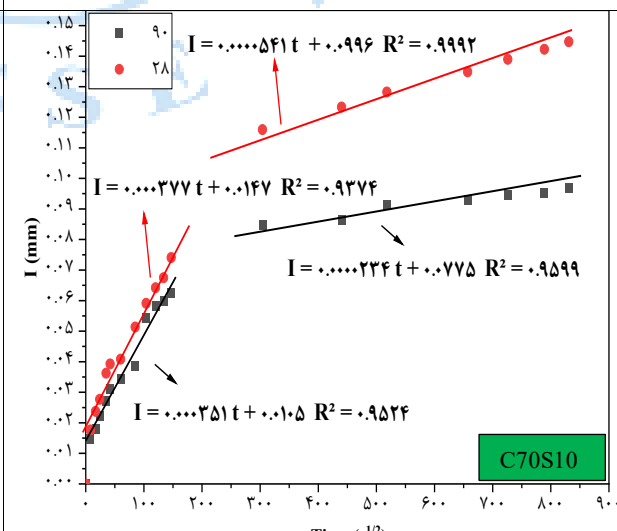
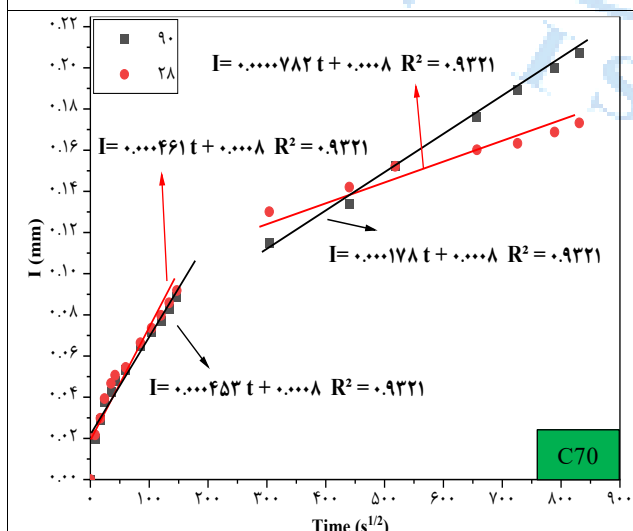
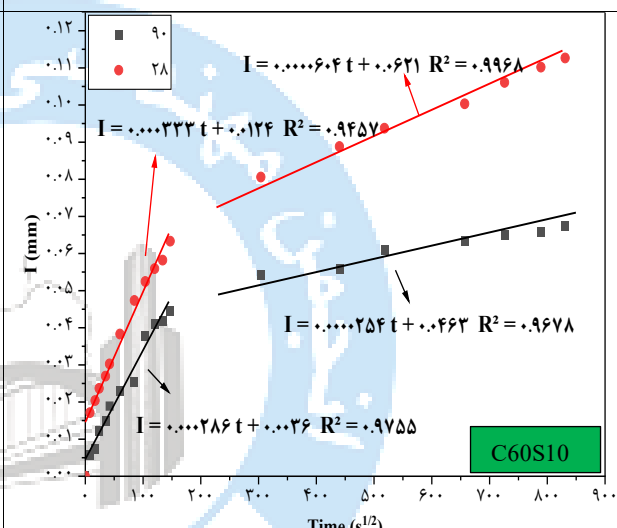
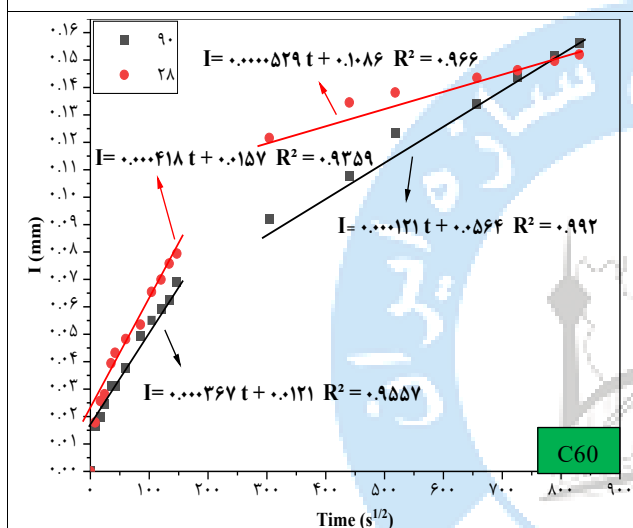
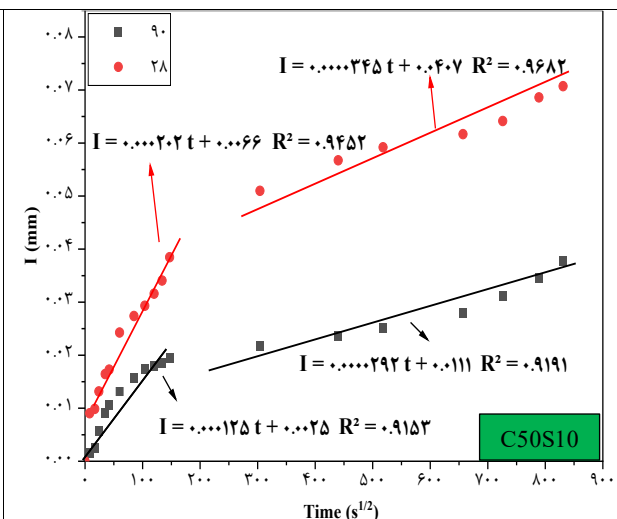
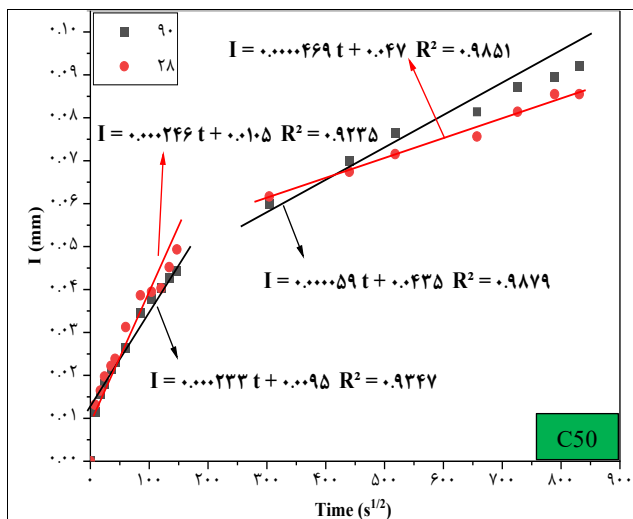
نتایج جذب آب حجمی بر روی تمامی نمونه‌های بتنی مورد مطالعه پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق نتایج، با افزایش جایگزینی خاک رس با سیمان در مخلوط‌های بتن، میزان جذب آب مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۵۰ درصد خاک رس به جای سیمان، جذب آب را به ترتیب ۴۷/۲۵٪ و ۵۶/۵۷٪ نسبت به مخلوط شاهد پس از ۲۸ و ۹۰ روز افزایش می‌دهد. برای مخلوط C80، جذب آب نسبت به مخلوط شاهد به ترتیب ۸۶/۹۲٪ و ۱۰۳/۷۱٪ پس از ۲۸ و ۹۰ روز افزایش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان با ماهیت آب‌دوستی خاک رس توجیه نمود. با افزایش درصد خاک رس در مخلوط بتن، این رفتار آب‌دوستی می‌تواند برجسته‌تر شود و در نتیجه درصد جذب آب بالاتری برای مواد کامپوزیت ایجاد شود. این نتایج با یافته‌های گوراو و همکاران [۱۶] سازگاری دارد. از طرفی ترکیب دوده سیلیس در مخلوط‌ها منجر به کاهش جذب آب و بهبود عملکرد آن‌ها شد. در مقایسه با مخلوط‌های P50 و P80، مخلوط‌های P50S10 و P80S10 جذب آب را به ترتیب ۳۴/۱۷٪ و ۸/۲۲٪ پس از ۲۸ روز عمل آوری کاهش داد. کاهش جذب آب را می‌توان به اصلاح ریزساختار ماتریس سیمانی مخلوط‌های بتن توسط دوده سیلیس نسبت داد. این نتیجه با یافته‌های تحقیقات قبلی مطابقت دارد [۱۷، ۱۸].

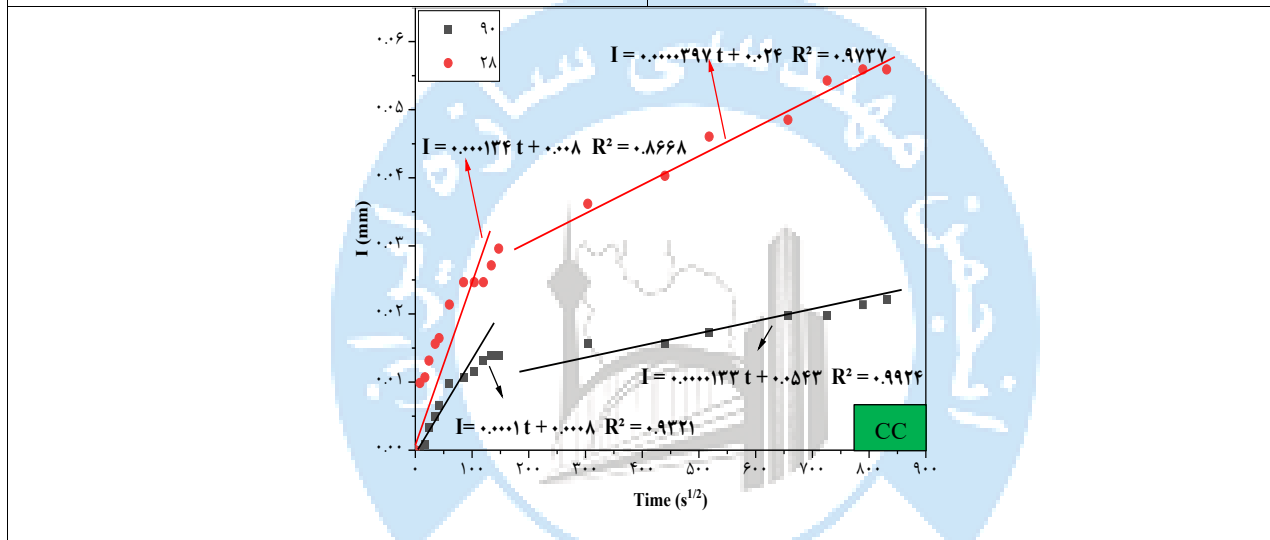
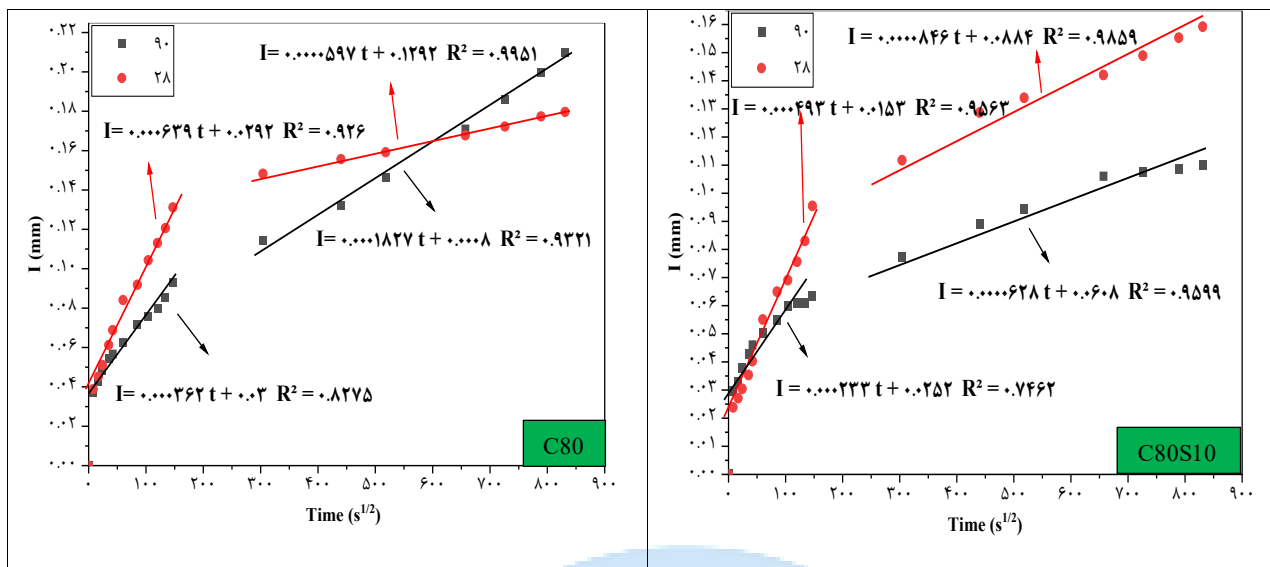


شکل ۱۱: نتایج جذب آب نمونه‌ها پس از ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری تحت عمل‌آوری تر.

#### ۴-۲-۲- جذب آب موئینه

نتایج جذب آب موئینه پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین ضرایب جذب آب موئینه برای مخلوط‌های بتن خاکی در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول  $S_i$  نشان دهنده ضریب جذب آب موئینه اولیه و  $S_s$  نشان دهنده ضریب جذب آب موئینه ثانویه است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، ضریب جذب آب موئینه با افزایش مقدار خاک رس در بتن، افزایش می‌یابد. ضریب CWA بتن خاکی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری با جایگزینی ۷۰٪ و ۸۰٪ خاک رس، تقریباً ۲۴۴٪ و ۳۷۷٪ بیشتر از بتن شاهد بود. خاک رس تخلخل مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، ماهیت آب‌دوست خاک رس می‌تواند باعث جذب آب موئینه بالاتری نسبت به مخلوط شاهد شود. نتایج نشان داد که، استفاده از ۱۰٪ دوده سیلیس ضریب جذب موئینی در نمونه‌های C70 و C80 را به ترتیب ۶۳٪ و ۱۰۹٪ در ۲۸ روز عمل‌آوری کاهش می‌دهد. در واقع، ذرات دوده سیلیس کوچک‌تر از ذرات سیمان هستند و با پر کردن ریز حفره‌ها در مخلوط بتن، اثر پرکننده دارند. در مقابل، واکنش پوزولانی ناشی از حضور دوده سیلیس، ژل CSH اضافی تولید می‌کند که همگنی ماتریس بتن را بهبود می‌بخشد و جذب آب را کاهش می‌دهد [۱۹]. علاوه بر این، استفاده از دوده سیلیس باعث تبدیل حفره‌های موئینه پیوسته به غیرپیوسته در ماتریس سیمانی می‌گردد که نقش بسزایی در کاهش ضریب جذب موئینی دارد.





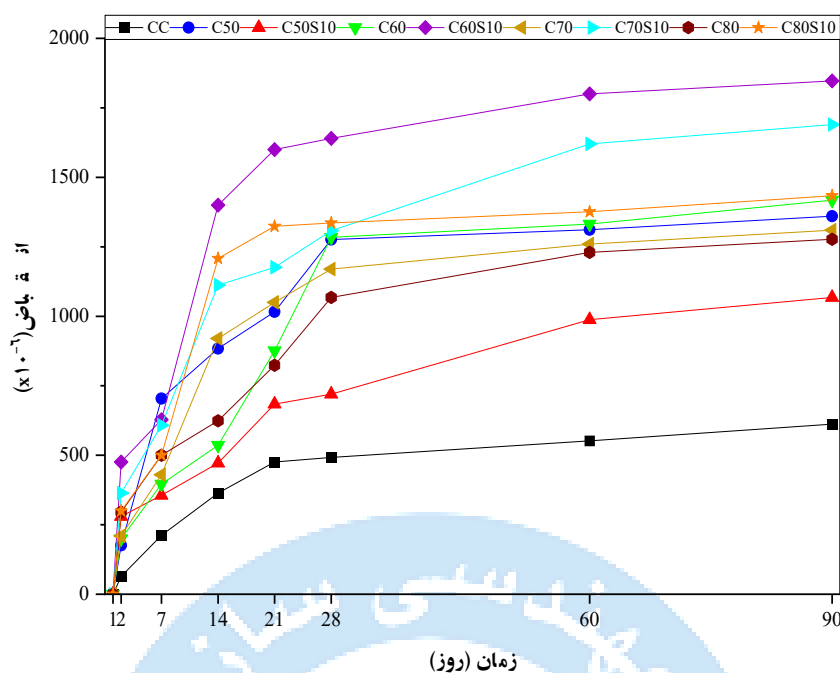
شکل ۱۲: ضریب جذب موئینه به عنوان تابعی از لگاریتم روزهای عمل آوری پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری ( $mm/h^{0.5}$ ).

جدول ۴. نرخ‌های اولیه و ثانویه جذب آب ( $S_s$  و  $S_i$ ).

سن	۲۸ روزه		۹۰ روزه	
	$S_i \times 10^{-4}$ (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ )	$S_s \times 10^{-4}$ (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ )	$S_i \times 10^{-4}$ (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ )	$S_s \times 10^{-4}$ (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ )
CC	۱/۳۴	۰/۳۹۷	۱	۰/۱۳۳
C50	۲/۴۶	۰/۴۶۹	۲/۳۳	۰/۵۹
C60	۴/۱۸	۰/۵۲۹	۳/۶۷	۱/۲۱
C70	۴/۶۱	۰/۷۸۲	۴/۵۳	۱/۷۸۴
C80	۶/۳۹	۰/۵۹۷	۳/۶۲	۱/۸۲۷
C50S10	۲/۰۲	۰/۳۴۲	۱/۲۵	۰/۲۹۲
C60S10	۳/۳۳	۰/۶۰۴	۲/۸۶	۰/۲۵۴
C70S10	۳/۷۷	۰/۵۴۱	۳/۵۱	۰/۲۳۴
C80S10	۴/۹۳	۰/۸۴۶	۲/۳۳	۰/۶۲۸

## ۴-۳- انقباض

برای افزایش طول عمر سازه‌ها، تعیین کمیت انقباض در بتن به همراه کنترل ترک خوردگی در مرحله طراحی بسیار مهم است. نتایج آزمایش انقباض مخلوط‌های SCEC در شکل ۱۳ به نمایش گذاشته شده است. همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، در سنین اولیه آزمایش، تغییرات در نرخ انقباض مخلوط‌های SCEC در مقایسه با مخلوط شاهد زیاد بود. در سن ۹۰ روز، مقادیر انقباض برای C50، C50S10، C80 و C80S10 برابر با  $1.360 \times 10^{-6}$ ،  $1.068 \times 10^{-6}$ ،  $1.277 \times 10^{-6}$  و  $1.433 \times 10^{-6}$  بود. در طول کل مدت آزمایش، مخلوط شاهد دارای کمترین مقدار کرنش انقباض بود، در حالی که مخلوط C60S10 بالاترین مقدار انقباض را داشت. از طرفی با افزایش درصد جایگزینی خاک رس، تغییرات در نرخ انقباض کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که مخلوط C80 انقباض کمتری نسبت به مخلوط‌های C50، C60 و C70 داشت. این نتایج با یافته‌های Zhi Ge و همکاران مطابقت دارد [۲۰]. همچنین می‌توان مشاهده کرد که استفاده از دوده سیلیس در بتن، موجب افزایش نرخ انقباض می‌شود. این به این دلیل است که تخلخل و قطر متوسط منافذ با استفاده از دوده سیلیس کاهش می‌یابد، بنابراین کشش موئینه افزایش می‌یابد که نرخ انقباض را در اعضای بتنی افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده توسط شن و همکاران [۲۰] دوده سیلیس می‌تواند تغییر شکل انقباض را به دلیل واکنش‌های پوزولانی و اندازه منافذ خود افزایش دهد.

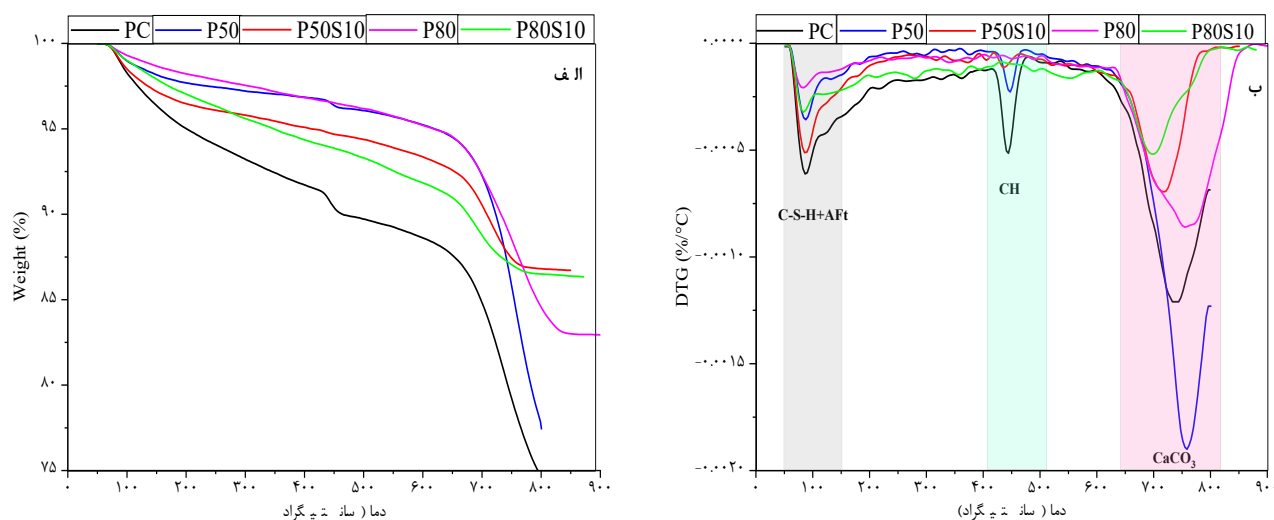


شکل ۱۳: میزان انقباض در طرح اختلاط‌های مورد مطالعه تا سن ۹۰ روز.

#### ۴-۴-۴ ریزساختار خمیر سیمان

#### ۴-۴-۱-۴ تحلیل وزن سنجی حرارتی

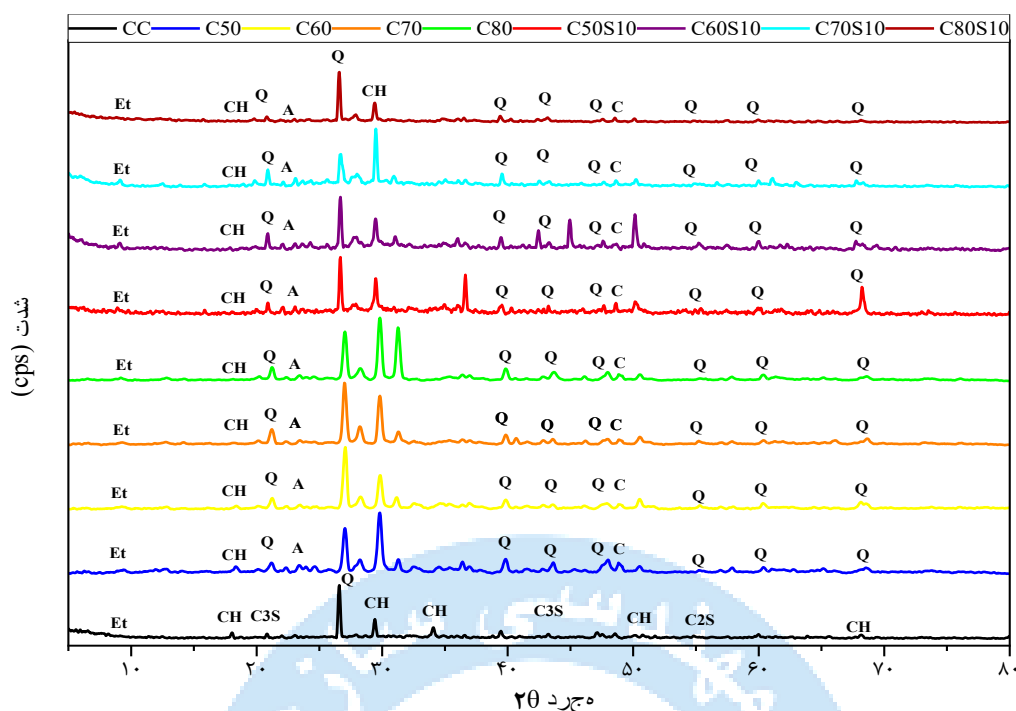
استفاده از تحلیل وزن سنجی حرارتی یکی از تکنیک‌های تکمیلی برای تعیین ریزساختار مخلوط‌های مورد بررسی است. در شکل ۱۴، نتایج TG و DTG مخلوط‌های CC، C50، C50S10، C80 و C80S10 در محدوده ۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد پس از ۲۸ روز نشان داده شده است. به‌طور کلی، اولین اوج تغییر جرمی که در محدوده ۷۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد، به دلیل تجزیه اترینگایت و ژل CSH است. تجزیه CH منجر به دومین اوج تغییر جرمی در محدوده ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد شد. همچنین، تغییرات وزنی در محدوده ۶۸۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به تجزیه ساختار  $\text{CaCO}_3$  است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۴، تغییرات جرمی در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده در مخلوط‌های C80 و C80S10 در مقایسه با سایر مخلوط‌ها کمتر است. این نشان دهنده تولید جزئی هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و هیدروکسید کلسیم (CH) به دلیل کاهش محتوای سیمانی در این مخلوط‌ها است. در صورتی که در همین محدوده دمایی ما شاهد اوج تغییرات جرمی تیزتری برای مخلوط‌های C50 و C50S10 هستیم. این نشان می‌دهد که این مخلوط‌ها دارای مقادیر قابل توجهی از ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و هیدروکسید کلسیم (CH) هستند. نتایج تحلیل وزن سنجی حرارتی در ۲۸ روز برای مخلوط‌های مورد بررسی در این مطالعه، سه پیک تجزیه مرتبط با CSH،  $\text{Ca(OH)}_2$  و  $\text{CaCO}_3$  را نشان می‌دهد که بر مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد. داده‌های ارائه شده در شکل نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از دوده سیلیس و خاک رس در ماتریس سیمان مخلوط C50S10 و C80S10 فرآیند هیدراتاسیون را افزایش می‌دهد. اوج تغییرات جرمی مشاهده شده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به وضوح نشان دهنده تولید هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) بیشتر است که تأیید کننده اثر مثبت هم‌افزایی خاک رس و دوده سیلیس در افزایش مقاومت فشاری است.



شکل ۱۴: تحلیل TG (الف) و DTG (ب) طرح‌های اختلاط مورد مطالعه در بازه ۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز.

#### ۴-۲-۴-۴ XRD

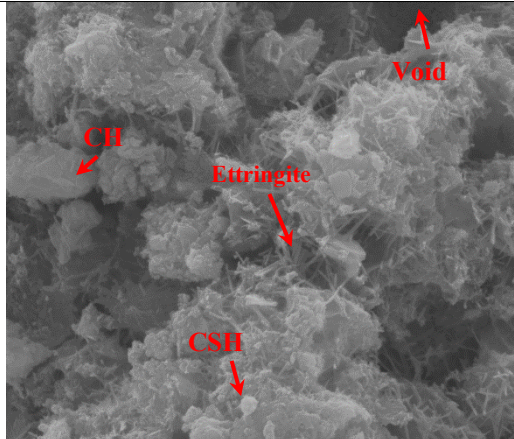
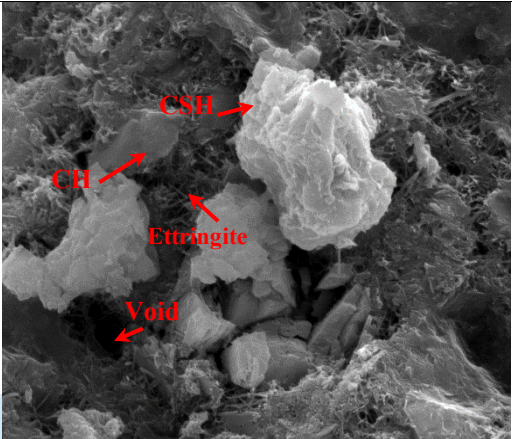
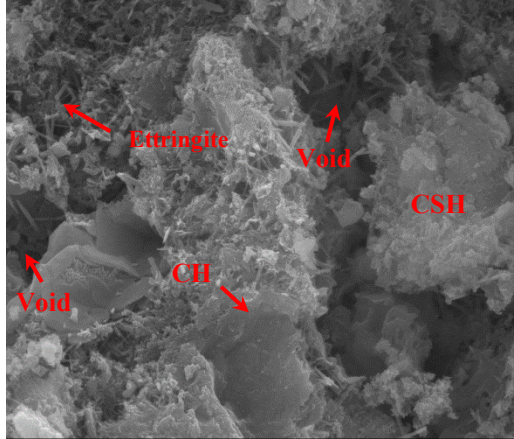
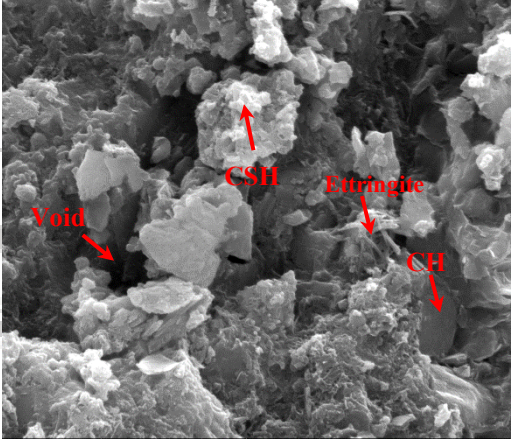
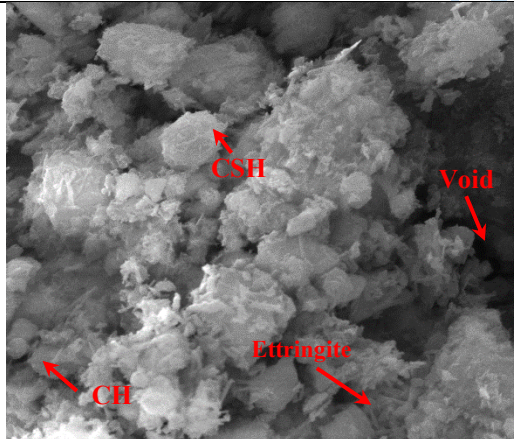
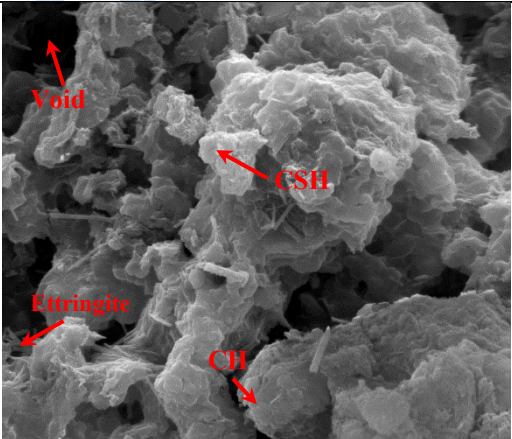
الگوی XRD مخلوط‌های بتنی مورد مطالعه در سن ۲۸ روز در شکل ۱۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۵ تجزیه و تحلیل پراش مخلوط‌ها، حضور فازهای مختلفی مانند کلسیت (C)، کوارتز (Q) و آلبیت (A) را نشان داد. پیک مشاهده شده در ۲۶/۵ درجه، نشان دهنده حضور فاز کوارتز است. در تجزیه و تحلیل XRD، کوارتز به عنوان یک فاز کریستالی غیر واکنش پذیر شناخته می‌شود. این نشان می‌دهد که کوارتز در ساختار بتن اساساً بی اثر است و به طور فعال در واکنش‌های شیمیایی درون ماده شرکت نمی‌کند. ظهور قله‌های جدید در زوایای ۱۸ درجه، ۲۹/۴ درجه و ۳۴/۱ درجه در تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) بتن حاکی نشان دهنده وجود پورتلندیت ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) در داخل ماده است. بر اساس نتایج مقاومت فشاری، در حالی که مخلوط‌های سه جزئی (سیمان، خاک رس و دوده سیلیس) مقاومت فشاری بالاتری نسبت به مخلوط‌های دوجزئی (سیمان و خاک رس) نشان می‌دهند، اوج شدت هیدروکسید کلسیم (CH) برای مخلوط‌های سه جزئی به دلیل مصرف آن در واکنش‌های پوزولانی کمتر است. به عنوان مثال، پیک مخلوط C50S10 در ۲۹/۴ درجه کمتر از مخلوط C50 است. کاهش شدت پیک هیدروکسید کلسیم (CH) در دمای ۲۹/۴ درجه سانتی‌گراد در مخلوط‌های سه جزئی، به تبدیل CH به هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) نسبت داده می‌شود. لازم به ذکر است که هیدروکسید کلسیم (CH) می‌تواند تا حدی در افزایش مقاومت بتن نقش داشته باشد، در حالی که مسئولیت اصلی مقاومت بتن بر عهده هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) است [۲۰]. همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد، انتقال CH به CSH می‌تواند بر نفوذپذیری و بهبود استحکام در نمونه‌ها تأثیر بگذارد. به عبارت دیگر، هنگامی که سیمان با دوده سیلیس جایگزین می‌شود، این مخلوط در فرآیند هیدراتاسیون مؤثرتر عمل می‌کند و فاز ثانویه CSH را نسبت به مخلوط‌های دوتایی تولید می‌کند.



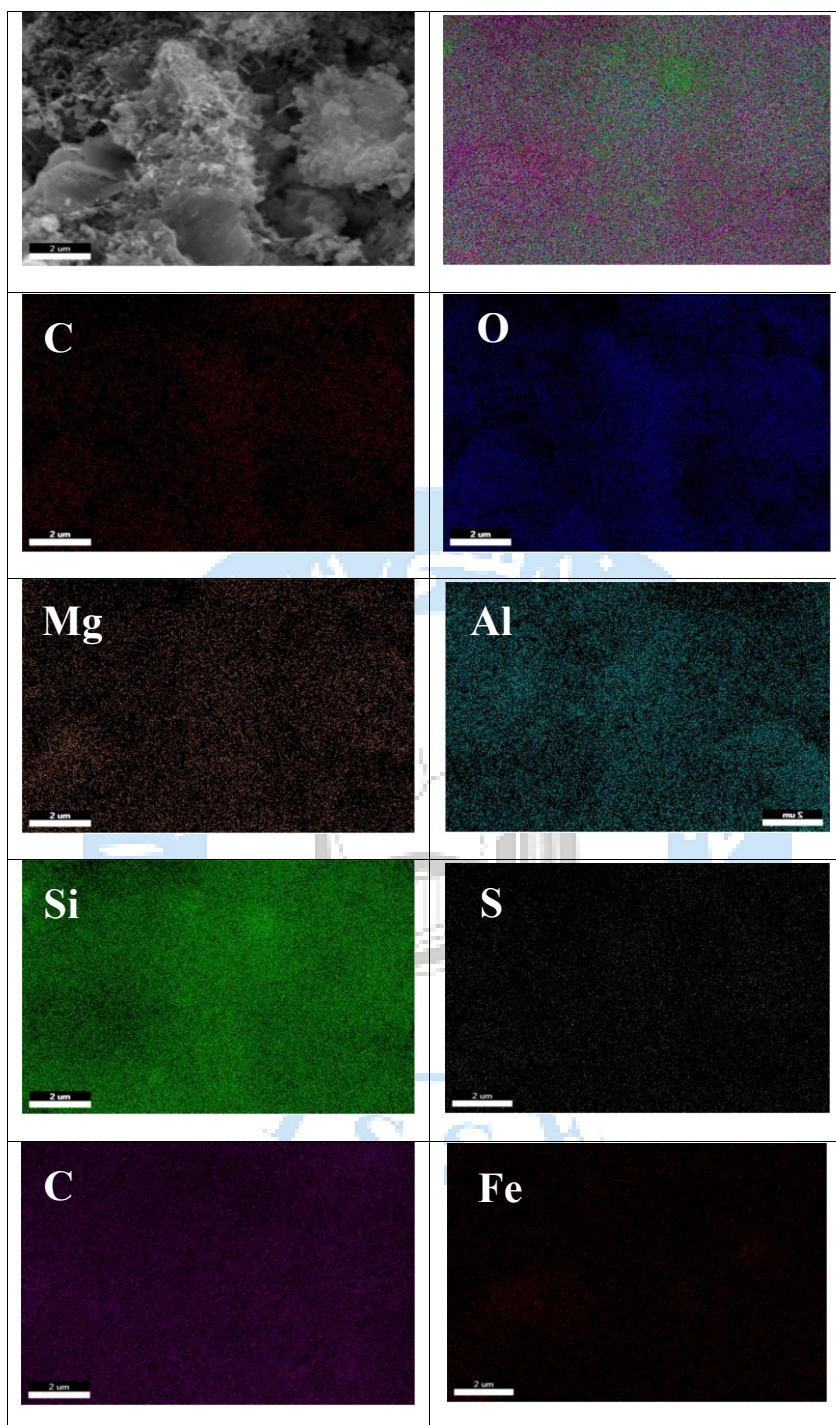
شکل ۱۵: الگوی تحلیلی XRD طرح اختلاط‌های مختلف بتنی در سن ۲۸ روز.

#### ۴-۳-۳- تحلیل تصاویر FESEM

ریزساختار نمونه‌های مختلف خمیر سیمان در شرایط عمل‌آوری‌های مختلف تر و خشک در سن ۲۸ روزه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی 10Kx برای بررسی فرآیند هیدراتاسیون سیمان استفاده شد. تمام تصاویر SEM فازهای معمولی هیدراتاسیون سیمان، مانند اترینگایت، هیدروکسید کلسیم (CH) و کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) را نشان می‌دهند. در تصاویر SEM، CSH ممکن است به صورت کریستال‌های دراز یا تشکیلات آمورف ظاهر شود که نقش آن را در افزایش خواص مکانیکی منعکس می‌کند. از سوی دیگر، کریستال‌های CH ممکن است دارای مرزهای کاملاً مشخص و حضور ایزوله تر در مقایسه با شبکه به هم پیوسته CSH باشند. همچنین، فاز اترینگایت به صورت بلورهای سوزنی دراز یا ساختارهای فیبری پراکنده در ماتریس سیمانی ظاهر می‌شود. بر اساس تصاویر ارائه شده در شکل ۱۶، مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس ساختار متراکم‌تری را در مقایسه با سایر ترکیبات نشان می‌دهند. ماتریس مخلوط P50S10 دارای حجم قابل توجهی از ژل‌های CSH است. شکل‌گیری زیاد ژل CSH در مخلوط P50S10 به دلیل واکنش پوزولانی دوده سیلیس است. طبق گفته لو و همکاران [۲۱]، هنگامی که دوده سیلیس به بتن اضافه می‌شود، تحت یک واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) قرار می‌گیرد که در طی هیدراتاسیون سیمان تولید می‌شود. این واکنش منجر به تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم اضافی (CSH) می‌شود که استحکام و دوام بتن را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، تصاویر SEM مخلوط P80 و P80S10 ساختار متخلخل‌تری را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده افزایش تخلخل به دلیل جایگزینی خاک رس با سیمان است. این مشاهدات از تصاویر SEM با یافته‌های مربوط به بخش مقاومت فشاری و نفوذپذیری مطابقت دارد. همچنین در این تحقیق با استفاده از تحلیل عنصری، عناصر اصلی ساختار نمونه P50S10 توسط تحلیل EDX-MAP مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، مقادیر قابل توجهی از عناصر سیلیکون (Si)، کلسیم (Ca)، و اکسیژن (O) مشاهده شد. همچنین عناصر کربن به‌طور مساوی در سراسر مخلوط P50S10 توزیع شده‌اند. علاوه بر این، در مقایسه با نمونه‌های دیگر، مخلوط P50S10 درصد اتمی کربن بیشتری دارد.

خشک	تر
<p style="text-align: center;"><b>P50</b></p>  <p>File: 6-4000-2_511.tif HV: 27.04 μm 25.0 kV Mag: 10000x WD: 10.5 mm Sig: SE</p>	<p style="text-align: center;"><b>P50</b></p>  <p>File: 6-4000-2_624.tif HV: 27.04 μm 25.0 kV Mag: 10000x WD: 12.7 mm Sig: SE</p>
<p style="text-align: center;"><b>P50S10</b></p>  <p>File: 6-4000-2_514.tif HV: 27.04 μm 25.0 kV Mag: 10000x WD: 9.0 mm Sig: SE</p>	<p style="text-align: center;"><b>P50S10</b></p>  <p>File: 6-4000-2_627.tif HV: 27.04 μm 25.0 kV Mag: 10000x WD: 12.8 mm Sig: SE</p>
<p style="text-align: center;"><b>P80S10</b></p>  <p>File: 6-4000-2_517.tif HV: 27.04 μm 25.0 kV Mag: 10000x WD: 9.2 mm Sig: SE</p>	<p style="text-align: center;"><b>P80S10</b></p>  <p>File: 6-4000-2_630.tif HV: 27.04 μm 25.0 kV Mag: 10000x WD: 10.9 mm Sig: SE</p>

شکل ۱۶: تصاویر ریزساختار تحلیل FESEM برای طرح‌های اختلاط مورد مطالعه.



شکل ۱۷: نقشه تحلیل عنصری (EDX-MAP) نمونه P50S10 به تفکیک عناصر موجود.

## ۵- نتیجه گیری

این مطالعه بر روی امکان‌سنجی استفاده از بتن خاکی خودمتراکم در صنعت ساخت‌وساز و به منظور کاهش مصرف سیمان با رویکرد استفاده از مصالح سبز متمرکز شده است. بدین منظور خواص مکانیکی، انقباض و ریزساختار بتن خاکی خودمتراکم مورد بررسی قرار گرفت. عمده نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱. نتایج حاصل از مقاومت فشاری نشان می‌دهند که با افزایش جایگزینی سیمان با خاک رس شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم. به گونه‌ای که مخلوط C80 کمترین مقاومت را در سنین ۷ تا ۹۰ روز در مقایسه با مخلوط‌های دیگر داشت. مقاومت فشاری مخلوط C80 به ترتیب ۸۳/۴٪، ۸۰/۸۲٪ و ۸۸/۱٪ کمتر از بتن شاهد در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در عمل‌آوری خشک بود. دلیل اصلی کاهش مقاومت فشاری، کاهش واکنش هیدراتاسیون است که در اثر کاهش محتوای سیمان ایجاد می‌شود. با این حال، افزودن ۱۰ درصد دوده سیلیس به مخلوط‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری آن‌ها شد. به طوری که برای مخلوط C50S10 در شرایط عمل‌آوری تر مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۳۶/۰۵٪، ۲۸/۰۸٪ و ۳۵/۱۸٪ نسبت به مخلوط C50 افزایش یافت. این به علت تولید هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در نتیجه واکنش بین دوده سیلیس و هیدروکسید کلسیم تولید شده در فرایند هیدراتاسیون سیمان، همچنین حضور ذرات بسیار ریز پرکننده دوده سیلیس، اتفاق می‌افتد.
۲. برای خمیرهای سیمانی که از مخلوط‌های دوجزئی (سیمان و خاک رس) تشکیل شده‌اند، عمل‌آوری خشک به طور معمول مناسب بوده و شاهد افزایش مقاومت فشاری نسبت به عمل‌آوری تر هستیم. از سوی دیگر، برای مخلوط‌هایی که حاوی دوده سیلیس هستند، عمل‌آوری تر مناسب‌تر است. در واقع عمل‌آوری تر به پراکندگی ذرات دوده سیلیس کمک می‌کند و واکنش پوزولانی آن‌ها را با هیدروکسید کلسیم تقویت می‌کند و منجر به بهبود مقاومت می‌شود.
۳. نتایج حاصل از جذب آب حجمی و جذب آب موئینه نشان داد که هر چه درصد جایگزینی سیمان و خاک رس بیشتر باشد، طرح مخلوط‌های SCEC عملکرد ضعیف‌تری در کاهش نفوذپذیری از خود نشان می‌دهند. این را می‌توان با ماهیت آب‌دوستی خاک رس توجیه نمود. این رفتار آب‌دوستی با افزایش درصد خاک رس در مخلوط بتن، می‌تواند برجسته‌تر شود و در نتیجه درصد جذب آب بالاتری برای مواد کامپوزیت ایجاد شود. در مقابل، مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های دوجزئی داشتند. این را می‌توان به اصلاح ریزساختار ماتریس سیمانی مخلوط‌ها توسط دوده سیلیس نسبت داد.
۴. بر اساس نتایج انقباض، مخلوط شاهد دارای کمترین مقدار کرنش انقباض بود، در حالی که مخلوط C60S10 بالاترین مقدار انقباض را داشت. مقادیر انقباض برای C50، C50S10، C80 و C80S10 برابر با  $10^{-6} \times 1360$ ،  $10^{-6} \times 1068$ ،  $10^{-6} \times 1277$  و  $10^{-6} \times 1433$  بود. این نشان می‌دهد نرخ انقباض با افزایش درصد خاک رس کاهش می‌یابد. در مقابل استفاده از دوده سیلیس در بتن منجر به افزایش نرخ انقباض می‌شود. این به دلیل کاهش تخلخل و اندازه متوسط منافذ ناشی از دود سیلیس است که منجر به افزایش کشش موئینه می‌شود که سرعت انقباض در اجزای بتن را تسریع می‌کند.
۵. نتایج تحلیل وزن سنجی حرارتی در ۲۸ روز برای مخلوط‌های مورد بررسی در این مطالعه، سه پیک تجزیه مرتبط با CSH،  $Ca(OH)_2$  و  $CaCO_3$  را نشان می‌دهد که بر مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد. داده‌های ارائه شده نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از دوده سیلیس و خاک رس در ماتریس سیمان مخلوط C50S10 و C80S10 فرآیند هیدراتاسیون را افزایش می‌دهد. همچنین تحلیل وزن سنجی حرارتی نشان داد پس از مخلوط CC شدت فاز CSH در مخلوط C50S10 نسبت به سایر مخلوط‌ها بیشتر بود. مقدار حداکثر تغییر جرمی که در ۷۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد به وضوح نشان دهنده تولید هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) بیشتر در نمونه حاوی دوده سیلیس است. این نشان می‌دهد که فاز CSH در بتن خاکی را می‌توان با جایگزینی ۱۰٪ دوده سیلیس به جای سیمان بهبود بخشید.
۶. بررسی تصاویر تحلیل SEM نشان داد دوده سیلیس نقش بسزایی در ایجاد فاز CSH دارد و موجب ایجاد ساختار متراکم‌تری در مخلوط‌ها می‌شود که متعاقباً می‌تواند در کاهش نفوذپذیری و تخلخل نمونه‌ها مؤثر واقع شود. مشاهدات میکروسکوپی، ساختار متراکم مخلوط P50S10 را نشان می‌دهد. این به دلیل شکل‌گیری حجم قابل توجهی از ژل‌های CSH است. از سوی دیگر،

تصاویر SEM مخلوط P80 و P80S10 ساختار متخلخل تری را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده افزایش تخلخل به دلیل جایگزینی خاک رس با سیمان است.

این تحقیق پتانسیل بتن حاکی خود متراکم (SCEC) را به عنوان جایگزینی پایدار برای بتن سنتی برجسته می‌کند. به طور خاص، طرح C50S10 در عمل‌آوری تر دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه تقریباً ۲۴/۵۸ مگاپاسکال می‌باشد که ضمن کاهش قابل ملاحظه اثرات منفی زیست‌محیطی سیمان، سبب دستیابی به مقاومت فشاری قابل قبولی برای استفاده در المان‌های سازه‌ای ساختمان‌ها می‌شود. علاوه بر این، فراوانی منابع رسی در داخل کشور، همراه با مزایای حرارتی ذاتی سازه‌های حاکی، فرصت ارزشمندی برای بهره‌برداری از این منبع طبیعی است. همچنین استفاده از خاک رس باعث صرفه جویی در هزینه و مزایای اقتصادی می‌شود و آن را به گزینه‌ای اقتصادی و زیست‌محیطی برای ساخت و ساز ساختمان تبدیل می‌کند. لذا نویسندگان استفاده از طرح‌های C50 و C50S10 را در المان‌های سازه‌ای و سایر طرح مخلوط‌ها را برای استفاده در المان‌های غیر سازه‌ای پیشنهاد می‌کنند.

## قدردانی

نویسندگان مقاله به طور ویژه از شرکت دانش بنیان توسعه فناوریان سبز کارا (کلینیک بتن سبز) جهت کمک در انجام بعضی از آزمایش‌ها قدردانی می‌نمایند.

## مراجع:

- [1]. Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A. A., Maghsoudi, M., & Siad, H. (2017). Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and building materials*, 151, 292-311.
- [2]. Pacheco-Torgal, F. (2017). High tech startup creation for energy efficient built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 618-629.
- [3]. Samimi, K., Farahani, M., Pakan, M., & Shirzadi Javid, A. A. (2022). Influence of pumice and metakaolin on compressive strength and durability of concrete in acidic media and on chloride resistance under immersion and tidal conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 1153-1175.
- [4]. Příkryl, R., Török, Á., Theodoridou, M., Gomez-Heras, M., & Miskovsky, K. (2016). Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society. *Special Publications*, 416(1), 1-22.
- [5]. Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2016). The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. *Construction and building materials*, 106, 179-188.
- [6]. Kamaragi, R. D. (2014). *Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique: histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances* Université Paris Est].
- [7]. Kulshreshtha, Y., Mota, N. J., Jagadish, K. S., Bredenoord, J., Vardon, P. J., van Loosdrecht, M. C., & Jonkers, H. M. (2020). The potential and current status of earthen material for low-cost housing in rural India. *Construction and building materials*, 247, 118615.
- [8]. Delgado, M. C. J., & Guerrero, I. C. (2006). Earth building in Spain. *Construction and building materials*, 20(9), 679-690.
- [9]. Kouta, N., Saliba, J., & Saiyouri, N. (2020). Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete. *Construction and building materials*, 254, 119315.
- [10]. Barbero-Barrera, M. M., Jové-Sandoval, F., & Iglesias, S. G. (2020). Assessment of the effect of natural hydraulic lime on the stabilisation of compressed earth blocks. *Construction and building materials*, 260, 119877.
- [11]. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., & Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and building materials*, 21(3), 539-545.
- [12]. Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, conservation and recycling*, 55(11), 923-932.

- [13]. Samimi, K., Pakan, M., & Eslami, J. (2023). Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions. *Journal of Building Engineering*, 68, 106126.
- [14]. Nawab, M. S., Ali, T., Qureshi, M. Z., Zaid, O., Kahla, N. B., Sun, Y., Anwar, N., & Ajwad, A. (2023). A study on improving the performance of cement-based mortar with silica fume, metakaolin, and coconut fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02480.
- [15]. Ashraf, M., Iqbal, M. F., Rauf, M., Ashraf, M. U., Ulhaq, A., Muhammad, H., & Liu, Q.-f. (2022). Developing a sustainable concrete incorporating bentonite clay and silica fume: Mechanical and durability performance. *Journal of Cleaner Production*, 337, 130315.
- [16]. ASTM C150. (2020). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM Int. p. 1–8.
- [17]. ASTM C109 / C109M-21. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. ASTM International, Philadelphia. p. 17.
- [18]. ASTM C39. (2016). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM. p. 3-4.
- [19]. ASTM C642–13. (2013). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*, ASTM Int.1–3.
- [20]. ASTM, C1585–11. (2011). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*, ASTM Int.
- [21]. ASTM C157 /C 157M. (2008). *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete*.
- [22]. Sabir, B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and concrete composites*, 23(6), 441-454
- [23]. Atiş, C., Özcan, F., Kılıç, A., Karahan, O., Bilim, C., & Severcan, M. (2005). Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. *Building and environment*, 40(12), 1678-1683.
- [24]. Gourav, K., Ullas, S., & Reddy, B. V. (2020). Studies on properties of Flowable Earth Mix concrete for monolithic load bearing walls. *Construction and building materials*, 250, 118876.
- [25]. Haq, I. U., Elahi, A., Nawaz, A., Shah, S. A. Q., & Ali, K. (2022). Mechanical and durability performance of concrete mixtures incorporating bentonite, silica fume, and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 345, 128223.
- [26]. Nandhini, K., & Ponmalar, V. (2021). Effect of blending micro and nano silica on the mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Silicon*, 13(3), 687-695.
- [27]. Bilal, H., Chen, T., Ren, M., Gao, X., & Su, A. (2021). Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. *Construction and building materials*, 275, 122124.
- [28]. Ge, Z., Feng, Y., Yuan, H., Zhang, H., Sun, R., & Wang, Z. (2021). Durability and shrinkage performance of self-compacting concrete containing recycled fine clay brick aggregate. *Construction and Building Materials*, 308, 125041.
- [29]. Shen, P., Lu, L., He, Y., Rao, M., Fu, Z., Wang, F., & Hu, S. (2018). Experimental investigation on the autogenous shrinkage of steam cured ultra-high performance concrete. *Construction and building materials*, 162, 512-522.
- [30]. Samimi, K., Pakan, M., Eslami, J., & Asgharnejad, L. (2022). Investigation of two different water-dispersed graphene on the performance of graphene/cement paste: Surfactant and superplasticizer effect. *Construction and Building Materials*, 349, 128756.
- [31]. Luo, T., Hua, C., Liu, F., Sun, Q., Yi, Y., & Pan, X. (2022). Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01048.