

## عمل آوری داخلی بتن فوق توانمند با استفاده از ماسه اسکوریا: جمع شدگی خودزا،

### خواص مقاومتی و خواص انتقالی

میثم آقاپور<sup>۱</sup>، جمشید اسماعیلی<sup>۲\*</sup> و جمیل کسائی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: ۱۳۷۷/۰۴/۰۰، بازنگری: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۴/۰۴/۳۱، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰

#### چکیده

بتن فوق توانمند نوع جدیدی از کامپوزیت‌های پایه سیمانی با خصوصیات مکانیکی بسیار بالا و دوام بهبودیافته می‌باشد که معمولاً با دانه‌بندی بهینه اجزای دانه‌ای، نسبت آب به سیمان بسیار پایین، درصد بالای مواد سیمانی و به کارگیری میکرو الیاف فولادی ساخته می‌شود. با این حال، بتن فوق توانمند به دلیل استفاده از مقادیر بالای سیمان و نسبت آب به سیمان بسیار پایین، جمع شدگی خودزای قابل توجهی دارد. عمل آوری داخلی یکی از روش‌های موفق و مفید برای کاهش جمع شدگی خودزای بتن فوق توانمند می‌باشد؛ بنابراین در این تحقیق آزمایشگاهی از ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در مقادیر مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد برای جایگزینی ماسه طبیعی رودخانه‌ای به منظور عمل آوری داخلی بتن فوق توانمند استفاده شده است. بدین منظور پس از آماده‌سازی نمونه‌ها آزمایش‌های تعیین جمع شدگی خودزا، مقاومت فشاری و خمشی، درصد جذب آب کاپیلاره (آهنگ جذب آب)، سرعت پالسی و درصد جذب آب بتن فوق توانمند انجام یافت. با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده، مشاهده می‌گردد که با افزایش محتوای ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در مخلوط‌های بتن فوق توانمند، جمع شدگی خودزا و خصوصیات مقاومتی کاهش یافته و خصوصیات انتقالی از قبیل درصد جذب آب و جذب آب کاپیلاره افزایش می‌یابد. بر این اساس، جایگزینی ۲۵ درصد ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده با ماسه طبیعی رودخانه‌ای، بهینه‌ترین نسبت برای کاهش جمع شدگی خودزا و حفظ خواص مکانیکی و انتقالی بتن فوق توانمند می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** بتن فوق توانمند، عمل آوری داخلی، ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده، جمع شدگی خودزا، خصوصیات مقاومتی، خصوصیات انتقالی

#### ۱- مقدمه

داخلی خمیر سیمان در طول فرایند هیدراسیون می‌شود که در نهایت به خشک شدگی داخلی و جمع شدگی خودزا می‌انجامد، [2001, P.F. Hansen, Jensen O.M].

جمع شدگی خودزا پدیده‌ای است که از اوایل قرن بیستم شناخته شده است، [1934, Lynam, C.G.] و تحقیقات وسیعی برای شناخت و ارزیابی آن در مواد پایه سیمانی مختلف انجام یافته است [Paillere, A.M. و همکاران، 1989، Tazawa, E.-i. و S. Miyazawa, 1995، Kasaei, J. و Esmaeili, J.، 2013]. جمع شدگی خودزا عموماً در بتن‌های با مقاومت بالا و فوق توانمند رخ می‌دهد [Artcin, P.، 2003]. طرح اختلاط متداول بتن فوق توانمند دارای نسبت‌های بسیار پایین آب به مواد سیمانی، مقادیر بالای

بتن فوق توانمند نوعی ماده پایه سیمانی است که سیمان پرتلند، میکروسلیس، ماسه سیلیسی ریزدانه، آب و میکرو الیاف فولادی اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده آن می‌باشد. بتن فوق توانمند عملکردی بسیار عالی از لحاظ خصوصیات مکانیکی و دوام از خود نشان می‌دهد. با توجه به طرح اختلاط و شرایط فراوری، مقاومت فشاری بتن فوق توانمند بین ۱۵۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال متغیر می‌باشد [Resplendino, J. و Schmidt, M.، 2012]. با این وجود، جمع شدگی خودزای بسیار زیاد مشکلی رایج در بتن فوق توانمند می‌باشد که به دلیل نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایین و به کارگیری مقادیر زیاد سیمان و میکروسلیس در تولید آن ایجاد می‌گردد. این عوامل منجر به کاهش چشمگیر رطوبت نسبی



ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز

شاپا الکترونیکی: ۴۰۷۷-۲۷۱۷

<https://doi.org/10.22034/CEEJ.0000.00000.0000>

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱۳۳۳۹۲۵۰۰

ایمیل: Kasaei.ja@tabrizu.ac.ir, J-Esmaeili@tabrizu.ac.ir, M.aghapour1401@ms.tabrizu.ac.ir

\* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0000-0000-0000

استفاده از ماسه سبک در طرح اختلاط بتن فوق توانمند می تواند کمک شایانی به کنترل جمع شدگی خودزا نماید. مطالعات دیگر نشان داده اند که استفاده از مصالح متخلخل به میزان مناسب نه تنها می تواند جمع شدگی خودزا را کاهش دهد، بلکه تاحدودی مقاومت فشاری و خمشی بتن فوق توانمند را بهبود می بخشد [Liu, K. و همکاران، 2018، 2019 و Suzuki, M. و همکاران، 2010].

این مقاله نتایج تحقیقی آزمایشگاهی بر خواص کلیدی بتن فوق توانمند حاوی درصد های مختلفی از ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده را ارائه می دهد. در این تحقیق، خصوصیات بتن فوق توانمند حاوی پنج مقدار مختلف از ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد حجمی)، مورد بررسی قرار گرفته است. جمع شدگی خودزا در بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلفی از ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده اندازه گیری و با نمونه های شاهد مقایسه گردیده است. مقاومت فشاری و خمشی، سرعت پالسی، جذب آب کاپیلاره و درصد جذب آب در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز به عنوان خواص مکانیکی و انتقالی به دست آمده و مورد ارزیابی قرار گرفته اند.

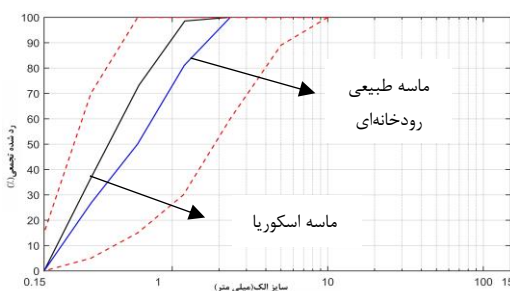
## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد

#### سیمان و میکروسیلیس

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان پرتلند تیپ ۱، میکروسیلیس، ماسه طبیعی رودخانه ای، ماسه اسکوریا، میکرو الیاف فولادی و ابر روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات می باشند. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۱ تولید شده توسط شرکت سیمان سامان استفاده شده است. این سیمان دارای وزن مخصوص ۳/۱ و سطح مخصوص بلین ۳۲۸۰ سانتی متر مربع بر گرم می باشد. در تمامی مخلوط ها از میکروسیلیس با بیش از ۸۹٪  $SiO_2$  و وزن مخصوص ۲/۲ استفاده شده است. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان و میکروسیلیس ارائه شده است.

#### سنگدانه ها



شکل ۱: منحنی های دانه بندی سنگدانه ها

سیمان و مواد افزودنی معدنی و فوق روان کننده ها می باشد. در شرایطی که نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۲ باشد [Ismael, A.N., 2014]، ممکن است آب کافی در مخلوط برای تکمیل فرآیند هیدراسیون وجود نداشته باشد و در نتیجه با خشک شدن داخلی زمینه برای ایجاد جمع شدگی خودزا فراهم می گردد. جمع شدگی خودزا تغییرات حجمی ایجاد کرده که می تواند منجر به ایجاد ترک در بتن گردد [Bentz, D.P. و O.M. Jensen, 2004, Holt, E., 2005].

امروزه جستجو به منظور یافتن روش هایی برای کاهش یا محدود کردن جمع شدگی خودزای بتن فوق توانمند در تحقیقات مهندسی اهمیت بیشتری پیدا کرده است. روش ها و راهکارهای گوناگونی برای مقابله با جمع شدگی خودزا گزارش شده است [Esmaeili, J. و همکاران، 2024, 2025] که برخی از آنها عبارتند از: بکارگیری عمل آوری داخلی [Wang, X. و همکاران، 2019، 2020، Eberhardt, F. و Rajabipour, F. و همکاران، 2008]، جایگزینی سیمان و یا میکروسیلیس با مواد پوزولانی [Rößler, C. و همکاران، 2014، Liu, J. و همکاران، 2017]، استفاده از مواد منبسط کننده [Anshuang و همکاران، 2017] و افزودن الیاف [Wu, Z. و همکاران، 2019]. روش و راهکاری که در این پژوهش مورد بررسی قرار می گیرد، عمل آوری داخلی می باشد. بر اساس نتایج تحقیقات انجام یافته، عمل آوری داخلی به عنوان روشی مؤثر برای مقابله با خشک شدن و جمع شدگی خودزا در بتن در نظر گرفته می شود. این روش به کاهش احتمال ترک خوردگی در سنین اولیه، به ویژه در مواد پایه سیمانی سیمانی با نسبت آب به مواد سیمانی پایین می انجامد. دو روش رایج عمل آوری داخلی در بتن، استفاده از مصالح از پیش اشباع شده و پلیمرهای فوق جاذب می باشد [Hansen, P.F. و Jensen, M., 1996].

تکنیک جدیدی که برای کاهش جمع شدگی خودزای بتن فوق توانمند پیشنهاد شده است، استفاده از دانه های ریز پلیمر فوق جاذب در بتن می باشد [Jensen, O.M. و P.F., 2002]. پژوهشگران استفاده از پلیمرهای فوق جاذب به عنوان عامل عمل آوری داخلی برای کاهش جمع شدگی خودزای بتن فوق توانمند را مورد بررسی قرار داده اند. اگرچه پلیمرهای فوق جاذب می توانند مؤثر باشند، اما می تواند منجر به ناهمگنی در بتن شده و حفره هایی به بزرگی ۶۰۰ میکرومتر برجای بگذارند. بنابراین، پژوهشگران همچنان در حال بررسی روش های دیگر عمل آوری داخلی بتن فوق توانمند برای کاهش این مشکلات هستند. همانطور که قبلاً اشاره گردید، بکارگیری سنگدانه های سبک از پیش اشباع شده نیز به عنوان روشی مؤثر در عمل آوری داخلی مواد پایه سیمانی مطرح گردیده است. بر اساس تحقیقات منگ و همکاران [Khayat, K. و Meng, W., 2017]

جدول ۱: ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی مواد سیمانی [شرکت سیمان سامان غرب، کارخانه فروسیلیس ایران]

| نوع مصالح          | Na <sub>2</sub> O % | K <sub>2</sub> O % | SO <sub>3</sub> % | MgO % | CaO % | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | SiO <sub>2</sub> % | I.o.I % | مقاومت فشاری<br>(کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) |     |     | بلین<br>(سانتیمتر مربع بر گرم) |
|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|---------|--------------------------------------------|-----|-----|--------------------------------|
|                    |                     |                    |                   |       |       |                                  |                                  |                    |         | ۳                                          | ۷   | ۲۸  |                                |
| سیمان پرتلند تیپ ۱ | ۰/۷۴                | ۰/۲۷               | ۲/۵۴              | ۲/۳۸  | ۵۹/۱۱ | ۳/۶                              | ۵/۷                              | ۲۲/۸               | ۲/۱۶    | ۵۳۹                                        | ۴۲۷ | ۳۳۱ | ۳۲۸۰                           |
| میکرو سیلیس        | ۰/۵۵                | ۱/۰۵               | ---               | ۱/۶۱  | ۱/۸۷  | ۲/۱۲                             | ۱/۲                              | ۸۹/۲۲              | ۲/۶     | ---                                        | --- | --- | ---                            |

شکل ۲: مواد مورد استفاده در آزمایش



الف) میکرو الیاف فولادی، ب) ماسه رودخانه ای، پ) ماسه اسکوریا، ت) میکروسیلیس، ث) سیمان

میکرو الیاف فولادی به طول ۱۶ میلیمتر و قطر ۰/۲۵ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفته است. این الیاف مطابق با الزامات استاندارد [2006, ASTM A820] می باشند.

## ۲-۲- طرح اختلاط

بتن فوق توانمند مورد بررسی در این تحقیق با مقادیر مختلفی از ماسه اسکوریا به عنوان جایگزین ماسه طبیعی رودخانه ای (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد حجمی) و نسبت ثابت آب به مواد سیمانی ۰/۲ طرح گردیده است. برای حفظ کارایی مخلوط های بتن تازه فوق توانمند، از مقدار ثابتی ابرروان کننده استفاده گردید. مقدار مواد سیمانی، شامل سیمان و میکروسیلیس، در تمام مخلوط های بتنی ثابت نگه داشته شده است. جدول ۲، نسبت های اختلاط مخلوط های بتن فوق توانمند با مقادیر مختلف ماسه اسکوریا را نشان می دهد.

سنگدانه ها در اختلاط بتن فوق توانمند شامل ترکیبی از ماسه اسکوریا و ماسه طبیعی رودخانه ای می باشد. ماسه اسکوریا، دارای وزن مخصوص و جذب آب به ترتیب ۱/۹۲٪ و ۸/۸۵٪ و حداکثر اندازه ۱/۱۸ میلی متر می باشد. این در حالیست که وزن مخصوص و جذب آب ماسه طبیعی رودخانه ای به ترتیب ۲/۶۷٪ و ۲٪ می باشد. ماسه اسکوریا قبل از استفاده در نمونه های بتن فوق توانمند ۲۴ ساعت در داخل آب اشباع گردید تا آب کافی را جذب نماید. منحنی های دانه بندی ماسه اسکوریا و ماسه رودخانه طبیعی در شکل ۱ نشان داده شده است.

## ابرروان کننده

افزودنی ابرروان کننده مورد استفاده در این تحقیق بر پایه پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص حدود ۱/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب و محتوای جامد ۳۰٪ تا ۴۰٪ می باشد.

## الیاف فولادی

## ۳-۲- روش تهیه نمونه ها، قالب ها و عمل آوری

جدول ۲: نسبت اختلاط بتن فوق توانمند حاوی محتویات مختلف ماسه اسکوریا

| نامگذاری<br>(شماره<br>اختلاط) | الیاف فولادی<br>(کیلوگرم<br>بر متر مکعب) | فوق روان<br>کننده<br>(کیلوگرم<br>بر متر مکعب) | ماسه طبیعی<br>رودخانه<br>ای (کیلوگرم<br>بر متر مکعب) | آب<br>(کیلوگرم<br>بر متر<br>مکعب) | میکروسیلیس<br>(کیلوگرم<br>بر متر مکعب) | ماسه اسکوریا<br>(کیلوگرم<br>بر متر مکعب) | سیمان<br>(کیلوگرم<br>بر متر مکعب) | نسبت<br>آب به<br>سیمان |
|-------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| شاهد                          | ۱۵۷                                      | ۱۰                                            | ۱۰۵۵                                                 | ۲۱۱                               | ۲۵۵                                    | ---                                      | ۸۰۰                               | ۰/۲                    |
| اسکوریا-<br>٪۲۵               | ۱۵۷                                      | ۱۰                                            | ۷۹۲                                                  | ۲۱۱                               | ۲۵۵                                    | ۱۹۰                                      | ۸۰۰                               | ۰/۲                    |
| اسکوریا-<br>٪۵۰               | ۱۵۷                                      | ۱۰                                            | ۵۲۸                                                  | ۲۱۱                               | ۲۵۵                                    | ۳۸۰                                      | ۸۰۰                               | ۰/۲                    |
| اسکوریا-<br>٪۷۵               | ۱۵۷                                      | ۱۰                                            | ۲۶۴                                                  | ۲۱۱                               | ۲۵۵                                    | ۵۶۹                                      | ۸۰۰                               | ۰/۲                    |
| اسکوریا-<br>٪۱۰۰              | ۱۵۷                                      | ۱۰                                            | ---                                                  | ۲۱۱                               | ۲۵۵                                    | ۷۵۹                                      | ۸۰۰                               | ۰/۲                    |

## ۲-۴- روش آزمایش

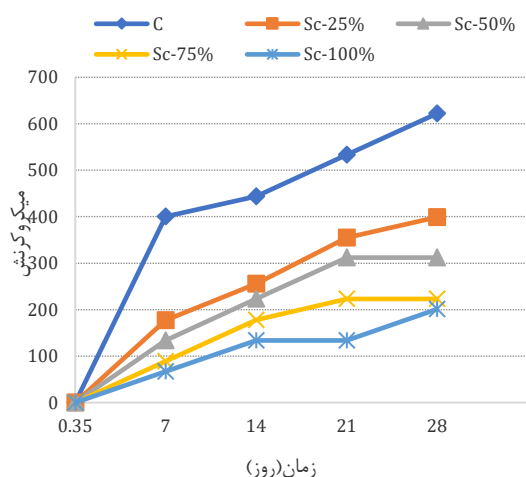
آزمایش مقاومت خمشی در سنین ۲۸،۷ و ۹۰ روز مطابق با استاندارد [2008, ASTM C348] بر روی نمونه های تیر شکل به ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی متری و آزمایش مقاومت فشاری نیز در سنین ۲۸،۷ و ۹۰ روز مطابق با استاندارد [ASTM C116-1999, 90] بر روی نمونه های بدست آمده از آزمایش خمشی انجام یافته است. آزمایش درصد جذب آب بتن فوق توانمند مطابق با استاندارد [1997, ASTM C642]، آزمایش سرعت پالسی مطابق با استاندارد [2002, ASTM C597] و آزمایش جذب آب کاپیلاره مطابق با استاندارد [2004, ASTM C1585] بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر در سنین ۲۸،۷ و ۹۰ روز انجام یافته است. آزمایش جمع شدگی خودزا بر روی نمونه های منشوری با ابعاد ۵/۲۸×۵/۲۸×۵/۲۸ سانتی متر مطابق با استاندارد [2000, ASTM C490] انجام یافته است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- جمع شدگی خودزا

جمع شدگی خودزا در تمامی مخلوط های بتن فوق توانمند، تا ۲۸ روز اندازه گیری شده و در شکل ۴ ارائه گردیده است. نمونه های جمع شدگی خودزا و ستاپ آزمایشگاهی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. باتوجه به نتایج به دست آمده مشاهده می گردد که با افزایش مقدار ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در نمونه های بتن فوق توانمند، جمع شدگی خودزا به طور

فرایند اختلاط بتن فوق توانمند در دستگاه مخلوط کن و در دمای کنترل شده محیط آزمایشگاه انجام پذیرفت. به منظور تولید نمونه های آزمایشی، بتن تازه بلافاصله در قالب های فولادی ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ثابت محیط (حدود ۲۳ درجه سانتی گراد)، نگهداری گردید. پس از این مدت، نمونه ها از قالب خارج شده و تا موعد انجام آزمایش ها جهت عمل آوری، در مخازن حاوی آب آهک اشباع شده با دمای ثابت ۲۳ درجه سانتی گراد غوطه ور شدند. آزمون های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، درصد جذب آب، جذب آب کاپیلاره و سرعت پالسی بر روی نمونه ها پس از سپری شدن دوره های عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به عمل آمد. در خصوص ارزیابی جمع شدگی خودزا، فرایند اختلاط بتن فوق توانمند مطابق روال فوق اجرا و بلافاصله بتن در قالب های مربوطه ریخته شد. این نمونه ها به مدت ۹ ساعت در محفظه عمل آوری تحت دمای ۲۳ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی بالاتر از ۹۰ درصد قرار گرفتند. پس از پایان این بازه زمانی، نمونه ها از قالب جدا شده و به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت داخلی، ابتدا با دولایه پوشش نایلونی و سپس دولایه فویل آلومینیومی کاملاً پوشانده شدند. طول اولیه نمونه ها فوراً اندازه گیری و ثبت گردید و متعاقباً تغییرات طولی آن ها در بازه های زمانی استاندارد پایش شد. بدین صورت که در طول هفته نخست به صورت روزانه و سپس تا یک ماه به صورت هفتگی اندازه گیری ها انجام پذیرفت.



شکل ۴: جمع شدگی خودزا بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده

### ۳-۲- مقاومت فشاری

مقادیر میانگین نتایج مقاومت فشاری تا ۹۰ روز برای تمامی مخلوط‌های بتن فوق توانمند که حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده هستند، در جدول ۳ و شکل ۵ ارائه شده است. آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام گرفته است. مقادیر مقاومت فشاری، میانگین شش آزمون می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در نمونه‌های بتن فوق توانمند، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. کمترین مقدار مقاومت فشاری در تمامی سنین مربوط به مخلوط اسکوریا-۱۰۰٪ می‌باشد که شامل ۱۰۰٪ ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده می‌باشد.

در میان نمونه‌های بتن فوق توانمند حاوی ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده، مخلوط اسکوریا-۲۵٪ دارای بیشترین مقاومت فشاری می‌باشد. مقدار ماسه اسکوریا تأثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند دارد. تحلیل نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کاهش مقاومت فشاری با جایگزینی ماسه طبیعی رودخانه‌ای توسط ماسه اسکوریا تا میزان ۲۵٪، چندان قابل توجه نیست. با افزایش مقدار ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده، کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های اسکوریا-۵۰٪، اسکوریا-۷۵٪ و اسکوریا-۱۰۰٪، به ترتیب برابر با ۱۴٪، ۲۰٪ و ۲۸٪ می‌باشد. کاهش مشاهده‌شده در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مخلوط با نسبت ۲۵٪ اسکوریا به‌عنوان بهترین درصد بهینه مورد استفاده در این آزمایش در بتن فوق توانمند، با توجه به مقادیر ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای رایج در محدوده مطلوب قرار دارد [FHWA - Federal Highway, ACI 239R-18 Administration]. در این مطالعه، کاهش مقاومت فشاری در

قابل توجهی کاهش می‌یابد. حداکثر کاهش جمع‌شدگی خودزا حدود ۸۳٪ و ۶۸٪، نسبت به نمونه شاهد در مخلوط ماسه اسکوریا - ۱۰۰٪ به ترتیب در ۷ و ۲۸ روزگی قرائت گردید. قابل توجه است که با جایگزینی تنها ۲۵٪ از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده (ماسه اسکوریا-۲۵٪)، جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند، به ترتیب در ۷ و ۲۸ روزگی به طور قابل توجهی در حدود ۵۶٪ و ۳۶٪ کاهش می‌یابد. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۴، جمع‌شدگی خودزا در ۷ روز ابتدایی نسبت به ۲۸ روزگی به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌یابد که این امر در بتن فوق توانمند می‌تواند منجر به کاهش احتمال ایجاد ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خودزا در روزهای ابتدایی گردد. به دلیل تغییر مکانیزم عمل‌آوری داخلی ماسه اسکوریا در طول زمان، تأثیر افزایش درصد ماسه اسکوریا بر کاهش جمع‌شدگی خودزا در تمام دوره آزمایش یکسان نمی‌باشد. در مراحل اولیه، ماسه اسکوریا با آزادسازی آب ذخیره شده، موجب کاهش چشمگیر جمع‌شدگی خودزا می‌شود، اما با گذشت زمان و کاهش میزان آزادسازی آب، این تأثیر کاهش می‌یابد. همچنین، میزان این کاهش در درصد‌های مختلف جایگزینی ماسه اسکوریا با ماسه رودخانه‌ای یکسان نمی‌باشد، زیرا ویژگی‌هایی همچون میزان تخلخل و ظرفیت نگهداری آب در نمونه‌های با درصد جایگزینی متفاوت (برای مثال ۲۵٪ و ۱۰۰٪ اسکوریا) متفاوت می‌باشد.



شکل ۳: چینه‌ش آزمایش نمونه جمع شدگی خودزا

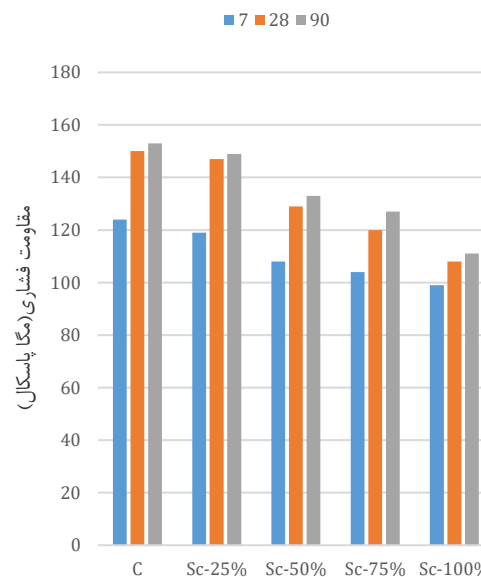
به ترتیب در نمونه های ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده می گردد. به نظری رسد با افزایش مقادیر ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده و همچنین افزایش سن نمونه ها و روند کسب مقاومت بتن فوق توانمند، ظرفیت مقاومتی سنگ دانه های سبک اسکوریا کافی نبوده و این امر موجب کاهش مقاومت خمشی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز گردیده است.

شایان ذکر است که میزان کاهش مقاومت خمشی نمونه اسکوریا-۲۵٪ نسبت به نمونه شاهد تنها ۳٪ و ۶٪ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می باشد.



شکل ۶: چینش آزمایش مقاومت خمشی

نمونه های حاوی ماسه اسکوریا، به ویژه در مخلوط حاوی ۲۵٪ اسکوریا، در مقایسه با نمونه شاهد، در حدود ۲٪ و ۲۵٪ در سنین ۲۸ و ۹۰ روزگی می باشد. این کاهش مقاومت فشاری از حداقل مقاومت لازم برای بتن فوق توانمند (۱۵۰ مگاپاسکال طبق ACI 239R-18) فراتر نمی رود و به اندازه ای قابل ملاحظه نیست که نشان دهنده کاهش قابل توجه در عملکرد و قابلیت استفاده این نوع بتن باشد.

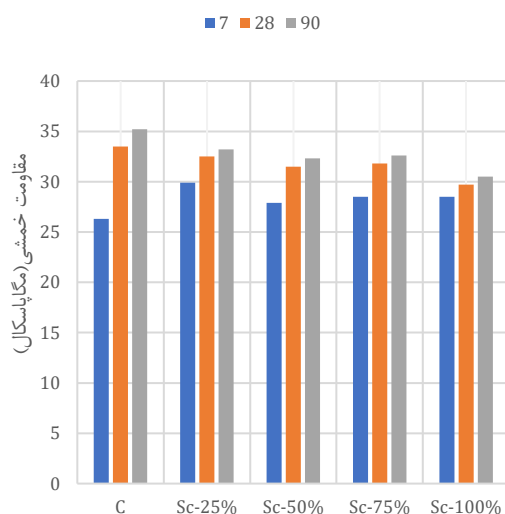


شکل ۵: مقاومت فشاری بتن فوق توانمند مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده

### ۳-۳- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی بتن فوق توانمند که حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده می باشد در سنین مختلف در جدول ۳ و شکل ۷ ارائه شده است. مقادیر مقاومت خمشی، میانگین نتایج سه نمونه آزمایشی می باشد. شکل ۶ نحوه چینش آزمایش خمشی را نشان می دهد.

آزمایش تعیین مقاومت خمشی در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰ روز بر روی نمونه های آزمایشگاهی انجام گرفته است. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۷، مشاهده می گردد که مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه های بتن فوق توانمند با بکارگیری ماسه اسکوریا بهبود می یابد. بطوریکه مقاومت خمشی اسکوریا-۲۵٪ ۷ روزه به میزان حدودا ۱۴٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. این درحالیست که در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، با افزایش مقدار بکارگیری ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در طرح اختلاط بتن فوق توانمند، مقاومت خمشی کاهش می یابد. بیشترین میزان کاهش در مقاومت خمشی در نمونه اسکوریا-۱۰٪ و حدودا ۱۱٪ و ۱۳٪

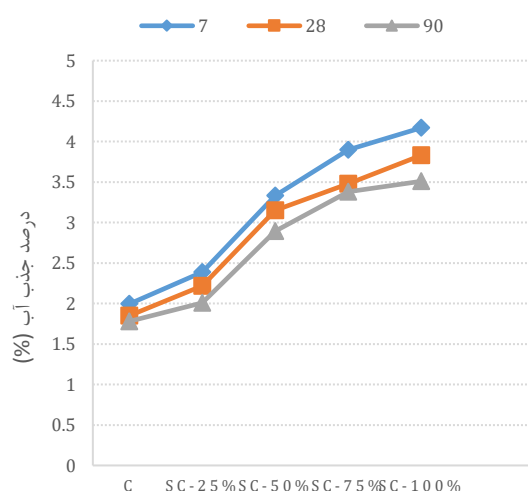


شکل ۷: مقاومت خمشی بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده

جدول ۳: خواص مقاومتی و وزن مخصوص خشک بتن های فوق توانمند حاوی درصد های مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده

| وزن مخصوص خشک<br>(کیلوگرم بر مترمکعب) | مقاومت خمشی<br>(مگاپاسکال) | مقاومت فشاری<br>(مگاپاسکال) | زمان (روزها) | طرح اختلاط   |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| ۲۳۸۳                                  | ۲۶/۳                       | ۱۲۴                         | ۷            | شاهد         |
|                                       | ۳۳/۵                       | ۱۵۰                         | ۲۸           |              |
|                                       | ۳۵/۲                       | ۱۵۳                         | ۹۰           |              |
| ۲۳۵۵                                  | ۲۹/۹                       | ۱۱۹                         | ۷            | اسکوریا-۲۵٪  |
|                                       | ۳۲/۵                       | ۱۴۷                         | ۲۸           |              |
|                                       | ۳۳/۲                       | ۱۴۹                         | ۹۰           |              |
| ۲۳۱۶                                  | ۲۷/۹                       | ۱۰۸                         | ۷            | اسکوریا-۵۰٪  |
|                                       | ۳۱/۵                       | ۱۲۹                         | ۲۸           |              |
|                                       | ۳۲/۳                       | ۱۳۳                         | ۹۰           |              |
| ۲۲۷۰                                  | ۲۸/۵                       | ۱۰۴                         | ۷            | اسکوریا-۷۵٪  |
|                                       | ۳۱/۸                       | ۱۲۰                         | ۲۸           |              |
|                                       | ۳۲/۶                       | ۱۲۷                         | ۹۰           |              |
| ۲۲۳۸                                  | ۲۸/۵                       | ۹۹                          | ۷            | اسکوریا-۱۰۰٪ |
|                                       | ۲۹/۷                       | ۱۰۸                         | ۲۸           |              |
|                                       | ۳۰/۵                       | ۱۱۱                         | ۹۰           |              |

معنادار بین این پارامترها و تأثیر مستقیم تخلخل سنگدانه ها بر مقاومت و جذب آب بتن فوق توانمند می باشد. با تفسیر این نمودار ها می توان به این نتیجه رسید که افزایش جذب آب در نمونه های حاوی ماسه اسکوریا، به دلیل افزایش تخلخل، می تواند همراه با کاهش مقاومت فشاری باشد.

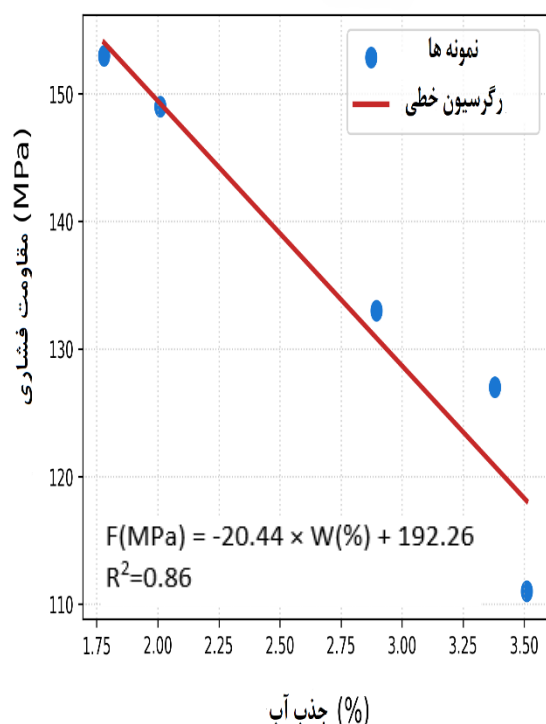


شکل ۸: درصد جذب آب بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده

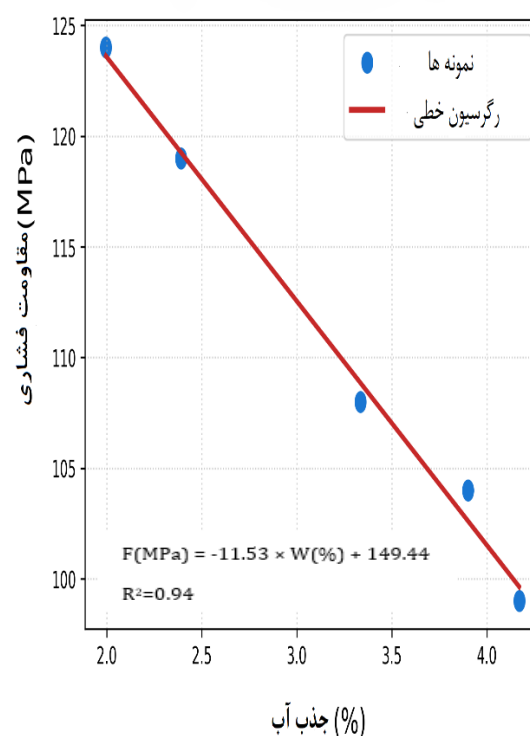
### ۴-۳- درصد جذب آب

درصد جذب آب نمونه های بتن فوق توانمند که حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا می باشند، در سنین مختلف ۲۸، ۷ و ۹۰ روزگی در شکل ۸ ارائه گردیده است. مقادیر درصد جذب آب ارائه شده، میانگین نتایج سه نمونه آزمایشگاهی می باشد. باتوجه به نتایج به دست آمده مشاهده گردید که با افزایش درصد ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در نمونه های بتن فوق توانمند، درصد جذب آب به تدریج افزایش می یابد.

بیشترین میزان افزایش درصد جذب آب تقریباً ۱۰۹٪ بوده که مربوط به مخلوط اسکوریا-۱۰۰٪، ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد می باشد. افزایش میزان بکارگیری ماسه اسکوریا به جای ماسه رودخانه ای در بتن فوق توانمند می تواند منجر به متخلخل شدن ساختار حفره ای بتن گردیده و در نهایت افزایش درصد جذب آب را به همراه داشته باشد. البته قابل ذکر است که میزان افزایش درصد جذب آب در نمونه های اسکوریا-۲۵٪، ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد ۲۰٪ می باشد. جهت تحلیل دقیق تر، نمودارهای همبستگی و رگرسیون خطی بین پارامترهای مختلف شامل جذب آب و مقاومت فشاری در سنین مختلف، در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شد. این نمودارها نشان دهنده رابطه



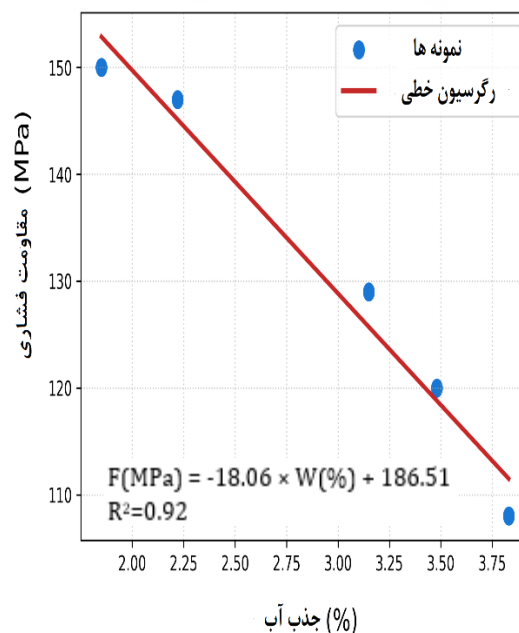
شکل ۱۱: رابطه مقاومت فشاری و جذب آب (۹۰ روزه)



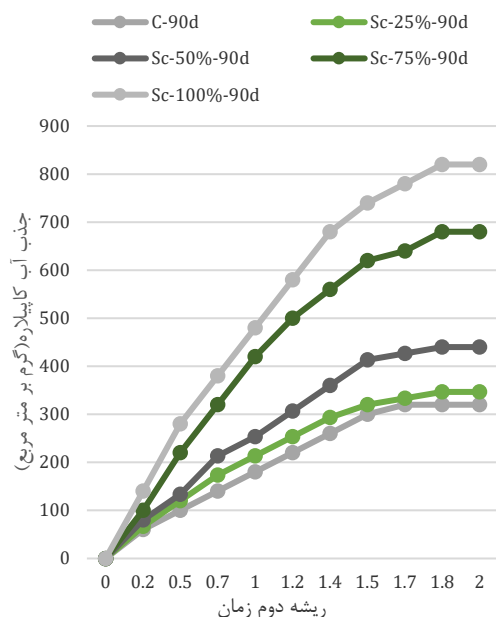
شکل ۹: رابطه مقاومت فشاری و جذب آب (۷ روزه)

### ۳-۵- جذب آب کاپیلاره

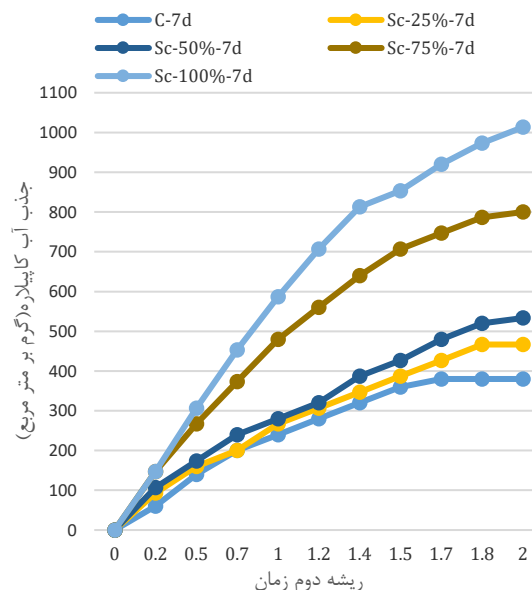
جذب آب کاپیلاره نمونه های بتن فوق توانمند که حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا هستند، در سنین مختلف ۲۸، ۹۰ و ۱۴۱، ۱۳۰ و ۱۲۰ روز در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. مقادیر جذب آب کاپیلاره میانگین نتایج سه نمونه آزمایشگاهی می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده گردید که با افزایش میزان ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در نمونه های بتن فوق توانمند، جذب آب کاپیلاره نیز به تدریج افزایش می یابد. بیشترین میزان افزایش جذب آب کاپیلاره در انتهای تست، حدوداً ۱۶۷٪ بوده و در نمونه های اسکوریا-۱۰٪ ۷ روزه مشاهده می گردد. این در حالیست که میزان افزایش جذب آب کاپیلاره در نمونه های اسکوریا-۲۵٪ ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد ۲۰٪ می باشد. افزایش جذب آب کاپیلاره در بتن های فوق توانمند حاوی ماسه اسکوریا را می توان به افزایش تخلخل کل و تشکیل منافذ پیوسته تر در ساختار بتن نسبت داد که عمدتاً ناشی از استفاده از سنگدانه های سبک و متخلخل می باشد. مطالعات پیشین نیز به اثر افزایش تخلخل ناشی از سنگدانه های سبک بر افزایش جذب آب اشاره داشته اند [Kim و Choi, 2012].



شکل ۱۰: رابطه مقاومت فشاری و جذب آب (۲۸ روزه)



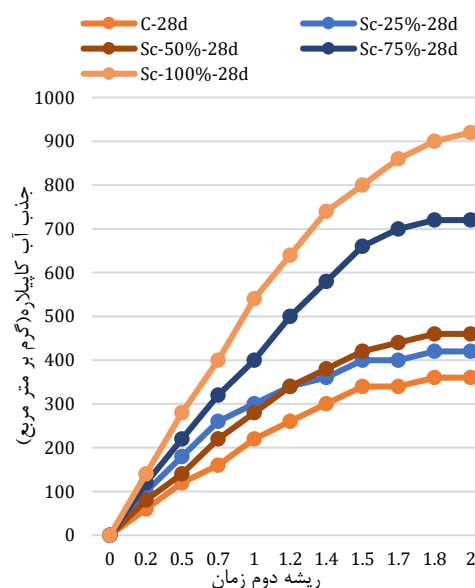
شکل ۱۴: جذب آب کاپیلاره بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده (۹۰ روزه)



شکل ۱۲: جذب آب کاپیلاره بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده (۷ روزه)

### ۳-۶- سرعت پالسی

آزمایش سرعت پالسی آلتراسونیک با استفاده از دستگاه آلتراسونیک (PUNDIT) بر روی نمونه‌ها انجام یافت. سرعت پالسی نمونه‌های بتن فوق توانمند که حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا هستند، در سنین مختلف ۲۸.۷ و ۹۰ روزگی در شکل ۱۶ ارائه گردیده است. نحوه آزمایش و ستاپ نمونه‌های سرعت پالسی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مقادیر سرعت پالسی میانگین نتایج سه نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. باتوجه به نتایج به دست آمده مشاهده گردید که با افزایش درصد ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در نمونه‌های بتن فوق توانمند، سرعت پالسی به تدریج کاهش می‌یابد. در میان نمونه‌های بتن فوق توانمند با درصد‌های مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده، بیشترین کاهش سرعت پالسی تقریباً ۱۰٪ بوده که مربوط به مخلوط اسکوریا - ۱۰٪ می‌باشد. این کاهش سرعت پالسی را می‌توان به ساختار متخلخل‌تر بتن فوق توانمند، با افزایش مقدار ماسه اسکوریا در اختلاط نسبت داد. شایان ذکر است که کاهش سرعت پالسی در نمونه اسکوریا-۲۵٪/۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد تنها ۵٪ می‌باشد.



شکل ۱۳: جذب آب کاپیلاره بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده (۲۸ روزه)

جایگزینی ۲۵ درصد از ماسه طبیعی رودخانه ای توسط ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده، جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند به طور قابل ملاحظه ای (تا ۵۶٪ در سن ۷ روز) کاهش می‌یابد، درحالی‌که افت مقاومت فشاری و خمشی در این مخلوط بسیار جزئی و ناچیز می‌باشد (به ترتیب کمتر از ۴٪ کاهش مقاومت فشاری در ۲۸ روز و حدود ۳٪ کاهش مقاومت خمشی در ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد). همچنین افزایش درصد جذب آب و سایر خواص انتقالی در این چهارچوب کنترل‌شده و محدود باقی می‌ماند. در مقابل، افزایش بیشتر جایگزینی ماسه اسکوریا (۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) علی‌رغم کاهش بیشتر جمع‌شدگی خودزا، موجب افت مقاومت فشاری و افزایش جذب آب می‌گردد که تأثیر منفی بر عملکرد بتن فوق توانمند را در پی دارد. بنابراین، بر اساس جمع‌بندی داده‌های تجربی این مطالعه، مقدار بهینه جایگزینی ماسه طبیعی رودخانه ای توسط ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده، ۲۵ درصد پیشنهاد می‌گردد. این مقدار توازنی مطلوب بین کنترل جمع‌شدگی خودزا و حفظ خواص مقاومتی و انتقالی ایجاد می‌نماید و به‌عنوان راهکاری عملی به منظور عمل‌آوری داخلی بتن فوق توانمند توصیه می‌شود.

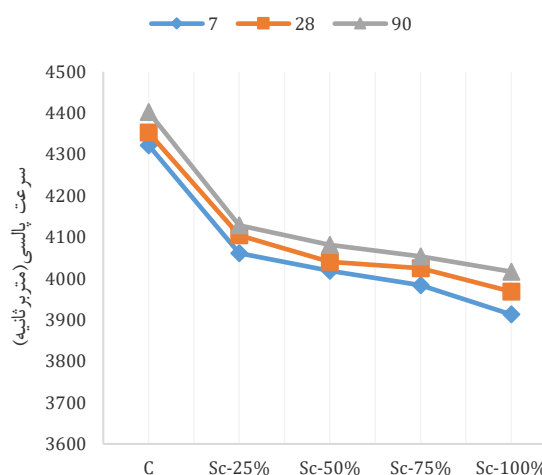
#### ۴- نتیجه گیری

تحلیل نتایج آزمایشگاهی مربوط به مخلوط‌های بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده نشان می‌دهد:

- با افزایش میزان ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در نمونه‌های بتن فوق توانمند، جمع‌شدگی خودزا به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. با جایگزینی تنها ۲۵٪ ماسه طبیعی رودخانه توسط ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده (اسکوریا-۲۵٪)، جمع‌شدگی خودزا بتن فوق توانمند به ترتیب در حدود ۵۶٪ و ۳۶٪ در سنین ۷ و ۲۸ روزگی کاهش می‌یابد.
- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن فوق توانمند در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰ روز، با جایگزینی ماسه رودخانه طبیعی توسط ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده، کاهش می‌یابد. با این حال، این کاهش مقاومت فشاری در مخلوط اسکوریا-۲۵٪ چندان قابل توجه نیست و به ترتیب در حدود ۴٪، ۲٪ و ۲/۵٪ در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰ روزگی نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.
- در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، با افزایش مقدار بکارگیری ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در طرح اختلاط بتن فوق توانمند، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. میزان کاهش مقاومت خمشی نمونه اسکوریا-۲۵٪ نسبت به



شکل ۱۵: چینه‌ش آزمایش سرعت پالسی



شکل ۱۶: سرعت پالسی بتن فوق توانمند حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده

#### ۳-۷- درصد بهینه بکارگیری ماسه اسکوریا

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، تعیین درصد بهینه بکارگیری ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده به‌عنوان عامل عمل‌آوری داخلی در بتن فوق توانمند می‌باشد. به‌طوری‌که بتوان کاهش جمع‌شدگی خودزا را با کمترین افت ممکن در خواص مقاومتی و انتقالی همراه ساخت. با استناد به داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، مشاهده گردید که افزایش درصد بکارگیری ماسه اسکوریا، هرچند منجر به کاهش قابل‌توجه جمع‌شدگی خودزا می‌شود، اما می‌تواند موجب افزایش جذب آب و کاهش مقاومت فشاری و خمشی گردد. بنابراین، یافتن میزان بهینه ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده با حفظ عملکرد بتن فوق توانمند اهمیت بسزایی دارد. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده

ASTM C 642 97, (1997), "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", <https://doi.org/10.1520/C0642-97>.

ASTM C 597 02, (2002), "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete", <https://doi.org/10.1520/C0597-02>.

ASTM C 1585 04, (2004), "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes", <https://doi.org/10.1520/C1585-04>.

ASTM C49000a, (2000), "Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete", <https://doi.org/10.1520/C049000A>.

Anshuang S, et al, "Effects of shrinkage reducing agent and expansive admixture on the volume deformation of ultrahigh performance concrete", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/9187394>

Bentz D.P, and O.M. Jensen, "Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking", *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(6): p. 677-685, [https://doi.org/10.1016/S09589465\(03\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S09589465(03)00049-6).

Eberhardt A.B, "On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in self con-solidating mortars and concretes", 2010.

Esmaeili J, and Kasaei J, "Effect of different curing regimes on shrinkage and strength properties of self-consolidating mortars containing silica fume in different contents", *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 357: p. 1271-1276. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1271>.

Esmaeili J and Kasaei J, "Effect of internal curing using light-weight scoria fine aggregates on autogenous shrinkage, strength and transport properties of cement mortars", *Journal of Concrete Research*, vol. 5, no. 2, pp. 101-110, 2013, [Online]. Available: <https://sid.ir/paper/197169/en>.

ESMAEILI J, Aghapour M and Kasaei J, "An Experimental Study on Internal Curing of Ultra High Performance Concrete Using Lightweight Scoria Sand", in *fib symposium*, 2024.

Ferrosilice Co, Iran, Products, Available at: <https://www.iranferrosilice.com>.

Holt, E, "Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and concrete research*", 2005. 35(3): p. 464-472. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.004>.

نمونه شاهد تنها ۳٪ و ۶٪ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می باشد.

- سرعت پالسی مخلوط‌های بتن فوق توانمند که حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا هستند، در سنین مختلف ۲۸، ۹۰ و روزگی با افزایش جایگزینی ماسه طبیعی رودخانه‌ای توسط ماسه اسکوریا کاهش می‌یابد.
- خصوصیات انتقالی نمونه‌های بتن فوق توانمند (درصد جذب کاپیلاره، درصد جذب آب) که حاوی مقادیر مختلف ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده هستند، در سنین مختلف با افزایش جایگزینی ماسه اسکوریا با ماسه طبیعی رودخانه‌ای افزایش می‌یابند.
- استفاده از ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده به‌عنوان یک عامل عمل‌آوری داخلی در بتن فوق توانمند می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی منجر به کنترل جمع‌شدگی خودزا گردد. به نظر می‌رسد به‌کارگیری ماسه اسکوریا از پیش اشباع شده در مقادیر بهینه می‌تواند هم‌زمان با حفظ خصوصیات مقاومتی و انتقالی منجر به کاهش جمع‌شدگی خودزا در بتن فوق توانمند گردد.

#### - مراجع

ACI 239R-18, "Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report", American Concrete Institute, 2018.

Aghapour M, Esmaeili J and Kasaei J, "Transport Properties and shrinkage of UHPC Containing Presoaked Scoria Sand", Second international congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran, 2025.

Aitcin, P, "The durability characteristics of high performance concrete: a review", *Cement and concrete composites*, 2003, 25(4-5): p. 409-420, [https://doi.org/10.1016/S09589465\(02\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S09589465(02)00081-1).

Astm, A, "Standard specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete", American Society for Testing and Materials (ASTM) Committee, 2006, <https://doi.org/10.1520/C0348-08>.

ASTM C348-08, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars", <https://doi.org/10.1520/C0348-08>.

ASTM C116-90, "Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure (Withdrawn 1999)", <https://doi.org/10.1520/C0116-90>.

- Paillere A.M, Buil M and Serrano J, "Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume", *Materials journal*, 1989. 86(2): p. 139-144.
- Rajabipour F, Sant G and Weiss J, "Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution", *Cement and Concrete Research*, 2008. 38(5): p. 606-615. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.004>.
- Resplendino J, "State of the art of design and construction of UHPFRC structures in France", in *Proceedings of Hipermat-3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*, 2012. ISBN: 978-3-86219-264-9.
- Rößler C, D.-D. Bui and H.-M. Ludwig, "Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2014. 53: p. 270278. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcom.2014.07.015>.
- Saman Gharb Cement Company, Products, Available at: <https://gharbcement.com>.
- Schmidt M, "Sustainable building with ultra-high performance concrete (UHPC)—Coordinated research program in Germany. in *Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*", Schmidt Ed, et al, Kassel University Press, Kassel, Germany. 2012. ISBN:978-3-86219-264-9.
- Suzuki, M, et al, "Long-term shrinkage and stress in ultra high strength concrete using porous ceramic waste for internal curing", in *Proceedings of the international RILEM conference on use of superabsorbent polymers and other new additives in concrete*, Jensen OM, Hasholt MT, Laustsen S, editors, Lyngby, Denmark. 2010.
- Tazawa E.-i and Miyazawa S, "Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste", *Cement and concrete research*, 1995. 25(2): p. 281-287. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00011-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00011-9).
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), "UHPC program publications, Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community"; Publication No. FHWA-HRT-13-060; JUNE 2013.
- Wang X, et al, "Optimized treatment of recycled construction and demolition waste in developing sustainable ultra-high performance concrete", *Journal of Cleaner Production*, 2019. 221: p. 805-815.
- Ismael A.N, "Internal curing of high strength concrete by using cold bonded aggregates", 2014, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Jensen O.M, and P.F. Hansen, "Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background", *Cement and concrete research*, 2001. 31(4): p. 647-654. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00463-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00463-X).
- Jensen M and P.F. Hansen, "Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste. *Materials Journal*", 1996. 93(6): p. 539-543.
- Jensen O.M and P.F. Hansen, "Water-entrained cement-based materials: II" Experimental observations. *Cement and concrete research*, 2002. 32(6): p. 973978. [https://doi.org/10.1016/S00088846\(02\)00728-3](https://doi.org/10.1016/S00088846(02)00728-3).
- Kim H. K, and Choi Y. C, (2012), "Utilization of volcanic pumice and scoria aggregates for improving the mechanical and durability properties of lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 30, 957964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.104>.
- Liu J, et al, "The effect of SCMs and SAP on the autogenous shrinkage and hydration process of RPC", *Construction and Building Materials*, 2017. 155:p.239249. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.051>.
- Liu K, et al, "Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on appropriate application of porous pumice. *Construction and Building Materials*", 2019. 214: p. 369-381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.118>.
- Liu K, et al, "Effects of pumice-based porous material on hydration characteristics and persistent shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC)", *Materials*, 2018.12(1):p.11. <https://doi.org/10.3390/ma1201011>.
- Lynam C.G, "Growth and movement in Portland cement concrete", (No Title), 1934.
- Meng W and K Khayat, "Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*", 2017. 101: p. 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>.

816.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.267>.

Wu Z, Shi C and Khayat K.H, "Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape", Composites Part B: Engineering, 2019. 174: p. 107021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>.

