

## امکان‌سنجی استفاده از ژئولیت در رویه بتنی خودتراکم

علی ذوالقدری، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه زنجان

بابک احمدی، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی، بخش فناوری بتن

حسن طاهرخانی، دانشیار راه و ترابری، دانشگاه زنجان

Email: [b.ahmadi@bhrc.ac.ir](mailto:b.ahmadi@bhrc.ac.ir)

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶

### چکیده

با توجه به نوپا بودن صنعت تولید بتن خودتراکم (SCC) در ایران و نیز رو به رشد بودن استفاده از این نوع بتن در رویه‌ی راه‌ها، جاده‌ها و فرودگاه‌های کشور، نیاز به طراحی بتن‌ها با رویکرد اقتصادی و توسعه پایدار وجود دارد. بتن خودتراکم یکی از محصولات نوآورانه در صنعت بتن است که طی سالیان زیادی توسعه یافته است؛ اگرچه بسیاری از محققان همچنان در حال بهینه‌سازی نسبت‌های مخلوط این بتن و استفاده از مصالح جدید برای بررسی آن هستند. مقادیر زیاد استفاده از سیمان پرتلند در تولید این بتن یکی از چالش‌های اصلی پیش رو در طرح مخلوط است. این استفاده زیاد از مقادیر سیمان باعث افزایش هزینه‌ی تولید این بتن می‌شود. همچنین، مقادیر زیادی از دی‌اکسید کربن در هنگام تولید سیمان پرتلند آزاد می‌شود که خطرات زیست-محیطی فراوانی را به دنبال دارد. در این تحقیق، به منظور کاهش مقدار سیمان مورد استفاده در طرح مخلوط، از ماسه طبیعی با ریزدانه زیاد و ژئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند استفاده شده است. مقادیر مختلف ژئولیت (صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) در دو نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۴۲ و ۰/۴۶) جایگزین سیمان شد. برای بررسی ویژگی‌های بتن تازه، از آزمایش‌های جریان اسلامپ، جریان اسلامپ در حلقه J، T50، جعبه L و قیف V استفاده شده است. مشخصات مکانیکی بتن تازه نیز در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی (به روش بارگذاری چهارنقطه‌ای) و همچنین مقاومت سایشی به روش دیسک‌های چرخان طبق استاندارد ASTM C779-A مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های بتن تازه نشان می‌دهد که جایگزینی ژئولیت باعث بهبود پایداری استاتیک مخلوط و جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها می‌شود؛ اما باعث افزایش مقدار استفاده از فوق‌روان‌کننده مورد نیاز نیز می‌گردد. جایگزینی ژئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی طرح‌ها در سن ۷ روزه می‌گردد؛ اما در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه باعث بهبود نتایج می‌شود. همچنین، مشاهده می‌گردد که جایگزینی ژئولیت در مقادیر آب به مواد سیمانی کمتر نتایج بهتری را در مقاومت سایشی، خمشی و فشاری بتن رقم زده است.

واژه‌های کلیدی: رویه بتنی خودتراکم، ژئولیت، کارایی بتن

## ۱. مقدمه

رویه‌های بتنی از نوع رویه‌های صلب هستند که در راه‌ها، فرودگاه‌ها، خیابان‌ها، پارکینگ‌ها، پل‌ها و دیگر زیرساخت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (بیرواگن و ابوهواش، ۲۰۰۵؛ زیاری و همکاران، ۲۰۱۴؛ حسامی و همکاران، ۲۰۱۶). اگر طراحی و اجرای این رویه‌ها به درستی انجام گیرد، می‌تواند دهه‌ها پس از ساخت، بدون تعمیر اساسی، مورد بهره‌برداری قرار گیرند. رویه‌های بتنی، هزینه‌ی اولیه ساخت بیشتری نسبت به رویه‌های آسفالتی دارند. اما عمر بیشتر و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری آنها کمتر است (بیرواگن و ابوهواش، ۲۰۰۵). بتن خودتراکم بتنی با کارایی بالاست که می‌تواند در فضاهای محدود جریان یابد و بدون جداسدگی یا آب‌انداختگی تحت وزن خودتراکم یابد. این ویژگی‌های بتن خودتراکم در کاهش مدت زمان ساخت و ساز، کاهش هزینه‌ی کارگر و تجهیزات، سطح تمام شده‌ی با کیفیت و کاهش سر و صدای ناشی از ویبراتورها مؤثر است (دُشارتر و همکاران، ۲۰۰۸). استفاده از این نوع بتن در در دنیا به دلیل فواید ذکر شده در ساخت تونل‌ها، پل‌ها، دیگر سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (رمضان و حداد، ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر، گرایش در استفاده از این نوع بتن، خصوصاً در ساخت جاده‌های شهری و بین شهری، خطوط ترافیکی و فرودگاه‌ها افزایش یافته است (اوپچی و همکاران، ۲۰۰۳؛ وانگ، ۲۰۰۳؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ زیاری و همکاران، ۲۰۱۴؛ بوساری و همکاران، ۲۰۱۷؛ رمضان و حداد، ۲۰۱۷؛ بوساری و همکاران، ۲۰۱۸). در بیشتر مطالعات، برای کسب کارایی بتن خودتراکم از مقادیر زیاد حجم خمیر استفاده می‌شود که می‌تواند باعث استفاده‌ی بیشتر از مواد سیمانی شود (زیاری و همکاران، ۲۰۱۴). این موضوع می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی بتن و یا ترک-خوردگی ناشی از گرادپان حرارتی شود. علاوه بر این، از دیدگاه محیط زیستی، کاهش مقدار سیمان پرتلند، به دلیل آلودگی بالای ناشی از تولید آن، بسیار قابل اهمیت است

(حسامی و همکاران، ۲۰۱۶). این در حالیست که کاهش مقدار مواد سیمانی در بتن خودتراکم می‌تواند خطر جداسدگی سنگدانه‌ها یا آب‌انداختگی در مخلوط را افزایش دهد که بر مقاومت سایشی بتن نیز تأثیرگذار است.

مقاومت سایشی بتن به توانایی سطح برای مقاومت در برابر مالش و اصطکاک گفته می‌شود. سایش روسازی و کف می‌تواند به دلیل عبور و مرور وسایل نقلیه، انسان و یا در محیط‌های صنعتی، به علت جابجایی اشیا ایجاد شود. باد و ذرات موجود در آب نیز می‌توانند باعث سایش سطوح بتنی شوند (گوداسپید و همکاران، ۱۹۹۶؛ ACI، ۲۰۰۵). طبق گزارش ACI (۲۰۰۵)، عواملی که روی مقاومت سایشی بتن تأثیر گذار هستند را می‌توان به مواردی همچون مقدار و کیفیت خمیر سیمان، مقاومت فشاری بتن، سختی سنگدانه درشت، کیفیت سطح تمام شده، شرایط عمل‌آوری و همچنین وجود یا عدم وجود ترک در سازه دسته‌بندی کرد. محققان، اثر نانوذرات (لی و همکاران، ۲۰۰۶)، بافت سطحی بتن (سیلوا و همکاران، ۲۰۱۹)، ماسه شکسته (لی و همکاران، ۲۰۱۱)، مقدار و نوع سیمان (غفوری و همکارا، ۲۰۱۳)، پوزولان‌های میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی (رشاد و همکاران، ۲۰۱۴؛ سیلوا و همکاران، ۲۰۱۹)، الیاف فلزی و پلیمری (ارن و همکاران، ۱۹۹۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۷) و خزش و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن (توکر، ۲۰۱۲) را در سایش بتن مورد بررسی قرار داده‌اند. اما تحقیقات کمی در خصوص سایش بتن خودتراکم انجام شده است. در برخی از طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم از افزودنی‌های اصلاح‌کننده‌ی لزجت استفاده می‌شود تا خطر جداسدگی سنگدانه‌ها در مخلوط کاهش یابد. راه دیگر برای تأمین پایداری مخلوط، استفاده از مواد جایگزین سیمان، مثل زئولیت طبیعی است؛ که می‌تواند باعث افزایش لزجت مخلوط گردد (فنگ و همکاران، ۱۹۹۰؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۰).

این مقاله به منظور بررسی امکان تولید روبه بتنی خودتراکم با حداقل مقدار مواد سیمانی و کمک به توسعه پایدار، در عین دستیابی به مقاومت مکانیکی و سایشی مطلوب، تدوین شده است. برای این منظور، از زئولیت به عنوان پوزولان جایگزین سیمان در مقادیر وزنی مختلف، و از ماسه طبیعی نیز برای افزایش ریزدانه مخلوط و کمک به دستیابی ویژگی‌های بتن خودتراکم استفاده شده است.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱. مصالح مصرفی

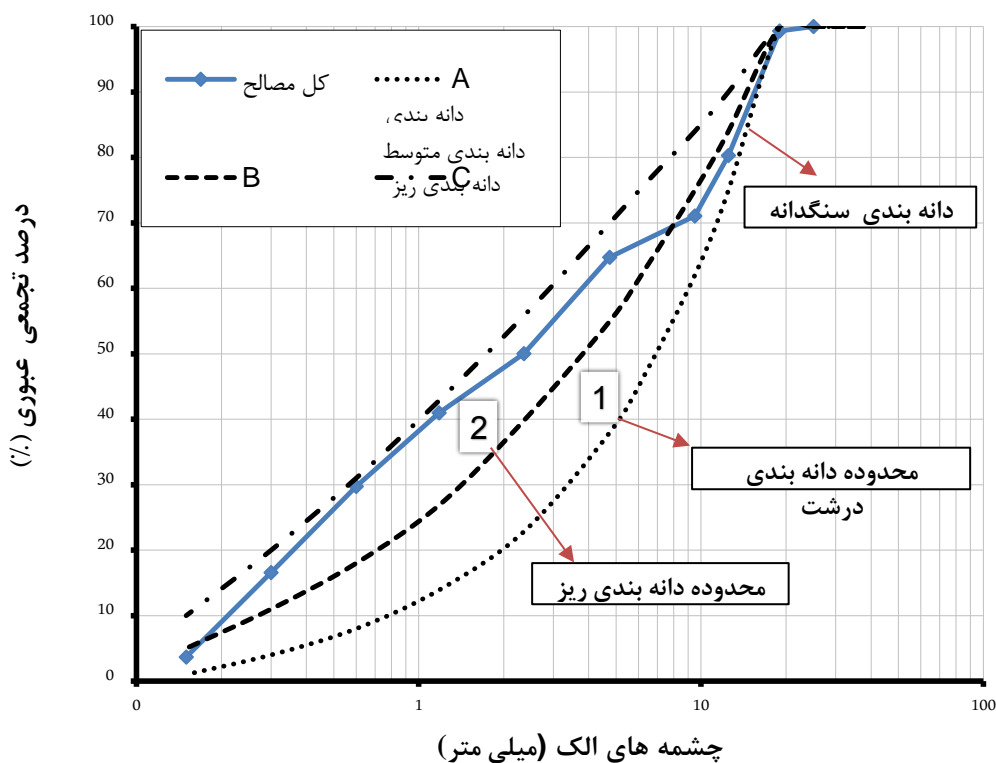
#### ۲-۱-۱. سنگدانه‌ها

سنگدانه‌ی استفاده شده در این مطالعه شامل ماسه رودخانه‌ای و شن شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. مشخصات مصالح ذکر شده در جدول ۱ قابل مشاهده است. آزمایش چگالی و جذب آب شن و ماسه به ترتیب مطابق استاندارد ملی ایران به شماره‌های ۴۹۸۲ و ۴۹۸۰ (استاندارد ملی ایران، ۱۳۹۶) انجام گرفته است. دانه‌بندی شن و ماسه مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۴۹۷۷ (استاندارد ملی ایران، ۱۳۹۳) انجام گرفته است. منحنی دانه‌بندی سنگدانه مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده است. کران بالا و پایین نمودار از آیین‌نامه‌ی ملی طرح مخلوط ایران (شکرچی‌زاده، ۲۰۰۸) انتخاب شده است.

زئولیت‌ها جامدات بلورین با منافذ ریز هستند. پیوند مولکول‌های آب در شبکه این کانی‌ها ضعیف است و بر اثر دما، بدون آن که ساختمان شبکه فرو بریزد، آب خود را از دست می‌دهند و این عمل به صورت بازگشت-پذیر انجام می‌شود. زئولیت‌ها به صورت شبکه کریستالی شامل اکسیژن و آلومینیوم یا سیلیس هستند که به صورت ساختمانی سه‌بعدی درآمده‌اند (بولس و مامتون، ۱۹۷۷؛ کولیا، ۲۰۰۵). عملکرد پوزولان زئولیت توسط محققان مختلفی در سطح دنیا مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل واکنش پوزولانی زیاد این ماده (احمدی و همکاران، ۲۰۱۰؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۴)، استفاده از آن در سیمان و بتن باعث افزایش مقاومت مکانیکی سیمان و بتن، افزایش مقاومت در محیط‌های اسیدی، به خصوص سولفوریک اسید (صمیمی و همکاران، ۲۰۱۸)، افزایش مقاومت الکتریکی و همچنین کاهش نفوذ یون کلرید در بتن در جایگزینی زئولیت به جای سیمان شده است (نجیمی و همکاران، ۲۰۱۲؛ دوستی و همکاران، ۲۰۱۳؛ صمیمی و همکاران، ۲۰۱۸). در بتن خودتراکم، به منظور بهبود طرح مخلوط و افزایش کارایی بتن نیز مورد استفاده قرار گرفته است (رمضانیان‌پور و همکاران، ۲۰۱۲؛ رنجبر و همکاران، ۲۰۱۳؛ حج فروش و همکاران، ۲۰۱۹). اما مقاومت سایشی که از عوامل تأثیرگذار در دوام روبه‌های بتنی است در بتن‌های حاوی زئولیت تا کنون منتشر نشده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی

| نوع مصالح سنگی | چگالی اشباع با سطح خشک ( $\text{kg/m}^3$ ) | جذب آب (%) | مدول نرمی (%) | ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون (%) |
|----------------|--|------------|---------------|------------------------------|
| ماسه           | ۲۵۳۰                                       | ۲/۹        | ۲/۹           | ۳/۰                          |
| شن بادامی      | ۲۵۶۰                                       | ۲/۳        | -             | ۰/۵                          |



شکل ۱. دانه بندی سنگدانه طبق روش ملی مخلوط

## ۲-۱-۲. مواد سیمانی

مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده همراه با تحلیل ترموگراویمتری<sup>۱</sup> و تحلیل BET<sup>۲</sup> در جدول ۲ ارائه شده است.

سیمان مصرفی سیمان پرتلند نوع ۱-۴۲۵ می باشد. زئولیت طبیعی (نوع کلینوپتیلولایت) در این پژوهش از معادن شمال سمنان مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی

| ترکیب شیمیایی                  | سیمان (درصد) | زئولیت طبیعی (درصد) |
|--------------------------------|--------------|---------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | ۲۰/۹۲        | ۶۷/۷۹               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۴/۹۲         | ۱۳/۶۶               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۳/۸۰         | ۱/۴۴                |
| CaO                            | ۶۴/۲۳        | ۱/۶۸                |
| MgO                            | ۱/۹۰         | ۱/۲۰                |
| SO <sub>3</sub>                | ۲/۱۶         | ۰/۵۰                |
| Na <sub>2</sub> O              | ۰/۴۹         | ۲/۰۴                |

<sup>۱</sup>- Thermo-gravimetric analysis

<sup>۲</sup>- Brunauer, Emmett and Teller analysis

|          |          |   |
|----------|----------|---|
| ۱/۴۲     | ۰/۸۰     | K <sub>2</sub> O  |
| ۱۰/۲۳    | ۰/۷۵     | L.O.I   |
| -        | ۵۷/۸۰    | C <sub>3</sub> S  |
| -        | ۱۶/۳۷    | C <sub>2</sub> S  |
| -        | ۶/۶۱     | C <sub>3</sub> A  |
| -        | ۱۱/۵۶    | C <sub>4</sub> AF   |
| ۲۱۹۰     | ۳۱۵۰     | چگالی (kg/m <sup>3</sup> )                                  |
| ۴۰۰      | ۳۲۸      | سطح مخصوص بلین (m <sup>2</sup> /kg)                         |
| ۲۰۹۵۴    | ۱۲۱۳     | سطح مخصوص BET (m <sup>2</sup> /kg) <sup>a</sup>             |
| ۰/۱۱۳۰۰۰ | ۰/۰۰۶۴۰۳ | حجم تخلخل کل <sup>۱</sup> (cm <sup>3</sup> /g) <sup>a</sup> |
| ۵۶/۸۹    | -        | واکنش پوزولانی <sup>۲</sup> (%) <sup>b</sup>                |

(a) نتیجه‌ی تحلیل BET و (b) نتیجه‌ی تحلیل ترموگراویمتری

### ۳-۱-۲. فوق‌روان‌کننده

فوق‌روان‌کننده مصرفی بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اتر، با ۴۰٪ مواد جامد و چگالی ۱۰۶۰ کیلوگرم در متر مکعب است.

### ۳-۲. نسبت‌های مخلوط و روش ساخت نمونه‌ها

تعدادی طرح مخلوط آزمایشی با نسبت آب به مواد سیمانی و مقادیر مواد سیمانی مختلف ساخته شد تا امکان ساخت بتن خودتراکم با حداقل مقدار مواد سیمانی و حداقل نسبت آب به مواد سیمانی بررسی شود. لذا، با مصالح موجود، حداقل نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲، مقدار مواد سیمانی ۴۲۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و نیز حداکثر مقدار جایگزینی ۱۵٪ زئولیت در طرح‌های مخلوط آزمایشی امکان‌پذیر شد. در نتیجه، با توجه به مطالعات پیشین صورت گرفته توسط محققان (بولس و مامتون، ۱۹۷۷؛ پون و همکاران، ۱۹۹۹؛ کولیا و مامتون، ۲۰۰۰؛ کولیا، ۲۰۰۵؛ ازل و همکاران، ۲۰۱۰؛ کاراکورت و همکاران، ۲۰۱۰؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۰؛

کاراکورت و همکاران، ۲۰۱۱؛ کیلینکارسلا، ۲۰۱۱؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ رمضانپور و همکاران، ۲۰۱۲؛ رنجبر و همکاران، ۲۰۱۳؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۴؛ ادکونل و همکاران، ۲۰۱۵؛ و جملکووا و همکاران، ۲۰۱۵؛ ناگروکین و همکاران، ۲۰۱۶؛ صمیمی و همکاران، ۲۰۱۸؛ حج فروش و همکاران، ۲۰۱۹) به منظور تأثیر مقدار زئولیت بر ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده، زئولیت در سه مقدار (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به صورت وزنی) در دو نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۴۲ و ۰/۴۶) جایگزین سیمان شد. مقدار مواد سیمانی در تمامی طرح‌های مخلوط ۴۲۰ کیلوگرم در متر مکعب ثابت نگه داشته شد. نسبت‌های مخلوط در جدول ۳ نشان داده شده است. نسبت ترکیب شن و ماسه پس از ساخت مخلوط‌های آزمایشی در مقدار بهینه‌ی ۷۰٪ سهم ماسه و ۳۰٪ سهم شن بادامی در نظر گرفته شده است. طرح مخلوط ملی ایران، سه منحنی دانه‌بندی سنگدانه A، B و C را معرفی کرده است که به ترتیب معرف دانه‌بندی درشت، متوسط و ریز می‌باشد. همانطور که در نمودار شکل ۱ نشان داده

<sup>۱</sup>- Total pore volume

<sup>۲</sup>- Pozzolanic activity

زئولیت در یک سطل با هم مخلوط شدند. سپس، مقادیر شن و ماسه برای مدت زمان یک دقیقه به صورت خشک داخل میکسر مخلوط شدند. سپس، مواد سیمانی به همراه دو سوم مقدار آب داخل میکسر ریخته شده و برای مدت زمان دو دقیقه مخلوط گشتند. در پایان، فوق‌روان‌کننده‌ی مصرفی به همراه آب باقیمانده داخل میکسر ریخته شده و به مدت سه دقیقه اختلاط انجام گرفت. فوق‌روان‌کننده به مقداری به بتن اضافه شد تا جریان اسلامپ هدف حاصل شود. سپس، آزمایش‌های بتن خودتراکم انجام - شد.

شده است، با اتخاذ نسبت ۷۰٪ ماسه و ۳۰٪ شن، نمودار دانه‌بندی مخلوط در محدوده‌ی ریزنمودار که برای ساخت بتن خودتراکم مطلوب است، واقع شده است. اتخاذ ترکیب دانه‌بندی مناسب سنگدانه، مدول نرمی مناسب و طبیعی بودن ماسه مذکور باعث کاهش اصطکاک داخلی مخلوط و ساخت بتن خودتراکم بدون اضافه کردن موادپودری برای روانی بهتر شد.

کلیه مخلوط‌ها با استفاده از یک درام میکسر با ظرفیت ۱۱۰ لیتر ساخته شد. توالی یکسانی برای ساخت مخلوط‌ها رعایت شد. قبل از شروع اختلاط، سیمان و

جدول ۳. نسبت‌های مخلوط طرح‌ها به صورت وزنی در یک متر مکعب

| نام طرح     | سیمان<br>(کیلوگرم) | زئولیت<br>(کیلوگرم) | شن<br>(کیلوگرم) | ماسه<br>(کیلوگرم) | آب<br>(کیلوگرم) | درصد<br>هوای بتن | فوق‌روان‌کننده<br>(درصد وزنی<br>مواد سیمانی) |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|--|
| TZP0-0.42   | ۴۲۰                | ۰                   | ۵۱۶             | ۱۱۸۵              | ۱۷۷             | ۲/۱              | ۰/۸  |
| TZP5-0.42   | ۳۹۹                | ۲۱                  | ۵۱۰             | ۱۱۷۱              | ۱۷۷             | ۱/۸              | ۰/۹۶   |
| TZP10-0.42  | ۳۷۸                | ۴۲                  | ۵۰۷             | ۱۱۶۵              | ۱۷۷             | ۲/۰              | ۱/۱  |
| TZP15-0.42* | ۳۵۷                | ۶۳                  | ۵۰۴             | ۱۱۵۷              | ۱۷۷             | ۲/۵              | ۱/۳۷   |
| TZP0-0.46   | ۴۲۰                | ۰                   | ۵۰۰             | ۱۱۴۷              | ۱۹۳             | ۲/۰              | ۰/۷۵   |
| TZP5-0.46   | ۳۹۹                | ۲۱                  | ۴۹۷             | ۱۱۴۱              | ۱۹۳             | ۲/۲              | ۰/۸۱   |
| TZP10-0.46  | ۳۷۸                | ۴۲                  | ۴۹۵             | ۱۱۳۶              | ۱۹۳             | ۲/۴              | ۰/۸۹   |
| TZP15-0.46  | ۳۵۷                | ۶۳                  | ۴۹۲             | ۱۱۳۰              | ۱۹۳             | ۲/۶              | ۱  |

\* در طرح TZP15-0.42 عدد ۱۵ نشان‌دهنده‌ی جایگزینی زئولیت به جای سیمان به مقدار ۱۵٪ است و عدد ۰/۴۲ نشان‌دهنده‌ی نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲ در نسبت‌های مخلوط می‌باشد.

جعبه L (قابلیت عبور و پرکنندگی)، و شاخص پایداری چشمی (پایداری استاتیک)، روی تمامی طرح مخلوط‌ها انجام گرفت.

طبق استاندارد ASTM C1611 (۲۰۱۸)، آزمایش جریان اسلامپ شامل پرکردن یک مخروط اسلامپ از بتن، بدون وارد کردن ضربه یا تراکم، سپس بلند کردن این مخروط به صورت عمودی و در نهایت اندازه‌گیری

## ۲-۳. آزمایش‌های انجام شده روی بتن تازه

### ۲-۳-۱. آزمایش‌های کارایی بتن

کارایی بتن خودتراکم تحت عناوین قابلیت پرکنندگی<sup>۱</sup>، قابلیت عبور<sup>۲</sup> و قابلیت پایداری<sup>۳</sup> تعریف می‌شود. به منظور ارزیابی این مشخصات، آزمایش جریان اسلامپ، قیف V و T50 (قابلیت پرکنندگی)، آزمایش جریان اسلامپ در حلقه J و حلقه J (قابلیت عبور)، آزمایش

<sup>۱</sup>- Filling ability

<sup>۲</sup>- Passing ability

<sup>۳</sup>- Stability

۳ امتیازبندی می‌گردد که عدد صفر بهترین وضعیت پایداری بتن را دارد. شکل ۲ تصاویر برخی از آزمایش‌های کارایی انجام گرفته را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصاویر A، B و C به ترتیب آزمایش جریان اسلامپ، جریان اسلامپ در حلقه J و آزمایش جعبه L

۲-۳-۲. آزمایش تعیین هوای بتن تازه  
درصد هوای بتن تازه مطابق استاندارد ASTM C231 (۲۰۱۷)، با دستگاه تیپ B (شکل ۳) اندازه‌گیری شد و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. دستگاه اندازه‌گیری هوای بتن (تیپ B)

۲-۴. آزمایش‌های انجام شده روی بتن سخت شده  
به منظور ارزیابی مشخصات بتن سخت شده، آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی بتن به روش بارگذاری

دو قطر بازشدگی بتن به صورت عمود بر هم است. آزمایش T50 نیز زمان رسیدن جریان بتن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر حین آزمایش جریان اسلامپ است. طبق استاندارد EN12350-9 (۲۰۱۰)، آزمایش قیف V با استفاده از یک قیف ایستاده انجام می‌گیرد. حدود ۱۲ لیتر بتن بدون ضربه و تراکم داخل قیف ریخته می‌شود. پس از گذشت ۱۰ ثانیه از پر کردن بتن، دریاچه باز می‌شود و بتن از انتهای قیف خارج می‌گردد. مدت زمان خروج بتن از لحظه باز کردن دریاچه اندازه‌گیری می‌شود.

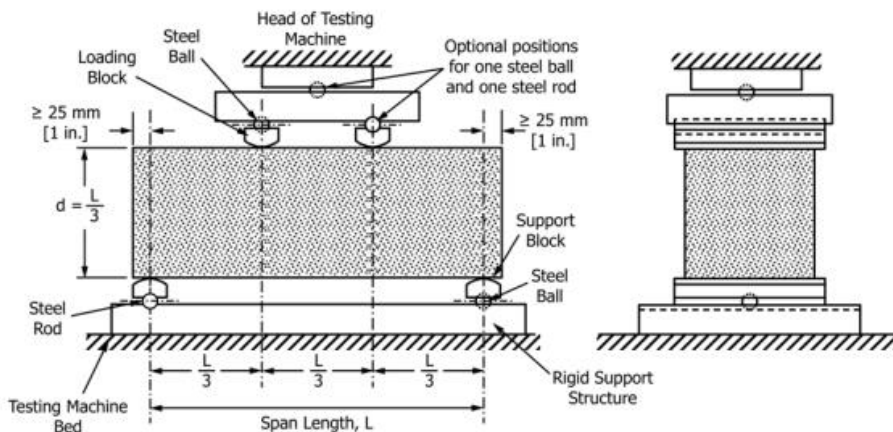
آزمایش جریان اسلامپ در حلقه J و حلقه L نیز مشابه جریان اسلامپ است. با این تفاوت که یک حلقه فلزی با میله‌هایی که به فواصل مساوی از هم قرار گرفته‌اند، مخروط اسلامپ را احاطه می‌کند. طبق استاندارد EN12350-12 (۲۰۰۹، ۱۲۳۵۰-۱۲)، پس از برداشتن مخروط اسلامپ، ارتفاع بتن خارج و داخل رینگ فلزی اندازه‌گیری می‌شود. اما طبق استاندارد ASTM C1621 (۲۰۱۴)، اختلاف جریان اسلامپ و جریان اسلامپ با حضور حلقه J، اندازه‌گیری می‌شود و تحت عنوان احتمال انسداد ارزیابی می‌گردد.

آزمایش جعبه L نیز که نشان‌دهنده همزمان قابلیت عبور و پرکنندگی مخلوط است. مطابق استاندارد EN12350-10 (۲۰۱۰، ۱۲۳۵۰-۱۰) انجام می‌گیرد. به این صورت که در هنگام بسته بودن دریاچه، ۱۴ لیتر بتن بدون لرزاندن و یا تراکم داخل دستگاه ریخته می‌شود و پس از یک دقیقه، دریاچه آن باز می‌شود. پس از توقف جریان، ارتفاع بتن در انتهای بخش افقی و ارتفاع در بخش عمودی اندازه‌گیری شده و نسبت انسداد از تقسیم این دو عدد به دست می‌آید.

شاخص پایداری چشمی که نشان‌دهنده پایداری استاتیک مخلوط است طبق استاندارد ASTM C1611 (۲۰۱۸) به صورت چشمی هنگام آزمایش جریان اسلامپ بدین شکل ارزیابی می‌شود: پس از توقف جریان بتن، با توجه به نحوه توزیع شن در مخلوط، آب‌انداختگی و نحوه بازشدگی قطری بتن، از بین اعداد صفر، ۱، ۲ و

است. برای ساخت آزمون‌های مقاومت خمشی، از قالب‌های فلزی با ابعاد  $10 \times 10 \times 50$  سانتی‌متر استفاده شد. برای هر طرح، ۶ آزمون منشوری ساخته شده است که ۲ آزمون در سن ۷ روز، ۲ آزمون در سن ۲۸ روز و ۲ آزمون در سن ۹۰ روز پس از عمل‌آوری در دمای  $23 \pm 2$  درجه سلسیوس در آب اشباع از آهک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار زئولیت در خمش مورد ارزیابی قرار گیرد. برای انجام آزمایش از یک جک هیدرولیکی با نرخ بارگذاری  $3/2$  نیوتن بر دقیقه استفاده شد. نحوه بارگذاری در شکل ۴ نشان داده شده است. مدول گسیختگی مطابق فرمول ۱ محاسبه شده، و با دقت  $0/01$  مگاپاسکال به صورت میانگین نتیجه‌ی دو آزمون گزارش شده است. پارامتر  $P$  نیروی شکست بر حسب نیوتن،  $L$  طول دهانه بارگذاری بر حسب میلی‌متر،  $b$  عرض نمونه بر حسب میلی‌متر و  $d$  نیز ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر است که در شکل ۴ نیز نمایش داده شده است.

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$



شکل ۴. نحوه بارگذاری آزمون‌ها در دستگاه مقاومت خمشی

وسط دهانه تیر و همچنین مقاومت سایشی به روش دیسک‌های چرخان انجام شد.

#### ۱-۴-۲. آزمایش مقاومت فشاری بتن

در این تحقیق، آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS-1881-PART116 (۱۹۸۳) انجام شده است. برای ساخت آزمون‌های مقاومت فشاری از قالب‌های پلاستیکی با ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر استفاده شده است. برای هر طرح، ۷ آزمون مکعبی ساخته شده که ۲ آزمون در سن ۷ روز، ۳ آزمون در سن ۲۸ روز و ۲ آزمون در سن ۹۰ روز پس از عمل‌آوری در دمای  $23 \pm 2$  درجه سلسیوس در آب اشباع از آهک، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار زئولیت مورد ارزیابی قرار گیرد. برای انجام آزمایش از یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۲۰۰ تن و با نرخ بارگذاری  $0/4$  مگاپاسکال بر ثانیه استفاده شد.

#### ۲-۴-۲. آزمایش مقاومت خمشی بتن

آزمایش مقاومت خمشی به صورت بارگذاری یک سوم دهانه مطابق استاندارد ASTM C78 (۲۰۱۶) انجام شده

آزمایش مقاومت سایشی به روش دیسک‌های چرخان<sup>۱</sup> مطابق استاندارد ASTM C779-A (۲۰۱۲) انجام شده

#### ۳-۴-۲. آزمایش مقاومت سایشی بتن

<sup>۱</sup>- Revolving discs



بر دقیقه روی سطح بتن ریخته می‌شود. پس از مدت زمان ۵ دقیقه از شروع سایش، با استفاده از میکرومتر، ۲۰ نقطه از عمق سطح آزمون با دقت ۰/۰۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری و به عنوان عمق سایش اولیه در نظر گرفته می‌شود. پس از مدت زمان ۶۰ دقیقه از زمان سایش اولیه، عمق سایش همان ۲۰ نقطه اندازه‌گیری شده و میانگینی از آنها به دست می‌آید. میانگین عمق سایش با دقت ۰/۰۲۵ میلی‌متر گزارش می‌گردد. برای افزایش دقت آزمون، روی دو سطح در سن مورد نظر آزمایش صورت گرفته و میانگینی از اعداد قرائت شده، گزارش شده است. شکل ۵، نحوه انجام آزمایش مقاومت سایشی را نشان می‌دهد.

است. برای ساخت آزمون‌های مقاومت سایشی از قالب- های فلزی با ابعاد ۳۰×۳۰×۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای هر طرح ۴ آزمون ساخته شده است که ۲ آزمون در سن ۲۸ روز و ۲ آزمون در سن ۹۰ روز پس از عمل‌آوری در دمای  $23 \pm 2$  درجه سلسیوس در آب اشباع از آهک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

این آزمایش توسط سه دیسک چرخان با قطر ۶۰ میلی‌متر که به صورت افقی بر آزمون‌های بتنی به ابعاد ۳۰×۳۰×۱۰ سانتی‌متر و با سرعت دورانی ۲۸۰ دور در دقیقه حول خود و در محیطی دایره‌ای با سرعت ۱۲ دور بر دقیقه می‌چرخند، انجام می‌شود. همزمان با چرخش دیسک‌ها روی نمونه بتنی، پودر سیلیکون کارباید<sup>۱</sup> با دانه- بندی ۲۵۰ میکرون، از فنجان<sup>۲</sup> در بالا، با نرخ ۴ تا ۶ گرم



شکل ۵. نحوه‌ی انجام و اندازه‌گیری مقاومت سایشی بتن طبق استاندارد ASTM C779- A

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. نتایج بتن تازه

<sup>۱</sup>- Silicon carbide

<sup>۲</sup>- Cup

نسبت آب به سیمان نیز بیشتر می‌شود. این پدیده را می‌توان به دلیل سطح مخصوص بیشتر زئولیت نسبت به سیمان، ساختار متخلخل و جذب آب بالای این ماده، توصیف کرد (دشتر و همکاران، ۲۰۰۸؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج حاصل از آنالیز BET در جدول ۲ برای سیمان و زئولیت آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حجم حفرات و سطح مخصوص زئولیت به ترتیب ۱۷/۶ و ۱۷/۳ برابر سیمان است که می‌تواند توجهی برای استفاده‌ی بیشتر از فوق‌روان‌کننده برای دستیابی به کارایی برابر و همزمان افزایش لزجت مخلوط با جایگزینی وزنی این ماده به جای سیمان باشد.

نتایج بتن تازه در مقایسه با توصیه اروپایی EFNARC (۲۰۰۲) در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین، ارزیابی احتمال انسداد طبق استاندارد ASTM C1621 (۲۰۱۴) در جدول ۵ نشان داده شده است.

طبق محدوده‌ی توصیه شده توسط EFNARC (۲۰۰۲)، جریان اسلامپ بین ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر و T500 بین ۲ تا ۵ ثانیه مورد قبول است. براساس آیین‌نامه‌ی ACI 237R (۲۰۰۷) در رابطه با بتن خودتراکم، حداقل جریان اسلامپ ۶۰۰ میلی‌متر برای رویه‌ها در نظر گرفته شده است؛ لذا با افزودن فوق‌روان‌کننده اسلامپ هدف  $20 \pm 650$  میلی‌متر در طرح‌ها حاصل شد. همانطور که در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است، با افزایش جایگزینی وزنی زئولیت به جای سیمان نیاز به افزودن فوق‌روان‌کننده در مخلوط افزایش می‌یابد. این افزایش، با کاهش

جدول ۴. نتایج بتن تازه

| مقادیر<br>مورد قبول | TZP15-<br>0.42 | TZP10-<br>0.42 | TZP5-<br>0.42 | TZP0-<br>0.42 | TZP15-<br>0.46 | TZP10-<br>0.46 | TZP5-<br>0.46 | TZP<br>0-<br>0.46 | آزمایش‌های بتن تازه  |
|---------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|-------------------|--|
| ۸۵۰-۶۵۰             | ۶۳۰            | ۶۶۰            | ۶۵۰           | ۶۵۰           | ۶۲۰            | ۶۳۰            | ۶۳۰           | ۶۳۰               | جریان اسلامپ<br>(میلی‌متر)                                   |
| ۲/۰-۵/۰             | ۶/۰            | ۳/۴            | ۲/۴           | ۱/۸           | ۵/۲            | ۱/۸            | ۱/۲           | ۰/۸               | T50 (ثانیه)  |
| -                   | ۷/۰            | ۵/۰            | ۲/۵           | ۲/۰           | ۶/۵            | ۳/۰            | ۳/۰           | ۲/۵               | قیف V (ثانیه)  |
| -                   | ۰              | ۰              | ۱             | ۱             | ۰              | ۰              | ۱             | ۲                 | شاخص پایداری چشمی  |
| ۱۰۰-۸۰              | ۸۵             | ۹۰             | ۸۰            | ۸۵            | ۸۰             | ۹۰             | ۶۰            | ۶۵                | قابلیت عبور<br>جعبه L (درصد)                                 |
| -                   | ۶۰             | ۶۱             | ۶۳            | ۶۲            | ۵۸             | ۵۷             | ۶۱            | ۵۸                | جریان در حلقه J (سانتی-<br>متر)                              |
| ۰-۱۰                | ۱۱             | ۵              | ۱۰            | ۱۰            | ۸              | ۱۲             | ۹             | ۱۲                | اختلاف ارتفاع در حلقه J<br>(میلی‌متر)                        |
| -                   | ۱/۳۷           | ۱/۱۰           | ۰/۹۶          | ۰/۸۰          | ۱/۰۰           | ۰/۸۹           | ۰/۸۱          | ۰/۷۵              | مقدار فوق‌روان‌کننده مورد<br>نیاز (درصد وزنی مواد<br>سیمانی) |

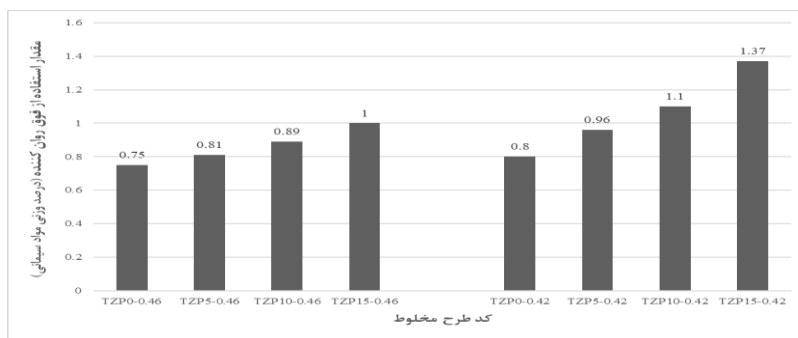
جدول ۵. ارزیابی احتمال انسداد

| نام طرح    | اختلاف نتیجه جریان اسلامپ از جریان اسلامپ در حلقه J، (سانتی‌متر) | احتمال انسداد طبق ASTM C1621 |
|------------|--|------------------------------|
| TZP0-0.46  | ۵  | کم تا قابل توجه              |
| TZP5-0.46  | ۲  | وجود ندارد                   |
| TZP10-0.46 | ۶  | قابل توجه تا زیاد            |
| TZP15-0.46 | ۴  | کم تا قابل توجه              |
| TZP0-0.42  | ۳  | کم تا قابل توجه              |
| TZP5-0.42  | ۲  | وجود ندارد                   |
| TZP10-0.42 | ۳  | کم تا قابل توجه              |
| TZP15-0.42 | ۵  | کم تا قابل توجه              |

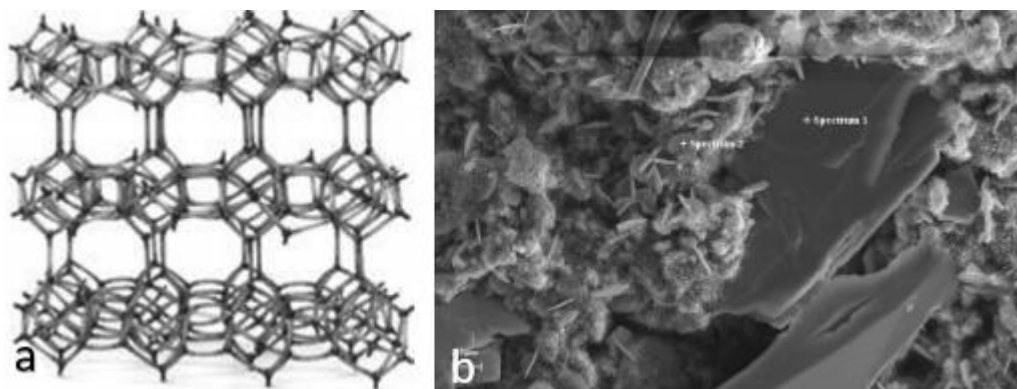
بیشتر مواد سیمانی، خطر جداسازی در مخلوط کاهش می‌یابد و پایداری مخلوط بیشتر می‌شود. رمضانیان پور و همکاران (۲۰۱۲) نیز نتایج مشابهی را در بهبود نتایج بتن تازه و بهبود روانی بتن خودتراکم با اضافه نمودن ژئولیت داشته‌اند. در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، علاوه بر جایگزینی ژئولیت، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی باعث افزایش لزجت مخلوط می‌شود و در نتیجه احتمال آب‌انداختگی و جداسازی نیز در مخلوط کاهش می‌یابد. به طور مثال، شکل ۸، تصویر آزمایش جریان اسلامپ دو طرح مخلوط TZP0-0.46 و TZP15-0.46 را نشان می‌دهد. همانطور که در تصویر مشخص است، طرح TZP0-0.46 به دلیل لزجت کم مخلوط و نداشتن ژئولیت دچار جداسازی سنگدانه و آب‌انداختگی شده است.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، عدد T500 که نشان‌دهنده سرعت جریان مخلوط و لزجت آن می‌باشد، افزایش می‌یابد. این افزایش با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی نیز بیشتر می‌شود. این پدیده را نیز می‌توان به دلیل سطح مخصوص زیاد و ساختار متخلخل ژئولیت توصیف کرد. ساختار متخلخل ژئولیت و بتن سخت شده‌ی حاوی ۲۰٪ ژئولیت در شکل ۷ نمایش داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، شاخص پایداری چشمی نیز بهبود یافته است. ژئولیت به دلیل وزن مخصوص کمتر نسبت به سیمان، حجم بیشتری را با جایگزینی وزنی به جای سیمان در مخلوط خواهد داشت. لذا، به دلیل حجم خمیر



شکل ۶. نمودار مقادیر استفاده از افزودنی فوق‌روان‌ساز برای دستیابی به اسلامپ هدف



شکل ۷. (a) ساختار متخلخل زئولیت (ملاعباسی و همکاران، ۲۰۱۷)، (b) تصویر SEM بتن سخت شده پس از ۷ روز عمل-آوری حاوی ۲۰٪ زئولیت (بیلماز و همکاران، ۲۰۰۷)



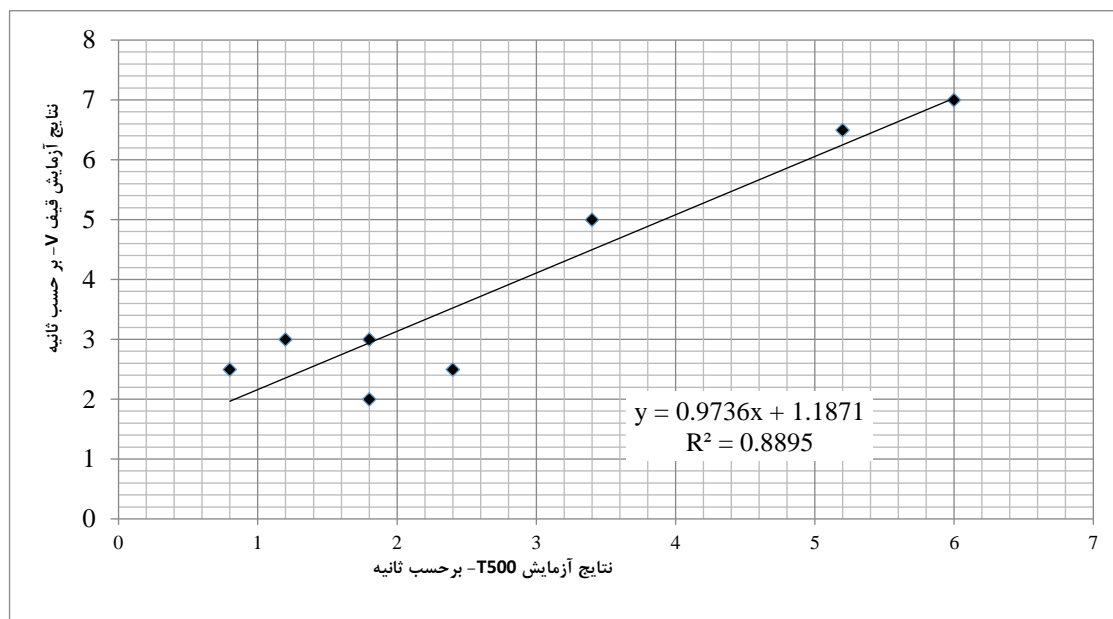
شکل ۸. تصویر آزمایش جریان اسلامپ دو طرح TZP15-0.46 و TZP0-0.46

<sup>۱</sup>- Scanning electron microscopy

EFNARC (۲۰۰۲)، نتایج حاصل از آزمایش را به دو رده‌ی VF1 و VF2 دسته‌بندی کرده است. اگر زمان تخلیه بتن از قیف V کمتر از ۸ ثانیه به طول بیانجامد رده‌ی VF1، و اگر بیش از ۸ ثانیه به طول بیانجامد در رده‌ی VF2 دسته‌بندی می‌شوند. طبق جدول ۴، کلیه طرح‌های مخلوط در رده‌ی VF1 دسته‌بندی می‌شوند. طبق توضیحات ارائه شده در این توصیه، بتن‌های قرار گرفته در این رده قابلیت پرکنندگی خوبی دارند؛ قادر به خود-ترازی<sup>۱</sup> هستند و پس از عمل پرداخت سطحی، سطح بسیار صافی دارند؛ اگرچه به علت لزجت کمتر، احتمال جداشدگی و آب‌انداختگی وجود دارد. طبق مشاهدات انجام شده و نتایج آزمایش‌های شاخص پایداری چشمی، جداشدگی و آب‌انداختگی در طرح‌های با جایگزینی زئولیت و آب به مواد سیمانی کمتر، دیده نشد. لذا، طرح-های مخلوط مذکور هم قابلیت پرکنندگی مطلوبی دارند و هم احتمال آب‌انداختگی و جداشدگی در آنها کم است. شکل ۹، ارتباط بین آزمایش قیف V و T500 را نشان می‌دهد که ارتباط معنی‌داری دارند.

طبق استاندارد ASTM C1621 (۲۰۱۴)، می‌توان احتمال انسداد را با تفریق نتیجه جریان اسلامپ از جریان اسلامپ در حلقه J، ارزیابی کرد. در جدول ۵، احتمال انسداد طبق این استاندارد ارزیابی شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، وضعیت بهتری در احتمال انسداد مشاهده می‌گردد. یکی از علل این اتفاق می‌تواند افزایش لزجت مخلوط به دلیل کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و در نتیجه همگنی بهتر مخلوط باشد. در این آزمایش، جایگزینی زئولیت نیز تأثیرگذار بوده است. اختلاف ارتفاع بتن داخل و خارج در آزمایش حلقه J با توجه به محدوده‌ی مورد قبول در جدول ۴، طرح‌های TZP0-0.46، TZP10-0.46 و TZP15-0.42 در محدوده‌ی مورد قبول واقع نشدند. دو طرح اول به ترتیب به دلیل فقدان لزجت و همگنی مناسب و طرح آخر نیز به دلیل لزجت زیاد مخلوط که حاصل جایگزینی بیشتر زئولیت به جای سیمان بوده است قابلیت عبور مناسبی در این آزمایش نداشتند.

آزمایش قیف V همانند آزمایش T500 نشان‌دهنده‌ی قابلیت پرکنندگی و لزجت مخلوط است. توصیه



شکل ۹. ارتباط بین نتایج آزمایش قیف V و T500

<sup>۱</sup> - Self-leveling

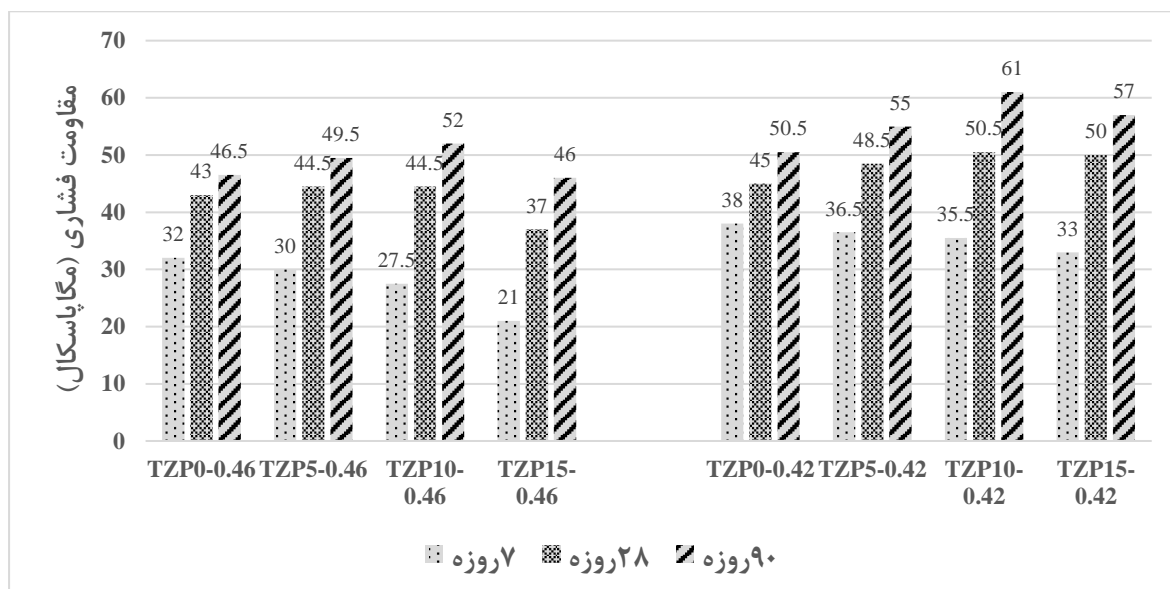
نسبت به طرح کنترل مشاهده می‌شود. در همین سن، طرح‌های با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲، با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد زئولیت، به ترتیب افزایش ۸، ۱۱/۵ و ۱۲ درصدی در مقایسه با طرح کنترل را نشان می‌دهند. در سن ۹۰ روز، جایگزینی زئولیت در تمامی طرح‌ها، به جز طرح TZP15-0.46 که تغییری نداشته، باعث بهبود محسوس مقاومت فشاری شده است. به طور مثال، در طرح‌های TZP5-0.46 و TZP10-0.46 به ترتیب ۶/۵ و ۱۲ درصد افزایش مقاومت در مقایسه با طرح کنترل اتفاق افتاده است. با توجه به تحقیقات محققان در جایگزینی مختلف زئولیت به جای سیمان، هر مقدار که جایگزینی زئولیت افزایش یافته، افت مقاومت در سنین اولیه بتن افزایش یافته است و با بیشتر شدن سن عمل‌آوری، زئولیت در مقایسه با طرح کنترل عملکرد بهتری را داشته است (پون و همکاران، ۱۹۹۹؛ کلینکارسلان، ۲۰۱۱؛ رمضانپور و همکاران، ۲۰۱۲؛ رنجبر و همکاران، ۲۰۱۳؛ وجملکووا و همکاران، ۲۰۱۵). در طرح‌های TZP5-0.46، TZP10-0.42 و TZP15-0.42 با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲، به ترتیب ۹، ۱۳ و ۲۱ درصد افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه در مقایسه با طرح شاهد مشاهده می‌شود. طبق نمودار، در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲ و ۰/۴۶، جایگزینی ۱۰٪ زئولیت بهترین عملکرد را در نتایج مقاومت فشاری داشته است. همچنین، مشاهده می‌شود که زئولیت در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر بهتر عمل کرده است. نجیمی و همکاران (۲۰۱۲) نیز با جایگزینی ۱۵٪ زئولیت به جای سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵، که نسبت آب به مواد سیمانی بالایی است، کاهش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه را در مقایسه با طرح کنترل مشاهده کردند که به ترتیب ۱۰، ۴ و ۳ درصد بوده است.

طبق گزارش ACI 237R (۲۰۰۷)، آزمایش جعبه L، قابلیت عبور و پرکنندگی بتن خودتراکم در فضاهای محدود و اشغال شده توسط آرماتورها را نشان می‌دهد. طبق مقادیر قابل قبول ارائه شده در استاندارد، حداقل مقدار قابل قبول برای نسبت انسداد ۸۰٪ است. با توجه به نتایج به دست آمده، به جز طرح‌های TZP0-0.46 و TZP5-0.46 کلیه طرح‌ها قابلیت عبور بین ۸۰ تا ۹۰ درصد داشته‌اند. به نظر می‌رسد دو طرح نامبرده، به علت فقدان لزجت و همگنی مناسب، قابلیت عبور و پرکنندگی مناسبی نداشته‌اند.

### ۲-۳. نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

#### ۱-۲-۳. مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جایگزینی زئولیت به جای بخشی از سیمان در مقایسه با طرح کنترل، در سن ۷ روزه، باعث کاهش مقاومت فشاری در تمامی طرح‌ها شده است؛ اما با افزایش سن عمل‌آوری، بهبود مقاومت مشاهده می‌شود. نتیجه تحقیقات برخی از محققان نیز نشان‌دهنده این موضوع است (احمدی و همکاران، ۲۰۱۰؛ رمضانپور و همکاران، ۲۰۱۲؛ وجملکووا و همکاران، ۲۰۱۵). این پدیده به دلیل سرعت کمتر واکنش پوزولانی در مقایسه با سیمان است، زیرا پوزولان‌ها با  $Ca(OH)_2$  حاصل از آبگیری سیمان، واکنش می‌دهند و ژل ثانویه CSH تولید می‌شود. در سن ۲۸ روزه در طرح‌های با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۶، جایگزینی زئولیت تأثیر اندکی در نتایج مقاومت فشاری داشته است. حتی در طرح TZP15-0.46، با جایگزینی ۱۵٪ زئولیت به جای سیمان، کاهش ۱۴ درصدی مقاومت فشاری



شکل ۱۰. نتایج مقاومت فشاری طرح‌های بتن خودتراکم

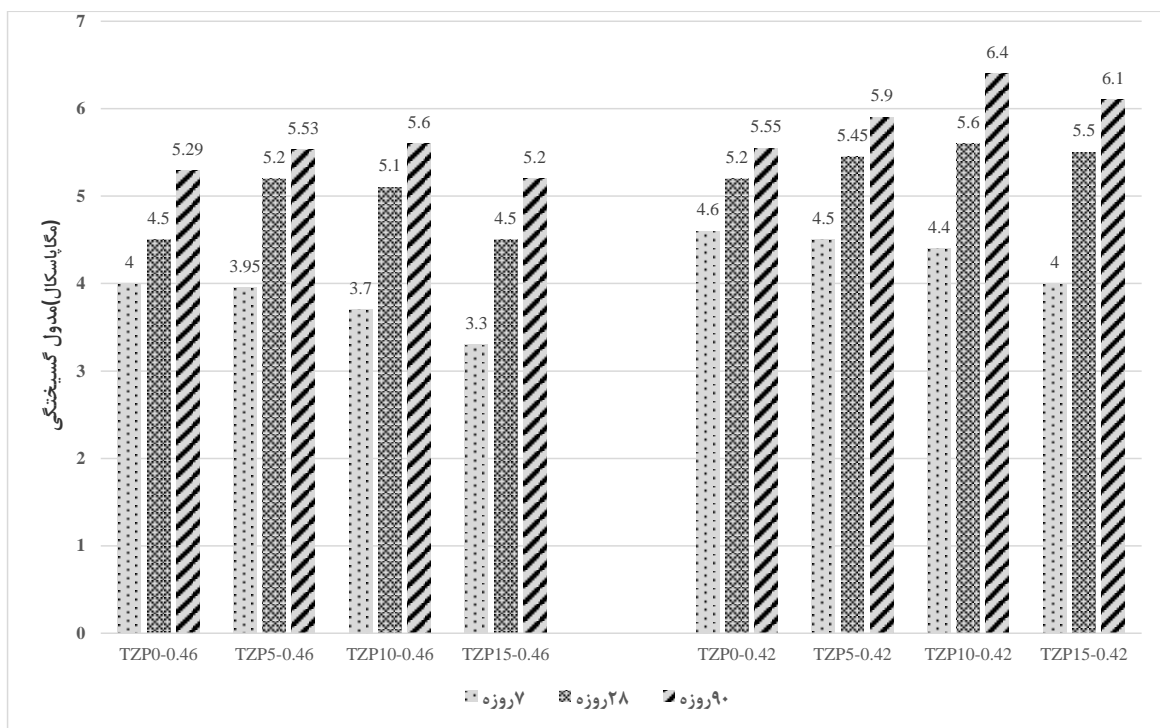
۰.۴۶، برابر ۵/۵، ۱۵/۵ و ۱۰ درصد رشد اتفاق افتاده است. هر مقدار که جایگزینی ژئولیت بیشتر شده، رشد مقاومت از سن ۷ روز تا سن ۹۰ روز افزایش یافته است. به طوری که در طرح‌های TZP15-0.42 و TZP15-0.46 به ترتیب ۵۷/۵ و ۵۲/۵ درصد رشد مقاومت، در مقایسه با طرح کنترل مشاهده شده است. کلیه طرح‌ها با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، حداقل مقدار ۴/۵ مگاپاسکال مقاومت خمشی را در سن ۲۸ روزه کسب کرده‌اند و این نشان‌دهنده این است که این طرح‌ها طبق الزامات مکانیکی، هر یک به تنهایی می‌توانند به عنوان گزینه‌ای در جهت استفاده از بتن خودتراکم فرودگاه‌ها و جاده‌هایی که در معرض چرخه‌های یخ زدن و آب شدن نیستند، مورد استفاده قرار گیرند، زیرا حداقل مقدار مجاز مقاومت خمشی ۴/۸-۴/۲ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزه توسط اداره هوانوردی آمریکا<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) و حداقل مقدار مجاز مقاومت خمشی ۴/۵ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز توسط اداره راه آمریکا<sup>۲</sup> (۱۹۸۹) تعیین شده است.

### ۲-۳. مقاومت خمشی بتن

شکل ۱۱ نتایج مدول گسیختگی طرح‌ها را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نشان می‌دهد. جایگزینی ژئولیت به جای بخشی از سیمان در مقایسه با طرح کنترل، در سن ۷ روزه، باعث کاهش مقاومت خمشی در تمامی طرح‌ها شده است. اما با افزایش سن عمل‌آوری، جایگزینی ژئولیت باعث بهبود مقاومت خمشی شده است. در سن ۲۸ روز، در طرح‌های با نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر، جایگزینی ژئولیت تأثیر بهتری را در رشد مقاومت خمشی در مقایسه با طرح کنترل داشته است که به ترتیب در طرح‌های TZP5-0.46 و TZP10-0.46، برابر ۱۵/۵ و ۱۳/۵ درصد اتفاق افتاده است. اما در طرح TZP15-0.46 در این سن، کاهش یا افزایشی مشاهده نشده است. در سن ۹۰ روزه، در طرح‌های با نسبت آب به مواد سیمانی کم‌تر، جایگزینی ژئولیت تأثیر بهتری را در رشد مقاومت خمشی در مقایسه با طرح کنترل داشته است که به ترتیب در طرح‌های TZP5-0.42، TZP10-0.42 و TZP15-

<sup>۱</sup>- Federal Aviation Administration

<sup>۲</sup>- Federal Highway Administration



شکل ۱۱. نمودار نتایج مقاومت خمشی طرح‌های بتن خودتراکم

۹۰ روزه در مقایسه با طرح کنترل مشاهده کردند و آن را به دلیل افزایش حفرات بتن و طولانی‌تر شدن فرایند هیدراسیون ارزیابی کردند.

### ۳-۲-۳. مقاومت سایشی بتن

نتایج آزمایش مقاومت سایشی که در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفته و هر یک از آزمون‌ها به مدت ۶۰ دقیقه تحت سایش قرار گرفتند، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در سن ۲۸ روز باعث بهبود مقاومت سایشی در این آزمایش شده است. با مقایسه دو طرح کنترل TZP0-0.46 و TZP0-0.42 مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۶ به ۰/۴۲ باعث بهبود مقاومت سایشی شده است؛ که پس از ۶۰ دقیقه سایش، عمق ساییدگی ۱۸/۵ درصد کمتر شده است.

کاهش نسبت آب به مواد سیمانی طرح‌های دارای ژئولیت نیز مقاومت سایشی بتن را بهبود داده است. به طور مثال، با مقایسه دو طرح TZP10- و TZP10-0.46 مشاهده می‌شود که کاهش آب به مواد سیمانی از

نتایج این ۸ طرح مخلوط نشان می‌دهد که ژئولیت در بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، عملکرد بهتری را در جایگزینی به جای سیمان در مقاومت خمشی و در سن ۹۰ روزه ایفا می‌کند.

کافی کلینوپتیلولایت ژئولیت ساختار متخلخلی دارد. و جملک‌ها و همکاران (۲۰۱۵) طبق بررسی‌هایی نشان دادند که حجم مخصوص حفرات این نوع کانی حدود ۰/۰۸ سانتی‌متر مکعب بر گرم است. لذا، با افزایش جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، حفرات موئینه بتن افزایش می‌یابد و این افزایش بیش از اندازه حفرات موئینه و خلل و فرج در ریزساختار خمیر سیمان به نوعی می‌تواند باعث کاهش مقاومت بتن گردد؛ تا جایی که واکنش پوزولانی نیز نمی‌تواند خلل و فرج ایجاد شده را پر کند. در جایگزینی ۱۵ درصدی ژئولیت به جای سیمان، این اتفاق در مقاومت خمشی و مقاومت فشاری بتن در طرح‌ها مشاهده شده است، که می‌توان بدین شکل آن را توجیه نمود. ثابت و همکاران (۲۰۱۳) نیز نتایج مشابهی را در جایگزینی ۲۰٪ ژئولیت در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۲ و کاهش مقاومت در سنین ۷، ۲۸ و



۰/۴۲ به ۰/۴۶ بهبود قابل توجه مقاومت سایشی را سبب شده است (عمق ساییدگی ۰/۴۴٪ کمتر شده است). همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در سن ۲۸ روز، جایگزینی ژئولیت در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۶ در مقایسه‌ی با طرح کنترل اثر منفی روی سایش بتن داشته است که این پدیده می‌تواند به دلیل کامل نشدن واکنش پوزولانی ژئولیت در این سن باشد. در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲ در همین سن نتایج بهتری به دست آمده است. به جز طرح TZP5-0.42 که عمق سایش در مقایسه با طرح کنترل ۴٪ افزایش یافته است، عمق سایش در طرح‌های TZP15-0.42 و TZP10-0.42 به ترتیب ۳۰ و ۱۸ درصد کاهش یافته است.

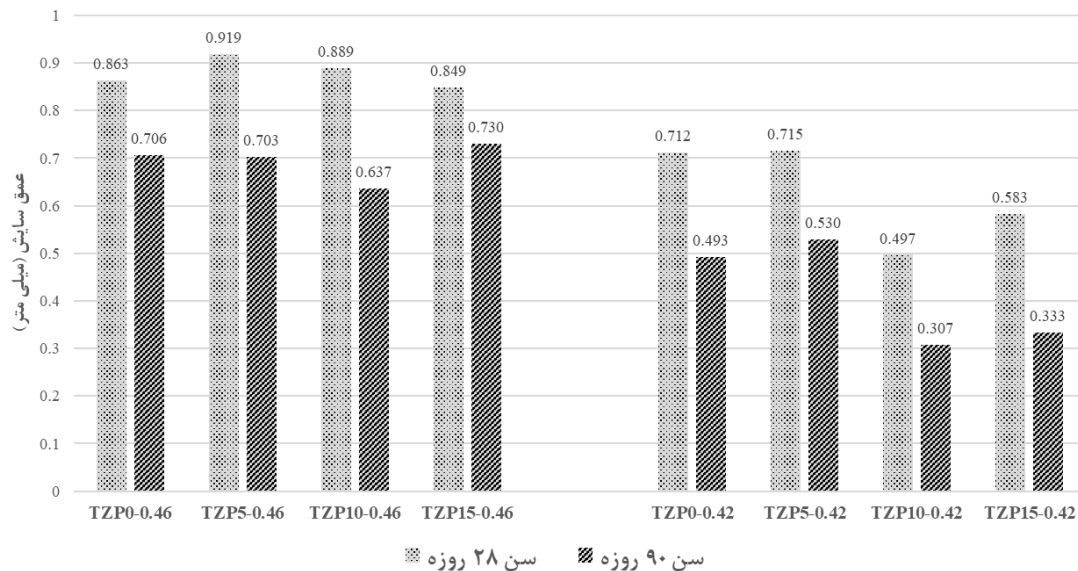
در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، پس از ۹۰ روز عمل‌آوری، نتایج بهتری از ۲۸ روز عمل‌آوری در مقایسه با طرح کنترل مشاهده می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل پیشرفت واکنش هیدراسیون و کامل‌تر شدن آن در سن بیشتر باشد که محققان مختلفی آن را گزارش کرده‌اند (صدیق، ۲۰۰۴؛ شوارزنتراپر و همکاران، ۲۰۰۶؛ بیلماز و همکاران، ۲۰۰۷؛ ازل و همکاران، ۲۰۱۰). با مقایسه نتایج دو طرح کنترل TZP0-0.46 و TZP0-0.42 مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۶ به

کاهش نسبت آب به مواد سیمانی طرح‌های دارای ژئولیت نیز تأثیر مشابهی در نتایج مقاومت سایشی بتن داشته است. به طور مثال، با مقایسه‌ی دو طرح TZP15-0.46 و 0.42 مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی باعث کاهش ۵۴/۵ درصدی عمق سایش شده است، که می‌توان آن را با توجه به واکنش-پذیری زیاد ژئولیت و نیز بهبود عملکرد آن در نسبت‌های آب به مواد سیمانی کمتر توصیف نمود.

طبق توصیه‌ی استاندارد ASTM C779 (۲۰۱۲)، حداکثر عمق سایش بتن در این آزمایش باید ۳ میلی‌متر باشد. اگر عمق سایش بیش از این مقدار باشد، بتن در برابر عوامل ساینده آسیب‌پذیر است. با توجه به نتایج به دست آمده در این آزمایش، عمق سایش هیچیک از طرح‌ها از یک میلی‌متر نفوذ نکرد و در نتیجه از نظر الزامات سایشی تمامی طرح‌ها مورد قبول می‌باشند.

در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، پس از ۹۰ روز عمل‌آوری، نتایج بهتری از ۲۸ روز عمل‌آوری در مقایسه با طرح کنترل مشاهده می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل پیشرفت واکنش هیدراسیون و کامل‌تر شدن آن در سن بیشتر باشد که محققان مختلفی آن را گزارش کرده‌اند (صدیق، ۲۰۰۴؛ شوارزنتراپر و همکاران، ۲۰۰۶؛ بیلماز و همکاران، ۲۰۰۷؛ ازل و همکاران، ۲۰۱۰). با مقایسه نتایج دو طرح کنترل TZP0-0.46 و TZP0-0.42 مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۶ به

در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، پس از ۹۰ روز عمل‌آوری، نتایج بهتری از ۲۸ روز عمل‌آوری در مقایسه با طرح کنترل مشاهده می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل پیشرفت واکنش هیدراسیون و کامل‌تر شدن آن در سن بیشتر باشد که محققان مختلفی آن را گزارش کرده‌اند (صدیق، ۲۰۰۴؛ شوارزنتراپر و همکاران، ۲۰۰۶؛ بیلماز و همکاران، ۲۰۰۷؛ ازل و همکاران، ۲۰۱۰). با مقایسه نتایج دو طرح کنترل TZP0-0.46 و TZP0-0.42 مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۶ به



شکل ۱۲. نتایج عمق سایش در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، پس از ۶۰ دقیقه سایش

#### ۴. نتیجه گیری

می‌شود و در نسبت‌های آب به مواد سیمانی کمتر تأثیر بهتری دارد.

- در تمامی طرح‌های حاوی پوزولان طبیعی ژئولیت، مشاهده شد که در سن ۲۸ روز، حداقل مقاومت خمشی ۴/۵ مگاپاسکال، که الزام مقاومت خمشی برای استفاده در رویه راه‌ها، فرودگاه‌ها و جاده‌هاست، به دست آمده است.

- بهترین تأثیر جایگزینی ژئولیت به جای سیمان در نتایج مقاومت فشاری، خمشی و سایشی بتن پس از ۹۰ روز عمل‌آوری اتفاق افتاد. طرح بهینه با توجه نتایج بتن سخت شده در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲ و جایگزینی ۱۰٪ به دست آمده است.

- ژئولیت همچنین باعث بهبود نتایج مقاومت سایشی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه شد که تأثیر آن با افزایش جایگزینی وزنی سیمان تا ۱۰٪ و کاهش نسبت آب به سیمان شدت یافت.

- طبق گزارش ACI، کیفیت و کمیت خمیر سیمان که با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی بهبود یافت، در افزایش مقاومت سایشی بتن تأثیر مستقیم داشت.

#### ۵. قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و همچنین شرکت فهاب بتن تشکر و قدردانی می‌گردد.

در این مطالعه، نشان داده شد که امکان تولید بتن خودتراکم با مقادیر کم سیمان پرتلند و جایگزینی ۵ تا ۱۵ درصد ژئولیت و در عین حال دستیابی به مقاومت مکانیکی و سایشی مطلوب برای استفاده در رویه‌های بتنی وجود دارد. برخی از نتایج مهم به شرح زیر است:

- با جایگزینی ۵ تا ۱۰ درصد ژئولیت و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۲، مخلوط‌ها تمامی توصیه‌های EFNARC در آزمایش‌های بتن تازه انجام گرفته را برآورده کردند. این در حالی است که کل مواد سیمانی این طرح‌ها ۴۲۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و نیز بدون استفاده از پودر سنگ با سایر افزودنی‌های پودری بوده است. همچنین، نتایج بتن تازه نشان داد که امکان ساخت بتن خودتراکم با عیار ۴۲۰ کیلوگرم بدون ژئولیت نیز وجود دارد؛ ولی در عین حال خطر جداشدگی و آب‌انداختگی زیاد است.

- با توجه به ساختار متخلخل ژئولیت، با افزایش جایگزینی وزنی ژئولیت به جای سیمان، نیاز به استفاده از فوق‌روان‌کننده در مخلوط‌ها برای دستیابی به جریان اسلامپ هدف افزایش یافت.

- طبق نتایج به دست آمده، نشان داده شد که استفاده از ژئولیت باعث افزایش لزجت مخلوط می‌گردد؛ که این امر به پایداری استاتیک مخلوط و مقاومت در برابر جداشدگی سنگدانه‌ها کمک می‌کند.

- با توجه به نتایج مقاومت فشاری، مشاهده شد که جایگزینی ژئولیت باعث افزایش مقاومت فشاری بتن

#### ۶. مراجع

استاندارد ملی ایران. ۱۳۹۳. "دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز و درشت".

استاندارد ملی ایران. ۱۳۹۶. "تعیین چگالی، چگالی نسبی (وزن مخصوص) و جذب آب سنگدانه ریز - روش آزمون".

12350-10, B. B. E. "Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. L box test". 12 p.

12350-12, B. B. E. 2009. "Testing fresh concrete. Part 12: Self-compacting concrete. J-ring test". 14 p.

ACI. 2005. "Guide to durable concrete". American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.

- ACI 237R-07. 2007. "Self-consolidating concrete". ACI, Farmington Hills, USA.
- Adekunle, S., Ahmad, S., Maslehuddin, M. and Al-Gahtani, H. J. 2015. "Properties of SCC prepared using natural pozzolan and industrial wastes as mineral fillers". *Cement Concrete Comp.*, 62: 125-133.
- Ahmad, S., Adekunle, S. K., Maslehuddin, M. and Azad, A. K. 2014. "Properties of self-consolidating concrete made utilizing alternative mineral fillers". *Constr. Build. Mater.*, 68: 268-276.
- Ahmadi, B. and Shekarchi, M. 2010. "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material". *Cement Concrete Comp.*, 32(2): 134-141.
- Ahmadi, B., Sobhani, J., Shekarchi, M. and Najimi, M. 2014. "Transport properties of ternary concrete mixtures containing natural zeolite with silica fume or fly ash". *Magazine Concrete Res.*, 66(3): 150-158.
- ASTM C779/C779M-12. 2012. "Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C1621/C1621M-14. 2014. "Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by J-ring". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C231/C231M-17a. 2017. "Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C1611/C1611M-18. 2018. "Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM International Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates. 2016. "Standard test method for flexural strength of concrete using simple beam with center-point loading". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bierwagen, D. and Abu-Hawash, A. 2005. "Ultra high performance concrete highway bridge". In: *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa.
- Boles, J. R. and Mumpton, F. A. 1977. "Mineralogy and geology of natural zeolites". Mineralogical Society of America.
- British Standards Institution. 1983. "Testing concrete: Method for determination of the compressive strength of concrete cores". BS 1881-120.
- BSI. 2010. "Method for determination of self compacting concrete". Part 9.
- BSI. 2010. "Method for determination of self compacting concrete". Part 9.
- Busari, A. A., Akinmusuru, J. O., Dahunsi, B. I. O., Ogiye, A. S. and Okeniyi, J. O. 2017. "Self-compacting concrete in pavement construction: Strength grouping of some selected brands of cements". *Energy Procedia*, 119: 863-869.
- Busari, A., Akinmusuru, J. and Dahunsi, B. 2018. "Mechanical properties of dehydroxylated kaolinitic clay in self-compacting concrete for pavement construction". *Silicon*, 1-9.
- 1- Colella, C. 2005. "Natural zeolites". PP. 13-40. In: *Cejka, J. and van Bekkum, H. (Eds.), Zeolites and Ordered Mesoporous Materials: Progress and Prospects*.
- Colella, C. Mumpton, F. A. 2000. "Natural zeolites for the third millenium". A. De Frede Pub.
- De Schutter, G., Bartos, P., Domone, P. and Gibbs, J. 2008. "Self-compacting concrete". Whittles, Dunbeath, Scotland, UK.
- Dousti, A., Rashednia, R., Ahmadi, B. and Shekarchi, M. 2013. "Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite". *Constr. Build. Mater.*, 49: 393-399.
- EFNARC. 2002. "Specification and guidelines for self-compacting concrete". European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete System.
- Eren, Ö., Marar, K. and Çelik, T. 1999. "Effects of silica fume and steel fibers on some mechanical properties of high-strength fiber-reinforced concrete". *J. Test. Eval.*, 27(6): 380-387.
- FAA. 2014. "Standards for specifying construction of airports". Federal Aviation Administration, Advisory Circular No. 150/5370-10G, US Department of Transportation.
- Feng, N. Q., Li, G. Z. and Zang, X. W. 1990. "High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture". *Cement Concrete Aggregates*, 12(2): 61-69.
- Ghafoori, N., Najimi, M. and Aqel, M. A. 2013. "Abrasion resistance of self-consolidating concrete". *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(2): 296-303.
- Goodspeed, C. H., Vanikar, S. N. and Cook, R. A. 1996. "High-performance concrete defined for highway structures". US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

- Hajforoush, M., Madandoust, R. and Kazemi, M. 2019. "Effects of simultaneous utilization of natural zeolite and magnetic water on engineering properties of self-compacting concrete". *Asian J. Civ. Eng.*, 20(2): 289-300.
- Heinrichs, K. W., Liu, M. J., Darter, M. I., Carpenter, S. H. and Ioannides, A. M. 1989. "Rigid pavement analysis and design". FHWA-RD-88-068, Federal Highway Administration, USA.
- Hesami, S., Hikouei, I. S. and Emadi, S. A. A. 2016. "Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber". *J. Clean. Prod.*, 133: 228-234.
- Karakurt, C. and Topçu, İ. B. 2011. "Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete". *Constr. Build. Mater.*, 25(4): 1789-1795.
- Karakurt, C., Kurama, H. and Topcu, I. B. 2010. "Utilization of natural zeolite in aerated concrete production". *Cement Concrete Comp.*, 32(1): 1-8.
- Kılıncarslan, S. 2011. "The effect of zeolite amount on the physical and mechanical properties of concrete". *Int. J. Phys. Sci.*, 6(13): 3041-3046.
- Li, B., Ke, G. and Zhou, M. 2011. "Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete". *Constr. Build. Mater.*, 25(10): 3849-3853.
- Li, H., Zhang, M. H. and Ou, J. P. 2006. "Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement". *Wear*, 260(11-12): 1262-1266.
- Mola-Abasi, H., Kordtabar, B. and Kordnaeij, A. 2017. "Parameters controlling strength of zeolite-cement-sand mixture". *Int. J. Geotech. Eng.*, 11(1): 72-79.
- Nagrockiene, D. and Girskas, G. 2016. "Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition". *Constr. Build. Mater.*, 113: 964-969.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and Shekarchi, M. 2012. "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan". *Constr. Build. Mater.*, 35: 1023-1033.
- Ouchi, M., Nakamura, S. A., Osterberg, T., Hallberg, S. and Lewin, M. 2003. "Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States". Kochi University of Technology, Kochi, Japan.
- Poon, C. S., Lam, L., Kou, S. C. and Lin, Z. S. 1999. "A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes". *Constr. Build. Mater.*, 13(8): 427-432.
- Ramadan, K. Z. and Haddad, R. H. 2017. "Self-healing of overloaded self-compacting concrete of rigid pavement". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 21(1): 63-77.
- Ramezani-pour, A. A., Kazemian, A., Sarvari, M. and Ahmadi, B. 2012. "Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low Portland cement content and high durability". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(5): 589-596.
- Ranjbar, M. M., Madandoust, R., Mousavi, S. Y. and Yosefi, S. 2013. "Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete". *Constr. Build. Mater.*, 47: 806-813.
- Rashad, A. M., Seleem, H. E. D. H. and Shaheen, A. F. 2014. "Effect of silica fume and slag on compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete". *Int. J. Concrete Struct. Mater.*, 8(1): 69-81.
- Sabet, F. A., Libre, N. A. and Shekarchi, M. 2013. "Mechanical and durability properties of self-consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash". *Constr. Build. Mater.*, 44: 175-184.
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S. and Maghsoudi, A. A. 2018. "Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment". *Constr. Build. Mater.*, 165: 247-263.
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S. and Maghsoudi, A. A. 2018. "Resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes: pumice and zeolite effect". *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, 12(3): 250-259.
- Schwartzentruber, L. A., Le Roy, R. and Cordin, J. 2006. "Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self compacting concrete (SCC)". *Cement Concrete Res.*, 36(7): 1203-1213.
- Shekarchizadeh, M. 2008. "The national method for concrete mix design". Building and Housing Research Center, Tehran, Iran.
- Siddique, R. 2004. "Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete". *Cement Concrete Res.*, 34(3): 487-493.

- Silva, C. V., Zorzi, J. E., Cruz, R. C. and Dal Molin, D. C. 2019. "Experimental evidence that micro and macro structural surface properties markedly influence on abrasion resistance of concretes". *Wear*, 422: 191-200.
- Tucker, B. T. 2012. "Investigation of the effects of shrinkage, creep, and abrasion on self-consolidating concrete and high volume fly ash concrete for use in transportation related infrastructure". Masters Thesis, Missouri University of Science and Technology.
- Uzal, B., Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, M. C. and Çulfaz, A. 2010. "Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan". *Cement Concrete Res.*, 40(3): 398-404.
- Vejmelková, E., Koňáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Žumár, J., Rovnaníková, P. and Černý, R. 2015. "Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance". *Cement Concrete Comp.*, 55: 259-267.
- Wang, K. 2003. "Self-compacting concrete—applications to slip form paving". SCC proposal paper written to the Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology.
- Wang, K., Shah, S. P. and Voigt, T. 2010. "Self-consolidating concrete for slip-form construction: Properties and test methods". *The 50-year teaching and research anniversary of professor Sun Wei on advances in civil engineering materials*, pp. 161-172.
- Wang, L., Zhou, S. H., Shi, Y., Tang, S. W. and Chen, E. 2017. "Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete". *Comp. Part B: Eng*, 130: 28-37.
- Yılmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B. and Uz, V. 2007. "Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended Portland cement". *Build. Environ.*, 42(11): 3808-3815.
- Ziari, H., Hayati, P. and Sobhani, J. 2014. "Airfield self-consolidating concrete pavements (ASCCP): Mechanical and durability properties". *Constr. Build. Mater.*, 72: 174-181.