

# تأثیر حجم خمیر مواد سیمانی و زئولیت بر خواص بتن خودتراکم

دریافت مقاله: ۱۰-۰۹-۱۳۹۷

پذیرش مقاله: ۱۰-۰۴-۱۳۹۸

سعید خالوئی

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

بابک احمدی\*

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش فناوری بتن

b.amadi@bhrc.ac.ir

آزاده عسکری نژاد

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش مصالح و فرآورده‌های راه و ساختمان

مسعود نکوئی

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده:

بتن خودتراکم امتیازهای ویژه‌ای از جمله قابلیت روانی و پرمکندگی زیاد، بی‌نیازی به لرزاندن و تراکم بهتر را نسبت به بتن معمولی دارد، لکن این مزایا معمولاً با افزایش مقدار حجم خمیر مخلوط قابل دستیابی است. از این رو، حجم خمیر بتن‌های خودتراکم یکی از مهمترین مشخصه‌های این نوع بتن می‌باشد. در این تحقیق، به منظور بررسی خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم با حجم خمیرهای متفاوت، سه عیار مواد سیمانی (۴۵۰، ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب) با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ساخته شد. همچنین در عیارهای مواد سیمانی ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، به ترتیب ۹ و ۱۷ درصد زئولیت جایگزین سیمان شد تا اثر این ماده به عنوان یک یوزولان بررسی شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش عیار مواد سیمانی بتن خودتراکم از ۴۵۰ به ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب در یک نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن ندارد، اما جداسدگی را بیشتر می‌کند. همچنین نتایج آزمایش قیف V نشان می‌دهد که این افزایش عیار مواد سیمانی در نسبت آب به مواد سیمانی برابر، اثر قابل توجهی در ویسکوزیته بتن ندارد اما جایگزین کردن بخشی از سیمان با زئولیت، نتیجه این مشخصه بتن خودتراکم را افزایش داده و تأثیر مثبتی بر عدم جداسدگی، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن دارد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، حجم خمیر، عیار مواد سیمانی، زئولیت

## ۱. مقدمه

کاهش استفاده از سیمان به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین مواد ساخته شده به دست بشر، یکی از دغدغه‌هایی است که همواره مورد توجه محققان و فعالان محیط زیست بوده است [۱]. این موضوع به دلیل فرایند آلاینده تولید سیمان و قیمت بیشتر این ماده نسبت به سایر اجزاء بتن می‌باشد [۲]. بتن‌های خودتراکم علی‌رغم مزایای زیاد، به دلیل آنکه به حجم خمیر بیشتری نیاز دارند، معمولاً در آنها سیمان بیشتری مصرف می‌شود که می‌تواند مشکلاتی را به وجود آورد [۳]. لذا بررسی حجم خمیر مورد نیاز در بتن خودتراکم و نوع عملکرد آن، یکی از مباحثی بوده است که همواره مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]. اصولاً در این نوع بتن، برای ایجاد روانی زیاد، قابلیت خودتراکمی و کاهش اصطکاک بین سنگدانه‌ها، افزایش میزان حجم خمیر در مقایسه با بتن‌های معمولی ضروری است [۵]، اما افزایش بیش از اندازه خمیر سیمان در بتن می‌تواند اثرات مخربی همچون جمع‌شدگی بیش از حد و کاهش دوام را به همراه داشته باشد، لذا بیشترین تاکید بر آن است که این افزایش حجم با مواد جایگزین سیمان همچون دوده سیلیسی، سرباره، زئولیت و ... و همچنین جایگزین مواد پودری خنثی مانند پودر سنگ انجام شود [۶]. علاوه بر ایجاد روانی با فرایندی که ذکر شد، بتن خودتراکم باید دارای قابلیت عبور و مقاومت در برابر جداسدگی سنگدانه‌ها باشد. جداسدگی سنگدانه‌ها که می‌تواند در نتیجه‌ی روانی زیاد رخ دهد، یکی از شایع‌ترین مشکلات این نوع بتن می‌باشد، لذا بتن خودتراکم علاوه بر روانی زیاد، باید لزجت قابل قبولی داشته تا از جداسدگی ذرات جلوگیری کند [۷]. افزایش ویسکوزیته می‌تواند با مواد شیمیایی اصلاح‌کننده‌ی لزجت یا با مواد پوزولانی که سطح مخصوص بیشتری نسبت به سیمان دارند انجام شود. یکی از مواد پوزولانی پرکاربرد زئولیت است. زئولیت به دلیل سطح مخصوص زیاد، که ناشی از ساختار متخلخل آن می‌باشد، توانایی جذب آب زیادی دارد و جایگزینی وزنی آن با بخشی از سیمان، حجم خمیر بتن را به دلیل وزن مخصوص کمتر افزایش می‌دهد که می‌تواند منجر به افزایش ویسکوزیته و کاهش جداسدگی در بتن خودتراکم شود [۸]. در چند سال اخیر، مطالعات محدودی در مورد استفاده از زئولیت در بتن خودتراکم انجام شده است [۹]. بتن خودتراکم حاوی زئولیت به فوق روان‌کننده‌ی زیادی برای رسیدن به روانی مورد نظر نیاز دارد که می‌تواند یکی از معایب این ماده باشد، هرچند به دلیل قیمت کمتر زئولیت نسبت به سیمان تا حدی قابل توجه است. اما نکته مهم این است که دوام بتن با زئولیت به دلیل واکنش پوزولانی آن، بهبود می‌یابد که در این مطالعه با استفاده از آزمایش مقاومت الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته است، همچنین زئولیت مزایای دیگری همچون کاهش جمع‌شدگی و افزایش مقاومت مکانیکی را به همراه خواهد داشت [۱۰].

در این مطالعه، به منظور بررسی تاثیر حجم خمیر مواد سیمانی روی خواص بتن خودتراکم، عیارهای مواد سیمانی متفاوتی با نسبت آب به سیمان ثابت در نظر گرفته شد، همچنین از ۹ درصد و ۱۷ درصد زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شد تا خواص آن در بتن تازه و سخت‌شده خودتراکم بررسی شود.

## ۲. مواد و روش‌های آزمایش

### ۱.۲. مواد سیمانی

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرتلند نوع ۲ با وزن مخصوص ۳/۱۲ و زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان از شرکت افرد توسکا تهیه شده است. زئولیت به صورت میکرونیزه بوده و وزن مخصوصی برابر ۲/۵۲ دارد.

### ۲.۲. سنگدانه‌ها

برای ساخت بتن‌های خودتراکم از ماسه استخراج شده از معادن قم استفاده شد. این ماسه دارای وزن مخصوص ۲/۶۱ و جذب آب ۲/۶ درصد بود. درشت‌دانه‌های مورد استفاده محصول معدنی در شهریار و به صورت گردگوشه با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲ میلی‌متر بودند. وزن مخصوص درشت‌دانه‌ها برابر با ۲/۵۴ و جذب آب آن ۲/۲ درصد بود.

### ۳.۲. آب و فوق روان‌کننده

آب مورد استفاده برای ساخت بتن‌های خودتراکم، آب شرب شهر تهران بود. در این تحقیق، از فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با قابلیت حفظ اسلامپ زیاد استفاده شد.

### ۳. طرح‌های مخلوط

به منظور بررسی خواص بتن خودتراکم در حجم خمیرهای متفاوت، سه عیار مواد سیمانی شامل ۴۵۰، ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ در نظر گرفته شد. همچنین ۹ و ۱۷ درصد زئولیت به ترتیب در عیارهای ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب به صورت وزنی جایگزین سیمان شد. کلیه بتن‌های خودتراکم، جریان اسلامپ هدفی برابر با  $50 \pm 700$  میلی‌متر داشتند. برای رسیدن به این اسلامپ، فوق روان کننده به مقدار لازم به مخلوط اضافه شد و مقدار آن به عنوان درصدی از وزن مواد سیمانی برای طرح مخلوط ثبت شد. طرح‌های مخلوط بتن‌های خودتراکم در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- طرح‌های مخلوط بتن‌های خودتراکم

| سنگدانه‌ها |      | مواد سیمانی  |                           |                        | فوق                    |                             | کد مخلوط |
|------------|------|--|---------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|----------|
| شن         | ماسه | زئولیت ( $\text{kg/m}^3$ )<br>(درصد وزنی جایگزینی) | سیمان ( $\text{kg/m}^3$ ) | کل ( $\text{kg/m}^3$ ) | نسبت آب به مواد سیمانی | روان کننده<br>(٪ وزن سیمان) |          |
| ۴۹۶        | ۱۱۸۸ | ۰-۰  | ۴۵۰                       | ۴۵۰                    | ۰/۴                    | ۰/۶۳                        | C450     |
| ۴۷۱        | ۱۱۲۹ | ۰-۰  | ۴۹۵                       | ۴۹۵                    | ۰/۴                    | ۰/۶۵                        | C495     |
| ۴۴۶        | ۱۰۷۰ | ۰-۰  | ۵۴۰                       | ۵۴۰                    | ۰/۴                    | ۰/۴۰                        | C540     |
| ۴۶۶        | ۱۱۱۸ | ۹-۴۵   | ۴۵۰                       | ۴۹۵                    | ۰/۴                    | ۰/۸۰                        | C495 Z9  |
| ۴۳۷        | ۱۰۴۷ | ۱۷-۹۰  | ۴۵۰                       | ۵۴۰                    | ۰/۴                    | ۱/۳۲                        | C540 Z17 |

### ۴. ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

در ابتدا، به منظور جلوگیری از افت اسلامپ اولیه بتن به وسیله جذب آب سنگدانه‌ها، آب و سنگدانه‌های ریز و درشت با یکدیگر ترکیب شدند و بعد از حدود ۳ دقیقه، مواد سیمانی به طرح مخلوط اضافه شد. بعد از ۲ دقیقه مخلوط شدن به وسیله دستگاه مخلوط کن، فوق روان کننده به آرامی به مخلوط اضافه شد تا زمانی که به صورت تجربی و ظاهری احساس شود که بتن به روانی هدف رسیده است، سپس در صورتی که با انجام آزمایش جریان اسلامپ، روانی مورد نظر تایید می‌شود، آزمایش‌های بتن تازه انجام و در انتها، قالب‌گیری برای انجام آزمایش‌های بتن سخت شده بدون تراکم انجام شد.

### ۵. آزمایش‌های بتن تازه

#### ۱.۵. جریان اسلامپ و بررسی چشمی پایداری جریان (VSI)

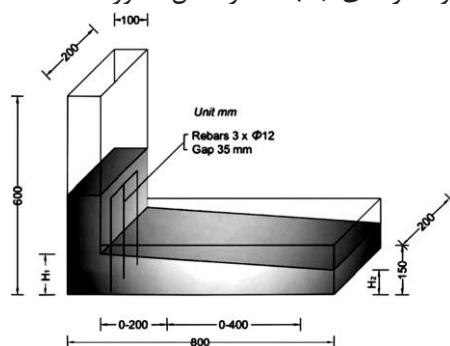
برای بررسی قابلیت جریان بتن خودتراکم بدون وجود مانع در راه آن، از آزمایش جریان اسلامپ و شاخص پایداری چشمی طبق استاندارد ASTM C1611 استفاده شد. مراحل انجام این آزمایش شامل پرکردن مخروط اسلامپ، بالا کشیدن آن به صورت عمودی و اندازه‌گیری دو قطر عمود برهم پس از توقف حرکت بتن می‌باشد. در آزمایش شاخص پایداری چشمی، پس از اتمام آزمایش جریان اسلامپ، با نسبت دادن اعداد بین ۰ تا ۳ به بتن، مقدار پایداری بتن به صورت کمی بیان می‌شود که جزئیات آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر شاخص پایداری چشمی طبق استاندارد ASTM C1611

| مقدار VSI           | معیار  |
|---------------------|--|
| ۰ = کاملاً پایدار   | بدون جداسدگی و آب انداختگی در بتن  |
| ۱ = پایدار          | بدون جداسدگی و با کمی آب انداختگی و درخشندگی در سطح  |
| ۲ = ناپایدار        | وجود شیره پیرامونی کوچک ( $\leq 10 \text{ mm}$ ) و یا انباشتگی سنگدانه در توده بتن                                       |
| ۳ = کاملاً ناپایدار | جداسدگی قابل توجه با نشانه وجود شیره پیرامونی بزرگ ( $> 10 \text{ mm}$ ) و یا انباشتگی سنگدانه‌های درشت در مرکز حلقه بتن |

## ۲.۵. جعبه L

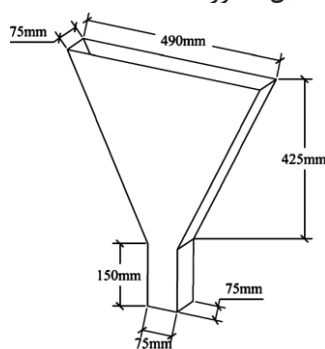
جعبه L دارای دو قسمت عمودی و افقی می‌باشد که با وجود میلگردهای عمودی در قسمت افقی آن، قابلیت عبور بتن خودتراکم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نحوه آزمایش به این ترتیب است که ابتدا بتن در قسمت عمودی به مدت ۶۰ ثانیه می‌ماند، سپس با بالا کشیدن دریچه‌ای که قابلیت باز و بسته شدن دارد، بتن از قسمت عمودی با عبور کردن از میان میلگردها وارد قسمت افقی می‌شود. نسبت ارتفاع بتن باقی مانده در انتهای جعبه نسبت به ارتفاع بتن باقی مانده در قسمت عمودی به عنوان معیاری از قابلیت عبور در نظر گرفته می‌شود. طبق استاندارد BS EN 12350-10-2010 حداقل نسبت مجاز برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شده است، هرچه که این نسبت بیشتر باشد، قابلیت عبور بیشتر خواهد بود. مشخصات و اندازه‌های جعبه L در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- دستگاه جعبه L

## ۳.۵. قیف V

این آزمایش می‌تواند به طور غیر مستقیم نمایانگر ویسکوزیته بتن خودتراکم باشد، همانطور که در روش استاندارد BS EN 12350-9-2010 توضیح داده شده است، این آزمایش شامل یک قیف به شکل V و یک دریچه قابل باز و بسته شدن در قسمت پایینی آن می‌باشد. بتن خودتراکم باید به صورت یک مرتبه در قیف ریخته شود و بعد از ۱۰ ثانیه، دریچه پایین باز شود، زمانی که طی می‌شود تا بتن از قیف خارج شود به عنوان معیاری از ویسکوزیته در نظر گرفته می‌شود. مشخصات و اندازه‌های قیف V در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- قیف V

## ۴.۵. پایداری شبکه الک

طبق روش استاندارد BS EN 12350-11-2010، در این آزمایش ابتدا حدود ۱۰ لیتر بتن تازه به مدت ۱۵ دقیقه در یک ظرف نگهداری می‌شود، سپس حدود ۴/۸ کیلوگرم از این بتن در وسط یک الک با چشمه‌های ۵ میلی‌متر ریخته می‌شود، بعد از ۲ دقیقه که مقدار مصالح عبور کرده از الک توزین شد، درصد وزنی موادی که از الک عبور می‌کند به عنوان جداسدگی بتن در نظر گرفته می‌شود. حداکثر ۲۰ درصد عبور مصالح از مقدار بتنی که روی الک ریخته می‌شود قابل قبول است.

## ۶. آزمایش‌های بتن سخت‌شده

### ۱.۶. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام آزمایش در هر سن، سه نمونه مکعبی  $100 \times 100 \times 100$  میلی‌متر اخذ شد و میانگین نتایج آن به عنوان مقاومت فشاری در سن مورد نظر ثبت شد.

### ۲.۶. مقاومت الکتریکی

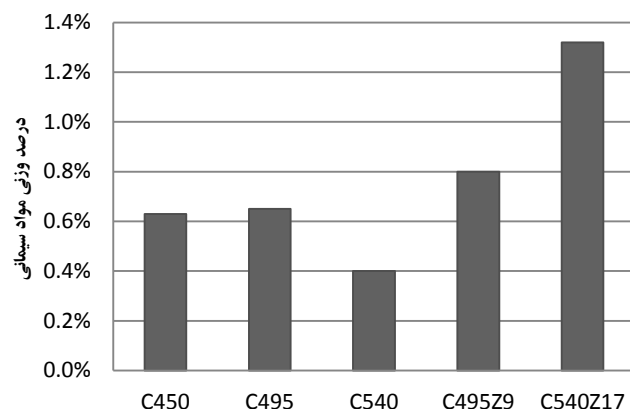
مقاومت الکتریکی یک آزمایش ساده به منظور اندازه‌گیری مقاومت بتن در برابر حرکت یون‌ها می‌باشد. این آزمایش به طور غیر مستقیم می‌تواند میزان تخلخل بتن را نیز مورد ارزیابی قرار دهد و به عنوان معیاری برای ارزیابی ریز ساختار بتن به کار رود [۹]. در این مطالعه از آزمایش مقاومت الکتریکی چهار نقطه‌ای به عنوان معیاری برای ارزیابی دوام بتن‌های خودتراکم استفاده شد. هر چه اعدادی که در این آزمایش به دست می‌آید بزرگتر باشد، نشان دهنده متراکم تر بودن بتن و وجود یون‌های کمتر است که معمولاً با واکنش پوزولانی یا کاهش مقدار سیمان اتفاق می‌افتد. در نتیجه می‌توان این آزمایش را یک معیار از دوام بتن در نظر گرفت.

### ۷. تحلیل و نتایج آزمایش‌های بتن تازه

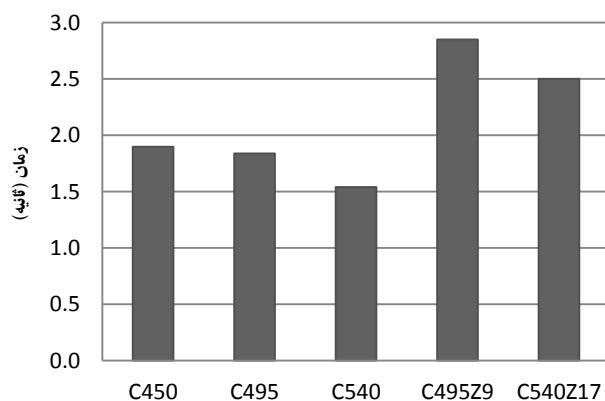
مجموعه‌ی نتایج آزمایش‌های بتن تازه در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این جدول، کلیه بتن‌های خودتراکم حداقل معیار را برای قبولی در آزمون جعبه L شکل داشتند و با توجه به آنکه حداکثر اندازه شن مورد استفاده کوچک بود، مشکلی بابت انسداد در هنگام عبور بتن از میلگرد‌ها دیده نشد. طبق شکل ۳، در مخلوط C540، به دلیل عیار مواد سیمانی بیشتر و نسبت آب به مواد سیمانی برابر، درصد فوق روان کننده کمتری برای رسیدن به اسلامپ هدف مصرف شده است. همچنین، درصد فوق روان کننده در مخلوط‌های C450 و C495 تقریباً باهم برابر است، اما طبق جدول ۳، اسلامپ بتن در C495 کمی افزایش پیدا کرده است. این موضوع به دلیل کاهش اصطکاک بین سنگدانه‌ها می‌باشد که نتیجه‌ی افزایش حجم خمیر مخلوط‌ها است. با جایگزینی وزنی ژئولیت به مقادیر ۹ و ۱۷ درصد، به ترتیب در مخلوط‌های C495 Z9 و C540 Z17، درصد استفاده از فوق روان کننده نسبت به نمونه کنترل خود (C495 و C540)  $1/2$  و  $3/3$  برابر شده است، این افزایش به دلیل تخلخل و زبری زیاد سطح ژئولیت می‌باشد که باعث شده است بتن خودتراکم برای رسیدن به اسلامپ هدف، نیاز به فوق روان کننده بیشتری داشته باشد و در نتیجه هزینه‌های ساخت بتن را افزایش دهد [۱۱]. شکل ۴، نشان می‌دهد که با افزایش حجم خمیر بتن به دلیل افزودن سیمان (مخلوط‌های C450، C495 و C540)، در یک نسبت آب به سیمان برابر، نتایج آزمون قیف V شکل تغییر چندانی نکرده و کمی کاهش به دلیل کم شدن اصطکاک بین سنگدانه‌ها مشاهده می‌شود، اما جایگزینی ۹ و ۱۷ درصد ژئولیت با سیمان (مخلوط‌های C495 Z9 و C540 Z17) زمان خروج بتن از قیف را نسبت به طرح کنترل متناظر (مخلوط‌های C495 و C540) به ترتیب  $1/5$  و  $1/6$  برابر کرده است. دلیل این موضوع افزایش ویسکوزیته بتن بواسطه استفاده از ژئولیت است.

جدول ۳- خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌های بتن تازه

| کد مخلوط | جریان اسلامپ (میلیمتر) | فوق روان کننده (درصد وزنی مواد سیمانی) | VSI | زمان قیف V (ثانیه) | جداشدگی الک (%) | نسبت ارتفاع در آزمایش جعبه L |
|----------|------------------------|--|-----|--------------------|-----------------|------------------------------|
| C450     | ۶۸۰                    | ۰/۶۳                                   | .   | ۱/۹۰               | ۷/۶۰            | ۰/۸۹                         |
| C495     | ۷۵۰                    | ۰/۶۵                                   | .   | ۱/۸۵               | ۹/۶۰            | ۰/۸۸                         |
| C540     | ۶۸۰                    | ۰/۴۰                                   | .   | ۱/۵۵               | ۱۸/۳۲           | ۰/۸۵                         |
| C495 Z9  | ۷۰۰                    | ۰/۸۰                                   | .   | ۲/۸۵               | ۱۱/۰۰           | ۰/۸۹                         |
| C540 Z17 | ۷۲۰                    | ۱/۳۲                                   | .   | ۲/۵۰               | ۱۵/۰۰           | ۰/۸۹                         |



شکل ۳- مقدار فوق روان کننده



شکل ۴- نتایج زمان عبور در قیف V

با توجه به شکل ۵ و جدول ۳، بررسی چشمی پایداری جریان در همه بتن های خودتراکم عدد ۰ را نشان داد. در این مطالعه، با افزایش عیار مواد سیمانی در مخلوط بتن تا ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، هیچ گونه آب انداختگی و جداسدگی بین سنگدانه ها مشاهده نشد. همچنین به نظر می رسد که بتن های دارای ۹ و ۱۷ درصد زئولیت، مخلوطی لزج تر نسبت به بتن های حاوی سیمان تنها دارند.

در شکل ۶، نتایج آزمون پایداری شبکه الک ارائه شده است. با توجه به این نتایج مقدار جداسدگی کلیه طرح مخلوطها کمتر از حد مجاز مقرر در استاندارد BS EN 12350-11-2010 (۲۰ درصد) می باشد. با توجه به شکل ۶، با افزایش عیار مواد سیمانی در مخلوطهای C450، C495 و C540، در نسبت آب به سیمان برابر، اعداد بزرگتری برای الک جداسدگی به دست آمد. این موضوع به دلیل افزایش مقدار خمیر مخلوط و کاهش ویسکوزیته در بتن می باشد و الزاماً نشان دهنده بیشتر شدن جداسدگی سنگدانه ها نیست. به عبارت دیگر، در این آزمایش، هرچه مقدار خمیر مخلوط بیشتر و ویسکوزیته آن کمتر باشد، مقدار بیشتری از بتن مستعد عبور از الک می باشد و به تبع آن، نتایج بزرگتری ممکن است به دست آید. در حالیکه، پایداری بتن کم نشده است و جداسدگی قابل ملاحظه ای اتفاق نیافتاده است (شکل ۵). در نتیجه، این آزمایش نمی تواند معیار کاملاً دقیقی از جداسدگی در بتن باشد. در شکل ۶ مشاهده می شود که جایگزین کردن ۱۷ درصد سیمان با زئولیت (C540 Z17) نسبت به مخلوط متناظر آن (C540)، میزان جداسدگی ۲۲ درصد کاهش پیدا کرده است. این موضوع به دلیل افزایش ویسکوزیته در بتن می باشد که به دلیل سطح مخصوص زیاد زئولیت ایجاد شده است.

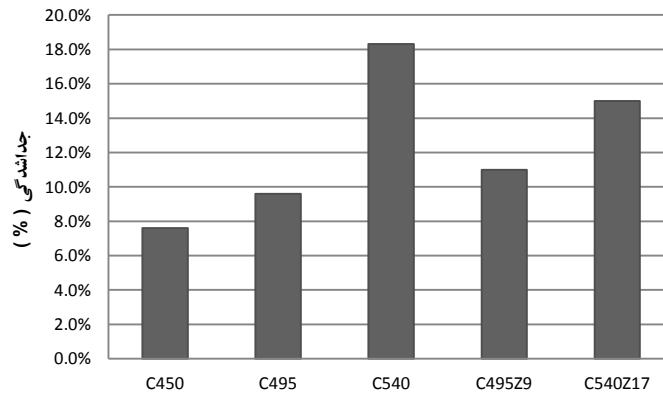


C450-VSI=0

C495-VSI=0

C540-VSI=0

شکل ۵- تصاویر بررسی چشمی پایداری جریان بتن های خودتراکم در عیارهای متفاوت بدون زئولیت



شکل ۶- نتایج آزمایش پایداری شبکه الک در بتن های خودتراکم

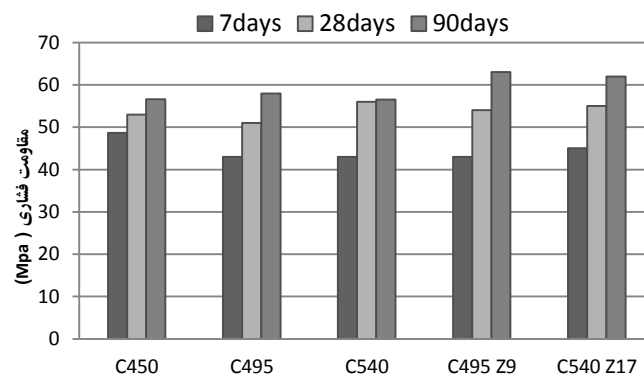
در این مطالعه، بتن خودتراکم با عیار مواد سیمانی ۴۵۰ کیلوگرم در متر مکعب، خواص بتن تازه مطلوبی داشت و با افزایش عیار مواد سیمانی تنها با آب به سیمان برابر، هیچ یک از پارامترهای بتن تازه خودتراکم بهبود پیدا نکرد و حتی منجر به کاهش ویسکوزیته و افزایش اعداد آزمایش پایداری شبکه الک شد. این موضوع نشان می‌دهد که بعد از دست‌یابی به حجم خمیر مناسب برای بتن خودتراکم که در این مطالعه با عیار مواد سیمانی ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد، افزایش عیار مواد سیمانی با نسبت آب به سیمان برابر به منظور بهبود خواص بتن تازه بی- نتیجه است.

## ۸. تحلیل و نتایج آزمایش‌های بتن سخت‌شده

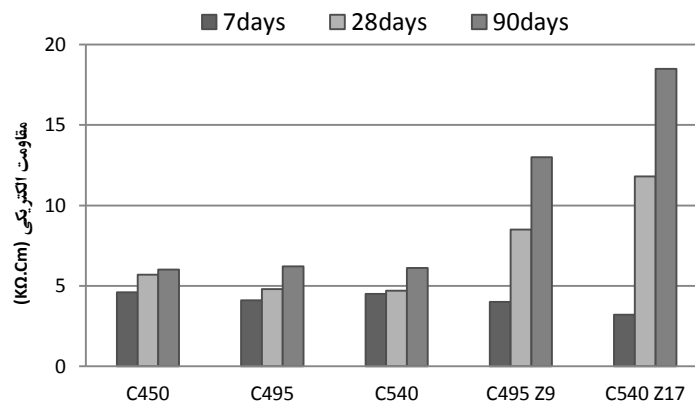
نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۷ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در آب به سیمان برابر، افزایش مقدار سیمان از ۴۵۰ به ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت فشاری ۷ روزه کاهش پیدا کرده است، در حالی که این روند در مورد نتایج سنین ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده نمی‌شود. دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که در سن ۷ روز، درجه هیدراسیون سیمان کمتر است و در نتیجه با افزایش خمیر سیمان، تخلخل بیشتری در واحد حجم سیمان وجود داشته است. درحالی که در سنین بیشتر (۲۸ و ۹۰ روز) با افزایش هیدراسیون سیمان، از میزان تخلخل خمیر سیمانی کاسته شده و تبع آن، افزایش خمیر سیمان تاثیر کمتری در مقدار تخلخل بتن داشته است. هرچند آزمایش‌های بیشتری برای اثبات این موضوع لازم می‌باشد. طبق شکل ۷، جایگزین کردن ۹ و ۱۷ درصد زئولیت به ترتیب در عیارهای ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت فشاری ۹۰ روزه را نسبت به طرح مخلوط متناظر بدون زئولیت در حدود ۱۰ درصد افزایش داده است که به دلیل واکنش پوزولانی زئولیت می‌باشد.

مقاومت الکتریکی بتن‌های C450، C495 و C540، تقریباً در همه سنین برابر به دست آمد (شکل ۸). با توجه به شکل ۸، مقاومت الکتریکی بتن‌های حاوی ۹ و ۱۷ درصد ژئولیت در ۷ روز نسبت به طرح بدون ژئولیت متناظر کمی کاهش داشته است که به دلیل عدم انجام واکنش پوزولانی کافی تا این سن می‌باشد. لکن، با افزایش سن بتن تا ۹۰ روز، مقاومت الکتریکی بتن با انجام واکنش پوزولانی ژئولیت در ۹ و ۱۷ درصد جایگزینی به ترتیب به ۱۳ و ۱۸/۵ کیلو اهم سانتی متر افزایش پیدا کرده است. واکنش پوزولانی سبب می‌شود علاوه بر کاهش یون‌های بتن (با کاهش مقدار کلسیم هیدروکسید)، تخلخل آن نیز کاهش پیدا کرده و در نتیجه اعداد بزرگتری از آزمایش مقاومت الکتریکی به دست آید. بتن‌هایی که دارای مقاومت الکتریکی بیشتری هستند می‌توانند دوام بیشتری هم داشته باشند.

مشاهده می‌شود که همانند آزمایش‌های بتن تازه، افزایش سیمان از ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب به ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب در آب به سیمان برابر، هیچ‌گونه خواص مطلوبی برای بتن سخت شده به همراه نداشته است. حتی انتظار می‌رود که بتن‌های با عیار بیشتر، جمع‌شدگی و مشکلات دوام بیشتری داشته باشند.



شکل ۷ - مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز



شکل ۸ - مقاومت الکتریکی بتن‌های خودتراکم در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

## ۹. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور بررسی خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم با حجم خمیرهای متفاوت، سه عیار مواد سیمانی (۴۵۰، ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب) با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ساخته شد. همچنین در عیارهای مواد سیمانی ۴۹۵ و ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، به ترتیب ۹ و ۱۷ درصد ژئولیت جایگزین سیمان شد تا اثر این ماده به عنوان یک پوزولان بررسی شود. جمع‌بندی یافته‌های این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱) در یک نسبت آب به مواد سیمانی برابر، هرچه عیار مواد سیمانی افزایش پیدا می‌کند، نتایجی که در آزمایش پایداری شبکه الک به دست می‌آید، بیشتر و زمان خروج بتن از قیف V کمتر می‌شود، به عبارت دیگر، ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند.



(۲) افزایش عیار سیمان در نسبت آب به سیمان برابر، مقاومت فشاری ۷ روزه را کاهش می‌دهد و بر مقاومت الکتریکی آن بی‌تاثیر است اما بر خواص بتن سخت شده در سن ۹۰ روز تاثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

(۳) جایگزین کردن ۹ و ۱۷ درصد زئولیت با سیمان، می‌تواند مقاومت فشاری بتن را در سن ۹۰ روز حدود ۱۰ درصد افزایش دهد.

(۴) زئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی، تاثیر بسیار مطلوبی در مقاومت الکتریکی و در نتیجه دوام بتن دارد. جایگزین کردن ۹ و ۱۷ درصد زئولیت با سیمان در بتن خودتراکم، به ترتیب مقاومت الکتریکی را در ۹۰ روز، ۲ و ۳ برابر کرده است.

(۵) زئولیت در بتن خودتراکم می‌تواند ویسکوزیته را افزایش و جاداشدگی را کاهش دهد.

(۶) در این مطالعه، جایگزین کردن ۱۷ درصد زئولیت با سیمان سبب افزایش چشمگیر فوق روان کننده‌ی مخلوط شد که می‌تواند صرفه اقتصادی نداشته باشد.

(۷) بتن خودتراکم با عیار مواد سیمانی ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب تمام خصوصیات مطلوب را برای این نوع بتن در حالت تازه همراه داشت. مشاهده شد که با افزایش عیار سیمان در یک نسبت آب به سیمان ثابت، هیچ‌گونه تاثیر مطلوبی چه در حالت تازه و چه در حالت سخت شده در بتن خودتراکم حاوی سیمان تنها دیده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد در صورتی که حجم خمیر لازم برای این نوع بتن فراهم شود، افزایش مقدار آن به جز افزایش هزینه‌های مصرف سیمان و فوق روان کننده نتیجه‌ی دیگری نخواهد داشت، لذا به دست آوردن حجم خمیر مناسب برای ساخت بتن خودتراکم یک امر مهم است که می‌تواند صرفه‌های اقتصادی و محیط زیستی داشته باشد.

#### ۱۰. قدردانی

این مقاله مستخرج از پروژه پژوهشی انجام گرفته در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی می‌باشد. نویسندگان مقاله کمال تشکر را نسبت حمایت‌های مادی و معنوی آن مرکز دارند.

#### ۱۱. مراجع

- [1] C. Meyer, *The greening of the concrete industry*, *Cement Concr. Compos.* 31 (8) (2009) 601–605
- [2] H.G. Oss, A.C. Padovani, *Cement manufacture and the environment part II: environmental challenges and opportunities*, *J. Ind. Ecol.* 7 (1) (2003) 93–126.
- [3] Yazıcı, H, *The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete*, *Constr. Build. Mater.* 22(4) (2008) 456–462.
- [4] Bui, V.K., *Application of minimum paste volume method in designing cost-effect selfconsolidating concrete—an experience in New Zealand*, *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*. Chicago, IL: ACBM, (2002) 127-132.
- [5] Vejmelkova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Skaliński, B., and Černý, R, *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag*. *Constr. Build. Mater.*, 25(3), (2010) 1325–1331.
- [6] Roziere, E., Turcry, P., Loukili, A., *Influence of Paste Volume, Addition Content and Addition Type on Shrinkage Cracking of Self-Compacting Concrete*, *Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Chicago, Illinois, 2005, pp. 945–951.
- [7] *European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*. European Project Group, 2005.
- [8] Mumpton FA, *Mineralogy and geology of natural zeolites*, New York: Reprint of Mineralogical Society of America's Reviews in Mineralogy; 1993.
- [9] F.A Sabet, E., *Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash*, *Construction and Building Materials* 44 (2013) 175–184
- [10] Ahmadi B, Shekarchi M. *Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material*. *Cem Concr Compos* 2010;32:134–41.
- [11] Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, Shekarchi M. *An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan*. *Constr Build Mater* 2012;35:1023–33.

# The Effect of Cementitious Materials Paste Volume and Use of Zeolite on The Properties of Self-Compacting Concrete

*Saeed Khalooee*

*Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*

*Babak Ahmadi\**

*Road, Housing & Urban Development Research Centre, Department of Concrete Technology, Tehran, Iran*

*Azade Askarinejad*

*- Road, Housing & Urban Development Research Centre, Department of Construction Materials, Tehran, Iran*

*Masoud Nekooei*

*Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*

## **Abstract**

*Self-compacting concrete (SCC) has advantages such as flowability, filingability and having no need to vibration and better consolidation compared to conventional concrete. However, these benefits are achievable through increasing the volume of paste. Therefore, the volume of SCC paste is one of the most significant parameters in such type of concrete. In this research study, in order to investigate the fresh and hardened properties of SCC mixtures with various paste volume, three levels of cementitious materials ( $450 \text{ kg/m}^3$ ,  $495 \text{ kg/m}^3$  and  $540 \text{ kg/m}^3$ ) were made keeping w/cm constant. In addition, at cementitious materials content of  $450 \text{ kg/m}^3$  and  $495 \text{ kg/m}^3$ , natural zeolite was replaced 9% and 17% of cement by weight, respectively to study the influence of this material as a type of pozzolan. The experimental results indicate that increasing the SCC's cementitious materials at a constant W/CM, does not have considerable effect on compressive strength of concrete, while increases the segregation. The results of V-funnel test show that increasing the cementitious materials content at a constant W/CM, has no prominent impact on viscosity of concrete, however partial replacement of cement by zeolite increases this parameter of SCC and has a positive effect on stability, compressive strength and resistivity.*

**Keywords:** *Self-Compacting Concrete, Paste Volume, Cement Content, Zeolite*