

Influence of Silica Fume and Zeolite on the Mid-Term Behavior of Expansive Self-Compacting Concrete

Abdul Sattar Safaei^{1*}, Gholamreza Ghodrati Amiri², Seyed Mohamad Hossein Razavi³, Hamidreza Hosseinali Beygi⁴

1- Associate Professor, Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2 -Professor, Civil Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Lecturer, Civil Engineering Department, Salehan Qaemshahr Higher Education Institute, Qaemshahr, Iran

4- MSc. Graduate, Civil Engineering Faculty, Aryan Institute of Science and Technology, Amirkolla, Iran

ABSTRACT

Self-compacting concrete is an innovation in the field of concrete that has resolved one of the main problems in the construction of concrete structures, namely the problem of concrete compaction. This type of concrete has caused a uniform composition in concrete with a new composition and the invention of superplasticizer. In the present study, the effect of introducing the additives of zeolite and micro silica and their replacement with a part of cement has been evaluated by testing the mechanical properties including compressive, tensile, flexural and ultrasonic waves tests on the control specimen of self-compacting concrete and expansive self-compacting concrete. Also, the short-term deformation due to shrinkage of self-compacting concrete caused by drying for a period of 210 days after the fabrication of specimens has been investigated. Experimental results have shown that micro silica and zeolite pozzolans improve the microstructure of the evaluated concrete, which improves the mechanical properties. In fact, the replacement of cement with pozzolans has made the parts of the transition zone of the specimens better and condensed. Shrinkage test results also show that zeolite and micro silica pozzolans lead to a significant reduction in drying shrinkage. Drying shrinkage of the concrete containing 15% zeolite and 7.5% micro silica decreased by 32% and 15% compared to the control concrete containing expansive materials at the age of 210 days, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 January 2020

Revise Date: 26 May 2021

Accept Date: 29 May 2021

Keywords:

Self-Compacting Concrete
Compressive Strength
Tensile
Flexural
Shrinkage

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.216035.2050>

*Corresponding author: Abdul Sattar Safaei

Email address: s.safaei@nit.ac.ir

تأثیر میکروسیلیس و زئولیت بر رفتار میان مدت بتن خودتراکم منبسط شونده

عبدالستار صفائی^{۱*}، غلامرضا قدرتی امیری^۲، سیدمحمدحسین رضوی^۳، حمیدرضا حسینعلی بیگی^۴

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، نام دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی صالحان قائمشهر

۴- کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان

چکیده

بتن خودتراکم یک نوآوری در زمینه بتن می‌باشد که باعث رفع یکی از مشکلات اساسی در ساخت سازه‌های بتنی یعنی مشکل تراکم بتن، گردیده است. این نوع بتن با ترکیب جدید و ابداع ابر روان‌کننده موجب شده است که ترکیب یکنواخت در بتن ایجاد شود. در تحقیق حاضر تأثیر افزودنی‌های زئولیت و میکروسیلیس و جایگزینی آن‌ها با بخشی از سیمان به کمک آزمایشات خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی، خمشی و امواج فراصوت بر روی نمونه شاهد بتن خودتراکم و بتن خودتراکم منبسط شونده مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین تغییر شکل کوتاه مدت حاصل از جمع‌شدگی بتن خودتراکم در اثر خشک شدن برای دوره ۲۱۰ روزه پس از ساخت نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده نشان داده است که پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت سبب بهبود در ریزساختار بتن‌های مورد مطالعه شده که این امر باعث بهبود در خواص مکانیکی می‌گردد. در حقیقت جایگزینی سیمان با پوزولان‌ها سبب شده که قسمت‌های ناحیه انتقال نمونه‌ها بهتر و متراکم‌تر شوند. همچنین نتایج آزمایش جمع‌شدگی نشان می‌دهد که پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس منجر به کاهش قابل توجهی در جمع‌شدگی خشک می‌شوند. جمع‌شدگی خشک بتن حاوی ۱۵ درصد زئولیت و ۷/۵ درصد میکروسیلیس نسبت به بتن شاهد حاوی مواد منبسط شونده در سن ۲۱۰ روز به ترتیب به میزان ۳۲ و ۱۵ درصد کاهش یافته‌اند.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، مقاومت فشاری، کششی، خمشی، جمع‌شدگی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.216035.2050	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.216035.2050	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۸	۱۴۰۰/۰۳/۰۸	۱۴۰۰/۰۳/۰۵	۱۳۹۸/۱۰/۲۶
عبدالستار صفائی s.safaei@nit.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بتن خودمتراکم نقش اساسی در توسعه پایدار ساخت و ساز بناهای مدرن و زیرساخت‌ها نظیر سازه‌های بلند، برج‌ها و پل‌های بزرگ، تونل‌ها، سازه‌های بتن آرمه در جهان داشته است. میکروسیلیس از مواد افزودنی صنعتی است که در واقع غبار گازهای خروجی از دودکش‌های کارخانجات تولید سلیکون و آلیاژهای سیلیس، نظیر فروسیلیس در کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد، که واکنش ذرات آن با کریستال‌های حجیم و پر تخلخل آهک و تبدیل آن‌ها به ژل کلسیم سیلیکات کلسیم هیدراته C-S-H، بهبود پیوند خمیر سیمان و سنگدانه را به همراه دارد. که به عنوان ماده جایگزین سیمان در تولید بتن استفاده می‌شود [۱-۲]. وونگکو^۱ در تحقیقات خود بر روی مقاومت فشاری و نفوذ یون کلر در بتن دربردارنده خاکستر بادی و دوده سیلیسی گزارشی ارائه دادند که افزودن این مواد پوزولانی سبب بالا رفتن مقاومت فشاری و کاهش نفوذ یون کلر شده است. ژئولیت نوعی پوزولان طبیعی است که به‌طور گسترده‌ای در صنعت بتن استفاده می‌شود و از ویژگی‌های بارز این ماده ارزان بودن و در دسترس بودن آن نسبت به دیگر پوزولان‌ها است [۳-۴]. استفاده از این ماده اسلامپ بتن را کاهش داده و از جدا شدگی و آب انداختگی آن جلوگیری می‌کند و علاوه بر آن با کاهش نفوذپذیری بتن دوام آن را بهبود می‌بخشد. صدرممتازی و همکاران^۲ در پژوهش خود نشان دادند فعالیت پوزولانی طبیعی ژئولیت بین دوده سیلیسی و خاکستر بادی است، این تحقیق به منظور بررسی خواص رئولوژیکی و مکانیکی و انقباض بتن خود تراکم حاوی در صدهای مختلف پوزولان دوده سیلیسی، خاکستر بادی، خاکستر برگ مامبو و ژئولیت به عنوان جایگزین وزنی درصدی از وزن سیمان انجام شده است [۵-۶].

تحقیقات جدیدی صورت گرفته که خواص بتن تازه معمولی دربردارنده ژئولیت را مورد بررسی قرار داده است. مطالعه بر روی خواص مهندسی بتن نرمال حاوی پودر ژئولیت نشان داده که برای حجم بیشتر ژئولیت، به حجم زیادتری از فوق‌روان کننده نیاز می‌باشد که مقدار اسلامپ را به اندازه بتن مینا نگه دارد [۷]. این امر حکایت از کاهش روانی بتن نرمال در حضور پودر ژئولیت داشته است. این نتیجه در راستای مطالعه ولیپور^۳ می‌باشد [۸]. مطالعه احمدی و شکرچی^۴ همچنین نشان می‌دهد که بالا رفتن لغزندگی بتن در حضور ژئولیت سبب عدم وجود هر گونه جدا شدگی و یا آب انداختگی در نمونه‌ها می‌شود [۷].

جمع شدگی بتن تازه و حتی سخت شده یکی از مسائل عمده در اجرای سازه‌های بتن آرمه است، که مستقیماً بر روی دوام و خدمت‌پذیری سازه تاثیر می‌گذارد. بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی جمع شدگی ناشی از خشک شدن بیشتر را تجربه می‌کند که می‌توان دلیل آن را به بالا بودن حجم خمیر سیمان برای رسیدن به روانی لازم مطابق دستورالعمل (ACI 237R-07) برای بتن خودتراکم، نسبت داد [۹]. بررسی چگونگی تاثیر عوامل مختلف از جمله مواد افزودنی بر تغییر شکل‌های طولانی مدت و سایر خواص این بتن ضروری به نظر می‌رسد. جایگزین کردن مصالح پوزولانی به جای سیمان با توجه به اثرات مخرب سیمان در محیط زیست و توسعه پایدار از مواردی است که در بتن خودتراکم منبسط شونده بسیار مورد نیاز جامعه امروز می‌باشد. یانگ^۵ و همکاران در مطالعه دیگری به بررسی خود جمع-شدگی پرداخته‌اند و اثر نسبت آب به سیمان و مواد افزودنی و جداسازی خود جمع‌شدگی^۶ با جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی بررسی نموده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پایین آوردن آب به سیمان و افزایش میزان میکروسیلیس جمع‌شدگی را بالا برده است [۱۰].

تأثیر جبران کنندگی افزودنی منبسط شونده بر روی جمع‌شدگی بتن خودمتراکم (SCC) مورد مطالعه قرار گرفت. تغییر شکل بتن مورد آزمایش بررسی و تحلیل کمی و کیفی مواد هیدراسیون بوسیله اشعه ایکس XRD انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که مقدار افزودنی معدنی و شرایط عمل‌آوری کاربرد افزودنی منبسط شونده را به‌صورت مشخصی تحت تأثیر قرار می‌دهد. نمونه‌های SCC که شامل افزودنی منبسط شونده بودند در آب عمل‌آوری شدند و در طی زمان آزمایش منبسط شدند. در شرایط وجود آب و شرایط عمل‌آوری طبیعی، نمونه-

¹ Wongkeo

² Najimi

³ Valipour

⁴ Ahmadi and Shekarchi

⁵ Yang

⁶ Autogenous Shrinkage

ها همیشه در طی دوران آزمایش دچار جمع شدگی می شوند. پژوهش ژهنگ و همکاران نشان داد که افزودنی منبسط شونده بر پایه اکسید کلسیم تأثیر خوبی دارند تا در مقابل جمع شدگی بتن خودمتراکم مقاومت نماید [۱۱].

در تحقیق حاضر با تهیه ۸ طرح اختلاط و ساخت ۱۸ نمونه برای هر طرح اختلاط، اثر درصدهای مختلف میکروسیلیس بر جمع-شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده به مدت ۲۱۰ روز و نیز خصوصیات مکانیکی آن شامل مقاومت‌های فشاری، کششی و مدول ارتجاعی به طور تجربی تا سن ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

جهت ساخت نمونه آزمایشی از ماسه با مدول نرمی ۲/۸۳ استفاده گردید. همین طور چگالی ویژه ماسه بکار گرفته شده برابر ۲/۶۰۰ و وزن مخصوص ظاهری آن برابر 1720 Kg/m^3 بوده است. شن بکار رفته در بتن خودمتراکم از نوع رودخانه ایی با حداکثر اندازه ۱۰ میلیمتر می باشد. همچنین چگالی ویژه شن بکار برده برابر ۲/۵ است. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه های ریز ماسه و درشت شن

سنگدانه	شن	ماسه
چگالی ظاهری (gr/cm^3)	۲/۵۰۰	۲/۶۰۰
وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	۱۵۸۰	۱۷۲۰
رطوبت نسبی (%)	۰/۱	۰/۴
رطوبت اشباع با سطح خشک (%)	۰/۵	۰/۷
مدول نرمی (F.M)	-	۲/۸۳
ارزش ماسه ای (S.E) (%)	-	۸۲

سیمان استفاده شده از نوع سیمان پرتلند تیپ II ساخت کارخانه سیمان مازندران است. دانسیته سیمان مذکور برابر با gr/cm^3 ۳/۱۴ می باشد و سطح ویژه (سطح بلین) cm^2/gr ۳۰۵۰ می باشد، همچنین خصوصیات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی این سیمان در جداول (۲) و (۳) آمده است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی سیمان

مقدار مشخصه فیزیکی	مشخصات فیزیکی سیمان مازندران (نکا)
۱۷۵ دقیقه	زمان گیرش اولیه
۲۳۰ دقیقه	زمان گیرش نهایی
185 Kg/cm^2	مقاومت ۳ روزه >100
295 Kg/cm^2	مقاومت ۷ روزه >175
379 Kg/cm^2	مقاومت ۲۸ روزه >315

جدول ۳- تجزیه شیمیایی سیمان تیپ ۲ مازندران

درصد	ترکیب شیمیایی
۶۴/۰۷	CaO
۰/۳۸	Na ₂ O
۰/۶۳	K ₂ O
۱/۲۰	MgO
۳/۱۹	Fe ₂ O ₃
۴/۹۵	AL ₂ O ₃
۲۱/۲۵	SiO ₂
۱/۱۰	Free CaO

میکروسیلیس به کار رفته در این پژوهش به صورت پودری بوده و وزن مخصوص آن ۲۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و به رنگ خاکستری مایل به سفید می باشد. میکروسیلیس مذکور حاوی ۸۵ تا ۹۰ درصد دی اکسید سیلیسیم است این ماده با ساختمان کریستالی و ابعاد میانگین ۱۵ میکرون و صد برابر ریزتر از دانه های سیمان و به نرمی $2/m^2/gr$ می باشد. در این تحقیق میکروسیلیس با درصدهای مختلف ۲/۵، ۵ و ۷/۵ نسبت به وزن سیمان بکار گرفته شده است.

ژئولیت تولیدی شرکت نگین پودر از نوع کلینوپتیلولیت (clinoptilolite) است که کاربردی ترین نوع ژئولیت در طبیعت می باشد پودر میکرونیزه این ماده معدنی مصارف عمده ای در صنایع مختلف از قبیل پوزولان، بتن سبک، تصفیه و کودهای شیمیایی دارد. این شرکت قابلیت تولید پودر ژئولیت از مش ۱۷۰ تا مش ۲۵۰۰ که حدود ۱۰۰ تا ۵ میکرون می باشد را دارد. در این تحقیق ژئولیت با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ نسبت به وزن سیمان بکار گرفته شده است.

در این پژوهش از پودر سنگ آهک با وزن مخصوص $2660 kg/m^3$ به عنوان عنصر پر کننده فیلر استفاده شده است. پرکننده هایی چون پودر سنگ آهک به خاطر دارا بودن ذرات بسیار ریز، موجب پر کردن فضای خالی و سوراخ های موجود بین ذرات سیمان می شوند، لذا موجب کمتر شدن تخلخل و بالا بردن درجه توپری بتن می شوند.

استراگروت EN500 یک منبسط کننده و فوق روان کننده مصالح بر پایه سیمان پرتلند می باشد که یک انبساط کنترل شده تا قبل از گیرش اولیه مخلوط سیمانی ایجاد می کند. این محصول انبساط کنترل شده تا ۴ درصد ایجاد می کند. استراگروت ES500 در نوع بدون خاصیت فوق روان کنندگی و فقط دارای انبساط با کد Strugrout EN500 نیز قابلیت تولید دارد. مشخصات محصول منبسط کننده در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- اطلاعات محصول منبسط کننده

شکل ظاهری	پودر طوسی رنگ
جرم حجمی	$1 \pm 0.1 gr/cm^3$ در $1/2$ درجه سانتیگراد
میزان یون کلر	فاقد یون کلر

در این پژوهش از ابر روان کننده استراژین یک ابر روان کننده دیرگیر بتن چهارم و بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با حفظ اسلامپ طولانی از واحد تحقیق. توسعه تولید رزین پلی کربوکسیلات شرکت Strumix می باشد. این محصول جهت تولید بتنی با نسبت آب به سیمان پایین و روانی بالا و حفظ اسلامپ طولانی توسعه یافته است و همچنین برای تولید بتن خودمتراکم SCC عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان می دهد. رسیدن به مقاومت و دوام بالا در بتن در میزان مصرف های متوسط این محصول از دیگر مزایای آن می باشد. همچنین این محصول جهت استفاده در کنار انواع سیمان ها و پوزولان ها عملکرد مناسبی دارد و رس موجود در سنگدانه ها روی عملکرد روانی اولیه و حفظ روانی آن تاثیری نخواهد گذاشت.

۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش جهت دستیابی به بتن خودمتراکم بر طبق دستورالعمل (ACI 237R-07) بوده [۹]. نکته قابل توجه آن است که براساس گزارش‌های ارائه شده قبلی انتظار می‌رود با افزایش منبسط شونده، ژئولیت و تا حدی میکروسیلیس کارایی بتن خود متراکم کاهش یابد بنابراین در طرح اختلاط‌های مربوط به بتن خودمتراکم سعی بر آن است تا بتن فاقد منبسط شونده، ژئولیت و میکروسیلیس دارای حداکثر کارایی مجاز طبق دستورالعمل ACI237R-07 باشد [۹]. تا پس از اضافه نمودن منبسط شونده، ژئولیت و میکروسیلیس همچنان پاسخگو آزمایش‌های مربوط به کنترل کارایی بتن خودمتراکم هست. بعد از انجام آزمایش‌های گوناگون و با در نظر گرفتن حد پایین و بالای مجاز کارایی، میزان کاربرد مواد روان کننده در طرح اختلاط‌های بدون ژئولیت و حاوی درصد‌های مختلف ژئولیت متفاوت می‌باشند.

در این تحقیق آزمایشگاهی ۸ طرح اختلاط، حاوی ژئولیت تنها (۵، ۱۰ و ۱۵) درصد و میکروسیلیس تنها (۲/۵، ۵ و ۷/۵) درصد و منبسط شونده (۰/۴) درصد وزنی سیمان، مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی طرح‌ها در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵- طرح اختلاط (kg/m^3)

نمونه	w/b	سیمان	شن	ماسه	پودر سنگ	آب	ابر روان کننده	منبسط کننده	میکروسیلیس	ژئولیت
R	۰/۴	۴۱۱	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۴/۱	۰	۰	۰
E	۰/۴	۴۱۱	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۴/۱	۱/۶	۰	۰
EM2.5	۰/۴	۴۰۰/۷۲	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۴/۵	۱/۶	۱۰/۲۸	۰
EM5	۰/۴	۳۹۰/۴۵	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۴/۹۵	۱/۶	۲۰/۵۵	۰
EM7.5	۰/۴	۳۸۰/۱۷	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۵/۷۵	۱/۶	۳۰/۸۳	۰
EZ5	۰/۴	۳۹۰/۴۵	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۴/۷	۱/۶	۰	۲۰/۵۵
EZ10	۰/۴	۳۶۹/۹	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۵	۱/۶	۰	۴۱/۱
EZ15	۰/۴	۳۴۹/۳۵	۷۵۰	۹۱۷	۱۴۴	۱۶۵	۶/۵	۱/۶	۰	۶۱/۶۵

۲-۳- روش آزمایش و عمل آوری

• آزمایش جریان اسلامپ

آزمایشات جریان اسلامپ به کار رفته تا قابلیت جریان و پایداری بتن خودمتراکم را تعیین نماید. تجهیزات شامل یک مخروط جریان و یک میز جریان می‌باشد. مخروط اسلامپ با بتن پر شده در حالی که مخروط اسلامپ روی میز فشار داده می‌شود. سپس مخروط اسلامپ به‌طور عمودی بالا برده می‌شود و زمان اندازه گیری شروع میشود. زمان T_{50} برای قطر بتن که به 50.0mm برسد یادداشت می‌شود. هنگامی که بتن از حرکت باز ایستاد، قطر نهایی بتن و در صورت لزوم هرگونه مرز جداشدگی در محیط بتن اندازه گیری می‌شود.

• آزمایش جعبه - L

با جعبه L - شکل این امکان وجود دارد که خواص گوناگون، نظیر قابلیت جریان، بلوکه شدن و جداشدگی مورد بررسی قرار گیرد. قسمت قائم جعبه، با بتن پر می‌شود، بعد از اینکه بتن در قسمت قائم برای یک دقیقه قرار گرفت، درپچه لغزان متحرک بالا برده می‌شود و حالا بتن به خارج قسمت قائم جریان می‌یابد و به قسمت افقی جعبه - L می‌رسد. سر راه خودش، آن باید از یک سری از میلگردها عبور کند. فاصله بین میلگردها $1/5$ اینچ (34mm) است، اما می‌تواند به اندازه‌های متفاوت تغییر کند. بعد از اینکه درپچه لغزان باز شد زمان برای لبه بتن که به 8 اینچ (200mm) علامت گذاری شده T_{20} برسد و زمان برای لبه بتن که به 16 اینچ (400mm)

علامت گذاری شده برسد، یادداشت می شود، شکل (۳-۴) را ملاحظه نمایید. هنگامی که بتن متوقف شد: فاصله H_1 و H_2 در ۸ اینچی و ۱۶ اینچی محل علامت گذاری شده اندازه گیری می شود، مقادیر قابل قبول نیست گرفتگی، H_2/H_1 می تواند برابر با $0/85 - 0/80$ باشد. هر دو گرفتگی و پایداری را می توان با چشم مشاهده کرد. اگر بتن یک صفحه در پشت لایه میلگردها تشکیل داد، بتن یا دچار گرفتگی شده یا دچار جداسازی شده است.

• نحوه عمل آوری و نگهداری، نمونه ها

پس از پایان عمل اختلاط کردن، بتن را داخل قالب های آماده ریخته و پیش از ریختن بتن، برای آسان بیرون آوردن نمونه ها از داخل قالب ها پس از سخت شدن، داخل قالب ها روغن زده می شود و در شرایط آزمایشگاهی در طول ۲۴ ساعت نگهداری می شود. سپس از قالب خارج گردیده و در حوضچه های آب در دمای بین ۲۲-۲۵ درجه سانتیگراد تا سن ۲۸ روز برای هر آزمایش نگهداری می گردد و همچنین نمونه های منشوری در محیط آزمایشگاهی و دستگاه اون عمل آوری شدند.

• آزمایش مقاومت فشاری:

در تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده از نمونه های استوانه ای 300×150 و مکعبی با ابعاد $310 \times 310 \times 100$ میلی متر B.S 1881: Part 116 و ASTM استفاده می گردد. نحوه آزمایش بدین صورت است که پس از ۲۸ روز عمل آوری، نمونه های بتنی را در زیر جک فشاری قرار می گیرد سپس نیروی فشاری توسط جک با سرعتی ثابت به نمونه وارد می گردد تا در اثر بار فشاری وارد بر آن گسیخته گردد و عمل آوری شده در رطوبت ۱۰۰٪ در سنین ۲۸ و ۱۸۰ روز استفاده گردید [۱۲-۱۳].

• آزمایش کشش غیرمستقیم

این آزمایش که به آزمایش برزیلی نیز موسوم است برای مشخص نمودن مقاومت کششی دو نیم شدن بتن براساس استاندارد (ASTM C496, 2017) بکار می رود. بدین منظور از نمونه های استوانه ای به قطر ۱۵ به ارتفاع ۳۰ سانتی متر بهره گیری می شود. نمونه استوانه ای پس از قرار گرفتن در گیره نگهدارنده مطابق شکل (۳-۷)، به گونه ای در زیر جک فشاری قرار داده می شود که نیروی اعمالی از سوی جک در امتداد ارتفاع نمونه و بر سطح جانبی آن وارد شود. بار وارد شده از سوی جک به تریج بیشتر شده تا آنجا که منجر به دو نیم شدن نمونه شود. سپس بار نهایی گسیختگی به وسیله دستگاه خوانده و ثبت می شود. و عمل آوری شده در رطوبت ۱۰۰٪ در سنین ۲۸ روز استفاده گردید [۱۴].

• آزمایش ضریب الاستیسیته بتن

ضریب الاستیسیته بتن که با علامت E نشان داده می شود به صورت تغییرات تنش فشاری به کرنش متناظر آن تعریف می گردد به شرط آنکه تنش فشاری کمتر از ۴۰ درصد تنش حد نهایی بتن باشد یعنی بتن در ناحیه الاستیک باشد. برای تعیین مدول ارتجاعی بتن از نمونه های استوانه ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر (ASTM C 469, 2014) استفاده می گردد. نخست دو نوار فلزی که فاصله عمودی آن ها از یکدیگر ۱۵۰ میلی متر بوده و در آن کرنش سنجی قرار داده شده و درون استوانه قرار گرفته، سپس به همراه استوانه در زیر دستگاه فشار گذاشته می شود [۱۵].

• ارزیابی سرعت امواج فرا صوتی

در این تحقیق تعداد ۸ طرح اختلاط بتن خودمترکم با مقادیر متفاوت، پودر منبسط کننده، ژئولیت و میکروسیلیس در آزمایشگاه تهیه و بر روی نمونه های بتنی در سن ۲۸ روز، آزمون غیرمخرب، تعیین زمان انتقال امواج اولتراسونیک به روش انتقال مستقیم، به وسیله دستگاه آزمایشگر تعیین سرعت پالس انجام گشته.

فرکانس پالس های ارسالی از طرف دستگاه ۵۴ KHz می باشد و مدت زمان انتقال پالس بر حسب میکرو ثانیه و با دقت ۰/۱ میکرو ثانیه، بر روی صفحه دیجیتالی دستگاه نشان داده شده است. بر اساس پژوهش های محققین دیگر، بهره گیری از فرکانس امواج اولتراسونیک در محدوده ۸۰-۴۰ KHz برای سنجش بتن مناسب است [۱۵-۱۶].

• آزمایش مقاومت خمشی

در این آزمایش هدف تعیین مدول گسیختگی و طاقت خمشی براساس استاندارد ASTM C78 است که بر روی نمونه‌های منشوری $50 \times 10 \times 10$ سانتی متر به وسیله دستگاه یونیورسل که مکانیزم آن کنترل کرنش بوده و با سرعت 0.2 mm/min انجام گردیده. فاصله بین دو تیکه گاه ۴۰ سانتی متر است [۱۷].

• آزمایش اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM)

امروزه شیوه‌های گوناگونی برای شناسایی و تحلیل مواد وجود داشته که یکی از شناخته شده ترین آن‌ها، شیوه‌های میکروسکوپی می‌باشد مطابق. در این روش‌ها می توان تصاویر بزرگنمایی شده از نمونه به دست آورد. میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM که از گروه میکروسکوپ‌های الکترونی هست.

• آزمایش جمع شدگی

جهت انجام این آزمایش ابتدا بر سطح نمونه‌های منشور بتنی در امتداد طول پین‌های مخصوص به فاصله ۲۰۰ میلی متر نصب شده و سپس فاصله‌ی پین‌ها بر روی منشور بتنی توسط کرنش سنج مکانیکی به طول ۲۰۰ میلی متر قرائت گردید تا به مقادیر محاسبه شده نزدیک شود.

تاریخ شروع اندازه گیری اولین روز قرارگیری نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی بوده و تا ۲۱۰ روز نیز ادامه یافت. این آزمایش بر روی سه نوع بتن ساخته شده با مقاومت‌های متفاوت نشان داده شده، در شکل (۱) انجام گرفت.



شکل ۱- نمونه های جمع شدگی که توسط کرنش سنج مکانیکی قرائت می شود

جهت اندازه گیری کرنش جمع شدگی از نمونه منشوری با ابعاد 285375375 میلی متر استفاده شد، ثبت تغییرات پس از ۱ روز و در دو حالت، دستگاه اون با رطوبت نسبی ۸۰ درصد و دمای ۲۳ درجه سانتی گراد و محیط آزمایشگاه صورت گرفت.

۳- نتایج آزمایش و تفسیر

۳-۱- آزمایش‌های بتن خودمترکم تازه

نتایج خواص بتن‌های تازه توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ: قطر جریان اسلامپ و T50، قیف V شکل: زمان سپری شده برای خارج شدن کامل بتن از قیف و جعبه L شکل محاسبه شده‌اند. مقادیر خواص بتن تازه به دست آمده از مخلوط‌ها در این پژوهش در جدول (۶) نشان داده شده‌اند.

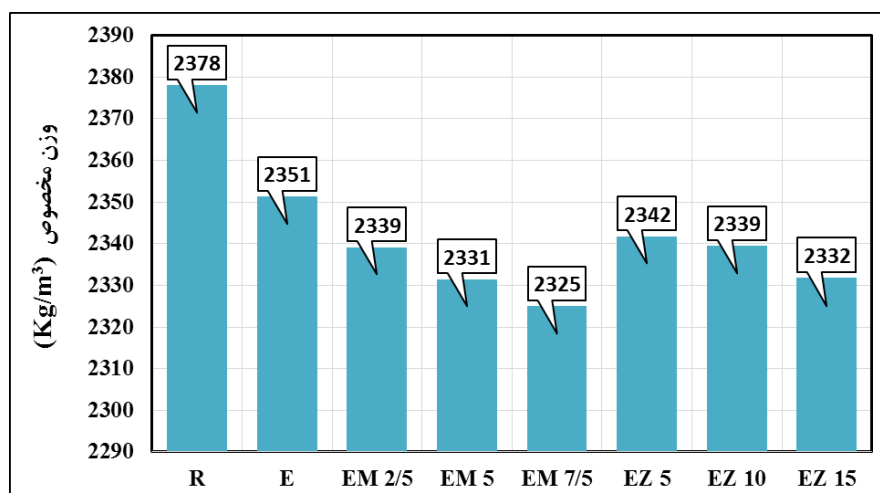
جدول ۶- نتایج آزمایشات بتن تازه

طرح	ابر روان کننده kg/m ³	جریان اسلامپ T ₅₀ (Sec)	د (cm)	قیف V شکل (Sec)	جعبه L شکل h ₂ /h ₁
R	۴/۱	۲/۲	۸۱	۶/۸	۰/۹۵
E	۴/۱	۲/۵	۷۹	۷	۰/۹۳
EM 2.5	۴/۵	۳/۱	۷۵	۷/۵	۰/۹
EM 5	۴/۹۵	۳/۹	۷۳	۸/۲	۰/۹
EM 7.5	۵/۷۵	۴/۵	۷۰	۸/۹	۰/۸۷
EZ 5	۴/۷	۴/۲	۷۴	۸	۰/۹۱
EZ 10	۵	۴	۷۱	۹/۱	۰/۸۷
EZ 15	۶/۵	۴/۸	۶۹	۱۰/۳	۰/۸۵

۳-۲- نتایج آزمایشات بتن سخت شده

۳-۲-۱- وزن مخصوص خشک

وزن مخصوص مخلوط‌های خودتراکم منبسط شونده حاوی درصد‌های مختلف جایگزینی پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس در شکل (۲) نشان داده شده اند. هر کدام از مقادیر آورده شده برای وزن مخصوص میانگین وزن مخصوص ۳ نمونه مکعب ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی-متر می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود وزن مخصوص بتن خودتراکم منبسط شونده (E) نسبت به وزن مخصوص بتن شاهد (R) کمتر می‌باشد. چگالی بتن‌های خودتراکم منبسط شونده حاوی پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس با افزایش مقدار جایگزینی آن‌ها کاهش منظمی در وزن مخصوص مشاهده می‌شود که این امر به علت چگالی پایین‌تر زئولیت و میکروسیلیس نسبت به سیمان پرتلند معمولی می‌باشد.



شکل ۲- وزن مخصوص نمونه‌ها

۳-۲-۲- نتایج مقاومت فشاری

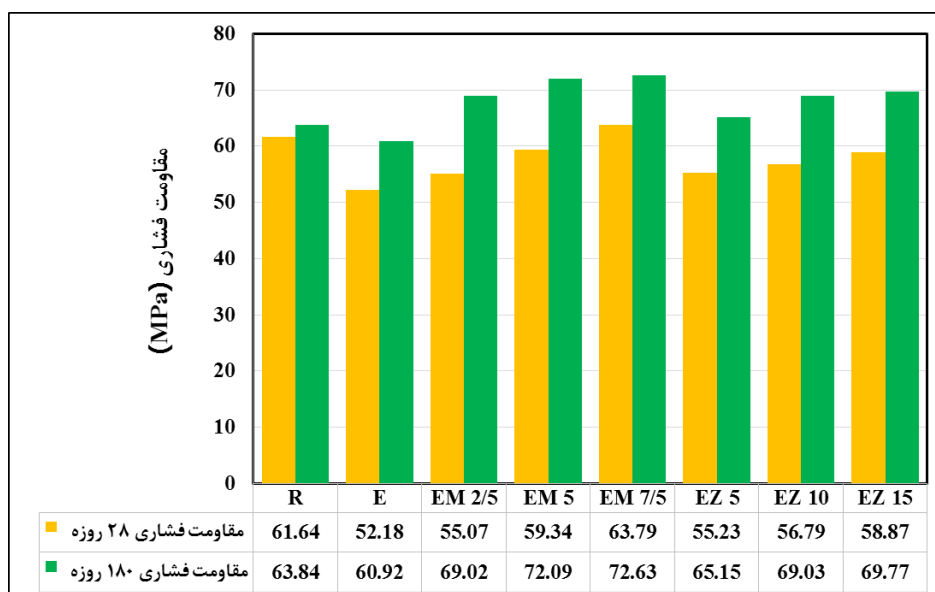
نتایج مقاومت فشاری مخلوط های بتن خودتراکم منبسط شونده ساخته شده با درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت و میکروسیلیس در سنین ۲۸ و ۱۸۰ روز در شکل (۳) آورده شده اند. از این نتایج می توان مشاهده نمود که محدوده مقاومت فشاری در سنین ۲۸ روز و ۱۸۰ روز به ترتیب بین ۵۲/۱۸ الی ۶۳/۷۹ و ۶۰/۹۲ الی ۷۲/۶۳ می باشد. همان طور که انتظار می رفت مقاومت فشاری بتن ها با افزایش سن آن ها افزایش یافتند. با این حال مقادیر نسبتاً بیشتر مقاومت فشاری برای مخلوط های حاوی پوزولان زئولیت و میکروسیلیس در سنین بالاتر به علت واکنش پوزولانی زئولیت و میکروسیلیس به دست آمده است. برای مثال در مقایسه با بتن خودتراکم شاهد حاوی مواد منبسط شونده (E)، افزایش حدود ۱۹ درصدی و ۱۴/۵ درصدی در سن ۱۸۰ روز به ترتیب برای بتن های EM 7.5 و EZ 15 مشاهده شده است. زمانی که تاثیر استفاده از افزودنی منبسط شونده بر روی مقاومت فشاری بتن خودتراکم بررسی شد چنین مشاهده شد که مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۲۸ روز و ۱۸۰ روز به ترتیب به مقدار ۱۵/۵ درصد و ۴/۵ درصد کاهش پیدا نمود. بنابراین چنین نتیجه می شود که تاثیر اضافه نمودن مواد منبسط شونده در سنین پایین بر روی از دست رفتن مقاومت بیشتر می باشد. این روند با تاثیر کمتر در سنین بالاتر ادامه می یابد.

تاثیر پوزولان های زئولیت و میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری مخلوط های بتن خودتراکم منبسط شونده عموماً به این دلیل می باشد که این پوزولان ها مقادیر منافذ ریز را افزایش می دهند و موجب کاهش مقادیر منافذ بزرگ مضر در خمیر سیمان می شوند. در نتیجه مقاومت بتن افزایش یافته و همچنین خواص دیگر آن بهبود می یابد. علاوه بر این زئولیت می تواند نسبت وزنی SiO_2/CaO در ناحیه انتقال افزایش دهد که موجب افزایش فاز C-S-H و کاهش مقادیر هیدروکسید کلسیم می گردد. بنابراین ساختار ناحیه انتقال بهبود می یابد. در نتیجه مقاومت و مقاومت در برابر نفوذپذیری بتن افزایش می یابد [۱۸].

احمدی و شکرچی گزارش دادند که مقاومت فشاری مخلوط های بتن حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد زئولیت در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ به ترتیب ۱۴، ۱۶، ۲۳ و ۲۵ درصد بیشتر از بتن شاهد بوده است [۷]. کنپلات^۷ و همکاران مشاهده نمودند که جایگزینی زئولیت تا ۱۵ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری در سنین پایین می شود [۱۹]. پون^۸ و همکاران یافتند که فعالیت های پوزولانی زئولیت نسبت به خاکستر بادی بیشتر و نسبت به میکروسیلیس کمتر می باشد [۲۰].

⁷ Canpolat

⁸ Poon



شکل ۳- مقاومت فشاری ۲۸ و ۱۸۰ روزه نمونه‌ها حاوی درصد‌های مختلف ۲/۵، ۵ و ۷/۵ میکروسیلیس و ۵، ۱۰ و ۱۵ ژئولیت

۳-۲-۳- آزمایش‌های کشش غیر مستقیم

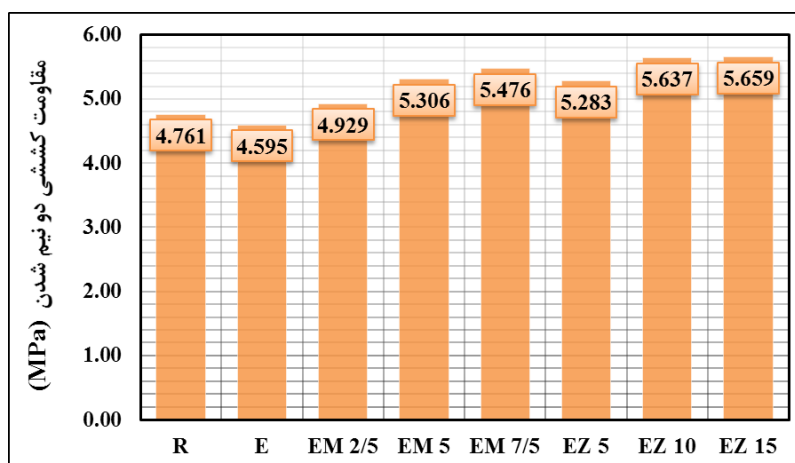
آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۰×۱۵×۳ سانتی متر در سن ۲۸ روز، نتایج در جدول (۷) نشان داده شده‌اند. این جدول همچنین نتایج مربوط به نسبت‌های مقاومت کششی به مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهد. روند کلی مقاومت کششی مشابه آنچه که در مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مشاهده شده است دیده می‌شود (شکل (۴)).

با توجه به جدول (۷) اضافه نمودن افزودنی منبسط شونده به طرح شاهد، موجب کاهش ۳/۵ درصدی مقاومت کششی غیر مستقیم می‌شود. همچنین با جایگزینی سیمان پرتلند توسط درصد‌های مختلف پوزولان‌های ژئولیت و میکروسیلیس روند افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم نسبت به بتن خودتراکم حاوی مواد افزودنی منبسط شونده مشاهده می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند افزایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روز در اثر استفاده از پوزولان‌های ژئولیت و میکروسیلیس توأم با افزودنی منبسط شونده نسبت به بتن حاوی منبسط شونده تنها (E) در مقایسه با روند افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روز در این بتن‌ها خیلی بیشتر می‌باشد. مقاومت کششی مخلوط‌های بتن خودتراکم منبسط شونده با جایگزینی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد میکروسیلیس نسبت به بتن خودتراکم حاوی مواد منبسط شونده تنها به ترتیب ۷/۳، ۱۵/۵ و ۱۹/۲ درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت کششی مخلوط‌های بتن خودتراکم منبسط شونده با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ژئولیت نسبت به بتن خودتراکم حاوی مواد منبسط شونده تنها به ترتیب ۱۵، ۲۲/۷ و ۲۳/۲ درصد افزایش یافته است. در نتیجه در بتن‌های حاوی مواد پوزولانی ژئولیت افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم بیشتری نسبت به بتن‌های حاوی مواد پوزولانی میکروسیلیس مشاهده شده است. این رفتار می‌تواند مرتبط با تشکیل C-S-H ثانوی بعلت واکنش پوزولانیک و مصرف هیدروکسید کلسیم باشد، با توجه به حساسیت زیادی که مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به تخلخل خمیر سیمان و ناحیه انتقال، شکل ساختار ناحیه انتقال و وجود کریستال‌های هیدروکسید کلسیم دارند، می‌توان گفت که ژئولیت طبیعی ساختار ناحیه انتقال را قبل از ۲۸ روز بهبود می‌بخشد.

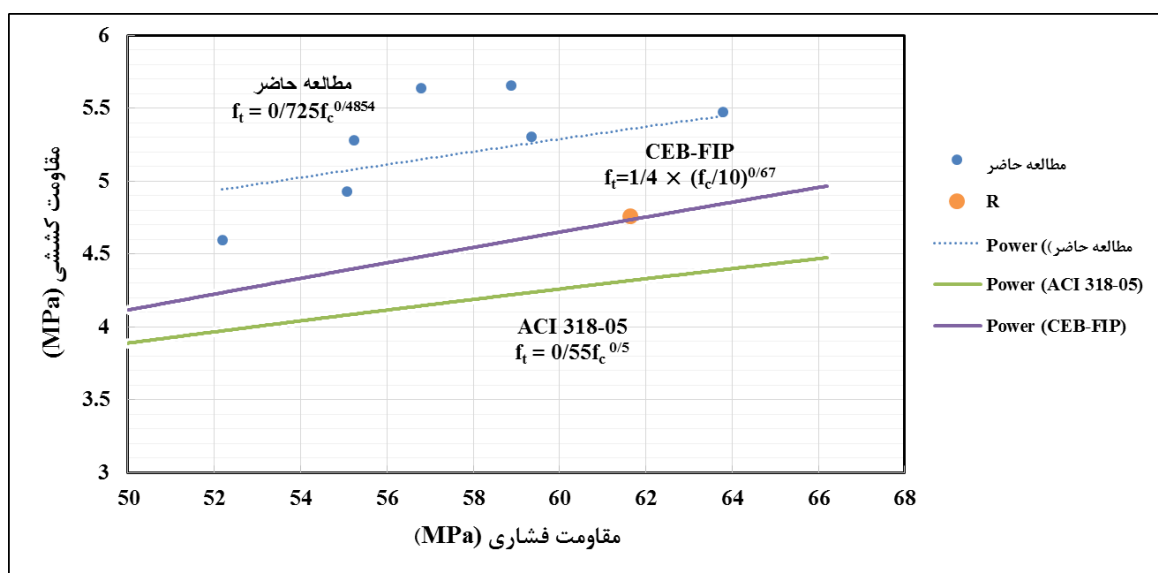
تغییرات مقاومت فشاری با مقاومت کششی بتن‌های خودتراکم منبسط شونده حاوی پوزولان‌های ژئولیت و میکروسیلیس بررسی شده‌اند و نتایج آن‌ها در شکل (۵) آورده شده است. از شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی افزایش می‌یابد. براساس نتایج ۲۸ روز، معادله رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمودار فوق‌الذکر آورده شده است. این معادله مقادیر بیشتری را نسبت به معادلات آئین‌نامه‌های (CEB-FIP) و (ACI-318-05) نشان می‌دهد [۲۱-۲۲]. همچنین همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود رابطه بین مقاومت فشاری و کششی بتن مرجع (R) روی خط پیش‌بینی آئین‌نامه CEB-FIP منطبق شده است.

جدول ۷- مقاومت کششی غیرمستقیم بتن خودمترکم منبسط شونده

نمونه	درصدهای مختلف میکروسیلیس و زئولیت	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین مقاوت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	ft/fc
R	۰	۴/۸۳۵	۴/۶۸۷	۴/۷۶۱	۴/۷۶۱	۶۱/۶۴	۰/۰۷۷
E	۰	۴/۴۶۵	۴/۵۷	۴/۷۵	۴/۵۹۵	۵۲/۱۸	۰/۰۸۸
EM 2.5	۲/۵	۴/۸۴۴	۴/۸۷۸	۵/۰۶۵	۴/۹۲۹	۵۵/۰۷	۰/۰۸۹
EM 5	۵	۵/۳۰۶	۵/۰۷۶	۵/۵۳۷	۵/۳۰۶	۵۹/۳۴	۰/۰۸۹
EM 7.5	۷/۵	۵/۳۷	۵/۷۸۲	۵/۲۷۶	۵/۴۷۶	۶۳/۷۹	۰/۰۸۶
EZ 5	۵	۵/۳۶۹	۵/۲۸۵	۵/۱۹۵	۵/۲۸۳	۵۵/۲۳	۰/۰۹۶
EZ 10	۱۰	۵/۶۴۹	۵/۶۶۸	۵/۵۹۵	۵/۶۳۷	۵۶/۷۹	۰/۰۹۹
EZ 15	۱۵	۵/۸۳۱	۵/۶۱۱	۵/۵۳۵	۵/۶۵۹	۵۸/۸۷	۰/۰۹۶



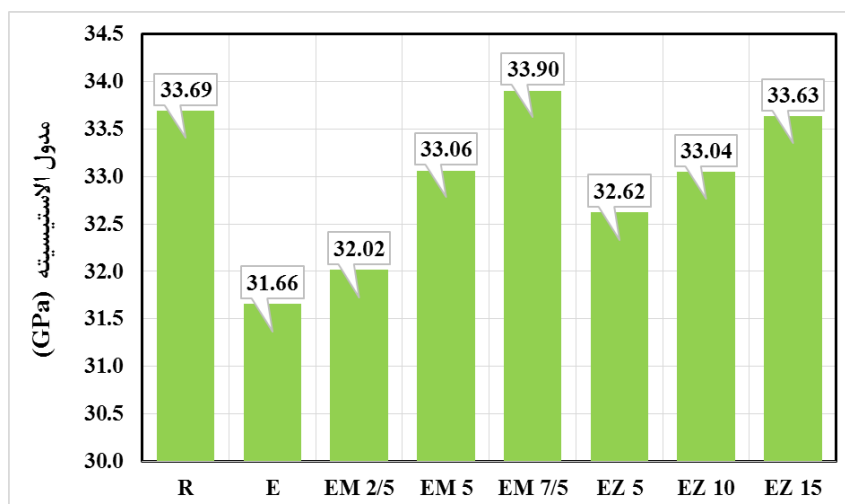
شکل ۴- مقاومت کشش غیر مستقیم (برزیلی) نمونه ها حاوی درصدهای مختلف میکروسیلیس و زئولیت



شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری با مقاومت کششی

۳-۲-۴- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته

جدول (۸) و شکل (۶) مدول الاستیسیته استاتیکی بدست آمده برای بتن های خودتراکم منبسط شونده حاوی درصد‌های مختلف جایگزینی زئولیت و میکروسیلیس را نسبت به مدول الاستیسیته بتن شاهد و بتن شاهد حاوی مواد افزودنی منبسط شونده را نشان می دهد. از آنجائیکه تغییر شکل حاصل در بتن علاوه بر ارتباط با تغییر شکل الاستیک سنگدانه ها به تغییر شکل حاصل از خمیر سیمان نیز بستگی دارد، لذا نوع پوزولان مصرفی بر روی مدول الاستیسیته تاثیر گذار می باشد. از این رو، افزایش در مدول الاستیسیته بتن های حاوی زئولیت و میکروسیلیس نسبت به بتن حاوی مواد منبسط شونده تنها (E) را می توان به علت اتصال بهتر بین بافت و سنگدانه ها دانست. بدین ترتیب با افزایش جانشین سازی سیمان پرتلند با پوزولان های زئولیت و میکروسیلیس افزایش تدریجی مدول الاستیسیته مشاهده شده است. همچنین در جدول (۸) می توان مشاهده نمود که اعداد مدول الاستیسیته حاصل شده از نمونه های آزمایشگاهی بسیار نزدیک با معادلات پیش بینی پیشنهاد شده توسط آئین نامه های ACI-363R-92 و CEB-FIP 1990 می باشد [۲۱ و ۲۳]. با دقت بالاتر می توان گفت که معادله مدول الاستیسیته ارائه شده توسط CEB-FIP 1990 دارای تقریب قابل قبولی برای پیش بینی بتن های حاصل در این پژوهش می باشد.



شکل ۶- مدول الاستیسیته نمونه های شاهد و خودتراکم منبسط شونده و نمونه های حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس و زئولیت

جدول ۸- نتایج مدول الاستیسیته (GPa)

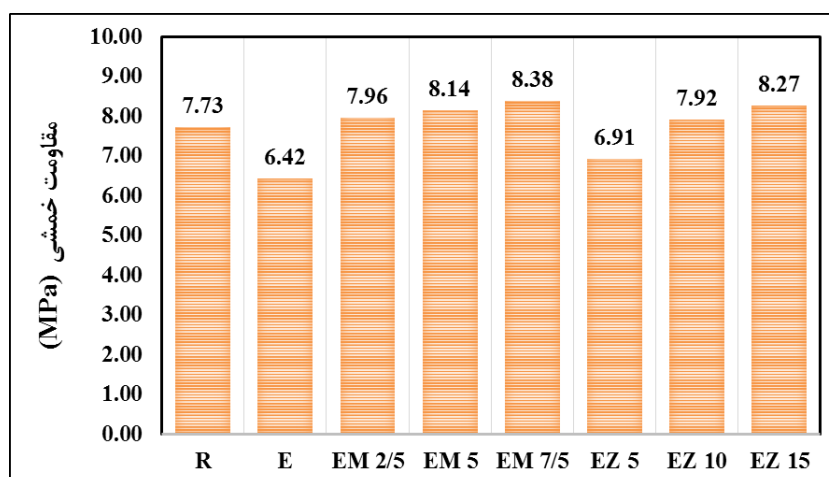
نمونه	درصد‌های مختلف میکروسیلیس و زئولیت	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین مدول الاستیسیته	پیش بینی مدول الاستیسیته توسط ACI 363R-92	پیش بینی مدول الاستیسیته توسط CEB-FIP 1990
R	۰	۳۳/۶۹	۳۳/۹۵	۳۳/۴۲	۳۳/۶۹	۳۲/۹۵	۳۳/۳۹
E	۰	۳۱/۴۵	۳۲/۰۷	۳۱/۴۷	۳۱/۶۶	۳۰/۸۷	۳۱/۷۶
EM 2.5	۲/۵	۳۱/۶۶	۳۲/۴۸	۳۱/۹۲	۳۲/۰۲	۳۱/۵۳	۳۲/۲۸
EM 5	۵	۳۳/۱۱	۳۳/۰۰	۳۳/۰۷	۳۳/۰۶	۳۲/۴۷	۳۳/۰۱
EM 7.5	۷/۵	۳۳/۸۴	۳۳/۹۲	۳۳/۹۴	۳۳/۹۰	۳۳/۴۱	۳۳/۷۴
EZ 5	۵	۳۳/۱۰	۳۲/۱۹	۳۲/۵۸	۳۲/۶۲	۳۱/۵۶	۳۲/۳۱
EZ 10	۱۰	۳۳/۰۷	۳۳/۱۳	۳۳/۹۳	۳۳/۰۴	۳۱/۹۱	۳۲/۵۸
EZ 15	۱۵	۳۳/۴۶	۳۳/۷۷	۳۳/۶۶	۳۳/۶۳	۳۲/۳۶	۳۲/۹

۳-۲-۵- نتایج مقاومت خمشی

میانگین نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه مخلوط های مختلف در شکل (۷) و جدول (۹) آورده شده است. همانطور که می توان از نمودار مشاهده نمود با درصد های مختلف جایگزینی مواد پوزولانی نتایج حاصل از روند مقاومت خمشی برای تمامی مخلوط ها، مشابه نتایج مقاومت فشاری می باشد. این روند مورد انتظار را می توان به بهبودی بیشتری که در ریزساختار نمونه ها با واکنش های هیدراسیون ادامه دار در حال وقوع می باشد نسبت داد.

جدول ۹- مقاومت خمشی (MPa)

نمونه	درصد های مختلف میکروسیلیس و زئولیت	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
R	۰	۷/۷۷۵	۷/۶۹۲	۷/۷۰۸	۷/۷۲۵
E	۰	۶/۳۲۸	۶/۴۸۲	۶/۴۴۸	۶/۴۱۹
EM 2.5	۲/۵	۸/۰۱۲	۷/۹۶۴	۷/۸۹۱	۷/۹۵۶
EM 5	۵	۸/۰۶۱	۸/۱۵۵	۸/۲۰۱	۸/۱۳۹
EM 7.5	۷/۵	۸/۳۲	۸/۴۲۳	۸/۳۹۲	۸/۳۷۸
EZ 5	۵	۶/۸۶۲	۶/۹۵۱	۶/۹۲۶	۶/۹۱۳
EZ 10	۱۰	۷/۸۴۹	۷/۹۵۷	۷/۹۵۴	۷/۹۲۰
EZ 15	۱۵	۸/۱۷۶	۸/۲۸۸	۸/۵۵۳	۸/۲۷۲



شکل ۷- مقاومت خمشی نمونه ها حاوی درصد های مختلف منبسط شونده، میکروسیلیس و زئولیت

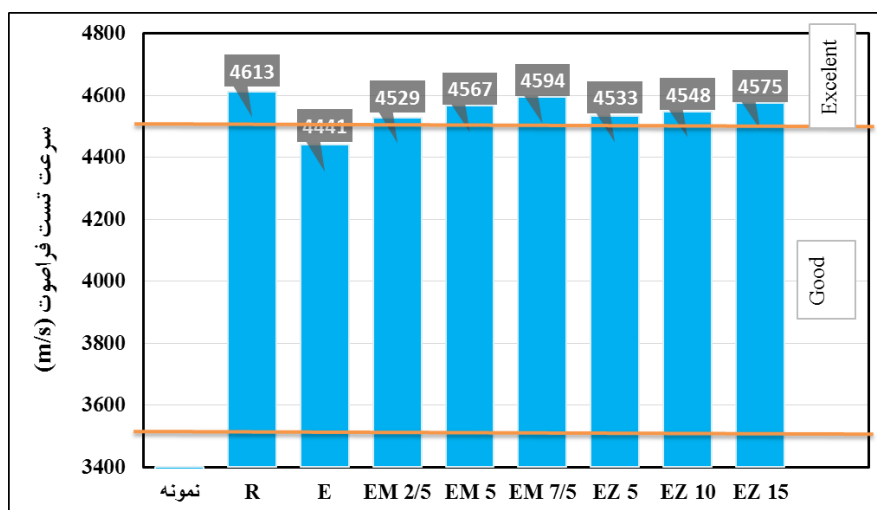
همچنین می توان از نمودار مشاهده نمود، زمانی که به مخلوط شاهد افزودنی منبسط شونده اضافه شود مقدار قابل توجهی کاهش در نتایج مقاومت خمشی نمونه های حاصل می گردد. همان گونه که در نمودار مذکور دیده می شود با افزودن منبسط شونده کاهش ۱۷ درصدی مقاومت خمشی نمونه های حاوی مواد منبسط شونده تنها نسبت به نمونه های مرجع مشاهده می شود. همچنین با بررسی نمودار ارائه شده، مقاومت خمشی نمونه ها با جایگزینی سیمان توسط ۱۵ درصد زئولیت و ۷/۵ درصد میکروسیلیس نسبت به بتن خودتراکم منبسط شونده به ترتیب افزایش ۲۸/۸ و ۳۰/۵ درصدی مشاهده می شود.

۳-۲-۶- ارزیابی سرعت امواج اولتراسونیک

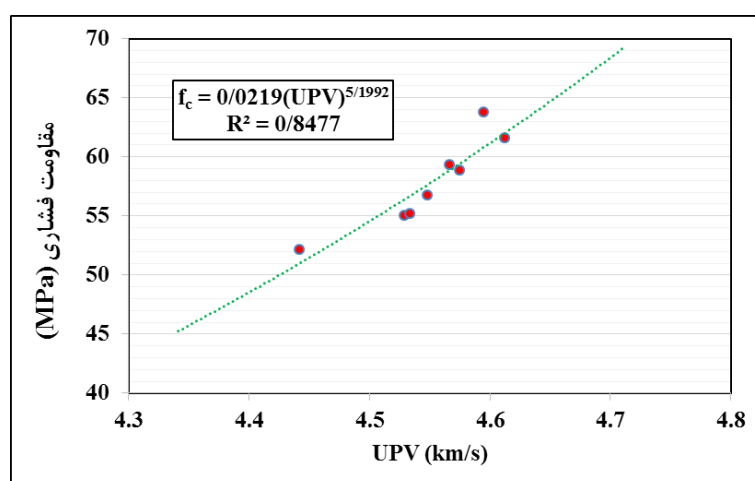
سرعت فراصوت مخلوط های بتن خودتراکم منبسط شونده حاوی درصد های مختلف زئولیت و میکروسیلیس در شکل (۸) و جدول (۱۰) نشان داده شده است. محدوده تغییرات سرعت فراصوت در سن ۲۸ روز برای مخلوط های مختلف بین ۴۴۴۱ الی ۴۶۱۳ متر بر

ثانیه می باشد. کیفیت بتن پیشنهاد شده توسط وایتهرست^۹ به صورت شرایط عالی، خوب، مشکوک، ضعیف و خیلی ضعیف به ترتیب دارای مقادیر سرعت های فراصوت ۴۵۰۰ و به بالا، ۳۵۰۰ الی ۴۵۰۰، ۳۰۰۰ الی ۳۵۰۰، ۲۰۰۰ الی ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر بر ثانیه و کمتر از آن می باشد [۲۴]. بر این اساس اکثر مخلوط های بتن در کیفیت عالی قرار می گیرند. همچنین مشاهده می شود که در روند مشابه با تغییرات مقاومت فشاری، افزایش در مقادیر سرعت های فراصوت با افزایش مقادیر مختلف جایگزینی سیمان توسط پوزولان های زئولیت و میکروسیلیس رخ می دهد.

یکی از روش های غیر مخرب برای تعیین مقاومت فشاری استفاده از منحنی کالیبره شده سرعت فراصوت و مقاومت فشاری می باشد. رابطه بین مقاومت و سرعت فراصوت به فاکتورهای زیادی وابسته بوده و نیاز به اصلاح آن برای بتن با ترکیبات مختلف می باشد. در شکل (۸) بطور موردی تاثیر پودر منبسط شونده بر سرعت امواج اولتراسونیک نشان داده شد. روند حداکثری در بیشتر نمودارهای به دست آمده از این دست بیان کننده این واقعیت است که با بکارگیری درصد پودر منبسط شونده در درصد های زئولیت و میکروسیلیس مشخص در شرایط نگهداری معلوم، سرعت امواج اولتراسونیک افزایش می یابد. بدین منظور تاثیر پوزولان های زئولیت و میکروسیلیس بر روی ارتباط بین مقاومت فشاری و سرعت فراصوت در بتن های خودتراکم منبسط شونده در شکل (۹) ارزیابی شده است.



شکل ۸- سرعت تست فراصوت (m/s)



شکل ۹- تغییرات مقاومت فشاری با سرعت تست فراصوت

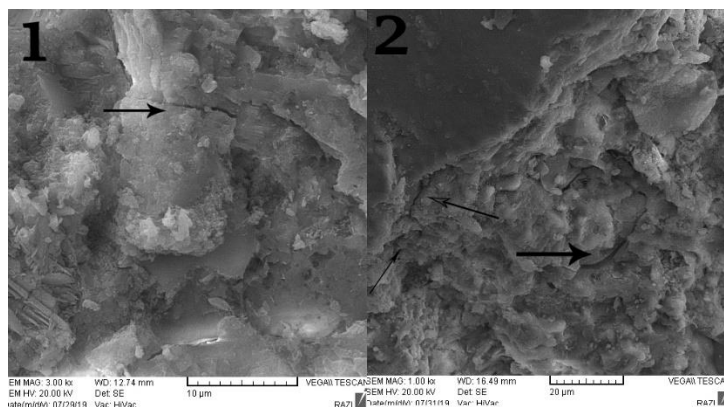
⁹ Whitehurst

جدول ۱۰- سرعت تست فراصوت (m/s)

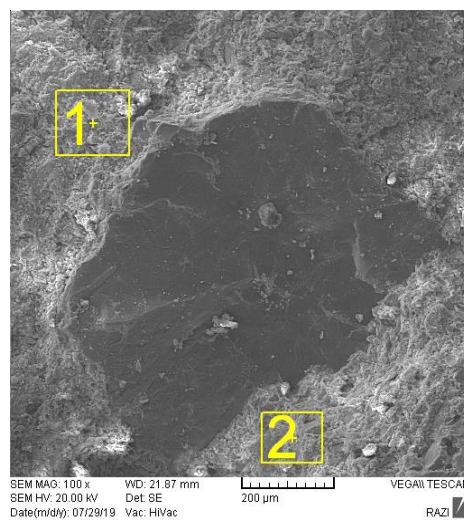
مقاومت فشاری (MPa)	میانگین سرعت (m/s)	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	درصدهای مختلف میکروسیلیس و ژئولیت	نمونه
۶۱/۶۴	۴۶۱۲/۵۱	۴۶۱۵/۴۵	۴۶۰۱/۱۶	۴۶۲۰/۹۲	۰	R
۵۲/۱۸	۴۴۴۱/۴۱	۴۴۶۴/۲۹	۴۴۴۵/۴۵	۴۴۱۴/۵۰	۰	E
۵۵/۰۷	۴۵۲۸/۶۴۷	۴۴۵۳/۳۳	۴۵۸۷/۱۶	۴۵۴۵/۴۵	۲/۵	EM 2.5
۵۹/۳۴	۴۵۶۶/۶۵	۴۵۴۵/۴۵	۴۵۶۶/۲۱	۴۵۸۸/۲۹	۵	EM 5
۶۳/۷۹	۴۵۹۴/۲۶	۴۵۶۶/۲۱	۴۶۰۸/۲۹	۴۶۰۸/۲۹	۷/۵	EM 7.5
۵۵/۲۳	۴۵۳۳/۰۹	۴۴۲۴/۷۸	۴۶۰۸/۲۹	۴۵۶۶/۲۱	۵	EZ 5
۵۶/۷۹	۴۵۴۸/۰۹	۴۵۴۵/۴۵	۴۵۳۳/۹۴	۴۵۶۴/۸۹	۱۰	EZ 10
۵۸/۸۷	۴۵۷۵/۰۳	۴۵۴۵/۸۹	۴۵۹۴/۸۹	۴۵۸۴/۳۰	۱۵	EZ 15

۳-۳- بررسی ریز ساختار با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر اخذ شده در مرکز پژوهشگاه مواد و متالوژی رازی تهران شکل بر روی ناحیه انتقال اطراف سنگدانه ها در طرح های شاهد (R)، با مواد منبسط شونده (E)، ۵ درصد میکروسیلیس (EM5) و ۵ درصد ژئولیت (EZ5) در سن ۱۸۰ روزه صورت گرفته است. در طرح شاهد مشاهده می شود مطابق شکل های (۱۰) و (۱۱) در اطراف ناحیه سنگدانه ترک های ریز بسیاری مشاهده می شود. پیوندهای صورت گرفته بین ذرات خمیر سیمان و کریستال های تشکیل شده در شاهد حکایت از انبوهی از فضای خالی و رشد اترینگایت و پرتلندیت در بین ذرات تشکیل دهنده خمیر سیمان دارد. با توجه به عدم وجود مواد پوزولانی، تخلخل موجود در ماتریس خمیر به علت وجود هیدروکسید کلسیم به طور کامل متراکم نشده است و می تواند دلیلی بر عملکرد نا مطلوب آن نسبت به مخلوطهای حاوی مواد پوزولانی در خواص مکانیکی و دوام باشد.

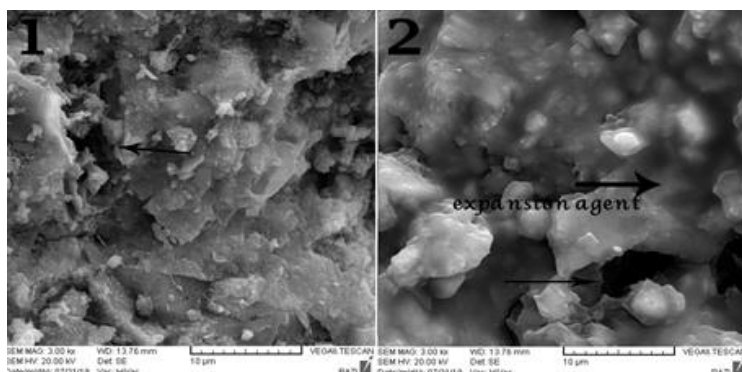


شکل ۱۱- بررسی ریز ساختار ناحیه ۱ و ۲ با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر طرح R

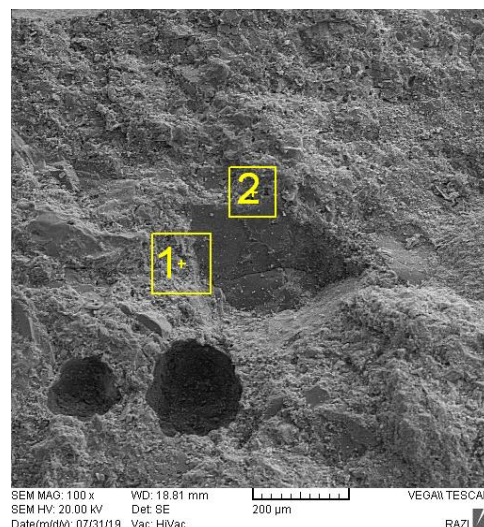


شکل ۱۰- ریز ساختار طرح R با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر

در طرح E مطابق شکل (۱۲) مشاهده می شود که ریز ساختار بتن بسیار متراکم شده است اما در سطح بتن حفراتی به وجود آمده است. همچنین در شکل (۱۳) نیز نشان می دهد که مواد منبسط شونده ترک های ریز را کاهش داده است اما سبب به وجود آمدن تخلخل حفره ای شده است همچنین مواد منبسط شونده ناحیه انتقال را متراکم نموده است.

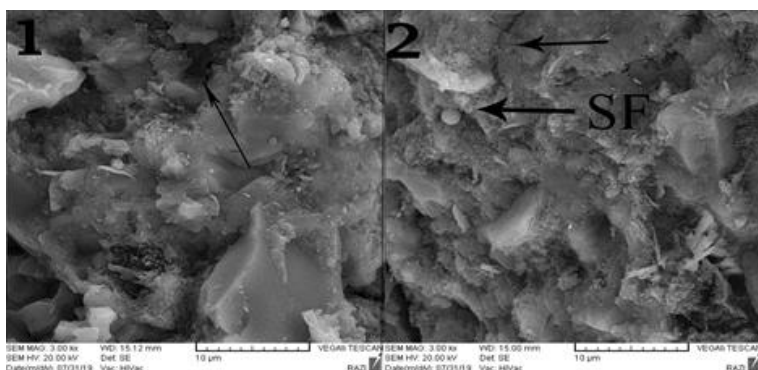


شکل ۱۳- بررسی ریز ساختار ناحیه ۱ و ۲ با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر طرح E

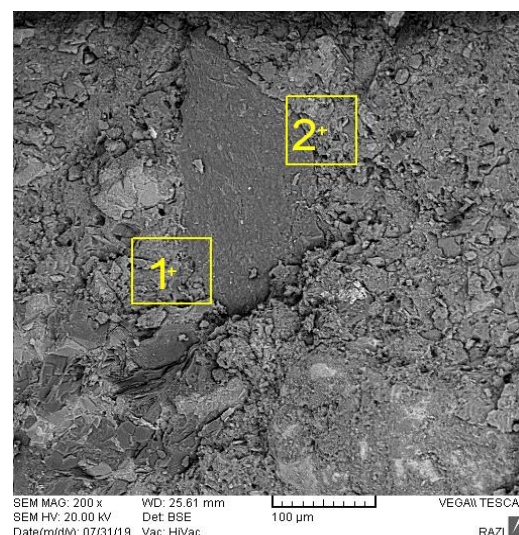


شکل ۱۲- ریز ساختار طرح E با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر

در طرح ۵ درصد میکروسیلیس مطابق شکل (۱۴) مشاهده می شود با وجود استفاده از مواد منبسط شونده اما حفره مشاهده نمی گردد و ساختار متراکم تری مشاهده می گردد. افزودن میکروسیلیس سبب تغییر در شکل، اندازه و مقدار کریستال های $\text{Ca}(\text{OH})_2$ می شود به طوری که بدون حضور میکروسیلیس هم پوشانی و اتصال در ژل C-S-H توسط تعداد زیادی کریستال های $\text{Ca}(\text{OH})_2$ صورت گرفته است که به علت اینکه کریستال ها ظرفیت چسبندگی کمتری دارند این موضوع سبب می شود در ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه اتصال خوبی برقرار نشود و به صورت نواحی مستعد شکافت رفتار کنند همچنین در مقابل حملات شیمیایی و جمع شدگی بسیار ضعیف می باشد. با اضافه کردن میکروسیلیس در شکل (۱۵) مشاهده می گردد که سبب تغییر در تولیدات هیدراسیون ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده است که کریستال های $\text{Ca}(\text{OH})_2$ به کریستال های کوچک و به مقدار کمتری نسبت به حالت قبل تبدیل شده است. با اشاره به این نکته که توده های سفید رنگ در تصاویر میکروسکوپ الکترونی همان کریستال های هیدروکسید کلسیم هستند.

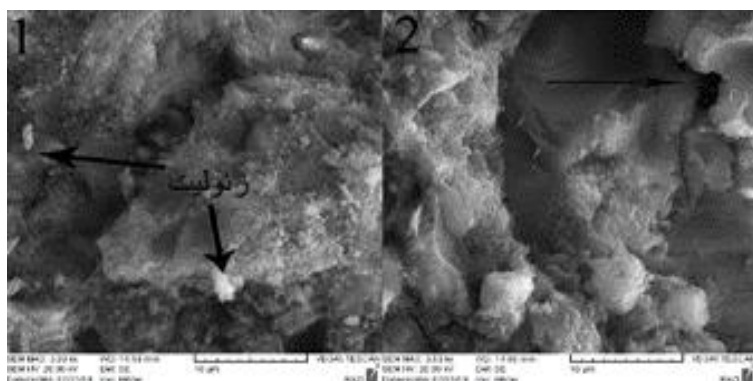


شکل ۱۵- بررسی ریز ساختار ناحیه ۱ و ۲ با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر طرح EM5

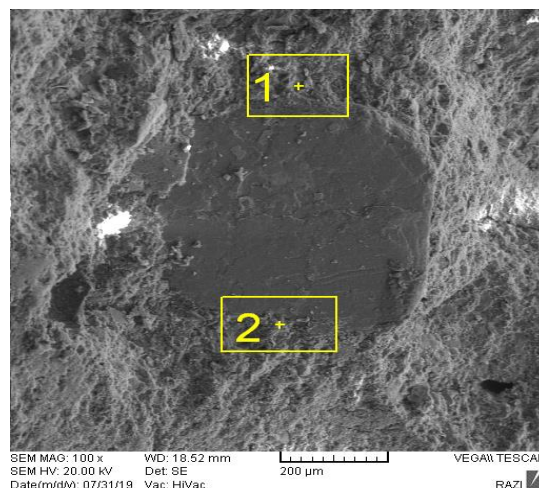


شکل ۱۴- ریز ساختار طرح EM5 با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر

در شکل (۱۶) مشاهده می شود که زئولیت سبب ساختار متراکم ناحیه انتقال می شود اما تخلخل کروی به مقدار کمی مشاهده می شود. با توجه به اینکه زئولیت خاصیت پوزولانی قابل توجهی دارد فعالیت پوزولانی زئولیت ها به علت وجود SiO_2 و Al_2O_3 با ترکیبات شیمیایی بتن واکنش ایجاد می کند. این ترکیبات با Ca(OH)_2 ایجاد شده در طول هیدراتاسیون سیمان واکنش می دهند و آن را تبدیل به ژل C-S-H آلومینوسیلیکات هیدراته می کنند. در نتیجه ریز ساختار بتن سخت شده را بهبود می بخشد و بتن، نفوذ ناپذیرتر می شود. هنگامی که آب به مخلوط زئولیت و سیمان اضافه شود، به علت بالا بودن PH محلول، OH^- زنجیره ی آلومینوسیلیکاتی زئولیت شروع به تجزیه شدن می کند، مطابق شکل (۱۷). در اثر تجزیه شدن زنجیره آنیون های $[\text{SiO(OH)}_3]^-$ و $[\text{Al(OH)}_4]^-$ با Ca^{2+} واکنش داده و ترکیبات هیدراته سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم تولید می شود که سبب افزایش تراکم و مقاومت بتن می گردد.



شکل ۱۷- بررسی ریز ساختار ناحیه ۱ و ۲ با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر طرح EZ5



شکل ۱۶- ریز ساختار طرح EZ5 با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر

۳-۴- کرنش جمع شدگی

تمام خصوصیات ویژه بتن خودتراکم (SCC) ممکن است تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار جمع شدگی آن داشته باشد. جمع شدگی بتن به عنوان کاهش حجم بتن با زمان پس از سخت شدن بتن در نمونه های بدون بارگذاری تعریف می شود. این انقباض ناشی از تغییر در میزان رطوبت بتن است. انواع مختلف جمع شدگی در بتن وجود دارد: جمع شدگی پلاستیک (به دلیل از بین رفتن آب در اثر تبخیر از سطح بتن در طول حالت پلاستیک)، جمع شدگی شیمیایی (به دلیل هیدراتاسیون بتن)، جمع شدگی ذاتی (به دلیل خشک شدن خود به خود پس از گیرش نهایی)، جمع شدگی کربوناسیون (به دلیل واکنش شیمیایی بین سیمان هیدراته شده و دی اکسید کربن موجود در هوا)، و جمع شدگی خشک (به دلیل تبخیر آب داخلی در بتن سخت شده). کرنش های جمع شدگی خشک (DS) به عنوان یکی از نگرانی های اصلی برای زوال بتن در نظر گرفته می شود، که باعث ایجاد تنش کششی در داخل بتن می شود که منجر به ترک خوردگی شده و باعث قادر ساختن نفوذ مواد مضر به داخل بتن می گردد که بر عوامل اقتصادی ساخت و ساز همانند دوام، قابلیت سرویس دهی و قابلیت اطمینان بلند مدت تاثیر می گذارد.

جمع شدگی خشک در بتن به ۳ فاکتور کنترل کننده وابسته است: نسبت آب به مواد سیمانی، مقدار حجم خمیر در بتن و میزان هیدراتاسیون. در این پژوهش تمامی ۸ مخلوط دارای نسبت آب به مواد سیمانی و حجم خمیر یکسان بوده اند. تاثیر جایگزینی پوزولان طبیعی زئولیت و پوزولان میکروسیلیس با مواد سیمانی بر روی جمع شدگی خشک بتن خودتراکم منبسط شونده مورد تحقیق قرار گرفته است. در این پژوهش اندازه گیری جمع شدگی خشک بر روی نمونه های بتنی با ابعاد $7/537/5328/5$ سانتی متر، ۲۴ ساعت بعد از بتن ریزی و قالب برداری انجام شده است. قابل ذکر است که مقادیر کرنش جمع شدگی خشک مخلوط های مورد مطالعه، به مدت طولانی در سنین ۲، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸، ...، ۱۶۱، ۲۱۰ روز بعد از قرائت اولیه در ۲۴ ساعت بعد از بتن ریزی ثبت شده است. در طول مدت آزمایش تمام نمونه ها در ۲ شرایط متفاوت عمل آوری شدند: (۱) سری اول از نمونه ها در فضای آزاد اتاق با رطوبت نسبی 50 ± 5 درصد نگهداری

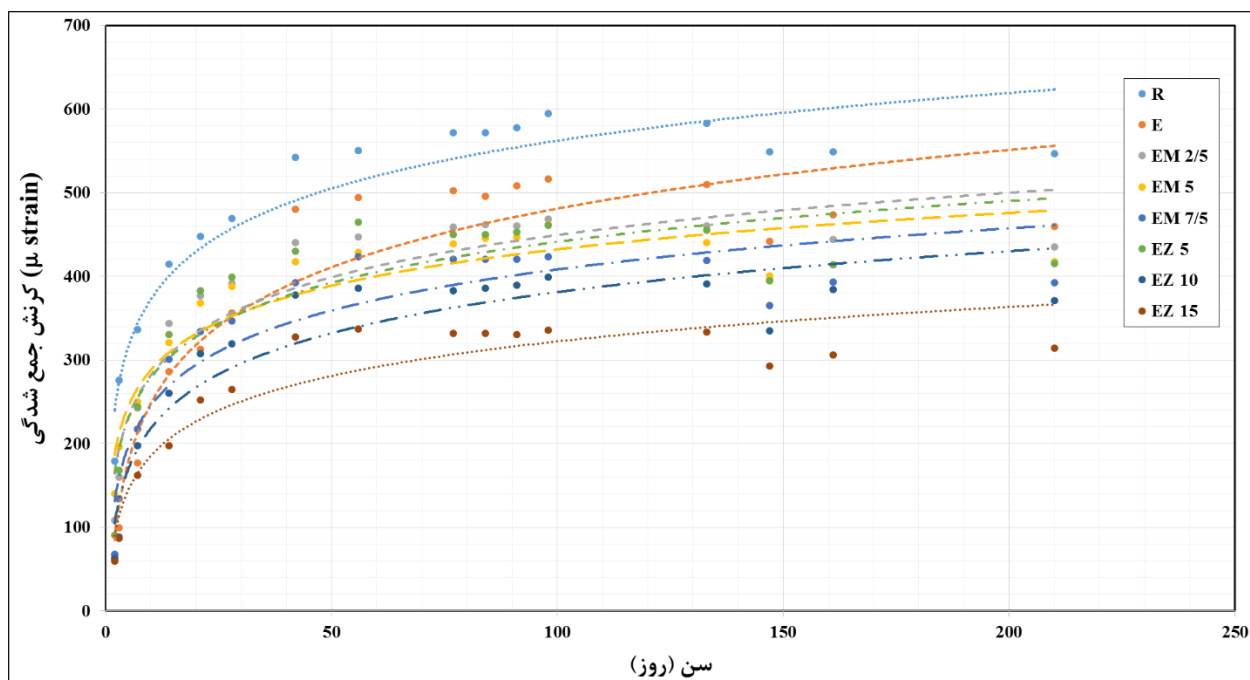
شدند، ۲) سری دوم از نمونه ها در دستگاه اون با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۸۰ درصد عمل آوری شدند. شکل های (۱۸) – (۲۷) جمع شدگی خشک مخلوط ها را نشان می دهد، که در سنین مختلف رسم شده اند. مطابق این نمودارها، استفاده از پوزولان طبیعی زئولیت و پوزولان میکروسیلیس منجر به کاهش قابل ملاحظه ای در جمع شدگی خشک می شود. همانطور که از نمودارها مشاهده می شود جمع شدگی خشک EZ15 و EM7.5 نسبت به بتن شاهد حاوی مواد منبسط شونده (E) در سن ۲۱۰ روز به ترتیب ۳۲ و ۱۵ درصد کاهش یافته اند. عوامل مختلفی می تواند موجب به دست آمدن این نتایج شود: جایگزینی سیمان توسط زئولیت و میکروسیلیس موجب کاهش محتوای آهک مخلوط ها بعلا مقادیر کم آهک موجود در زئولیت و عدم وجود آن در میکروسیلیس مورد بررسی در این مطالعه می شود. به دلیل کاهش مقدار آهک سرعت هیدراتاسیون بتن کاهش می یابد. همچنین می توان گفت که واکنش های هیدراتاسیون میکروسیلیس موجب کاهش حرکت آب موجود در ژل به خارج می شود که این امر سبب بالا رفتن رطوبت نسبی داخلی در قیاس با عدم حضور میکروسیلیس می باشد و نتیجتاً با توجه به اینکه رطوبت نسبی با جمع شدگی رابطه عکس دارد این امر سبب کاهش در جمع شدگی خشک می شود. براساس مطالعات (نجیمی) استفاده از زئولیت طبیعی منجر به کاهش قابل توجهی در جمع شدگی خشک در شرایط خشک می شود. جمع شدگی خشک مخلوط ها با جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد سیمان در سن ۹۰ روز به ترتیب در حدود ۸۴ درصد و ۶۴ درصد نسبت به بتن مرجع بوده است [۶]. می توان گفت که قابلیت عمل آوری داخلی زئولیت طبیعی مشابه بتن های سبک می باشد. این به این معنا است که زئولیت طبیعی به عنوان یک ماده متخلخل بخشی از آب بتن تازه را جذب می کند و این آب به تدریج از زئولیت طبیعی در طول دوران سخت شدن بتن خارج می گردد. همچنین (جینگ^{۱۰} و همکاران) تاثیر جایگزینی ۲، ۴ و ۸ درصد پودر زئولیت بر روی جمع شدگی بتن خودتراکم را بررسی نمودند، براساس نتایج حاصله با جایگزینی پودر زئولیت، جمع شدگی بتن خودتراکم در سنین اولیه عمل آوری با کاهش زیادی روبرو شده است. این امر به دلیل ساختار متخلخل داخلی زئولیت می باشد که می تواند آب را برای بتن خودتراکم جذب و آزاد نماید، با افزایش زمان هیدراتاسیون آب موجود در پودر زئولیت به تدریج آزاد می شود که این امر سبب افزایش رطوبت نسبی داخلی بتن خودتراکم می شود. این امر نشان می دهد که پودر زئولیت به عنوان مواد خود عمل آور تاثیر بسیار خوبی بر روی عمل آوری دارد، که می تواند موجب افزایش رطوبت نسبی داخلی در بتن خودتراکم شود [۲۵].

در حالی که، نتایج مغایر با این مشاهدات توسط جانا^{۱۱} و کسای^{۱۲} و همکاران به دست آمده است [۲۶ و ۲۷]. جانا مشاهده نمود که جمع شدگی خشک مخلوط های حاوی جایگزینی ۱۰ درصد و ۲۰ درصد زئولیت طبیعی مشابه یا کمی بیشتر از بتن شاهد می باشد. در حالی که با جایگزینی ۳۰ درصد سیمان توسط زئولیت، جمع شدگی خشک حدود ۲۰ درصد بیشتر از بتن شاهد بوده است. با این حال باید ذکر شود که آزمایشات جمع شدگی را بر روی منشورهای ملات را درست بعد از ۷ روز عمل آوری تر انجام داده است [۲۶]. کسای و همکاران جمع شدگی خشک را برای مخلوط ملات های حاوی انواع زئولیت کلینوپتیلولیت یا مورتنیت بررسی کرده است. هر دو ملات های حاوی کلینوپتیلولیت و مورتنیت جمع شدگی بیشتری را نسبت ملات شاهد نشان دادند و مخلوط ملات مورتنیت جمع شدگی کمی بیشتر نسبت به مخلوط ملات کلینوپتیلولیت نشان داده است [۲۷].

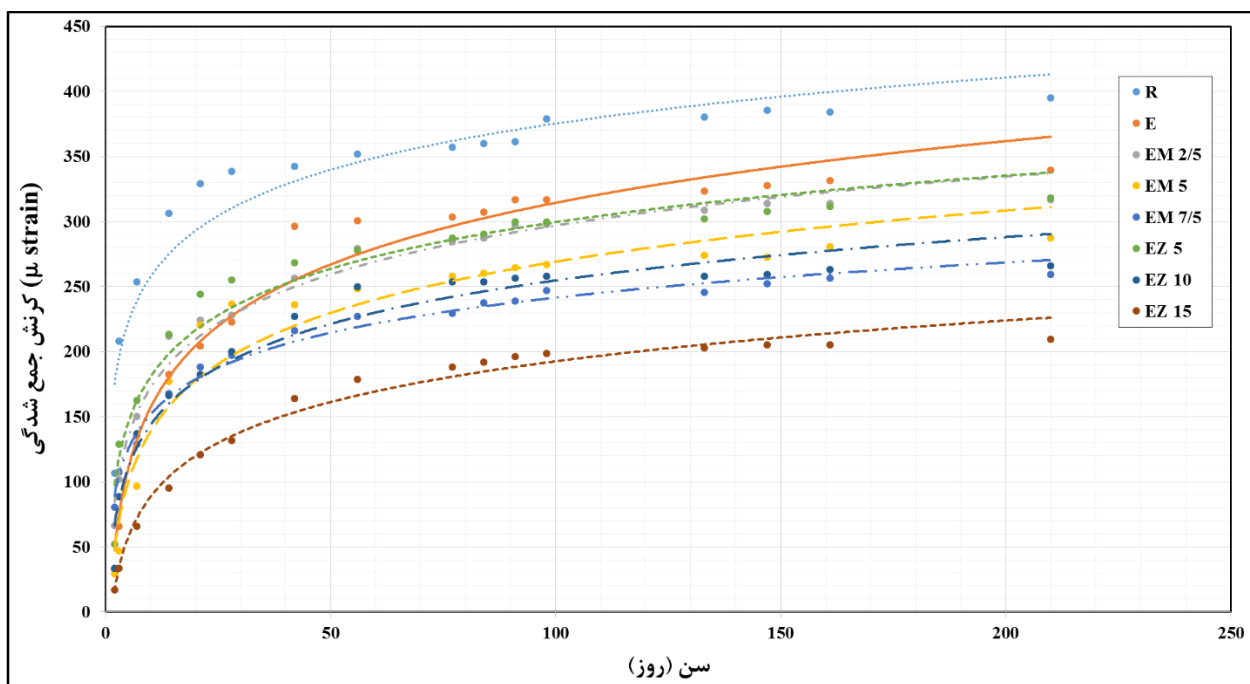
¹⁰ Jing

¹¹ Jana

¹² Kasai



شکل ۱۸- کرنش حاصل از جمع شدگی طرح‌ها مختلف در شرایط محیطی

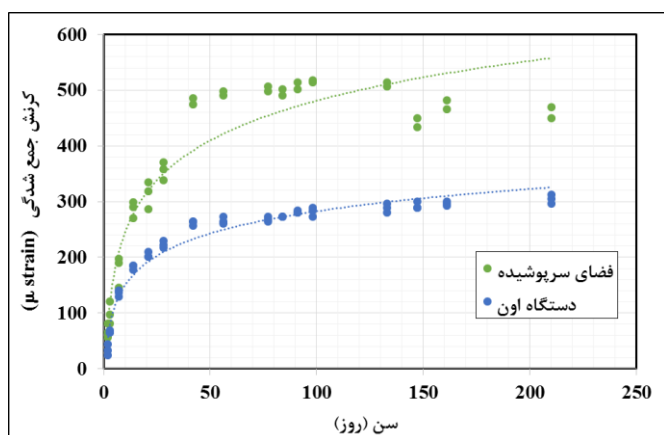


شکل ۱۹- کرنش حاصل از جمع شدگی طرح‌ها مختلف در دستگاه اون

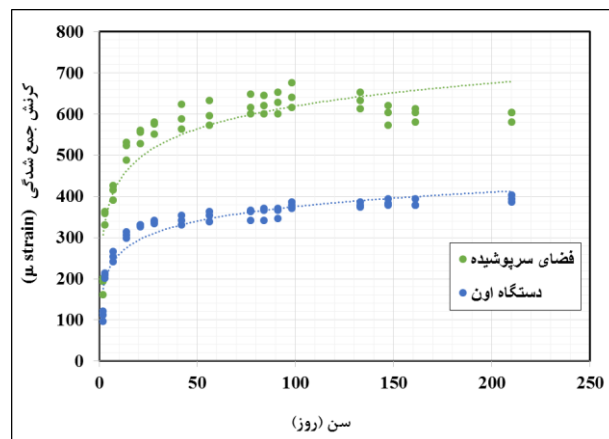
همان‌طور که از شکل‌های (۱۸) و (۱۹) مشاهده می‌شود می‌توان تاثیر مواد افزودنی منبسط شونده را بر روی بتن شاهد به خوبی ملاحظه نمود. مواد منبسط شونده نقش اساسی را بر روی جمع شدگی خصوصاً در سنین اولیه بازی می‌کنند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که کاهش در جمع شدگی در سنین بالاتر به صورت تدریجی و آهسته می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از جمع شدگی

از نمونه های ۲۱۰ روز، می توان اظهار نمود که اضافه نمودن مواد افزودنی منبسط شونده موجب تاخیر در جمع شدگی نمی شوند بلکه موجب کاهش آن می شوند.

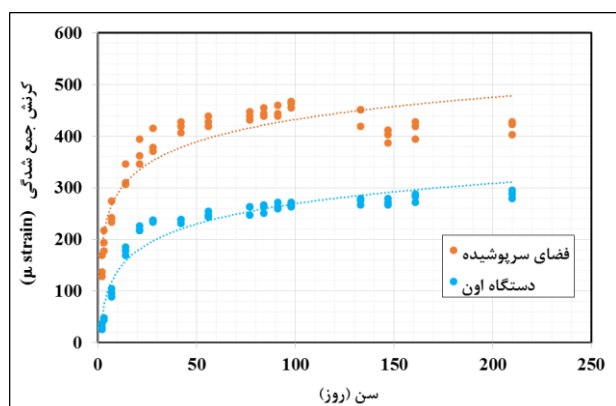
با بررسی شکل های (۲۰) الی (۲۷) مشاهده می شود که مقدار کرنش جمع شدگی برای مخلوط های نگهداری شده در محیط باز آزمایشگاه نسبت به مقادیر به دست آمده از مخلوط های عمل آوری شده در دستگاه اون بیشتر می باشد. این امر بدین دلیل می باشد که میزان رطوبت نسبی فضای آزمایشگاه همواره کمتر از میزان رطوبت دستگاه اون بوده و همانطور که انتظار می رود می بایست مقدار کرنش جمع شدگی با رطوبت نسبت عکس داشته باشد، که این امر در نمودارها مشهود می باشد.



شکل ۲۱- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده E

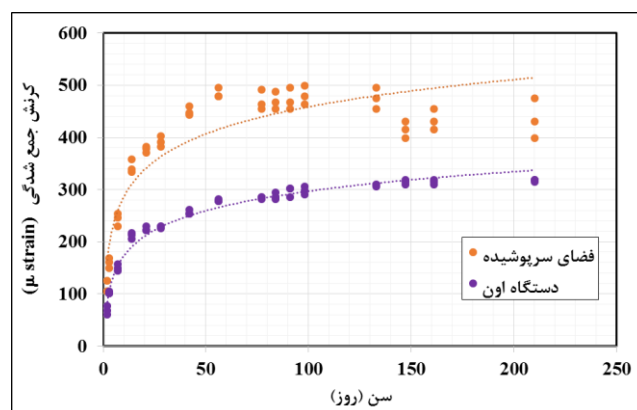


شکل ۲۰- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم شاهد R



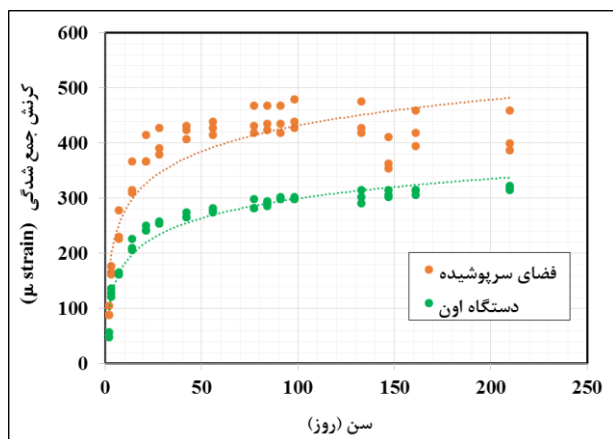
شکل ۲۳- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده

حاوی ۵ درصد میکروسیلیس EM5

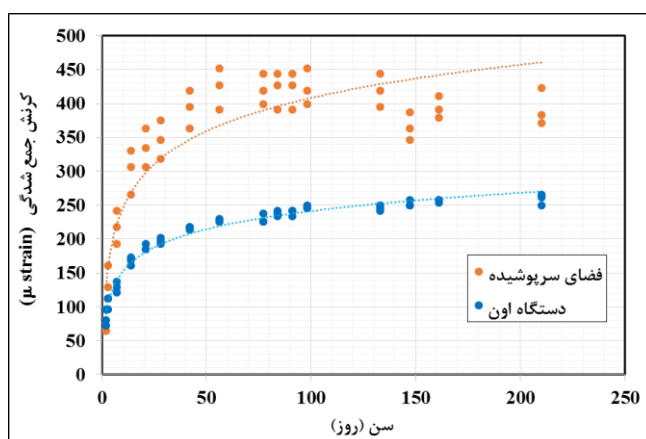


شکل ۲۲- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده

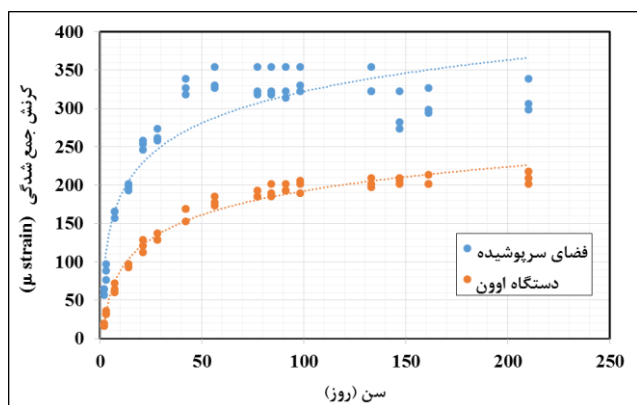
حاوی ۲/۵ درصد میکروسیلیس EM2.5



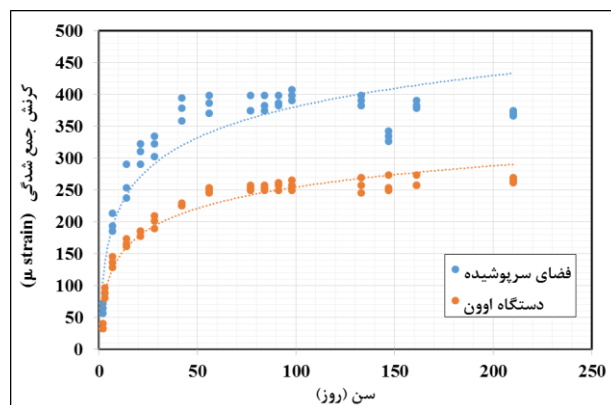
شکل ۲۵- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده حاوی ۵ درصد زئولیت EZ5



شکل ۲۴- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده حاوی ۷/۵ درصد میکروسیلیس EM7.5



شکل ۲۷- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده حاوی ۱۵ درصد زئولیت EZ15



شکل ۲۶- کرنش ناشی از جمع شدگی بتن خودمتراکم منبسط شونده حاوی ۱۰ درصد زئولیت EZ10

۴- نتیجه گیری

براساس آزمایشات صورت گرفته بر روی هشت طرح اختلاط بتن خودمتراکم و تعداد ۱۴۴ نمونه برای هر طرح و با اندازه گیری مقاومت های فشاری، کششی غیرمستقیم، ضریب الاستیسیته و خمشی تا سن ۲۸ روز و ثبت تغییر شکل های ناشی از جمع شدگی به مدت ۲۱۰ روز نتایج زیر حاصل می گردد.

۱. مقاومت فشاری بتن خودمتراکم حاوی مواد منبسط کننده (EA) به همراه پوزولان های میکروسیلیس و زئولیت نسبت به بتن خودمتراکم حاوی مواد منبسط کننده تنها، افزایش ۱۹ درصدی و ۱۴/۵ درصدی در سن ۱۸۰ روز را به ترتیب برای بتن های حاوی ۷/۵ درصد میکروسیلیس و ۱۵ درصد زئولیت داشته است.
۲. اثر افزودنی منبسط کننده بر روی مقاومت فشاری بتن خودمتراکم منبسط شونده فاقد پوزولان (E) نسبت به بتن شاهد (R) در سنین ۲۸ روز و ۱۸۰ روز به ترتیب به مقدار ۱۵/۵ درصد و ۴/۵ درصد کاهش پیدا نمود. بنابراین، این نتایج نشان می دهد که مواد منبسط کننده در سنین پایین باعث کاهش مقاومت بیشتر می گردند و این روند در سنین بالاتر کمتر اثر دارد.
۳. مقاومت کششی نمونه های بتنی خودمتراکم منبسط شونده با جایگزینی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد میکروسیلیس نسبت به بتن خودمتراکم شاهد حاوی مواد منبسط کننده (E) (فاقد پوزولان) به ترتیب ۷/۳، ۱۵/۵ و ۱۹/۲ و با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد

زئولیت نسبت به بتن خودمتراکم منبسط شونده شاهد (فاقد پوزولان (E)) به ترتیب ۱۵، ۲۲/۷ و ۲۳/۲ درصد افزایش یافته است.

۴. تصاویر SEM نشان داد طرح شاهد ترک‌های ریزی را اطراف سنگدانه‌ها نشان می‌دهد. ضمناً فضای خالی زیادی مشاهده می‌گردد. در حالی که طرح (E) (افزودن منبسط کننده)، مواد منبسط کننده باعث کاهش ترک‌های ریز شد، اما سبب بوجود آمدن تخلخل حفره‌ای گردیده است. در حالی که باعث تراکم ذرات بتن در ناحیه انتقال گردیده است.
۵. در بررسی کرنش جمع‌شدگی نتایج نشان داد که مواد منبسط شونده نقش اساسی را بر روی جمع‌شدگی خصوصاً در سنین اولیه بازی می‌کنند. همچنین کاهش در جمع‌شدگی در سنین بالاتر به صورت تدریجی و آهسته می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از جمع‌شدگی از نمونه‌های ۲۱۰ روز، می‌توان اظهار نمود که اضافه نمودن مواد افزودنی منبسط شونده موجب تاخیر در جمع‌شدگی نمی‌شوند بلکه موجب کاهش آن می‌شوند.

مراجع

- [۱] صدرممتازی، ع.، باران دوست، ج.، طهمورسی، ب.، طهموسی، م.ص.، (۱۳۹۴) "ارزیابی مکانیکی ملات های سیمانی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیس با درونیاب اسپیلین هموار شونده" هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران.
- [2] Saridemir, M., (2013) "Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 484-489.
- [3] Wongkeo W., Thongsanitgarn P., Ngamjarurojana A., Chaipanich A. (2014) "Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume", *Materials & Design Volume 64*, pp. 261-269.
- [4] Vejmelková, E., Koňáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Žumár, J., Rovnaníková, P., Keršner, Z., Sedlmajer, M., Černý, R., (2014) "Engineering Properties of Concrete Containing Natural Zeolite as Supplementary Cementitious Material: Strength, Toughness, Durability, and Hygrothermal Performance" *Cement & Concrete Composites*, Vol. 55, pp. 259-267.
- [۵] صدرممتازی، ع.، استوار، س.م.، (۱۳۹۳) "بررسی تاثیر زئولیت بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات های سیمانی"، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، انجمن بتن ایران، ایران، تهران.
- [6] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M., (2012) "An Experimental Study on Durability Properties of Concrete Containing Zeolite as a Highly Reactive Natural Pozzolan", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 1023-1033.
- [7] Ahmadi, B., Shekarchi, M., (2010) "Use of Natural Zeolite as a Supplementary Cementitious Material", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. (2), pp. 134-141.
- [8] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., (2013) "Comparing a Natural Pozzolan Zeolite to Metakaolin and Silica Fume in Terms of Their Effect on the Durability Characteristics of Concrete: A Laboratory Study", *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 879-888.
- [9] ACI (American Concrete Institute), (2007) "Self-Consolidating Concrete", ACI 237 R-07, Farmington Hill, USA.
- [10] Yang, Y., Sato, R., Kawai, K., (2005) "Autogenous Shrinkage of High-Strength Concrete Containing Silica Fume Under Drying at Early Ages", *Cement and Concrete Research*, 35(3), 449-456.
- [11] ZHENG, Y-Ch., LIU, Y-J., JING, D-H., ZHENG, D-Sh., LI, Q., (2016) "Experimental Study on Shrinkage-Compensating Concrete with CaO-based Expansive Agent", *International Conference on Material Science and Civil Engineering (MSCE 2016)*.
- [12] BS 1881: Part 116, (1983) "Standard Test Method for Compressive Strength of Cubic Concrete Specimens", *British Standards Institution*, London: BSI.
- [13] ASTM C192, (2006) "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02.
- [14] ASTM C496 / C496M-17, (2017) "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [15] ASTM C469 / C469M-14, (2014) "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression", *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [16] Bungey, J.H., Millard, S.G., (1996) "Testing of Concrete in Structures", Third Ed. Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall.

- [17] ASTM C78 / C78M-18, (2018) "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [18] Feng, N., Li, G., Zang, X., (1990) "High-Strength and Flowing Concrete with a Zeolitic Mineral Admixture," ASTM Cem Concr Aggr; Vol. 12 No. (2): pp. 61-9.
- [19] Canpolat, F., Yilmaz, K., Kose, MM., Sumer, M., Yurdusev, MA., (2004) "Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement Production," Cem Concr Res; Vol. 34 No. (5): pp. 731-5.
- [20] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., (1999) "A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes," Constr Build Mater; Vol. 13, No. (8): pp. 427-32.
- [21] CEB-FIB model code (1990) Committee Euro-International du Beton. Thomas Telford, London; 1993.
- [22] ACI Bulding code 318-05, (2005) "Bulding Code Requirement for Structural Concrete (ACI318-99) and Commentary (ACI318R-05)", Reported by ACI commeittee318.
- [23] ACI 363R (1992) "State of the Art Report on High Strength Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills (Michigan).
- [24] Whitehurst, EA., (1951) "Soniscope Test Concrete Structures," J Am Concr Insti, Vol. 47, pp. 443-4.
- [25] Chaokai, W., Jing, Ch., Qibin, L., (2017) "Research on Influence of Zeolite Powder on Internal Humidity and Autogenous Shrinkage of Self-Compacting Concrete", 2nd International Conference on Advances in Materials, Mechanics and Civil Engineering (ICAMMCE), Advances in Engineering Research, Vol. 121, pp. 195-200.
- [26] Jana, D., (2007) "A New Look to an Old Pozzolan: Clinoptilolite – A Promising Pozzolan in Concrete", in: Proceedings of the Twenty-Ninth Conference on Cement Microscopy, Quebec City, PQ, Canada, pp. 168-206.
- [27] Kasai, Y., Tobinai, K., Asakura, E., Feng, N., (1992) "Comparative Study of Natural Zeolites and Other Inorganic Admixtures in Terms of Characterization and Properties of Mortars", in: V.D. Malhotra (Ed.), Proceedings of the 9th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Farmington Hills.