



ارزیابی تاثیر پوزولان میکروسیلیس بر روی رئولوژی و خصوصیات مکانیکی بتن خودمتراکم منبسط شونده

غلامرضا قدرتی امیری¹، عبدالستار صفائی^{2*}، سید محمدحسین رضوی³، حمیدرضا حسینیعلی بیگی⁴

- 1- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- 2- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
- 3- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران موسسه آموزش عالی صالحان قائمشهر
- 4- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، موسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان امیرکلا

خلاصه

بتن خودتراکم یک نوآوری در ترکیب بتن بوده که در حقیقت باعث رفع یکی از مشکلات اساسی در ساخت سازه‌های بتنی گردیده است، بدین معنی که این نوع بتن با ترکیب جدید و ابداع ابر روانکننده ویژه سبب گردید که ترکیب یکنواخت ایجاد شده و بدون نیاز به ویبراتور، بعد از ریختن در قالب بخودی خود متراکم گردد. در پژوهش حاضر برای رفع مشکل ترک خوردگی زیاد در بتن‌های تازه که باعث کاهش دوام و عمر بتن در طولانی مدت میگردد از مواد منبسط کننده (EA) استفاده گردید. برای ارزیابی تاثیر افزودن میکروسیلیس و جایگزینی آن بجای بخشی از سیمان، همچنین اثر افزودنی منبسط کننده به طرح اختلاط بتن خودمتراکم آزمایشات خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی، خمشی و امواج فراصوت بر روی بتن خودمتراکم منبسط شونده حاوی میکروسیلیس میباشد. نتایج آزمایشگاهی حاصل نشان دادند که پوزولان میکروسیلیس موجب بهبود خواص مکانیکی بتن‌های مورد مطالعه شده از جمله افزایش در مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته شده است. همچنین این پوزولانها موجب شده‌اند که سرعت امواج فراصوت در این بتن‌ها افزایش یابند.

کلمات کلیدی: بتن خودمتراکم، افزودنی منبسط کننده، پوزولان میکروسیلیس، مقاومت فشاری، کششی، خمشی.

1. مقدمه

در طول سی سال گذشته بتن خودمتراکم (SCC)[†] بعنوان یکی از بتن‌های توانمند و با عملکرد رضایتبخش که برای اولین بار توسط محقق ژاپنی بنام اکامورا[‡] ابداع گردید و بصورت گسترده مورد استقبال مهندسين دنیا قرار گرفت. بتن خودتراکم نقش اساسی در توسعه پایدار ساخت و ساز پناهای مدرن و زیرساختها نظیر سازه‌های بلند، برج ها و پلهای بزرگ، تونلها، سازه‌های بتن آرمه در جهان داشته است. در ژاپن از بتن خودتراکم در ساخت بسیاری از سازه‌های با مقیاس بزرگ و حجیم بهره گرفته می‌شود. یکی از اولین سازه‌های حجیمی که در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت و در ساخت آن از بتن خودمتراکم استفاده

* Corresponding author: عبدالستار صفائی، استادیار دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه

صنعتی نوشیروانی بابل

Email: s.safaei@nit.ac.ir

[†] - Self Compacting Concrete

[‡] - Okamura



بعمل آمد در سال 1998، در ساخت دو لنگرگاه پل معلق آکاشی- کایکو* با دهانه‌ای بیش از 1990 متر بود [1].. بتن خودمتراکم، نوعی بتن است که تحت وزن خودش تا سطح تراز شده جریان یافته، هوایش خارج و تراکمش بخودی خود بدون استفاده از انرژی متراکم کننده خارجی بوقوع می‌پیوندد. در حقیقت این نوع آوری پاسخی به فقدان تکنسینها و کارگران ماهر صلاحیت دار در اجرای پروژه های بتنی و یک راه حل مطمئن برای ساخت سازه‌های با دوام و در جهت توسعه پایدار در صنعت ساخت و ساز میباشد. ترک خوردگی بتن و بخصوص تشکیل ترک ها در اثر جمع شدگی یکی از نگرانی های اصلی در دوام سازه های بتنی می باشد. تکنولوژی مناسب بتن می تواند از ترک خوردگی جلوگیری بعمل آورد و موجب پیدایش دوام مناسب گردد. نفوذپذیری کمتر، نفوذناپذیری در مقابل آب، مقاومت یخ زدگی - ذوب بهتر و مقاومت بالاتر در مقابل حمله مواد مخرب نتیجه کار است.

برای جلوگیری از ترک خوردگی در اثر جمع شدگی چندین راه حل وجود دارد که بیشتر در ارتباط با طرح اختلاط، نظیر: استفاده از سیمان های منبسط شونده با استفاده از مخلوط های جبران کننده جمع شدگی، مخلوط کردن بتن ها با خمیر سیمان با محتویات کمتر، مخلوط کردن بتن ها با محتویات ماسه کمتر، به همراه عمل آوری مؤثر بتن می باشد [2-4]. از آنجا که با بهترین دانه بندی ممکن برای سنگدانه ها هنوز خلل و فرج زیادی در بین سنگدانه ها باقی می ماند. لذا خمیر سیمان قطعاً باید بیشتر از حجم فضاهای خالی باشد. عمل خمیر سیمان با از بین بردن اصطکاک بین سنگدانه ها جریان پذیری سرعت بیشتری در درون بتن پیدا کرده، به عبارتی سبب افزایش کارایی بتن می گردد [5]. میکروسیلیس (SF) از مواد افزودنی صنعتی است که در واقع غبار گازهای خروجی از دودکش های کارخانجات تولید سیلیکون و آلیاژهای سیلیس، نظیر فورسیلیس در کوره های قوس الکتریکی می باشد، که واکنش ذرات آن با کریستال های حجیم و پر تخلخل آهک و تبدیل آنها به ژل کلسیم سلیکات هیدروکسید C-S-H، بهبود پیوند خمیر سیمان و سنگدانه را به همراه دارد. که به عنوان ماده جایگزین سیمان در تولید بتن استفاده می شود در تحقیقات خود بر روی مقاومت فشاری و نفوذ یون کلر در بتن در بر دارنده خاکستر بادی و دوده سیلیسی گزارشی ارائه دادند که افزودن این مواد پوزولانی سبب بالا رفتن مقاومت فشاری و نفوذناپذیری یون کلر شده است [6-7]. همچنین در گزارش محققان مختلف استفاده از دوده سیلیسی در بتن خود تراکم موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام آن شده است [8-10].

2. برنامه آزمایشگاهی

1.2. مصالح

جهت ساخت نمونه آزمایشی از ماسه با مدول نرمی 83/2 استفاده گردید. همین طور چگالی ویژه ماسه بکار گرفته شده برابر 600/2 و وزن مخصوص ظاهری آن برابر 1720 kg/m^3 بوده. شن بکار رفته در بتن خودمتراکم از نوع رودخانه ایی با حداکثر اندازه 10 میلیمتر می باشد. همچنین چگالی ویژه شن بکار برده شده برابر 5/2 است. سیمان استفاده شده از نوع سیمان پرتلند تپ II ساخت کارخانه سیمان مازندران است. دانسیته سیمان مذکور برابر با $14/3 \text{ gr/cm}^3$ می باشد و سطح ویژه (سطح بلین) $3050 \text{ cm}^2/\text{gr}$ می باشد، همچنین خصوصیات شیمیایی این سیمان در جدول 1 آمده است.

جدول 1- تجزیه شیمیایی سیمان تپ 2 مازندران

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na ₂ O	Free CaO	SO_3
درصد	25/21	95/4	19/3	07/64	20/1	38/0	10/1	63/0

میکروسیلیس

* - Akashi-kaikyo

سبزوار

میکروسیلیس به کار رفته در این پژوهش بصورت پودری بوده و وزن مخصوص آن 2250 کیلوگرم بر مترمکعب بوده و به رنگ خاکستری مایل به سفید می باشد. میکروسیلیس مذکور حاوی 85 تا 90 درصد دی اکسید سیلیسیم است این ماده با ساختمان کریستالی و ابعاد میانگین 15 میکرون و صد برابر ریزتر از دانه های سیمان و به نرمی $20 \times 10^{-2} \text{ g}$ می باشد. در این تحقیق میکروسیلیس با درصدهای مختلف 5/2، 5 و 5/7 بکار گرفته شده است.

پودر سنگ آهک

در این پژوهش از پودر سنگ آهک با وزن مخصوص 2660 kg/m^3 بعنوان عنصر پرکننده (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 میشوند لذا موجب کمتر شدن تخلخل و بالابردن درجه توپیری بتن می شوند.

پودر منبسط کننده

منبسط کننده بتن و ملات سیمانی (Strugrout EN500)

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 4 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 پودر منبسط کننده در جدول 2 آمده است. استراگروت EN500 با الزامات استانداردهای ASTM C490 و ASTM C940، ASTM C806، ASTM C827 قابل ارزیابی می باشد [11]:

جدول 2- اطلاعات محصول منبسط کننده

شکل ظاهری	پودر طوسی رنگ
جرم حجمی	$1/0 \pm 2/1 \text{ gr/cm}^3$ در 20 درجه سانتیگراد
میزان یون کلر	فاقد یون کلر

ابر روان کننده مصرف شده جهت ساختن بتن خودمتراکم

در این پژوهش از ابر روان کننده استراژین یک ابر روان کننده دیرگیر بتن نسل چهارم و بر پایه پلی کربوکسیلات اثر با حفظ اسلایم طولانی از واحد تحقیق، توسعه تولید رزین پلی کربوکسیلات شرکت Strumix می باشد. رسیدن به مقاومت و دوام بالا در بتن در میزان مصرف های متوسط این محصول از دیگر مزایای آن می باشد. [12].

2.2. طرح اختلاط

طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش جهت دستیابی به بتن خودمتراکم بر طبق دستورالعمل (ACI 237R-07) بوده. نکته قابل توجه آن است که براساس گزارشهای ارائه شده قبلی انتظار می رود با افزایش منبسط شونده، کارایی بتن خود متراکم کاهش یابد (ACI 544.4R)، بنابراین در طرح اختلاط های مربوط به بتن خودمتراکم سعی بر آن است تا بتن فاقد منبسط شونده، دارای حداکثر کارایی مجاز طبق دستورالعمل ACI 237R-07 باشد تا پس از اضافه نمودن منبسط شونده، و میکروسیلیس همچنان پاسخگو آزمایشهای مربوط به کنترل کارایی بتن خودمتراکم هست. بعد از انجام آزمایش های گوناگون و با در نظر گرفتن حد پایین و بالایی مجاز کارایی، میزان کاربرد مواد روان کننده در طرح اختلاط های مواد منبسط شونده و میکروسیلیس متفاوت می باشند [13-14].

در این تحقیق آزمایشگاهی 5 طرح اختلاط، شامل بتن خودمتراکم (شاهد: R) و بتن خودمتراکم منبسط شونده (E) و بتن خودمتراکم منبسط شونده حاوی میکروسیلیس (EM) با



(5/2، 5 و 5/7) درصد و منبسط بشونده (4/0) درصد وزنی سیمان، مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی طرحها در جدول 3 آمده است.

جدول 3- طرح اختلاط

EM5/7	EM5	EM5/2	E	R	ترکیبات
83/30	55/ 20	28/10	0	0	میکروسیلیس
6/1	6/1	6/1	6/1	0	منبسط کننده
75/5	95/ 4	5/4	1/4	1/4	ابر روان کننده
135	135	135	135	135	آب
144	144	144	144	144	پودر سنگ
917	917	917	917	917	ماسه
750	750	750	750	750	شن
12/37 8	4/3 88	67/39 8	95/40 8	411	سیمان
4/0	4/0	4/0	4/0	4/0	w/b

در این طرح ها، مقدار ماده روان کننده و میکروسیلیس متغیر بوده و باقی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده اند. نسبت آب به مصالح سیمانی (w/b) (مجموع سیمان و میکروسیلیس) برابر است با 4/0 و طرح شماره 1 که فاقد پودر منبسط کننده، و میکروسیلیس است به عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد.

3.2. روش آزمایش و عمل آوری

1.3.2. آزمایش جعبه - L

با جعبه L - شکل این امکان وجود دارد که خواص گوناگون، نظیر قابلیت جریان، بلوکه شدن و جدایشگی مورد بررسی قرار گیرد. قسمت قائم جعبه، با بتن پر می شود، بعد از اینکه بتن در قسمت قائم برای یک دقیقه قرار گرفت، درجه لغزان (متحرک) بالا برده می شود و حالا بتن به خارج قسمت قائم جریان می یابد و به قسمت افقی جعبه - L می رسد. سر راه خودش، آن باید از یک سری از میلگردها عبور کند. فاصله بین میلگردها mm34 است، اما می تواند به اندازه های متفاوت تغییر کند. فاصله H_1 و H_2 در 8 اینچی و 16 اینچی محل علامت گذاری شده اندازه گیری می شود، مقادیر قابل قبول نسبت گرفتگی، H_2/H_1 می تواند برابر با 85/0 - 80/0 باشد.

2.3.2. 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 می باشد. یک قطر متمرکز از mm500 روی میز علامت گذاری شده است. مخروط اسلامپ با بتن پر شده در حالیکه مخروط اسلامپ روی میز فشار داده می شود. سپس مخروط اسلامپ به طور عمودی بالا برده می شود و زمان اندازه گیری شروع می شود. زمان برای قطر بتن که به mm500 (T_{50}) برسد یادداشت می شود. هنگامی که بتن از حرکت باز ایستاد، قطر نهایی (نهایی - D) بتن و در صورت لزوم هرگونه مرز جدایشگی در محیط بتن اندازه گیری می شود.

3.3.2. آزمایش قیف - V

قیف V به کار می رود تا قابلیت جریان و پایداری بتن SCC را تعیین نماید. تجهیزات شامل یک قیف V شکل می باشد. قیف - V تا سطح بالایی آن با بتن پر می شود. در



آزمایش بتن بعد از یک دقیقه در قیف ۷ - درپچه باز می شود. زمانی که بتن از قیف - ۷ به خارج قیف - ۷ جریان می یابد (زمان - جریان) یادداشت می شود.

4.3.2. نحوه عمل آوری و نگهداری، نمونه ها

پس از پایان عمل اختلاط کردن، بتن را داخل قالب های آماده ریخته (پیش از ریختن بتن، برای آسانی 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 24 ساعت نگهداری میشود. سپس از قالب خارج گردیده و در حوضچه آب در دمای بین 22-25 درجه سانتیگراد تا سن مورد نظر برای هر آزمایش نگهداری می گردد. هر طرح اختلاط شامل 3 نمونه مکعبی به ابعاد (10×10×10) سانتیمتر، 9 نمونه استوانه ای (15×30) سانتیمتر، 3 نمونه تیر به ابعاد (10×50×10) سانتیمتر و می باشد که در کل برای 8 طرح اختلاط، 120 نمونه ساخته شده است.

5.3.2. آزمایش مقاومت فشاری

در تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده از نمونه های استوانه ای با ابعاد 150 * 300 سانتی متر (ASTM 1881: Part 116 B.S) و (ASTM استفاده می گردد [15-16]). نحوه آزمایش بدین صورت است که پس از 28 روز عمل آوری، نمونه های بتنی را در زیر جک فشاری قرار شکل 1 میگیرد.



(ب)

(الف)

شکل 1: الف) قرار گرفتن نمونه در دستگاه جهت آزمایش، ب) نمونه بعد از آزمایش

6.3.2. آزمایش کشش غیرمستقیم

این آزمایش که به آزمایش برزلی نیز موسوم است برای مشخص نمودن مقاومت کششی دو نیم شدن بتن براساس استاندارد (ASTM C496, 2017) بکار می رود [17]. بدین منظور از نمونه های استوانه ای به قطر 15 به ارتفاع 30 سانتی متر بهره گیری می شود. نمونه استوانه ای پس از قرار گرفتن در گیره نگهدارنده مطابق شکل 2، 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. نحوه محاسبه مقاومت کششی براساس رابطه ی (1) است.

(1)

$$f_t' = \frac{2P}{DL}$$



شکل 2- الف) نمونه در زیر فک برای اعمال فشار، ب) نحوه مهار نمونه آزمایش

7-3-2- آزمایش ضریب الاستیسیته بتن

ضریب الاستیسیته بتن که با علامت E نشان داده می شود بصورت تغییرات تنش فشاری به کرنش متناظر آن تعریف می گردد به شرط آنکه تنش فشاری کمتر از 40 درصد تنش حد نهایی بتن باشد (یعنی بتن در ناحیه الاستیک باشد). برای تعیین مدول ارتجاعی بتن از نمونه های استوانه ای به قطر 15 و ارتفاع 30 سیانتي متر (ASTM C 469, 2014) استفاده می گردد [18]. نخست دو نوار فلزي که فاصله عمودي آنها از یکدیگر 150 ميلي متر بوده و در آن کرنش سنجي قرار داده شده مطابق شکل 3 درون استوانه قرار گرفته، سپس به همراه استوانه در زیر دستگاه فشار گذاشته می شود.

مقدار نیرو در دو ناحیه از منحنی تنش - کرنش (کرنش ها با استفاده از دستگاه کرنش سنج خوانده می شود)، تعداد دورهای کرنش سنج پس از رسیدن عقربه دستگاه به نیروی محاسبه شده خوانده شده و سپس در عدد 002/0 ميلي متر ضرب شده تا بدین شکل تغییر طول نمونه بین دو نوار فلزي به دست آید. با تقسیم تغییر طول نمونه بر طول اولیه نمونه که همان 150 ميلي متر بود کرنش متناظر تنش در محدوده کششی بتن بدست آمده و به همین ترتیب تعداد دوره های کرنش سنج متناظر با کرنش طولی 10×10^{-6} محاسبه و با بهره گیری از دستگاه، نیروی مربوط به این کرنش خوانده شده. با تعیین کرنش و تنش دو نقطه، مدول الاستیسیته بتن مطابق رابطه (2) بدست می آید:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

در این فرمول E_c ضریب الاستیسیته بتن، S_1 و S_2 تنش ها حاصل از بار فشاری (جک) بر روی نمونه استوانه ای و ϵ_1 و ϵ_2 کرنش های نظیر آن ها می باشد.



الف) طریقه قرار گرفتن کرنش سنج بر روی نمونه ب) قرار گرفتن نمونه در دستگاه

شکل 3- نمونه بتن قرار گرفته در کرنش سنج

3. نتایج آزمایش و تفسیر

3.1. آزمایش بتن خودتراکم تازه

نتایج خواص بتن های تازه توسط آزمایشهای جریان اسلامپ (قطر جریان اسلامپ و T_s)، قیف V شکل (زمان سپری شده برای خارج شدن کامل بتن از قیف) و جعبه L شکل

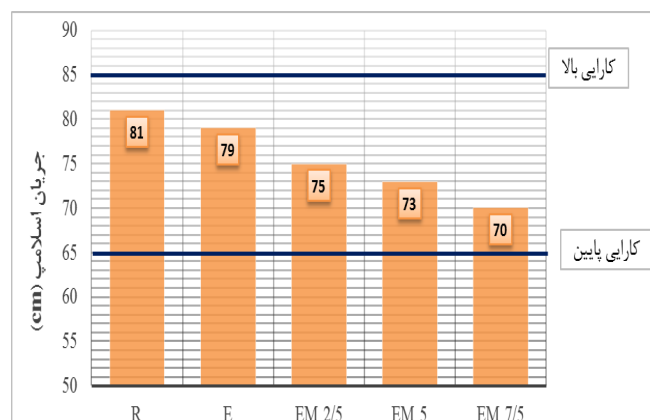
محاسبه شده‌اند. مقادیر خواص بتن تازه به دست آمده از مخلوطها در این پژوهش در جدول 4 و اشکال 4 الی 6 نشان داده شده‌اند.

جدول 4- نتایج آزمایشات بتن تازه

طرح	ابر روان کننده Kg/m^3	جریان اسلامپ		قیف V شکل (Sec)	جعبه L شکل h/2h
		T_{50} (Sec)	d (cm)		
R	1/4	2/2	81	8/6	95/0
E	1/4	5/2	79	7	93/0
EM 5/2	5/4	1/3	75	5/7	9/0
EM 5	95/4	9/3	73	2/8	9/0
EM 5/7	75/5	5/4	70	9/8	87/0

1.1.3. جریان اسلامپ و شاخص پایداری بصری

تأثیر پوزولان میکروسیلیس بر روی مقادیر جریان اسلامپ و میزان استفاده از ابر روان کننده در شکل 4 آورده شده است. همانطور که در نمودار مشخص است میتوان بتنه‌ای خودتراکم منبسط شونده حاوی میکروسیلیس دارای جریان اسلامپ رضایتبخشی در محدوده 69 الی 75 سانتی متر را با تنظیم محتوای ابر روان کننده از 1/4 تا 5/6 کیلوگرم بر مترمکعب تولید شود. براساس (EFNARC, 2005) جدول 5 تمام مخلوط های بتن خودتراکم منبسط شونده حاوی پوزولان میکروسیلیس را میتوان در گروه 2 (SF_2) دسته بندی نمود. مخلوط های بتن در این گروه دارای جریان اسلامپ مناسبی برای بسیاری از کاربردهای معمولی همانند دیوارها و ستونها میباشد. همچنین از شکل 4 چنین بر میآید با افزایش جایگزینی میکروسیلیس میزان مصرف ابر روان کننده بیشتر خواهد شد. بنابراین بهمنظور رسیدن به جریان اسلامپ مورد نظر در زمان جایگزینی بیشتر سیمان توسط میکروسیلیس نیاز به ابر روان کننده بیشتری میباشد که این امر با مشاهدات حاصل از محققین دیگر مطابقت مینماید این امر بهدلیل سطح مخصوص بالای میکروسیلیس میباشد که منجر به جذب آب بیشتر روی ذرات میشود [19 و 20].



شکل 4- آزمایش جریان اسلامپ (T_{50})

جدول 5: طبقه بندی جریان اسلامپ ویسکوزیته و قابلیت عبور براساس [5] (EFNARC, 2005)

جریان اسلامپ (mm)	گروه‌های جریان اسلامپ
----------------------	-----------------------------



550 - 650		SF1
660 - 750		SF2
760 - 850		SF3
زمان قیف شکل V (S)	T ₅₀ (S)	گروههای ویسکوزیته
< 8	< 2	VF/1VS1
9 - 25	> 2	VF/2VS2
گروههای قابلیت عبور		
8/0 با دو میلگرد >		1PA
8/0 با سه میلگرد >		2PA

2.1.3. زمان جریان T_{50}

همانطور که در جدول 4 آورده شده است، زمان جریان T_{50} برای مخلوطهای بتن خودتراکم مختلف بین 2/2 الی 8/4 ثانیه میباشد. با توجه به این جدول تمام مخلوطها زمان جریان اسلامپ در محدوده 2 الی 5 ثانیه را نشان میدهند. در این محدوده از T_{50} ، ویسکوزیته به اندازه کافی بالا میباشد تا مقاومت جدا شدگی را افزایش داده و فشار بیش از حد به قالبها را محدود نماید [21]. زمان جریان T_{50} عموماً با افزایش میزان میکروسیلیس افزایش مییابد.

3.1.3. نسبت بلوکه شدگی (آزمایش جعبه L شکل)

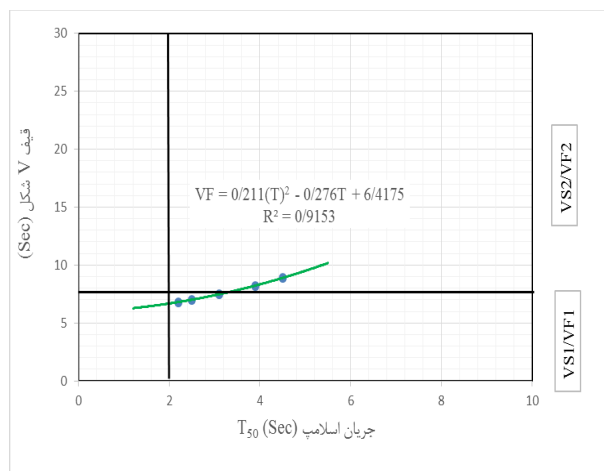
نتایج به دست آمده از آزمایش جعبه L شکل برای مخلوطهای بتن خودتراکم مختلف در جدول 4 آورده شده است.

محدوده نسبت بلوکه شدگی جعبه L شکل بین 85/0 تا 95/0 بدون تمایل به انسداد می-باشد. طبق نتایج حاصل بالاترین نسبت بلوکه شدگی از بتن شاهد (R) و پایین ترین نسبت بلوکه شدگی از بتن خودتراکم منبسط شونده حاوی 5/7 درصد میکروسیلیس به دست آمده است. همانطور که طبق (EFNARC, 2005) جدول 8، بتن خودتراکم پایدار باید نسبت بلوکه شدگی برابر یا بیشتر از 8/0 را نشاندهد. بر این اساس تمام مخلوطهای بتنی مورد مطالعه در این تحقیق توانایی مناسبی برای عبور از میلگردهای جعبه L شکل دارند.

4.1.3. زمان قیف V شکل

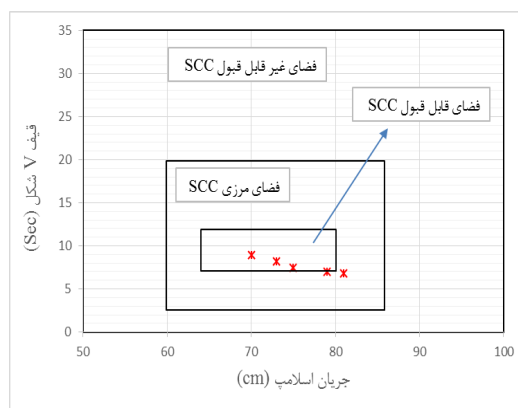
نتایج به دست آمده از آزمایش قیف V شکل برای مخلوطهای بتن خودتراکم مختلف در جدول 5 آورده شده است. با توجه به این جدول زمان قیف V شکل برای گروههای مختلف بتن در محدوده 8/6 الی 3/10 ثانیه میباشد. همانند آنچه که برای زمان جریان T_{50} مشاهده شده است، زمان قیف V شکل برای مخلوطهای بتن خودتراکم مختلف با افزایش مقدار جایگزینی میکروسیلیس افزایش یافته است. این نتایج نشان میدهد که با استفاده از پوزولان میکروسیلیس ویسکوزیته مخلوطهای بتن خودتراکم افزایش مییابند.

گروه ویسکوزیته مخلوطها در شکل 5 نشان داده شدهاند. طبق (EFNARC, 2005)، اکثر مخلوطهای بتن مورد تحقیق را میتوان در گروه (VS2/VF2) طبقه بندی نمود. این نوع از بتنها میتوانند در رمپها، دیوارها و شمعها با قطر جریان اسلامپ گروه (SF2) استفاده شوند. همانطور که در شکل 5 آورده شده است تغییرات در زمان جریان T_{50} در مقابل زمان قیف V شکل نشان داده شد است که همبستگی خوبی را حاصل نموده است.



شکل 5- تغییرات گروه ویسکوزیته با زمانهای جریان T_{50} و قیف V شکل [5]

به منظور تجزیه و تحلیل نتایج کارآیی بتنهای خودتراکم مفهوم کارآیی در شکل 6 با استفاده از محدودههایی ارائه شده است، که مخلوطهای داخل این فضا، مخلوطهای قابل قبول بتن خودتراکم میباشند [22]. مخلوطهای داخل محدوده تحت عنوان "فضای قابل قبول بتن خودتراکم" بهعنوان محدوده مناسب و قابل قبول بتنهای خودتراکم تلقی میشوند، در حالیکه سایر مخلوطها که در منطقیهای تحت عنوان "فضای مرزی" قرار دارند به عنوان مخلوطهای بتن خودتراکم با جداشدگی جزئی، قابل قبول هستند. هیچ یک از مخلوطهای تحقیق حاضر در ناحیه غیر قابل قبول مشاهده نشده است.



شکل 6- محدودههای کارآیی مخلوطهای بتن خودتراکم

2.3. نتایج آزمایشات بتن سخت شده

1.2.3. مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری مخلوط های بتن خودتراکم منبسط شونده ساخته شده با درصد های مختلف جایگزینی میکروسیلیس در سنین 28 و 180 روز در شکل 7 آورده شده است. از این نتایج می توان مشاهده نمود که محدوده مقاومت فشاری در سنین 28 روز و 180 روز به ترتیب بین 18/52 الی 79/63 و 92/60 الی 63/72 می باشد. همان طور که انتظار می رفت مقاومت فشاری بتن ها با افزایش سن آنها افزایش یافتند، با این حال مقادیر نسبتاً بیشتر مقاومت فشاری برای مخلوط های حاوی پوزولان میکروسیلیس در سنین بالاتر به علت واکنش پوزولانی میکروسیلیس به دست آمده است. برای مثال در مقایسه با بتن خودتراکم شاهد حاوی مواد منبسط شونده (E)، افزایش حدود 19 درصدی در سن 180 روز به برای بتن 5/7EM 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 28 روز و 180 روز به ترتیب به مقدار 5/15 درصد و 5/4 درصد کاهش پیدا نمود. بنابراین چنین نتیجه می‌شود 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.



شکل 7- مقاومت فشاری 28 و 180 روزه نمونه ها حاوی درصد های مختلف 5/2، 5 و 5/7 میکروسیلیس

تاثیر پوزولان میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری مخلوط های بتن خودتراکم منبسط شونده عموماً به این دلیل می باشد که این پوزولان 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.

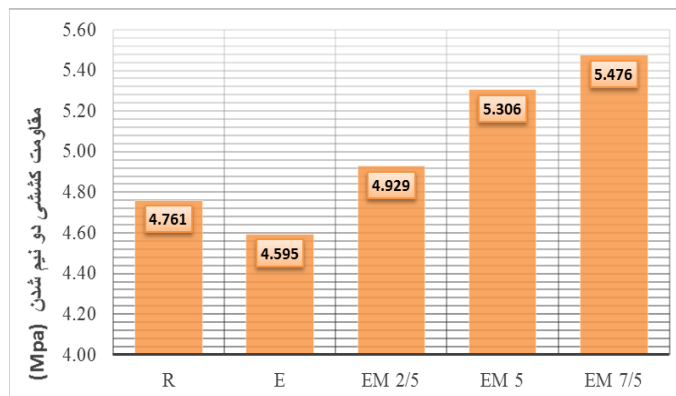
2.2.3. آزمایش های کششی غیرمستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه های استوانه ای با ابعاد 30 15 3 سانتی متر در سن 28 روز. نتایج در شکل 8 نشان داده شده اند. این جدول همچنین نتایج مربوط به نسبت های مقاومت کششی به مقاومت فشاری مخلوط های مختلف را نشان می دهد. روند کلی مقاومت کششی مشابه آنچه که در مقاومت فشاری در سن 28 روز مشاهده شده است دیده می شود.

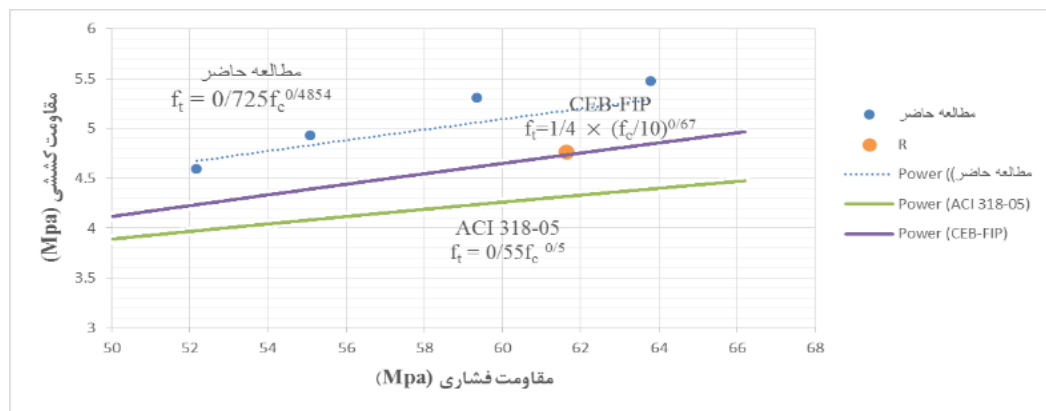
با توجه به شکل 9 اضافه نمودن افزودنی منبسط شونده به طرح شاهد، موجب کاهش 5/3 درصدی مقاومت کششی غیر مستقیم می شود. همچنین با جایگزینی سیمان پرتلند توسط درصد های مختلف پوزولان میکروسیلیس روند افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم نسبت به بتن خودتراکم حاوی مواد افزودنی منبسط شونده مشاهده می گردد. همان طور که مشاهده می شود روند افزایش مقاومت کششی در سن 28 روز در اثر استفاده از پوزولان میکروسیلیس توأم با افزودنی منبسط شونده نسبت به بتن حاوی منبسط شونده تنها (E) در مقایسه با روند افزایش مقاومت فشاری 28 روز در این بتن ها خیلی بیشتر می باشد. مقاومت کششی مخلوط های بتن خودتراکم منبسط شونده با جایگزینی 5/2، 5 و 5/7 درصد میکروسیلیس نسبت به بتن خودتراکم حاوی مواد منبسط شونده تنها به ترتیب 3/7، 5/15 و 2/19 درصد افزایش یافته است. تغییرات مقاومت فشاری با مقاومت کششی بتن های خودتراکم منبسط شونده حاوی پوزولان میکروسیلیس بررسی شده اند و نتایج آن ها در شکل 8 آورده شده است. از شکل 9 مشاهده می شود که با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی افزایش می یابد. براساس نتایج 28 روز، معادله رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمودار فوق الذکر آورده شده است. این معادله مقادیر بیشتری را نسبت به معادلات آئین نامه های (CEB-FIP, 1990) و (ACI-318-05) نشان می دهد. همچنین همان طور که از نمودار مشاهده می شود رابطه بین



مقاومت فشاری و کششی بتن مرجع (R) روی خط پیش بینی آئین نامه CEB-FIP منطبق شده است [23-24].



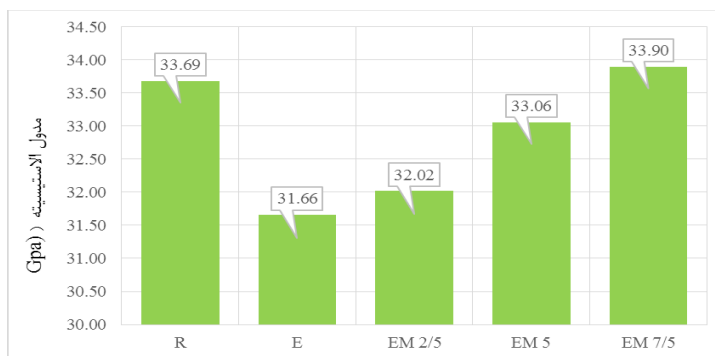
شکل 8- مقاومت کشش غیر مستقیم (برزیلی) نمونه ها حاوی درصد های مختلف میکروسیلیس



شکل 9- تغییرات مقاومت فشاری با مقاومت کششی

3.2.3. نتایج آزمایش مدول الاستیسیته

جدول 9 و شکل 10 مدول الاستیسیته آستاتیکی بدست آمده برای بتن های خودتراکم منبسط شونده حاوی درصد های مختلف جایگزینی 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 گذاری می باشد. از این رو، افزایش در مدول الاستیسیته بتن های حاوی 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 میکروسیلیس افزایش تدریجی مدول الاستیسیته مشاهده شده است. همچنین در جدول 6 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. 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 [23 و 25].



شکل 10- مدول الاستیسیته نمونه‌ها حاوی درصد‌های مختلف منبسط
شونده، میکروسیلیس

جدول 6- نتایج مدول الاستیسیته (GPa)

نمونه	درصد‌های مختلف میکروسیلیس	نمونه 1	نمونه 2	نمونه 3	میانگی ن	پیش مدول الاستیسیته توسط ACI 363R-92	پیش مدول الاستیسیته توسط CEB- FIP 1990
R	0	69/3 3	95/3 3	42/3 3	69/3 3	95/32	39/33
E	0	45/3 1	07/3 2	47/3 1	66/3 1	87/30	76/31
EM 5/2	5/2	66/3 1	48/3 2	92/3 1	02/3 2	53/31	28/32
EM 5	5	11/3 3	00/3 3	07/3 3	06/3 3	47/32	01/33
EM 5/7	5/7	84/3 3	92/3 3	94/3 3	90/3 3	41/33	74/33

4. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایش‌های مربوط به بتن خودمتراکم و بتن خودمتراکم منبسط شونده تازه و سخت شده برای ارزیابی تاثیر پوزولان میکروسیلیس بر روی این بتن‌ها انجام گردید. ویژگی‌های بتن تازه شامل: آزمایش‌های (جعبه L شکل)، (جریان اسلامپ)، (قیف V شکل) و همچنین ویژگی‌های نمونه بتن‌های سخت شده شامل: وزن مخصوص خشک، مقاومت فشاری در سنین مختلف (28 و 180 روز)، مقاومت کششی، ضریب الاستیسیته و مقاومت خمشی می‌باشد. همچنین آزمایش سرعت امواج فراصوت جهت تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مذکور انجام و ارائه گردید که نتایج به شرح ذیل می‌باشد:

1- وجود پوزولان میکروسیلیس بر روی مقادیر حاصل از جریان اسلامپ تأثیر می‌گذارد. بنابراین به منظور دستیابی به رئولوژی مورد نظر در بتن‌های خودمتراکم طراحی شده می‌بایست میزان ابرروان کننده تغییر یابد. در این پژوهش اسلامپ بتن‌های خودمتراکم منبسط شونده حاوی میکروسیلیس در محدوده 69 الی 75 بوده است که براساس (EFNARC, 2005) در گروه 2 (SF2) قرار گرفته و نتایج حاصله رضایت بخش می‌باشد.

2- زمان حاصل از آزمایش T_{50} بر روی نمونه‌های بتن خودمتراکم با ترکیب‌های مختلف در محدوده بین 2/2 الی 8/4 ثانیه قرار دارند.



- 3- نتایج آزمایشهای جعبه L شکل نشان داد که همه نمونههای بتن خودمتراکم پایدار بوده و مقادیر نسبت بلوکه شدگی برای طرحهای مورد آزمایش بین 87/0 تا 95/0 بوده است.
- 4- نتایج حاصل آزمایش قیف V شکل برای نمونههای مختلف بتن تازه در محدوده 8/6 الی 9/8 ثانیه قرار گرفته‌اند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از پوزولان میکروسیلیس موجب افزایش در ویسکوزیته مخلوطهای بتن میشوند.
- 5- نتایج مقاومت فشاری نمونهها با درصدهای مختلف پوزولان میکروسیلیس در سنین 28 و 180 روز با افزایش عمر نمونه همانطور که انتظار می‌رفت افزایش یافتند. در واقع ادامه واکنش پوزولانی میکروسیلیس در نمونههای بتنی حاوی آنها سبب افزایش مقاومت گردیده است.
- 6- مقاومت فشاری بتن خودمتراکم حاوی مواد منبسط کننده (EA) به همراه پوزولان میکروسیلیس نسبت به بتن خودمتراکم حاوی مواد منبسط کننده تنها، افزایش 19 درصدی در سنی 180 روز را برای بتن های 5/7EM داشته است.
- 7- اثر افزودنی منبسط کننده بر روی مقاومت فشاری بتن خودمتراکم منبسط شونده فاقد پوزولان (E) نسبت به بتن شاهد (R) در سنین 28 روز و 180 روز به ترتیب به مقدار 5/15 درصد و 5/4 درصد کاهش پیدا نمود. بنابراین، این نتایج نشان می‌دهد که مواد منبسط کننده در سنین پایین باعث کاهش مقاومت بیشتر می‌گردند و این روند در سنین بالاتر کمتر اثر دارد.
- 8- نتایج آزمایش کششی غیرمستقیم بر روی نمونههای استوانه نشان داد اضافه کردن افزودنی منبسط کننده به طرح شاهد، موجب کاهش 5/3 درصدی مقاومت کششی گردید.
- 9- مقاومت کششی نمونه های بتنی خودمتراکم منبسط شونده با جایگزینی 5/2، 5 و 5/7 درصد میکروسیلیس نسبت به بتن خودمتراکم شاهد حاوی مواد منبسط کننده (E) (فاقد پوزولان) به ترتیب 3/7، 5/15 و 2/19 درصد افزایش یافته است.
- 10- با بکار بردن پوزولان میکروسیلیس به صورت جایگزینی بخشی از سیمان، افزایش تدریجی مدول الاستیسیته مشاهده شده است. این امر به دلیل بهبود ریزساختار بتن حاصل می‌شود.
- 11- نتایج آزمایشگاهی مدول الاستیسیته با مقادیر حاصل از آئین نامههای ACI-209، CEB-FIP-90 بسیار نزدیک می‌باشد.

12. مراجع (B Nazanin 12 pt, Bold) (فونت: B Nazanin، اندازه فونت 12 ضخیم)

فهرست مراجع بعنوان آخرین بخش مقاله با فونت (Times New Roman 12pt) نوشته میشوند. ترتیب آنها مطابق با ترتیب طرح آنها در داخل متن میباشد و فقط شامل مواردی است که مستقیماً در متن مقاله به آنها ارجاع شده است. همچنین بایستی از علامت [] دقیقاً در همان محل استفاده از مرجع برای شماره گذاری استفاده نمود. در تعریف هر مرجع اطلاعات کامل مطابق با استانداردهای موجود ذکر گردد. برای مراجع فارسی، از فونت (B Nazanin 12pt) استفاده گردد. موارد زیر نحوه ارائه این اطلاعات را نشان میدهند:

1. Cao, Q., Hwang, S., Khayat, K., Morcou, G., (2016). "Design and implementation of self consolidating concrete for connecting precast concrete deck panels to bridge girders," J. Mater. Civ. Eng. ASCE 0416058-1-12.
2. Kovler, K., Zhutovsky, S. (2006) "Overview and Future Trends of Shrinkage Research", Materials and Structures, Vol. 39, pp. 827-847.
3. Wittmann, F. H., Bazant, Z.P., (1982) "Creep and Shrinkage Mechanisms, in Creep and Shrinkage in Concrete Structures", John Wiley & Sons, pp. 129-163.



4. Mindess, S., Young, J. F. (1981) "Concrete", Prentice and Hall, New York, London, 671 p.
5. EFNARC (2005) "Guidelines for Self-Compacting Concrete", European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Norfolk, UK, English ed.
6. قدوسی، پ.، (1376). "مکانیزم و علل کاهش آسیب پذیری بتن دارای میکروسیلیس"، مجموعه مقالات بین‌المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، صفحه 182 – 196، تهران – ایران.
7. صدرممتازی، ع.، باران دوست، ج.، طهمورسی، ب.، طهموسی، م.ص.، (1394) "ارزیابی مکانیکی ملات های سیمانی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیس با درونپاش اسپلاین هموار شونده" هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران – تهران.
8. 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.
9. Flores Medina, N., Barluenga, G., Hernández-Olivares, F., (2015) "Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement", Construction and Building Materials, Vol. 96 pp. 556–566.
10. صدرممتازی، ع.، نصرتی، ج.، طهمورثی، م.ه.، (1392). "بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر روی خواص بتن خودتراکم حاوی پوزولان های مختلف"، پنجمین کنفرانس ملی بتن انجمن بتن ایران، تهران، ایران.
11. ASTM C490 / C490M-17, (2017) "Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA.
12. کاتالوگ شرکت شیمی ساختمان آبادگران،
<https://www.abadgarangroup.net/fa-IR/Product/217>
13. ACI 237R, (2007) "Self-Consolidating Concrete, American," Concrete. Institute, Farmington. Hills.
14. ACI committee 544 Report, (1988) "Design Consideration for SFRC", ACI Structural Journal, (reapproved 1994), pp 563-530.
15. BS 1881: Part 116, (1983) "Standard Test Method for Compressive Strength of Cubic Concrete Specimens", British Standards Institution, London: BSI.
16. ASTM C496 / C496M-17, (2017) "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA.
17. 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.
18. Bungey, J.H., Millard, S.G., (1996) "Testing of Concrete in Structures", Third Ed. Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall.
19. Memon, Sh. A., Shaikh, M. A., Akbar, H, (2011) "Utilization of Rice Husk Ash as Viscosity Modifying Agent in Self Compacting Concrete", Construction and Building Materials, 25 (2), PP. 1044-1048.
20. 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.
21. Ranjbar, M.M., Madandoust, R., Mousavi, S.Y., Yosefi, S., (2013) "Effects of Natural Zeolite on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacted Concrete," In: Construction and Building Materials, Elsevier Ltd, 47, 806–813.
22. Barfield, M., Ghafoori, N., (2012) "Air-Entrained Self-Consolidating Concrete: A Study of Admixture Sources," Constr Build Mater, Vol. 26, pp. 490–6.



23. Esquinas, A., Motos-Pérez, D., Jiménez, M., Ramos, C., Jiménez, J., Fernández, J., (2018) "Mechanical and Durability Behaviour of Self-Compacting Concretes for Application in the Manufacture of Hazardous Waste Containers," Constr. Build. Mater, Vol. 168, pp. 442–458.
24. CEB-FIB model code (1990) Committee Euro-International du Beton. Thomas Telford, London; 1993.
25. ACI Building code 318-05, (2005) "Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI318-99) and Commentary (ACI318R-05)", Reported by ACI committee 318.