



مطالعه آزمایشگاهی اثرات جایگزینی ماده مکمل سیمانی سیلیکا فیوم با سیمان بر مقاومت فشاری نمونه های بتنی

حسین رضائی^{۱*}، امین صباغ زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مسئول واحد تحقیق و توسعه شرکت صنایع سیمان زابل

۲- فوق لیسانس مهندسی شیمی، کارشناس دفتر فنی شرکت صنایع سیمان زابل

خلاصه

امروزه محققین از مواد مکمل سیمانی (SCM) به عنوان ششمین جز بتن نام می برند. اهدافی که از استفاده از این مواد دنبال می شود شامل مواردی چون بهبود کارایی بتن تازه، بالا بردن مقاومت و دوام بتن سخت شده، کاهش حرارت هیدراسیون، حفظ محیط زیست و منافع اقتصادی می شود. در میان مواد پوزولانی، سوپر پوزولان سیلیکا فیوم (دوده سیلیسی) یکی از فعال ترین آنهاست. هدف تحقیق حاضر بررسی تاثیرات سیلیکا فیوم بر مقاومت فشاری نمونه های بتنی می باشد. در این مطالعه آزمایشگاهی در واحد تحقیق و توسعه سیمان سیستان به بررسی خواص مکانیکی مخلوط های بتنی حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد دوده سیلیسی از طریق انجام آزمایشات مقاومت فشاری پرداخته شده است. نتایج نهایی نشان می دهد که با افزایش درصد جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیمان (از صفر تا ۱۵ درصد) می توان به رشد ۲۰ تا ۳۰ درصدی در مقاومت فشاری دست یافت.

کلمات کلیدی: مواد مکمل سیمانی، سیلیکا فیوم، دوده سیلیسی، مقاومت فشاری، مواد پوزولانی

۱. مقدمه

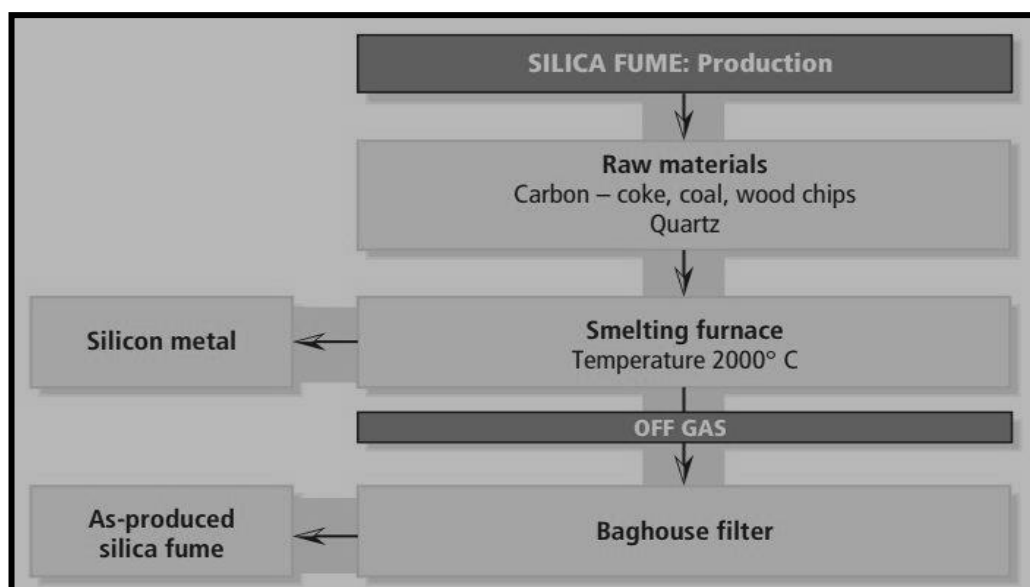
افزودنی های معدنی غالباً مواد سیلیسی و سیلیکاتی نرم و با ذرات بسیار ریز هستند که در زمان اختلاط به مخلوط بتن اضافه می شوند. محصولات فرعی صنعتی به عنوان منبع اصلی و اولیه افزودنی های معدنی محسوب می شوند. این مواد به عنوان «مواد مکمل سیمانی» یا SCM نیز خوانده می شوند. می دانیم که بتن سنتی شامل چهار جز، آب، سیمان، سنگدانه های فاین و سنگدانه های کورس می باشد، اما در مقابل، بتن معاصر دوجز اضافی شامل افزودنی های شیمیایی و مواد مکمل سیمانی یعنی SCM دارد. به همین دلیل برخی از محققان از (مواد مکمل سیمانی) به عنوان ششمین جز بتن نام می برند [۱].

در تکنولوژی بتن نوین، اهدافی که از استفاده از این افزودنی ها دنبال می شوند شامل مواردی چون بهبود کارایی بتن تازه، بالا بردن مقاومت و دوام بتن سخت شده، کاهش حرارت هیدراسیون، حفظ محیط زیست و منافع اقتصادی می

* Corresponding Author : Rezaei., H., Ph.D Student of Civil Eng., R&D Manager of Zabol Cement Ind. Co.
Email : Hn.rezaei@yahoo.com



باشند. چهار افزودنی معدنی (SCM) که به طور متداول مورد استفاده قرار میگیرند شامل سیلیکا فیوم (دوده سیلیسی) یا SF، سرباره گرانوله یا GBFS، خاکستر بادی یا PFA و متاکائولن یا MK می شوند. سوپر پوزولان سیلیکا فیوم در واقع یک محصول فرعی کارخانجات فولاد آلیاژی یا فروسیلیس است که نتیجه تبدیل کوارتز با خلوص بالا به سیلیکون در یک کوره قوس الکتریکی بوده و به صورت بخار سیلیسی کوره در دمای دو هزار درجه سانتیگراد از آن خارج می شود. این بخار در فیلتر مخصوص کوره جمع آوری شده و متراکم می گردد [۲]. مراحل تولید سیلیکا فیوم به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. سیلیکافیوم بسیار ریز دانه است به طوری که قطر ذرات آن کمتر از یک میکرومتر بوده و حدود ۹۳ برابر از ذرات سیمان کوچکتر است. چون نرمی سیلیکافیوم حدود دو برابر نرمی ذرات دود سیگار است، به همین جهت به آن دوده سیلیسی نیز اطلاق می شود. حدود نود درصد وزنی سیلیکافیوم از ذرات بسیار ریز سیلیس آمورف (بی شکل و غیر بلوری) و فعال تشکیل شده است. به همین جهت خاصیت سیمانی سیلیکا فیوم بسیار بالا بوده و به نام سوپرپوزولان خوانده می شود [۲].



شکل ۱- فرآیند تولید دوده سیلیسی (سیلیکافیوم)

دوده سیلیسی را می توان با سیمان مثلا در مرحله آسیاب کلینکر مخلوط کرد و به یک سیمان پوزولانی مرغوب دست یافت. ضمن آن که این ماده را می توان به طور جداگانه در مرحله ساخت بتن به صورت پودر و یا ژل به آن افزود. در صورت عدم دسترسی به سیمان حاوی سیلیکا فیوم بهتر است که آن را به صورت ژل مورد استفاده قرار داد. ژل سیلیکا فیوم را می توان به صورت آماده از بازار تهیه کرد و یا به وسیله یک میکسر ویژه و با دور بالا و اختلاط سیلیکافیوم و آب به نسبت وزنی ۱ به ۵ (ژل رقیق) و یا ۲ به ۳ (ژل غلیظ) تولید نمود.

۲. ویژگی های بتن ساخته شده با سوپر پوزولان سیلیکافیوم

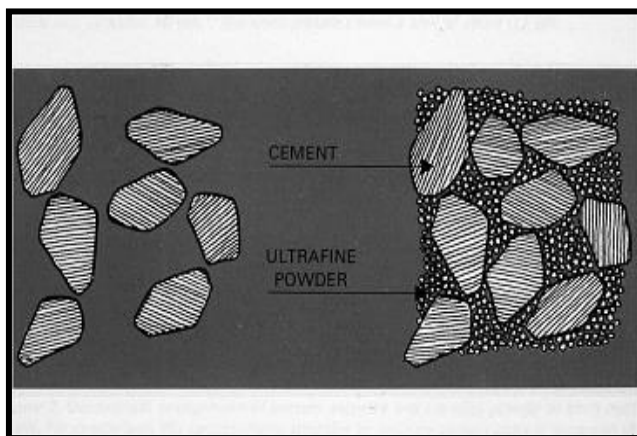
بین مواد پوزولانی، دوده سیلیس یکی از فعال ترین آنهاست. رفتار پوزولانی دوده سیلیس در بتن، مهمترین خاصیتی است که باعث می شود بتن سخت شده دارای خواص ویژه ای گردد. تفاوت اساسی بین دوده سیلیس و پوزولانهای معمولی



مانند خاکستر آتشفشانی و خاکستر بادی این است که فعالیت پوزولانی دوده سیلیس زودتر از پوزولانهای فوق آغاز می شود. دوده سیلیس به واسطه شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان خیلی فعال و پرکننده ای بسیار مؤثر در بتن است. خاصیت پرکنندگی دوده سیلیس نیز باعث توزیع یکنواخت و همگن محصولات به دست آمده از هیدراتاسیون در مخلوط می گردد. نهایتاً ترکیب دو خاصیت پرکنندگی و پوزولانی دوده سیلیس به صورت ایجاد یک جسم بسیار متراکم و کم تخلخل، خود را نشان می دهد. بنابراین، فعالیت پوزولانی و تغییر توزیع منافذ باعث کاهش نفوذپذیری بتن و کاهش درجه قلیایی آن (مقدار هیدروکسید کلسیم) می گردد [۳].

محققان نشان داده اند که خمیر هیدراته شده سیمان پرتلند به اضافه پوزولان، در مقایسه با خمیر سیمان پرتلند دارای منافذ خیلی ریزی هستند که به آسانی قابل نفوذ نیستند. اساساً دوام و استحکام بتن وابسته به احتمال نفوذ یونهای خطرناک در این ماده متخلخل به وسیله آب می باشد و زوال و دوام ساختار بتن عمدتاً وابسته به تراوایی آن می باشد. دوده سیلیسی (SF) به عنوان یک ترکیب معدنی در بتن مورد استفاده قرار می گیرد که ساختار ناتراوا و پیوسته در بتن ایجاد می کند. ناتراوایی هرچه بیشتر دوده سیلیسی وابسته به توزیع اندازه حفره ها و فشردگی ماتریسی، کاهش مقدار $Ca(OH)_2$ و توزیع سطحی توده ملات سیمانی می باشد. در طول فرایند هیدراتاسیون، حفره های سطحی به تدریج براساس واکنش پوزولانی بین دوده سیلیس و هیدروکسید کلسیم، چگال می شود [۴].

ارزیابی سریع تراوایی بتن به طور غیر مستقیم می تواند در برآورد و تخمین مقاومت آن به کار رود. نفوذ پذیری بتن در مقابل آب یا بخار خاصیتی است که اجازه عبور سیال یا بخار را از میان بتن می دهد. کلیه بتن ها قدری آب جذب می کنند و تا حد مشخصی نفوذ پذیر هستند. آزمایش های انجام شده تحت فشار های هیدرواستاتیکی معادل با ۳۰ متر ارتفاع مؤید این است که نه سیمان پرتلند و نه مخلوطهای ساخته شده با آن، به طور مطلق نفوذ ناپذیر نیستند. در سازه های هیدرولیکی که فشار آب اثر گذار است، نفوذ پذیری اهمیت بیشتری نسبت به مقاومت دارد. نفوذ پذیری و جذب همچنین در رابطه با عوامل مختلف تجزیه و تخریب بتن دارای اهمیت ویژه ای هستند [۵]. به لحاظ فیزیکی رنگ ظاهری SF خاکستری تیره یا کرم رنگ می باشد (مطابق شکل ۲) و می تواند براساس کاربرد به صورت پودر متراکم یا دوغاب به کار رود.



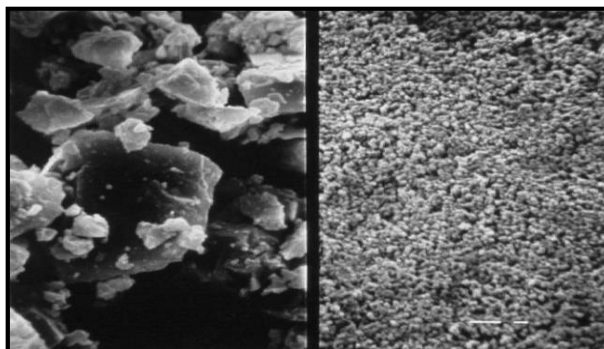
شکل ۲- رنگ ظاهری دوده سیلیسی (سیلیکافیوم) شکل ۳- کاهش نفوذپذیری بتن به وسیله دوده سیلیسی

دوده سیلیسی می تواند بر بتن هم اثر شیمیایی و هم اثر فیزیکی داشته باشد، تراوایی آن را کاهش داده و مقاومت آن را افزایش دهد. افزایش SF در بتن منجر به کاهش ضریب تخلخل حفره های سطحی بین ماتریس و سنگدانه در بتن تازه



می شود [۴]. کاربرد سیمانهای ترکیبی یا مواد افزودنی چسبنده مکمل مثل SF، تراوایی را کاهش می دهد، در نتیجه مقاومت بتن را در برابر فرسایش شیمیایی افزایش می دهد [۴]. بررسی انجام شده بر بتن حاوی SF به وسیله میکروسکوپ الکترونی نشان داد که میکرو ساختار این ماده نسبت به بتن های بدون دوده سیلیسی همگن تر و متراکم تر می باشند [۶]. تحقیقات نشان می دهد با افزودن ۱۵٪ سطح جایگزین سیمان با دوده سیلیس، ضریب تراوایی ۸۰ مرتبه کاهش می یابد. به کارگیری دوده سیلیس همچنین مقاومت بتن های خمیری را افزایش می دهد [۶]. استفاده از SiO₂ یا اکسید سیلیس که با Ca(OH)₂ میل ترکیبی خوبی دارد و در کنار آب با هم خوب ترکیب می شوند، باعث ایجاد سیلیکات کلسیم محلول در آب می شود و نفوذ پذیری بتن را با کم کردن خلل و فرج کاهش می دهد و هرچه فاصله بین خمیر سیمان و سنگدانه کمتر باشد، خلل و فرج نیز کمتر و آب بندی بتن بیشتر می گردد [۷] (شکل ۳). در طول واکنش پوزولانی SF، شکافهای بین بافت سیمان و اجزای بتن به یکدیگر اتصال یافته، مقاومت را افزایش داده و تراوایی را با چگال کردن ماتریس بتن کاهش می دهد و این بدین معنی است که بتن حاوی SF بسیار همگن و متراکم است. در زمینه کار با دوده سیلیسی، انجمن سیلیکا فیوم (Silica Fume Association) کتاب راهنمای [۲] بسیار مفیدی را به چاپ رسانده که به صورت نمونه برخی از مشخصات و ویژگی های این ماده و نیز مقایسه آن با دیگر مواد مکمل سیمانی (SCM) در شکل ۴ نشان داده شده است.

PHYSICAL PROPERTIES OF SILICA FUME	
Particle size (typical):	< 1 μm
Bulk density:	
(as-produced):	130 to 430 kg/m ³
(densified):	480 to 720 kg/m ³
Specific gravity:	2.2
Specific surface:	15,000 to 30,000 m ² /kg



(ب)

(الف)

PROPERTY	PORTLAND CEMENT	CLASS F FLY ASH	CLASS C FLY ASH	SLAG CEMENT	SILICA FUME
SiO ₂ content, %	21	52	35	35	85 to 97
Al ₂ O ₃ content, %	5	23	18	12	
Fe ₂ O ₃ content, %	3	11	6	1	
CaO content, %	62	5	21	40	< 1
Fineness as surface area, m ² /kg (Note 2)	370	420	420	400	15,000 to 30,000
Specific gravity	3.15	2.38	2.65	2.94	2.22

(ج)

شکل ۴- الف) فوتومیکروگراف از ذرات سیمان پرتلند در مقایسه با سیلیکافیوم. ب) مشخصات فیزیکی سیلیکافیوم. ج) مقایسه مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیلیکافیوم با دیگر مواد مکمل سیمانی.



۳. شرح کلی برنامه آزمایش ها

در این مطالعه آزمایشگاهی در کارخانه سیمان سیستان به بررسی خواص مکانیکی مخلوط های بتنی حاوی دوده سیلیسی از طریق تست مقاومت فشاری پرداخته شده است. برای سیمان مصرفی در طرح از سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه استفاده گردیده و دوده سیلیسی مصرفی نیز از صنایع فروآلباژ ایران واقع در ازنا تهیه شده که مشخصات آنها مطابق جدول ۱ و ۲ می باشد. سنگدانه های ریز (ماسه) مصرفی از نوع طبیعی دو بار شوی و سنگدانه های درشت (شن) از نوع شکسته می باشند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و ویژگی های فیزیکی بیندراهای طرح

سیمان	دوده سیلیسی	آنالیز
۲۱/۵۲	۹۴	SiO ₂
۵/۲۶	۰/۳۱	Al ₂ O ₃
۳/۶۲	۰/۵۹	Fe ₂ O ₃
۶۲/۳۴	۰/۳۷	CaO
۱/۷۶	۰/۷۹	MgO
۰/۶۲	۰/۲۱	Na ₂ O
۲/۸۸	۰/۲۳	SO ₃
۱/۵۱	۱/۷۵	LOI
۳/۱۸	۲/۱۳	وزن ویژه
۳۲۰۰	-	بلین

جدول ۲- مشخصات فیزیکی دوده سیلیسی

سطح ویژه (m ² /gr)	دانسیته غیرمتراکم (gr/cm ³)	دانسیته متراکم (gr/cm ³)	حدود اندازه ذرات (میکرومتر)
۲۰	۰/۲۵- ۰/۳۵	۰/۵- ۰/۷	۰/۰۵- ۰/۱۵



در این تحقیق از ۳ طرح اختلاط بتنی با برنامه ۹۰ روزه شامل یک مخلوط کنترل (۱۰۰ درصد سیمان) و دو مخلوط دیگر با میزان جایگزینی ۷/۵ و ۱۵ درصد استفاده گردید. از هر مخلوط برای تعیین مقاومت فشاری در سنین مختلف ۱۲ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر (برای هر سن ۳ نمونه) ساخته شد. در تست آزمایشگاهی ابتدا بر اساس استاندارد، یک مخلوط کنترل (Control-Mix) با نسبت آب به بیندر ۰/۳ و مقدار سیمان ۴۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار سنگدانه درشت ۱۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سنگدانه ریز ۶۸۹ کیلوگرم بر مترمکعب تهیه گردید که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. در ادامه به منظور بررسی نقش سیلیکا فیوم در بتن، دو مخلوط دیگر با جایگزینی ۷/۵ و ۱۵ درصد دوده سیلیسی به جای سیمان طرح گردید.

جدول ۳- مشخصات مخلوط کنترل (Control-Mix)

Water (kg/m ³)	PC (kg/m ³)	F.a (kg/m ³)	C.a (kg/m ³)	W/B
۱۴۵	۴۸۵	۶۸۹	۱۱۵۰	۰/۳

در مخلوط حاوی ۷/۵ درصد سیلیکافیوم، نسبت سنگدانه به بیندر در حدود ۳/۷۶ و نسبت مصالح فاین به کورس در حدود ۰/۵۹ و مقدار سیمان ۴۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار دوده سیلیسی در حدود ۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد.

در مخلوط حاوی ۱۵ درصد سیلیکافیوم، نسبت سنگدانه به بیندر در حدود ۳/۷۲ و نسبت مصالح فاین به کورس در حدود ۰/۵۷ و مقدار سیمان ۴۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار دوده سیلیسی در حدود ۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. همچنین در هر سه طرح اختلاط مورد بحث از مواد فوق روان کننده استفاده گردید. سایر اطلاعات مربوط به نسبت های اختلاط در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- جدول نسبت های اختلاط (سه طرح اختلاط آزمایشگاهی)

Mix ID	Agg./Binder	F.a/C.a	Water (kg/m ³)	PC(kg/m ³)	SF(kg/m ³)	F.a(kg/m ³)	Superplasticiser (% by mass of PC)
Control.Mix	۳/۷۹	۰/۶	۱۴۵	۴۸۵	-	۶۸۹	۱/۱۰
M-SF-7.5	۳/۷۶	۰/۵۹	۱۴۵	۴۴۹	۳۶	۶۷۳	۱/۳۵
M-SF-15	۳/۷۲	۰/۵۷	۱۴۵	۴۱۲	۷۳	۶۵۲	۱/۷۵

۴. خلاصه نتایج مقاومت فشاری نمونه ها

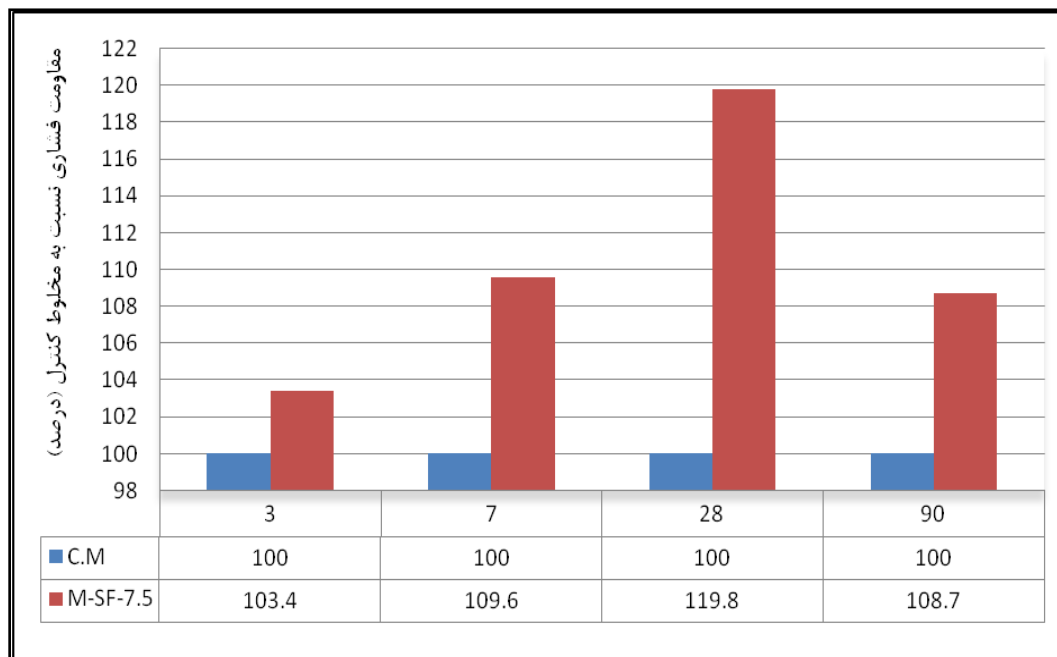
برای ۳ طرح اختلاط، آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ روزه با شکستن ۳ نمونه از هر سن انجام گردید. نتایج این آزمایشات نسبت به مخلوط کنترل در جدول ۵ ارائه شده است. در مخلوط حاوی ۷/۵ درصد سیلیکافیوم در تمامی سنین، رشد مقاومت فشاری دیده می شود که این افزایش مقاومت از سن ۳ روزه تا ۲۸ روزه روندی صعودی دارد و بیشترین درصد افزایش مربوط به سن ۲۸ روزه می باشد.



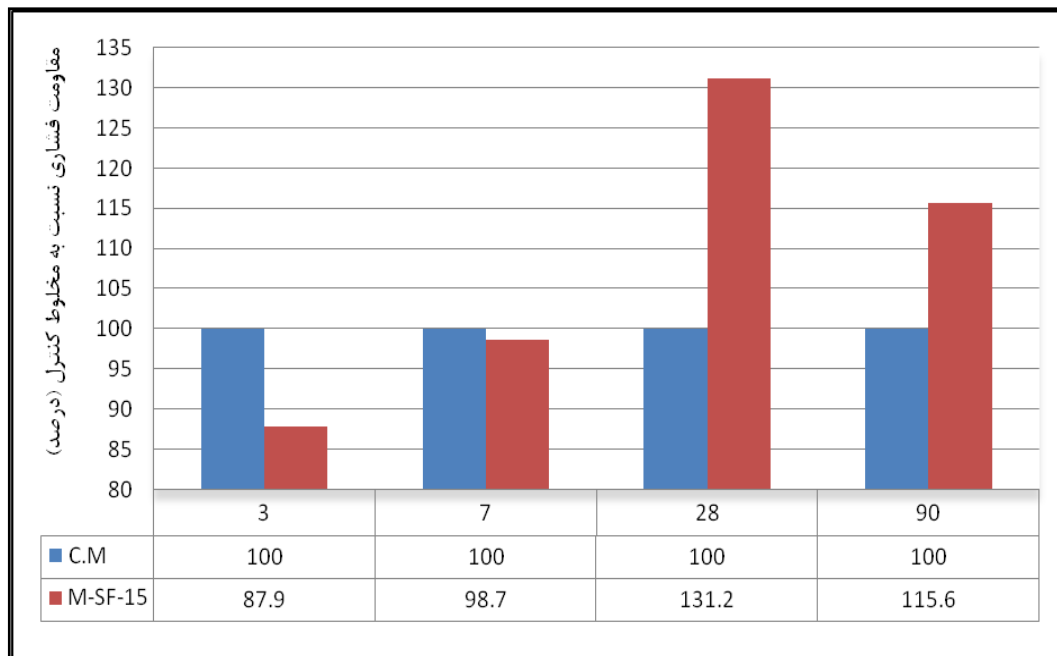
در مخلوط حاوی ۱۵ درصد سیلیکافیوم در سنین کم روند کاهش مقاومت نسبت به مخلوط کنترل ملاحظه گردید اما در سن ۲۸ روزه به یکباره افزایش چشمگیری در مقاومت نمونه ها رخ داد به طوری که این افزایش (سن ۲۸ روزه) از میزان افزایش مقاومت مخلوط حاوی ۷/۵ درصد سیلیکافیوم در سن ۲۸ روزه نیز بیشتر می باشد. همچنین در مخلوط حاوی ۱۵ درصد سیلیکافیوم به طور مشابه افزایش مقاومت از سن ۳ روزه تا ۲۸ روزه روندی صعودی دارد. نتایج مربوط به سن ۹۰ روزه در نمونه های بتنی حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد دوده سیلیسی در مقایسه با مخلوط کنترل به ترتیب نشان از رشد ۸ درصدی و ۱۵ درصدی مقاومت فشاری دارد. به طور کلی اگر در آزمایشات حاضر مبنای قضاوت را سن ۲۸ روزه در نظر بگیریم می توان اظهار کرد که با افزایش درصد جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیمان می توان به رشد ۳۰ درصدی در مقاومت فشاری دست یافت. در ادامه به منظور نمایش تاثیر حضور سیلیکافیوم در بتن نمودار هایی در شکل ۵ و ۶ ارائه شده است.

جدول ۵- اثر سیلیکافیوم بر مقاومت فشاری نمونه های بتنی

Mix ID	مقاومت فشاری در سنین مختلف نسبت به مخلوط کنترل (برحسب درصد)			
	۳روز	۷روز	۲۸روز	۹۰روز
Control.Mix	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
M-SF-7.5	۱۰۳/۴	۱۰۹/۶	۱۱۹/۸	۱۰۸/۷
M-SF-15	۸۷/۹	۹۸/۷	۱۳۱/۲	۱۱۵/۶



شکل ۵- مقایسه نتایج مخلوط حاوی ۷/۵ درصد سیلیکافیوم با مخلوط کنترل در سنین مختلف



شکل ۶- مقایسه نتایج مخلوط حاوی ۱۵ درصد سیلیکافیوم با مخلوط کنترل در سنین مختلف

۵. نتیجه گیری

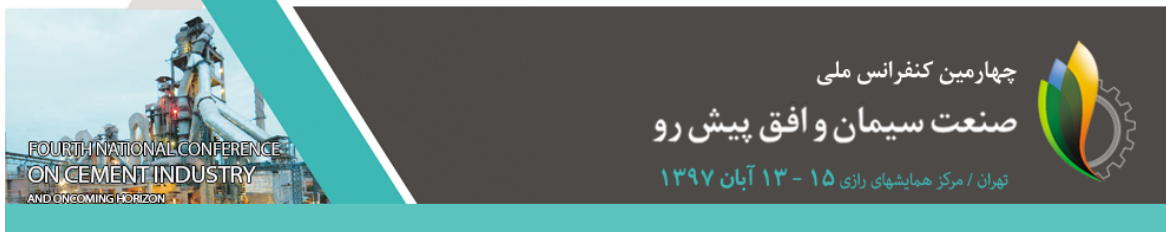
بر اساس تحقیق صورت گرفته و با در نظر گرفتن این مطلب که این نتایج منحصرًا مربوط به نمونه دوده سیلیسی به کار رفته در این پروژه آزمایشگاهی بوده و برای اظهار نظر قطعی نیاز به تحقیقات آزمایشگاهی گسترده تری وجود دارد موارد زیر قابل نتیجه گیری است :

تمامی نمونه های بتنی حاوی دوده سیلیسی از سنین کم تا سن ۲۸ روزه رشد مقاومت فشاری را تجربه می کنند که ماکزیمم افزایش مقاومت در سن ۲۸ روزه رخ می دهد. در نمونه های حاوی ۷/۵ درصد سیلیکافیوم در تمامی سنین، رشد مقاومت فشاری نسبت به مخلوط شاهد دیده می شود.

در مخلوط حاوی ۱۵ درصد سیلیکافیوم در سنین کم روند کاهش مقاومت نسبت به مخلوط کنترل ملاحظه می گردد ولی در سن ۲۸ روزه بیشترین افزایش در مقاومت نمونه ها رخ می دهد به نحوی که این میزان افزایش از میزان افزایش مقاومت در نمونه های حاوی ۷/۵ درصد سیلیکافیوم در سن ۲۸ روزه نیز بیشتر است.

نتایج مربوط به سنین بالا (سن ۹۰ روزه) در نمونه های بتنی حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد دوده سیلیسی در مقایسه با مخلوط شاهد به ترتیب نشان از رشد ۸ درصدی و ۱۵ درصدی مقاومت فشاری دارد.

اگر مطابق آیین نامه ها نتایج مربوط به مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه را ملاک عمل قرار دهیم می توان گفت که با افزایش درصد جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیمان (از صفر تا ۱۵ درصد) می توان به رشد ۲۰ تا ۳۰ درصدی در مقاومت فشاری دست یابیم.



۶. مراجع

1. ACI Committee 234, (1996) *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*, ACI 234R-96, American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan.
2. SFA, <http://www.silicafume.org>, (2000) Silica Fume Association, Fairfax, Virginia.
3. Malhotra, V. M., (1996) , *Pozzolan and Cementitious Materials*, Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, page 208.
4. Ha-Won S., Seung-Woo P., Sang-Hyeok N., Jong-Chul J. and Velu S., (2010), “*Estimation of the permeability of silica fume cement concrete*”, Construction and building material, PP 315-32.
5. Lachemi M, Jagnit-hamou AE, Aitcin C.,(1998), “*Long-term performance of silica fume cement concretes*”, Concr Inst, PP 59-65.
6. Song Ha-W., Jand Jong-Ch., Saraswathy V., (2007), “*An estimation of diffusivity of silica fume concrete*”, Build Environ, PP1358-1367.
7. Khatri RP., Sirivivatnanon V. (1995) , *Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete*. Cem Concre Res, 25(1):209–216.