تأثیر رس‌های کلسینه شده و میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن

ابوالفضل سلطانی[1]، امیر طریقت[2]، روح‌اله رستمی[3]*

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
۳- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

امروزه پوزولان‌ها به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای سیمان از لحاظ افزایش مقاومت و دوام بتن در شرایط محیطی نامناسب، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط زیست محسوب می‌شوند. در این مقاله تأثیر ترکیب رس‌های کلسینه به عنوان پوزولان و میکروسیلیس و تأثیر هرکدام نیز به تنهایی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ۱۵ طرح مخلوط با نسبت آب به موادسیمانی ۰/۳۸ ساخته شد. در شش طرح فقط متاکائولن، زئولیت و یا میکروسیلیس وجود دارد و در هشت طرح دیگر متاکائولن و میکروسیلیس و یا زئولیت و میکروسیلیس با هم ترکیب شده‌اند. متاکائولن یا زئولیت با نسبت ۱۰ یا ۲۰ درصد و میکروسیلیس با نسبت ۷ یا ۱۰ درصد جایگزین سیمان مصرفی شده‌اند. یافته‌های اصلی این تحقیق نشان داد که استفاده از این نوع پوزولان‌ها می‌تواند سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن شود، به گونه‌ای که بهترین عملکرد تا سن ۲۸ روز برای مقاومت فشاری مربوط به جایگزینی ترکیب ۱۰درصد زئولیت با ۷ درصد میکروسیلیس و برای مقاومت الکتریکی مربوط به جایگزینی ترکیب ۱۰ درصد زئولیت با ۱۰ درصد میکروسیلیس است.

کلمات کلیدی: بتن، رس‌های کلسینه، میکروسیلیس، مقاومت فشاری.

***نویسنده مسئول: روح‌اله رستمی**
پست الکترونیکی: rostami62r@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵

DOI: 10.22065/jsce.2017.43232
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.43232
شناسه دیجیتال

۱- مقدمه

سیمان یکی از مصالح ساختمانی است که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طول فرآیند تولید آن جهت به دست آمدن CaO به عنوان یکی از مواد اولیه، سنگ آهک را تا دمای ۱۴۵۰ ^{o}C حرارت می‌دهند که این امر سبب تولید مقدار قابل توجهی CO_2 می‌شود. با تولید یک تن سیمان، تقریباً ۰/۸ تن CO_2 متصاعد می‌شود. صنعت سیمان سبب انتشار ۸-۵٪ کل CO_2 در سراسر جهان است[۱].

تولید کنندگان سیمان در صدد هستند مقدار انرژی مورد نیاز برای تولید سیمان و مقدار گاز انتشار یافته در روند تولید سیمان را کاهش دهند. به همین دلیل در پی جستجوی موادی برای جایگزینی سیمان هستند [۲]. ماده‌ای که برای جایگزینی سیمان (یا جایگزینی بخشی از سیمان) در نظر گرفته می‌شود، از یک طرف باید عوامل منفی مانند: نیاز به سنگ آهک، تولید CO_2، صرف انرژی و هزینه زیاد را کاهش دهد و از طرفی، باید منجر به افزایش خصوصیات مثبت بتن مانند مقاومت و دوام شود. راهکار پیشنهادی، استفاده از سیمان‌های آمیخته است. امروزه، تولید سیمان‌های آمیخته با استفاده از پوزولان‌های مختلف (شامل میکروسیلیس، خاکستر بادی، پوزولان‌های طبیعی و غیره)، محبوبیت جهانی پیدا کرده است [۳]. متاکائولن، زئولیت و میکروسیلیس سه نوع از پوزولان‌هایی هستند که با توجه به خواص مثبتی که بر روی بتن داشته‌اند مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند.

خاک‌های کائولینیتی گروهی از انواع پوزولان‌های طبیعی هستند که به دلیل ریز بودن، داشتن ساختاری آمورف و فعالیت پوزولانی بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای قسمتی از سیمان باشند. برای تقویت خاصیت پوزولانی و افزایش قدرت واکنش‌پذیری کائولن، آن را در محدوده دمایی ۶۰۰ ^{o}C تا ۹۰۰ حرارت می‌دهند تا ماده‌ای به نام متاکائولن با ساختار آلومینوسیلیکاتی به صورت آمورف شکل گیرد. استفاده از این ماده در مصالح ساختمانی قدمت چندین هزار ساله دارد [۴]. کائولن یک خاک طبیعی و معدنی بسیار دانه‌ریز به رنگ سفید و با ذراتی به شکل صفحه‌ای یا بشقابی است. از نظر شیمیایی فرمول مولکولی رایج برای کائولن به عنوان سرگروه کائولینیت $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ می‌باشد[۵].

توف‌های زئولیتی از زمان روم باستان، در ترکیب با آهک مورد استفاده قرار می‌گرفتند. زئولیت‌ها کانی‌های آلومینوسیلیکاتی هستند که با داشتن ساختار قفسه مانند، دارای سطح مخصوص (داخلی و خارجی) بزرگی هستند. سطح مخصوص زیاد، اساس واکنش‌پذیری قابل توجه می‌باشد [۶]. فرمول شیمیایی زئولیت در حالت کلی به صورت $m\ 2/n\ O.Al_2O_3.xSiO_2.yH_2O$ می‌باشد [۷]، که در آن m نوع کانی‌های قلیایی و قلیایی‌خاکی با ظرفیت n است و x و y ضرایبی متغیر با مقادیری به ترتیب ۲ تا ۱۰ و ۲ تا ۷ می‌باشند.

میکروسیلیس یک ماده زاید حاصل از فرآوری صنعتی مواد است که از کوره‌های ذوب فلزات با روش قوس الکتریکی در جریان تولید فاز سیلیسیم و یا آلیاژهای وابسته به آن تولید می‌شود. این ماده به علت داشتن بیش از ۸۰ درصد سیلیس غیربلوری و همچنین ذرات بسیار ریز، خاصیت پوزولانی زیادی دارد. از لحاظ خواص فیزیکی، ذرات این ماده کاملاً کروی شکل بوده و اندازه متوسط دانه‌های آن برابر با ۰/۲ میکرون و سطح ویژه‌ای در حدود ۱۴ مترمربع بر گرم دارد [۸].

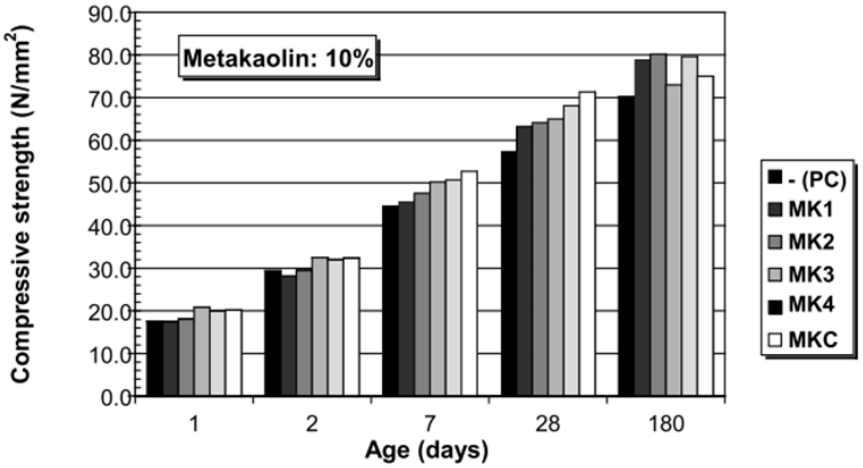
آزمایش مقاومت فشاری یکی از مهمترین آزمایش‌هایی است که در ارزیابی خواص بتن انجام می‌شود. نتایج این آزمایش می‌تواند گویای روند هیدراسیون و کیفیت خمیر سخت شده سیمان و بتن نهایی باشد

در تحقیقی که توسط بادوگیانیس و همکارانش روی پنج نمونه متاکائولن با ترکیبات شیمیایی موجود در جدول۱ انجام شده است نشان می‌دهد با گذشت زمان و افزایش درصد کائولینیت مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد (شکل‌های۱و۲). علاوه بر این نمونه‌های بتنی با ۱۰ درصد جایگزینی متاکائولن به جای سیمان (شکل۱) مقاومت فشاری بالاتری نسبت به حالت ۲۰ درصد جایگزینی این ماده دارند (شکل۲) [۹].

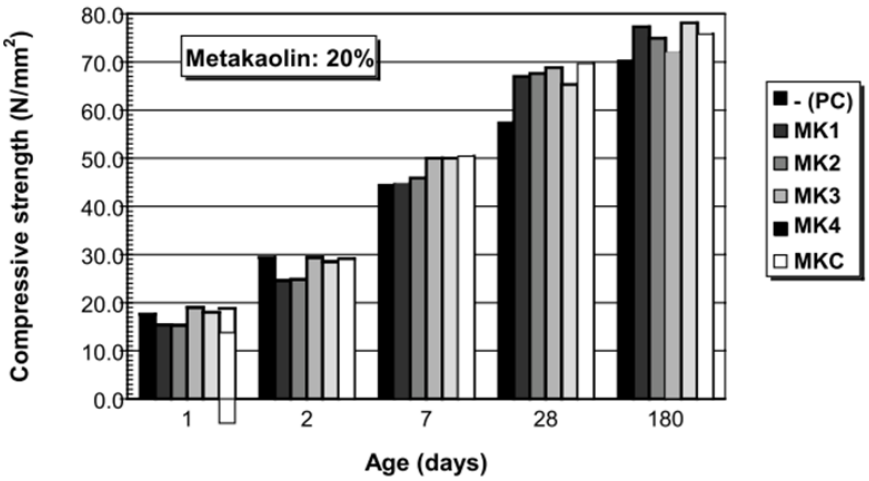
جدول۱ : ترکیبات شیمیایی کائولن‌های آزمایش شده در تحقیق بادوگیانیس [۹]

Mineralogical composition of kaolins (% w/w)

	K1	K2	K3	K4	KC
Kaolinite	38	39	65	52	96
Alunite	7	7	22	5	–
Quartz (mainly) + cristobalite	55	54	8	41	–
Illite	–	–	–	–	3



شکل۱ : مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد متاکائولن [۹].



شکل۲ : مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد متاکائولن [۹].

در تحقیقی که در هنگ کنگ توسط سامی و ژیهانگ [۱۰] انجام شد، تأثیر زئولیت (Zeolite)، خاکستر بادی (Pulverized Fuel Ash: PFA) و میکروسیلیس (Silica Fume: SF) بر مقاومت فشاری دو دسته از نمونه‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها با نمونه‌های شاهد ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی (OPC)، مورد بررسی قرار گرفت. دسته اول نمونه‌هایی بودند که دارای نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و برابر ۰/۲۸ بوده و در آن‌ها، Zeolite، SF و PFA به صورت ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد وزنی، جایگزین سیمان شدند. دسته‌ی دوم شامل نمونه‌هایی بودند که در آن‌ها درصد جایگزینی Zeolite، SF و PFA ثابت و برابر ۱۰ درصد بوده ولی نسبت آب به مواد سیمانی متغیر و برابر ۰/۲۷، ۰/۳۳، ۰/۳۹و ۰/۴۵ بوده است. نتایج مربوط به سری اول نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، می‌توان مشاهده کرد که در تمام حالت‌های جایگزینی، Zeolite، SF و PFA باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شوند. با این وجود، در سن ۷ روزه مشاهده می‌شود که وقتی مقدار جایگزینی Zeolite و PFA به ۳۰٪ می‌رسد، به دلیل اینکه افزایش مقاومت نمونه‌ها در سرعت کمتری و مانند نمونه‌های شاهد اتفاق می‌افتد، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده و در حد نمونه‌های شاهد می‌باشد. بنابراین، مقدار بهینه‌ی جایگزینی برای Zeolite و PFA برابر ۱۵٪ و برای SF برابر ۱۰٪ می‌باشد. در جدول ۳ نیز نتایج مربوط به دسته‌ی دوم نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول۲ : نتایج اسلامپ و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه برای دسته‌ی اول نمونه‌ها [۱۰]

Concrete code	Cement replacement material and level	Superplasticizer (l/m^3)	Slamp (mm)	Compressive strength (MPa)		7-day/28-day Compressive Strength ratio
				7-day	28-day	
Control	_	8	198	77.4	96.5	0.80
ZE5	Zeolite, 5%	8	210	90.5	103.8	0.87
ZE10	Zeolite, 10%	8	215	88.1	104.8	0.84
ZE15	Zeolite, 15%	8	220	96.0	110.2	0.87
ZE30	Zeolite, 30%	9.5	200	75.3	101.6	0.74
FA5	PFA, 5%	8	202	88.9	101.5	0.88
FA10	PFA, 10%	8	220	85.1	102.1	0.83
FA15	PFA, 15%	8	215	84.8	106.3	0.80
FA30	PFA, 30%	9.5	210	74.7	103.4	0.72
SF5	Silica fume, 5%	8	225	102	108.3	0.94
SF10	Silica fume, 10%	8	55	101	120.1	0.84
SF15	Silica fume, 15%	8	15	96.8	115.3	0.84
SF30	Silica fume, 30%	13.4	35	95.3	114.7	0.83

جدول ۳ : نتایج اسلامپ و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه برای دسته‌ی دوم نمونه‌ها [۱۰]

No.	W/(C+P)	Cement replacemennt material and level	Compressive strength (MPa)		Slamp (mm)
			7-day	28-day	
1	0.27	_	91.9	110.0	205
2	0.33	_	72.0	92.9	190
3	0.39	_	50.4	71.3	140
4	0.45	_	40.4	60.3	172
5	0.27	Zeolite, 10%	101.7	115.6	190
6	0.33	Zeolite, 10%	76.4	97.6	180
7	0.39	Zeolite, 10%	53.7	73.1	110
8	0.45	Zeolite, 10%	39.7	57.9	125
9	0.27	PFA, 10%	92.9	114.4	125
10	0.33	PFA, 10%	74.0	94.6	100
11	0.39	PFA, 10%	52.1	70.9	115
12	0.45	PFA, 10%	38.9	56.6	115
13	0.27	Silica fume, 10%	103.8	120.9	25
14	0.33	Silica fume, 10%	91.0	108.6	35
15	0.39	Silica fume, 10%	65.1	83.7	35
16	0.45	Silica fume, 10%	48.7	70.6	60

نتایج آزمایش نشان می‌دهد که بدون توجه به نسبت آب به مواد سیمانی، ۱۰٪ جایگزینی سیمان به وسیله‌ی SF باعث افزایش مقاومت ۷ و ۲۸ روزه می‌شود. اما برای نمونه‌هایی که حاوی Zeolite و PFA بودند، وقتی نسبت آب به مواد سیمانی به ۰/۴۵ رسیده است، مقاومت ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها کمتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد.

آزمایش مقاومت الکتریکی به عنوان یک ابزار جهت سنجش پتانسیل مقاومت و دوام بتن استفاده می‌شود. از مزیت‌های ویژه این آزمایش، غیر مخرب و ارزان بودن آن است. مقاومت الکتریکی تنها خاصیت بتن است که با تمام عوامل کنترل شدت خوردگی ارتباط دارد بطوریکه با افزایش مقاومت الکتریکی، شدت جریان کمتر و خوردگی هم کاهش می‌یابد [۱۱-۱۲]. هدایت و مقاومت معانی عکس یکدیگر

دارند. وجود رطوبت و تخلخل در بتن باعث کاهش مقاومت و افزایش هدایت الکتریکی آن می‌شود. همچنین کاهش الکترولیت موجود در بتن که با کاهش رطوبت حاصل می‌گردد، مقاومت الکتریکی بتن را بالا می‌برد.

دوام بتن به طور کلی به واکنش شیمیایی (واکنش هیدراسیون سیمان) و ساختار بتن مربوط می‌شود. استفاده از پوزولان‌ها به دلیل تأثیر در ساختار میکروسکوپی بتن می‌تواند بر دوام بتن مؤثر باشد.

جاستیس[۱۳] معتقد است که متاکائولن می‌تواند با مقداری از پرتلندایت تولید شده از هیدراسیون سیمان وارد واکنش شده و باعث چگال‌تر شدن ساختار خمیر سیمان هیدراته شده شود. در واقع به دلیل قابلیت حل شدن پرتلندایت در آب، ناحیه انتقال مستعد خراب شدن در محیط‌های شیمیایی است و متاکائولن پس از واکنش با این ماده تأثیر مهمی بر بهبود دوام بتن خواهد داشت.

نتایج مطالعات بادوگیانیس و همکارانش [۹] نشان می‌دهدکه افزودن متاکائولن در اغلب نمونه‌های بتنی باعث کاهش نسبی تخلل در بتن خواهد شد. وی معتقد است بتن‌های متاکائولنی در مقایسه با بتن‌های تهیه شده با سیمان پرتلند معمولی نفوذپذیری کمتری در برابر اثرات کلریدها و گازها دارند.

۲- فرآوری مواد و مصالح مورد استفاده در تحقیق

کائولن مورد استفاده برای این تحقیق از ذخایر معدنی آهویی و رخ سفید واقع در ۲۶۵ کیلومتری جنوب مشهد و در ۱۴ کیلومتری غرب گناباد تأمین شده است. این ماده جهت افزایش عملکرد مثبت در محیط بتن توسط دستگاه لس آنجلس تا حد ممکن پودر شده و سپس پودر حاصل از سایش، در مرکز فرآوری مواد معدنی ایران (کرج)، در کوره تحت حرارت یکنواخت ۷۵۰°C به مدت ۳ ساعت قرار گرفت. در این فرآیند، ضمن کلسینه شدن و تبدیل کائولن به متاکائولن، موجبات ریزتر شدن ذرات آن نیز فراهم گردید. آنالیز XRF برای تعیین ترکیب شیمیایی متاکائولن در جدول ۴ نشان داده شده است.

زئولیتی که در این تحقیق از آن استفاده شده است، بر اساس آنالیز شیمیایی انجام شده، کلینوپتیلولایت بود. این ماده نوعی زئولیت طبیعی است. این ماده از معادن زئولیت موجود در سمنان تهیه گردید. آنالیز XRF برای تعیین ترکیب شیمیایی کلینوپتیلولایت در جدول ۵ نشان داده شده است. میکروسیلیس مورد استفاده در این تحقیق از تهران تهیه شده و جدول ۶ ترکیبات شیمیایی این ماده را نشان می‌دهد.

همانطور که در جداول ۴ و ۶ (مشخصات شیمیایی کائولن و میکروسیلیس) مشاهده می‌شود مجموع درصدهای Al_2O_3 و SiO_2 حدود ۹۰ درصد است که شباهت زیادی به ترکیب کلینکر در سیمان پرتلند استفاده شده دارند. لذا می‌توانند ضمن ایفای نقش پوزولانی احتمالاً بصورت جایگزین بخشی از سیمان نیز عمل کنند. نتایج آنالیز شیمیایی جدول ۵ (مشخصات شیمیایی زئولیت) نشان می‌دهدکه در این نوع زئولیت، مجموع درصد وزنی SiO_2، Al_2O_3 و Fe_2O_3 برابر با ۸۰/۲۵ درصد می‌باشد. بنابراین، طبق استاندارد ASTM C618 این نوع زئولیت طبیعی می‌تواند درگروه N از پوزولان‌های طبیعی قرار گیرد. همچنین، مقدار بالای کاهش وزن زئولیت (L.O.I) در اثر حرارت، می‌تواند مربوط به سطح مخصوص بالای این ماده و در نتیجه زیاد بودن قدرت جذب آب سطحی آن باشد. طبق استاندارد ASTM C 618 مقدار L.O.I باید کمتر از ۱۰ باشد البته این درصورتی است که حرارت اعمال شده تا دمای ۷۵۰°C سانتیگراد باشد. در فرآوری این زئولیت، حرارت تا دمای ۱۲۰۰°C اعمال شده است. بنابراین، مقدار L.O.I بدست آمده (۱۲/۷۸) برای زئولیت مصرفی، مقدار قابل قبولی می‌باشد. به علاوه، مشاهده می‌شود که در زئولیت درصد Na_2O از درصد K_2O بیشتر است که می‌تواند به دلیل ترکیب شیمیایی و شرایط تشکیل زئولیت در منشأ آن باشد.

سیمان معمولی (OPC) بکار گرفته شده در ساخت نمونه‌های بتنی از نوع پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تولید کارخانه سیمان تهران می‌باشد که در جدول ۷ ترکیبات شیمیایی این ماده نشان داده شده است.

سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق شامل شن و ماسه‌ی طبیعی شسته شده است که از معادن اطراف تهران تهیه شده است.

آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها آب شرب شهری است. متاکائولن، زئولیت و میکروسیلیس به صورت دوغاب وهمراه با آب درساخت بتن مورد استفاده قرار گرفتند.

ماده افزودنی فوق‌روان‌کننده نوعی افزودنی شیمیایی است که مقدار آب لازم را برای مخلوط بتنی به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. ماده افزودنی مصرف شده در این تحقیق فوق‌روان‌کننده با نام تجاری LG Chem بوده که بر پایه پلیمرهای پلی کربوکسیلیک اتر اصلاح شده قرار دارد.

جدول۴ : مشخصات شیمیایی متاکائولن گناباد با استفاده از آنالیز XRF

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی موجود در متاکائولن
L.O.I	1.20
MgO	0.67
Al_2O_3	22.87
SiO_2	64.51
P_2O_5	0.15
SO_3	1.36
K_2O	4.68
CaO	0.66
TiO_2	0.36
Fe_2O_3	2.56
Na_2O	0.97

جدول۵ : مشخصات شیمیایی زئولیت طبیعی با استفاده از آنالیز XRF

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی موجود در زئولیت
L.O.I	12.78
MgO	1.15
Al_2O_3	10.98
SiO_2	68.33
SrO	0.15
SO_3	0.18
K_2O	1.6
CaO	1.53
Fe_2O_3	0.94
Na_2O	2.37

جدول۶ : ترکیب شیمیایی میکروسیلیس

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی موجود در میکروسیلیس
L.O.I	2
MgO	1.80
Al_2O_3	1
SiO_2	91.7
SO_3	0.87
CaO	1.68
Fe_2O_3	0.9
Cl	0.08

جدول۷ : ترکیب شیمایی سیمان تیپ ۱-۴۲۵ تهران

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی موجود در سیمان	ترکیب شیمیایی	درصد وزنی موجود در سیمان
L.O.I	2.98	Fe_2O_3	2.76
MgO	3.44	TiO_2	0.44
Al_2O_3	3.83	MnO	0.2
SiO_2	21.32	C_3A	5.1
SO_3	2.09	C_4AF	9.06
K_2O	0.73	C_3S	54.6
CaO	62.02	C_2S	20

۳- مشخصات طرح‌های مخلوط

در این تحقیق از ۱۵ طرح مخلوط با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۸ استفاده شده است. یک طرح به عنوان نمونه شاهد، بدون جایگزینی سیمان با پوزولان، شش طرح فقط متاکائولن، زئولیت و یا میکروسیلیس و در هشت طرح دیگر متاکائولن و میکروسیلیس و یا زئولیت و میکروسیلیس با هم ترکیب شده‌اند. در طرح‌های مخلوط، متاکائولن یا زئولیت با نسبت ۱۰ یا ۲۰ درصد و میکروسیلیس با نسبت ۷ یا ۱۰ درصد جایگزین سیمان مصرفی شده‌اند. در کلیه‌ی طرح‌ها عیار مواد سیمانی $۴۵۰ kg/m^3$ است. برای دست یافتن به کارآیی یکسان در هر یک از طرح‌های مخلوط و به منظور دستیابی به اسلامپی در حدود ۱۲۰-۸۰ میلیمتر، به میزان لازم به هر یک از طرح‌ها فوق‌روان‌کننده اضافه شد. مشخصات طرح‌های مخلوط ساخته شده در جدول ۸ آمده است. در این جدول مقدار تعیین شده برای شن، ماسه، آب، سیمان، متاکائولن، زئولیت و میکروسیلیس بر حسب kg/m^3 می‌باشد.

۴- ساخت و نگه‌داری نمونه‌ها

در این تحقیق از قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر برای ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری استفاده شده است. پس از ساخت هر طرح مخلوط، بلافاصله برای تعیین روانی بتن تازه، آزمایش اسلامپ انجام گردید. در این تحقیق میزان فوق‌روان‌کننده به نحوی انتخاب شد تا میزان اسلامپ ۲±۱۰ سانتیمتر برای همه نمونه‌ها بدست آید. در صورت مناسب بودن اسلامپ بتن درون قالب ریخته شده و پس از طی ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها درون حوضچه آب به منظور عمل‌آوری تا سن ۷ و ۲۸ روز قرار داده شدند. جهت کسب اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌های صورت گرفته و کاهش خطا، برای هر طرح مخلوط و برای هر سنی سه نمونه مکعبی ساخته شد. ضمناً تمام مراحل ساخت، نگه‌داری و آزمایش نمونه‌ها در آزمایشگاه بتن دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران انجام شد.

جدول۸ : جزئیات کامل طرح‌های مخلوط (MK = Metakaolin; Z = Zeolite; SF=Silica Fume)

شماره طرح	نحوه نمایش طرح در نمودارها	W/C	مواد ومصالح استفاده شده در مخلوط‌های بتنی (Kg/m^3)						
			آب	سیمان	میکروسیلیس	متاکائولن	زئولیت	ریزدانه	درشت دانه
MIX1	PC	0.38	171	450	0	0	0	1245.3	533.7
MIX2	SF7	0.38	171	418.5	31.5	0	0	1245.3	533.7
MIX3	SF10	0.38	171	405	45	0	0	1245.3	533.7
MIX4	MK10	0.38	171	405	0	45	0	1245.3	533.7
MIX5	SF7MK10	0.38	171	373.5	31.5	45	0	1245.3	533.7
MIX6	SF10MK10	0.38	171	360	45	45	0	1245.3	533.7
MIX7	MK20	0.38	171	360	0	90	0	1245.3	533.7
MIX8	SF7MK20	0.38	171	328.5	31.5	90	0	1245.3	533.7
MIX9	SF10MK20	0.38	171	315	45	90	0	1245.3	533.7
MIX10	Z10	0.38	171	405	0	0	45	1245.3	533.7
MIX11	SF7Z10	0.38	171	373.5	31.5	0	45	1245.3	533.7
MIX12	SF10Z10	0.38	171	360	45	0	45	1245.3	533.7
MIX13	Z20	0.38	171	360	0	0	90	1245.3	533.7
MIX14	SF7Z20	0.38	171	328.5	31.5	0	90	1245.3	533.7
MIX15	SF10Z20	0.38	171	315	45	0	90	1245.3	533.7

۵- شرح و تفسیر نتایج

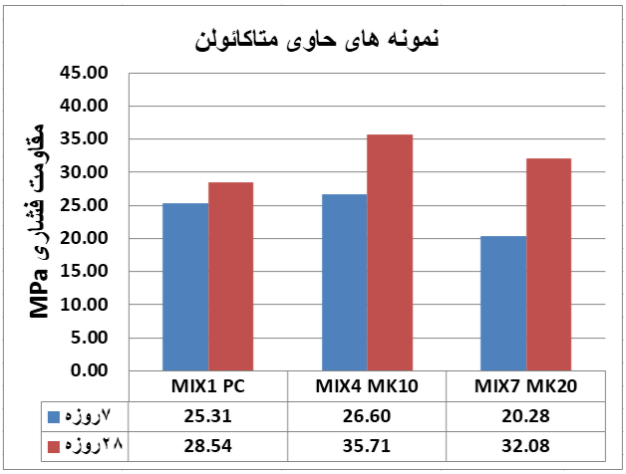
در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۸ و در سنین۷ و ۲۸ روز و مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روز روی نمونه‌های مکعبی با ضلع ۱۰ سانتیمتر انجام شد. برای هر طرح و برای هر سن، از سه نمونه میانگین گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری برای تمام طرح‌های ساخته شده در شکلهای شماره ۱ تا ۶ و نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی در شکلهای ۷ تا ۱۲ آمده است.

۵-۱- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن

با بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد متاکائولن در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز (شکل۱)، مشاهده می‌شود که با افزایش سن، مقاومت نمونه‌های حاوی متاکائولن بیشتر از نمونه شاهد شده است. درصد جایگزینی بهینه متاکائولن ۱۰ بدست آمده است که با نتایج تحقیقات بادوگیانیس و همکارانش [۹] که قبلاً در مقدمه به آن اشاره شد مطابقت دارد.

۵-۱-۱- تأثیر متاکائولن بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن

مطالعات آماری نشان می‌دهد که، افزایش درصد متاکائولن از ۰ تا ۱۰، در شرایطی که به تنهایی در بتن استفاده شود، منجر به افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه بتن خواهد شد [۱۴-۱۵]. در سنین بالاتر (۲۸ روز)، برای درصدهای جایگزینی بالاتر متاکائولن (۲۰ درصد) نیز مقاومت افزایش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که فعالیت پوزولانی متاکائولن در سن ۲۸ روز بیشتر شده و امکان جایگزینی درصدهای بالاتری از این ماده در نسبت‌های پایین آب به موادسیمانی وجود دارد.



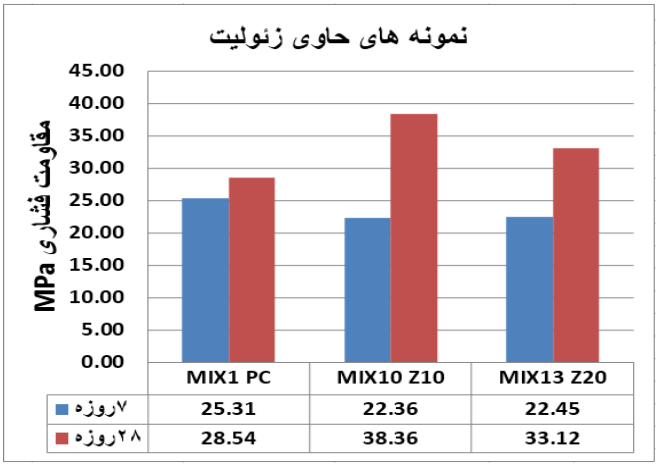
شکل۱ : مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن.

۵-۲ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت

با بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز (شکل۲) ، مشاهده می‌شود که با افزایش سن در هر دو مقدار جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت مقاومت نمونه‌ها بیشتر از نمونه شاهد شده است. مناسب‌ترین درصد جایگزینی زئولیت ۱۰ (MIX10) بدست آمده است، ولیپور و همکارانش [۱۶] مناسبترین مقدار جایگزینی زئولیت را ۱۰ درصد بیان کرده‌اند که کاملاً منطبق بر نتایج این تحقیق است و همانطوریکه در مقدمه ذکر شد سامی و ژیهانگ نیز در تحقیق خود مناسب‌ترین مقدار جایگزینی زئولیت را ۱۵ درصد بیان کرده‌اند، لذا به نظر می‌رسد جایگزینی ۱۰ تا ۲۰ درصد زئولیت جهت افزایش مقاومت فشاری مناسب باشد.

۵-۲-۱ تأثیر زئولیت بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت

طبق نتایج حاصله، مقاومت فشاری در سن ۷ روز برای طرح‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در این سن و در این نسبت آب به مواد سیمانی هنوز زئولیت نتوانسته عملکرد خود را برای انجام واکنش پوزولانی و افزایش مقاومت ایفا کند و همچنین اثر رقیق‌کنندگی و در دسترس نبودن هیدروکسیدکلسیم لازم برای انجام واکنش پوزولانی از جمله دلایل کاهش مقاومت هستند. در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت از طرح شاهد بیشتر است که نشان دهنده‌ی وارد شدن پوزولان‌ها در واکنش‌های مواد سیمانی و مصرف هیدروکسید کلسیم توسط آن‌ها می‌باشد.



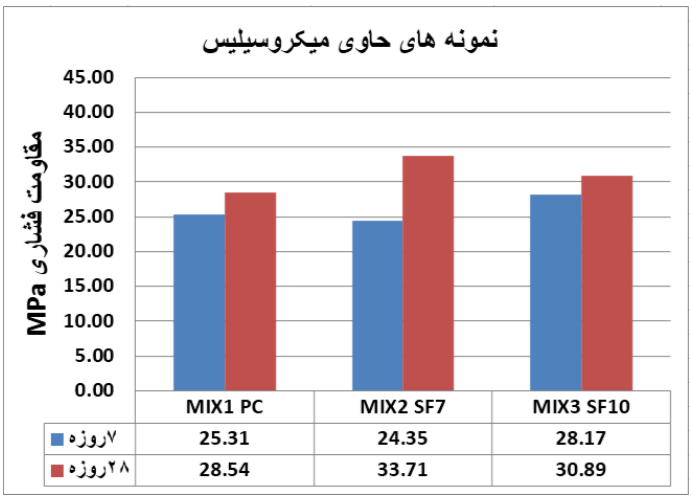
شکل۲ : مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت.

۵-۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس

شکل۳ نشان می‌دهد که حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس در سن ۷ روز مربوط به طرح مخلوط با ۱۰ درصد میکروسیلیس (MIX3) و در سن ۲۸ روز مربوط به طرح با ۷ درصد میکروسیلیس (MIX2) است، ولیپور و همکارانش [۱۶] مناسب‌ترین درصد جایگزینی میکروسیلیس را ۷/۵ تا ۱۰ درصد پیشنهاد کرده‌اند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

۵-۳-۱- تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس

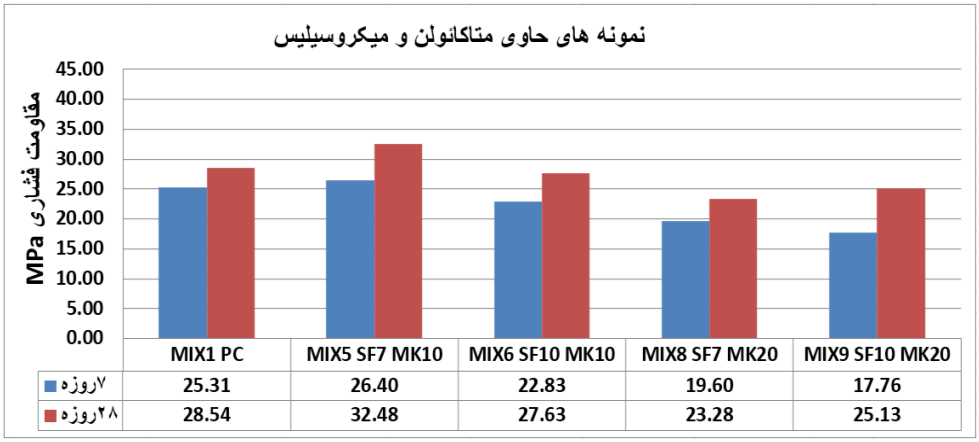
نتایج بدست آمده از مقاومت فشاری سنین ۷ و ۲۸ روز (شکل۳) نشان می‌دهد، استفاده از میکروسیلیس تا ۱۰ درصد (MIX3) منجر به افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز خواهد شد. در واقع همانطور که انتظار می‌رفت، میکروسیلیس هم مانند متاکائولن (و زئولیت) به علت خاصیت پوزولانی و اثر فیلری باعث بهبود خواص مکانیکی بتن شده است [۱۷]. با افزایش میکروسیلیس از ۷ به ۱۰ درصد به علت مصرف مقدار عمده هیدروکسید کلسیم، پیشرفت مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز کاهش می‌یابد.



شکل۳ : مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس.

۵-۴- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس

استفاده همزمان متاکائولن و میکروسیلیس (شکل۴) بسته به درصدهای جایگزینی هر یک و نسبت آب به مواد سیمانی طرح مخلوط، تأثیرات متفاوتی بر روند مقاومت فشاری گذاشته است. در این تحقیق درصد بهینه جهت جایگزینی متاکائولن در سیمان ۱۰ درصد (MIX4) بدست آمده که این تأثیر با استفاده همزمان ۷ درصد میکروسیلیس (MIX5) بیشتر شده است. در همین درصد از جایگزینی متاکائولن، با افزایش درصد میکروسیلیس از ۷ به ۱۰ (MIX6) مقاومت نسبت به نمونه شاهد بیشتر و نسبت به حالت ۷ درصد جایگزینی میکروسیلیس کمتر است زیرا با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس، هیدروکسید کلسیم بیشتری توسط دانه‌های میکروسیلیس مصرف می‌شود و در نتیجه احتمالاً قسمتی از دانه‌های متاکائولن وارد واکنش نشده‌اند و سبب کاهش مقاومت شده‌اند. حداکثر مقاومت فشاری در سن ۷ روز مربوط به طرح با جایگزینی ۱۰ درصد متاکائولن و ۷ درصد میکروسیلیس بوده است که با دور شدن از مقادیر فوق مقاومت فشاری کاهش یافته است. این روند در سن ۲۸ روز هم ادامه دارد و استفاده از درصدهای بهینه دو ماده فوق افزایش مقاومت فشاری را در پی دارد. در سن ۲۸ روز، جایگزینی متاکائولن تا ۱۰ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. افزایش درصد متاکائولن از ۱۰ به ۲۰ در حالتی که به تنهایی استفاده شود (شکل۱) افت مقاومت را در پی دارد، اما با استفاده همزمان متاکائولن با میکروسیلیس (شکل۴) علاوه بر افزایش مقاومت فشاری امکان جایگزین کردن درصدهای بالاتری از این ماده، در سیمان فراهم می‌شود. ویکاس و همکارانش [۱۸] در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که میزان ترکیب بهینه‌ی متاکائولن و میکروسیلیس برای مقاومت فشاری در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب برابر ۱۵ و ۶ درصد است که به نتایج این تحقیق بسیار نزدیک است.



	MIX1 PC	MIX5 SF7 MK10	MIX6 SF10 MK10	MIX8 SF7 MK20	MIX9 SF10 MK20
۷روزه	25.31	26.40	22.83	19.60	17.76
۲۸روزه	28.54	32.48	27.63	23.28	25.13

شکل۴ : مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس.

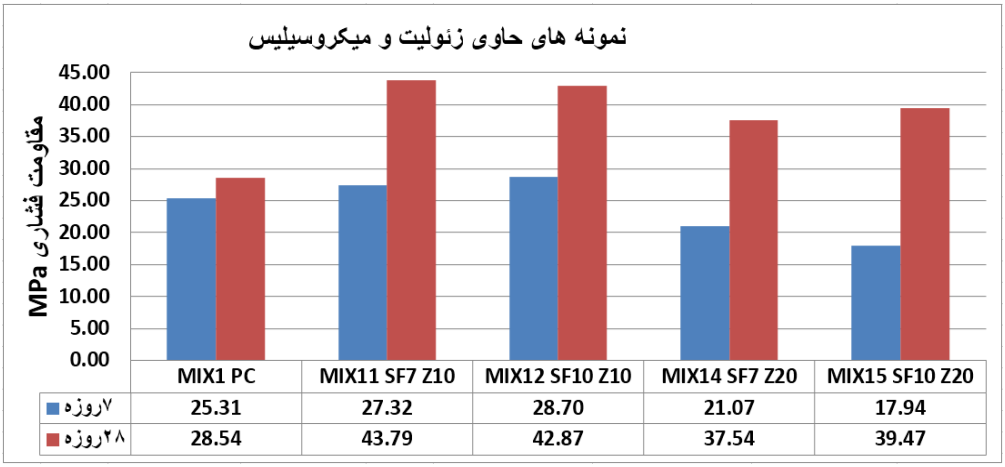
۵-۵- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس

با افزایش سن (از ۷ به ۲۸ روز)، مقاومت فشاری برای تمام طرح‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس (شکل۵) افزایش پیدا می‌کند. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که با افزایش سن، هیدراسیون و واکنش پوزولانی افزایش پیدا کرده و با تشکیل ژل سیلیکاتی بیشتر، ناحیه‌ی انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه بهبود یافته و باعث افزایش مقاومت فشاری شده است.

در طرح‌های حاوی ۱۰ درصد زئولیت یعنی طرح‌های MIX11 و MIX12 به ترتیب مقاومت فشاری ۷ روزه رو به افزایش است که دلیل این امر، می‌تواند اثر پرکنندگی (فیلری) پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس در این سن باشد که باعث می‌شود با اضافه کردن ۷ درصد و سپس ۱۰ درصد میکروسیلیس به مخلوط، مقاومت فشاری افزایش یابد. اما در طرح‌های MIX14 و MIX15 که در آن‌ها از ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت استفاده شده است، در سن ۷ روزه به علت خاصیت رقیق‌کنندگی (کمبود مقدار هیدروکسیدکلسیم جهت انجام واکنش پوزولانی)، مقاومت فشاری با افزایش درصد میکروسیلیس رو به کاهش است. طرح MIX12 با ۱۰ درصد جایگزینی زئولیت و ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس دارای مقاومت فشاری ۷ روزه‌ای بالاتر از سایر طرح‌های حاوی زئولیت و طرح شاهد (MIX1) است. این طرح را

می‌توان به عنوان طرح بهینه برای مقاومت فشاری ۷ روزه در نظر گرفت که در آن زئولیت و میکروسیلیس دارای بهترین عملکرد در سن ۷ روز هستند.

برای سن ۲۸ روز می‌توان مشاهده کرد که مقاومت فشاری تمام طرح‌ها از مقاومت فشاری طرح شاهد بیشتر است، این موضوع می‌تواند به دلیل واکنش پوزولانی خوب زئولیت و میکروسیلیس باشد که باعث افزایش مقاومت در این سن شده است. برای طرح‌های MIX14 و MIX15 که دارای ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت هستند، مقاومت فشاری در این سن با افزایش میکروسیلیس رو به افزایش است که این موضوع را می‌توان به افزایش هیدراسیون، افزایش واکنش پوزولانی و عملکرد بهتر پوزولان‌ها در درصدهای جایگزینی بیشتر، ارتباط داد. طرح شاهد که در آن از پوزولان استفاده نشده است دارای کمترین مقاومت ۲۸ روزه می‌باشد. طرح MIX11 با ۱۰ درصد جایگزینی زئولیت و ۷ درصد جایگزینی میکروسیلیس دارای مقاومت فشاری ۲۸روزه‌ای بالاتر از سایر طرح‌های حاوی زئولیت و طرح شاهد است. این طرح را می‌توان به عنوان طرح بهینه برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نظر گرفت که در آن زئولیت و میکروسیلیس دارای بهترین عملکرد در این سن هستند.



	MIX1 PC	MIX11 SF7 Z10	MIX12 SF10 Z10	MIX14 SF7 Z20	MIX15 SF10 Z20
۷روزه	25.31	27.32	28.70	21.07	17.94
۲۸روزه	28.54	43.79	42.87	37.54	39.47

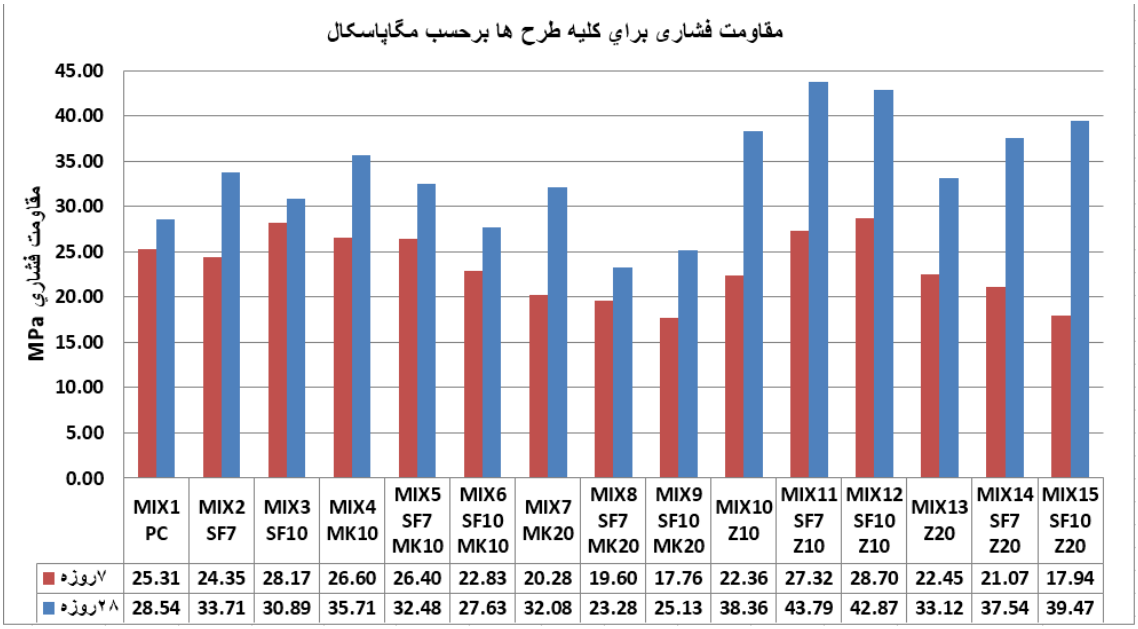
شکل۵ : مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس.

۵-۶- مقایسه‌ی مقاومت فشاری برای کلیه‌ی طرح‌ها

در حالت کلی با توجه به نتایج شکل ۶ ، در سن ۷ روز طرح‌های ۳، ۴، ۵، ۱۱ و ۱۳ بالاتر از نمونه شاهد قرار گرفته‌اند که درصد افزایش مقاومت فشاری آن‌ها نسبت به نمونه شاهد عبارت است از: MIX3=11%، MIX4=5%، MIX5=4%، MIX11=8% و MIX12=13% بالاتر از نمونه شاهد می‌باشند و بقیه طرح‌ها مقاومتی پایین‌تر از نمونه شاهد کسب کرده‌اند و اگر بخواهیم طرح‌ها را براساس مقاومت فشاری در سن ۷ روز رتبه‌بندی کنیم رتبه ۱ مربوط به MIX12 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت)، رتبه ۲ مربوط به MIX3 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس) و رتبه ۳ مربوط به MIX11 (حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) می‌باشد.

در سن ۲۸ روز با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌شود که مقاومت تمام طرح‌ها بجز طرح‌های MIX6 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد متاکائولن با ۳ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد)، MIX8 (حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد متاکائولن با ۱۸ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد) و MIX9 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد متاکائولن با ۱۲ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد) از مقاومت نمونه شاهد بیشتر می‌باشند. همانطور که مشاهده شد بیشتر نمونه‌های حاوی ترکیب متاکائولن و میکروسیلیس کاهش مقاومت داشته‌اند که احتمالاً به دلیل عمل نکردن فعالیت پوزولانی متاکائولن در سنین پایین باشد و به احتمال زیاد در دراز مدت و با افزایش سن مقاومت آنها افزایش یابد. دلیل دیگر آن می‌تواند اثر رقیق‌کنندگی این دو پوزولان در کنار هم باشد. برای رتبه بندی طرح ها در سن ۲۸ روز: رتبه ۱ متعلق به MIX11 (حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) با ۵۳ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد، رتبه ۲ مربوط به

MIX12 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) با ۵۰ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد و رتبه ۳ نیز مربوط به MIX15 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد زئولیت) با ۳۸ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد است.

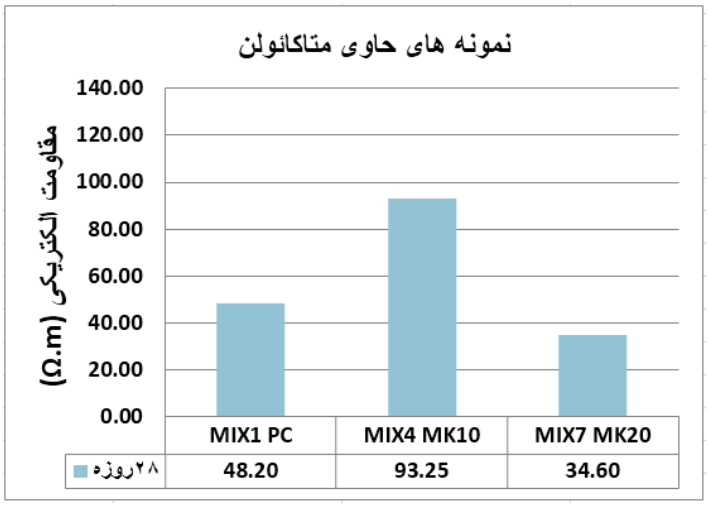


	MIX1 PC	MIX2 SF7	MIX3 SF10	MIX4 MK10	MIX5 SF7 MK10	MIX6 SF10 MK10	MIX7 MK20	MIX8 SF7 MK20	MIX9 SF10 MK20	MIX10 Z10	MIX11 SF7 Z10	MIX12 SF10 Z10	MIX13 Z20	MIX14 SF7 Z20	MIX15 SF10 Z20
۷روزه	25.31	24.35	28.17	26.60	26.40	22.83	20.28	19.60	17.76	22.36	27.32	28.70	22.45	21.07	17.94
۲۸روزه	28.54	33.71	30.89	35.71	32.48	27.63	32.08	23.28	25.13	38.36	43.79	42.87	33.12	37.54	39.47

شکل۶ : شکل نتایج مقاومت فشاری برای کلیه طرح‌ها.

۵-۷- مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی متاکائولن

با بررسی مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد متاکائولن در سن ۲۸ روز (شکل۷)، مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد متاکائولن (MIX4) به دلیل مصرف هیدروکسید کلسیم، تخلخل نمونه کاهش یافته و در نتیجه مقاومت این طرح بیشتر از نمونه شاهد شده است، اما با افزودن متاکائولن به ۲۰ درصد به دلیل اینکه هیدروکسید کلسیم کافی جهت واکنش با دانه‌های متاکائولن وجود ندارد لذا مقاومت الکتریکی این طرح کمتر از نمونه شاهد شده است.

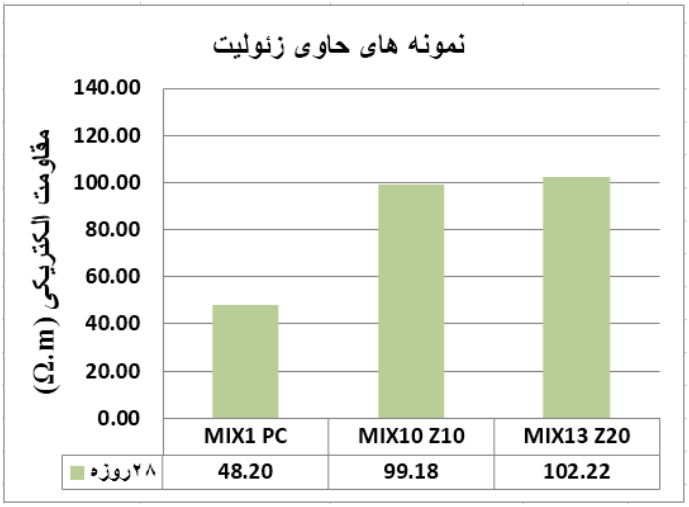


	MIX1 PC	MIX4 MK10	MIX7 MK20
۲۸روزه	48.20	93.25	34.60

شکل۷ : مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی متاکائولن.

۵-۸- مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی زئولیت

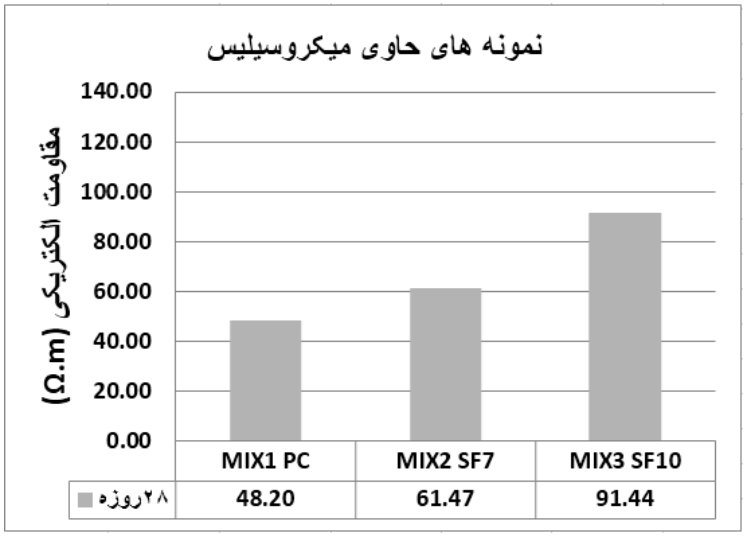
با بررسی مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی زئولیت در سن ۲۸ روز (شکل۸)، مشاهده می‌شود که در هر دو مقدار جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت مقاومت نمونه‌ها بیشتر از نمونه شاهد شده است که نشان دهنده‌ی وارد شدن پوزولان‌ها در واکنش‌های مواد سیمانی و مصرف هیدروکسید کلسیم توسط آن‌ها می‌باشد. مناسب‌ترین درصد جایگزینی زئولیت ۲۰ می‌باشد.



شکل۸ : مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی زئولیت.

۵-۹- مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس

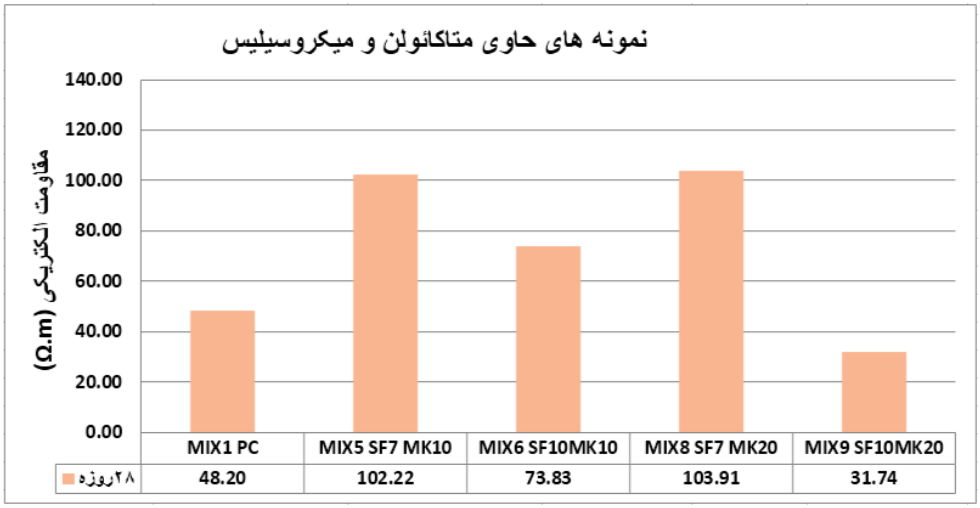
مشاهده می‌شود که در هر دو مقدار جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد میکروسیلیس مقاومت نمونه‌ها بیشتر از نمونه شاهد شده است که نشان دهنده‌ی وارد شدن پوزولان‌ها در واکنش‌های مواد سیمانی و مصرف هیدروکسید کلسیم توسط آن‌ها می‌باشد. مناسب‌ترین درصد جایگزینی میکروسیلیس ۱۰ می‌باشد.



شکل۹ : مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس.

۵-۱۰- مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس

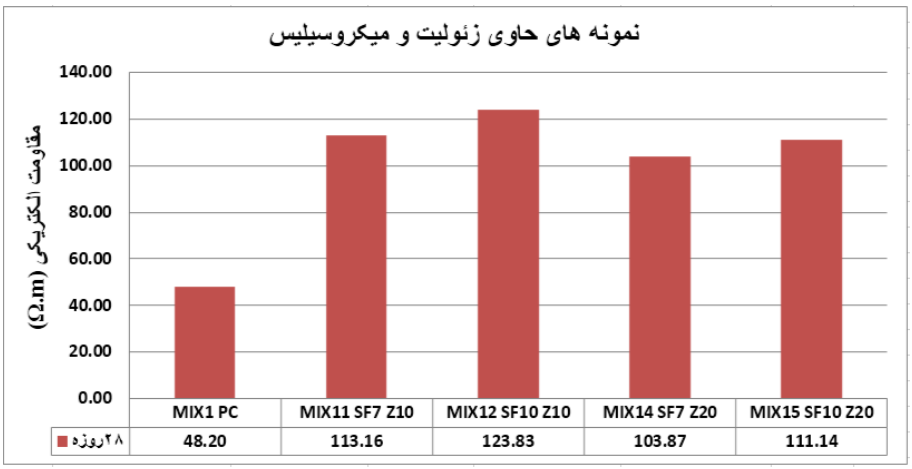
استفاده همزمان متاکائولن و میکروسیلیس (شکل۱۰) بسته به درصدهای جایگزینی پوزولان‌ها، تأثیرات متفاوتی بر روند مقاومت الکتریکی داشته است. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است فقط طرح حاوی ترکیب ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد متاکائولن (MIX9) مقاومتی کمتر از نمونه شاهد کسب کرده است و احتمالاً به این دلیل باشد که قسمت اعظم هیدروکسید کلسیم توسط میکروسیلیس به مصرف رسیده است و در نتیجه هیدروکسید کسیم کافی جهت واکنش با دانه‌های متاکائولن باقی نمانده است؛ بنابراین قسمتی از دانه‌های متاکائولن بدون اینکه وارد واکنش شوند در بتن باقی می‌مانند و سبب ایجاد تخلخل و کاهش مقاومت الکتریکی می‌شوند، این کاهش مقاومت در طرح حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد متاکائولن (MIX6) نیز مشاهده می‌شود اما به دلیل اینکه مقدار متاکائولن در این طرح کمتر از MIX9 است کاهش مقاومت کمتری را مشاهده می‌کنیم. بهترین عملکرد در این گروه مربوط حضور ۷ درصد میکروسیلیس در کنار به ترتیب ۲۰ و ۱۰ درصد متاکائولن است که نشان دهنده مناسب بودن این درصد از ترکیب میکروسیلیس در کنار متاکائولن است، با مقایسه MIX7 در شکل ۷ و MIX8 در شکل ۱۰ در می‌یابیم که حضور ۷ درصد میکروسیلیس در کنار ۲۰ درصد متاکائولن تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت الکتریکی داشته و احتمالاً به دلیل قرار گرفتن دانه‌های میکروسیلیس در فضای بین دانه‌های متاکائولن باشد و به عبارتی در اینجا میکروسیلیس نقش فیلری دارد.



شکل۱۰ : مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس.

۵-۱۱- مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس

با بررسی شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که مقاومت الکتریکی تمام طرح‌ها بیشتر از نمونه شاهد است و همانطوریکه در شکل مشخص است با افزایش میکروسیلیس از ۷ به ۱۰ درصد در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت مقاومت الکتریکی افزایش پیدا می‌کند، به نظر می‌رسد با توجه به اینکه دانه‌های زئولیت بصورت شبکه‌ای هستند، با افزودن میکروسیلیس که دانه‌های آن کروی شکل هستند و در فضای بین دانه‌های شبکه‌ای زئولیت قرار می‌گیرند باعث کاهش تخلخل نمونه شده و نهایتاً مقاومت الکتریکی بالا می‌رود. بطور کلی با مقایسه شکل ۱۱ و شکل ۸ مشاهده می‌شود که حضور میکروسیلیس سبب بالاتر رفتن مقاومت الکتریکی شده است.

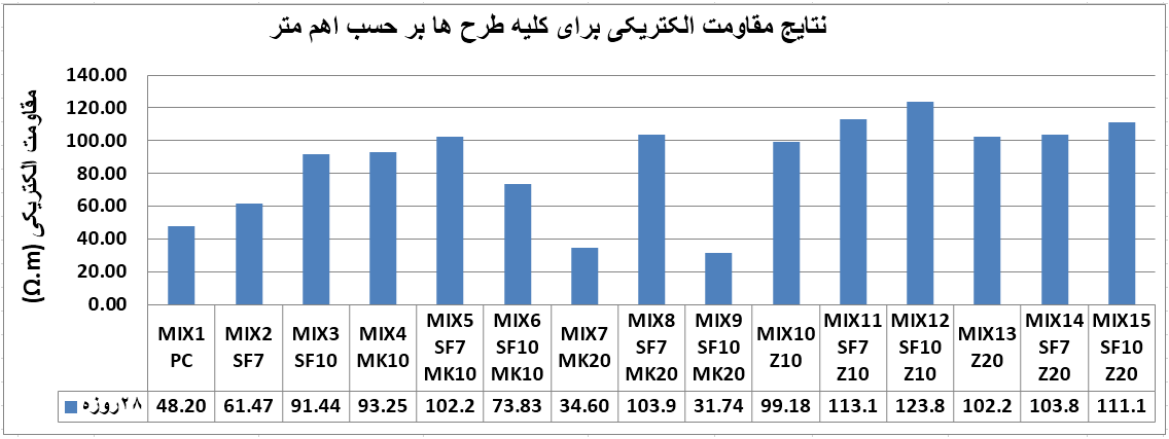


شکل ۱۱ : مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس.

۵-۱۲- مقایسه‌ی مقاومت الکتریکی برای کلیه‌ی طرح‌ها

پس از بررسی شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که مقاومت تمام طرح‌ها بجز طرح‌های MIX7 (۲۰ درصد متاکائولن با ۲۸ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد)، MIX9 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد متاکائولن با ۳۴ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد) از مقاومت نمونه شاهد بیشتر می‌باشند. همانطور که مشاهده شد عملکرد نمونه‌های زئولیت و میکروسیلیس بهتر از نمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس است که احتمالاً همانطوریکه که قبلاً توضیح داده شد مربوط به ساختار مولکولی آن‌ها و عملکرد مناسب این دو پوزولان در کنار هم است. برای رتبه بندی طرح‌ها در مقاومت الکتریکی: رتبه ۱ متعلق به MIX12 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) با ۱۵۷ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد، رتبه ۲ مربوط به MIX11 (شامل ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) با ۱۳۵ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد و رتبه ۳ نیز مربوط به MIX15 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد زئولیت) با ۱۳۰ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد است.

همانطوری که مشاهده شد در اکثر طرح‌ها با جایگزینی پوزولان‌ها و افزایش سن نمونه‌های حاوی پوزولان، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن افزایش چشمگیری داشته که این افزایش را می‌توان به دو عامل اصلی زیر نسبت داد، یکی واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل سیلیکاتی که منجر به بهبود ساختار حفرات، کاهش تخلخل و افزایش استحکام ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان می‌شود و دیگری نقش پرکنندگی این پوزولان‌ها که به دلیل ریزی بالا می‌توانند به عنوان پرکننده عمل کرده و حفرات ریز موجود در ساختار بتن را پر نمایند. ولیپور و همکارانش [۱۶] نیز به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش پوزولان‌های متاکائولن، زئولیت و میکروسیلیس سبب افزایش مقاومت الکتریکی بتن شده‌اند که در بین آنها میکروسیلیس مقاومت بالاتری را کسب نموده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.



شکل۱۲ : شکل نتایج مقاومت الکتریکی برای کلیه طرح‌ها.

۶- نتیجه‌گیری

براساس تحقیق صورت گرفته و با در نظر گرفتن این مطلب که نتایج حاصله منحصراً مربوط به مواد و روش‌های به کار رفته در این تحقیق آزمایشگاهی بوده و در مواردی جهت اظهار نظر قطعی، نیاز به برنامه آزمایشگاهی گسترده‌تری وجود دارد، موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه‌گیری است:

- در سن ۷ روز مقاومت فشاری اکثر طرح‌ها پایین‌تر از نمونه شاهد است که دلیل آن کمی تأثیر فرآیند پوزولانی و همچنین وجود C_3S کمتر در ترکیب مواد سیمانی می‌باشد.
- با افزایش سن نمونه‌ها مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که این روند نشان دهنده پیشرفت فرآیند پوزولانی و مصرف هیدروکسید کلسیم است که در نتیجه سبب کاهش تخلخل و بهبود ناحیه‌ی انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌شود.
- در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری اکثر طرح‌ها بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد و بهترین حالت مربوط به ترکیب همزمان ۱۰ درصد زئولیت و ۷ درصد میکروسیلیس است.
- جایگزینی به میزان ۱۰ درصد متاکائولن یا زئولیت منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن خواهد شد. علاوه بر این جایگزینی درصدهای بالاتر متاکائولن یا زئولیت (۲۰ درصد) در سن ۲۸ روز، بدون افت چشمگیر مقاومت فشاری، امکانپذیر است. دلیل این موضوع را می‌توان در خاصیت فیلری و پر شدن منافذ موجود در بتن با ژل سیلیکاتی تولید شده دانست.
- در بیشتر طرح‌های حاوی ترکیب متاکائولن و میکروسیلیس در سن ۲۸ روز کاهش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود که احتمالاً به دلیل کمی فعالیت پوزولانی متاکائولن در سنین پایین باشد. دلیل دیگر می‌تواند اثر رقیق‌کنندگی این دو پوزولان در کنار هم باشد. در حالت کلی رتبه بندی طرح‌ها برای مقاومت فشاری درسن ۷ روز بدین قرار است: رتبه ۱ مربوط به MIX12 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت)، رتبه ۲ مربوط به MIX3 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس) و رتبه ۳ مربوط به MIX11 (حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) می‌باشد. رتبه بندی طرح ها در سن ۲۸ روز چنین است: رتبه ۱ مربوط به MIX11 (حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت)، رتبه ۲ مربوط به MIX12 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) و رتبه ۳ مربوط به MIX15 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد زئولیت) می‌باشد.
- در نمونه‌های حاوی متاکائولن، تا ۱۰ درصد جایگزینی این ماده، افزایش مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود. در این درصد از جایگزینی متاکائولن با استفاده همزمان میکروسیلیس تا ۷ درصد نیز باعث افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه شاهد

می‌شود. با افزایش مقدار متاکائولن به ۲۰ درصد، مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است که این کاهش به دلیل خاصیت رقیق‌کنندگی می‌باشد.

- به طورکلی، در طرح‌های حاوی ۱۰ درصد جایگزینی زئولیت نتایج بهتری نسبت به طرح های حاوی ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت به دست آمده است. زئولیت دارای اندازه‌ی ذراتی ریزتر از سیمان و درشت از میکروسیلیس می‌باشد. بنابراین، ذرات زئولیت اگر در درصدهای مناسب (در این تحقیق ۱۰ درصد) جایگزین سیمان شوند، می‌توانند به عنوان مصالح پرکننده عمل کرده و باعث بهبود خواص بتن شوند.
- مقاومت الکتریکی تمام طرح‌ها بجز طرح‌های MIX7 (۲۰ درصد متاکائولن)، MIX9 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد متاکائولن) از مقاومت نمونه شاهد بیشتر می‌باشند؛ کاهش مقاومت این دو طرح می‌تواند به علت مناسب نبودن درصد جایگزینی پوزولان‌ها و در نتیجه اثر رقیق‌کنندگی آنها باشد. در حالت کلی رتبه بندی طرح‌ها برای مقاومت الکتریکی درسن ۲۸ روز بدین قرار است: رتبه ۱ مربوط به MIX12 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت)، رتبه ۲ مربوط به MIX11 (حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت) و رتبه۳ مربوط به MIX15 (شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد زئولیت) می‌باشد.
- همانطوریکه در نتایج بالا مشاهده گردید بهترین نتایج در هر دو آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی مربوط به ترکیب میکروسیلیس و زئولیت است، به نظر می‌رسد چون دانه‌های کروی میکروسیلس کوچکتر از دانه‌های شبکه‌ای زئولیت هستند، لذا می‌توانند در فضای شبکه‌ای دانه‌های زئولیت قرار گیرند و در نتیجه با کاهش تخلخل و افزایش تراکم سبب افزایش مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن گردند.
- با مقایسه‌ی شکلهای مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی می‌توان به این نتیجه کلی رسید که در بیشتر موارد اگر مقاومت الکتریکی بالا باشد به دلیل اینکه در آن طرح، تراکم نمونه بالاتر است لذا میتوان پیش‌بینی کرد که احتمالاً مقاومت فشاری نیز بالا باشد.
- استفاده از مواد معدنی نظیر متاکائولن، زئولیت و میکروسیلیس به عنوان پوزولان در بتن سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن می‌گردد که در نتیجه با جایگزینی مقداری از این نوع پوزولان‌ها بجای سیمان می‌توانیم علاوه بر بهبود مقاومت بتن، با توجه به پایین بودن دمای فرآوری این مواد نسبت به سیمان به محیط زیست نیز کمک نمود.
- بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پوزولان‌های متاکائولن و زئولیت سبب بهبود مقاومت فشاری و الکتریکی بتن نسبت به نمونه‌های شاهد و حتی بعضاً نمونه‌های حاوی میکروسیلیس شده است (که البته نیازمند بررسی بیشتر در سنین بالاتر می‌باشد). با توجه به این امر و همچنین وجود منابع کائولن و زئولیت در ایران و از طرفی هزینه‌ی کمتر تهیه‌ی این دو نوع پوزولان نسبت به سیمان و میکروسیلیس، به نظر می‌رسد که با جایگزینی متاکائولن یا زئولیت بجای بخشی از سیمان می‌توان علاوه بر افزایش مقاومت فشاری بتن، باعث کاهش هزینه و صرفه‌جویی در مصرف انرژی شد.

مراجع

[1] Scrivener, K.L., Kirkpatrick, R.J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38, 128–136.

[2] Juenger, M.C.G., F. Winnefeld., J.L. Provis and J.H. Ideker. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41, 1232–1243.

[3] Pourkhorshidi, A.R., M. Najimi., T. Parhizkar., F. Jafarpour and B. Hillemeier. (2010). Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 32, 794–800

[4] McSaveney, L. 2013. *it's concrete but not as we know it*. http://www.civil.canterbury.ac.nz/events/pandp/03McSaveney.pdf. (Accessed 4 januray. 2013).

[5] Zoltan, A., and J.Fodor. (2005). *Bentonite, Kaolin and selected clay minerals*. Geneva: Word health organization, 11-12. (Accessed 12 April. 2015)
[6] Perraki, T, E., Kontori, S., Tsivilis and G. Kakali. (2010). The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 32, 128–133
[7] Clifton, R. A. (1987). *Natural and Synthetic Zeolites.* Supt. of Docs, no.: I 28.27: 9140
[8] Fidjestol, P., and M. Dastol. (2012). The history of silica fume in concrete from novelty to key ingredient in high performance concrete. www.elkeme.material.no .(Accessed 12 April.2015).
[9] Badogiannis, E., Kakali. G., and S. Tsivilis. (2005). Metakaolin and supplementary cementitious material optimization of kaolin to metakaolin conversion. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 81, 457-462.
[10] Chan, S.Y.N and Xihuang Ji, 1999. Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes. *Cement and Concrete Composites*, 21, 293-300
[11] Liew, Y. M., H. Kamarudin., A. M. Mustafa All Bakri., M. Lugman., N. I. Khairul ., C. M. Ruzaidi., and C. Y. Heah. (2012). Processing and characterization of calcin kaolin cement powder. *Construction and Building Materials*, 30, 794-802.
[12] Badogiannise, E., G. Kakali., G. Dimopoulou., E. Chaniotakis., and S. Tsivilis. (2005). Metakaolin as a main cement constituent. Explotation of poor greek kaolins. *Cement and Concrete Composites*, 27, 197-203.
[13] Justice, J. M., L. H. Kennison., B. J. Mohr., S. L. Beckwith., J. E. McCormick., B. Wigginz., Z. Z. Zhang., K. E. Kurtis. (2005). Comparision of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitous materials. *Seventh International Symposion on Utizilation of High-stregth/High Performance Concrete*. Washington D.C. 20-24 June 2015.
[14] Imerys performance mineral, (2012). *Calcined kaolin dehydroxylated aluminum silicate.* http://www.imerys-perfmins.com/pdf/Calcined%20Kaolin%20Properties%20&%20Grades.pdf. [Accessed 4 february. 2013].
[15] Kim, H. S., S. H. Lee., and H. Y. Moon. (2007). Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials*, 21, 1229-1237.
[16] Valipour, M., F. Pargar., M. Shekarchi and S. Khani. (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*, 41, 879-888.
[17] Khatib, J. M., and J. J. Hibert. (2005). Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Constrauction and Building Materials*,19, 460-472.
[18] Vikas, S., Kumar. R., Agarwal. V. C., Mehta. P. K. (2012). Effect of Silica Fume and Metakaolin combination on concrete. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2, 893-900.