بررسی آزمایشگاهی اثر متاکائولین بر خواص مکانیکی بتن با سنگدانه معادن قرضه حومه شهر شیراز

کد مقاله:C

علیرضا دهقان[۱]، داوود قائدیان رونیزی[۲]، محمود رضا شقاقیان[۳]،محمدرضا خسروی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، موسسه آموزش عالی زند

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید

۳- گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

۴- کارشناس کنترل تحقیق شرکت ساوانا بتن شیراز

(alirezadehghan۶۶@yahoo.com)

چکیده

مواد اصلی بتن، سنگدانه‌های بتن است. سنگدانه‌ها به دو بخش ریز دانه و درشت دانه تقسیم می‌شوند. مهمترین نقش در تعیین مقاومت در بتن را سنگدانه‌ها بر عهده دارند. بتن با مقاومت و کیفیت بالا به عنوان یک مصالح به صرفه و مؤثر، رشد قابل توجهی در صنعت ساختمان دارا می‌باشد. اجزاء تشکیل دهنده بتن و اندر کنش بین آن، نقش تعیین کننده ای در تبیین خواص مکانیکی بر عهده دارد. با توجه به مصرف بالای بتن در بخش صنعت و ساختمان در کشور، ارتقای کیفیت و مشخصه های کلیدی این ماده، همواره یکی از مشکلات بخش های مرتبط با آن بوده است.

در این پژوهش سیمان و آب در تمام نمونه ها یکسان و نسبت آب به سیمان ۰/۵۷ در نظر گرفته می شود. پوزولان متاکائولین بر اساس درصد وزنی ۵، ۱۰، ۱۵، درصد وزن سیمان در مخلوط بتن اضافه گردیده است. در استفاده از پوزولان متاکائولین از استاندارد ASTM C ۶۱۸ استفاده گردیده است. پس از آماده شدن مواد و مصالح اقدام به ساخت بتن و نمونه برداری از بتن ساخته شده با رعایت نکات آئین نامـــه ASTM C ۱۷۲ جهت نمونه گیری از بتن تازه می‌گردد. پس از نمونه برداری و رسیدن به مقاومت مورد نظر در سنین مختلف بتن شامل ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه و انجام آزمایش های مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C ۳۹ و ASTM C ۱۱۶ بر روی نمونه‌ها اقدام به شکست نمونه‌ها و بررسی، تحلیل و مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده استفاده از پوزولان متاکائولین تا ۱۵ درصد وزن سیمان باعث افزایش مقاومت در هر سه معدن بیدکوه، صدراکنار و محمدرسول الله گردیده است.

کلمات کلیدی: پوزولان متاکائولین، سنگدانه های بتن.

۱. مقدمه

بتن[۱]در حال حاضر جزء پر مصرف ترین مصالح ساختمانی دنیا می‌باشد. امروزه بتن به دلایلی از جمله وجود برخی ویژگی‌ها نظیر مقاومت فشاری بالا، دوام، در دسترس بودن مصالح مورد نیاز برای ساخت و قیمت مناسب مورد توجه است. با توجه به گسترش مصرف بتن در ساخت و سازهای مختلف از ابتدای ساخت سیمان[۲]و بتن بشر همیشه در زمینه ی تولید بتن با خواص مطلوب تر تلاش کرده است. این تلاش ها در زمینه های مختلف بوده است. در این زمینه می‌توان از جایگزین کردن کلی مواد دیگر به جای سیمان تا جایگزین کردن مواد مختلف به جای بخشی از سیمان یا سنگدانه[۳]نام برد. اما می‌توان گفت محور کلی این آزمایش‌ها در زمینه تولید بتن با تراکم بیشتر و البته اقتصادی‌تر بوده است. بنابر تخمین، کل بتنی که در سال ۹۱ میلادی در جهان مصرف شده است بیش از سه میلیارد تن یعنی یک تن به ازای هر نفر در جهان بوده است. تنها ماده‌ای را که بشر به این میزان مصرف می کند، آب است. با پیشرفت روز افزون علم، پژوهشگران و محققان سعی بر این داشته‌اند که با بکارگیری فناوری‌های نوین در صنعت بتن و ساخت بتن‌های ویژه بتوانند قدمی در راه تولید بتن با مقاومت بالا بردارند.

در ایران با توجه به حجم بالای پروژه های عمرانی و در دسترس بودن مصالح مورد نیاز برای تولید سیمان، استفاده از بتن بسیار رواج دارد و دوام بتن به عنوان عامل مهم و اساسی در طول عمر مفید سازه های بتنی در نظر مهندسین قرار دارد. از طرفی مطالعات نشان داده است که تولید سیمان، مقادیری از منابع طبیعی مانند سنگ آهک، سوختهای فسیلی و ... را از بین می‌برد و به ازای هر تن سیمـــان تولید شده، حدود یک تن گاز دی اکسیدکربن که از گازهای آلاینده محیط زیست می‌باشد ایجاد می‌شود. این میزان تولید گازگلخانه‌ای می‌تواند اثرات زیادی بر گرم شدن زمین و عوارض آن داشته باشد. نیاز روز افزون به سیمان برای اجرای پروژه های مختلف و دستیابی به سازه های بتنی با کیفیت و دوام بالا اهمیت زیادی دارد. علاوه بر این، ضرورت استفاده بهینه سیمان و جایگزینی بخشی از آن با موادی که علی رغم داشتن خصوصیات سیمان، عملکرد خمیر سیمان را چه از لحاظ مقاومتی و چه از لحاظ دوام، به مخاطره نمی‌اندازد، احساس می‌شود. که در این جایگزینی مسائل اقتصادی طرح و دوام بتن عوامل تعیین کننده ای هستند. گروهی از این مواد تحت عنوان پـوزولان شناخته می‌شوند. به طور کلی پوزولان‌ها موادی هستند که به خودی خود ارزش سیمان ندارند و یا فعالیت سیمانی کمی دارند، ولـی در صورتی که ذرات آن به خوبی تفکیک شده و ریز باشند، می‌تواند در حضور رطوبت با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سـیمان واکنش شیمیایی داده و ترکیباتی با خصوصیات سیمان تولید نمایند. پوزولان‌ها از جمله مواد افزودنی معدنی ارزان قیمت و قابل دسترس می‌باشد که در کاهش تولید سیمان و جایگزین کردن بخشی از سیمان، باعث کاهش مصرف انرژی، حفظ منابع طبیعی و محیط زیسـت می گردد. پوزولان‌ها از نظر منشاء وجودی و نوع شکل گیری، به پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. پوزولان طبیعی شامل شیل‌ها، توف ها، خاکستر آتشفشان و ... است. منابع اصلی تولید پوزولان مصنوعی، کوره استخراج فلزات تولید کننده آهن خام، فولاد، و نیروگاه هایی که از ذغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می کنند می باشد. استفاده از این مواد و جایگزین کردن درصد های مختلف آن نه تنها هزینه تمام شده تولید بتن را تقلیل می دهد بلکه دوام بتن را در محیط های مخرب بهبود می‌بخشد.

متاکائولین[۴]از جمله مواد پوزولانی هستند که ذخایر و مواد اولیه آن ها در کشور یافت می شود و در سالهای اخیر مطالعه گسترده در مورد استفاده از پوزولان انجام شده است. متاکائولین که حاصل فعال سازی حرارتی رس کائولین است به عنوان یک ماده جایگزین سیمان مورد توجه قرار گرفته است و مقادیر مصرف این ماده در صنعت سیمان روبه افزایش است. مطالعات گذشته حاکی از افزایش مقاومـــت فشاری بتن با افزودن متاکائولین بویژه در روزهای اولیه عمل آوری است[۱]. با توجه به خواص مثبت متاکائولین در بهبود مقاومت فشـــاری کوتاه مدت و مشخصات دوام به نظر می‌رسد که استفاده از متاکائولین در بتن می تواند مشکل کاهش مقاومت کوتاه مدت اولیه بتن را تـا حدود زیادی مرتفع نماید. استفاده از متاکائولین موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن می‌شود.

خاک‌های کائولینیتی گروهی از انواع پوزولان‌های طبیعی هستند که به دلیل ریز بودن و داشتن ساختاری آمورف و فعالیت پوزولانی بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای قسمتی از سیمان باشند. برای تقویت اهداف پوزولانی و افزایش. قدرت واکنش پذیری کائولن، آن را در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۹۰۰C° حرارت می دهند تا ماده‌ای به

۱- Concrete

۲- Cemen

۳- Aggregate

۴- Metacolin

نام متاکائولن با ساختار آلومینوسیلیکاتی به صورت آمورف شکل گیرد. استفاده از این ماده در مصالح ساختمانی قدمت چندین هزار ساله دارد[۷]. کائولن یک خاک طبیعی و معدنی بسیار دانه ریز به رنگ سفید و با ذراتی به شکل صفحه ای با بشقابی است از نظر شیمیایی فرمول مولکولی رایج برای کائولن به عنوان سرگروه کائولینیت $AL_2 Si_2O_2(OH)_4$ می‌باشد[۸].

۲. تحقیقات گذشته

برخی از تحقیقات انجام شده تاثیر انواع پوزولان ها بر روی بتن به شرح زیر می‌باشد:

مصطفوی (۲۰۱۷) به بررسی مقدار بهینه مصرف متاکائولین و میکروسیلیس به جای سیمان در مخلوط بتن خودمتراکم حاوی الیاف با هدف صرفه جویی در وقت و هزینه و بکار گیری نیروی انسانی در زمینه افزایش مقاومت بتن خودمتراکم با افزودن پوزولان به آن انجام گرفت[2].

قویدل شهرکی (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از ترکیب زئولیت و متاکائولین بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودمتراکم پرداخته است. نتایج بیانگر این است که افزودن پوزولان های زئولیت و متاکائولین به صورت همزمان در بتن، موجب دوام و خوردگی میلگرد در آن شده است به طوری که طرح اختلاط حاوی ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰ درصد متاکائولین مقاومت در برابر خوردگی را ۱/۹۴ برابر بهبود می‌بخشد[3].

رقیه عطائی کوزانی (۲۰۱۵) کوزانی به بررسی شرایط بتن تازه و سخت شده خود متراکم حاوی نانو اکسید آلومنیم و متاکائولین پرداخت. با توجه به اثرات منفی زیست محیطی جهت تولید سیمان، به منظور کاهش مصرف سیمان بخشی از سیمان با پرکننده جایگزین گردید. نتایج حاصل بیان نمود جایگزین حداکثر ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومنیم می تواند خواص خود تراکمی را تامین نماید و با افزودن نانو اکسید آلومنیوم می توان مقاومت فشاری مقاومت کششی مدول الاستیسیته را افزایش داد. ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومنیوم جایگزین مناسب برای بتن خود متراکم حاوی ۱۰ درصد متاکائولین در نظر گرفته شد[4].

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد و امین رضا پور (۲۰۱۴) پژوهشی به منظور مطالعه و مقایسه خاصیت پوزولانی سیمان پوزولان حاوی متاکائولین و پرلیت انجام دادند. نتایج حاصل بیان نمود خاصیت پوزولانی پرلیت در مواردی از جمله افزایش مقاومت خمشی به مراتب بهتر از متاکائولین می باشد و در مقاومت فشاری پرلیت شرایطی تقریبا مشابه متاکائولین دارد[5].

محسن تدین و همکاران (۲۰۱۲) پژوهشی به منظور بررسی تاثیر شکل سنگدانه بر مقاومت فشاری بتن انجام دادند و هدف این پژوهش بررسی مقاومت فشاری و اسلامپ بتن های ساخته شده با سنگدانه هایی که دارای شکل متفاوت هستند، می باشد و نتایج حاصل بیان نمود که شکل سنگدانه باعث افزایش و یا کاهش مقاومت فشاری می‌شود[6].

محمد رنجبر و همکاران (۲۰۱۲) پژوهشی به منظور بررسی خواص بتن خود متراکم حاوی متاکائولین بیان نمودند و در نتایج مشخص شد, با افزایش میزان متاکائولین جریان اسلامپ بتن خودمتراکم کاهش می یابد و با افزایش آن لزجت بتن خود متراکم افزایش می یابد و مقاومت فشاری نمونه های بتن با افزایش سن بتن افزایش می‌یابد[1].

آنچه در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفته شامل بررسی تاثیر استفاده از افزودنی بتن مواد افزودنی پوزولانی اعم از میکروسیلیس، نانوسیلیس، متاکائولین و... بر روی خواص مکانیکی بتن که از مهمترین آن مقاومت فشاری بتن، همچنین تاثیر مواد افزودنی بر روی میزان نفوذپذیری و استحکام بتن مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه این پژوهش قصد دارد اثر مواد پوزولانی متاکائولین بر خواص مکانیکی بتن ساخته شده با سنگدانه و دانه‌بندی سه معدن قرضه مختلف، در حومه شهر شیراز با توجه به متفاوت بودن جنس و شکل دانه های هر معدن مورد مقایسه و بررسی قرار دهد.

۳. برنامه آزمایشگاهی و مصالح مصرفی

- **مشخصات مصالح**

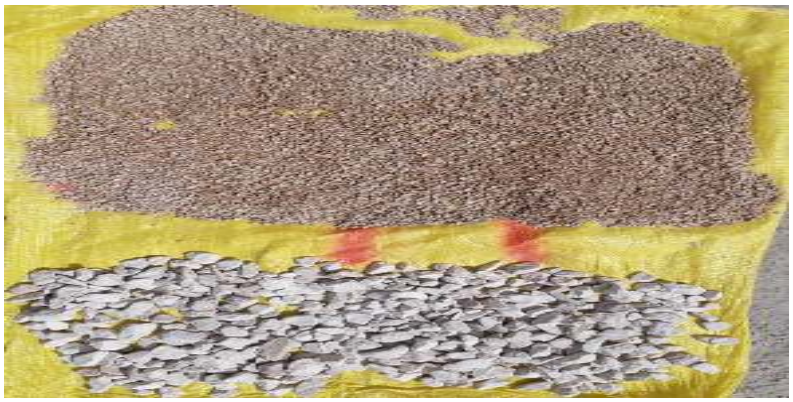
در این پژوهش از سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان فارس و فوق روان کننده بتن بر پایه کربوکسیلات شرکت ساوانا بتن استفاده گردید. با توجه به هدف پژوهش، برای انجام این پژوهش ابتدا سه معدن قرضه حومه شهر شیراز به نام های بید کوه، صدرا کنار، محمد رسول الله به منظور تهیه سنگدانه انتخاب گردید و از روش استاندارد ASTM C ۱۳۶ برای انتخاب مصالح از دپوی معدن استفاده گردیده است. برای دانه بندی مصالح از استاندارد ASTM C۱۳۶-۸۴a استفاده گردید. تمامی آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه شرکت ساوانا بتن شیراز صورت گرفته است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی روان کننده SP۲۰۰ مشخص می‌باشد.

جدول۱. مشخصات روان کننده

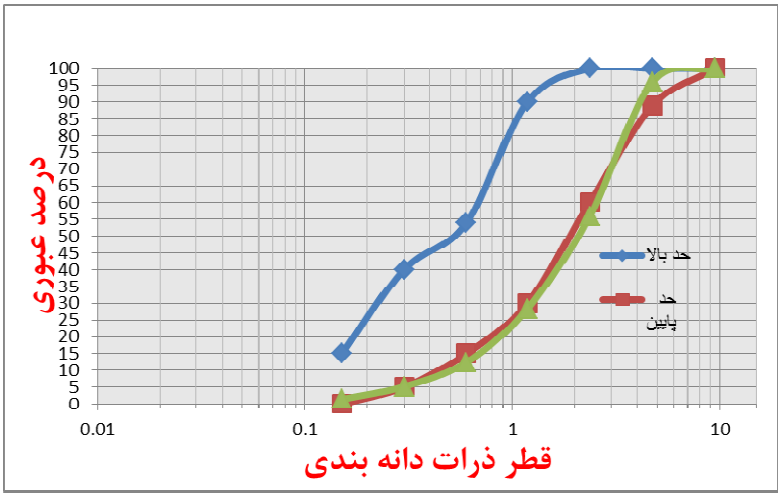
نوع ماده	رنگ	وزن
مایع غلیظ	قهوه ای روشن	22کیلو گرم
وزن مخصوص **۳gr/cm**	PH	یون کلر
1.1 ± 9.93	6.1	ندارد

- **معدن بیدکوه**

این معدن که در نقطه جنوبی شیراز واقع گردیده است از سال ۱۳۹۰ فعالیت خود را در زمینه تولید مصالح درشت دانه و ریز دانه و ... آغاز نموده است این شرکت ماسه تولیدی خود را در سایت رسمی با ضریب نرمی ۳/۲ معرفی نموده است اما پس از دانه بندی مصالح ضریب نرمی آن ۴ به ثبت رسید. پس از بازدید میدانی از این معدن مشخص شد مصالح درشت دانه این معدن بیشتر تیز گوشه می باشد به دلیل واقع شدن این معدن در جوار کوه های آهکی جنوب شرق شیراز مصالح این معدن دارای مقداری آهک می باشد، که پس از نمونه برداری از این مصالح و انتقال آن به آزمایشگاه، مورد آزمایش دانه بندی قرار گرفت. در شکل ۱ و ۲ مشخصات و دانه بندی مصالح ذکر شده است.



شکل۱. مصالح معدن بیدکوه

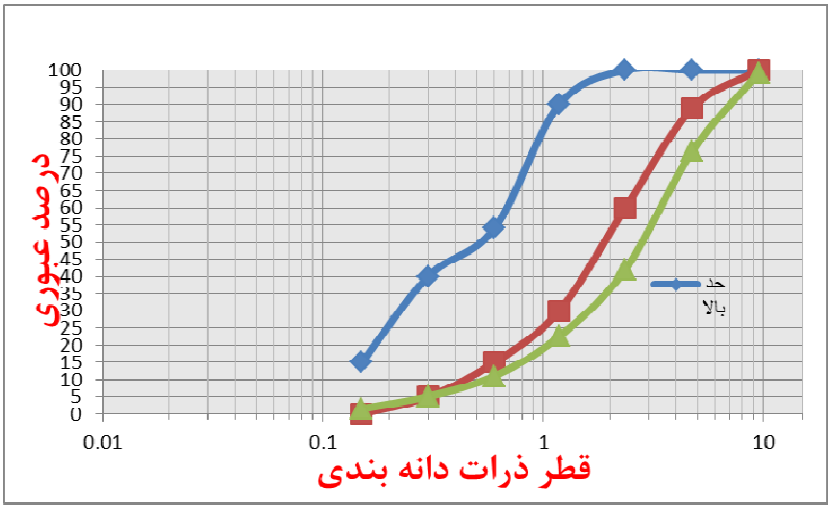


شکل۲. نمودار دانه بندی مصالح معدن بیدکوه

- **معدن محمدرسول الله**

این معدن در نقطه جنوب شرقی شیراز واقع گردیده است از سال ۱۳۸۸ فعالیت خود را در زمینه تولید مصالح درشت دانه، ریزدانه و ... آغاز نموده است. با بازدید میدانی از تولیدات این شرکت مصالح تولیدی این معدن بیشتر شبیه به مصالح پولکی و دارای خاک زیاد بود. پس از نمونه برداری از این مصالح و انتقال آن به آزمایشگاه مورد آزمایش دانه بندی قرار گرفت که ضریب نرمی مصالح ۴/۴۲ به دست آمد. در شکل ۳ و ۴ مشخصات و نمودار دانه بندی مصالح قابل مشاهده می باشد.

شکل۳. مصالح معدن محمدرسول الله



شکل۴. نمودار دانه بندی معدن محمدرسول الله

- **معدن صدرا کنار**

این معدن در نقطه شمال غربی شهر شیراز واقع گردیده است از سال ۱۳۹۰ فعالیت خود را در زمینه تولید مصالح درشت‌دانه، ریزدانه و آزمایشگاهی آغاز نموده است. با بازدید میدانی از تولیدات این شرکت به نظر می رسد مصالح تولیدی این معدن از دانه بندی متعادلی برخوردار است. پس از نمونه برداری از این مصالح و انتقال آن به آزمایشگاه مورد آزمایش دانه بندی قرار گرفت که پس از دانه بندی ضریب نرمی دانه ها به عدد ۴ رسید. در شکل ۵ و ۶ مصالح مصرفی معدن صدرا کنار و نمودار دانه بندی نشان داده شده است.

شکل۵. مصالح معدن صدرا کنار

شکل۶. نمودار دانه بندی معدن صدرا کنار

همانطور که در شکل های ۲، ۴ و ۶ مشاهده می‌شود حدود دانه‌بندی مصالح معادن بیدکوه، محمدرسول الله و صدرا کنار مشخص گردیده است. دانه‌بندی و مصالح ریزدانه را چنان باید انتخاب کرد که درصد مواد رد شده از الک، یا حداکثر پیشنهادی آیین‌نامه بخواند(حد پایین محدوده استاندارد ASTM C۳۳) و در بتن‌های پر سیمان و یا بتن‌هایی با شن درشت‌دانه از نظر صرفه جویی در مصرف سیمان حد بالای دانه‌بندی استاندارد ASTM C۳۳ برای ریزدانه مطلوب می‌باشد.

- **متاکائولین**

در شکل شماره ۷عکس و در جدول شماره ۲ مشخصات متاکائولین مورد استفاده در این پژوهش قابل مشاهده می‌باشد.

شکل۷. متاکائولین مورد استفاده در این پژوهش

جدول۲. مشخصات متاکائولین مورد استفاده

متاکائولین	ترکیبات شیمیایی
52/1	SIO_2
42/8	AL_2O_3
1/6	Fe_2O_3
0/2	CaO
0/21	MgO
0/00	SO_3
0/32	K_2O
0/11	Na_2O
	خصوصیات فیزیکی
2/54	سطح ویژه (m^2/g)
2/6	توده ویژه

- **طرح مخلوط**

همان طور که در روش ملی طرح مخلوط بتن، تعریف طرح مخلوط بتن قید شده است، در همه روش‌های طرح مخلوط بتن دو بخش جداگانه وجود دارد. یکی از آن‌ها که مسلماً قبل از دیگری بدان پرداخته می‌شود، انتخاب اجزای بتن و مناسب بودن آن‌ها برای طرح مخلوط بتن می‌باشد و جنبه کیفی دارد. در این پژوهش یک طرح اختلاط مرجع برای هر سه معدن و با نسبت آب به سیمان 0/57 در نظر گرفته شده است، سپس متاکائولین به ترتیب ۵، ۱۰و ۱۵ درصد وزنی از سیمان به طرح مخلوط در هر معدن اضافه گردیده است. از هر معدن یک طرح به عنوان طرح شاهد تهیه شده است که در جدول ۲ شرح داده شده است.

جدول۳. جزییات کامل طرح های اختلاط

ردیف	نام طرح	نسبت آب به سیمان	سیمان kg/m³	آب kg/m³	ریزدانه kg/m³	درشت دانه kg/m³	متاکائولین kg/m³
۱	BD	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	–
۲	BD۵	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۲۰
۳	BD۱۰	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۴۰
۴	BD۱۵	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۶۰
۵	MD	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	–
۶	MD۵	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۲۰
۷	MD۱۰	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۴۰
۸	MD۱۵	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۶۰
۹	SD	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	–
۱۰	SD۵	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۲۰
۱۱	SD۱۰	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۴۰
۱۲	SD۱۵	/57	۴۰۰	۲۲۸	۱۳۴۵	۴۸۰	۶۰

۴. ساخت و نگه داری نمونه های آزمایشگاهی

در این تحقیق از قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۵*۱۵*۱۵ سانتیمتر برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. از استاندارد EN ۱۲۳۹۰-۲ برای پر کردن قالب‌های مکعبی استفاده شده است که استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۵ نیز از این استاندارد بین المللی اقتباس شده است و در برگیرنده نحوه تهیه قالب‌های مکعبی می‌باشد. پس از ساخت هر طرح مخلوط بلافاصله برای تعیین روانی بتن تازه، آزمایش اسلامپ انجام شده است. در این پژوهش میزان فوق روان کننده ۰/۵٪ وزن سیمان انتخاب شد تا تغییرات ایجاد شده در بتن تازه پس از افزودن الیاف و متاکائولین قابل مشاهده باشد. در صورت مناسب بودن اسلامپ بتن، به درون قالب ریخته شده و پس از طی ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها درون حوضچه آب به منظور عمل‌آوری تا سن ۷، ۲۸و ۹۰ روز قرار داده شده‌اند.در شکل‌های ۸ و ۹ نمونه قالب ها و شرایط نگه‌داری نمونه ها قابل مشاهده می‌باشد.

شکل۸. مراحل ساخت و قالب‌های استفاده شده

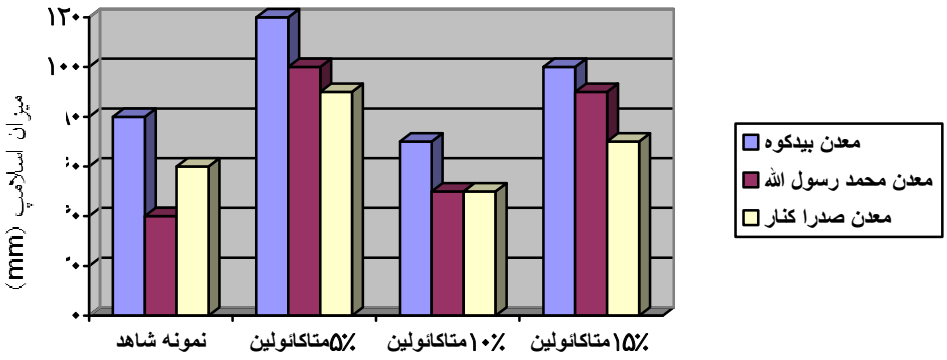
شکل۹. عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه

۵. نتایج تحقیق

در این قسمت به بررسی نتایج آزمایش‌های اسلامپ و مقاومت فشاری بتن هر معدن پرداخته می‌شود که به ترتیب در جداول ۳ تا ۴ و شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده است.

جدول۴. نتایج بتن تازه (اسلامپ)

ردیف	نام طرح	درصد متاکائولین	میزان اسلامپ mm
۱	BD	-	80
۲	BD۵	۵	120
۳	BD۱۰	۱۰	100
۴	BD۱۵	۱۵	90
۵	MD	-	60
۶	MD۵	۵	70
۷	MD۱۰	۱۰	50
۸	MD۱۵	۱۵	50
۹	SD	-	60
۱۰	SD۵	۵	100
۱۱	SD۱۰	۱۰	90
۱۲	SD۱۵	۱۵	70

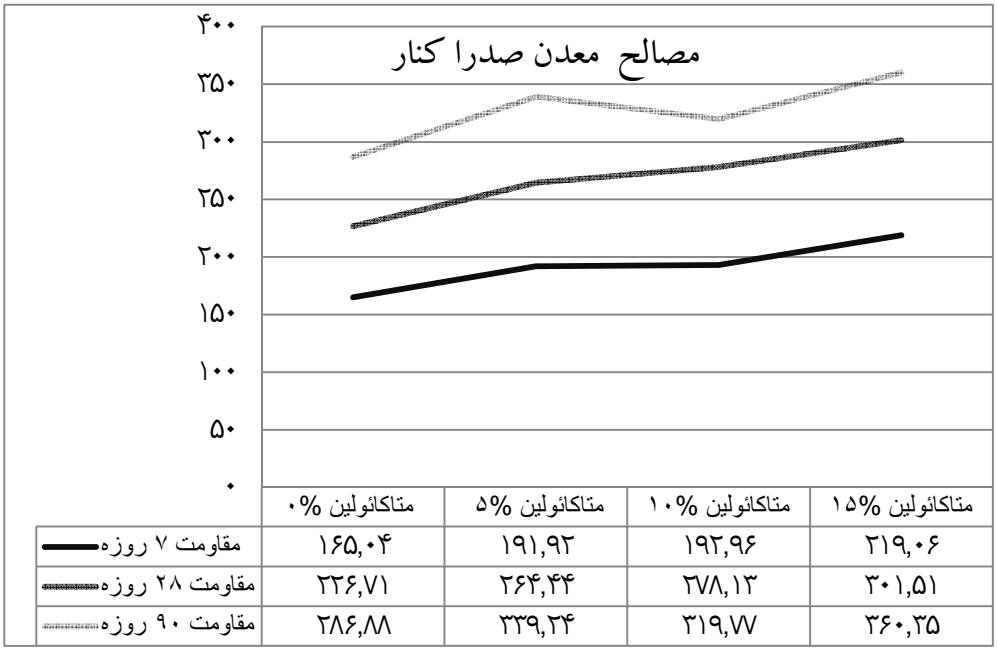


شکل ۱۰. نمودار نتایج اسلامپ

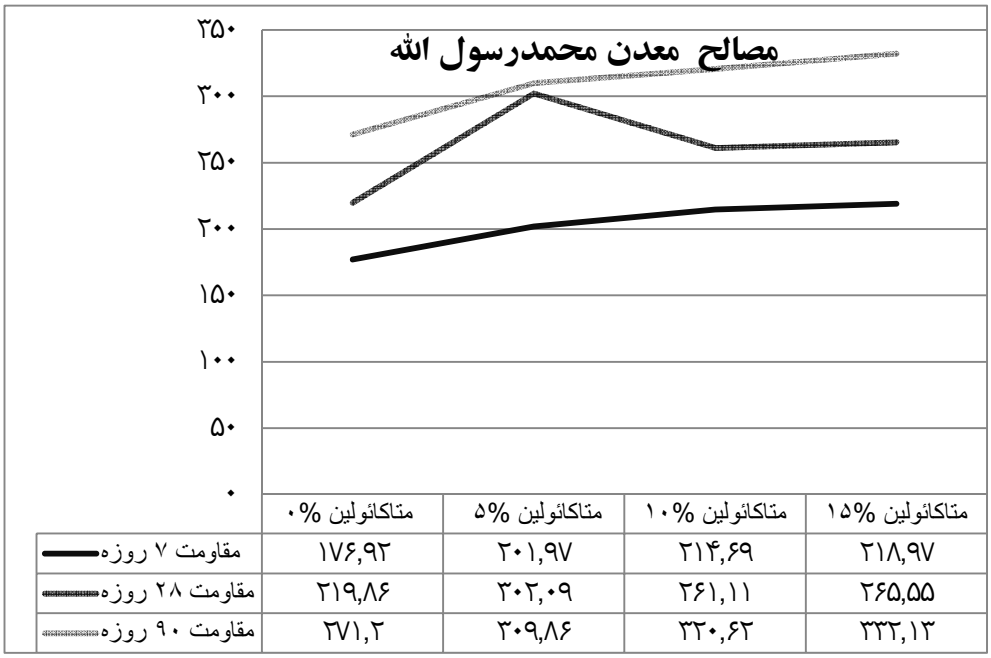
جدول۵. نتایج مقاومت های ۲۸،7 و ۹۰ روزه

معدن صدراکنار، محمد رسول الله، بید کوه

نمونه	متاکائولین	۷ روزه		۲۸ روزه		۹۰ روزه	
معدن صدراکنار	درصد	Ton نیرو	Mpa مقاومت	Ton نیرو	Mpa مقاومت	Ton نیرو	Mpa مقاومت
SD	۰	۴۶/۴۲	16/5	۶۲/۲۶	22/6	۷۵/۸۰	28/6
SD۵	٪۵	۵۳/۹۸	19/1	۷۰/۷۵	26/4	۷۶/۳۳	33/9
SD۱۰	٪۱۰	۵۴/۲۷	19/2	۷۳/۸۳	27/8	۸۳/۲۰	31/9
SD۱۵	٪۱۵	۶۰/۵۴	21/9	۷۹/۰۹	30/1	۹۲/۳۳	36/0
معدن محمدرسول	درصد	Ton نیرو	Mpa مقاومت	Ton نیرو	Mpa مقاومت	Ton نیرو	Mpa مقاومت
MD	۰	۴۹/۷۶	17/6	۶۰/۷۲	21/9	۷۲/۲۷	27/1
MD۵	٪۵	۵۶/۶۲	20/1	۷۹/۳۲	30/2	۸۰/۹۸	30/9
MD۱۰	٪۱۰	۵۹/۲۷	21/4	۷۰/۰۰	26/1	۸۳/۳۹	32/0
MD۱۵	٪۱۵	۶۰/۰۲	21/8	۷۱/۰۰	26/5	۸۵/۹۸	32/2
معدن بیدکوه	درصد	Ton نیرو	Mpa مقاومت	Ton نیرو	Mpa مقاومت	Ton نیرو	Mpa مقاومت
BD	۰	۴۰/۹۲	14/5	۵۲/۹۱	18/8	۵۶/۰۷	19/9
BD۵	٪۵	۵۴/۵۲	19/3	۶۴/۰۹	23/4	۶۸/۲۵	25/3
BD۱۰	٪۱۰	۵۸/۰۶	21/2	۷۰/۱۵	26/1	۷۳/۰۵	27/7
BD۱۵	٪۱۵	۶۷/۸۲	24/9	۷۲/۸۱	27/1	۸۱/۹۴	31/1

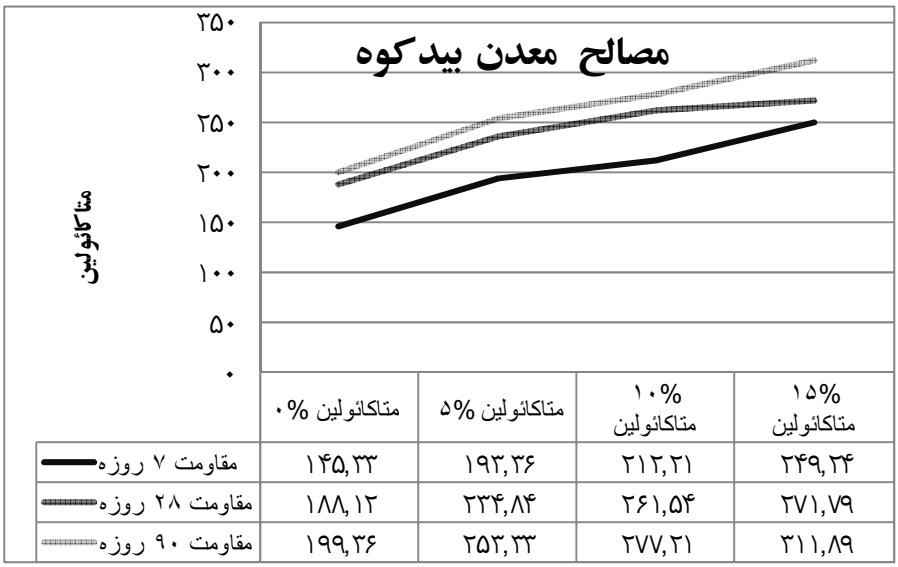


شکل۱۱. نمودار خطی نتایج مقاومت فشاری معدن صدراکنار



	متاکائولین ۰%	متاکائولین ۵%	متاکائولین ۱۰%	متاکائولین ۱۵%
مقاومت ۷ روزه	۱۷۶,۹۲	۲۰۱,۹۷	۲۱۴,۶۹	۲۱۸,۹۷
مقاومت ۲۸ روزه	۲۱۹,۸۶	۳۰۲,۰۹	۲۶۱,۱۱	۲۶۵,۵۵
مقاومت ۹۰ روزه	۲۷۱,۲	۳۰۹,۸۶	۳۲۰,۶۲	۳۳۲,۱۳

شکل۱۲. نمودار خطی نتایج مقاومت فشاری معدن محمدروسول الله



	متاکائولین ۰%	متاکائولین ۵%	۱۰% متاکائولین	۱۵% متاکائولین
مقاومت ۷ روزه	۱۴۵,۳۳	۱۹۳,۳۶	۲۱۲,۲۱	۲۴۹,۲۴
مقاومت ۲۸ روزه	۱۸۸,۱۲	۲۳۴,۸۴	۲۶۱,۵۴	۲۷۱,۷۹
مقاومت ۹۰ روزه	۱۹۹,۳۶	۲۵۳,۳۳	۲۷۷,۲۱	۳۱۱,۸۹

شکل۱۳. نمودار خطی نتایج مقاومت فشاری معدن بیدکوه

۶. نتیجه‌گیری

۱. پس از دانه بندی مصالح و قرار دادن اعداد دانه‌بندی بر روی نمودار مصالح معدن صدراکنار با ضریب نرمی ۴ کمترین ضریب نرمی را دارا بود.

۲. در تمامی معادن با افزودن متاکائولین به نمونه شاهد رشد قابل توجه مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد هستیم. نمونه MD۵ مربوط به معدن محمد رسول الله با ۵٪ متاکائولین و مقاومت فشاری 30/2 Mpa و سپس نمونه SD۱۵ مربوط به معدن صدرا کنار با ۱۵٪ متاکائولین و مقاومت فشاری 30/1 Mpaو در نهایت نونه BD۱۵ مربوط به معدن بیدکوه با ۱۵٪ متاکائولین و مقاومت فشاری 27/1 Mpa می باشد.

۳. با بررسی مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌ای شاهد (بدون متاکائولین) بالاترین مقاومت فشاری را معدن صدرا کنار کسب کرده است، دلیل این موضوع تیز گوشه بودن مصالح سنگی، تمیز بودن و دانه بندی مناسب سنگدانه‌ها می‌باشد.

۴. با افزودن متاکائولین به معادن قرضه‌ها شاهد افزایش مقاومت فشاری در هر سه معدن می‌باشیم به طوری که می‌توان مقدار بهینه مصرف متاکائولین را در این سه معدن ۵ و ۱۰ درصد وزن سیمان معرفی کرد.

۵. معدن محمدرسول الله و بیدکوه در سنین ۲۸ روزه با رشد ۱۷ درصدی نسبت به نمونه شاهد خود بیشترین افزایش مقاومت را داشته‌اند.

۶. در معدن محمد رسول الله و صدراکنار چه نمونه‌های حاوی ترکیب افزودنی الیاف پلی پروپیلن و پوزولان متاکائولین و چه نمونه‌های حاوی افزودن الیاف پلی پروپیلن به تنهایی و نمونه‌های حاوی افزودن پوزولان متاکائولین به تنهایی، مقاومت فشاری نمونه‌ها بالاتر از مقاومت فشاری حداقل می باشد. که دلیل آن به شرح زیر می‌باشد:

با توجه به اینکه در تمامی نمونه‌ها طرح اختلاط ثابت در نظر گرفته شد و مقدار روان‌کننده و آب در تمام نمونه ها ثابت می‌باشد، جنس و نوع دانه بندی مصالح سنگی معادن قرضه تاثیر بسزایی بر روی مقاومت نمونه‌ها گذاشت. با توجه به اینکه هرچه سنگ‌دانه‌ها گردگوشه باشد درصد درگیری سنگ دانه ها کمتر و میزان آب مصرفی در نمونه کمتر و در صورتی که سنگدانه ها تیز گوشه باشد درصد درگیری بیشتری داشته مقاومت بیشتر و میزان آب مصرفی در نمونه بیشتر می‌شود. از آنجا که نمونه‌های ساخته شده در معدن بیدکوه نسبت به دو معدن دیگر دانه‌بندی نامناسب داشته و با توجه به شکل سنگ دانه‌ها در معدن بیدکوه مصالح درشت دانه از جنس آهکی، گردگوشه و بافت صاف بودند و به دلیل استفاده از روان کننده SP۲۰۰ و آب مصرفی به مقدار ثابت در نمونه‌ها سبب شد که معدن بیدکوه مقاومت فشاری کمتری را نسبت به سایر معادن بدست آورد زیرا استفاده از روان کننده در معدن بیدکوه سبب می‌شود که بتن دچار پدیده آب انداختگی گردد. در نمونه های BD۵ و BD۱۰ و BD۱۵ با افزودن متاکائولین به نمونه‌ها سبب شد که متاکائولین مقداری از آب نمونه را جذب کرده و به ترتیب در تمامی نمونه‌ها شاهد رشد مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد باشیم.

۷. مراجع

[۱] رنجبر، م، مدندوست، ر، یوسفی، س، موسوی، ی، (۱۳۹۱). "بررسی خواص بتن خود متراکم حاوی متاکائولین". پنجمین کنفرانس ملی بتن ایران.

[۲] مصطفوی، م، (۱۳۹۵)." مطالعه آزمایشگاهی تاثیر متاکائولین و میکروسیلیس بر مقاومت بتن خودمتراکم حاوی الیاف فولادی"، موسسه آموزش عالی لقمان حکیم.

[۳] قویدل شهرکی، م، (۱۳۹۵) "بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از ترکیب زئولیت و متاکائولین بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودمتراکم"، نشریه مهندسی عمران.

[۴] عطائی کوزانی، ر، (۱۳۹۴) "ارزیابی شرایط بتن تازه و سخت شده خودمتراکم حاوی نانواکسید آلومینیوم و متاکائولین"، موسسه آموزش عالی دیلمان.

[۵] قاسم زاده موسوی نژاد، ح، رضاپور، الف، (۱۳۹۳) "مقایسه و مطالعه خاصیت پوزولانی سیمان حاوی متاکائولین و پرلیت"، ششمین کنفرانس ملی بتن ایران.

[۶] تدین، م، مهاجری، پ، شعبانیان، م، ر، (۱۳۹۱) "بررسی تاثیر شکل سنگدانه بر مقاومت فشاری بتن"، چهارمین کنفرانس ملی بتن ایران.

[۷] غریب نواز، عطیه، خسرو ابراهیمی، سید احمد مظاهری، عباس یوسفی، (۱۳۸۶)، "بررسی کاربرد صنعتی کائولن معادن آهویی و رخ سفید گن آباد و مقایسه آنها با ذخایر کائولین آمریکا"، یازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

[۱] Fidjestol, P., and M. Dastol. (2012). The history of silica fume in concrete from novelty to key ingredient high performance concrete. www.elkeme.material.no .(۴ januray ۲۰۱۳)