بررسی تاثیر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر
بر مشخصات فنی سیمان

علی اکبر کفاش بازاری[1]، زیور نیک‌فال[2]، مهدی چینی[3]، محمد وطنی[4]

۱-رئیس آزمایشگاه مرکز تحقیق و توسعه کارخانه سیمان تهران (نویسنده مسئول)؛

۲-رئیس آزمایشگاه فیزیک و حفاری کارخانه سیمان تهران؛

۳- استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ؛

۴- کارشناس آزمایشگاه کارخانه سیمان تهران.

Eliaskafash@gmail.com

چکیده

مطابق منابع متعدد، پوزولان‌ها بهبود دهنده خواص سیمان می‌باشند. با توجه به امکانات موجود در اکثر کارخانجات سیمان کشور، سایش همزمان کلینکر و پوزولان مورد استفاده قرار می گیرد. ولی با توجه به تجربیات و تحقیقات انجام شده مبنی بر تاثیر مناسب‌تر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر بر کیفیت سیمان، در این مقاله به این موضوع پرداخته می‌شود. به نظر می‌رسد سایش همزمان کلینکر و پوزولان با توجه به ضرایب سایش‌پذیری مختلف کلینکر و پوزولان، موجب ۲فازی شدن سیمان و بروز نقایصی گردد. لیکن میزان این تاثیر و نحوه اثرگذاری چندان روشن نمی‌باشد. در این مقاله برای بررسی این موضوع یک نمونه کلینکر تهیه گردید. پس از آنالیز شیمی و مطالعه میکروسکوپی، سیمان‌سازی آزمایشگاهی صورت گرفت. در فاز اول سیمان‌سازی آزمایشگاهی نمونه‌های حاوی ۰درصد، ۵درصد، ۱۰درصد و ۲۷/۵درصد پوزولان تهیه شدند که سایش کلینکر و پوزولان هم‌زمان صورت گرفت. در فاز دوم ۴نمونه سیمان محتوی درصد پوزولان‌های مذکور تهیه شدند، با این تفاوت که سایش کلینکر و پوزولان به طور جداگانه انجام گردید. ۷نمونه سیمان آزمایشگاهی تهیه شده مورد آزمایش‌های تعیین مانده روی الک‌های ۹۰، ۴۵ و ۳۲ میکرون، دانه‌بندی لیزری، نرمی (بلین)، گیرش اولیه و نهائی، مقاومت فشاری ۲، ۷ و ۲۸روزه ملات استاندارد و مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰روزه بتن قرار گرفتند. مشخصات ظاهری بتن‌های تازه نیز ثبت و مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که در مقادیر کم پوزولان (۵درصد) سایش جداگانه یا هم‌زمان کلینکر و پوزولان تاثیر متفاوت و مشخصی در مشخصات فنی سیمان و بتن نداشته‌اند و در واقع وجود پوزولان باعث بهبود کارایی بتن و همچنین افزایش ۲۱-۱۵درصد مقاومت فشاری ۲۸روزه و ۶-۴درصد مقاومت فشاری ۹۰روزه بتن می‌شود. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵درصد) نیز سایش جداگانه موجب افزایش حدود ۴۰درصد مقاومت فشاری ملات و بتن ۲۸روزه، ۱۵درصد افزایش ذرات بین الک ۳ تا ۳۰ میکرون (Δ3-30) سیمان و کاهش کارپذیری بتن نسبت به سایش همزمان می‌گردد.

کلمات کلیدی: پوزولان، سایش جداگانه، هم‌زمان، بتن، سیمان.

۱. مقدمه (تاریخچه و هدف پژوهش)

مطابق منابع متعدد، پوزولان‌ها بهبود دهنده خواص سیمان می‌باشند. تجربیات متعدد پروژه‌ها نیز این موضوع را اثبات نموده‌اند. در کشور ایران با توجه به امکانات اکثر کارخانجات سیمان، سایش کلینکر وپوزولان به صورت همزمان می باشد ولی تجربیات جهانی و نتایج تحقیقات انجام شده در جهان حاکی بر تاثیر مطلوب‌تر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر بر کیفیت سیمان تولیدی می باشد. لذا در این مقاله به این موضوع پرداخته می‌شود. به نظر می‌رسد سایش همزمان کلینکر و پوزولان با توجه به ضرایب سایش‌پذیری مختلف کلینکر و پوزولان، دانه‌بندی سیمان ۲بخشی شود. در این تحقیق بررسی فنی-آزمایشگاهی این موضوع در محصولات کارخانه سیمان تهران مدنظر می‌باشد. لذا هدف پروژه بررسی تاثیر سایش جداگانه پوزولان در مشخصات سیمان (پرتلند تیپ۲، پوزولانی و پوزولان ویژه) با استفاده از آسیاب آزمایشگاهی است.

قیاسوند و رمضانیانپور (۲۰۱۵) تأثیر روش سایش را بر روی مصرف انرژی و توزیع اندازه ذرات سیمان‌های آمیخته را مطالعه نمودند. در این تحقیق آنها تأثیر سایش هم‌زمان و جداگانه بر میزان مصرف انرژی، دقت بلین و توزیع اندازه ذرات (PSD) بر روی سیمان‌های آمیخته شامل سیمان پرتلند پوزولانی (PPC) ، سیمان پرتلند آهکی (PLC) و سیمان مرکب پرتلند (PCC) بررسی کردند. در مطالعه مذکور، ۱۸ نوع سیمان شامل دو نوع سیمان پرتلند (PC) ، چهار نوع سیمان پرتلند آهکی (PLC) ، چهار نوع سیمان پرتلند پوزولانی (PPC) و هشت نوع سیمان مرکب پرتلند (PCC) استفاده شد. تحقیقات آنها نشان داد که توزیع اندازه ذرات (PSD) سیمان‌های آمیخته برای هر روش متفاوت است. استفاده صحیح از افزودنی‌ها نه تنها باعث بهبود سایش در سیمان‌های آمیخته می شود، بلکه توزیع اندازه ذرات از این سیمان ها را نیز بهبود می‌بخشد [۲].

ویرت (۲۰۰۷) طی مطالعاتی عنوان نمود که ترجیح سایش جدا یا هم‌زمان به سه معیار زیر بستگی دارد: ۱- از نظر فنی: فرآیند سایش جداگانه از این مزیت برخوردار است که می توان PSD اجزای مختلف را کنترل کرد، می‌توان از یک فن‌آوری مناسب برای هر مؤلفه استفاده کرد و سیمان‌ها را مطابق دلخواه تشکیل داد. فرآیند سایش هم‌زمان از نظر فنی ساده‌تر است و همگن‌سازی به راحتی صورت می‌گیرد. با این حال، PSD از اجزای مختلف عمدتا بسته به تفاوت نسبی آنها در قابلیت خرد شدن است؛ ۲- از نظر انرژی یا مزیت زمانی: بسته به نوع پوزولان، مقدار اضافه شده، مدت زمان سایش هر یک از روش‌های سایش قابل بررسی است؛ ۳-امکان سنجی: این امکان وجود دارد که یک ماده سازنده سیمان چند جزء به دلیل خرد کردن ترجیحی یکی دیگر از اجزای قابلیت خردایش آسانتر نتواند به نرمی مورد نیاز خود برسد. در این حالت به طور مشخص باید از روش سایش جداگانه استفاده شود [۳].

کیاسار و عفیفی (۱۹۷۶) قابلیت خردایش برخی از افزودنی‌های معدنی و اهمیت آن در تولید سیمان آمیخته را مطالعه نمودند. آزمایش‌های آنها بر روی سیمان‌های آمیخته متشکل از ۷۱درصد کلینکر سیمان پرتلند ، ۲۵درصد افزودنی‌های معدنی و ۴درصد گچ انجام شد. در یک سری از آزمایش‌ها، اجزای سیمان مخلوط به طور جداگانه و در یک سری دیگر همزمان سایش شدند. نتایج نشان داد که در حالت سایش همزمان، وقتی افزودنی سخت‌تر از کلینکر (مانند ماسه) با کلینکر سایش می‌شود از مقاومت فشاری اولیه بیشتری نسبت به سیمانی که در آن افزودنی نرمتر از کلینکر است برخوردار است. برای موادی که نسبت به کلینکر نرم‌تر هستند، سایش مجزا بهتر از سایش هم‌زمان است [۴].

اردوگو و همکاران (۱۹۹۹) مقایسه سایش هم‌زمان و سایش جداگانه برای تولید سیمان‌های آمیخته با پوزولان طبیعی و سرباره را مطالعه نمودند. آنها یک کلینکر سیمان پرتلند، یک پوزولان طبیعی و یک سرباره کوره بلند (GBFS) را برای به دست آوردن سیمان آمیخته حاوی ۲۵درصد مواد افزودنی معدنی استفاده کردند. پوزولان طبیعی نرم‌تر و سرباره کوره بلند سخت‌تر از کلینکر در سایش بود. دو سیمان به صورت هم‌زمان و دو نمونه دیگر جداگانه سایش شدند. تمام سیمان‌های آمیخته و سیمان شاهد (بدون هیچ‌گونه افزودنی) نرمی یکسانی (بلین: ۳۵۰۰ سانتی‌مترمربع برگرم) داشتند. آنها نشان دادند که مصرف انرژی آسیاب، توزیع اندازه ذرات و مقاومت فشاری ملات ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه دو روش اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد [۵].

باربوزا و همکاران (۲۰۱۹) تاثیر سایش بر فعالیت پوزولانی مواد باقیمانده گرانیتی را بررسی نمودند. این مطالعه به بررسی پتانسیل پسماند گرانیت به عنوان مواد پایه سیمانی مکمل، و راندمان روش‌های سایش در بهبود واکنش‌پذیری پسماند می‌پردازد. لذا پسماند گرانیت ۲۵درصد وزنی جایگزین سیمان پرتلند شد. پسماند به روش‌های تر، خشک و افزودنی خشک سایش گردید. مواد پایه سیمانی توسط پراش اشعه ایکس کمی با استفاده از روش ریتولدز، ترموگراویمتری (وزن‌سنجی حرارتی) و مقاومت فشاری، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. آنها راندمان بالاتر روش سایش مرطوب، افزایش نتایج مقاومت فشاری و به همان افزایش زمان سایش را مشاهده نمودند.، به دنبال یافت. نتایج آنها نشان داد که در آزمایش مقاومت ملات استاندارد، جایگزینی جزئی پسماند گرانیت با سیمان به علت فعالیت پوزولانی و اثر پرکنندگی تاثیر قابل توجهی ندارد. همچنین از نظر زیست محیطی و اقتصادی این جایگزینی مزایای مناسبی دارد [۶]. لازم به ذکر است که صنایع استخراج و

پردازش گرانیت با تولید ۶درصد در هر سال در ۱۰سال اخیر رشد داشته است. پیش‌بینی می‌شود که در نقاط مختلف جهان تولید این سنگ به ۴۰۰میلیون تن در هر سال برسد (Menezes, et al., ۲۰۰۵; MME, ۲۰۰۹).

۲. برنامه آزمایشگاهی و مواد تحقیق

در اولین مرحله، پوزولان مصرفی در این تحقیق بررسی شد (جدول۱).

جدول۱- مشخصات پوزولان مصرفی در این پروژه

نام معدن	مطالعات میکروسکوپی		اکتیویته (TG) ۲۸روزه	آنالیز شیمیائی						
	نام سنگ‌شناسی	کانی‌های اصلی		LOI	K_2O	Na_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
تراست جاجرود	توف سبز	کوارتز، فلدسپات، زئولیت	۵۸	۱۰/۴	۲/۲۹	۲/۵۷	۱/۰۶	۳/۵	۲/۰۴	۱۲/۹۳	۶۵/۱۸

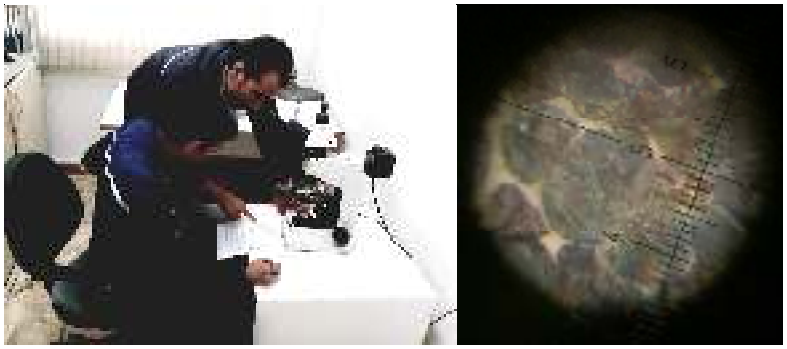
در مرحله دوم کلینکر و گچ مصرفی آنالیز شیمیائی شدند (جدول۲). سپس کلینکر تحت آزمایش‌های میکروسکوپی قرار گرفت (شکل۱ و جدول۳).

جدول۲- آنالیز شیمیائی کلینکر و گچ مصرفی در این مطالعه

نام نمونه	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	$CaSO_4$	آب مولکولی	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
گچ	۱/۳۴	۰/۷۲	۰/۲۲	۳۲/۴۶	۰/۸۴	۴۱/۶۹	۷۰/۹	۱۸/۶۶	*	*	*	*
کلینکر	۲۲/۶۴	۴/۶۸	۳/۹۶	۶۴/۱۶	۳/۳۸	۰/۴۳	*	*	۵۰/۷	۲۶/۷	۵/۷	۱۲/۱

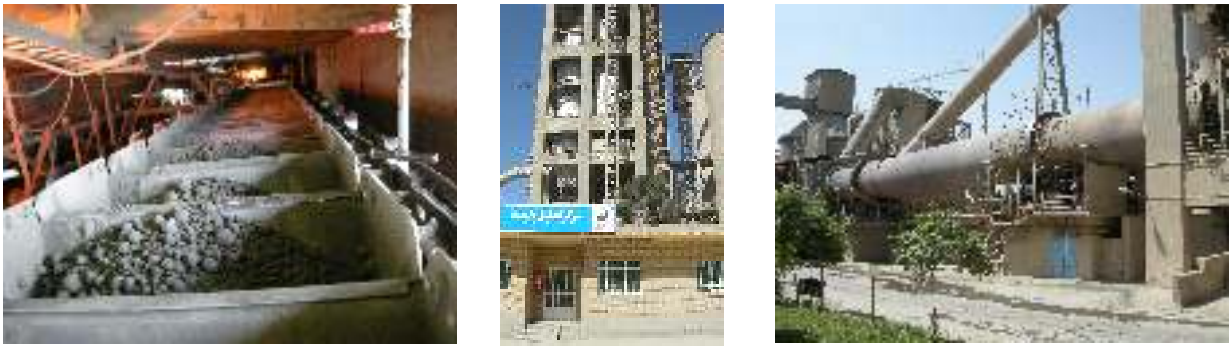
جدول۳- مطالعات میکروسکوپی نمونه کلینکر مصرفی

مقدار فاز آلیت (C_3S) (درصد)	مقدار فاز بلیت (C_2S) (درصد)	مقدار فاز آلومینات (C_3A) (درصد)	مقدار فاز فریت (C_4AF) (درصد)	مقدار آهک آزاد (درصد)	مقدار پری کلاز (درصد)
۵۸	۳۲	۴	۷	۰/۲	۰



شکل۱- انجام مطالعات میکروسکوپی بر روی نمونه کلینکر

در این مطالعه، کلینکر پرتلند نوع۲ از واحد هشتم کارخانه سیمان تهیه گردید (شکل۳).



شکل۲- محل تهیه نمونه و انجام پروژه- مجتمع صنعتی سیمان تهران

در مرحله سوم اقدام به تهیه سیمان‌های آزمایشگاهی شد. با توجه به اینکه آسیاب آزمایشگاهی تک خانه‌ای است و گلوله‌های مصرفی آن دارای سایز پائین‌تر از ۵۰ میلی‌متر می‌باشند؛ لذا در مشابه‌سازی با خانه اول آسیاب‌های صنعتی، کلینکر، سنگ آهک و گچ تا حداکثر ۴ میلی‌متر با دستگاه کراشر خرد و با نسبت مدنظر (جدول۴) وارد آسیاب شده‌اند (شکل۳).

جدول۴- مشخصات ۷ نمونه سیمان‌سازی آزمایشگاهی

روش سایش		همزمان			جداگانه		
عنوان	سیمان شاهد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد
کلینکر	۹۷درصد	۹۲درصد	۸۷درصد	۶۹/۵درصد	۹۲درصد	۸۷درصد	۶۹/۵درصد
گچ	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد
پوزولان	۰درصد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد

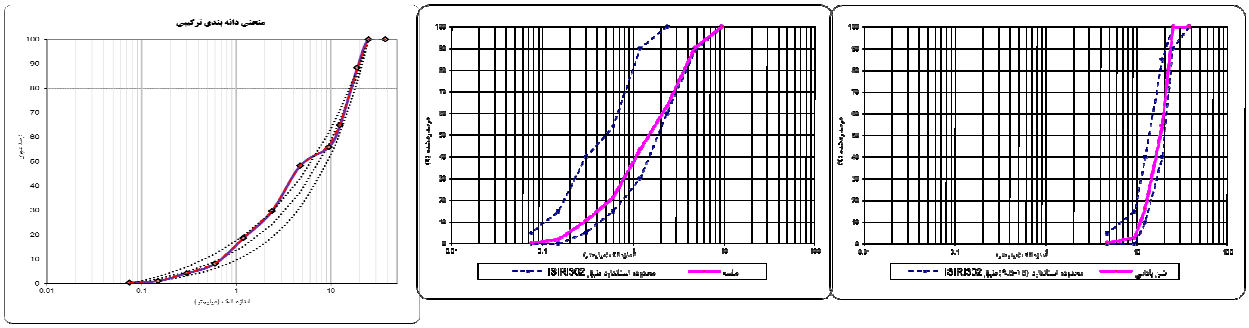
شکل۳- عملیات سیمان‌سازی آزمایشگاهی

آسیاب آزمایشگاهی مورد استفاده با ظرفیت ۸کیلوگرم، ابعاد ۷۵×۷۵ سانتی‌متر و شارژ وزنی ۷۰کیلوگرم بوده است. مبنای سایش مشابه روش صنعتی، دستیابی به نرمی یکنواخت و شاخص بلین ۵۰±۳۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم در نظر گرفته شد.

در گام چهارم تهیه طرح مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی با استفاده از سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی در برنامه کاری قرار گرفت. بطور معمول افزایش حداکثر اندازه سنگدانه (MSA)، منجر به افزایش مقاومت، کاهش هزینه، افزایش چگالی [۷]، کاهش پمپ‌پذیری، کاهش قابلیت بتن‌ریزی در مقاطع نازک یا تراکم آرماتور، افزایش آب‌انداختگی و ... می‌شود. لذا غالبا ساخت بتن صنعتی با سنگدانه MSA:۲۵mm انجام می‌گیرد. مبنای انتخاب مصالح سنگدانه‌ای برای تهیه مخلوط بتن‌های آزمایشی در این تحقیق نیز بر همین منوال (مشابه اجرای بتن در ساختمان‌ها) بوده است. شکل۴ و جدول۵ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از جنوب تهران می‌باشد.

جدول۵- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	مدول نرمی (FM)	درصد جذب آب	چگالی (SSD)	درصد شکستگی	درصد گذشته از الک ۲۰۰
شن نیمه شکسته (بادامی)	-	۱/۹۸	۲/۵۷	۵۵	۰/۷
ماسه نیمه شکسته	۳/۷	۲/۶۴	۲/۵۶	*	۳/۹



شکل۴- نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن

در کلیه مخلوطها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمونگرها و شرایط عمل‌آوری تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر سیمان مصرفی باشد (شکل۲). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرحها نیز kg/m^3 ۳۵۰ بود. طراحی مخلوطها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود n:۰.۳۵ (میانگین ۰/۱ تا ۰/۶۷) در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد [۱]. برای تهیه این مخلوط ۶۰درصد ماسه با ۴۰درصد شن درشت استفاده شد (نمودار شکل۴). در این تحقیق مبنای تهیه مخلوطهای بتن آزمایشگاهی، رسیدن به کارائی مناسب (اسلامپ ۸±۰/۵ سانتی‌متر) بود که w/c= ۰/۵۵±۰/۰۱ به دست آمد. در نهایت مقاومت آزمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شدند و وضعیت ظاهری بتن تازه نیز بطور شهودی ثبت گردید. (شکل۵)

شکل۵- نماهائی از عملیات سیمان سازی آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های فیزیکی-شیمیائی در این تحقیق

۳. *نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل*

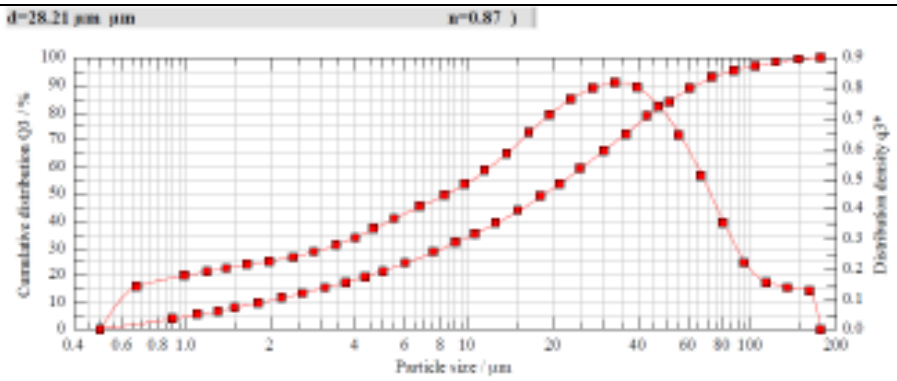
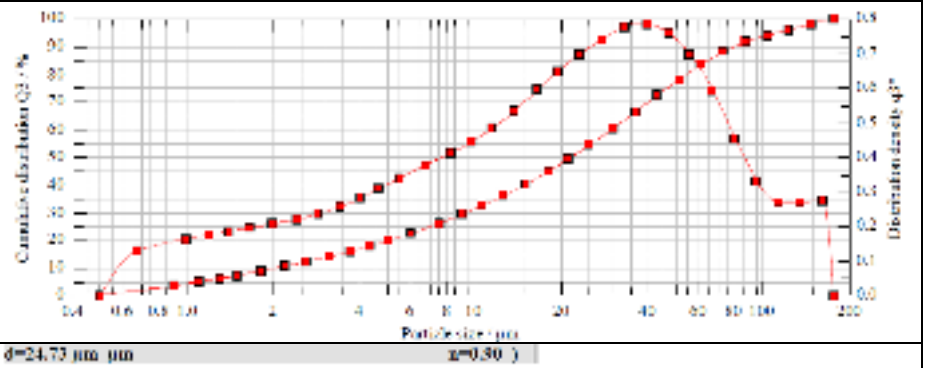
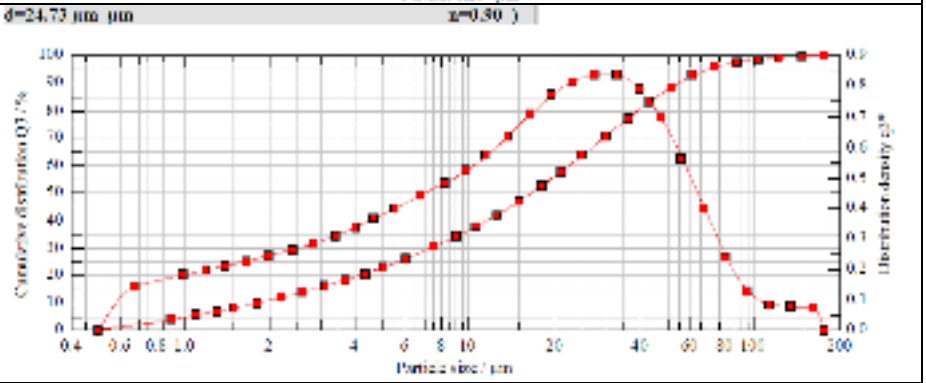
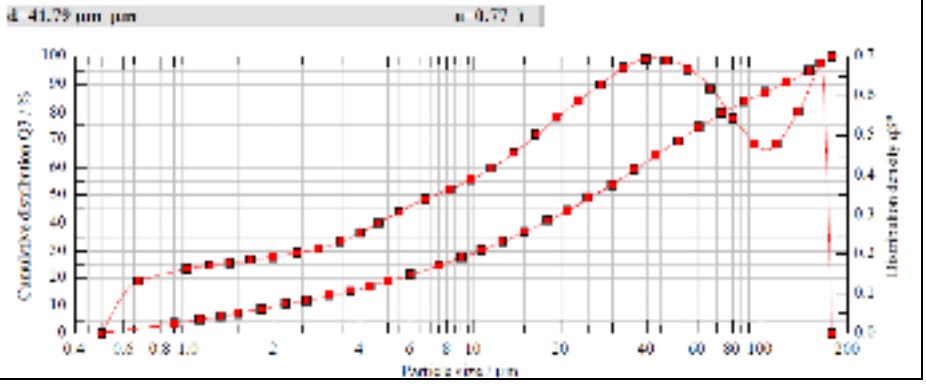
در اولین گام حین ساخت مخلوطهای بتنی، وضعیت ظاهری بتن تازه به صورت شهودی بررسی شدند (جدول۶). در این بررسی شهودی به پارامترهایی همچون قوام، کارپذیری، قابلیت پرداخت‌کاری و غیره امتیاز ۵-۱ داده شد و در نهایت میانگین

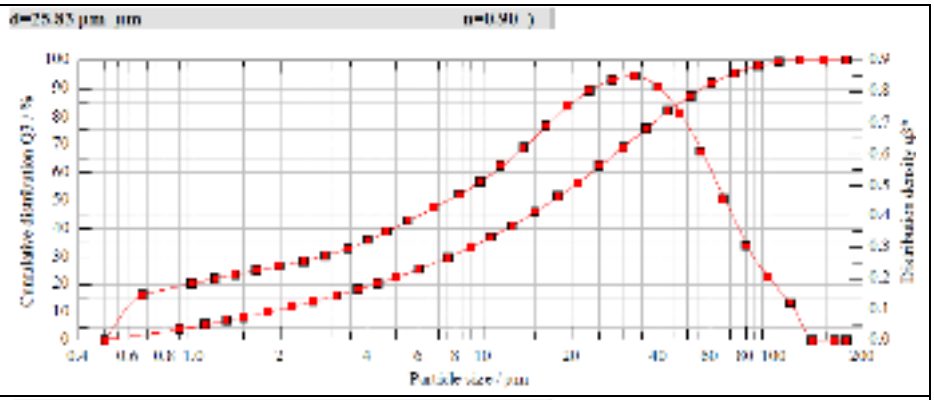
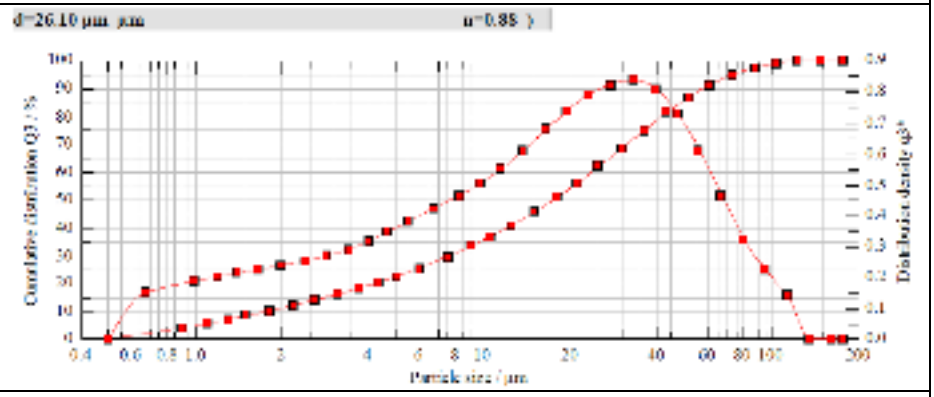
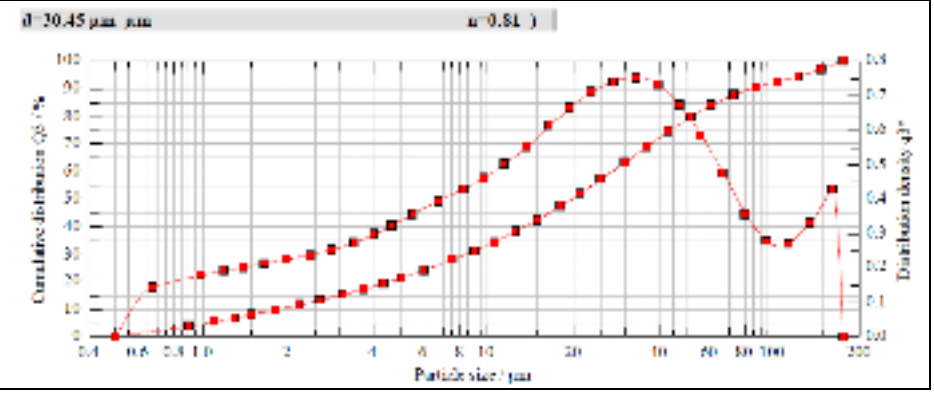
امتیاز هر مخلوط بررسی شد. در این میان برای پارامترهای نامناسب همچون جداشدگی و غیره واژه "عدم" لحاظ گردید تا بتوان قضاوت راحتی داشت. این بررسی نشان داد که: ۱-در سیمان تهیه شده به روش سایش جداگانه نسبت به نمونه ساخته شده با روش سایش هم‌زمان، مشخصات بتن تازه کمی بهبود می‌یابد؛ ۲- سیمان حاوی پوزولان نسبت به سیمان فاقد پوزولان (نوع۲) مشخصات بتن تازه بهتری دارد؛ ۳- همواره با افزایش پوزولان مشخصات بتن تازه بهبود می‌یابد.

جدول۶- مشخصات شهودی مخلوط بتن‌های تازه

پارامتر	وضعیت مخلوط بتن آزمایشگاهی						
نوع سایش	همزمان				جداگانه		
مقدار پوزولان	۰درصد	۵درصد	۱۰درصد	۵/۲۷درصد	۵درصد	۱۰درصد	۵/۲۷درصد
اسلامپ نهائی (سانتی‌متر)	۶/۵	۶	۵/۵	۴/۵	۶	۵	۵
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۲۹	۲/۳۱	۲/۳۱	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۱	۲/۲۵
قوام (اصطلاحا عسلی بودن و لوز داشتن بتن)	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
کارپذیری (راحتی در جابجائی بتن و غیره) اولیه (۵دقیقه)	۴	۵	۴	۴	۵	۴	۴
کارپذیری (راحتی در جابجائی بتن و غیره) با تاخیر (۲۰دقیقه)	۲	۳	۴	۴	۳	۴	۴
قابلیت پرداخت‌کاری (و ماله‌کشی یا صاف نمودن سطح بتن) اولیه (۵دقیقه)	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
قابلیت پرداخت‌کاری (و ماله‌کشی یا صاف نمودن سطح بتن) با تاخیر (۲۰دقیقه)	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳
پمپ‌پذیری (بافت ظاهری نرم، کمبود سنگدانه‌های تیزگوشه، درشت و غیره)	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۴
قابلیت تراکم (فشردگی با دست و منسجم شدن بتن)	۳	۳	۴	۵	۴	۵	۵
چسبندگی اجزای بتن به هم و انسجام آن اولیه (۵دقیقه)	۴	۴	۵	۵	۴	۴	۵
چسبندگی اجزای بتن به هم و انسجام آن با تاخیر (۲۰دقیقه)	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۵
عدم بافت خشن (فرم‌پذیری بد به علت اصطحکاک سنگدانه‌ها با هم)	۳	۳	۴	۴	۴	۴	۴
عدم استعداد جداشدگی (تفکیک خودکار شن، ماسه و خمیره بتن)	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
عدم روند کاهش سریع اسلامپ طی ۱ساعت	۵	۵	۴	۳	۵	۵	۵
عدم زمان گیرش طولانی بتن، عدم صعوبت در پرداخت‌کاری و جابجائی با تاخیر آن	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
عدم استعداد آب‌انداختگی (جمع شدن آب بر روی سطح بتن)	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
میانگین امتیازات	۳/۶	۴/۱	۴/۳	۴/۳	۴/۲	۴/۴	۴/۶

در گام بعدی نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی دانه‌بندی به روش لیزری شدند. شکل۶ و جدول۷ نتایج و نمودارهای دانه‌بندی نمونه‌های سیمان را نشان می‌دهد.

نمونه شاهد		
سایش همزمان	۵درصد پوزولان	
	۱۰درصد پوزولان	
	۲۷/۵درصد پوزولان	

سایش جداگانه	۵درصد پوزولان	
	۱۰درصد پوزولان	
	۲۷/۵درصد پوزولان	

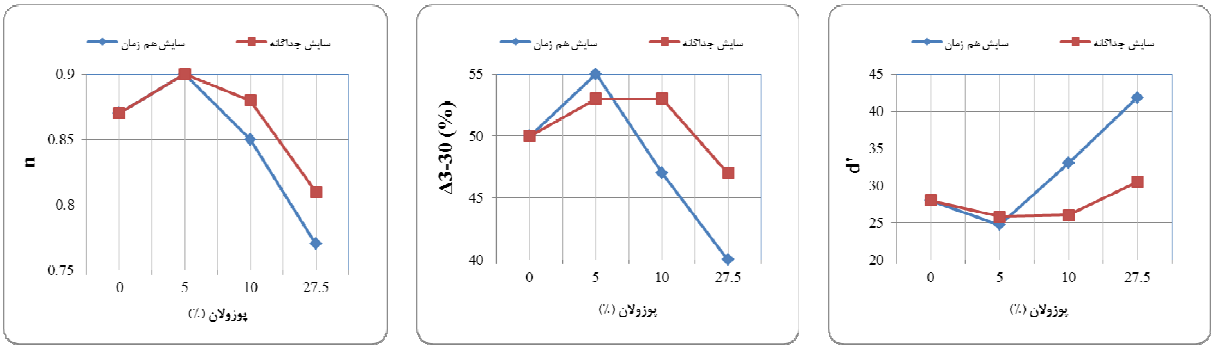
شکل۶- دانه‌بندی لیزری نمونه‌های سیمان

همانگونه که در نمودارهای شکل۶ مشهود است میزان ذرات بین ۳۰-۳ میکرون (Δ۳۰-۳) در محدوده ۵۵-۴۰درصد است. طبق مرجع [۸]، میزان Δ۳۰-۳ برای سیمان با مقاومت ملات نسبتا زیاد در حدود ۵۵-۴۵درصد است. برخی مراجع دیگر [۹] حداقل مطلوبیت را برای این پارامتر ۵۰درصد ذکر نموده‌اند. این جدول به وضوح اختلاف کیفیت سایش ۲ سری نمونه سیمان مصرفی در این تحقیق را نمایش می‌دهد. نتایج دانه‌بندی لیزری نشان می‌دهد که ۱- با افزایش مقدار پوزولان در سیمان میزان یکنواختی (پارامتر n) کاهش می‌یابد؛ ۲-در سایش جداگانه کلینکر و پوزولان، میزان زبری (پارامتر d') نسبت به روش سایش همزمان کمتر است؛ ۳-با افزایش مقدار پوزولان در سیمان، درصد ذرات ۳۰-۳ میکرون کاهش می‌یابد؛ ۴-دو نمونه حاوی ۲۷/۵درصد پوزولان (سایش همزمان و جداگانه) دارای پارامتر زبری کاملا متفاوتی هستند که نشان از دو فازی شدن در حالت سایش همزمان دارد. علت آن قابلیت خردایش کمتر پوزولان نسبت ه کلینکر است، یعنی اینکه پوزولان تردتر از کلینکر می‌باشد و در نتیجه ذرات نرم‌تر پوزولان و ذرات درشت‌تر کلینکر می‌باشند.

جدول۷- خلاصه نتایج دانه‌بندی لیزری نمونه‌های سیمان‌سازی آزمایشگاهی

کد نمونه	روش سایش	مقدار پوزولان	n	d'	مانده روی الک ۴۵ میکرون (درصد)	ذرات بین ۳ تا ۳۰ میکرون (درصد)
۳۲۵۱	*	۰	۰,۸۷	۲۸	۲۱	۵۰
۳۲۵۲	هم زمان	۵	۰,۹۰	۲۵	۱۵	۵۵
۳۲۵۳	هم زمان	۱۰	۰,۸۵	۳۳	۲۵	۴۷
۳۲۵۴	هم زمان	۲۷,۵	۰,۷۷	۴۲	۳۴	۴۰
۳۲۷۴	جداگانه	۵	۰,۹۰	۲۶	۱۶	۵۳
۳۲۷۵	جداگانه	۱۰	۰,۸۸	۲۶	۱۷	۵۳
۳۲۷۶	جداگانه	۲۷,۵	۰,۸۱	۳۱	۲۴	۴۷

نمودارهای شکل ۷ این مقایسه را به نحو مطلوبی نمایش می‌دهد.



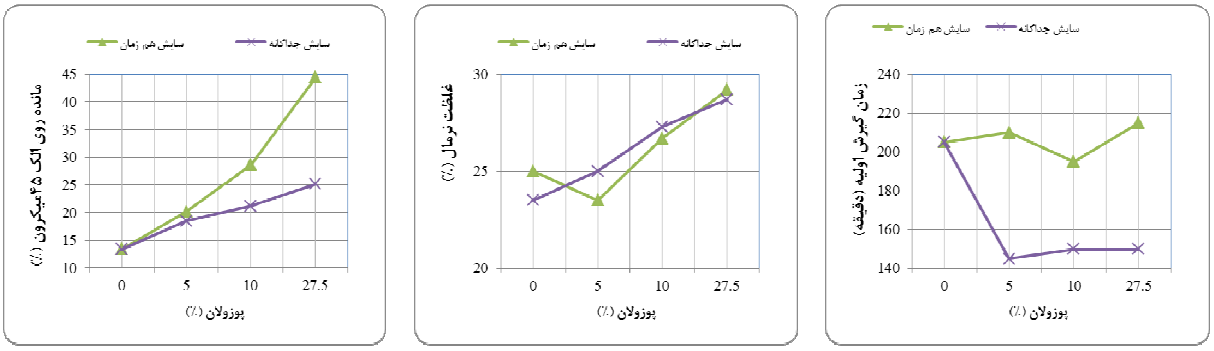
شکل۷- مقایسه خلاصه نتایج دانه‌بندی لیزری نمونه‌های سیمان‌سازی آزمایشگاهی

جدول۸ و نمودار شکل۸ مشخصات فیزیکی ۷نمونه سیمان آزمایشگاهی را به نمایش می‌گذارد. این نتایج نشان می‌دهد که: ۱-علیرغم نرمی (بلین) مشابه، میزان مانده روی الکها متفاوت است و هر چه محتوی پوزولان نمونه‌ها بیشتر می‌شود، ذرات زبره (درشت‌تر از الک‌های ۹۰، ۴۵ و ۳۲ میکرون) بیشتر می‌شوند و همچنین در روش سایش هم‌زمان نسبت به روش سایش جداگانه، زیری سیمان بیشتر شده است؛ ۲- روش سایش جداگانه باعث کاهش زمان گیرش می‌شود.

جدول۸- مشخصات فیزیکی نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

روش	مقدار	کد	بلین	مقاومت ملات استاندارد (kg/cm۲)			مانده روی الک (درصد)			غلظت	زمان گیرش (دقیقه)	
سایش	پوزلان (درصد)	نمونه	Cm۲/gr	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰میکرون	۴۵میکرون	۳۲میکرون	نرمال (درصد)	اولیه	نهائی
*	۰	۳۲۵۱	۲۹۸۵	۲۳۰	۳۵۳	۴۹۰	۲/۲	۱۳/۳	۲۳/۶	۲۵/۰	۲۰۵	۳۱۵
همزمان	۵	۳۲۵۲	۳۰۷۶	۲۲۷	۳۸۸	۵۳۴	۱/۶	۲۰/۱	۳۱/۴	۲۳/۵	۲۱۰	۳۱۵
همزمان	۱۰	۳۲۵۳	۲۸۱۰	۱۲۸	۲۲۹	۳۹۹	۴/۰	۲۸/۶	۳۷/۸	۲۶/۷	۱۹۵	۳۰۰
همزمان	۲۷/۵	۳۲۵۴	۲۹۵۱	۶۳	۱۱۲	۲۲۴	۱۳/۸	۴۴/۴	۵۰/۶	۲۹/۲	۲۱۵	۳۳۰
جداگانه	۵	۳۲۷۴	۲۹۱۶	۱۸۶	۳۲۹	۵۴۱	۲/۱	۱۸/۴	۲۶/۵	۲۵/۰	۱۴۵	۲۲۵
جداگانه	۱۰	۳۲۷۵	۲۸۸۱	۱۷۰	۳۲۰	۵۲۶	۲/۸	۲۱/۲	۲۹/۵	۲۷/۳	۱۵۰	۲۳۵
جداگانه	۲۷/۵	۳۲۷۶	۳۰۵۲	۹۶	۱۶۹	۳۳۲	۲/۲	۲۵/۱	۳۳/۸	۲۸/۷	۱۵۰	۲۲۰

جهت تبیین بهتر موضوع شکل۸ نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر زمان گیرش، غلظت نرمال و مانده روی الک ۴۵میکرون مقایسه شده‌اند.



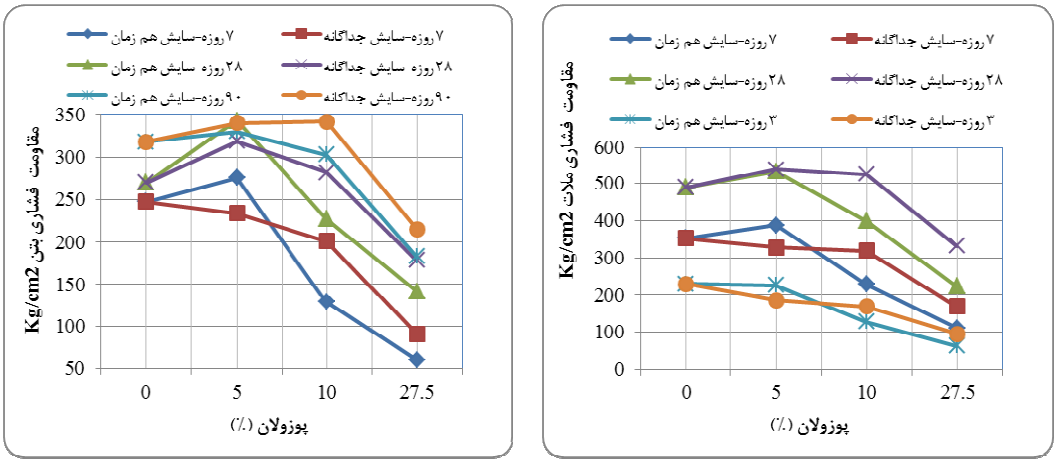
شکل۸- مقایسه مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه

جدول۹ خلاصه نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در این مطالعه را نشان می‌دهد. شکل۹ نمودار کلیه آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری در ۷مخلوط بتن آزمایشگاهی (۴۲ آزمونه) را نشان می‌دهد.

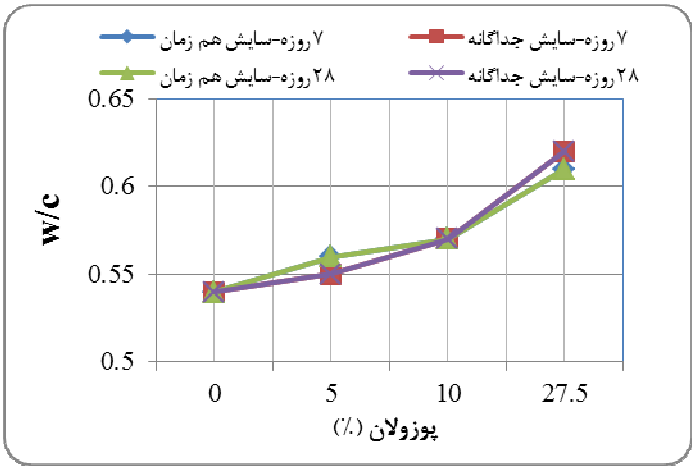
جدول۹- خلاصه نتایج مخلوط‌های بتنی عملیات آزمایشگاهی

روش	مقدار	کد	بتن تازه		مقاومت بتن (kg/cm۲)		
سایش	پوزلان (درصد)	نمونه	w/c	اسلامپ (cm)	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
*	۰	۳۲۵۱	۰/۵۴	۸	۲۴۷	۲۷۰	۳۱۸
همزمان	۵	۳۲۵۲	۰/۵۶	۸	۲۷۵	۳۴۳	۳۳۰
همزمان	۱۰	۳۲۵۳	۰/۵۷	۸	۱۲۹	۲۲۷	۳۰۳
همزمان	۲۷/۵	۳۲۵۴	۰/۶۱	۸	۶۱	۱۴۲	۱۸۳
جداگانه	۵	۳۲۷۴	۰/۵۴	۸	۲۳۴	۳۱۹	۳۴۰
جداگانه	۱۰	۳۲۷۵	۰/۵۵	۸	۲۰۱	۲۸۲	۳۴۲
جداگانه	۲۷/۵	۳۲۷۶	۰/۵۷	۸	۹۱	۱۷۸	۲۱۵

بر اساس منابع قبلی دور از ذهن نبود که با افزایش مقدار پوزولان، مقاومت فشاری کوتاه و میان مدت (۷ و ۲۸ روزه) بتن کاهش یابد. لیکن در نمونه‌های سایش جداگانه، با افزایش پوزولان، مقاومت بلندمدت (۹۰روزه) افزایش (برای سیمان‌های ۵درصد و ۱۰درصد به ترتیب ۶درصد و ۷درصد) یافت. البته در نمونه محتوی ۲۷/۵درصد پوزولان به علت افزایش نسبتا زیاد نسبت w/c مقاومت ۹۰روزه نیز نسبت به نمونه شاهد کاهش (۴۸درصد و ۷۴درصد) داشت (شکل۱۰). اما در روش سایش هم‌زمان با افزایش میزان پوزولان همواره مقاومت بلندمدت کاهش دارد که نشان می‌دهد علیرغم تاثیر مطلوب پوزولان در مقاومت بلندمدت (نمونه‌های سایش جداگانه)، مقاومت بلندمدت نمونه‌های سایش هم‌زمان به علت سایش نامطلوب کاهش دارد. همچنین مقاومت فشاری نمونه های سایش جداگانه مقاومت بیشتری نسبت به نمونه های هم رده خود در سایش همزمان داشته اند.



شکل۹- نتایج مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات استاندارد (سمت راست) و بتن (سمت چپ)



شکل۱۰- نتایج نسبت w/c در مخلوط‌های بتنی مورد آزمایش

۴. نتیجه‌گیری

۱. در مقادیر کم پوزولان (۵درصد) سایش جداگانه یا هم‌زمان کلینکر و پوزولان تاثیر نامناسبی در مشخصات فنی سیمان و بتن نداشته بلکه باعث ۲۱-۱۵درصد بهبود مقاومت ۲۸روزه و ۶-۴درصد بهبود مقاومت ۹۰روزه بتن می‌شود.

۲. این بهبود مقاومت سیمان حاوی ۵درصد پوزولان در مقاومت ملات منجر به بهبود ۹-۸درصد مقاومت ۲۸روزه می‌گردد؛

۳. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵درصد) سایش جداگانه نسبت به روش سایش هم‌زمان موجب بهبود بیش از ۴۰درصد (افزایش) مقاومت ملات و بتن ۲۸روزه می‌شود؛

۴. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵درصد) سایش جداگانه نسبت به روش سایش هم‌زمان باعث بهبود ۱۵درصد (افزایش) -۳۰ Δ دانه‌بندی سیمان و کاهش کارپذیری بتن می‌گردد؛

۵. مصرف حدود ۵درصد پوزولان به علت بهبود دانه‌بندی سیمان، کاربرد بتن را بهتر می‌نماید.

۶. در کارایی برابر، با افزایش پوزولان نسبت w/c را افزایش می‌یابد.

۵. قدردانی

تشکر و قدردانی ویژه‌ای از مدیران، کارشناسان، و تکنسین‌های آزمایشگاه و سایر پرسنل زحمتکش مجتمع صنعتی سیمان تهران داریم.

۶. مراجع

[۱] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.

[۲] E. GHIASVAND AND A. A. RAMEZANIANPOUR. (۲۰۱۵). "EFFECT OF GRINDING METHOD ON ENERGY CONSUMPTION AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF BLENDED CEMENTS". IJST, Transactions of Civil Engineering, Vol. ۳۹, No. C۲+, pp ۴۲۳-۴33.

[۳] Klaartje De Weerdt. (۲۰۰۷). "Separate grinding versus intergrinding". SINTEF Building and nfrastructure. ISBN ۹۷۸-۸۲-۵۳۶-0986-7.

[۴] Kaissar M. Hanna & Aly Afify (۱۹۷۶). "Grindability of some additions and its significance in the production of mixed cements". Journal of Applied chemistry and biotechnology banner. ۲۹ May ۲۰۰۷.

[۵] K Erdogdua & M Tokyayb & P Türker (). "Comparison of intergrinding and separate grinding for the production of natural pozzolan and GBFS-incorporated blended" Cement and Concrete Research. Volume ۲۹, Issue ۵, May ۱۹۹۹, Pages ۷۴۳-۷۴۶.

[۶] Jairo Mendes Barbosa. & Jose Maria Franco de Carvalho & Keoma Defáveri do Carmo e Silva & Ricardo Andre Fiorotti Peixoto & Guilherme Jorge Silva Brigolin "Influence of grinding on the pozzolanic activity of granite residue" REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, ۷۲(۳), 395-404, jul. sep. | 2019.

[۷] ACI ۲۱۱-۱-91 (Reapproved 2002)" Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete" .

[۸] Duda, w. (۱۹۷۶). "Cement data book". Volume ۲.

[۹] Neville AM, Brooks JJ (۲۰۰۲). "Concrete Proprties". Prentice Hall, p۲۲.