

## بررسی تاثیر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر بر مشخصات فنی سیمان

علی اکبر کفاش بازاری<sup>۱</sup>، زیور نیکفال<sup>۲</sup>، مهدی چینی<sup>۳</sup>، محمد وطنی<sup>۴</sup>

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 می‌گیرد. 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 افزایش 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 ۰ درصد، ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۲۷/۵ درصد پوزولان تهیه شدند که سایش کلینکر و پوزولان همزمان صورت گرفت. در فاز دوم ۴ نمونه سیمان محتوی درصد پوزولان‌های مذکور تهیه شدند، با این تفاوت که سایش کلینکر و پوزولان به طور جداگانه انجام گردید. ۷ نمونه 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 ۲۸ روزه ملات استاندارد و مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بتن قرار گرفتند. مشخصات ظاهری بتن‌های تازه نیز ثبت و مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که در مقادیر کم پوزولان (۵ درصد) 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 ۲۱-۱۵ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۶-۴ درصد مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن می‌شود. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵ درصد) نیز سایش جداگانه موجب افزایش حدود ۴۰ درصد مقاومت فشاری ملات و بتن ۲۸ روزه، ۱۵ درصد افزایش ذرات بین الک ۳ تا ۳۰ میکرون ( $\Delta 3-30$ ) 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 و پوزولان به صورت همزمان می‌باشد ولی تجربیات جهانی و نتایج تحقیقات انجام شده در جهان حاکی بر تاثیر مطلوب‌تر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر بر کیفیت سیمان تولیدی می‌باشد. 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 بخشی 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 تیپ ۲، 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 می‌شود، بلکه توزیع اندازه ذرات از این سیمان‌ها 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 می‌توان 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 عمدتاً 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 عقیفی (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 ۷۱ درصد کلینکر سیمان پرتلند، ۲۵ درصد افزودنی‌های معدنی و ۴ درصد 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 ۲۵ درصد 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) تأثیر سایش بر فعالیت پوزولانی مواد باقیمانده گرانیته را بررسی نمودند. این مطالعه به بررسی پتانسیل پسماند گرانیته به عنوان مواد پایه سیمانی مکمل، و راندمان روش‌های سایش در بهبود واکنش‌پذیری پسماند می‌پردازد. لذا پسماند گرانیته ۲۵ درصد 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 ریتولوز، 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 یافتن نتایج آنها نشان داد که در آزمایش مقاومت ملات استاندارد، جایگزینی جزئی پسماند گرانیته با سیمان به علت فعالیت پوزولانی و اثر پرکنندگی تأثیر قابل توجهی ندارد. همچنین از نظر زیست محیطی و اقتصادی این جایگزینی مزایای مناسبی دارد [۶]. لازم به ذکر است که صنایع استخراج و

پدازش گرانیات با تولید ۶ درصد در هر سال در ۱۰ سال اخیر رشد داشته است. پیش‌بینی می‌شود که در نقاط مختلف جهان تولید این سنگ به ۴۰۰ میلیون 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 (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات پوزولان مصرفی در این پروژه

نام معدن	نام سنگ‌شناسی	مطالعات میکروسکوپی نام کانی‌های اصلی	آنالیز شیمیائی								
			اکتیویته (TG) ۲۸ روزه	LOI	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
تراست جاچرود	توف سبز	کوارتز، فلدسپات، زئولیت	۵۸	۱۰/۴	۲/۲۹	۲/۵۷	۱/۰۶	۳/۵	۲/۰۴	۱۲/۹۳	۶۵/۱۸

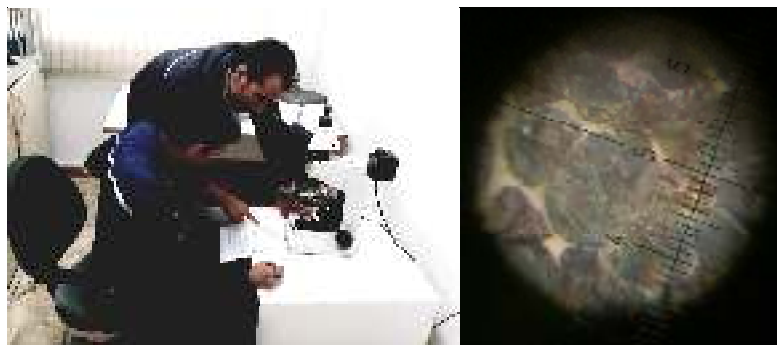
در مرحله دوم کلینکر و گچ مصرفی آنالیز شیمیائی شدند (جدول ۲). سپس کلینکر تحت آزمایش‌های میکروسکوپی قرار گرفت (شکل ۱ و جدول ۳).

جدول ۲- آنالیز شیمیائی کلینکر و گچ مصرفی در این مطالعه

نام نمونه	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	آب مولکولی	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
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

جدول ۳- مطالعات میکروسکوپی نمونه کلینکر مصرفی

مقدار فاز آلایت (C+S) (درصد)	مقدار فاز بلیت (C+S) (درصد)	مقدار فاز آلومینات (C+A) (درصد)	مقدار فاز فریت (C+AF) (درصد)	مقدار آهک آزاد (درصد)	مقدار پری کلاز (درصد)
۵۸	۲۲	۴	۷	۰/۲	۰



شکل ۱- انجام مطالعات میکروسکوپی بر روی نمونه کلینکر

در این مطالعه، کلینکر پرتلند نوع ۲ از واحد هشتم کارخانه سیمان تهیه گردید (شکل ۳).



شکل ۲- 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 (جدول ۴) وارد آسیاب شده‌اند (شکل ۳).

جدول ۴- مشخصات ۷ نمونه سیمان‌سازی آزمایشگاهی

روش سایش	هم‌زمان		جداگانه				
	عنوان	سیمان شاهد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد	۵درصد	۱۰درصد
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

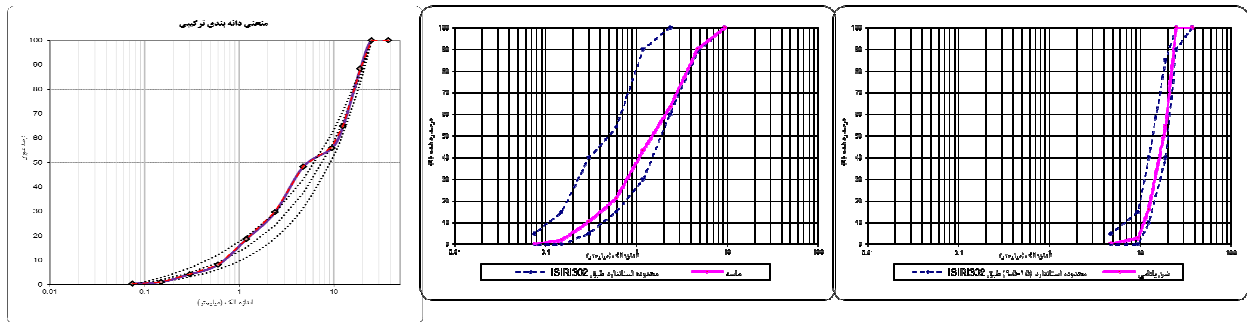


شکل ۳- عملیات سیمان‌سازی آزمایشگاهی

آسیاب آزمایشگاهی مورد استفاده با ظرفیت ۸ کیلوگرم، ابعاد ۷۵×۷۵ سانتی‌متر و شارژ وزنی ۷۰ کیلوگرم بوده است. مبنای سایش مشابه روش صنعتی، دستیابی به نرمی یکنواخت و شاخص بلین  $50 \pm 3000$  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 غالباً ساخت بتن صنعتی با سنگدانه  $25\text{mm} : \text{MSA}$  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. شکل ۴ و جدول ۵ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از جنوب تهران می‌باشد.

جدول ۵- 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



شکل ۴- 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 (شکل ۲). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها نیز  $350 \text{ kg/m}^3$  بود. طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود  $n: 0.35$  (میانگین  $0.1$  تا  $0.67$ ) 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 ۶۰ درصد ماسه با ۴۰ درصد شن درشت استفاده شد (نمودار شکل ۴). در این تحقیق مبنای تهیه مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی، رسیدن به کارایی مناسب (اسلامپ  $8 \pm 0.5$  سانتی‌متر) بود که  $W/C = 0.55 \pm 0.01$  به دست آمد. در نهایت مقاومت آزمون‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شدند و وضعیت ظاهری بتن تازه نیز بطور شهودی ثبت گردید. (شکل ۵)



شکل ۵- نمائاتی از عملیات سیمان‌سازی آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های فیزیکی-شیمیایی 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 (جدول ۶). 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 (نوع ۲) مشخصات بتن تازه بهتری دارد؛ ۳- همواره با افزایش پوزولان مشخصات بتن تازه بهبود می‌یابد.

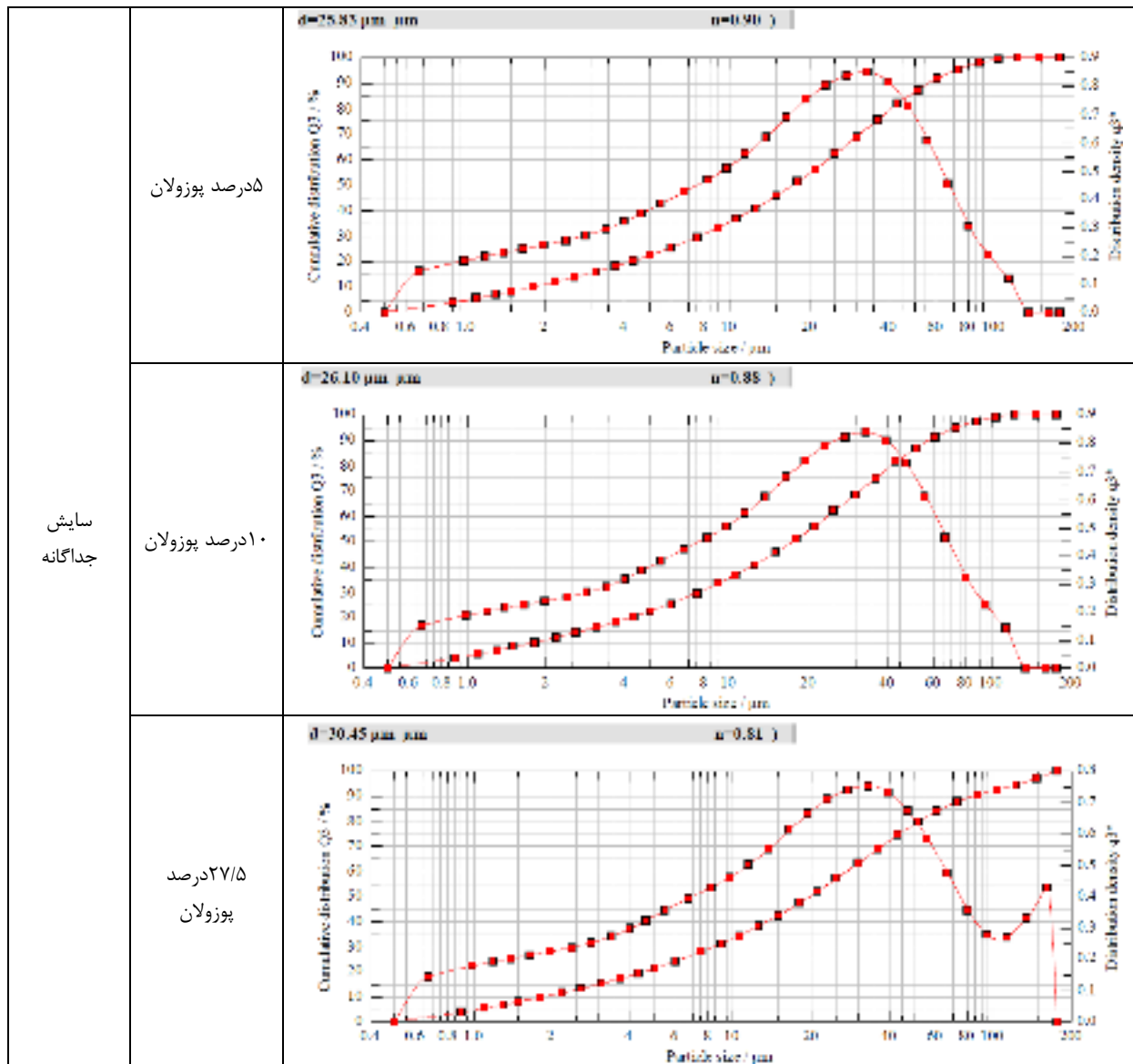
جدول ۶- مشخصات شهودی مخلوط بتن‌های تازه

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

در گام بعدی نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی دانه‌بندی به روش لیزری شدند. شکل ۶ و جدول ۷ نتایج و نمودارهای دانه‌بندی نمونه‌های سیمان را نشان می‌دهد.



<p>نمونه شاهد</p>		
	<p>۵ درصد پوزولان</p>	
<p>سایش هم‌زمان</p>	<p>۱۰ درصد پوزولان</p>	
	<p>۲۷/۵ درصد پوزولان</p>	



شکل ۶- دانه بندی لیزری نمونه های سیمان

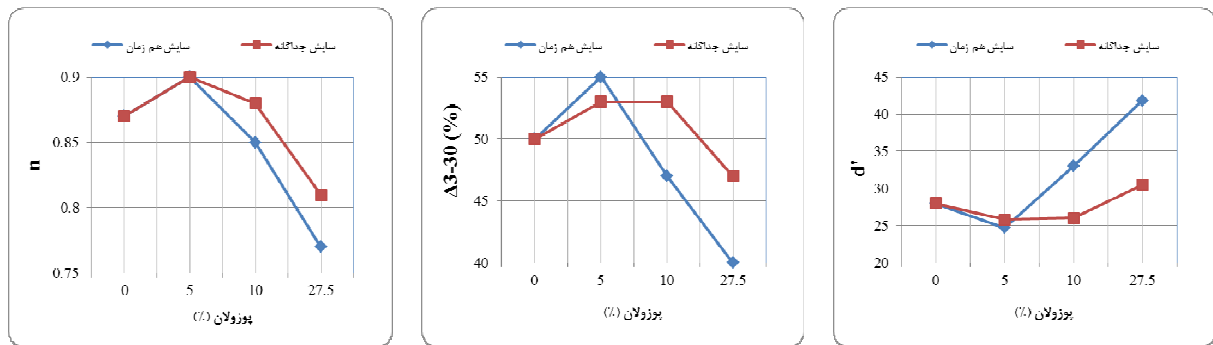
همانگونه که در نمودارهای شکل ۶ مشهود است میزان ذرات بین ۳۰-۳ میکرون ( $\Delta 3-30$ ) در محدوده ۴۵-۴۰ درصد است. طبق مرجع [۸]، میزان  $\Delta 3-30$  برای سیمان با مقاومت ملات نسبتاً زیاد در حدود ۴۵-۵۵ درصد است. برخی مراجع دیگر [۹] حداقل مطلوبیت را برای این پارامتر ۵۰ درصد ذکر نموده اند. این جدول به وضوح اختلاف کیفیت سایش ۲ سری نمونه سیمان مصرفی در این تحقیق را نمایش می دهد. نتایج دانه بندی لیزری نشان می دهد که ۱- با افزایش مقدار پوزولان در سیمان میزان یکنواختی (پارامتر  $n$ ) کاهش می یابد؛ 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 می یابد؛ ۴- دو نمونه حاوی ۲۷/۵ درصد پوزولان (سایش همزمان و جداگانه) دارای پارامتر زبری کاملاً متفاوتی هستند که نشان از دو فازی شدن در حالت سایش همزمان دارد. علت آن قابلیت خردایش کمتر پوزولان نسبت به کلینکر است، یعنی اینکه پوزولان تردتر از کلینکر می باشد و در نتیجه ذرات نرم تر پوزولان و ذرات درشت تر کلینکر می باشند.



جدول ۷- 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	هم‌زمان	۵	۰.۹۰	۲۵	۱۵	۵۵
۳۲۵۳	هم‌زمان	۱۰	۰.۸۵	۳۳	۲۵	۴۷
۳۲۵۴	هم‌زمان	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.



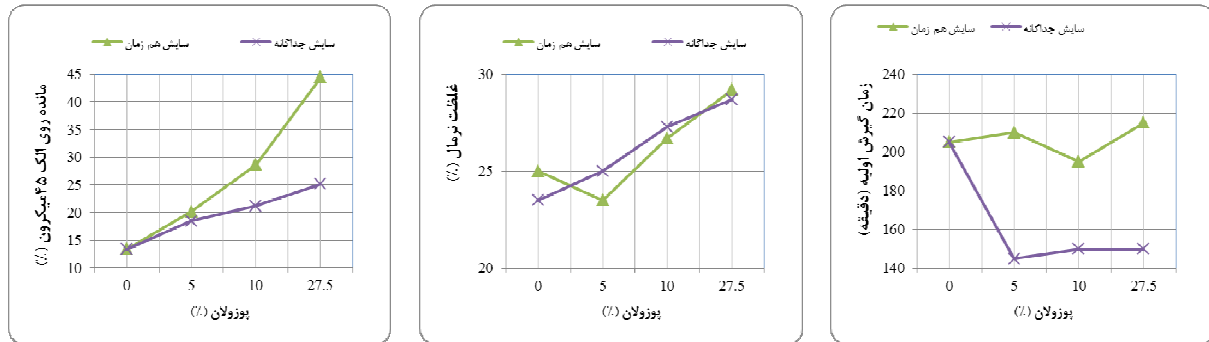
شکل ۷- مقایسه خلاصه نتایج دانه‌بندی لیزری نمونه‌های سیمان‌سازی آزمایشگاهی

جدول ۸ و نمودار شکل ۸ مشخصات فیزیکی ۷ نمونه 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.

جدول ۸- مشخصات فیزیکی نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

زمان گیرش (دقیقه)	غلظت	مانده روی الک (درصد)		مقاومت ملات استاندارد (kg/cm <sup>2</sup> )			بلین	کد نمونه	مقدار پوزولان (درصد)	روش سایش
		۳۲ میکرون	۴۵ میکرون	۹۰ میکرون	۲۸ روزه	۷ روزه				
۳۱۵	۲۵/۰	۱۳/۳	۲۳/۶	۲/۲	۴۹۰	۲۳۰	۲۹۸۵	۳۲۵۱	۰	*
۳۱۵	۲۳/۵	۲۰/۱	۳۱/۴	۱/۶	۵۳۴	۳۸۸	۳۰۷۶	۳۲۵۲	۵	هم‌زمان
۳۰۰	۲۶/۷	۲۸/۶	۳۷/۸	۴/۰	۳۹۹	۲۲۹	۲۸۱۰	۳۲۵۳	۱۰	هم‌زمان
۳۳۰	۲۹/۲	۴۴/۴	۵۰/۶	۱۳/۸	۲۲۴	۱۱۲	۲۹۵۱	۳۲۵۴	۲۷/۵	هم‌زمان
۲۲۵	۲۵/۰	۱۸/۴	۲۶/۵	۲/۱	۵۴۱	۳۲۹	۲۹۱۶	۳۲۷۴	۵	جداگانه
۲۳۵	۲۷/۳	۲۱/۲	۲۹/۵	۲/۸	۵۲۶	۳۲۰	۲۸۸۱	۳۲۷۵	۱۰	جداگانه
۲۴۰	۲۸/۷	۲۵/۱	۳۳/۸	۲/۲	۳۳۲	۱۶۹	۳۰۵۲	۳۲۷۶	۲۷/۵	جداگانه

جهت تبیین بهتر موضوع شکل ۸ نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر زمان گیرش، غلظت نرمال و مانده روی الک ۴۵ میکرون مقایسه شده‌اند.



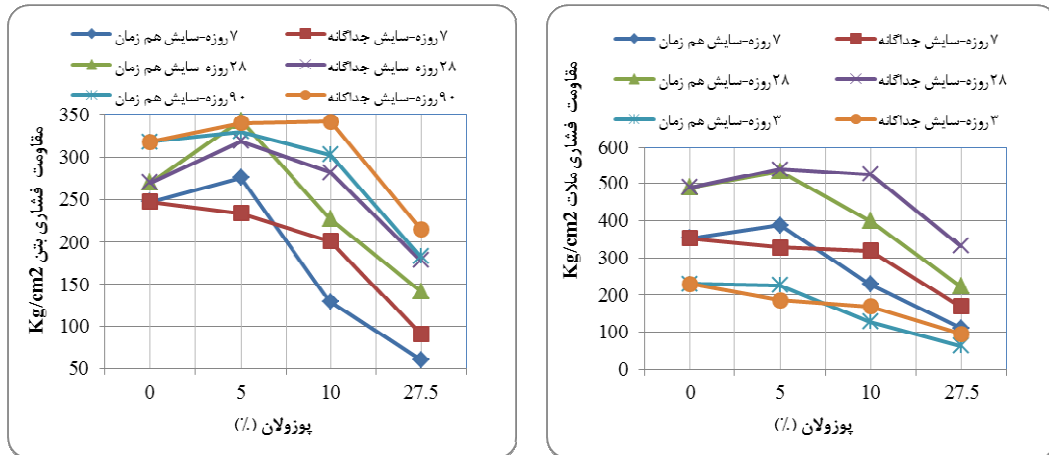
شکل ۸- مقایسه مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه

جدول ۹ خلاصه نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در این مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۹ نمودار کلیه آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری در ۷ مخلوط بتن آزمایشگاهی (۴۲ نمونه) را نشان می‌دهد.

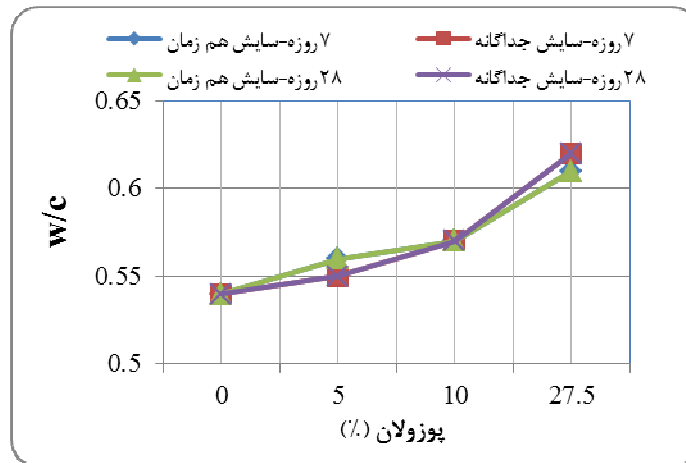
جدول ۹- خلاصه نتایج مخلوط‌های بتنی عملیات آزمایشگاهی

روش سایش	مقدار پوزلان (درصد)	کد نمونه	بتن تازه w/c (cm)	مقاومت بتن (kg/cm <sup>2</sup> )		
				۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
*	۰	۳۲۵۱	۰/۵۴	۲۴۷	۲۷۰	۳۱۸
هم‌زمان	۵	۳۲۵۲	۰/۵۶	۲۷۵	۳۴۳	۳۳۰
هم‌زمان	۱۰	۳۲۵۳	۰/۵۷	۱۲۹	۲۲۷	۳۰۳
هم‌زمان	۲۷/۵	۳۲۵۴	۰/۶۱	۶۱	۱۴۲	۱۸۳
جداگانه	۵	۳۲۷۴	۰/۵۴	۲۳۴	۳۱۹	۳۴۰
جداگانه	۱۰	۳۲۷۵	۰/۵۵	۲۰۱	۲۸۲	۳۴۲
جداگانه	۲۷/۵	۳۲۷۶	۰/۵۷	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 (۹۰ روزه) افزایش (برای سیمان‌های ۵درصد و ۱۰درصد به ترتیب ۶درصد و ۷درصد) یافت. البته در نمونه محتوی ۲۷/۵درصد پوزولان به علت افزایش نسبتاً زیاد نسبت W/C مقاومت ۹۰روزه نیز نسبت به نمونه شاهد کاهش (۴۸درصد و ۷۴درصد) داشت (شکل ۱۰). 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 نمونه‌های سایش جداگانه مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های هم رده خود در سایش هم‌زمان داشته‌اند.



شکل ۹- نتایج مقاومت فشاری آزمون‌های ملات استاندارد (سمت راست) و بتن (سمت چپ)



شکل ۱۰- نتایج نسبت w/c در مخلوط‌های بتنی مورد آزمایش

#### ۴. نتیجه‌گیری

۱. در مقادیر کم پوزولان (۵ درصد) سایش جداگانه یا هم‌زمان کلینکر و پوزولان تاثیر نامناسبی در مشخصات فنی سیمان و بتن نداشته بلکه باعث ۲۱-۱۵ درصد بهبود مقاومت ۲۸ روزه و ۶-۴ درصد بهبود مقاومت ۹۰ روزه بتن می‌شود.
۲. این بهبود مقاومت سیمان حاوی ۵ درصد پوزولان در مقاومت ملات منجر به بهبود ۹-۸ درصد مقاومت ۲۸ روزه می‌گردد؛
۳. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵ درصد) سایش جداگانه نسبت به روش سایش هم‌زمان موجب بهبود بیش از ۴۰ درصد (افزایش) مقاومت ملات و بتن ۲۸ روزه می‌شود؛
۴. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵ درصد) سایش جداگانه نسبت به روش سایش هم‌زمان باعث بهبود ۱۵ درصد (افزایش) -۳  $\Delta$  ۳۰ دانه‌بندی سیمان و کاهش کارپذیری بتن می‌گردد؛
۵. مصرف حدود ۵ درصد 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 ۴۲۳-۴۳۳.
- [۳] Klaartje De Weerd. (۲۰۰۷). "Separate grinding versus intergrinding". SINTEF Building and Infrastructure. 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 Properties". Prentice Hall, p۲۲.