

## کاهش دما و زمان پخت سیمان پرتلند از طریق کاربرد ضایعات صنعت فولاد در تولید سیمان

احسان محمدی،<sup>۱</sup> مهدی طاهری\*<sup>۲</sup>، مجید نزاکت<sup>۳</sup>، مرتضی ثابت

### چکیده:

در این پژوهش امکان کاهش دمای پخت سیمان پرتلند با حفظ خواص سیمان از طریق جایگزینی پوسته اکسیدی نورد گرم فولاد به جای سنگ آهن در ترکیب سیمان مورد بررسی قرار گرفت. دو نوع مخلوط اولیه با ۸۵ درصد مارل، ۴/۲۸ درصد سیلیس و ۱۵/۷۴ درصد کربنات کلسیم، یکی با ۱/۷۷ درصد سنگ آهن و دیگری با ۱/۴۸ درصد پوسته اکسیدی نورد تهیه شد. نمونه ها در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت پخت داده شد. کلینکر تولیدی تا دمای محیط سریع سرد شده و پس از اضافه کردن ۳ درصد سنگ گچ آسیاب گردید. مشخصه یابی ساختار سیمان تولیدی با استفاده از تکنیک پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. استحکام فشاری و استحکام خمشی سیمان بعد از ۲۸ و ۷،۳ روز تعیین شد. آنالیز فازی حاکی از حصول فازهای اصلی سه کلسیم سیلیکات، دو کلسیم سیلیکات، سه کلسیم آلومینات و چهار کلسیم آلومینوفریت در سیمان است. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع کلینکر سیمان بعد از پخت حاکی از کمتر بودن تخلخل و ریزتر بودن ذرات فازی در سیمان تولیدی با پوسته اکسیدی است. استحکام فشاری و استحکام خمشی سیمان تولیدی با پوسته اکسیدی به دلیل حصول فاز مذاب بیشتر در دمای پخت و تسهیل شرایط تشکیل فازهای آلیت و بلیت، به طور نسبی بهتر از سیمان تولیدی با سنگ آهن است. نتایج نشان می دهد که به دلیل خلوص بالاتر پوسته اکسیدی نسبت به سنگ آهن فاز مذاب در حین پخت در دماهای کمتر و در مدت زمان کمتر شکل می گیرد. این مسئله سبب می شود که ضمن حفظ خواص سیمان از جمله استحکام فشاری و استحکام خمشی، پخت سیمان در دماهای کمتر و زمان های کوتاه تر فراهم شود که منجر به کاهش مصرف انرژی در پخت سیمان در مقیاس صنعتی می گردد.

**کلمات کلیدی:** کاهش مصرف انرژی، سیمان پرتلند، پوسته اکسیدی نورد گرم، خواص مکانیکی

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، شرکت فن آوری پایامواد- شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد- دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد- پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

## مقدمه

سیمان پرتلند یکی از مهمترین مواد در مصالح ساختمانی است. سیمان پرتلند دارای گروه‌های مختلف تولیدی است که می‌توان به سیمان معمولی (تیپ ۱)، سیمان بهینه شده (تیپ ۲)، سیمان سریع سخت‌شونده<sup>۱</sup> (تیپ ۳)، سیمان با گرمای هیدراته‌شدن پایین<sup>۲</sup> (تیپ ۴) و سیمان ضد سولفات<sup>۳</sup> (تیپ ۵) اشاره کرد [۲ و ۱]. مواد اولیه مصرفی در تولید سیمان پرتلند شامل سنگ آهک یا برخی مواد حاوی آهک از جمله مارل<sup>۴</sup> و خاکرس است. برای کنترل و تنظیم ترکیب شیمیایی عموماً سیلیس و سنگ آهن نیز به مخلوط اضافه می‌شود. محدوده مناسب برای اکسیدهای موجود در مواد اولیه شامل ۶۲-۶۸ درصد  $CaO$ ، ۲۱-۲۴ درصد  $SiO_2$ ، ۴-۸ درصد  $Al_2O_3$  و ۲-۵ درصد  $Fe_2O_3$  است [۲]. در دمای پخت  $CaO$  با آلومین، اکسید آهن و سیلیس وارد واکنش شده و فازهای اصلی سیمان شامل سه کلسیم‌سیلیکات یا آلایت ( $3CaO.SiO_2$ )، دوکلسیم‌سیلیکات یا بلیت ( $2CaO.SiO_2$ )، سه کلسیم‌آلومینات یا سلیت ( $3CaO.Al_2O_3$ ) و تتراکلسیم‌آلومینوفریت ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ) بوجود می‌آیند. مینرال‌های فوق را به ترتیب به صورت  $C_3S$ ،  $C_2S$ ،  $C_3A$  و  $C_4AF$  نشان می‌دهند، که  $F = Fe_2O_3$  و  $S = SiO_2$ ،  $A = Al_2O_3$ ،  $C = CaO$  است (جدول ۱). در فرآیند پخت سیمان اکسید آهن نقش کمک ذوب را دارد و باعث ایجاد فاز مذاب ( $C_4AF$ ) و تسهیل در ایجاد فازهای اصلی سیمان می‌شود [۱۱ و ۳]. در ترکیب آب با سیمان سیلیکات‌ها و آلومینات‌های سیمان هیدراته شده و به تدریج سخت می‌شوند. از بین فازهای موجود در سیمان بعد از پخت فازهای سیلیکاتی شامل آلایت و بلیت بیشترین تاثیر را بر چسبندگی و استحکام سیمان بعد از هیدراته شدن دارند (شکل ۱). این دو فاز از نظر خواص مکانیکی و فیزیکی بعد از هیدراته شدن کاملاً مشابه هستند ولی فاز آلایت سریعتر هیدراته می‌شود [۴]. جهت حصول فازهای سیلیکاتی بویژه آلایت لازم است پخت در دمای بالاتر از ۱۲۵۰-۱۲۰۰ درجه سانتیگراد صورت گیرد. فازهای آلایت و بلیت از دمای حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد شروع به تشکیل می‌نمایند [۱۱ و ۳]. بعد از پخت و تولید کلینکر به منظور کنترل گیرش ۳-۵ درصد سنگ گچ اضافه شده و آسیاب می‌گردد تا سیمان پرتلند بدست آید [۵ و ۶]. پوسته‌های اکسیدی نورد گرم به عنوان یکی از محصولات جانبی صنعت فولاد، از جمله ضایعاتی است که به دلیل داشتن درصد بالایی از آهن به عنوان یک ماده اولیه مناسب جهت استفاده در صنایع دیگر مورد توجه قرار گرفته است [۷ و ۸]. در گذشته تلاشی جهت استفاده از ضایعات صنعت فولاد از جمله سرباره کوره بلند و کنورتور جهت تولید سیمان صورت گرفت [۲]. همچنین گزارشاتی در رابطه با موفقیت استفاده از سبوس برنج به عنوان یک ماده ارزان قیمت و غنی از سیلیس در

<sup>۱</sup> Rapid Hardening

<sup>۲</sup> Low Heat

<sup>۳</sup> Sulfate Resisting

<sup>۴</sup> Marl

تولید سیمان پرتلند و حصول فازهای اصلی سیمان در دمای حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد منتشر شده است [۴]. یکی از مسائل مهم در در ممیزی انرژی در صنعت سیمان کنترل مصرف انرژی در کوره دوار پخت سیمان است. در این پژوهش امکان کاهش دمای پخت سیمان با جایگزینی سنگ آهن در تولید سیمان پرتلند توسط پوسته‌های اکسیدی نورد گرم فولاد مورد بررسی قرار گرفت.

### فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه مصرفی جهت تولید سیمان شامل مارل، سنگ آهن، پوسته اکسیدی نورد گرم فولاد، سیلیس و کربنات کلسیم بود. کربنات کلسیم و سیلیس با خلوص بیش از ۹۸ درصد به کار رفت. آنالیز XRF مواد اولیه مصرفی در جدول ۲ بیان گردید. جهت تهیه یک فرمول مناسب برای تولید سیمان، آنالیز XRF مخلوط اولیه به کار رفته جهت تولید سیمان تیپ یک در کارخانه سیمان اصفهان تعیین شد. این سیمان پرمصرف‌ترین نوع سیمان و از نوع ساختمانی بود. از این آنالیز برای تهیه مخلوط اولیه نمونه‌های سیمان آزمایشگاهی استفاده شد (جدول ۳). با توجه به آنالیز مواد اولیه دو فرمول مناسب یکی با سنگ آهن (نمونه A) و دیگری با پوسته اکسیدی نورد (نمونه B) تهیه گردید. جدول ۴ درصد وزنی هر یک از مواد اولیه را در مخلوط تهیه شده جهت تولید دو سیمان آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با توجه به عدم امکان استفاده از کوره دوار، در این پژوهش برای توزیع یکنواخت اکسیدهای مختلف در مخلوط اولیه، هر مخلوط به مدت ۵ دقیقه آسیاب گردید. سپس به منظور افزایش سطح تماس بین ذرات مواد اولیه، مخلوط با پرس فشرده شد. با توجه به افزایش سطح تماس ذرات توسط پرس کردن که باعث انجام بهتر واکنش‌ها در ضمن پخت می‌گردد، نمونه‌ها در دمای حدود ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت پخت گردید و تا دمای محیط سریع سرد شد. تکنیک پراش پرتو ایکس (XRD) توسط دیفرآکتومتر Philips X Pert-MPD System برای شناسایی فازهای موجود در سیمان تولیدی به کار رفت. تیوب بکار رفته پرتو  $K_{\alpha}$  مس با طول موج ۱/۵۴۲ آنگستروم را تامین کرده و فیلتری از نیکل داشت. اندازه پله ۰/۰۵ درجه و زمان شمارش ۲/۵ ثانیه و زاویه پراش ( $2\theta$ ) از ۲۰ تا ۶۵ درجه انتخاب گردید. میکروسکوپ الکترونی روبشی (Philips XL30) برای مطالعه مورفولوژی ذرات فازهای موجود در کلینکر بعد از پخت و قبل از آسیاب کردن به کار رفت. به منظور کنترل گیرش سیمان، ۳ درصد سنگ گچ به کلینکر تولیدی اضافه شد و به مدت ۱۵ دقیقه آسیاب گردید تا هر دو کلینکر تولید شده به یک میزان خرد شوند و سیمان حاصل آید. استحکام فشاری<sup>۱</sup> سیمان

---

<sup>۱</sup> Compressive Strength

تولیدی براساس استاندارد ASTM C109-80 و استحکام خمشی<sup>۱</sup> نیز براساس استاندارد ASTM C348-80 تعیین شد [۱۰ و ۹].

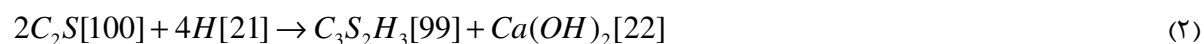
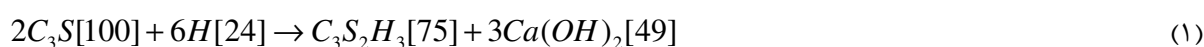
## نتایج و بحث

نتایج آنالیز XRD دو نمونه سیمان آزمایشگاهی ساخته شده با سنگ آهن و پوسته اکسیدی نورد به ترتیب در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده است. مشاهده شد که فازهای اصلی سیمان یعنی آلایت ( $C_3S$ )، بلیت ( $C_2S$ )، سه کلسیم آلومینات ( $C_3A$ ) و چهار کلسیم آلومینو فریت ( $C_4AF$ ) در هر دو نمونه تشکیل شده‌اند و الگوی پراش پرتو ایکس سیمان تولیدی توسط پوسته با سیمان تولیدی توسط سنگ آهن انطباق خوبی دارد. جهت بررسی اثر پوسته اکسیدی در مقایسه با سنگ آهن در شکل گیری فازهای آلایت و بلیت در سیمان که نقش اصلی را در استحکام سیمان بعد از هیدراته شدن دارا هستند [۴]، پیک‌های اصلی هر فاز تعیین و شدت آنها مقایسه شد. شکل ۴ مقایسه شدت پیک‌های صفحات کریستالی اصلی فاز آلایت در نمونه تولیدی با سنگ آهن و پوسته اکسیدی را نشان می‌دهد. ملاحظه شد که شدت صفحات کریستالی اصلی فاز آلایت در نمونه تولیدی با پوسته بیشتر از سنگ آهن است. این رفتار در مینرال‌های بلیت نیز به چشم می‌خورد (شکل ۵). اشکال ۶ و ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع کلینکر بعد از پخت و قبل از آسیاب کردن را نشان می‌دهند. در نمونه تولیدی توسط پوسته، توزیع اندازه دانه‌ها یکنواخت‌تر و دانه‌ها ریزتر بوده و نسبت به نمونه‌های تولیدی توسط سنگ آهن تخلخل کمتر است. کربنات کلسیم در ضمن حرارت‌دهی در کوره به آهک و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌شود [۱۱]. آزاد شدن گاز در این واکنش باعث ایجاد تخلخل و کاهش فشردگی نمونه بعد از پخت و آسیاب شدن بهتر آن می‌گردد [۱۱ و ۴]. با توجه به مقادیر یکسان کربنات کلسیم و آزاد شدن مقادیر یکسان گاز در دو نمونه، انتظار می‌رفت که میزان تخلخل در دو نمونه یکسان باشد. ولی در نمونه B میزان تخلخل کمتری نسبت به نمونه A مشاهده شد که می‌تواند دلیلی بر تشکیل فاز مذاب بیشتر در دمای پخت نمونه B نسبت به نمونه A باشد. در فرآیند پخت و تولید کلینکر، اکسید آهن نقش کمک ذوب را بر عهده دارد و ایجاد فاز  $C_4AF$  به صورت مذاب در دمای پخت باعث تسهیل در انجام واکنش‌های حالت جامد و تشکیل فازهای اصلی سیمان می‌شود [۱۱ و ۳]. علیرغم اینکه در نمونه B مقدار پوسته ۱/۴۸ درصد و در نمونه A میزان سنگ آهن ۱/۷۷ درصد است (رجوع به جدول ۴)، از نظر تشکیل فاز مذاب پوسته‌های اکسیدی نورد به دلیل خلوص بالاتر بهتر از سنگ آهن که دارای ناخالصی بیشتری است، عمل می‌کنند. به نظر می‌رسد تشکیل فاز مذاب بیشتر در دمای پخت نمونه B به دلیل کمک به انجام واکنش‌های حالت جامد در دمای پخت سیمان، باعث تسهیل در تشکیل فازهای آلایت و بلیت در سیمان شده است. بالاتر بودن شدت

---

<sup>۱</sup> Flexural Strength

نسبی پیک‌های XRD مربوط به فاز آلیت و بلیت در نمونه B نسبت به نمونه A (اشکال ۵ و ۴) نیز می‌تواند ناشی از این امر باشد. در الگوی پراش پرتو ایکس دو نمونه (اشکال ۳ و ۲) شدت کم پیک‌های مربوط به فاز  $C_4AF$  نشان می‌دهد که این فاز عمدتاً به صورت آمورف در ساختار سیمان حضور دارد. به نظر می‌رسد مذاب بودن فاز مذکور در دمای پخت و سرد شدن سریع تا دمای محیط بعد از پخت، باعث انجماد این فاز به صورت عمدتاً آمورف شده است [۱۱]. در جداول ۵ و ۶ به ترتیب استحکام فشاری و استحکام خمشی نمونه‌های سیمان تولیدی ذکر گردید. واکنش فازهای  $C_3S$  و  $C_2S$  که نقش اساسی را در استحکام بخشی سیمان در ضمن هیدراته شدن بر عهده دارند بر طبق روابط ۱ و ۲ صورت می‌پذیرد [۱۲]:



اعداد داخل کروشه نماینده وزن ترکیبات فوق است. در هر دو سیلیکات تقریباً به یک میزان آب برای فعل‌و‌انفعال نیاز است. واکنش  $C_3A$  با آب سریعتر از سیلیکات‌ها بوده و گیرش بسیار سریع دارد و با اضافه کردن گچ کنترل می‌شود [۱۲]. نتایج نشان داد که استحکام فشاری و خمشی در نمونه B به طور نسبی از نمونه A بیشتر است. این تمایز بعد از هیدراته شدن در ۷ و ۳ روز قابل توجه است. بعد از ۲۸ روز هیدراته شدن تمایز استحکام فشاری و استحکام خمشی در دو سیمان به حداقل رسید. گیرش و استقامت اولیه ملات سیمان ناشی از حضور فاز آلیت در آن است. فاز بلیت آهسته‌تر هیدراته می‌شود (عمدتاً بعد از یک هفته)، ولی نقش عمده ای را در استحکام نهایی سیمان دارد [۱۲]. وجود ذرات فازی ریزتر در نمونه B باعث هیدراته شدن سریعتر فاز آلیت و بلیت در زمانهای کوتاه‌تر نسبت به نمونه A می‌گردد. بنابراین در ۳، ۷ و ۲۸ روز، هیدراته شدن سریعتر به همراه مقادیر بیشتر فاز آلیت و بلیت در نمونه B باعث حصول استحکام فشاری بیشتر گردید. با توجه به نتایج آزمون XRF ترکیب پوسته اکسیدی مورد دارای مقادیر کمتر آهک ( $CaO$ ) و منیزیا ( $MgO$ ) نسبت به سنگ آهن است (جدول ۲). از وجود آهک آزاد به دلیل خطر شکفته شدن در کلینکر پودر، باید اجتناب شود [۱۱]. مقدار آهک موجود در مواد خام نباید بیشتر از آن مقداری باشد که برای ترکیب با سیلیس، آلومین و اکسید آهن لازم است. مقدار آهک موجود در مواد خام باید به نحوی کنترل گردد که به طور کامل در ضمن پخت وارد واکنش‌های تشکیل فازهای اصلی سیمان شود و خطر حضور آهک آزاد در کلینکر وجود نداشته باشد [۱۱]. لذا به نظر می‌رسد استفاده از پوسته اکسیدی با داشتن آهک بسیار اندک (حدود ۰/۲۵ میزان آهک در سنگ آهن) ارجحیت دارد. اکسید منیزیم با اکسیدهای اسیدی موجود در سیمان ترکیب نمی‌شود و به صورت منیزیای آزاد در محصول نهایی سیمان باقی می‌ماند. مشابه آهک، شکفته شدن منیزیا نیز با افزایش حجم همراه است. در صورتی که منیزیا به مقدار زیاد در سیمان وجود داشته باشد خطر انبساط تأخیری وجود خواهد داشت. انبساط حجمی مربوط به منیزیا خطرناک‌تر از انبساط حجمی آهک آزاد است. زیرا سرعت گسترش انبساط آن بسیار کند است و اولین علائم انبساط آن ممکن

است پس از چند سال ظاهر شود [۱۱ و ۱۲]. عوارض ناشی از تأخیر در انبساط را نمی‌توان با آزمایش‌های کوتاه‌مدت تشخیص داد. به نظر می‌رسد استفاده از پوسته اکسیدی با داشتن منیزیای کمتر نسبت به سنگ آهن (حدود ۰/۱ میزان منیزیا در سنگ آهن) باعث کاهش میزان منیزیا در سیمان می‌شود. بر طبق استاندارد سیمان پرتلند حداکثر وجود ۵ درصد منیزیا در ترکیب سیمان مجاز است [۶].

### نتیجه گیری

- ۱- پوسته اکسیدی به دلیل خلوص بالاتر نسبت به سنگ آهن که دارای ناخالصی بیشتر است، شرایط تشکیل فاز مذاب در دمای پخت سیمان را در دمای کمتر و زمان کوتاه‌تر تسهیل کرد. به نظر می‌رسد این امر کمک به انجام کاملتر و سریعتر واکنش‌های حالت جامدی می‌نماید که باعث تشکیل آلایت و بلیت به عنوان فازهای اصلی استحکام‌دهنده سیمان در دمای پخت می‌گردند. با بهینه‌کردن ترکیب سیمان در این روش امکان کاهش چشمگیر در مصرف انرژی در تولید سیمان فراهم می‌شود.
- ۲- به نظر می‌رسد که وجود درصد کمتر منیزیا و آهک در ترکیب پوسته‌های اکسیدی نسبت به سنگ آهن می‌تواند باعث کاهش خطر انبساط تأخیری و کاهش خطر شکسته‌شدن آهک در سیمان تولید شده با پوسته اکسیدی گردد.
- ۳- استحکام فشاری و خمشی سیمان تولیدی با پوسته اکسیدی از سیمان تولیدی با سنگ آهن بالاتر است. بعد از ۳ و ۷ روز هیدراته شدن، تفاوت در استحکام فشاری و خمشی سیمان تولیدی با پوسته اکسیدی نسبت به سیمان تولیدی با سنگ آهن بیشتر بود ولی بعد از ۲۸ روز این تمایز به حداقل رسید.

### مراجع

1. K.M.Mehta, "Concrete: Structure, Properties and Materials", 1986, New Jersey Prentice Hall.
2. A.Monshi, M.K.Asgarani, "Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone", Cement and Concrete Research, Vol.29, 1999, PP.1373-1377.
3. A.Komar, "Building Materials and Components", 1987, Moscow, MIR publishers.
4. A.Rodrigues, "Low temperature synthesis of cement from rice hull ash", cement and Concrete Research, Vol.33, 2003, PP.1525-1529.
5. A.M.Neville, J.J.Brooks, "Concrete Technology", 1987, United Kingdom, longman Scientific & Technical Publishers.
6. Annual Book of ASTM Standards, "Standard specification for portland cement", C 150-84, Vol.04.01., pp.113-119, 1997.
7. www.oit.doe.gov
8. G. Garnaoud, R.A.Rapp, "Thickness of the oxide layers formed during the oxidation of iron", Oxidation of Metals, Vol.11, 1977, PP.193-198.

9. Annual Book of ASTM Standards, "Compressive strength of hydraulic cement mortars", C 109-80, Vol.04.01., pp.78-83, 1997.

10. Annual Book of ASTM Standards, "Flexural strength of hydraulic cement mortars", C 348-80, Vol.04.01., pp.263-270, 1997.

۱۱- شیمی فیزیک سیمان، ولف گانگ چرنیین، مترجم: عزیزان.م، ۱۳۷۰، چاپ آشنا، صفحه ۶۶-۲۷.

۱۲- تکنولوژی بتن، نویل، مترجمان: رمضانپور.ع، شاه نظری.م، ۱۳۸۴، انتشارات علم و صنعت، صفحه ۲۰-۳۲.

### اشکال، نمودارها و جداول

جدول ۱- فازهای اصلی تشکیل دهنده سیمان پرتلند و درصد وزنی اکسیدهای تشکیل دهنده آنها

$CaO$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	
۷۳/۷	۲۶/۳	-	-	سه کلسیم سیلیکات
۶۵/۱	۳۴/۹	-	-	دو کلسیم سیلیکات
۶۲/۳	-	۳۷/۷	-	سه کلسیم آلومینات
۴۶/۱	-	۲۱	۳۲/۹	چهار کلسیم آلومینوفريت

جدول ۲- آنالیز XRF مواد اولیه مصرفی جهت تولید سیمان (درصد وزنی)

$Fe_2O_3$	$CaO$	$K_2O$	$SO_3$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$MgO$	$Na_2O$	
۳/۳۱	۶۵/۴۶	۰/۸۸	۰/۱۵	۲۰/۵	۶/۷۸	۲/۴۹	۰/۴	مارل
۸۴/۷۴	۵/۸۸	-	-	۶/۲۸	-	۳/۱	-	سنگ آهن
۷۰/۶۴ (آهن کل)	۱/۳۵	-	-	۰/۹۷	۰/۳	۰/۲۹	-	پوسته

جدول ۳- آنالیز XRF سیمان تیپ ۱ کارخانه سیمان اصفهان قبل از پخت (درصد وزنی)

$Fe_2O_3$	$CaO$	$K_2O$	$SO_3$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$MgO$	$Na_2O$
۴/۳۱	۶۴/۴۶	۰/۸۴	۰/۳۳	۲۱/۶۷	۵/۸	۲/۲	۰/۳۹

جدول ۴- ترکیب مخلوط اولیه دو نوع سیمان تولیدی قبل از پخت (درصد وزنی)

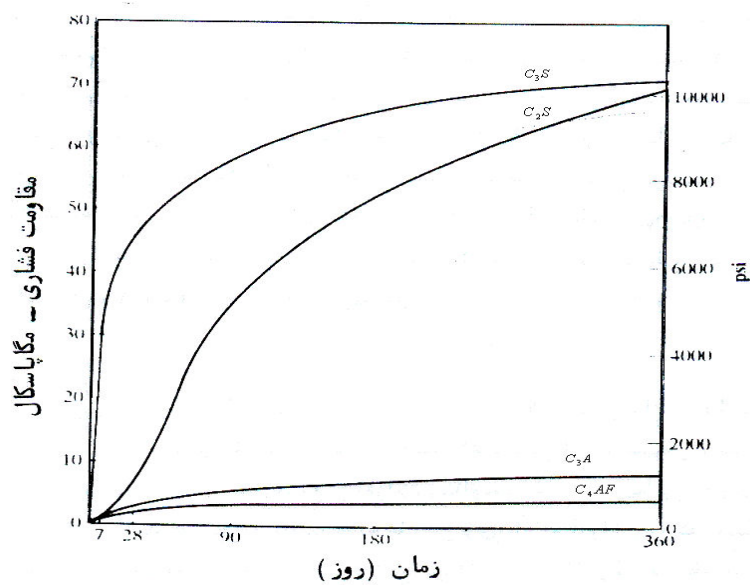
کربنات کلسیم	سیلیس	پوسته اکسیدی	سنگ آهن	مارل	
۱۵/۷۴	۴/۲۸	-	۱/۷۷	۸۵	نمونه A
۱۵/۷۴	۴/۲۸	۱/۴۸	-	۸۵	نمونه B

جدول ۵- استحکام فشاری (MPa.) - ASTM C109-80

۲۸ روز	۷ روز	۳ روز	
۲۶/۱	۱۴/۷	۹	نمونه A
۲۶/۲	۱۶	۹/۷	نمونه B

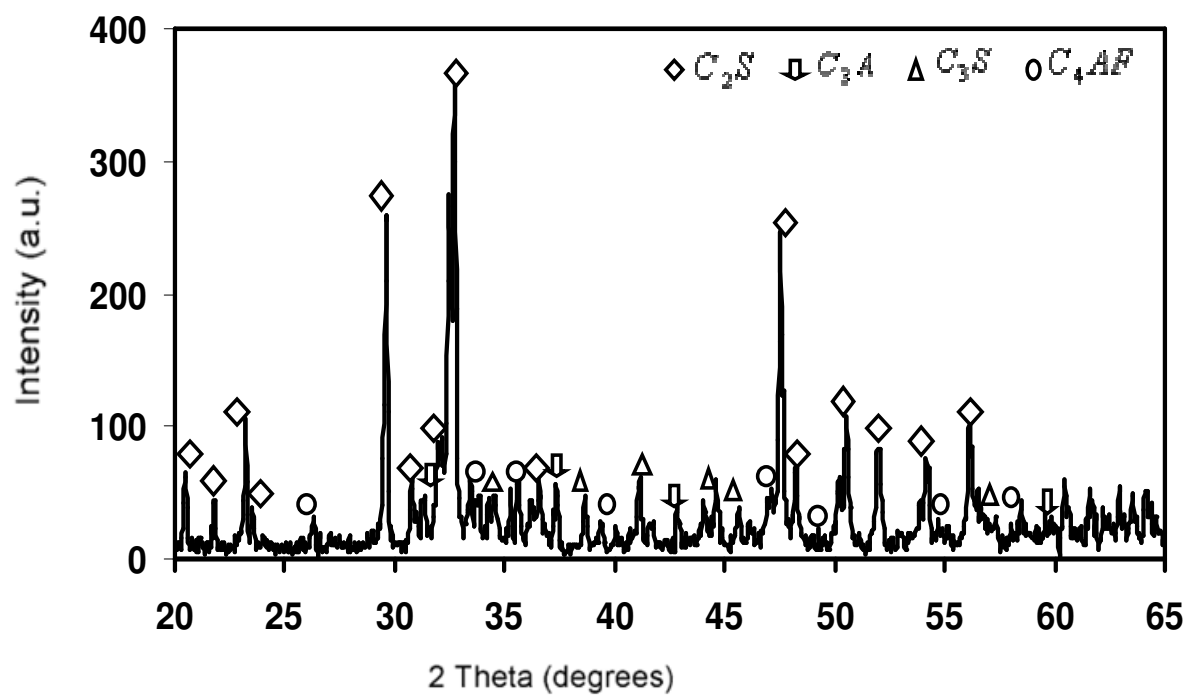
جدول ۶- استحکام خمشی (MPa.) - ASTM C348-80

۲۸ روز	۷ روز	۳ روز	
۴/۲	۲	۱/۷	نمونه A
۴/۳	۲/۴	۱/۹	نمونه B

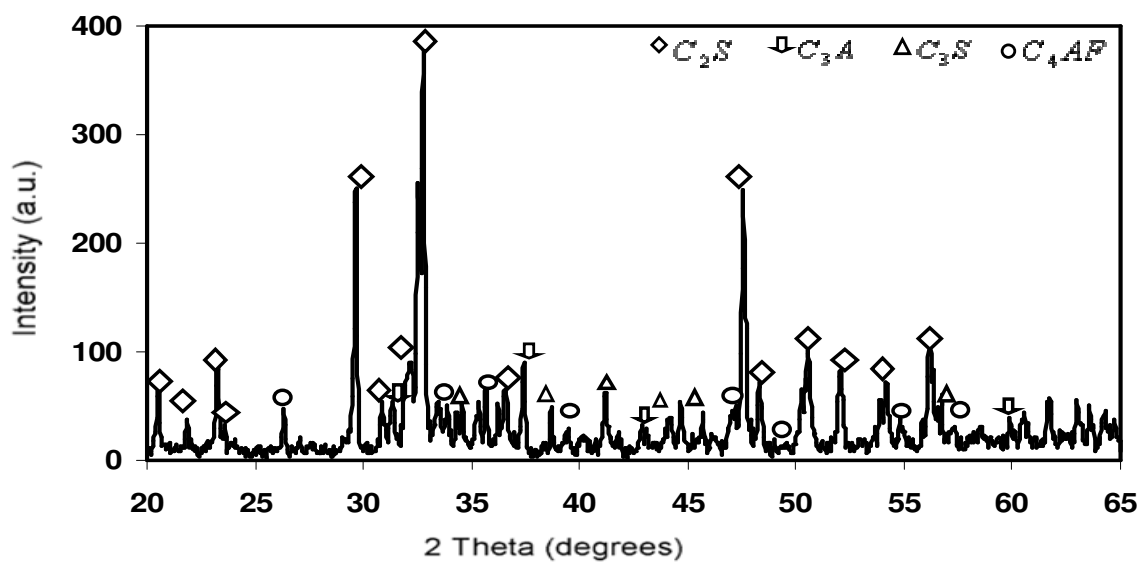


شکل ۱- افزایش مقاومت ترکیبات خالص سیمان به تنهایی [۱۲].

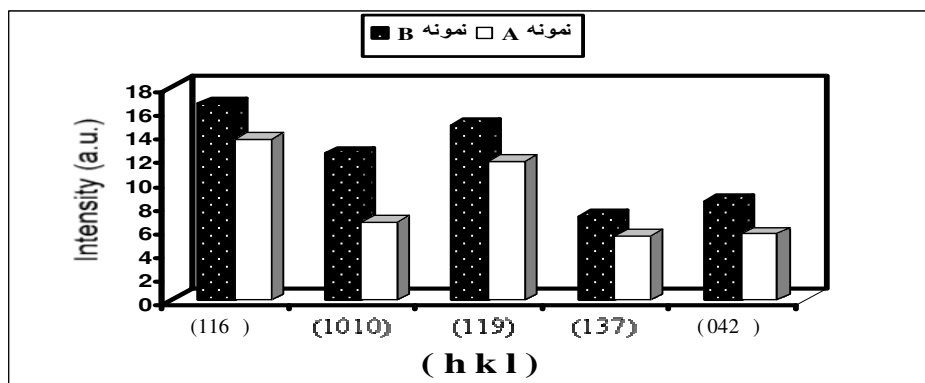




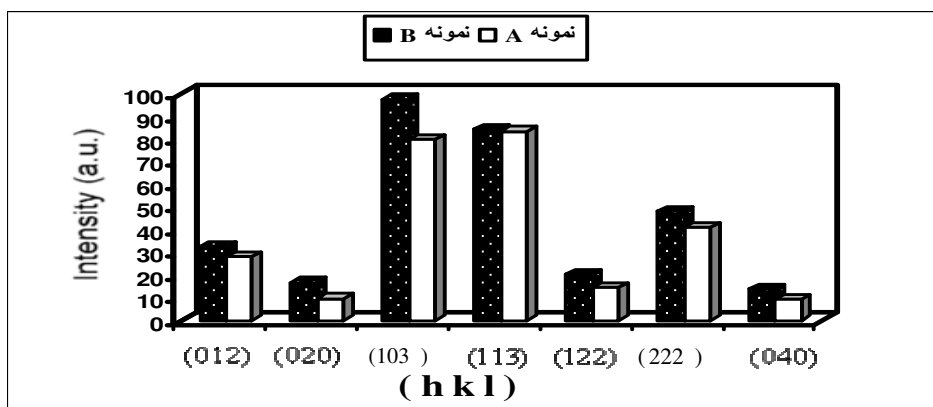
شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس سیمان تولیدی با سنگ آهن (نمونه A)



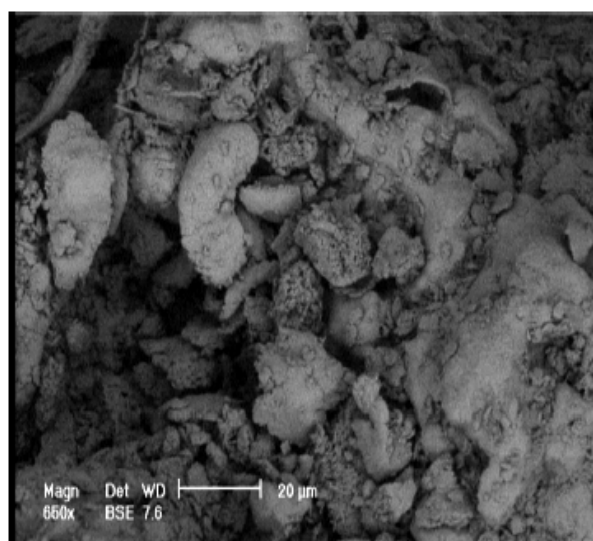
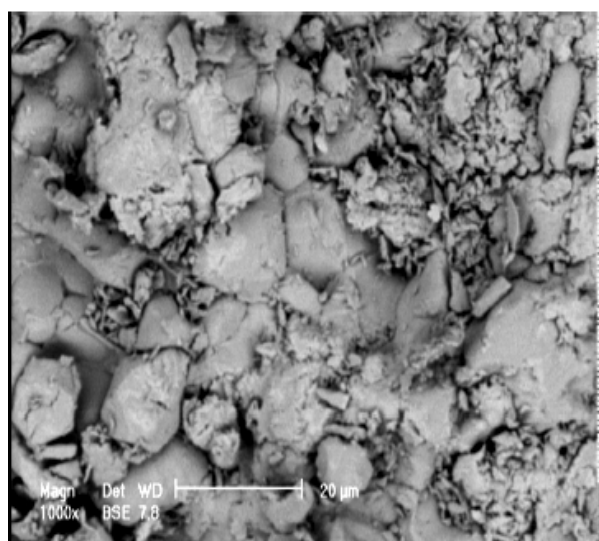
شکل ۳- الگوی پراش پرتو ایکس سیمان تولیدی با پسته اکسیدی نورد گرم (نمونه B)



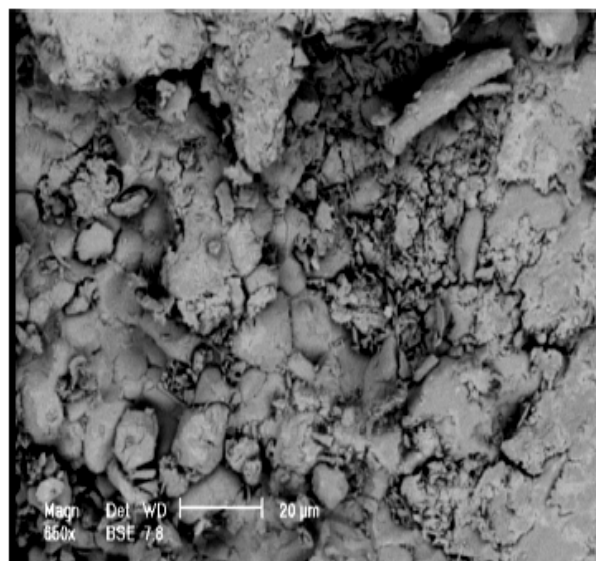
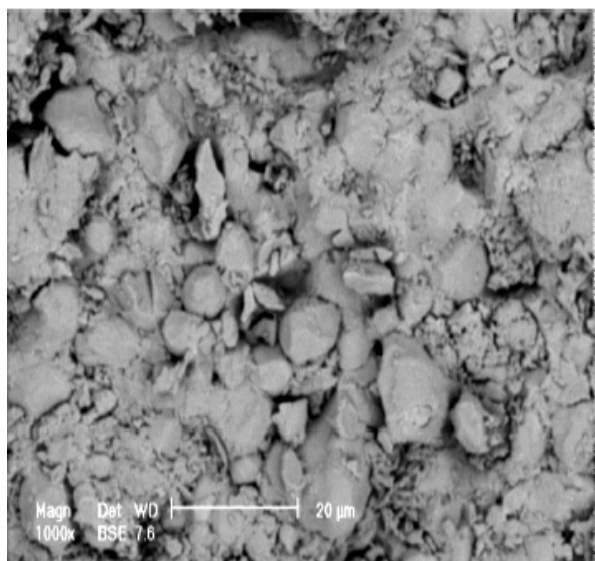
شکل ۴- مقایسه شدت صفحات کریستالی اصلی در الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) فاز آلایت ( $3CaO.SiO_2$ )



شکل ۵- مقایسه شدت صفحات کریستالی اصلی در الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) فاز بلیت ( $2CaO.SiO_2$ )



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الکترون برگشتی (BSE) از مقطع کلینکر سیمان با سنگ آهن (نمونه A)



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الکترون برگشتی (BSE) از مقطع کلینکر سیمان با پوسته اکسیدی (نمونه B)