

## مطالعه سیالیت پودرهای قالب ریخته‌گری مداوم فولاد با سرعت بالا با استفاده از آنالیز

### میکروسکوپ حرارتی

احمدرضا عارف پور<sup>۱\*</sup>، احمد منشی<sup>۲</sup> و حمیدرضا ربیعی<sup>۳</sup>

#### چکیده

هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر سیالیت پودرهای قالب ریخته‌گری مداوم فولاد با سرعت بالا در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از آنالیز میکروسکوپ حرارتی و تغییر در ترکیب شیمیایی آنها می‌باشد. بدین منظور از دستگاه میکروسکوپ حرارتی جهت مقایسه سیالیت پودرهای تولیدی با پودر قالب صنعتی استفاده گردید. نتایج آنالیز نشان داد که، یک نمونه مشابه سازی شده پودر قالب صنعتی با استفاده از فلورین و چهار نمونه کم فلورین با استفاده از ترکیب‌هایی نظیر اکسید آهن، اکسید روی، کربنات سدیم و اکسید تیتانیوم حاصل گردید که دارای سیالیت مشابهی با پودر قالب صنعتی بودند که این ترکیب‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای پودر قالب مورد استفاده در صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد با سرعت بالا باشند.

واژه‌های کلیدی: پودر قالب، سیالیت، میکروسکوپ حرارتی.

<sup>۱</sup> - کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> - استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

<sup>۳</sup> - کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

\*- نویسنده مسئول مقاله: Arefpour.a@gmail.com

## پیشگفتار

پودرهای قالب نقش اساسی در پایداری فرآیند ریخته‌گری مداوم فولاد و کیفیت نهایی محصول ایفا می‌نمایند [۱ و ۲]. این پودرها در سال ۱۹۶۸ به صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد معرفی شدند. از وظایف عمده پودرهای قالب می‌توان به حفاظت فلز مذاب از اکسیداسیون، جلوگیری از اتلاف حرارت، روانسازی (سیالیت)، جذب آخال‌های مضر، کنترل انتقال حرارت بین پوسته و قالب از راه پوسته منجمد شده و کاهش شدت نشانه‌های نوسانی اشاره نمود [۳-۵]. پودرهای قالب ریخته‌گری مداوم فولاد از اکسیدهایی نظیر اکسیدهای سیلیسیم، کلسیم، عناصر قلیایی و قلیایی خاکی با مقادیر کم فلئوریدها و کربن تشکیل شده‌اند [۶-۸]. از میان ترکیب‌های تشکیل دهنده پودرهای قالب، فلئور نقش مهمی را ایفا می‌نماید [۹]. فلئور در ترکیب شیمیایی پودر قالب از راه ترکیباتی نظیر فلورین ( $\text{CaF}_2$ ) و کریولیت ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) به پودر قالب افزوده می‌شود که باعث ایجاد سیالیت مناسب، کنترل دمای کریستالیزاسیون پودرهای قالب و کنترل انتقال حرارت افقی بین پوسته فولادی منجمد شده و قالب مسی آبگرد از راه رسوب کریستال‌های فاز کاسپیدین ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaF}_2$ ) می‌گردد. [۹-۱۲]. از طرفی، انتشار مواد سمی از پودرهای حاوی فلئور در آب‌های سرد کننده و آثار مخرب آن بر محیط زیست سبب شد تا جایگزین ساختن فلئور با سایر ترکیب‌های غیر مضر یکی از موضوع‌های مورد توجه در سال‌های اخیر باشد [۱۳ و ۱۴]. انتشار ترکیب‌های سمی حاوی فلئور نظیر گازهای  $\text{NaF}$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{HF}$  و... یکی از بزرگترین معضله‌های محیط زیست بوده است. زیرا این ترکیب‌ها با انحلال در آب‌های سرد کننده و اسیدی نمودن آنها، سبب فرسایش و خوردگی تجهیزات واحد صنعتی مسموم نمودن آب و خاک و به دنبال آن به مخاطره افکندن ایمنی و سلامت در محیط می‌شوند [۱۵ و ۱۶]. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر سیالیت بر روی پودرهای قالب ریخته‌گری مداوم فولاد با استفاده از تغییر در ترکیب شیمیایی آنها می‌باشد. بدین منظور از فلورین ( $\text{CaF}_2$ ) برای ساختن پودری مشابه با پودر قالب صنعتی و از ترکیباتی نظیر اکسید آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )، اکسیدهای تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ ) و

روی ( $\text{ZnO}$ ) و کربنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) جهت ساخت نمونه‌های کم‌فلئور نسبت به پودر قالب صنعتی استفاده گردید. هم‌چنین بمنظور بررسی اثر سیالیت پودرهای تولیدی از آنالیز میکروسکوپ حرارتی استفاده شد.

## مواد و روش پژوهش

### آماده سازی نمونه‌ها

مجموع فولاد مبارکه اصفهان از پودر قالبی در صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد استفاده می‌نماید، که ترکیب شیمیایی آن بر اساس درصد وزنی مطابق با جدول ۱ می‌باشد. در این پژوهش، این پودر را به عنوان پودر قالب صنعتی انتخاب نموده و سیالیت آن با نمونه‌های پودری آزمایشگاهی با استفاده از آنالیز میکروسکوپ حرارتی مقایسه گردید. جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از ترکیباتی نظیر سیلیس ( $\text{SiO}_2$ )، اکسید منیزیم ( $\text{MgO}$ )، اکسید منگنز ( $\text{MnO}$ )، کربنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )، اکسید آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )، اکسید روی ( $\text{ZnO}$ )، اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ )، فلورین ( $\text{CaF}_2$ ) و کلینکر سیمان پرتلند استفاده شد. ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند مطابق با جدول ۲ می‌باشد. در این پژوهش نمونه‌های آماده شده باید بدون ناخالصی مضر سولفات باشند. بدین منظور از کلینکر سیمان پرتلند که بدون ناخالصی‌های مضر سولفات است در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده گردید. بر اساس ترکیب شیمیایی پودر قالب صنعتی (جدول ۱)، بازسیته آن ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.94$ ) و ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند (جدول ۲)، ۵ نمونه ۵۰ گرمی که ترکیب شیمیایی آن بر اساس گرم مطابق با جدول ۳ می‌باشد، تهیه گردید. هم‌چنین ترکیب شیمیایی نمونه‌های آزمایشگاهی براساس درصد وزنی مطابق با جدول ۴ است. شایان ذکر است که ترکیب شیمیایی نمونه‌های آماده شده بدون در نظر گرفتن اتلاف حرارتی محاسبه شده است. بمنظور همگن نمودن مواد مینرالی در هر نمونه از اتانول ۹۶٪ خلوص و آسیاب گلوله‌ای استفاده شد. بدین صورت که همراه با هر نمونه ۵۰ گرمی اتانول به داخل محفظه‌های آسیاب گلوله‌ای ریخته شد. اتانول مطابق با وزن هر نمونه پودری بود. در ادامه نمونه‌ها در داخل آسیاب گلوله‌ای به مدت زمان ۵

محدوده دمایی  $600-1070^{\circ}\text{C}$  افزایش جزیی حجم را نشان داده است که ناشی از فعل و انفعالات مواد اولیه نظیر انبساط حرارتی و خروج گازهای دی‌اکسیدکربن و منواکسیدکربن بوده است. در محدوده دمایی  $1140^{\circ}\text{C}$  -  $1070$  سیالیت این نمونه کمتر از پودر قالب صنعتی در همین محدوده دمایی شده است. در محدوده دمایی  $1140-1160^{\circ}\text{C}$  سیالیت نمونه ۱ نسبت به پودر قالب صنعتی افزایش یافته و مشابه پودر قالب صنعتی شده است. با توجه به این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که نمونه ۱ نسبت به پودر قالب صنعتی دارای سیالیت مشابهی بوده است. به عبارت دیگر، در ترکیب شیمیایی نمونه ۱، حدود ۴ درصد وزنی فلئور (۸ گرم فلورین) استفاده شده است که با توجه به مقایسه سیالیت نمونه ۱ با پودر قالب صنعتی می‌توان نتیجه گرفت که ادعای مشابه سازی پودر قالب صنعتی صحیح بوده است. گراف زینترینگ نمونه ۲ (شکل ۳) در محدوده دمایی  $600-1110^{\circ}\text{C}$  افزایش حجم جزیی به دلیل خروج گازهای تشکیل شده نظیر دی‌اکسیدکربن و منواکسید کربن حاصل از واکنش را نشان داده است. در محدوده دمایی  $1140-1110^{\circ}\text{C}$  افزایش شدید سیالیت پودر با شیب تند را نشان داده است. در نهایت در دمای حدود  $1140^{\circ}\text{C}$  نمونه ذوب گردیده است. در ترکیب شیمیایی نمونه ۲ از ۳ گرم اکسید آهن مازاد بر اکسید آهن موجود در ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند استفاده شده است. اکسید آهن یک اکسید زود ذوب می‌باشد و به نظر می‌رسد افزایش آن در ترکیب شیمیایی نمونه ۲ باعث کاهش دمای ذوب این نمونه گردیده است. با توجه به  $10^{\circ}\text{C}$  اختلاف بین دمای ذوب نمونه ۲ و پودر قالب صنعتی، به نظر می‌رسد که این نمونه سیالیت قابل مقایسه‌ای با پودر قالب صنعتی حاصل نموده است. گراف زینترینگ نمونه ۳ (شکل ۴) در محدوده دمایی  $600-1140^{\circ}\text{C}$  افزایش حجم جزیی به دلیل خروج گازهای تشکیل شده حاصل از واکنش نظیر گازهای دی‌اکسیدکربن و منواکسیدکربن را نشان داده است. در محدوده دمایی  $1140-1170^{\circ}\text{C}$  در این نمونه، افزایش شدید سیالیت با شیب تند مشاهده شده است. به نظر می‌رسد که نمونه ۳ در محدوده دمایی  $1140-1170^{\circ}\text{C}$  ذوب گردیده است، که با دمای ذوب

دقیقه و با سرعت  $600\text{Rpm}$  مخلوط گردید. سپس جهت خشک نمودن پودرها و تبخیر اتانول، نمونه‌های پودری به مدت زمان حدود ۳ ساعت در داخل خشک کن درجه دمایی قرار داده شد. بعد از خشک شدن پودرها، سیالیت نمونه‌های پودری با پودر قالب صنعتی با استفاده از آنالیز میکروسکوپ حرارتی مقایسه گردید.

### آنالیز میکروسکوپ حرارتی

نمونه‌های پودری در داخل دستگاهی به نام میکروسکوپ حرارتی قرار داده شد و آنالیز انجام گردید. با استفاده از آنالیز میکروسکوپ حرارتی نموداری به دست می‌آید، که نمودار زینترینگ نام دارد. این نمودار شامل دو محور عمودی و افقی می‌باشد. محور افقی نشان دهنده دما است و محور عمودی برحسب درصد می‌باشد و بیشینه‌ی  $105\%$  را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، محور عمودی نشان دهنده ارتفاع اولیه نمودار است که دستگاه آن را در ابتدای کار که نمونه هنوز ذوب نشده است،  $100\%$  برآورد نموده است که با افزایش دما به تدریج ارتفاع کاهش می‌یابد. در واقع دو محور نشان می‌دهند که با توجه به فرمولاسیون در هر دما چند درصد از نمونه‌ها را فاز مذاب تشکیل داده است. شیب نمودار نشان دهنده سیالیت نمونه است، هرچه شیب تندتر باشد، در آن محدوده دمایی، سیالیت بیش تر بوده است.

### نتایج و بحث

گراف زینترینگ پودر قالب صنعتی (شکل ۱) که از آنالیز میکروسکوپ حرارتی به دست آمد، به نظر می‌رسد در محدوده دمایی  $600-1070^{\circ}\text{C}$  در این نمونه مقدار جزیی افزایش حجم مشاهده شده است که می‌تواند ناشی از انبساط حرارتی گازها باشد. در این محدوده دمایی هنوز فاز مذابی تشکیل نشده است. در محدوده دمایی  $1070-1130^{\circ}\text{C}$  سیالیت پودر ثابت مانده و نشانگر این موضوع است که در این محدوده دمایی ثبات و پایداری سیالیت وجود دارد. در محدوده دمایی  $1130-1150^{\circ}\text{C}$  سیالیت پودر افزایش یافته تا در نهایت در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  کل پودر ذوب گردیده است. گراف زینترینگ نمونه ۱ (شکل ۲) به نظر می‌رسد که در

در این نمونه، از ۶ گرم اکسید تیتانیوم در ترکیب شیمیایی استفاده شده است. به نظر می‌رسد، افزودن اکسید تیتانیوم تا مقادیر حدود ۶ درصد وزنی (حدود ۶ گرم) به ترکیب شیمیایی پودر قالب باعث افزایش سیالیت پودر قالب می‌گردد. اما افزودن اکسید تیتانیوم در مقادیر بالاتر از ۶ درصد وزنی باعث کاهش سیالیت پودر قالب می‌گردد. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از اکسید تیتانیوم تا مقادیر حدود ۶ درصد وزنی در ترکیب شیمیایی پودر قالب ریخته‌گری مداوم فولاد عملکردی مشابه فلورین در ایجاد سیالیت مناسب پودر قالب دارد و باعث روانکاری مطلوب و ایجاد شرایط بهینه ریخته‌گری مداوم خواهد شد.

### نتیجه‌گیری

- ۱- با استفاده از ۴ درصد وزنی فلورین پودری مشابه با پودر قالب صنعتی ساخته شد که دارای سیالیت مشابه با سیالیت پودر قالب صنعتی بود. به عبارت دیگر در نمونه مشابه سازی شده، فلورین نقش روانکاری مطلوب را ایفا نموده و باعث ایجاد شرایط بهینه ریخته‌گری مداوم فولاد خواهد شد.
- ۲- با استفاده از اکسید آهن یک نمونه کم فلورین از پودر قالب حاصل گردید. اکسید آهن یک ترکیب غیر سمی و زود ذوب است که می‌تواند جایگزین فلورین در ترکیب شیمیایی پودر قالب گردد.
- ۳- با استفاده از کربنات سدیم یک نمونه از پودرهای قالب کم فلورین حاصل گردید. کربنات سدیم یک ترکیب روانساز است که می‌تواند در کنار فلورین، باعث ایجاد سیالیت مناسب پودر قالب شود.
- ۴- اکسید تیتانیوم در ترکیب شیمیایی پودر قالب عملکردی نظیر فلورین دارد که می‌تواند باعث ایجاد سیالیت مناسب پودر قالب گردد. به عبارت دیگر با استفاده از اکسید تیتانیوم در مقادیر حدود ۶ درصد وزنی یک نمونه کم فلورین حاصل گردید که این نمونه می‌تواند جایگزین مناسبی برای پودر قالب صنعتی مورد استفاده در صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد با سرعت بالا باشد.

پودر قالب صنعتی به‌گونه‌ی تقریبی مشابهت دارد. در این نمونه از یک گرم اکسید روی (ZnO) استفاده شده است. اگرچه در این نمونه از مقدار فلورین کاسته شده و به جای آن از اکسید روی استفاده شده است، اما به نظر می‌رسد که نقش اصلی در ایجاد سیالیت مناسب این نمونه و مشابهت آن با سیالیت پودر قالب صنعتی را فلورین ایفا می‌نماید. البته این مسئله فعلاً به صورت یک فرضیه است و برای تحقق یافتن آن بایستی تحقیقات بیش‌تری نسبت به اکسید روی و جایگزینی آن به جای فلورین در ترکیب شیمیایی پودر قالب انجام شود. گراف زینترینگ نمونه ۴ (شکل ۵) در محدوده دمایی  $1100-600^{\circ}\text{C}$  افزایش حجم جزئی ناشی از خروج گازهای حاصل از واکنش (گازهای دی‌اکسید کربن و منواکسید کربن) را نشان داده است. در محدوده دمایی  $1180-1100^{\circ}\text{C}$  افزایش شدید سیالیت با شیب تند در این نمونه مشاهده شده است. محدوده دمایی  $1150-1100^{\circ}\text{C}$ ، دمای ذوب نمونه است که نزدیک به دمای ذوب پودر قالب صنعتی ( $1150^{\circ}\text{C}$ ) می‌باشد. به نظر می‌رسد که در کل نمونه ۴ دارای سیالیت مشابهی نسبت به پودر قالب صنعتی بوده است. در ترکیب شیمیایی نمونه ۴ از ۱ گرم کربنات سدیم مازاد بر کربنات سدیم موجود در ترکیب شیمیایی نمونه ۴ استفاده شده است. کربنات سدیم یک ترکیب روانساز است و در کنار فلورین باعث افزایش سیالیت پودر قالب و ایجاد روانکاری مطلوب می‌گردد. گراف زینترینگ نمونه ۵ (شکل ۶) در محدوده دمایی  $1100-600^{\circ}\text{C}$  افزایش حجم جزئی را نشان داده است. به نظر می‌رسد این افزایش حجم به خاطر خروج انبساط حرارتی گازها باشد. در محدوده دمایی  $1160-1100^{\circ}\text{C}$  سیالیت با یک مقدار ثابت و کمتر از مقدار سیالیت در این محدوده دمایی نسبت به پودر قالب صنعتی می‌باشد. به عبارت دیگر، این نمونه در این محدوده دمایی ویسکوزتر از پودر قالب صنعتی شده است. در محدوده دمایی  $1210-1160^{\circ}\text{C}$  سیالیت این نمونه افزایش یافته که البته سیالیت این نمونه کمی از سیالیت پودر قالب صنعتی بیش‌تر شده است، اما تفاوت زیادی در کار نیست. این نمونه، نمونه ایده‌آلی به لحاظ سیالیت مناسب برای جایگزین نمودن پودر قالب صنعتی مورد استفاده در صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد می‌باشد.

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO-CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub> Systems", ISIJ International, Vol. 46, No. 3, pp. 368-374, 2006.
10. A. Kondratiev, P.C. Hayes and E. Jak, "Development of a Quasi-chemical Viscosity Model for Fully Liquid Slags in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO-MgO-SiO<sub>2</sub> System. Part 3. Summary of the Model Predictions for the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> System and Its Sub-systems", ISIJ International, Vol. 46, No. 3, pp. 375-384, 2006.
  11. R. Carli and C. Righi, "Mould flux crystallization : A kinetic study", 7<sup>th</sup> International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, pp. 821-826, Japan 2004.
  12. M. Susa, K.C. Mills, M.J. Richardson, R. Taylor and D. Stewart, "Thermal properties of slag films taken from continuous casting mould", Ironmaking and Steelmaking, Vol. 21, No. 4, pp. 279-286, 1994.
  13. K.C. Mills, L. Courtney, A.B. Fox, B. Harris, Z. Idoyaga and M.J. Richardson, "The use of thermal analysis in the determination of the crystalline fraction of slag", Thermochimica Acta, Vol. 391, pp. 175-184, 2002.
  14. S. Itoyama, H. Kitaoka, T. Skuraya, S. K. Orimachi, S. Morivaki, S. Yamada, C. Tada, T. Mitumune, S. Kaneko, and M. Maeda, "Mold Powder for Continuous Casting", United States Patent, No. 535645, 1994.
  15. M. Kawamoto, M. Hanao, S. Kumakura, Y. Tanizawa, "Mold Powder for Continuous Casting and Method of Continuous Casting using This Powder", European Patent, No. EP0899041, 1999.
  16. W. En-fa, Y. Yin-dong, F. Chang-lin, I.D. Sommerville, and A. McLean, "Effect of carbon properties on melting Behavior of mold fluxes for continuous casting of steels", Journal of Iron and Steel Research International, Vol. 13, No. 2, pp. 22-26, 2006.
- ۱۷- الهام / رحیمی، ا. منشی، ر. عمادی، «بررسی اثر اندازه کاربید سیلیسیم در تولید جرم ریختنی نسوز خیلی کم سیمان برای صنایع فولاد، مجله مواد نوین، سال ۱، شماره ۲، ص ۲۸-۲۹، زمستان ۱۳۸۹.
- ### References
1. K.C. Mills, S. Sridhar, A.S. Normanton and S.T. Mallaband, "Mould flux behavior in continuous casting", The Brimacombe Memorial Symposium, pp. 781-794, Canada 2000.
  2. P.V. Riboud, Y. Roux, L.D. Lucas and H. Gaye, "Improvement of Continuous Casting Powders", Fachber. Huttenprax. Metallweiterverarb., Vol. 19, p. 859, 1981.
  3. G. Urbain, F. Cambier, M. Deletter and M.R. Anseau, "Viscosity of Silicate Melts", Transaction and Journal of British Ceramics Society, Vol. 80, p. 139, 1981.
  4. E.T. Turkdogan, "Physicochemical Properties of Molten Slags and Glasses", The Metals Society, p. 11, 1983.
  5. S. Seetgraman, D. Sichen and F.Z. Ji, "Estimation of Viscosities of Ternary Silicate Melts using the Excess Gibbs Energy of Mixing", Metallurgical and Materials Transaction B, Vol. 31B, p. 105, 2000.
  6. L. Zhang and S. Jahanshahi, "Review and Modeling of Viscosity of Silicate Melts: Part I. Viscosity of Binary and Ternary Silicates Containing CaO, MgO and MnO", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 29B, issue.1, p. 177, 1998.
  7. L. Zhang and S. Jahanshahi, "Review and Modeling of Viscosity of Silicate Melts: Part II. Viscosity of Melts Containing Iron Oxide in the CaO-MgO-MnO-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> System", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 29B, issue.1, p.187, 1998.
  8. A. Kondratiev, P.C. Hayes and E. Jak, "Development of a Quasi-chemical Viscosity Model for Fully Liquid Slags in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO-MgO-SiO<sub>2</sub> System. Part 1. Description of the Model and Its Application to the MgO, MgO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO and CaO-MgO Sub-systems", ISIJ International, Vol. 46, No. 3, pp.359-367, 2006.
  9. A. Kondratiev, P.C. Hayes and E. Jak, "Development of a Quasi-chemical Viscosity Model for Fully Liquid Slags in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO-MgO-SiO<sub>2</sub> System. Part 2. A Review of the Experimental Data and the Model Predictions for the

**پیوست‌ها**

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر قالب صنعتی مورد استفاده در ریخته‌گری مداوم فولاد با سرعت بالا بر اساس درصد وزنی.

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
LOI	۱۵-۱۸
C <sub>(total)</sub>	۷-۹
C <sub>(free)</sub>	۴/۵-۶/۵
SiO <sub>2</sub>	۲۸-۲۹/۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱-۲/۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳-۵
CaO	۲۶-۲۸
MgO	۵-۶
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	۶-۸
MnO	۴-۶
F <sup>-</sup>	۳-۴
S	<۰/۳
H <sub>2</sub> O (120 °C)	<۰/۸

جدول ۲- ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند براساس درصد وزنی.

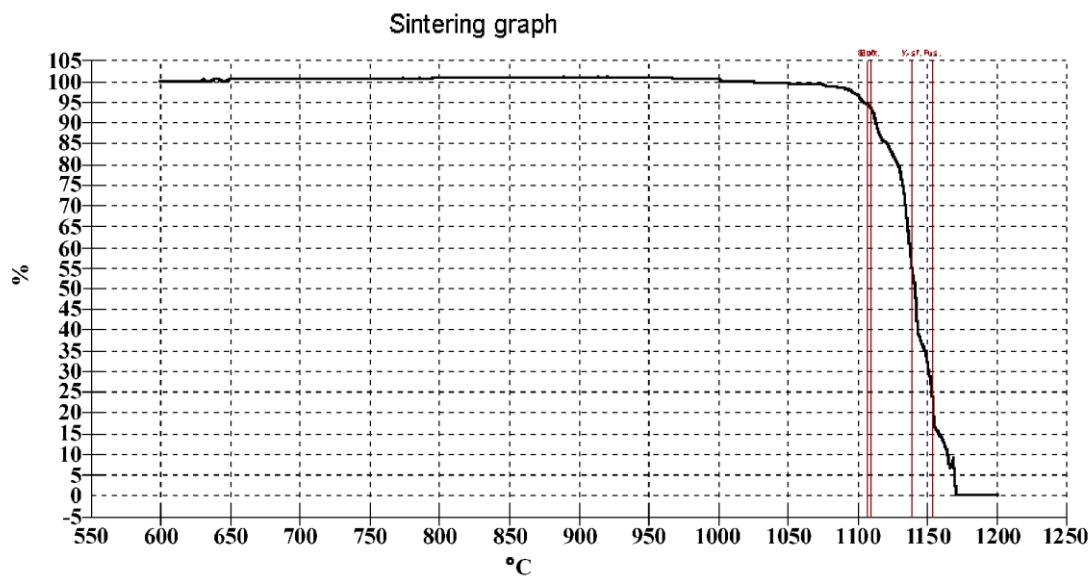
ترکیب شیمیایی	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
درصد وزنی	۲۱/۷۸	۵/۴۱	۳/۱۴	۶۴/۳۲	۱/۸۹	۰/۷۳	۰/۲۸	۰/۰۱

جدول ۳- ترکیب شیمیایی نمونه‌های آزمایشگاهی براساس ساخت ۵۰ گرم پودر.

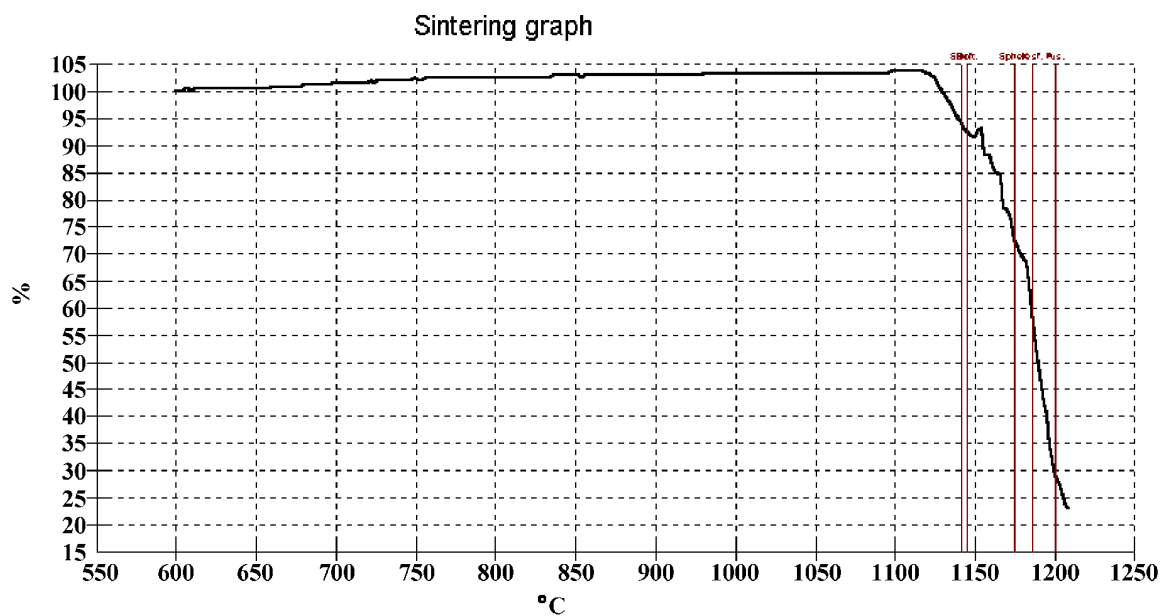
	۱	۲	۳	۴	۵
کلینکر سیمان پرتلند	۲۲/۸۲	۲۲/۸۲	۲۲/۸۲	۲۲/۸۲	۲۲/۸۲
SiO <sub>2</sub>	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴
MnO	۲/۹۷	۲/۹۷	۲/۹۷	۲/۹۷	۲/۹۷
MgO	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶	۲/۳۶
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۷/۲۶	۷/۲۶	۷/۸	۷/۸	۷/۲۶
CaF <sub>2</sub>	۴	۳/۰۸	۳/۱۸	۳/۱۸	۲/۰۵
TiO <sub>2</sub>					۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		۱/۵			
ZnO			۰/۷	۰/۷	

جدول ۴- ترکیب شیمیایی نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس درصد وزنی.

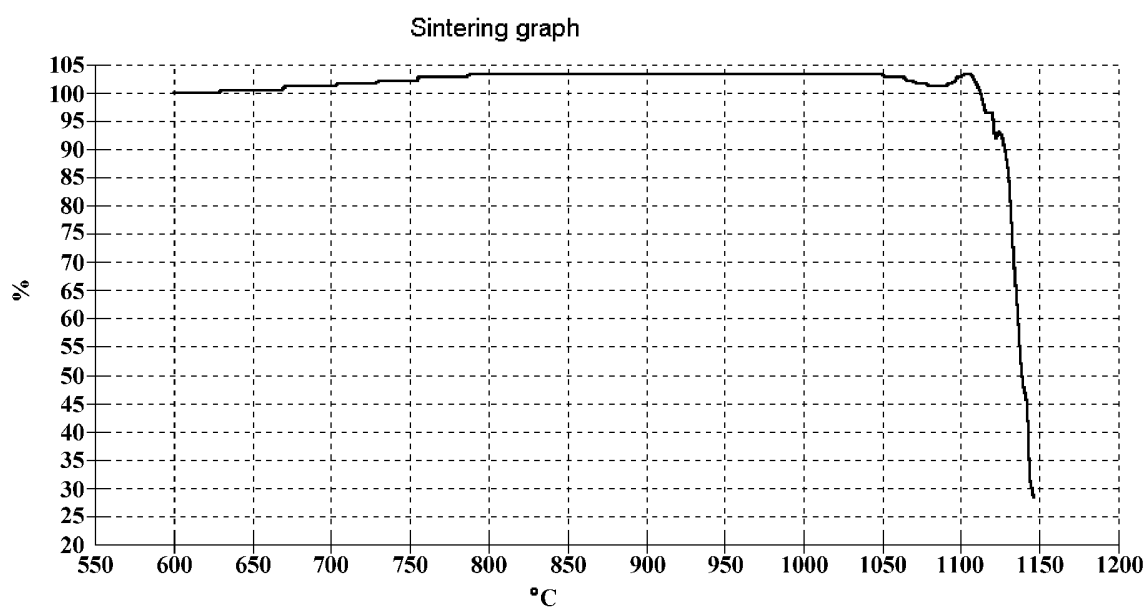
	۱	۲	۳	۴	۵
CaO	۳۶/۵۲	۳۴/۸۱	۳۵/۵۴	۳۵/۶۵	۳۳/۱۱
SiO <sub>2</sub>	۳۲/۳۶	۳۲/۱۸	۳۲/۸۶	۳۲/۹۶	۳۲/۰۱
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۴۸	۴/۵۶	۱/۵	۱/۵۱	۱/۴۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۵۶	۲/۵۴	۲/۶	۲/۶۱	۲/۵۳
MnO	۶/۱۶	۶/۱۳	۶/۲۶	۶/۲۸	۶/۱
MgO	۵/۷۸	۵/۷۵	۵/۸۷	۵/۸۹	۵/۷۲
Na <sub>2</sub> O	۸/۹۴	۸/۸۹	۹/۰۸	۹/۷۲	۸/۸۲
K <sub>2</sub> O	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۴
F	۴	۳/۰۹	۳/۱۶	۳/۱۷	۲/۰۵
TiO <sub>2</sub>					۶/۱۵
ZnO			۱/۰۵		
S	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴
C	۱/۷	۱/۶۹	۱/۷۲	۱/۶۸	۱/۶۸



شکل ۱- کراف زینتیرینک پودر فالب صنعتی

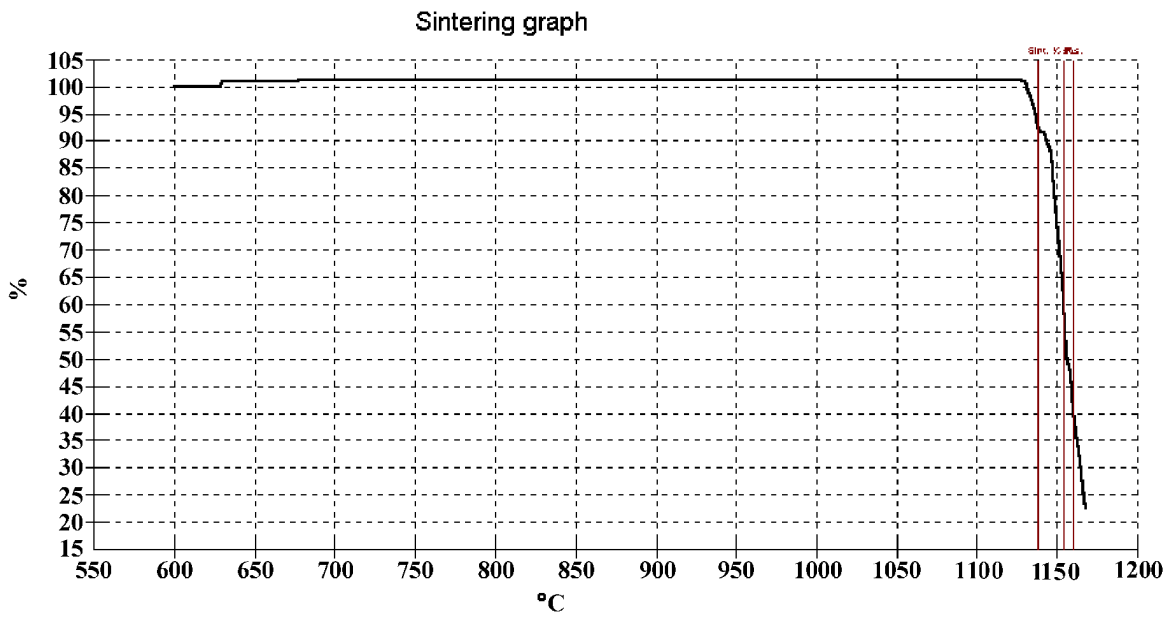


شکل ۲- گراف زینترینگ نمونه ۱

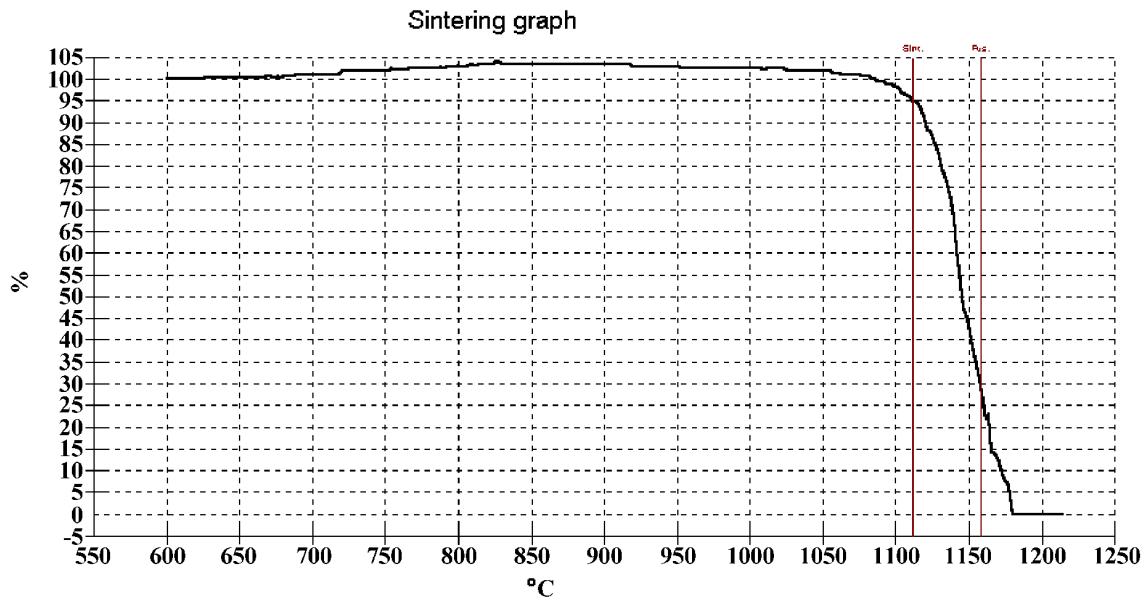


شکل ۳- گراف زینترینگ نمونه ۲

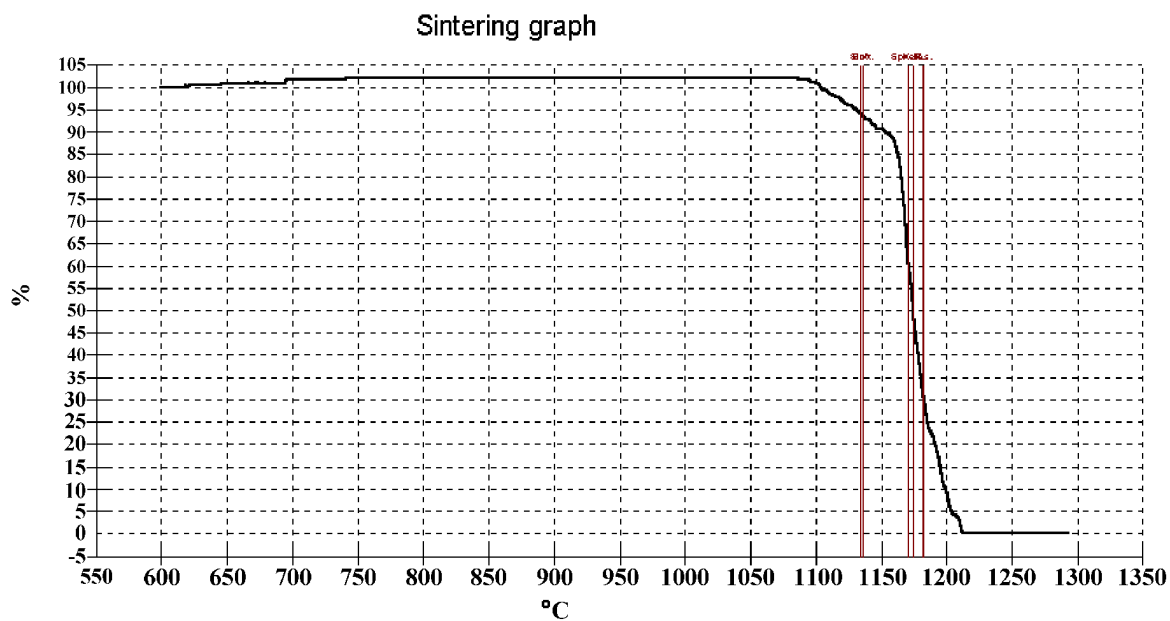




شکل ۴- گراف زینترینگ نمونه ۳.



شکل ۵- گراف زینترینگ نمونه ۴.



شکل ۶- گراف زینترینگ نمونه ۵.