

## بررسی اثر اندازه دانه کاربید سیلیسیم در تولید جرم ریختنی نسوز خیلی کم سیمان برای صنایع فولاد

الهام رحیمی<sup>۱\*</sup>، احمد منشی<sup>۲</sup> و رحمت الله عمادی<sup>۳</sup>

در این پژوهش، تولید جرم ریختنی نسوز خیلی کم سیمان شامل کاربید سیلیسیم و آلومینا برای صنایع آهن و فولاد مورد بررسی قرار گرفت. تلفیق بوکسیت با سیمان سکار ۷۱، منیزیت کلسینه، هگزا متافسفات سدیم، میکرو سیلیس، آلومینای کلسینه و آلومینایی راکتیو همراه با کاربید سیلیسیم در اندازه‌های گوناگون از ۱۶ تا ۱۲۰۰ مش صورت گرفت و آزمایش‌های استحکام سرد و دانسیته نشان داد که در دانه بندی ۴۶ مش کاربید سیلیسیم بهترین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی را ارائه می‌دهد که همراه با آزمایش فاز شناسی پراش پرتو ایکس مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. از آن جایی که جرم‌های دیرگداز حاوی مقادیر بیش‌تر کاربید سیلیسیم، از مقاومتی بالاتر در برابر سرباره و فلز برخوردارند و هم‌چنین، گازهای دی اکسید کربن و منو اکسید کربن تولید شده از اکسید اسیون کاربید سیلیسیم از حرکت فازهای با نقطه ذوب پایین به درون تخلخل‌های دیرگداز جلوگیری کرده و سبب بهبود ویژگی‌های شیمیایی جرم‌های ریختنی می‌شوند، به همین دلیل تاثیر میزان بهینه‌ی ذرات کاربید سیلیسیم بر جرم ریختنی مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های استحکام سرد و دانسیته نشان دادند که در دانه بندی ۴۶ مش کاربید سیلیسیم میزان بهینه‌ی ذرات کاربید سیلیسیم ۱۵ درصد وزنی است و بهترین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی را ارائه می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** جرم ریختنی نسوز، کاربید سیلیسیم، آلومینا، بوکسیت، سیمان سکار ۷۱.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- استاد دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان.

\*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: e.rahimi@ma.iut.ac.ir

## پیشگفتار

کاربرد جرمهای دیرگداز امروزه در صنایع گوناگون از جمله صنایع فولاد که نیاز به استفاده از موادی با مقاومت در شرایط گوناگون در فرایندهای فولادسازی دارند، به شدت گسترش یافته است. از سوی دیگر، جرمهای ریختنی متداول به دلایل گوناگونی مانند استحکام کم، دیرگدازی پایین و سایر مشکلات مربوط به استفاده از سیمان در آنها برای چنین کاربردهایی چندان مناسب نبوده و در سالهای اخیر دسته نوبنی از این جرمها با عنوان جرمهای کم سیمان مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. توسعهی دیرگدازهای کم سیمان<sup>۱</sup> (LCC) و بسیار کم سیمان<sup>۲</sup> (ULCC) در دهه‌های ۸۰ میلادی با جایگزینی بخشی از سیمان با ذرات ریز ( $1-100 \mu\text{m}$ ) و خیلی ریز ( $< 1 \mu\text{m}$ ) همانند میکرو سیلیس و آلومینای فعال شده آغاز شد [۲]. وجود میکرو سیلیس و آلومینای فعال شده<sup>۳</sup> [۳] به عنوان مواد اولیهی ریز دانه در ترکیب شیمیایی دیر گدازهای کم سیمان باعث تشکیل فاز مولایت در دمای بالای ۱۳۰۰ درجهی سانتی گراد به جای فازهای با نقطه ذوب پایین، همچون آنورتیت ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ ) و ژلنیت ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO}$ )، در جرمهای پر سیمان شده و سبب افزایش استحکام گرم می‌شود [۴، ۵]. کاربید سیلیسیم چهارمین مادهی سخت جهان پس از الماس است. این ماده بخشی از سرامیک‌های غیر اکسیدی است و با توجه به ویژگی‌های این نوع مواد به گونه‌ی عام و کاربید سیلیسیم به گونه‌ی خاص، کاربرد آن در صنایع به گونه‌ای رو افزون افزایش یافته است. به طور معمول، از SiC برای افزایش رسانایی حرارتی و کاهش ضریب انبساط حرارتی و در نتیجه، افزایش مقاومت به شوک حرارتی دیرگدازهای ریختنی آلومینایی استفاده می‌شود. این ویژگی‌ها و مقاومت به سایش بسیار خوب SiC، جرمهای ریختنی  $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$  را برای کاربرد در کوره‌ها مطرح کرده است. بنابر این، در جرمهای دیرگداز کم سیمان تلفیق اجزای سازنده سبب ایجاد واکنش‌های

فیزیکی و شیمیایی گوناگون می‌شود که در زمان نصب و محل کاربرد آنها به وقوع می‌پیوندد و طراحی فرمولاسیون مناسب برای این جرمها باید با توجه به این واکنش‌ها صورت گیرد [۵].

## روش پژوهش

### مواد اولیهی مصرفی

در این پژوهش بمنظور بررسی اثر متقابل مواد مورد استفاده در جرمهای خیلی کم سیمان از مواد اولیه ای که عمدتاً در این جرمها بکار می‌روند، استفاده شد که عبارتند از: بوکسیت چینی (Bauxite) با دانه بندی mm (۱-۳ و ۳-۵)، آلومین کلسینه با خلوص بالای تولیدی Alcoa با دانه بندی ( $0-0.5 \text{mm}$ )، منیزیت کلسینه تولیدی نسوز کشور در بیرجند با خلوص ۹۲ درصد با دانه بندی ( $0-0.5 \text{mm}$ )، کاربید سیلیسیم با مش‌های (۱۶، ۲۴، ۳۶، ۴۶، ۸۰، ۱۲۰، ۲۲۰، ۳۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰) محصول کشور چین، میکروسیلیس ایرانی به صورت میکرونیزه محصول فرعی فروسیلیس ازنا و سیمان نسوز سکار ۷۱ تولیدی لافارژ با دانه بندی ( $0-0.5 \text{mm}$ ) استفاده شد.

### انتخاب دانه بندی مناسب

بمنظور بررسی دانه بندی مواد اولیه و توزیع اندازهی ذرات بر خواص جرمهای ریختنی خیلی کم سیمان معادلات متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، بر اساس مدل آندریازن به دلیل عملی تر بودن انتخاب شد که به صورت زیر است:

$$\text{CPFT} = 100 * (\text{d}/\text{D})^n (1)$$

که در آن d: اندازهی ذرات، D: بیشینهی اندازهی ذرات، n: ضریب توزیع، CPFT: درصد انباشتگی ذرات کوچک‌تر از اندازهی d می‌باشد.

جرمهای دیر گداز ریختنی، شامل پودرهای ریز، اگرگیت و آب باشد، ویژگی‌های جرمها به عواملی از قبیل میزان آب، دما، میزان روان‌ساز و توزیع دانه بندی بستگی دارد. در این جرمهای ریختنی، اگر تنها دانه بندی گیت‌ها تغییر یافت، ولی درصد بقیه‌ی مواد از قبیل میکروسیلیس، منیزیت کلسینه، سیمان و کاربید سیلیسیم

<sup>۱</sup> - Low Cement Castable

<sup>۲</sup> - Ultra Low Cement Castable

<sup>۳</sup> - Reactive Alumina

حجمی برابر، در محدوده‌ی دانه بندی mm (۰-۱) قرار گرفته است و بنظر می‌رسد که تغییرات اندازه‌ی دانه در محدوده‌ی (۰-۱mm) و شکل نا کروی ذرات کاربرد سیلیسیم بر مقدار تراکم بدنه‌ی دیر گذار تاثیر گذار بوده است.

### اثر اندازه‌ی دانه SiC

نتایج مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها (شکل ۵ و ۴) نشان می‌دهند که با کاهش اندازه‌ی ذرات تا مش ۴۶ سبب افزایش استحکام و دانسیته و کاهش تخلخل می‌شود و دوباره با کاهش اندازه‌ی ذرات تا مش ۱۲۰۰ سبب کاهش استحکام و دانسیته و افزایش تخلخل می‌شود و این نتیجه حاصل می‌شود که اندازه‌ی ذره‌ی مش ۴۶ که برابر با  $355 \mu\text{m}$  است، تخلخل ظاهری نمونه‌ها کاهش یافته بود؛ در نتیجه، استحکام و اتصال بین اجزای تشکیل دهنده‌ی نمونه افزایش یافته است و بهترین تراکم را ایجاد کرده است. دلیل این امر این است که اگر از رابطه‌ی آندریازن استفاده شود، چنانچه مش ۳۶، ۴۶ و ۶۰ را محاسبه گردد، مقادیر بین ۱ میلی‌متر تا ۵۰۰ میکرون (۳۶مش)، مقادیر بین ۱ میلی‌متر تا ۳۵۵ میکرون (۴۶مش) و مقادیر بین ۱ میلی‌متر و ۲۵۵ میکرون (۶۰مش) به ترتیب برابر ۱۶، ۲۱ و ۲۶ درصد بدست خواهد آمد. بنظر می‌رسد که حدود ۶ درصد از ذرات اضافه شده در محدوده‌ی تقریباً mm (۰-۱) می‌باشند که به مقدار ۱۵ درصد کاربرد سیلیسیم افزوده شده اضافه گردیده و عدد ۲۱ درصد با رابطه‌ی آندریازن بهترین هم‌خوانی را نشان می‌دهد. نمودار پراش اشعه‌ی ایکس (شکل ۷ و ۶) نمونه‌ی ۴۶ مش کاربرد سیلیسیم در دو دمای خشک  $110^{\circ}\text{C}$  و پخت  $1350^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است.

### نتیجه‌گیری

۱- تغییر دانه بندی اگرگیت یکی از عامل‌های تاثیر گذار در افزایش تراکم ذرات می‌باشد که تراکم بیش‌تر ذرات، بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی را در پی دارد. مناسب‌ترین ضریب محاسبه شده  $n=0/3$  گزارش شد.

ثابت بماند، طی آزمایش‌های انجام شده، بهترین ضریب توزیع برای رسیدن به جریان‌یابی مناسب در دیر گذارهای ریختنی برابر با  $n=0/3$  می‌باشد.

ترکیبات گوناگونی از مواد اولیه بر اساس جدول ۱ تهیه شدند. مخلوط هر یک از ترکیبات پس از افزودن ۶ درصد آب، ۰/۴ درصد اسید سیتریک و ۰/۰۶ درصد تری پلی فسفات سدیم به عنوان روان‌ساز در قالب‌های مکعبی به ابعاد  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  از بدنه‌های دیرگذاری تهیه شد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای  $110^{\circ}\text{C}$  خشک و سپس در یک کوره‌ی الکتریکی در دمای  $1350^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت پخت شدند. اندازه‌گیری چگالی (B.D) و میزان تخلخل (P.O) بر اساس معیار ASTM C20-97 و همچنین استحکام فشاری سرد (CCS) بر اساس معیار ASTM C133-97 در مورد نمونه‌های خشک شده و پخت شده انجام گرفت. در ادامه، بمنظور بررسی فازهای تشکیل شده در ترکیبات گوناگون از دستگاه پراش اشعه‌ی ایکس با لامپ  $\text{Cu-K}\alpha$  و اشعه‌ی ایکس با طول موج  $1/6045$  آنگستروم استفاده و از نمونه‌های پخت شده الگوی پراش اشعه‌ی ایکس در شرایط اندازه‌ی گام  $0/05$  درجه و زمان در هر گام ۲ ثانیه تهیه گردید.

### نتایج و بحث

#### تأثیر میزان بینه ذرات SiC

نتایج مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها (شکل ۱، ۲ و ۳) در دو دمای  $110^{\circ}\text{C}$  و  $1350^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد نشان می‌دهند که با افزایش مقدار کاربرد سیلیسیم، دانسیته و استحکام فشاری سرد نمونه‌ها کاهش و تخلخل ظاهری افزایش می‌یابد. بنظر می‌رسد به دلیل لبه‌های تیز و شکل نا کروی ذرات کاربرد سیلیسیم، امکان تراکم کامل ذرات کاربیدهای سیلیسیم فراهم نشده و با افزایش مقدار ذرات کاربرد سیلیسیم در نمونه‌ها فاصله‌ی میان ذرات نیز بیش‌تر شده است و در نتیجه‌ی آن تراکم بدنه کاهش یافته و دانسیته و استحکام فشاری سرد نیز پایین می‌آید. لازم به توضیح است که اگر گیت‌ها داری ۳ محدوده‌ی دانه بندی mm (۰-۱) و ۰-۳، ۱-۳ باشند، کاربرد سیلیسیم افزوده شده با در نظر گرفتن نسبت

on Refractories Eurogress Aachen, pp .184-188, 1996.

۳- ح. ر. عزت پور، م. حداد سبزواری، ج. وحدتی خاکی، ح. حمیدی، " تولید درجای نانو کامپوزیت  $(\text{Cu-Cr})-\text{Al}_2\text{O}_3$  به روش مکانوشیمیایی، " مجله علمی پژوهشی مواد نوین، دوره ۱ شماره ۱، ص ۴۱-۴۸، پاییز ۱۳۸۹.

4- C. Parr., and E. Speafico., "Calcium AluminateCement Based Castable for DemandingApplications" Proceedings of InternationalSeminar on Monolithic Refractory Materials, Tehran, Iran, pp .141-152, 1997.

5- W.E. Lee., W. Vieira., S. Zhang., K. GhanbariAhari., H. Sarpoolaky., and C. Parr., "Castablerefractory concretes" International MaterialsReviews,Vol .46, No .3, pp .145-167, 2001.

6- De. Oliveira, I.R. Studart., A.R. Pandolfelli V.C. Menegazzo "Zero Cement Refractory Castable" Am .Ceram .Soc.Bulletin .Vol.81, No.12, pp.27-34, 2002.

۲- نتایج نشان داد که میزان بهینه‌ی کاربید سیلیسیم که باعث افزایش استحکام سرد فشاری و افزایش دانسیته می‌شود، برابر با ۱۵ درصد وزنی است.

۳- نتایج نشان می‌دهند که اندازه‌ی ذرات کاربید سیلیسیم با مش ۴۶ ( $355 \mu\text{m}$ ) باعث کم‌ترین تخلخل ظاهری و بهترین تراکم گردیده و در نتیجه، استحکام و اتصال بین ذرات افزایش می‌یابد.

### منابع

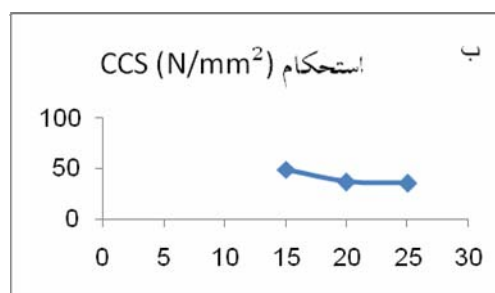
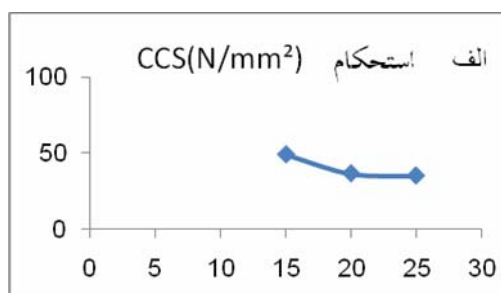
1- B. Myhre., and B. Sandberg., "the Use of Microsilicain Refractory Castables" International Seminar on Monolithic Refractory Materials, Tehran, Iran, Nov .30 -Dec .1, pp .113-140, 1997.

2- B. Myrhe., and A. Hundere., "On the influence ofsuper fines in high alumina castables",XXXIXth International Colloquium

### پیوست‌ها

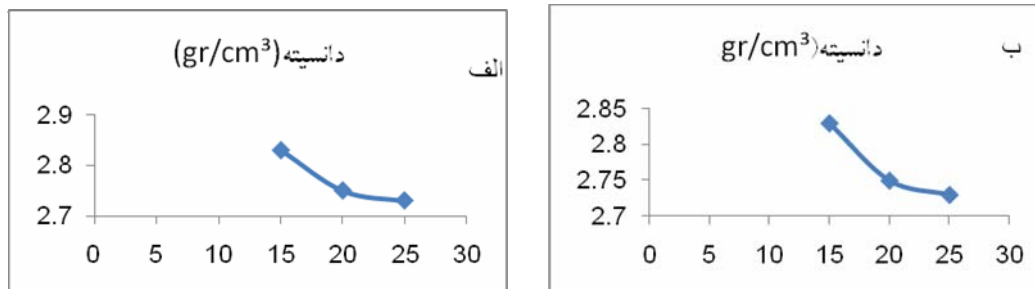
جدول ۱- ترکیب شیمیایی مورد استفاده برای دیرگداز ریختنی کم سیمان

| نمونه | اگرگیت | سیمان | آلومینایی<br>فعال شده | آلومینایی<br>کلسینه | کاربید<br>سیلیسیم | میکروسیلیس | منیزیت<br>کلسینه | هگزامتا<br>فسفات<br>سدیم | تری پلی<br>فسفات<br>سدیم | اسید<br>سیتریک |
|-------|--------|-------|-----------------------|---------------------|-------------------|------------|------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| ۱     | ۶۷     | ۳     | ۳                     | ۳                   | ۱۵                | ۳          | ۳                | ۱/۵                      | ۰/۰۶                     | ۰/۰۴           |
| ۲     | ۶۲     | ۳     | ۳                     | ۳                   | ۲۰                | ۳          | ۳                | ۱/۵                      | ۰/۰۶                     | ۰/۰۴           |
| ۳     | ۵۷     | ۳     | ۳                     | ۳                   | ۲۵                | ۳          | ۳                | ۱/۵                      | ۰/۰۶                     | ۰/۰۴           |

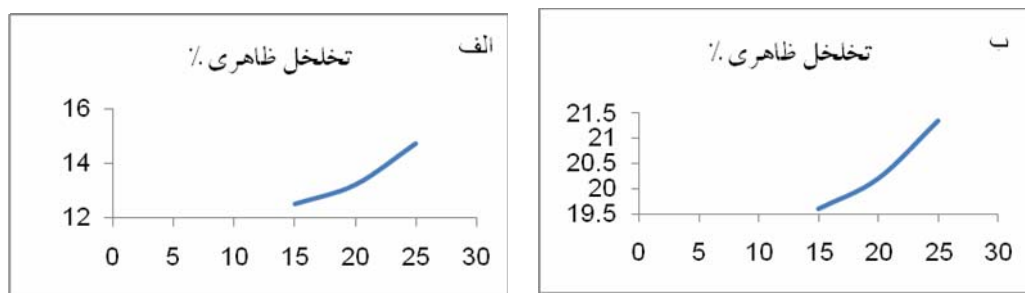


شکل ۱- استحکام فشاری سرد برای درصدوزنی گوناگون SiC

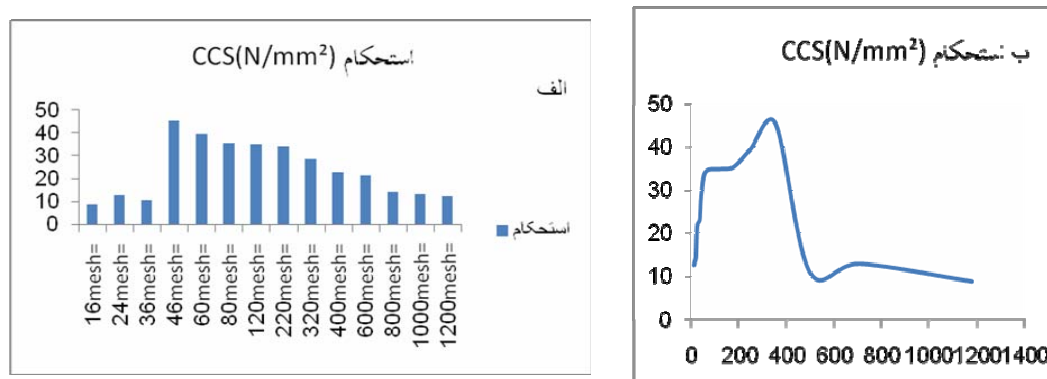
(الف) نمونه‌های خشک شده در دمای ۱۱۰ °C و (ب) نمونه‌های پخت شده در دمای ۱۳۵۰ °C



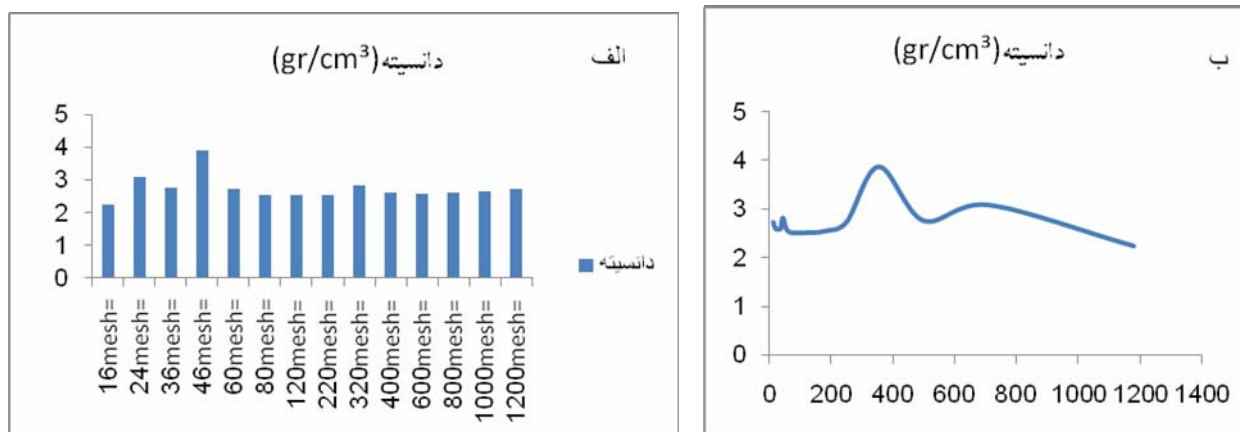
شکل ۲- میزان تغییرات دانسیته با درصد وزنی گوناگون SiC  
 الف) نمونه‌های خشک شده در دمای ۱۱۰°C و ب) نمونه‌های پخت شده در دمای ۱۳۵°C



شکل ۳- میزان تغییرات تخلخل ظاهری با درصد وزنی گوناگون SiC  
 الف) نمونه‌های خشک شده در دمای ۱۱۰°C و ب) نمونه‌های پخت شده در دمای ۱۳۵°C

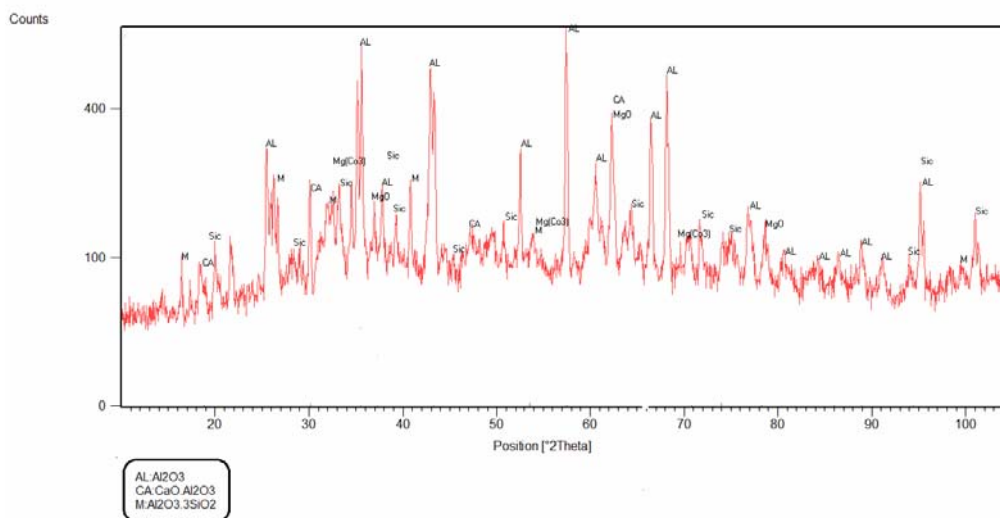


شکل ۴- نمودار استحکام فشاری برای اندازه‌ی ذرات گوناگون SiC  
 الف) اندازه‌ی ذرات بر حسب مش و ب) اندازه‌ی ذرات بر حسب میکرومتر

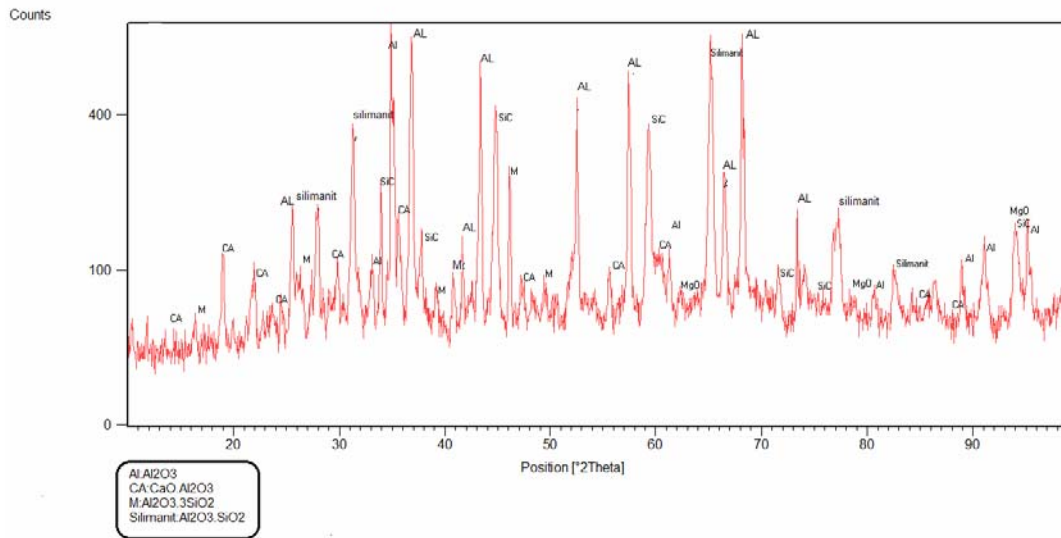


شکل ۵- نمودار دانسیته برای اندازه‌ی ذرات گوناگون SiC

الف) اندازه‌ی ذرات بر حسب مش و ب) اندازه‌ی ذرات بر حسب میکرومتر



شکل ۶- پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌ی ۴۶ مش کاربید سیلیسیم خشک شده در دمای ۱۱۰°C



شکل ۷- پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌ی ۴۶ مش کاربید سیلیسیم پخت شده در دمای  $1350^{\circ}\text{C}$

