

بررسی اثر افزودن سیمان آلومینا بالا بر خواص آجرهای عایق آلومینایی تهیه شده به روش فومی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

زهرا سعادت، رحیم نقی‌زاده*، حمیدرضا رضایی، هاجر قنبری

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

*rnaghizadeh@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۴ بهمن ۱۳۹۸

پذیرش: ۱۳ خرداد ۱۳۹۹

کلید واژه:

آلومینا؛ آجر عایق؛ ریخته‌گری
دوغابی؛ سیمان آلومینا بالا؛ فوم.

چکیده:

هدف تحقیق حاضر، بررسی اثر سیمان آلومینا بالا و دمای زیتتر بر ریزساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی آجرهای عایق آلومینایی تهیه شده به روش فومی می‌باشد. دوغاب‌های حاوی ۷۵٪ وزنی آلومینا، ۲۵٪ وزنی آب دیونیزه، ۱٪، ۳٪، ۵٪، ۷٪ وزنی سیمان آلومینا بالا و ۲٪ وزنی فوم سبک آتشنشانی، تهیه شد. رفتار جریانی دوغاب حاوی آلومینا، ۲٪ وزنی فوم آتشنشانی و ۷٪ وزنی سیمان آلومینا بالا (سکار ۷۱) بررسی شد. سپس دوغاب‌های فومی درون قالب فلزی ریخته شدند که پس از چند ساعت، بدنه گیرش یافته دارای استحکام اولیه حاصل شد. پس از خشک کردن طولانی مدت نمونه‌های ریخته‌گری شده، آن‌ها به مدت ۳ ساعت در دماهای مختلف 1650°C - 1510°C پخت شدند. نتایج نشان داد که دوغاب آلومینایی حاوی افزودنی‌های ۲٪ فوم و ۷٪ سیمان آلومینا بالا در سرعت برشی 1 s^{-1} ، ویسکوزیته برابر 3 Pa.s دارد که با افزایش سرعت برشی به 10 s^{-1} ، ویسکوزیته آن به 0.3 Pa.s کاهش یافت، در واقع با افزایش سرعت برشی، تنش برشی افزایش و ویسکوزیته دوغاب کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده رفتار شبه پلاستیک دوغاب است. نمونه‌ها چگالی کلی بین 0.98 g/cm^3 تا 1.62 g/cm^3 ، درصد تخلخل کلی بین ۵۹ تا ۷۵، استحکام خمشی بین 2.8 MPa تا 6.6 MPa و اندازه متوسط تخلخل‌های شبه کروی بین $1\text{ }\mu\text{m}$ تا $11\text{ }\mu\text{m}$ را بسته به میزان سیمان و دمای پخت نشان دادند. می‌توان گفت با افزایش میزان سیمان آلومینا بالا، چگالی کلی و استحکام خمشی نمونه‌ها افزایش یافت و میزان تخلخل کاهش پیدا کرد. بررسی‌های فازی نشان می‌دهد که پیک‌های به وجود آمده در دمای 1510°C مربوط به فاز اصلی کوراندوم و فاز فرعی کلسیم آلومینات ($\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$) می‌باشد.

۱- مقدمه

یکی از راه‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی در کوره‌های صنعتی استفاده از آجرهای عایق، جرم‌های ریختنی، الیاف

فشرده و پوک‌های عایق می‌باشد. که در میان آن‌ها نوع آلومینایی به دلیل تحمل دمای بالای 1500°C اهمیت خاصی دارد [۱-۳]. برای تهیه آجرهای عایق آلومینایی



روش‌های مختلفی از قبیل استفاده از فوم، ژل و آلومینای حباب‌دار وجود دارد. راه‌های مختلفی از زیرمجموعه روش‌های تر برای ساخت قطعات عایق حرارتی وجود دارد که شامل روش‌های فومی همراه با ریخته‌گری ژلی و همراه با افزودن سیمان آلومینا بالا، ریخته‌گری انجمادی و همچنین روش‌های سل-ژلی می‌شود [۴-۷].

آجرهای دیرگداز سبک محصولات دیرگدازی با تخلخل واقعی بیش از ۴۵٪ و دمای کارکرد حداقل 800°C می‌باشند که بایستی تغییرات طولی پایدار آن‌ها در دمای کار کمتر از ۲ درصد باشد. صرفه‌جویی در انرژی به میزان ۱۵ تا ۳۵ درصد در طرح‌های کاربرد مواد عایق و یا سازه‌های کاملاً سبک به هنگام بهره‌برداری واقعی از کوره‌ها در مقایسه با سازه‌های سنگین کوره‌ها با مواد دیرگداز فشرده به اثبات رسیده است. همچنین به کاهش وزن بدنه در همان مقیاس حجمی و مزایای کم شدن وزن به هنگام انتقال، نصب و پیاده کردن کوره‌ها باید اشاره کرد [۵ و ۴].

یکی از روش‌های ساخت آجرهای عایق روش فومی یا روش حبابی می‌باشد. در روش فومی از سه دسته مواد استفاده می‌گردد:

الف) مواد دیرگداز نظیر شاموت، رس، آلومینا، منیزیای ددبرن شده و کرومیت و ...

ب) سازندگان فوم نظیر صابون، کلوفون، ساپونین و کف آتش‌نشانی و

ج) عوامل پایدار کننده کف نظیر سریشم، چسب‌های آلی، صمغ عربی، گچ قالبسازی و سیمان نسوز و ... [۶ و ۴].

روش فومی یا حبابی به دو صورت یکی ایجاد حباب درجا و درون دوغاب اصلی و دیگری ساخت دوغاب اصلی و

سوسپانسیون حاوی حباب به طور جداگانه و آنگاه مخلوط کردن آن‌ها می‌باشد. در روش دوم ابتدا دوغابی پایدار با چگالی مناسب از عوامل دیرگداز و سوسپانسیونی با چگالی مناسب از عوامل فوم و پایدارساز ساخته می‌شود، سپس دو دوغاب با هم مخلوط می‌شوند. لذا چگالی دوغاب فومی تعیین کننده چگالی آجر خام خواهد بود. سپس دوغاب در درون قالب چوبی، مقوایی و یا فلزی ریخته می‌شود و در نهایت عملیات خشک شدن، پخت و پرداخت انجام می‌شود. حسن روش فومی ایجاد تخلخل‌های ریز و کروی می‌باشد که از نظر عایق بودن و استحکام مکانیکی مطلوب می‌باشند. مشکلات روش فومی زمان خشک کردن طولانی و حساس بودن دانسیته دیرگداز به تغییرات جزئی متغیرها می‌باشد [۸ و ۷].

در پژوهشی [۹] دوغابی حاوی آلومینای کلسینه، نیترات آمونیوم و آب تهیه شد و سپس به آن سیمان آلومینات کلسیم و عامل فوم ساز تری اتانول آمین سولفات اضافه شد و پس از تکان دادن شدید، به سرعت داخل قالب ریخته شد. پس از پخت در دمای 1700°C ، خواص مکانیکی، حرارتی و فازی آن بررسی شد که فازهای آن شامل کوراندوم، CA6 و ضریب هدایت حرارتی آن، $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ۰/۴۵ بود. بررسی‌های رئولوژیک در دوغاب‌های حاوی فوم و استفاده از فوم سازه‌های ارزان قیمت نظیر فوم آتش‌نشانی بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، استفاده از کف آتش‌نشانی به عنوان عامل ایجاد کننده فوم و سیمان آلومینا بالا به عنوان غلظت دهنده دوغاب و عامل تسریع در سفت شدن آن به دلیل واکنش‌های هیدراسیون و همچنین به



عنوان کمک زینتر در حین پخت هدف این پروژه قرار گرفت که به ویژه با رویکرد این مقاله بررسی چندانی روی آن‌ها صورت نگرفته است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در ساخت آجرهای عایق آلومینایی شامل موارد زیر بود.

۱- آلومینای کلسینه شده: پودر α -آلومینا با اندازه‌ی بین $90\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۲- هگزا متافسفات سدیم: نوع صنعتی آن به عنوان روانساز مورد استفاده قرار گرفت.

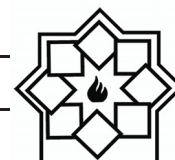
۳- کف آتش‌نشانی (عامل ایجاد فوم): فوم سبک آتش‌نشانی از نوع سورفکتانت فلورینی و سولفات‌ها با $\text{pH}=7$ و وزن مخصوص $1/0.9\text{ g/cm}^3$ و ویسکوزیته 10 mm/s در دمای 20°C بود.

۴- سیمان آلومینا بالا: سیمان سکار ۷۱ به عنوان افزودنی استفاده شد و آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- نحوه ساخت نمونه‌ها و آزمایش بر روی آن‌ها

فرمولاسیون دوغاب‌ها در جدول ۲ آورده شده است. برای آماده سازی دوغاب‌ها (بر اساس جدول ۲) ابتدا محلول آب دیونیزه و هگزا متافسفات سدیم آماده شد. سپس با α -آلومینا به مدت ۱ ساعت در جارمیل تحت آسیاب و مخلوط کردن قرار گرفت تا دوغاب روان و پایدار به دست آید.

جنس گلوله‌ها و جداره جارمیل از آلومینا بود. سپس فوم آتش‌نشانی به دوغاب‌ها اضافه شد و به مدت ۱۵ دقیقه توسط هم زن مکانیکی به منظور افزایش حباب‌ها هم زده شد، پس از آن سیمان سکار ۷۱، طبق جدول ۲ به دوغاب‌ها افزوده شد و به مدت ۱۵ دقیقه توسط هم زن مکانیکی هم زده شد. به منظور حفظ حباب‌ها دوغاب‌ها به سرعت درون قالب آلومینیومی ریخته شدند. روی باز قالب با کاغذ آغشته به روغن پوشانده شد تا از تبخیر آب و خروج حباب‌ها جلوگیری شود. فرمولاسیون‌ها و نحوه عمل با توجه به منابع مختلف و همچنین سعی و خطا به دست آمده است. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط، ۲۴ ساعت دیگر در دمای 50°C و در نهایت به مدت ۴۸ ساعت در دمای 110°C خشک شدند. پس از خشک کردن نمونه‌ها بر اساس برنامه‌ی حرارتی خاص در دماهای مختلف پخت شدند. برنامه پخت شامل سرعت حرارت دهی 4°C/min از 25°C تا 800°C و یک ساعت نگهداری در این دما و سپس 10°C/min تا دمای ماکزیمم و مدت زمان نگه داری سه ساعت در این دما بود. تمام نمونه‌ها در دمای 1500°C و نمونه حاوی ۷٪ سیمان در دماهای 1650°C و 1600°C نیز زینتر شدند. رئولوژی دوغاب‌ها به وسیله دستگاه رئومتر مدل MCR-300 اندازه‌گیری شد. چگالی کلی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-C20 و استحکام خمشی به روش سه نقطه‌ای و با فاصله تکیه‌گاه ۵ سانتی‌متر بر روی سه نمونه از هرکدام از فرمول‌ها اندازه‌گیری گردید. الگوی پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) برای پودر نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه DRON-8 با اشعه تکفام $\text{CuK}\alpha$ و ولتاژ شتاب دهنده 40 kV و جریان 30 میلی آمپر تهیه شد و با کمک نرم افزار



شناسایی Xpert مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار الکترونی روبشی SEM (SEM, Tescan Vega) مورد نمونه‌های مانت شده به وسیله‌ی دستگاه میکروسکوپ مشاهده قرار گرفت.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی

ترکیب شیمیایی						نوع ماده اولیه
TiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
۰/۰۰۷	۰/۳	۰/۰۱	۰	۹۹/۶	۰/۰۲	α-آلومینا
۰	۰/۵	۰/۱	۲۸/۵	۷۰/۵	۰/۴	سیمان سکار ۷۱

جدول ۲- ترکیب شیمیایی دوغاب‌ها (برحسب درصد وزنی دوغاب)

ترکیب	α-آلومینا (%)	آب مقطر دیونیزه (%)	کف آتش‌نشانی (%)	سیمان سکار ۷۱ (%)	هگزامتافسفات (%)
A	۷۵	۲۵	۲	۱	۱
B	۷۵	۲۵	۲	۳	۱
C	۷۵	۲۵	۲	۵	۱
D	۷۵	۲۵	۲	۷	۱

جدول ۳- ویسکوزیته (Pa.s) سه نوع دوغاب مورد مطالعه

سرعت برشی (S ⁻¹)		نوع دوغاب
۱	۱۰	
۰/۰۹	۰/۰۶	دوغاب آلومینایی
۰/۳۵	۰/۱	دوغاب آلومینایی همراه با فوم
۳	۰/۶	دوغاب آلومینایی همراه با فوم و سیمان

جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزایش فوم آتش‌نشانی و همچنین فوم و سیمان آلومینایی به دوغاب آلومینایی، ویسکوزیته افزایش می‌یابد. با افزایش فوم (حباب گاز)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی رئولوژی دوغاب‌ها

ویسکوزیته دوغاب حاوی آلومینا، آب و هگزامتافسفات سدیم اندازه‌گیری شد که در جدول ۳ نتایج آن آمده است. سپس به دوغاب فوق ۲٪ فوم آتش‌نشانی اضافه شد و پس از هم زدن منحنی رئولوژی آن تهیه شد که در شکل ۱-الف آورده شده است. به دوغاب آلومینایی اولیه علاوه بر ۲٪ فوم، ۷٪ سیمان سکار نیز افزوده شد و پس از هم‌زدن منحنی رئولوژی آن مطابق شکل ۱-ب به دست آمد.



ویسکوزیته می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. اگر حین اعمال تنش برشی، خطوط جریان پیرامون حباب به هم خوردگی زیادی پیدا نماید، در این صورت وجود حباب، ویسکوزیته را افزایش می‌دهد. اگر حباب‌ها خود تغییر فرم دهند و خطوط جریان موجود در سوسپانسیون خیلی تغییر نکند در این صورت وجود حباب موجب کاهش ویسکوزیته سوسپانسیون می‌گردد [۱۰]. در این آزمایش و با سرعت برش اعمال شده، ویسکوزیته با افزودن حباب به دوغاب آلومینایی افزوده شده است. این موضوع در رابطه‌ای شبیه رابطه زیر نشان داده شده است [۱۰]:

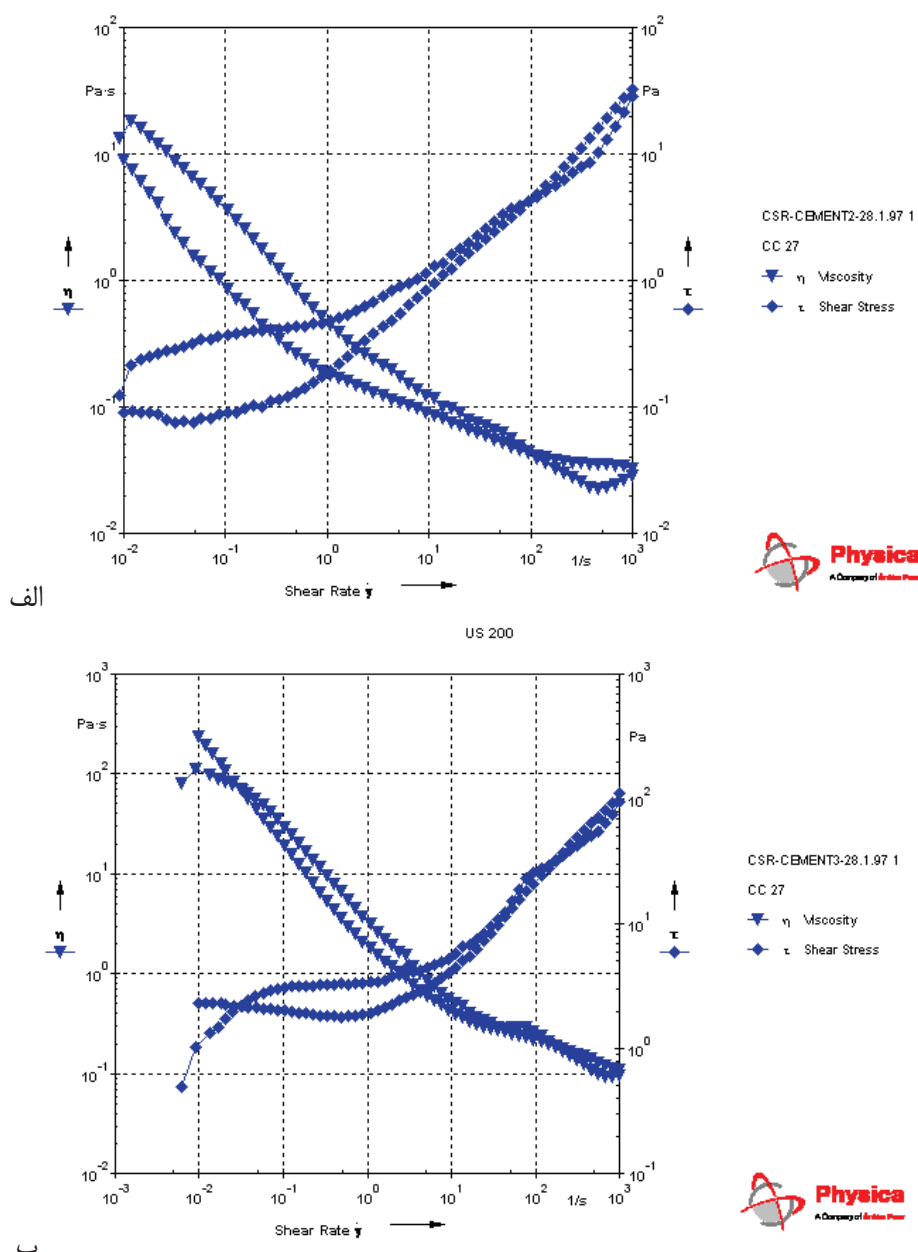
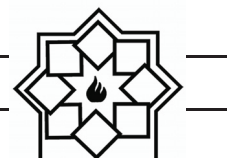
$$1 + 9\phi \leq \eta_r \leq (1 - \phi)^{-1}$$

این رابطه نشان می‌دهد که ویسکوزیته نسبی دوغاب با افزایش جزء حجمی حباب گاز (ϕ) در محدوده فوق افزوده می‌شود.

با توجه به شکل ۱ با افزایش سرعت برشی، تنش برشی افزایش و ویسکوزیته دوغاب کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده رفتار رقیق شدن برشی دوغاب‌ها یا همان رفتار شبه پلاستیک است همچنین دوغاب‌ها رفتار تیکسوتروپی نیز نشان می‌دهند زیرا منحنی رفت و برگشت یکسان نیست [۱۱].

دلیل افزایش ویسکوزیته دوغاب آلومینایی با افزودن سیمان

را می‌توان این گونه بیان کرد. سیمان آلومینا بالا از یک طرف دارای توزیع دانه‌بندی معمولاً از $90 - 30 \mu m$ می‌باشد. از طرف دیگر دارای قابلیت انحلال و تغییر pH دوغاب به سمت قلیایی را دارد و در نهایت می‌تواند پس از انحلال گیرش کرده و به صورت چسب هیدرولیک عمل کند. بدیهی است هنگام اندازه‌گیری ویسکوزیته، گیرش سیمان بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد زیرا که این عمل به حدود یک ساعت زمان نیاز دارد. در نتیجه سه موضوع تغییر pH، تغییر توزیع دانه‌بندی و افزایش بار جامد در دوغاب آلومینایی با افزودن سیمان آلومینایی ایجاد می‌گردد. تغییر pH در حوالی ۹ به بعد ویسکوزیته دوغاب آلومینایی را کاهش می‌دهد [۱۱]. ولی افزودن میزان بار جامد موجب افزایش ویسکوزیته می‌گردد [۱۲]. در تحقیقی نشان داده شده است که وسیع‌تر کردن توزیع اندازه ذرات می‌تواند موجب کاهش ویسکوزیته گردد [۱۳]. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، با افزودن سیمان دو عامل pH و توزیع وسیع‌تر اندازه ذرات موجب کاهش ویسکوزیته می‌گردد ولی افزایش بار جامد موجب افزایش ویسکوزیته می‌گردد و به نظر می‌رسد که در دوغاب‌های این تحقیق، افزایش ویسکوزیته توسط میزان بار جامد به عوامل دیگر غلبه کرده است.



شکل ۱- نمودار تنش برشی بر حسب کرنش برشی و ویسکوزیته بر حسب کرنش برشی (الف) نمونه دوغاب آلومینایی حاوی ۲٪ وزنی فوم آتش‌نشانی و ۷٪ وزنی سیمان سکار ۷۱ (ب) نمونه دوغاب آلومینایی حاوی ۲٪ وزنی فوم آتش‌نشانی و ۷٪ وزنی سیمان سکار ۷۱

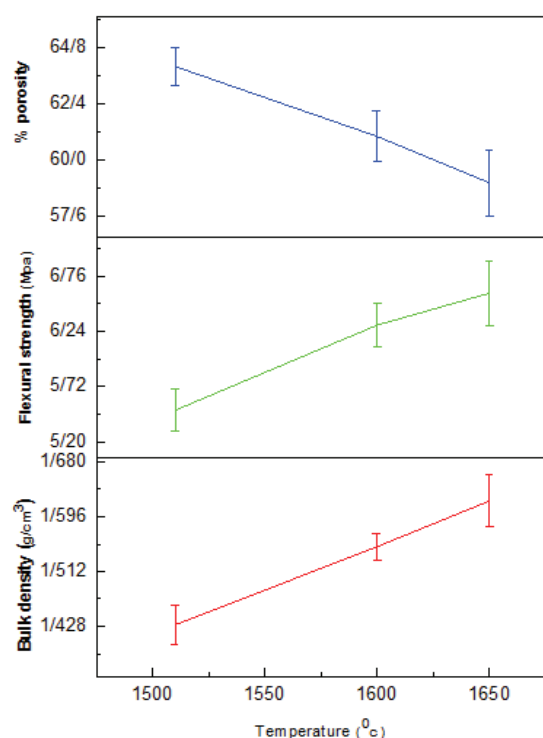
تخلخل کلی و افزایش چگالی پخت در 1510°C و افزایش استحکام پخت از $2/8 \text{ MPa}$ در 1% افزودنی سیمان به $5/5 \text{ MPa}$ در 7% سیمان می‌گردد. دلیل کاهش تخلخل را می‌توان هم به حالت خام و هم به حالت پخت نسبت داد.

۳-۲- چگالی کلی، استحکام خمشی و درصد تخلخل واقعی

شکل ۲ نشان می‌دهد که با درصد فوم ثابت (۲٪ وزنی)، افزودن سیمان آلومینا بالا از ۱ به ۷٪ موجب کاهش

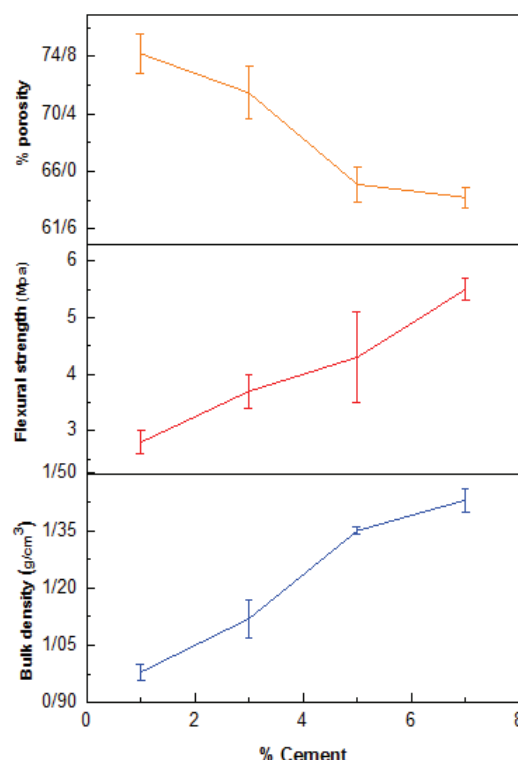


است. با افزایش دما به دلیل افزایش سرعت نفوذ اتمی انتظار تغییرات فوق می‌رود. هر چند که انتظار حضور فاز مایع و زینتر در حضور آن می‌رود اما با توجه به حضور حداکثری ۲/۵٪ Cao نمی‌توان انتظار فاز مذاب را در کمتر از ۱۸۰۰°C داشت [۱۴و۱۵].



شکل ۳- نمودار چگالی کلی، درصد تخلخل و استحکام خمشی بر حسب دمای زینتر، در نمونه حاوی ۷٪ سیمان آلومینا بالا

در حالت خام دلیل کاهش تخلخل افزایش بار جامد می‌باشد که می‌تواند استحکام خام را نیز افزایش دهد و در حالت پخت دلیل کاهش تخلخل می‌تواند زینتر شدن بهتر به دلیل بالاتر بودن سیمان آلومینا بالا باشد. با توجه به شکل ۳ با افزایش دمای پخت به ۱۶۰۰°C و ۱۶۵۰°C به دلیل افزایش زینتر، هم تخلخل کاهش یافته و هم استحکام بالا رفته



شکل ۲- نمودار چگالی کلی، درصد تخلخل و استحکام خمشی بر حسب درصد وزنی سیمان آلومینا بالا در نمونه حاوی ۲٪ فوم آتش‌نشانی پس از پخت در دمای ۱۵۱۰°C به مدت سه ساعت

۳-۳- بررسی فازی (XRD)

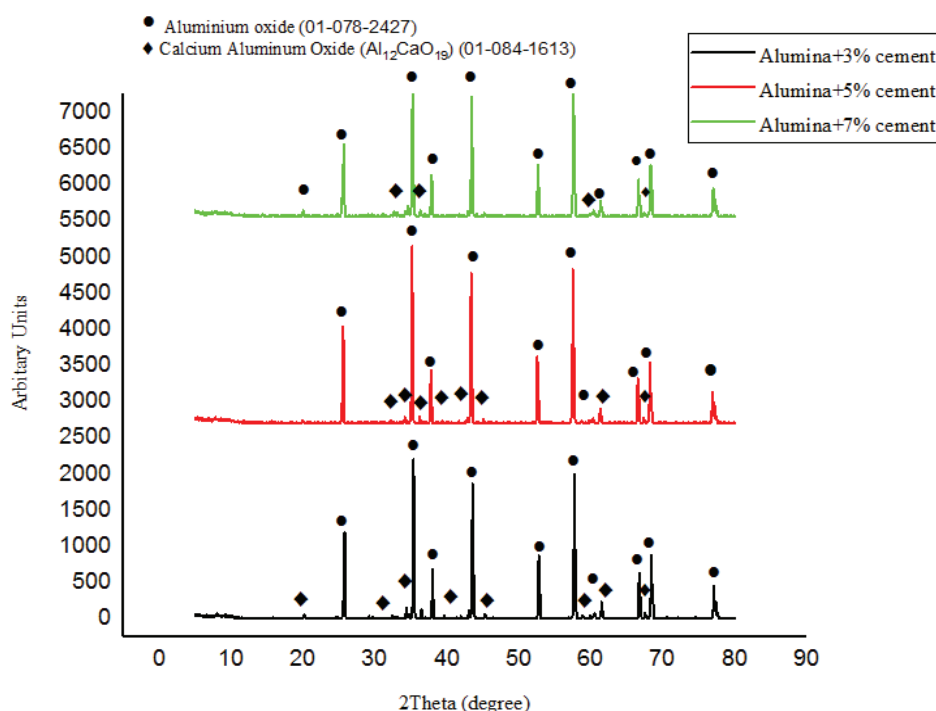
شکل ۴ الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلفی از سیمان سکار را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۳-۷٪ وزنی سیمان پس از پخت می‌باشند. همانطور

که مشاهده می‌گردد نمونه‌ها دارای فاز کوراندوم و هیپونیت یا همان هگزا آلومینات کلسیم می‌باشند. با توجه به آنالیز سیمان، آنالیز نمونه‌ها به به ترتیب حاوی ۱/۲٪، ۱/۹٪ و ۲/۵٪ اکسید کلسیم و بقیه آلومینا می‌باشد. برای تشکیل



دست می‌دهد و در نهایت C_3AH_{10} به دست می‌آید که آن هم در دمای $450^{\circ}C$ تبدیل به C_3A و $C_{12}A_7$ تبدیل می‌شود. و بالاخره در $1000^{\circ}C$ فازهای CA و CA_2 حاصل می‌شود که تا $1500^{\circ}C$ پایدارند و چنانچه به آلومینای اضافی دسترسی داشته باشند به CA_6 تبدیل می‌گردند [۱۴ و ۱۵].

$CaO.6Al_2O_3$ مسیر تبدیل تدریجی فازهای هیدراته سیمان به انواع مختلف آلومینات کلسیم کم آلومینا و سپس واکنش آنها با زمینه آلومینایی و غنی شدن از آن را می‌توان در نظر گرفت. تبدیلات سیمان آلومینا بالای هیدراته به این صورت می‌باشد که CAH_{10} در دمای $70^{\circ}C$ کمی از آب خود را از

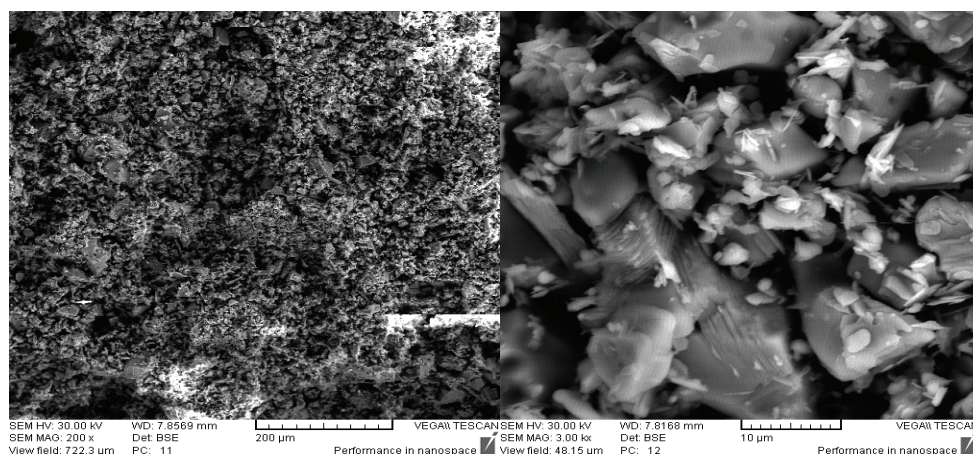


شکل ۴- آنالیز XRD نمونه‌های حاوی درصدهای مختلفی از سیمان سکار ۷۱ پس از پخت در دمای $1510^{\circ}C$

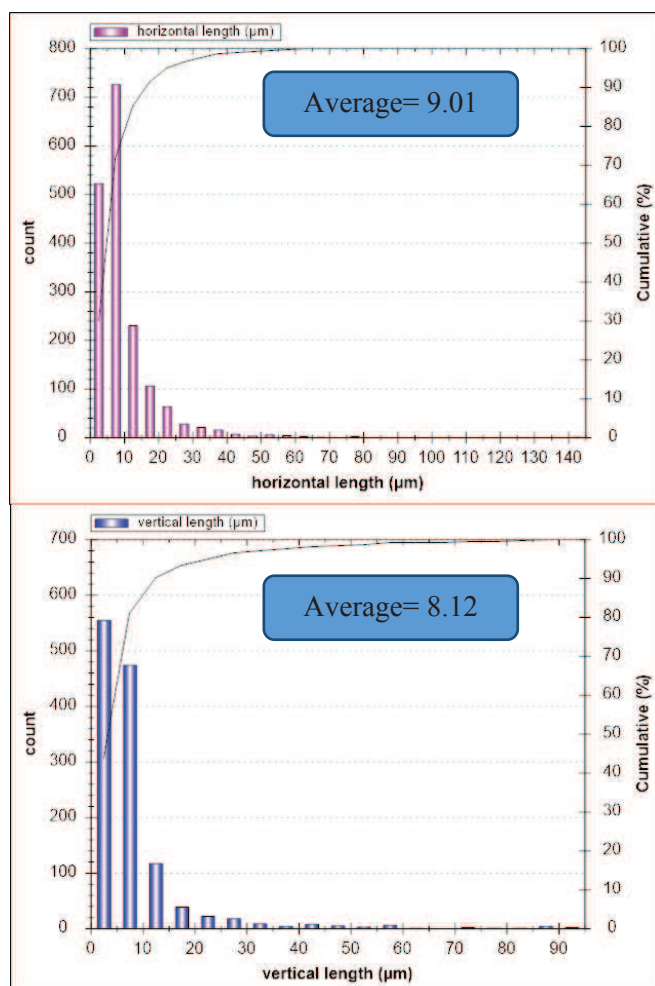
آلومیناتی به واسطه‌ی وزن بالاتر، همانند کارهای مشابه محققین روشن تر دیده می‌شود. [۱۶-۱۸]. در شکل ۶ توزیع اندازه تخلخل‌های نمونه فوق توسط نرم‌افزار MIP رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متوسط اندازه تخلخل‌ها حدود $8-9\ \mu m$ می‌باشد و می‌توان گفت شکل تخلخل‌ها تقریباً کروی است.

۳-۴- بررسی ریزساختاری

تصویر میکروسکوپی حاصل از بررسی میکروسکوپی نمونه‌ی مانده حاوی ۷٪ سیمان سکار پخت شده در دمای $1510^{\circ}C$ در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ تخلخل‌ها با اندازه‌های مختلف که تقریباً کروی هستند و ذرات کوراندوم قابل مشاهده می‌باشند. فاز کلسیم



شکل ۵- تصویر SEM نمونه حاوی ۷٪ سیمان سکار ۷۱ پخت شده در دمای 1510°C به مدت ۳ ساعت با دو بزرگنمایی مختلف



شکل ۶- توزیع تخلخل در دو جهت در نمونه حاوی ۷٪ سیمان، پخت شده در دمای 1510°C



۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آجرهای عایق آلومینایی با روش فومی و همچنین با استفاده از سیمان سکار ۷۱ (به عنوان چسب) آماده گردیدند. رفتار دوغابها بررسی شد و ویسکوزیته آنها با فوم و سیمان حدود ۳ Pa.s بود. همچنین، تأثیر مقدار سیمان سکار ۷۱ و دمای زینتر بر ریزساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌های آلومینایی حاوی ۱-۷٪ وزنی سیمان آلومینا بالا، با درصد ثابت فوم (۲٪ وزنی) با افزودن سیمان از ۱٪ به ۷٪ وزنی، میزان تخلخل کلی پس از پخت در دمای ۱۵۱۰°C از ۷۵٪ به ۶۴٪ حجمی کاهش، چگالی کلی از ۰/۹۸ g/cm³ به ۱/۴۳ افزایش و استحکام از ۲/۸MPa به ۵/۵ افزایش می‌یابد. تأثیر دماهای پخت بالاتر یعنی ۱۶۵۰°C بر روی نمونه حاوی ۷٪ وزنی سیمان و ۲٪ وزنی فوم، نمایشگر افزایش استحکام از ۵/۵MPa به ۶/۶ و کاهش تخلخل کلی از ۶۴٪ حجمی به ۵۹٪ حجمی بود. به طور کلی افزودن سیمان آلومینا بالا و افزایش دمای زینتر موجب افزایش استحکام و چگالی کلی نمونه‌ها و کاهش درصد تخلخل کلی آنها گردید. با توجه به اعداد به دست آمده میزان بهینه سیمان آلومینا بالا، ۷٪ وزنی بود. بررسی فازی نمونه‌های حاوی سیمان آلومینا بالا حاکی از تشکیل فاز هگزا آلومینات کلسیم بود که به زینتر زمینه آلومینایی کمک کرده بود. شکل تخلخل‌ها کروی و متوسط اندازه آنها بین ۸ تا ۹ میکرون بود.

مراجع

[۱] ج. روتشکا، "مواد دیرگداز"، ترجمه دکتر بهزاد میرهادی، دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز انتشارات، ۱۳۷۷.

- [۲] ح. سرپولکی، ح. شهبازی، "هندبوک جامع کاربردی دیرگدازها"، شرکت فیبرونا، زمستان ۱۳۹۱.
- [3] P. P. Budnikov, "The Technology of Ceramic and Refractories", by Scripta Technica the M. I. T. Press, Massachusette. PP. 364-74, 1964.
- [4] Q. B. Li, Z. H. Pan, Present Status of Research on Lightweight, "Thermal insulating materials and its developing trend", C. Bulletin on the Chinese ceramic society, 30,5(2011).
- [5] Abdul Kadir A, Mohajerani A, Roddick F, Buckeridge J, "Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light-weight fired clay bricks incorporating cigarette butts". Int J Civ Environ Eng 2, 179-84(2010).
- [۶] ر. نقی‌زاده، ح. سرپولکی، م. م. سید طبایی، ع. طیبی‌فرد، "بررسی ساخت آجر عایق شاموتی با استفاده از فوم"، دومین کنگره سرامیک ایران، ۴-۲ آبان ۱۳۷۴.
- [7] F. H. Notron, "Refractories", MC Graw-Hill Book Company. PP. 143-4, 1968.
- [8] A. Jonker, "Insulating Refractory Materials from Inorganic Waste Resources" Ph.D. Thesis, Tshwane University of Technology, Pretoria, 2006.



- [14] B. B. Subramanian, B. B. Machhoya, Sarsani and K. N.Miti, "Preparation of Hot-Face Insulation Bicks by Foming", *Interceram*, 45 4. PP. 272-7(1996).
- [15] P. G. De La Iglesia, O. Garc'ia-Moreno, R. Torrecillas, and J. L. Menéndez, "Influence of different parameters on calcium hexaluminate reaction sintering by spark plasma" *Ceram. Int.*, vol. 38, no. 7, pp. 5325–5332, 2012.
- [16] Z. Živcová, E. Gregorová, and W. Pabst, "Alumina ceramics prepared with new pore-forming agents" *Process. Appl. Ceram.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2008.
- [17] G. Tar'i, J. M. F. Ferreira, and O. Lyckfeldt, "Influence of the stabilising mechanism and solid loading on slip casting of alumina" *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 18, no. 5, pp. 479–486, 1998.
- [18] Z. Živcová, E. Gregorová, and W. Pabst, "Alumina ceramics prepared with new pore-forming agents" *Process. Appl. Ceram.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2008.
- [9] L. Jia, L. Yuanbing, L. Shujing, L. Yawei, S. Shaobai."Preparation of Utralight Alumina Lightweight Insulation Brick", *Key Engineering Materials Vols* 602-603 pp 648-65(2014).
- [10] E. W. Llewellyn and M. Manga, "Bubble suspension rheology and implications for conduit flow," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 143, no. 1–3, pp. 205–217, 2005.
- [11] E. M. M. Ewais, "Rheological properties of concentrated alumina slurries: influence of ph and dispersant agent" *J. Australas. Ceram. Soc.*, vol. 41, no. 1, pp. 36–43, 2005.
- [12] G. Tar'i, J. M. F. Ferreira, and O. Lyckfeldt, "Influence of the stabilising mechanism and solid loading on slip casting of alumina" *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 18, no. 5, pp. 479–486, 1998.
- [13] M. He, Y. Wang, and E. Forssberg, "Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review" *Powder Technol.*, vol. 147, no. 1–3, pp. 94–112, 2004.