

بررسی اثر توزیع اندازه ذرات و میزان فاز اسپینل در خواص جرم‌های کم‌سیمان آلومینا اسپینلی

ملیحه قاسم‌زاده^۱ و زیارتعلی نعمتی^۲

۱- مربی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

ghasemzadeh@kiau.ac.ir

چکیده

دیرگدازهای ریختنی آلومینا-اسپینل به دلیل مقاومت بهتر در برابر مذاب و سرباره‌ها به تدریج در حال جایگزینی به جای آجرهای دیرگداز در صنعت به‌ویژه برای ساخت فولاد می‌باشند. این جرم‌ها به طرق گوناگون از قبیل مخلوط کردن اگریگیت‌های آلومینای تبولار با اسپینل غنی از آلومینا، سیمان دیرگداز، مواد ریزدانه و دفلوکولانت‌ها تهیه می‌شوند. در روش دیگر به جای اسپینل سنتزی آماده از منیزیا استفاده می‌شود که در نتیجه واکنش منیزیا با آلومینا در دمای بالا اسپینل تشکیل می‌شود. ویژگی‌هایی نظیر جریان‌یابی، استحکام خمشی سرد (CMOR)^۱، استحکام فشاری سرد (CCS)^۲، دانسیته، آنالیز فازی نمونه‌ها به روش تفرق اشعه X (XRD) و بررسی ریزساختاری آنها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تحت مطالعه قرار گرفته‌است. مقاله حاضر به بررسی اثر توزیع اندازه ذرات و میزان فاز اسپینل بر خواص جرم آلومینا-اسپینل کم‌سیمان می‌پردازد. هدف تولیدکنندگان دیرگداز عمدتاً تهیه محصولات با دانسیته بالا است. از نظر تئوری انتظار این است که ذرات دیرگداز ریختنی کاملاً فشرده شوند تا دانسیته صد در صد حاصل شود. در این صورت آب اضافه شده کمترین مقدار را خواهد داشت اگر چه دانسیته انباشتگی ۱۰۰٪ مخالف با سیالیت است، لذا یک ساختار جامد با انباشتگی بهینه از نظر تئوری آب کمتری نسبت به انباشتگی کم برای نصب نیاز دارد. در این میان برای رسیدن به دانسیته بهینه توزیع اندازه ذرات از اهمیت برخوردار است. توزیع اندازه ذرات تعیین می‌کند که آیا دیرگداز ریختنی از نوع خود جاری است یا از نوع ویبره‌ای است. ابتدا با استفاده از مواد اولیه مناسب یک جرم نسوز کم‌سیمان با قابلیت استفاده در سقف کوره‌های قوس الکتریک ساخته شده [۵-۱] و اثر توزیع اندازه ذرات و میزان اسپینل [۶ و ۷] بر خواص آن بررسی شد.

واژه‌های کلیدی:

جرم آلومینا-اسپینل، جرم کم‌سیمان، دیرگدازهای ریختنی، پرکننده‌ها، توزیع اندازه ذرات.

۱- مقدمه

توسعه دیرگدازهای ریختنی کم‌سیمان (LCC)^۳ و خیلی کم‌سیمان (ULCC)^۴ در دهه ۱۹۷۰ با جایگزینی بخشی از سیمان با ذرات ریز ($1-100 \mu\text{m}$) و خیلی ریز ($< 1 \mu\text{m}$) همانند میکروسیلیس و آلومینای فعال شده آغاز شد. [۸] عملکرد خوب و اجرای موفقیت‌آمیز این نوع دیرگدازها به‌هنگام نصب و

توسعه تکنولوژی‌های جدید تولید فولاد و دیگر فلزات باعث توسعه مواد دیرگداز نیز گردیده‌است که در این راستا توجه بیشتری به دیرگدازهای ریختنی و جایگزینی آنها به جای دیرگدازهای شکل‌دار شده‌است.

به‌خاطر پارامترهای متعددی که در فرمول آنها در نظر گرفته شده‌است جهت استفاده مشکل‌ساز می‌باشد و به‌همین دلیل کمتر مورد توجه است. در حالی که مدل آندریازن بسیار ساده است ولی تا حدودی طبیعت نیمه تجربی دارد. جرم‌های دیرگداز که در سقف کوره قوس الکتریک به کار می‌روند بایستی بعضی از نیازها مانند: عملیات حرارتی سیکلی، دمای بالا و خوردگی توسط گازها را ارضا کنند.

بنابراین یک ماده دیرگداز برای این عملیات باید دارای خواص زیر باشد:

مدول گسیختگی بالا، تخلخل کم، چگالی بالا، مقاومت شوک حرارتی بالا، خاصیت نسوزندگی بالا، مقاومت خوردگی بالا، در این میان جرم‌های دیرگداز آلومینا-اسپینل خواص مطلوبی را نشان می‌دهند.

یکی از پارامترهای مهم که بر روی عمر سرویس‌دهی سقف کوره‌ها اثر دارد [۹]، مقاومت شوک حرارتی است که پودرهای ریز و افزودنی‌ها بر مقاومت شوک حرارتی مؤثر می‌باشند.

جرم‌های ریختنی آلومینا-اسپینل به‌دو صورت وجود دارد. حالت اول اینکه اسپینل غنی از آلومینا را به جرم آلومینایی اضافه می‌کنند اما در دسته دوم منیزیا را به جرم آلومینایی اضافه کرده که در حین کاربرد منیزیا با آلومینا واکنش داده و تشکیل اسپینل درجا می‌دهد [۱۰ و ۱۱].

مطالعات و نتایج حاکی از آن است که دیرگدازهای ریختنی آلومینا-اسپینل به‌علت مقاومت نفوذ سرباره و مقاومت خوردگی خوب جهت کاربرد در سقف کوره‌های قوس الکتریکی مناسب هستند. البته در توزیع اندازه ذرات اسپینل باید کنترل دقیق انجام شود.

همچنین خواص دمای بالای آنها به‌توانایی پر کردن حفرات بین سنگدانه‌ها ($> 100 \mu\text{m}$) توسط ذرات ریز و خیلی ریز دانه ترکیب نسبت داده می‌شود. پر شدن حفرات ترکیب باعث افزایش چگالی و کاهش قابل ملاحظه آب مصرفی می‌گردد. بنابراین دیرگدازهای ریختنی کم‌سیمان و خیلی کم‌سیمان خواص فیزیکی بهتری را در مقایسه با دیرگدازهای ریختنی دارای مقدار سیمان معمولی (CC)^۵ نشان می‌دهند. همچنین مشخص شده‌است که توزیع اندازه ذرات دیرگدازهای ریختنی یک عامل مهم در بهبود خواص جریان‌یابی این دیرگدازها محسوب می‌شود. ذرات ریز و خیلی ریز دانه باعث افزایش فاصله جدایش بین ذرات درشت می‌شود و در نتیجه جریان‌یابی را افزایش می‌دهند. در این نوع دیرگدازها علاوه بر توزیع اندازه ذرات و طبیعت و ویژگی مواد اولیه، نوع مواد افزودنی مورد مصرف به‌ویژه مواد پراکنده‌ساز و ضد انعقاد از اهمیت زیادی برخوردار است. دیرگدازهای ریختنی کم‌سیمان (LCC) به‌علت مقدار کم سیمان مورد استفاده (۵-۸٪) دارای استحکام‌های گرم و سرد بسیار خوبی هستند. اما به‌خاطر ساختارهای متراکم و میزان تخلخل کم در این نوع دیرگدازها مشکلاتی همانند حساسیت زیاد نسبت به خشک شدن و مقاومت انفجاری کم وجود دارد.

به‌طور کلی سیستم ماتریکس به‌عنوان جزء ریز ترکیب ($< 100 \mu\text{m}$) که شامل مواد پرکننده و سیمان آلومینات کلسیم می‌باشد، همراه با سنگدانه‌ها به‌عنوان جزء درشت ترکیب ($> 100 \mu\text{m}$) تشکیل توزیع اندازه ذرات (PSD)^۶ دیرگدازهای ریختنی را می‌دهد. هر یک از اجزاء تشکیل‌دهنده دیرگداز ریختنی محدوده مشخصی از اندازه ذرات ترکیب دیرگداز را تشکیل می‌دهد.

تاکنون مدل‌های چندی جهت بیان توزیع اندازه ذرات و طراحی دیرگدازهای ریختنی ارائه شده‌اند. این مدل‌ها که شامل فورناس^۷، فولر^۸، آندریازن^۹ و دینگر و فونک^{۱۰} می‌باشند. بر اساس فرمول‌های ریاضی که در آنها هدف کسب بیشترین تراکم و فشرده‌گی بین ذرات است، می‌باشند. مدل‌های فورناس و فولر

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مورد استفاده برای دیرگدازهای ریختنی کم‌سیمان آلومینا-اسپینل.

ترکیب شیمیایی	wt/.
Al ₂ O ₃	> ۶۸
SiO ₂	۴
CaO	۱/۸
MgO	۴/۵ - ۵/۵

جدول (۲): آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی.

مشخصات مواد اولیه مصرفی	آلومینای تبولار	میکروسیلیس ایرانی	سیمان آلومینات کلسیم	اسپینل MAS 76	آلومینا کلسینه شده
Al ₂ O ₃	≥ ۹۹/۴	< ۰/۷	۶۹/۸ - ۷۲/۲	۷۵/۳	≥ ۹۹/۵
SiO ₂	≤ ۰/۰۹	> ۹۷/۵	۰/۲ - ۰/۶	۰/۳	≤ ۰/۰۳
Fe ₂ O ₃	≤ ۰/۰۲	< ۰/۳	۰/۱ - ۰/۳	۰/۲۸	≤ ۰/۰۵
TiO ₂	-	-	< ۰/۴	-	-
K ₂ O	-	< ۰/۶	-	-	-
Na ₂ O	≤ ۰/۴	< ۰/۳	< ۰/۵	-	≤ ۰/۳
MgO	-	< ۰/۵	< ۰/۵	۲۳/۱	-
α - Al ₂ O ₃	-	-	-	-	≥ ۹۵
CaO	-	< ۰/۳	۲۶/۸ - ۲۹/۲	۰/۵	-
H ₂ O	-	-	< ۰/۸	-	-
دانشیه کلی (g/cm ³)	۳/۵	-	-	-	-
تخلخل ظاهری	≤ ۵	-	-	-	-
جذب آب	≤ ۱/۵	-	-	-	-
سطح مخصوص m ² /g	-	-	۳۸۰۰ - ۴۰۰۰	-	-

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه مصرفی

اگرگیت مصرفی در این پروژه آلومینای تبولار شرکت آلکوآ^{۱۱} است و سیمان آلومینات کلسیم (Secar 71) محصول شرکت لافارژ^{۱۲} به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده هیدرولیکی، آلومینا کلسینه شده و پودر ریز میکروسیلیس به‌عنوان پرکننده و اسپینل MAS76 استفاده گردید. آنالیز شیمیایی و فیزیکی مواد اولیه مصرفی در جدول (۲) آورده شده‌است.

تاکنون ترکیب‌های مختلفی برای جرم‌های ریختنی آلومینا-اسپینل مورد آزمایش قرار گرفته‌است. اما با توجه به منابع در این زمینه مناسب‌ترین ترکیب شیمیایی برای این دیرگدازها به‌صورت کم‌سیمان انتخاب گردید که در جدول (۱) ارائه شده‌است. جهت ایجاد ترکیب شیمیایی مورد نظر از مواد اولیه مناسب مطابق گزارشات مراجع استفاده شد.

جدول (۳): توزیع اندازه ذرات.

انواع جرم (BZ, CZ, DZ)	شماره الکها										
	$-\frac{1}{4}$ $\frac{3}{2}$	$-\frac{3}{2}$ $\frac{4}{4}$	$-\frac{4}{6}$	$-\frac{6}{8}$	$-\frac{8}{10}$	$-\frac{10}{14}$	$-\frac{14}{30}$	$-\frac{30}{60}$	$-\frac{60}{100}$	$-\frac{100}{170}$	-170
BZ سایز ذرات درشت: (۶/۳۵ mm) ۲۷٪ سایز ذرات ریز: (۰/۰۹ mm) ۳۰٪ (q=۰/۲۹)	۳	۴	۱۰	۷	۴	۷	۱۴	۱۱	۵	۵	۳۰
CZ سایز ذرات درشت: (۶/۳۵ mm) ۲۳٪ سایز ذرات ریز: (۰/۰۹ mm) ۳۵٪ (q=۰/۲۵)	۳	۴	۸	۷	۳	۶	۱۳	۱۱	۵	۵	۳۵
DZ سایز ذرات درشت: (۶/۳۵ mm) ۲۱٪ سایز ذرات ریز: (۰/۰۹ mm) ۴۰٪ (q=۰/۲۲)	۳	۳	۷	۶	۳	۶	۱۲	۱۰	۵	۵	۳۹

۲-۲- انتخاب دانه بندی مناسب

به منظور بررسی اثر توزیع اندازه ذرات بر خواص جرم های کم سیمان آلومینا- اسپینل معادلات متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت توزیع اصلاح شده آندریازن به دلیل عملی تر بودن انتخاب شد [۱۲] که به صورت زیر است:

$$CPTF = \frac{d^q - d_m^q}{D^q - d_m^q} \times 100 \quad (1)$$

d: اندازه ذرات

d_m : مینیمم اندازه ذرات

D: ماکزیمم اندازه ذرات

q: ضریب توزیع

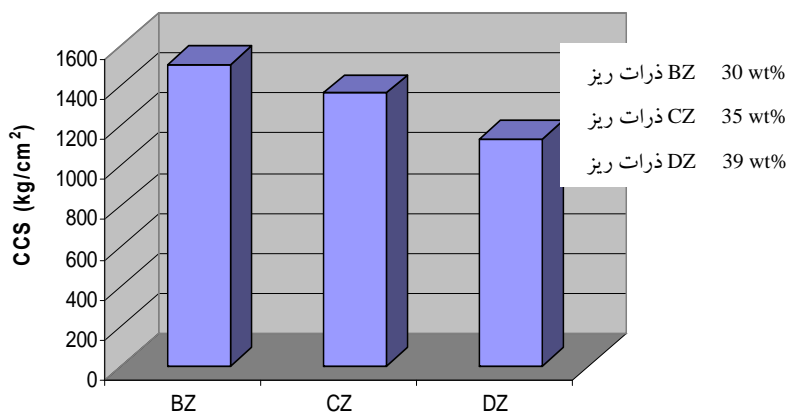
CPFT: درصد انباشتگی ذرات کوچکتر از اندازه d

بنابراین ابتدا فرمولاسیون بر اساس (q = ۰/۲۹, q = ۰/۲۵), مورد بررسی قرار گرفت، فرمولاسیون های مورد بررسی به ترتیب جدول (۳) می باشد.

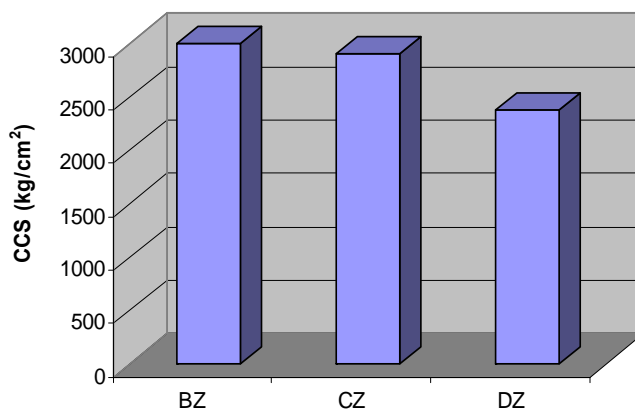
در این سه فرمولاسیون، تنها دانه بندی اگرگیته ها تغییر یافت ولی درصد بقیه مواد از قبیل میکروسیلیس و اسپینل و سیمان و آلومینای کلسینه ثابت می باشد.

بر اساس استاندارد ASTM C860 مخلوط به مدت یک دقیقه به صورت خشک و با سرعت آهسته مخلوط شد و سپس ۹۰٪ آب محاسبه شده یک چهارم دقیقه به بیج اضافه شد. مخلوط کن سپس به مدت یک دقیقه کار کرده و در خاتمه آب باقی مانده به مخلوط اضافه شد و تا رسیدن به مقدار برش مطلوب مخلوط شد که این زمان در مورد جرم های ریختنی نباید از ۵ دقیقه تجاوز کند.

پس از آماده سازی جرم، از قالب های استاندارد با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰ mm از جنس فولاد مطابق استاندارد ASTM C860 به منظور تهیه نمونه تست استحکام فشاری سرد استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا قالب ها را تا نیمه از جرم پر کرده و تحت ویبره قرار داده تا حبابها خارج شوند و سپس قالب کاملاً پر شده و دوباره تحت ویبره قرار می گیرد. لازم به ذکر است که مدت زمان ویبره نباید آنقدر کوتاه باشد که حبابها به صورت ناقص خارج شوند و نه آنقدر طولانی باشد که باعث جدایش ذرات ریز و مهاجرت آنها به سطح شود. پس از تهیه نمونه ها آنها را در رطوبت بالای ۹۰٪ به مدت زمان ۲۴ ساعت برای عمل آوری^{۱۳} نگهداری کرده، سپس آنها را از قالب خارج کرده و به مدت ۲۴ ساعت در خشک کن ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. پس از آن نمونه ها به منظور انجام عملیات حرارتی مجدد^{۱۴} آماده گردیدند.



شکل (۱): نمودار استحکام فشاری سرد بعد از خشک کردن در ۱۱۰°C.



شکل (۲): نمودار استحکام فشاری سرد بعد از پخت در ۱۵۰°C به مدت ۳ ساعت.

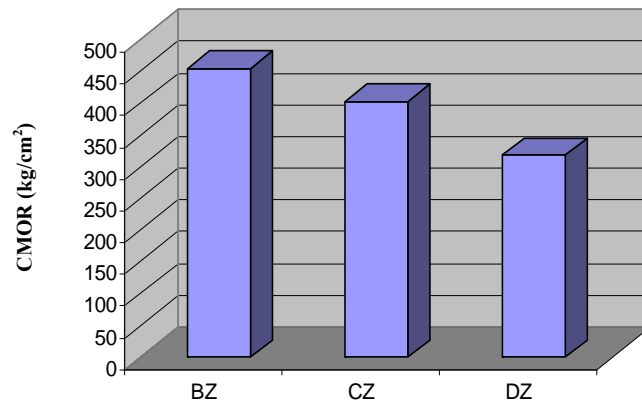
همانطور که در شکل‌های (۱) تا (۳) دیده می‌شود، با افزایش مقدار ذرات ریز در جرم دیرگداز استحکام افت می‌کند (طبق استاندارد ASTM C133-97). آزمایشات و تئوریه‌ها [۱] نشان می‌دهد که در جرم‌های با اندازه ذرات ریزتر، شکل ترک‌ها مستقیم است، در حالی که در جرم‌های با اندازه ذرات درشت‌تر، ترک‌ها به شکل شاخه‌ای است. انرژی شکست نیز معیاری از مجموع انرژی پراکنده شده در طول شکست است و افزایش آن در نتیجه افزایش میکروتِرک‌ها و ایجاد مسیرهای شکست پیچ در پیچ می‌باشد.

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- اثر ترکیب و دانه‌بندی

جرم‌های دیرگداز ریختنی شامل پودرهای ریز، اگریگیت و آب می‌باشد و خواص جرم‌ها به عواملی از قبیل میزان آب، دما، میزان روانساز و توزیع دانه‌بندی بستگی دارد. برای رسیدن به جریان‌یابی مناسب در دیرگدازهای ریختنی مقدار q بین ۰/۲۸-۰/۳ باید باشد.

با تغییر ضریب توزیع سه فرمولاسیون BZ، CZ، DZ پیشنهاد شد و با انجام تست‌های مختلف فرمولاسیون BZ به عنوان بهترین نمونه انتخاب گردید.



شکل (۳): نمودار استحکام خمشی سرد بعد از پخت در 150°C به مدت ۳ ساعت.

شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش ذرات ریز میزان آب لازم جهت رسیدن به میزان جریان‌یابی ۷۰٪ افزایش می‌یابد که همین امر می‌تواند بر کاهش استحکام مؤثر باشد.

جدول (۴) میزان دانسیته حجمی جرم‌های BZ، CZ و DZ را نشان می‌دهد. دانسیته حجمی و تخلخل باز با عوامل مختلفی مثل دانسیته تئوری اجزاء، درصد آب، توزیع اندازه ذرات و تبدیلات فازی ارتباط دارد. آبی که به جرم اضافه می‌شود، قسمتی به وسیله تخلخل‌ها جذب می‌شود و در اتصال هیدرولیک مشارکت ندارد و بخشی از آن با سیمان واکنش می‌دهد و اتصال هیدرولیک را ایجاد می‌کند. باقیمانده نیز به شکل گیری و تراکم جرم کمک می‌کند. سه مورد نمونه آزمایش از لحاظ توزیع اندازه ذرات با هم متفاوت می‌باشند و همانگونه که دیده می‌شود بیشترین میزان فشردگی را نمونه BZ دارد (شکل‌های ۵ و ۶) و میزان آب مورد نیاز جهت جریان‌یابی ۷۰ درصد در نمونه BZ از دیگر نمونه‌ها کمتر می‌باشد. این به آن معنی است که ذرات درشت‌تر آب کمتری نیاز دارند بنابراین تخلخل کمتری ایجاد شده و دانسیته بعد از پخت نیز افزایش یافته و در نتیجه مدول یانگ افزایش می‌یابد. تصویر XRD مربوط به نمونه‌های BZ در شکل (۷) نشان داده شده است.

۳-۲- اثر مقدار اسپینل

نتایج، اثر افزودن اسپینل بر خواص جرم آلومینا-اسپینل در شکل‌های (۸) تا (۱۰) ارائه شده است.

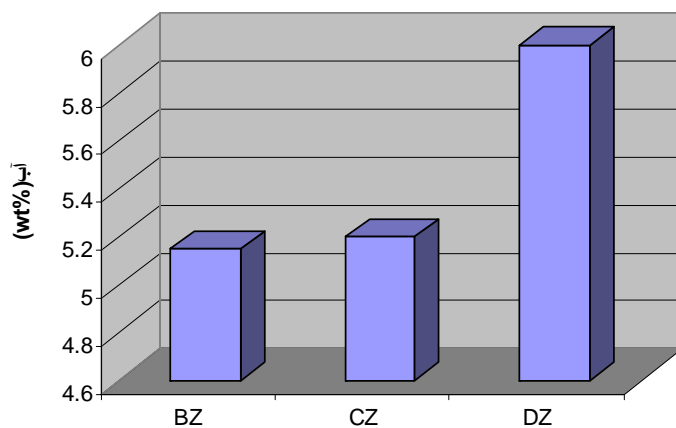
نتایج نشان می‌دهد که میزان انرژی سطح شکست جرم‌ها به مقدار و اندازه آگریگیت‌های دانه درشت بستگی دارد. در جرم‌های حاوی دانه‌های کوچک‌تر و متشکل از آگریگیت‌های دانه درشت به مقدار کمتر، شروع شکست راحت‌تر است. دو پارامتر R_{ST} و R''' برای نمایان کردن مقاومت شوک حرارتی نسوزها طبق معادلات زیر استفاده می‌شود: در این معادله E مدول یانگ، γ_{wof} انرژی سطح شکست و S مدول شکست و α ضریب انبساط حرارتی است [۱].

$$R''' = \frac{E\gamma_{wof}}{S^2(1-\nu)} \quad (2)$$

$$R_{ST} = \left(\frac{\gamma_{wof}}{\alpha E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

برای افزایش میزان انرژی سطح شکست باید جرم‌هایی با ماتریس پیوندی بالا داشته باشیم. بنابراین شروع شکست در جرم‌های متشکل از دانه‌های کوچک‌تر با مقدار کمتر از آگریگیت‌های دانه درشت آسان‌تر است.

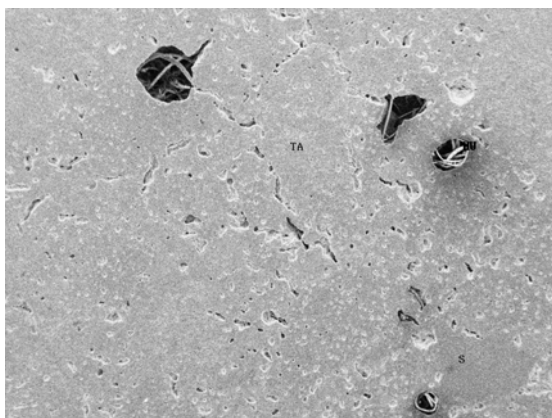
شکل (۳) ارتباط بین استحکام و ذرات ریز جرم‌ها را نشان می‌دهد. بدون در نظر گرفتن مقدار آگریگیت‌های دانه درشت جرم‌هایی که دارای ۳۵-۳۰ درصد وزنی ذرات ریز هستند، نسبت به جرم‌هایی که ۴۰ درصد وزنی ذرات ریز دارند از استحکام بالاتری برخوردارند و مقاومت شوک حرارتی آنها نیز بالاتر است.



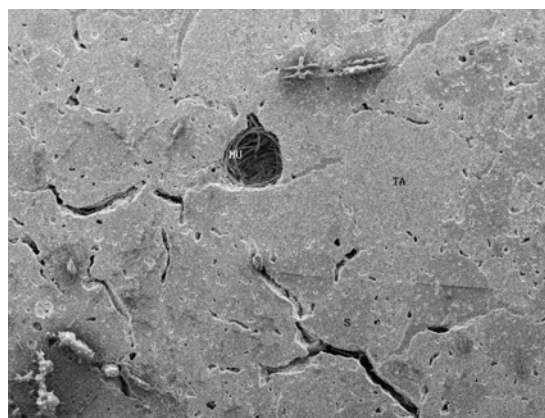
شکل (۴): نمودار آب مورد نیاز برای رسیدن به جریان یابی ۷۰٪.

جدول (۴): دانسیته حجمی جرم‌های BZ، CZ، DZ.

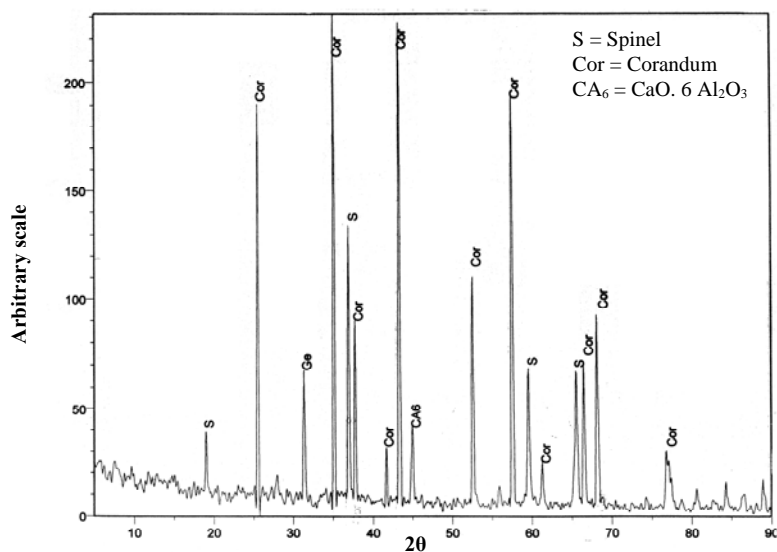
انواع جرم	دانسیته حجمی خام g/cm^3	دانسیته حجمی پخته g/cm^3
BZ	۳/۰۲	۳/۰۶
CZ	۲/۹	۳/۰۵
DZ	۲/۹	۳/۰۵



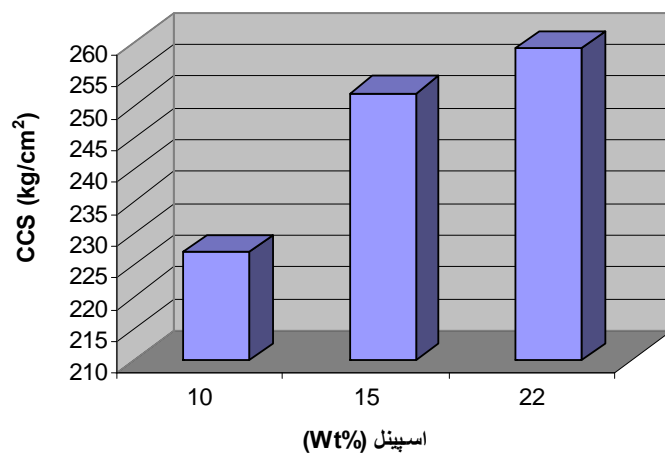
شکل (۶): تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM از سطح مقطع نمونه دیرگداز ریختنی BZ (X150).



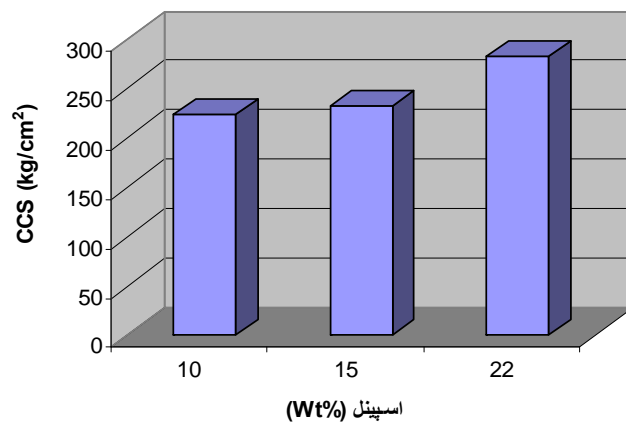
شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM از سطح مقطع نمونه دیرگداز ریختنی CZ (X110).



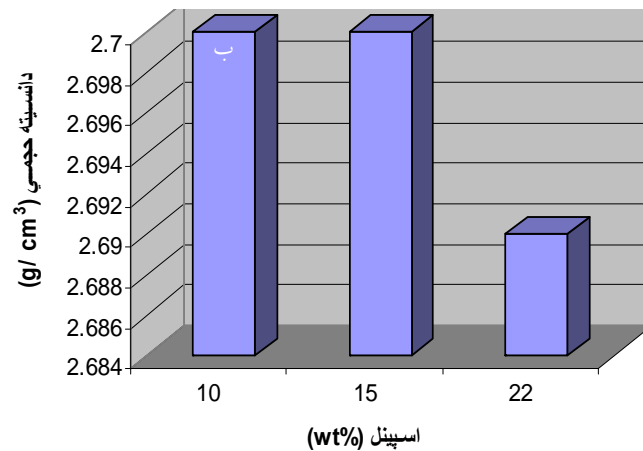
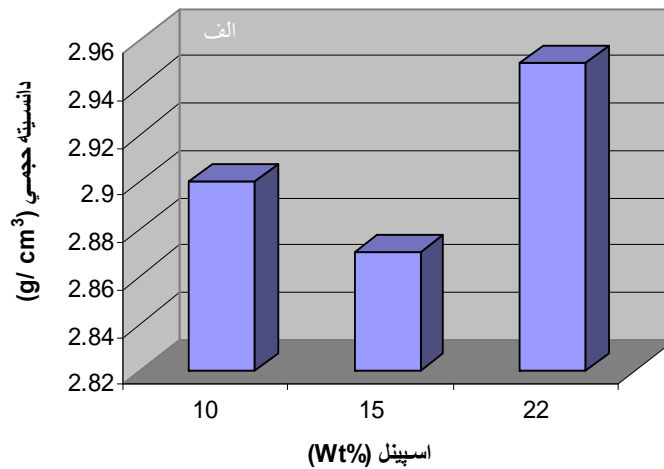
شکل (۷): الگوی پراش اشعه X نمونه دیرگداز ریختنی BZ.



شکل (۸): اثر مقدار اسپینل بر استحکام فشاری سرد جرم آلومینا- اسپینل بعد از خشک شدن در ۱۱۰ °C.



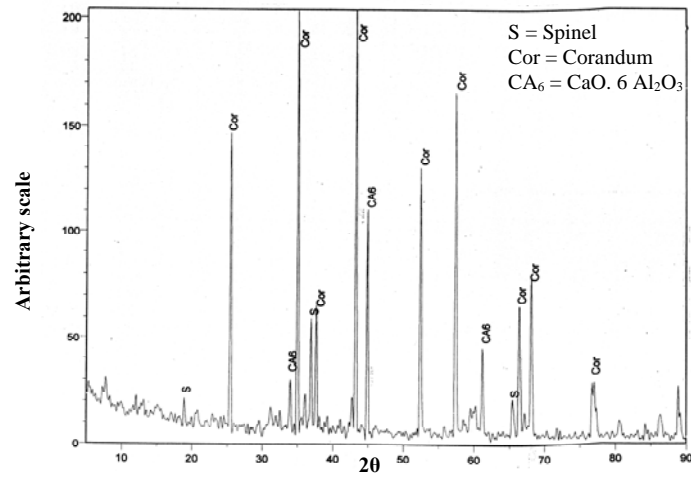
شکل (۹): اثر مقدار اسپینل بر استحکام فشاری سرد جرم آلومینا- اسپینل بعد از پخت در ۱۵۰ °C به مدت ۳ ساعت.



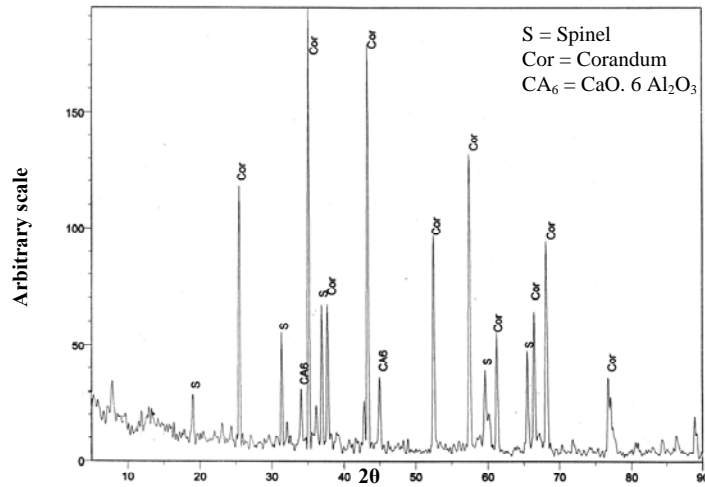
شکل (۱۰): اثر مقدار اسپینل بر میزان دانشینه حجمی جرم آلومینا-اسپینل، (الف) بعد از خشک شدن در ۱۱۰°C و (ب) بعد از پخت در ۱۵۰۰°C به مدت ۳ ساعت.

برای شکل‌گیری CA_6 استوکیومتری یک گرم CaO و $۱۰/۹۳$ گرم Al_2O_3 لازم است. یک صدگرم از جرم مورد آزمایش شامل ۶٪ سیمان می‌باشد و ۶ گرم سیمان حاوی $۴/۳$ گرم Al_2O_3 و $۱/۷$ گرم CaO است. که برای شکل‌گیری CA_6 به $۱۸/۵۸$ گرم Al_2O_3 نیاز می‌باشد. محاسبات مشخص می‌کند که جرم شامل ۲۲ درصد اسپینل $۰/۳۴$ گرم آلومینای ریزدانه ($< ۰/۰۹$ mm) برای شکل‌گیری CA_6 کمبود دارد در حالی که جرم شامل ۱۵ درصد اسپینل $۲/۹۲$ گرم Al_2O_3 ریزدانه برای شکل‌گیری CA_6 زیاد دارند.

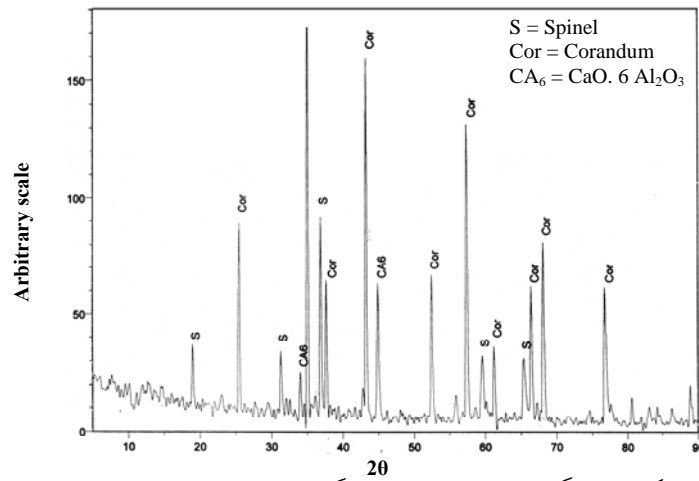
شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهد که با افزایش میزان اسپینل استحکام فشاری سرد تا حدودی افزایش می‌یابد. الگوی پراش اشعه X (XRD) (شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳) نمونه حاوی ۱۰ و ۱۵ و ۲۲ درصد وزنی اسپینل نشان می‌دهد که نمونه حاوی ۲۲ درصد وزنی اسپینل پیک مربوط به اسپینل شدت بالاتری دارد اما بر خلاف انتظار شدت پیک مربوط به CA_6 کمتر از نمونه حاوی ۱۰٪ اسپینل است و محاسبات مشخص کرد که دلیل افزایش شدت پیک مربوط به CA_6 در نمونه حاوی ۱۰٪ اسپینل به علت وجود ذرات ریز آلومینای بیشتر و در نتیجه مصرف کمتر اسپینل است.



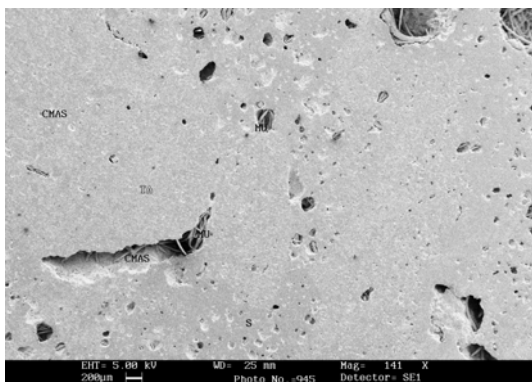
شکل (۱۱): الگوی پراش اشعه X نمونه دیرگداز ریختنی حاوی ۱۰٪ اسپینل.



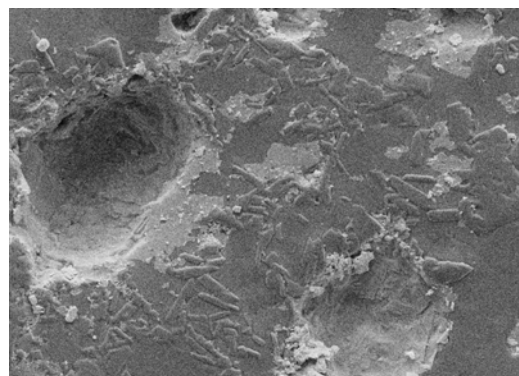
شکل (۱۲): الگوی پراش اشعه X نمونه دیرگداز ریختنی حاوی ۱۵٪ اسپینل.



شکل (۱۳): الگوی پراش اشعه X نمونه دیرگداز ریختنی حاوی ۲۲٪ اسپینل.



شکل (۱۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه دیرگداز ریختنی آلومینا-اسپینل (۱۴۰ X).



شکل (۱۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه دیرگداز ریختنی مشخص‌کننده فاز CA₆ بعد از پخت در ۱۵۰۰°C برای ۳ ساعت (۱۰۰۰ X).

۵- مراجع

- [1] Y. C. KO, "Influence of the Total Fines Content on the Thermal Shock Damage Resistance of Al₂O₃-Spinel Castables", *Ceramics International*, pp. 501-507, 2001.
- [2] J. E. Funk, D. R. Dinger, "Particle Size Control for High-Solids Castable Refractories", *Am. Ceram. Soc. Vol. 73*, No. 16, pp. 66-68, 1994.
- [3] C. F. Chan and Y. C. Ko, "Influence of Coarse Aggregate Content on the Thermal Conductivity of Alumina-Spinal Castables", *J. Am. Ceram. Soc. Vol. 11*, No. 79, pp. 2961-64, 2005.
- [4] B. Myrhe, A. Hundred, "On the Influence of Superfine in High Alumina Castables", *International Colloguium Refractories*, Eurogress Aachen, pp. 184-188, 1996.
- [5] J. Madias, R. E. Caligaris, L. Zamboni, "Post-Mortem Study of Electric Arc Furnace Roof", *Inter Cream*, Vol. 49, No. 5, 2000.
- [6] S. Mukhopadhyay, P. K. Das Poddar, "Effect of Preformed and Insitu Spinels on Microstructure and Properties of a Low Cement Refractory Castable", *Ceramics International*. Vol. 30, pp. 369-380, 2004.
- [7] Y. C. KO and C. F. Chan, "Effect of Spinel Content on Hot Strength of Alumina Spinel Castables in the Temperature Range 1000-1500°C", *J. Am. Ceram. Soc.* pp. 2633-2639, 1999.
- [8] B. Myhre, B. Sandberg, "The of Microsilica in Refractory Castables", *Proceedings of International Seminar on Monolithic Refractory Materials*, Tehran, Iran, pp. 113-140, 1997.
- [9] B. Liu, "Monolithic Roofs For UHP Furnace", *Unitcer*, pp. 322-330, 2001.

جرم شامل ۱۰٪ اسپینل ۵/۶۸ گرم آلومینای ریزدانه برای شکل‌گیری CA₆ زیاد دارند و این میزان زیادی آلومینای ریزدانه منجر می‌شود که CA₆ بیشتری تشکیل شود و چون واکنش تشکیل CA₆ با افزایش حجم همراه است:



بنابراین شاید بتوان نتیجه گرفت که میزان انبساط حرارتی تحت بار در جرم شامل ۱۰٪ اسپینل بیشتر از جرم شامل ۲۲٪ اسپینل باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی جرم آلومینا-اسپینل در شکل‌های (۱۴ و ۱۵) دیده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- تغییر دانه‌بندی اگر بیگیت یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در افزایش تراکم ذرات می‌باشد که تراکم بیشتر ذرات، بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی را به دنبال دارد. مناسب‌ترین ضریب توزیع محاسبه شده $q = ۰/۲۹$ گزارش شد.

۲- نتایج نشان داد که افزایش اسپینل به دلیل ایجاد حلقه پیوندی بین CA₆ و دانه‌های اسپینل باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی دیگرگداز ریختنی آلومینا-اسپینل می‌شود.

- [10] F. Simoni, C. Olagnon, S. Maximilien and G. Fantozzi, "Thermomechanical Behavior of High-Alumina Refractory Castables with Synthetic Spinel Additions", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 10, No. 83, pp. 2481-90, 2000.
- [11] A. M. Hundere, B. Myhre, "Substitution of Reactive Alumina with Microsilica in Low-Cement and Ultra-Low Cement Castables-Part II: the Effect of Temperature on Hot Properties", Unitecr 97 Proceedings, pp. 91-100, 1997.
- [12] R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, "Rheology and Particle-Size Distribution of Pumpable Refractory Castables", Am. Ceram. Soc, Vol. 80, pp. 52-57, 2001.

۶- پی نوشت

- 1- Cold Modulus of Rupture
- 2- Cold Crushing Strength
- 3- Low Cement Castable
- 4- Ultra Low Cement Castable
- 5- Conventional Castables
- 6- Particlesize Distribution
- 7- Furnas
- 8- Fuller
- 9- Andreasen
- 10- Dinger and Funk
- 11- Alcoa
- 12- Lafarge
- 13- Curing
- 14- Reheat