بررسی اثر افزودن آندالوزیت روی شوک‌پذیری حرارتی جرم‌های ریختنی دیرگداز تبولار آلومینایی

زهرا خلیلی اواتی[۱]، محمد رجبی[۲]، علیرضا سوری[۳]*

[۱] دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
[۲] دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
[۳] گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر

دکتر علیرضا سوری، نویسنده مسئول مقاله، عضو هیات علمی دانشگاه ملایر

arsouri@gmail.com

چکیده: در این مقاله اثر مقادیر مختلف آندالوزیت روی شوک‌پذیری حرارتی جرم‌های ریختنی دیرگداز تبولار آلومینایی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه جرم‌های دیرگداز با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد آندالوزیت ساخته شدند و بعد از عمل آوری و خشک کردن در دماهای ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پخته شدند. آزمایش‌های استحکام فشاری سرد، دانسیته کلی و تخلخل ظاهری اندازه‌گیری شدند. آزمایش مقاومت در برابر شوک حرارتی با روش دمش هوای سرد روی نمونه‌های باز پخت شده در ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. مشخصه‌یابی مورفولوژیکی و ساختاری نمونه‌ها توسط آنالیز تفرق پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. نتایج آنالیز فازی نشان می‌دهند که با حضور آندالوزیت در جرم‌های ریختنی دیرگداز تبولار آلومینایی فاز مولایت تشکیل شده است. وجود فاز مولایت باعث بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است. همچنین نتایج آزمایش مقاومت در برابر شوک حرارتی برای نمونه‌ی با مقدار ۱۰ درصد وزنی آندالوزیت بالاترین کاهش درصد استحکام خمشی سرد از ۷۳/۹۵ درصد به ۵۷ درصد را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: جرم دیرگداز آلومینایی، شوک‌پذیری حرارتی، آندالوزیت، مولایت.

۱- مقدمه

امروزه تولید مواد دیرگداز با کیفیت بهتر و طول عمر بیشتر برای صنایع مصرف کننده دیرگداز مانند صنایع آهن و فولاد، صنایع سیمان و انواع کوره‌های صنعتی از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. دیرگدازهای مونولیتیک به دلیل مقاومت بالایی که در برابر شوک حرارتی و واکنش‌های شیمیایی دارند، به طور وسیع در آستر کوره‌های قوس الکتریکی، پاتیل‌ها و تاندیش‌های ریخته‌گری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. مزایای دیرگدازهای مونولیتیک باعث افزایش تمایل به مصرف این گروه از مواد و جایگزینی تدریجی آن‌ها به جای دیرگدازهای شکل‌دار شده است [۲]. فرآورده‌های دیرگداز ممکن است حین کار تحت شوک حرارتی قرارگیرند. برای جلوگیری از ترک برداشتن و شکسته شدن و به دست آوردن حداکثر عمر، لازم است که محصولات دیرگداز شوک‌پذیری حرارتی مناسبی با توجه به محل مصرف داشته باشند. مقاومت در برابر شوک حرارتی به شاخص‌های فیزیکی ماکروسکوپی مانند استحکام، مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی وابسته است. علاوه بر این‌ها عوامل درونی مانند ساختار مواد، اندازه‌دانه، شکل و توزیع نقص داخلی نیز تأثیرگذار است [۳].

یکی از راه‌های بهبود خواص جرم‌های ریختنی کم سیمان پایه آلومینایی، تشکیل فاز مولایت در ساختار آن‌ها می‌باشد که در رشد و توسعه این دیرگدازها اهمیت بسزایی دارد. به دلیل دمای ذوب بالای مولایت (۱۸۵۰ درجه سانتی‌گراد)، هدایت حرارتی و انبساط حرارتی پایین، استحکام بالا، پایداری حرارتی و شیمیایی خوب و سرعت خزش پایین مولایت، این ماده فازی مطلوب و قابل توجه در صنعت دیرگداز می‌باشد [۴و۵]

یکی از مینرال‌های آلومینوسیلیکاتی که قابلیت مولایت‌زایی بالایی دارد، آندالوزیت می‌باشد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.5.4]

آندالوزیت یک مینرال آلومینوسیلیکاتی با ساختار بلوری اورتورومبیک است ودارای خواصی همچون پایداری حجمی مناسب در دمای بالا، استحکام مکانیکی بالا، مقاومت به شوک‌حرارتی و مقاومت به خزش می‌باشد [۶]. مهم‌ترین خصوصیاتی که آندالوزیت را از دیگر آلومینوسیلیکات‌ها متمایز می‌سازد نسبت مناسب آلومینا به سیلیس موجود در ماده جهت تشکیل فاز مولایت، استحاله آسان و برگشت ناپذیر به مولایت و قیمت مناسب آن می‌باشد [۷].

در این پژوهش، بهبود شوک‌پذیری حرارتی جرم‌های دیرگداز آلومینا بالای کم سیمان با افزودن درصدهای مختلف آندالوزیت مورد بررسی قرارگرفته است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه شامل تبولار آلومینا، راکتیو آلومینا، سیمان سکار ۷۱ و آندالوزیت می‌باشد که در جدول ۱ترکیب شیمیایی آنها نشان داده شده است.

جدول ۱- آنالیزشیمیایی مواد اولیه استفاده شده برای ساخت جرم ریختنی دیرگداز

	آلومینای تبولار	آلومینای راکتیو	آندالوزیت	سیمان سکار ۷۱
Al_2O_3	۹۸/۸۸	۹۹/۴۹	۵۹/۱	≥۶۸,۵
SiO_2	۰/۰۷	-	۳۸/۵	۰/۸
Fe_2O_3	۰/۰۵	-	۰/۸	۰/۴
TiO_2		-	۰/۲۵	۰/۴
Na_2O	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۱	-
K_2O		۰/۰۱	۰/۳	-
MgO		-	۰/۱۵	۰/۵
CaO	۰/۰۸	-	-	≤۳۱
$SO_۳$	۰/۰۷	-	-	۰/۳
LOI	۰/۵	۰/۲۳	۰/۷	-

۲-۲-اختلاط و آماده‌سازی جرم‌های ریختنی

مواد اولیه بعد از توزین با ترازوی با دقت ۰/۱ گرم، در یک میکسر هوبارت دو دقیقه اختلاط خشک و ۳ دقیقه اختلاط تر شدند. سپس جرم‌ها در قالب ریخته شده و روی میز ویبره تحت عمل لرزش به مدت یک دقیقه با فرکانس ۵۰HZ ساخته شدند. نمونه‌ها در محفظه‌ای با رطوبت ۹۰٪ به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس همه نمونه‌ها در دمای۱۱۰درجه سانتی‌گراد خشک و در سه دمای ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت پخت شدند.

۲-۳- آزمایش‌ها و مشخصه‌یابی

دانسیته بالک، تخلخل باز، استحکام خمشی سرد مطابق استاندارد ASTM روی نمونه‌های استاندارد انجام شد. برای اندازه گیری شوک حرارتی نمونه‌هایی به شکل شمش ساخته شدند پس از پخت در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، برای انجام سیکل‌های حرارتی آماده شدند. بدین صورت که نمونه‌ها در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه حرارت دیدند و سپس از کوره خارج شده و تحت دمش هوای سرد به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند. این سرد و گرم کردن ۵ بار تکرار شد و پس از آن از نمونه‌ها

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.5.4]

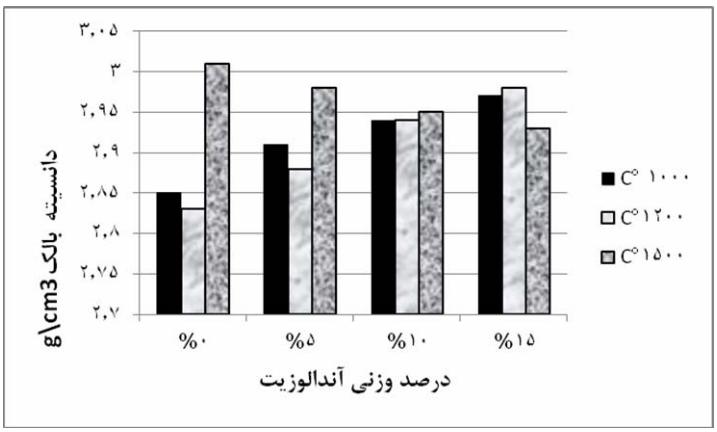
آزمون استحکام خمشی سرد گرفته شد. به منظور ارزیابی ساختاری و فازی نمونه‌ها بعد از پخت در دماهای ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، آنالیز تفرق پرتو ایکس (XRD) به‌کار گرفته شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت مشخصه‌یابی نمونه‌های بالک استفاده شد. با استفاده از تصاویر حاصل، اثر افزودن آندالوزیت و حضور یا عدم حضور فاز مولایت مورد بررسی قرارگرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر آندالوزیت بر روی دانسیته بالک و تخلخل ظاهری جرم‌های ریختنی

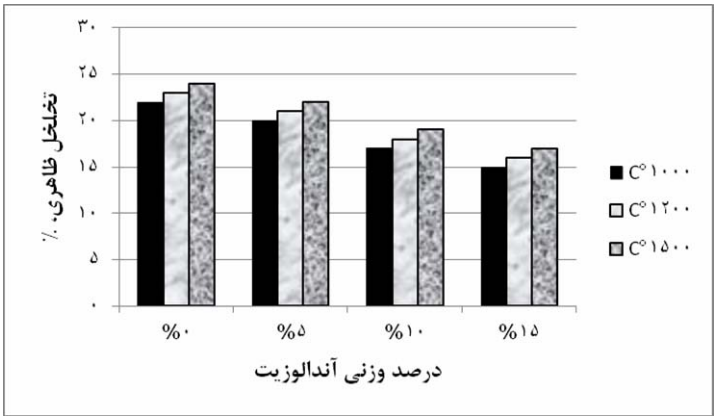
دانسیته بالک و تخلخل ظاهری دو پارامتر مهم در بحث جرم‌های ریختنی دیرگداز هستند. در شکل ۱ اثر افزودن آندالوزیت روی دانسیته بالک جرم های آلومینایی کم سیمان نشان داده شده است.

در محدوده دمایی ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد که نمونه‌ها پخت شدند دو عامل روی دانسیته تأثیر می‌گذارد. عامل اول حذف فازهای هیدراته CAH_{10} و AH_3 و خروج مواد فرار است که باعث کاهش دانسیته می‌شود [۴]. از طرفی با افزایش بیشتر دما تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد عامل دوم که زینترینگ می‌باشد منجر به افزایش دانسیته می‌گردد. بنابراین در نمونه‌های ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪، علت کاهش دانسیته را می‌توان غلبه عامل اول دانست و در نمونه ۱۵٪، افزایش درصد آندالوزیت سبب افزایش میزان فاز شیشه شده که از طریق کمک به انجام زینترینگ و پر کردن حفرات بر عامل اول غلبه نموده و دانسیته را افزایش می‌دهد.



شکل ۱- دانسیته بالک نمونه‌های مختلف در دماهای پخت متفاوت

تخلخل ظاهری نمونه‌ها در دماهای مختلف با افزایش درصد آندالوزیت در شکل ۲ نشان داده شده است، میزان تخلخل ظاهری به علت پر شدن حفرات توسط فاز شیشه کاهش می‌یابد و با افزایش دما تخلخل ظاهری مقدار جزئی افزایش داشته است. در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت کامل شدن زینترینگ درصد تخلخل ظاهری تمام نمونه‌ها به یک مقدار تقریبا ثابت می‌رسد.

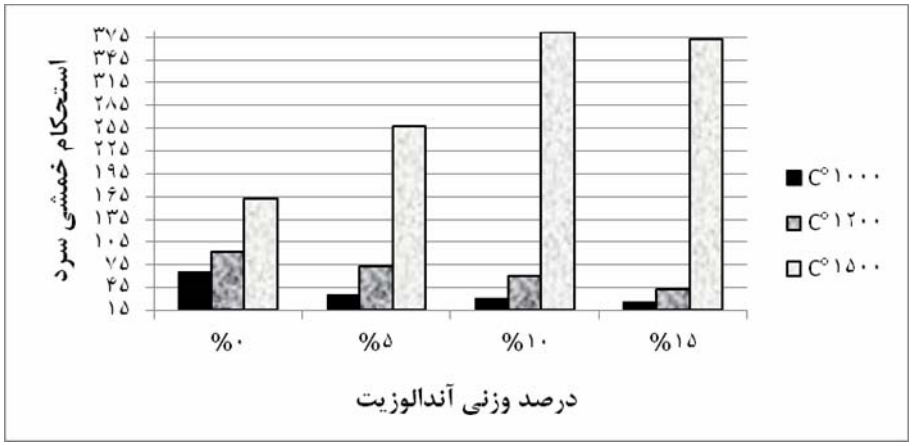


شکل ۲- تخلخل ظاهری نمونه‌های مختلف در دماهای پخت مختلف

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.5.4]

۳-۲- اثر افزودن آندالوزیت روی مقاومت به شوک حرارتی

استحکام خمشی سرد نمونه‌ها در دماهای مختلف و در درصدهای وزنی مختلف آندالوزیت اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- استحکام خمشی سرد نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف آندالوزیت در دماهای پخت متفاوت

نتایج شکل ۳ مربوط به استحکام خمشی سرد قبل از وارد شدن شوک حرارتی به نمونه‌ها است. بعد از تحمل سیکل‌های حرارتی نیز مقدار استحکام خمشی سرد در ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری گردید. درصد کاهش مقدار استحکام خمشی سرد نمونه‌ها با مقادیر مختلف آندالوزیت در دمای پخت اولیه ۱۵۰۰ درجه‌سانتی‌گراد در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲-درصد کاهش استحکام خمشی سرد پس از شوک حرارتی

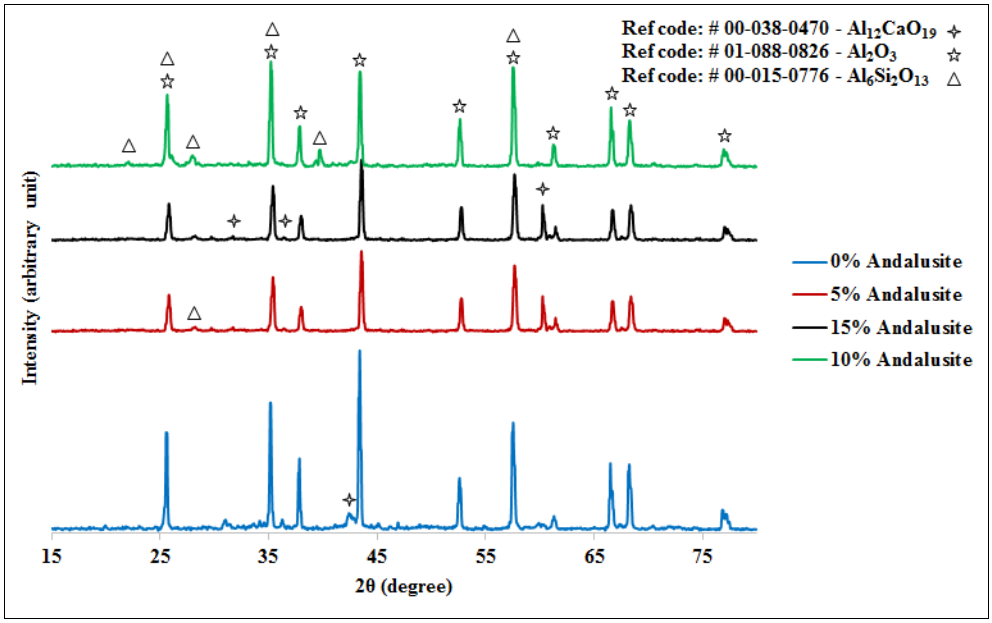
مشخصه نمونه‌ها، مقدار آندالوزیت	٪کاهش استحکام خمشی سرد (MOR)
٪۰	**۷۳/۹۵**
٪۵	**۶۸/۰۷**
٪۱۰	**۵۷**
٪۱۵	**۵۷/۷۱**

همانگونه که در جدول مشاهده می‌گردد با افزایش مقدار اندالوزیت تا ۱۰ درصد وزنی روند کاهش استحکام خمشی سرد بهبود یافته است و در ۱۵ درصد اندالوزیت این روند کاهشی متوقف شده است.

برای درک بهتر اثر آندالوزیت روی بهبود شوک پذیری حرارتی آنالیز فازی (XRD) برای نمونه‌هایی که در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پخت شدند انجام شد. با افزایش درصد آندالوزیت تا ۱۰ ٪، مقدار مولایت در نمونه‌ها بیشتر تشکیل می‌گردد که در شکل ۴ افزایش شدت پیک‌های ظاهر شده مولایت در آنالیز پراش پرتو ایکس بیانگر همین موضوع هست.

نکته قابل توجه آن است که با افزایش آندالوزیت تا ۱۵٪ از تعداد و شدت پیک‌های مولایت کم شده‌است، که بنظر می‌رسد احتمالا مقدار فاز شیشه بالاتر در سیستم تشکیل شده و باعث جلوگیری از تشکیل مولایت بیشتر شده است.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.5.4]



شکل ۴- الگوی XRD نمونه‌های مختلف در دمای پخت ۱۵۰۰ درجه‌سانتی‌گراد

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر درصدهای مختلف آندالوزیت روی شوک پذیری حرارتی جرم‌های ریختنی تبولار آلومینایی کم سیمان بررسی گردید و نتایج نشان می‌دهند که با افزایش آندالوزیت تا ۱۰ درصد وزنی در این نوع جرم‌ها باعث بهبود کاهش استحکام خمشی سرد نمونه‌ها تا حدود ۱۷ درصد بعد از اعمال شوک حرارتی شده است. نتایج الگوهای پراش اشعه ایکس در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهند که در نمونه حاوی ۱۰ درصد آندالوزیت بیشترین فاز مولایت تشکیل شده که با توجه به ویژگی‌های فاز مولایت باعث بهبود بیشتر شوک پذیری حرارتی گردیده است.

مراجع

[1] Rahid, C. A., "Refractories; manufacture, properties, application", India, 1986.
[2] Myrhe, B. et al, "On the influence of superfines in high Alumina castables", proceeding of international colloquium on refractories, vol. 45, pp. 184-188, 1996.
[3] Zhang Wei."Research on thermal shock resistance of mullite-bauxite-silicon carbide refractoy castable", Chin. J. Geochem, vol 31, pp.204-208, 2013.
[4] Zawrah, M.F., Kalil N.M., "Effect of Mullite formation on properties of Refractory castable".,Ceramic International,.vol 27. pp.689-694,2001.
[5] H.Schneider,et.al.,"Structure and properties of mullite-A review".,journal of The European Ceramic Society, vol 28. p.p. 329-344, 2008.
[6] Roy Hagen,et al,."Mullite Formation, High Temprature properties of Andalusite Alumina Based LCC and ULCC"., UNITERCR,2009.
[7] C.Odegard, et al,."Mullite-Bonded castable With Andalusite as agregate"., International colloquium on Refractories,1998.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.5.4]