

بهینه‌سازی خواص مکانیکی جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا از طریق اصلاح فرمولاسیون / مطالعه کاربردی در صنعت گاز و پتروشیمی

علیرضا رحیمی*

کارشناس ارشد مکانیک، واحد مهندسی معکوس و ساخت کالا، شرکت پتروشیمی بوشهر، عسلویه، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: al.rahimi@bupc.ir

مقاله کاربردی

صفحه ۹۰ - ۱۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

چکیده

در واحدهای ریفرمر صنایع گاز و پتروشیمی، قطعات نسوز محافظ اطراف نازل‌ها در معرض دماهای بالا، شوک‌های حرارتی و محیط‌های خورنده قرار دارند و وابستگی به مواد نسوز وارداتی یکی از چالش‌های مهم صنعتی در این حوزه محسوب می‌شود. در این پژوهش، به منظور بومی‌سازی و بهبود عملکرد مکانیکی، مهندسی معکوس یک جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا انجام و فرمولاسیون آن با رویکردی فنی-اقتصادی بهینه شد. در ترکیب پیشنهادی از آندالوزیت به عنوان منبع آلومینا استفاده شد و ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به عنوان عامل معدن‌ساز جهت تسریع تشکیل فاز مولایت استفاده شد. همچنین به جای سیستم سیمانی متعارف از بایندرهای نانویی استفاده گردید که منجر به کاهش CaO و بهبود تراکم ریزساختاری شد. نمونه‌های تولیدی مطابق استانداردهای ASTM C133، C113 و ISO 5017 مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه بومی ضمن حفظ دمای سرویس ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، دارای چگالی حجمی ۲/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، استحکام فشاری سرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تغییر طول خطی دائمی ۰/۸ درصد در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین حدود ۳۳ درصد کاهش هزینه نسبت به نمونه وارداتی حاصل شد. این نتایج نشان می‌دهد ترکیب ارائه شده می‌تواند جایگزینی قابل اعتماد و اقتصادی برای کاربردهای دما بالا در صنعت پتروشیمی باشد.

کلید واژه‌ها: مهندسی معکوس، نسوز ریختنی، نازل ریفرمر، آلومینا، آندالوزیت، بایندرهای نانویی

۱. مقدمه

تجهیزات فرآیندی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، به‌ویژه ریفرمرها، به‌طور مداوم در معرض شرایط عملیاتی شدید شامل دماهای بالا، شوک‌های حرارتی و محیط‌های خورنده قرار دارند. در چنین شرایطی، انتخاب مواد نسوز مناسب نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری عملکرد واحدهای فرآیندی و جلوگیری از توقف‌های ناخواسته تولید دارد. در این میان، قطعاتی نظیر مافل‌بلاک‌های^۱ نازل ریفرمر به عنوان لایه محافظ در برابر تماس مستقیم شعله و اجزای فلزی عمل کرده و از بروز آسیب‌های حرارتی و مکانیکی جلوگیری می‌کنند. از این رو، طراحی و انتخاب نسوزهای ریختنی^۲ با خواص

1. Muffle Block

2. Castable Refractories



مکانیکی مناسب، پایداری حرارتی بالا و مقاومت مطلوب در برابر خزش و شوک حرارتی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مواد نسوز آلومینایی به دلیل دارا بودن درصد بالای اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، پایداری فازی مناسب، مقاومت در برابر خزش در دماهای بالا و مقاومت مطلوب در برابر سایش و خوردگی شیمیایی، به‌طور گسترده در کاربردهای دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که بهبود عملکرد ترمومکانیکی این مواد عمدتاً از طریق اصلاح ترکیب شیمیایی، کنترل ریزساختار و مدیریت فازهای تشکیل‌شده در طی فرآیند زینترینگ حاصل می‌شود [۲-۳]. در واقع، کنترل ریزساختار و فازهای ثانویه یکی از عوامل کلیدی در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی نسوزهای آلومینا بالا محسوب می‌شود.

یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد نسوزهای آلومینایی، استفاده از مواد معدنی حاوی آلومینا نظیر آندالوزیت است. آندالوزیت در محدوده دمایی حدود ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به فاز مولایت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) و سیلیس تبدیل می‌شود که تشکیل مولایت درجا می‌تواند موجب بهبود پایداری حجمی، استحکام فشاری سرد، افزایش استحکام مکانیکی و ارتقای مقاومت خزشی گردد [۴]. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که توزیع مناسب اندازه ذرات آندالوزیت و کنترل شرایط حرارتی می‌تواند موجب تشکیل مؤثرتر فاز مولایت و بهبود رفتار ترمومکانیکی نسوزها شود [۵]. علاوه بر این، بررسی‌های انجام‌شده در سیستم‌های نسوز آلومینایی نشان داده است که حضور آندالوزیت در ترکیب می‌تواند به کاهش تنش‌های حرارتی داخلی و افزایش دوام قطعات نسوز در شرایط عملیاتی شدید کمک کند [۶-۷].

با توسعه صنایع دمای بالا، به‌ویژه در صنایع فولاد و پتروشیمی، نیاز به نسوزهایی با محتوای آلومینا بالاتر و پایداری حرارتی بیشتر افزایش یافته است. در پاسخ به این نیاز، توسعه نسوزهای ریختنی آلومینا بالا با فاز غالب آلفا آلومینا مورد توجه قرار گرفته است که قادر به تحمل دماهایی تا حدود ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند [۱]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از آندالوزیت در چنین سیستم‌هایی می‌تواند با تشکیل مولایت درجا موجب بهبود استحکام مکانیکی و مقاومت دمای بالا شود [۸-۹]؛ بنابراین استفاده هدفمند از منابع آلومینوسیلیکاتی می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی ریزساختار و خواص عملکردی نسوزهای آلومینا بالا ایفا کند.

در کنار انتخاب ماده اولیه مناسب، نوع سیستم بایندر نیز نقش مهمی در عملکرد نسوزهای ریختنی ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر، تحول قابل‌توجهی از نسوزهای شکل‌دار به سمت مواد نسوز بدون شکل یا ریختنی رخ داده است، زیرا این مواد امکان نصب آسان‌تر، کاهش زمان تعمیرات و تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌کنند [۱۰]. در همین راستا، سیستم‌های ریختنی با سیمان کم (LCC)، فوق‌العاده کم (ULCC) و حتی بدون سیمان توسعه یافته‌اند تا میزان فازهای کم‌ذوب ناشی از حضور CaO کاهش یابد [۱۰]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که حضور CaO ناشی از سیمان آلومیناتی می‌تواند در دماهای بالا با اجزای ماتریس نسوز واکنش داده و فازهای با نقطه ذوب پایین تشکیل دهد که این امر موجب کاهش مقاومت به خوردگی و افت پایداری حرارتی می‌شود. از این رو روند توسعه نسوزهای ریختنی به سمت سیستم‌های کم‌سیمان و حتی بدون سیمان مبتنی بر بایندرهایی ژلی یا سل-ژل در حال حرکت است [۱۱].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از بایندرهایی مبتنی بر نانو می‌تواند موجب ایجاد ریزساختار متراکم‌تر و افزایش استحکام مکانیکی نسوزها شود. در این سیستم‌ها، ذرات نانومتری به‌صورت سوسپانسیون‌های سرامیکی عمل کرده و پس از پخت موجب ایجاد شبکه پیوندی قوی و پایدار در ماتریس نسوز می‌شوند [۱۲-۱۴]. پژوهش‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که استفاده از بایندرهایی نانویی در جرم‌های ریختنی موجب کاهش تخلخل، افزایش چگالی ظاهری و بهبود مقاومت در برابر شوک حرارتی می‌شود [۱۵-۱۶].

از سوی دیگر، استفاده از افزودنی‌های فعال نظیر اکسید تیتانیوم (TiO_2) به‌عنوان عامل معدن‌ساز می‌تواند در تسریع واکنش‌های زینترینگ و تشکیل فازهای پایدار نقش مهمی ایفا کند. مطالعات نشان داده‌اند که حضور TiO_2 می‌تواند از طریق کاهش انرژی فعال‌سازی واکنش‌ها و ایجاد فاز مایع‌گذرا، فرآیند تراکم ساختاری را تسهیل کند [۱۷-۱۸]. با این حال، افزایش بیش از حد این افزودنی ممکن است منجر به تشکیل فازهای ناپایدار و افت خواص دمای بالا گردد؛ بنابراین تعیین مقدار بهینه آن در ترکیب نسوز اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۱، ۱۹]. علاوه بر ترکیب شیمیایی و سیستم بایندر، رفتار عملکردی نسوزها در شرایط عملیاتی واقعی نیز اهمیت زیادی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که کنترل تخلخل و نفوذپذیری در ساختار نسوزهای ریختنی می‌تواند نقش مهمی در افزایش



دوام و مقاومت در برابر تخریب حرارتی ایفا کند [۲۰]. همچنین برخی تحقیقات نشان داده‌اند که رابطه مستقیمی میان ریزساختار نسوز و عملکرد آن در شرایط صنعتی وجود دارد [۱۹]. از این رو، بررسی هم‌زمان ترکیب، تراکم ساختاری و خواص مکانیکی می‌تواند درک بهتری از عملکرد واقعی نسوزها در شرایط عملیاتی فراهم کند.

در بسیاری از مجتمع‌های صنعتی کشور، همچنان وابستگی قابل توجهی به واردات برخی قطعات نسوز پیشرفته وجود دارد. در چنین شرایطی، مهندسی معکوس این قطعات می‌تواند ضمن کاهش وابستگی، به انتقال دانش فنی و بهینه‌سازی عملکرد مواد در شرایط عملیاتی ویژه هر واحد فرآیندی کمک کند.

باوجود مطالعات متعدد در زمینه بهبود خواص نسوزهای آلومینایی، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده اثر عوامل مختلفی مانند نوع ماده اولیه، افزودنی‌های معدنی یا سیستم بایندر را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند. در مقابل، بررسی اثر هم‌زمان این عوامل در قالب یک فرمولاسیون واحد و در چارچوب یک کاربرد صنعتی مشخص، به‌ویژه در قطعات حساس ریفورمرهای صنایع نفت و پتروشیمی، محدود گزارش شده است.

مروری بر مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در زمینه بهبود خواص نسوزهای آلومینا بالا و عوامل مؤثر بر عملکرد آن‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مرور مطالعات و ارائه خلاصه نتایج پژوهش‌های گذشته

شماره مرجع	موضوع مطالعه	خلاصه نتیجه پژوهش
[۱]	خواص نسوزهای آلومینا بالا	پایداری فازی عالی در دماهای بالا
[۲]	کاربرد آندالوزیت در نسوزهای آلومینایی	افزایش پایداری حرارتی و کنترل ریزساختار
[۳]	تشکیل مولایت در نسوزهای ریختنی	بهبود استحکام مکانیکی ناشی از شبکه مولایتی
[۴]	استفاده از آندالوزیت در نسوزهای آلومینا بالا	بهبود رفتار ترمومکانیکی و پایداری ابعادی
[۵]	بهینه‌سازی توزیع ذرات آندالوزیت	ارتقای استحکام فشاری سرد و مقاومت خزشی
[۶]	اثر نانو-باند‌ها در سیستم‌های آلومینوسیلیکاتی	کاهش تخلخل و افزایش تراکم ماتریکس
[۷]	رفتار جرم‌های نسوز با باند سیلیکا سول	بهبود خواص مکانیکی در دماهای بالا
[۸]	سیستم‌های بدون سیمان	بهبود پایداری در برابر محیط‌های خورنده
[۹]	سنتز بایندر آلومینا-سیلیکا به روش سل-ژل	ایجاد پیوند قوی در دمای پایین و متوسط
[۱۰]	روند توسعه نسوزهای کم‌سیمان	کاهش فازهای کم‌ذوب و افزایش پایداری حرارتی
[۱۱]	مقایسه بایندهای سیمانی و ژلی	افزایش مقاومت در برابر شوک حرارتی در سیستم‌های ژلی
[۱۲]	ساختاردهی جرم‌های ریختنی	ایجاد ساختار متراکم و کاهش نفوذپذیری
[۱۳]	کاربرد نانوذرات در جرم‌های نسوز	کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی
[۱۴]	مکانیزم‌های پیوند نانویی	افزایش چگالی ظاهری و مقاومت مکانیکی
[۱۵]	استفاده از مواد بازیافتی در نسوزها	تائید امکان استفاده از مواد جایگزین با حفظ عملکرد
[۱۶]	اثر افزودنی‌های معدنی بر نسوزها	تسهیل واکنش‌های فازی در زینترینگ
[۱۷]	نقش TiO_2 در تشکیل فازهای پایدار	تسریع واکنش زینترینگ و تراکم ساختاری
[۱۸]	نانو-مولایت در سیستم‌های ریختنی	افزایش چشمگیر استحکام در دمای بالا
[۱۹]	تعیین مقدار بهینه TiO_2	مدیریت تشکیل فاز مایع و پایداری دمای بالا
[۲۰]	نفوذپذیری جرم‌های ریختنی	اهمیت تراکم ریزساختار در افزایش دوام صنعتی

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف مهندسی معکوس و بهینه‌سازی فرمولاسیون یک جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا مورد استفاده در مافل‌بلاک‌های نازل ریفرورمر انجام شده است. در این تحقیق، یک سیستم بومی مبتنی بر اصلاح ترکیب شیمیایی و نوع بایندر طراحی و عملکرد آن از نظر خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی با نمونه مرجع خارجی مقایسه شده است.

نوآوری این پژوهش در ارزیابی هم‌زمان سه راهبرد بهینه‌سازی شامل بهره‌گیری از منبع جایگزین آلومینا، استفاده از عامل معدن‌ساز به مقدار بهینه و حذف سیستم سیمانی مرسوم از طریق به‌کارگیری بایندر نانویی در قالب یک کاربرد صنعتی واقعی است. برخلاف مطالعات پیشین که این عوامل را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند، در این تحقیق اثر هم‌زمان آن‌ها در چارچوب مهندسی معکوس یک قطعه عملیاتی ارزیابی شده است.

۲. مشخصات فنی و عملکردی نمونه مرجع خارجی

این فصل به تفصیل الزامات فنی استخراج‌شده از دیتاشیت و نمونه‌ی اصلی خارجی می‌پردازد و مشخصه‌های شیمیایی، فیزیکی و عملیاتی آن را به‌صورت طبقه‌بندی‌شده ارائه می‌دهد. نتایج این بررسی در (جدول ۲) آمده‌اند.

الزامات شیمیایی قطعه مرجع برای تضمین پایداری حرارتی و مقاومت نسوز در برابر شرایط فرآیندی ریفرورمر و دمای سرویس حداقل ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد حیاتی‌اند. همان‌گونه که در اطلاعات سازنده و (جدول ۲) مشاهده می‌شود، ترکیب شیمیایی نمونه بر پایه آلومینای تبلار^۱ و آندالوزیت با داشتن حداقل ۶۰ درصد اکسید آلومینیوم و حداکثر ۱/۵ درصد اکسید آهن استوار است. وجود حداقل ۶۰ درصد آلومینا و تشکیل فاز مولایت حاصل از واکنش آلومینا و سیلیکا در دماهای بالا موجب افزایش پایداری ابعادی و مقاومت خزشی نسوز می‌شود [۱].

جدول ۲. مشخصه‌های شیمیایی، فیزیکی و عملکردی مرجع خارجی

مشخصه	مقدار
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۶۰ <
SiO ₂ (درصد وزنی)	۳۱ >
Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۱/۵ >
CaO (درصد وزنی)	۴/۲ تا ۲/۸
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	۱۷۰۰ <
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	≥ ۲/۲
تغییر طول خطی دائمی در ۲۴ ساعت (درصد)	۱ (در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد)
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۵۰۰ <

محدوده‌ی مجاز CaO در این نمونه بین ۲/۸ تا ۴/۲ درصد تعیین شده است که ناشی از حضور بایندر سیمان آلومینایی در سیستم ریختنی است. حضور این فاز علاوه بر ایجاد پیوند اولیه در مرحله هیدراتاسیون، می‌تواند به‌عنوان فاز کمک‌ذوب در فرآیند زینترینگ نیز عمل کند. با این حال افزایش بیش از حد CaO ممکن است منجر به تشکیل فازهایی نظیر آنورتیت شده و در نتیجه پایداری حرارتی و مقاومت خزشی نسوز را کاهش دهد [۳، ۱۰].

عملکرد قطعه در دمای سرویس، اصلی‌ترین شاخص ارزیابی و تأیید کیفیت آن به‌شمار می‌رود. از دیدگاه فیزیکی، چند ویژگی کلیدی تعیین‌کننده رفتار نسوز در شرایط کاری هستند. چگالی حجمی قطعه مرجع حداقل ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تعیین شده است که به معنای کاهش تخلخل و به‌تبع آن، افزایش مقاومت در برابر نفوذ مواد مذاب است. استحکام فشاری سرد بالای ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، نشان‌دهنده‌ی توان مکانیکی مناسب در برابر تنش‌های فشاری است.

از سوی دیگر، پایداری ابعادی در دماهای بالا برای جلوگیری از ایجاد ترک و جداسازی مکانیکی و در نهایت نشت حرارت ضروری است. در این زمینه، تغییر طول خطی دائمی قطعه، معیار مهمی محسوب می‌شود که مقدار ارائه شده در دیتاشیت نمونه مرجع، نشان‌دهنده کنترل این مقدار در محدوده مجاز و مطابقت با الزامات استاندارد ASTM C113 است [۲۱].

علاوه بر آن، فرآیند پخت مرجع نمونه‌ی اصلی شامل یک سیکل حرارتی دقیق است که در آن نمونه تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرمایش یافته و به مدت ۵/۵ روز در این دما نگهداری می‌شود. این مرحله برای فعال‌سازی کامل پیوندهای زینتری و دستیابی به چگالی نهایی مطلوب ضروری است.

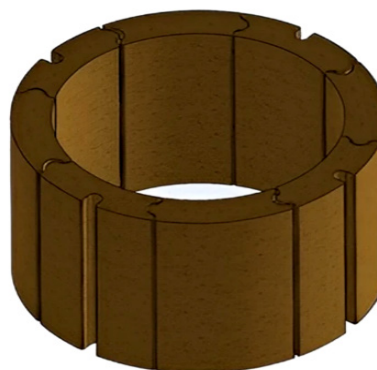
۳. طراحی و ساخت نمونه بومی‌سازی‌شده

این فرآیند بر اساس رویکرد مهندسی معکوس انجام شد؛ بدین صورت که ابتدا مشخصات شیمیایی، فیزیکی و عملکردی نمونه مرجع استخراج شده و سپس با استفاده از مواد اولیه در دسترس داخلی، فرمولاسیون معادل با هدف دستیابی به عملکرد مشابه طراحی گردید.

۳-۱. طراحی و انتخاب مواد اولیه

جهت ساخت قالب مورد نیاز در عملیات ریخته‌گری جرم نسوز و همچنین بازرسی‌های ابعادی، نقشه ساخت قطعات با

جزئیات لازم، تهیه شد. ابعاد کلی برحسب میلی متر و به صورت قطر خارجی ۶۹۰، قطر داخلی ۵۴۰ و ارتفاع کلی ۴۳۵ است. هر دسته از مافل بلاک شامل ۸ تکه می باشد. در (شکل ۱)، نقشه شماتیک مافل بلاک در حالت مونتاژ شده نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه شماتیک مافل بلاک در حالت مونتاژ

برای دستیابی به بهترین ترکیب بومی با عملکرد درازمدت و اقتصادی، مواد اولیه با دقت و با توجه به مطابقت حداکثری با نمونه مرجع، استانداردهای بین المللی ساخت نسوز و تجربیات سازندگان داخلی انتخاب شد. در این راستا، فرمولاسیون بومی سازی شده با جایگزینی کامل سیستم سیمانی سنتی با بایندره های نانویی توسعه داده شد. این رویکرد، مافل بلاک های ساخته شده را از جرم های سیمانی متعارف متمایز کرده و می تواند برخی ویژگی های عملکردی مشابه با اجزای پرسی پخته شده ایجاد کند که مزایای فنی مانند کاهش چشمگیر محتوای آهک، بهبود تراکم ساختاری و ارتقای مقاومت در برابر شوک حرارتی را به همراه دارد.

آنالیز شیمیایی نمونه بومی در (جدول ۳) آورده شده است.

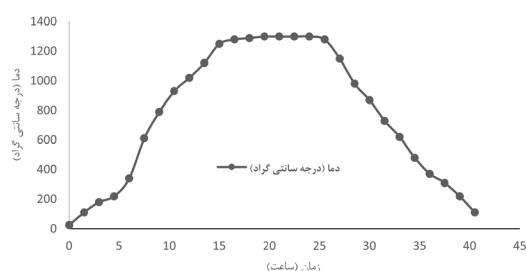
جدول ۳. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه بومی سازی شده

مقدار	مشخصه
۵۹/۴	Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)
۳۵/۴	SiO ₂ (درصد وزنی)
۱/۶	Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)
۰/۶	CaO (درصد وزنی)
۲/۲	TiO ₂ (درصد وزنی)
۰/۲ (ناخالصی)	MgO (درصد وزنی)

در این فرمولاسیون، استفاده از آندالوزیت به عنوان منبع اصلی آلومینا و افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO₂ به منظور جایگزینی جزئی CaO و بهبود تشکیل فاز مولایت مورد توجه قرار گرفت. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می دهد ترکیب بومی سازی شده دارای ۵۹/۴ درصد وزنی Al₂O₃ است که به مقدار اسمی ۶۰ درصد در نمونه مرجع نزدیک است. میزان Fe₂O₃ برابر با ۱/۶ درصد وزنی اندازه گیری شد که اندکی بالاتر از حد مرجع (۱/۵ درصد) است، با این حال همچنان در محدوده قابل قبول برای جرم های آلومینایی ریختنی قرار دارد. مقدار CaO برابر با ۰/۶ درصد وزنی به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع کاهش نشان می دهد. این کاهش می تواند بر میزان تشکیل فازهای کم ذوب و رفتار دمای بالای سیستم اثرگذار باشد که در بخش «مقایسه و تحلیل» به صورت تفصیلی بررسی شده است.

۳-۲. شکل دهی و پخت قطعه

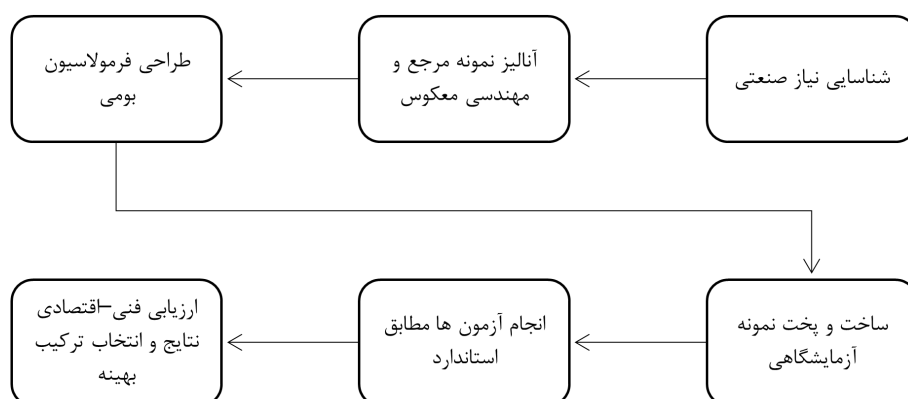
تولید قطعه مورد نظر، مستلزم پیروی دقیق از فرآیندهای تخصصی ریخته گری و پخت مواد نسوز است. فرآیند با آماده سازی دوغاب آغاز می شود؛ در این مرحله، پودرهای ماده نسوز اولیه با عوامل روان کننده اختلاط می یابند تا ویسکوزیته بهینه برای اطمینان از پر شدن حفره های قالب و به حداقل رساندن تخلخل ها در حین عملیات تراکم دهی فراهم شود. بخش حیاتی نهایی، اجرای دقیق برنامه حرارتی پخت است؛ این برنامه باید نرخ افزایش و کاهش دما، به ویژه در مرحله تثبیت ساختار متراکم در دمای نهایی را با دقت کنترل کند تا از ایجاد تنش های حرارتی داخلی جلوگیری شده و ساختار کریستالی پایدار حاصل شود.



شکل ۲. منحنی پخت مافل بلاک

پیش از اقدام به تولید انبوه، ساخت و ارسال یک قطعه شاهد جهت اخذ تأیید ابعادی و عملکردی الزامی است. این قطعه شاهد باید در کنار قطعات اصلی، تمامی سیکل های حرارتی و عملیات پخت مربوطه را دقیقاً طی کند تا خواص شیمیایی

و مکانیکی آن نماینده قطعات نهایی باشد. نمونه شاهد جهت
آزمون‌های نهایی به آزمایشگاه مرجع ارسال می‌گردد. در این تحقیق به صورت شماتیک در (شکل ۳) ارائه شده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل اجرای پژوهش و بهینه‌سازی فرمولاسیون

۴. روش‌های آزمون

۴-۱. استانداردهای مرجع آزمون

این فصل به تشریح دقیق استانداردهای مرجع، پروتکل‌های
نمونه‌برداری حین ساخت و نتایج اولیه آزمون‌های انجام شده
بر روی نمونه‌های بومی‌سازی شده می‌پردازد. آزمون‌های شیمیایی و مکانیکی صورت گرفته بر روی
نمونه‌ها مطابق استانداردهای معرفی شده در (جدول ۴)
انجام شده است.

جدول ۴. معرفی استانداردهای بین‌المللی در حوزه آزمون مواد نسوز ریختنی

استاندارد مرجع	نوع آزمون و کاربرد
ASTM C401-12	طبقه‌بندی ریخته‌گری‌های آلومینا و آلومینا-سیلیکات بر اساس محتوای شیمیایی و خواص فیزیکی [۲۲]
ASTM C113	تعیین تغییرات خطی دائمی مواد نسوز پس از حرارت‌دهی
ASTM C133	تعیین استحکام فشاری سرد و استحکام خمشی مواد نسوز [۲۳]
ISO 5017	روش آزمون تعیین چگالی مواد نسوز شکل‌دار [۲۴]
API STD 936	مبنای انتخاب نمونه، صلاحیت‌دهی پرسنل آزمون و مستندسازی کلی فرآیند بازرسی و آزمون [۲۵]

۴-۲. آزمون‌های نهایی شیمیایی و فیزیکی

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه بومی قبلاً در (جدول ۳)
ارائه گردید. نتایج آزمون‌های فیزیکی انجام‌شده بر روی
نمونه‌های شاهد که برای ارزیابی عملکرد مکانیکی و
حرارتی قطعه ضروری هستند، در (جدول ۵) نشان داده
شده است. کلیه آزمون‌ها در آزمایشگاه تحقیق و توسعه
صنعت سیمان نسوز که دارای گواهینامه ISO 17025
است، انجام گردید.

به‌منظور ارزیابی خواص شیمیایی و فیزیکی قطعات
تولیدی، تعداد ۹ نمونه شاهد شامل ۶ نمونه با ابعاد استاندارد
۵۰×۵۰×۵۰ (میلی‌متر) و ۳ نمونه با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰
(میلی‌متر) انتخاب و علامت‌گذاری شدند. ابعاد نمونه‌ها
مطابق با الزامات آزمایشگاه و بر اساس راهنمای API STD
936 تعیین گردید و برای انجام آزمون‌های چگالی حجمی،
استحکام فشاری سرد و تغییر طول خطی دائمی مورد استفاده
قرار گرفتند که نتایج آن در بخش بعدی ارائه شده است. کلیه
آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی حداقل در سه تکرار انجام شده
و میانگین مقادیر به‌عنوان نتایج نهایی گزارش گردیده است.

جدول ۵. نتایج آزمون‌های فیزیکی نمونه بومی

مشخصه	مقدار
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۵۳
تغییر طول خطی دائمی در ۲۴ ساعت (درصد)	۰/۸ (در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۱۰۰۰ <

جسم متخلخل را نسبت به حجم کل آن بیان می‌کند و از پارامترهای اساسی در ارزیابی کیفیت ریخته‌گری است، برابر با ۱۴/۹ درصد به‌دست آمد. از آنجا که مقدار متناظر برای نمونه مرجع در دیتاشیت سازنده گزارش نشده است، امکان مقایسه مستقیم این پارامتر فراهم نبود، با این حال مقدار به‌دست‌آمده در محدوده مجاز استاندارد ISO 5017 قرار دارد و نشان‌دهنده کیفیت مناسب فرآیند ریخته‌گری و تراکم ساختاری ماده است.

۵. مقایسه و تحلیل

(جدول ۶)، مقایسه خواص شیمیایی، فیزیکی و عملکردی نمونه بومی‌سازی شده را با نمونه مرجع خارجی نشان می‌دهد. هدف از این تحلیل بررسی تأثیر تغییرات ترکیب شیمیایی و رویکرد فرمولاسیون بر خواص کلیدی نسوز شامل چگالی، استحکام فشاری سرد، تغییر طول خطی دائمی و دمای سرویس است.

دمای سرویس این ماده برابر با ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید که نشان‌دهنده قابلیت عملکرد در شرایط دمایی ریفورمرهای صنعتی است. چگالی حجمی نمونه بومی‌سازی شده برابر با ۲/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد که بیانگر ساختار نسبتاً متراکم و کاهش تخلخل در مقایسه با حداقل الزامات نمونه مرجع است.

استحکام فشاری سرد نمونه بومی بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده استحکام مکانیکی بالا و توانایی تحمل تنش‌های فشاری و حرارتی در شرایط بهره‌برداری است. همچنین مقدار تغییر طول خطی دائمی برابر با ۰/۸ درصد پس از ۲۴ ساعت حرارت‌دهی در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد که بیانگر پایداری ابعادی مناسب ماده در دماهای بالا مطابق استاندارد ASTM C113 است.

تخلخل ظاهری^۱ که درصد حجم کل منافذ باز در یک

جدول ۶. مقایسه خواص شیمیایی، فیزیکی و عملکردی نمونه بومی با مرجع خارجی

مشخصه	نمونه مرجع خارجی	نمونه بومی
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۶۰ <	۵۹/۴
SiO ₂ (درصد وزنی)	۳۱ >	۳۵/۴
Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۱/۵ >	۱/۶
CaO (درصد وزنی)	۴/۲ تا ۲/۸	۰/۶
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	۱۷۰۰ <	۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۲ <	۲/۵۳
تغییر طول خطی دائمی در ۲۴ ساعت (درصد)	۱ (در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد)	۰/۸ (در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۵۰۰ <	۱۰۰۰ <
هزینه نهایی هر دسته (میلیون ریال)	۲۵۳	۱۶۸

1. Apparent Porosity

بررسی تطبیقی خواص نمونه بومی سازی شده در مقایسه با نمونه مرجع خارجی، نشان دهنده یک تغییر رویکرد موفق در فرمولاسیون است که بر پایه افزودن مواد اولیه‌ای نظیر آندالوزیت و اکسید تیتانیوم و همچنین استفاده از بایندهای نانویی به جای سیمان متعارف بنا شده است. این تغییرات شیمیایی که منجر به بهبود خواص عملکردی و همچنین صرفه جویی ریالی قابل توجه (کاهش هزینه از ۲۵۳ به ۱۶۸ میلیون ریال) شده، به طور مستقیم بر خواص مهندسی کلیدی تأثیر گذاشته است.

نتایج نشان می دهد که نمونه بومی با وجود تفاوت هایی در ترکیب شیمیایی، توانسته است عملکردی قابل مقایسه و در برخی موارد بهتر از نمونه مرجع ارائه دهد. یکی از مهم ترین تغییرات در فرمولاسیون، حذف سیستم سیمانی متعارف و استفاده از سیستم باینده مبتنی بر نانو بوده است که منجر به کاهش قابل توجه مقدار اکسید کلسیم در ترکیب گردید.

در نسوزهای آلومینایی، حضور CaO که عمدتاً ناشی از سیمان آلومینایی است می تواند منجر به تشکیل فازهای کم ذوب و افزایش مقدار فاز شیشه ای در ریزساختار پس از پخت شود. کاهش این ترکیب تا حدود ۰/۶ درصد در نمونه بومی باعث کاهش تشکیل این فازها و در نتیجه افزایش پایداری حرارتی ماده شده است. این موضوع ارتباط مستقیمی با بهبود پایداری ابعادی و کاهش تغییر طول خطی دائمی در دماهای بالا دارد [۱۳-۱۴].

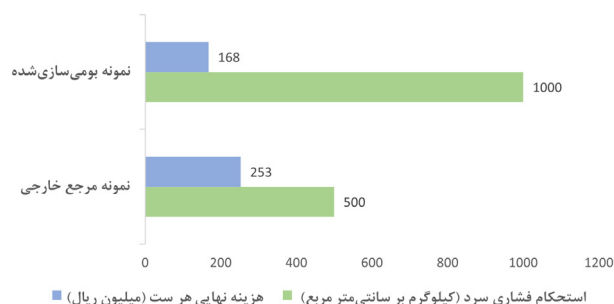
نتایج آزمون تغییر طول خطی دائمی (PLC) نیز مؤید این موضوع است. این مقدار برای نمونه بومی برابر با ۰/۸ درصد پس از ۲۴ ساعت در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد که بیانگر پایداری ابعادی مناسب در شرایط دمای بالا است. اگرچه مقدار گزارش شده برای نمونه مرجع برابر با ۱ درصد در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد است و شرایط آزمون دو نمونه کاملاً یکسان نیست، با این حال دستیابی به مقدار PLC کمتر در دمای بالاتر نشان می دهد که نمونه بومی از پایداری ابعادی قابل قبولی برخوردار بوده و عملکرد آن در شرایط حرارتی شدید نیز رضایت بخش است.

افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به عنوان یک عامل معدن ساز، نقش مهمی در تسریع تشکیل فاز مولایت ایفا می کند. مولایت به عنوان یکی از پایدارترین فازهای سرامیکی در دماهای بالا شناخته می شود و حضور آن موجب افزایش استحکام مکانیکی و مقاومت خزشی نسوز می گردد. در نتیجه، استحکام فشاری سرد نمونه بومی نسبت به نمونه مرجع افزایش قابل توجهی نشان داده و به بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع رسیده است.

استفاده از آندالوزیت به عنوان منبع اصلی آلومینا نیز نقش مهمی در ایجاد تعادل مناسب بین Al_2O_3 و SiO_2 داشته است. اگرچه مقدار نهایی Al_2O_3 در نمونه بومی اندکی کمتر از نمونه مرجع است، اما حضور آندالوزیت و تبدیل آن به فازهای پایدار در دماهای بالا موجب حفظ عملکرد مناسب نسوز شده است.

از نظر خواص فیزیکی، چگالی حجمی نمونه بومی برابر با ۲/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شد که نسبت به حداقل مقدار مورد نیاز در نمونه مرجع (۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب) افزایش قابل توجهی را نشان می دهد. این افزایش چگالی نشان دهنده کاهش تخلخل و تشکیل ساختار متراکم تر در ماده است. افزایش چگالی حجمی و کاهش CaO نشان دهنده تشکیل ماتریکس سرامیکی متراکم تر و کاهش فاز شیشه ای در ریزساختار نسوز است که می تواند نقش مهمی در بهبود مقاومت در برابر خزش و شوک حرارتی ایفا کند [۱۵].

علاوه بر بهبود خواص فنی، نتایج نشان دهنده مزیت اقتصادی قابل توجه در فرآیند بومی سازی است. هزینه تولید هر دسته از قطعات از ۲۵۳ میلیون ریال در نمونه مرجع به ۱۶۸ میلیون ریال در نمونه بومی کاهش یافته است که بیانگر صرفه جویی اقتصادی حدود ۳۳ درصدی است. این کاهش هزینه عمدتاً ناشی از جایگزینی مواد اولیه وارداتی با مواد در دسترس داخلی و بهینه سازی فرمولاسیون بوده است. (شکل ۴) از مقاله این برتری دوگانه را به صورت بصری نشان می دهد؛ بهبود هم زمان در استحکام فشاری سرد و کاهش هزینه تولید که در مجموع نمونه بومی را به گزینه ای رقابتی از نظر مهندسی، عملکردی و اقتصادی تبدیل کرده است.



شکل ۴. مقایسه هزینه تمام شده و استحکام فشاری سرد مرجع خارجی و نمونه بومی





۵-۱. اعتبارسنجی نتایج با منبع علمی

مرجع گزارش شده در منابع علمی معتبر از جمله کتاب Refractory Oxides مقایسه شد [۱]. نتایج این اعتبارسنجی در (جدول ۷) ارائه شده است.

به منظور ارزیابی صحت نتایج به دست آمده، ترکیب شیمیایی و خواص عملکردی نمونه بومی با داده های

جدول ۷. اعتبارسنجی خواص شیمیایی و عملکردی نمونه بومی با کتاب Refractory Oxides

مشخصه	محدوده کتاب Refractory Oxides	مقدار نمونه بومی
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۵۸ تا ۶۳	۵۹/۴
SiO ₂ (درصد وزنی)	۲۵ تا ۳۲	۲۵/۴
Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)	> ۱/۵	۱/۶
CaO (درصد وزنی)	۲/۸ تا ۴/۲	۰/۶
TiO ₂ (درصد وزنی)	۱ تا ۳	۲/۲
MgO (درصد وزنی)	کمتر از ۱	۰/۲
دمای سرویس (درجه سانتی گراد)	< ۱۷۰۰	۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی متر مکعب)	< ۲/۲	۲/۵۳
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	< ۵۰۰	< ۱۰۰۰

CaO می تواند موجب کاهش تشکیل فازهای کم ذوب و بهبود پایداری فازی در دماهای بالا شود.

اگرچه مقدار Fe₂O₃ و SiO₂ اندکی بالاتر از مقادیر مرجع گزارش شده است، این اختلاف احتمالاً به ترکیب شیمیایی آندالوزیت مورد استفاده مربوط می شود. با توجه به عملکرد مناسب نمونه در پارامترهای کلیدی مانند چگالی حجمی و استحکام فشاری سرد، این اختلاف تأثیر منفی قابل توجهی بر عملکرد نسوز نشان نمی دهد. همچنین مقدار MgO اندازه گیری شده در محدوده ناخالصی های مجاز قرار دارد.

برای تکمیل فرآیند اعتبارسنجی، نتایج این پژوهش با داده های گزارش شده در مطالعات پیشین نیز مقایسه شده است که در (جدول ۸) ارائه شده است.

مقایسه داده ها نشان می دهد که ترکیب شیمیایی نمونه بومی از نظر نسبت کلی اجزای اصلی در چارچوب نسوزهای آلومینا-آندالوزیت گزارش شده در منابع علمی قرار می گیرد، هرچند برخی اجزا مانند CaO و Fe₂O₃ به دلیل تفاوت در نوع مواد اولیه و سیستم بایندر با مقادیر مرجع تفاوت دارند. مقدار آلومینا با بازه های مرجع همخوانی داشته و افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO₂ نیز در محدوده پیشنهادی منابع قرار دارد که می تواند به بهبود فرآیند زینترینگ و افزایش استحکام مکانیکی کمک کند.

همچنین مقدار CaO در نمونه بومی به طور قابل توجهی کمتر از مقادیر گزارش شده است که ناشی از حذف سیمان آلومینایی و استفاده از سیستم بایندر نانویی است. کاهش

جدول ۸. اعتبارسنجی خواص شیمیایی و عملکردی نمونه بومی با مطالعات پیشین

مشخصه	محدوده مرجع [۷]	محدوده مرجع [۱۵]	محدوده مرجع [۹]	مقدار نمونه بومی
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۶۵ تا ۵۵	۵۰ تا ۶۰	۵۵ تا ۶۵	۵۹/۴
چگالی حجمی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۶ تا ۲/۳	۲/۵ تا ۲/۲	۲/۶ تا ۲/۳	۲/۵۳
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۹۰۰ تا ۴۰۰	۸۰۰ تا ۳۵۰	۹۰۰ تا ۵۰۰	< ۱۰۰۰

نتایج ارائه شده در (جدول ۸) نشان می دهد که خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه بومی در محدوده داده های گزارش شده برای نسوزهای آلومینا بالا قرار دارد [۷، ۹، ۱۵]. چگالی حجمی با ۲/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب بیانگر تراکم مناسب ساختار بوده و استحکام فشاری سرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع حتی از بسیاری از مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین بالاتر است. این بهبود عملکرد را می توان به استفاده از آندالوزیت به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی، افزودن TiO_2 و به کارگیری سیستم بایندر نانویی نسبت داد که مطابق گزارش های موجود در منابع علمی، استفاده از این ترکیبات می تواند موجب تشکیل ریزساختار متراکم تر و بهبود خواص مکانیکی نسوزها شود [۱۵].

همچنین مقایسه با قطعه مرجع صنعتی نشان داد که نمونه بومی از نظر چگالی حجمی و استحکام فشاری سرد عملکردی بالاتر از حداقل الزامات دارد و مقدار تغییر طول خطی دائمی ۰/۸ درصد در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد، بیانگر پایداری ابعادی مناسب در شرایط دمای بالا است. در مجموع، همخوانی بین نتایج این پژوهش، داده های منابع علمی و عملکرد قطعه مرجع صنعتی، قابلیت اطمینان فرمولاسیون نسوز مهندسی معکوس شده را تأیید می کند.

۶. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بومی سازی جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا برای کاربرد در مافل بلاک ریفورمر با استفاده از رویکرد مهندسی معکوس و بهره گیری از مواد اولیه داخلی با موفقیت امکان پذیر است. در این مطالعه، استفاده از

آندالوزیت به عنوان منبع اصلی آلومینا، افزودن مقدار بهینه ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به عنوان عامل معدن ساز و جایگزینی سیستم سیمانی متداول با بایندر نانویی، به بهبود قابل توجه خواص فیزیکی و مکانیکی ماده منجر شد.

نمونه بومی تولید شده با چگالی حجمی ۲/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب و استحکام فشاری سرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، الزامات مرجع را برآورده کرده و در برخی شاخص ها از آن فراتر رفت. همچنین نتایج آزمون ها بیانگر پایداری ابعادی مناسب در دمای بالا و قابلیت عملکرد پایدار در دمای سرویس حدود ۱۷۰۰ درجه سانتی گراد است که برای شرایط کاری ریفورمرهای صنعتی اهمیت بالایی دارد.

از منظر صنعتی، توسعه این ترکیب نسوز می تواند به رفع یکی از چالش های مهم بهره برداری در واحدهای ریفورمر، یعنی وابستگی به قطعات نسوز وارداتی با هزینه بالا و زمان تأمین طولانی، کمک کند. علاوه بر این، نتایج تحلیل اقتصادی نشان داد که بومی سازی این قطعه امکان کاهش حدود ۳۳ درصدی هزینه تولید را نسبت به نمونه خارجی فراهم می کند؛ بنابراین، استفاده از ترکیب بهینه ارائه شده می تواند به عنوان یک راهکار قابل اعتماد برای افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات دما بالا، کاهش هزینه های نگهداری و تقویت زنجیره تأمین داخلی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد توجه قرار گیرد. این نتایج نشان می دهد که رویکرد مهندسی معکوس مبتنی بر بهینه سازی هم زمان ترکیب شیمیایی و سیستم بایندر می تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر در توسعه نسوزهای پیشرفته صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۹. فهرست اختصارات به کاررفته در مقاله

اختصار	شرح
ASTM	انجمن آزمون و مواد آمریکا - American Society for Testing and Materials (ASTM International)
ISO	سازمان بین المللی استانداردسازی - International Organization for Standardization
API	مؤسسه نفت آمریکا - American Petroleum Institute
PLC	تغییر طول خطی دائمی - Permanent Linear Change
LCC	جرم نسوز ریختنی کم سیمان - Low Cement Castable
ULCC	جرم نسوز ریختنی فوق کم سیمان - Ultra Low Cement Castable

- of Ceramic Science and Technology. 2025;16(3):107–116. <https://doi.org/10.4416/JCST2024-00014>.
- [8]. Li M, Cai C, Qi G, Lv S, Li S, Chen R. A novel tar-silica sol bonded no-cement Al_2O_3 -SiC-C castable with improved carbon dispersion and SiC whisker formation. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2025;22(6): e70025. <https://doi.org/10.1111/ijac.70025>.
- [9]. Nevřivová L, Zemánek D. Study of the mineralogical composition of an alumina-silica binder system formed by the sol-gel method. *Materials*. 2023;16(15):5466. <https://doi.org/10.3390/ma16155466>.
- [10]. Lee WE, Vieira W, Zhang S, Ghanbari Ahari K. Castable refractory concretes. *International Materials Reviews*. 2001;46(3):145–167. <https://doi.org/10.1179/095066001101528439>.
- [11]. Hou X, Chen J, Cao Y, Liu G, Wei G, Yan W, Wei Y, Li N, Zhang Y. Influence of bonding systems on the properties of Al_2O_3 -MgO refractory castables: Aluminate cement and alumina-silica gel. *Ceramics International*. 2024;50(22):46695–46704. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.021>.
- [12]. Kashcheev ID, Rozhkov EV, Pivinskii YuE. Structurization of unshaped refractories. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003;44(1):37–41. <https://doi.org/10.1023/A:1023967712104>.
- [13]. Roy J, Chandra S, Maitra S. Nanotechnology in castable refractory. *Ceramics International*. 2019;45(1):19–29. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.261>.
- [14]. Nouri Khezrabad M, Braulio MAL, Pandolfelli VC, Golestani Fard F, Rezaie HR. Nano-bonded refractory castables. *Ceramics International*. 2013;39(4):3479–3497. <https://doi.org/10.1016/j>
- مراجع:
- [1]. Smith JD, Fahrenholtz WG. Refractory Oxides. In: Shackelford JF, Doremus RH, editors. *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*. Oxford, United Kingdom: Springer; 2008.
- [2]. Liao G, He K, Li L, Jiang M. Study on application of alumina in high-purity andalusite-based refractory. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2004;3(2):125–130. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2004.32009>.
- [3]. Zawrah MFM, Khalil NM. Effect of mullite formation on properties of refractory castables. *Ceramics International*. 2001;27(6):689–694. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00021-9).
- [4]. Rebouillat L, Rigaud M. Andalusite-Based High-Alumina Castables. *American Ceramic Society Bulletin*. 2004;83(12):28–32. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00099.x>.
- [5]. Bhattacharyya A, Singh RK, Pradhan N, Kujur MK, Kain A, Prasanth P, et al. Study of the influence of andalusite on properties of 60% Al_2O_3 -based bricks for steel plants. *SN Applied Sciences*. 2020;69:30–35. <https://doi.org/10.1007/s42411-019-0062-3>.
- [6]. Khanmohammadi S, Mohtadinia M. Parameters influencing the characteristics of the nano-bonded aluminosilicate based refractory castables. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2025;61:21–29. <https://doi.org/10.1007/s41779-024-01139-y>.
- [7]. Brochen E, Dannert C, Thiesen M, Ibarra T, Krause O, Abdelouhab S, Lang C. Thermomechanical and thermochemical behaviour of silica- and spinel-sol-bonded high-alumina refractory castables. *Journal*





- [21]. ASTM International. Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick (ASTM C113-14(2019)). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019.
- [22]. ASTM International. Standard Classification of Alumina and Alumina-Silica Castable Refractories (ASTM C401-12). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022.
- [23]. ASTM International. Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories (ASTM C133-24). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2024.
- [24]. International Organization for Standardization. Dense shaped refractory products—Determination of bulk density, apparent porosity and true porosity (ISO 5017:2025). Geneva: International Organization for Standardization; 2025.
- [25]. American Petroleum Institute. Refractory Installation Quality Control—Inspection and Testing Monolithic Refractory Linings and Materials (API STD 936-24). Washington, DC: American Petroleum Institute; 2024.
- ceramint.2012.11.028.
- [15]. López Perales JF, Díaz Tato L, González Carranza Y, Contreras de León JE, Gómez Rodríguez C, Fernández González D, Rodríguez Castellanos EA. Aluminum spent foundry sand as an emergent raw material in the production of a sustainable aluminosilicate refractory castable. *Materials*. 2025;18(24):5500. <https://doi.org/10.3390/ma18245500>.
- [16]. Liu Y, Xu L, Chen M, Zhang D. Effects of andalusite and kyanite addition on the microstructure, thermo-mechanical properties and corrosion resistance of ultralow-cement bauxite-corundum castables. *Ceramics International*. 2022;48(10):14141–14150. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.300>.
- [17]. Li L, Wang Q, Liao G, Li K, Ye G. Densification behavior of mullite–Al₂TiO₅ composites by reaction sintering of natural andalusite and TiO₂. *Ceramics International*. 2018;44(4):3981–3986. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.191>.
- [18]. Singh AK, Sarkar R. Nano mullite bonded refractory castable composition for high temperature applications. *Ceramics International*. 2016;42(11):12937–12945. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.066>.
- [19]. Najafi A, Sarpoulaki H, Golestani-Fard F, Taqizadeh R. Investigation of the effect of TiO₂ on the properties of alumina–spinel refractory castables. *Int J Ind Eng Prod Manag*. 2008;19(5):1–8. [In Persian].
- [20]. Innocentini MDM, Silva MG, Menegazzo BA, Pandolfelli VC. Permeability of refractory castables at high temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*. 2001;84(3):645–647. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00715.x>.

Mechanical Property Optimization of High Alumina Castables via Formulation Adjustment in Petrochemical Applications

Alireza Rahimi*

Senior Mechanical Engineer, Reverse Engineering and Manufacturing Unit, Bushehr Petrochemical Company, Asaluyeh, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

Article History:

Received: 18 February 2026

Revised: 07 June 2026

Accepted: 20 June 2026

Keywords:

Reverse Engineering

Castable Refractory

Reformer Nozzle

Alumina

Andalusite

Nano-bonded

ABSTRACT

In reformer units of gas and petrochemical industries, refractory components surrounding nozzles are exposed to high temperatures, thermal shocks, and corrosive environments, and dependence on imported refractory materials represents a major industrial challenge. In this study, reverse engineering of a high alumina refractory castable was performed to achieve localization and improve mechanical performance, and its formulation was optimized using a techno economic approach. Andalusite was used as the primary alumina source, and 2.2 wt% TiO_2 was added as a mineralizing agent to accelerate mullite formation. Furthermore, nano bonding systems were employed instead of conventional cement binders, leading to reduced CaO content and improved microstructural densification. The produced samples were evaluated according to ASTM C133, ASTM C113, and ISO 5017 standards. Results showed that the developed composition maintained a service temperature of 1700 °C, with a bulk density of 2.53 g/cm³, cold crushing strength exceeding 1000 kg/cm², and permanent linear change of 0.8% at 1450 °C. Additionally, approximately 33% cost reduction was achieved compared to the imported sample. These findings indicate that the proposed composition can serve as a reliable and cost effective alternative for high temperature applications in the petrochemical industry.

DOR: [20.1001.1.2602.1119.1404.11.29](https://doi.org/10.1001.1.2602.1119.1404.11.29)

How to cite this article

A. Rahimi, Mechanical Property Optimization of High Alumina Castables via Formulation Adjustment in Petrochemical Applications. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 13(1): 90-102. (https://ijge.irangi.org/article_738767.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: al.rahimi@bupc.ir, (A. Rahimi).

Available online 21 June 2026

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

