فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۶، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۳۹۶

امکان‌سنجی بهبود کیفیت فلدسپات‌های استان اصفهان به منظور استفاده در صنایع کاشی و سرامیک

سیدمحمدرئوف حسینی*، محمدرضا عزیزی‌نیا، ابراهیم عظیمی، علی احمدی عامله

ایران، اصفهان، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن

* r.hosseini@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۶ آبان ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۷ دی ۱۳۹۶

کلید واژه:

فلدسپات، آهن، سرامیک، هیدروسیکلون، جدایش مغناطیسی، لیچینگ

چکیده:

ذخایر خاک صنعتی فراوانی در استان اصفهان شناسایی شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است که متاسفانه بعلت وجود ناخالصی‌هایی از جمله سیلیس و اکسیدهای آهن، با قیمت بسیار ارزان فروخته می‌شوند. هدف از انجام این پژوهش، حذف ناخالصی‌های مذکور و افزایش ارزش افزوده آنها جهت ارایه به کارخانجات کاشی و سرامیک می‌باشد. بدین منظور، سه نمونه فلدسپات از معادن واقع در ورزنه، نایین و کاشان تهیه و پس از خردایش و تعیین دانه‌بندی، تحت آنالیز شیمیایی و کانی شناسی قرار گرفت. سپس، نمونه زیر ۲۵۰ میکرون به منظور کاهش سیلیس وارد هیدروسیکلون شد که در سرریز سیکلون، به طور متوسط، میزان سیلیس ۴٪ کاهش و مقدار آلومینا، ۱/۲٪ افزایش یافت. لیکن، مقدار اکسید آهن حدود ۲٪ بیشتر شد. سرریز سیکلون، جهت کاهش آهن، تحت جدایش مغناطیسی شدت بالا قرار گرفت و در نهایت میزان اکسید آهن موجود، به طور متوسط ۱٪ کاهش یافت. برای حذف بیشتر آهن، کنسانتره جدایش مغناطیسی، با استفاده از سدیم دیتیونایت لیچ شد که به دلیل حذف سیلیس همراه با آهن، کاهش آهن قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. در نهایت، خوراک اولیه، با بهره‌گیری از اگزالیک اسید تحت لیچینگ قرار گرفت که میزان اکسید آهن برای نمونه کاشان، به زیر ۱٪ رسید. همچنین، بررسی‌های اولیه، نشان داد که ایجاد کارخانه‌ای با ظرفیت ۱۵۰ هزار تن در سال، با توجه به قیمت تمام شده و فروش ۳۰ و ۸۰ هزار ریال بر تن و دوره بازگشت سرمایه چهار سال، اقتصادی می‌باشد.

۱- مقدمه

فلدسپات‌ها (Feldspars) که از فراوان‌ترین کانی‌ها در پوسته زمین می‌باشند، عبارتند از کانی‌هایی با فرمول $KAlSi_3O_8$ (فلدسپات پتاسیک)، $NaAlSi_3O_8$ (آلبیت) و $CaAl_2Si_2O_8$ (آنورتیت) [۱]. در جهان، سالانه نزدیک به ۲۰ میلیون تن فلدسپات تولید می‌شود که کشور ایتالیا ۲۵ درصد این تولیدات را به خود اختصاص داده و در رتبه بعدی، کشورهای ترکیه و چین قرار دارند [۲]. از فلدسپات‌ها به عنوان ماده اولیه در ساخت شیشه، محصولات سرامیکی،

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

لاستیک، رنگ، فایبرگلاس، کود شیمیایی و سایر محصولات استفاده می‌شود [۳].

در ایران معادن زیادی با عناوین فلدسپات، کائولن و خاک‌های صنعتی ثبت شده که در حال استخراج می‌باشند. طبق آمار، در استان اصفهان [۴]، حدود ۱۸ معدن خاک صنعتی به ثبت رسیده که متاسفانه به علت کیفیت پایین محصول و وجود ناخالصی های متعدد، بویژه اکسی/هیدروکسیدهای آهن، با وجود کارخانجات متعدد کاشی و سرامیک در استان و همچنین استان‌های همجوار، بیشتر آنها تعطیل هستند یا با ظرفیت بسیار پایینی استخراج می‌شوند.

وجود ناخالصی‌های آهن باعث ایجاد رنگ قرمز تا قهوه‌ای در بدنه سرامیک شده که بر روی کیفیت محصولات تولیدی تاثیر منفی می‌گذارد [۳, ۵]. به دلیل اینکه حضور ناخالصی‌های آهن یکی از مشکلات کلیدی جهت استفاده از کائولن و فلدسپات در صنعت کاشی و سرامیک است، لذا باید به زیر یک درصد کاهش داده شود [۶].

برای فرآوری فلدسپات‌ها با هدف کاهش ناخالصی‌های اکسید آهن و سیلیس از شیوه‌های متنوعی استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل انواع روشهای فیزیکی و شیمیایی از جمله جدایش مغناطیسی، جدایش ثقلی، فلوتاسیون و لیچینگ می‌باشند. کارایی روش‌های فلوتاسیون و لیچینگ بالاتر بوده و البته از نظر هزینه، گرانتر تمام می‌شوند. بنابراین راهکار رایج، انجام پیش تغلیظ با بهره‌گیری از روش‌های ارزان‌تر نظیر هیدروسیکلون و مغناطیسی و سپس استفاده از لیچینگ یا فلوتاسیون می‌باشد [۷]. با بکارگیری چند مرحله‌ای هیدروسیکلون‌ها، میزان سیلیس بدلیل راهیابی به ته‌ریز سیکلون، کاهش داده شده و سپس با استفاده از جدایش مغناطیسی سرریز، کانی‌های آهن‌دار مغناطیسی به راحتی حذف می‌شوند. در نهایت، کانی‌های آهن‌دار غیر مغناطیسی با استفاده از فلوتاسیون یا لیچینگ حذف خواهند شد. در پژوهش حاضر، نمونه‌های فلدسپات از سه نقطه مختلف استان اصفهان تهیه و پس از بررسی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی اولیه، امکان بهبود کیفیت آنها از دیدگاه کاهش ناخالصی‌های آهن و سیلیس با بهره‌گیری از تست‌های هیدروسیکلون، جدایش مغناطیسی شدت بالا و لیچینگ مورد بررسی قرار گرفت.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- آماده‌سازی نمونه

خاک مورد مطالعه از محصول درجه دوم سه معدن خاک صنعتی استان اصفهان به نام‌های چاه‌شور در نزدیکی ورزنه، سپرو در نزدیکی نایین و توکل یحیی‌آباد در نزدیکی کاشان نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها پس از ورود به آزمایشگاه، با استفاده از سنگ شکن فکی و دیسکی خردایش شدند. سپس برای کاهش بیشتر اندازه ذرات، وارد آسیای گلوله‌ای شده و با درصد جامد ٪۵۰ به مدت ۷۵ دقیقه خرد شدند. در مرحله نهایی آماده‌سازی، دانه‌بندی محصول آسیا با استفاده از سری سرندی ۲۵۰، ۱۰۵، ۸۸، ۶۳، ۴۴ و ۳۷ میکرون انجام شد و مانده روی هر سرند جهت انجام آنالیز XRF به آزمایشگاه ارسال شد.

آنالیز شیمیایی و کانی شناسی بر روی محصول آسیاکاری، با استفاده از XRF و XRD انجام شد که نتایج حاصل در جدول (۱) و شکل (۱) نشان داده شده‌اند. بر طبق آنالیز XRD که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، نمونه‌های مورد

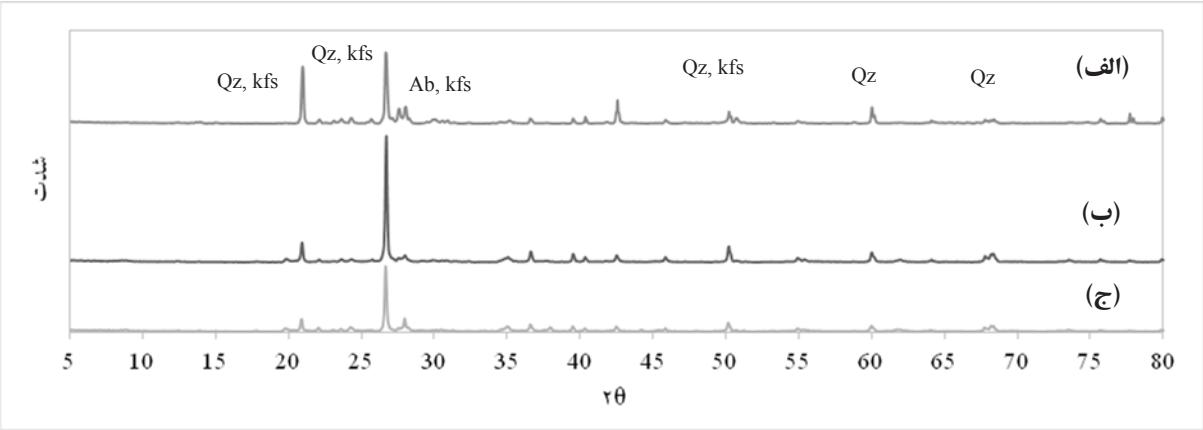
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

مطالعه، حاوی کوارتز، اورتوکلاز، آلبیت بعنوان فازهای اصلی و مقدار کمی موسکوویت و کلسیت در فاز فرعی می‌باشند. تشخیص دقیق فاز حاوی اکسی/هیدروکسیدهای آهن بعلت مقدار کم (زیر ۵٪)، توسط آنالیز XRD امکان‌پذیر نمی‌باشد.

جدول ۱- خلاصه نتایج آنالیز شیمیایی محصول آسیا با استفاده از XRF

نمونه	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cl	LOI
نایین	۶۴/۸	۱۷/۴	۷/۴	۲/۲۵	۱/۸	۰/۷	۰/۵	۱/۳	۲/۶
ورزنه	۶۱/۶	۱۵/۶	۴/۱	۲/۶	۴/۱	۰/۴	۱/۲	۱/۵	۷/۳
کاشان	۷۱/۳	۱۱/۹	۵/۶	۳/۱	۱/۶	۲/۴	۰/۷	۰/۴	۲/۶



شکل ۱- نتایج آنالیز XRD **بر روی محصول آسیاکاری.**

(الف) نمونه کاشان، (ب) نمونه نایین، (ج) نمونه ورزنه. (Qz**: کوارتز،** kfs**: فلدسپات پتاسیک،** Ab**: آلبیت)**

۲-۲- آزمایش‌های جداسازی

به منظور حذف ناخالصی سیلیس از نمونه‌ها، محصول زیر ۲۵۰ میکرون آسیای گلوله‌ای پس از تهیه دوغاب با درصد جامد ۵٪ و افزودن سیلیکات سدیم بعنوان روانساز به میزان ۵۰۰ گرم بر تن، به مدت ۱۵ دقیقه آماده سازی شد. سپس، دوغاب مذکور با فشار یک اتمسفر به هیدروسیکلونی با قطر سه سانتیمتر وارد شد. در مرحله بعدی، از سرریز هیدروسیکلون، دوغابی با جامد ۱۰٪ تهیه شد و پس از افزودن روانساز و آماده‌سازی، برای کاهش ترکیبات آهن‌دار تحت تاثیر میدان مغناطیسی با شدت دو تسلا قرار گرفت.

۲-۳- آزمایش‌های لیچینگ

در این مرحله، جهت حذف ناخالصی آهن باقیمانده در محصول، کنسانتره جداکننده مغناطیسی شدت بالا، تحت لیچینگ شیمیایی با استفاده از سدیم دیتیونایت قرار گرفت. در این آزمایش‌ها، دانسیته دوغاب، ۳۰ درصد وزنی؛ زمان لیچینگ، یک ساعت؛ مقدار سدیم دیتیونایت، ۵۰ گرم بر لیتر ؛ دور همزن،۱۵۰ دور در دقیقه در دماهای ۳۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد. برای تنظیم اسیدیته در pH=۵ از اسید سولفوریک استفاده شد. در آزمایش دیگری، هر سه نمونه اولیه (محصول آسیاکاری) تحت لیچینگ با استفاده از

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

اگزالیک اسید قرار گرفت. شرایط این آزمایش مشابه حالت قبل بود با این تفاوت که pH دوغاب، عدد ۳ و دمای انحلال، ۸۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد.

۳- نتایج و بحث

هر سه نمونه اولیه، پس از خردایش و کاهش اندازه ذرات توسط سنگ‌شکن و آسیا، تعیین دانه‌بندی شده و سپس با بهره‌گیری از هیدروسیکلون، جداکننده مغناطیسی شدت بالا و لیچینگ، تغلیظ شدند.

۳-۱- تعیین دانه‌بندی

توزیع ابعادی محصول آسیا با استفاده از آنالیز سرندی تر به همراه میزان سیلیس، آلومینا و اکسید آهن برای هر محدوده ابعادی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- توزیع اندازه ذرات نمونه‌های آسیا شده به همراه ترکیب شیمیایی هر محدوده ابعادی

نمونه	اندازه (میکرون)	+۲۵۰	-۲۵۰ +۱۰۵	-۱۰۵ +۸۸	-۸۸ +۶۳	-۶۳ +۴۴	-۴۴ +۳۸	-۳۸
تایین	تجمعی عبوری (٪)	۹۴/۴	۶۶/۰	۵۶/۹	۳۹/۸	۳۵/۴	۳۰/۶	۰/۰
	روی سرند (٪)	۵/۶	۲۸/۳	۹/۲	۱۷/۱	۴/۴	۴/۸	۳۰/۶
	SiO_2	۷۴/۳	۷۴/۳	۷۷/۹	۷۹/۱	۷۸/۴	۷۵/۶	۶۹/۸
	Al_2O_3	۱۱/۷	۱۰/۶	۱۰/۵	۹/۷	۹/۶	۱۰/۳	۱۸/۶
	K_2O	۶/۴	۶/۳	۴/۸	۴/۷	۴/۵	۴/۹	۴/۴
	Na_2O	۱/۸	۱/۵	۱/۴	۱/۲	۱/۳	۱/۵	۱/۴
	Fe_2O_3	۱/۵	۱/۹	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۶	۲/۲
ورزنه	تجمعی عبوری (٪)	۶۵/۹	۴۱/۵	۳۸/۶	۳۶/۱	۳۵/۰	۳۳/۹	۰/۰
	روی سرند (٪)	۳۴/۱	۲۴/۳	۳/۰	۲/۵	۱/۱	۱/۱	۳۳/۹
	SiO_2	۵۶/۷	۵۳/۳	۵۸/۷	۶۲/۰	۶۳/۸	۶۲/۹	۵۶/۷
	Al_2O_3	۱۲/۸	۱۱/۸	۱۲/۳	۱۱/۴	۱۴/۱	۱۴/۸	۲۱/۹
	K_2O	۶/۵	۷/۳	۶/۱	۵/۵	۴/۵	۴/۴	۴/۱
	Na_2O	۲/۵	۲/۳	۲/۱	۲/۱	۱/۷	۱/۷	۱/۷
	Fe_2O_3	۱۰/۴	۱۳/۳	۱۰/۷	۹/۳	۲/۴	۷/۵	۷/۲
کاشان	تجمعی عبوری (٪)	۷۰/۱	۵۱/۸	۴۷/۲	۴۲/۳	۳۶/۵	۳۳/۴	۰/۰
	روی سرند (٪)	۲۹/۹	۱۸/۳	۴/۶	۴/۹	۵/۸	۳/۱	۳۳/۴
	SiO_2	۵۲/۹	۶۵/۹	۶۶/۹	۷۱/۸	۷۸/۷	۶۵/۷	۶۰/۵
	Al_2O_3	۸/۰	۷/۲	۷/۳	۸/۵	۸/۵	۱۰/۴	۱۵/۹
	K_2O	۱۰/۰	۱۰/۱	۹/۰	۶/۷	۶/۳	۷/۱	۴/۹
	Na_2O	۵/۳	۳/۵	۲/۹	۲/۷	۲/۶	۲/۸	۲/۴
	Fe_2O_3	۴/۵	۲/۶	۲/۷	۲/۹	۲/۱	۴/۷	۴/۸

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

مشاهده می‌شود کـه در قـسمت نرمـه (زیـر ۳۷ میکـرون)، درصد آلومینا نسبت به بخش‌های دیگر بالاتر است که بعلت حضور مقادیر زیادی از کانی‌های رسی ریزدانه در این بخش می‌باشـد. همچنـین، مقـدار سـیلیس بعلـت سـختی بـالا و خردایش کمتر، در قسمت نرمه نسبت به سایر بخش‌ها کمتر می‌باشد. همانطور که دیده می‌شـود، مقـدار سـیلیس نمونـه نایین، در تمامی فراکسیون‌هـای ابعـادی از دو نمونـه دیگـر بالاتر می‌باشد. همچنین، میزان اکسید آلومینیـوم، در نمونـه ورزنه بیشتر از سایر نمونـه‌هـا بـوده و نمونـه کاشـان دارای کمترین مقدار Al_2O_3 است. از دیگرسو، از نظر مقـدار K_2O و Na_2O، نمونه کاشان در تمامی محـدوده انـدازه‌هـا دارای وضعیت بهتری نسبت به دو نمونه دیگـر مـی‌باشـد، کـه بـا مراجعه به شکل (۱)، می‌توان نتیجه گرفت که میزان بـالاتر آلبیت و پلاژیوکلازهای پتاسیک در این نمونـه، دلیـل ایـن تفاوت آشکار است.

با درنظر گرفتن میزان ناخالصی آهـن، مـی‌تـوان گفـت کـه نمونه ورزنه در تمامی فراکسیون‌های ابعادی وضعیت بدتری نسبت بـه دو نمونـه دیگـر داشـته و ناخالـصی آهـن نمونـه کاشان، کمتر است. با توجه به بـالا بـودن مقـدار ذرات ریـز (حدود ۳۰ درصد ریز تر از ۳۷ میکرون) و همچنـین در صـد بالاتر ناخالصی آهن در این ذرات، می‌توان راهیابی ناخالصی آهن به جریان محـصول (سـرریز) را در مرحلـه جـدایش بـا هیدروسیکلون پیش بینی نمود.

پس از انجام مرحله خردایش، محصول آسـیا بـا مشخـصات آورده شده در جدول (۲) بعنوان خوراک، وارد هیدروسـیکلون شد. در بخش بعدی به تحلیل نتایج حاصل از جدایش توسط هیدروسیکلون پرداخته خواهد شد.

۳-۲- هیدروسیکلون

در این مرحله، از هیدروسیکلون به منظـور کـاهش ناخالـصی سیلیس و افزایش درصد فلدسپات نمونه‌هـا اسـتفاده شـد. بـا شروع به کار پمپ دستگاه، دوغاب وارد سیکلون شده و یـک جریان گردابی داخل سیکلون ایجاد می‌شود. ذرات سنگین‌تـر که انتظار می‌رود ذرات سیلیس باشند، در اثر نیـروی گریـز از مرکز به سمت دیواره‌ها رانده شده و به سمت پایین می‌لغزنـد و از ته ریز خارج می‌شوند. درهمین حال، ذرات ریـز و سـبک، مانند ذرات رسی که نیروی گریز از مرکز تاثیر کمتری بر آنها دارد، در مرکز سیکلون باقی مانده و به سمت بالا صعود نموده و از سـرریز سـیکلون خـارج مـی‌شـوند [۶]. نتـایج آزمـایش هیدروسیکلون در جدول (۳) مشاهده می‌شود. در مورد نمونـه نایین، متاسفانه بازیابی عملیات بسیار پایین بوده، طوریکه تنها حدود ۱۸ درصد کل مواد از سرریز خارج شده و بقیه به بخش باطله راه یافته است. درصد بازیابی برای Al_2O_3، ۲۰ درصـد، K_2O، ۱۵ درصـد و Na_2O، ۱۸ درصـد مـی‌باشـد. بعـلاوه، همانطور که ملاحظه می‌شود، ناخالصی سیلیس در محـصول، حدود ۴ درصد کاهش داشته است. از طرف دیگـر، ناخالـصی آهن، نه تنها کـاهش نیافتـه بلکـه متاسـفانه بـه ۲/۲ درصـد افزایش پیدا کرده است. همانطور که پیش از این اشـاره شـد، علت این رویداد، میزان بالای آهن در بخش ریزدانه است.

با مراجعه به نتـایج نمونـه ورزنـه، بازیـابی کلـی عملیـات در مقایسه بـا روش‌هـای مرسـوم هیدروسـیکلون، مناسـب و در حدود ۳۹ درصد اسـت. بـا وجـود اینکـه تـوفیقی در کـاهش محتوی سیلیس آن حاصل نشده و میزان ناخالـصی آهـن آن هم افزایش داشـته اسـت، میـزان Al_2O_3 و K_2O در سـرریز افزایش نسبی از خود نشان می‌دهند کـه مـی‌توانـد بـه دلیـل

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

راهیابی کانی‌های فلدسپات به سرریز باشد. همچنین، بازیابی هر دو برابر با ۴۳ درصد و بازیابی Na_2O، ۲۷ درصد است.

جدول ۳- نتایج آزمایش هیدروسیکلون بر روی هر سه نمونه

نمونه	جریان	درصد وزنی	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
نایین	سرریز	۱۷/۷	۶۰/۹	۱۹/۷	۶/۳	۲/۳	۲/۲
	ته ریز	۸۲/۳	۸۱/۹	۸/۵	۳/۵	۱/۵	۱/۰
ورزنه	سرریز	۳۹/۰	۶۰/۰	۱۷/۳	۴/۵	۱/۸	۶/۰
	ته ریز	۶۱/۰	۷۰/۲	۱۳/۲	۳/۵	۲/۱	۴/۴
کاشان	سرریز	۳۸/۵	۶۴/۴	۱۱/۶	۴/۹	۲/۶	۵/۳
	ته ریز	۶۱/۵	۷۴/۱	۷/۷	۵/۶	۲/۹	۲/۵

عملیات جداسازی نمونه کاشان نیز با بازیابی در حدود ۳۹ درصد، موفقیت خوبی در کاهش میزان سیلیس (حدود ۷ درصد) داشته است. لیکن از نظر محتوای ناخالصی آهن، به عللی که قبلاً ذکر شد، بر خلاف انتظار افزایش اتفاق افتاده است. از دیدگاه مقادیر Al_2O_3، K_2O و Na_2O، بهبودی در کیفیت ماده معدنی حاصل نشده و بازیابی این مواد در محصول هیدروسیکلون، بترتیب برابر با ۳۸، ۳۴ و ۳۲ درصد بوده است.

از آنجاکه مقدار ناخالصی آهن در محصول هر سه نمونه افزایش داشته است، لذا سرریز حاصل از هیدروسیکلون برای حذف آهن، تحت عملیات جدایش مغناطیسی شدت بالا قرار گرفت، که تحلیل نتایج حاصل از این عملیات در بخش بعدی آورده شده است.

۳-۳- جدایش مغناطیسی شدت بالا

با توجه به ماهیت ناخالصی‌های هدف، انتظار می‌رفت که با انجام جدایش مغناطیسی با شدت دو تسلا بر روی سرریز هیدروسیکلون، ناخالصی آهن موجود در نمونه‌ها به نحو چشمگیری کاهش یابد. لیکن، نتایج بدست آمده از این مرحله، نشان داد که با وجود کاهش درصد آهن تمامی نمونه‌ها، کیفیت محصول بدست آمده در حد استانداردهای مورد نیاز برای صنایع شیشه و سرامیک نمی‌باشند. مطابق اطلاعات ارایه شده در جدول (۴)، نمونه نایین با حفظ نسبی درصد اکسیدهای موجود، از جمله آهن در کنسانتره مغناطیسی، بازیابی حدود ۷۵ درصد داشته است و بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که روش مغناطیس در مورد این نمونه، کارایی مطلوبی ندارد. دلیل این مشاهده، می‌تواند درگیری بالای ذرات اکسیدآهن ریزدانه با دانه‌های رس و عدم آزادسازی مناسب آن باشد که مقدار زیادی از ماده ورودی را نیز با خود به بخش مغناطیسی (باطله) برده و بازیابی را کاهش داده است.

در مورد نمونه ورزنه، دیده می‌شود که میدان مغناطیسی با بازیابی بالای ۹۵ درصد و حفظ درصد اکسیدهای موجود در خوراک ورودی، ناخالصی آهن را در حدود ۱/۵ درصد کاهش داده است و لذا، در مقایسه با نمونه قبلی، نتیجه بهتری حاصل شده است. کنسانتره مغناطیسی نمونه کاشان نیز بهبود نسبی را نشان داده و ناخالصی آهن را در حدود یک درصد نسبت به سرریز هیدروسیکلون کاهش داده است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

جدول ۴- نتایج آزمایش جدایش مغناطیسی بر روی سرریز هیدروسیکلون

نمونه	محصول	درصد وزنی	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
نایین	کنسانتره	۷۵/۲	۶۲/۹	۱۹/۷	۶/۱	۱/۷	۲/۱
	باطله	۲۴/۸	۴۹/۱	۱۱/۰	۳/۵	۲/۳	۲۲/۸
ورزنه	کنسانتره	۹۸/۵	۶۲/۰	۱۷/۳	۴/۴	۱/۶	۴/۵
	باطله	۱/۵	۳۷/۶	۱۵/۵	۳/۵	۱/۵	۲۹/۰
کاشان	کنسانتره	۹۵/۱	۶۳/۸	۱۲/۴	۵/۲	۲/۸	۴/۱
	باطله	۴/۹	۵۸/۵	۱۱/۸	۴/۴	۲/۵	۹/۳

از آنجاکه پس از آزمایش جدایش مغناطیسی، هنوز میزان ناخالصی آهن تا حد مطلوب کاهش نداشته است، در مرحله نهایی خالص سازی از روش‌های لیچینگ شیمیایی بهره‌گیری شد. نتایج حاصل از لیچینگ با استفاده از سدیم دیتیونایت و اگزالیک اسید در بخش بعدی مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۴- نتایج آزمایش لیچینگ

سدیم دیتیونایت یا سدیم هیدروسولفیت ($Na_2S_2O_4$) به علت خاصیت احیا کنندگی بالا، به عنوان عامل موثری در حذف ناخالصی آهن از کانی‌های صنعتی به کار می‌رود [۸, ۹]. به منظور کاهش بیشتر ناخالصی آهن محصول نهایی، کنسانتره جدایش مغناطیس شدت بالا، با استفاده از سدیم دیتیونایت، بعنوان احیاکننده، در یک محیط اسیدی لیچ شد.

محلول‌های بدست آمده از این آزمایش‌ها، به رنگ زرد تا قهوه‌ای درآمد که نشان دهنده انحلال آهن از کنسانتره جدایش مغناطیسی بود. شدت رنگ با افزایش دما از ۳۰ به ۶۰ درجه سانتیگراد، به وضوح افزایش یافت. سدیم دیتیونایت، با استفاده از رابطه (۱) و (۲) اکسیدهای آهن فریک را احیا نموده و به صورت محلول آهن فروس در می‌آورد [۱۰].

نتایج آنالیز XRF محصول لیچینگ احیایی را در جدول (۵) ملاحظه می‌کنید. در مورد لیچینگ در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، می‌توان گفت که مقدار اکسید آهن موجود در نمونه‌های ورزنه و کاشان، حدود دو درصد کاهش یافته است و تغییر چندانی در نمونه نایین از این منظر، حاصل نشده است.

$$Na_2S_2O_4 + 3H_2O \rightarrow NaHSO_4 + NaHSO_3 + 4H^+ \quad (۱$$

$$2NaHSO_3 + Fe_2O_3 + 2H^+ \rightarrow 2NaHSO_4 + H_2O + 2Fe^{2+} \quad (۲$$

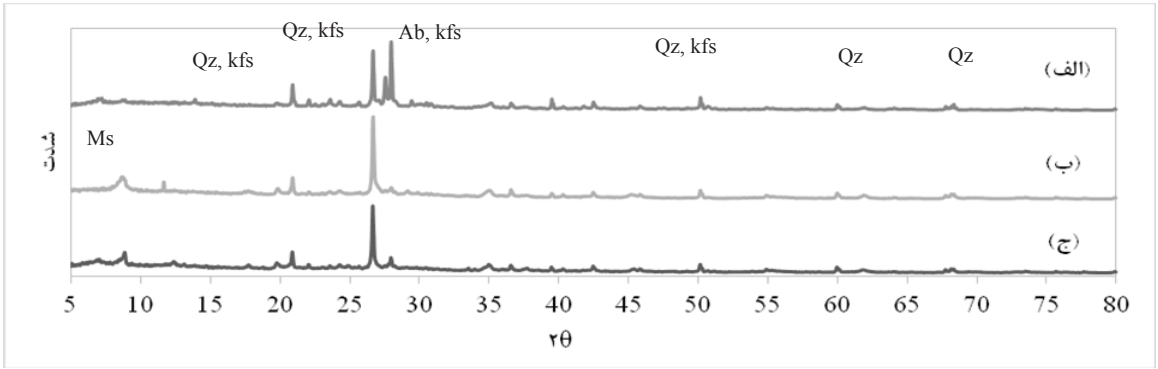
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

جدول ۵- ترکیب کنسانتره حاصل از لیچینگ کنسانتره مغناطیس با سدیم دیتیونایت

نمونه	دما	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
نایین	۳۰ °C	۵۶/۷	۱۹/۲	۶/۸	۲/۴	۲/۶
	۶۰ °C	۵۳/۶	۲۱/۰	۷/۵	۱/۵	۲/۴
ورزنه	۳۰ °C	۵۵/۹	۱۷/۸	۴/۶	۲/۱	۲/۵
	۶۰ °C	۵۲/۳	۱۷/۵	۴/۸	۱/۶	۴/۷
کاشان	۳۰ °C	۶۵/۰	۱۴/۲	۵/۴	۲/۵	۲/۳
	۶۰ °C	۵۸/۵	۱۵/۲	۶/۲	۲/۸	۳/۵

با افزایش دمای واکنش به ۶۰ درجه سانتیگراد، میزان آهن در نمونه نایین همچنان بدون تغییر مانده و وضعیت درصد آهن نمونه‌های ورزنه و کاشان، نسبت به محصول لیچینگ ۳۰ درجه سانتیگراد، بدتر شده است. بنظر می‌رسد که افزایش دما تغییر چندانی در مقدار آهن کنسانتره جدایش مغناطیسی ایجاد نکرده است. این در حالی است که در مورد تمامی نمونه‌ها و در هر دو دما، شدت رنگ محلول باقیمانده، نشان‌دهنده انحلال قابل توجه ناخالصی آهن بود. کارهای مشابه در این زمینه [۱۱-۱۳] با استفاده از سدیم دیتیونایت، انحلال بالای آهن را مخصوصاً در دماهای بالا گزارش نموده‌اند. در برخی این گزارش‌ها، از غلظت آهن در محلول باقیمانده، بعنوان شاهدی بر حذف ناخالصی آهن از خاک‌های صنعتی استفاده شده و با کسر مقدار آهن حل شده از میزان آهن اولیه موجود در خاک، نتیجه‌گیری شده که درصد آهن در خاک کاهش یافته است. لیکن، در این کار تحقیقاتی، با استفاده از آنالیز XRF نشان داده می‌شود که با وجود انحلال آهن، درصد آن در خاک تغییری نکرده است. جهت بررسی دقیق‌تر این پدیده، از محصول لیچینگ احیایی در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد، آنالیز کانی‌شناسی XRD (شکل (۲)) تهیه و با نتیجه XRD نمونه‌های اولیه ارایه شده در شکل (۱) مقایسه شد.



شکل ۲- نتایج آنالیز XRD بر روی محصول عملیات لیچینگ با سدیم دیتیونایت.

(الف) نمونه کاشان، (ب) نمونه نایین، (ج) نمونه ورزنه. (Qz: کوارتز، kfs: فلدسپات پتاسیک، Ab: آلبیت، Ms: موسکوویت)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

همانطور که ملاحظه می‌شود، در مورد نمونه کاشان (الف)، شدت پیک‌های آلبیت و پلاژیوکلاز پتاسیک در شکل (۲) در مقایسه با شکل (۱) به میزان زیادی افزایش یافته و حتی بعد از لیچینگ، پیک‌های پلاژیوکلاز از پیک کوارتز در ۲۶/۵ درجه، بلندتر هستند. این در حالیست که اگر نتایج XRF محصول لیچینگ را در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد که در جدول (۵) ارایه شده با جدول (۱) مقایسه کنید، مقادیر K_2O و Na_2O تغییر معناداری نکرده‌اند. در مقابل، مقدار سیلیس بیش از ۱۲ درصد نسبت به نمونه اولیه و بیش از پنج درصد نسبت به کنسانتره جدایش مغناطیسی کاهش داشته است. این مشاهدات بیانگر آن است که سدیم دیتیونایت علاوه بر انحلال ناخالصی‌های آهن، مقادیری از سیلیس موجود در نمونه را نیز حل کرده است. طبق کارهای مشابه صورت گرفته، سیلیس ممکن است از شبکه کریستالی کانی‌های آلومینوسیلیکاته موجود در خاک یا از انحلال سیلیس آمورف، به همراه آهن و یا بصورت جداگانه [۱۴, ۱۵]، استخراج شده باشد که با افزایش دما، غلظت سیلیس محلول افزایش می‌یابد [۱۶]. در مورد نمونه‌های نایین و ورزنه، همانطور که از مقایسه شکل (۱) و شکل (۲) بر می‌آید، شدت پیک‌های مسکوویت، پس از انجام عملیات لیچینگ، افزایش یافته است، به نحوی که پس از لیچینگ، پیک‌های موسکویت به راحتی قابل تشخیص می‌باشند. آنالیز XRF نیز نشان می‌دهد که میزان سیلیس خاک بعد از انجام لیچینگ، نسبت به قبل از آن، نزدیک به ۱۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین، انحلال سیلیس آمورف یا سیلیس موجود در کانی‌های آلومینوسیلیکاته با ساختار کریستالی ضعیف، باعث واضح شدن بیشتر پیک‌های مربوط به آلبیت، پلاژیوکلاز پتاسیک و کوارتز شده است.

درصورتی‌که کاهش در مقدار سیلیس، نتیجه استخراج آن از درون شبکه کریستالی کانی‌های آلومینوسیلیکاته باشد، می‌تواند تاثیر مخربی بر روی خواص خاک جهت استفاده در صنایع مربوطه داشته باشد، طوری‌که مثلاً در مورد کاشی و سرامیک، به دلیل تخریب کانی‌های فلدسپات و کائولینیت موجود در خاک، خواص محصول تولیدی را پس از پخت با مشکلات جدی مواجه می‌سازد.

با درنظر گرفتن تمامی مشکلات مذکور و همچنین بعلت کاهش اندک مقدار ناخالصی سیلیس، افزایش اندک مقدار اکسیدهای آلومینیوم، پتاسیم و سدیم و همچنین افزایش قابل ملاحظه آهن در محصول هیدروسیکلون، یک آزمایش لیچینگ آهن بر روی مواد ورودی هیدروسیکلون انجام شد. در این آزمایش، عامل لیچینگ از سدیم دیتیونایت به اگزالیک اسید تغییر داده شد و دمای واکنش به ۸۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت. طبق رابطه (۳)، اگزالیک اسید با یون فریک موجود در اکسیدهای آهن، تشکیل کمپلکس داده و آنها را وارد محلول می‌نماید [۱۷, ۱۸].

$$3C_2O_4^{2-} + Fe^{3+} \rightarrow [Fe(C_2O_4)_3]^{3-} \qquad (۳$$

پس از اتمام عملیات لیچینگ دوم، مشاهده شد که رنگ تمامی محلول‌های بدست آمده به زرد تا سبز فسفری تغییر کرد. این رنگ، علامت تولید کمپلکس اگزالات فریک محلول می‌باشد که نشان می‌دهد انحلال آهن از نمونه‌ها موفقیت‌آمیز بوده است [۱۷]. به منظور بررسی کاهش درصد آهن خاک، آنالیز XRF هم بر روی محصول عملیات لیچینگ انجام شد که نتایج آن در جدول (۶) ارایه شده است. در نتیجه این فرایند، ناخالصی آهن موجود در نمونه‌های فلدسپات به حدود یک و حتی زیر یک درصد برای نمونه کاشان رسیده است و برخلاف آزمایش‌های

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

انجام شده با سدیم دیتیونایت، با وجود انجام عملیات در دمای بالاتر، هیچگونه کاهش درصد سیلیس هم نسبت به خوراک اولیه دیده نمی‌شود. بنابراین، استفاده از اگزالیک اسید برای کاهش ناخالصی آهن از فلدسپات‌ها پیشنهاد می‌شود.

جدول ۶- ترکیب کنسانتره حاصل از لیچینگ هر سه نمونه اولیه با اگزالیک اسید

نمونه	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
نایین	۶۰/۲	۱۵/۰	۳/۶	۱/۱	۱/۲
ورزنه	۷۲/۲	۱۶/۴	۲/۸	۲/۱	۱/۱
کاشان	۷۳/۴	۱۲/۸	۴/۵	۳/۱	۰/۸

۳-۵- نتایج بررسی فنی و اقتصادی

در پایان پژوهش، به منظور بررسی امکان اجرای طرح در مقیاس صنعتی، محاسبات فنی و اقتصادی اولیه برای تاسیس کارخانه‌ای با ظرفیت ۱۵۰ هزار تن در سال، صورت گرفت که نتایج آن بطور خلاصه در جدول (۷) لیست شده است. طبق اطلاعات ارایه شده، نرخ بازگشت سرمایه، ۲۴ درصد و دوره بازگشت سرمایه، نزدیک به چهار سال می‌باشد که با در نظر گرفتن ارزش خالص فعلی (Net Present Value) حدود ۲/۲ میلیارد ریال، احداث این واحد فرآوری از دیدگاه اقتصادی بصرفه است.

جدول ۷- نتایج بررسی فنی و اقتصادی طرح

مشخصه اقتصادی	مقدار	واحد
ظرفیت تولید (در زمان بهره برداری کامل)	۱۵۰	هزار تن
سرمایه گذاری ثابت	۲۱۹۳۰/۱۸	میلیون ریال
سرمایه در گردش (۳ ماهه)	۳۹۳/۸۹	میلیون ریال
فروش کل	۱۲۰۰۰	میلیون ریال
جمع هزینه های تولید (ثابت و متغیر)	۴۵۰۴/۸	میلیون ریال
سود خالص بعد از مالیات	۵۶۲۱/۴	میلیون ریال
قیمت تمام شده هر واحد محصول	۳۰۰۳۲	ریال
قیمت فروش هر واحد محصول	۸۰۰۰۰	ریال
نقطه سربه سر	۳۹۶۴۳	تن
نقطه سربه سر	۲۶	درصد
نرخ بازگشت سرمایه (IRR)	۲۴	درصد
دوره برگشت سرمایه	۴۷/۶	ماه
ارزش خالص فعلی (NPV)	۲۲۱۴/۵۴	میلیون ریال

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

۴- نتیجه گیری

بر اساس کارهای انجام شده در این پژوهش، جهت افزایش کیفیت فلدسپات‌های استان اصفهان، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از هیدروسیکلون تاحدودی می‌تواند باعث کاهش ناخالصی سیلیس و افزایش نسبی اکسیدهای آلومینیوم، پتاسیم و سدیم شود. لیکن به علت بازیابی کم و افزایش ناخالصی آهن در سرریز، که حتی با استفاده از جداکننده مغناطیسی شدت بالا هم به راحتی قابل حذف نیست، استفاده از لیچینگ به کمک اگزالیک اسید پیشنهاد می‌شود. استفاده از سدیم دیتیونایت بعنوان عامل لیچینگ جهت انحلال آهن، بعلت انحلال سیلیس و آسیب احتمالی به شبکه فدسپات‌ها پیشنهاد نمی‌شود. انجام لیچینگ با استفاده از اگزالیک اسید، نه تنها باعث کاهش ناخالصی آهن در حد استانداردهای مورد نیاز صنایع شد، بلکه تغییری در مقدار سیلیس موجود در نمونه اولیه هم ایجاد نکرد، که به نظر می‌رسد بر خلاف سدیم دیتیونایت، تاثیر مخربی در ساختار کانی‌های فلدسپات نداشته باشد. بنابراین، لیچینگ با بهره‌گیری از اگزالیک اسید جهت حذف ناخالصی آهن از فلدسپات‌های استان اصفهان پیشنهاد می‌شود. همچنین، با توجه به بررسی‌های فنی و اقتصادی انجام شده، انجام این طرح در مقیاس صنعتی، از دیدگاه اقتصادی بصرفه است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از سازمان صنعت، معدن و تجارت استان اصفهان به دلیل تامین مالی این طرح پژوهشی تحت قرارداد شماره ۱۰۴/۸۲۷۷۳ تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] F. Crundwell, The mechanism of dissolution of the feldspars: Part I. Dissolution at conditions far from equilibrium, Hydrometallurgy, Vol. 151, pp. 151-162, 2015.

[2] M. R. Yazdani, T. Tuutijärvi, A. Bhatnagar and R. Vahala, Adsorptive removal of arsenic (V) from aqueous phase by feldspars: kinetics, mechanism, and thermodynamic aspects of adsorption, Journal of Molecular Liquids, Vol. 214, pp. 149-156, 2016.

[3] Y. Liu, H. Peng and M. Hu, Removing iron by magnetic separation from a potash feldspar ore, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., Vol. 28, No. 2, pp. 362-366, 2013.

[۴] م.ر. حسینی، م.ر. عزیزی‌نیا، ا. عظیمی، ع. احمدی، بررسی جداسازی ناخالصی‌های کائولن، فلدسپات و خاک‌های صنعتی به منظور ایجاد ارزش افزوده و استفاده در صنایع چینی‌سازی، کاشی‌سازی و صنایع دارویی و صادرات. ۱۳۹۶، سازمان صنعت، معدن و تجارت استان اصفهان.

[5] M. R. Hosseini, and A. Ahmadi, Biological beneficiation of kaolin: A

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

review on iron removal, Applied Clay Science, Vol. 107, pp. 238-245, 2015.

[6] E. Barrachina, I. Calvet, D. Fraga and J.B. Carda, Ceramic porcelain stoneware production with Spanish clays purified by means of the removal of iron compounds and organic matter using physical methods, Applied Clay Science, Vol. 143, pp. 258-264, 2017.

[7] L. Chen, R. Yang, J. Zeng, Y. Shao, Q. Xiao and S. Guo, A wet belt permanent high gradient magnetic separator for purification of non-metallic ores, International Journal of Mineral Processing, Vol. 153, pp. 66-70, 2016.

[8] M. Lu, G. Xia and W. Cao, Iron removal from kaolin using thiourea dioxide: Effect of ball grinding and mechanism analysis, Applied Clay Science, Vol. 143, pp. 354-361, 2017.

[9] M. Lu, G. Xia and X. Zhang, Refinement of industrial kaolin by removal of iron-bearing impurities using thiourea dioxide under mechanical activation, Applied Clay Science, Vol. 141, pp. 192-197, 2017.

[10] S. Irwin, A comparison of the use of sodium metabisulfite and sodium dithionite for removing rust stains from paper, The book and paper group annual, Vol. 30, pp. 37-46, 2011.

[۱۱] ص. قاسمی فلاورجانی، م. عبداللهی، آهن زدایی از کائولن رباط خان طبس به روش هیدرومتالوژی و اثرات زیست محیطی آن و طرا حی آزمایشگاه با استفاده از نرم افزار MiniTab، اولین سمینار تخصصی محیط زیست و رنگ. ۱۳۸۲، پژوهشکده صنایع رنگ.

[12] N.H. Aguilera and M.L. Jackson, Iron oxide removal from soils and clays, Soil Science Society of America Journal, Vol. 17, No. 4, pp. 359-364, 1953.

[13] V. Ambikadevi and S. Gopalakrishna, Iron stain removal by bleaching and leaching techniques, in Proceedings of the 10th Kerala Science Congress, 1997.

[14] B. Smith, Chemical dissolution techniques in the study of soil clays: Part I, Clay Minerals, Vol. 6, p. 23, 1965.

[15] E.A.C. Follett, W.J. Mchardy, B.D. Mitchell and B.F.L. Smith, Chemical dissolution techniques in the study of soil clays: Part II, Clay Minerals, Vol. 6, p. 35, 1965.

[16] J. McKeague and M. Cline, Silica in soil solutions: I. The form and concentration

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]

of dissolved silica in aqueous extracts of some soils, Canadian Journal of Soil Science, Vol. 43, No. 1, pp. 70-82, 1963.

[17] M.R. Hosseini, M. Pazouki, M. Ranjbar, M. Habibian, Bioleaching of iron from highly contaminated kaolin clay by Aspergillus niger, Applied Clay Science, Vol. 37, No. 3, pp. 251-257, 2007.

[18] M. Taran and E. Aghaie, Designing and optimization of separation process of iron impurities from kaolin by oxalic acid in bench-scale stirred-tank reactor, Applied Clay Science, Vol. 107, pp. 109-116 2015.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.3.4.5]