

# بررسی کاهش آهن در سیلیس به روش اسیدشوئی و مغناطیسی

محمد نوعپرست

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد کلاهدوزان

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

رجب اصغری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۹/۳۰، تاریخ تصویب ۸۲/۳/۳)

## چکیده

یکی از ناخالصی های مهم در پودر سیلیس اکسید آهن است، که کیفیت محصول شیشه را به شدت کاهش می دهد. وجود اکسید آهن در سیلیس مصرفی صنعت شیشه نه تنها باعث ایجاد رنگهای نامطلوب در آن می گردد، بلکه تغییرات بیش از حد مجاز آن نیز اختلال در روند تولید را نیز بدنبال دارد. در این تحقیق سیلیس مصرفی در کارخانه استخراج و فرآوری مواد اولیه شیشه تاکستان که یکی از مهمترین تولید کنندگان پودر سیلیس در صنایع شیشه می باشد، با کاربرد روشهای اسیدشوئی و جدایش مغناطیسی فرآوری شد. نمونه خوراک با میزان اکسید آهن ۰/۰۸۲٪ ابتدا مورد مطالعه کانی شناسی قرار گرفت تا نحوه درگیری کانیهای مختلف شناسائی گردد، و سپس تحت شرایط مختلفی پرعیار شد. پارامترهایی نظیر درصد جامد، زمان، دما، نوع اسید، میزان اسید و شدت میدان مغناطیسی بهینه سازی گردید و نهایتاً تلفیق دو روش اسیدشوئی و مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که در بهترین حالت محصولی با اکسید آهن ۰/۰۱۸٪ قابل دستیابی خواهد بود.

**واژه های کلیدی:** کانه آرائی، فرآوری سیلیس، اکسید آهن، اسیدشوئی، جدایش مغناطیسی

## مقدمه

صنعت شیشه از مواد مختلفی بعنوان مواد اولیه استفاده می نماید، که غالباً از معادن استخراج می شوند و سپس مورد فرآوری قرار می گیرند. میزان خلوص و همگنی مواد پس از فرآوری، تاثیر بسزایی در کیفیت شیشه تولیدی دارد [۵،۱]. مهمترین ناخالصی مطرح در صنعت شیشه اکسید آهن است که عیار بالای آن موجب کاهش کیفیت محصول می گردد [۱]. خوراک کارخانه کانه آرائی شرکت استخراج و فرآوری مواد اولیه شیشه تاکستان از معدن سیلیس قرمز آباد تامین می شود. در این مطالعه روشهای مختلف اسیدشوئی [۳] و جدایش مغناطیسی [۴،۲] بمنظور کاهش اکسید آهن خوراک این کارخانه بکار گرفته شدند. نتایج حاصل از این مطالعه در قالب دو مقاله ارائه میشود که در مقاله حاضر (بخش اول) نتایج حاصل از مطالعات کانی شناسی، و کاربرد روشهای

فرآوری اسیدشوئی و جدایش مغناطیسی و در مقاله دوم نتایج حاصل از آزمایشهای فلوتاسیون ارائه می شود.

## نمونه برداری و آماده سازی نمونه

نمونه لازم جهت انجام مطالعه کانی شناسی و آزمایشهای کانه آرائی از مواد معدنی و استخراجی دپو شده تهیه گردید. بمنظور نمونه برداری ابتدا یک شبکه با ابعاد تقریبی ۴×۴ مترمربع در نظر گرفته شد و سپس از نقاط مختلف این شبکه نمونه برداری بعمل آمد. ابعاد نمونه برداشت شده با وزن تقریبی ۱۰۰ کیلوگرم، با استفاده از سنگ شکن های فکی و غلتکی (در دو مرحله) به ریزتر از ۳ میلی متر تبدیل شد. پس از آماده سازی، نمونه به سه بخش تقسیم و از هر بخش یک نمونه متوسط تهیه گردید و هر نمونه با دستگاه جذب اتمی مورد عیارسنجی اکسید آهن قرار گرفت، که عیار متوسط اکسید آهن این سه نمونه بعنوان عیار متوسط اکسید آهن

بصورت ذرات آزاد در ابعاد ۲۰۰-۵۰ میکرون می باشند. همچنین کانیهای آهندار در برخی از ذرات کوارتز بصورت ادخال نیز دیده می شوند که ابعاد آنها ۳۰-۲۰ میکرون است. روتیل، زیرکن و تورمالین از ناخالصی های دیگر هستند، که غالباً بصورت ادخالهایی با ابعاد ۲۰-۱۰ میکرون در ذرات سیلیس مشاهده شده اند. فلدسپات از نوع میکروکلین نیز بصورت آزاد و درگیر در نمونه ها وجود دارد.

مطالعات کانی شناسی نشان دادند، که برای آزادی ۸۰٪ کانیهای آهندار لازم است تا ابعاد ذرات به ریزتر از ۱۵۰ میکرون برسد، که البته این امر در فرآیند تولید سیلیس به جهت تولید نرمه زیاد امکانپذیر نمی باشد.

### آنالیز خوراک در فراکسیونهای مختلف ابعادی

حدود یک کیلوگرم از نمونه آماده شده با استفاده از آسیای غلتکی به ابعاد ریز تر از ۸۴۰ میکرون (حداکثر ابعاد سیلیس مصرفی در صنعت شیشه) تبدیل شد. این نمونه تجزیه سرنندی شد و در چهار فراکسیون ۲۹۷+۸۴۰، ۲۵۰+۲۹۷، ۱۴۹+۲۵۰ و ۱۴۹- میکرون دانه بندی شد. نمونه هر فراکسیون با استفاده از ریفل تقسیم گردید و پس از تقسیم از روی یک مگنت دستی (جهت جدایش ذرات آهن حاصل از مراحل سنگ شکنی) عبور داده شد. سپس نمونه ها با هاون به ابعاد ریزتر از ۱۵۰ میکرون رسانده شدند. نتایج عیارسنجی اکسید آهن حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه ها در هر فراکسیون در جدول (۱) نشان داده شده است.

نمونه در نظر گرفته شد. عیار اکسید آهن سه نمونه به ترتیب معادل ۰/۰۹۲، ۰/۰۸۳ و ۰/۰۷۳ درصد و متوسط آن ۰/۰۸۲ درصد تعیین گردید.

### مطالعه کانی شناسی

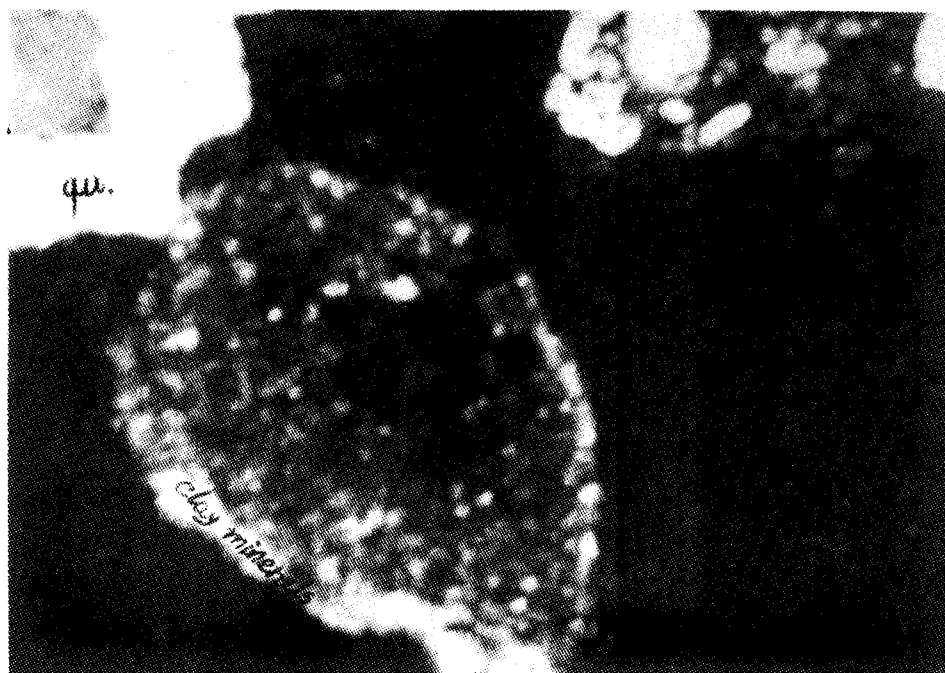
بمنظور انجام مطالعه کانی شناسی از نمونه کلی، یک نمونه ۱ کیلوگرمی تهیه شد و سپس در هفت فراکسیون ابعادی ۸۴۰+، ۵۹۰+۸۴۰، ۴۲۰+۵۹۰، ۲۵۰+۲۹۷، ۱۸۰+۲۵۰، ۱۴۹+۱۸۰ و ۱۴۹- میکرون آنالیز سرنندی انجام شد و از مواد باقیمانده در هر فراکسیون ابعادی جهت مطالعه کانی شناسی نمونه برداری شد. از نمونه های لازم، تیغه نازک و همچنین از نمونه های بخش خردایش (آسیا) و مرحله اسیدشوئی نیز مقطع نازک تهیه شد.

مطالعه کانی شناسی مقاطع صیقلی و تیغه های نازک نشان داد که سیلیس مورد مطالعه دارای بافت دانه ای می باشد و اندازه متوسط ذرات در حدود ۴۰۰-۳۵۰ میکرون است. این ذرات عمدتاً با سیمان رسی و یا سیمان سیلیسی و در برخی موارد با سیمان کربناته بهم متصل شده اند. کانیهای رسی عمدتاً از نوع ایلیت می باشند که پس از خردایش در اطراف ذرات سیلیس باقی می مانند (شکل ۱). کانیهای کربناته از نوع کلسیت، دولومیت و آنکرت (کربنات آهندار) هستند.

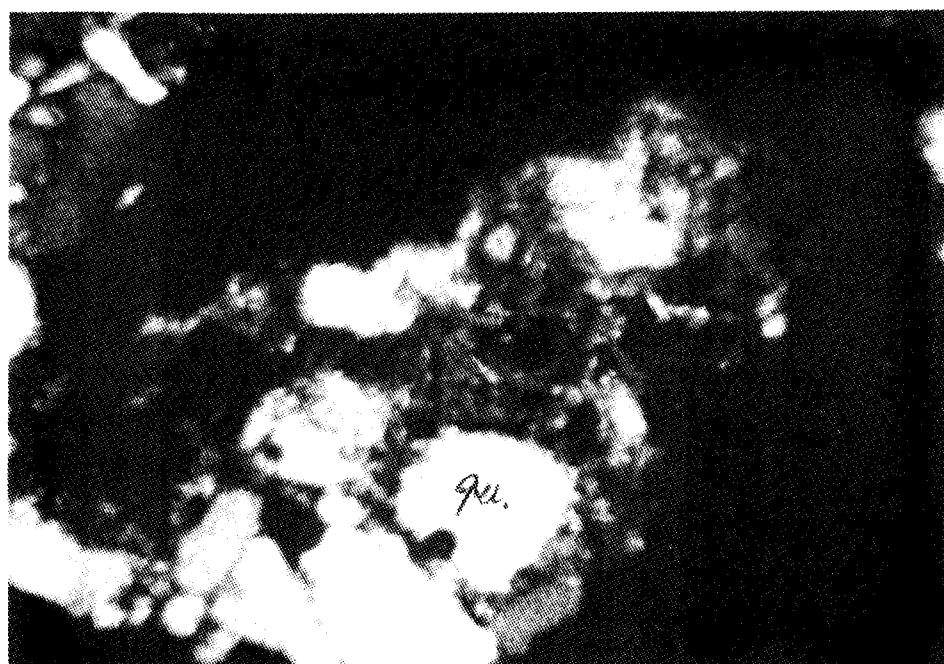
کانیهای آهندار در سیلیس عمدتاً از نوع اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) بوده و عمدتاً بصورت ذرات درگیر با سیلیس (شکل ۲) و همچنین

جدول ۱: نتایج حاصل از تجزیه سرنندی و عیارسنجی در چهار دانه بندی.

دانه بندی میکرون	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	درصد وزن باقیمانده (%)	توزیع اکسید آهن (%)
-۸۴۰+۳۰۰	۰/۰۳۰	۲۷/۱	۹/۶۱
-۳۰۰+۲۵۰	۰/۰۶۲	۲۴/۰	۱۷/۵۸
-۲۵۰+۱۵۰	۰/۱۲۰	۴۳/۰	۶۰/۹۶
-۱۵۰	۰/۱۷۰	۵/۹	۱۱/۸۵
عیار نمونه کلی	۰/۰۸۵	—	۱۰۰



شکل ۱ : قطعات درگیر آنکريت يا دولوميت با ذرات کوارتز (۸۵ برابر).  $130 \mu m$



$120 \mu m$

شکل ۲ : کانیهای کدر آهن دار درگیر با کالسدونی و هاله های رسی در اطراف آن (۸۵ برابر).

جدول ۲: نتایج آزمایش های اسیدشونی تحت مقادیر مختلف جامد در پالپ.

شماره آزمایش	درصد جامد	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	درصد حذف اکسید آهن
۱	۳۰	۰/۰۳۳۰	۶۰/۰
۲	۴۵	۰/۰۳۲۲	۶۱/۲
۳	۶۰	۰/۰۲۷۲	۶۷/۲
۴	۷۵	۰/۰۲۵۹	۶۸/۸

استفاده از اسیدسولفوریک انجام گرفت، درصد وزنی جامد در پالپ مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا درصد وزنی ۳۰، به عنوان مبنا در نظر گرفته شد و سپس در سه آزمایش، هر بار ۱۵٪ به درصد وزنی جامد در پالپ افزوده شد (تا میزان ۷۵٪). در هر چهار آزمایش، زمان اسیدشونی ۲۵ دقیقه و میزان مصرف اسید معادل ۸ کیلوگرم بر تن بود.

نتایج حاصل در مورد اکسید آهن موجود در محصول آزمایش های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج نشان میدهد که بیشترین میزان اکسید آهن در درصد وزنی جامد ۳۰ بدست آمده است، که معادل ۰/۰۳۳٪ و کمترین مقدار آن نیز (برای ۷۵٪ وزنی جامد) معادل ۰/۰۲۵۹٪ بوده است.

نتایج حاصل دلالت بر آن دارند که با افزایش میزان جامد در پالپ، مقدار اکسید آهن کاهش می یابد. البته لازم به ذکر است که به جهت اطمینان بیشتر، آزمایش دیگری با ۸۵٪ وزنی جامد انجام شد که به دلیل بالا بودن درصد جامد، پالپ دارای سیالیت لازم نبود و ذرات سیلیس صرفاً در اطراف پره دستگاه همزن دارای حرکت بودند، و نقاط خارج از این ناحیه حالت ساکن داشتند و لذا انجام آزمایش، بعلت عدم حصول نتیجه مطلوب متوقف شد. نتایج حاصل بر این امر دلالت دارند که میزان بهینه درصد وزنی جامد پالپ حدود ۷۵-۷۰٪ است. از طرف دیگر انجام اسید شونی در شرایطی با درصد جامد بسیار بالا، استهلاک شدیدی را به وسایل در مدار تحمیل می نماید، ضمن آنکه همزدن چنین پالپی نیاز به موتور قوی را خواهد داشت.

همانطور که در جدول (۱) مشاهده می شود با کاهش ابعاد، میزان اکسید آهن افزایش می یابد؛ این بدان معنا است که میزان ناخالصی ها در اندازه های ریزتر، بیشتر می باشد و همچنین بیانگر ریزبودن ناخالصی ها و یا ریزتر شدن ناخالصی ها در مراحل مختلف خردایش است. البته این امر را می توان به پائین بودن سختی ناخالصی هایی نظیر رسها، کربناتها، کانیهای کربناته و فلدسپاتها، در مقایسه با سیلیس نسبت داد که در مطالعات کانی شناسی نیز مشاهده شده بودند.

### آزمایش های فرآوری

آزمایشهای فرآوری بمنظور کاهش اکسید آهن در سیلیس به روشهای (الف) اسید شوئی، (ب) مغناطیسی و (پ) فلوتاسیون انجام شدند که دو بخش اول در این مقاله، و شرح مربوط به کاربرد روش فلوتاسیون و نتایج حاصل از آن بدلیل گستردگی تعداد آزمایشها، در مقاله دیگری ارائه می گردد.

### آزمایشهای فرآوری اسیدشونی

آزمایشهای متعددی به جهت بررسی عوامل مختلف انجام گرفت. این عوامل عبارت بودند از: درصد وزنی جامد در پالپ، نوع و میزان اسید مصرفی و زمان و دما. شایان توجه می داند که در بخش فلوتاسیون اثر pH مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت، که نتایج آن در مقاله دیگری ارائه شده است.

### تاثیر درصد وزنی جامد در پالپ

در اولین مرحله از آزمایشهای اسیدشونی که با

## تأثیر زمان ساییش

در این مرحله، آزمایش ها با انجام عمل ساییش در مدت زمانهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه و بدون اسید انجام شدند. جدول (۳) نتایج حاصل را ارائه می دهد که با افزایش زمان ساییش، میزان اکسید آهن تغییری ندارد و در حد ۰/۰۳٪ ثابت مانده است. این امر را می توان به همزدن پالپ در شرایط بدون استفاده از اسید نسبت داد، که تنها در اثر برخورد بین ذرات، مقداری از ناخالصی های سطحی ذرات جدا می شوند و در صورت استفاده از اسید، علاوه بر عمل فوق، کاهش ناخالصیها (در اثر انحلال در اسید) و در نتیجه کاهش اکسید آهن را نیز خواهیم داشت.

## تأثیر زمان اسیدشویی

در این مرحله، آزمایشهای مرحله قبل (ساییش) با استفاده از اسید سولفوریک تکرار شدند. نتایج این آزمایشها در جدول (۴) ارائه شده است.

نتایج نشان می دهند که با افزایش زمان اسیدشویی، از میزان اکسید آهن کاسته می شود و این میزان از ۰/۰۲۲۹٪ برای زمان ۱۰ دقیقه تا ۰/۰۱۹۲٪ برای ۴۰ دقیقه تغییر می کند. البته میزان کاهش اکسید آهن باتوجه به افزایش زمان بسیار کم است، که تقریباً بطور متوسط به ازاء هر ۱۰ دقیقه افزایش زمان اسیدشویی، حدود ۰/۰۰۱۲٪ از اکسید آهن کاسته شده است. کاملاً روشن است که با افزایش زمان اسید شویی، میزان انحلال عنصر در اسید نیز افزایش می یابد. روند مذکور در این سری از آزمایش ها مشاهده شد، به گونه ای که پس از افزایش زمان اسیدشویی از ۱۰ به ۴۰ دقیقه، میزان اکسید آهن نیز از ۰/۰۲۲۹ به ۰/۰۱۹۲ درصد کاهش یافت. البته میزان بالای اکسید آهن به میزان ۰/۰۲۴۵ درصد در زمان اسید شویی ۲۰ دقیقه محتملاً ناشی از همگنی نامطلوب نمونه است. باتوجه به نتایج حاصل، زمان بهینه اسیدشویی حدود ۲۵-۲۰ دقیقه می باشد.

جدول ۳: تغییرات اکسید آهن با افزایش زمان ساییش.

شماره آزمایش	زمان ساییش (دقیقه)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	درصد وزنی جامد	درصد حذف اکسید آهن
۱	۱۰	۰/۰۳	۷۰	۶۳/۸
۲	۲۰	۰/۰۲۹	۷۰	۶۲/۰
۳	۳۰	۰/۰۳	۷۰	۶۳/۸
۴	۴۰	۰/۰۳۱	۷۰	۶۲/۶

جدول ۴: تغییرات اکسید آهن با افزایش زمان اسیدشویی.

شماره آزمایش	زمان اسیدشویی دقیقه	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	درصد وزنی جامد	مقدار اسید مصرفی (kg/ton)	درصد حذف اکسید آهن
۱	۱۰	۰/۰۲۲۹	۷۰	۸	۲۷/۴
۲	۲۰	۰/۰۲۴۵	۷۰	۸	۷۰/۵
۳	۳۰	۰/۰۲۲۴	۷۰	۸	۷۳/۰
۴	۴۰	۰/۰۱۹۲	۷۰	۸	۷۶/۹

## تأثیر میزان اسید مصرفی

تأثیر میزان اسید مصرفی در کاهش اکسید آهن سیلیس، در آزمایش های این مرحله مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش چهار آزمایش با مقدار اسید ۸، ۱۶، ۲۴ و ۳۲ کیلوگرم بر تن ماده معدنی انجام شدند. البته سایر شرایط در چهار آزمایش ثابت، و عبارت بودند از: ۷۰٪ وزنی جامد و ۲۵ دقیقه زمان اسیدشویی. جدول (۵)

نتایج حاصل از این آزمایش ها را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، روند کاهش اکسید آهن کند است، و این مقدار از حدود ۰/۰۲۳۲٪ به ۰/۰۱۸۵٪ می رسد در واقع به ازاء افزایش هر ۸ کیلوگرم بر تن اسید، حدود ۰/۰۰۱۵٪ از اکسید آهن کاسته شده است. البته در خط تولید کارخانه شرکت استخراج و فرآوری مواد اولیه شیشه، میزان اسید مصرفی باتوجه به pH پالپ

دانه بندی مختلف  $۴۲۰+۵۹۰$ ،  $۲۹۷+۴۲۰$  و  $۱۰۰+۲۹۷$  - میکرون تهیه شدند. آزمایشها با شرایط یکسان از نظر زمان اسیدشویی (۲۵ دقیقه) و  $۷۰\%$  وزنی جامد و میزان اسید ۸ کیلوگرم بر تن ماده معدنی انجام شدند. جدول (۶) نتایج این آزمایشها را نشان می دهد.

نتایج حاصل دلالت بر آن دارد که میزان اکسید آهن در دانه بندی ریز بیش از دانه بندی درشت می باشد. البته این نتایج با توجه به آنالیز شیمیایی خوراک اولیه (جدول ۱) قابل توجیه هستند.

### تاثیر دما و نوع اسید

آزمایش های اسیدشویی با دو نوع اسید کلریدریک و اسید سولفوریک و در دماهای متفاوت انجام شدند و نتایج حاصل در جدول (۷) ارائه شده است.

موجود در سلولهای فلوتاسیون کنترل می گردد. مقدار این اسید باید در حدی باشد، که pH در سلولهای فلوتاسیون بین ۲ تا  $۲/۵$  باشد. بنابراین اگر اسید بیش از حد در مرحله اسید شویی مصرف گردد، به منظور رساندن pH به حد لازم و به جهت جلوگیری از خوردگی در وسایل، باید مراحل شستشو زیاد گردد و یا با آهک مقدار آن به میزان مطلوب برسد. استفاده از هریک از این روشها علاوه بر هزینه بالا مشکلاتی را نیز همانند افزایش دبی آب مصرفی برای شستشوی بیشتر (به منظور تنظیم pH) در کلاسیفایر که موجب خروج ذرات بیشتری از سیلیس به باطله می شود، را در بر دارد.

### تاثیر دانه بندی بر اسیدشویی

در این بخش از آزمایشها، تاثیر دانه بندی بر اسیدشویی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا نمونه لازم در سه

جدول ۵: تغییرات اکسید آهن با تغییر میزان اسید مصرفی.

شماره آزمایش	مقدار اسید (kg/ton)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	درصد وزنی جامد	زمان اسیدشویی دقیقه	درصد حذف اکسید آهن
۱	۸	۰/۰۲۳۲	۷۰	۲۵	۷۲/۰
۲	۱۶	۰/۰۲۲۳	۷۰	۲۵	۷۳/۱
۳	۲۴	۰/۰۱۹۴	۷۰	۲۵	۷۶/۶
۴	۳۲	۰/۰۱۸۵	۷۰	۲۵	۷۷/۷

جدول ۶: نتایج حاصل از آزمایشهای با دانه بندی مختلف.

شماره آزمایش	دانه بندی (میکرون)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	درصد وزنی جامد	زمان اسیدشویی دقیقه	درصد حذف اکسید آهن
۱	$۴۲۰+۵۹۰$	۰/۰۲۵	۷۰	۲۵	۲۱/۹
۲	$۲۹۷+۴۲۰$	۰/۰۲۸	۷۰	۲۵	۶۲/۱
۳	$۱۰۰+۲۹۷$	۰/۰۲۳	۷۰	۲۵	۷۲/۵

جدول ۷: میزان اکسید آهن در اسیدشویی با تغییر نوع اسید و دمای اسیدشویی.

شماره آزمایش	دمای اسیدشویی (°C)	نوع اسید	مقدار اسید (kg/ton)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	درصد حذف اکسید آهن
۱	۲۵	سولفوریک	۸	۰/۰۳۵	۵۷/۸
۲	۵۰	سولفوریک	۸	۰/۰۳	۶۳/۸
۳	۷۰	سولفوریک	۸	۰/۰۲۴	۷۱/۰
۴	۲۵	کلریدریک	۸	۰/۰۲۸	۶۶/۲
۵	۵۰	کلریدریک	۸	۰/۰۲۵	۶۹/۸
۶	۷۰	کلریدریک	۸	۰/۰۲۱۸	۳۷/۷

### آزمایش های مغناطیسی

جدایش مغناطیسی بصورت تلفیقی با اسیدشویی در ادامه فرآیند پرعیارسازی بکار گرفته شد. بدین منظور از نمونه کلی حدود ۴ کیلوگرم نمونه لازم تهیه و ابعاد ذرات آن در آسیای غلتکی به ریزتر از ۸۴۰ میکرون رسانده شد. سپس این نمونه به چهار قسمت تقسیم شده و در دستگاه مغناطیسی با شدت بالا و از نوع خشک، و در چهار شدت میدان ۱۵۵۰۰، ۱۵۰۰۰، ۱۳۲۰۰ و ۹۰۰۰ گوس مورد آزمایش قرار گرفتند، که نتایج حاصل در جدول (۸) ارائه شده است.

نتایج دلالت بر آن دارد که اکسید آهن با کاهش شدت میدان افزایش یافته است. البته بین شدت میدان ۹۰۰۰ و ۱۳۲۰۰ گوس، این روند بسیار جزئی بوده (۰/۰۰۱٪) و بهترین نتیجه از شدت میدان ۱۵۵۰۰ گوس با اکسید آهن ۰/۰۳۱۵ بدست آمد. میزان بازیابی در چهار آزمایش بسیار نزدیک بهم بود و حداقل بازیابی ۹۴٪ برای شدت ۱۵۵۰۰ گوس و حداکثر ۹۴/۹٪ برای شدت میدان ۹۰۰۰ گوس بدست آمد.

محصول حاصل از جدایش مغناطیسی در مرحله بعد در چهار آزمایش دیگر تحت اسیدشویی با ۸ کیلوگرم بر تن اسید سولفوریک قرار گرفتند، که نتایج آنها در جدول (۹) آمده است. میزان اکسید آهن در سه آزمایش به کمتر از ۰/۰۲٪ رسیده و کمترین مقدار مربوط به آزمایش شماره ۴ است، که محصول جدایش مغناطیسی تحت بالاترین شدت میدان (۱۵۵۰۰ گوس) بود. البته مشاهده می شود که تلفیق جدایش مغناطیسی و اسیدشویی میزان اکسید آهن در محصول سیلیس را حداقل به ۰/۰۱۸۲۰٪ می رساند.

میزان اکسید آهن در محصول اسیدشویی در دمای محیط با اسیدسولفوریک به ۰/۰۳۵٪، و این میزان برای محصول اسیدشویی با اسیدکلریدریک به حدود ۰/۰۲۸٪ رسید. این امر را می توان ناشی از قویتر بودن عملکرد اسیدکلریدریک نسبت به اسیدسولفوریک دانست. البته گرانتتر بودن اسیدکلریدریک می تواند عاملی منفی در انتخاب نهائی آن باشد. از طرف دیگر خورندگی این اسید نسبت به اسیدسولفوریک بیشتر است. در خط تولید کارخانه ها برای گرم نمودن پالپ مصرفی در فرایند لیچینگ گرم، می توان از بخار آب یا از محافظ های حرارتی در اطراف مخازن استفاده نمود. البته باید این نکته را نیز در نظر داشت که با افزایش دمای اسیدشویی، خوردگی مخازن اسید شویی نیز به شدت افزایش می یابد، که به منظور جلوگیری از آن، استفاده از پوشش های لاستیکی و یا پلی اورتان می تواند موثر واقع گردد.

دمای اسیدشویی در آزمایشهای بعدی به ۵۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت. در این آزمایشها برای آنکه دمای پالپ ثابت بماند، از ظرف دو جداره استفاده شد. بهر حال باتوجه به آنکه تثبیت دما بدون منبع گرمایی ممکن نبود، لذا در آزمایش های انجام شده، دمای پالپ پس از پایان اسیدشویی در حدود ۲۰-۱۰ درجه سانتیگراد کمتر از دمای اولیه بود.

نتایج حاصل دلالت بر آن دارند که دمای اسیدشویی تاثیر زیادی در کاهش اکسید آهن دارد. میزان اکسید آهن در نمونه اسیدشویی شده با اسید کلریدریک در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد به ۰/۰۲۱۸٪، و با اسیدسولفوریک به ۰/۰۲۴٪، و همچنین با اسید کلریدریک در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد به ۰/۰۲۵٪ و با اسیدسولفوریک به ۰/۰۳٪ رسید.

جدول ۸: نتایج آزمایشهای مغناطیسی تحت شدت میدانهای متفاوت.

بازیابی (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	شدت میدان (گوس)	شماره آزمایش
۹۴	۰/۰۳۱۵	۱۵۵۰۰	۱
۹۴/۳	۰/۰۳۶۳	۱۵۰۰۰	۲
۹۴/۷	۰/۰۳۸۹	۱۳۲۰۰	۳
۹۴/۹	۰/۰۳۹	۹۰۰۰	۴

جدول ۹: نتایج اسیدشویی جدایش مغناطیسی.

شماره آزمایش	شدت میدان (KG)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	زمان اسیدشویی (دقیقه)	درصد حذف اکسید آهن
۱	۹	۰/۰۲۱۷	۲۵	۴۴/۴
۲	۱۳/۲	۰/۰۱۹	۲۵	۵۱/۱
۳	۱۵	۰/۰۱۸۵	۲۵	۴۹/۰
۴	۱۵/۵	۰/۰۱۸۲	۲۵	۴۲/۲

### تجزیه و تحلیل نتایج

همانطور که اشاره شد، میزان ناخالصی ها در ابعاد ریزتریستر می شود و این امر در ابعاد ۱۵۰+۲۵۰- میکرون به حداکثر مقدار خود (۶۰/۹۶٪) می رسد. البته در ابعاد ریزتر، ۱۵۰- میکرون، مقدار اکسید آهن کاهش می یابد (۱۱/۸۵٪). این امر بدان معنی است که تمرکز ناخالصی در فراکسیون ۱۵۰+۲۵۰- میکرون بیشتر از فراکسیونهای دیگر می باشد، که در مطالعات کانی شناسی نیز مشاهده شده بود.

فرآیند اسید شویی ماده معدنی نشان داد که با افزایش درصد وزنی جامد در پالپ، میزان کاهش اکسید آهن افزایش می یابد؛ چنانچه در ۷۵٪ وزنی جامد، حداقل عیار اکسید آهن (۰/۰۲۵۹٪) حاصل گردید، ضمن آنکه بالاترین درصد حذف اکسید آهن (۶۸/۸٪) را نیز نتیجه داد. زمان سایش در کاهش اکسید آهن تاثیر چندانی نداشت و موفقیت در حذف اکسید آهن نیز در زمانهای مختلف سایش تقریباً یکسان بود (از حداقل ۶۲ درصد برای ۱۲۰ دقیقه سایش تا ۶۳/۸ درصد برای ۱۰ و ۳۰ دقیقه سایش). این امر دلالت بر آن دارد که صرفاً عمل همزدن پالپ تاثیر چشمگیری نمی تواند بر کاهش عیار اکسید آهن داشته باشد.

افزایش زمان در فرآیند اسید شویی موجب کاهش اکسید آهن گردید، اگرچه که میزان کاهش با در نظر گرفتن افزایش زمان کم می باشد. در هر صورت میزان حذف اکسید آهن نیز با افزایش زمان، افزایش یافت (حداکثر ۷۶/۹٪ برای زمان ۴۰ دقیقه در مقایسه با ۷۰/۵٪ برای زمان ۲۰ دقیقه اسیدشویی). این روند برای میزان اسید مورد مصرفی در فرآیند اسیدشویی مشاهده گردید. حداکثر حذف اکسید آهن در اسیدشویی، در ابعاد ریزتر بدست می آمد (۷۲/۵٪ در فراکسیون ابعادی ۱۰۰+۲۹۷

- میکرون). افزایش دما در کاهش عیار اکسید آهن و افزایش حذف آن تاثیر بسزایی داشت، چنانکه با کاربرد اسید کلریدریک در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد، عیار اکسید آهن به ۰/۰۲۱۸٪ و مقدار درصد حذف، به ۷۳/۷٪ (ماکزیمم مقدار خود) رسید. این امر در حالت کاربرد اسید کلریدریک در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد، به ترتیب ۰/۰۲۵ درصد و ۶۹/۸ درصد بودند.

نتایج حاصل از آزمایش های مغناطیسی دلالت بر آن دارند که عیار اکسید آهن با کاهش شدت میدان مغناطیسی (از ۱۵۵۰۰ به ۹۰۰۰ گوس)، افزایش می یابد و میزان بازیابی نیز تغییر چندانی ندارد (به ترتیب از ۹۴ به ۹۴/۹ درصد).

### نتیجه گیری

باتوجه به آنچه که توضیح داده شد، نتایج زیر در خصوص فراوری سیلیس معدن قرمزآباد قابل ارائه هستند:

#### الف - مطالعات کانی شناسی

ناخالصی های موجود در سیلیس را می توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود:

- کانیهای آهندار (عمدتاً هماتیت، گوتیت)،
  - کانیهای کربناته (کلسیت، دولومیت، آنکرت)،
  - فلدسپاتها (عمدتاً میکروکلین)،
  - کانیهای رسی (عمدتاً ایلیت)،
  - کانیهای سنگین (روتیل، تورمالین، زیرکن)
- همچنین سائز دست یابی به درجه آزادی ۸۰ درصد، ۱۵۰ میکرون می باشد.

#### ب - آزمایشهای فراوری

آزمایشهای فراوری در دو بخش انجام شد و نتایج زیر بدست آمدند:



افزایش دمای اسیدشویی تاثیر زیادی بر کاهش اکسید آهن داشت، بگونه ای که با افزایش دما از ۲۵ به ۷۰ درجه سانتیگراد (در مورد اسیدسولفوریک)، میزان اکسید آهن از ۰/۰۳۵٪ به ۰/۰۲۴٪ کاهش یافت. در مورد اسید کلریدریک این میزان از ۰/۰۲۸٪ به ۰/۰۲۱۸٪ کاهش یافت و لذا مشاهده می شود که در یک دمای خاص تاثیر اسید کلریدریک بهتر از اسیدسولفوریک بوده است.

جدایش مغناطیسی تحت شدت میدان ۱۵۵۰۰ گوس محصولی با ۰/۰۳۱۵٪ اکسید آهن را بدست داد و حاصل اسیدشویی این محصول با اسیدسولفوریک محصولی با اکسید آهن ۰/۰۱۸۲٪ را حاصل نمود. باتوجه به نتایج حاصل می توان شرایط بهینه سازی شده آزمایش های اسیدشویی و مغناطیسی را بقرار جدول (۱۰) خلاصه نمود.

در بخش اسیدشویی، بالا بودن درصد وزنی جامد در پالپ نقش بسزایی در کاهش اکسید آهن داشت. بطور مثال با افزایش درصد وزنی جامد از ۳۰ به ۷۵، میزان اکسید آهن از ۰/۰۳۳٪ به ۰/۰۲۵٪ کاهش یافت.

افزایش زمان اسیدشویی نیز باعث کاهش اکسید آهن گردید (که این تاثیر چشمگیر نبود)، بگونه ای که با افزایش زمان اسیدشویی از ۱۰ دقیقه به ۴۰ دقیقه، میزان اکسید آهن از ۰/۰۲۳٪ به ۰/۰۱۹٪ کاهش یافت، و تقریباً به ازاء هر ۱۰ دقیقه افزایش زمان اسیدشویی، ۰/۰۰۱٪ از میزان اکسید آهن کاسته شد. باتوجه به نتایج حاصل زمان بهینه اسیدشویی در حدود ۲۵-۲۰ دقیقه بدست آمد.

افزایش میزان اسید مصرفی نیز باعث کاهش اکسید آهن بود (این کاهش نیز چشمگیر نبود)، بطوریکه با افزایش مقدار اسید از ۸ به ۳۲ کیلوگرم برتن ماده، میزان اکسید آهن از ۰/۰۳۲٪ به ۰/۰۱۸٪ رسید. یعنی به ازاء هر ۸ کیلوگرم برتن افزایش اسید، میزان اکسید آهن حدود ۰/۰۱۵٪ کاهش یافت (که باتوجه به میزان اسید مصرفی قابل ملاحظه نمی باشد).

جدول ۱۰: خلاصه نتایج حاصل از آزمایشهای اسیدشویی و مغناطیسی.

درصد وزنی جامد	زمان اسیدشویی (دقیقه)	دما (°C)	نوع اسید	میزان اسید	شدت مغناطیسی (گوس)
۷۵	۲۰-۲۵	۷۰	کلریدریک	کم تاثیر	۱۵۵۰۰

## مراجع

- 1 – Austin, T. G. (1984). *Shreve's chemical process industries*. 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, PP. 197.
- 2 – Chammas, E. et.al. (2001). "Removal of iron and other major impurities from silica sand for the production of high added value materials." *Proceeding of the 9<sup>th</sup> Balkan Mineral Processing Congress*, Istanbul, 11-13 Sep. 2001, PP. 289-295.
- 3 – Vegilo, F. (1998). "Drum leaching tests in iron oxide removal from Quartz." *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 54, PP. 158.
- 4 – Teodorescu, E., Sarachie, I., Prida, T., Ivan, I. and Popa, T. (1998). "Glass sand production by flotation and magnetic separation technology." *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Mineral Processing Symposium*, Istanbul, 15-17, PP. 339-341.
- 5 – Carr, D. (1994). *Industrial Minerals and Rocks*. 6<sup>th</sup> Edition, SME Publishers, PP. 879.