

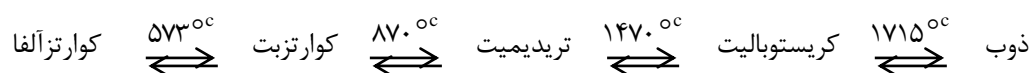
فصل اول

کلیات زمین شناسی

و کانی شناسی سیلیس

۱-۱- اطلاعات کلی در رابطه با سیلیس

کانیهای حاوی سیلیسیم فراوانترین کانیهای موجود در قشر جامد کره خاکی بوده و بیش از ۹۵٪ مجموع کانیهای پوسته زمین را تشکیل می‌دهند. ترکیب سیلیسیم چه بصورت سیلیس آزاد و چه بصورت بنیان سیلیکاته در تمام انواع سنگها اعم از آذرین، دگرگونی و رسوبی یافت می‌شود. وفور سیلیکاتها و آلومینوسیلیکاتها منعکس کننده فراوانی عناصر آنها یعنی اکسیژن (۴۷٪) سیلیسیم (۲۵٪) و آلومینیم (۰/۰۸٪) در طبیعت می‌باشد. اکسید سیلیسیم^۱ که اصطلاحاً به آن سیلیس^۲ گفته می‌شود، اغلب بصورت کانی کوارتز در طبیعت دیده می‌شود. کوارتز، تریدیمیت و کریستوبالیت سه پلی مورف اصلی سیلیس هستند که در طبیعت بخوبی شناخته شده‌اند. این پلی مورفها در شرایط حرارتی زیر به یکدیگر تبدیل می‌شوند.



این تغییر و تبدیل اشکال مختلف سیلیس با تغییر حجم نیز همراه است که کم و بیش ایجاد مشکلاتی را در استفاده از سیلیس مانند بکاربردن آن در کار ریخته‌گری و غیره ایجاد می‌نماید. سختی کوارتز ۷، وزن مخصوص آن ۲/۶ و در حالت خلوص، بیرنگ و شفاف است. ولی برحسب ناخالصی رنگهای مختلف بخود می‌گیرد. نوع متراکم و دگرگون شده ماسه سنگهای سیلیسی که دارای تبلور ثانویه باشد را کوارتزیت می‌نامند. انواع مختلف سیلیس ممکن است بصورت کریپتوکریستالین (کلسدونی) و یا آمورف (اوپال) دیده شوند. در طبیعت انواع سیلیس بصورت‌های زیر دیده می‌شوند:

کوارتز رگه‌ای، کوارتزیت، ماسه سنگ و قلوها و ماسه‌های کوارتزی [۱]. منابع تأمین سیلیس برای صنایع را بطریق زیر می‌توان تقسیم‌بندی نمود:

^۱ SiO₂

^۲ Silica

- منابع جوان - منابع با منشا آذرین و یا دگرگونی - منابع با منشا رسوبی

۱-۱-۱- منابع جوان

منظور از این منابع ذخائری است که از نظر زمین‌شناسی سن چندانی ندارند. معمولاً این ذخایر بصورت تجمعات ماسه‌ای در سواحل دریاها (ماسه‌های ساحلی) و حاشیه رودخانه‌ها (ماسه‌های رودخانه‌ای) که بصورت تراس یا مئاندرها تشکیل می‌شوند) یافت می‌شوند. همچنین ممکن است در ماسه‌های حاصل از هوازدگی و تخریب سنگهای حاوی کوارتز مثل گرانیت و دیگر سنگهای اسیدی و نیمه‌روشن اسیدی بصورت برجا و یا نابرجا مشاهده گردد. در کشورهای اروپایی غالباً از ماسه‌های ساحلی مناسب یا نهشته‌های جوان رودخانه‌ای (ماسه سنگهای تحکیم نیافته) برای تأمین سیلیس مورد نیاز صنایع استفاده می‌شود. در ایران ماسه‌های ساحلی و رودخانه‌ای که دارای کیفیت مناسب برای مصارف صنعتی باشند تاکنون شناخته نشده است ولی در مقابل در اطراف شهر بابک در استان کرمان و نیز استانهای خراسان و یزد منابع عظیمی از ماسه‌های حاصل از تخریب سنگهای آذرین اسیدی و نیمه اسیدی شناسایی شده است که می‌تواند مورد استفاده در صنایع گوناگون واقع شود [۲].

۱-۱-۲- منابع با منشاء آذرین یا دگرگونی

در اینگونه منابع سیلیس بصورت رگه‌های خالص کوارتز در درزه‌ها و شکستگیهای سنگها تمرکز می‌یابد و یا بصورت عدسیهای تشکیل شده از کوارتز همراه با فلدسپار و میکا بخشی از سنگ را تشکیل می‌دهند. ذخایر رگه‌ای بیشتر حاصل فعالیت‌های هیدروترمال و عدسیهای کوارتز در سنگهای پگماتیتی و یا گنیس می‌باشد. چنانچه ذخائری با ابعاد و کیفیت مناسب از اینگونه منابع موجود باشد می‌تواند مورد بهره‌برداری اقتصادی قرار گیرد. از این نوع ذخایر در استانهای لرستان، همدان، ایلام، خراسان، زنجان و کرمان تمرکزهای قابل توجهی دیده می‌شود. نمونه اقتصادی این نوع ذخایر که در حال حاضر از آنها بهره‌برداری می‌شود معادن اطراف ملایر، درود، ازنا و الیگودرز است [۲].

۱-۱-۳- منابع رسوبی سیلیس

گاهی رسوبات دریایی ماسه‌ای تحت شرایطی تشکیل می‌شوند که میزان کوارتز در آنها بالا رفته و در مقابل ناخالصی‌های اندکی در لایه‌های آنها موجود است و می‌توان بعضی از این ذخائر را تمرکزهای اقتصادی سیلیس به حساب آورد. در ایران در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی چین رسوباتی تشکیل شده است. مشخص‌ترین لایه رسوبی از این نوع سازند لالون است. در انتهای فوقانی سازند لالون یک لایه ضخامت ۲۰ تا ۵۰ متر از کوارتزیت سفید رنگ دیده می‌شود که بنام کوارتزیت فوقانی نامگذاری شده و دارای اهمیت اقتصادی است. این لایه در اغلب نقاط بوسيله یک لایه شیلی از ماسه سنگهای زیرین جدا شده است. کوارتزیت فوقانی در ایران گسترش بسیار دارد و در ارتفاعات رشته کوه‌های البرز - زاگرس و فلات مرکزی ایران رخنمون دارد. در استانهای آذربایجان، زنجان، مرکزی، سمنان، غرب خراسان، کرمان و کردستان ذخائری از این کوارتزیت شناخته شده است. این لایه که دچار دگرگونی اندکی شده است دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی ثابتی نیست. کیفیت آن از یک ذخیره به ذخیره دیگر و حتی در یک کنسار از محلی به محل دیگر تغییر می‌کند. رخداد این سه تیپ بصورت ذخائر اقتصادی سیلیس در ایران گزارش شده است [۱].

۱-۲- مشخصات کانی‌شناسی و زمین‌شناسی سیلیس

سیلیس یکی از شناخته شده‌ترین کانیهای در پوسته زمین است و علت آن نیز فراوانی عناصر سازنده این کانی می‌باشد. براساس برآوردهای انجام گرفته حدود ۴۴/۶ درصد پوسته زمین اکسیژن و ۲۷/۲ درصد نیز سیلیسیم می‌باشد. کانی سیلیس با فرمول شیمیایی SiO_2 در هر سه گروه از سنگهای آذرین، دگرگونی و رسوبی یافت می‌شود. شبکه اتمی سیلیس بصورت داربستی است. هر اتم سیلیس با چهار اکسیژن در ارتباط است که این اتمها در رئوس یک چهار وجهی قرار می‌گیرد. کانیهای مختلفی از سیلیس وجود دارند، که در ذیل توضیح داده می‌شوند [۱].

- کوآرتز^۱

کوآرتز دارای سیستم تبلور تری گونال و دارای کریستالهای منشوری شکل می‌باشد. وزن مخصوص آن ۲/۶۵۳ تا ۲/۶۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و سختی آن در اشل موس هفت است. رنگ آن به واسطه وجود ناخالصیها به رنگ زرد، قهوه‌ای، دودی، سبز، آبی و سیاه در می‌آید. انواع کوآرتز به شرح زیر وجود دارد.

۱- آمیتیست : کوآرتز ارغوانی شفاف و یا بنفش متمایل به آبی .

۲- کوآرتز کریستال : شفاف و بیرنگ . ۳- کوآرتز الیافی یا رشته‌ای یا چشم ببری

۴- رز کوهی : کوآرتز صورتی رنگ . ۵- سیتترین : رنگ زرد تا زرد لیمویی .

۶- کوآرتز دودی : رنگ دودی یا سیاه و قهوه‌ای سیر ، که نوع سیاه آن را موریل می‌نامند.

۷- کوآرتز شیری ۸- آوانتورین

۹- کوآرتز آبی ۱۰- کوآرتز سبز

- کلسدون^۲

کلسدون از انواع نهان بلور سیلیس است و دارای جلای مومی و بصورت شفاف و نیمه شفاف دیده می‌شود. وزن مخصوص آن ۲/۶ تا ۲/۶۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. به رنگهای آبی خاکستری، قهوه‌ای روشن و تیره و سیاه دیده می‌شود. انواع کلسدون به شرح زیر است:

۱- کارنالین کلسدون شفاف قرمز یا عقیق گون است.

۲- کریز پراز کلسدون به رنگ سبز سیب است.

۳- پلاسم کلسدون سبز درخشان است.

۴- عقیق نوعی کلسدون به رنگهای گوناگون که بصورت نوارهای متحدالمرکز یا موازی از یکدیگر

^۱ Quartz

^۲ Calcedonian

تفکیک شده‌اند.

۵- اونیکس مانند عقیق از نوارهایی به رنگهای مختلف تشکیل شده است.

۶- فلینت که به رنگهای خاکستری، قهوه‌ای و دودی و آبی مایل به سیاه می‌باشد.

۷- چرت شبیه فلینت می‌باشد ولی شکننده‌تر از آن می‌باشد.

۸- ژاسپر نوعی کسلدونی که به رنگهای قرمز، قهوه‌ای و قرمز تیره دیده می‌شود [۱].

- تریدیمیت^۱

تریدیمیت یکی از پلی‌مرفهای سیلیس می‌باشد (نوع هگزا گونال سیلیس می‌باشد). کریستالهای آن دانه‌ریز هستند. سختی آن در اشل موس هفت و وزن مخصوص آن ۲/۲۸ تا ۲/۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. به رنگهای سفید تا آبی دیده می‌شود [۱].

- کریستوبالیت^۲

کریستوبالیت پلی‌مرف خاصی از سیلیس است که بصورت آلفا و بتا وجود دارد. کریستوبالیت در سیستم کوبیک متبلور می‌شود و وزن مخصوص آن ۲/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد [۱].

- اوپال^۳

اوپال نوع آمورف سیلیس می‌باشد. معمولاً به صورت توده‌ای دیده می‌شود. سختی آن در اشل موس ۵/۵ تا ۶/۵ است. وزن مخصوص آن ۱/۹ تا ۲/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و به رنگهای قرمز، سفید، زرد، قهوه‌ای، سبز، آبی است. درصد آب ملکولی آن پنج تا ده درصد است که گاهی به ۲۰ درصد هم می‌رسد. انواع اوپال به شرح زیر می‌باشد.

۱- اوپال معمولی به رنگ سفید شیری.

^۱ Tridimit

^۲ Crystobalit

^۳ Opal

۲- اوپال اصیل که به دلیل شکافهای درونی در مقابل نور دارای درخشش الوان است.

۳- اوپال آتشین دارای رنگ قرمز آتشین یا نارنجی است.

۴- اوپال چوبی که در اثر جانشینی (سیلیکاته شدن) مواد چوبی ایجاد می شود.

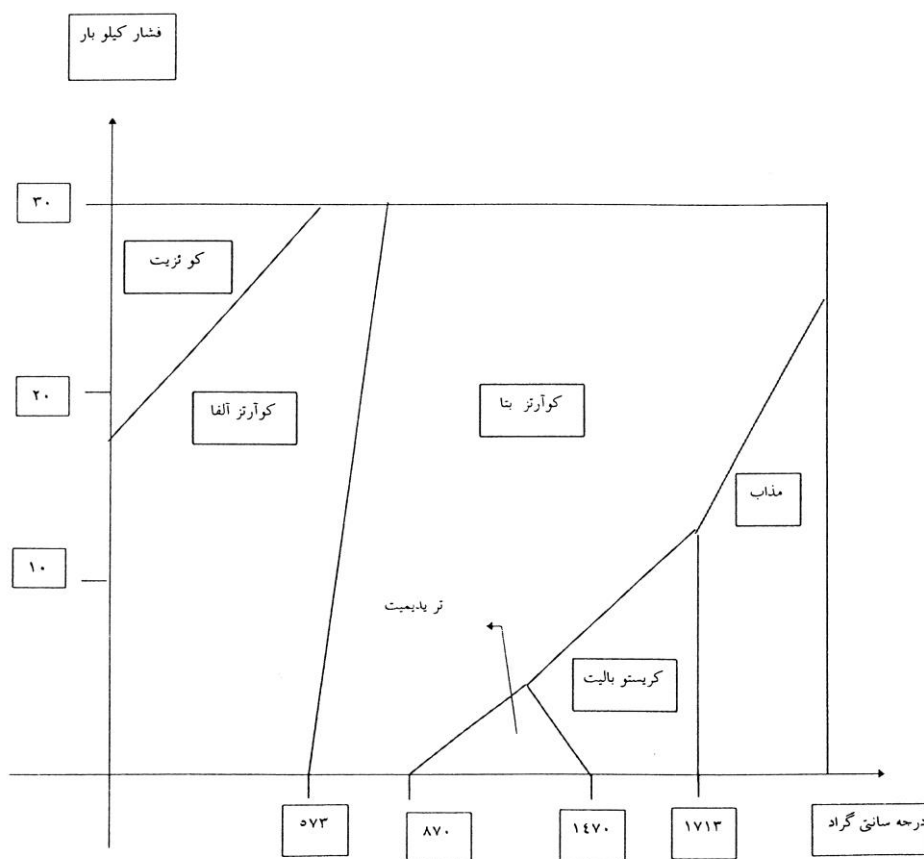
۵- هیالیت که بصورت پوسته نازکی در روی حفره سنگهای آذرین بوجود می آید [۱].

- شیشه کوآرتز

شیشه کوآرتز نوعی سیلیس بی شکل است که به دلیل سرد شدن سریع حالت تبلور نداشته و مانند

شیشه بی شکل است. سه پلی مرف اصلی کوآرتز، کوآرتز آلفا و بتا تردیمیت آلفا و بتا و کریستوبالیت

آلفا و بتا به صورت شکل شماره ۱-۱ به یکدیگر تبدیل می شوند.



شکل ۱-۱ نمودار فاز دیگرام تعادل بین سه پلی مرف اصلی کوآرتز [۱]

۱-۲-۱- مشخصات ماده معدنی سیلیس چاه نو

شهرستان شاهرود یکی از شهرستانهای تابعه استان سمنان است که در بخش شرقی این استان واقع شده است و مرکز آن شاهرود می باشد. از شمال به ارتفاعات سلسله جبال البرز و مرز شهرستان گنبد کاووس و گرگان، از شرق به مرز شهرستان سبزوار، از جنوب به دشت کویر و مرز استان اصفهان و از مغرب به شهرستان دامغان مرتبط می باشد. این شهرستان دارای ۴ بخش مرکزی به مرکزیت شاهرود، بسطام به مرکزیت بسطام، میامی به مرکزیت میامی و بخش بیارجمند است. بخش مرکزی از سه دهستان به نامهای دهملا، طرود و حومه، بخش بسطام از دو دهستان به نامهای خرقان و کلاته های غربی، بخش میامی از چهار دهستان به نامهای کلاته های شرقی، زرین(کالپوش)، فرومد، بخش بیارجمند شامل دو دهستان به نامهای خوارتوران و دهستان بیارجمند می باشد. محدوده معدنی سیلیس چاه نو در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان شاهرود قرار گرفته است. از لحاظ آب و هوایی منطقه دارای آب و هوای خشک و نسبتاً گرم می باشد و این امر موجب گردیده است تا پوشش گیاهی متشکل از خار و قیچ به چشم بخورد. عموماً این منطقه خالی از سکنه می باشد. تنها منابع آب منطقه چاههای قدیمی می باشد که معمولاً کم آب و شور بوده و قابلیت شرب ندارند. این چاهها محل آبخور حیوانات وحشی از جمله آهوانی که در منطقه به چشم می خورند می باشد. ماده معدنی از سنگهای رسوبی دگرگون شده بوده و در گروه ماسه سنگهای غنی از کوارتز دگرگون شده یا کوارتزیت قرار می گیرد. کانی اصلی در این سنگها کوارتز می باشد [۳].

فصل دوم

میزان مصارف و استانداردهای سیلیس

در صنایع مختلف

۱-۲- میزان مصارف سیلیس در صنایع مختلف

۱-۱-۲- شیشه

مهمترین مصرف سنگ سیلیس و ماسه‌های سیلیسی در صنایع شیشه‌سازی است و بیشترین سهم بازار را در مورد مصرف سیلیس بخود اختصاص داده است. کارخانجات سازنده شیشه در کشور و ظرفیت اسمی آنها بشرح جدول شماره (۱-۲) می‌باشد.

جدول ۱-۲- کارخانجات سازنده شیشه در ایران در سال ۱۳۷۶[۴].

ردیف	نام کارخانه	توع تولید	محل	ظرفیت اسمی (تن در سال)	ملاحظات
۱	شیشه ایران	شیشه و جام و بلور	تهران	۲۰۰۰۰	
۲	شیشه قزوین	جام و مشجر	قزوین	۱۲۰۰۰۰	
۳	آبگینه	جام و مشجر و شیشه ایمنی	قزوین	۲۸۰۰۰	
۴	پارس سکوریت	شیشه ایمنی	قزوین	۴۰۰۰	شیشه جام از کارخانجات دیگر تأمین می‌شود
۵	میرال	شیشه ایمنی	تهران	۱۷۰۰۰	شیشه جام از کارخانجات داخلی خریداری می‌شود
۶	شیشه و گاز	بلور و بطری	تهران	۱۲۰۰۰۰	
۷	مینا	بلور و بطری	تهران	۳۰۰۰۰	
۸	شیشه‌نشکن	شیشه ایمنی	کرج	۲۰۰۰	شیشه جام از کارخانجات دیگر خریداری می‌شود
۹	آریا گلاس	شیشه ایمنی	ساوه	۴۰۰۰	شیشه جام وارداتی مصرف می‌نماید
۱۰	شیشه همدان	بلور و بطری	همدان	۳۰۰۰۰	
۱۱	کاوه	ظروف	ساوه	۳۶۰۰	
۱۲	کارگاههای تولید شیشه	ظروف	تهران	۶۰۰۰۰	
	جمع	-	-	۴۳۸۶۰۰	-

با کسر ظرفیت اسمی کارخانجاتی که خود تولید کننده شیشه نیستند بلکه فقط شیشه را خریداری و روی آن عملیات انجام می‌دهند، ظرفیت اسمی تولید شیشه در کشور برابر است با ۴۱۱۶۰۰ تن که با

در نظر گرفتن این نکته که ۷۰ درصد ترکیب شیشه را سیلیس تشکیل می‌دهد نیاز سالیانه کارخانجات شیشه‌سازی به سیلیس برابر ۲۸۸۰۰۰ تن سنگ سیلیس خواهد بود.

۲-۱-۲- ریخته‌گری

یکی از مهمترین مصارف سیلیس و ماسه سیلیس در صنایع ریخته‌گری می‌باشد که سهم عمده‌ای از بازار مصرف سیلیس را به خود اختصاص می‌دهد. مصرف‌کنندگان ماسه ریخته‌گری در کشور و ظرفیت اسمی آنها طبق جدول (۲-۲) می‌باشد.

جدول ۲-۲- مصرف‌کنندگان عمده ماسه ریخته‌گری در سال ۱۳۷۵ [۵]

ردیف	مصرف‌کنندگان	ظرفیت اسمی (تن)	ردیف	مصرف‌کنندگان	ظرفیت اسمی (تن)
۱	ماشین‌سازی تبریز	۲۷۰۰۰	۱۴	فارسیت	۴۰۰۰
۲	ماشین‌سازی اراک	۸۰۰۰	۱۵	ایران ابزار	۵۰۰
۳	آذرباب	۱۰۰۰۰	۱۶	پیرلس	۱۰۰۰
۴	تولید قطعات فولادی	۸۴۰۰	۱۷	ایرانیت	۳۵۰۰
۵	پروفیل نیمه‌سبک	۴۰۰۰۰	۱۸	راه‌آهن	۱۸۰۰
۶	پارس مثال	۴۵۰۰۰	۱۹	اشتاد	۵۷۰
۷	کلاچ	۲۰۰۰۰	۲۰	صنایع ریخته‌گری ایران	۷۵۰۰
۸	لوله و ماشین‌سازی	۲۵۰۰۰	۲۱	شوفاز کار	۱۵۰۰۰
۹	مالی بل	۳۰۰۰	۲۲	اتمسفر	۱۵۰۰۰
۱۰	ایرفو	۲۰۰۰۰	۲۳	فولیران	۱۵۰۰
۱۱	ایران ناسیونال	۲۵۰۰۰	۲۴	فرد ایران	۱۵۰۰
۱۲	تراکتورسازی تبریز	۷۰۰۰۰	۲۵	ریخته‌گران سنتی	۳۰۰۰۰۰
۱۳	ارج	۱۰۰۰			
	جمع				۶۵۴۴۵۰

۲-۱-۳- سایر مصارف

سایر مصارف سیلیس مانند صنایع چینی بهداشتی، لعاب‌سازی و لامپ‌سازی و دیگر صنایع نظیر سیلیکات سدیم رقمی در حدود ۳۰ هزار تن در سال را در ظرفیت اسمی تشکیل می‌دهد [۵].

۲-۲- کاربردها و استانداردهای سیلیس مصرفی در صنایع

۲-۲-۱- خلوص و یکنواختی مواد اولیه برای صنایع شیشه

در مورد خلوص و یکنواختی مواد اولیه باید گفت که با توجه به ماهیت فرآیند شیشه‌سازی هر ماده‌ای که به مجموع مواد اولیه شیشه اضافه شود یکی از ترکیبات آن در محصول نهایی باقی خواهد ماند و چون هیچ مرحله سرباره‌سازی برای جدا کردن ناخالصیها از شیشه مذاب در فرآیند تولید شیشه وجود ندارد، بنابراین خلوص مواد اولیه در صنایع شیشه حائز اهمیت است. مهمترین ناخالصیها در تولید شیشه اکسیدهای آهن و کروم هستند. مخلوط اکسیدهای فرو و فریک شیشه را برنگ سبز در می‌آورد و اگر میزان آن از حد قابل قبول بیشتر باشد، تولید کننده شیشه بایستی به بیرنگ کننده‌های گرانیقیمت روی آورد. اکسید کروم باعث ایجاد رنگ در شیشه می‌شود. مخصوصاً اسپینل $FeCr_2O_4$ که در صنعت شیشه‌سازی بنام کرومیک نامیده می‌شود در شیشه مذاب غیر قابل حل بوده و بصورت ذرات سیاه رنگی در محصول نهایی باقی می‌ماند. از جمله ناخالصیهای دیگر می‌توان از اکسید تیتان و زیرکن نام برد. واضح است که حداکثر درصد قابل قبول این ناخالصیها با بالا رفتن کیفیت شیشه تولیدی، کاهش می‌یابد. بطوریکه برای تولید شیشه‌های جام معمولی میزان ۰/۱ درصد اکسید آهن (Fe_2O_3) قابل قبول است در حالی که برای تولید شیشه‌های نوری حداکثر میزان مجاز ۰/۰۰۱ درصد پذیرفته شده است.

در مورد ناخالصیها بایستی ذکر شود که برای تولید انبوه شیشه علاوه بر میزان مطلق ناخالصیها یکنواختی درصد ناخالصیها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. وقتی تولید کننده به میزان ناخالصی‌ها واقف و از یکنواختی آنها مطمئن باشد می‌تواند فرآیند تولید را بر همان اساس تنظیم نماید. اشکال عمده در تولید تغییر ناگهانی ناخالصیها است که بصورت رنگهای غیر یکنواخت در محصول نهایی ظاهر می‌شود. بطور کلی در تولید پیوسته و انبوه شیشه، یکنواختی مواد اولیه از نظر شیمیایی و دانه‌بندی ضرورتی اساسی است و در کیفیت محصول نهایی تأثیر تعیین کننده دارد. یکنواختی دانه‌بندی باعث می‌شود که مواد اولیه بهتر مخلوط شده و در نتیجه مرحله ذوب نیز بهتر

صورت گیرد. دانه‌های درشت‌تر که دیرتر ذوب می‌شوند نقاطی با گرانروی متفاوت با بخش کاملاً ذوب شده ایجاد می‌نمایند و حتی ممکن است بدون آنکه ذوب شوند در محصول نهایی بصورت کریستالهایی باقی بمانند. همچنین اگر در مواد اولیه دانه‌های خیلی ریز وجود داشته باشد با پراکنده شدن در فضای کوره و نفوذ در آجرها سبب بروز خوردگی در قسمت‌های مختلفی خواهد شد.

ناخالصی اکسید آهن در اغلب سنگهای سیلیسی، کوارتز و پگماتیتها وجود دارد. آهن بصورت ترکیبات فرو یا فریک یا اکسید مغناطیسی در شیشه حضور پیدا می‌کند. هیدروکسید فرو بصورت خالص سفید رنگ است ولی چون بسرعت اکسیده می‌شود تغییر رنگ داده و تقریباً سیاه می‌شود. حضور یون فرو در شیشه به تنهایی باعث رنگ آبی می‌شود ولی این یون بسرعت در مرحله فرآیند تولید شیشه اکسیده شده و قسمتی از آن تبدیل به یون فریک می‌شود و رنگ آبی - سبز شیشه را ایجاد می‌نماید. هر چه اکسید فرو بیشتر اکسیده شود و به وضعیت فریک نزدیک‌تر شود تغییر رنگ به سمت زرد- سبز میل می‌کند و در حالت اکسیداسیون کامل (ایجاد یون فریک) به رنگ زرد- قهوه‌ای تبدیل می‌شود.

در تولید شیشه جام، حضور اکسید آهن در بار مذاب علاوه بر پایین آوردن درجه حرارت کف کوره (به واسطه جلوگیری از تشعشع حرارتی در کوره) و اختلال در امر همگون‌سازی بار، در قسمت کشش نیز اثر داشته و توزیع یکنواخت ضخامت را در عرض شیشه برهم می‌زند.

بدین ترتیب باید گفت که برای ایجاد پایداری در فرآیند تولید شیشه لازم است که محتوی اکسید آهن در ترکیب شیشه در یک سطح ثابت باقی بماند. تجربه نشان داده است که نوسانات اکسید آهن در مواد اولیه شیشه نباید از ۰/۰۱ درصد بیشتر باشد چون افزایش هر ۰/۰۱ درصد اکسید آهن منجر به کاهش حدود ده درجه سانتیگراد در دمای کف کوره می‌شود [۵].

۲-۲-۲- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیلیس برای تولید شیشه جام

در کشورهای مختلف در تولید شیشه جام معیارهای فیزیکی و شیمیایی زیر برای سیلیس تعیین کننده می‌باشد:

۱- ترکیب شیمیایی ۲- توزیع دانه‌بندی ۳- میزان ناخالصیهای جزئی

گرچه معیارهای فوق در تعیین کیفیت و قابلیت مصرف سیلیس در صنعت شیشه نقش عمده‌ای دارند، یکنواختی و پایداری این خصوصیات نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۵].

۳-۲-۲- استاندارد انگلستان

استانداردهای انگلستان برای تولید انواع شیشه به شرح ذیل می‌باشد.

۱-۳-۲-۲- شیشه جام

همانطور که از جدول شماره (۳-۲) پیداست، میزان درصد سیلیس و اکسید آهن و آلومین مواد اولیه که به کارخانه مصرف کننده تحویل داده می‌شود بایستی ثابت باشد و درصد تغییرات آن که با علامت، « \pm » مشخص شده در همان حد باقی بماند [۵].

جدول ۳-۲- استاندارد ترکیبات شیشه جام در انگلستان [۵]

میزان استاندارد	نوع ترکیب
0.96 ± 0.03 حداقل	SiO_2
$0.005 \pm$ حداکثر	Fe_2O_3
$0.01 \pm$ تا 0.02	Al_2O_3

طبق استاندارد انگلستان دانه‌بندی مواد اولیه برای تولید شیشه جام مطابق جدول (۴-۲) می‌باشد.

جدول ۴-۲- استاندارد دانه‌بندی مواد اولیه برای تولید شیشه جام [۵]

سایز (میکرون)	دانه بندی
۱۰۰۰۰	حد بالا
۱۲۵	حد پایین
۲۵۰	حد متوسط

سیلیس مصرفی همچنین بایستی از ناخالصیهائی نظیر کرومیت، سیلیمانیت و کروندوم که به واسطه نسوز بودن در کوره ذوب نشده و در شیشه تولید بصورت ذرات تیره‌رنگی باقی می‌مانند عاری باشد [۵].

۲-۲-۲-۲- شیشه فلینت^۱

در تولید شیشه‌های بیرنگ (Flint) مواد اولیه بایستی فاقد عناصر رنگی باشند مشخصات ماسه سیلیسی برای تولید شیشه‌های فلینت در استاندارد انگلیسی BS2975 داده شده است. بر طبق این استاندارد سه نوع سیلیس برای تولید شیشه فلینت در نظر گرفته شده است.

۱- نوع A برای تولید شیشه‌های نوری^۲ با کیفیت بالا مواد اولیه این نوع شیشه‌ها دارای مشخصاتی طبق جدول (۲-۵) می‌باشد.

جدول ۲-۵- استانداردهای شیشه فلینت در انگلستان [۵]

نوع ترکیبات	میزان استاندارد
SiO _۲	۹۹/۵٪ حداقل
Fe _۲ O _۳	۰/۰۰۸٪ حداکثر
TiO _۲	۰/۰۳٪ حداکثر
Cr _۲ O _۳	۰/۰۰۰۲٪ حداکثر

نوع B برای تولید شیشه‌های تزئینی و وسایل خانگی بسیار مرغوب. مشخصات مواد اولیه سیلیسی این نوع شیشه‌ها همان مشخصات نوع A است با این تفاوت که میزان اکسید آهن تا حداکثر ۰/۰۱۳٪ قابل قبول است.

نوع C برای تولید شیشه‌های بیرنگ معمولی از جمله بطریها و وسایل خانگی معمولی طبق جدول (۲-۶) می‌باشد.

^۱ Flint

^۲ Optical Glass

جدول ۲-۶- استانداردهای شیشه‌های بیرنگ در انگلستان [۵]

میزان استاندارد	نوع ترکیبات
حد اقل ۹۸/۵٪	SiO _۲
حداکثر ۰/۰۴٪	Fe _۲ O _۳
حداکثر ۰/۰۳٪	TiO _۲
حداکثر ۰/۰۰۰۶٪	Cr _۲ O _۳

بایستی متذکر شد که در انگلستان عملاً برای تولید شیشه‌های فلینت نوع C از ماسه سیلیسی با میزان اکسید آهن ۰/۰۵ درصد نیز استفاده می‌شود مشروط بر آنکه یکنواختی ترکیب در حد ۰/۰۰۵٪ حفظ گردد [۵].

۲-۲-۳-۳- بطریهای رنگی

مسئله اصلی در ساخت بطریهای رنگی همان یکنواختی ترکیب شیمیایی و دانه‌بندی مواد اولیه است. در این مورد وجود میزان بیشتر اکسید آهن قابل قبول است. میزان مجاز درصد اکسید آهن در تولید شیشه‌های رنگی به این شرح است:

- حداکثر میزان اکسید آهن در شیشه‌های سبز رنگ ۰/۳ درصد

- حداکثر میزان اکسید آهن در شیشه‌های کهربائی و قهوه‌ای رنگ ۱ درصد

۲-۲-۳-۴- پشم شیشه

مشخصات مواد اولیه برای تولید پشم شیشه به اندازه شیشه‌های دیگر حساس نمی‌باشد. در مورد تولید پشم شیشه بایستی گرانیروی شیشه مذاب به دقت کنترل شود. چون شفافیت شیشه تولیدی جزو مشخصات محصول نیست لذا وجود اکسید آهن بیشتر در مواد اولیه مجاز می‌باشد. برای حفظ دوام محصول اکسید آلومینیم به مواد اولیه افزوده می‌شود. در ضمن به واسطه نوع خاص کوره‌های تولید پشم شیشه گرد و غبار در مواد اولیه مسئله‌ساز نیست و می‌توان دانه‌بندی ریزتری را مورد استفاده قرار داد [۵].

۲-۲-۳-۵- شیشه‌های عینک

برای تولید شیشه‌های نوری که بایستی دارای درجه خلوص بیشتری باشند از کوارتز استفاده می‌شود در حالی که برای تولید شیشه‌های عینک از ماسه سیلیسی استفاده می‌گردد ولی به هر حال بالا بودن درصد سیلیس در مواد اولیه شرط لازم و اساسی است. علاوه بر بالا بودن درصد سیلیس بایستی درصد اکسید آلومینیم و اکسید آهن در این نوع شیشه‌ها پایین باشد. بهر حال انعطاف در مورد میزان ناخالصیها برای شیشه‌های عینک بیش از شیشه‌های نوری است. شیشه‌های عینک از شیشه‌های جام با مشخصات فلینت نوع C تراشیده می‌شوند و نواقص موجود در شیشه جام فقط تا حدی باعث بالا بردن میزان ضایعات خواهد شد.

۲-۲-۴- استاندارد ایالات متحده آمریکا

۲-۲-۴-۱- شیشه فلینت

تجزیه شیمیایی ماسه سیلیسی مورد قبول توسط قسمت اعظم تولیدکنندگان شیشه فلینت در ایالات متحده آمریکا طبق جدول (۲-۷) می باشد.

جدول ۲-۷- استاندارد ترکیبات شیشه فلینت در آمریکا [۵]

نوع ترکیبات	میزان استاندارد
SiO ₂	۹۹/۵ ± ۰/۱۵٪ حداقل
Fe ₂ O ₃	۰/۰۲۵ ± ۰/۰۱٪ حداکثر
Al ₂ O ₃	۰/۲ ± ۰/۰۷٪ حداکثر
TiO ₂	۰/۰۲ ± ۰/۰۰۲٪ حداکثر
CaO	۰/۰۵ ± ۰/۰۲۵٪ حداکثر
Cr ₂ O ₃	۰/۰۰۰۲٪ حداکثر
Co ₃ O ₄	۰/۰۰۰۲٪ حداکثر
MnO ₂	۰/۰۰۲٪ حداکثر

۲-۴-۲-۲- شیشه جام

در ایالات متحده آمریکا استاندارد ترکیبات برای تولید شیشه جام از ماسه سیلیسی طبق جدول (۲-۸) می باشد.

جدول ۲-۸- استاندارد ترکیبات شیشه جام از ماسه سیلیسی در آمریکا [۵].

میزان استاندارد	نوع ترکیبات
۹۷/۱٪	SiO _۲
۰/۱۵	Fe _۲ O _۳
۰/۲۵٪	Al _۲ O _۳
۰/۰۵٪	TiO _۲
۰/۰۰۲٪	Cr _۲ O _۳

۲-۴-۲-۳- استاندارد دانه‌بندی در صنعت شیشه آمریکا

استاندارد دانه‌بندی پودر سیلیس مورد مصرف در صنعت شیشه جام، بطری‌سازی و ظروف در آمریکا به ترتیب زیر در نظر گرفته شده است:

حد بالائی ۰/۴۲۵ میلی‌متر (U S. 40 Mesh)

حد پایینی ۰/۱۰۶ میلی‌متر (U S. 140 Mesh)

این استاندارد با این مفهوم است که حداقل ۸۵٪ وزنی پودر سیلیس بین دو حد دانه‌بندی فوق قرار گیرد و همچنین از نقطه نظر یکنواختی، توزیع دانه‌بندی در پودر سیلیس بایستی پایدار و در حد قابل قبول تغییر کند. کلیه تولیدکنندگان شیشه در ایالات متحده آمریکا حداکثر حد دانه‌بندی قابل قبول را ۰/۸۵ میلی‌متر (U S. 20 Mesh) تعیین کرده‌اند.

۲-۴-۲-۵- استاندارد ترکیه

تجزیه شیمیایی متوسط پودر سیلیس در صنعت تولید شیشه جام و بلور ترکیه طبق جدول (۲-۹) می باشد.

جدول ۲-۹- تجزیه شیمیایی پودر سیلیس در صنعت تولید شیشه و جام ترکیه [۵].

ترکیب	شیشه جام	بلور
SiO ₂	٪۹۹	٪۹۹/۲۶
Fe ₂ O ₃	٪۰/۱۲	٪۰/۰۳۶
Al ₂ O ₃	٪۰/۲۹	٪۰/۲۰
TiO ₂	٪۰/۲۴	٪۰/۰۹۸
CaO	٪۰/۰۴۵	٪۰/۰۵۷
MgO	٪۰/۰۱۸	٪۰/۰۲۴
Na ₂ O	٪۰/۰۴۶	٪۰/۰۲۰
K ₂ O	٪۰/۳۶	٪۰/۰۷۹

استاندارد قابل قبول دانه‌بندی پودر سیلیس در کارخانه‌های شیشه جام به روش فلوت و شیشه جام آناتولی به روش پیتسبورگ طبق جدول (۲-۱۰) می باشد. همچنین میزان مجاز اکسید آهن در ماسه سیلیسی ترکیه طبق جدول (۲-۱۱) می باشد.

جدول ۲-۱۰- استاندارد قابل قبول پودر سیلیس در کارخانه‌های شیشه جام [۵]

اندازه دانه‌بندی	میزان استاندارد (درصد)
دانه‌های بزرگتر از ۰/۵۹ میلی‌متر	۰/۱
دانه‌های کوچکتر از ۰/۱ میلی‌متر	۱۰
دانه‌های کوچکتر از ۰/۰۷۴ میلی‌متر	۳

جدول ۲-۱۱- میزان مجاز اکسید آهن در ماسه سیلیسی ترکیه [۵]

نوع تولیدات	میزان استاندارد
شیشه جام	٪۰/۱۳ با یکنواختی ٪۰/۰۱
بطریهای بیرنگ	٪۰/۰۷ با یکنواختی ٪۰/۰۱
ظروف بیرنگ صنعتی	٪۰/۰۵ با یکنواختی ٪۰/۰۱
بلورسازی و وسایل خانگی	٪۰/۰۴ با یکنواختی ٪۰/۰۱
کریستال‌سازی	٪۰/۰۱ با یکنواختی ٪۰/۰۰۱

لازم به تذکر است که آنچه در مورد خصوصیات فیزیکی و ترکیب شیمیایی مواد اولیه کشورهای مختلف ذکر شد لزوماً نمی‌تواند در کشور دیگر ملاک قطعی تعیین مشخصات مواد اولیه قرار گیرد. زیرا اصولاً استانداردهای هر کشور با توجه به مواد اولیه موجود در همان کشور تنظیم و به اجرا

گذاشته شده است. استانداردهای فوق براساس دسترسی به مواد اولیه، کیفیت مناسب و جهت اقتصادی برای صنعت شیشه‌سازی تنظیم گردیده است و از این جهت در استاندارد بعضی از کشورها کیفیت بالایی برای مواد اولیه تعیین شده است و در مقابل در برخی دیگر از کشورها کیفیت متوسط نیز پذیرفته شده است [۵].

۲-۲-۶- استاندارد ایران

۲-۲-۶-۱- شیشه

در ایران استاندارد دی جهت ماسه سیلیسی مورد استفاده در صنعت شیشه و بلور تدوین نشده است و به نظر می‌رسد که بایستی بررسی همه‌جانبه‌ای در مورد مواد اولیه سیلیسی موجود در کشور بعمل آید و بر مبنای وفور، نزدیکی و سهولت دسترسی به منابع مواد اولیه، ترکیب شیمیایی، خصوصیات فیزیکی و هزینه آرایش استانداردهای لازم تنظیم گردد به نحوی که با اجرای استانداردهای مربوط بتوان محصولی با کیفیت مطلوب تولید نمود. در حال حاضر معیارهای زیر از طرف کارخانجات تولید شیشه و بلور مورد قبول قرار گرفته و اجرا می‌شود. استاندارد ایران برای انواع تولیدات طبق جدول‌های (۲-۱۲) تا (۲-۱۹) می‌باشد [۵].

جدول ۲-۱۲- استاندارد شیشه جام به روش قدیم در ایران

ترکیب	میزان استاندارد	یکنواختی
اکسید آهن	حداکثر ۰/۱٪	± ۰/۰۱٪
آلومین	حداکثر ۲٪	± ۰/۱٪
رطوبت	حداکثر ۵٪	± ۱٪

جدول ۲-۱۳- استاندارد شیشه جام به روش فلوت در ایران

ترکیب	میزان استاندارد	یکنواختی
سیلیس	حداقل ۹۷٪	۰/۳٪
اکسید آهن	حداکثر ۰/۱٪	± ۰/۰۱٪
رطوبت	۵٪	± ۱٪
آلومین	حداکثر ۱/۲٪	± ۰/۱٪

جدول ۲-۱۴- استاندارد بطری سازی در ایران

ترکیب	میزان استاندارد	یکنواختی
اکسید آهن	حداکثر ۰/۰۸٪	۰/۰۱ ± ٪
اکسید آلومینیم	حداکثر ۲٪	۰/۱ ± ٪
رطوبت	حداکثر ۵٪	۱ ± ٪

جدول ۲-۱۵- استاندارد لعاب سازی در ایران

ترکیب	میزان استاندارد	یکنواختی
اکسید آهن	حداکثر ۰/۰۸٪	۰/۰۱ ± ٪

جدول ۲-۱۶- استاندارد لامپ و شیشه های صنعتی در ایران

ترکیب	میزان استاندارد	یکنواختی
اکسید آهن	حداکثر ۰/۰۶٪	۰/۰۱ ± ٪
آلومین	حداکثر ۲٪	۰/۱ ± ٪
رطوبت	حداکثر ۵٪	۱ ± ٪

جدول ۲-۱۷- استاندارد وسائل خانگی، بلور و ظروف مشابه

ترکیب	میزان استاندارد	یکنواختی
اکسید آهن	حداکثر ۰/۰۴٪	۰/۰۱ ± ٪
آلومین	حداکثر ۲٪	۰/۱ ± ٪
رطوبت	حداکثر ۵٪	۱ ± ٪

جدول ۲-۱۸- استاندارد کریستال و بلور ممتاز در ایران

ترکیب	میزان استاندارد	یکنواختی
سیلیس	حداقل ۹۹٪	-
اکسید آهن	حداکثر ۰/۰۲٪	۰/۰۱ ± ٪

جدول ۲-۱۹- استاندارد پشم شیشه در ایران

ترکیب	میزان استاندارد
اکسید آهن	۰/۰۴٪

۲-۲-۶-۲-۲- ماسه سیلیسی

۲-۲-۶-۲-۱- استاندارد ماسه‌های سیلیسی مورد مصرف در صنایع ریخته‌گری

در اصطلاح ریخته‌گری کلمه ماسه به ذرات سیلیسی اطلاق می‌شود که حداقل دارای ۹۵٪ سیلیس SiO_2 بوده و قطر دانه‌ها بین ۰/۰۵ تا ۳/۳۶ میلی‌متر (۶ تا ۲۷۰ مش) باشد ولی عملاً ماسه‌های سیلیسی که در ریخته‌گری استفاده می‌شوند دارای ابعاد بین ۰/۰۵ تا ۱ میلی‌متر می‌باشند که با توجه به احتیاجات صنعت ریخته‌گری به ده نوع و یا بیشتر تقسیم می‌شوند. ماسه سیلیسی ریخته‌گری به دو نوع طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند.

ماسه سیلیسی ریخته‌گری طبیعی^۱، دانه‌های سیلیسی می‌باشند که محتوی بین ۵ تا ۲۰ درصد خاک رس به عنوان چسب می‌باشند و در محل با اضافه نمودن آب و شستن رس می‌توان آن را مستقیماً مورد استفاده صنایع ریخته‌گری قرار داد.

ماسه ریخته‌گری مصنوعی^۲ نیز منشاء طبیعی دارد با این تفاوت که به واسطه نداشتن چسب طبیعی و یا ناخالصی‌هایی که باید شستشو شود در موقع مصرف مقدار مناسبی خاک رس مناسب به آن اضافه می‌نمایند. امروزه در صنعت استفاده از ماسه مصنوعی را ترجیح می‌دهند و برای ریخته‌گری در دماهای بالاتر از ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد حتماً از آن بایستی استفاده نمود [۵].

۲-۲-۶-۲-۲- ترکیب شیمیایی ماسه ریخته‌گری

با وجود اینکه سیلیس ترکیب پایداری در طبیعت می‌باشد، تهیه مقادیر زیاد آن بصورت صد درصد خالص مشکل و غیر اقتصادی است. ماسه‌های سیلیسی طبیعی اغلب همراه ناخالصی‌هایی مانند اکسیدهای قلیائی اکسید سدیم، اکسید پتاسیم، اکسید کلسیم، اکسید آهن، اکسید آلومینیم و مقادیر جزئی اکسید منیزیم و تیتان می‌باشند. اکسیدهای قلیائی همراه با اکسیدهای آلومینیم و سیلیکات‌های

^۱ Clay Bonded^۲ synthetic sand

قلیائی نظیر فلدسپات و میکا به مقدار قابل توجهی نقطه ذوب سیلیس را پایین می‌آورند و به منزله کمک ذوب FLUX عمل می‌نمایند. برای ریخته‌گری در درجات حرارت بالا مجموع درصد اکسیدهای قلیائی نبایستی از یک درصد تجاوز نماید. اکسیدهای کلسیم و منیزیم در ترکیب ماسه‌های سیلیسی ریخته‌گری به صورت فلدسپاتهای کلسیم منیزیم و یا کربناتها یافت می‌شوند. مجموع درصد این دو اکسید نیز نبایستی از یک درصد تجاوز کند. اثر اکسید آهن نیز در صنعت ریخته‌گری به صورت کمک ذوب است که میزان آن بایستی بسیار پایین باشد و حداکثر از ۰/۲ درصد تجاوز نکند. اکسیدهای آلومینیم در واقع به صورت چسب عمل می‌کنند و تأثیر نامطلوبی در مقادیر جزئی آن ندارد سایر ناخالصیهای دیگر به مقادیر جزئی اثر زیادی در خواص متالورژیکی ماسه ریخته‌گری ندارد [۵].

۲-۲-۶-۳- خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه ریخته‌گری

خصوصیات یک ماسه ریخته‌گری با ترکیب شیمیایی همراه با مجموعه خواص فیزیکی و مکانیکی آن تعیین می‌شود. ترکیب شیمیایی بطور کلی قابلیت کاربرد ماسه را برای ریخته‌گری تعیین می‌کند در حالی که خواص فیزیکی و مکانیکی قابلیت کاربرد ماسه را برای بخشهای مختلف و مصارف گوناگون تعیین می‌کنند. خواص فیزیکی و مکانیکی عبارتست از اندازه دانه‌ها و توزیع دانه‌بندی، شکل میکروسکوپی دانه‌ها، درصد رس، دیرگدازی، استحکام فشاری در حالت‌های خشک و تر و نفوذپذیری. دیرگدازی، دانه‌بندی و شکل دانه‌ها به منشاء و شرایط زمین‌شناسی بستگی دارد و به عنوان خواص پایه نامگذاری شده است. مشخصات شیمیایی ماسه ریخته‌گری طبق تعریف انجمن تحقیقات و فولادریزی انگلستان طبق جدول (۲-۲۰) می‌باشد.

جدول ۲-۲۰- مشخصات شیمیایی ماسه ریخته‌گری

ترکیب (درصد)	ماسه درجه یک	ماسه درجه دو
SiO ₂	۹۶ حداقل	کمتر از ۹۶
Al ₂ O ₃	۱/۵ حداکثر	۱/۵ حداکثر
Fe ₂ O ₃	۱ حداکثر	۱ حداکثر
CaO MgO	۰/۵ حداکثر	۱ حداکثر
Na ₂ O K ₂ O	۱ حداکثر	۲ حداکثر

درصد رس، استحکام فشاری تر و خشک و نفوذپذیری و سایر خواص برای مخلوطی از ماسه قالب‌گیری شده سنجیده می‌شود و علاوه بر آنکه ارتباط با خواص پایه ماسه دارد بستگی به اجزاء تشکیل دهنده ماسه (ماسه، آب و خاک رس و سایر افزودنیها نظیر ذغال و غیره) نیز دارد و تا حدودی قابل کنترل است [۵].

۲-۲-۶-۲-۴- دانه‌بندی و شکل میکروسکوپی ماسه ریخته‌گری

اندازه دانه‌های ماسه ریخته‌گری از ۰/۰۵ تا ۳/۳۶ میلی‌متر و در عمل بیشتر بین ۰/۰۵ تا ۱ میلی‌متر است. بهترین دانه‌بندی حداقل ۳۰ مش (۵۰۰ میکرون) و حداکثر ۱۴۰ مش (۱۰۶ میکرون) با ۹۰ درصد بین ۴۰ مش (۴۲۵ میکرون) تا ۱۰۰ مش (۱۵۰ میکرون) می‌باشد.

از نظر شکل میکروسکوپی دانه‌های ماسه به چهار نوع گرد، مخروطی، گوشه‌دار و ترکیبی تقسیم می‌شود که بستگی به منشاء و شرایط زمین‌شناسی تشکیل ماسه دارد. از نقطه‌نظر مرغوبیت انواع ماسه‌های گرد و مخروطی بهترین خواص را دارند. چون تخلخل جرم قالب بستگی به شکل دانه‌ها دارد که ماکزیمم تخلخل و کمترین سطح را دانه‌های گرد دارند و کمترین مصرف رزین یا رس را خواهد داشت [۵].

۲-۲-۶-۲-۵- نفوذپذیری

نفوذپذیری مقیاسی است برای اندازه‌گیری تخلخل ماسه کوبیده شده در شرایط استاندارد برای اندازه‌گیری سرعت عبور هوا یا گاز تحت فشار ثابت از ماسه. در شرایط ایده‌آل دانه‌های گرد و پس از آن مخروطی بهترین انواع ماسه برای ایجاد تخلخل کافی در ماسه می‌باشند [۵].

۲-۲-۶-۲-۶- استحکام فشاری تر و خشک

در مورد استحکام فشاری نیز عامل عمده دانه‌بندی و فرم دانه‌های ماسه است و در صورت وجود این دو عامل بصورت استاندارد با مواد افزودنی مناسب استحکام لازم برای قالب فراهم می‌آید.

۲-۲-۶-۷- دیرگذاری

دیرگذاری ماسه عبارتست از بالاترین دمائی که در آن دانه‌های ماسه بصورت سطحی ذوب شده و به یکدیگر می‌چسبند و ترکیب شیمیایی اولیه ماسه و نداشتن ناخالصیهای ذکر شده، دیرگذاری ماسه را تعیین می‌کنند [۵].

۲-۳- سیلیس مورد مصرف سایش شیشه

ماسه سیلیسی پاکیزه، دارای استحکام مکانیکی، نرم تا متوسط و عاری از مواد خارجی که بدقت جهت سایش اولیه و یا نهایی شیشه جام دانه‌بندی شده است، در سایش شیشه مورد مصرف است. دانه‌بندی عموماً بین ۳۰ تا ۱۰۰ مش است و شکل دانه‌ها اهمیت زیادی ندارند گرچه وجود دانه‌های زاویه‌دار به علت احتمال شکستن آنها در هنگام سایش مقبولیت کمتری دارند. توزیع دانه‌بندی اهمیت خاصی دارد زیرا در چنین حالتی هر یک از ذرات وظیفه خود را در هنگام سایش به خوبی ایفا خواهند کرد [۵].

۲-۴- سیلیس مورد مصرف در صنایع ذوب

سیلیس متالورژیک، یک سیلیس پاکیزه با دانه‌بندی شن و ماسه و با آهن پایین و آلومین پایین می‌باشد که عمدتاً به عنوان ماده اولیه جهت آلیاژهای سیلیسیم بکار برده می‌شود. مهمترین آلیاژهای سیلیسیم عبارتند از: کلسیم سیلیس - فروسیلیس، کرم سیلیس، مس سیلیس، منگنز سیلیس و تیتان سیلیس. وجود آلومین در ترکیب ماده اولیه عمدتاً مضر است زیرا در کوره الکتریکی با اشکال احیا می‌شود و با ایجاد یک سرباره چسبنده محصول را آلوده می‌کند. به این دلیل میزان آلومین محتوی مواد اولیه سیلیسی بایستی کمتر از ۰/۴ درصد باشد. آهن محتوی تا ۰/۲ درصد نیز می‌تواند بالا رود و مجموع اکسیدهای قلیائی نبایستی از ۰/۰۳ درصد تجاوز نماید. میزان تیتان بایستی در حداقل

نگهداری شود. فسفر و آرسنیک بخاطر مسمومیت‌زائی عناصر خطرناکی به حساب می‌آیند و بنابراین حتی بصورت اثر نیز در مواد اولیه نباید وجود داشته باشد. در عین حال افت حرارتی مواد اولیه سیلیسی باید کمتر از ۰/۳ درصد باشد.

از نظر دانه‌بندی حد سه هشتم تا یک دوم اینچ از نظر حد پایینی و ۶ تا ۸ اینچ از نظر حد بالایی مورد نظر است و سیلیس مورد نظر بایستی دارای خواص مکانیکی مناسب باشد تا بتواند فشار و تراکم را در کوره و ضربه را در موقع نقل و انتقال مواد تحمل نماید [۵].

۲-۵- سیلیس مورد مصرف در آجرهای نسوز

سیلیس آجرهای نسوز نوعی سیلیس پاکیزه می‌باشد که در حدود دانه‌بندی شن و ماسه است و از نظر عیار آهن و آلومین بسیار پایین است که برای تولید آجرهای نسوز سیلیسی بکار برده می‌شود. مشخصات سیلیس مخصوص تولید آجرهای نسوز اسیدی مقاوم (Superduty) طبق جدول (۲-۲۱) می‌باشد [۵].

جدول ۲-۲۱- مشخصات سیلیس مخصوص تولید آجرهای نسوز [۵]

ترکیب	میزان استاندارد
آلومین	۰/۴٪
اکسید آهن	۰/۲٪ و در آجرهای نوع متوسط ۰/۴٪
کلیسم	۱٪
مجموع قلیائی‌ها	۰/۵٪
حداکثر افت حرارتی	۰/۵٪

۲-۶- ماسه سیلیسی مورد مصرف در صنایع جهت فیلتراسیون

ماسه فیلتراسیون ماسه‌ای شسته و دانه‌بندی شده است و برای مصارف تصفیه آب و مواد شیمیایی بکار برده می‌شود. مشخصات این ماسه به شرح زیر است.

مشخصات دانه‌بندی: بایستی دارای مقاومت مکانیکی کافی باشد، شکل دانه‌ها اهمیت دارد و بایستی دانه‌ها کاملاً گرد باشند. حداکثر ۲ درصد دانه‌های طویل یا مسطح، در این ماسه مجاز است. وزن

مخصوص آن بایستی حداقل ۲/۶ درصد باشد. هیچ رس، سیلت یا ناخالصیهای آلی در آن نباید وجود داشته باشد. تخلخل ماسه در هنگام استفاده به عنوان فیلتر بایستی ۳۵ درصد تا ۴۵ درصد باشد. اندازه ذرات برای بستر درشت ۶ تا ۹۰ میلی‌متر و برای بستر ریز از ۲/۵ تا ۶ میلی‌متر و برای بستر نرم کمتر از ۲ میلی‌متر است. به علاوه این ماسه نبایستی حاوی اکسید آهن و منگنز باشد تا متقابلاً ماده تصفیه شنی را آلوده ننماید [۱].

۲-۷- مصارف ساینده سیلیسی

ماسه سیلیسی کاربرد وسیعی برای سندبلاست، پرداخت‌گری و صاف کردن اولیه سطح شیشه دارد و به عنوان ماده‌ای جهت برش برای سنگبری سنگ‌های ساختمانی، بکار می‌رود. سندبلاست یک نوع ماسه کوارتزی هم اندازه می باشد که هنگامی که با سرعت زیاد بوسیله هوا، آب یا نیروی گریز از مرکز کنترل شده به گردش درآید برای پاک کردن فلزات از زنگ‌زدگی، رنگ و پلیسه‌های ریخته‌گری و یا جلای مجدد سنگ‌ها بکار برده می‌شود. کوارتز مهمترین وسیله برای انجام امر فوق است. مشخصات کوارتز مورد استفاده جهت سندبلاست عبارتست از: اندازه مناسب، مقاومت مکانیکی، نداشتن رس و اکسیدهای آهن و عدم وجود موادی که در هنگام کار تولید گرد و غبار می‌نماید.

هنگام سندبلاست ماسه سیلیسی با دانه‌بندی ۲۰ تا ۳۵ مش، برای کارهای سبک و ۴ تا ۸ مش برای کار چدنی سنگین و کارهای فولادی بکار می‌رود.

ماسه خرد شده و دانه‌بندی شده در کارخانه شیشه‌سازی به داخل دستگاههای مسطح کننده هدایت شده و در این مورد حدوداً سه تن ماسه برای مسطح کردن یک تن شیشه جام لازم است.

ماسه‌هایی که حاوی دانه‌های تیز و سفت کوارتز است به عنوان ساینده در اره‌های قابدار سنگبری سنگ‌های نما بکار می‌روند. این ماسه معمولاً از نظر دانه‌بندی بین ۲۰ تا ۳۵ مش تقریباً معادل ماسه مخصوص سندبلاست می‌باشد.

ماسه مخصوص جلا دادن، ماسه سیلیسی با دانه گرد و ظریف با اندازه‌های یکنواخت بین ۶۵ تا ۱۰۰

مش است که برای گستراندن و جلا دادن نقوش طلایی روی سطح ظروف چینی، بکار می‌رود. کوارتز خرد شده و ریز شده برای ساخت پس زمینه سایشی برای کاغذهای سنباده از جنس سنگ چخماق بکار می‌رود. این کاغذ که ارزان‌ترین کاغذ سنباده است هنوز به میزان خوبی به فروش می‌رسد و عمدتاً توسط ریخته‌گران کوچک بکار می‌رود. کوارتز و سیلت پودر شده، گاهی برای تمیز کردن سایشی ترکیبات و برای پرداخت خشن تر فلزات بکار می‌رود [۶].

۲-۸- ساینده‌های سنگی سیلیسی طبیعی

سنگ‌های سیلیسی از معدن استخراج و به شکل‌های مناسب جهت استفاده مانند سنگ سایش (کارد تیزکن)، سنگ خمیر، سنگ آسیاب و سنگ‌های دستی با انواع گوناگون شکل داده می‌شوند. سنگی که مورد استفاده است بطور غالب، ماسه سنگ می‌باشد ولی از کوارتزیت، کوارتز میکاشیست، سنگ آهنک سیلیسی شده سنگ چخماق، چرت^۱ و نواکولیت^۲ نیز استفاده می‌شود.

۲-۹- سنگ سایش (ابزار تیزکننده)

این سنگ‌ها عمدتاً از ماسه سنگ ساخته می‌شوند. ماسه سنگ باید دارای سختی یکنواخت باشد و دانه‌های یکدست و تیز آن به حد کافی به هم چسبیده باشد که از قدرت کششی آن اطمینان حاصل گردد و در عین حال امکان خرد شدن را بدهد تا از تشکیل جدار لعابی یا شیشه‌ای ممانعت شود. هرچه دانه‌ها درشت‌تر باشند قدرت برش سریعتر می‌شود. البته با ناهمواری مرتبط با آن نیز همراهی خواهد داشت قطعات سالم باید به ابعاد ۱ تا ۲ متر در دسترس باشند. ماسه سنگ‌های کمی وجود دارند که تمام این مشخصات را با هم داشته باشند.

۲-۱۰- سنگ‌های خمیر

^۱ Chert

^۲ novaculite

این سنگ‌ها برای سایش الوارهای خمیر در تولید خمیر کاغذ بکار می‌روند. این سنگ‌ها از ماسه سنگ ساخته شده‌اند و از همان نوع مرتبط با سنگ‌های تیزکن هستند، ولی بسترهای آنها باید قادر باشند قطعاتی با قطر ۵ فوت و با وجهی که ۱ تا ۳ متر پهنا دارد را تأمین نمایند. خصوصیات آنها عموماً مشابه سنگ‌های ابزار تیزکن است ولی پیوند بین ذرات آن باید به حد کافی ضعیف باشد که امکان بیرون‌زدگی دانه‌های سخت‌تر کوارتز را فراهم کند، پس از استخراج، سنگ‌ها به مدت یک تا دو سال برای رهایی تنش‌های موجود در آن رها شده و سپس برای کاربری آماده می‌شوند.

سنگ‌های خمیر ممکن است از همان بسترهای سنگ‌های تیزکن تهیه شوند [۶].

۱۱-۲- سنگ‌های آسیا

سنگ‌های آسیاب، سنگ‌های بزرگ حلقوی هستند که دارای چرخش افقی یا روی لبه هستند. آنها از هر نوع سنگ مناسب و سخت از انواع ماسه سنگ، کوارتزیت، کنگلومرای کوارتزی، گرانیت یا بازالت ساخته می‌شوند سنگ خاره و سنگ چسب^۱ نیز شامل سنگ‌های آسیاب است، سنگ خاره، سیلیکای کالسدونی است که ابتدا برای آسیاب دانه‌ها و غلات بکار می‌رفت ولی امروزه برای آسیاب کردن رنگها، غنی‌کننده‌ها و گرافیت بکار می‌رود. سنگ‌های چسب، سنگ‌های سنگین و بزرگی هستند که عمدتاً برای آسیاب فلدسپات، کوارتز، باریت و سایر کانی‌ها مطلوب هستند، اغلب این سنگ‌ها در ایتالیا، انگلستان، ایالات متحده آمریکا، کانادا و آلمان تولید می‌شوند [۶].

۱۲-۲- ریگ‌ها و آسترهای آسیا

ریگ‌ها انواع انتخابی سنگ چخماق و کوارتز هستند که در آسیاب‌های بزرگ گلوله‌ای چرخنده برای آسیاب کلوخه‌های معدنی فلزی، رنگ‌ها، سیمان، گچ، رس، کانی‌های سرامیک، پرکننده‌ها، ساینده‌های پودری بکار می‌روند [۶].

^۱ Chaser stone

۲-۱۳- سنگ‌های تیزکننده

این سنگ‌ها شامل: سنگ چاقو تیزکن، سنگ نفت، سنگ آب، سنگ‌هانینگ، سنگ داس تیزکن و غیره که این سنگ‌ها از ماسه سنگ‌های نرم، آرژیلیت سیلیسی و شیست ساخته می‌شوند. سنگ‌های سایشی که از ماسه سنگ درشت تشکیل شده‌اند برای سایش بدنه خودروها، مبلمان و بتن بکار می‌روند [۶].

میزان ذخایر، معادن سیلیس و

واحدهای فعالیت کننده در ایران

۳-۱- منابع سیلیس و واحدهای فرآوری

۳-۱-۱- معادن سیلیس در ایران

کانسارهای سیلیس ایران در مناطق مختلف پراکنده می‌باشند، ولی عمده تمرکز این کانسارها در استانهای همدان، زنجان و قزوین می‌باشد و همچنین عمده صنایع شیشه‌سازی نیز در استانهای مذکور و تهران متمرکز می‌باشند. در واقع قطب معادن سیلیس و صنایع شیشه در این چهار استان تمرکز یافته است.

طبق بررسیهای انجام شده لیست معادن سیلیس ایران به همراه میزان ذخیره، ترکیب شیمیایی و شرکت بهره‌برداری مطابق لیست ارائه شده در پیوست شماره ۱ می‌باشد [۵ و ۷].

۳-۱-۲- واحدهای فرآوری سیلیس در ایران

صنعت شیشه ایران با گسترش کمی و کیفی وسیعی همراه بوده است. در سال ۱۳۸۰ ایران با تولید سالانه ۲۲۵ هزار تن شیشه تخت، ۱۵۰ هزارتن شیشه‌های بسته‌بندی مواد غذایی و دارویی و ۲۵ هزارتن شیشه مطروف و با مجموع تولید سالیانه ۴۰۰ هزارتن در رده بزرگترین تولیدکنندگان شیشه خاورمیانه بوده است و البته با راه انداختن شیشه شناور لیا به ظرفیت اسمی ۱۰۰ هزار تن افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است [۱]. این اعداد و ارقام بیانگر این نکته مهم است که تداوم تولید در چنین حجم وسیعی از شیشه نیاز به برنامه‌ریزی اصولی در زمینه مهمترین ماده اولیه این صنعت یعنی سیلیس است. محور این برنامه‌ریزی لزوماً استفاده از سیلیس فرآوری شده برای استفاده بهینه از ذخایر موجود سیلیس است.

در میان تولید کنندگان سیلیس شرکت استخراج و فرآوری مواد اولیه شیشه با ظرفیت تولید ۲۰۰ هزار تن سیلیس فرآوری شده و امکانات کامل خردایش، دانه‌بندی، شستشو و فلو تاسیون، ۴۰٪ ظرفیت تولید سیلیس فرآوری شده کشور را در اختیار دارد. این کاملترین و بزرگترین مجموعه صنعتی کشور

در زمینه فرآوری سیلیس است. مهمترین واحدهای فرآوری سیلیس در ایران طبق جدول (۳-۱) می‌باشد.

جدول ۳-۱- مهمترین واحدهای فرآوری سیلیس در ایران، سال ۱۳۷۹ [۲].

ردیف	نام تولید کننده	ظرفیت اسمی (هزارتن)	نوع سنگ معدن مورد استفاده	امکانات فرآوری
۱	شرکت استخراج و فرآوری مواد اولیه شیشه	۲۰۰	سنگ کوآرتزیت از معادن قرمزآباد و قزل‌قیه	شستشو، اسیدشویی و فلوتاسیون
۲	شیشه قزوین	۸۵	کوآرتزیت معدن طهماسب آباد	روش تر
۳	گروه شیشه و بلور کاوه	۱۰۰	دماوند - زنجان	روش تر
۴	سیلیس البرز	۸۵	کوآرتزیت و کوآرتز	روش تر و خشک
۵	سیلیس بلودر	۲۰ (عملاً ۶ تا ۷)	معدن شیورین	روش تر
۶	هشت واحد کوچک سنگ کوبی در همدان	۲۰	معدن کوآرتز در همدان	روش تر
	جمع	۵۳۵	-	-

شرکت شیشه قزوین دارای یک واحد تولید پودر سیلیس به روش تر است که در ۷۰ کیلومتری غرب کارخانه (بخش فارسنجین) احداث شده و دارای ظرفیت ۱۶ تن در ساعت است. این طرح با امکانات صد درصد داخلی اجرا شده است و توانایی تأمین خطوط تولید شرکت شیشه قزوین را دارا می‌باشد. بخش عمده تولید سیلیس البرز به صورت خشک است و حدود ۴۰ درصد از محصولات این شرکت شستشو می‌شود و به بازار عرضه می‌گردد.

مجموع شیشه تولیدی کشور حدود ۴۰۰ هزار تن است، که در مقایسه با ارقام تولید در برخی کشورهای صنعتی همانند آمریکا با حدود ۱۵ میلیون تن، ژاپن با ۱۳ میلیون تن، انگلستان با ۳ میلیون تن [۸]، ناچیز به نظر می‌رسد. لذا چنانچه در صد گسترش صنایع شیشه و همچنین ورود به بازارهای جهانی جهت صادرات باشیم، باید ضمن افزایش ظرفیت تولید مواد اولیه صنایع شیشه و همچنین افزایش واحدهای تولید شیشه به مقوله بهبود کیفیت هم توجه نمود. یکی از راههای رسیدن به این مهم، احداث واحدهای مجهز فرآوری می‌باشد. با توجه به این که اغلب واحدهای فرآوری سیلیس فقط عملیات فرآوری در حد دانه‌بندی و شستشوی ساده انجام می‌دهند، لذا این واحدها باید

خود را مجهز به روشهای فرآوری نظیر فلوتاسیون، اسیدشویی و استفاده از جداکننده‌های مغناطیسی شدت بالا کرده تا بتوانند سیلیس با کیفیت بالا مورد نیاز در صنایع شیشه (بلور و کریستال) را تولید نمایند. مسلماً تکیه بر منابع کم‌ذخیره و پراکنده کوآرتز نمی‌تواند چاره دائمی برای واحدهای تولید بلور و کریستال باشد، از طرف دیگر استفاده از ذخایر کوآرتز فرآوری نشده در صنایع بلور و کریستال که موجب تولید محصول با کیفیت پایین می‌شود معقول به نظر نمی‌رسد. حال آنکه با انجام عملیات فرآوری مناسب می‌توان محصولات مرغوب تولید نمود که می‌تواند با محصولات خارجی رقابت نماید.

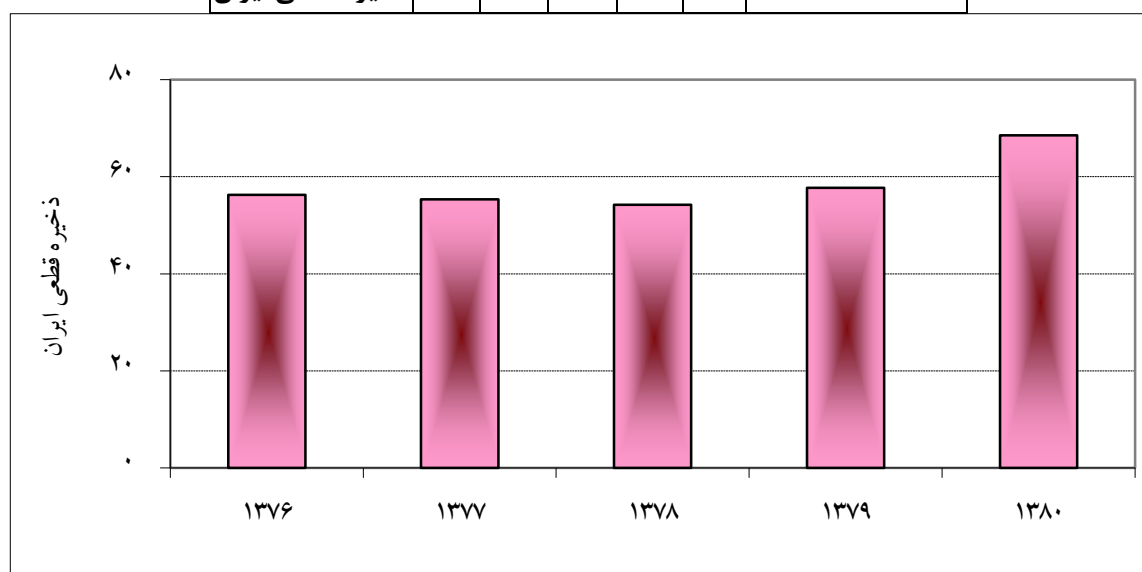
۲-۳- میزان ذخایر، تولیدات و مصارف سیلیس در ایران

۱-۲-۳- ذخایر سیلیس در ایران

ذخایر قطعی سیلیس در ایران بالغ بر ۶۸ میلیون تن می‌باشد. با توجه به نرخ رشد ۵/۴ درصدی شناسایی ذخایر ایران می‌توان گفت سرمایه‌گذاری بخش توسعه و اکتشاف سیلیس در سالهای اخیر افزایش یافته و نتایج آن، افزایش میزان ذخایر قطعی سیلیس ایران می‌باشد. [۹]

جدول ۲-۳- ذخیره قطعی سیلیس در ایران (میلیون تن)

سال	۱۳۷۶	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	متوسط نرخ رشد (%)
ذخیره قطعی ایران	۵۶/۳	۵۵/۳	۵۴/۲	۵۷/۷	۶۵/۵	۵/۴



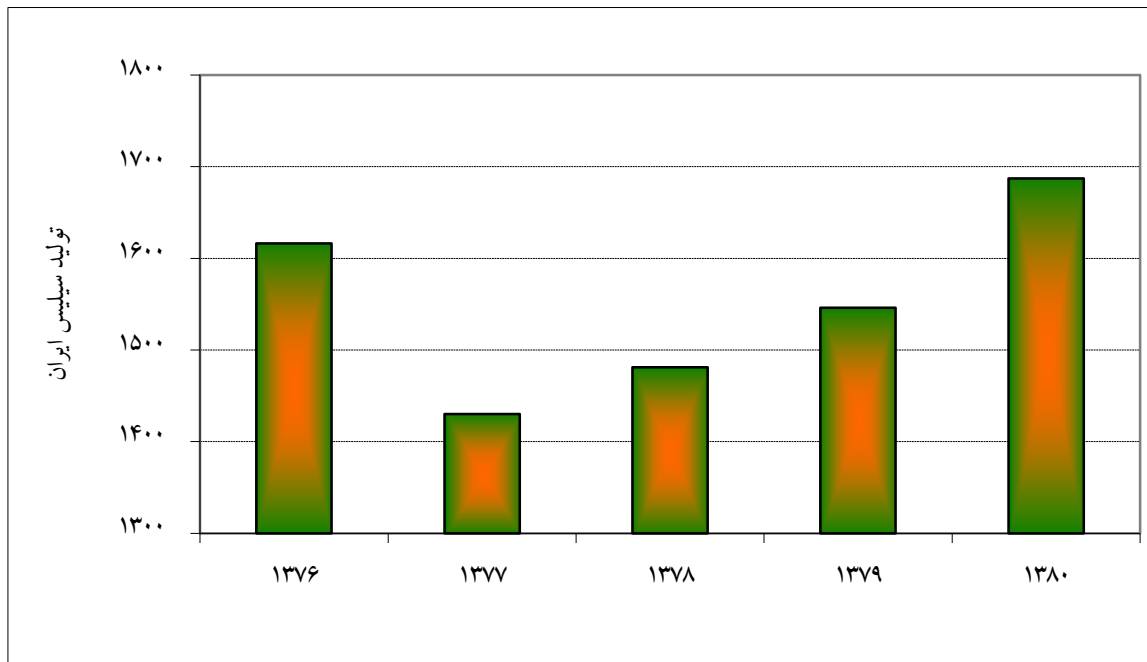
شکل ۱-۳- نمودار ذخیره قطعی سیلیس در ایران (میلیون تن)

۳-۲-۲- تولید سیلیس در ایران

شاخص مهم در این بخش، میزان تولید سیلیس جهت استفاده در کارخانجات شیشه‌سازی است که می‌توان با یک تغییر ساده در فرآیند آرایش دانه‌بندی، آنرا در واحدهای ریخته‌گری قابل مصرف نمود. تولید کنندگان سیلیس برای کارخانجات شیشه‌سازی به علت شناخت خواص ماسه ریخته‌گری و نیز کسب سود بالاتر با یک سرمایه‌گذاری کم نسبت به بازار مصرف شیشه‌سازی، تمایل به تولید ماسه ریخته‌گری پیدا کرده و اقداماتی را در این زمینه شروع نموده‌اند به طوری که احتمال می‌رود در آینده به صورت جدی وارد این بازار گردند.

جدول ۳-۳- میزان تولید سیلیس در ایران طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰ (هزار تن)

سال	۱۳۷۶	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	متوسط نرخ رشد(%)
تولید سیلیس	۱۶۱۶	۱۴۳۰	۱۴۸۱	۱۵۴۶	۱۶۸۷	۱/۴



شکل ۳-۲- نمودار میزان تولید سیلیس در ایران طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰ (هزار تن)

روند تولید سیلیس از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۸۰ دارای روندی افزایشی بوده است و میزان تولید سیلیس در ایران در سال ۱۳۸۰ معادل ۱/۶ میلیون تن گزارش شده است که نسبت به سال قبل ۹/۱ درصد

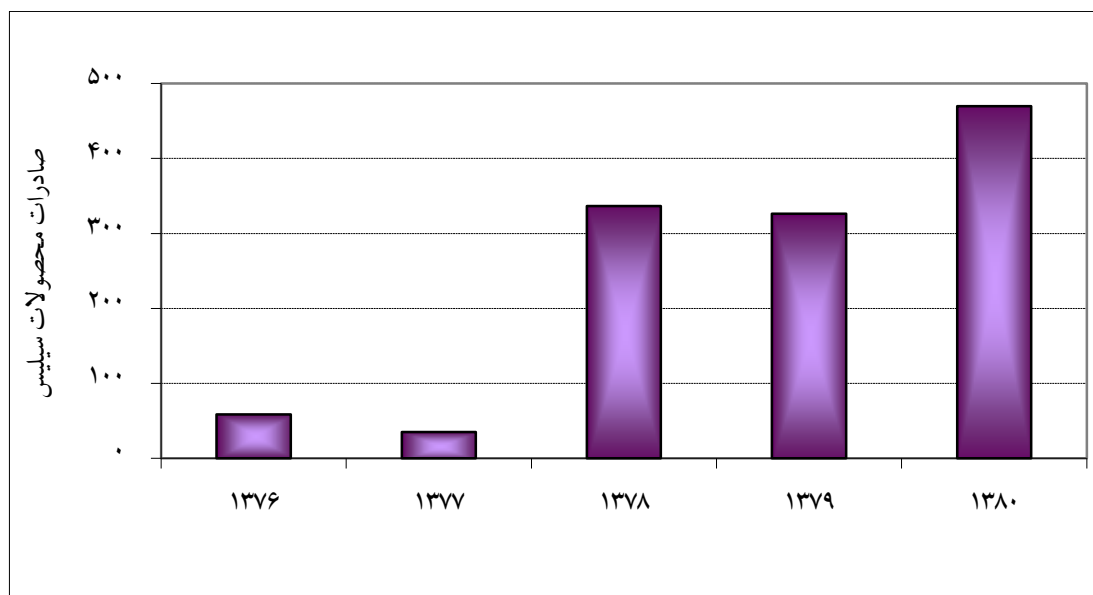
افزایش داشته است. این افزایش تولید، به سبب افزایش قیمت سیلیس طی سالهای اخیر و همچنین تولید محصول ماسه ریخته گری می باشد. این امر باعث افزایش صادرات و کاهش واردات محصولات سیلیس در ایران شده است.

۳-۲-۳- صادرات سیلیس ایران

بیش از ۹۹ درصد صادرات ایران در سال ۱۳۸۰ مربوط به شن و ماسه کوارتزی و سیلیسی بوده است. ایران در سال ۱۳۸۰ مقدار ۴۶۶/۸ هزار تن شن و ماسه کوارتزی و سیلیسی، ۱۰۷/۷ تن شن و ماسه طبیعی، ۱۸ تن کوارتز و ۲/۸ هزار تن خاکهای سیلیسی سنگواره ای صادر کرده است که در مجموع ۴۶۹/۷ هزار تن سیلیس در انواع ذکرشده به خارج از کشور صادر گردیده است. [۹]

جدول ۳-۴- میزان صادرات ترکیبات مختلف سیلیس دار طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰ (هزار تن)

سال	۱۳۷۶	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	متوسط نرخ رشد(%)
صادرات محصولات سیلیس	۵۸/۸	۳۵/۲	۳۳۶/۶	۳۲۶/۳	۴۶۹/۷	۲۱۴/۰۷



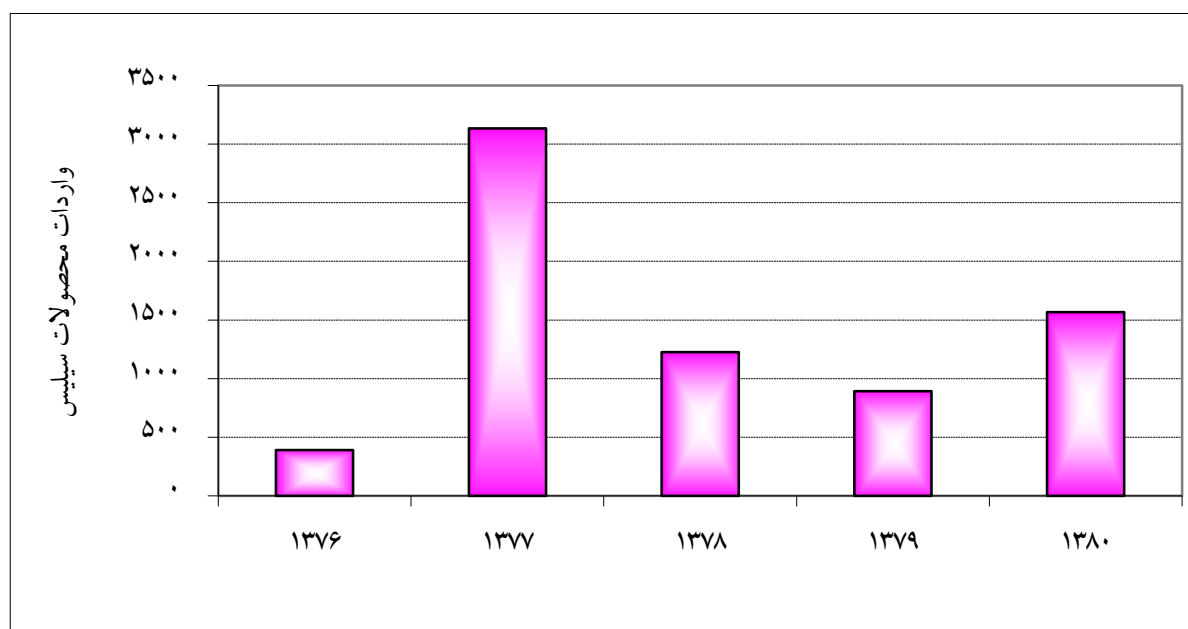
ششکل ۳-۳- نمودار صادرات محصولات مختلف سیلیس در ایران طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰ (هزار تن)
میزان صادرات محصولات سیلیسی ایران بعد از یک دوره کاهش در سال ۸۰ افزایش چشم گیری داشته است. این امر به دلیل افزایش صادرات شن و ماسه سیلیسی و همچنین کوارتز بوده است.

۳-۲-۴- واردات سیلیس در ایران

بیشترین واردات سیلیس مربوط به خاکهای سیلیسی سنگواره‌ای است و بیشترین استفاده آنها در صنایع شیشه و سرامیک می باشد. جدول (۳-۵) میزان واردات محصولات مختلف سیلیس را طی سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۸۰ نشان می دهد.

جدول ۳-۵- میزان واردات محصولات مختلف سیلیس طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰ (تن)

سال	۱۳۷۶	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	متوسط نرخ رشد (%)
واردات محصولات	۳۹۱/۱۹	۳۱۳۴/۷۵	۱۲۲۴/۶۲	۸۹۳/۱۳	۱۵۶۷/۸۵	-۴/۱۵



شکل ۳-۴- نمودار واردات محصولات مختلف سیلیس طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰ (تن)

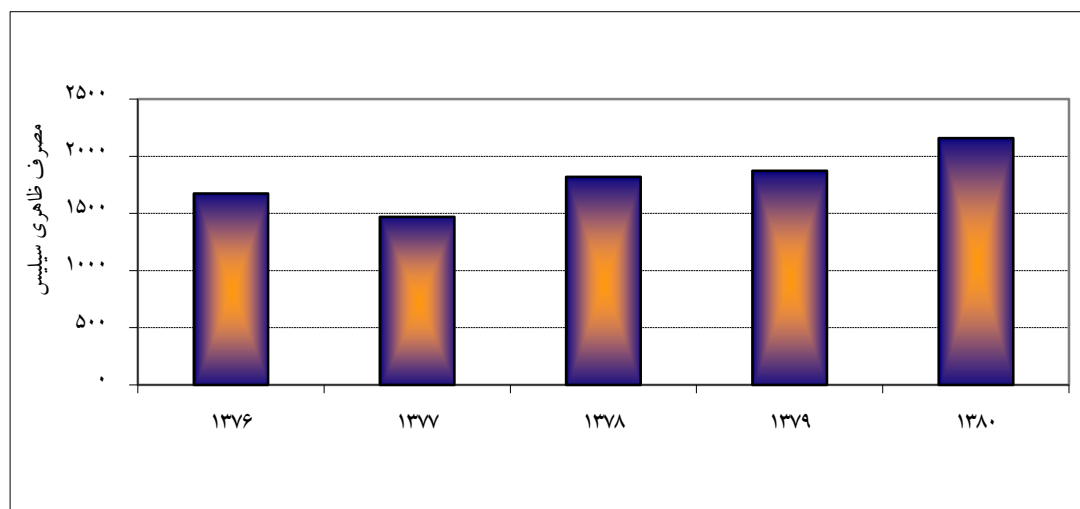
متوسط نرخ رشد بر اساس سالهای ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ بدست آمده است. با توجه به جدول (۳-۵) و نمودار شکل (۳-۴)، واردات ایران در طی سالهای اخیر دارای کاهش تدریجی با متوسط نرخ رشد (۴/۱۵-) درصد بوده است. در سال ۱۳۸۰ میزان واردات افزایش یافته است که این افزایش ناشی از واردات شن و ماسه طبیعی و کوارتز می باشد. این در حالی است که در سال ۱۳۸۰ کاهش شدیدی در تولید و صادرات شن و ماسه طبیعی دیده می شود.

۳-۲-۵- مصرف سیلیس در ایران

مصرف اصلی سیلیس در ایران در زمینه شیشه سازی، ریخته گری، تولید فروسیلیس و مصارف صنعتی خصوصا جهت پوشش کاری سطح قطعات می باشد، که عمدتا تاکید بر مصرف در شیشه سازی و ریخته گری است.

جدول ۳-۶- میزان مصرف ظاهری سیلیس در ایران طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰

سال	۱۳۷۶	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	متوسط نرخ رشد(%)
تولید ایران(تن)	۱۶۱۶۰۰۰	۱۴۳۰۰۰۰	۱۴۸۱۰۰۰	۱۵۴۶۰۰۰	۱۶۸۷۰۰۰	۱/۴
واردات ایران(هزارتن)	۳۹۱/۱۹	۳۱۳۴/۷۵	۱۲۲۴/۶۲	۸۹۳/۱۳	۱۵۶۷/۸۴	۱۷۲/۲۲
صادرات ایران(تن)	۵۸۸۴۱/۳۴	۳۵۲۳۱/۲۵	۳۳۶۶۴۲/۰۶	۳۲۶۲۹۹/۹۵	۴۶۹۷۰۱/۴۰	۲۱۴/۰۷
مصرف ظاهری(هزار تن)	۱۶۷۵/۲	۱۴۶۸/۴	۱۸۱۸/۹	۱۸۷۳/۲	۲۱۵۸/۳	۲۶/۱۲



شکل ۳-۵- نمودار میزان مصرف ظاهری سیلیس در ایران طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰(هزار تن)

مصرف ظاهری سیلیس از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۸۰ دارای روند افزایشی بوده است. همچنین متوسط نرخ رشد مصرف ظاهری سیلیس در ایران طی سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰ برابر با ۲۶/۱۲ درصد می باشد.

فصل چهارم

شناسایی و بررسی اولیه کاربرد سیلیس چاه

نو

در صنایع مختلف

۴-۱- مقدمه

پس از آنکه ماده معدنی استخراج می گردد، بسته به نوع مورد مصرف تحت عملیات کانه آرایبی قرار می گیرد. کانه آرایبی شامل مجموعه عملیاتی است که بر روی سیلیس مورد نظر صورت گرفته تا آنرا قابل مصرف نماید. هدف از کانه آرایبی سیلیس در بیشتر موارد، جداکردن کانی‌های با ارزش سیلیس از گانگ (رس و اکسید آهن) است.

برای انجام فرایندهای کانه آرایبی نیاز به آماده سازی اولیه و شناسایی نمونه می باشد. جهت نمونه برداری از کانسار سیلیس چاه نو و بدست آوردن آنالیز کانسار با توجه به شکل توده ای آن، ابتدا یک شبکه نمونه برداری تشکیل شد. محدوده تعیین شده دارای طول و عرض ۳۷۰۰ و ۱۵۰۰ متر بود که کانسار مورد نظر در داخل این محدوده واقع شده است. در منطقه مورد نظر، شبکه نمونه برداری بصورت مربعات ۲۵۰*۲۵۰ متر مربع در نظر گرفته شد و ترسیم شبکه انجام گرفت.

در این شبکه هر پروفیل با پروفیل قبلی ۲۵۰ متر فاصله دارد. از محل برخورد پروفیل‌ها نقاطی بدست آمد که از بین این نقاط، از نقاطی که در کانسار سیلیس چاه نو واقع است نمونه برداری انجام گرفته است. در انجام این عملیات ۲۲ نقطه نمونه برداری در قسمت تاپ کوارتزیت بدست آمد که در این نقاط به طریقه نمونه برداری لبپری، نمونه گیری انجام گرفت. در این روش از هر نقطه در منطقه حدود یک کیلوگرم نمونه برداشت شد.

در روی پروفیل شماره ۱، نمونه‌های A1 تا A5، در روی پروفیل شماره ۲ نمونه‌های B1 تا B6، در روی پروفیل شماره ۳، نمونه‌های C1 تا C4، در روی پروفیل شماره ۴ نمونه‌های D1 تا D3، در روی پروفیل شماره ۵ نمونه‌های E1 و E2، در روی پروفیل شماره ۶، نمونه F1 و در روی پروفیل شماره ۷، نمونه G1 برداشت شد.

در حالت کلی بدیهی است که چگالی نقاط نمونه برداری و همچنین تعداد و وزن لبپرها به درجه تغییر پذیری واحد نمونه برداری بستگی دارد. در انجام عملیات نمونه برداری هر جا که نقاط نمونه برداری

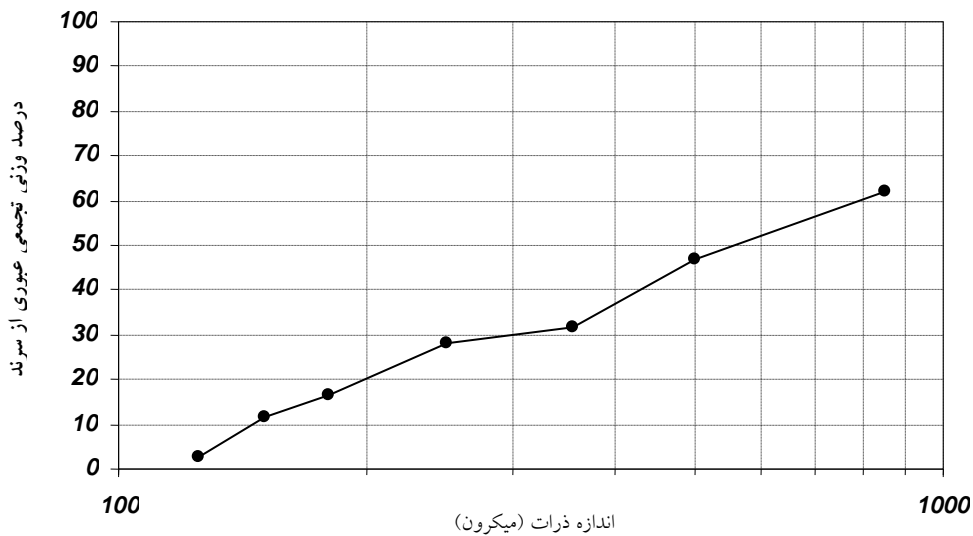
منطبق بر ترانسه‌ها و پروفیل‌های زده شده بود، از داخل آنها نمونه برداری شده است. نمونه‌های تهیه شده همگی از کوارتز سفید شیری بوده که بعد از جمع آوری نمونه‌ها جهت انجام آنالیز یک نمونه تهیه شد. در کلیه مراحل تهیه نمونه سعی در رعایت تمام اصول سیستماتیک نمونه برداری شد تا نسبت به اعتبار نمونه اطمینان حاصل گردد.

۴-۱-۱- سنگ شکنی

جهت انجام عملیات فرآوری بر روی نمونه لازم است ابتدا نمونه به خردایش مورد نظر برسد. جهت انجام این کار نمونه‌های تهیه شده از کانسار سیلیس چاه نو توسط سنگ‌شکن فکی آزمایشگاهی با سایز خردایش دو سانتی‌متر مورد خردایش قرار گرفت. برای این کار حدود ۲۰ کیلوگرم از نمونه‌ای که توسط سنگ‌شکن فکی مورد خردایش قرار گرفته انتخاب شده و توسط سنگ‌شکن مخروطی مورد خردایش قرار می‌گیرد. خروجی سنگ‌شکن مخروطی بر روی دو میلی‌متر تنظیم گردید. مواد خروجی را از سرنده دو میلی‌متر عبور داده و باقیمانده روی سرنده را دوباره وارد سنگ‌شکن مخروطی کرده و عملیات بالا چندین بار تکرار شد تا سایز کل نمونه به زیر دو میلی‌متر رسید. پس از خردایش نمونه‌ها جهت حذف قطعات آهنی که از مراحل سنگ شکنی به نمونه انتقال یافته است از آهنربای دستی استفاده شد. جدول زیر آنالیز سرنده ذرات خروجی از سنگ شکن مخروطی را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱- آنالیز سرنده ذرات خروجی از سنگ شکن مخروطی

شماره سرنده (مش)	سایز سرنده (میکرون)	وزن ذرات روی سرنده	درصد وزنی ذرات روی سرنده	درصد وزنی تجمعی روی سرنده	درصد وزنی تجمعی عبوری از سرنده
+۲۰	۸۵۰	۲۶۷	۳۸/۱۴	۳۸/۱۴	۶۱/۸۶
-۲۰+۳۰	۵۰۰	۱۰۴	۱۴/۸۵	۵۲/۹۹	۴۷/۰۱
-۳۰+۴۵	۳۵۵	۱۰۸	۱۵/۴	۶۸/۳۹	۳۱/۶۱
-۴۵+۶۰	۲۵۰	۲۳	۳/۲۸	۷۱/۶۷	۲۸/۳۳
-۶۰+۸۰	۱۸۰	۸۴	۱۲	۸۳/۶۷	۱۶/۳۳
-۸۰+۱۰۰	۱۵۰	۳۲	۴/۵۷	۸۸/۲۹	۱۱/۷۱
-۱۰۰+۱۲۰	۱۲۵	۶۳	۹	۹۷/۲۹	۲/۷۱
-۱۲۰	۱۲۵	۱۹	۲/۷۱	۱۰۰	
جمع		۷۰۰	-	-	



شکل ۴-۱- آنالیز سرنندی خروجی سنگ شکن مخروطی

۴-۱-۲- خردایش توسط آسیای گلوله‌ای سرامیکی

برای رسیدن به درجه آزادی مورد نظر از آسیا کردن استفاده شد. از آنجایی که نمونه را باید در شرایطی مورد خردایش قرار داد، که میزان آلودگی به آهن حداقل باشد لذا از آسیای گلوله‌ای سرامیکی جهت نرم کردن استفاده شد. برای این منظور حدود دو کیلوگرم نمونه از خروجی سنگ‌شکن مخروطی به وسیله ریفل انتخاب شد. بعد از تهیه نمونه، حدود دو کیلوگرم وارد آسیای گلوله‌ای سرامیکی کرده تا عملیات خردایش بر روی آن انجام شود، درصد پالپ ۴۰ درصد جامد وزنی در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از ایجاد نرمه هر یک ربع ساعت نمونه‌ها از آسیا خارج شده و عملیات طبقه بندی بر روی سرنند ۱۰۰ مش (۱۵۰ میکرون) به روش تر انجام شد. عملیات خردایش تا حدی که کل نمونه‌ها به زیر ۱۵۰ میکرون برسد ادامه یافت، کل زمان خردایش یکساعت بطول انجامید. سپس نمونه‌های خرد شده تحت شستشو و نرمه‌گیری قرار گرفته و عملیات طبقه‌بندی بر روی آن انجام گرفت. بعد از عمل شستشو و نرمه‌گیری بر روی نمونه‌های خرد شده توسط آسیا و بعد

از خشک شدن، حدود ۲۰ گرم نمونه به روش مخروطی و چهار قسمتی انتخاب گردید. در این روش نمونه‌ها را روی یک سطح صاف و تمیز ریخته با هم مخلوط کرده و سپس آنها را به صورت یک مخروط درآورده و مخروط را از نوک به طرف کف فشار داده تا سطح صافی به موازات قاعده آن بوجود آید. سپس این سطح توسط یک صفحه صاف به ۴ قسمت تقسیم شد. دو بخش از این چهار قسمت که روبروی هم قرار دارند حذف و از سایر مواد جدا شدند. دو بخش باقیمانده مجدداً با یکدیگر خوب مخلوط شده و بصورت یک مخروط درآورده و مراحل بالا عیناً بر روی آن تکرار شد. این فرآیند آنقدر تکرار شده تا نمونه با اندازه مناسب بدست آید. نمونه بدست آمده جهت تعیین درصد عبار سیلیس و آهن ارسال گردید.

انجام نتایج بدست آمده از آنالیز حاکی از آنست که با استفاده از خردایش و نرمه‌گیری و بدون انجام فلوتاسیون و روش‌های مغناطیسی می‌توان تا حدی میزان رس موجود در نمونه را کاهش داد که برای صنایع فروسیلیس قابل توجه می‌باشد.

۲-۴- تعیین کیفی کانیهای اصلی بوسیله XRD و آنالیز نمونه

بمنظور استفاده از سیلیس چاه نو در صنایع مختلف و انجام عملیات فرآوری متناسب با نوع استفاده می‌بایست نمونه اولیه مورد شناسایی قرار گیرد. لذا نمونه‌هایی جهت انجام آنالیز و تعیین کیفی کانیهای اصلی ارسال گردید که نتایج آن طبق جداول زیر قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲-۴- نتایج آنالیز XRD نمونه سیلیس چاه نو

Major Phase(s)
Quartz

جدول ۳-۴- نتایج آنالیز نمونه سیلیس چاه نو (بر حسب درصد اکسیدها)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	L.OI
۹۶/۲۱	۱/۵۶	۰/۹۹	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۰۶۲	۰/۰۰۱	۰/۰۳۲	۰/۱۹

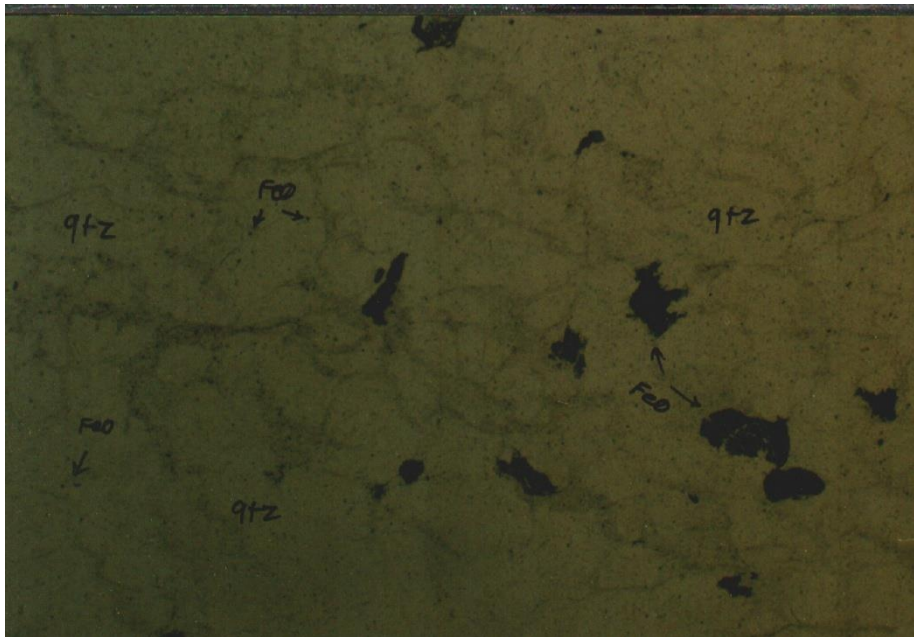
۴-۳- مطالعات میکروسکوپی

قبل از عملیات فرآوری بر روی نمونه‌های معدنی لازم است تا مطالعات میکروسکوپی انجام گیرد، تا از این طریق بتوان شناخت دقیق‌تری بر روی کانسنگ مورد نظر پیدا نمود و همچنین نحوه درگیری کانیه‌های مختلف، اندازه ذرات و درجه آزادی آنها را مشخص نمود تا در مراحل خردایش و آسیا ابعاد سنگ به میزانی برسد که کانی مورد نظر به درجه آزادی لازم رسیده باشد. همچنین در این بخش نوع کانی‌های موجود در سنگ و درصد حدودی آنها مشخص می‌شود که از این طریق بتوان برآورد اولیه‌ای از سنگ نمود.

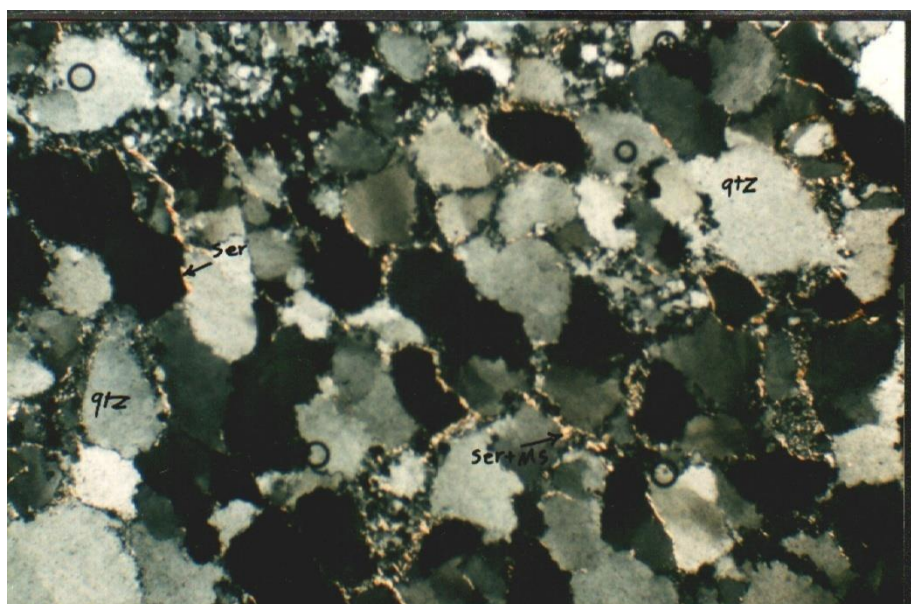
۴-۳-۱- گزارش مطالعه پتروگرافی

جهت انجام مطالعات پتروگرافی دو نمونه تهیه و توسط کارشناسان سازمان زمین شناسی کشور مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه گزارش به این شرح می‌باشد. نمونه از نوع سنگ‌های رسوبی دگرگون شده بود و در گروه ماسه سنگ‌های غنی از کوارتز دگرگون شده یا کوارتزیت قرار می‌گیرد. کوارتز تشکیل دهنده اصلی نمونه است، که حدود ۹۵٪ آن را به خود اختصاص می‌دهد. دانه‌های کوارتز عموماً گردشگی و جورشدگی خوبی را داشته و به علت تحمل دگرگونی حواشی دندان‌های پیدا کرده اند (بافت کوارتزیتی) که این موضوع ناشی از پدیده انحلال فشاری صورت گرفته در مرز لایه است. ابعاد دانه‌های کوارتز عموماً در حد ۱۰۰ الی ۳۵۰ میکرون می‌باشد. ضمن اینکه دانه‌های با ابعاد ۲۰۰-۲۵۰ میکرون فراوانی بیشتری دارند. علاوه بر کوارتز، تشکیل دهنده قابل توجه دیگر شامل ذرات و اجتماعات ریز از نوع سرسیت، موسکویت و کانیه‌های رسی است که اغلب در فضای بین ذرات کوارتز تجمع دارند و جهت یافتگی نسبی نیز نشان می‌دهد که این کانیه‌ها علی‌رغم ابعاد ریزشان به دلیل نحوه قرارگیری در بین دانه‌های کوارتز در صورت خردایش مناسب به سهولت قابل شستشو و جدایش می‌باشد. کمتر از یک درصد کانیه‌های اوپاک (ترکیبات آهن‌دار) از دو نسل می‌باشند. یک نسل شامل

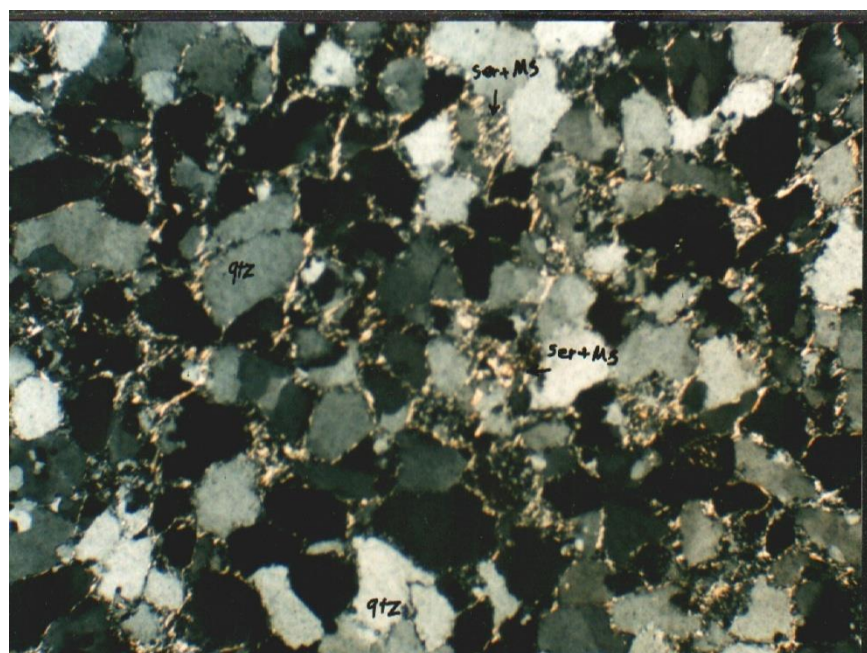
قطعات نیمه شکل دار نسبتاً درشت با ابعاد ۱۵۰-۵۰ میکرون است که عموماً در فضای بین کوارتزها تجمع دارند و ضمن خردایش و رسیدن به درجه آزادی مناسب، به خوبی قابل جدایش هستند. کانی اصلی در این ترکیبات هماتیت می باشد. شکل دیگر ترکیبات اوپاک (آهن دار) شامل ادخالهای ریز در داخل کواتزها می باشند که ابعاد آنها در حد چند میکرون (کوچکتر از ۵ میکرون) بوده و طی فرآیند فرآوری قابل جدایش نمی باشند. مقدار کانیهای اوپاک درشت (نسل اول) چندین برابر نسل دوم است. اگرچه بایستی این موضوع در نمونه‌های متعدد بررسی و نتیجه‌گیری شود. لازم به ذکر است که نمونه‌های مورد مطالعه از لحاظ بافت کانی‌شناسی تفاوت قابل ذکری ندارند. تصاویر نشان داده شده در اشکال ۲-۴ تا ۴-۴ حالات مختلف ذرات و کانیهای مختلف توصیف شده می باشد.



شکل ۲-۴- تصویر میکروسکوپی - نور معمولی (PPL)، با بزرگنمایی ۴۰× کوارتز (qtz)، اکسیدهای آهن (FeO)



شکل ۴-۳- تصویر میکروسکوپی - نور پلاریزه (CPL)، با بزرگنمایی $\times 40$ کوارتز (qtz)، موسکویت (MS)، سرسیت (Ser)



شکل ۴-۴- تصویر میکروسکوپی - نور پلاریزه (CPL)، با بزرگنمایی $\times 40$ کوارتز (qtz)، موسکویت (MS)، سرسیت (Ser)

۴-۳-۲- تعیین درجه آزادی

یکی از مهمترین هدف‌های خردایش در کانه‌آرایی، آزادکردن کانی‌های با ارزش (SiO_2) از کانی‌های باطله Al_2O_3 و Fe_2O_3 همراه در درشت‌ترین ابعاد ممکن است. دستیابی به یک درجه آزادی خوب در اندازه‌های درشت از مصرف انرژی خردایش جلوگیری می‌کند و باعث می‌شود که جدایش کانی‌ها به ازای هزینه کمتری انجام شود. درجه آزادی، نسبت کانی‌های با ارزش آزاد به کل کانی‌های با ارزش تعریف می‌شود. با توجه به مطالعات میکروسکوپی انجام گرفته بر روی کانسار سیلیس چاه نو، درجه آزادی حدود ۱۵۰ میکرون (۱۰۰ مش) می‌باشد که اکثر کانی‌های آهن در این سایز به درجه آزادی رسیده‌اند و می‌توان آهن را جدا کرد.

۴-۴- بررسی اولیه کاربرد سیلیس چاه نو

بررسی نتایج آنالیز نمونه و مطالعات صورت گرفته بر روی استانداردهای کاربردهای سیلیس، کاربرد کانسار سیلیس چاه نو به ترتیب با کمترین عملیات کانه‌آرایی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود.

۴-۴-۱- صنایع سیمان

از آنجا که سیلیس مصرفی در صنایع سیمان به آهن و رس حساسیت زیادی ندارد، بنابراین بدون انجام عملیات کانه‌آرایی بر روی کانسار سیلیس چاه نو امکان استفاده از این کانسار در صنایع سیمان وجود دارد. در جدول (۴-۴) مقایسه‌ای بین سیلیس مورد استفاده در صنایع سیمان با کانسار سیلیس چاه نو انجام شده است.

جدول ۴-۴- مقایسه بین سیلیس مصرفی صنایع سیمان با سیلیس چاه نو

Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	ترکیب (درصد)
۵	۰/۲	۸۸	سیلیس مورد استفاده در صنایع سیمان
۰/۹۹	۱/۵۶	۹۶,۲۱	سیلیس چاه نو

۴-۴-۲- ماسه ریخته‌گری

با مقایسه استاندارد ماسه ریخته‌گری با استاندارد سیلیس چاه نو و مشاهده درصد دو ترکیب مهم سیلیس و اکسید آهن قابلیت مصرف این کانسار در صنایع ریخته‌گری نیز وجود دارد. درصد Fe_2O_3 در سیلیس چاه نو کمتر از استاندارد درصد Fe_2O_3 در صنایع ریخته‌گری است پس در مورد Fe_2O_3 مشکلی وجود ندارد. با توجه به اینکه سیلیس چاه نو را بایستی با خردایش به دانه بندی مناسب رساند، عملاً از گردش‌دگی مناسب برخوردار نبوده و از این لحاظ مطلوب نمی باشد.

جدول ۴-۵- مقایسه استاندارد ماسه ریخته‌گری و سیلیس چاه نو

Fe_2O_3	SiO_2	ترکیب
کمتر از ۱٪	۹۶٪	ماسه ریخته‌گری
۰/۹۹٪	۹۶,۲۱	سیلیس چاه نو

۴-۴-۳- صنایع فروسیلیس

با توجه به استاندارد سیلیس مورد نیاز صنایع فروسیلیس و با مقایسه آن با سیلیس مورد نظر می توان به کاربرد سیلیس چاه نو در صنایع فروسیلیس نیز پی برد. با توجه به اینکه درصد سیلیس در صنایع فروسیلیس ۹۷ درصد و در سیلیس چاه نو ۹۶/۲۱٪ است جهت پرعیار کردن سیلیس تا ۹۷ درصد می‌توان عملیات شستشو بر روی نمونه اولیه انجام داد. در مورد اکسید آهن نیز با توجه به اینکه درصد Fe_2O_3 در سیلیس چاه نو کمتر از Fe_2O_3 در صنایع فرو سیلیس است، پس در این مورد مشکلی وجود ندارد.

جدول ۴-۶- مقایسه استاندارد صنایع فروسیلیس و سیلیس چاه نو

Fe_2O_3	SiO_2	ترکیب(درصد)
کمتر از ۷	۹۷	صنایع فروسیلیس
۰/۹۹	۹۶,۲۱	سیلیس چاه نو

۴-۴-۴- صنایع نسوز

مقایسه استاندارد سیلیس مخصوص تولید آجرهای نسوز و درصد ترکیبات سیلیس چاه نو در جدول

(۷-۴) نشان می دهد که بکارگیری از سیلیس چاه نو بدون انجام هیچگونه عملیات کانه آرابی و بطور مستقیم امکان پذیر به نظر نمی رسد. تنها در صورتیکه بتوان درصد Al_2O_3 و Fe_2O_3 را تا حد لازم کاهش داد، پتانسیل بهره گیری از آن در صنعت نسوز وجود خواهد داشت که در فصل های بعدی بدان پرداخته می شود.

جدول ۷-۴- مقایسه استانداردهای آجرنسوز و سیلیس چاه نو

Fe_2O_3	Al_2O_3	ترکیب(درصد)
کمتر از ۰/۲	کمتر از ۰/۴	صنایع نسوز
۰/۹۹	۱/۵۶	سیلیس چاه نو

۴-۴-۵- پشم شیشه

مهمترین ترکیب در پشم شیشه اکسید آهن می باشد که باید عیار آن زیر ۰/۴ درصد باشد. با توجه به آنالیز سیلیس چاه نو که میزان اکسید آهن آن ۰/۹۹ درصد می باشد در صورتیکه امکان کاهش عیار آهن کانسار با شستشو و یا حداکثر یک خردایش اولیه توسط سنگ شکن و انجام فلوتاسیون تا زیر ۰/۴ درصد وجود داشته باشد، این کانسار کاربرد بسیار خوبی برای این صنایع خواهد داشت. بدین منظور آزمایشهایی انجام گرفته است که در بخشهای بعدی بدان پرداخته شده است.

۴-۴-۶- شیشه جام

در جدول (۸-۴) مقایسه ای بین عیار عناصر مورد توجه جهت کاربرد سیلیس در صنایع تولید شیشه جام و سیلیس چاه نو صورت پذیرفته است. همانطور که مشاهده می شود امکان استفاده از این سیلیس بدون انجام عملیات کانه آرابی مقدور نبوده و تنها در صورت کاهش عیار آهن تا کمتر از ۰/۱ درصد این امر میسر خواهد شد.

جدول ۸-۴- مقایسه استاندارد شیشه جام و سیلیس چاه نو

Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	ترکیب(درصد)
۰/۱	۰/۲	۹۶	استاندارد شیشه جام
۰/۹۹	۱/۵۶	۹۶,۲۱	سیلیس چاه نو

فصل پنجم

آزمایشهای کانه آرایبی و فرآوری

۵-۱- مقدمه

همانطور که قبل تر اشاره شد، آنالیز محصول خردایش توسط آسیای سرامیکی حاکی از آنست که با استفاده از خردایش و نرمه گیری و بدون انجام عملیات فرآوری نمی توان میزان آهن موجود در نمونه را کاهش داد. لذا نیاز به آزمایشهای فرآوری بیشتر علاوه بر شستشو و نرمه گیری ضروری به نظر می رسيد.

در این فصل آزمایشهایی برای فرآوری کان سنگ سیلیس چاه نو انجام گرفت. معمولاً به علت وجود عوامل مختلف و متعدد درگیر در طرح، تعداد آزمایشها زیاد شده و هزینه گزاف و زمانی طولانی مصرف می شود، بنابراین با طراحی آزمایش روند انجام آزمایش به یک طرح منظم تبدیل شده و در جهت تسریع و تنظیم اطلاعات بدست آمده و کاهش تعداد آزمایشهای لازم و همچنین بهینه سازی مجموعه پیش می رود.

۵-۲- طراحی آزمایشها [۱۰ و ۱۵]

طراحی آزمایشها شامل یکسری از آزمایشهایی است که در آنها به طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، تغییراتی ایجاد می گردد تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود. بعضی از متغیرهای فرآیند (X_1 و X_2 و ... X_p) قابل کنترل و بقیه (Z_1 و Z_2 و ... Z_g) غیر قابل کنترل هستند. معمولاً هدف از آزمایش تعیین متغیرهای x است بطوریکه تأثیراتی روی پاسخ داشته باشند (خواه تأثیر زیاد خواه تأثیر کم).

طراحی آزمایشها یکی از ابزارهای مهم مهندسی در راستای بهبود فرآیندهای تولیدی محسوب می شود که کاربرد فراوانی در توسعه فرآیند تولید دارد. همچنین این روشها می توانند نقش مهمی در فعالیتهای طراحی مهندسی که شامل طراحی و توسعه محصولات جدید و بهبود محصولات موجود می باشد، ایفا نماید. یکی از روشهای طراحی آزمایشها روش تاگوچی است که در انجام آزمایشهای فلوتاسیون از این روش استفاده گردید. در ادامه این روش به تفصیل آورده می شود.

۵-۳- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

در اوایل دهه ۱۹۸۰ پرفسور گینیچی تاگوچی^۱ روش خود را جهت استفاده از طراحی آزمایش‌ها برای موارد زیر ارائه نمود:

- طراحی محصولات یا فرآیندها بطوریکه آنها نسبت به شرایط محیطی مقاوم باشند.
- طراحی و توسعه محصولات بطوریکه آنها نسبت به تغییرات مؤلفه‌های خود مقاوم باشند.
- حداقل نمودن تغییرات در اطراف مقدار هدف.

طراحی آزمایش سه مرحله دارد:

- (۱) مرحله غربال کردن که در دو سطح انجام شده و تعدادی از پارامترها حذف می‌شوند.
- (۲) مرحله بهینه‌سازی که عوامل بررسی شده در مرحله قبل در سه یا چند سطح بررسی می‌شوند و شرایط بهینه از این قسمت به دست می‌آید.
- (۳) مرحله تأیید که شامل یک آزمایش با شرایط بهینه بدست آمده در مرحله بهینه‌سازی بوده و ماکزیمم پاسخ از این مرحله به دست می‌آید.

۵-۳-۱- روش طراحی پارامتر تاگوچی

طراحی پارامتر به روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد^۲ انجام می‌شود. آرایه متعامد جدولی از اعداد صحیح است که عناصر ستون‌های آن (۱، ۲، ۳، ...) نشان دهنده سطوح کم، متوسط و زیاد عوامل می‌باشند. هر ردیف از آرایه متعامد، یک آزمایش را مشخص می‌سازد و به عبارت دیگر مجموعه مشخصی از سطوح عامل‌هایی است که باید آزمایش گردند. جدول ۵-۱ یک آرایه L_8 را نشان می‌دهد. ستون اول این جدول شماره آزمایش را مشخص می‌نماید و سطر اول آن شماره عامل‌ها را نشان می‌دهد. بقیه جدول با اعداد ۱ و ۲ پر شده است که عدد ۱ نشان دهنده سطح پایین هر عامل و عدد ۲ معرف سطح بالای عامل می‌باشد. برخی از خصوصیات آرایه‌های متعامد به شرح ذیل می‌باشد:

1. Ginichi Taguchi
2. Orthogonal array

- هر یک از سطوح به تعداد مساوی در هر ستون آرایه تکرار می‌شوند. مثلاً برای آرایه L_8 ، ۴ عدد سطح ۱ و ۴ عدد سطح ۲ در هر ستون موجود می‌باشد. هر سطر از آرایه دارای ترکیب متفاوتی از سطوح عوامل است؛ یعنی هیچ دو سطری در آرایه مشابه نیستند.

- با انتخاب هر جفت ستون از جدول تمام ترکیبات سطوح وجود دارد و از هر ترکیب به تعداد مساوی موجود می‌باشد. برای مثال در آرایه L_8 تمام ترکیبات ممکن یعنی $(1,1)$ ، $(1,2)$ ، $(2,1)$ ، $(2,2)$ و از هر ترکیب ۲ عدد موجود است.

جدول ۵-۱- آرایه متعامد L_8

شماره آزمایش	فاکتورها	A	B	C	D	E	F	G
	ستون‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲		۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲
۳		۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۴		۱	۲	۲	۲	۲	۱	۱
۵		۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲
۶		۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۷		۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱
۸		۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲

تاگوچی ۱۸ ماتریس متعامد استاندارد برای طراحی پیشنهاد می‌کند که برای طراحی آزمایش باید از آنها استفاده نمود. آرایه‌هایی که بیشترین استفاده را دارند عبارتند از: $L_{16}(2^{15})$ ، $L_{32}(2^{31})$ ، $L_8(2^7)$ برای سیستم‌های دو سطحی و $L_{18}(2^1 \cdot 3^7)$ ، $L_9(3^4)$ ، $L_{27}(3^{13})$ برای سیستم‌های سه سطحی. همچنین آرایه‌هایی برای سیستم‌های چهار و پنج سطحی نیز وجود دارد که کمتر استفاده می‌شوند.

مراحل طراحی آزمایش به روش تاگوچی به صورت ذیل می‌باشد.

۵-۳-۲- تعیین عوامل مؤثر بر متغیر پاسخ و درجه آزادی آنها

در این مرحله آزمایشگر باید هدف از تحقیق را به خوبی درک کرده و متغیرهای پاسخ را انتخاب نماید

و سپس با کمک اطلاعات علمی و فنی موجود و تجربه‌های قبلی، عوامل مؤثر در تغییر هدف (متغیر پاسخ) را پیدا نموده، سطح هر عامل را نیز مشخص کند و اثرات متقابل بین آنها را بررسی نماید. در صورتیکه اثرات متقابل بین عوامل مشخص نباشد، می‌توان با یک مرحله آزمایش غربال، آنها را شناسایی نمود. پس از شناسایی کلیه عوامل مؤثر بر هدف، درجه آزادی هر یک محاسبه می‌شود. درجه آزادی برای متوسط کل نتایج تعریف می‌گردد و با DOF یا f نشان داده شده، به صورت ذیل محاسبه می‌شود.

اگر عاملی دارای L سطح باشد، این عامل دارای $L-1$ درجه آزادی است:

$$DOF = Level - 1 \quad 1-5$$

چنانچه دو عامل با هم اثر متقابل داشته باشند، درجه آزادی مربوط به اثر متقابل برابر حاصلضرب درجه آزادی دو عامل است:

$$DOF_{A*B} = DOF_A * DOF_B \quad 2-5$$

درجه آزادی کل آزمایش برابر مجموع درجه آزادی تمامی عوامل می‌باشد:

$$DOF_{total} = \sum DOF_{factors} + \sum DOF_{interaction} \quad 3-5$$

درجه آزادی آرایه متعامد به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$DOF_{O,A} = \sum DOF_{column} \quad 4-5$$

که DOF_{column} درجه آزادی ستون است و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$DOF_{column} = Level - 1 \quad 5-5$$

۵-۳-۳- انتخاب آرایه متعامد مناسب

پس از محاسبه درجه آزادی عوامل، باید آرایه مناسب را انتخاب نمود. اولین نکته‌ای که در انتخاب آرایه متعامد باید مدنظر قرار گیرد این است که درجه آزادی آرایه انتخابی باید بیشتر از درجه آزادی آزمایش باشد؛ یعنی:

$$DOF_{O,A} > DOF_{exp} \quad 6-5$$

در صورتیکه بین عوامل، اثر متقابل وجود داشته باشد، آرایه انتخابی باید شرایط لازم برای بررسی اثر متقابل را دارا باشد. ممکن است چند آرایه متعامد دارای شرایط مذکور باشند، در اینگونه موارد آرایه‌ای انتخاب می‌گردد که دارای کمترین تعداد آزمایش باشد.

۵-۳-۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

کسانی که غالباً روش تاگوچی را به کار می‌برند از تجزیه و تحلیل واریانس^۱ جهت شناسایی عامل‌هایی که بر متوسط پاسخ اثر می‌گذارند استفاده می‌کنند. آنها همچنین نمودارهای میانگین حاشیه‌ای را در مورد هر یک از عوامل به کار می‌برند. روش معمول شامل بررسی نمودارها و انتخاب «عامل‌های برنده» است. عامل‌های برنده عامل‌هایی هستند که دارای اثرات بزرگتر می‌باشند. سطوحی از این عامل‌ها که بهترین نتیجه را داشته باشند، به عنوان سطوح بهینه در نظر گرفته می‌شوند و متغیر پاسخ در این سطوح محاسبه می‌گردد. سه هدف عمده از تجزیه و تحلیل نتایج عبارتند از:

- تعیین اثرات فرعی یا اصلی هر یک از عوامل

- تعیین شرایط بهینه

- تخمین نتایج در شرایط بهینه

مراحل تجزیه و تحلیل به شرح ذیل است:

۵-۳-۵- تعیین اثر اصلی هر عامل^۲

اگر A, B, C, \dots عامل‌هایی باشند که بر متغیر پاسخ تأثیر می‌گذارند (اعم از عامل‌های اصلی و اثرهای متقابل)، متوسط پاسخ در هر سطح از این عوامل برابر است با مجموع مقدار متغیر پاسخ در هر سطح، تقسیم بر تعداد آن. به عنوان مثال برای متغیر A مقدار متوسط پاسخ در هر سطح از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

^۱ ANOVA

^۲ ANOVA

$$\bar{A}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_k \quad 7-5$$

که در آن i سطوح عامل A ، n_i تعداد آزمایش‌هایی است که در آن عامل A در سطح i می‌باشد و y_k میزان پاسخ آزمایشی است که A در سطح i قرار دارد. با رسم متوسط پاسخ نسبت به سطوح هر عامل، نمودارهای میانگین حاشیه‌ای به دست می‌آید. از این نمودارها می‌توان عامل‌هایی که دارای بیشترین تأثیر هستند و همچنین سطوح بهینه آنها را تشخیص داد.

۵-۳-۶- تحلیل واریانس

پس از مشخص شدن اثر کلی عامل‌ها باید میزان تأثیر هر عامل تعیین گردد. برای این منظور از آنالیز واریانس استفاده می‌گردد. مراحل عمده تحلیل واریانس به شرح ذیل می‌باشد:

۱- محاسبه مجموع نتایج

اگر هدف از آزمایش رسیدن به پاسخ معینی باشد (هدف یک مقدار خاص است) و y_0 این مقدار معین، y_i مقدار پاسخ در آزمایش i ام و n ، کل آزمایش‌های انجام شده باشد، مجموع تمام نتایج (T) برابر است با:

$$T = \sum_{i=1}^n (y_i - y_0) \quad 8-5$$

در صورتی که هدف مقدار معینی نباشد بلکه ماکزیمم یا مینیمم کردن پاسخ باشد، y_0 برابر صفر خواهد بود.

۲- محاسبه ضریب تصحیح^۱

ضریب تصحیح (C.F) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$C.F = \frac{T^2}{n} \quad 9-5$$

که در آن T مجموع تمام نتایج و n تعداد کل آزمایش‌ها است.

^۱ Correction Factor

۳- محاسبه مجموع مربعات کل^۱

S_T ، مجموع مربعات کل برابر است با:

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 - C.F \quad 10-5$$

۴- محاسبه مجموع مربعات هر عامل^۲

اگر L تعداد سطوح عامل A و i تعداد آزمایش‌هایی باشد که در هر یک از سطوح انجام گرفته است مجموع مربعات A برابر است با:

$$S_A = \sum_{k=1}^L \frac{1}{n_k} \left[\sum_{i=1}^n (A_{ik} - y_0) \right]^2 - C.F. \quad 11-5$$

برای محاسبه مجموع مربعات اثر متقابل بین دو عامل A و B ($A * B$) از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$S_{B-A} - S_A - S_{AB} = S_{A*B} \quad 12-5$$

که S_{AB} برابر است با:

$$S_{AB} = \sum_{i=1}^{L_A} \sum_{j=1}^{L_B} \frac{(A_i B_j)^2}{r_{ij}} - C.F. \quad 13-5$$

که در آن L_A و L_B تعداد سطوح عامل A و B است، $A_i B_j$ مقدار پاسخ در زمانی است که عامل A در سطح i و عامل B در سطح j و r_{ij} تعداد آزمایش‌هایی است که در آنها عامل A در سطح i و عامل B در سطح j است. پس از محاسبه مجموع مربعات تمامی عوامل باید مجموع مربعات خطا را نیز محاسبه نمود. مجموع مربعات خطا از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + \dots) \quad 14-5$$

۵- محاسبه درجه آزادی

درجه آزادی از رابطه‌های ۱ تا ۶ محاسبه می‌شود. پس از محاسبه درجه آزادی تمام عوامل، باید درجه

^۱ Total Sum Squares

^۲ Factor Sum of Squares

آزادی خطا نیز محاسبه گردد. درجه آزادی خطا برابر است با:

$$f_e = f_T - (f_A + f_B + \dots) \quad 15-5$$

که f_B و f_A درجه آزادی عامل‌های مختلف است. در ضمن درجه آزادی کل برابر است با:

$$f_T = 1 - (\text{تعداد تکرار} * \text{تعداد آزمایش}) \quad 16-5$$

۶- محاسبه واریانس

واریانس هر عامل برابر با نسبت مجموع مربعات آن عامل به درجه آزادی آن است. به عنوان مثال واریانس عامل A و خطا برابر است با:

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} \quad 17-5$$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} \quad 18-5$$

در صورتیکه درجه آزادی خطا و مجموع مربعات آن صفر باشد، V_e برابر « $\frac{0}{0}$ » خواهد شد که در مجموعه اعداد حقیقی تعریف نشده است. برای حل این مشکل عاملی که دارای کمترین مربعات است را حذف کرده، مجموع مربعات و درجه آزادی آن به مجموع مربعات و درجه آزادی خطا افزوده می‌شود، به این عمل اصطلاحاً "Pooling" گفته می‌شود. "Pooling" می‌تواند برای چند عامل انجام شود. اگر M عاملی باشد که کوچک‌ترین مجموع مربعات را دارد V_e برابر است با:

$$V_e = \frac{S_e + S_M}{f_e + f_M} \quad 19-5$$

۷- محاسبه نسبت واریانس هر عامل (نسبت F)

نسبت واریانس هر عامل به واریانس خطا، نسبت واریانس آن عامل تعریف می‌گردد و با F نشان داده می‌شود.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad 20-5$$

جهت تعیین عوامل مؤثر از آزمون فیشر استفاده می‌گردد. به این منظور نسبت F بدست آمده، برای

هر عامل با نسبت فیشر در سطح اعتماد معین (معمولاً سطح اعتماد ۰.۹۵) مقایسه می‌شود. اگر نسبت F محاسبه شده از نسبت F حاصل از جدول کوچک‌تر باشد، آن عامل نامؤثر تشخیص داده می‌شود.

۱- محاسبه مجموع مربعات خالص^۱

مجموع مربعات خالص از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S'_A = S_A - (V_e * f_A) \quad 21-5$$

۲- محاسبه درصد تأثیر هر عامل

نسبت مجموع مربعات خالص به مجموع مربعات کل درصد تأثیر هر عامل تعریف می‌شود.

$$P_A = \frac{S'_A}{S_T} * 100 \quad 22-5$$

۵-۳-۷- محاسبه مقدار پاسخ در شرایط بهینه

اگر A_i, B_j, C_k و ... شرایط بهینه باشند، مقدار پاسخ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$y_{opt} = \frac{T}{n} + (\bar{A}_i - \frac{T}{n}) + (\bar{B}_j - \frac{T}{n}) + \dots \quad 23-5$$

که در آن n ، تعداد کل آزمایش‌ها، T مجموع کل نتایج و \bar{A}_i متوسط نتایج آزمایش‌هایی است که در آنها عامل A در سطح i قرار دارد.

محدوده اطمینان پاسخ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C.I = \pm \sqrt{\frac{F_{(\alpha,1,f)} * V_e}{n_e}} \quad 24-5$$

که در آن α ریسک، V_e واریانس خطا، f درجه آزادی خطا و n_e تعداد تکرارهای مؤثر می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$n_e = (\text{درجه آزادی مقدار میانگین} + \text{درجه آزادی فاکتورهای استفاده شده در تخمین}) / (\text{تعداد آزمایش‌ها}) \quad 25-5$$

در انتها آزمایش تأییدی در شرایط بهینه انجام می‌شود تا اطمینان حاصل شود که متغیر پاسخ به

^۱ Pure Sum of Squares

دست آمده از این آزمایش در دامنه اطمینان قرار گرفته است، در غیر این صورت احتمالاً یک یا چند اثر متقابل محاسبه نشده‌اند و باید آنها را در ادامه بررسی‌ها در نظر گرفت.

۴-۵- آزمایشهای جداکننده مغناطیسی

بمنظور بررسی امکان تغلیظ کانسنگ با استفاده از جداکننده های مغناطیسی آزمایشهای مغناطیسی انجام شد. با توجه به اینکه جدایش با استفاده از جداکننده مغناطیسی خشک در ابعاد بالای ۷۵ میکرون موثرتر عمل می کند، بنابراین نمونه زیر ۱۰۰ مش در این دانه بندی نرمه گیری گردید. آزمایش مغناطیسی توسط جداکننده مغناطیسی شدت بالای القایی استوانه ای در شدت جریانهای مختلف انجام و نتیجه آزمایشها بطور چشمی مورد مطالعه قرار گرفت. در بهترین حالت عیار اکسید آهن برابر ۰/۷۳ درصد و مقدار سیلیس برابر ۹۷/۶ درصد شد. با توجه به استانداردهای اشاره شده برای مصارف مختلف سیلیس تستهای مغناطیسی از بازدهی مورد انتظار برخوردار نبوده است.

۵-۵- فلوتاسیون

فلوتاسیون یک روش فیزیکی و شیمیایی است که برای پر عیار کردن ذرات خیلی ریز کانی‌ها به کار می‌رود فرآیند فلوتاسیون می‌تواند به دو روش مستقیم و معکوس انجام پذیرد در فلوتاسیون مستقیم هدف شناور کردن کانی‌های مطلوب و در فلوتاسیون معکوس هدف شناورسازی کانی غیر مطلوب و بازداشت کانی‌های مطلوب است. بر اساس مطالعات صورت گرفته در زمینه جداسازی کانیهای آهن از سیلیس، با توجه به حجم بالای سیلیس نسبت به آهن و با توجه به اینکه عنصر مزاحم در این آزمایش آهن می‌باشد انجام فلوتاسیون معکوس پیشنهاد می‌گردد که بتوان ذرات Fe_2O_3 را شناور کرده و SiO_2 را بازداشت کرد.

فرآیند فلوتاسیون شامل آماده‌سازی کانی‌ها با مواد شیمیایی است. در این آماده‌سازی سطح ذرات یک کانی فعال می‌شود که در این آزمایش هدف، فعال کردن سطح Fe_2O_3 می‌باشد، این ذرات به حباب‌های هوا در پالپ می‌چسبند و توسط آنها به سطح پالپ حمل می‌شوند. در سطح پالپ لایه ای از

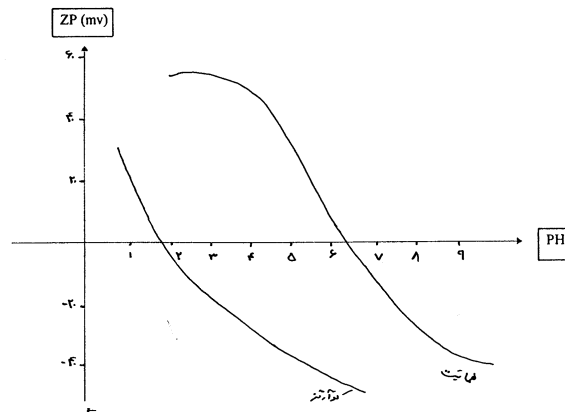
کف از ذرات Fe_2O_3 تشکیل می‌شود این لایه کف از روی سطح پالپ جمع‌آوری می‌شود در حالی که ذرات یا کانی‌های دیگر در داخل پالپ باقی می‌مانند [۱۱ و ۱۹].

۵-۵-۱- تنظیمات pH در فلوتاسیون

قابلیت فلوته شدن هر کانی اعم از اکسیده و یا سیلیکاته توسط یک کلکتور خاص بستگی به خواص الکتریکی سطح کانی، بار الکتریکی و وزن مولکولی کلکتور، حلالیت کانی مزبور و پایداری نمک فلزی کلکتور دارد. با استفاده از پدیده‌ها و خواص مذکور روشهای متعددی برای جداسازی یک کانی می‌توان در نظر گرفت. به عنوان مثال در مورد هماتیت که غالباً مستلزم جداسازی کوارتز از آن می‌باشد چهار روش مختلف که کاربرد صنعتی نیز دارد تاکنون معرفی شده است:

- ۱- فلوتاسیون هماتیت با استفاده از سولفات‌ها به عنوان کلکتور در pH ۲ تا ۶
 - ۲- فلوتاسیون هماتیت با استفاده از اسیدهای چرب به عنوان کلکتور pH ۶ تا ۸
 - ۳- فلوتاسیون کوارتز با استفاده از آمین‌ها در pH ۶ تا ۷
 - ۴- فلوتاسیون کوارتز با فعال نمودن سطح آن توسط یون کلسیم در pH ۱۱-۱۲ و سپس استفاده از اسیدهای چرب به عنوان کلکتور به همراه نشاسته جهت بازداشت هماتیت.
- در فلوتاسیون بر اساس اختلاف بار سطحی ذرات (پتانسیل زتا ZP) در pH معین انجام می‌شود. بطور خلاصه در حالت اول در pH ۲ تا ۶ بار سطحی هماتیت مثبت و بار سطحی کوارتز منفی می‌باشد و لذا فلوتاسیون هماتیت با سولفونات‌ها که از نوع کلکتورهای آنیونیک می‌باشند، میسر می‌گردد و در واقع یک مکانیزم فیزیکی رخ می‌دهد. در روش دوم اسید چرب بر روی هماتیت جذب شیمیایی گشته در حالیکه بر روی کوارتز جذب نمی‌گردد. در سومین روش آمین به عنوان یک کلکتور کاتیونیک بر روی کوارتز که شدیداً دارای بار سطحی منفی است و در شرایطی که هماتیت عملاً فاقد بار الکتریکی در سطح می‌باشد جذب می‌گردد. بررسی مکانیزم جذب کلکتورها در موارد فوق نشان می‌دهد که اکسیدها و سیلیکات‌ها تحت فرایندهای جذب فیزیکی و

جذب شیمیایی قابل فلوته شدن می باشند [۱۱ و ۱۷ و ۱۹].



شکل ۵-۱- منحنی تغییرات زتا کانیهای آهندار و کوارتز [۲].

۵-۲- طراحی آزمایشهای فلوتاسیون

با توجه به تعداد پارامترهای موثر در نظر گرفته شده برای کاهش تعداد تستها و تعیین مناسب آنها از نرم افزار طراحی آزمایش تاگوچی بهره گرفته شد.

۵-۲-۱- پارامترهای موثر در آزمایشهای فلوتاسیون

بمنظور انجام آزمایشهای فلوتاسیون ابتدا نسبت به مطالعه و تعیین پارامترهای موثر در فرایند شناورسازی کانیهای آهن اقدام شد. با توجه بررسیهای کتابخانه ای و تحقیقات گذشته، مشخص شد که از بین عوامل زیادی که بر روی فلوتاسیون آهن از سیلیس موثر است، پارامترهای ارائه شده در جدول (۵-۲) بیشتر تاثیر گذارند. همچنین محدوده های مورد نظر جهت آزمایشها مشخص گردید که در جدول آورده شده است.

جدول ۵-۲- عوامل اصلی و سطوح انتخابی برای آنها

عوامل	علامت اختصاری	سطح اول	سطح دوم	واحد
نوع کلکتور	A	Aero 801	Aero 825	-
مقدار کلکتور (gr/t)	B	۲۰۰	۴۰۰	gr/ton
pH	C	۳	۵	-
درصد جامد	D	٪۱۵	٪۲۵	%
وجود نرمه	S	با نرمه گیری	بدون نرمه گیری	-

با در نظر گرفتن ۵ پارامتر متغیر گفته شده و دو سطح تصمیم و همچنین ۷ اندرکنش بین متغیرها،

درجه آزادی کل ۱۲ می شود و جدولی که درجه آزادی آن بزرگتر یا مساوی ۱۲ باشد طرح L16 می باشد. آرایه L16 دارای ۱۶ سطر و ۱۵ ستون می باشد. در واقع این آرایه متعامد شامل ۱۶ آزمایش می باشد و برای طرحی که درجه آزادی آن کمتر از ۱۵ است مناسب است. لذا، با توجه به توضیحات داده شده شانزده آزمایش فلوتاسیون و بر اساس جدول ۵-۳ انجام شد.

شایان ذکر است که طراحی و تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار Excel انجام گرفت و البته کلیه مراحل با نرم افزارهای design expert و Qualitek-4 نیز مورد کنترل قرار گرفت.

جدول ۵-۳- آرایه L16 انتخابی تاگوچی

Run	A	B	A*B	C	A*C	B*C	D	S	A*S	B*S	C*S	۱۳	۱۴	D*S
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۴	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۵	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۶	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۷	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۸	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۹	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۰	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۱	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۴	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۶	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

بر اساس مطالعات و تجربیات قبلی از Frother 65 بعنوان کف ساز و به میزان ۳۰ گرم بر تن و از نفت سفید نیز به عنوان روغن خنثی و به مقدار ۱۰۰ گرم بر تن استفاده شد [۱]. آزمایشها بوسیله دستگاه فلوتاسیون آزمایشگاهی DENVER و با ظروف ۱ و ۲ لیتری صورت گرفت. دور روتور در تمام آزمایشها ۱۰۰۰ RPM در نظر گرفته شد.

۵-۵-۲- انجام آزمایشات و نتایج حاصل

آزمایشها طبق شرایط مطرح شده انجام گرفت. برای انجام آزمایشها ابتدا ظرف و روتور و استاتور دستگاه را تمیز کرده، نمونه را در آن ریخته و در غلظت جامد ۶۰ درصد به مدت ۵ دقیقه در حضور کلکتور آماده سازی گردید. سپس یک قطره کف ساز به پالپ اضافه شد و بمدت یک دقیقه هم زده شد. در نهایت پالپ به حجم رسانده شد بطوریکه سطح پالپ به اندازه دو سانتی متر زیر سطح سرریز باشد و پس از بازکردن شیر هوا به مدت ۵ دقیقه کف گیری شد. دو بخش کنساتره (حاوی آهن) و باطله (حاوی سیلیس) بدست آمده از آزمایش تحت فیلتراسیون و خشک کردن در کوره قرار گرفتند. بمنظور بررسی چگونگی آزمایش از بخش حاوی سیلیس نمونه ای تهیه و جهت آنالیز و تعیین درصد اکسیدهای آهن و سیلیس ارسال گردید. نتایج آنالیز آهن و سیلیس این آزمایشها در جدول ۴-۵ آمده است. با توجه به اهمیت کاهش میزان آهن در بخش حاوی سیلیس، تجزیه و تحلیل آنالیزها بر اساس نتایج عیار Fe_2O_3 انجام گردید.

جدول ۴-۵- نتایج آنالیز آهن و سیلیس

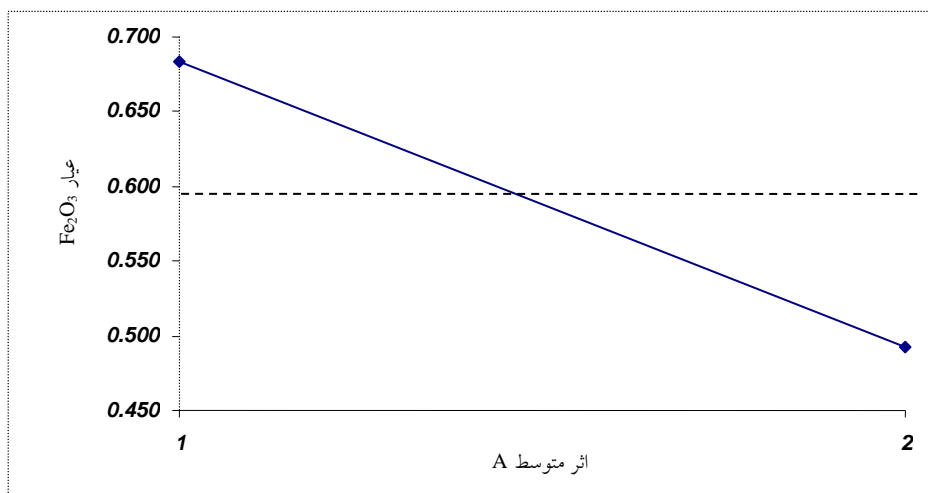
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	آزمایش
۹۷/۱۸	۰/۵۵	۱
۹۷/۴۹	۰/۶۲	۲
۹۵/۷۹	۰/۶۶	۳
۹۳/۷۵	۰/۷۶	۴
۹۵/۸۱	۰/۶۷	۵
۹۵/۷	۰/۷	۶
۹۵/۷۳	۰/۷۵	۷
۹۵/۷۸	۰/۷۶	۸
۹۵/۳۲	۰/۳۵	۹
۹۸/۰۲	۰/۴۲	۱۰
۹۷/۹۱	۰/۴۹	۱۱
۹۷/۸۴	۰/۵۴	۱۲
۹۸/۰۱	۰/۴۸	۱۳
۹۷/۸۹	۰/۵۲	۱۴
۹۷/۷۷	۰/۵۳	۱۵
۹۷/۷۳	۰/۶۱	۱۶

۵-۵-۲-۳- تجزیه و تحلیل واریانس

مقدار متوسط پاسخ سیستم در سطوح بالا و پایین عوامل طبق جدول ۵-۵ محاسبه گردید. از روی این مقادیر نمودار تاثیر عوامل مختلف بر عیار آهن مطابق شکل‌های (۵-۲) تا (۵-۱۳) رسم گردید.

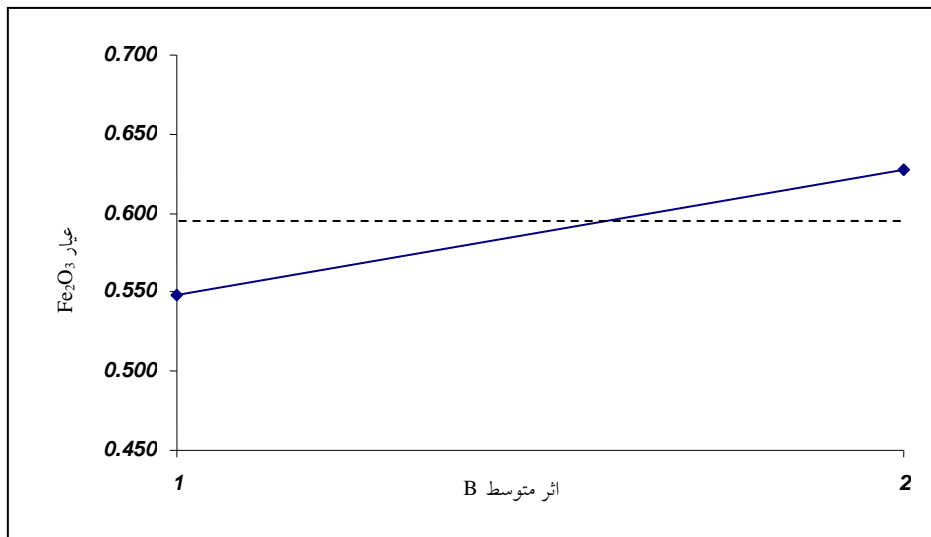
جدول ۵-۵- اختلاف مقدار متوسط عیار Fe_2O_3 در سطوح ۱ و ۲

L_2-L_1	سطح ۲ (L_2)	سطح ۱ (L_1)	عوامل	ردیف
۰/۱۹	۰/۴۹	۰/۶۸	A	۱
-۰/۰۸	۰/۶۳	۰/۵۵	B	۲
۰/۰۱	۰/۵۸	۰/۵۹	A*B	۳
-۰/۱	۰/۶۴	۰/۵۴	C	۴
۰	۰/۵۹	۰/۵۹	A*C	۵
-۰/۰۳	۰/۶	۰/۵۷	B*C	۶
۰	۰/۵۹	۰/۵۹	D	۷
-۰/۰۵	۰/۶۱	۰/۵۶	S	۸
۰	۰/۵۹	۰/۵۹	A*S	۹
-۰/۰۱	۰/۵۹	۰/۵۸	B*S	۱۰
۰	۰/۵۹	۰/۵۹	C*S	۱۱
۰/۰۱	۰/۵۸	۰/۵۹	D*S	۱۲

شکل ۵-۲- اثر عامل A (نوع کلکتور) بر عیار Fe_2O_3

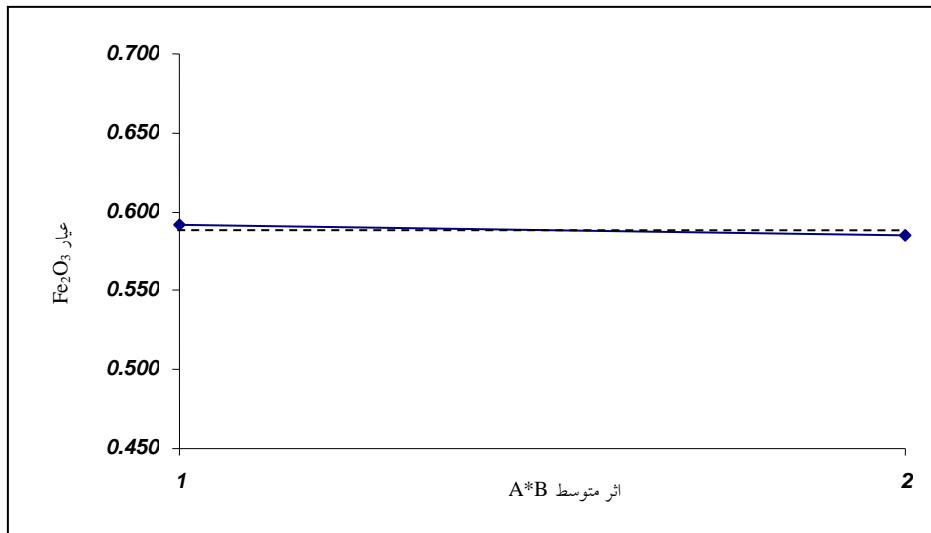
همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌گردد، عیار اکسید آهن در سطح ۱ پارامتر A یعنی بهنگام

استفاده از کلکتور Aero801 از بیشترین مقدار خود برخوردار است و در سطح ۲ به کمترین میزان خود می‌رسد. همچنین نمودار دارای شیب نزولی بالایی می‌باشد که نمایانگر تاثیر قابل توجه تغییر نوع کلکتور می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که حالت بهینه در مورد پارامتر A سطح ۲ (کلکتور Aero825) بوده و این عامل تاثیر قابل توجهی در فرایند دارد.



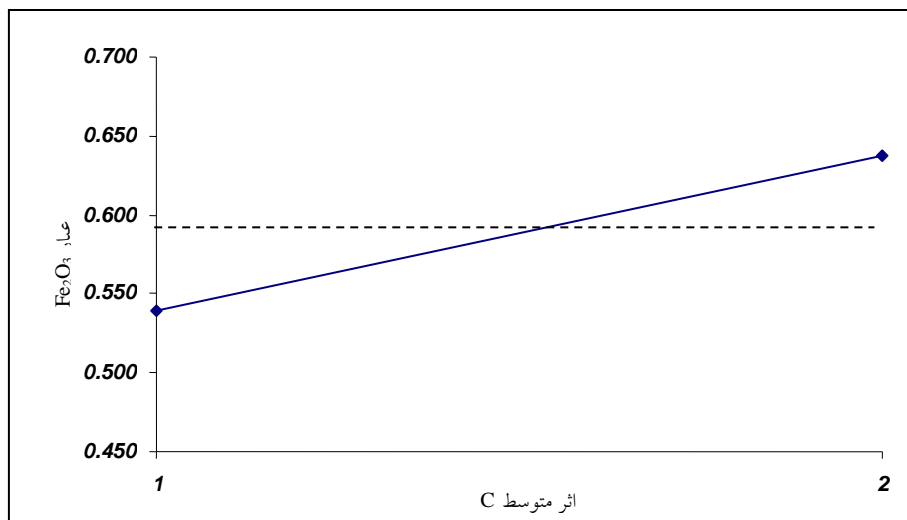
شکل ۵-۳- اثر عامل B (مقدار کلکتور) بر عیار Fe₂O₃

شکل ۵-۳ بیانگر تاثیر سطوح پارامتر B یعنی مقدار کلکتور بر عیار آهن می‌باشد. عیار آهن در این نمودار در سطح ۱ و بهنگام مصرف ۲۰۰ گرم بر تن کلکتور، کمترین میزان خود را دارد و در سطح ۲ (۴۰۰ گرم بر تن) از مقدار ماکزیمم برخوردار است. شیب نمودار نشان می‌دهد که پارامتر B و تغییرات سطوح آن که در حقیقت همان مقدار مصرف کلکتور است، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در فلوتاسیون دارد. با توجه به آزمون معنی‌داری F محاسباتی عامل بزرگتر از F جدول استاندارد است و بنابراین تاثیر عامل معنی‌دار می‌باشد. یعنی تغییرات مشاهده شده در شکل در اثر تاثیر عامل بوده و نه خطای آنالیز.



شکل ۴-۵- اثر عامل A*B بر عیار Fe₂O₃

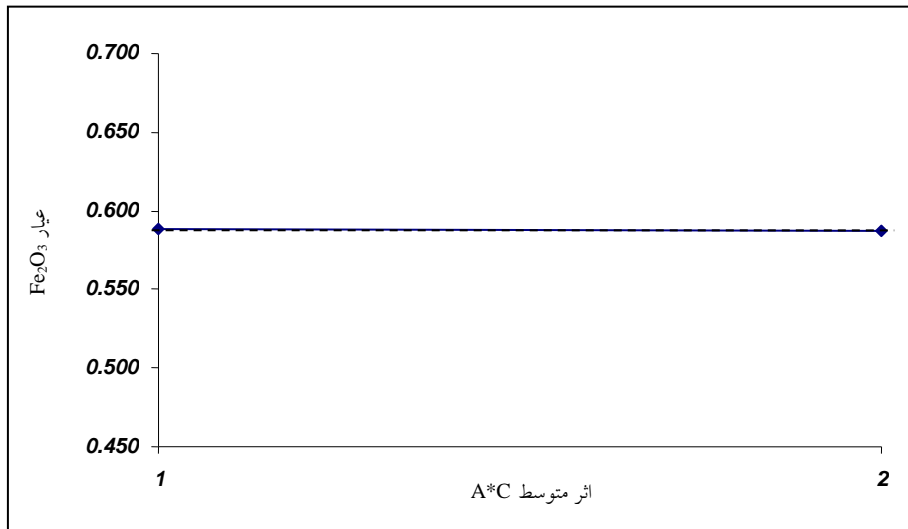
مشاهده شکل ۴-۵ این مطلب را عیان می سازد که تاثیر متقابل نوع کلکتور و میزان آن بر روی عیار آهن بسیار ناچیز بوده و در عمل تغییر سطح عوامل هیچ تاثیری بر روند فرایند نخواهد داشت. مفهوم اثر متقابل اینست که تغییرات سطح یک عامل بر نحوه عملکرد عامل دیگر تاثیر گذار نیست.



شکل ۵-۵- اثر عامل C بر عیار Fe₂O₃

اثر عامل C یعنی pH بر روی عیار آهن در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. با تغییر سطح pH از ۱ به ۲ (از ۳ به ۵) نمودار از شیبی صعودی برخوردار است که نشان از تاثیر قابل ملاحظه این عامل بر روی آزمایش دارد. همچنین میزان اکسید آهن در pH ۵ بیشترین مقدار خود را دارد و می توان نتیجه

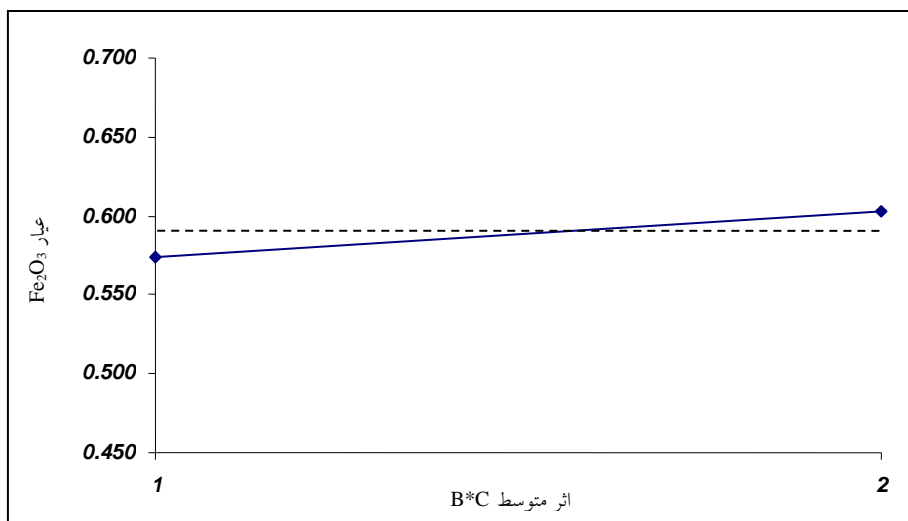
گرفت که در نظر گرفتن پارامتر C در سطح اول شرایط بهتری را در بر خواهد داشت.



شکل ۵-۶- اثر عامل A*C بر عیار Fe₂O₃

شکل فوق اثر متقابل نوع کلکتور و pH (A و C) بر عیار آهن را به تصویر کشیده است. بر اساس این

شکل عملاً تغییر سطوح هیچ اثری بر کاهش یا افزایش عیار آهن ندارد.



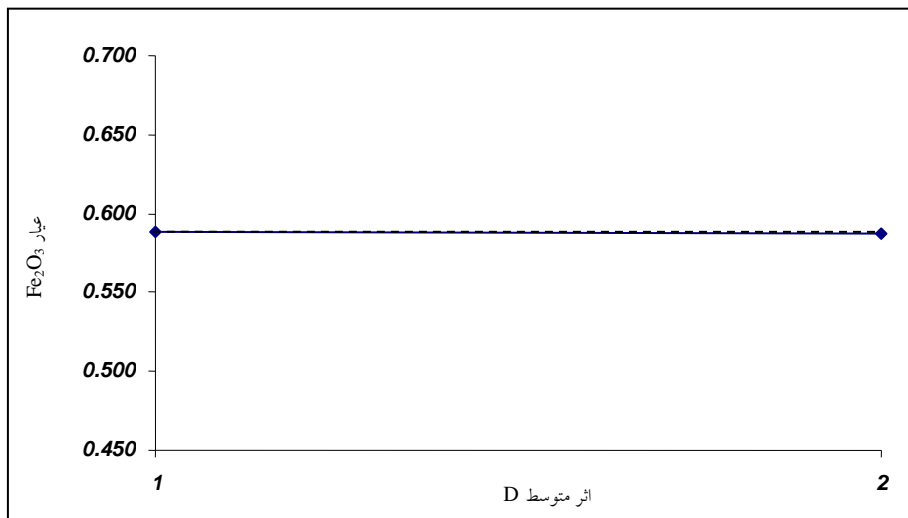
شکل ۵-۷- اثر عامل B*C بر عیار Fe₂O₃

با مشاهده شکل ۵-۷ که بیانگر اثر متقابل میزان کلکتور و pH (B و C) بر روی عیار آهن است، می

توان دریافت که این دو عامل متقابلاً در سطح ۲ موجب حضور بیشترین میزان آهن می‌باشند.

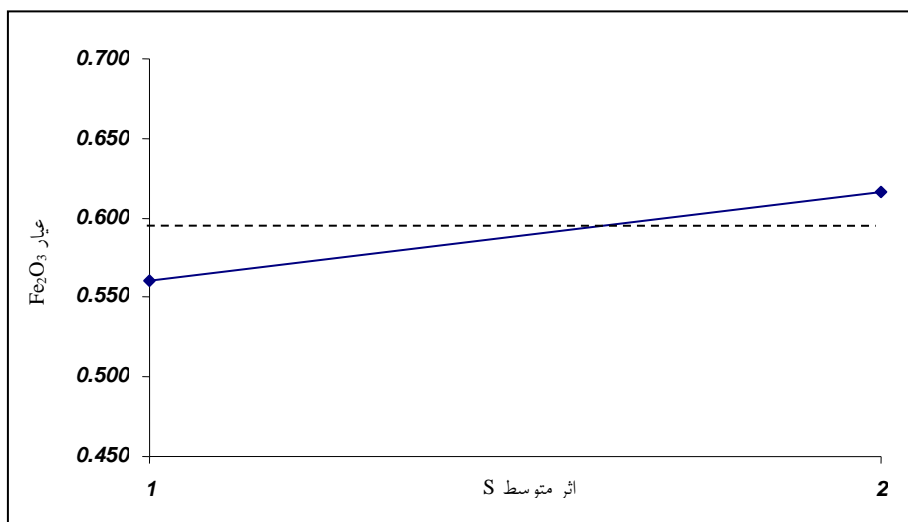
همچنین بررسی نمودار اندرکنش دو عامل مقدار کلکتور و pH نشان می‌دهد که در pH پایین تاثیر

افزایش کلکتور بیشتر از تاثیر آن در pH بالاست.



شکل ۵-۸- اثر عامل D بر عیار Fe_2O_3

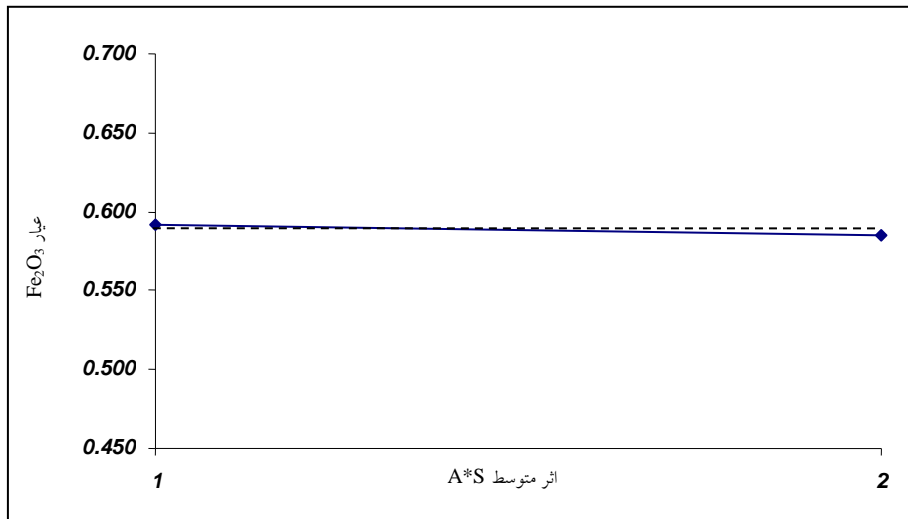
اثر عامل D یعنی درصد جامد بر تغییر عیار آهن در شکل ۵-۸ نمایش داده شده است. تغییرات این پارامتر نیز عملاً در تغییر عیار آهن تاثیری ندارد.



شکل ۵-۹- اثر عامل S بر عیار Fe_2O_3

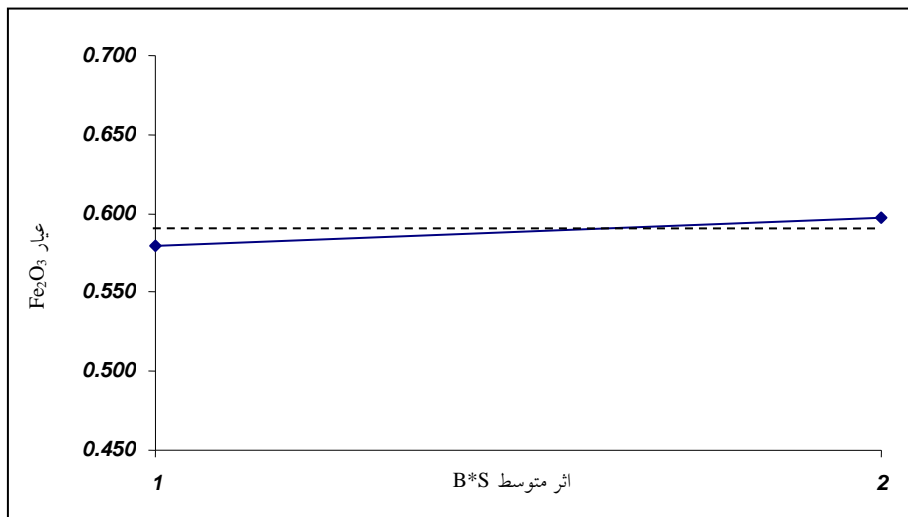
عامل S یکی از عواملی است که تاثیر آن بر روی عیار آهن زیاد می باشد، بطوریکه میزان آهن در سطح ۱ کمترین مقدار و در سطح ۲ به میزان ماکزیمم می رسد. این بدان معنی است که وقتی آزمایش بر روی نمونه نرمه گیری شده انجام می گیرد، میزان آهن به حداقل و بهنگام آزمایش با نمونه حاوی نرمه مقدار اکسید آهن به میزان ماکزیمم می رسد. با توجه به اینکه هدف از آزمایشها

کاهش میزان آهن بوده است، این امر برای عامل S و در سطح ۱ محقق شده است.



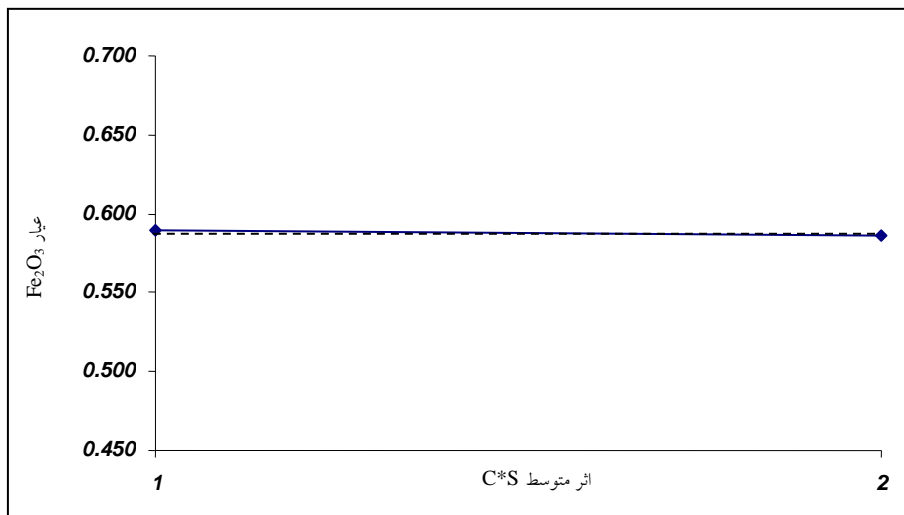
شکل ۵-۱۰- اثر عامل A*S بر عیار Fe₂O₃

در شکل ۵-۱۰ مشخص شده است که تاثیر متقابل دو عامل A و S بر عیار آهن نیز بسیار ناچیز است.



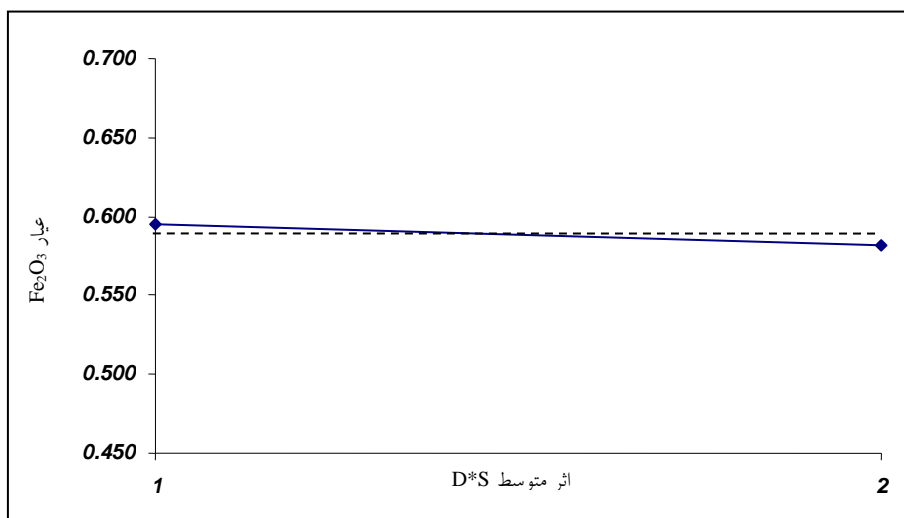
شکل ۵-۱۱- اثر عامل B*S بر عیار Fe₂O₃

در شکل فوق اثر متقابل دو عامل مقدار کلکتور و وجود یا عدم حضور نرمه (S و B) در نظر گرفته شده است. علیرغم اینکه تاثیر متقابل این دو عامل بر عیار آهن زیاد نمی باشد، ولی عیار آهن در سطح ۱ (میزان کلکتور ۲۰۰ گرم بر تن و با نرمه گیری) کمتر بوده و در نتیجه از شرایط بهتری برخوردار است.



شکل ۵-۱۲- اثر عامل C*S بر عیار Fe₂O₃

با توجه در شکل (۵-۱۲) می توان اثرات متقابل بین C و S (pH وجود نرمه) را بر عیار آهن بررسی نمود. با توجه به این نمودار شرایط در هر دو سطح ۱ و ۲ از تغییر چندانی برخوردار نمی باشد.



شکل ۵-۱۳- اثر عامل D*S بر عیار Fe₂O₃

اثر متقابل دو عامل D و S نیز در شکل بالا نمایش داده شده است. شیب بسیار کم نمودار دلالت بر ناچیز بودن تاثیرات متقابل این دو عامل دارد و البته عیار آهن در سطح دو از مقدار کمتر و در نتیجه شرایط بهتری برخوردار است.

۵-۲-۴- تشکیل جدول ANOVA و انجام آزمون معنی داری

جدول ANOVA مطابق جدول ۵-۶ تشکیل شد. بر اساس این جدول عوامل نوع کلکتور، pH، میزان

کلکتور و اثر متقابل حضور نرمه و مقدار کلکتور به ترتیب بیشترین تاثیر را بر عیار Fe_2O_3 داشتند. بقیه عوامل یا تاثیری نداشتند و یا از اثر بسیار ناچیزی برخوردار بوده اند. بنابراین می توان از تاثیر آنها در نتایج صرفنظر نموده و مقدار آنها را pool کرد.

جدول ۵-۶- آنالیز واریانس و درصد تاثیر عوامل بر عیار Fe_2O_3

درصد تأثیر	F	S'	V	S	f	عوامل
۶۳/۸۲	۰/۱۴۶	۰/۱۴۶	۰/۱۴۶	۱	A
۱۰/۸۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۱	B
۰/۰۶۸	۱	A*B
۱۷/۰۲	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۱	C
۰/۰۰۳	۱	A*C
۱/۴۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۱	B*C
۰/۰۰۳	۱	D
۵/۵۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۱	S
۰/۰۲۵	۱	A*S
۰/۴۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	B*S
۰/۰۲۵	۱	C*S
۰/۳۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	D*S
.....	۳	خطا
۱۰۰	۰/۰۱۵	۰/۲۲۹	۱۵	جمع

جدول ۵-۷- آنالیز واریانس و درصد تاثیر عوامل بر عیار Fe_2O_3 بعد از pooling

درصد تأثیر	F	S'	V	S	f	عوامل
۶۳/۷۵	۴۶۲/۶۳	۰/۱۴۶	۰/۱۴۶	۰/۱۴۶	۱	A
۱۰/۶۹	۷۸/۴۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۱	B
	POOLED				(۱)	A*B
۱۶/۹۰	۱۲۳/۲۴	۰/۰۳۸	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۱	C
	POOLED				(۱)	A*C
۱/۳۱	۱۰/۴۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۱	B*C
	POOLED				(۱)	D
۵/۳۹	۴۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۱	S
	POOLED				(۱)	A*S
	POOLED				(۱)	B*S
	POOLED				(۱)	C*S
	POOLED				(۱)	D*S
۱/۹۷	.....	.....	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳	۱۰	خطا
۱۰۰	.....	.....	۰/۰۱۵	۰/۲۳	۱۵	جمع

پس از pooling عوامل کم اثر، مقدار خطا ۱/۹۷ شد. مقدار F محاسبه شده برای تمامی عوامل جدول بالاتر از مقدار $F_{0.01}(1,10)=10/04$ در دامنه اطمینان ۹۹٪ می باشد. بنابراین در سطح اطمینان ۹۹٪، عوامل A، B، C و B*C و S معنادار هستند.

شرایط بهینه آزمایشها مرحله غربال فلوتاسیون مستقیم در جدول ۵-۸ آمده است.

جدول ۵-۸ - سطوح بهینه عوامل و مقدار هر یک

عوامل	سطح	مقدار
نوع کلکتور	۲	Aero 825
مقدار کلکتور (gr/t)	۱	200
pH	۱	3
درصد جامد	۲	25%
وجود نرمه	۱	با نرمه گیری

مقدار عیار بهینه را می توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود. حداقل عیار Fe_2O_3 در شرایط بهینه به صورت زیر به دست می آید:

$$y_{opt} = \frac{T}{n} + (\bar{A}_i - \frac{T}{n}) + (\bar{B}_j - \frac{T}{n}) + \dots$$

$$y_{opt} = 0/36$$

پس از تخمین مقدار بهینه، آزمایش تأییدی با استفاده از شرایط بهینه به دست آمده انجام شد. نتیجه آزمایش بهینه عبارت است از:

$$\text{عیار } Fe_2O_3: 0/35$$

محدوده اطمینان پاسخ از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C.I. = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha(1,f)} * V_e}{n_e}} = \pm \sqrt{\frac{3.5 * 0.0003}{3.2}}$$

$$C.I. = \pm 0.02$$

در نهایت با تکرار آزمایش در شرایط بهینه نتایج تأیید می گردد.