

## فصل اول: ویژگیهای عمومی

### ۱-۱- مقدمه

فروسیلیسیم یکی از آمیزان های مورد مصرف در صنایع مختلف بخصوص صنایع متالورژی است و از این نظر اهمیت نسبتاً بالایی یافته است. چگونگی کاربرد این ماده در صنعت تا حدود زیادی به نسبت آهن و سیلیسیم موجود در آن و همچنین ناخالصیهای متعارف بستگی دارد. فروسیلیسیم در صنایع متالورژی به عنوان عنصر آلیاژی، جوانه زا و اکسیژن زدا و سیلیسیم تقریباً خالص در صنایع الکترونیکی به عنوان نیمه هادی و یکسو کننده به کار می رود. علاوه بر آن مشتقات ترکیبی آن رد ساخت رزین های سیلیسیم، لعاب ها، لاستیک و.. مصرف می شود.

دستیابی به تکنولوژی تولید فروسیلیسیم بدون شناسائی خواص هر یک از عناصر آهن و یا سیلیسیم و یا محصول ترکیبی آن ها میسر نخواهد بود و از این نظر در این فصل مسائل عمده کاربر فروسیلیسیم با توجه به خواص و ویژگی های آن مورد بحث قرار می گیرد.

### ۱-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی سیلیسیم:

سیلیسیم عنصری است در تناوب چهارم جدول عناصر شیمیایی که در مدار آخر خود ۴ الکترون دارد و به همین دلیل و بر خلاف کربن در تمام ترکیبات شیمیایی با ظرفیت ۴ ظاهر می شود مانند:  $Si_3N_4$ ,  $SiC$ ,  $Mg_2Si$ ,  $SiO_2$ ، حضور سیلیسیم در ترکیبات با

ظرفیت ۲ نیز ثابت شده است ، ولی این ترکیبات ناپایدار بوده و به سرعت به ترکیبات

با ظرفیت ۴ تبدیل می شوند و فقط بر حسب شرایط ترکیبی نقش واسطه را دارند.

گرمای تشکیل یک مول سیلیس ( $SiO_2$ ) بر حسب شرایط تشکیل کوارتز ( $\alpha$ ) یا

کربوسیتوبالیت ( $\beta$ ) متفاوت و به صورت زیر است :

$$\langle Si \rangle + (O_2) = \langle SiO_2 \rangle_{\alpha} - 208300 \text{ cal/mol}$$

$$\langle Si \rangle + (O_2) = \langle SiO_2 \rangle_{\beta} - 205600 \text{ cal/mol}$$

در حالی که گرمای تشکیل منواکسید سیلیسیم و سیلیس به صورت زیر گزارش شده

است :

$$2 \langle Si \rangle + (O_2) = 2 \langle SiO \rangle - 550000 \text{ cal/mol}$$

گاز  $SiO$  در کمتر از  $1500^{\circ}C$  تجزیه شده و به سیلیسیم و سیلیس تبدیل می شود .

$$2(sio) = [si] + \langle sio_2 \rangle$$

نقطه ذوب سیلیسیم  $1414 \pm 20$  درجه سانتیگراد است که با توجه به میل ترکیبی شدید

آن با اکسیژن و سایر مواد اکسید کننده ، در طبیعت به صورت آزاد یافت نمی شود .

ترکیب عمده آن ، شکل های مختلف سیلیس است که به صورت تقریباً خالص و یا

درجه خلوط بیش از ۹۸ درصد و همچنین به صورت اسپینل ( اکسید مضاعف با

آلومینیوم ) یا سیلیکات ها به نسبت های مختلف در طبیعت وجود دارد سیلیسیم بعد

از اکسیژن مهمترین ماده تشکیل دهنده پوسته زمین بوده و مقدار آن ۲۸ درصد برآورد

شده است ، درحالی که مقدار اکسیژن در پوسته زمین برابر ۴۹ درصد ، آلومینیوم ۷/۲ درصد و آهن ۵/۶ درصد تخمین زده شده است .

سیلیسیم در سه شکل ( پلی مرفی ) وجود دارد که عبارتند از :

الف - سیلیسیم بی شکل ، به صورت گرد قهوه ای رنگ با چگالی  $2/33 - 2/35 g/cm^3$  است این ماده به سرعت اکسید شده و در مجاورت هوا به سیلیس تبدیل می شود احیاء پودر سیلیس توسط پودر منیزیم در دمای حدود  $1000^{\circ}C$  تا  $1200$  عموماً منجر به تشکیل سیلیسیم بی شکل یا سیلیسیم قهوه ای می گردد .

ب- سیلیسیم گرافیتی (متورق) ، سیلیسیمی است که از احیاء سیلیس توسط کربن در دمای بالاتر از  $1400$  درجه سانتیگراد تشکیل می شود علاوه بر آن از حرارت دادن سیلیسیم قهوه ای در محیط بسته عاری از اکسیژن ( نیز این ماده تولید می شود عموماً به صورت لایه ای و پولک سیاه و براق است و مقاومت بیشتری در مقابل هوا و محلول های اسیدی نشان می دهد چگالی آن حدود  $2/4 g/cm^3$  است و در اکثر مواردی که اضافه کردن سیلیسیم خالص به مذاب ضرورت می یابد از این نوع سیلیسیم استفاده نمی شود .

پ- سیلیسیم «متبلور» یا سیلیسیم تکه ای ، که عنوان سیلیسیم فلزی نیز شناخته شده است ، عموماً از افزایش دما در کوره احیاء سیلیس و یا حرارت دادن سیلیسیم گرافیتی در محیط بسته ، تولید می شود در اکثر موارد و در کاربردهای سیلیسیم خالص در

صنایع الکترونیکی، این نوع سیلیسیم مورد استفاده رار می گیرد و چگالی آن  
 $2/6 - 2/9 \text{ g/cm}^3$  گزارش شده است.

سیلیسیم تکه ای و سیلیسیم گرافیتی به دلایل تشابه در چگونگی تولید در اغلب موارد کنار هم وجود دارند که نوع گرافیتی آن به دلیل قابلیت انحلال بهتر در مواد مذاب، در صنایع متالورژیکی کاربرد بیشتری دارد، ولی از نوع سیلیسیم تکه ای نیز می توان در مقاصد متالورژیکی استفاده نمود و اختلاف عمده، کندتر بودن سرعت واکنش آن، نسبت به نوع قبلی است

سیلیسیم متبلور در ساختار مکعبی الماس و با ثابت شبکه  $a = 5/4282^\circ A$  گزارش شده است.

### ۳-۱- سیلیسیم و صنعت

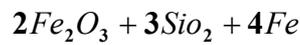
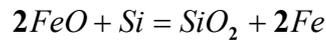
سیلیسیم به طور خالص و یا به صورت ترکیبی در صنعت کاربردهای مختلفی یافته است که اهم آن به شرح زیر طبقه بندی می شود:

#### ۱-۳-۱- صنایع متالورژی

الف - اکسیژن زدا: سیلیسیم نسبت به بسیاری از فلزات اصلی در صنایع، متالورژی (آهن، مس، نیکل، کرم و ...) قابلیت اکسایش بیشتری دارد (شکل ۱-۱-۱- جدول ریچاردسون) و از این رو برای بسیاری از آلیاژهای صنعتی به عنوان اکسیژن زدا به

کار می رود که از آن جمله می توان به کاربرد این عنصر در صنایع فولاد سازی و

ریخته گری فولاد اشاره نمود .



سیلیسیم به عنوان اکسیژن زدا، در فولادها، عموماً به صورت خالص به کار نمی رود

و اغلب ترکیبات آمیزانی ف روسیلیسیم، فروسیلیکو منگنز، فروسیلیکو آلومینیوم و یا

سیلیکو کلسیم مورد استفاده قرار می گیرد .

مهمترین عامل در انتخاب سیلیسیم (همراه و یا بدون آلومینیوم) به عنوان اکسیژن زدا

در فولادها آن است که :

۱- چگالی سیلیس، حدود ۲ تا ۲/۴ بوده و از این رو با توجه به رابطه استوک

$$V = 2g.r^2(\rho_1 - \rho_2)/g\eta$$

به سرعت در سطح مذاب جمع می شود که در آن :

$V$ : سرعت شناوری

$r$ : اندازه ذره یا سیلیس تشکیل شده

$\rho_1$ : چگالی مذاب

$\rho_2$ : چگالی سیلیس

$\eta$ : ویسکوزیته مذاب

است .

۲- پسماند سیلیسیم در مقادیر کمتر از ۰/۱ درصد در فولاد و چدن اثرات مضر

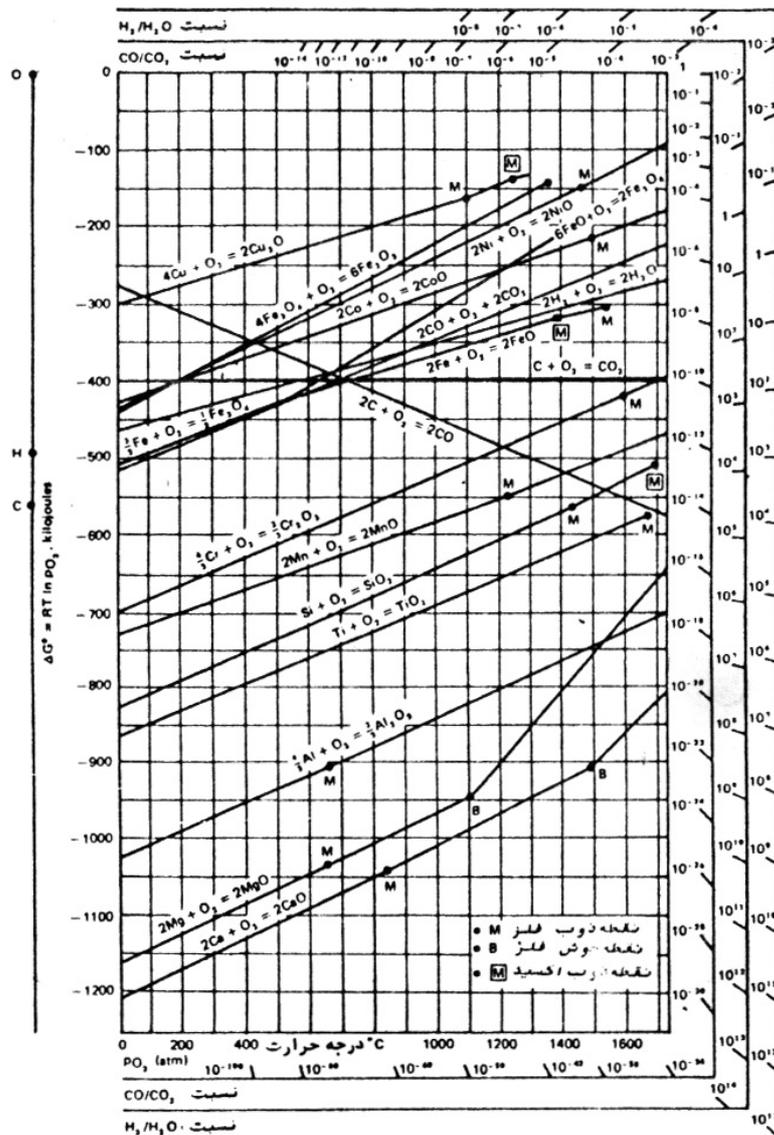
بحرانی ندارد، در حالی که مقدار آلومینیوم در فولادها باید در حدود ۰/۰۱

درصد کنترل شود

۳- سیلیسیم حاصل در دمای ذوب فولاد، می تواند با جذب اکسیدهای دیگر نظیر

آهن، کلسیم و... ترکیبات سیلیکاته تشکیل داده و حالت شلاکه ای آن، باعث

حذف بهرت آن اکسیدها شود.



شکل ۱-۱ دیاگرام ریچارد سیون

در مورد تأثیر اکسیژن زدایی سیلیسیم در فولاد و مقایسه آن با سایر مواد اکسیژن زدا می توان نکات زیر را مورد توجه قرار داد .

حد اکسیژن زدایی سیلیسیم بسیار کمتر از آلومینیوم و چندین برابر منگنز است ، در این مورد آزمایش *Brinel* برای تعیین درجه اکسیژن زدایی بر اساس پسماند عناصر به کار می رود .

$$T = \%Mn + (5.2)\%Si + (90)\%Al$$

در همین حال بر اساس آزمایشات *Swidem*؛ تأثیر پسماند سیلیسیم در اکسیژن زدایی فولاد و حذف تخلخل های ناشی از گاز *Co* به صورت زیر گزارش شده است .

> ۰/۲	۰/۲-۰/۱۸	۰/۱۸-۰/۱۵	۰/۱۵-۰/۱۲	درصد سیلیسیم
۰	۱۳/۸	۵۷/۸	۱۰۰	درصد قطعات

در این آزمایش میزان کربن ۰/۵۵ و مقدار منگنز ۰/۷ درصد بوده است

با توجه به توضیحات فوق مشخص می گردد که کاربرد سیلیسیم به صورت ترکیبات فروسیلیسیم و فروسیلیکو آلومینیوم و مشابه آن ها یکی از مهمترین موارد استفاده در صنعت متالورژی محسوب می شود مقدار سیلیسیم مصرفی برای این مقصود معمولاً بیش از ۰/۳ درصد بوده و چنانچه با توجه به فروسیلیسیم ۷۵ درصد محاسبه شود (حدود متوسط ۰/۴ درصد فروسیلیسیم) به ازاء هر تن فولاد تهیه شده مقدار فروسیلیسیم مصرفی حدود ۴ تا ۵ کیلوگرم است.

علاوه بر آن سیلیسیم به عنوان اکسیژن زدا در ریخته گری فولاد در مقادیر بیشتری مصرف می شود (حد بحرانی حضور سیلیسیم در فولاد ریختگی بالاتر است و علاوه بر آن هیچ گونه مک و حفره گازی نباید وجود داشته باشد) در این حالت میزان مصرف سیلیسیم بین ۰/۳ تا ۰/۶ درصد گزارش شده است.

ب - جوانه زا: سیلیسیم عنصری است به شدت گرافیت زا، به طوری که تشکیل گرافیت ها در انواع چدن ها به حضور سیلیسیم به عنوان عنصر آلیاژی و گرافیت های ظرفیت، به تلقیح سیلیسیم (به صورت فروسیلیسیم در مراحل انتهایی ذوب و قبل از بار ریزی بستگی دارد).

قابلیت جوانه زایی سیلیسیم به مقدار سیلیسیم موجود در ترکیب و یا آمیزان بستگی دارد. از طرف دیگر چنانچه از سیلیسیم خالص به این منظور استفاده شود امکان عدم انحلال کامل آن وجود دارد و به همین منظور در اکثر موارد از آمیزان های آهن و سیلیسیم با نسبت های ترکیبی ۷۰ تا ۹۰ درصد سیلیسیم استفاده به عمل می آید. میزان مصرف سیلیسیم به عنوان عنصر جوانه زا در تمام چدن های گرافیتی در حدود ۰/۶ تا ۱ درصد گزارش شده است که اگر این نسبت با فروسیلیسیم ۷۵ درصد سنجیده شود حدود ۱ تا ۱/۵ درصد و به عبارت دیگر مقدار مواد جوانه زا حدود ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم فروسیلیسیم برای تولید هر تن چدن گرافیتی است

علاوه بر آن سیلیسیم به عنوان جوانه زا به صورت سیلیسیم - کلسید  $sica_2$  نیز به کار می رود که حضور کلسیم در آن عملی برای برای گوگرد زدایی و تشدید اکسیژن زدای نیز محسوب می شود .

تلقیح منیزیم برای کروی کردن گرافیت نیز در اغلب موارد توسط آمیزان هایی از آهن - سیلیسیم - منیزیم انجام میگیرد تا عملیات جوانه زایی و اصلاح گرافیت همزمان انجام گیرد

عنصر آلیاژی : سیلیسیم یکی از عناصر آلیاژی در خانواده آلیاژهای آهنی و غیر آهنی است مهمترین آلیاژهای صنعتی حاوی سیلیسیم عبارتند از :

۱- چدن ها ، سیلیسیم یکی از عناصر اصلی و در حقیقت دومین عنصر آلیاژی تمام چدن های معمولی است میزان سیلیسیم در این چدن ها معمولاً ۱ تا ۲/۷ درصد است چدن خام به دلیل واکنش های احیایی توسط کربن ، حاوی مقادیر لازم از سیلیسیم است ولی اکسایش سیلیسیم در عملیات ذوب این شمش ها ، افزایش مقادیر ۱ تا ۱/۵ درصد سیلیسیم را به صورت های آمیزان فروسیلیسیم ایجاب می کند . از طرف دیگر با توجه به تولید چدن از طریق قراضه آهن در کوره های القایی و یا استفاده از درصدی از قراضه در سایر روش ها ، تأمین کمبود سیلیسیم لازم معمولاً به میزان ۲/۵ تا ۳/۵ درصد انجام می گیرد . افزایش این سیلیسیم معمولاً به صورت فروسیلیسیم با نسبت های ترکیبی مختلف صورت می پذیرد چدن های نقره ای

محتوی بی شاز ۱۰ تا ۲۲ درصد سیلیسیم که عموماً ضد اسید هستند ، از طریق ذوب در کوره بلند ویا ذوب در کوره های الکتریکی با افزودن سیلیسیم متبلور تولید می شوند .

۲- فولادها ، معمولاً حاوی کمتر از ۰/۳ درصد سیلیسیم هستند که از پسماند عملیات اکسیژن زدایی حاصل می شوند ولی فولادهای سیلیسیم دار محتوی ۳ تا ۵ درصد سیلیسیم نیز وجوددارند و عموماً تحت عنوان فولادهای ترانسفورماتور به کار می روند افزایش سیلیسیم در این فولادها نیز از طریق تلقیح آمیزان های فرو سیلیسیم انجام می گیرد .

۳- برنرها و برنج ها ؛ آلیاژهای مس - قلع و مس - روی با افزایش سیلیسیم در مقادیر ۰/۲ تا حداکثر ۳ درصد در شرایط ویژه کاربردی نظیر استحکام بالا ، مقاومت به خوردگی ، مقاومت در برابر اسید در یاتاقان ها و.... به کار می روند سیلیسیم در اکثر آلیاژهای مس ، به عنوان عنصر مضر شناخته می شود ولی در برنج ها و برنرهای مخصوص به صورت سیلیسیم متبلور به مذاب افزوده می شود .

آمیزان های مس - سیلیسیم به دلیل کمبود مصرف هنوز تولید نشده است و از ترکیبات آهن - سیلیسیم نیز ، جزء در مواردی که آهن یکی از عناصر آلیاژی محسوب شود نمی توان استفاده کرد کیلیسیم سیلیسید نیز در آلیاژهای مس ، با توجه

به قابلیت اکسیژن زدایی کلیسمی ، می تواند به کر رود ولی این امر در مواردی امکان پذیر است که مقدار سیلیسیم مورد نیاز کمتر از ۰/۵ درصد باشد .

۴- آلومینیوم ها ، اکثر آلیاژهای آلومینیوم حاوی مقادیر ۰/۱ تا ۰/۵ درصد سیلیسیم به عنوان ناخالصی هستند که تحت شرایط تولید و از طریق مواد اولیه به مذاب وارد می شود . ولی سیلیسیم به عنوان عنصر آلیاژی در آلیاژهای ریختگی ونوردی ۳۰۰,۴۰۰,۴۰۰,۶۰۰۰ به عنوان عنصر دوم و در سایر خانواده های آلیاژی به عنوان عناصر سوم وچهارم به کار می رود مقدار سیلیسیم در آلیاژهای مختلف آلومینیوم از ۱ تا بیش از ۱۳ درصد است و علاوه بر آلیاژهای جدیدی با حدود ۱۶ تا ۲۰ درصد سیلیسیم نیز در ساخت پیستون ها به کار می رود . افزودن سیلیسیم به آلیاژها یا آلومینیوم از طریق استفاده از سیلیسیم متبلور و همچنین انواع آمیزان ها نظیر آلیاژهای آلومینیوم - سیلیسیم ، انجام می گیرد به طور کلی میانگین مصرف سیلیسیم در آلیاژهای ریختگی آلومینیوم را بر حسب میزان مصرف ، می توان تا ۱۰ درصد پیش بینی کرد . در حالی که برای آلیاژهای نوردی این مقدار به کمتر از ۴ درصد کاهش می یابد سیلیسیم در این آلیاژها ، موجب افزایش استحکام و بهبود شرایط ریختگی می شود علاوه بر موارد فوق سیلیسیم در آلیاژهای منیزیم و ... نیز کاربرد دارد که به عنوان مصرف سیلیسیم و ترکیبات آن نمی توانند مورد توجه قرار گیرد .

ت- سایر مصارف متالورژیکی ، سیلیس ، به صورت ماسه و آجر نسوز یکی از مهمترین مواد اولیه صنایع متالورژی است که عملاً ماده اولیه آن به صورت طبیعی یافت می شود. کاربرد سیلیسیم ماده است که با عملیات تخلیص در ساخت الکترودهای نسوز و بوته ها و همچنین به عنوان سنگ سایا در صنایع متالورژیکی کاربرد دارد .

### ۲-۳-۱- صنایع الکترونیکی

به آن گونه که قبلاً توضیح داده شد سیلیسیم یک نیمه هادی و یکسو کننده قوی است مقاومت الکتریکی آن به  $3 \times 10^5$  اهم سانتی متر می رسد سیلیسیم که در صنایع الکترونیکی به کار می رود عموماً با درجه خلوص بیش از ۹۹/۹ درصد بوده و به صورت تکه ای ، نوار و... تولید می شود علاوه بر آن از کاربرد سیلیسیم متبلور نیز در ساخت نیمه هادیها در درجه حرارت های بیش از  $350^\circ C$  استفاده به عمل آید

### ۳-۳-۱- سایر صنایع

رزین های سیلیسیم ، موادی غیر آلی هستند که با آرایش مولکولی پلاستیکی با هیدروژن ساخته می شوند و به عنوان پلاستیک های غیر آلی نیز شناخته می شوند و سیلان فرمول  $SiH_4$  مشابه به مان ( $CH_4$ ) به صورت گاز است. فرمول عمومی رزین های کلریدی را می توان به صورت  $(CH_3)_x(SiCl)_{4-x}$  نشان داده و از نظر شرایط تولید بر اساس واکنش های شیمیایی در مقیاس صنعتی تولید می شوند .  
سیمان سیلیسی لعاب های سیلیسی ، انواع پلیمرهای سیلیسیم و لاستیک و... مشتقات دیگر ترکیبات سیلیسیم هستند که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند .

## فصل دوم: مواد اولیه

### ۱-۲- مقدمه

تولید فروسیلیسیم به روش های گوناگونی انجام می پذیرد که در هر فرآیند مواد اولیه متفاوتی کاربرد خواهند داشت متداو لترین روشی که در جهان امورد استفاده قرار گرفته است ، تهیه فروسیلیسیم در کوره های قوس الکتریکی است که بر مبنای واکنش های احیایی مواد حاصل سیلیسیم و آهن ؛ توسط مواد حاصل کربن در دمای مناسب و با افزودن انرژی الکتریکی صورت می پذیرد بدیهی است هریک از مواد اصلی فوق در طبیعت به صورت های مختلفی یافت می شوند . که بر حسب وفور ترکیب شیمیایی ، عملیات آماده سازی و ... شرایط و ویژگی های کاربردی متفاوتی دارند .

یکی از مهمترین نکاتی که در فرآیند تولید فروسیلیسیم باید مورد توجه قرار گیرد عدم تشکیل سرباره و مواد اکسیدی و مختلفی است که از پسماند واکنش ها حاصل می شوند بدیهی است حضور مواد ناخالصی و سرباره زا ، در هریک از مواد اولیه می تواند مسئله تشکیل سرباره را تشدید و تولید را با اشکالات متالورژیکی و یا تکنولوژیکی متعددی روبرو سازد بنابراین در انتخاب مواد اولیه و آماده سازی آنها ، باید به عوامل سرباره زا و همچنین روش های پیشگیری از تشکیل آنها توجه نمود .

از طرف دیگر ، مواد طبیعی و یا ساخته شده در دامنه ای از تغییرات ترکیبی یا فیزیکی قرار می گیرند که عدم توجه به آنها و نبود سنجش های کمی و کیفی و عدم رعایت

استانداردهائی که با فرآیند تولید منطبق باشد می تواند تولید را ناهمگون و کنترل هایی

لازم را غیر ممکن سازد

تحت شرایط کلی ، مواد اولیه بایستی شرایط عمومی زیر را دارا باشند .

ترکیب شیمیایی ، مواد اولیه باید به گونه ای انتخاب شوند که قادر به تولید محصول

مورد نظر باشند حضور ناخالصی هائی نظیر آهن ، آلومینیوم ، کلسیم و بور و ... علاوه

بر آنکه ترکیب شیمیایی محصول را دگرگون می سازند مستلزم عملیات حذف و

کاهش نیز می باشند از طرف دیگر ناخالصی ها می توانند قابلیت واکنش پذیری مواد

را تغییر داده و شرایط کاری کوره را دچار اشکال سازند .

مشخصات فیزیکی مواد اولیه بر حسب موقعیت استفاده ( محل معدن ، ساخت و ...)

از نظر چگالی ، ساختار ، اندازه و ... نیز متفاوت هستند بدیهی است هرگونه تغییری

در این مشخصات می تواند شرایط تولید را نامتشابه سازد .

وفور و هزینه های اقتصادی تهیه فروسیلیسیم نیز نظیر سایر فرآیندهای تولیدی باید با

توجه به ارزش افزوده محصول ، اقتصادی باشد مسلماً در چنین حالتی تهیه آن ها است

و لذا مستلزم فراوانی و مصرف انرژی کمتر در تهیه آن ها است لذا در انتخاب مواد

اولیه باید به موارد عمومی فوق توجه نمود.

با توجه به فرآیند تولید فروسیلیسیم مواد اصلی که در تهیه این ماده به کار می روند

شامل :

الف) مواد حامل سیلیسیم

ب) مواد انرژیزا ، احیاء کننده ، کاتالیزوری و.. یا به اختصار مواد حاصل کربن

ج) مواد حامل آهن

می باشند هر یک از مواد اصلی سه گانه فوق ، علاوه بر شرایط عمومی ؛ باید دارای

ویژگی های خاصی باشند که مستقیماً به مشخصات شیمیایی شیمی - فیزیکی و

تکنولوژیکی تولید مربوط شده و در زیر مورد مطالعه قرار می گیرند .

## ۲-۲- مواد حاصل سیلیسیم

مواد مختلف و متنوعی که حاوی سیلیسیم با عیار بالا هستند جهت تولید فروسیلیسیم

مورد استفاده قرار می گیرند سیلیسیم از نظر فراوانی ، بعد از اکسیژن ، دومین عنصر

موجود در طبیعت است حدود ۲۷/۶ درصد پوسته زمین از سیلیسیم تشکیل شده است

بشر تاکنون بیش از ۲۰۰ نوع مختلف از مواد سیلیسیم دار را شناسایی کرده است که از

آن جمله می توان ترکیبات زیر را نام برد :

- کوارتزیت ( *Quartzite* )
- کوارتز ( *Quartz* ) که تحت نام قدیمی ایرانی « در کوهی » شناخته شده و در

اشکال مختلف زیر ظاهر می شود

- کوارتز رودخانه ای

- سنگ بلور ( *Rock Crystal* )،؛ نوعی کوارتز خالص و شفاف و بی رنگ
  - درکوهی بنفش ( *Amethyst* ) نوعی کوارتز منگنزدار
  - اپال ( *Opal* ) اکسید سیلیسیم آبدار طبیعی
  - سنگ سلیمانی یا باباقوری ( *Onyx* ) از اقسام عقیق که در آن نوارهایی رنگین در خط مستقیم یافت می شود
  - عقیق جگری ( *Cornelian* )
  - ژاسپر ( *Jasper* )
  - نوعی سیلیس ناخالص که به علت وجود اکسیدهای آهن در آن ، به رنگ قرمز ظاهر می شوند
  - شن و بسیاری ترکیبات دیگر
- در تمامی ترکیبات فوق سیلیسیم به صورت اکسیدی و با فرمول  $SiO_2$  «سیلیس» ظاهر می شود که سیلیسیم در مرکز چهار وجهی ها اکسیژن قرار دارد .
- علاوه بر این ترکیبات هزاران کانی دیگر را میتوان یافت که در آن ها سیلیسیم در ترکیب با اکسیدهای عناصر مختلف به شکل سلیکات ها ظاهر شده است .
- معمولاً ارزان ترین کانی های موجود حامل سیلیسیم در تولید فروسیلیسیم مورد استفاده قرار می گیرند این مواد عبارتند از :

### ۳-۲- کوارتز ، کوارتزیت و به میزان کمی کالسه دوان (Chalcedony)

#### کوارتز

کوارتز کانی است فشرده با ساختار کریستالی رومبوئدرال، چگالی آن  $2/59 - 2/65 \text{g/cm}^3$  و سختی آن ۷ مو بوده است و غالباً بی رنگ ، سفید ، خاکستری و یا قرمز است ، موارتزیکی از فراوان ترین کانی ها بوده و به علت دامنه پایداری را تحمل نماید و در نتیجه در بسیاری از رسوبات ، به سختی و مقاومت زیاد آن ارتباط دارد با توجه به این کوارتز ، فاقد رخ (Cleavage) بوده و در عین حال قابلیت انحلال آن نیز ناچیز می باشد عموماً در حین حمل و نقل بدون تغییر قابل ملاحظه ای باقی می ماند .

کوارتز در  $573^\circ\text{C}$  تغییر شکل ساختاری داده و از فاز  $\alpha$  به  $\beta$  تبدیل می شود . این تغییر شکل ، برگشت پذیر است زیرا در این درجه حرارت چهار وجهی ها ، حدود ۷ درجه نسبت به هم جابجا می شوند .

این امر با تقارن همراه بوده و از سیستم رومبوئدرال ( چهار وجهی ) به هگزاگونال ( شش وجهی ) مبدل می شود . این تغییر شکل پایدار نبوده و در سرد کردن مجدداً شکل متبلور کوارتز به  $\alpha$  برگشت می نماید در تبدیل یک فرم به فرم

دیگر، نوع پیوندهای یونی به هیچوجه تغییر نمی کند. شکل ۱-۲-انواع

مدیفیکاسیون های کوارتز را نشان می دهد.

علت آنکه کوارتز در رنگهای مختلف پدیدار می شود حضور ناخالصی های

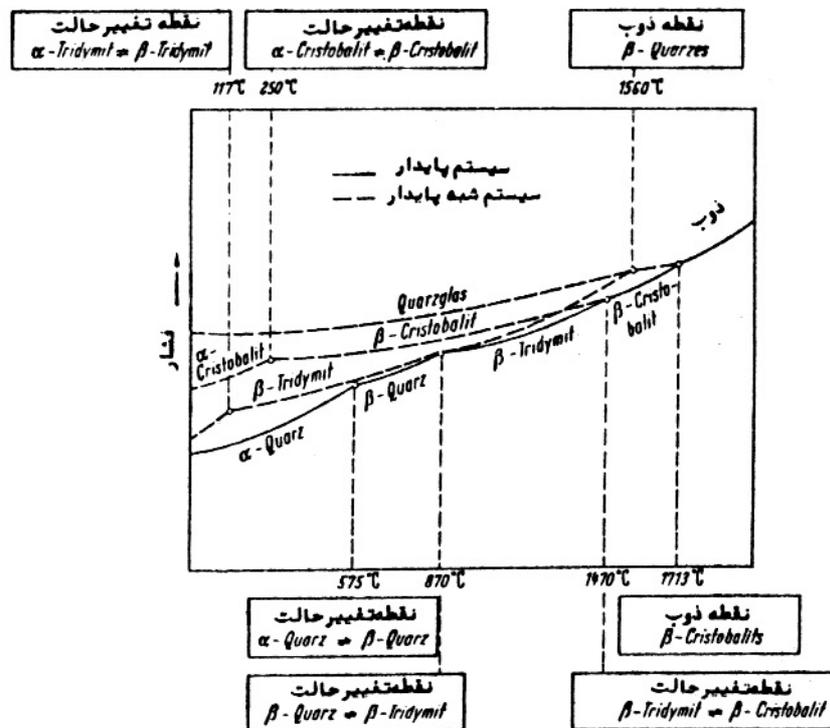
مختلف در کانی های آن است میزان  $SiO_2$  موجود در کوارتز، عموماً بیش از ۹۸ درصد است.

کوارتز مصرفی در فرآیند تولید فروسیلیسیم بایستی نقطه نرم شدن بالائی داشته

باشد علت این امر آن است که کوارتز بایستی تا زمانی که به حفره واکنش نرسیده،

شکل اولیه خود را حفظ کرده و بدون آن که ذوب شود وارد منطقه فعل و انفعال

گردد.



شکل ۱-۲ انواع مدیفیکاسیون های کوارتز

به عبارت دیگر ، کوارتز بهتر است در حالت جامد احیاء شود و چنانچه قبل از احیاء ذوب شده و وارد حوضچه مذاب گردد ، به میزان قابل توجهی تشکیل سرباره داده و احیاء آن در این حالت بسیار مشکل خواهد بود.

لذا کوارتز مصرفی بایستی از نقطه نظر حرارتی و مکانیکی پایدار بوه و درصد خالصی های آن ، بخصوص  $K,Na$  پایین باشد . پایداری حرارتی کوارتز بر اساس یک آزمایش استاندارد اندازه گیری می شود اکسید آهن موجود در کوارتز نیز نبایستی از ۰/۳ درصد بیشتر باشد زیرا پایداری حرارتی آن را کاهش می دهد پیریت از ناخالصی هایی است که نبایستی در کوارتز مصرفی در این صنعت وجود داشته باشد در جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی چند نوع کوارتز آورده شده است .

جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی چند نوع کوارتز

ترکیب شیمیایی				
x				
MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
■ ----	۰/۱۳	۰/۳۴	۰/۶۵	۹۸/۶۰
ناچیز	ناچیز	۰/۱۳	۰/۰۸	۹۹/۷۰
۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۲۴	۹۹/۲۰
■ ترکیب شیمیایی سنگ معدن کوارتز قیدعلی ازنا				

## ۲-۴- کوارتزیت

کوارتزیت سنگی است رسوبی ، متشکل از دانه های کوارتز که در زمینه ای از ترکیبات سیلیکاتی قرار گرفته است .

کوارتزیت به طور وسیعی در سطح زمین پخش شده و منابع آن تمام نشدنی است

کوارتزیت مصرفی در صنعت تولید فروسیلیسیم بایستی شزایط زیراً حائز باشد .

(۱) میزان سیلیس موجود در آن حداقل ۹۶ دصد و ترجیحاً ۹۷ تا ۹۹ درصد باشد .

(۲) مقدار ناخالصی های تشکیل دهنده سرباره (آلومینا اکسید ، منیزیم ، اکسید کلسیم و ...) حتی الامکان کم باشد .

(۳) میزان  $P_2O_5$  محتوی کمتر از ۰/۰۲ درصد باشد زیرا فسفرهمراه شارژ تقریباً به طور صد درصد وارد محلول نهائی خواهد شد .

(۴) فاقد آخال های کلی باشد

(۵) میزان جذب رطوبت آن کمتر از ۵ درصد باشد

(۶) در هنگام خرد کردن و نیز حرارت دادن ؛ استحکام مکانیکی خود را از دست ندهد .

کوارتزیت های حاوی کربن ( با حدود ۰/۷ تا ۰/۵ درصد کربن ) جهت استفاده در

فرآیند تولید فروسیلیسیم مناسب نیستند ، زیرا در هنگام حرارت دادن ترک برداشته و

خرد می شود و نتیجتاً قابلیت عبور گاز در شارژ را پایین می آورند .

در جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی کوارتزیت های مختلف نشان داده شده است .

جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی چند نوع کوارتزیت

درکبب شیمیایی							
C	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
---	---	۰/۰۷	۰/۲۰	۰/۵۸	۱/۱۵	۰/۷۳	۹۷/۲۰
---	---	---	۰/۱۴	۰/۲۴	۱/۱۲	۰/۳۲	۹۷/۹۰
---	---	---	---	۰/۷۲	۰/۲۲	۰/۸۴	۹۶/۰۸
۰/۵	۰/۰۱۱	---	۰/۱۷	۰/۷۰	۱/۱۲	۲/۲۴	۹۶/۰۰
---	۰/۰۱۴	---	۰/۰۵	۰/۶۰	۰/۵۳	۰/۲۳	۹۸/۱۶
---	---	۰/۱۴	---	۰/۷۰	۰/۲۴	۰/۲۱	۹۸/۲۵

### ۵-۲- کالسه دوان (Chalcedony)

کانی است که با ساختار فیبری نازک و بر خلاف آنچه که قبلاً تصور می شد آبدار

نیست کالسه دوان از بلورهای بسیار کوچک کوارتز ساخته می شود که مجموع ماریچ

های آن رشته هائی را تشکیل می دهد . ساختار این رشته ها باز بوده و از منافذ زیر

متعدد تشکیل می شود که ناخالصی های مخصوصا اکسید آهن در آن جایگزین می

شود و در نتیجه با رنگ های مختلف در طبیعت یافت می شود

رفتار این کانی در فرآیندهای متالورژیکی تا حدودی بدتر از کوارتز و کوارتزیت است

زیرا حاوی میزان پایین تری از SiO<sub>2</sub> می باشد (حدود ۹۵ درصد) به همین دلیل

مصرف آن در فرآیند تولید فروسیلیسیم محدود شده است .

### ۶-۲- مواد حامل کربن

موادی که جهت احیاء در فرآیند تولید فروسیلیسیم مورد استفاده قرار می گیرند

عبارتند از :

- زغال چوب (Charcoal)

- کک تولید شده در دمای پایین (*Low temperature Coke*)

- کک نفتی (*Fetroleum coke*)

- کک قیری (*Pitch coke*)

- کک گازی (*Gas coke*)

- کک متالورژی (*Metallurgical Coke*)

- زغال سنگ (*Coal*)

- زغال قهوه ای (*Lignite*)

- آنتراسیت (*Anthracite*)

و تراشه چوب

مواد احیاء کننده مصرفی در این صنعت بایستی حائز شرایط خاصی باشند .

۱- میزان خاکستر آن ها حتی الامکان کم باشد ( ترکیب شیمیایی خاکستر نیز مهم

است )

۲- به منظور واکنش پذیری بهتر دارای مدول سطحی بالائی باشند ( به منظور

افزایش راکتیویته در شرایط ثابت )

۳- مقدار مواد فرار موجود پایین باشند .

۴- استحکام مکانیکی بالائی داشته باشند .

۵- مقاومت الکتریکی آن ها بالا باشد .

و طبیعتاً از نظر قیمت ارزان باشند مقاومت الکتریکی مواد احیاء کننده و واکنش پذیری (راکتیویته) آنها به یکدیگر وابسته اند به عنوان مثال ککی که دارای واکنش پذیری خوبی است مقاومت الکتریکی بالائی نیز دارد و ککی که دارای هدایت الکتریکی خوبی باشد راکتیویته ضعیفی دارد جهت تولید بدون تشکیل سرباره است، بایستی مواد احیاء کننده ای که دارای راکتیویته خوب و مقاومت الکتریکی بالائی هستند به کار برده شوند بدین ترتیب مقاومت مجموع شارژ در اطراف الکترودها بالا برده می شود از آنجا که مقاومت الکتریکی هریک از تکه های مواد احیاء کننده و مقاومت الکتریکی از یک تکه این مواد به تکه دیگر نقش مهمی را در مقدار کل مقاومت الکتریکی مخلوط شارژ بازی می کند، می توان با کنترل و تا حد امکان کوچک تر کردن دانه بندی مواد احیاء کننده به مقاومت الکتریکی مورد نظر دست یافت از طرف دیگر باتوجه به این که لازم است مواد شارژ قابلیت عبور دادن گازهای تشکیل شونده در قسمت های پائینی کوره را داشته باشند نبایستی گرد و غبار و دانه های بسیار ریز مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به فرآیندهای مختلف کک سازی می توان دو روش زیر را تمیز داد:

۱- کک تولید شده در درجه حرارت بالا، این کک، در درجه حرارت های بین

۱۰۰۰ تا  $1300^{\circ}C$  تولید می شود نتیجه این فرآیند ککی است که دارای مواد

فرار ناچیزی بوده و در عین حال میزان گرافیته شدن آن بیشتر است و به طور

نسبی دارای مقاومت الکتریکی کمتری است .

۲- کک تولید شده در درجه حرارت پایین این کک در محدوده حرارتی بین

حدود ۵۰۰ تا ۹۰۰ C<sup>o</sup> تولید می شود . بدین طریق ککی با راکتیویته بالا و مواد

فرار نسبتاً زیاد تولید شده و میزان گرافیته شدن آن کم و در نتیجه مقاومت

الکتریکی آن بالا خواهد بود .

از آنجا که مدت زمان عملیات کک سازی ، تأثیر مستقیم بر میزان گرافیته شدن دارد

می توان در هنگام تولید کک در درجه حرارت های بالا ، با کنترل مدت زمان توقف

در سلول های کک سازی انواع مختلفی از آن را تولید نمود . برای مثال چنانچه مدت

زمان توقف کوتاه باشد کک گازی حاصله دارای واکنش پذیری بسیار خوبی بوده و

چنانچه مدت زمان توقف بلند باشد کک متالورژی سخت تولید خواهد شد کک گازی

تولید شده بدین طریق جهت استفاده در کوره های قوس الکتریکی بسیار مناسب بوده

در حالی که کک متالورژی حاصله به دلیل سختی آن عموماً جهت استفاده در کوره

بلند و کوره کوپل به کار برده می شود . به طور کلی ککی که دارای چگالی ظاهری

کمتر و میزان تخلخل بالاتری باشد قابلیت واکنش کردن آن بالاتر و مقاومت الکتریکی

آن بهتر خواهد بود رفتار الکتریکی مواد احیاء کننده در کوره قوس الکتریکی تا

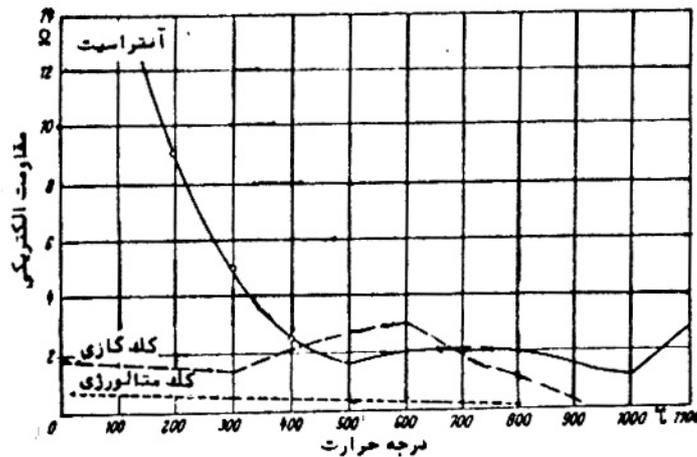
حدودی پیچیده است زیرا مقاومت الکتریکی آنها به درجه حرارت بستگی دارد در

شکل ۲-۲ چگونگی تغییرات مقاومت الکتریکی مواد احیاء کننده با بالا رفتن درجه

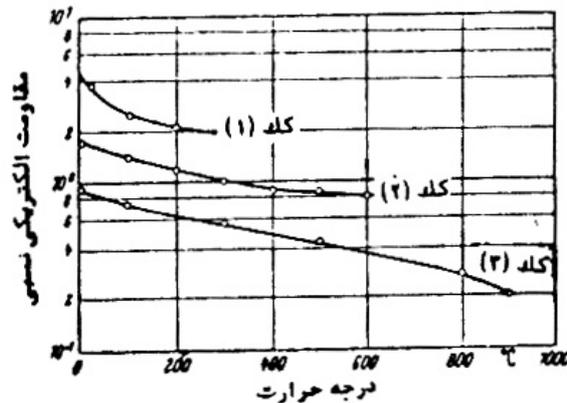
حرارت مقاومت الکتریکی مواد اولیه کاهش می یابد شکل ۲-۳ نیز مقاومت الکتریکی

نسبی سه نوع کک مختلف را نشان می دهد .

شکل ۲-۲ تأثیر درجه حرارت بر مقاومت الکتریکی مواد احیاء کننده



شکل ۲-۳ تأثیر درجه حرارت بر مقاومت الکتریکی نسبی سه نوع کک مختلف



جدول ۳-۳ ترکیب شیمیایی مواد احیاء کننده و ترکیب شیمیایی خاکستر آنها به صورت نمونه

نوع ماده احیاء کننده	رطوبت %	مواد فرار %	خاکستر %	کربن ثابت %	ترکیب شیمیایی خاکستر								
					SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	SO <sub>3</sub> %	اکسیدهای قلیایی %	
کک متالورژی	۱-۳	۲-۴	۱۰-۱۲	۸۱-۸۵	۲۸-۵۲	۲۲-۲۶	۱۵-۲۰	-	-	-	-	-	-
	۸-۱۱	۱-۳	۸-۱۰	۷۶-۸۳	۲۰-۲۵	۲۹-۳۳	۱۰-۱۴	۲-۴	۱-۲	-/۵-۱	۲-۱۱	۲-۶	-
	۵-۷	۱-۳	۹-۱۰	۸۰-۸۲	۲۴-۲۸	۱۸-۲۷	۱۸-۲۰	۲-۶	۱-۲	-/۳-۰/۵	۱۰-۲۰	-	-
زغال چوب	۲	۳	۱-۲	۹۰-۹۵	۱۰-۱۲	۱-۴	۱-۴	۲۰-۳۰	۸-۱۵	۲-۵	۲-۵	۱۵-۲۵	-
	۵-۷	۱۰-۱۲	۱-۳	۷۶-۸۲	۲-۶	۱-۲	۱-۲	۲۵-۳۵	۱۰-۱۸	۲-۵	۲-۶	۲۰-۳۰	-
آبتراسیت	۲-۴	۲-۶	۲-۸	۸۵-۹۰	۲۳-۲۷	۲۶-۲۹	۱۹-۲۲	۵-۷	۱-۳	۱-۳	۲-۴	۱-۳	-
	۲-۴	۱۲-۲۰	۱-۴	۷۰-۸۰	۲۵-۵۰	۳۰-۴۰	۱۰-۱۵	۱-۱۰	-	-	-	-	-
کک Trof	۵-۶	۸-۱۲	۲-۲	۷۸-۸۲	۲۷-۳۲	۶-۸	۵-۷	۱۰-۱۲	۱۶-۲۰	۱-۳	۱۵-۲۲	۲-۶	-
	۶-۹	۷-۱۱	۸-۱۰	۷۰-۷۹	۲۷-۳۱	۲۲-۲۵	۱۱-۱۴	۲-۶	۶-۷	-/۱-۰/۲	۵-۷	۲-۶	-

به طور کلی انواع مواد احیاء کننده مصرفی در فرآیند تولید فروسیلیسیم دارای

مشخصات زیر هستند :

## ۲-۲-۷- کک نفتی و کک قیری

این کک ها حاوی مقادیر ناچیزی خاکستر ( در حدود ۲ درصد ) و مواد فرار می باشند این مواد از احیاء کننده های بسیار خوب محسوب شده و به دلیل قیمت بسیار زیاد آنها عموماً در تولید سیلیسیم متبلور و فروتنگستن مورد استفاده قرار می گیرند .

## ۲-۲-۸- کک متالورژی

از اساسی ترین مواد احیاء کننده در فرآیند تولید فروسیلیسیم است کک متالورژی مورد استفاده در صنعت تولید فروسیلیسیم ، در واقع ریزدانه های باطله در هنگام

تولید این نوع کک بوده و به همین دلیل دارای مقادیر بیشتری خاکستر و میزان متغیری از رطوبت هستند. این کک از زغال های مختلف و با فرآیند های متفاوت تولید شده و بسته به نوع زغال مورد استفاده و نوع فرآیند ویژگی های مختلفی پیدا می کند در جدول ۲-۴ و ۲-۵ ترکیب شیمیایی کک های مختلف و نیز ترکیب شیمیایی خاکستر محتوی آورده شده است.

جدول ۲-۴ ترکیب شیمیایی نمونه از چند نوع کک

C کربن	ترکیب شیمیایی ، X			خاکستر	رطوبت
	S	P	مواد فرار		
۸۱/۶۰-۸۲/۰۷	۱/۴-۱/۵	--	۱/۹۰	۹-۱۰	۵
۸۱/۵۰-۸۲/۰۰	۰/۴-۰/۵	--	۱/۰۰	۱۱-۱۲	۵
۸۶/۵	--	--	۱/۵	۱۲	۲۵/۲
۸۷/۸۴	۰/۴۹	--	۱/۲	۱۰/۴۷	۱۳/۲
۸۷/۵۵	۰/۴۹	۰/۰۵۸	۱/۴۰	۱۰/۵	۱۴/۵
■ ۷۵/۶۰	۰/۶۰	--	۱/۳۰	۲۴/۱	--
■ ۷۹/۳۰	۰/۸۱	--	۲/۳۰	۱۸/۵	--

■ ترکیب شیمیایی دو نمونه از کک های ذوب آهن اصلهان

در سال های اخیر از کک واره ها (*Semi coke*) نیز به همراه کک در فرآیند تولید فروسیلیسیم استفاده می شود کک واره ها توسط فرآیند کک کردن زغال سنگ تا درجه حرارت  $700^{\circ}\text{C}$  تولید شده و به طور کلی دارای ترکیبی پایدار، مقاومت الکتریکی بالا و راکتیویته مناسبی هستند استفاده از مخلوطی از خرده کک و کک واره امکان آ را فراهم می سازد تا الکترودها در موقعیت پایین تری در درون شارژ قرار گرفته و فرایند تولید بهبود یابد.

در جدول ۲-۶ نمونه ای از ترکیب شیمیایی این گونه مواد مشاهده می شود.

جدول ۵-۲ ترکیب شیمیایی خاکستر چند نوع کک

ترکیب شیمیایی ، x						
FeO	P	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
۹/۶۷	۰/۵۸	۲/۲۰	۶/۵۰	--	۲۹/۷۸	۴۸/۵۲
--	۰/۰۷۶	۱/۰۰	۲/۶۰	۱۳/۱۹	۳۶/۹۲	۴۴/۴۲
--	۰/۳۳	۲/۰۰	۶/۳۰	۹/۷۷	۲۸/۹۳	۴۵/۱۶
--	۰/۳۷	۲/۲۰	۶/۶۰	۱۱/۶۱	۲۸/۱۷	۴۸/۵۲
■ --	۰/۲۹	۱/۹۰	۴/۲۰	۶/۸۰	۲۲/۴۰	۵۴/۰۰
■ --	۰/۲۷	۲/۵۰	۵/۸۰	۸/۸۰	۲۵/۱۰	۴۸/۹۰

■ ترکیب شیمیایی خاکستر دو نمونه از کک های ذوب آهن اصفهان

جدول ۶-۲ ترکیب شیمیایی دو نوع کک وارده

ترکیب شیمیایی کک وارده						ترکیب شیمیایی خاکستر			
FeO	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	S	P	کربن رطوبت خاکستر مواد فرار		
۶-۸	۰/۵-۱	۱-۲	۱۱-۱۲	۷۱-۷۶	۰/۰۷-۰/۰۹	۰/۰۱-۰/۰۲	۳-۷	۱۵-۲۶	۱۰-۲۰
۹	۲/۶	۲	۱۹	۶۱	۰/۹	۰/۰۱۵	۲-۷	۲۰-۲۱	--

## ۲-۹- زغال چوب

از احیاءکننده های بسیار خوب و اغلب حاوی مقادیر بسیار کمی خاکستر ، در حدود ۱-۲ درصد است این ماده دارای راکتیویته ای بالا و مقاومت الکتریکی قابل توجهی است به هر حال به دلیل گران بودن آن بیشتر جهت تولید آلیاژهای سیلیسیم یا عیار بالا به کار برده می شود (مانند فروسیلیسیم ۹۰ درصد و سیلیسیم متبلور) ولی جهت تولید فروسیلیسیم با عیارهای کمتر نیز تا مقدار مشخصی از این ماده می توان به عنوان کمکی استفاده کرد .

## ۱۰-۲- زغال سنگ

دارای مقاومت الکتریکی بالایی است ، بعضی از زغال سنگ ها حاوی خاکستر کم ، مقادیر ناچیز مواد فرار و ناخالصی های مختصری هستند امات این مواد اکثراً در هنگام حرارت دادن ترک برداشته و خرد می شوند به همین دلیل مصرف آن ها در تولید فروسیلیسیم محدود می گردد .

جایگزین کردن زغال سنگ به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد به جای کک باعث بهبود خواص مخلوط شارژ شده ، از زیتتر شدن مواد شارژ جلوگیری کرده و امکان آن را ایجاد میکند تابتوان الکترودها را در موقعیت پایین تری قرار داد با توجه به جدول ۷-۲ که طبقه بندی بین المللی انواع زغال ها را نشان می دهد می توان زغال هایی را که جهت تولید فروسیلیسیم به کار برده می شوند به صورت زیر نام برد .

۸۳۲،۸۲۳،۸۲۲،۸۲۱،۷۳۳،۷۲۳،۷۲۲،۷۲۱،۶۳۳،۶۳۲،۶۲۳،۶۲۲،۶۲۱،۵۳۳،۵۳۲،

۵۲۳،۵۲۲،۵۲۱،۴۳۳،۴۳۲،۴۲۳،۴۲۲،۴۲۱

در این جدول انواع زغال ها با سه رقم نمایش داده می شوند اولین رقم نشاندهنده میزان مواد فرار در زغال سنگ است و طبقه زغال سنگ نامیده می شود کلیه زغال ها به ۱۰ طبقه و با ارقام صفر تا ۹ نمایش داده می شوند .  
در جدول ۸-۲ جزئیات این ۱۰ طبقه آورده شده است .

دومین رقم گروه زغال نامیده می شود که در رابطه با خواص کیک شدن زغال بوده

و توسط دو روش مختلف تعیین می شوند دو روش موجود تعیین اندیس تورم

(Swelling index) و آزمایش روکا (Roga) هستند هر یک از این دو روش جهت

تعیین گروه زغال قابل قبول می باشند این رقم به چهار گروه از صفر تا ۳ تقسیم

بندی می شود.

جدول ۳-۷ طبقه بندی بین المللی انواع زغال سنگ

گروه زغال سنگ	۳				۲۲۵	۵۲۵	۶۲۵			۵	
				۲۲۴	۲۲۴	۵۲۴	۶۲۴			۴	
				۲۲۳	۲۲۳	۵۲۳	۶۲۳	۷۲۳		۳	
				۲۲۲ <sub>a</sub>	۲۲۲ <sub>b</sub>	۴۲۲	۵۲۲	۶۲۲	۷۲۲	۸۲۲	۲
	۲			۲۲۲	۲۲۲	۵۲۲	۶۲۲	۷۲۲	۸۲۲	۳	
				۲۲۲	۲۲۲	۵۲۲	۶۲۲	۷۲۲	۸۲۲	۲	
				۲۲۱	۲۲۱	۵۲۱	۶۲۱	۷۲۱	۸۲۱	۱	
	۱			۲۱۲	۲۱۲	۴۱۲	۵۱۲	۶۱۲	۷۱۲	۸۱۲	۲
				۲۱۱	۲۱۱	۴۱۱	۵۱۱	۶۱۱	۷۱۱	۸۱۱	۱
	۰		۱۰۰		۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰
		A B									
طبقه زغال سنگ											
۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹											

در جدول ۲-۹ تقسیم بندی گروه های زغال سنگ مشاهده می شود

جدول ۸-۲ طبقه بندی زغال سنگ در استاندارد بین المللی

نوع زغال	ارزش حرارتی Kcal/Kg	مواد فرار x	طبقه زغال
ناآنحر اسیت	---	۰-۳	۰
آنحر اسیت	---	۳-۶/۵	۱A
آنحر اسیت	---	۶/۵-۱۰	۱B
زغال لاغر	---	۱۰-۱۴	۲
زغال با مواد فرار کم	---	۱۴-۲۰	۳
زغال با مواد فرار	---	۲۰-۲۸	۴
متوسط	---	۲۸-۳۳	۵
زیاد	---	> ۳۳(۳۳-۴۱)	۶
"	> ۷۷۵۰	> ۳۳(۳۳-۴۴)	۷
"	۷۲۰۰-۷۷۵۰	> ۳۳(۳۵-۵۰)	۸
"	۶۱۰۰-۷۲۰۰	> ۳۳(۴۲-۵۰)	۹
"	۵۷۰۰-۶۱۰۰		

جدول ۹-۲ تقسیم بندی گروه های زغال سنگ در استاندارد بین المللی

قابلیت کک شدن	آزمایش اندیس حورم	آزمایش روکا	گروه زغال
ندارد	۰-۰/۵	۰-۵	۰
ضعیف	۱-۲	۵-۲۰	۱
متوسط	۲/۵-۲	۲۵-۲۰	۲
خوب	> ۲	> ۲۵	۳

سومین رقم زیر گروه زغال رانشان می دهد که در رابطه با خواص کک شونده

زغال سنگ است این رقم توسط دو آزمایش مختلف دیلاتومتری و کری کینگ

(Gray-King) تعیین می شود این رقم به ۶ زیر گروه از صفر تا ۵ بر حسب

میزان خاصیت کک دهی زغال تقسیم بندی می شود.

جدول ۱۰-۲ تقسیم بندی زیر گروه های زغال سنگ را نشان می دهد.

**جهت خرید فایل word به سایت [www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com) مراجعه کنید**  
**یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید**

تجربیات موجود نشان داده است که می توان از مواد باطله حاصل از فرآیند تولید

الکترودهای گرافیتی به عنوان مواد احیاء کننده نیز استفاده نمود ترکیب شیمیایی

این مواد ( به صورت نمونه ) در جدول ۱۱-۲ آورده شده است .

جدول ۱۰-۲ تقسیم بندی زیر گروه های زغال سنگ در استاندارد بین المللی

خاصیت بک شندگی	روش گری کینگ	روش دیلاتومتر زغال	زغال
ندارد	A	بدون تغییر	۰
خیلی ضعیف	B-D	لغت انقباض	۱
ضعیف	E-G	۰	۲
متوسط	G1-G4	۰-۵۰	۳
خوب	G5-G8	۵۰-۱۴۰	۴
عالی	G8	> ۱۴۰	۵

جدول ۱۱-۲ ترکیب شیمیایی مواد باطله حاصله از تولید الکترودهای گرافیتی

ترکیب شیمیایی ، x				
C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	SiC
۲۰-۲۸	۱-۲	۵-۶	۲۰-۲۵	۲۰-۲۷
۲۰-۲۵	--	--	۴۰-۵۲	۲۳-۴۰
۵۰-۶۰	--	--	۱۲-۲۵	۱۶-۲۹

با به کار گیری حدود ۳۰ درصد از این مواد به همراه دیگر مواد احیاء کننده نتایج

زیر در زمینه میزان مصرف انرژی حاصل شده است که نشانگر حدود ۱۰ درصد

کاهش مصرف انرژی است .

جهت تولید فروسیلیسیم ۴۵ درصد ، ۳۳۶۰ Kwh به ازاء هر تن

جهت تولید فروسیلیسیم ۵۰ درصد ، ۵۲۲۰ Kwh به ازاء هر تن

جهت تولید فروسیلیسیم ۷۵ درصد ،  $8260 \text{ Kwh}$  به ازاء هر تن

وبدین ترتیب هزینه های تولید محصول تا حدودی پایین آورده شده است .

## ۱۱-۲- تراشه چوب

از مواد باطله حاصله از صنایع چوب نیز می توان به همراه مواد احیاء کننده و به عنوان جزئی از آن ها استفاده نمود این مواد به صورت تراشه چوب و یا بریده های آن به کار برده می شود . استفاده از این مواد نتایج زیرا را در فرآیند تولید در بر دارد .

۱- قابلیت نفوذ و عبور گازها از درون لایه های شارژ را بالا برده و از تشکیل

پوسته ( *Crust* ) محکم جلوگیری می کند .

۲- هدایت الکتریکی ویژه شارژ را پایین آورده و امکان پایین تر بردن الکترودهای

را در مخلوط شارژ فراهم می سازد

تنظیم موقعیت الکتروود در درون شارژ را می توان تا اندازه ای با تغیی دادن مقدار این

مواد در مخلوط شارژ کنترل نمود . شاید یکی از مهمترین عوامل یکه منجر به استفاده

از تراشه چوب در کوره های تولید سیلیسیم گردید ، درجهت بالا بردن میزان تخلخل

شارژ و به تبع آن جلوگیری از خروج کامل گاز *Sio* تولید شونده در حفره واکنشی

کوره باشد .

در فرآیند تولید فروسیلیسیم بایستی سعی نمود که گازهای تشکیل شونده در حفره واکنشی ( که حدود ۵۰ درصد آن گاز *Sio* است ) از کلیه نقاط شارژ عبور کرده و بدین ترتیب میزان بازیابی سیلیسیم را بالا برد چنانچه این امر عملی نگردد فشار گازهای تولید شده در درون حفره بالا رفته و نهایتاً تشکیل یک سوراخ راه خود را به سطح شارژ پیدا کرده و از کوره خارج خواهند شد در نتیجه اتلافات جرمی بالا خواهد بود .

آنچه که اکنون جهت بالا بردن بازیابی سیلیسیم انجام می شود به کارگیری تراشه چوب و با استفاده از سیخ زدن مخلوط شارژ به طور مرتب و منظم توسط اپراتور می باشد بدین طریق می توان از تنوره گازها ، از یک نقطه جلوگیری کرده و در واقع با ایجاد مسیرهای مختلف در درون شارژ میزان بازیابی سیلیسیم را بالا برد .

جهت مقایسه قابلیت واکنش کردن مواد احیاء کننده از معیاری به نام « راکتیویته » استفاده می شود مواد با راکتیویته بالاتر جهت استفاده در فرآیند تولید فروسیلیسیم

مناسب ترند ، در جدول ۱۲-۲ راکتیویته انواع مواد احیاء کننده نشان داده شده است در جدول ۱۳-۲ خواص برخی از مواد احیاء کننده نشان داده شده است این جدول در بر گیرنده اطلاعاتی از قبیل مقاومت الکتریکی راکتیویته مواد احیاء کننده نسبت به *Sio , Co2* ، تخلخل میکروسکوپی ، چگالی فله ای و حجم کربن ثابت این مواد است

با توجه به اینکه جدول می توان تفاوت برخی از مواد احیاء کننده را با توجه به خواص

و ویژگی های مذکور استخراج نمود .

جدول ۱۲-۲ مقایسه راکتیویته انواع مواد احیاء کننده

مواد احیاء کننده	ویژگی راکتیویته	راکتیویته (K)
	مواد احیاء کننده	$\text{cm}^3/\text{s.g}$
کک متالورژی ،		
آنتراسیت	پایین	۰/۰۲
آنتراسیت ، کک		
گازی	متوسط پایین	۰/۰۴
کک گازی	متوسط بالا	۰/۰۸
کک تولید شده در		
درجه حرارتهای پایین	بالا	۰/۱۶
زغال چوب	خیلی بالا	۵
لیگنیت	خیلی بالا	۲۰

جدول ۱۳-۲ خواص برخی از مواد احیاء کننده

کک	کک	کک	زغال
نخلی	متالورژی	گازی	چوب
مقاومت			
$>5000$	۵۰۰-۱۵۰۰	۳۰۰۰-۲۰۰۰	$>5000$
الکتریکی $1 \Omega/\text{m}$			
راکتیویته			
نسبت به $\text{ml/S.g.CO}_2$	۰/۰۱-۰/۰۲	۰/۰۲-۰/۰۳	۳-۵
راکتیویته			
نسبت به $\text{ml.SiO}$	۳۵۰۰-۱۹۰۰	۱۹۰۰-۱۶۰۰	۸۰۰-۳۰۰
دخول			
میکروسکوپی $\times$	۴	۱۰	۱۷
چگالی			
$\text{g/l.ای}$	۶۰۰-۵۰۰	۵۵۰-۴۷۵	۲۵۰-۳۷۵
حجم کریس			
ضایع $\text{m}^3/\text{t}$	۱/۸- ۳/۱	۱/۵- ۳/۱	۲/۰- ۲/۳

## ۱۲-۲- مواد حامل آهن

جهت تولید فروسیلیسیم می بایستی آهن لازم در این آلیاژ را به طریقی به همراه مخلوط شارژ وارد کوره نمود . منابع حاوی این عنصر که در این فرآیند مورد استفاده قرار می گیرند به قرار زیر است .

- کندله سنگ آهن (*Iron Ore Pellet*)

- سنگ معدن آهن با عیار بالا (*Iron Ore*)

- پوسته های اکسیدی نورد (*Mill Scale*)

- براده تراشکاری (*Shredded Turnings*)

استفاده از ترکیبات اکسیدی آهن ، طبعاً با بالا رفتن میزان مصرف انرژی و هزینه های مربوطه همراه خواهد بود . علت این امر انرژی لازم جهت احیاء اکسیدهای آهن و نیز گرم کردن سرباره تشکیل شونده است بنا به همین دلیل میزان بیشتری از مواد احیاء کننده مورد نیاز می باشد.

سنگ معدن آهن مورد استفاده بایستی دارای عیار بالائی بوده و میزان ناخالصی های همراه آن کم باشد زیرا در عمل اکثر این ناخالصی ها احیاء شده و وارد محصول نهایی خواهد شد سنگ معدن آهن و نیز کندله سنگ آهن عموماً جهت تولید فروسیلیسیم با عیارهای پایین مورد استفاده قرار می گیرد ولی به هر حال می توان آنها را جهت تولید هر نوع آلیاژ فروسیلیسیم به کار برد . طبیعتاً تنها تفاوت میزان انرژی مصرفی خواهد

بود. از پوسته های اکسیدی نورد نیز به عنوان مواد حامل آهن استفاده می شود این پوسته ها عموماً درای ترکیب نسبتاًخالص بوده و باعث بهبود فرآیند بخصوص در سطح شارژ می گردند.

در جدول ۱۴-۲ ترکیب شیمیایی نمونه هایی از سنگ معدن آهن مشاهده می شود. کندله سنگ آهن دارای درصد بالائی از آهن (به صورت  $Fe_2O_3$  بوده و دارای آنالیز های متفاوتی است ترکیب شیمیایی پلت سنگ آهن به عنوان نمونه به صورت زیر:

$P: \% 0/05$ ,  $Fe_2O_3: \% 97/1$ ,  $SiO_2 T \% 0/78$ ,  $Al_2O_3: \% 0/2$   
 $S: \% 0/02$ ,  $Mgo: \% 1/3$ ,  $CaO: \% 0/5$

می باشد کندله سنگ آهن مورد نیاز کارخانه تولید فروسیلیسیم شرکت صنایع فروآلیاژایران دارای ترکیب شیمیایی فوق است.

آهن را به صورت براده و یا دم قیچی آن نیز می توان در مخلوط شارژ وارد گروه نمود این مواد بایستی عاری از زنگ های اکسیدی یا هیدارته باشند زیرا در غیر اینصورت میزان هیدروژن محلول در فروسیلیسیم بالا خواهد بود. براده های فولادهای آلیاژی را نبایستی به کار گرفت. زیرا اکثر مواد آلیاژی مانند کروم، نیکل، منگنز و.. وارد مذاب شده و در نتیجه آنالیز محصول نهایی از حالت استاندارد خارج خواهد شد. از به کار گیری هر نوع چدن در مخلوط شارژ نیز بایستی اجتناب نمود زیرا فسفر همراه اینگونه مواد تماماً وارد محصول نهایی می شود وجود گوگرد به همراه مواد مصرفی چندان مضر نیست زیرا این عنصر با تشکیل ترکیبات فرار از محیط

عمل خارج شده و تقریباً امکان حلالیت در محصول مذاب را پیدا نمی کند هرچه براده ها و بریده های آهن مصرفی کوچکتر باشند امکان پخش یکنواخت تر آن ها در مخلوط شارژ بیشتر و بهتر می شود . به همین دلیل استفاده از اندازه های بزرگ اینگونه مواد توصیه نمی شود .

ناخالصی های همراه این مواد بایستی حتی الامکان کم بوده و خصوصاً عاری از هر گونه ناخالصی های فلزی باشند میزان آهن موجود در اینگونه مواد تا ۹۰ درصد می رسد جهت تولید فروسیلیسیم با عیارهای مختلف می توان از مخلوطی از سنگ معدن آهن به همراه براده های آهن استفاده نمود .

باید توجه داشت که استفاده از این براده و پسماندهای فولادی تا حدود زیادی به قیمت و چگونگی مصرف آنها در سایر صنایع ذوب بستگی دارد . چنانچه تولید فولاد و تهیه فولاد و چدن از آهن قراضه توسعه پیدا نماید بالطبع قیمت این مواد افزایش یافته و در چنین مواردی حتی برای تولید فروسیلیسیم با عیار بالا نیز ، باید مشخصات اقتصادی استفاده از آهن قراضه را مدنظر قرار داد .

جدول ۱۴-۲- ترکیب شیمیایی نمونه هایی از سنگ معدن آهن

ترکیب شیمیایی X							
Fe	Mn	P	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	H <sub>2</sub> O
سنگ معدن با سیلیس زیاد							
۴۹/۹۲	۰/۰۸	۰/۰۲۳	۲۲/۳۶	۰/۸۲	۱/۹۶	۰/۲۷	۰/۲۰
۴۵/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۰۹	۲۷/۲۷	۵/۰۰	۰/۲۱	۰/۷۵	۰/۶۶
۵۳/۱۲	۰/۱۰	۰/۰۲۰	۱۶/۳۲	۱/۲۸	۲/۷۲	۳/۱۲	۰/۹۰
۵۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۰۱۰	۲۳/۲۵	۱/۱۳	۱/۳۶	۱/۶۰	۱/۰۵
۴۱/۶۶	۰/۰۷	۰/۰۱۲	۳۰/۲۸	۳/۸۹	۱/۹۳	۲/۵۷	۱/۳۰
۳۶/۲۲	۰/۰۲	۰/۰۲۶	۳۵/۹۸	۲/۲۶	۰/۳۰	۳/۹۸	۱/۱۵
۲۲/۲۸	۰/۰۷	۰/۰۲۱	۲۹/۹۶	۵/۲۲	۰/۲۳	۰/۹۲	۱/۰۰
۳۸/۱۶	۰/۳۵	۰/۰۱۶	۳۲/۶۹	۳/۷۹	۱/۶۵	۳/۱۶	۰/۸۰
سنگ معدن با سیلیس خیلی زیاد و فسفر بالا							
۳۲/۳۶	۰/۰۷	۰/۱۲۵	۲۰/۲۰	۱/۲۳	۲/۸۳	۰/۲۸	۱/۹۰
۲۳/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۸۲	۶۱/۲۵	۰/۹۷	۰/۶۷	۰/۱۹	۱/۸۰
ترکیب شیمیایی سایر معادن							
۶۶/۳۸	۰/۰۹	۰/۰۳۸	۲/۵۸	۱/۱۶	۰/۳۰	۱/۷۵	۱/۸۰
۶۲/۷۶	۰/۰۹	۰/۰۲۷	۲/۱۲	۱/۸۸	۰/۰۷	۰/۰۲	۱/۹۳

## ۱۵-۲- عملیات بر روی مواد اولیه بار آرای

مواد ساختمانی و یا مواد طبیعی موجود در طبیعت، عمدتاً از نظر ترکیب شیمیایی، اندازه دانه و مشخصات فیزیکی قابلیت آن را ندارند که مستقیماً در فرآیند تولید مورد استفاده قرار گیرند. به همین دلیل باید این مواد تحت عملیات مشخص و تعریف شده ای که به طبیعت هر فرآیند بستگی دارد، آرایش کردند و به عبارت دیگر بار آرائی فرآیند تولید فرو سیلیسیم از اهمیت خاص ویژه خود برخوردار است.

فرآیند اقتصادی تولید، با انتخاب مناسب مواد اولیه و با عملیات لازم بر روی این مواد امکان پذیر است، نتیجه بهبود کیفیت شارژ، کاهش میزان مصرف انرژی است.

عملیات ابتدائی بر روی مواد اولیه در تولید فرو آلیاژهای مختلف تقریباً مشابه بوده و

این عملیات را می توان به طور کلی به صورت زیر طبقه بندی نمود :

پیش سازی فیزیکی و شیمیائی شامل :

- خرد کردن

- دانه بندی کردن

- آگلومراسیون

- خشک کردن ( کاهش رطوبت )

- پیش گرم کردن

- احیاء مقدماتی مواد

- تکلیس کردن

و ...

در فرآیند تولید فرو سیلیسیم برخی از عملیات فوق به کار برده می شود تا مخلوط

مواد اولیه مناسب جهت شارژ به کوره آماده شود . عملیات بار آرائی در این فرآیند

عمدتاً از جنبه فیزیکی صورت می گیرد ، که مهمترین آنها مسئله دانه بندی مواد اولیه

و نقش رطوبت همراه آن ها است .

پیش سازی فیزیکی در مخلوط مواد اولیه شارژ شونده به کوره و در اطراف الکترودها،

تبادل حرارت صورت پذیرفته و نیز واکنش هائی بین گازهای حاصله و مواد اولیه

انجام می شود که به تفصیل در فصل ۴ آورده شده است . به همین دلیل مجموعه

مخلوط شارژ بایستی دارای درجه تراکم معینی بوده و در نتیجه اندازه هر یک از انواع

مواد اولیه از اهمیت خاصی برخوردار می شود .

درجه تراکم مخلوط شارژ به :

- تفاوت چگالی ظاهری و چگالی فله ای مواد اولیه

- تفاوت اندازه دانه هر یک از مواد اولیه

- تفاوت اندازه دانه انواع مواد اولیه و

- نسبت و میزان مواد تشکیل دهنده شارژ

بستگی دارد .

انتقال انرژی الکتریکی از الکترودها به شارژ ، متأثر از اندازه فیزیکی مواد اولیه و نیز

پروفیل درجه حرارت در درون این مواد است . مخلوط مواد اولیه بایستی حتی الامکان

همگن و یگنواخت باشد .

طبیعتاً در مسیر انتقال مواد شارژ از انبار مواد اولیه تا به کوره ، امکان جدا شدن مواد

وجود دارد به گونه ای که مواد از یک نوع ، مثلاً کک ، در یک قسمت تجمع کرده و

نوعی غیر یکنواختی در نحوه مخلوط شدن شارژ ایجاد می شود . شارژی که از این

نظر غیر همگن باشد تأثیر قابل ملاحظه ای بر جریان و عبور گازها در درون شارژ

مقاومت الکتریکی شارژ و روند تولید دارد . طبیعتاً می توان با کنترل اندازه دانه مواد

اولیه و نیز با بهبود نحوه مخلوط کردن این مواد تا حدودی از غیر همگنی شارژ جلوگیری نمود، ولی به هر حال این پدیده تا حدودی صورت پذیرفته و اثرات مشخصی را بر فرآیند تولید می گذارد. بنابراین پدیده بار آرائی ( عملیات فیزیکی یا مکانیکی بر روی یک ماده ) و آماده سازی بار ( عملیات فیزیکی یا مکانیکی بر روی مخلوط مواد ) از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

### دانه بندی مواد اولیه

در فرآیند تولید فرو سیلیسیم اندازه دانه هر یک از مواد موجود در شارژ بایستی در محدوده خاصی قرار گیرد. این محدوده ها توسط اندازه و ابعاد کوره پارامترهای الکتریکی کوره ( به عنوان مثال ولتاژ کاری ) و نوع فرو سیلیسیم تولیدی مشخص می شوند.

الف - کوارتز و کوارتزیت مورد استفاده در این فرآیند، ابتدا توسط سنگ شکن خرد شده و سپس دانه بندی و شستشو می شود. جهت تولید انواع فرو سیلیسیم کوارتز و کوارتزیت به ابعاد ۲۵ تا ۷۰ میلی متر خرد می شود. استفاده از ابعاد ۷۰ تا ۱۲۵ میلی متر نیز مجاز است. دانه های ریز باطله، با غربال جدا شده و دانه بندی مناسب جهت شارژ به کوره تهیه می گردد. شستشوی سنگ معدن کوارتزیت و کوارتز باعث حذف مواد تشکیل دهنده سرباره شده و در نتیجه، شرایط کاری کوره بهبود می یابد. سنگ معدن این گونه مواد عموماً حاوی مقادیری خاک و مواد سازنده سرباره است، به همین

دلیل شستشوی سنگ معدن آنها از اهمیت خاصی برخوردار است . دانه بندی کوارتز بایستی حتی الامکان یکنواخت باشد . وجود دانه های ریز ناخواسته ، از طرفی نفوذ و عبور گازها در درون شارژ را مشکل می سازد و از طرف دیگر دانه های ریز اکثر حاوی مقادیر بالایی از ناخالصیها ، خصوصاً آلومینا می باشد . دانه بندی کوارتز مصرفی در کارخانه تولید فرو سیلیسیم شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران در حدود ۲۵ تا ۱۲۵ میلی متر بوده و وجود تا ۵ درصد دانه بندی ریزتر از ۲۵ میلی متر مجاز شناخته شده است .

ب- کک و سایر مواد احیاء کننده ، کک های برگشتی از خط تولید کک سازی ابتدا غربال شده و سپس در سنگ شکن خرد و دانه بندی می گردد . اندازه دانه های ک شدیداً بر روند کار کوره تأثیر می گذارد . دانه بندی کک مصرفی بایستی با توجه به توان کاری کوره و ولتاژ ثانویه آن انتخاب گردد . به عنوان مثال برای کوره ای با توان ۷۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلو وات آمپر ولتاژ ثانویه ۱۴۰ تا ۱۶۰ ولت ، بهترین دانه بندی کک در حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی متر است . چنانچه ولتاژ کاری کوره بیشتر باشد ، دانه بندی کک مورد نیاز بایستی کاهش یابد ، ولی به هر حال دانه های ریز ۵ میلی متر جهت تولید فرو سیلیسیم مناسب نبوده و بایستی جدا گردند .

در جدول ۱۵-۲ رابطه بین میزان مصرف انرژی ، جهت تولید فرو سیلیسیم با عیارهای مختلف ، در رابطه با اندازه دانه های کک آورده شده است .

جدول ۱۵-۲- تأثیر دانه بندی کک بر میزان مصرف انرژی به ازای هر تن محصول

میزان مصرف انرژی (KWh/t)	ویژگیهای کک مصرفی در مخلوط هارز	مبار آلباز FeS1
۵۰۸۰	کک با دانه بندی ۵ تا ۲۰ میلی متر، به همراه حدود ۱۱ درصد ریزدانه زیر ۵ میلی متر (درصد نسبت به وزن کل مواد احیا کننده)	۲۵ درصد
۵۰۵۲	کک با دانه بندی ۵ تا ۲۰ میلی متر	۲۵ درصد
۹۱۳۰	کک با دانه بندی ۸ تا ۲۵ میلی متر، به همراه حدود ۱۲ درصد ریزدانه زیر ۸ میلی متر (درصد نسبت به وزن کل مواد احیا کننده)	۷۵ درصد
۸۹۶۰	کک با دانه بندی ۸ تا ۲۵ میلی متر	۷۵ درصد
۹۱۲۰	کک با دانه بندی ۲۰ تا ۲۰ میلی متر	۷۵ درصد
۸۹۲۵	کک با دانه بندی ۸ تا ۲۰ میلی متر	۷۵ درصد

گزارشان دیگر نشان دهنده تأثیر اندازه دانه های کک مصرفی بر میزان مصرف انرژی و

نیز میزان مصرف کوارتز، جهت تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد است که در جدول

۱۶-۲ آورده شده است:

جدول ۱۶-۲- تأثیر دانه بندی کک بر میزان مصرف انرژی و میزان مصرف کوارتز

میزان مصرف کوارتز (Kg/t)	میزان مصرف انرژی (KWh/t)	دانه بندی کک (mm)
۱۹۲۰	۹۰۰۰	۹
۱۸۳۰	۸۴۰۰	۹-۲۱
۱۸۸۰	۸۸۰۰	۲۱-۳۵

همانگونه که از جدول ۱۶-۲ برداشت می شود، بهترین نتایج در میزان مصرف انرژی

و مقدار کوارتز، با دانه بندی کک ۹-۲۱ میلی متر حاصل و گزارش شده است. به

عبارت دیگر چنانچه دانه بندی کک کوچکتر یا بزرگتر از محدوده فوق باشد، ارقام

مربوط به میزان مصرف و کوارتز مصرفی می یابد. به همین دلیل انتخاب مناسب ترین دانه بندی کک، جهت هر کوره از فاکتورهای مهم و اساسی است.

دانه بندی زغال مصرفی در صنعت تولید فروآلیاژها حدود ۱۵ تا ۲۵ میلی متر است که معمولاً در کنار کک مصرفی دانه بندی آن نیز تعیین می شود. دانه بندی سایر مواد احیاء کننده نیز در همین محدوده قرار دارد.

پ - سنگ معدن آهن و گندله سنگ آهن، دانه بندی مواد حاصل آهن، عموماً در حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی متر. گندله سنگ آهن مصرفی در کارخانه تولید فرو سیلیسیم شرکت صنایع فروآلیاژ ایران نیز دارای دانه بندی فوق خواهد بود. در مورد براده و بریده های آهن هر چه ابعاد کوچکتر باشند نتایج کاری کوره بهتر خواهد بود.

### **خشک کردن و کاهش میزان رطوبت مواد اولیه**

وجود رطوبت به همراه مواد اولیه ایجاد مشکلات مختلفی به قرار زیر می کند:

- ۱- غربال کردن دانه های ریز از مواد تر تقریباً امکان پذیر نیست.
- ۲- تغییرات درصد رطوبت مواد، بیلان جرم مواد را در حین عمل مختل می سازد.
- ۳- وجود رطوبت، ممکن است نتایج نامطلوبی در روند تولید به بار آورد.

اختلالات حاصله در اثر تغییرات درصد رطوبت در مواد اولیه ممکن است بسیار جدی باشد. به عنوان مثال در مورد کک، این اشکال عمده بوجود خواهد آمد که در کک توزین شده چه مقدار گربن ثابت وجود دارد و رطوبت چقدر است. به همین دلیل

بایستی در هنگام شارژ کردن کک با درصد رطوبت متغیر، نمونه برداری های فراوانی انجام شده و جهت توزین مقدار مناسب کک، درصد رطوبت آن مشخص گردد. به عبارت دیگر وجود رطوبت باعث غیر یکنواختی نسبت شارژ می شود.

تأثیر رطوبت در روند تولید می توان نسبتاً کم باشد و این در حالی است که رطوبت همراه شارژ در لایه های بالائی کوره انرژی حرارتی همراه گازهای خروجی را که به هر حال به هدر خواهد رفت، به مصرف رساند. چنانچه چنین حالتی اتفاق نیفتد و درجه حرارت گاز های خروجی، ثابت بماند، مصرف انرژی الکتریکی، با افزایش درصد رطوبت، افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال تأثیر این پدیده در مورد کوره تولید فرومنگنز در شکل ۴-۲ گزارش شده است.

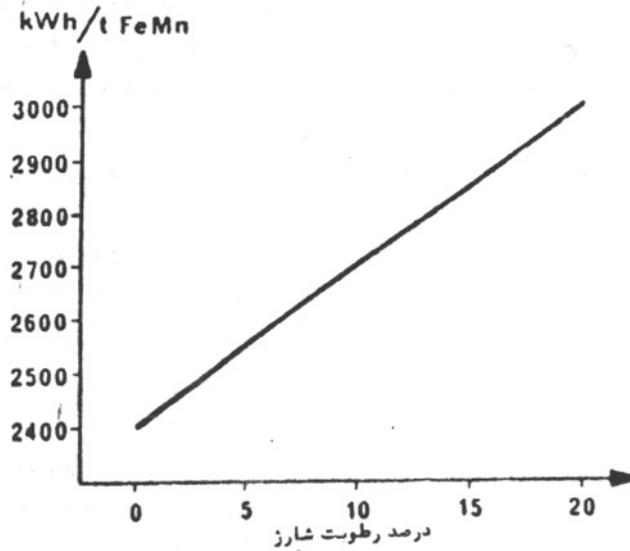
از لحاظ ترمودینامیکی، احتمال انجام دو واکنش زیر در کوره وجود دارد



واکنش (۱) نیار به کربن و حرارت اضافی نداشته و ترجیحاً در درجه حرارت های کمتر از  $700^\circ C$  اتفاق می افتد. واکنش (۲) گرماگیر بوده و مستلزم مصرف کربن است. این واکنش در درجه حرارت های بالاتر از  $700^\circ C$  اتفاق می افتد. تحت شرایط نامطلوب، در فرآید تولید فرو منگنز، مشاهده شده است که چگونه واکنش (۲) به عنوان واکنش غالب عمل نموده و مقدار گاز هیدروژن در مخلوط گازهای خروجی

۲۰ درصد افزایش یافته است . در اثر انجام این واکنش و مصرف کربن ، میزان مصرف

انرژی ۳۰-۴۰ درصد افزایش می یابد .



شکل ۴-۲- تأثیر میزان مصرف رطوبت همراه شارژ بر میزان مصرف انرژی

## ۱۶-۲- میزان مصرف مواد اولیه و محاسبه شارژ

جهت تولید فرو سیلیسیم با عیار های مختلف ، لازم است که مخلوط شارژ متناسب با

آنالیز نهایی انتخاب و محاسبه شود . محاسبه شارژ با توجه به عوامل و فاکتورهای

موثر در آن انجام پذیرفته و این عوامل را می توان به صورت زیر تشریح نمود .

۱- میزان درصد بازیابی هر یک از عناصر

۲- میزان اتلاف جرمی به همراه گازهای خروجی کوره

۳- میزان اتلاف عناصر در سرباره تولید شونده

۴- اتلاف عناصر در صورت رسوب در کف کوره

با توجه به این عوامل ، می توان نحوه و چگونگی محاسبه شارژ لازم جهت تولید فرو سیلیسیم ۴۵ و ۷۵ درصد را توضیح داد .

### مقدار کوارتز مصرفی

در فرآیند تولید فرو سیلیسیم میزان نسبتاً زیادی غبار تولید می شود که اکثراً به اتلاف سیلیسیم تعبیر می شود . هر چه عیار فرو سیلیسیم تولیدی بیشتر باشد میزان غبار تولیدی و در نتیجه میران اتلاف سیلیسیم بیشتر خواهد بود . به عنوان مثال در هنگام تولید فرو سیلیسیم ۴۵ درصد ، حدود ۲۵۰-۱۵۰ کیلوگرم و در هنگام تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد ، حدود ۴۰۰-۲۵۰ کیلو گرم غبار به ازاء هر تن محصول تولید می شود . این غبار حاوی حدود ۹۸-۸۵ درصد  $SiO_2$  است

علاوه بر این سیلیسیم با تشکیل فاز  $Sic$  و رسوب آن در کف کوره هدر می رود . تحت شرایط مناسب کاری کوره بایستی چنین رسوبی تشکیل نشود ولی به هر حال در عمل این مسئله به وقوع پیوسته و موجب اتلاف سیلیسیم می شود .

علیرغم آن که فرآیند تولید فرو سیلیسیم ، قاعداً بایستی عاری از تشکیل سرباره باشد و اصولاً بنام فرآیند بدون تشکیل سرباره شناخته شده است ولی به دلیل عدم امکان استفاده از مواد کاملاً خالص و در عین حال به سبب شرایط کاری کوره معمولاً سرباره ناچیزی تولید خواهد شد . یکی از اجزاء سازنده سرباره ،  $SiO_2$  بوده و بدین ترتیب مقداری از اتلفات سیلیسیم نیز از طریق سرباره حاصل خواهد شد .

در مجموع، آنچه که تحت عنوان میزان بازیابی سیلیسیم در کوره تولید فرو سیلیسیم

ذکر می شود عموماً به صورت زیر است :

میزان بازیابی سیلیسیم در هنگام

تولید فروور ۴۵ درصد : ۹۲-۸۳ درصد

میران بازیابی سیلیسیم در هنگام

تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد : ۸۵-۷۸ درصد

بنابراین چنانچه کوارتز مصرفی حاوی ۹۸/۵ درصد  $SiO_2$  باشد مقدار کوارتز لازم

جهت تولید یک تن فرو سیلیسیم ۴۵ درصد، در حدود ۱۱۶۰-۱۰۵۰ کیلوگرم و

جهت تولید یک تن فرو سیلیسیم ۷۵ درصد، حدود ۲۰۵۰-۱۸۹۰ کیلوگرم خواهد

بود. تحقیقات مختلف به منظور کاهش میزان تلفات سیلیسیم و کاهش مصرف انرژی

تانجام شده است و در همین حال تکنولوژی استفاده از غبارهای حاصله نیز توسعه

یافته است .

### مقدار گندله سنگ آهن مصرفی

مقدار تلفات آهن موجود در مواد حامل آهن در این فرآیند ناچیز بوده و تقریباً مقدار

آهن موجود در شارژ کاملاً وارد محصول نهائی می شود . تلفات آهن به میزان ناچیزی

به همراه گازهای خروجی از کوره و به میزان بیشتری در سرباره تولید شده ، صورت

می پذیرد . آهن عمدتاً به شکل  $FeO$  وارد سرباره شده و در مجموع باعث حدود ۱

درصد اتلاف آهن می شود . در هنگام محاسبه شارژ کوره های تولید فرو سیلیسیم درصد بازیابی آهن ، عموماً حدود ۹۹ درصد در نظر گرفته می شود . بدین ترتیب میزان پلت سنگ آهن مصرفی جهت تولید تن فرو سیلیسیم ۴۵ درصد، در حدود ۷۶۰ کیلوگرم و جهت تولید یک تن فرو سیلیسیم ۷۵ درصد، در حدود ۳۰۰ کیلوگرم خواهد بود و این در صورتی است که پلت سنگ آهن مصرفی، حاوی حدود ۹۷ درصد  $Fe_2O_3$  باشد . لازم به توضیح است که میزان آهن مورد نیاز در مخلوط شارژ جهت وارد شدن به محصول نهائی تا حدودی از طریق خاکستر مواد احیاء کننده نیز تأمین می شود .

### مقدار مواد احیاء کننده مصرفی

در هنگام محاسبه شارژ، مقدار مواد احیاء کننده مورد نیاز با توجه به درصد کربن ثابت موجود در این مواد محاسبه می شود و از این دیدگاه لازم است در نظر گرفته شود که چه مقدار کربن، جهت واکنش های احیاء مورد نیاز است . محاسبه مقدار مواد احیاء کننده، در این فرآیند از اهمیت به سزایی برخوردار است زیرا چنانچه مقدار کربن شارژ شونده به کوره بیشتر از حد مصرف مورد نیاز واکنش های احیاء باشد باعث تشکیل فاز  $Sic$  و اتلاف سیلیسیم شده و چنانچه مقدار کربن موجود در شارژ کمتر از حد مورد نیاز باشد درصد گاز  $Sio$  تولید شونده در حفره واکنشی بالا رفته و باز هم

اتلاف سیلیسیم بالا خواهد رفت . لذا محاسبه دقیق مواد احیاء کننده با توجه به درصد

کربن ثابت موجود در این مواد ، از الزامات این فرآیند است .

از آنجا که درجه حرارت مواد شارژ در سطح بالایی آن نسبتاً زیاد است ، لذا مقدار

نسبتاً زیادی از مواد کربنی در سطح سارژ سوخته و موجب اتلاف کربن بدین طریق

می شود . مابقی کربن موجود در مواد احیاء کننده وارد مناطق فعل و انفعال شده و

پس از احیاء اکسید های مختلف ، عمدتاً به صورت  $Co$  ( و به میزان کمی به صورت

$Co_2$  ) از کوره خارج می شود . در هنگام محاسبه مقدار مواد احیاء کننده ، میزان

بازیابی کربن در حدود ۹۲-۸۸ درصد در نظر گرفته می شود . چنانچه مواد احیاء

کننده شامل مخلوطی از کک و زغال سنگ باشد معمولاً حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد کربن

ثابت مورد نیاز از طریق کک و در نتیجه حدود ۵۰ تا ۲۰ درصد کربن ثابت از طریق

زغال سنگ تأمین می شود . به عبارت دیگر مخلوط مواد احیاء کننده می تواند شامل

۵۰ درصد کک و ۵۰ درصد زغال سنگ ( درصد نسبت به میزان کربن ثابت ) و یا این

که ۸۰ درصد کک و ۲۰ درصد زغال سنگ ( درصد نسبت به میزان کربن ثابت ) باشد .

چنانچه مقادار کربن ثابت موجود در کک و زغال سنگ به ترتیب ۸۲ و ۶۰ درصد در

نظر گرفته شود ، مقدار مصرف مواد احیاء کننده به صورت زیر محاسبه می شود .

الف - نسبت کربن ثابت کک به زغال : ۵۰ به ۵۰

جهت تولید فرو سیلیسیم ۴۵ درصد :

جهت خرید فایل word به سایت [www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com) مراجعه کنید  
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید

۳۶۰ کیلوگرم کک به ازاء هر تن محصول و ۴۹۰ کیلو گرم زغال سنگ به ازاء هر تن

محصول

جهت تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد :

۵۰۰ کیلو گرم کک به ازاء هر تن محصول و ۶۸۰ کیلو گرم زغال سنگ به ازاء هر تن

محصول

ب- نسبت کربن ثابت کک به زغال : ۸۰ به ۲۰

جهت تولید فرو سیلیسیم ۴۵ درصد :

۵۷۰ کیلو گرم کک به ازاء هر تن محصول و ۲۰۰ کیلو گرم زغال سنگ به ازاء هر تن

محصول

جهت تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد :

۸۰۰ کیلو گرم کک به ازاء هر تن محصول و ۲۷۰ کیلو گرم زغال سنگ به ازاء هر تن

محصول

از تراشه چوب در فرآیند تولید فرو سیلیسیم بیشتر به منظور پایین آوردن درجه تراکم

کم شارژ استفاده می شود و فقط قسمتی از کربن موجود در این ماده ، جهت واکنش

های شیمیائی مورد استفاده قرار می گیرد .

در هر حال چنانچه تراشه چوب در این فرآیند به کار گرفته شود میزان محصول آن

در حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم به ازاء هر تن محصول می باشد .

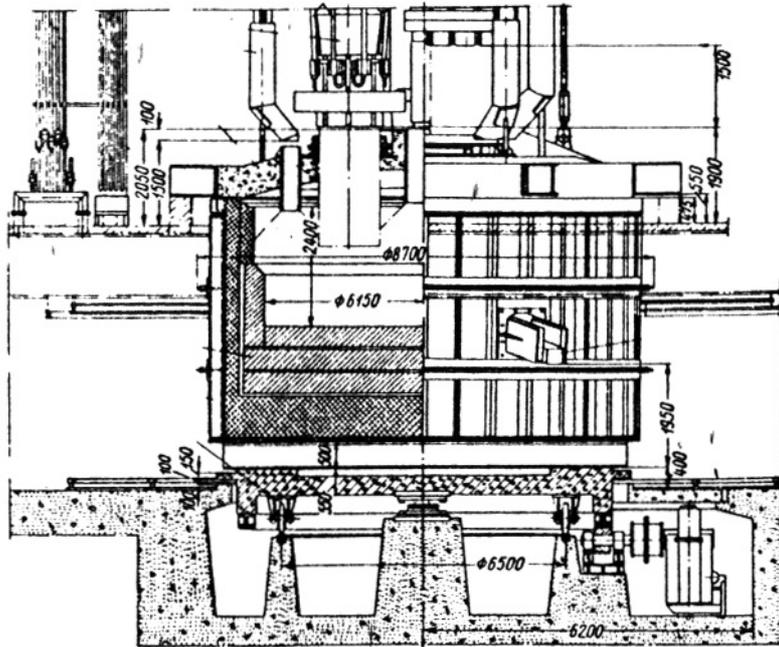
## فصل سوم: کوره های تولید فروسیلیسم

### ۱-۳- مقدمه

ذوب و احیاء فروسیلیسم، همچون بسیاری از فرو آلیاژها، در سال های اولیه تولید، در پاتیل های گرافیکی و یا در کوره بلند صورت می گرفت. بدین ترتیب که مواد سیلیسی و سنگ آهن، همراه با کک و مواد کمکی، به کوره شارژ شده و در اثر احتراق کک عملیات احیاء و ذوب شارژ انجام می شد. ولی به دلیل محدودیت های این روش، از جمله عدم امکان دسترسی به درجه حرارت های بالا، اقتصادی نبودن فرآیند، پایین بودن عیار فروسیلیسم تولیدی، اشباع بودن آلیاژ از کربن و به ویژه دستیابی به انرژی الکتریکی ارزان، کوره های قوس الکتریکی مورد توجه قرار گرفت. به طوری که در حال حاضر تولید فروسیلیسم عمدتاً در این کوره ها انجام می پذیرد. طرح این کوره ها تا حدود زیادی به کوره های قوسی مورد استفاده در ذوب و احیاء آهن و تهیه چدن خام و به مقیاس کمتری به کوره های قوسی مورد استفاده در صنایع ریخته گری شباهت دارد. در شکل ۱-۳ یک کوره قوس الکتریکی مورد استفاده در تهیه فروسیلیسم مشاهده می شود.

## ۲-۳- انواع کوره های قوس الکتریکی تولید فرو آلیاژها

کوره های قوس الکتریکی دارای انواع مختلفی بود که بسته به فرآیند و ظرفیت تولید، کوره مناسب انتخاب می شود. تقسیم بندی این کوره ها می تواند از نقطه نظرات مختلف به شرح زیر انجام شود.



شکل ۱-۳ کوره قوس الکتریکی فروسیلیسم

## ۳-۳- سیستم الکتریکی

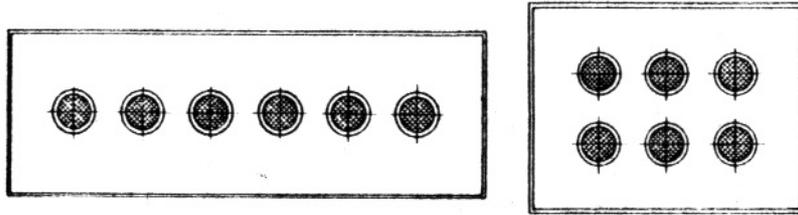
این نوع کوره ها به دو نوع تک فاز و سه فاز تقسیم می شوند. نوع تک فاز می تواند دارای یک و یا دو الکتروود باشد. در نوع تک الکتروود، قوس الکتریکی با کف کوره صورت می گیرد. نوع تک فاز عموماً جهت مصارف ویژه و مدل های آزمایشگاهی و نوع سه فاز جهت تولید صنعتی فروسیلیسم به کار می رود.

## نوع الکتروود

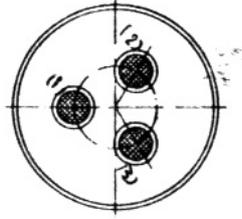
الکتروودهای مورد استفاده در کوره های قوسی می توانند پیش پخته و یا از نوع الکتروودهای خود پز ( زودر برگ) باشند، الکتروودهای پیش پخته به دلیل محدودیت ابعاد و نیاز به قطع و وصل جریان هنگام تعویض الکتروود، کاربرد کمتری در تولید صنعتی فروسیلیسم دارند.

## استقرار الکتروودها

در سیستم های سه فاز الکتروودها به دو صورت خطی و مثلثی می توان مستقر کرد. در نوع خطی، الکتروودها در امتداد هم قرار داشته و هر جفت الکتروود با هم ایجاد قوس می کند، از این رو مناطق ذوب جداگانه ای حاصل شده و نیاز به دهانه های بارگیری متفاوت وجود دارد. در ضمن به دلیل فاصله زیاد الکتروودهای کناری ضریب قدرت کوره کمتر است. شکل بوته چنین کوره ای مکعب مستطیل بوده ( شکل ۲-۳) و عموماً با شش الکتروود ( سه جفت) کار می کنند ولی استفاده از سیستم سه الکتروودی نیز متداول است. چنین کوره هایی در تهیه مات مس کاربرد وسیعی پیدا کرده اند. در نوع مثلثی، الکتروودها در رئوس یک مثلث متساوی الاضلاع قرار داشته ( شکل ۳-۳) و شکل بته استوانی است.



شکل ۲-۳ نحوه استقرار خطی الکترودها



شکل ۳-۳ نحوه استقرار مثلثی الکترودها

در این کوره ها به دلیل ایجاد قوس متقابل بین هر سه الکتروود محفظه های ذوب به یکدیگر متصل شده و از اینرو بارگیری از یک دهانه امکان پذیر است. همچنین به دلیل شکل بوته، مقدار شارژی که در واکنش ها شرکت نمی کند نسبت به بوته های با شکل مکعبی کمتر است. با توجه به توضیحات فوق و ماهیت فرآیند تولید فروسیلیسم و ایجاد محفظه واکنشی در اطراف نوک الکتروود، استفاده از کوره های استوانی در تولید فروسیلیسم متداول شده است.

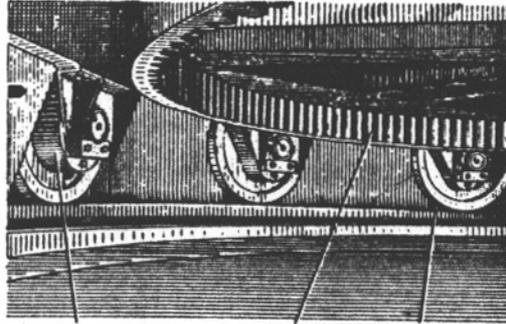
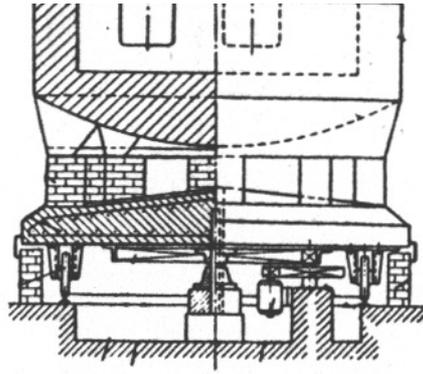
#### ۴-۳- وضعیت بوته

کوره های استوانه ای به کوره های ساکن و کوره های چرخان تقسیم می شوند. کوره های چرخان برای تولید فروسیلیسم مناسب هستند. زیرا در فرآیند تولید فروسیلیسم ( و کلیه فرآیندهای با درجه حرارت بالا) با رسیدن شارژ به مناطق حرارتی بالا، اجزاء

شارژ ذوب و زینتر می شوند و علاوه بر این که باعث کاهش قابلیت های نفوذ گاز می شوند، با ایجاد پل در پایین آمدن شارژ نیز ایجاد اختلال می کنند. حرارت بوتله کوره با شکستن پل ها و حذف مشکلات خمیری شدن شارژ باعث بهبود فرآیند شده و علاوه بر این، حرکت مداوم مناطق حرارتی بالا، سبب افزایش عمر نسوز کوره می شود. ذکر این نکته ضروری است که دوران کوره به آهستگی صورت می گیرد و در کوره های بزرگ ( با قطر بوتله حدود ۱۰ متر) یک دور گردش حدود ۳۰۰-۵۰ ساعت طول می کشد. در شکل ۴-۳ یک کوره استوانی با بوتله چرخان نشان داده شده است.

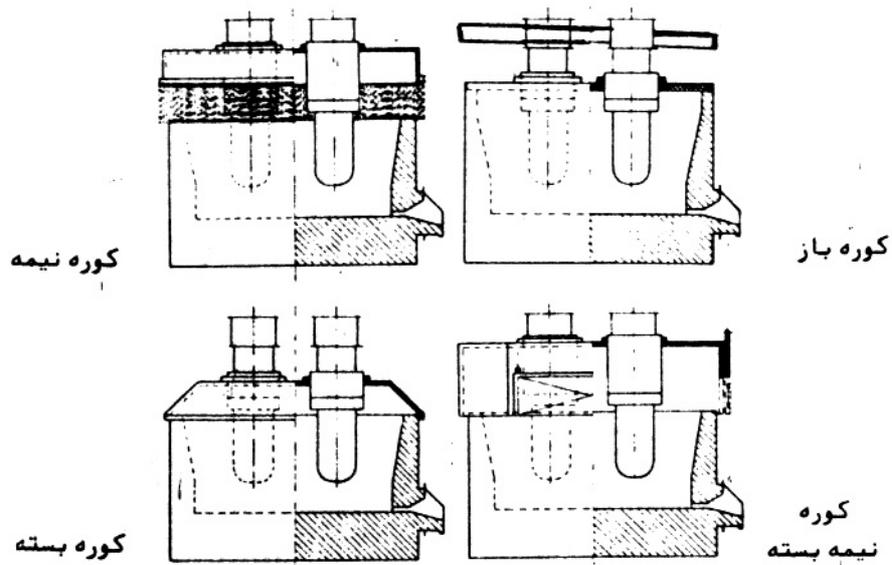
### وضعیت سقف کوره

کوره ها از نظر وضعیت سقف به چهار گروه باز، نیمه باز، نیمه بسته و بسته تقسیم می شوند. در کوره های باز درپوش کوره در ارتفاع بالایی قرار داشته و حجم گازهای خروجی به دلیل داخل کردن هوا به منظور کاهش دمای گازها زیاد است. در کوره های نیمه باز نیز در پوش بالاتر از سطح فوقانی کوره قرار داشته ولی به منظور جلوگیری از تلفات ناشی از تشعشع حرارتی سطح شارژ، سطح جانبی در پوش با زنجیره های معلق، تجهیز می شود.



شکل ۴-۳ کوره قوسی با بوته چرخان

در کوره های نیمه بسته درپوش روی کوره قرار دارد و مجهز به دریچه هایی است که در مواقع ضروری برای شارژ باز و بسته می شود. در این کوره ها حجم گازهای خروجی کمتر بوده و بر عکس درجه حرارت آن بیشتر است. در کوره های بسته سقف کوره کاملاً آب بندی شده و به هیچ وجه امکان اختلاط هوا با گازهای خروجی کوره وجود ندارد. در این حالت درجه حرارت گازهای خروجی، حداکثر مقدار ممکن را داشته و امکان بازیابی انرژی موجود در گازها وجود دارد. در شکل ۳-۵ نمای عمومی چهار نوع کوره فوق نشان داده شده است.



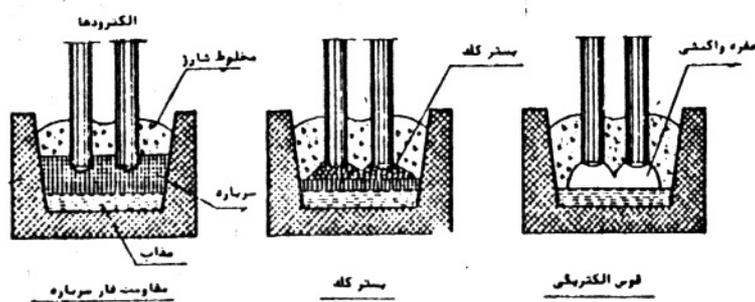
شکل ۳-۵ انواع کوره ها از نظر وضعیت سقف

در فرآیند تولید فروسیلیسم به دلیل لزوم دستیابی به سطح شارژ و تصحیح آن، کوره های بسته نمی توانند مورد استفاده قرار گیرند. در حال حاضر کوره های باز و نیمه بسته کاربرد بیشتری دارند.

### ۳-۵- نحوه تولید حرارت

برای تولید حرارت در کوره های قوس الکتریکی سه مکانیسم مختلف وجود دارد.

( شکل ۳-۶ )



شکل ۳-۶ مکانیسم های تولید حرارت در کوره های الکتریکی

### الف- ایجاد حرارت در اثر عبور جریان از فاز سرباره

در این حالت الکترودهای کوره به داخل فاز سرباره فرو رفته و در اثر عبور جریان از لایه سرباره حرارت لازم تولید می شود.

### ب- ایجاد حرارت در اثر عبور جریان از بستر کک

در این حالت، در زیر الکترودها کک قرار داده شده و این کک به عنوان المان مقاومتی عمل می کند. قسمتی از حرارت آزاد شده در لایه کک، به دلیل مقاومت اهمی و بقیه به علت برقراری قوس های الکتریکی کوچک میان ذرات کک ایجاد می شود. لایه کک به عنوان جدا کننده سربازه مذاب و مواد اولیه به حالت جامد نیز عمل می کند.

### پ- ایجاد حرارت در اثر برقرای قوس الکتریکی

در این حالت فضای خالی در زیر و اطراف نوک الکترودها وجود داشته و گرما توسط ایجاد قوس الکتریکی میان الکترودها تولید می شود.  
کوره های تولید فروسیلیسم به دلیل ایجاد حفره واکنشی در اطراف نوک الکترودها از نوع سوم هستند.

## فصل چهارم: ترمودینامیک و شیمی فیزیک تولید فرو سیلیسیم

### ۱-۴- مقدمه

آمیژان های فرو سیلیسیم متشکل از آهن و سیلیسیم با دامنه ترکیبی وسیعی است . فرآیند تولید فرو سیلیسیم معمولاً مشتمل بر احیاء توام کانه های پرعیار سیلیس و آهن توسط کربن ، در کوره الکتریکی با قوس زیر شارژ است که از نظر متالورژی ، فرآیند پیچیده ای بوده و حاوی نکات و مشخصات جالبی نیز هست که ویژگی های آن ، این فرآیند را از دیگر فرآیند ها متمایز می سازد . بررسی سیستم های  $Si-O$  و  $Si-Fe$  نشان می دهد که سیلیسیم و سیلیس دارای چند شکلی (*Polymorphism*) متنوعی هستند و در شرایط متفاوت ، فازهای گوناگونی را تشکیل می دهند که استحاله این فاز ها در چگونگی فرآیند تولید فرو سیلیسیم و نیز در خواص محصول ، بسیار موثر است.

سیلیس  $SiO_2$  اکسیدی پایدار و با پتانسیل اکسیژن بسیار پائین است ، از این رو احیاء آن به صرف انرژی زیاد و فراهم آوردن شرایط احیایی بالایی نیاز دارد . چنین شرایطی با سهولت نسبی در یک ذوب الکتروترمی - کربوترمی تأمین می شود ، در حالی که روش های دیگر نظیر احیاء کربوترمی در کوره بلند ، برای تهیه فروسیلیسیم جامعیت ندارد و فقط آمیژانهای فرو سیلیسیم با درصد پائین سیلیسیم ( کمتر از ۲۵ درصد ) با توجه به اصلاح و تغییر در روند تولید و پیش بینی های ضروری و با بروز مشکلات

بیشتر در کوره بلند می شود. به دلیل مشکلات متعدد تولید و کنترل های لازم بر مصرف کک، گازهای خروجی و ترکیب محصول، روش تهیه فرو سیلیسیم های کم عیار از طریق کوره بلند نیز تقریباً اعتبار خود را از دست داده و با روش های الکتریکی جایگزین شده است.

سیلیس یک اکسید اسیدی است، در حالی که اکسیدهای فلزی عموماً بازی هستند و با سیلیس میل ترکیبی دارند. حضور اکسیدهای فلزی پایدارتر از سیلیس ( $MgO, Al_2O_3, CaO, \dots$ ). به صورت ناخالصی. تشکیل سرباره می دهد، سرباره موجب کاهش اکتیویته  $SiO_2$  و مشکل تر شدن احیاء آن می شود. از طرف دیگر اکسیدهای

فلزی ناپایدارتر ( $MnO, Cr_2O_3, \dots$ ) وقتی که شرایط احیاء سیلیس در کوره فراهم است، احیاء می شوند و با فاز فلزی پیوسته و موجب ناخالص محصول می شوند. از این رو کنترل های ویژه بر ترکیب مواد اولیه به عنوان یک ضرورت هموار مطرح بوده و لذا فرآیند تولید فروسیلیسیم باید یک فرآیند بدون سرباره باشد که عملاً تشکیل مقادیر

کمی سرباره و ناخالص در محصول اجتناب ناپذیر است. واکنش های احیایی در درجه حرارت های بالا، عموماً با مشارکت  $Si$ ،  $O$  و  $C$  انجام می شود. آهن که در شرایط تولید فرو سیلیسیم به آسانی از اکسید آهن احیا می شود. با تشکیل بستر مذاب و انحلال سیلیسیم به صورت محلول مذاب  $Fe-Si$  در می آید که با کاهش اکتیویته

سیلیسیم ، پیشبرد فرآیند در تسهیل می نماید ولی به طور کلی در مجموعه واکنش ها ، در طول فرآیند تأثیر و دخالت چندانی ندارد.

واکنش اصلی ، احیاء سیلیس توسط کربن است که منجر به تولید سیلیسیم می شود . چنین واکنشی یک مرحله ای نیست ، بلکه با تشکیل ترکیبات میانی ، نظیر *Sic* جامد و *Sio* گازی ، مجموعه متنوعی واکنش های بین عناصر و ترکیبات موجود در سیستم ، در درجه حرارتهای مختلف و در مناطق متفاوت کوره به وقوع می پیوندد که باعث پیچیدگی بیشتر فرآیند می شود .

در حالی که می توان هر یک از واکنش ها به طور مجزا مورد بررسی قرار داد که می توان هر یک از واکنش ها را به طور مجزا مورد بررسی قرار داد ، ولی با توجه به شرایط و تأثیر هماهنگ بودن واکنشها در فرآیند تولید ، الزاماً باید به بررسی توام واکنش ها نیز پرداخته شود . مطالعه و بررسی رفتار ترمودینامیکی و سینتیکی واکنش هایی که در فرآیند تولید نقش تعیین کننده ای دارند، می تواند به شناخت بهتر فرآیند تولید نقش تعیین کننده ای دارند ، می تواند به شناخت بهتر فرآیند و عواملی که بر روی آن تأثیر می گذارند ، منجر شود و بدین وسیله ، ابزار کنترل فرآیند و عواملی که به وسیله آنها می توان فرآیند را در مسیر مورد نظر هدایت کرد ، مشخص می شود . علاوه بر آن با احاطه به طبیعت فرآیند و مکانیزم هایی که در آن دخالت دارد ، در

صورت بروز اشکال در روند تولید می توان علل آن را شناخت و عکس العمل مناسبی را برای رفع آن اعمال کرد .

همواره مقداری از سیلیسیم موجود در سیستم ، از طریق گاز  $SiO$  که به ذرات  $SiO_2$  تبدیل می شود ، همواره گاز خروجی از کوره خارج می شود . غبار سفید رنگ غلیظ و انبوهی که از کوره تولید فرو سیلیسیم متصاعد می شود ، از دیگر مشخصه های فرآیند است که عدم جمع آوری غبار و پراکنده شدن آن در فضا ، از طرفی موجب آلودگی محیط و از طرف دیگر باعث پایین آمدن راندمان احیاء سیلیس و اتلاف آن می شود . امروزه با جمع آوری و تصفیه غبارهای خروجی ، محصول فرعی عمده تولید سیلیسیم متبلور فرو سیلیسیم به نام میکروسیلیکا و به عنوان یک ماده صنعتی با ارزش ، کاربردهای متنوعی یافته است .

## ۲-۴- مشخصات فیزیکی ، شیمیائی و ترمودینامیکی فرو سیلیسیم

آمیزان های فرو سیلیسیم که محدوده وسیعی از ۱۰ تا ۹۰ درصد سیلیسیم را شامل می شوند ، دارای خواص متفاوتی هستند که هر یک از آن ها دامنه ای از تغییرات داشته و اغلب به علت دارا بودن ترکیبات خاص مشخصات ویژه ای نیز دارند . از آنجا که شرح خواص آلیاژهای مختلف فرو سیلیسیم ، در بخش های دیگر اشاره شده است ، مشخصات و خواص انواع فرو سیلیسیم در جداول ۱-۴ و ۲-۴ خلاصه می شود .

جدول ۱-۴- ترکیب شیمیایی انواع فرو سیلیسیم تجاری

ترکیب شیمیایی X											
O	N	Cr	Ti	Ca	Mn	C	S	P	Al	Si	نام آلیاژ
۰/۰۱	۰/۰۱	۱/۰	۰/۱	--	۰/۵-۲/۰	۲/۵	<۰/۰۲	<۰/۱۵	<۰/۸	۸/۰-۱۵/۰	FeSi10
۰/۰۲	۰/۰۱	۱/۰	۰/۱	--	۰/۸	۰/۸	<۰/۰۲	<۰/۰۸	<۰/۸	۲۰/۰-۳۰/۰	FeSi2۵
۰/۱	۰/۰۱	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲	۰/۵	۰/۲	<۰/۰۲	<۰/۰۵	<۱/۵	۲۲/۰-۲۸/۰	FeSi4۵
۰/۲	۰/۰۱	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲	۰/۵	۰/۱	<۰/۰۲	<۰/۰۵	<۲/۰	۷۲/۰-۷۹/۰	FeSi7۵
۰/۲	۰/۰۱	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۰/۱	<۰/۰۲	<۰/۰۵	<۱/۰	۷۲/۰-۷۹/۰	FeSi7۵
۰/۱	۰/۰۱	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲	۰/۵	۰/۱	<۰/۰۲	<۰/۰۲	<۲/۵	۸۷/۰-۹۵/۰	FeSi9۰
۰/۱	۰/۰۱	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۰/۱	<۰/۰۲	<۰/۰۲	<۱/۰	۸۷/۰-۹۵/۰	FeSi9۰
--	۰/۰۱	--	--	۰/۲۵	--	--	--	--	< ۱/۵	۹۷/۰-۹۹/۰	Si 9۹

جدول ۲-۴- ترکیب شیمیایی انواع آلیاژهای فرو سیلیسیم

ترکیب شیمیایی X											
Q	Mg	Cu	C	S	P	Ca	Zr	Mn	Al	Si	نام آلیاژ
۰/۵	--	--	<۰/۱	<۰/۰۱	<۰/۰۲	<۰/۰۱	--	<۰/۵	<۰/۲	۶۵-۷۵	FeSi100R
--	--	۰/۲	<۱/۰	۰/۰۱	<۰/۱	--	--	۰/۵	۰/۵	۱۲-۱۸	FeSi1۰۰
--	--	--	<۰/۲	۰/۰۱	<۰/۰۵	--	--	۰/۵	۰/۵	۲۲-۲۶	FeSi1۰۰
--	۲-۶	--	--	--	--	--	--	۰/۵	۰/۵	۲۵	FeSi1۰۰
--	۸-۱۲	--	--	--	--	--	--	۰/۵	۰/۵	۲۵	FeSi1۰۰
--	۲۸-۳۲	--	--	--	--	۲-۵	--	--	--	۵۰-۵۵	FeSi1۰۰
--	--	--	--	--	--	--	--	--	۱۸-۲۲	۲۰-۲۵	FeSi4۵Al20
--	--	--	--	--	--	--	--	--	۲-۸	۷۰-۷۵	FeSi7۵Al5
۰/۲	--	--	--	--	--	--	--	--	۲۸-۵۰	۲۵-۳۷	FeSiAl50
--	--	--	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۵-۲	--	۰/۵	۱-۲	۷۰-۷۵	FeSi7۵Ca
--	--	--	--	--	--	--	--	۲۰	۲۰	۲۰	FeSiAl20Mn20
--	--	--	--	--	--	۶-۸	۶-۸	--	--	۶۵	FeSiMnZr7

### ۱-۲-۴- سیستم های دوتایی سیلیسیم

شکل ۱-۴ دیاگرام دوتایی آهن - سیلیسیم را نشان می دهد .

منطقه آهن  $\gamma$ ، توسط سیلیسیم محدود شده و ماکزیم انحلال سیلیسیم در این فاز به

$1/63$  درصد سیلیسیم، در دمای  $1150^{\circ}C$  می رسد . میزان انحلال  $Si$  در منطقه

$\alpha + \gamma$ ،  $1/94$  درصد سیلیسیم است .  $Fe_2Si$  با حدود  $19/36$  درصد سیلیسیم، در

$1040^{\circ}C$  با یک تحول یوتکتوئیدی به فاز های  $\alpha_2$  و  $Fe_3Si_3$  تجزیه می شود .

$Fe_5Si_3$  با ۲۳/۱۸ درصد سیلیسیم ( فاز  $\eta$  )، طی یک تحول پریتکتوئیدی از  $Fe_2Si$  و

$FeSi$  تولید می شود .

$Fe_5Si_3$  با سیستم منشوری و دارای ثوابت کریستال به شرح زیر است :

$$a = 6/755 \text{ \AA}$$

$$c = 4/717 \text{ \AA}$$

$FeSi$  با ۳۳/۴۶ درصد سیلیسیم ، فاز  $a$  در یک محدوده همگن از ۳۳/۲ تا ۳۴/۲ درصد

سیلیسیم متبلور می شود . ساختار آن مکعبی با ثبات شبکه  $a = 4/489 \text{ \AA}$  است . فاز  $\zeta$

که به نام لبوئیت ( $Leboit$  یا  $Lebeault$ ) نیز شناخته می شود ؛ در یک محدوده

همگن از ۵۳/۵ تا ۵۶/۵ درصد سیلیسیم ، در سیستم هگزاگونال متبلور می شود ، که

در دمای بالاتر از  $918^\circ C$  پایدار است .

هنگام سرد شدن فاز  $\zeta$  طی یک تحول اوتکتوئیدی به  $FeSi_2$  تبدیل می شود .  $FeSi_2$

نیز طی یک تحول پریتکتوئیدی از  $FeSi$  و فاز  $\zeta$  به وجود می آید . این تحول با

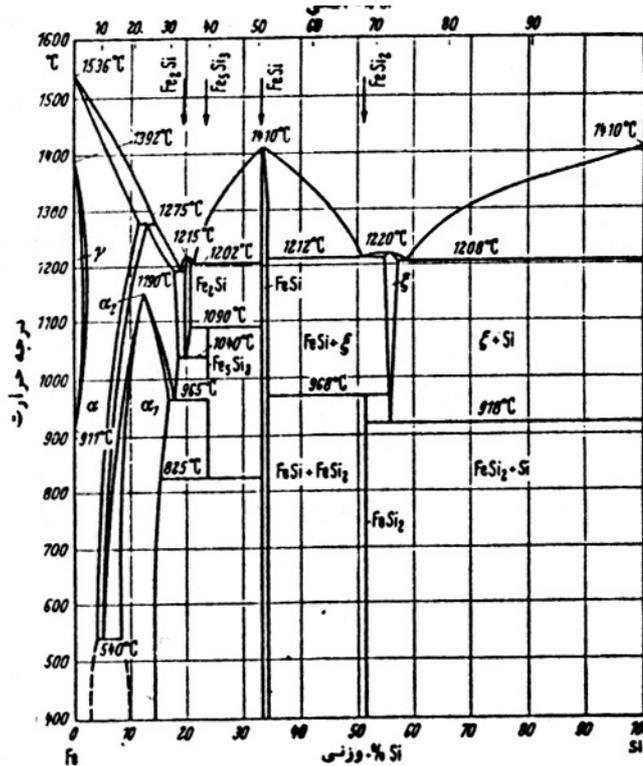
افزایش حجم قابل ملاحظه ای همراه است . که منجر به تجزیه آلیاژهای فرو سیلیسیم

( به خصوص در محدوده ۴۸۰ تا ۶۰ درصد سیلیسیم ، می شود . بدین جهت در

هنگام سرد کردن فرو سیلیسیم مذاب ، به منظور جلوگیری از انجام این تحول و تجزیه

فرو سیلیسیم مذاب را سریعاً سرد می کنند .  $FeSi_2$  نیز دارای شبکه تراگونال ( راست

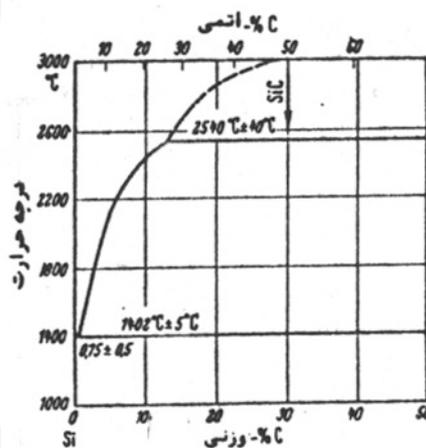
وجهی ) با ثابت شبکه ای  $a = 2/692 \text{ \AA}$  و  $c = 5/17 \text{ \AA}$  است .



شکل ۱-۴- دیاگرام دوتائی آهن - سیلیسیم

ناخالصی هایی مانند کلسیم ، فسفر و آلومینیوم ، امکان تجزیه آلیاژ های فرو سیلیسیم را بیشتر می کنند و از این رو در حضور این ناخالص ها باید به سرعت سرد کردن توجه بیشتری معطوف شود . شکل ۲-۴ دیاگرام دوتایی سیلیسیم - کربن را نشان

می دهد .



شکل ۲-۴- دیاگرام دوتایی سیلیسیم - کربن

با توجه به دیاگرام مشاهده می شود که سیلیسیم مذاب ، امکان حل کردن حدود ۰/۳۲ درصد کربن را در دمای  $1725^{\circ}C$  دارد و در دمای  $1520^{\circ}C$  میزان انحلال کربن در سیلیسیم فقط ۰/۰۴۹ درصد می باشد . کربن در مقادیر بالاتر از حد حلالیت با سیلیسیم تولید سیلیسیم کاربید *Sic* می کند که شکل های بلوری متفاوتی را دارد. از انواع مختلف پلی مرفی های کاربید سیلیسیم می توان به سه شکل زیر اشاره کرد :

*Sic-β* با ساختار مکعبی و ثابت شبکه  $a = 4/3596 \text{ \AA}$

*Sic III* با ساختار هگزاگونال و ثوابت شبکه :

$$a = 3/0806 \text{ \AA}$$

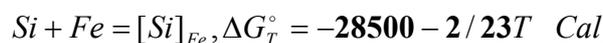
$$c = 15/1173 \text{ \AA}$$

*Sic Wurtzit* با ساختار هگزاگونال و ثوابت شبکه :

$$a = 3/076 \text{ \AA}$$

$$c = 5/048 \text{ \AA}$$

انحلال سیلیسیم در آهن گرمازا است ، انتالپی انحلال سیلیسیم در آهن به صورت زیر گزارش شده است :



برای انحلال کربن در آهن مذاب ، انرژی آزاد فاز حاصله به صورت زیر گزارش شده است :

$$C_{gr} + Fe = [C]_{Fe} \quad \text{Log } K = \text{Log } a = -\frac{1944}{T} + 2/695$$

و در نتیجه برای درجه حرارت های بین ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰°K:

$$\Delta G_T^\circ = +8900 - 12/1T$$

تأثیر حضور سیلیسیم بر میزان انحلال کربن را می توان از اختلاف بین انرژی های انحلال بدست آورد که تاکنون اطلاعات کمی در این مورد گزارش نشده است.

در این قسمت و با توجه بن انرژی های انحلال کربن و سیلیسیم در آهن باید به دو

نکته اساسی زیر توجه نمود:

الف) با افزایش دما، نسبت انحلال کربن به سیلیسیم در آهن مذاب کاهش می یابد.

ب) در دماهای بالاتر از ۲۰۰۰°K به دلیل تشکیل فاز *Sic*، قابلیت انحلال کربن در

مذاب آهن - سیلیسیم به شدت کاهش یافته به طوری که در دماهای حدود ۳۰۰۰°K، تقریباً به صفر می رسد.

جدول ۳-۴ مشخصه انحلال کربن و سیلیسیم را در دماهای مختلف نشان می دهد.

جدول ۳-۴ - مشخصه انحلال کربن و سیلیسیم در دماهای مختلف

$\Delta G_{[Fe-Si]_{Fe}} - \Delta G_{[Fe-C]_{Fe}}$		$\Delta G_{[Fe-Si]_{Fe}}$	$\Delta G_{[Fe-C]_{Fe}}$	درجه حرارت
Cal	Cal	Cal	°C	K
-۲۲۶۰۰	-۲۱۸۰۰	-۹۲۰۰	۱۲۲۷	۱۵۰۰
-۱۷۶۰۰	-۲۲۹۰۰	-۱۵۳۰۰	۱۷۲۷	۲۰۰۰
-۱۰۰	-۲۷۸۰۰	-۲۷۷۰۰	۲۷۲۷	۳۰۰۰

بنابراین واکنش های انحلالی زیر در درجه حرارت های متفاوت، از اهمیت خاصی

برخوردار خواهند بود:

$$(a) \quad [C]_{Fe} + Si = [Si]_{Fe} + C_{gr}$$

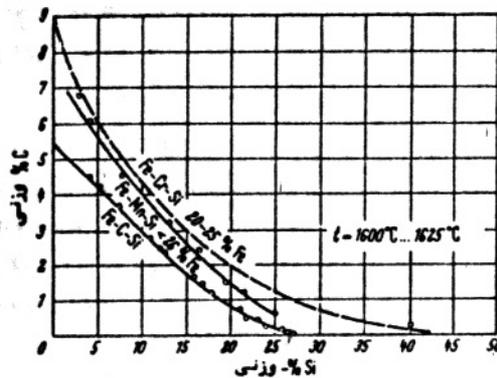
$$(b) \quad [C]_{Fe} + [Si]_{Fe} = [Si]_{Fe} + Sic$$

در دمای  $3050^{\circ}K$ ، رابطه انرژی برای واکنش (a) به صورت زیر خواهد بود :

$$\Delta G_{[Fe-Si]_{Fe}} - \Delta G_{[Fe-C]_{Fe}} = 0$$

در شکل ۳-۴ وابستگی کربن حل شده در حد اشباع، به مقدار سیلیسیم موجود در

آلیاژهای آهن - منگنز و آهن - کروم نشان داده شده است .



شکل ۳-۴- تأثیر مقدار سیلیسیم در آلیاژهای مختلف بر میزان کربن حل شده در حد اشباع

همانگونه که مشاهده می شود، با بالا رفتن درصد سیلیسیم در این آلیاژها، میزان انحلال

کربن کاهش می یابد، در عین حال با افزوده شدن عناصری مانند منگنز و کروم به

آلیاژ آهن - سیلیسیم، میزان انحلال کربن در آلیاژ افزایش می یابد .

در سیستم سیلیسیم - اکسیژن، تنها فاز جامد  $Sic_2$  است، فاز دیگری که اغلب با نام

$Sio$  متبلور شناخته می شود، در واقع ترکیبی از  $Sio_2$  و  $Si$  بوده که از چگالش گاز  $Sio$

حاصل می شود .



جهت خرید فایل word به سایت [www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com) مراجعه کنید  
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۵۱۱ تماس حاصل نمایید

$SiO_2$  به صورت های زیر متبلور می شود :

$\beta$  - کوارتز با ساختار تریگونال و ثوابت شبکه :

$$a = 4/903 \text{ \AA}$$

$$c = 5/394 \text{ \AA}$$

$\alpha$  - کوارتز با ساختار هگزاگونال و ثوابت شبکه :

$$a = 5/01 \text{ \AA}$$

$$c = 5/47 \text{ \AA}$$

$\alpha$  - تری دیمیت با ساختار هگزاگونال و ثوابت شبکه :

$$a = 5/03 \text{ \AA}$$

$$c = 8/22 \text{ \AA}$$

$\alpha$  - کریستویالیت با ساختار مکعبی و ثابت شبکه :

$$a = 7/12 \text{ \AA}$$

میزان انحلال اکسیژن در سیلیسیم جامد، با کاهش درجه حرارت کاهش می یابد . به

طوری که میزان انحلال اکسیژن در ۱۴۱۰، ۱۲۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد،

به ترتیب برابر با  $3/4 \times 10^{-3}$ ،  $1/8 \times 10^{-3}$ ،  $1/8 \times 10^{-3}$  و  $1/4 \times 10^{-3}$  درصد اتمی گزارش

شده است . حضور سیلیسیم و آهن در کنار هم موجب می شود که حلالیت اکسیژن

در هر یک کاهش یابد .

در سیستم سیلیسیم - نیتروژن، فقط یک ترکیب  $Si_3N_4$  ( با ۳۹/۹۴ درصد نیتروژن )

وجود دارد . این ترکیب در دو شکل  $\alpha$  و  $\beta$  ظاهر می شود .

با ساختار هگزاگونال و ثوابت شبکه :

$$a = 7/748 - 7/758 \text{ \AA}$$

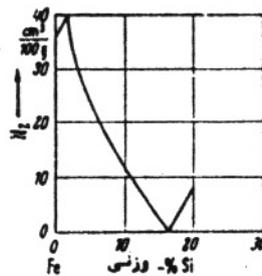
$$c = 5/617 - 5/623 \text{ \AA}$$

و  $\beta - Si_3N_4$  که در  $1550^\circ C$  از  $\alpha - Si_3N_4$  حاصل می شود و دارای ثوابت شبکه ای  
زیر است :

$$a = 7/608 - 7/603 \text{ \AA}$$

$$c = 2/911 - 2/909 \text{ \AA}$$

شکل ۴-۴ نشان دهنده نحوه انحلال نیتروژن در آلیاژهای آهن - سیلیسیم مذاب ( با  
صفر تا ۲۰ درصد سیلیسیم ) است . بعد از ظاهر شدن یک ماکزیمم در حدود ۱  
درصد سیلیسیم ، با افزایش درصد سیلیسیم ، میزان انحلال نیتروژن کاهش می یابد تا  
این کار در بالا تر از ۱۵ درصد سیلیسیم به مینیمم مقدار خود می رسد .



شکل ۴-۴- میزان انحلال نیتروژن در آلیاژهای آهن - سیلیسیم در  $1660^\circ - 1600^\circ C$  در فشار

نیتروژن معادل ۱ اتمسفر

در سیستم سیلیسیم - هیدروژن، سیلان، به فرمول عمومی  $Si_nH_{2L} + 2$  تشکیل می

شود، که در آن  $n \leq 3$  است. ترکیبات سیلان در دمای محیط به شکل گاز است. میزان

انحلال هیدروژن در آلیاژهای آهن - سیلیسیم، شدیداً تابع غلظت است.

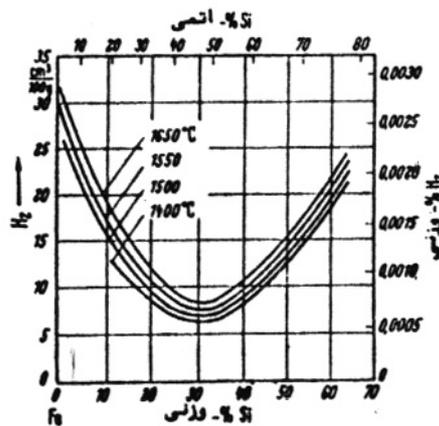
شکل ۴-۵ قابلیت انحلال هیدروژن در آلیاژهای مذاب آهن - سیلیسیم را نشان

می دهد. انحلال هیدروژن در فاز جامد جامد به میزان هیدروژن اولیه موجود در آن و

نیز به مقدار سیلیسیم موجود در آلیاژ بستگی دارد، از طرف دیگر، عملیات بعدی بر

روی آلیاژ، بر میزان هیدروژن محلول (و نیز میزان اکسیژن محلول) در آلیاژ تأثیر

می گذارد.

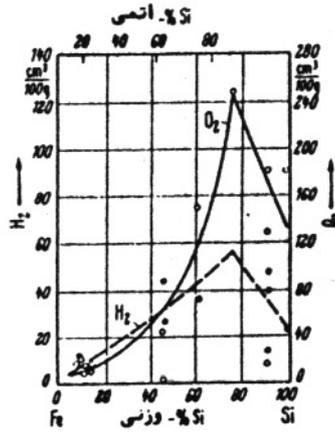


شکل ۴-۵- انحلال هیدروژن در آلیاژهای مذاب آهن - سیلیسیم در فشار هیدروژن معادل ۱

اتمسفر

شکل ۴-۶ میزان هیدروژن و اکسیژن محتوی در آلیاژهای مختلف آهن - سیلیسیم را

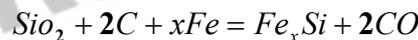
نشان می دهد.



شکل ۶-۴- میزان هیدروژن و اکسیژن موجود در آلیاژهای فرو سیلیسیم در دمای  $25^{\circ}C$

### ۳-۴- ترمودینامیک واکنش ها

تولید فروسیلیسیم ، عموماً با شارژکوارتز ، مواد کربنی و مواد حامل آهن در کوره قوس الکتریک و با توجه به عملیات گرمایی - احیایی انجام می گیرد . مواد اولیه در مراحل اولیه با عبور جریان الکتریکی پیش گرم می شوند و هنگامی که شرایط برای انجام واکنش آماده شود ، تولید فروسیلیسیم با توجه به واکنش ایده آلی زیر انجام می گیرد :



دود غلیظ متصاعد از کوره و مکانیسم راهبری کوره ، نمایانگر آن است که شیمی فرآیند ، بسیار پیچیده تر از واکنش ایده آلی فوق است و لذا مطالعه ترمودینامیکی تولید فروسیلیسیم ، مستلزم بررسی های تعادلی در هر یک از مناطق مختلف کوره است .

در شکل ۷-۴، نمای عمومی مناطق مختلف یک کوره تک فاز در حال کار نشان داده

شده است. توزیع دمایی در الکتروود و مناطق تحت نفوذ نسبی آن نیز به طور شماتیک

در شکل ۸-۴ مشخص شده است. بر اساس شکل ۷-۴، مناطق تفکیک شده

ششگانه، به صورت زیر تشریح می شوند:

منطقه ۱- منطقه مذاب آلیاژی.

منطقه ۲- منطقه تشکیل و حضور ذرات سیلیسیم کاربید که توسط مذاب آلیاژی احاطه

شده است.

منطقه ۳- حفره واکنشی که عمدتاً از گازهای  $CO$ ،  $Sio$  پر شده است.

منطقه ۴- منطقه تشکیل لایه های غیر متبلور کوارتز و قطرات مذاب، این منطقه از

سیلیسیم کاربید، کربن آزاد و سیلیس تشکیل شده است که به شمت حفره واکنشی

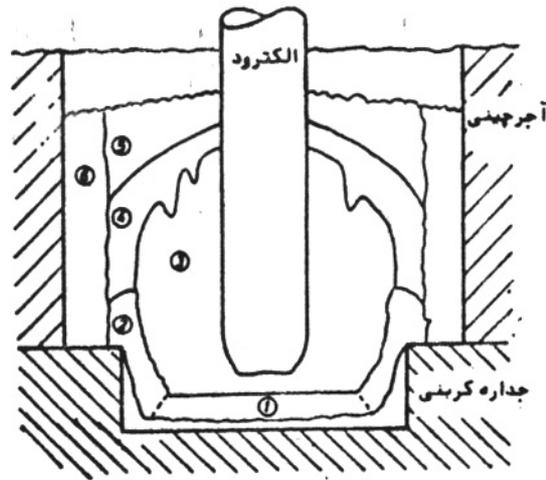
حرکت می کنند.

منطقه ۵- مواد اولیه بدون تغییر عمده در شکل و ترکیب، با توجه به چگالش نسبی

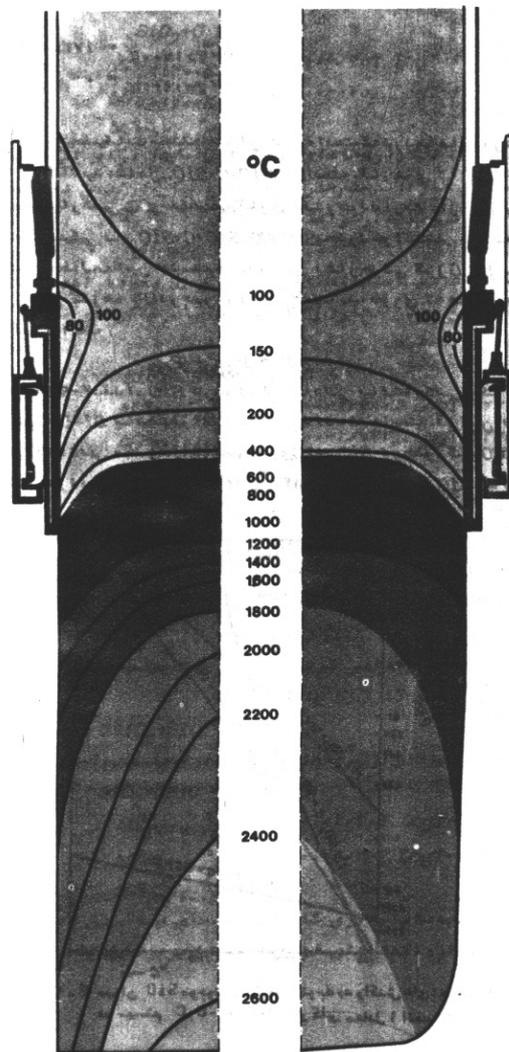
$Sio$  و پیش گرم شدن مواد اولیه.

منطقه ۶- مواد اولیه غیر موثر در واکنش ها

جهت خرید فایل word به سایت [www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com) مراجعه کنید  
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۵۱۱ تماس حاصل نمایید



شکل ۷-۴- برشی از مقطع یک کوره تک فاز

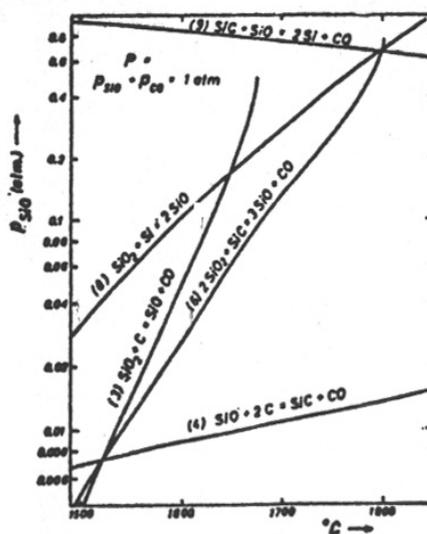


شکل ۸-۴- توزیع دما در الکتروود و مناطق تحت نفوذ نسبی آن

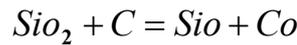
نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که در دماهای مورد عمل، فازهای چگالیده شامل  $Si$ ،  $SiC$ ،  $C$ ،  $SiC_2$  و  $Si$  است، فازهای گازی  $SiO$ ،  $CO$  و مقادیر بسیار کمی  $CO_2$  و سیلیسیم گازی نیز وجود دارند. از این رو بحث ترمودینامیکی به  $CO$ ،  $SiC$ ،  $C$ ،  $SiO_2$  و  $SiO$  محدود خواهد شد. نکته حائز اهمیت در مطالعه این سیستم ها، بررسی فشار جزئی گاز  $SiO$  ( $P_{SiO}$ ) به فشار کلی گازهای ( $P$ ) در حفره واکنشی است. به طوریکه که همواره رابطه زیر برقرار است:

$$P = P_{SiO} + P_{CO}$$

در شکل ۹-۴ مقدار  $SiO$  در شرایط تعادلی با فشار کلی یک اتمسفر در سیستم  $Si-O-C$  یا تغییرات دما نشان داده شده است. در این نمودار واکنش تعادلی مخلوط استوکیومتری  $SiO_2 + 2C$  در حضور گاز  $CO$  بررسی شده است. در دماهای پائین تر از  $1520^\circ C$  مقداری گاز  $SiO$  بایستی تشکیل شود.



شکل ۹-۴- میزان  $SiO$  موجود در گازها با توجه به واکنش های تعادلی در سیستم  $Si-O-C$ ، با فشار کلی معادل ۱ اتمسفر

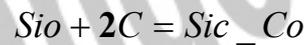


$$\Delta G_T^\circ < 1700^\circ k = 165000 + 6/45T \cdot \text{Log}t - 103/85T$$

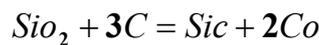
$$\Delta G_T^\circ > 1700^\circ k = 178000 + 6/45T \cdot \text{Log}t - 111/05T$$

$$\Delta G_T^\circ = 2000^\circ k = 0$$

به عبارت دیگر در دماهای بالاتر از  $1520^\circ C$  برای ایجاد تعادل، باید مقداری گاز از سیستم خارج شود. علاوه بر آن، در این دما، سیلیسیم کاربید نیز پایدار خواهد بود.



به این ترتیب سه فاز چگالیده  $C$ ،  $SiC$  و  $Si$  وجود خواهد داشت که با توجه به پائین بودن فشار  $SiO$ ، در شرایط با درجه آزادی صفر، واکنش زیر قابل ارائه است:

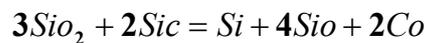


$$\Delta G_T^\circ < 1686^\circ k = 148200 - 1/300T \cdot \text{Log}t - 77/7T$$

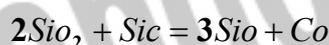
$$\Delta G_T^\circ > 1686^\circ k = 147200 - 2/732T \cdot \text{Log}t - 72/5T$$

$$\Delta G_T^\circ = 1810^\circ k = 0$$

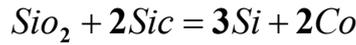
تعادل مجدد در دمای حدود  $1800^\circ C$  با نسبت  $P_{SiO} / P = \frac{2}{3}$  با درجه آزادی صفر حاصل می شود که واکنش زیر را نیز می توان برای آن ارائه داد:



با مصرف شدن تمامی کربن، درجه حرارت سیلیسیم افزایش یافته و تا دمای  $1800^\circ C$  گاز  $SiO$  پایدار است.



در دمای بالاتر از  $1800^\circ C$ ، فاز پایدار، سیلیسیم است:



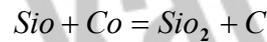
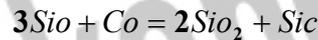
$$\Delta G_T^\circ < 1700^\circ k = 190200 + 2/30T \cdot \text{Log}t - 94/76T$$

$$\Delta G_T^\circ > 1700^\circ k = 228400 + 5/46T \cdot \text{Log}t - 126/8T$$

$$\Delta G_T^\circ = 2100^\circ k = 0$$

با توجه به ناپایداری گاز  $SiO$  در دمای پائین و در غیاب کربن، تعدادی از واکنش

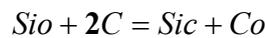
های فوق به صورت زیر برگشت پذیر می شوند:



$$\Delta G_T^\circ > 1700^\circ k = -169600 - 12/9T \cdot \text{Log}t + 124/3T$$

$$\Delta G_T^\circ > 1700^\circ k = -181700 - 12/9T \cdot \text{Log}t + 131/5T$$

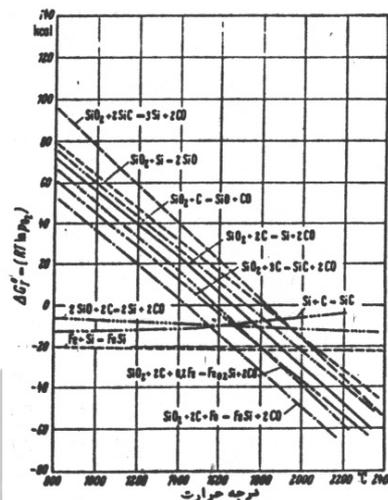
با حضور کربن و در دمای بالاتر از  $1520^\circ C$ ، واکنش زیر نیز انجام پذیر است:



در ارائه شده در شکل ۹-۴، منطقه انجام واکنش های فوق برحسب درجه حرارت

نشان داده شده است و در همین حال، نمودار تغییرات انرژی آزاد برای واکنش ها بر

حسب درجه حرارت در شکل ۱۰-۴ مشخص شده است.



شکل ۱۰-۴- تغییرات انرژی آزاد واکنش ها با درجه حرارت، در هنگام تولید فرو سیلیسیم

واکنش های فوق در غایب آهن نمود بررسی قرار گرفت ، در تولید فرو سیلیسیم ، آهن به عنوان یک ماده اصلی به سیستم اضافه می شود . اکتویته سیلیسیم در تمامی واکنش های فوق در حضور آهن کاهش می یابد و در نتیجه باعث کاهش فشار ( و نیز مقدار ) گاز  $SiO$  می شود . در صورت بالا بودن مقدار آهن ، دامنه پایداری  $Si$  و  $SiC, C, SiO_2$  تغییر کرده و به طور کلی فاز  $SiC$  ناپایدارتر می شود .

در سیستم گرمادهی یک مخلوط استوکیومتری  $SiO_2 + 2C + XFe$  ، آهن ، سیلیسیم را در خود حل می کند و تا زمانی که انحلال و جذب سیلیسیم در آهن به حد اشباع نرسد ، سیلیسیم کاربرد پایدار نخواهد بود . با افزایش درجه حرارت و افزایش حد حلالیت سیلیسیم در آهن ، نقطه تشکیل  $SiC$  نیز تغییر می کند . اثر آهن در سیستم تعادل  $Si, SiC, SiO_2$  در جدول ۴-۴ خلاصه شده است .

جدول ۴-۴- تأثیر مقدار آهن موجود در آلیاژ بر روند تولید فرو سیلیسیم

معدل بین $Si, SiC, SiO$		
نوع آلیاژ (%Si)	درجه حرارت ( C )	گاز (%SiO)
۹۰	۱۷۹۶	۶۵
۷۵	۱۷۹۳	۵۸
۷۵	۱۷۸۰	۴۳
۲۰	۱۷۳۰	۲۰
۲۰	۱۵۶۰	۱/۳
مقدار $SiO$ در گاز معدل ۵۰ درصد	۱۷۸۷	۵۰
کمترین مقدار $Si$ در آلیاژ در		
حالتی که $SiC$ پایدار باشد	۱۵۲۱	۰/۷

واکنش های فوق موجب تغییرات شدید گرمایی می شوند . تعدادی از این واکنش ها گرماگیر هستند و واکنش های مصرف کننده  $SiO$  عموماً گرمازا هستند. در جدول ۵-۴

اثرات حرارتی واکنش های  $Si-O-C$  در دمای  $1527^{\circ}C$  و در جدول ۴-۶ دمای

تعدادی از واکنش ها در حضور آهن درج شده است .

جدول ۴-۵- اثرات برخی از واکنش ها در سیستم  $Si-O-C$

واکنش	$\Delta H(1527^{\circ}C)$ Kcal
$2SiO_2 + SiC = 3SiO + CO$	(۶) +۲۳۵/۱
$SiO_2 + 2SiC = 3Si + 2CO$	(۷) +۲۲۷/۳
$3SiO_2 + 2SiC = Si + 4SiO + 2CO$	(۵) +۵۲۲/۶
$SiO + 2C = SiC + CO$	(۳) - ۱۷/۳
$SiO + SiC = 2Si + CO$	(۱۱) + ۳۹/۵
$2SiO = SiO_2 + Si$	(-۸) -۱۲۸/۳
$SiO + CO = SiO_2 + C$	(-۲) -۱۵۹/۳

جدول ۴-۶- دمای انجام برخی از واکنش ها در حضور آهن

واکنش	درجه حرارت C
$SiO_2 + C = Si$	(۱) ۱۶۵۰
$SiO_2 + C = FeSi$	(۱a) ۱۶۲۷
$SiO_2 + C + Fe = FeSi$	(۱b) ۱۵۸۷
$SiO_2 + C + Fe = FeSi$	(۱c) ۱۵۳۰
$SiO_2 + C + Fe = FeSi$	(۱d) ۱۲۳۰
$SiO_2 + C = SiC$	(۲) ۱۵۲۷
$SiO_2 + SiC = Si$	(۷) ۱۸۲۷

با توجه به شکل ۱۰-۴ و مطالب مطرح شده، نتیجه می شود که واکنش های احیایی

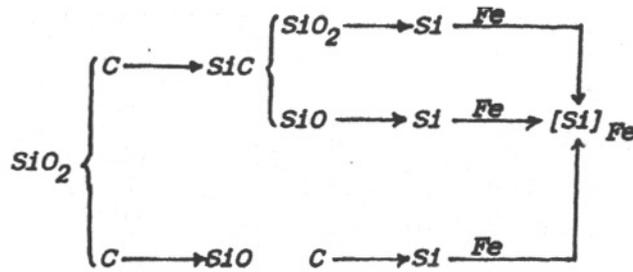
در تولید فرو سیلیسیم، عموماً با تولید کاربید سیلیسیم و منواکسید سیلیسیم همراه

است. در نتیجه برای تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد (به طور مثال)، درجه حرارت

مطلوب در دامنه  $1900^{\circ}C - 1850^{\circ}C$  قرار می گیرد، که بالاتر از دمای تعادلی واکنش

کوارتز- کاربید سیلیسیم می باشد . مکانیزم چنین واکنش را می توان به صورت زیر

ارائه نمود :



پس از احیاء  $SiO_2$  توسط کربن و تولید  $SiC$  و  $SiO$  ، این دو محصول میانی ، با

یکدیگر و یا با سایر اجزاء سازنده شارژ ، فعل و انفعال انجام داده و سیلیسیم تولسد

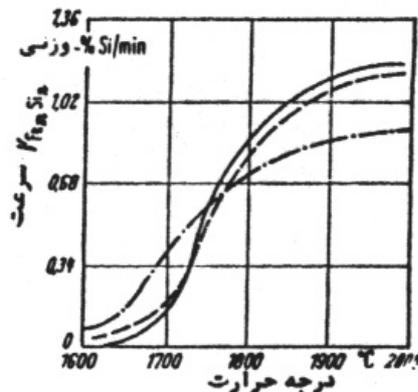
می شود که به نوبه خود با آهن تولید آمیژان می کند . شکل ۱۱-۴ بیانگر وابستگی

سرعت تشکیل فرو سیلیسیم ۷۵ درصد به دیجه حرارت است ، در این شکل نتایج

حاصله از احیاء انواع مختلف کوارتز توسط کربن در حضور آهن ، در یک بوتله

گرافیکی نشان داده شده است و بیانگر تأثیرات انتخاب نوع کوارتز بر واکنش های

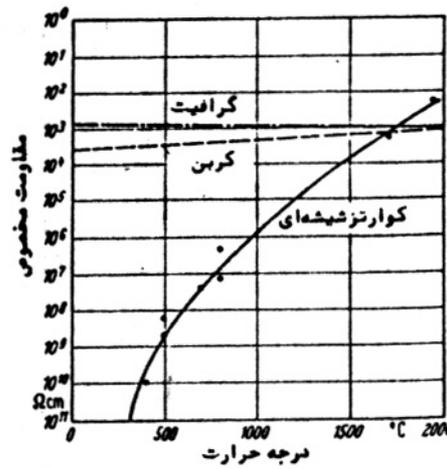
احیایی است .



شکل ۱۱-۴- تأثیر دما بر سرعت واکنش تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد ، برای چند نوع کوارتز

شکل ۱۲-۴ وابستگی مقاومت الکتریکی ویژه کوارتز غیر متبلور، گرافیک و کربن به درجه حرارت را نشان می دهد. در درجه حرارت های بالاتر از  $1750^{\circ}C$  هدایت الکتریکی کوارتز، بهتر از گرافیک و کربن است، بنابراین برای بالابردن مقاومت کاری کوره استفاده از کوارتز بیشتر منفی بوده و برعکس موجب کاهش مقاومت کاری

خواهد شد.



شکل ۱۲-۴- تأثیر دما بر مقاومت الکتریکی ویژه گرافیک، کربن و کوارتز غیر متبلور

در هنگام تولید فرو سیلیسیم، چنانچه کربن موجود در شارژ کمتر از مقدار استوکیومتری باشد، واکنش ها در جهت تولید بیشتر گاز  $SiO$  پیش خواهد رفت. این

واکنش ها که ناخواسته هستند ممکن است به صورت:



و یا



انجام پذیرند. در اثر انجام این واکنش ها و تولید گاز  $SiO$ ، میزان تلفات سیلیسیم نیز

زیاد خواهد شد، زیرا گاز  $SiO$  تولید شده، به همراه گاز  $CO$  از کوره خارج خواهد شد

. فعل و انفعال بین کوارتز و سیلیسیم در حلاء زیاد ، مطابق واکنش (۸) در درجه

حرارت های حدود  $1000^{\circ}C$  صورت نگرفته و  $SiO$  تولید نمی شود . در حالی که در

درجه حرارت  $1250^{\circ}C$  این واکنش به طرف تشکیل  $SiO$  پیش خواهد رفت .

اتلاف سیلیسیم از طریق تشکیل گاز  $SiO$  و خروج آن از کوره را می توان توسط درجه

حرارت سطح شارژ کنترل نمود . چنانچه درجه حرارت سطح شارژ کم باشد گاز  $SiO$

مطابق واکنش زیر چگال می شود :



در غیر این صورت و در صورت حضور اکسیژن ، گاز  $SiO$  سریعاً با شعله سفیدی

سوخته و  $SiO_2$  حاصل از واکنش احتراق ، دارای دامنه بندی بسیار ریزی خواهد بود .



در هنگام تولید آلیاژهای فرو سیلیسیم با بیش از ۴۰ درصد سیلیسیم ،  $SiC$  در درجه

حرارت نسبتاً پایین تشکیل خواهد شد .  $SiC$  در اثر بالا رفتن درجه حرارت ، بیش از

$1827^{\circ}C$  ، با  $SiO_2$  واکنش انجام داده و در نتیجه  $Si$  تولید خواهد شد . در حضور آهن

، این واکنش بهتر انجام می شود . بنابراین در هنگام تولید فرو سیلیسیم ۷۵ درصد ،

درجه حرارت منطقه واکنش باید بالاتر از  $1827^{\circ}C$  باشد تا  $SiC$  تولید شده ( که خود

باعث کاهش مقاومت کاری می شود ) بتواند به فعل و انفعال در آمده و از بین برود .

#### ۴-۴- عملیات تصفیه و حذف ناخالصی ها

فرو سیلیسیم های تجاری، عموماً با مقادیر جزئی ناخالصی عناصر نظیر آلومینیم، کلسیم، تیتانیوم و ... همراه هستند. در مصارف عمومی حضور ناخالصی های فوق و کربن مشکلات عمده ای ایجاد نمی کند، در حالی که در مصارف خاص نظیر تولید فولادهای سیلیسیم دار با پس ماند مغناطیسی پایین، صنایع الکترونیکی و ... ناخالصی های فوق حتی در مقادیر جزئی، اثرات فاحشی بر جای می گذارد. از طرف دیگر در حضور ناخالصی هایی نظیر آلومینیم، کلسیم و فسفر، تجزیه فرو سیلیسیم های اشتعال تولید می نماید. حضور سیلیسیم به صورت کاربیدکلسیم و حضور آلومینیوم و فسفر به صورت آلومینیم سفید، مهمترین عامل تجزیه و از هم پاشی فرو سیلیسیم و تولید گاز قابل اشتعال محسوب می شوند.



حد ناخالصی ها در سیلیسیم متبلور به دلیل کاربرد آن ها در صنایع الکترونیکی بحرانی تر و استاندارد پذیرش آن ها در مقیاس های **ppb** بیان شده است. کوارتز، کوارتزیت، گندله سنگ آهن و خاکستر کک، مهمترین منبع ورود ناخالصی هایی نظیر **K, P, Al, Ti, Ca** محسوب می شوند. خاکستر کک و زغال به عنوان عامل حضور ۶۰-۷۰ درصد از کل آلومینیوم و ۹۰-۹۵ درصد از کل کلسیم گزارش شده است. قسمت عمده ناخالصی های قلیایی و بخشی از عناصر قلیایی خاکی به صورت عناصر و مواد فرار از محیط کوره خارج می شوند در حالی که آلومینیوم به

دلیل اکتیویته بالا به صورت اکسید ( آلومینا ) حضور یافته و به دلیل دیر ذوبی و عدم قابلیت انحلال در مذاب سیلیسیم بخش اعظم آن به صورت سرباره و مقادیر کمتر آن در مذاب باقی می ماند . منشاء ورود ، کربن و کلسیم ، کاملاً مشخص است . کربن در حضور کلسیم و در دمای  $1800-2000^{\circ}C$  به صورت کاربید کلسیم ظاهر می شود که قابلیت انحلال آن در مذاب سیلیسیم ناچیز است و بنابراین قسمت عمده آن به سرباره و مقادیر کمی از آن در مذاب باقی می ماند . همانگونه که در قسمت قبل توضیح داده شده ، حد حلالیت کربن در آهن با افزایش سیلیسیم کاهش کی یابد و از اینرو در فرآیند تولید فرو سیلیسیم ، همراه کربن آزاد وجود خواهد داشت که به سرعت به کاربید کلسیم تبدیل می شود .

تیتانیم ، عموماً از طریق کوارتز به محیط وارد می شود و به دلیل قابلیت احیاء شدن به صورت فاز فلزی باقی می ماند . سایر ناخالصی ها نظیر و انادیم و کروم در مقادیر بسیار جزئی از طریق سنگ آهن وارد شده و لذا حد ناخالصی آن ها فقط در فروسیلیسیم ها مطرح می باشد و در تولید سیلیسیم متبلور حضور موثری ندارند .

حد حضور نا خالصی های فلزی و غیر فلزی به صورت های مختلف در فرو سیلیسیم و سیلیسیم متبلور بر اساس کنترل های ضروری در روش تولید و نوع مصرف متفاوت است . در مصارف دقیق و حساس ، حذف نا خالصی ها با عملیات تصفیه ای به یکی از روش های زیر انجام می گیرد :

- تصفیه الکترولیتی

- تصفیه در خلأ

- تصفیه اکسایشی

- تصفیه کلرایشی

دو روش اول عموماً در تهیه سیلیسیم فوق خالص در کاربرد انرژی های خورشیدی استفاده می شوند ، در حالی که دو روش آخر در تولید صنعتی عام کاربرد یافته اند .  
در جدول ۷-۴ ناخالصی های موجود در فرو سیلیسیم و سیلیسیم متبلور استاندارد و تصفیه شده درج شده است .

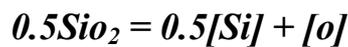
جدول ۷-۴- ناخالصی های موجود در فرو سیلیسیم و سیلیسیم متبلور استاندارد و تصفیه شده

سیلیسیم متبلور		فرو سیلیسیم				عناصر
استاندارد		طرح بالا		طرح فده		
MG-Si	MG-Si	FeSi66	FeSi75	FeSi75	FeSi75	
>۹۸/۵	۹۷-۹۹	۶۵-۶۷			۷۷-۷۹	Si
۰/۱-۰/۵	<۰/۶	<۰/۰۲۰	<۰/۰۶	۰/۰۵-۰/۵۰	<۲/۰	Al
۰/۰۳-۰/۰۷	۰/۲	<۰/۰۲۰	<۰/۰۲	۰/۰۵-۰/۱۰	۰/۲-۰/۸	Ca
۰/۰۵	۰/۰۵	<۰/۰۱۶	<۰/۰۴	۰/۱۰-۰/۲۰	۰/۰۷-۰/۱۰	Ti
۰/۰۲	۰/۰۳	<۰/۰۱۲	<۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۵-۰/۱۵	C
۰/۲-۰/۵	۰/۳-۰/۵	بقیه		بقیه	بقیه	Fe
۰/۰۳	۰/۰۳	<۰/۱۲۰				Mn
						Ni, Cu
۰/۰۱-۰/۰۳	۰/۰۱-۰/۰۳	۰/۰۱-۰/۰۳				V, Cr,
						Co, Mo
<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۳				Zr
					۰/۰۰۱-۰/۰۰۵	S
۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱۱۰			۰/۰۱۵-۰/۰۳	P
۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۵				B

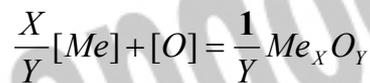
#### ۱-۴-۴- تصفیه اکسایشی

در این روش عملیات اکسایش عناصر ناخالصی با وارد کردن اکسیژن به روش های مختلف انجام گرفته و اکسیژن های حاصل به سر باره انتقال می یابند .

دمش هوا، دمش هوای غنی از اکسیژن و تزریق اکسید آهن  $Fe_2O_3$  برای فرو سیلیسیم متبلور از روش های مختلف سرباره سازی و انتقال مواد ناخالصی به سباره محسوب می شوند. روش اکسایش تأثیر شدیدی بر موازنه حرارتی و سینتیک فرآیند دارد، ولی تأثیر آن بر تعادل واکنش های شیمیایی ناچیز است و از این رو در مطالعات ترمودینامیکی در مورد روش اکسایش بحث عمده ای به عمل نمی آید. با وارد شدن اکسیژن، لایه نازکی از اکسید فراوانترین عنصر (سیلیسیم) در سطح مذاب به وجود می آید. واکنش نشان دهنده پتانسیل اکسیژن در فلز در مرز مشترک فلز-اکسید، عبارت است از:

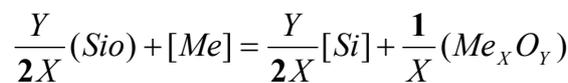


ناخالصی محلول در سطح مشترک  $[Me]$  نیز به صورت زیر واکنش می دهد.



چنانچه هر دو واکنش در سطح مشترک در تعادل موضعی و با اکتیویته انحلالی یکسان

$a_{[O]}$  باشند، لذا از ترکیب دو رابطه فوق می توان اکسیژن را حذف کرد:



و ثابت تعادل برابر است با:

$$K_{Me, Si} = [a_{Si}^{Y/2X} + (a_{Me_xO_y})^{1/X}] / [a_{Me} \cdot (a_{SiO})^{Y/2X}]$$

توجیه مطلب بر اکسایش ناخالصی همراه با اکسایش سیلیسیم استوار است ، نکته اصلی در سرعت و آهنگ ورود اکسیژن در فصل مشترک فلز سرباره قرار دارد و از این رو در بسیاری موارد اکسایش ناخالصی ها طی ، واکنش های مشابه ( فرمول ۳ ) به عمل می آید . در جدول ۸-۴ توزیع واکنش های عناصر ناخالصی آلومینیوم ، کلسیم ، آهن و تیتانیوم و جایگزینی آن ها با  $[Me]$  نشان داده شده است . اعداد مندرج در جدول با اطلاعات ترموشیمیایی محاسبه شده اند .

جدول ۸-۴- توزیع واکنش های عناصر ناخالصی و جایگزینی آنها با  $[Me]$

عنصر	FeS175 پس از حمله اکسیدی	FeS175 پس از حمله کلریدی	FeS175 استاندارد	FeS175 استاندارد
Si	۷۶٪	۷۶٪	۷۷٪	۷۷٪
Cr	۰٪	۰٪	۰٪	۰٪
C	۰٪	۰٪	۰٪	۰٪
Al	۰٪	۰٪	۰٪	۰٪
Ca	۰٪	۰٪	۰٪	۰٪
Ti	--	--	۰٪	۰٪
P	--	--	۰٪	۰٪

## ۲-۴-۴- تصفیه کلر ایشی

برای تصفیه از طریق وارد کردن کلریا مواد حامل آنها نیز نظیر تصفیه اکسایشی ، نتایج مطلوبی گزارش شده است ، ولی به دلیل آلودگی محیط و تجهیزات لازم برای بهسازی آن ، این روش کمتر مورد استفاده قرار گرفته است .

در این روش از انواع هالوژن ها به منظور عامل تولید هالید عناصر ناخالصی می توان استفاده کرد ، ولی کلر تنها هالوژنی است که در مقیاس صنعتی به کار می رود ، علاوه بر آن تأثیر بیشتری بر کلسیم و آلومینیوم دارد . گزارش های مختلف در حالی که تأثیر

بیشتری بر کلسیم و آلومینیوم دارد. گزارش های مختلف در حالی که تأثیر افزایش

کلر بر کاهش آلومینیوم و کلسیم را تا بیش از ۹۰ و ۹۹ درصد نشان می دهد ( شکل

۱۳-۴)، اثرات آن را بر روی حذف سایر عناصر بسیار کمتر و در حدود ارقام مندرج

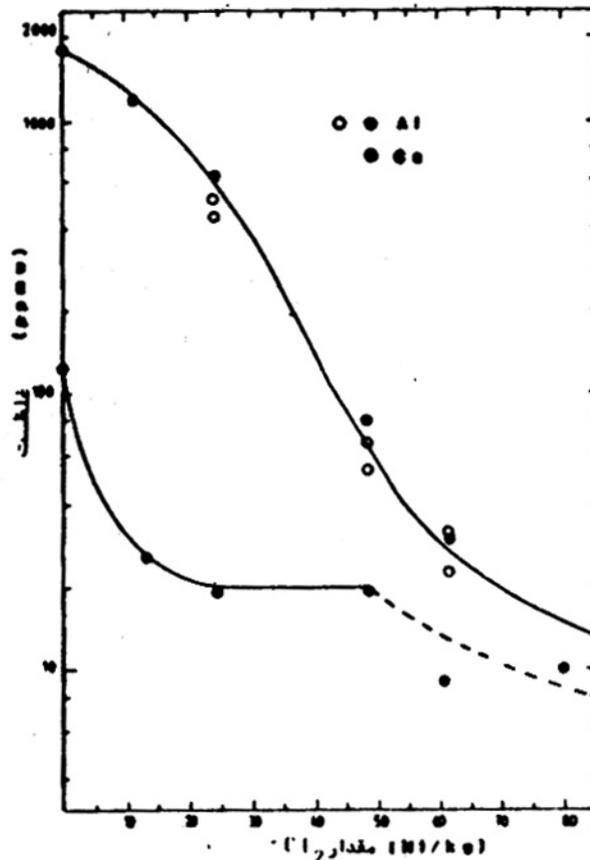
در زیر اعلام می نماید:

وانادیم، تیتانیم، نیکل، آهن تقریباً صفر درصد

منگنز، مس، کروم حدود ۲۰-۵۰ درصد

بر حدود ۴۰ درصد

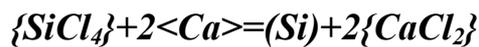
فسفر تقریباً ۱۰ درصد



شکل ۱۳-۴- تأثیر استفاده از کلر بر کاهش آلومینیوم و کلسیم در تصفیه گرایشی

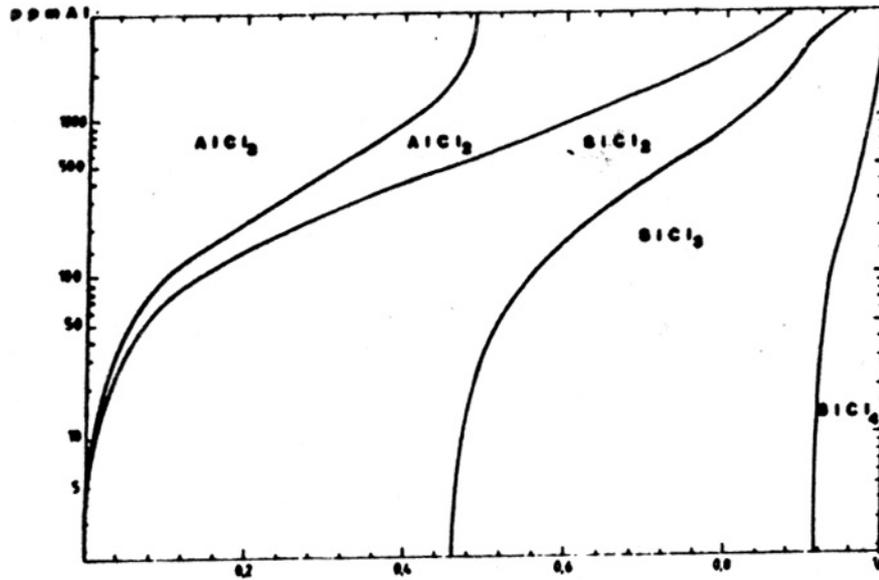
بدیهی است تأثیر واکنش های کلرایشی به اکتیویته عناصر با کلرواکتیویته عناصر با کلر در حضور یکدیگر بستگی دارد. با دمش گاز کلر ( $Cl_2$ ) به مذاب سیلیسیم خالص، ترکیبات کلریدی مختلفی نظیر  $SiCl_2$ ،  $SiCl_3$ ،  $SiCl_4$  در فشار یک اتمسفر تشکیل می شود در حالی که تشکیل ترکیب  $SiCl$  به دلایل ترمودینامیکی از اهمیت زیادی برخوردار نیست.

در حضور مقادیر بسیار کم کلسیم، ترکیب کلسیم کلرید  $CaCl_2$ ، پایدار تر بوده و در این حال تولید  $CaCl$  را می توان ناچیز دانست.



$SiCl_4$  با فشار جزئی معادل در تعادل ( $Si$ ) و  $\{Cl_2\}$  در فشار کلی یک اتمسفر وارد می شود. در حالی که  $CaCl_2$  در  $2208^\circ K$  تبخیر می شود و در  $1700^\circ K$  فشار بخاری معادل ۰/۰۱۸ اتمسفر دارد.

آلومینیوم، کلرید های مختلفی را تشکیل می دهد که تمام آن ها در بالاتر  $180^\circ C$  به صورت گاز می باشند،  $AlCl_3$  و  $AlCl_2$  در دماهای مختلف از کلرید های سیلیسیم پایدار تر بوده و بنابراین چنانچه مذاب سیلیسیم حاوی ناخالصی آلومینیم با گاز کلر تصفیه شود، تقریباً تمام آلومینیم آن به کلرید تبدیل می شود. شکل ۱۴-۴- تعادل محاسباتی فارهای گازی در تصفیه سیلیسیم را نشان می دهد. در این محاسبات  $\gamma_{Al}$  برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۴-۴- تعادل محاسباتی فازهای گازی در تصفیه سیلیسیم

در این حال هنگامی که سیلیسیم مذاب حاوی کلسیم و آلومینیوم باشد، در ابتدا اکسید کلسیم با کلر واکنش نشان داده و کلرید کلسیم مذاب تشکیل می شود، با کاهش غلظت کلسیم، آلومینیوم همراه با مقدار کمی سیلیسیم وارد واکنش می شود و با توجه به گاز بودن کلرید آلومینیوم و پایداری نسبی آن از محیط خارج شده و در نتیجه کاهش مقدار آلومینیوم به نسبت بیشتری انجام می گیرد.

در جدول ۹-۴ اثرات حذف ناخالصی با دور روش اکسایش و کلرایش باهم مقایسه شده اند.

جهت خرید فایل word به سایت [www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com) مراجعه کنید  
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۵۱۱ تماس حاصل نمایید

جدول ۹-۴- مقایسه اثرات حذف عناصر با دو روش تصفیه اکسایشی و کلرایشی

	ردیف (شماره)	مقادیر محاسبه شده K برای				
		به عنوان حلال FeS <sub>175</sub>		S <sub>1</sub> متبلور به عنوان حلال		
		$k_1^{(*)} = \frac{(a_{Si})^{3/4}}{K} \cdot M_{Fe} \left[ \frac{75}{M_{Si}} + \frac{25}{M_{Fe}} \right]$		$k_2^{(*)} = \frac{(a_{Si})^{3/4}}{K} \cdot \frac{100 \cdot M_{Fe}}{M_{Si}}$		
1550°C	1600°C	1550°C	1600°C	1550°C	1600°C	
$Al + \frac{1}{4} (SiO_2) = \frac{1}{4} Al + \frac{1}{2} (Al_2O_3)$	-107.307	-106.742				
$(\% Al) = K \frac{1}{\sqrt{Al}} \frac{(a_{Al_2O_3})^{1/2}}{(a_{SiO_2})^{3/4}}$			$6.09 \cdot 10^{-2}$	$7.63 \cdot 10^{-2}$	$8.06 \cdot 10^{-2}$	$1.01 \cdot 10^{-1}$
$Ca + \frac{1}{2} (SiO_2) = \frac{1}{2} Ca + (CaO)$	-145.017	-140.306				
$(\% Ca) = K \frac{1}{\sqrt{Ca}} \frac{a_{CaO}}{(a_{SiO_2})^{1/2}}$			$7.89 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-3}$	$9.94 \cdot 10^{-3}$	$1.74 \cdot 10^{-2}$
$Ti + \frac{1}{2} (SiO_2) = \frac{1}{2} Ti + (TiO)$	-79.688	-80.383				
$(\% Ti) = K \frac{1}{\sqrt{Ti}} \frac{a_{TiO}}{(a_{SiO_2})^{1/2}}$			$7.03 \cdot 10^{-1}$	$7.73 \cdot 10^{-1}$	$8.86 \cdot 10^{-1}$	$9.75 \cdot 10^{-1}$
$Zn + \frac{1}{2} (SiO_2) = \frac{1}{2} Zn + (ZnO)$	134.499	132.570				
$(\% Zn) = K \frac{1}{\sqrt{Zn}} \frac{a_{ZnO}}{(a_{SiO_2})^{1/2}}$			$7.13 \cdot 10^0$	$7.87 \cdot 10^0$	$1.42 \cdot 10^0$	$9.924 \cdot 10^0$

## فصل پنجم: مهندسی تولید

### ۱-۵- مقدمه:

تولید فروسیلیسیم در کوره های باز، نیمه بسته و احتمالاً بسته با توجه به ظرفیت تولید و نوع محصول از مهمترین عوامل مؤثر بر طراحی کارخانه و اعمال سیستم مهندسی تولید محسوب می شود. تغییرات شیمیایی و فیزیکی مواد اولیه، آماده سازی آنها و موقعیت های جغرافیایی منابع تأمین مواد، از پارامترهای مهم دیگر در طراحی کارخانه و نیازهای تولید آن به شمار می آیند. ارائه سیستم مهندسی تولید به طور کلی تابع مجموع عوامل فوق و همچنین سیستم های هدایت و مدیریت، قسمت های جنبی نظیر تعمیر و نگهداری، استفاده از تولیدات فرعی، مکانیسم حفاظت و دفع آلودگی ها و ... است. چنانچه عوامل و پارامترهای مؤثر به صورت عام و در یک مبحث کلاسیکی مطرح شود، سیستم مهندسی تولید نیز از عمومیت برخوردار شده و استفاده از آن در یک فعل، مهندسی تولید با توجه به شرایط اختصاصی تولید فروسیلیسیم در ایران (ازنا) تدوین و تألیف شده است. بدیهی است در تنظیم این فعل، مجموعه توضیح های علمی و کاربردی که در فصول قبل تشریح شده اند مورد استفاده قرار گرفته است و لذا امکان استفاده از آن به طور کلی و برای هر طرح دیگر نیز وجود دارد.

کارخانه تولید فروسیلیسیم ایران به منظور تولید سالیانه ۲۵ هزار تن ( ۲۰ هزار تن

*Fesi45* و ۵ هزار تن *Fesi45*) در ازنا واقع در استان لرستان و در مساحتی معادل

۵۰۰ هکتار طراحی شده است.

حجم مواد اولیه مورد نیاز بنابر اصول علمی و نیازهای طراحی شده به شرح زیر است:

۱- سیلیس ( کوارتز)، ۴۵ هزار تن در سال

۲- گندله سنگ آهن، ۱۰ هزار تن در سال

۳- کک، ۱۲ هزار تن در سال

۴- زغال سنگ، ۱۷ هزار تن در سال

۵- خمیر الکتروود، ۱/۵ هزار تن در سال

۶- پوسته الکتروود ( ورق فولاد)، ۰/۱۵ هزارتن در سال

مهمترین موضوع در سیستم مهندسی تولید هر واحد تولیدی، انتقال مواد در درون

کارخانه به طور منظم و بر اساس معیارهای کنترلی لازم، نیروی انسانی و ویژگی های

کنترلی کمی و کیفی آن است. درجه اتوماسیون در هر بخش و شرایط جنبی واحد

تولیدی می تواند انحرافهای منطقی مهندسی تولید را نسبت به واحدهای مشابه توجیه

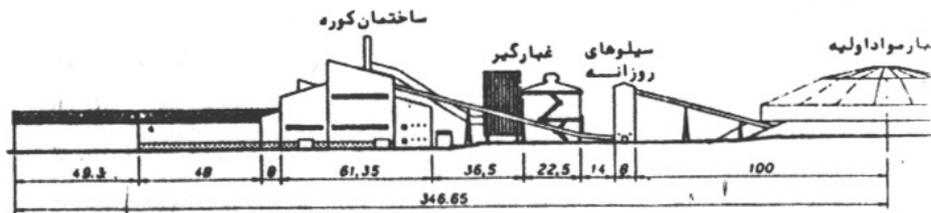
کند. کارخانه تولید فروسیلیسیم ( ازنا) به گونه ای طراحی شده است که حتی الامکان

در بخش های مربوط به انتقال مواد، ذوب، ریخته گری و غبارگیری از درجه

اتوماسیون نسبتاً بالایی برخوردار باشد و لذا سیستم مهندسی تولید، نیروی انسانی مورد

نیاز و کنترل های لازم، باید بر اساس چنین درجه ای ارائه شود.

در شکل ۱-۵ نمودار عمومی کارخانه نشان داده شده است.



شکل ۱-۵ نمودار عمومی کارخانه تولید فروسیلیسیم

هر چند احتمال تغییراتی در این نما وجود دارد ولی در هر حال، کلیات آن تغییرات

عمده ای نخواهد یافت. سیستم تولید «بدون توجه به آزمایشگاه ها و کنترل» به ۷

منطقه به شرح زیر تقسیم شده است:

منطقه ۱: کوره و بارگیری

منطقه ۲: انبار روزانه مواد

منطقه ۳: انبار ورودی

منطقه ۴: بارری و دانه بندی محصول

منطقه ۵: انبار محصول

منطقه ۶: غبارگیری

منطقه ۷: بسته بندی غبار

در ارائه سیستم مهندسی تولید، احاطه بر چگونگی انتقال مواد و تجهیزات در هر بخش یا منطقه ضرورت دارد و لذا در ادامه این فعل ابتدا مکانیسم انتقال مواد تشریح شده و سپس سایر ویژگی ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲-۵- تکنیک های علمی در پیشرفت فرآیند:

تولید فروسیسیسیم یک فرآیند حساس است که علاوه بر احاطه بر اصول علمی و تئوری بر تجربه طولانی و مهارت نیاز دارد. از آغاز به کار یک کوره تا مرحله پایداری سیستم ها و تغییرات عملی لازم و رسیدن به حد استاندارد مطلوب، معمولاً ۱ تا ۲ سال طول می کشد و از این رو ثبت تجربه ها و احاطه بر چگونگی عملیات به عنوان یک ضرورت مطرح است.

از آنجائی که این فرآیند با انجام واکنش های مختلف تجزیه، احیاء و ... همراه است، عوامل زیادی را می توان در پیشرفت هر یک از واکنش ها مؤثر دانست، ولی نمی توان انتظار داشت که شرایط بهینه ای برای پیشرفت کلیه واکنش های مورد نظر درون کوره ایجاد شود. با این حال برخی عوامل، تأثیر بیشتری بر عملکرد مناسب کوره دارند و با کنترل آنها می توان فرآیند را در جهت دلخواه هدایت نمود. این عوامل عبارتند از:

۱- ترکیب صحیح مواد خام

۲- موقعیت صحیح الکتروود

۳- جلوگیری از پل زدن شارژ و تنوره گازها

۴- بارگیری

### ۳-۵- ترکیب صحیح مواد خام

احیاء سیلیس به مقدار مشخصی کربن نیاز دارد. این مقدار برای هر تن سیلیس ۴۰۰ کیلوگرم کربن ثابت است و هر تغییر ناچیزی در ترکیب مواد خام به تدریج در عملکرد کوره مؤثر خواهد بود.

در حالت بیش کربنی *Over-coked*، سیلیسیم کار بید اضافه در کف کوره تشکیل شده و به علت بالا بودن هدایت الکتروود آن موقعیت الکتروودها در ارتفاع بالاتری تثبیت می شود. عملکرد کوره در ابتدا آرام است در صورتی که طول الکتروودها بیش از حد کوتاه نشود. با کوتاه شدن الکتروودها، درجه حرارت کف کاهش و درجه حرارت فوقانی افزایش یافته و مقدار بیشتری گاز *sio* تولید می شود. گاز *sio*، خوردگی بیشتر الکتروودها چسبناک شدن سطح شارژ و ایجاد تنوره را همراه دارد. حضور سیلیسیم کاربید به عنوان سدی برای خروج مذاب، عملیات بارگیری را مشکل و در پاره ای مواقع متوقف می سازد. برای رفع این مشکل باید سیلیسیم کاربید اضافی با

پیشرفت واکنش:  $sio+sic=2si+co$

از مجموع حذف شود. به منظور ایجاد شرایط مناسب برای پیشرفت این واکنش تدابیر زیر را میتوان اعمال نمود.

الف: تخلیه مدام مذاب

ب: افزایش دمای منطقه داخلی با پایین آوردن الکتروود

پ: افزایش مقدار آهن شارژ و کاهش اکتیویته سیلیسیم

در روش اخیر، عیار فروسیلیسیم موقتاً کاهش می یابد و به همین دلیل در اغلب موارد، فروسیلیسیم پر عیار همراه با فروسیلیسیم کم عیار در خط تولید قرار می گیرد ولی در حالت کلی این روش مورد توجه نیست.

پدیده کم کربنی در مخلوط شارژ، *under-coked* ازدیاد نسبی کوارتز و پایین رفتن الکتروودها نسبت به حالت عادی را در بر دارد.

این امر سبب می شود که مقداری  $SiO_2$  به صورت سرباره در مذاب باقی بماند. البته در صورتی که مقاومت کاری کوره کم باشد، حرارت کافی برای انجام واکنش:



ایجاد شده و مقدار *SiO* در گاز خروجی افزایش و سرعت تولید کاهش می یابد. بالا بودن میزان *SiO* و سرد بودن نسبی سطح شارژ (به دلیل پایین رفتن الکتروودها) واکنش چگالش را افزایش می دهد. انجام این واکنش که گرمازا است سبب چسبناک شدن سطح شارژ و ایجاد تنوره می شود. وجود شرایط سرباره ای در مذاب و در اطراف الکتروودها موجب ناپایداری تجهیزات کوره می شود. تصحیح این حالت با افزایش مواد احیا کننده و کاستن مقاومت کاری کوره و حذف *SiO* اضافی از منطقه واکنش امکانپذیر است. انحراف مقدار کربن از حد بهینه موجب کاهش بازیابی سیلیسیم و افزایش مصرف انرژی (به ازای هر یک درصد انحراف،  $200 \text{ kwh/t}$ ) می شود.

حداقل مصرف انرژی در صورت بازیابی کامل سیلیسیم ( $kwh/t$  ۷۷۰۰) در حالتی

است که فاکتور کربن (نسبت کربن ثابت واقعی به کربن ثابت تئوریک) برابر ۱/۰

باشد. با توجه به جداول ۱-۵ مشاهده می شود که کم کربنی و بیش کربنی نتایج

ظاهری یکسانی دارند و در نتیجه برای کنترل مقدار کربن همواره باید موقعیت الکترو

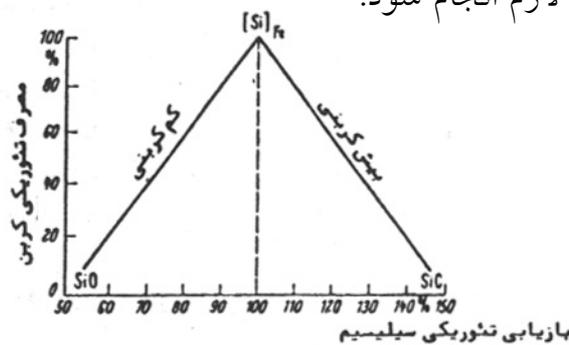
و دمای سطح شارژ کنترل شود. همچنین پدیده کم کربنی به دلیل ناپایداری تجهیزات

کوره از ابتدا مشخص است.

نظر به اینکه هرگونه تغییرات در شارژ تا رسیدن به منطقه ذوب باید زمان معینی را طی

نماید، لذا نسبت شارژ باید به طور دقیق کنترل شود و با تغییر نوع مواد اولیه و میزان

رطوبت آن تصححات لازم انجام شود.



شکل ۲-۵ مقایسه تغییرات کربن در بازیابی سیلیسیم

کم کربنی	بیش کربنی	اثرات
↙ ↘	↙ ↘	بازیابی سیلیسیم
↙ ↘	↙ ↘	مصرف انرژی
↙ ↘	↙ ↘	اردهای الکترو
↙ ↘	↙ ↘	دمای سطح شارژ
↙ ↘	↙ ↘	چسبندگی شارژ (پل زدن)
↙ ↘	↙ ↘	مخاطبات بارگیری
(بدلیل تشکیل $SiO_2$ )	(بدلیل تشکیل $SiC$ )	

جدول ۱-۵ مقایسه ویژگی های بیش کربنی و کم کربنی

در حالت کلی نسبت کربن ثابت عملی به کربن محاسبه شده، به دلیل مکانیسم های تلفاتی و یا حضور کربن از منابعی غیر از مواد احیاء کننده بر حسب نوع و شرایط کوره متفاوت و در حدود ۰/۹ تا ۱/۲ گزارش شده است. گاهی حتی در صورت صحیح بودن ترکیب شارژ، عدم ورود مقدار حرارت کافی به حفره واکنشی، سبب می شود که واکنش میان *sio* و *sic* به طور کامل انجام نشود. حتی  $Al_2O_3$  و *cao* نیز می توانند به طور احیاء نشده در سرباره باقی بمانند و اگر درجه حرارت خیلی پایین باشد بارگیری کامل انجام نشده و سرباره و سیلیسیم کاربید در کف کوره رسوب می کند که در این حالت باید نسبت به تصحیح مقاومت کاری کوره اقدام کرد.

#### ۴-۵- موقعیت الکتروود:

موقعیت الکتروود به دلیل تأثیری که بر کلیه پارامترهای الکتریکی و توزیع حرارت در کوره دارد، نقص مهمی در فرآیند بازده می کند. موقعیت صحیح الکتروود با توجه به طراحی اولیه و بر اساس ویژگی های مواد اولیه انتخاب می شود. بنابراین با تغییر کیفیت مواد خام (بخصوص مقاومت الکتریکی آنها) باید موقعیت صحیح الکتروود را تعیین نمود. کنترل موقعیت الکتروود به منظور ثابت نگه داشتن پارامترهای الکتریکی، معمولاً به طور اتوماتیک انجام می شود، ولی در هنگام بروز مشکلاتی که نیاز به کاهش بار کوره و یا تغییر در توزیع حرارت داخل کوره باشد، کنترل دستی نیز اعمال می شود. ابزار موقعیت الکتروود دستگاه لغزاننده است. لغزش الکتروود باید به طور منظم

و یا گام های کوتاه انجام شود. زیرا لغزش بلند در فاصله زمانی کوتاه باعث آشفستگی

مناطق حرارت پایدار در الکتروود می شود.

گاه سرعت مصرف الکتروود، به دلیل مختلف نظیر کم کربنی، شکستگی نوک الکتروود و

اختلالات حرارتی در داخل کوره، از سرعت پخت آن بیشتر می شود. چنانچه استفاده

از حداکثر سرعت لغزش مجاز قادر به تصحیح فرآیند نشود. ابتدا باید جریان را تا حد

تحمل پوسته فلزی الکتروود کاهش و سپس با استفاده از یک لغزش بلند و یا افزایش

تعداد گام ها، ارتفاع الکتروود را به اندازه طبیعی رسانیده پس از اعمال چنین لغزش

هایی به تدریج جریان را تا رسیدن به بار کامل افزایش می دهند. در غیر این صورت

امکان ایجاد ترک و شکست در الکتروود وجود دارد.

### جلوگیری از تنوره:

تمرکز خروج گازها از قسمت هایی از سطح شارژ که با لوله ای شدن شارژ همراه

است. تنوره، *bioding* می نامند. ایجاد تنوره مهم ترین نشانگر کاهش بازیابی

سیلیسیم، افزایش مصرف انرژی و کاهش راندمان تولید است. تشکیل گاز *sio* بیش از

حد متعارف و داغ و چسبانده بودن سطح شارژ مهم ترین عوامل ایجاد تنوره هستند و

لذا کنترل عملی با توزیع یکنواخت گازهای خروجی در سطح شارژ و افزایش زمان

حضور و سطح تماس گازها با مواد شارژ صورت می گیرد. برای رسیدن به این هدف،

سیخ زدن و یکنواخت کردن سطح شارژ از بین بردن مواضع تنوره ضروری است.

چگونگی سیخ زدن بستگی به شرایط سطح فوقانی شارژ داشته و برنامه ثابتی ندارد. اگر شرایط کوره مطلوب باشد، رانش شارژ به اطراف الکتروود کافی است. ولی در برخی مواقع که تنوره در سطح پایین کوره ایجاد شده باشد. سیخ زدن عمیق نیز باید انجام شود. سیخ زدن عمیق ممکن است باعث تخریب حفره واکنش و دخول شارژ جامد در مذاب شود و از اینرو به خصوص هنگام بارگیری باید از آن اجتناب کرد. برای افزایش زمان حضور *sio* معمولاً سطح شارژ با لبه کوره تراز و با مصرف مواد خام و با انتخاب تناوب، صحیح باردهی و تغییرات ضروری، آن را ثابت نگاه می دارند.

چرخش کوره نیز به یکنواختی و تخلخل شارژ کمک می کند. البته هدف اصلی چرخش، شکستن گوشه های حفره واکنش و از بین بردن پوسته های ایجاد شده درون کوره است، تا مواد شارژ امکان حرکت به پایین را داشته باشند. در شرایط طبیعی سرعت چرخش حداقل بوده و در هر دور چرخش ۳۰۰ ساعت طول می کشد. ولی در صورت نامطلوب بودن مواد شارژ و تشکیل سریع تر مواد چسبنده سرعت چرخش را می توان افزایش داد.

### بارگیری:

در برخی فرآیندها نظیر تولید چدن، وجود مذاب به عنوان عاملی برای کنترل واکنش ضروری است، در حالی که در فرآیند تولید فروسیلیسیم، تشکیل مذاب فروسیلیسیم به

عنوان پایان تمام واکنش ها محسوب شده و لذا تجمع مذاب در کف کوره را می توان

به عنوان پدیده منفی در:

الف) افزایش دمای سطح شارژ

ب) ایجاد تنوره از طریق افزایش *sio*

پ) بالارفتن الکترودها

محسوب نمود. بدیهی است در هر کوره، تناوب بارگیری معینی وجود دارد که دقیقاً

باید رعایت شود. کاهش زمان بارگیری، موجب می شود که مذاب به اندازه کافی

وجود نداشته و لذا فرآیند کنترلی در بارریزی دچار اختلال شود. در حالی که افزایش

زمان بارگیری، علاوه بر مسائل پیش گفته شده، مجدداً باعث اختلال در سیستم های

بارگیری و بارریزی می شود. فواصل بارگیری در یک فرآیند مشخص معمولاً کوتاه و

از ۱ تا ۲ ساعت تجاوز نمی کند و سیستم های بارگیری مداوم به عنوان یک عامل

مؤثر در افزایش راندمان کوره و کاهش مصرف انرژی، تحقیقات کاربردی وسیعی را به

خود اختصاص داده است و از مزایای آن کاهش مصرف انرژی به میزان  $400 \text{ Kwh/t}$

نسبت به بارگیری تکباری به تناوب  $1/5$  ساعت گزارش شده است.

به منظور کنترل علمی بارگیری، نحوه بازکردن دهانه بارگیری اهمیت داشته و شامل

یک یا چند مرحله زیر است:

الف) روش مکانیکی با استفاده از دریل و چکش برای قسمت های خارجی

ب) روش الکتریکی و ایجاد قوس به منظور بازکردن قسمت های درونی

ج) روش شیمیایی به دمش اکسیژن و سوزاندن، استفاده از اکسیژن به دلیل امکان واکنش با مواد جداره کوره محدودیت دارد.

در هنگام بازکردن دهانه، جهت و زاویه آن از اهمیت زیادی برخوردار بوده و باید از ایجاد سوراخ های جدید جلوگیری شود. قطر دهانه با توجه به حجم مذاب حدود ۸-۱۰ سانتی متر است. برای بستن سوراخ نیز معمولاً از توپ های کربنی و یا کربنی-شاموتی استفاده می شود. مخلوط توپی حاوی مقادیری آب است که باید هنگام جاگذاری، آن را طوری خشک کرد که سطح آن کاملاً خشک شده ولی قسمت داخلی آن دارای پلاستیسیته لازم است.

اگر عملکرد کوره خوب باشد بارگیری به راحتی انجام می شود ولی در صورت تشکیل سربازه بخصوص حضور *sic* سوراخ کردن دهانه و بارگیری مشکل خواهد بود و حتی در پاره ای مواقع به استفاده از مواد منفجره نیاز است.

### توقف کوره:

در خلال کار کوره، به دلایلی مانند قطه برق، شکست الکتروود، تعمیرات و ... امکان توقف کوره وجود دارد. بدیهی است که هر توقف کاهش تولید را در بر خواهد داشت ولی نکته مهمتر، ایجاد تنش های حرارتی در الکتروود و جداره نسوز کوره است که ممکن است پی آمدهای شدیدتری را به دنبال داشته باشد. برای جلوگیری از ایجاد

تنش های حرارتی، ارائه قواعد عمومی مشکل است. برای جلوگیری از ایجاد تنش های حرارتی، ارائه قواعد عمومی مشکل است و روش کار به توجه به شرایط کاری، مدت توقف، آگاهی از زمان و توقف و ... متغیر است. معمولاً توقف های کمتر از ۳ ساعت مشکل چندانی ایجاد نمی کند و به همین دلیل همواره چندین توقف کوتاه بر یک توقف بلند ترجیح داده می شود. توصیه های زیر را نیز می توان هنگام توقف به کار گرفت در هر صورت قبل از قطع کامل جریان برق، تخلیه کامل کوره از مذاب الزامی است.

### **توقف های پیش بینی شده:**

در این حالت توقف کوره از قبل برنامه ریزی و زمانبندی شده است و با توجه به زمان توقف می توان احتیاط هایی را قبل از توقف اعمال کرد.

#### **الف) توقف های کمتر از ۳ ساعت**

در توقف های کوتاه مدت تنها کنترلی که باید انجام شود اطمینان از موقعیت نگهدارنده الکتروود است که باید ۵۰۰ میلی متر بالاتر از حد پائینی خود قرار داشته باشد. پس از قطع جریان نیز بلافاصله باید الکتروودها ۳۰۰-۲۵۰ میلی متر پایین رفته و با شارژ گرم موجود در کوره پوشانده شوند.

(ب) توقف های بین ۳-۸ ساعت

در توقف های بیش از ۳ ساعت احتمال شکست الکتروود افزایش می یابد و لذا باید در حد امکان از آن جلوگیری کرد. ولی در صورتی که چنین توقفی ضروری باشد نکات زیر قبل از توقف رعایت می شود.

۱- در دو شیفت قبل از توقف، سرعت لغزش باید تا ۵۰ درصد حالت عادی کاهش یافته تا موقعیت نگهدارنده ها پایین آمده و طول الکتروود در کوره کاهش یابد. در هنگام قطع جریان، نگهدارنده اه باید در پایین ترین موقعیت قرار گیرند.

۲- سطح شارژ در اطراف الکتروودها در ۸ ساعت قبل از توقف پایین آورده شود.

۳- الکتروودها بلافاصله پس از قطع جریان به پایین ترین موقعیت خود لغزانده شوند.

۴- اطراف الکتروودها تا بالای گیره های اتصال با شارژ داغ کوره پوشانده شود.

(پ) توقف های بین ۸-۲۴ ساعت

در این حالت کوره نسبتاً سرد می شود و تنش های حرارتی بیشتری ایجاد می شود. بنابراین روند عملیات با روش های قبلی تفاوت داشته و اعمال زیر توصیه شده است.

۱- در ۲-۳ شیفت آخر قبل از توقف باید سرعت لغزش کم شود تا نگهدارنده الکتروود در پایین ترین موقعیت خود قرار گیرد.

۲- توان کوره در ۵ ساعت قبل از توقف باید به نصف رسانده شود، این عمل باید به

کمک تغییر پله های ولتاژ و بدون حرکت دادن زیاد الکترودها انجام شود. علاوه بر

این باید ارتفاع شارژ در اطراف الکترودها را نیز کاهش داد.

### توقف های غیر منتظره

اگر خاموش کردن کوره بدون برنامه قبلی لازم شود و مدت توقف نیز بیش از ۳

ساعت باشد رعایت موارد زیر الزامی است:

۱- بلافاصله پس از قطع جریان، الکتروود باید به پایین ترین موقعیت خود لغزنده شود

و سپس اطراف آن تا گیره های اتصال توسط شارژ گرم پوشانده شود.

۲- شروع به کار مجدد کوره در این حالت مانند توقف های پیش بینی شده است.

### راه اندازی مجدد بعد از توقف کوره

برنامه افزایش توان پس از توقف کار کوره، به مدت زمان توقف و ابعاد کوره بستگی

دارد. برای کوره های با الکتروودهای به قطر ۱۶۰۰ میلی متر روش های زیر پیشنهاد می

گردد:

الف) راه اندازی مجدد کوره پس از توقف های کمتر از ۳ ساعت

بعد از شروع به کار مجدد، باید بار کوره را هر چه سریع تر به بار متناسب با حدود

$100KA$  بالا برد. مدت زمانی که برای افزایش بار کوره از  $100KA$  تا رسیدن به بار

کامل ( *Full Load* ) صرف می شود باید حدود نصف مدت زمان توقف کار کوره

باشد و باید این افزایش به طور یکنواخت انجام شود.

ب) راه اندازی مجدد کوره پس از توقف های بین ۳ تا ۸ ساعت

بعد از شروع به کار مجدد، باید بار کوره را به سرعت به بار متناسب با  $80-85KA$  بالا

برد. از این حالت تا رسیدن به حالت بار کامل باید تقریباً نصف زمان توقف کوره طول

بکشد. ضمناً افزایش بار کوره باید یکنواخت باشد.

پ) راه انداز مجدد کوره پس از توقف های بین ۸ تا ۲۴ ساعت

بعد از شروع به کار مجدد، بار کوره باید به سرعت به بار متناسب با  $80-85KA$  بالا

برده شود، سپس تا رسیدن به جریان  $105KA$ ، باید به کمک پله های ولتاژ

ترانسفورماتور در هر ساعت  $2/5KA$  جریان الکتروود بالا برده شود. از  $105KA$  تا

رسیدن به حالت بار کامل باید جریان الکتروود در هر ساعت  $5KA$  افزایش داده شود. به

طور کلی مدت زمان بازگرداندن کوره به حالت بار کامل حدوداً نصف زمان توقف

کوره است.

با توجه به آن که قبل از توقف کوره، الکتروودها با لغزش های کوتاه به پایین رانده شده

اند در نتیجه طول الکتروودها در زیر سطح شارژ کوتاه تر از حالت طبیعی است. پس از

شروع به کار مجدد کوره باید سرعت لغزش افزایش یابد. برای دست یابی به موقعیت

صحیح و مناسب الکترودها، سرعت لغزش معادل  $1/5$  برابر سرعت طبیعی پیشنهاد شده است.

ت- راه اندازی مجدد کوره پس از توقف های بیش از ۲۴ ساعت  
برای شروع به کار مجدد کوره پی از توقف نسبتاً طولانی باید جریان الکتروود تا حد امکان سریعاً به  $50KA$  رسانده شود و سپس در هر ساعت  $5KA$  به جریان افزوده شود تا اینکه به  $85KA$  برسد. پس از آن و تا رسیدن به بار کامل در هر ساعت  $2/5KA$  به جریان الکتروود اضافه می گردد. در حالت کلی زمان رسیدن به بار کامل باید کمتر از نصف مدت زمان توقف باشد.

در توقف های طولانی، امکان منجمد شدن و چسبیدن شارژ به سطح الکتروود وجود دارد، بنابراین تا زمانی که اطمینان از رها شدن الکتروود از شارژ وجود ندارد نایستی لغزش الکتروود انجام پذیرد.

ث- راه اندازی مجدد کوره سرد  
چنانچه کوره برای مدتی طولانی (مثلاً چند ماه) خاموش و تمامی قسمت های آن کاملاً سرد شد، باید سطح شارژ را حفر کرد تا امکان دسترسی به کف کوره وجود داشته باشد. در چنین کوره ای باید ذخیره کافی حرارتی در سطح دهانه های بارگیری کوره ایجاد گردد. در بسیاری از موارد، پرکردن حفره های تشکیل شده در زیر الکترودها توسط کک، به منظور برقراری اتصال الکتریکی کافی به نظر می رسد.

در ضمن حرارت دادن مجدد، باید الکتروودها تا حد امکان پایین نگهداشته شود تا درجه حرارت کف کوره برای بارگیری مناسب شود. تا زمانی که بارگیری مذاب کوره عادلانه نشده است نباید شارژ جدیدی به کوره اضافه شود. تحت این شرایط برای رسیدن به حالت عادی حداقل یک هفته وقت لازم است.

نکات مطرح شده در رابطه با راه اندازی کوره برای اولین بار، تا حدود زیادی در این مورد نیز مصداق دارد. در هنگام شروع به کار مجدد کوره، پس از توقف بلند مدت، باید دستور العمل های زیر را در نظر گرفت:

۱- کوره به منبع جریان الکتریکی متصل شود. پس از توقف های طولانی به منظور

شروع به کار با ولتاژ پایین، ترانسفورماتورها باید به حالت ستاره / مثلث وصل شود.

۲- الکتروودها آن قدر پایین برده شوند تا عقربه های آمپر متر شروع به حرکت کنند.

برای این امر فقط قسمتی از بار عادی نیز کافی خواهد بود. بار کوره بدون آن که

الکتروودها پایین تر برده شوند به سرعت افزایش خواهد یافت.

۳- به محض آن که تشخیص داده شود که محصول مذاب به اندازه کافی در کف کوره

تجمع یافته است بایستی بارگیری های منظم و سریع انجام پذیرد.

۴- زمانی که کوره به بارکاری رسید، باید کنترل کوره به صورت اتوماتیک انجام شود.

هنگامی که از یک توقف چند ساعته رخ می دهد، بهترین موقعیت برای پرسنل واحد

تعمیر و نگهداری است تا به تعمیرات جزئی و بازرسی تجهیزات پردازند.

## ۵-۵- تغییر رژیم کوره

همانگونه که در مباحث قبل توضیح داده شده در بسیاری موارد به دلیل تولید سیلیسیم کاربرد، تغییر رژیم کوره از تولید فروسیلیسیم ۷۵ درصد به ۴۵ درصد ضروری است. پس از حذف و یا کاهش سیلیسیم کاربرد برگشت به تولید عادی نیز الزامی است. در اغلب موارد، حتی بدون تولید سیلیسیم کاربرد در کوره، تغییرهای ترکیبی محصول در قسمت برنامه تولید نیز پیش بینی می شود. تغییر رژیم کوره از تولید فروسیلیسیم ۷۵ درصد به ۴۵ درصد و برعکس عموماً در مدت ۲ روز انجام می گیرد. در حالی که حذف سیلیسیم کاربرد ضروری باشد زمان تغییر رژیم به طور مناسب افزایش می یابد. در هر مورد قبل از تغییر رژیم، با دهی کوره متوقف می شود تا سطح شارژ در حد مناسب پایین نگاهداشته شود. در این حال پس از ذوب جداره محفظه واکنش شارژ جدید با نسبت های بیشتری از آهن یا سیلیسیم باردهی می شود تا زمان تبدیل به اندازه کافی کوتاه شود. تغییرات دمایی معمولاً با تغییر مناسب نسبت کک و بر اساس محاسباتی که در فعل دوم ذکر گردید انجام می شود. تغییرات تدریجی نسبت شارژ و دستیابی به زمان مناسب تولید مطلوب و مقاومت کاری بهینه بر حسب شرایط کوره، نوع مواد مصرفی و اعمال کنترل های خاص بر هر کوره و از طریق محاسباتی عملی اولیه و تجربه بدست می آید.

تغییر رژیم از فروسیلیسیم ۷۵ به ۴۵ عموماً باعث کاهش دمای گازهای و گرد و غبار خروجی کوره است. کاهش دمای کوره از حالت معمولی ( $200^{\circ}\text{C}$  -  $250^{\circ}\text{C}$ ) عموماً می تواند زیان های زیر را حاصل نماید.

۱- بالا رفتن چگالی غبار که متعاقب آن میزان مصرف انرژی برای انتقال غبار از درون مجاری و فیلترها افزایش می یابد.

۲- درجه حرارت پایین غبار در حدود بالاتر از  $100^{\circ}\text{C}$  ممکن است باعث چگالش و تجمع غبار و همچنین خوردگی و کوتاه کردن عمر تجهیزات فیلتر گردد.

۳- در صورتی که درجه حرارت گازها و گرد و غبار بیش از حد پایین باشد غبار سرد ایجاد خواهد شد که حمل و نقل بسیار مشکل است. غبار سرد در عین حال موجب بسته شدن (*Clogging*) مجاری واحدهای بستر شناور، لوله و اتصالات می گردد.

برای اجتناب از مشکلات فوق و کنترل درجه حرارت در حد پذیرش می توان لوله های خنک کننده (*U-Tube Cooler*) را مسدود کرده و بدین ترتیب درجه حرارت را تقریباً ثابت نگاه داشت.

## فصل ششم: الکتروود

### ۱-۶- مقدمه

الکتریکی از مهمترین اجزاء یک کوره قوس الکتریکی است و وظیفه آن هدایت جریان الکتریکی به فضای کاری کوره و ایجاد قوس الکتریکی با الکتروودهای دیگر و یا با کف کوره است تا حرارت لازم برای ذوب و انجام واکنش های شیمیایی حاصل شود. با توجه به مکانیسم هدایت جریان الکتریسیته از الکتروود، مشخص می گردد که خواص فیزیکی و مکانیکی الکتروود نظیر، چگالی و فشردگی دانه بندی ذرات الکتروود و استحکام آن، همچنین خواص شیمیایی آن نظیر حضور ناخالصی ها، مواد چسبنده و ... در خواص هدایتی و کاربردی الکتروود تأثیر به سزائی دارند. از این رو الکتروودها باید خواص عمومی زیر را داشته باشند:

- ضریب هدایت حرارتی بالا

- مقاومت مکانیکی مناسب

- درجه حرارت اکسیده شدن بالا

- مقاومت در مقابل تجزیه و تلاشی

- هزینه های اقتصادی پایین

از ابتدای ساخت کوره های قوسی، مواد کربنی و گرافیتی کاربرد وسیعی در تهیه الکتروود پیدا کرده اند. کربن ( گرافیت ) با ضریب مقاومت الکتریکی نسبتاً پایین،

پایداری در دماهای بیش از  $2000^{\circ}C$  و مقاومت نسبی در مقابل ترکیب با بسیاری از

فلزات، ماده اولیه مناسبی جهت ساخت الکترودها محسوب می شود. به طور کلی

خواص فیزیکی - شیمیایی الکترودهای گرافیتی به شرح زیر گزارش شده است.

۱-۱۰	- مقدار خاکستر، درصد
۱/۵-۱/۷	- چگالی ظاهری، $g/cm^3$
۸-۱۲	- مقاومت الکتریکی $\mu\Omega m$
۱۶۰-۳۰۰	- مقاومت مکانیکی، $Kg/cm^3$

بنابر توضیحات فوق، علاوه بر خواص فیزیکی و شیمیایی، شکل الکتروود از نظر

هندسی نیز باید به گونه ای انتخاب شود که مکانیسم انتقال و اتصال میان گیره های

اتصال و الکتروود به خوبی انجام شود. به همین دلیل و همچنین به جهت کاستن نسبت

محیطی، الکترودهای با مقاطع دایره (الکتروود استوانه ای) ترجیح داده می شود.

برای ساخت الکتروود، مواد حاصل کربن (آنتراسیت، کک و یا گرافیت) پس از

بازسازی اولیه، خرد و دانه بندی می شوند. مواد دانه بندی شده در یک مخلوط کن با

مواد چسبنده (نظیر قیر و قطران) مخلوط شده و در قالب هایی به شکل مورد نظر

پخته می شوند. پس از خشک شدن، الکتروود خام پخته می شود. مراحل ساخت

الکتروود در شکل ۱-۶ مشاهده می شود.

از ابتدای کاربرد کوره های قوسی در صنایع، الکترودهای پیش پخته نیز تولید شده و مورد استفاده قرار گرفته اند. ولی با افزایش اندازه کوره ها و متعاقب آن افزایش اندازه الکترودها نیاز به خواص ویژه و هزینه های حمل و نقل، الکترودهای پیش پخته نمی توانستند پاسخگوی نیاز باشند. تا اینکه در سال ۱۹۱۹ میلادی نوع جدید الکتروود که در حین کار با کوره آماده و پخته می شود، طراحی شد. طراح این نوع الکتروود، شخصی بنام زودر برگ ( *Soderberg* ) بود و الکترودها نیز با نام الکترودهای خود پز یا زودر برگ معروف شده اند. در حال حاضر الکترودهای زودر برگ به مقیاس وسیعی در کوره های بزرگ و در مواردی که ورود مقادیر کمی آهن به محصول نهایی مجاز باشد، مورد استفاده قرار می گیرند. زیرا این الکترودها دارای پوسته فولادی هستند که در ضمن کار ذوب شده و وارد محصول می شود.

از سال ۱۹۷۰ در فرآیندهای سربازه ای ( نظیر تولید فروکروم) الکترودهایی به قطر ۲۰۰۰ میلی مترو در فرآیند تولید فروسیلیسیم، الکترودهایی به قطر ۱۸۰۰ میلی متر به کار رفته اند. چنین الکترودهایی قادر هستند جریان بیش از ۱۵۰ کیلوآمپر و درجه حرارت بیش از  $2000^{\circ}C$  را تحمل کنند.

## ۲-۶- الکترودهای زودر برگ

مزایای الکترودهای زودر برگ عبارتند از:

۱- قیمت کمتر در مقایسه با الکترودهای پیش پخته

۲- امکان ساخت الکترودهای قطورتر و با ویژگی های مورد نظر

۳- افزودن الکتروود جدید بدون قطع جریان الکتریکی

۴- امکان ساخت در محل و کاهش هزینه های حمل و نقل

این الکتروودها از دو جزء تشکیل شده اند:

الف) پوسته فولادی

ب) خمیر کربنی

بنابراین مکانیسم انتقال جریان، تابع شرایط پوسته فولادی و خمیر کربنی است.

تغییرات هدایت الکتریکی پوسته فولادی و خمیر کربنی نسبت به درجه حرارت، در

شکل ۲-۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش درجه حرارت، هدایت

الکتریکی فولاد کاهش یافته ولی هدایت الکتریکی کربن افزایش می یابد. پوسته

فولادی الکتروود ورق نازکی است که حدود  $\frac{1}{75}$  سطح مقطع الکتروود است. با توجه به

سطح مقطع نسبی پوسته و خمیر، در دمای  $750^{\circ}C$ ، از هر دو این اجزاء جریان

مساوی عبور می کند. در دمای  $1400-1200^{\circ}C$  پوسته، با کاهش شدید هدایت

الکتریکی روبرو شده و به تدریج ذوب می شود، در حالی که در این دما، کربن تبدیل

به یک رسانای قوی شده، که به تنهایی قادر به حمل جریان است.

## الف- پوسته الکتروود

پوسته الکتروود یک استوانه فولادی تو خالی است که بر روی محیط داخلی آن پره هایی در جهت شعاعی قرار گرفته اند. در الکتروودهای بزرگ، برای تقویت پره ها میلگردهای فولادی نیز به گوشه داخلی پره ها جوش داده می شود.

وظایف پوسته فولادی به شرح زیر است:

۱- قالب اولیه برای شکل دادن خمیر الکتروود

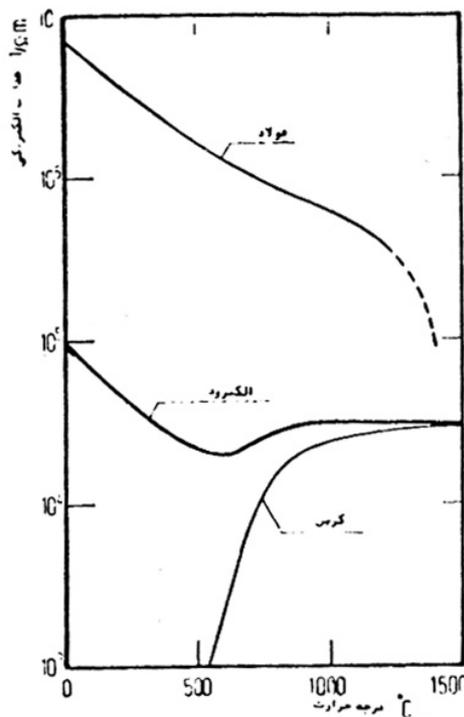
۲- تحمل وزن الکتروود تا پخت کامل

۳- انتقال جریان الکتریکی به داخل الکتروود در مراحل پخت

۴- رابط میان الکتروود و سیستم نگهدارنده

۵- عمل کردن به عنوان المان حرارتی برای پخت الکتروود

۶- حفاظت خمیر کربنی از اکسید شدن



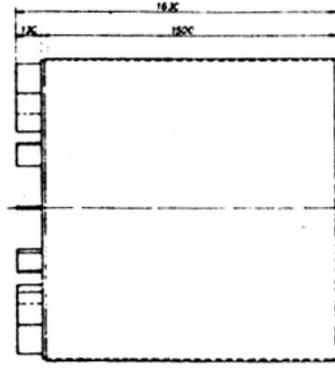
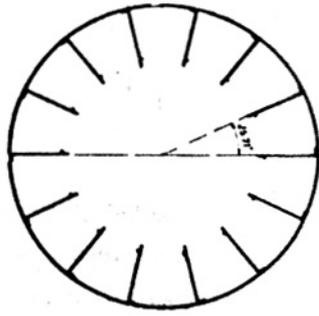
شکل ۲-۶ هدایت الکتریکی الکتروود نسبت به درجه الکتروود

در طراحی پوسته و انتخاب مقاطع مناسب، باید وظایف آن را مدنظر داشت. پوسته باید به گونه ای طراحی شود، تا بتواند تمام جریان را با داشتن استحکام کافی انتقال دهد. شدت جریان مطمئن برای فولاد  $2/5 A/mm^2$  است.

پوسته الکتروود با مصرف الکتروود به قسمت فوقانی جوش داده می شود. برای ساخت پوسته معمولاً از ورق فولاد به ضخامت ۱ تا ۳ میلی متر استفاده می شود. پس از کرد کردن ورق، مقدار لازم پره ها، که به قطر الکتروود بستگی دارد. به آن جوش داده می شود. پره ها، سطح تماس پوسته فولادی و خمیر کربنی را افزایش داده و وظایف الکتریکی و مکانیکی مشخصی را بر عهده دارند. از طرفی باید جریان الکتریکی را به داخل الکتروود حمل کرده و همچنین به عنوان المان حرارتی به پخت الکتروود کمک کنند. از طرف دیگر خمیر الکتروود، با گرم شدن، سیلان یافته و در ضمن پخت انقباض پیدا می کند. بنابراین باید توسط پره ها نگه داشته شود. برای اینکه میان خمیر و پره های لغزشی صورت نگیرد. سوراخ هایی در روی پره ها تعبیه می شود.

در اتصال الکتروودها و جوشکاری آنها، باید به نحوه جوشکاری، استحکام و نوع مواد جوش توجه کافی معطوف داشت. زیرا ناهمگنی در مقاطع جوش باعث تغییر خواص الکتریکی و کاربردی الکتروود نیز توصیه شده است.

در شکل ۳-۶ پوسته یک الکتروود به قطر  $160.0mm$  نشان داده شده است.



شکل ۳-۶ پوسته یک الکترود به قطر  $1600\text{mm}$

### ب- خمیر کربنی

خمیر کربنی جزء اصلی الکترود است که پس از ذوب پوسته فولادی وظیفه حمل

جریان به محفظه واکنش و ایجاد قوس الکتریکی را بر عهده دارد.

این خمیر مخلوطی از ۷۵-۸۰ درصد مواد کربنی نظیر آنتراسیت، کک متالورژیکی،

کک نفتی و ... و ۲۰-۲۵ درصد چسب مانند قیر، قطران یا *Antracit oil* است.

بهترین ماده ای که در حال حاضر برای ساخت الکترود، استفاده می شود آنتراسیت

کلسینه شده با مشخصات زیر است:

گوگرد: ۰/۶ درصد

خاکستر: ۶ درصد ( ۴۳ درصد  $SiO_2$  ، ۲۰ درصد  $Fe_2O_3$  ، ۳۰ درصد  $Al_2O_3$  ،

۳ درصد  $CaO$  ، ۲ درصد  $MgO$  )

کربن ثابت: ۹۲ درصد

مقاومت الکتریکی:  $550\ \mu\Omega m$

قیر مورد استفاده به عنوان چسب نیز باید مشخصات زیر را داشته باشد:

درجه حرارت نرم شده:  $60-70^{\circ}C$

حداکثر کربن آزاد: ۲۸-۲۰ درصد

حداکثر خاکستر: ۰/۳ درصد

حداکثر رطوبت ۰/۵ درصد

مواد فرار: ۶۵-۶۰ درصد

برای تهیه الکتروود، آنتراسیت پس از کلسینه الکتریکی، خرد و دانه بندی می شود.

سپس در مخلوط کن با چسب مخلوط شده و به اشکال مختلف ریخته می شود. در

شکل ۴-۶ نمودار تولید خمیر الکتروود نشان داده شده است.

خمیر الکتروود در شکلهای مختلف تهیه و استفاده می شود. در حال حاضر استفاده از

خمیرهای به شکل استوانه، مکعب و بریکت معمول است. استفاده از شکل های

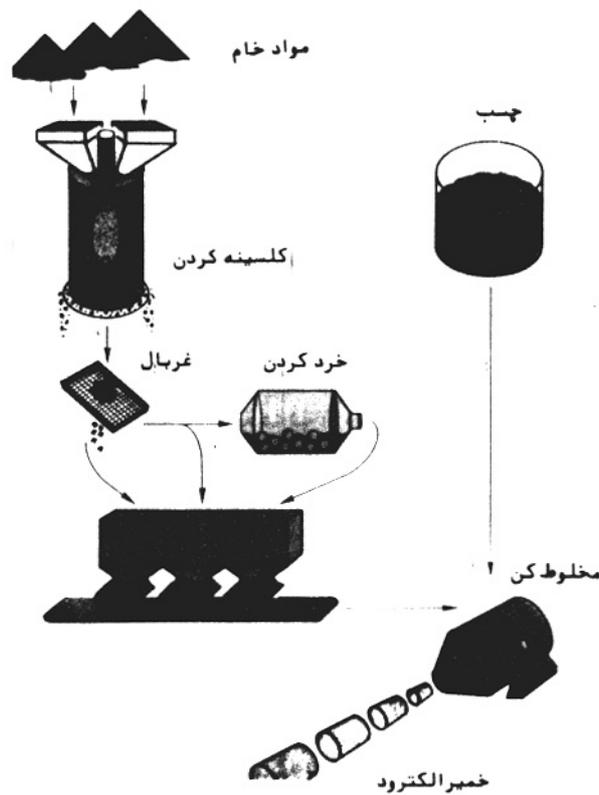
کوچک نظیر بریکت، هر چند از نظر راحتی در هنگام شارژ مناسب هستند، ولی به

دلیل امکان آلودگی، ذخیره سازی آنها مشکل است. در نگهداری و حمل و نقل خمیر

الکتروود باید دقت شود که هیچ ناخالصی و آلودگی با آن مخلوط نشود. زیرا هنگام

پخت، کیفیت آن را کاهش می دهد. برای جلوگیری از آلودگی، باید آنها را در

انبارهای سرپوشیده و تمیز نگهداری نمود.



شکل ۴-۶ نمودار تولید خمیر الکتروود

### ۳-۶- خواص خمیر الکتروود:

خمیر الکتروود باید حاوی خاکستر به میزان کمتر از ۱۰ درصد و مواد فرار به میزان ۱۴ تا ۱۸ درصد باشد. در این حال ناخالصی های ترکیبی آن در حداقل مقدار ممکن باشد. خواص خمیر عموماً در دو مرحله، قبل و بعد از پخته شدن مورد توجه قرار می گیرد. قبل از پخته شدن مهم ترین خاصیت خمیر، سیلان آن است. این نکته اهمیت زیادی دارد که خمیر در دماهای مورد نظر، سیلان مناسبی داشته باشد و بتواند تمام منافذ پوسته فولادی الکتروود را پر کند. پلاستیسیته خمیر به عنوان معیار سیلان با تنظیم مقدار چسب، هنگام تولید خمیر، کنترل می شود.

بعد از پخته شدن، الکتروود باید دارای خواص زیر شود:

۱- مقاومت الکتریکی پایین

۲- استحکام مکانیکی بالا

۳- مدول یانگ پایین

۴- ضریب انبساط حرارتی کم

۵- ضریب هدایت حرارتی بالا

مقاومت الکتریکی و هدایت حرارتی از نظر تولید و توزیع حرارت در الکتروود (توزیع

دمایی) اهمیت دارند، در حالی که خواص دیگر، از نظر استحکام مکانیکی و مقاومت

الکتروود در برابر تنش های حرارتی مهم هستند.

#### ۴-۶- اصول کار الکتروودهای زودر برگ

در شکل ۵-۶ نمای یک الکتروود زودر برگ نشان داده شده است. چنانچه در شکل

مشاهده می شود الکتروود را می توان به نواحی زیر تقسیم کرد:

۱- ناحیه باردهی خمیر الکتروود: در این ناحیه پوسته فولادی جدید به ستون الکتروود

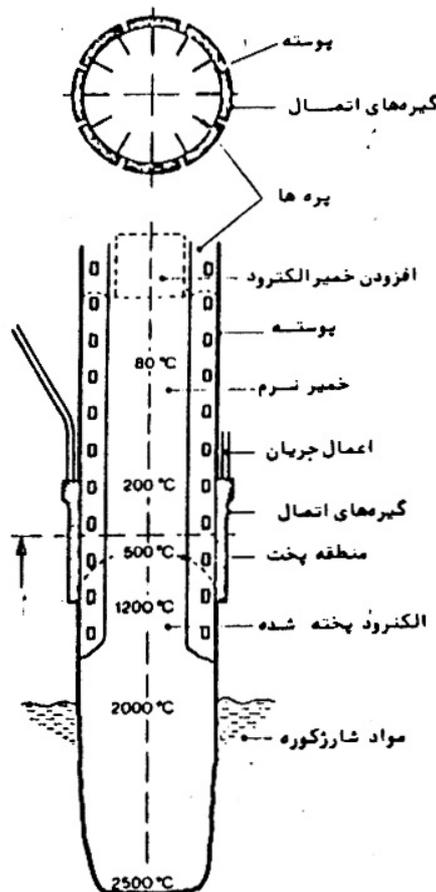
جوش داده شده و خمیر خام اضافه می شود. درجه حرارت از بالا به پایین به تدریج

تا  $70^{\circ}C$  افزایش می یابد.

۲- ناحیه سیلان خمیر: با رسیدن به دمای  $70^{\circ}\text{C}$ ، مواد چسبی ذوب و خمیر سیال می شود و می تواند در منافذ پوسته جاری شده و آنها را پر کند. در این ناحیه درجه حرارت خمیر افزایش بیشتری یافته و به  $200^{\circ}\text{C}$  می رسد.

۳- ناحیه گیره های اتصال: در این ناحیه جریان الکتریکی از میان پره ها به داخل الکتروود انتقال می یابد. به دلیل واکنش های ترموشیمی، خمیر مجدداً سخت و جامد شده و به یک هادی الکتریکی با استحکام مکانیکی زیاد تبدیل می شود. مواد فرار (موجود در چسب) تبخیر شده و با حرکت به سمت پایین الکتروود، به کربن و هیدروژن تجزیه می شوند. کربن حاصله از تجزیه مواد فرار استحکام الکتروود را بهبود

می بخشد.



شکل ۵-۶ نمای یک الکتروود زودر برگ

جهت خرید فایل word به سایت [www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com) مراجعه کنید  
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۵۱۱ تماس حاصل نمایید

۴- ناحیه بالای شارژ: با افزایش درجه حرارت در این ناحیه و رسیدن به نقطه ذوب

فولاد، پوسته الکتروود به تدریج ذوب می شود.

۵- ناحیه زیر سطح شارژ: درجه حرارت به بالاترین حد خود می رسد و با ایجاد

قوس الکتریکی، جریان الکتروود در اترک کرده و به همین دلیل الکتروود مصرف

می شود.

**Filename:** *Document1*

**Directory:**

**Template:** *C:\Documents and Settings\hadi tahaghoghi\Application Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm*

**Title:** *فصل اول: ویژگیهای عمومی*

**Subject:**

**Author:** *2*

**Keywords:**

**Comments:**

**Creation Date:** *4/15/2012 11:35:00 AM*

**Change Number:** *1*

**Last Saved On:**

**Last Saved By:** *H.H*

**Total Editing Time:** *0 Minutes*

***Last Printed On: 4/15/2012***

***11:35:00 AM***

***As of Last Complete Printing***

***Number of Pages: 125***

***Number of Words: 15,798***

***(approx.)***

***Number of Characters: 90,052***

***(approx.)***