



## شرایط آماده سازی کنسانتره تیتانیم دار قره آجاج ارومیه جهت سرباره سازی

**مهرداد ایران نژاد<sup>۱</sup>، مهدی منتجم<sup>۲</sup>**

۱- هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۲- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، پایگاه ملی داده های علوم زمین

[iranajad@yahoo.com](mailto:iranajad@yahoo.com)

[montajam@ngdir.ir](mailto:montajam@ngdir.ir)

### **چکیده**

در سرباره سازی کنسانتره ایلمنیت و تیتانومنیتیت، شرایط آماده سازی نقش مهمی دارد. از جمله پارامترهای مهم آماده سازی، شرایط اکسیداسیون و احیاء کنسانتره قبل از ذوب می باشد. آزمایش های اکسیداسیون در محدوده دمایی  $105^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$  و در زمان های  $1/5$ ،  $1/4$ ،  $1/3$  و  $1/2$  ساعت در بوته های سرامیکی انجام شده است. آزمایش های احیاء نیز در در محدوده دمایی  $120^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$  و در زمان های  $1/5$ ،  $1/4$ ،  $1/3$  و  $1/2$  ساعت در بوته های گرافیتی انجام گرفته است. شرایط مناسب اکسیداسیون برای کنسانتره ایلمنیت دمای  $100^{\circ}\text{C}$  و زمان  $6$  ساعت و برای کنسانتره تیتانومنیتیت دمای  $105^{\circ}\text{C}$  و زمان  $6$  ساعت می باشد. اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت و تیتانومنیتیت در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  موجب تشکیل فاز پزو دوبروکایت شده و درنتیجه تاثیر بسزایی بر روی سیستیک احیاء می گذارد. احیاء کامل کنسانتره ایلمنیت با  $10$  درصد کردن در دمای  $115^{\circ}\text{C}$  و زمان  $1$  ساعت و برای کنسانتره تیتانومنیتیت در دمای  $110^{\circ}\text{C}$  و زمان  $1/5$  ساعت رخ می دهد.

**کلمات کلیدی:** ایلمنیت، تیتانومنیتیت، اکسیداسیون، احیاء، پزو دوبروکایت، سرباره سازی.

### **۱- مقدمه**

کانسar تیتانیم دار قره آجاج در استان آذربایجان غربی و در ۳۶ کیلومتری شمال غربی شهرستان ارومیه و در بخش صومای برادوست واقع شده است. کانیهای تیتانیم دار این کانسar شامل ایلمنیت و تیتانومنیتیت می باشد. نمونه مورد مطالعه در این تحقیق بر روی کنسانتره ای که بروشهای ثقلی و مغناطیسی بدست آمده

<sup>۱</sup>. دکتر مهدی ایران نژاد، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر



است، انجام شده است که دارای عیار دی اکسید تیتانیم  $44/5$  درصد و اکسید آهن  $46$  درصد می باشد. یکی از روش‌های پر عیار سازی کنسانتره ایلمنیت، روش سرباره سازی می باشد. این فرآیند موجب می شود تا اکسید آهن موجود در کنسانتره حذف شده و دی اکسید تیتانیم تولید گردد. جهت تهیه سرباره مورد نظر، انجام یکسری عملیات آماده سازی شامل اکسیداسیون و احیاء ضروری می باشد. اکسیداسیون جهت خارج کردن اکسید آهن از شبکه کانی، و احیاء جهت حذف اکسیژن از اکسید آهن انجام می گردد.

## ۲- روش آزمایش

### ۲-۱- اکسیداسیون

آزمایش های اکسیداسیون در محدوده دمایی  $1050^{\circ}\text{C}$  -  $700$  و در زمان های  $1/5$ ،  $3$ ،  $4/5$  و  $6$  ساعت انجام شده است. نمونه ها در بوته های سرامیکی ریخته شده و در داخل کوره مافلی در فشار اتمسفر قرار گرفته است. بعد از اکسیداسیون نمونه ها، آن را داخل رطوبت گیر گذاشته تا رطوبت محیط را جذب نکند. نمونه ها بعد از اکسیداسیون بوسیله ترازو با دقیقه  $100/0$  توزین شده اند. سپس درصد اکسیداسیون توسط رابطه (۱) و با توجه به ترکیب شیمیایی کنسانتره ایلمنیتی و تیتانومنیتیتی محاسبه گردیده است.

لازم به ذکر است که در اثر اکسیداسیون کنسانتره و جذب اکسیژن توسط اکسیدهای آهن موجود در کنسانتره، افزایش وزن حاصل می شود. در این رابطه، درصد اکسیداسیون بستگی به وزن مولی و درصد اکسیدهای آهن کنسانتره دارد [۲].

$$\text{رابطه (۱)} \quad \frac{\text{وزن اکسیژن جذب شده}}{\text{وزن اکسیژن استوکیومتری جهت اکسیداسیون کامل نمونه}} = \frac{100}{\text{درصد اکسیداسیون}}$$

### ۲-۲- احیاء

در آزمایشهای احیاء، دمایا و زمانهای مختلف احیاء مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه ها در داخل بوته های گرافیتی ریخته شده و با دمچ گاز آرگون به بوته، در داخل کوره مافلی گذاشته می شود. احیاء بوسیله کک نفتی به میزان  $10$  درصد وزنی نمونه انجام شده است و اکسیدهای کربن تولید شده از قسمت خروجی بوته خارج گردیده است. تغییر وزن نمونه های احیاء شده بوسیله ترازوی دیجیتالی با دقیقه  $100/0$  محاسبه می شود. شرایط رطوبت گیری این آزمایشهای نیز مشابه آزمایشهای اکسیداسیون است. در مجموع درصد احیاء با استفاده از نسبت تغییرات وزن محاسبه گردیده است. لازم به ذکر است که در اثر احیاء کنسانتره ایلمنیت و



حذف اکسیژن اکسیدهای آهن کنسانتره، کاهش وزن حاصل می شود. لذا با استفاده از رابطه (۲) درصد احیاء محاسبه می گردد [۲].

$$\text{رابطه (۲)} \quad \frac{\text{وزن اکسیژن حذف شده}}{\text{وزن اکسیژن استوکیومتری قابل حذف جهت احیاء کامل نمونه}} = \frac{۱۰۰}{\text{درصد احیاء}}$$

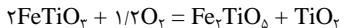
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اکسیداسیون

در هوازدگی طبیعی ایلمنیت، به نظر می رسد که تبدیل ایلمنیت به روتیل با تشکیل فاز میانی پزودوروتیل با فرمول  $\text{Fe}_7\text{Ti}_2\text{O}_9$  همراه است. ولی با انجام عملیات اکسیداسیون در دماهای بالای  $200^{\circ}\text{C}$  انتظار می رود که پزودوروبروکایت با فرمول  $\text{Fe}_7\text{TiO}_5$  و روتویل تشکیل شود که پزودوروبروکایت نسبت به ایلمنیت از سینتیک احیاء بالاتری برخوردار است [۲].

واکنش (۱) اکسیداسیون ایلمنیت و تشکیل پزودوروبروکایت را در محدوده دمایی بالای  $200$  درجه سانتیگراد نشانمی دهد.

واکنش (۱)



#### ۳-۱-۱- اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت

در آزمایش های انجام شده، تاثیر عوامل زمان و دما مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایشها در جدول (۱) آورده شده است.

در شکل (۱) نتایج افزایش دما در زمان ثابت و در شکل (۲) نتایج افزایش زمان در دمای ثابت بر روی اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت مورد بررسی قرار گرفته است. در دمای ثابت با افزایش زمان میزان اکسیداسیون افزایش پیدا کرده است. شب منحنی در زمان های کمتر بیشتر است. چرا که با رشد لایه اکسید تشکیل شده از نفوذ اکسیژن کاسته می شود و در نتیجه سرعت اکسیداسیون کاهش می یابد.

معمولًا در دماهای بالا و زمانهای کم، میزان اکسیداسیون بالا است و با گذشت زمان بدليل ذوب سطحی نمونه ها و پرشدن خلل و فرج ترکها، نفوذ اکسیژن کمتر شده، بنابراین سرعت اکسیداسیون کاهش می یابد. موارد ذکر شده نشان می دهد که تاثیر دما بر اکسیداسیون ایلمنیت بیشتر از تاثیر زمان است.

#### ۳-۱-۲- اکسیداسیون کنسانتره تیتانومنیتیت

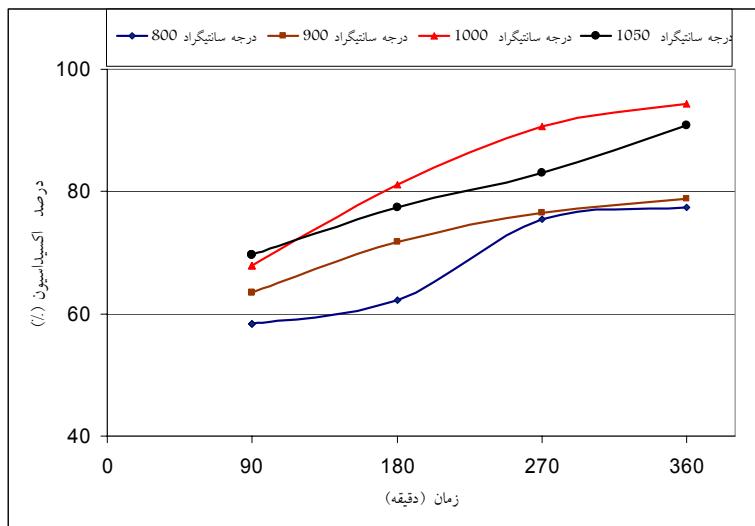
مشابه حالت ذکر شده برای اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیتی، کنسانتره تیتانومنیتیت نیز مورد عملیات اکسیداسیون قرار گرفته است. در جدول (۲) زمان ها و دماهای اکسیداسیون، نسبت تغییرات وزن و درصد



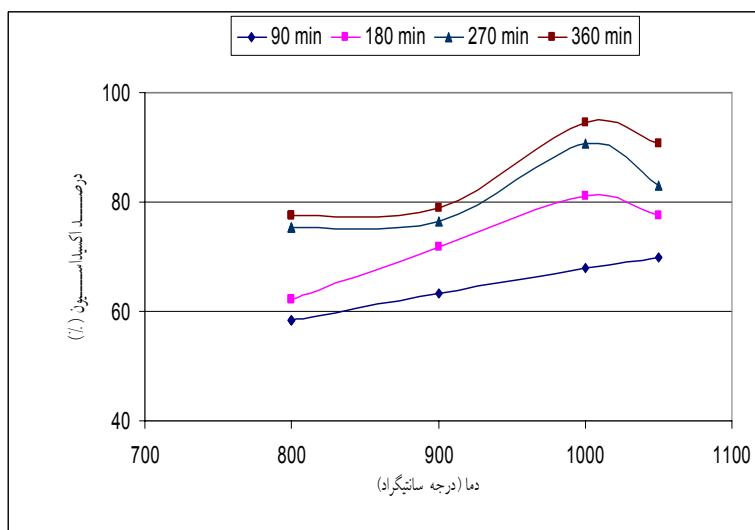
اکسیداسیون ذکر شده است. در دمای ثابت با افزایش زمان میزان اکسیداسیون افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، با افزایش زمان تا ۳۶۰ دقیقه میزان اکسیداسیون کنسانتره تیتانومینیتی افزایش یافته است و سرعت اکسیداسیون در زمانهای اولیه، بیشتر است. در زمان ثابت با افزایش دما میزان اکسیداسیون افزایش می‌یابد. کاهش درصد اکسیداسیون در دمای بالاتر در زمان ثابت، به دلیل ذوب سطحی نمونه‌ها و کاهش نفوذ اکسیژن جهت ادامه فرآیند اکسیداسیون می‌باشد. در شکل (۴) درصد اکسیداسیون کنسانتره تیتانومینیتی نسبت به دما در زمانهای مختلف مشاهده می‌شود. سرعت اکسیداسیون در محدوده زمانی ۱۸۰-۲۷۰ دقیقه بیشتر از سایر زمان‌ها است. سرعت اکسیداسیون کنسانتره تیتانومینیتی نسبت به زمان بیشتر است تا به دما.

**جدول ۱- نتایج حاصل از اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت در زمان‌ها و دمای مختلف**

درصد اکسیداسیون	درصد تعییرات وزن	دما (°C)	زمان (min)
۵۸/۴۲	۲/۵۸	۸۰۰	۹۰
۶۲/۲۶	۲/۷۵	۸۰۰	۱۸۰
۷۵/۴	۳/۳۳	۸۰۰	۲۷۰
۷۷/۴۲	۲/۴۲	۸۰۰	۳۶۰
۶۲/۴	۲/۸۰	۹۰۰	۹۰
۷۱/۷۷	۳/۱۷	۹۰۰	۱۸۰
۷۶/۵۲	۳/۳۰	۹۰۰	۲۷۰
۷۸/۷۹	۳/۴۰	۹۰۰	۳۶۰
۶۷/۹۲	۳/۰۰	۱۰۰۰	۹۰
۸۱/۰۵	۳/۵۸	۱۰۰۰	۱۸۰
۹۰/۵۶	۴/۰۰	۱۰۰۰	۲۷۰
۹۴/۴۱	۴/۱۷	۱۰۰۰	۳۶۰
۶۹/۷۳	۳/۰۸	۱۰۵۰	۹۰
۷۷/۴۳	۲/۴۲	۱۰۵۰	۱۸۰
۸۳/۱۰	۳/۶۷	۱۰۵۰	۲۷۰
۹۰/۷۷	۴/۰۱	۱۰۵۰	۳۶۰



شکل ۱- منحنی درصد اکسیداسیون کنسانتره ایلمنت نسبت به زمان در دماهای مختلف

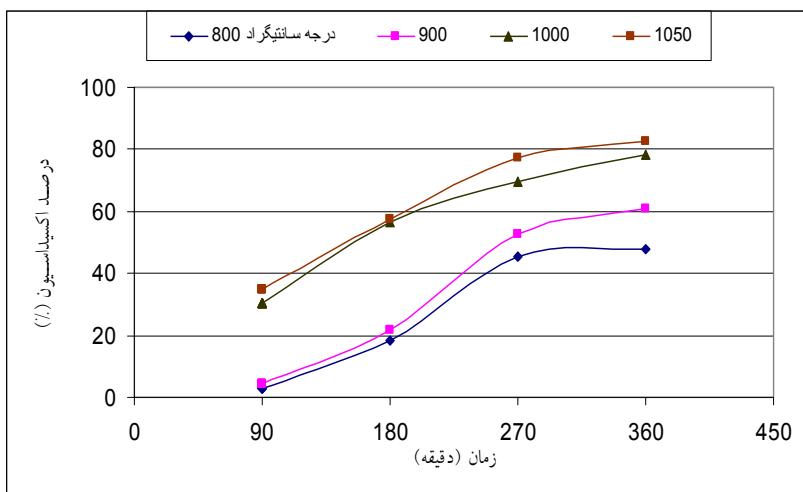


شکل ۲- درصد اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت نسبت به دما در زمان های مختلف

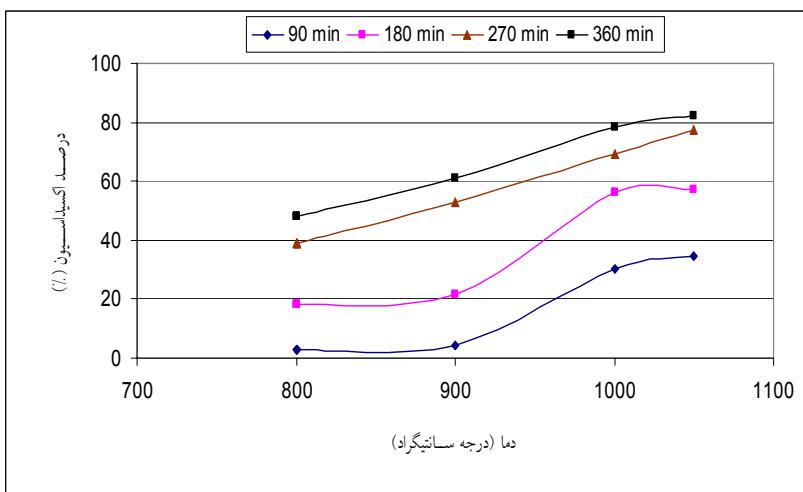


جدول ۲- نتایج حاصل از اکسیداسیون کنسانتره تیتانومنیتیت در زمان ها و دماهای مختلف

زمان (دقیقه)	دما (درجه سانتیگراد)	درصد تغییرات وزن	درصد اکسیداسیون
۹۰	۸۰۰	۰/۰۵۹	۳/۰۶
۱۸۰	۸۰۰	۰/۳۵۰	۱۸/۲۵
۲۷۰	۸۰۰	۰/۸۷۵	۴۵/۶۰
۳۶۰	۸۰۰	۰/۹۱۷	۴۷/۸۴
۹۰	۹۰۰	۰/۰۸۳	۴/۳۳
۱۸۰	۹۰۰	۰/۴۱۷	۲۱/۷۵
۲۷۰	۹۰۰	۱/۰۱۰	۵۲/۶۹
۳۶۰	۹۰۰	۱/۱۶۷	۶۰/۸۸
۹۰	۱۰۰۰	۰/۵۸۳	۳۰/۴۱
۱۸۰	۱۰۰۰	۱/۰۸۳	۵۶/۵۰
۲۷۰	۱۰۰۰	۱/۳۳۰	۶۹/۳۹
۳۶۰	۱۰۰۰	۱/۵۰۰	۷۸/۲۵
۹۰	۱۰۵۰	۰/۶۶۷	۳۴/۷۹
۱۸۰	۱۰۵۰	۱/۱۰۰	۵۷/۳۹
۲۷۰	۱۰۵۰	۱/۴۸۰	۷۷/۲۰
۳۶۰	۱۰۵۰	۱/۵۸۰	۸۲/۴۳



شکل ۳- درصد اکسیداسیون کنسانتره تیتانومنیتیتی نسبت به زمان در دماهای مختلف



شکل ۴- درصد اکسیداسیون کنسانتره تیتانومنیتیت نسبت به دما در زمانهای مختلف



### ۳-۱-۳- مقایسه اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت و تیتانومنیتیت

میزان اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت، همواره بیشتر از تیتانومنیتیت بوده و در نمودارهای ارائه شده در زمان ها و یا دماهای ثابت، منحنی های مریبوط به اکسیداسیون ایلمنیت همواره بالاتر از منحنی های مریبوط به اکسیداسیون کنسانتره تیتانومنیتیت بوده است (شکلهاي ۱ و ۳). این نتایج با توجه به ترکیب شیمیایی دو کنسانتره قابل توجیه است. کنسانتره ایلمنیت عامل اکسید شونده بیشتری نسبت به کنسانتره تیتانومنیتیت دارد. علاوه بر این وجود لایه های ضخیم هماتیت در شبکه اکسیدی تیتانومنیتیت، مانع نفوذ اکسیژن مورد نیاز برای ادامه فرآیند اکسیداسیون شده و سرعت رشد لایه اکسید را کاهش می دهد.

### ۲-۳- احیاء

مکانیزم احیاء ایلمنیت با کربن مشابه مکانیزم احیاء آن توسط گاز مونوکسیدکربن و یا هیدروژن است. این موضوع با تعیین درصد احیاء در زمانهای مختلف و تشخیص فازهای تشکیل شده توسط پراش اشعه ایکس به اثبات رسیده است. در فرآیند احیاء ایلمنیت با کربن جامد، ایندا ایلمنیت در محل اتصال کربن- ایلمنیت احیاء شده و سپس مونوکسید کربن حاصل، خود در احیاء ایلمنیت شرکت می کند. هرگاه کنسانتره ای در شرایط مشخص از لحظه ترکیب و درصد عامل احیاء کننده و درجه حرارت احیاء شود، با کوچکترین تغییر در شرایط احیاء، سرعت احیاء تغییر می کند. لذا تعیین بهینه پارامترهای احیاء در عملیات سرباره سازی موثر خواهد بود.

### ۲-۱- احیاء کنسانتره ایلمنیت

در جدول (۳) نتایج احیاء کنسانتره ایلمنیت در شرایط مختلف درج شده است. در شکل (۵) نمودار درصد احیاء کنسانتره ایلمنیت نسبت به زمان در دماهای مختلف دیده می شود. با افزایش دما در زمان ثابت درصد احیاء افزایش می یابد. ولی سرعت افزایش آن در دمای بین  $1150^{\circ}\text{C}$ - $1100^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد بیشتر از دمای بین  $1100^{\circ}\text{C}$ - $1000^{\circ}\text{C}$  است. زیرا از لحظه ترمودینامیکی در دمای بالای  $1100^{\circ}\text{C}$  سینتیک احیاء افزایش می یابد. همچنین قدرت نفوذ عامل احیاء کننده بیشتر می شود. کاهش نسبی درصد احیاء در دمای بالای  $1100^{\circ}\text{C}$  و زمان بالای  $1/5$  ساعت به خاطر کاهش عامل احیاء کننده با گذشت زمان است بطوریکه با اکسایش نمونه ها درصد احیاء کاهش می یابد. با توجه به مطالب گفته شده و حالت نسبتاً بهینه درصد احیاء در زمان  $1$  ساعت و دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  مقدار مناسب کک نفتی  $10$  درصد کنسانتره ایلمنیت پیش بینی می شود که با محاسبه مقدار کربن نیاز احیاء کنسانتره ایلمنیت، مقدار حداقل کربن مورد نیاز (با در نظر گرفتن اکسید های آهن کنسانتره به صورت  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  $7$  درصد وزنی کنسانتره و حداقل کربن مورد نیاز (اکسید های آهن به صورت  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  $10/35$  درصد وزنی کنسانتره است.

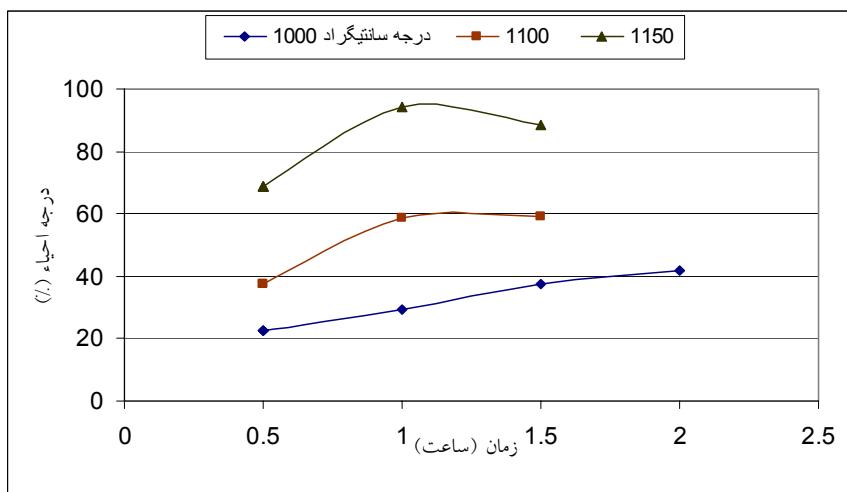


### ۲-۲-۳- احیاء کنسانتره تیتانومنیتیت

شرایط مشابه احیاء کنسانتره ایلمنیت برای کنسانتره تیتانومنیتیت اعمال شده است. در جدول (۴) درصد احیاء کنسانتره تیتانومنیتیت در زمانها و دماهای مختلف ارائه شده است. در شکل (۶) نیز درصد احیاء کنسانتره تیتانومنیتیت به صورت نمودار مشاهده می شود. در نمودار شکل (۶) در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  با گذشت زمان تغییر محسوسی در درصد احیاء نمونه رخ نداده است. زیرا این دما از لحظه ترمودینامیکی جهت احیاء کامل اکسیدهای آهن موجود در کنسانتره تیتانومنیتیت در زمان های کم کافی نیست. در دماهای ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد در زمان های اولیه سرعت احیاء زیاد بوده ولی با گذشت زمان و تمام شدن کک نفتی و شروع اکسیداسیون نمونه، درصد احیاء کاهش یافته است

جدول ۳- نتایج حاصل از احیاء کنسانتره ایلمنیت در زمان ها و دماهای مختلف

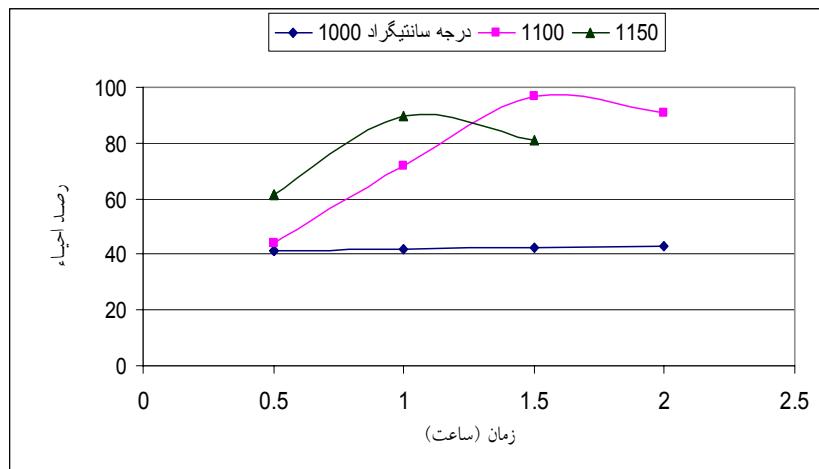
زمان (ساعت)	دماهی احیاء (درجه سانتیگراد)	درصد تغییرات وزن (%)	درصد احیاء (%)
۰/۵	۱۰۰۰	۳/۱۲۵	۲۲/۵۳
۱	۱۰۰۰	۴/۰۶۲	۲۹/۲۹
۱/۵	۱۰۰۰	۵/۲۰۰	۳۷/۴۹
۲	۱۰۰۰	۵/۸۰۳	۴۱/۸۴
۰/۵	۱۱۰۰	۵/۲۲۳	۳۷/۶۶
۱	۱۱۰۰	۸/۱۲۵	۵۸/۵۸
۱/۵	۱۱۰۰	۸/۱۸۴	۵۹/۰۱
۲	۱۱۰۰	-	-
۰/۵	۱۱۵۰	۹/۵۵۳	۶۸/۸۸
۱	۱۱۵۰	۱۳/۰۸۰	۹۴/۳۱
۱/۵	۱۱۵۰	۱۱/۲۹۵	۸۸/۶۱



شکل ۵- درصد احیاء کنسانتره ایلمنیت نسبت به زمان در دماهای مختلف

جدول ۴- درصد احیاء کنسانتره تیتانومنیتیتی در زمان ها و دماهای مختلف

زمان (ساعت)	دماهای احیاء (درجه سانتیگراد)	درصد تغییرات وزن	درصد احیاء
۰/۵	۱۰۰۰	۱۱/۲۷۰	۴۱/۳۶
۱	۱۰۰۰	۱۱/۳۸۹	۴۱/۸
۱/۵	۱۰۰۰	۱۱/۵۰۹	۴۲/۲۴
۲	۱۰۰۰	۱۱/۵۲۳	۴۲/۲۹
۰/۵	۱۱۰۰	۱۲/۰۴۹	۴۴/۲۲
۱	۱۱۰۰	۱۹/۵۳۶	۷۱/۷
۱/۵	۱۱۰۰	۲۶/۳۷۶	۹۶/۸
۲	۱۱۰۰	۲۴/۷۵۷	۹۰/۸۶
۰/۵	۱۱۵۰	۱۶/۷۸۴	۶۱/۶۰
۱	۱۱۵۰	۲۴/۴۵۷	۸۹/۷۶
۱/۵	۱۱۵۰	۲۲/۰۰۰	۸۰/۷۴



شکل ۶- درصد احیاء کنسانتره تیتانومنیتیت نسبت به زمان در دماهای مختلف

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- اکسیداسیون مناسب کنسانتره ایلمنیت در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  و زمان ۶ ساعت و برای کنسانتره تیتانومنیتیت در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  و زمان ۶ ساعت انجام می شود. همچنین جهت اکسیداسیون کامل نمونه به زمان بیشتری نیاز است.
- ۲- سرعت اکسیداسیون کنسانتره تیتانومنیتیتی نسبت به زمان در مقایسه با دما حساسیت بیشتری دارد.
- ۳- درصد اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت در شرایط مشابه بیشتر از درصد اکسیداسیون کنسانتره تیتانومنیتیت است زیرا در کنسانتره ایلمنیت عامل اکسید شونده ( $\text{FeO}$ ) بیشتری، از کنسانتره تیتانومنیتیت است.
- ۴- با اکسیداسیون کنسانتره ایلمنیت و تیتانومنیتیت در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  پزو دوبروکایت تشکیل می شود که در افزایش سینتیک احیاء موثر است.
- ۵- احیاء مناسب کنسانتره ایلمنیت با ۱۰ درصد کربن در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  و در زمان ۱ ساعت انجام می شود.
- ۶- احیاء مناسب کنسانتره تیتانومنیتیت در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  و در زمان  $1/5$  ساعت انجام می شود.



## منابع و مراجع

- [۱] ایران نژاد مهدی ، ۱۳۶۹، "ذوب احیایی و سرباره سازی کنسانتره ایلمنیت کهنهوج "، گزارش تحقیقاتی، موسسه تحقیقات و کاربرد مواد معدنی ایران .
- [۲] عطایی ابوالقاسم و دیگران، ۱۳۷۶، بررسی و تحقیق در زمینه تولید سرباره با مشخصات قابل قبول از کنسانتره ایلمنیت و مخلوط آن با کنسانتره تیتا نومنیتیت، گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- [۳] توحیدی ناصر، (۱۳۶۷)، "احیای مستقیم" ، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران
- [۴] Merk R. and Pickles C.A. , (۱۹۸۸), "Reduction of Ilmenite by Carbon Monoxide",Canadian Institute of Mining and Metallurgy, pp. ۱۷۹-۱۸۵.
- [۵] Wright J. B. etal, (۱۹۸۵),"Chlorination – Grade Feedstock From Domestic Ilmenite" , Minerals And Metallurgical Processing, pp. ۱۹۸-۲۰۱.
- [۶] United States patent, ۵۶۷۹۱۳۱, November ۱۹۹۷.
- [۷] Weiss N.L. (ed), (۱۹۸۵), SME Mineral Processing Handbook, Vol. ۲. , SME – AIME, pp . ۲۷-۱۴ : ۲۷-۱۷ .
- [۸] Ostrovski Z . G.۲۰۰۲, "Effect of Preoxidation and Sintering on Properties of Ilmenite Concentrates", International Journal of Mineral Processing ,Vol. ۶۴, pp.۲۰۳ – ۲۱۷.
- [۹] Ostrovski Z. G, ۲۰۰۱, " Reduction of Ilmenite Concentrates by Methane Containing Gas: part ۱ . Effects of Ilmenite Composition , Temperature and Gas Composition" , CIM Bulletin , Vol . ۴۰ , No . ۳ , Canadian Institute of Mining , Metallurgy and Petroleum , pp . ۳۱۷ – ۳۲۶ .
- [۱۰] United States patent , ۵۹۹۷۶۰۶, December ۱۹۹۹.
- [۱۱] Oden L. L. etal, "Studies on recovering Rutile from Titanium – enriched High – Iron Smelting Slag" ,Report of Investigation ۷۷۴۲ ,USBM .۱· PP.
- [۱۲] Elger G. W. etal, ۱۹۷۶ , " Producing Synthetic Rutile from Ilmenite by Ptrometallurgy" ,Pilot Plant Studies and Economic Evalution , Report of Investigation ۸۱۴۰ , USBM , ۳۱ PP .
- [۱۳] Wright J. B. etal , (۱۹۸۵), " Chlorination – Grade Feedstock From Domestic Ilmenite " , Minerals And Metallurgical Processing , pp. ۱۹۸-۲۰۱ .