

الله أكبر

11-119

۸۷،۱،۱۰۹۹۱۴  
۱۸ - ۱ - ۱۹



دانشگاه شهید باهنر کرمان  
دانشکده فنی و مهندسی - بخش معدن

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی

ارزیابی کارایی لیچینگ جهت استخراج تیتانیوم از کنسانتره ایلمنیت  
کارخانه فراوری کهنوج

اساتید راهنما:

دکتر محمد رنجبر

دکتر حسن هاشمی پوررفسنجانی

استاد مشاور:

مهندس علی احمدی عامله

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۲۷

مؤلف:

هادی آزاد روش

شهریور ۸۷

۱۱۰۸۸۹



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی معدن  
دانشکده فنی و مهندسی  
دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: هادی آزادروش

استادان راهنما:

دکتر محمد رنجبر

دکتر حسن هاشمی پور رفسنجانی

داور ۱: دکتر عباس سام

داور ۲: دکتر حسن حاجی امین شیرازی

داور ۳:

تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: آقای دکتر منصوری

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه است.

تقدیم به عزیزترین کسانی که در دنیا دارم

تقدیم به آنهایی که از خود گذشتند تا سر بلند باشم.

تقدیم به

پدر و مادرم

که همیشه در یادم خواهند ماند.

# تقدیر و شکر

سپاس خدای را که انسان را آفرید و به او قدرت آموختن بخشید.  
بدینوسیله بر خود لازم می دانم از اساتید ارجمند و گرامی جناب آقای دکتر محمد  
رنجبر و جناب آقای دکتر حسن هاشمی پوررفسنجانی به پاس تمام زحماتی که برای  
بنده در طول مدت تحصیل در این مقطع تحصیلی به عنوان استاد راهنمای پروژه  
متحمل شده اند، کمال قدردانی را به عمل آورم. همچنین از مسئولین کارخانه  
فراوری کهنوج به جهت همکاری بیدریغ در مدت انجام پروژه و انجام آنالیز نمونه ها  
قدردانی به عمل می آید. در خاتمه از تمام کسانی که به نحوی در انجام این تحقیق  
نقش داشته ولی نام بردن از همه آنها در این مجال نمی گنجد، تشکر می شود.

### چکیده:

لیچینگ، فرایند استخراج یک جزء قابل حل از جامد با استفاده از یک حلال است. جهت ارزیابی کارایی لیچینگ کنسانتره ایلمنیت کارخانه فرآوری کهنوج و همچنین تعیین شرایط مناسب، روش کلرید با اضافه کردن پودر آهن به عنوان عامل احیاء کننده به کار گرفته شد. پارامترهای موثر در آزمایشات، شامل غلظت اسید، دما، مقدار پودر آهن اضافه شده، زمان واکنش و نسبت جامد به مایع با استفاده از طرح Hadamard هشت آزمایشی مورد بررسی قرار گرفتند. با بررسی نتایج حاصل از آزمایشات مشخص شد که با افزایش هر کدام از متغیرها مقدار  $TiO_2$  در محصول نهایی افزایش و مقدار Fe در محصول نهایی کاهش پیدا می کند. همچنین براساس نتایج حاصل از متوسط تأثیر هر کدام از متغیرها مشخص شد که افزایش مقدار پودر آهن اضافه شده، بیشترین تأثیر و افزایش نسبت جامد به مایع، کمترین تأثیر را بر درصد  $TiO_2$  و درصد Fe در محصول نهایی دارند. مطابق با آزمایشات انجام شده، در بهترین حالت، مقدار  $TiO_2$  از ۴۵/۰۶٪ در نمونه اولیه به ۸۷/۳۱٪ در محصول نهایی افزایش و میزان Fe از ۲۵/۳۰٪ در نمونه اولیه به ۳/۷۶٪ در محصول نهایی کاهش می یابد.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول : مقدمه
۴.....	فصل دوم: کلیات
۵.....	۱-۲- تیتانیوم
۶.....	۲-۲- کانی شناسی
۶.....	۱-۲-۲- ایلمنیت
۷.....	۲-۲-۲- ایلمنیت دگرسان شده و لئوکوکسن
۸.....	۳-۲-۲- روتیل
۹.....	۳-۲- طبقه بندی ذخایر
۱۰.....	۱-۳-۲- ذخایر سنگی
۱۰.....	۲-۳-۲- ذخایر ماسه ای
۱۱.....	۴-۲- کاربردهای دی اکسید تیتانیوم
۱۲.....	۱-۴-۲- رنگدانه ها
۱۲.....	۲-۴-۲- فلزات سخت
۱۳.....	۳-۴-۲- گدازه آورها و سیم جوش ها
۱۳.....	۴-۴-۲- خازن های سرامیکی و قطعات پیزوالکتریک
۱۳.....	۵-۴-۲- تیتانات های معدنی
۱۴.....	۶-۴-۲- پودرهای الکتریکی
۱۴.....	۷-۴-۲- لامپ ها
۱۵.....	فصل سوم : فراوری ایلمنیت
۱۶.....	۱-۳- مراحل عملیات
۱۶.....	۱-۱-۳- اکسیداسیون
۲۰.....	۲-۱-۳- احیاء
۲۰.....	۱-۲-۱-۳- احیاء کامل آهن فریک به آهن فلزی
۲۶.....	۲-۲-۱-۳- احیاء جزئی آهن فریک به آهن فرو
۳۰.....	۳-۱-۳- لیچینگ
۳۲.....	۱-۳-۱-۳- روش سولفات
۳۵.....	۲-۳-۱-۳- روش کلرید
۳۸.....	۳-۳-۱-۳- سنتتیک فرایندها
۴۲.....	۲-۳- دیاگرامهای فازی

۴۳..... FeO-TiO<sub>2</sub> دیاگرام دو تایی ۱-۲-۳

۴۴..... FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> دیاگرام سه تایی ۲-۲-۳

۴۶..... فصل چهارم : مروری بر تحقیقات گذشته

۵۲..... فصل پنجم : مواد و روش تحقیق

۵۳..... ۱-۵- بررسی لیچینگ کسانتره ایلمنیت

۵۳..... ۲-۵- مراحل آزمایش

۵۳..... ۱-۲-۵- نمونه گیری

۵۳..... ۲-۲-۵- دانه بندی

۵۴..... ۳-۲-۵- طراحی آزمایش ها

۵۶..... ۳-۵- روش کار

۵۷..... فصل ششم : ارائه یافته ها و تحلیل نتایج

۵۸..... ۱-۶- آنالیز نمونه ها

۵۸..... ۲-۶- ارزیابی کارایی لیچینگ

۵۸..... ۱-۲-۶- تأثیر غلظت اسید کلریدریک

۶۰..... ۲-۲-۶- تأثیر دما

۶۱..... ۳-۲-۶- تأثیر مقدار پودر آهن اضافه شده

۶۲..... ۴-۲-۶- تأثیر زمان

۶۳..... ۵-۲-۶- تأثیر نسبت جامد به مایع

۶۴..... ۳-۶- تعیین مقادیر مناسب پارامترهای لیچینگ

۶۴..... ۴-۶- تعیین متوسط تأثیرها

۶۵..... ۵-۶- بررسی آماری نتایج

۶۸..... فصل هفتم : نتیجه گیری نهایی

۷۰..... منابع و مراجع



## فهرست شکلها

عنوان	صفحه
۱-۲- ماکل های روتیل .....	۸
۱-۳- دیاگرام فازی برای سیستم $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$ .....	۱۸
۲-۳- تأثیر درجه حرارت بر اکسیداسیون ایلمنیت .....	۱۹
۳-۳- تأثیر فشار جزئی اکسیژن بر سرعت اکسیداسیون ایلمنیت .....	۲۰
۴-۳- تأثیر افزودن کلرور آهن بر احیای ایلمنیت با گرافیت در $1000^\circ C$ .....	۲۵
۵-۳- تأثیر درجه حرارت و ترکیب گاز کاهنده بر نرخ احیاء ایلمنیت اکسید شده .....	۲۶
۶-۳- تأثیر عملیات مقدماتی بر حل شدن ایلمنیت در $HCl$ ۲۰٪ .....	۲۷
۷-۳- تأثیر درجه حرارت و ترکیب گاز کاهنده بر نرخ احیاء ایلمنیت اکسید شده .....	۲۹
۸-۳- تأثیر درجه حرارت احیاء بر سرعت حل شدن در $HCl$ ۲۰٪ .....	۳۰
۹-۳- لیچینگ ایلمنیت جهت تهیه $TiO_2$ خالص .....	۳۴
۱۰-۳- تولید روتیل مصنوعی از ایلمنیت .....	۳۶
۱۱-۳- تأثیر تغییر غلظت اسید کلریدریک بر میزان حل شدن تیتانیوم .....	۳۸
۱۲-۳- نمودار درصد بازیابی نسبت به زمان برای دماهای مختلف .....	۴۱
۱۳-۳- نمودار درصد بازیابی نسبت به زمان برای غلظت های مختلف اسید .....	۴۲
۱۴-۳- سیستم دوتایی $FeO-TiO_2$ .....	۴۳
۱۵-۳- دیاگرام فازی برای سیستم $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$ .....	۴۴
۱-۴- فلوشیت پیشنهادی جهت تولید روتیل مصنوعی .....	۵۰
۱-۶- تأثیر غلظت اسید بر کارایی لیچینگ .....	۵۹
۲-۶- تأثیر دما بر کارایی لیچینگ .....	۶۰
۳-۶- تأثیر مقدار پودر آهن اضافه شده بر کارایی لیچینگ .....	۶۱
۴-۶- تأثیر زمان بر کارایی لیچینگ .....	۶۲
۵-۶- تأثیر نسبت جامد به مایع بر کارایی لیچینگ .....	۶۳

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۴۸	۱-۴- ترکیب شیمیایی کنسانتره ایلمنیت
۴۹	۲-۴- آنالیز شیمیایی محلول لیچ قبل و بعد از اضافه کردن پودر آهن
۵۰	۳-۴- ترکیب شیمیایی کنسانتره ایلمنیت Rosetta
۵۱	۴-۴- ترکیب شیمیایی روتیل مصنوعی بدست آمده از ایلمنیت Rosetta
۵۴	۱-۵- توزیع دانه بندی کنسانتره ایلمنیت
۵۴	۲-۵- طرح کلی ماتریس Hadamard در طراحی آزمایش ها
۵۵	۳-۵- طراحی آزمایش انجام شده بر اساس طرح Hadamard
۵۸	۱-۶- نتایج آنالیز نمونه های مربوط به آزمایشات لیچینگ کنسانتره ایلمنیت
۵۹	۲-۶- مقادیر متوسط Fe, Ti در سطوح مختلف غلظت
۶۰	۳-۶- مقادیر متوسط Fe, Ti در سطوح مختلف دما
۶۱	۴-۶- مقادیر متوسط Fe, Ti در سطوح مختلف مربوط به مقدار پودر آهن اضافه شده
۶۲	۵-۶- مقادیر متوسط Fe, Ti در سطوح مختلف مربوط به زمان
۶۳	۶-۶- مقادیر متوسط Fe, Ti در سطوح مختلف مربوط به نسبت جامد به مایع
۶۴	۷-۶- متوسط تأثیر پارامترها بر درصد Fe, Ti در محصول نهایی

# فصل اول

مقدمه

لیچینگ، فرآیند استخراج یک جزء قابل حل از جامد با استفاده از یک حلال است. در این رابطه دو هدف مد نظر است که یکی تجزیه کانه، کنسانتره یا محصولات متالورژیکی برای حل کردن فلز موجود در آن و دیگری بهره وری شیمیایی از کانه می باشد. [۱]

پس از مرحله اکسیداسیون واحیاء ایلمنیت که موجب واکنش پذیری آن می گردد، جهت جدا کردن آهن از ایلمنیت ( $FeTiO_3$ ) و تولید روتیل ( $TiO_2$ ) عمل لیچینگ توسط اسید در ظروف ناپیوسته یا پیوسته انجام می گیرد. انتخاب اسید در فرایند لیچینگ بستگی به مسائلی از قبیل انحلال پذیری ماده، هزینه ها، جنس تجهیزات، انتخاب پذیری، بازیافت و مسائل زیست محیطی دارد. [۸، ۱۶، ۲۰]

معمولاً اسیدهای مورد استفاده شامل اسید کلریدریک و اسید سولفوریک می باشند که به ترتیب به عنوان روش کلرید و روش سولفات شناخته می شوند. البته تلاش هایی نیز جهت تولید فلز تیتانیوم توسط اسیدهای دیگر صورت گرفته که در حال حاضر در سطح صنعتی مطرح نیست. [۸، ۱۶]

مزایای روش سولفات را می توان قیمت پایین مواد خام اولیه و تکنولوژی ساده تر و معایب آنرا هزینه های کلی بیشتر، نیروی انسانی بیشتر و حجم زیاد ضایعات (سولفات آهن) آلوده کننده محیط زیست بر شمرد. [۲، ۷، ۸، ۲۵]

مزایای روش کلرید را می توان پیوسته بودن عملیات، محصولات فرعی کمتر، محصول با خواص بهتر و ضایعات کمتر (یک چهارم روش سولفات) به دلیل خوراک با عیار بالاتر دانست و از معایب آن می توان به گران بودن ماده اولیه، خوراک با عیار بالاتر، تکنولوژی پیچیده فرآیند، احتیاج به دمای بالاتر، مشکلات ناشی از خوردگی شیمیایی و سمی بودن تراکلرید تیتانیوم و ضایعات حاصله اشاره کرد. [۲، ۷، ۸، ۱۶، ۲۵]

امروزه کمبود روتیل طبیعی سبب شده تا تحقیقات گسترده ای در زمینه تبدیل ایلمنیت به روتیل صورت گیرد. فرآیندهای مختلفی در زمینه تولید روتیل مصنوعی از ایلمنیت وجود دارد که معمولاً به ۴ دسته تقسیم می شوند: [۲، ۴]

۷ روش ذوب: که در آن ایلمنیت احیاء و ذوب می شود تا آهن از تیتانیوم جدا گردد.

سرباره تیتانیوم سپس با اسید سولفوریک یا اسید کلریدریک در دمای بالا حل می شود.

۷ احیاء ایلمنیت، تا آهن فریک به طور جزئی به فرو یا به طور کامل به آهن فلزی تبدیل

شود و فرآیند توسط لیچینگ اسیدی ادامه می یابد (احیاء جزئی): فرآیند Benelite

واحیاء کامل: فرآیند (Becher).

✓ اکسید اسیون و احیای ایلمنیت که توسط لیچینگ با اسید کلریدریک دنبال می شود (فرآیند MURSO).

✓ تشویه و جدایش مغناطیسی که با فرآیند لیچینگ اسید کلریدریک دنبال می شود (فرآیند ERMS).

همه این فرآیندها بستگی به پیش عملیات اکسیداسیون و احیاء ایلمنیت دارند، که این مرحله انرژی بسیار زیادی را مصرف می کند. عملیات احیاء به منظور تبدیل آهن فریک موجود در ایلمنیت به آهن فرو انجام می شود که قابلیت انحلال بیشتری در اسید کلریدریک دارد. عامل احیاء کننده می تواند آهن یا روی باشد، هر چند این جنبه مورد آزمایش قرار نگرفته اما در جهت تهیه روتیل مصنوعی از ایلمنیت سودمند و مفید است. در حقیقت در عمل ۲ مسأله مورد بررسی قرار می گیرد:<sup>[۲]</sup>

✓ احیاء آهن فریک به فرو بوسیله آهن فلزی به عنوان عامل احیاء کننده (فلز آهن می تواند به صورت پودر اضافه شود).

✓ لیچینگ ایلمنیت با اسید کلریدریک.

این روش تولید روتیل مصنوعی مزایای بسیار زیادی نسبت به روشهای دیگر دارد که از جمله آنها می توان به اجتناب از درجه حرارت زیاد در عملیات و استفاده از لیچینگ تحت فشار اشاره کرد. یکی از معایب این روش استفاده بیش از حد از اسید می باشد که البته این مشکل امروزه از طریق بازیابی اسید مورد استفاده و برگشت آن به چرخه تولید روتیل تا حدودی برطرف شده است، همچنین محصول فرعی (اکسید آهن) تولید شده دارای ارزش اقتصادی است.<sup>[۲]</sup>

# فصل دوم

کلیات

## ۲-۱- تیتانیوم

تیتانیوم با موقعیت نهمین عنصر در لیتوسفر از لحاظ فراوانی، به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و زنگ زدگی به عنوان یک فلز شناخته شده در سطح جهان مطرح است، این عنصر به دلیل رنگ کاملاً سفید، قابلیت انحلال و قدرت پوشاندگی، وزن مخصوص کم، ضریب انکسار بالا و در نتیجه قابلیت پراکنش کم و عدم جذب طیف‌های رنگی نور، به عنوان رنگدانه اکسید تیتانیوم، بی‌رقیب شده است.<sup>[۲]</sup> تیتانیوم اولین بار در سال ۱۷۹۰ توسط گرگور<sup>۲</sup> کشف شد. کشف او به صورت اکسید سفید رنگی از مناکسانیت<sup>۳</sup> بود که نوعی ایلمنیت است که به صورت یک ماسه سیاه رنگ در نزدیکی فالموت<sup>۴</sup> در کورنوال<sup>۵</sup> تشکیل می‌شود. اما استخراج ماسه‌های ساحلی غنی از تیتانیوم در سال ۱۹۱۶ و به منظور ساخت تراکلرید تیتانیوم جهت استفاده در فیلترهای دود و موارد مشابه، آغاز شد.<sup>[۳]</sup>

کانی‌های تیتانیوم در سراسر جهان پراکنده می‌باشند. در واقع این فلز از لحاظ فراوانی پس از آلومینیوم، آهن و منیزیم چهارمین فلز صنعتی پوسته زمین بوده و ۰/۶ درصد آن را تشکیل می‌دهد. تیتانیوم به صورت‌های ایلمنیت ( $\text{FeTiO}_3$ ) و محصولات دگرسان شده آن شامل لئوکوکسن، پروسکیت  $(\text{Fe}_3\text{Ca})\text{TiO}_3$ ، اسفن  $(\text{CaTiO}(\text{SiO}_4))$ ، روتیل، آنازوبروکیت (که پلی مورفهای<sup>۶</sup>  $\text{TiO}_2$  می‌باشند)، اسکولرولیت  $(\text{Ca}(\text{Ti},\text{Fe})\text{SiO}_5)$ ، کیل‌هاویت  $(\text{CaY}(\text{Ti},\text{Al},\text{Fe})\text{SiO}_5)$ ، تیتانومگنتیت  $(\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{Ti}))$  و رامسایت (لورنزیت)  $(\text{Na}_2(\text{TiO})_2\text{Si}_2\text{O}_7)$  در پوسته زمین یافت می‌شود. از این میان تنها کانی‌هایی که از لحاظ مقدار، ارزش استخراج را دارند روتیل، ایلمنیت و محصولات دگرسان شده ایلمنیت نظیر لئوکوکسن می‌باشند.<sup>[۱۸، ۱۷، ۹، ۳]</sup>

روتیل از ابتدا به عنوان مهمترین کانی برای تهیه رنگدانه و فلز تیتانیوم مطرح بوده است، ولی با کم شدن ذخایر جهانی این کانی و بالطبع افزایش قیمت آن توجهات به سمت کانی مهم دیگر تیتانیوم یعنی

<sup>۱</sup> ماده رنگی یا pigment که به صورت دی‌اکسید تیتانیوم،  $\text{TiO}_2$  می‌باشد. دیگر انواع پیگمنت‌ها عبارتند از: اکسید آنتیموان سرب سفید، سولفات سرب بازی و فسفات روی.

<sup>۲</sup> Gregor

<sup>۳</sup> Menaccanite

<sup>۴</sup> Falmouth

<sup>۵</sup> Cornwall

<sup>۶</sup> Polymorphism: خاصیت چند شکلی: منظور از چند شکلی در بلورها تنوع در سیستم تبلور آنهاست. بعضی کانیها در شرایط درجه حرارت مختلف ممکن است در سیستم تبلور جداگانه ای تشکیل شوند. به این خاصیت کانیها چند شکلی می‌گویند. مثلاً کربن به صورت الماس در سیستم کوبیک و به صورت گرافیت در سیستم هگزاگونال متبلور می‌شود.

ایلمنیت معطوف شده است. میزان ایلمنیت به مراتب از روتیل بیشتر بوده و قیمت آن نیز بسیار کمتر می باشد. بدین واسطه در حال حاضر طرحهای بسیار متنوعی جهت استفاده از این کانی در حال اجرا و یا در دست بررسی می باشد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.<sup>[۱۷]</sup>

## ۲-۲- کانی شناسی

اگر چه تیتانیوم نهمین عنصر غالب در لیتوسفر است که حدود ۰/۶۲ درصد پوسته زمین را تشکیل می دهد، با این حال کانی های معدودی وجود دارند که حاوی مقادیر قابل توجهی از آن باشند<sup>۱</sup>. این کانی ها عبارتند از: روتیل، آناتاز، بروکیت (که پلی مورف های  $TiO_2$  اند)، ایلمنیت و محصولات دگرسان شده آن شامل لئوکوکسن، پروسکیت و اسفن. آناتاز ممکن است که در آینده به عنوان یک کانسار مناسب مورد توجه قرار گیرد؛ اما ایلمنیت، ایلمنیت دگرسان شده و روتیل تا به حال کانسارهای با حجم قابل توجه بوده اند. برخی مینرال های تیتانیوم نیز می توانند به صورت کانی های فرعی اصلی، همراه با ذخایر فلدسپار حضور داشته باشند.<sup>[۳]</sup>

۲-۲-۱- ایلمنیت: فرمول شیمیایی ایلمنیت خالص  $FeO.TiO_2$  می باشد و در سیستم تریگونال رومبوهدرال متبلور می شود. نام ایلمنیت از کوهستان های ایلمن<sup>۲</sup> در شوروی سابق گرفته شده که یکی از ذخایر بزرگ این کانی به شمار می رود. این کانی همچنین به نام های دیگری چون مناکانیت و آهن تیتانیک نیز نامیده می شود. چنانچه به صورت خالص باشد به آن کریکتونیت می گویند. یک جهت کلیواژ، سختی ۶-۵، وزن مخصوص ۴/۷، جلای فلزی و نیمه فلزی، سطح شکست ناصاف و عمدتاً به صورت دو قلویی از دیگر مشخصات آن می باشد. رنگ آن سیاه ولی رنگ خاکه آن قرمز متمایل به قهوه ای است. ایلمنیت خیلی خوب صیقل می خورد و در سطوح صیقل داده شده به رنگ سفید متمایل به خاکستری است. انعکاس نوری آن نسبتاً خوب است. رسانای جریان الکتریسته بوده و در صورت همراه بودن با مگنتیت به شدت، مغناطیسی می باشد. به صورت ظاهری از هماتیت کدرتر است. محلول های شیمیایی معمولی بجز ترکیب اسید فلئوئوریدریک و اسید سولفوریک غلیظ روی آن اثر ندارند. علاوه بر عناصر اکسیژن و آهن عناصر دیگری مانند وانادیوم، اسکاندیوم، تانتالیم، نیوبوم و اکسیدهای منیزیم، منگنز، آلومینیوم و کروم به عنوان عناصر فرعی در ساختمان ایلمنیت یافت می

<sup>۱</sup>. تاکنون بیش از ۷۰ نوع کانی شناخته شده است که تیتانیوم به اشکال گوناگون در آنها یافت می شود.

<sup>۲</sup>. Ilmen



سوند. اکسید تیتانیوم بطور تئوری ۵۲/۷ درصد آن را تشکیل می‌دهد ولی دامنه نوسانات آن در ایلمنیت در صورتی که با مقداری روتیل همراه باشد در کانسنگ‌های مختلف بین ۴۰ تا ۷۰ درصد تغییر می‌کند. در درجه حرارت‌های بالا ( $600^{\circ}\text{C}$ ) کانی هماتیت و ایلمنیت ایزومورف هستند و به هر سببی ممکن است با هم مخلوط شوند و در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  یک سری محلول‌های جامد پیوسته تشکیل می‌دهند؛ به همین دلیل هماتیت اغلب به صورت تیغک‌هایی به همراه ایلمنیت تشکیل می‌شود؛ لی‌وقتی درجه حرارت محیط کاهش یابد به صورت مستقل از هم تشکیل می‌شوند. [۲۲، ۳]

چنانچه منگنز و یا منیزیم جانشین آهن شود کانی ژیکلیت  $\text{MgTiO}_3$  و یا پیروفانیت  $\text{MnTiO}_3$  تشکیل می‌شود. البته معمولاً این دو عنصر به صورت ناخالصی‌های فرعی حضور دارند. ایلمنیت را می‌توان در سنگ‌های آذرین قلیایی و دگرگونی همراه با مگنتیت یافت. از آنجا که این کانی در برابر خراب مقاوم است می‌توان آن را در ذخایر پلاسری نیز پیدا کرد. نکته جالب در مورد این کانی این است که فراوانترین کانی کدر در کره ماه می‌باشد که در بعضی از سنگ‌های این کره، تا میزان ۲۰٪ یافت شده است. [۲۲، ۳]

**۱-۲-۲- ایلمنیت دگرسان شده و لئوکوکسن:** در کنسارهای ماسه‌ای، ایلمنیت در اثر کسیداسیون و خروج آهن، درجاتی از آلتراسیون از خود نشان می‌دهد. محصول نهایی این فرآیند عمدتاً  $\text{TiO}_2$  می‌باشد. تمپل<sup>۱</sup> این فرآیند را به صورت زیر توصیف کرد:

«آلتراسیون در طول مرز ذرات و ناپیوستگی‌های ساختی درون ذرات آغاز شد. پس از یک مرحله تغییر شکل، اکسیداسیون و خروج بخشی از آهن از شبکه ایلمنیت منتج به تشکیل یک تیتانات آهن حدواسط با ساختاری مشخص شد که برای آن روتیل کاذب فرض شده است. محصول آلتراسیون در مرحله اکسیداسیون کامل آهن اولیه در ایلمنیت حاوی ۷۰-۶۵٪ دی‌اکسیدتیتانیوم است که قابل مقایسه با ایلمنیت اولیه می‌باشد که ۵۲٪ دی‌اکسید دارد. محصولات آلتراسیون کانی ایلمنیت در اصطلاح «ایلمنیت دگرسان شده» نامیده می‌شوند. خیلی از کنسانتره‌های تجاری ایلمنیت عملاً محتوی ایلمنیت دگرسان شده می‌باشند. هر چند که اصطلاح «لئوکوکسن» نیز برای محصولات آلتراسیون با  $\text{TiO}_2$  بالا استعمال می‌شود.» [۳]

<sup>1</sup> Temple (1966)

شوند. اکسید تیتانیوم بطور تئوری ۵۲/۷ درصد آن را تشکیل می‌دهد ولی دامنه نوسانات آن در ایلمنیت در صورتی که با مقداری روتیل همراه باشد در کانسنگ‌های مختلف بین ۴۰ تا ۷۰ درصد تغییر می‌کند. در درجه حرارت‌های بالا ( $600^{\circ}\text{C}$ ) کانی هماتیت و ایلمنیت ایزومورف هستند و به هر نسبتی ممکن است با هم مخلوط شوند و در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  یک سری محلول‌های جامد پیوسته تشکیل می‌دهند؛ به همین دلیل هماتیت اغلب به صورت تیغک‌هایی به همراه ایلمنیت تشکیل می‌شود؛ ولی وقتی درجه حرارت محیط کاهش یابد به صورت مستقل از هم تشکیل می‌شوند. [۲۲،۳]

چنانچه منگنز و یا منیزیم جانشین آهن شود کانی ژیکلیت  $\text{MgTiO}_3$  و یا پیروفانیت  $\text{MnTiO}_3$  تشکیل می‌شود. البته معمولاً این دو عنصر به صورت ناخالصی‌های فرعی حضور دارند. ایلمنیت را می‌توان در سنگ‌های آذرین قلیایی و دگرگونی همراه با مگنتیت یافت. از آنجا که این کانی در برابر تخریب مقاوم است می‌توان آن را در ذخایر پلاستی نیز پیدا کرد. نکته جالب در مورد این کانی این است که فراوانترین کانی کدر در کره ماه می‌باشد که در بعضی از سنگ‌های این کره، تا میزان ۲۰٪ یافت شده است. [۲۲،۳]

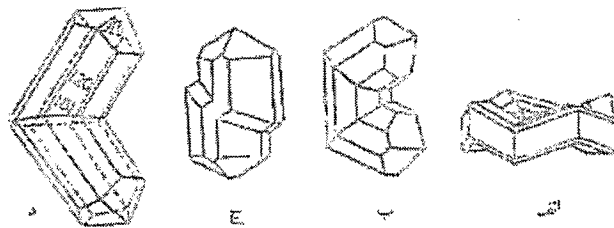
۲-۲-۲- ایلمنیت دگرسان شده و لئوکوکسن: در کانسارهای ماسه‌ای، ایلمنیت در اثر اکسیداسیون و خروج آهن، درجاتی از آلتراسیون از خود نشان می‌دهد. محصول نهایی این فرآیند عمدتاً  $\text{TiO}_2$  می‌باشد. تمپل<sup>۱</sup> این فرآیند را به صورت زیر توصیف کرد:

"آلتراسیون در طول مرز ذرات و ناپیوستگی‌های ساختی درون ذرات آغاز شد. پس از یک مرحله تغییر شکل، اکسیداسیون و خروج بخشی از آهن از شبکه ایلمنیت منتج به تشکیل یک تیتانات آهن حدواسط با ساختاری مشخص شد که برای آن روتیل کاذب فرض شده است. محصول آلتراسیون در مرحله اکسیداسیون کامل آهن اولیه در ایلمنیت حاوی ۶۵-۷۰٪ دی‌اکسید تیتانیوم است که قابل مقایسه با ایلمنیت اولیه می‌باشد که ۵۲٪ دی‌اکسید دارد. محصولات آلتراسیون کانی ایلمنیت در اصطلاح «ایلمنیت دگرسان شده» نامیده می‌شوند. خیلی از کنسانتره‌های تجاری ایلمنیت عملاً محتوی ایلمنیت دگرسان شده می‌باشند. هر چند که اصطلاح «لئوکوکسن» نیز برای محصولات آلتراسیون با  $\text{TiO}_2$  بالا استعمال می‌شود." [۳]

<sup>1</sup>. Temple (1966)

آلتراسیون فرایندی فوق العاده آهسته می باشد که افزایش دما تأثیر بسزایی در کمک به آن دارد و به همین دلیل است که کانسارهای ماسه ای قدیمی در نواحی حاره ای و گرم عموماً شامل ایلمنیت هایی با محتوای  $TiO_2$  بالا می باشند. کانسارهای جوانتر و آنهایی که در عرض جغرافیایی بالاترند معمولاً شامل ایلمنیت های دگرسان نشده با محتوای حدود ۵۰ درصدی از  $TiO_2$  می باشند، یعنی چیزی در حدود سطح تئوریک برای ایلمنیت خالص.<sup>[۳]</sup>

۲-۲-۳- روتیل: روتیل به عنوان پلی مورف دما و فشار بالای  $TiO_2$ ، متداولترین شکل از این ترکیب در طبیعت می باشد. این کانی در سیستم تتراگونال متبلور می گردد. فرم های آن اغلب به صورت منشورهای بی پیرامید، منشوری و منشورهای مختلف دی تتراگونال می باشد؛ البته ماکل های روتیل فراوانند که می توانند به صورت ساده و یا پیچیده در کنار هم قرار گیرند. در زیر نمونه هایی از ماکل های معمولی این کانی نشان داده شده است.<sup>[۳]</sup>



شکل ۲-۱- ماکل های روتیل: الف- ماکل حلقوی، ب- ماکل سه تایی، ج- ماکل دوتایی، د- ماکل زانویی در جهت (۱۰۱)<sup>[۳]</sup>

روتیل معمولاً مقادیر متفاوتی از نیوبیوم، تانتالیم، کلومبیوم، و انادیوم، قلع و آهن به همراه دارد. طبق نظریه اوبلوا<sup>۱</sup> چنانچه در محیط مقدار آهن موجود کم باشد روتیل و در صورتی که فاقد آهن باشد کانی آناتاز به وجود می آید. تانتالیوم و کلومبیوم بدلیل شباهت نزدیک در شعاع یونی بین  $Ti^{+4}$  و  $Cb^{+5}$  و  $Ta^{+5}$  می توانند وارد مینرال های تیتانیوم شوند. در مواردی که روتیل در سنگ های متامورفیک یافت می شود، ممکن است که حاوی نیوبیوم (حدود ۱۵٪) باشد. همچنین نوع خاصی روتیل با آهن بالا وجود دارد که روتیل فرو آن یا روتیل آهن دار<sup>۲</sup> نامیده می شود. کنسانتره های روتیل

<sup>1</sup>. O-Belov

<sup>2</sup>. Ferroan Rutile

تجاری، ۹۵٪ یا بیشتر  $TiO_2$ ، به همراه  $Al_2O_3$ ،  $V_2O_5$ ،  $Cr_2O_3$ ،  $SiO_2$  و اکسیدهای آهن باقی مانده دارند. جلای الماسی، سختی ۶-۶/۵ و وزن مخصوص ۴/۳-۴/۲ از ویژگی‌های آن است. در یک سطح کلیواژ خوب و در سطح دیگر کلیواژ ضعیف ولی قابل تشخیص دارد. رنگ آن قهوه‌ای متمایل به قرمز تا قرمز و در بعضی موارد حتی سیاه، صورتی، زرد، سبز و بی‌رنگ دیده می‌شود. این کانی خیلی خوب صیقل خورده و انعکاس نوری آن متوسط خوب است. مشخصات نوری آن شبیه مگنتیت است. تقریباً در برابر تمامی محلول‌های شیمیایی مقاوم است. این کانی تقریباً در برابر درجه حرارت و فشارهای زیاد هم مقاوم است. تیغه‌های دوقلو در این کانی خیلی خوب رشد کرده‌اند. چنانچه روتیل از تبلور مجدد ایلمنیت شکل گرفته باشد ممکن است حالت دوقلویی در آن دیده نشود. روتیل در خیلی از موارد طی فرآیندهای هیدروترمال از ایلمنیت و گاهی در نتیجه آلتراسیون از ایلمنیت یا آاناتاز تشکیل می‌شود. در سنگ‌های رسوبی به مقادیر زیاد در حد اقتصادی یافت می‌شود. روتیل در محیط‌های ثانویه مثل ماسه سنگ‌ها، شیل‌ها و رس‌ها و به ویژه در محیط‌های رسوبی - ساحلی به وفور و به صورت اقتصادی به شکل دانه‌های پراکنده وجود دارد. از آنجا که روتیل دارای سختی و انعکاس نوری بالاست و در برابر محلول‌های شیمیایی مقاوم است شناسایی آن مشکل نیست، ولی با وجود اینکه در مقابل بسیاری از تغییرات شرایط زمین‌شناختی مقاوم است با این حال ممکن است شرایط به گونه‌ای تغییر کنند که روتیل، دگرسان شده و به اسفن، گاهی ایلمنیت و ندرتاً آاناتاز تبدیل شود. [۳]

### ۲-۳- طبقه بندی ذخایر

ذخایر تیتانیوم از لحاظ سنی در ادوار مختلف پراکنده شده‌اند. به طور کلی دو نوع طبقه بندی مختلف برای کانسارهای تیتانیوم ارائه شده است. در طبقه بندی نوع اول که اکثر زمین‌شناسان غربی آن را پیشنهاد می‌کنند، ذخایر تیتانیوم به دو نوع کانسارهای سنگی (منابع اولیه) و کانسارهای آبرفتی (منابع ثانویه) تقسیم شده‌اند. کانسارهای آبرفتی خود به دو دسته ذخایر ماسه‌ای - ماسه‌های سیاه - و ذخایر قاره‌ای - مناطق آبرفتی، تلماسه‌های بادی و ماسه‌های رودخانه‌ای - تقسیم می‌شوند. در طبقه بندی دوم که توسط اسمیرنوف ارائه شده است ذخایر به پنج گروه اصلی یعنی ذخایر ماگمایی، ذخایر پلاسری، ذخایر رسوبی آذرین، ذخایر دگرگونی و ذخایر دگرسان شده تقسیم شده است. در این مجموعه طبقه بندی اول مورد توجه قرار می‌گیرد. [۳]