



وزارت صنعت، معدن، تجارت

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

**عنوان:**

**گزارش وضعیت تیتانیوم در ایران و جهان**

**مجری طرح:**

امید اردبیلی

**تهیه کننده:**

صبا خدرزاده، مریم شعاعی

آمارهای منتشر شده حاکی از این است که تولیدات صنعتی جهانی در کشورهای در حال توسعه و نوظهور همچنان با سرعت بیشتری نسبت به کشورهای توسعه یافته صنعتی در حال افزایش است. این موضوع به همراه تقاضا برای فلزات و مواد معدنی در آینده‌ای کم‌کربن جهان، جایگاه رو به رشدی برای تقاضای مواد معدنی ترسیم می‌نماید که بر این اساس، آلومینیوم، مس، سرب، لیتیوم، منگنز، نیکل، نقره، فولاد، روی و عناصر نادر خاکی مانند ایندیوم، مولیبدن و نئودیمیم انواع مواد معدنی و فلزاتی هستند که با رشد انرژی‌های پاک، کاربرد بیشتری پیدا خواهند کرد. در این راستا، پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور طی سال ۱۳۹۸، ۲۶ عنصر استراتژیک و مهم را مورد مطالعه و بررسی قرار داده که گزارش حاضر به بررسی عنصر تیتانیوم می‌پردازد.

**شهریور ماه ۱۳۹۹**

**TR.۲۵**

## فهرست

پیشگفتار.....	۳
۱-مقدمه.....	۴
۲- زمین شناسی.....	۴
۳-تولید.....	۷
۴- موارد استفاده.....	۱۲
۵-تجارت.....	۱۷
منابع.....	۱۹

## پیشگفتار

آمارهای منتشر شده حاکی از این است که تولیدات صنعتی جهانی در فصل نخست سال ۲۰۱۷ در مقایسه با مدت مشابه سال ۲۰۱۶ رشد ۳,۷ درصدی داشته و مقایسه روند رشد تولید در فصول سال ۲۰۱۶ و فصل چهارم سال ۲۰۱۵ نیز نشان می‌دهد، تولید کشورهای در حال توسعه و نوظهور همچنان با سرعت بیشتری نسبت به کشورهای توسعه یافته صنعتی در حال افزایش است. این موضوع به همراه تقاضا برای فلزات و مواد معدنی در آینده‌ای کم‌کربن جهان، جایگاه رو به رشدی برای تقاضای مواد معدنی ترسیم می‌نماید که بر این اساس، آلومینیوم، مس، سرب، لیتیوم، منگنز، نیکل، نقره، فولاد، روی و عناصر نادر خاکی مانند ایندیوم، مولیبدن و نئودیمیم انواع مواد معدنی و فلزاتی هستند که با رشد انرژی‌های پاک کاربرد بیشتری پیدا خواهند کرد. گرایش جهان به چنین سمت و سویی می‌تواند منتج به شکل‌گیری فرصت‌های چشمگیر توسعه اقتصادی برای کشورهایی باشد که غنی از مواد معدنی هستند و تعریف چنین فرصتی، نشانگر نیاز به پیش‌بینی راهکارهای بلندمدتی است که به آنها این توانایی را بدهد که تصمیمات هوشمندانه‌ای برای سرمایه‌گذاری در این بخش بگیرند و هم راستای آن سیاست‌های مناسب و شایسته‌ای را برای پیامدهای فعالیت‌های معدنی از جمله حفاظت‌های لازم از محیط‌زیست در نظر داشته باشند. با توجه به جایگاه کشور عزیزمان ایران در منابع معدنی دنیا به نظر می‌رسد باید بتوان با نگرشی جامع و سیستمی، رفتاری علمی و منطقی و نهایتاً با بیان ریاضی و گویا، اقدام به بهره‌برداری از این منابع خدادادی نمود. پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور پیش‌بینی می‌نماید، با توجه به توسعه فناوری، نقش بازیگران مختلف در طول و عرض زنجیره‌ی تامین مواد معدنی از رویکرد سنتی ساختار محور به رویکرد نوین مبتنی بر مدیریت اطلاعات و ارتباط محور تغییر پیدا خواهد کرد و سیاست‌گذاران، مدیران، سرمایه‌گذاران و بازرگانان تنها با اتکای بر منابع اطلاعاتی خواهند توانست خود را در برابر فرصت‌ها و تهدیدهای موجود در زنجیره‌ی تامین و زنجیره ارزش مواد معدنی کشور بیمه نمایند. این اطلاعات قابل بروز رسانی و متکی بر داده بوده و در سطح اطلاعات جهانی و کشوری گردآوری و ارائه می‌گردند.

## ۱- مقدمه

تیتانیوم فلزی است که استحکام ویژه (Specific Strength) بالایی دارد. فلزی با چگالی پایین، بادوام، براق و چکش خوار است. به دلیل مقاومت بالای آن در مقابل گرما و آب و همچنین دمای ذوب بالا (بیش از ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد)، در دسته فلزات نسوز قرار می‌گیرد. خاصیت پارامغناطیسی دارد و هدایت الکتریکی و حرارتی آن در مقایسه با دیگر فلزات پایین است اما زمانی که به کمتر از دمای بحرانی خود ( $272,66\text{ C}^\circ$ ) برسد، به ابر رسانا تبدیل خواهد شد. مقاومت کششی (Tensile Stress) تیتانیوم با خلوص ۲/۹۹ درصد، در حدود  $434\text{ MPa}$  تا  $434\text{ MPa}$  است. این مقدار از مقاومت کششی با آلیاژهای فولاد برابری می‌کند اما چگالی پایین تری در مقایسه با آلیاژهای فولاد دارد. در خصوص چگالی این فلز می‌توان اشاره کرد که با وجود اینکه این عنصر در حدود ۶۰ درصد چگال‌تر از آلومینیوم است اما استحکام آن را بیش از دو برابر آلیاژهای معمول آلومینیوم تخمین می‌زنند.

## ۲- زمین شناسی

کنسارهای تیتانیوم در ادوار مختلف زمین شناسی مانند نهشته‌های پرکامبرین در سپرهای بالتیک، کانادا، هند و آفریقای جنوبی و در خلال کوه زایی‌های کالدونین در آفریقای جنوبی، نروژ و اورال، هرسی نین در اورال و آلپین در امریکای شمالی و جنوبی به وجود آمده‌اند.

### ۲-۱- کانیهای مهم

در حال حاضر بیش از ۷۰ نوع کانی تیتانیوم شناخته شده است که تیتانیوم را بصورت ترکیب در خود جای داده‌اند. تولید تجاری تیتانیوم عمدتاً از کانی‌های ایلمنیت ( $\text{FeTiO}_3$ ) و روتیل ( $\text{TiO}_2$ ) صورت می‌گیرد این دو کانی همچنین دارای وانادیم، اسکاندیم، ناتالیو و نیوبیوم می‌باشند. از دیگر کانی‌های تیتانیوم لوکوکسن می‌باشد که محصول نهایی آلتراسیون‌های ایلمنیت و اسفن می‌باشد. (ایلمنیت لوکوکسن حاوی ۹۶ درصد  $\text{TiO}_2$  و اسفن لوکوکسن حاوی ۶۷ درصد  $\text{TiO}_2$  می‌باشد). تیتانیوم را از آناتاز و لوپاریت نیز می‌توان بدست آورد.

#### -ایلمنیت Ilmenite

این کانی با فرمول  $FeTiO_3$  و وزن مخصوص ۴/۵-۵ بوده و دارای خاصیت مغناطیسی ضعیف می باشد. این کانی دارای وانادیم، اسکاندیم، تانتالیم و نیوبیوم می باشد.

#### -لوکوکسن

محصول نهایی آلتراسیون ایلمنیت و اسفن می باشد. ایلمنیت لوکوکسن حاوی ۹۶%  $TiO_2$  و اسفن لوکوکسن حاوی ۶۷%  $TiO_2$  است.

#### -اولواسپینل

ایلمنیت و اولواسپینل در آنورتوزیت ها، نوریت ها و سنگ های گابروی و نیز به صورت پلاسری یافت می شوند.

#### -تیتانیت اسفن (Sphene & Titanite)

کانی اسفن یک سیلیکات کلسیم و تیتانیم دارای سختی ۵-۵/۵، چگالی ۳/۴۵ - ۳/۵۵ می باشد. این کانی عمدتاً بیرنگ و در برخی مواقع دارای چندرنگی زرد تا قهوه ای و قرمز است. این کانی دارای شکل تا بی شکل و شکننده بوده و در مقاطع عرضی لوزی شکل می باشد. برجستگی آن زیاد بوده و انیزوتروپ است. این کانی در سیستم تبلور منوکلینیک متبلور می شود.

تیتانیت به کانی لوکوکسن که در نور طبیعی تقریباً کدر و در نور پلاریزه خاموش است، دگرسان می شود. وجه مشخصه این کانی مقاطع عرضی لوزی یا گوه ای شکل آن می باشد. این کانی در مراحل نهایی انجماد ماگمایی در سنگ های آذرین تشکیل می شود و به جز در بعضی نقاط (مانند کنار دریاچه Tahoe که در آنجا از گرانودیوریت مشتق شده است) به صورت آواری کمتر دیده می شود. همچنین این کانی در سنگ های دگرگونی هم دیده می شود.

پلی مرف های اکسیدتیتان عبارتند از:

#### -روتیل Rutile

نام روتیل از کلمه لاتین روتیلوس Rutilos به معنی سرخی گرفته شده است. این کانی با فرمول  $TiO_2$  و وزن مخصوص ۴/۳-۴/۲، جلای الماسی یا فلزی، سختی ۶ بوده و شکننده و غیر مغناطیسی می باشد.

ترکیب شیمیایی این کانی  $Ti = 60\%$  بوده و دارای ناخالصی می باشد. این کانی در سیستم تبلور کوبیک متبلور شده است و به رنگ زرد تیره، قهوه ای، سرخ یا سیاه است. این کانی در فوتک ذوب نمی شود و اسیدها بر آن بی اثر اند و دارای وانادیم، اسکاندیم، تانتالیم و نیوبیوم می باشد.

روتیل در طبیعت به اشکال گوناگونی تشکیل می شود. این کانی معمولاً با پلی مورف های خود یعنی آناتاز و بروکیت در پلاسرهای آبرفتی و به صورت عناصر فرعی سنگ های آذرین (مانند سینیت و بندرت گرانیت) و یا در پگماتیت، رگه های گرمابی، دگرگونی) شیست های متبلور) و سنگ های رسوبی یافت می شود. گاهی این کانی به صورت بسیار ریز موئین در سایر کانی ها به ویژه کوارتز نیز مشاهده می شود.

پودر روتیل به رنگ سفید یا تقریباً سفید و بدون بو بوده و در آب و اسید های معدنی رقیق نامحلول است ولیکن در اسید سولفوریک گرم به آرامی حل می شود و در اسید فلئوئوریدریک نیز محلول است.

- آناتاس یا آناتاز ( $TiO_2$ )

- بروکیت

- پروفسکیت  $CaTiO_2$

- مگنتیت یا هماتیت تیتانیوم دار

- لوپاریت

## ۲-۲- ژنز

کانی های تیتانیوم دار ایلمنیت، لوکوکسن (محصول دگرسان شده ایلمنیت)، اولواسپینل و چندشکلی (پلی مورف) اکسید تیتان شامل: روتیل، آناتاس، بروکیت در آنورتوزیت ها، نوریت، سنگ های گابرویی و نیز به صورت پلاسر و دریایی حاصل از آنورتوزیت یافت می شوند.

بیشتر اکسیدهای روتیل، به صورت پلاسرند و بندرت در گنیسو شیست گزارش شده اند.

بر طبق تقسیم بندی آی - مالیشف دو تیپ اصلی کانسارهای تیتانیوم دار عبارتند از:

(۱) کانسارهای تیتانیوم موجود در سنگ های آنورتوزیت باکانه های ایلمنیت و روتیل.

(۲) کانسارهای تیتانیوم موجود در سنگ های گابرویی با کانه های ایلمنیت و تیتانومینیت.

کانسارهای اقتصادی تیتانیوم نهشته هایی هستند که دارای بیش از ۱۰٪  $TiO_2$  در کانسارهای اولیه و بیش از ۱۰٪ ایلمنیت یا ۱/۵٪ روتیل در کانسارهای پلاستی می باشند. عناصر مزاحم در این کانسارها کروم، فسفر، گوگرد، کلسیم و منیزیم می باشد.

سنگ های گابرو، آنورتیت و گرانیات در سنگ های آذرین و شیست سبز در سنگ های دگرگونه به عنوان منبع اولیه و سنگ های موجود در محیط های ساحلی، رسوبات رودخانه ای، تل ماسه های بادی و ساحلی، افق های لاتریتی به عنوان منبع ثانویه تیتانیوم می باشند.

## ۳- تولید

### ۳-۱- تولید تیتانیوم

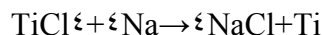
باوجود کمیاب بودن دی اکسید تیتانیوم (روتیل) و گران تر بودن این سنگ معدن، بیشترمورد استفاده قرار می گیرد زیرا فاقد ترکیبات آهن و فرآوری آن آسان تر می باشد. در برخی از موارد، با فرآوری ایلمنیت و حذف آهن، می توان به روتیل مصنوعی دست یافت. اصلی ترین فرایندهایی که موجب تولید تیتانیوم می شوند عبارتند از: هانتز، کرال، آرمسترانگ و

کمبریج

#### • فرایند هانتز

فرایند هانتز (Hunter Process) در سال ۱۹۱۰ توسط شیمیدان نیوزلندی و در آمریکا معرفی شد. این فرایند که به شکل «فرایندهای ناپیوسته (Batch Processes)» انجام می شود شامل کاهش «تیتانیوم تترا کلرید ( $TiCl_4$ )» به کمک سدیم بود. این واکنش در داخل راکتور ناپیوسته (Batch Reactor) و محیط خنثی تحت دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد

صورت می‌گرفت که بعد از آن از هیدروکلریک اسید برای شستشوی نمک از محصول نهایی مورد استفاده قرار می‌گرفت. واکنش کلی آن به صورت زیر است:



قبل از فرایند هانتر، تمامی تلاش‌ها منجر به تولید تیتانیوم با درصد خلوص بسیار پایین شده بود. این روش بعدها با روش دیگری تحت عنوان فرایند کرال جایگزین شد.

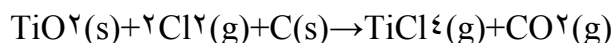
### • فرایند کرال

بیشترین میزان تولید تیتانوم حاصل از این فرایند است. فرایند kroll برای فلزت دیگری مانند Zr هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند شامل چهار مرحله زیر می‌باشد:

۱- کلریناسیون سنگ معدن به تیتانیوم (IV) کلرید

دی‌اکسید تیتانیوم به لحاظ حرارتی بسیار پایدار و در برابر واکنش‌های شیمیایی بسیار مقاوم است. دی‌اکسید تیتانیوم را نمی‌توان با استفاده از کربن، مونو اکسید کربن یا هیدروژن کاهش داد. همچنین کاهش آن بوسیله عناصر با الکتروپوزیتیوی بیشتر (الکترونگاتیوی کمتر) نیز به طور کامل صورت نمی‌گیرد. اگر بتوان آن را به صورت تیتانیوم (IV) کلرید تبدیل کرد در نهایت می‌توان به تیتانیم دست پیدا کرد چراکه کلرید به راحتی کاهش می‌یابد.

سنگ معدن خشک را به همراه گک در داخل یک کلرزن (کلیناتور) قرار می‌دهند همزمان با گرم کردن این مواد، کربن می‌سوزد و گرمای واکنش سبب می‌شود تا این فرایند در دمای ۱۰۲۷ درجه سانتیگراد ادامه پیدا کند:

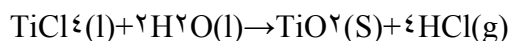


۲- خالص‌سازی تیتانیوم (IV) کلرید

تیتانیوم (IV) کلرید خام با استفاده از فرایند تقطیر، خالص‌سازی می‌شود. البته قبل از آن باید با هیدروژن سولفید  $\text{H}_2\text{S}$  یا روغن‌های معدنی آن را آماده کرد. این آماده‌سازی به این دلیل صورت می‌گیرد تا وانادیم اکسی کلراید ( $\text{VOCl}_3$ ) که نقطه جوشی برابر با تیتانیوم (IV) کلرید دارد از آن حذف شود. محصول نهایی شامل تیتانیوم (IV) کلرید با خلوص ۹/۹۹ درصد است که از آن می‌توان در تولید تیتانیوم یا رنگ‌های مات استفاده کرد.

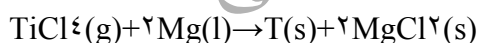


تانکرهایی که برای نگهداری این مواد استفاده می‌شود باید خشک و عاری از هرگونه رطوبت باشند چراکه این مواد در حضور آب و تحت یک هیدرولیز سریع رسوبات سفید هیدروژن کلرید از خود بجای می‌گذارند:



۳- کاهش تیتانیوم (IV) کلرید به اسفنج تیتانیوم

تیتانیوم (IV) کلرید مایعی فرار است. این مایع را گرم می‌کنند تا بخار آن را از یک رآکتور از جنس فولاد ضدزنگ عبور دهند. این رآکتور شامل منیزیمی است که تا ۵۲۶ درجه سانتی‌گراد و در محیط آرگون گرم شده است. در واکنش‌های پیرومتالوژی که استخراج فلزات در دمای بالا صورت می‌گیرد، یک عامل احیا کننده وجود دارد، در اینجا منیزیم به عنوان عامل احیا کننده حضور دارد. گذر تیتانیوم (IV) کلرید از رآکتور و واکنش آن گرمازا است و دما را تا ۸۲۶ درجه سانتی‌گراد بالا می‌برد. بر اثر این واکنش‌ها، کلریدهای تیتانیوم (II) و تیتانیوم (III) تولید می‌شوند. کلریدهای تولیدی در حین واکنش، سرعت پایین دارند و به جهت سرعت بخشیدن به واکنش، دما را تا بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بالا می‌برند. با این وجود باز هم انجام این واکنش زمان‌بر خواهد بود:



پس از گذشت ۳۶-۵۰ ساعت، رآکتور را از کوره خارج می‌کنند و به مدت ۴ روز زمان می‌دهند تا سرد شود. منیزیمی که در واکنش شرکت نکرده است را به همراه مخلوط کلرید و تیتانیوم خرد می‌کنند و به منظور حذف منیزیم کلرید، آنها را با هیدروکلریک اسید رقیق شستشو می‌دهند. در روشی دیگر که معمولاً در ژاپن انجام می‌شود، حذف منیزیم واکنش نداده از تیتانیوم به کمک تقطیر خلا و با دمای بالا انجام می‌شود.

با الکترولیز منیزیم کلرید، از منیزیم تولیدی دوباره در فرایند کاهش استفاده می‌کنند و کلر تولیدی را نیز در بخش کلر زنی بکار می‌گیرند. خالص‌سازی تیتانیوم به کمک تقطیر در دمای بالا انجام می‌شود. فلز تولید شده به شکل دانه‌های ریزی است که به آن اسفنج تیتانیوم می‌گویند. این گرده‌های تیتانیومی را می‌توان جداگانه به فروش رساند یا با فرآوری آنها به محصولات مختلف تیتانیومی دست یافت. در برخی موارد از آن به عنوان رنگ دانه سفید استفاده می‌شود.

۴- فرآوری اسفنج تیتانیوم

اسفنج تیتانیوم به سادگی در دمای بالا با نیتروژن و اکسیژن واکنش می‌دهد. در نتیجه برای فرآوری آن باید از محیط‌های خلأ یا محیطی خنثی مانند آرگون کمک گرفت. در این مرحله، ممکن است مواد بازیافتی این فلز یا فلزات دیگر را بمنظور تولید آلیاژهای تیتانیوم به فرایند اضافه کنند. یک روش معمول برای این کار، فشرده کردن مواد در بلوک‌های بزرگ است که در نهایت به الکتروود در کوره‌های قوس الکتریکی (Electric Arc Melting Crucible) تبدیل می‌شوند. قوس الکتریکی میان بوته و الکتروود رخ می‌دهد که در نهایت موجب ذوب شدن الکتروود در داخل بوته خواهد بود. این مواد مذاب، بعد از سرد شدن به شمش‌هایی تبدیل می‌شوند که می‌توان آن‌ها را برای ایجاد کیفیت بهتر، دوباره ذوب کرد.

#### • فرایند آرمسترانگ

برای تولید تیتانیوم و آلیاژهای آن، می‌توان به جای استفاده از منیزیم، از سدیم استفاده کرد. با وجود اینکه این روش از نظر شیمی، روش جدیدی نیست اما به تازگی روشی پیوسته به همین منظور توسعه پیدا کرده است که باعث کاهش هزینه‌ها نیز خواهد شد.

تیتانیوم (IV) کلرید به یک جریان مذاب از سدیم وارد می‌شود و کلرید طی یک فرایند ردوکس به فلز کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که تیتانیوم و سدیم کلرید هر دو جامد هستند، خارج کردن آنها از سدیم مذاب به کمک فیلتراسیون صورت می‌گیرد. پس از این مرحله، جداسازی فلز تیتانیوم از نمک، به سادگی با شستشو توسط آب امکان‌پذیر خواهد بود. سدیم کلرید تولید شده بعد از خشک شدن، ذوب و به کمک الکترولیز به سدیم و کلر تبدیل می‌شود. از سدیم و کلر تولیدی به طور مجدد در «فرایند آرمسترانگ» بهره می‌گیرند.

#### • فرایند کمبریج

تحقیقات در دانشگاه کمبریج انگلستان موجب توسعه روشی بر پایه الکترولیت شد که دی‌اکسید تیتانیوم را به طور مستقیم به تیتانیوم تبدیل کند.

دی‌اکسید تیتانیوم (روتیل) را پودر و به گلوله‌هایی تبدیل می‌کنند که نقش کاتدی دارند. این گلوله‌ها را داخل حمام مذابی از کلسیم کلرید قرار می‌دهند. این سلول به کمک یک آند کربنی کامل می‌شود. با اعمال ولتاژ، اکسید تیتانیوم به تیتانیوم

کاهش می‌یابد و یون‌های اکسیدشده به طرف آند کربنی حرکت می‌کنند. این عمل موجب تشکیل مونو اکسید و دی‌اکسید کربن خواهد بود. با اعمال ولتاژ بالاتر، مکانیسم متفاوتی رخ می‌دهد. کلسیم در کاتد رسوب می‌کند و با دی‌اکسید تیتانیوم وارد واکنش می‌شود. فرآورده‌های این واکنش، تیتانیوم و یون‌های کلسیم هستند. این فرایند به سبب دمای پایین‌تر واکنش، هزینه و خطرات زیست‌محیطی کمتری دارد. استفاده از این روش موجب کاهش هزینه‌ها و بکارگیری گسترده این فلز با ارزش خواهد بود.

### ۳-۲- استخراج و فراوری

ذخایر اولیه تیتانیوم به دلیل نحوه تشکیل در اعماق نیازمند عملیات استخراج و سپس فراوری می‌باشند و این در حالی است که ذخایر ثانویه عمدتاً به دلیل در دسترس بودن و عدم نیاز به عملیات خردایش، از لحاظ اقتصادی، فراوری آنها مقرون به صرفه می‌باشد.

#### روش‌های استخراج:

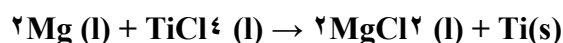
سنگ معدن تیتانیوم ( $TiO_2$ ) به روش زیر به تیتانیوم اسفنجی تبدیل می‌شود:

۱- عبور دادن گاز کلر ( $Cl_2$ ) از میان مواد شاره‌ای سنگ معدن به همراه کک. این امر منجر به تشکیل تتراکلرید تیتانیوم ( $TiCl_4$ ) می‌گردد.



۲-  $TiCl_4$  به روش تقطیر جزئی خالص سازی می‌شود.

۳-  $TiCl_4$  مایع در معرض یکی از عناصر منیزیم ( $Mg$ ) یا سدیم ( $Na$ ) تحت گاز خنثی آرگون ( $Ar$ ) قرار داده می‌شود تا تیتانیوم اسفنجی طبق رابطه زیر بدست آید:



#### روش‌های فراوری:

روش های مختلفی از جمله روشهای جدایش ثقلی برای فرآوری کانسنگ های تیتانیوم وجود دارد ولی امروزه با کاهش ذخایر پرعیار تیتانیوم و همچنین کاهش درجه آزادی کانی ایلمنیت، تکنولوژی فلوتاسیون مورد توجه قرار گرفته است و با موفقیت در معادن مختلف دنیا از جمله معدن تیتانیا نروژ بکار گرفته شده است. چالش اصلی پرعیارسازی کانسنگ ایلمنیت دار به روش فلوتاسیون، تمایل کم کلکتور آنیونی به جذب بر سطح ایلمنیت است که باعث افت بازیابی در مدار می شود. راهکار اصلی برای غلبه بر این چالش، افزودن نیترات سرب به پالپ فلوتاسیون است. با توجه به عیار کم و پیچیدگی کانی شناسی کانسنگ های ایلمنیت ایران، میتوان با بکارگیری تکنولوژی فلوتاسیون پرعیارسازی آنها را به طور مطلوب انجام داد.

اسفنج تیتانیوم به سادگی در دمای بالا با نیتروژن و اکسیژن واکنش می دهد. در نتیجه برای فرآوری آن باید از محیط های خلأ یا محیطی خنثی مانند آرگون کمک گرفت. در این مرحله، ممکن است مواد بازیافتی این فلز یا فلزات دیگر را بمنظور تولید آلیاژهای تیتانیوم به فرآیند اضافه کنند. یک روش معمول برای این کار، فشردن مواد در بلوک های بزرگ است که در نهایت به الکتروود در کوره های قوس الکتریکی (Electric Arc Melting Crucible) تبدیل می شوند. قوس الکتریکی میان بوته (ظرف) و الکتروود رخ می دهد که در نهایت موجب ذوب شدن الکتروود در داخل بوته خواهد بود. این مواد مذاب، بعد از سرد شدن به شمش هایی تبدیل می شوند که می توان آنها را برای دستیابی به کیفیت بهتر، دوباره ذوب کرد.

#### ۴- موارد استفاده

عمده ترین مصرف تیتانیوم در صنایع به دو صورت فلزی و دی اکسید تیتانیوم می باشد. مصرف فلز آن به دلیل مشکلات تهیه و خالص سازی آن مصرف چندانی ندارد، اما در عوض مصرف اکسید آن بصورت  $TiO_2$  در صنعت کاربرد بسیار گسترده ای دارد؛ بطوریکه ۹۰ درصد از صنایع اولیه، مصرف کننده اکسید تیتانیوم می باشد. امروزه فلز تیتانیوم ب عنوان یک فلز استراتژیک در موتور و ساختمان داخلی هواپیما، تجهیزات حمل و نقل صنایع شیمیایی، واحد های مولد برق، صنایع آلیاژی، ساخت زیر دریایی ها، کارخانه های ساخت مواد شیمیایی، دستگاه های خنک کننده نیروگاه های اتمی و حرارتی و دهها

مورد دیگر کاربرد دارد. مصرف عمده دی اکسید تیتانیوم در صنایع رنگ سازی به عنوان رنگدانه میباشد و همچنین این ماده در صنایع سرامیک، پلاستیک، کاغذ و الکترونیک کاربرد دارد. مصرف این ماده در کشورهای پیشرفته تقریباً ۱۰ برابر کشورهای در حال توسعه می باشد.

#### -مصارف فلز تیتانیوم

فلز تیتانیوم در محیط های فرسایشی بسیار مقاوم می باشد. تیتانیوم خالص و یا آلیاژ های آن باناخالصی کم در کارخانه های سولفورزدایی مشتقات نفتی، در تجهیزات مربوط به چاه های نفت و در اتصالات مورد نیاز و همچنین در موارد پزشکی مورد استفاده قرار می گیرد. از طرف ورق های فولادی با پوشش تیتانیوم هم اکنون در جهان تولید شده که بعلاوه خاصیت ضد فرسایشی کاربرد وسیعی در صنعت نفت و در مراحل سولفورزدایی مشتقات نفتی در پالایشگاه ها پیدا کرده اند. دیگر مصرف عمده این فلز در صنعت هواپیما سازی است.

سایر مصارف عمده تیتانیوم را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

#### ساخت کاربرد تیتانیوم

##### -سرامیک

-فرآیند شیمیایی و الکتروشیمیایی

-ساخت ورقه های فلزی و بازیافت آنها

-صنعت نفت

-سولفورزدایی گاز مایع

-نمک زدایی آب (تصفیه آب)

-ساخت پمپ های مخصوص مکش آب از دریا

-ساختمان سازی

-پزشکی (قطععات تعویضی در بدن، دندانها)

-صنایع اتومبیل سازی

-ساخت انباره های مخصوص

-جهت نگهداری از موادی نظیر ضایعات اتمی و غیره

-الیاف تقویت کننده جهت استفاده در ترکیبات فلزی

-رباط های صنعتی

-جواهرسازی

-ساخت انواع آلیاژ ها

-ذخیره سازی انرژی

-بالا بردن قابلیت هدایت حرارتی آلیاژ ها

-پرکننده

-سنگ های جواهرات مصنوعی

-نرم افزار

ایلمنیت و اکسیدهای تیتان برای تهیه تیتانیوم در آلیاژهای مهم و راهبردی استفاده می گردد.

آلیاژهای تیتانیوم در بدنه هواپیماهای جنگی، سفینه های فضایی، موشک ها، موتور هواپیماها، ادوات رزمی، توربین های گازی، دوچرخه و کامپیوترهای Laptop مورد استفاده قرار می گیرند. تیتانیوم اغلب با آلومینیوم، آهن، منگنز، مولیبدن و فلزات دیگر تشکیل آلیاژ می دهد.

ایلمنیت همچنین در تهیه اکسید تیتانیوم که در صنایع رنگ سازی، کاغذ سازی و پلاستیک به عنوان ماده رنگی، براق کردن سطح فلزات، لعاب، لاستیک سازی، شیشه، فایبرگلاس، سرامیک، الکتروسرامیک و... مصرف می شود، کاربرد دارد.

تنها در حدود ۵٪ تولید سالانه جهانی تیتانیوم صرف تولید فلز تیتانیوم شده و ۹۵٪ باقیمانده در تولید ماده رنگ دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده قرار می گیرد. این ماده دارای شکل آلوتروپی روتیل و آناتاز است که به واسطه رنگ سفید، ضریب شکست بالا (۲/۴۹ - ۲/۹۰)، درخشندگی عالی، بی اثر (خنثی بودن) و مقاومت سایشی و حرارتی بالای آن، درجه

دی‌رنگدازی بالا و توان زیاد در توزیع و انتشار یکنواخت در ترکیباتدیگر به عنوان عمده ترین ماده اولیه رنگ سفید در صنایع رنگ سازی ، کاغذسازی ، پلاستیک ، لاستیک و ... شناخته می شود.

-مصارف دارویی تیتانیوم:

پودر دی اکسید تیتان(روتیل) که از آن پراکسید تیتان ، سالیلات تیتان و تانات تیتان تهیه می کنند، عملی همانند اکسید روی بر روی پوست بدن ایجاد می کند.

دی اکسید تیتان برایالتیام سوزش های پوستی مورد استفاده قرار می گیرد و منعکس کننده اشعه ماوراء بنفش خورشید است و بدین جهت در ساختن کرم ها و لوسیون های ضد آفتاب ( ضد سوختگی ) استفاده می شود.

از پودر دی اکسیدتیتان در ساخت قاب کپسول های دارویی و پوشش قرص ها نیز استفاده می شود.

-مصارف آرایشی تیتانیوم:

دی اکسید تیتان در ساخت وسایل آرایشی به کار می رود.

مصرف سالیانه عنصرتیتانیوم و ترکیبات آن، ۱۰۵ تا ۱۰۶ تن می باشد. تقریباً ۹۵٪ تیتان بهفرم اکسید تیتان  $TiO_2$  مصرف می شود و یک رنگدانه دایمی و به شدت سفید رنگ باقدرت پوششی خوب در رنگ ها ، کاغذ و پلاستیک است رنگ ها با وجود اکسید تیتانیوم یک بازتابنده بسیار عالی اشعه مادون قرمز را می سازد و بنابراین به طور گسترده ای توسط اختر شناسان مورد استفاده قرار می گیرد. از آنجایی که این فلز مقاومت بالا، وزن سبک، مقاومت غیرعادی در برابر خوردگی و توانایی ایستادگی در برابر دماهای بسیار بالا می باشد.

بخاطر مقاومت بالادر آب دریا، این فلز برای ساخت شفت ها (محور)ملخ هواپیما و پروانه کشتی استفاده میشود.

-دی اکسید تیتان

دی اکسید تیتان در تهیه الیاف مصنوعی نیز استفاده می شود . پودر دی اکسید تیتان خالص به عنوانرنگدانه در فرآورده های غذایی کاربرد دارد.

دی اکسید تیتانیومدر کرم های (لوسیون ها) ضد آفتاب استفاده می شود که ناشی از توانایی آن در حفاظت پوست می باشد.

دی‌اکسید تیتانیومیک رنگدانه برتر سفید رنگ با ضریب شکست  $2/55 - 2/8$  است، مقاومت، درخشندگی، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر اشعه ماورای بنفش، غیرسمی بودن و پایداری در یک محدوده دمایی وسیع و قیمت مناسب آن سبب شده تا از آن در کاغذ، رنگ، پلاستیک، لاستیک، سرامیک، پارچه و مواد آرایشی استفاده شود.

دو نوع رنگدانه روتیل وجود دارد روتیل و آناتاز. روتیل از شبکه بلوری متراکم‌تری نسبت به آناتاز تشکیل شده و چگال‌تر است و ضریب شکست بالاتری دارد رنگدانه‌می‌بایست قابل استفاده در مسیر سولفات باشد (روتیل یا روتیل مصنوعی قابل استفاده نیستند) و دارای نسبت  $FeO/Fe_2O_3$  بالاتری بوده (دراسید سولفوریک واکنش‌پذیر) و آهن، کروم، وانادیوم، نیوبیوم، کلسیم، فسفات، اورانیوم، توریم و رنیم کم داشته باشد. خواص فیزیکی تقریباً مهم نیستند.

-تتراکلرینتیتانیوم

تتراکلرین تیتانیوم ( $TiCl_4$ ) یک مایع بی‌رنگ است که برای ساخت شیشه استفاده می‌شود و از آنجایی که آن در هوای مرطوب به شدت بخار می‌کند، به منظور پوشش در برابر بخار استفاده می‌شود.

ایلمنیت، روتیل، آناتاز، روتیل مصنوعی و سرباره تیتانیوم به عنوان پیش‌ماده تولید رنگدانه دی‌اکسیدتیتانیوم از دو مسیر سولفات و کلریدی امکان‌پذیر بوده که هر یک نیاز به پیش‌ماده مخصوص به خود دارند.

انواعی که در مسیر کلریدی به عنوان پیش‌ماده استفاده می‌شوند باید آلکالی کم، کمتر از  $2\% CaO$  و کمتر از  $1\% MgO$ ، داشته باشد. به علاوه آهن کم، کمتر از  $0/5\% Cr_2O_3$ ، قلع و آرسنیک، کمتر از  $2\%$  سیلیس و حداقل اورانیوم، توریم و رادیم و ... داشته باشد (هر یک از موارد فوق به دلایلی از قبیل سمی بودن، رنگ‌زایی، خواص مزاحم در حین فرآوری و ... می‌بایست در رنگدانه وجود نداشته باشند). شرایط مورد نیاز دیگر شامل چگالی، مقاومت ذرات و ... است.

با توجه به شرایط فوق، روتیل طبیعی با  $95\% TiO_2$ ، لازم است که به دلیل کمبود چنین ذخایری ایجاد طرح‌های پرعیار کردن پیش‌ماده صورت می‌گیرد.

کنسانتره ایلمنیت برای فرآوری سرباره می‌بایست حداقل  $35\% TiO_2$ ، داشته باشد، انواع سنگ سخت‌های ایلمنیت به سرباره‌های سولفات محدود می‌شوند، فرایندهای شستشوی زیرزمینی  $MgO$ ،  $CaO$  و دیگر ناخالصی‌ها را کاهش داده و



سرباره‌هایی با قابلیت قرارگیری در مسیر کلریدی ایجاد کند که معمولاً از پلاسره‌های ایلمنیت به دست می‌آیند ( $\text{TiO}_2$ ) (۵۷-۶۳٪)

-تیتانات باریوم:

ماده فروالکتريک باثابت دی‌الکتريک نسبتاً بالا در نیمه‌هادی‌ها و پیزوالکتريک‌ها به کار برده می‌شود.

-نیتريد تیتانیوم:

دمای ذوب ۲۹۵۰ درجه سانتیگراد دارد و از آن به عنوان بوته ذوب آلیاژهای لانتانیوم، رنگ زرد طلایی در جواهرات و ... به کار می‌رود.

-آلکالی‌های تیتانیوم:

پلیمریزاسیون، کاتالیزور

-تیتانات استرانسیم:

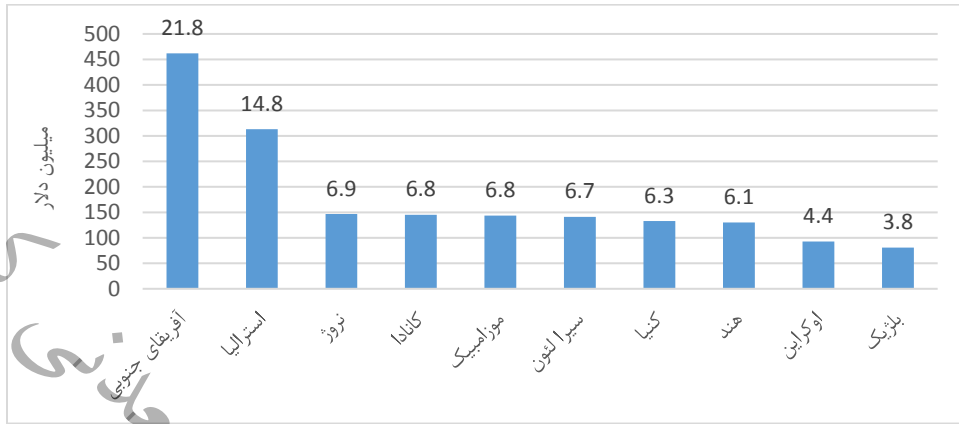
جواهر مصنوعی، ابزارنوری

## ۵-تجارت

### ۵-۱-صادرات

تولید کنندگان اصلی تیتانیوم کشورهای آفریقای جنوبی، استرالیا و نروژ هستند. در بررسی ارزش صادرات، کشور آفریقای جنوبی با صادرات ۴۶۱،۷ میلیون دلار تیتانیوم (معادل با ۲۱،۸ درصد از مجموع صادرات تیتانیوم در جهان)، بزرگترین صادرکننده در جهان در سال ۲۰۱۷ بوده است و پس از آن کشورهای استرالیا و نروژ به ترتیب با ۳۱۳ و ۱۴۶،۶ میلیون دلار، در جایگاه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

نمودار ۱- ارزش و سهم کشورها از صادرات تیتانیوم در جهان

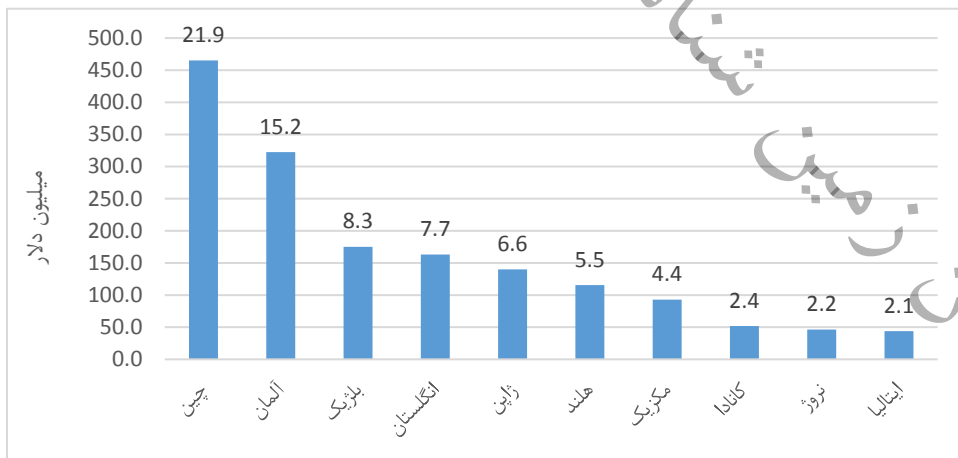


(<https://atlas.media.mit.edu>)

## ۵-۲- واردات

در سال ۲۰۱۷ کشور چین با ارزش واردات ۴۶۵ میلیون دلار تیتانیوم (معادل با ۲۱,۹ درصد از مجموع ارزش واردات تیتانیوم در جهان)، بزرگترین واردکننده این ماده معدنی بوده و پس از آن آلمان و بلژیک به ترتیب با ۳۲۲ و ۱۷۵ میلیون دلار، در رده های بعدی قرار داشته اند.

نمودار ۲- ارزش و سهم کشورها از واردات تیتانیوم در جهان



(<https://atlas.media.mit.edu>)

- <https://fa.wikipedia.org/wiki>
- <https://www.civilica.com>
- <https://oec.world>
- (<https://atlas.media.mit.edu>) The Observatory of Economic Complexity

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور