

## فلز نرم، درخشان و مهربان "نیکل"

مدیریت آموزش، پژوهش و فناوری ایمیدرو

نیکل یک فلز نقره ای مایل به سفید با خواص فلزی معمول است. این عنصر در گروه هشتم جدول تناوبی در مکان سوم بعد از آهن و کبالت قرار می گیرد و ارتباط نزدیکی نیز با این دو عنصر دارد. نیکل به شکل مخلوطی از ۵ ایزوتوپ پایدار با اعداد جرمی ۵۸، ۶۰، ۶۱، ۶۲ و ۶۴ و به ترتیب با فراوانی ۶۷/۸۴، ۲۶/۲۳، ۱/۱۹، ۳/۶۶ و ۱/۰۸ درصد در طبیعت وجود دارد. بعلاوه، ۷ ایزوتوپ رادیواکتیو مصنوعی نیز از این عنصر با اعداد جرمی ۵۶، ۵۷، ۵۹، ۶۳، ۶۵، ۶۶ و ۶۷ بدست آمده است.



شکل ۱. لیمونیت، از سنگ‌های متداول معدنی حاوی نیکل

مهم ترین ویژگی نیکل این است که می توان با آلیاژسازی، استحکام، چقرمگی، و مقاومت به خوردگی این فلز را در طیف وسیعی از بازه های دمایی بهبود بخشید. بکارگیری نیکل در صنایع آهن و فولاد غیر قابل اجتناب بوده و آلیاژهای حاوی نیکل نقش کلیدی در توسعه مواد هوا-فضا ایفا می کنند. با توجه به فراوانی نیکل در ذخایر جهانی، امکان تأمین تقاضا برای این عنصر تا سال ها وجود خواهد داشت.

تا پایان جنگ جهانی اول، کاربرد نیکل محدود به تولید محصولات نظامی بود، اما از دهه ۹۰ به بعد، این عنصر جایگاه جدیدی در انواع کاربردهای متنوع پیدا کرده و هزاران نوع آلیاژ نیکل، از نیکل نوردی با خلوص ۹۹٪ تا افزودنی حدود ۱٪ به سایر آلیاژها جهت بهبود سختی، مورد استفاده قرار می گیرند.

## "نیکل"

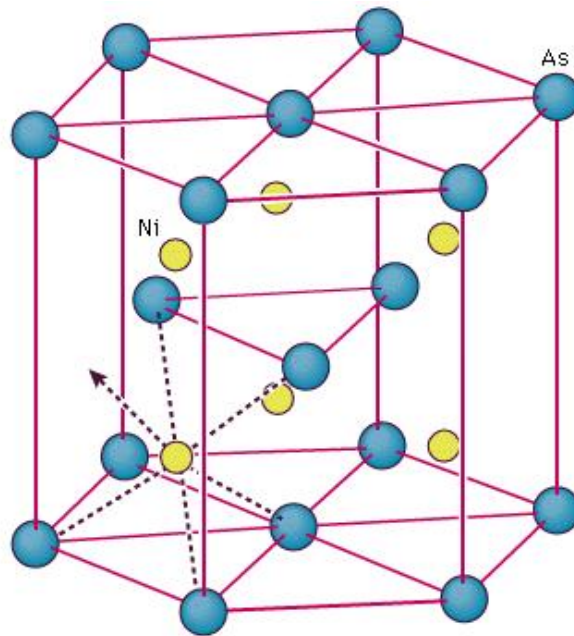


شکل ۲ عنصر نیکل

### خواص فیزیکی

خواص فیزیکی نیکل به خلوص، حالت فیزیکی فلز و عملیات قبلی انجام شده روی آن بستگی دارد. نیکل نوردی بسیار چکش خوار، نسبتاً مستحکم، سخت، داکتیل، و بسیار مقاوم به خوردگی در بسیار از محیط‌هاست. استحکام و داکتیلیته خوب آن تا دمای زیر صفر نیز حفظ می‌شود. نقطه ذوب فلز  $1455^{\circ}\text{C}$ ، نقطه جوش  $2730^{\circ}\text{C}$ ، چگالی ویژه در دمای اتاق  $8/9$ ، مقاومت الکتریکی  $6/9 \mu\Omega.\text{cm}^{-1}$  و سختی برینل آن ۸۵ است. استحکام کششی و الانگیشن نیکل تمپر شده در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  به ترتیب  $500 \text{ MPa}$  و  $48\%$  است و این مقادیر برای نیکل نوردی داغ به  $490$  و  $50\%$  می‌رسد.

نیکل معمولاً ساختار fcc تشکیل می‌دهد، هر چند که یک ساختار اصلاحی هگزاگونال نیز برای آن شناخته شده که در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  به ساختار مکعبی تبدیل می‌شود. نیکل مکعبی در دماهای زیر نقطه کوری خود،  $357^{\circ}\text{C}$ ، خاصیت فرومغناطیسی دارد، هر چند که از خاصیت فرومغناطیسی آهن ضعیف‌تر است. نیکل هگزاگونالی، خاصیت فرومغناطیسی ندارد.



©1996 Encyclopaedia Britannica, Inc.

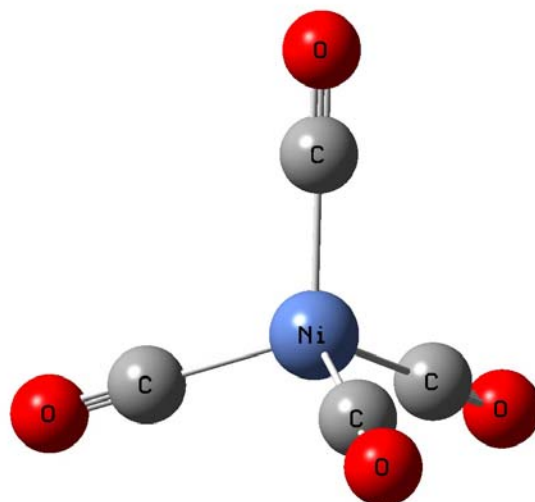
شکل ۳ ساختار کریستالی ترکیب معدنی آرسنید نیکل.

### خواص شیمیایی

نیکل از لحاظ خواص شیمیایی به آهن، کبالت و مس شباهت دارد. این عنصر به صورت اکسیدی +۲، بیشتر حائز اهمیت است؛ البته حالت های اکسیدی +۳ و +۴ نیز دیده شده است. اکسیداسیون محلول های نمکی نیکل (II) با کلر، برم، یا پرسولفات در محلول های قلیایی آبی، اکسید انحلال ناپذیر نیکل (III)،  $\beta$ -NiO(OH)، تولید می کند. اکسید نیکل (IV)،  $\text{NiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ، نیز با اکسیداسیون هیدروکسید نیکل (II) با پرسولفات بدست می آید. بر خلاف کبالت و آهن، نیکل معمولاً در محلول های آبی با حالت اکسیداسیون +۲ پایدار است.

اکسیدهای نیکل (II) به راحتی کمپلکس تشکیل می دهند. حداکثر عدد کوئوردیناسیون نیکل، شش است. به عنوان مثال، تمایل شدید نیکل برای تشکیل کمپلکس با آمونیاک در چند فرایند استحصال مورد استفاده قرار گرفته است.

یکی از عجیب ترین خواص نیکل، قابلیت واکنش دهی مستقیم آن با مونوکسید کربن و تشکیل یک کمپلکس کربونیل دوتایی است. واکنش نیکل فلزی با مونوکسید کربن در دمای  $60^\circ\text{C}$ ، ماده فرار تتراکربونیل نیکل،  $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ، تولید می کند. این واکنش، برگشت پذیر بوده و در دماهای بالاتر ( $180^\circ\text{C}$ )، ترکیب کربونیلی دوباره به مونوکسید کربن و نیکل تجزیه خواهد شد. چنین واکنشی اساس فرایند تصفیه بخار متالورژی نیکل را تشکیل می دهد. هیچ فلز دیگری تاکنون یافت نشده که بتواند در شرایط معتدل و فشار اتمسفری، ترکیبات کربونیلی مشابهی تولید کند.



شکل ۴ ساختار تتراکربونیل نیکل،  $\text{Ni(CO)}_4$ .

در دماهای متوسط، نیکل مقاومت خوردگی بالایی در برابر هوا، آب دریا، و اسیدهای غیر اکسیدکننده دارد. نیکل، کمی الکتروپوزیتیو بوده و پتانسیل استاندارد الکترودی آن،  $V - 0.25$  - است (تقریباً مشابه کبالت با پتانسیل  $V - 0.28$ ).

یکی از خواص شیمیایی فوق العاده نیکل، مقاومت به خوردگی آن در برابر مواد قلیایی است و به همین علت نیز در حمل سود سوزآور از این فلز استفاده می شود. در عوض، نیکل در برابر محلول های آبی آمونیاک مقاومت ندارد.

نیکل هیدروژن را به خود جذب می کند و جذب هیدروژن با افزایش دما، افزایش می یابد. نیتروژن توسط نیکل جذب نشده و به طور مستقیم با آن ترکیب نمی شود، هر چند که نوعی نیتريد نیکل،  $\text{Ni}_3\text{N}$ ، شناسایی شده است.

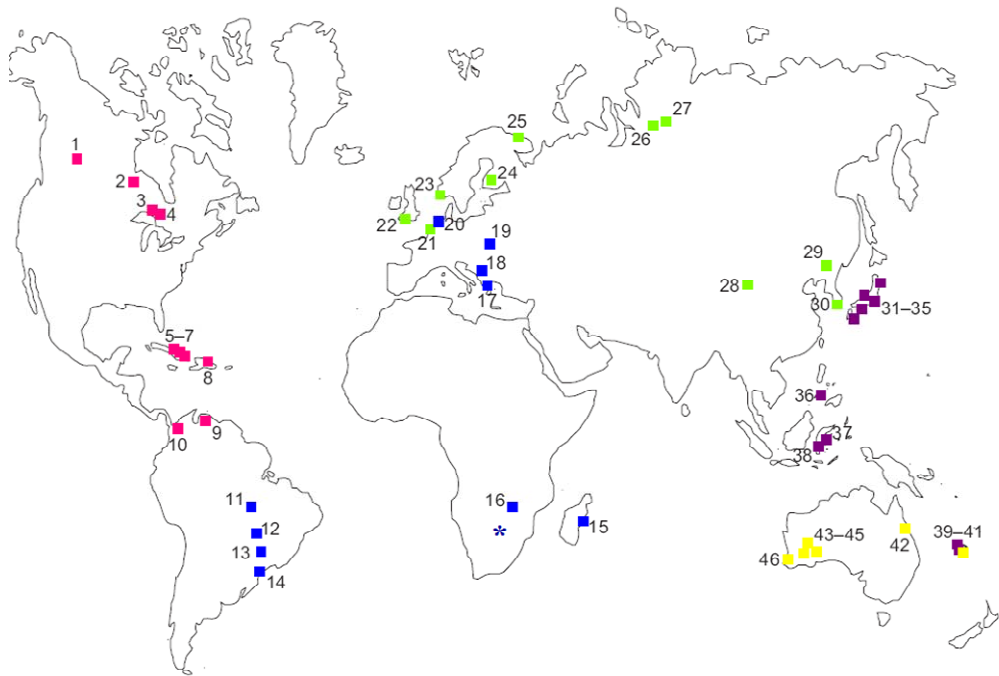
### فراوانی

فلز نیکل در جدول فراوانی عناصر در پوسته زمین با غلظت تخمینی  $0.008\%$  رتبه بیست و چهارم را داراست. هر چند که فراوانی نیکل از عناصر مس، روی، و سرب بیشتر است، ذخایر متمرکز کانی نیکل، که از لحاظ اقتصادی چشمگیر باشند، محدود هستند.

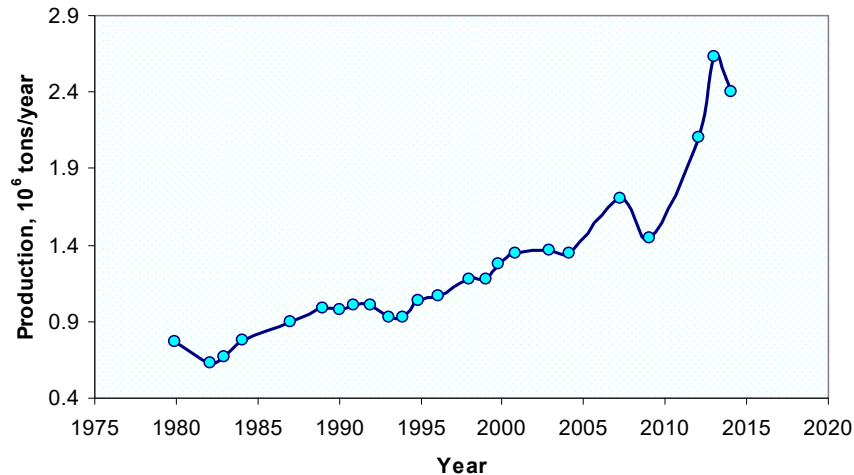
کانی های مهم اقتصادی را می توان به دو دسته سولفیدها و اکسیدها (یا سیلیکات ها) تقسیم نمود. نیکل به صورت عنصری در طبیعت یافت نمی شود. منابع جهانی شناخته شده حاوی ۱٪ نیکل یا بیشتر بوده که ۸۰٪ نیکل موجود در آنها در کانی لاتریت و ۲۰٪ باقی مانده در ذخایر سولفیدی وجود دارند.

کلوخه های منگنزی حاوی نیکل، که در کف دریا و در عمق ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰ متری به وفور یافته می شوند، عموماً بین ۰/۵ تا ۱/۵ درصد نیکل دارند. هر چند که در حال حاضر، این منابع نیکل از لحاظ اقتصادی بصره نیستند، اما قطعاً در آینده به عنوان منابع مهم نیکل مورد توجه قرار خواهند گرفت.

در ایالات متحده، منابع زیادی از نیکل درجه پایین، مانند معادن کانی لاتریت در اورگان و کالیفرنیا شمالی، وجود دارند. اما هیچ کدام از این منابع به عنوان منابع اقتصادی استحصال نیکل در نظر گرفته نشده اند.



شکل ۵ معادن و تأسیسات عمده استخراج و استحصال نیکل در دنیا. موقعیت تأسیسات فلزات گروه پلاتین در آفریقای جنوبی و زیمبابوه که مقدار قابل توجهی نیکل به عنوان محصول جانبی تولید می کند با (\*) نشان داده شده است.



شکل ۳ مقدار نیکل استخراج شده در جهان از سال ۱۹۸۰ تاکنون

### منابع و ماده خام

از میان انواع گوناگون مواد معدنی نیکل، تنها پنتلانیدیت، گارنیریت، و لیمونیت نیکل دار، به عنوان مواد معدنی اقتصادی شناخته می شوند. گارنیریت، یک نام کلی متعلق به یک سری سیلیکات های مخلوطی نیکل دار با درصد های نیکل مختلف است و می توان مخلوط های کلوئیدی اکسید سیلیسیم و هیدروکسید نیکل را نیز جزء این گروه برشمرد.

لیمونیت نیکل دار نیز اصطلاحی است که اکسید های فریک حاوی نیکل را در بر می گیرد. این اکسیدها ساختار نیمه کریستالی داشته و ترکیب اصلی آنها جئوتیت است.

اصلی ترین کانه های سولفیدی نیکل شامل پیرهوتیت، پنتلانیدیت، و کالوکوپیریت هستند. کانی های سولفیدی معمولاً ۲/۰-۴/۰ درصد نیکل، ۲/۰-۲/۰ درصد مس، ۳۰-۱۰٪ آهن و ۲۰-۵٪ گوگرد دارند و باقی مانده آنها را اکسید های سیلیسیم، منیزیم، آلومینیم و کلسیم تشکیل می دهند. پنتلانیدیت متداول ترین کانی سولفیدی است که حدود ۶۰ درصد تولید جهانی نیکل را تأمین می کند. پیرهوتیت نیکل دار، معمولاً فراوان ترین فاز در یک کانی نیکل است و حدود ۵/۰-۲/۰ درصد نیکل در حالت محلول جامد و آخال های بسیار ریز پنتلانیدیتی دارد.

هر چند که مواد معدنی اصلی در تمامی کانه های سولفیدی مشابهند، اما نسبت مقادیر پیرهوتیت، پنتلانیدیت، و کالوکوپیریت بسیار متغیر بوده و نقش تعیین کننده ای در انتخاب روش فراوری ایفا می کند.

علاوه بر تولید نیکل، درصد زیادی محصولات جانبی ارزشمند نیز از کانه های سولفیدی قابل بازیابی است، مس، کبالت، فلزات گروه پلاتین، طلا، نقره، سلنیوم، تلوریوم، گوگرد، و آهن، از جمله این محصولات هستند. کبالت اساساً به صورت محلول جامد در پنتلانیدیت با غلظت ۵-۱٪ نیکل وجود دارد. ذرات مجزای طلا، نقره، و فلزات گروه پلاتین خیلی به ندرت وجود داشته و این فلزات معمولاً به شکل محلول جامد در فازهای سولفیدی حضور دارند. فرایندهای عملیاتی نیز اغلب به گونه ای طراحی می شوند که تا حد امکان، تمامی فلزات با ارزش به صورت بهینه بازیابی گردند. اغلب منابع سولفیدی در کانادا، اتحاد جماهیر شوروی سابق، آفریقای جنوبی، استرالیا، زیمبابوه و فنلاند یافت می شوند.



شکل ۷ سنگ معدنی سولفید نیکل

کانه های اکسیدی نیکل طی یک فرایند تغلیظ شیمیایی و در نتیجه هوازگی لاتریتی، پریدوتیت تشکیل می گردند. پریدوتیت، بیشتر حاوی یک نوع سیلیکات آهن- منیزیم است که تا ۳۰ درصد وزنی نیکل دارد. در اغلب سنگ ها، پریدوتیت قبل از هوازگی به سرپنتین تبدیل شده که یک سیلیکات منیزیم هیدراته شده است.

تفاوت های میان مواد معدنی لیمونیتیکی و سیلیکاتی بر روش بازیابی نیکل از آنها تأثیر می گذارند. سیلیکات ها، که از نظر شیمیایی و مینرالوژیکی غیر همگن هستند و به یک روش فراوری انعطاف پذیر نیاز دارند، معمولاً به روش های پیرومتالورژیکی تحت عملیات قرار می گیرند. اما لیمونیت ها از نظر ترکیب شیمیایی و مینرالوژی نسبتاً همگن بوده و با روش های عملیاتی هیدرومتالورژیکی تطابق دارند.

نوعی از هوازگی که اکسید سیلیسیم و عناصر فلزی را از سنگ جدا نموده و با انحلال آنها، کانه های نیکلی لیمونیتی و سیلیکاتی تولید می کند، اغلب در مناطق آب و هوایی گرم و مرطوب با بارندگی زیاد و تجزیه مواد گیاهی، رخ می دهد. تجزیه گیاهان در این مناطق، اسید های اورگانیک و دی اکسید کربن آب های زمینی را تأمین می کنند. ذخایر اکسید نیکل در استرالیا، برزیل، کوبا،



جزایر دومینیکن، یونان، اندونزی، فیلیپین، اسکاتلند، یوگوسلاوی، ایالات متحده و جماهیر شوروی سابق، مورد بهره برداری قرار می گیرند.

هر چند که ۸۰ درصد منابع شناخته شده نیکل در دنیا به صورت کانه های اکسیدی هستند، تنها ۴۰ درصد تولید نیکل از این منابع بدست می آید و بخش اعظم نیکل تولیدی از کانه های سولفیدی حاصل می گردد. علت این امر به نقش فاکتورهای سیاسی، جغرافیایی، تکنیکی، و اقتصادی باز می گردد. ذخایر کانه های سولفیدی اغلب در کشورهای با پایداری سیاسی بیشتر و نزدیک به بازارهای اصلی نیکل وجود دارند. غلظت نیکل کانه های سولفیدی به روش های فیزیکی نسبتاً ساده و ارزان قابل افزایش است، در حالی که کانی های اکسیدی باید به صورت حجمی تحت عملیات قرار بگیرند. بعلاوه، شانس بیشتری برای استحصال محصولات فرعی ارزشمند و با حجم بیشتر از کانه های سولفیدی وجود دارد. از طرف دیگر، با توجه به استحصال مرتب منابع غنی از کانه های سولفیدی، درجه این کانه ها در معادن بزرگ رفته رفته رو به کاهش است و در عین حال، هزینه های معدن کاری زیر زمینی و نیروی کار به طور مرتب افزایش می یابد. بنابراین، منابع کانه های اکسیدی، که همگی از درجه نسبتاً یکنواختی برخوردار بوده و قابلیت استخراج سطحی را دارند، در آینده بیشتر مورد توجه قرار خواهند گرفت.

متأسفانه تولید نیکل از کانه های اکسیدی آن به روش های متداول نیازمند صرف دو تا سه برابر انرژی بیشتر نسبت به کانه های سولفیدی است. به همین علت نیز عملیات اکسید نیکل به قیمت نیروی الکتریکی و بهای نفت بستگی نزدیکی دارد.



شکل ۸ سنگ بانسنیت، اکسید نیکل منبع استخراج نیکل

### محصولات و کاربردها

نیکل، بر خلاف مس به ندرت بدون فراوری بعدی مورد استفاده قرار می گیرد و بنابراین، خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات نیکلی مورد توجه نبوده و نیکل تنها بر اساس ترکیب شیمیایی آن بازاریابی می شود. بازیابی نیکل طبق خلوص شیمیایی آن به دو دسته محصولات کلاس یک یا کلاس دو انجام می گیرد. محصولات با خلوص بالا، کاتد الکترولیزی، پودرها و گرانول های تصفیه شده کربونیلی، و نیکل پودری یا آجری که هیدروژن آن کاهش داده شده، جزو کلاس یک دسته بندی می شوند. نیکل تجاری این کلاس معمولاً خلوص ۹۹/۷ درصد یا بالاتر دارد. کلاس دو شامل انواع درجات فرونیکل، اکسید نیکل، و اکسید نیکل فلزی شده شده است. محصولات کلاس دو نیکل، معمولاً ارزان تر از کلاس یک به فروش می رسند.

## "نیکل"

برخی از محصولات نیکلی برای کاربردهای خاصی طراحی شده اند، مانند نیکل حاوی ۰/۰۲ درصد گوگرد که توسط شرکت Inco به عنوان یک ماده آند فعال در صنعت آبکاری توسعه یافته و یا پودرهای مخصوص مورد استفاده در باتری های Ni-Cd.



شکل ۹ کاربرد نیکل در ساخت باتری

اصلی ترین کاربرد نیکل در تولید فولاد ضد زنگ بوده و بیش از ۵۰ درصد مصرف نیکل را به خود اختصاص می دهد. بعد از آن، تولید آلیاژهای آهنی و آلیاژهای پایه نیکلی در رده های بعدی قرار دارند. میزان مصرف نیکل در آبکاری تنها ۱۱ درصد است.

فولاد ضد زنگ نیکل دار، که در ساخت لوازم مورد نیاز مصرف کنندگان مانند سینک های آشپزخانه، تجهیزات لباس شویی و مبلمان، قطعات آبکاری نیکلی برای دوچرخه، جواهرات، قاب عینک، و سازهای موسیقی مورد استفاده قرار می گیرد، یک چهارم کل مصرف نیکل را به خود اختصاص می دهد. کاربرد فولادهای ضد زنگ نیکل دار در ساخت و ماشینکاری واگن های قطار و تریلرهای مخزن دار، به دلیل استحکام بالا، وزن کم و نیاز کم به نگهداری و تعمیرات، رو به افزایش است. صنایع اتومبیل سازی و شیمیایی نیز در رده های بعدی از نظر میزان مصرف نیکل قرار دارند.

کاربردهای فولاد ضد زنگ نیکل دار در صنایع ساختمان سازی، الکترونیکی، تجهیزات کنترل محیطی و تولید مواد غذایی نیز رو به رشد است.

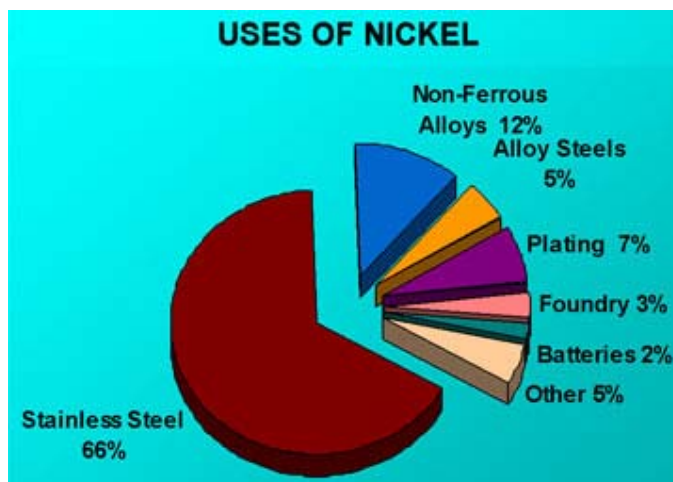


شکل ۱۰ کاربرد نیکل در آبکاری قطعات

در صنایع تولید نیرو، فولاد های ضد زنگ نیکل دار در نیروگاه های هسته ای، نفتی و زغال سنگی به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین مواد نیکل دار در صنعت پتروشیمی جهت تولید مته، لوله و سوپاپ، و در شاخه دریایی در ساخت کشتی و تأسیسات نمک گیری بکار می روند. در صنعت هوافضا، نیکل یک عنصر کلیدی در سوپراآلیاژهایی است که تا دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  یا بیشتر مقاومت به تنش و خوردگی دارند.

مواد شیمیایی نیکل دار در ساخت کاتالیست های نیکلی جهت استفاده در هیدروژنه کردن روغن های گیاهی، تصفیه روغن های سنگین، و همچنین به صورت نمک های نیکلی در آبکاری و افزایش رنگ سرامیک ها بکار برده می شوند.

هر چند که میزان تقاضا برای نیکل نسبت به سال های گذشته کاهش یافته، اما تولیدکنندگان بزرگ همچنان در تلاشند تا با توسعه بازاریابی و برنامه های تحقیقاتی، میزان مصرف نیکل را افزایش داده و راهنمایی ها و توصیه های تخصصی به مصرف کنندگان نیکل و محصولات نیکل دار ارائه دهند.



شکل ۱۱ تقسیم مصارف نیکل در دنیا

## روش های استحصال

### فراوری کانه های سولفیدی

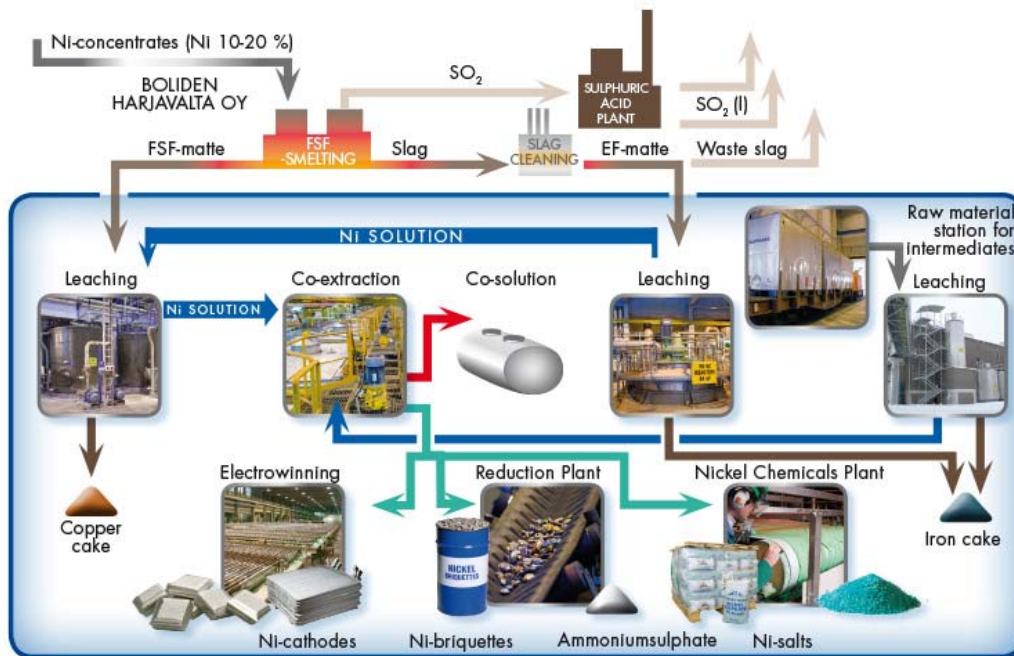
با توجه به اینکه میزان فلز موجود در کانه های سولفیدی امروزی پایین است، این کانه ها برای فراوری مستقیم به روش های گدازش یا هیدرومتالورژیکی مناسب نیستند. مواد معدنی سولفیدی معمولاً به شکل دانه های مشخص در سنگ های معدنی وجود دارند و می توان با استفاده از یک تکنیک مکانیکی آنها را از بخش اعظم سنگ جدا نمود. فلز داخل کانه توسط یک عملیات فیزیکی مانند خردسازی تغلیظ می شود. با استفاده از این روش می توان دانه های سولفیدی را آزاد کرده و در ادامه توسط یک فرایند شناورسازی با کف یا جداسازی مغناطیسی به کنسانتره غنی از فلز دست یافت.

به نظر می رسد که تولید کنسانتره های مجزای نیکل (پنتلانیدیت)، مس (کالوکوپریت)، و آهن (پیرهوتیت) امکان پذیر باشد، اما در واقع، جداسازی پنتلانیدیت از پیرهوتیت دشوار است، زیرا پیرهوتیت معمولاً حاوی آخال هایی از پنتلانیدیت و نیکل محلول جامد است. در حقیقت، پیرهوتیت اغلب ۱-۵٪ نیکل دارد که به روش های فیزیکی قابل تفکیک نیست. همین درصد نسبتاً بالای نیکل در پیرهوتیت سبب شده که میزان نیکل بدست آمده از کانه زیاد نباشد، مگر آنکه نیکل موجود در پیرهوتیت بازیابی شود. به همین ترتیب، حضور نیکل در فراوری مناسب آهن نیز اختلال ایجاد می کند.

اغلب تولیدکنندگان نیکل در خارج از کشور کانادا تمایلی به جداسازی کنسانتره های نیکل، مس و آهن نداشته و یک کنسانتره شامل پنتلانیدیت، پیرهوتیت و کالکوپریت به عنوان ماده اولیه ذوب تولید می کنند.

در کانادا، تولیدکنندگان اصلی بخش زیادی از پیرهوتیت را از پنتلانیدیت و کالکوپریت جدا نموده و شرکت Inco حتی پنتلانیدیت و کالکوپریت را نیز به دو کنسانتره مجزای نیکل و مس تبدیل می کند. با وجود تفکیک پیرهوتیت از پنتلانیدیت، پیرهوتیت باقی مانده در کنسانتره بخش مهمی از میزان سولفور را به خود اختصاص می دهد.

با بکارگیری خاصیت فرومغناطیسی پیرهوتیت یا به روش شناورسازی می توان آن را از پنتلانیدیت و کالکوپریت جدا نمود. با توجه به اینکه نوع هگزاگونالی پیرهوتیت غیر مغناطیسی است روش شناورسازی برای جدایش آن مناسب بوده و نوع دیگری از آن با ساختار کریستالی مونوکلینیک به روش مغناطیسی جدا می شود. کنسانتره های نیکل یا نیکل-مس معمولاً بین ۵ تا ۱۵ درصد نیکل+مس دارند که این درصد به درجه تفکیک پیرهوتیت بستگی خواهد داشت.



شکل ۱۲ مراحل فرآوری کانه های سولفیدی نیکل با روش گدازش و کاربردهای آن



## پیرومیتالورژی کنسانتره نیکل

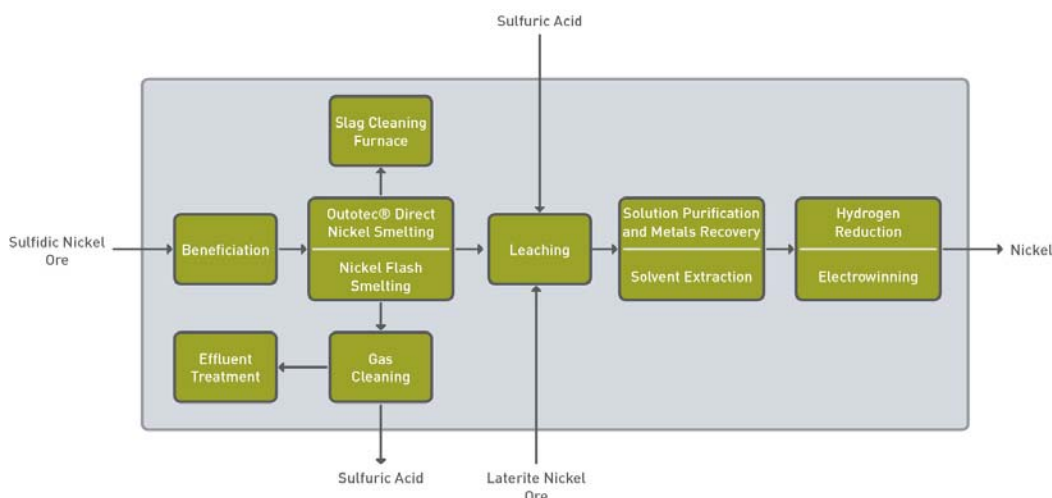
بیش از ۹۰ درصد کنسانتره های سولفید نیکلی در دنیا توسط فرایند پیرومیتالورژیکی تحت عملیات قرار می گیرند تا مات های نیکل دار بدست آیند. روش پیرومیتالورژیکی کنسانتره نیکل شامل سه نوع عملیات است: تشویه، گدازش و تبدیل. در مرحله تشویه، گوگرد به صورت دی اکسید خارج شده و بخشی از آهن نیز اکسید می گردد. در گدازش، محصول تشویه همراه با یک فلاکس سیلیسیمی ذوب می شود که با آهن اکسید شده ترکیب شده و دو فاز مخلوط ناپذیر تولید می کند. فاز اول یک سرباره سیلیکاتی مایع است که می توان آن را دور ریخت. فاز دوم محلولی از سولفیدهای مذاب بوده که فلزات مورد نظر را در خود دارد. در مرحله تبدیل سازی مذاب سولفور، گوگرد بیشتری به صورت دی اکسید خارج شده و آهن باقی مانده هم اکسید می گردد که با روان سازی به شکل یک سرباره سیلیکاتی خارج شده و در نهایت، یک مات سولفیدی نیکل-مس درجه بالا باقی می ماند.

در بسیاری از تکنیک های مدرن، مرحله تشویه حذف شده و کنسانتره سولفید نیکل مستقیماً در گدازشگر تحت عملیات قرار می گیرد.

## هیدرومیتالورژی کنسانتره نیکل

فرایندهای هیدرومیتالورژیکی متعددی به منظور فراوری مات های نیکل-مس و تولید محصولات نیکلی و مسی مجزا بکار برده می شوند. بعلاوه، یک نوع فرایند هیدرومیتالورژیکی که در اوایل دهه ۵۰ توسعه یافته، همچنان به عنوان جایگزینی برای روش گدازش مورد استفاده قرار می گیرد. در یک فرایند معمول هیدرومیتالورژی، کنسانتره یا مات ابتدا در یک محلول سولفاتی یا کلریدی شستشو داد می شود تا نیکل، کبالت و مقداری از مس حل شده و سولفید به گوگرد انحلال ناپذیر یا سولفات انحلال پذیر تبدیل گردد. شستشو اغلب در یک سیستم دو مرحله ای با جریان دو طرفه، انجام می گیرد تا مات برای خالص سازی نسبی محلول، مثلاً با ته نشین کردن مس به روش سمانته کردن، مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب، مات نیکل-مس تحت یک فرایند شستشوی دو مرحله ای قرار می گیرد و یک سولفات نیکل عاری از مس یا محلول کلرید نیکل، و یک پسماند غنی از مس تولید می کند. این پسماند در شستشوی پرفشار یا تشویه + شستشو قرار گرفته تا مس آن به صورت سولفات مس انحلال یابد و سپس به صورت الکترولیزی به عنوان کاتد مسی از محلول خارج شود. نیکل نیز، به روش الکترونیکی و به عنوان کاتد نیکلی خالص یا توسط فرایند احیای شیمیایی با هیدروژن و تولید پودر نیکل خالص از محلول کلریدی یا سولفات نیکل تصفیه شده، بازیابی خواهد شد.

میزان نیکل بدست آمده از عملیات هیدرومتالورژی مات بین ۳۵ تا ۷۵ درصد و درصد مس از صفر تا ۵۲ درصد و گوگرد از ۶ تا ۲۴ درصد متغیر است. مات های با درصد مس کم ( کمتر از ۱۰ درصد)، با شستشوی پرفشار آمونیاکی یا تصفیه الکترولیزی مستقیم مات، تحت عملیات قرار می گیرند. مات های با مس بالا نیز به روش های شستشوی پرفشار یا فشار اتمسفری با اسید سولفوریک، یا شستشو با اسید هیدروکلریک فراوری می شوند. تنظیم درصد بهینه گوگرد مات برای شستشو، در حین تبدیل سازی در گدازشگر انجام می شود. این میزان معمولاً بین ۲۰ تا ۲۳ درصد انتخاب می گردد.



شکل ۱۳ روش هیدرومتالورژی کنسانتره نیکل

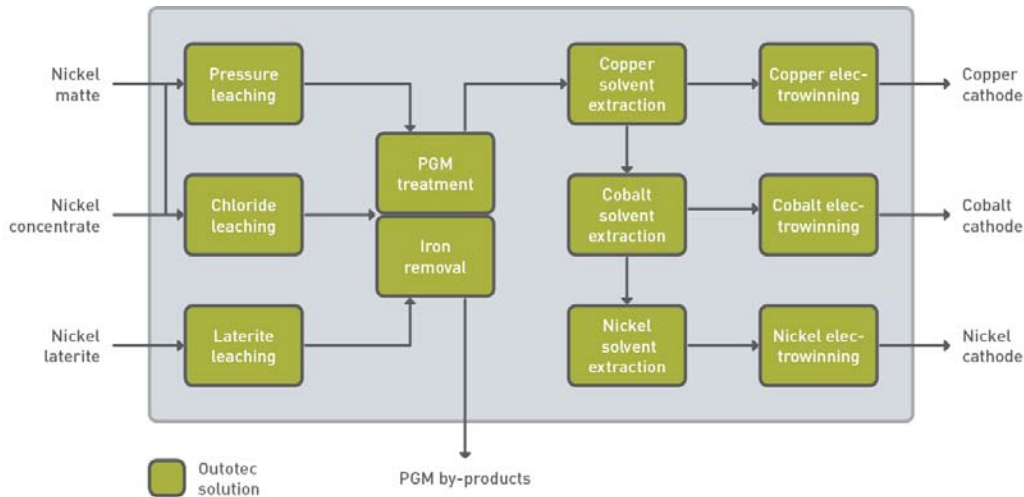
### تصفیه

نیکل، بر خلاف مس، کاربرد وسیعی به عنوان یک عنصر آلیاژی در فولاد ضد زنگ و تولید فولاد آلیاژی دارد. بنابراین، در حالیکه بیشتر مس تولیدی در کاربردهای انرژی حرارتی و الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد و خلوص بالای مس در این کاربردها ضروری است، در کاربردهای عمده نیکل نیازی به درصد خلوص بالا نیست. محصولات نیکلی، مانند اکسید نیکل، اکسید نیکل فلزی شده، و فرونیکل که جزء محصولات کلاس دو دسته بندی می شوند، به طور مستقیم به روش گدازش و تشویه تولید شده و بدن نیاز به تصفیه نیز از خلوص مناسب برای بسیاری از کاربردها از جمله تولید فولاد ضد زنگ برخوردارند. محصولات کلاس دو ممکن است حاوی مقادیر زیادی کبالت، مس و درصد کمی ناخالصی های دیگر باشند.

نیکل بسیار خالص در سایر کاربردهای این فلز ضروری است و محصولات نیکلی کلاس یک، شامل کاند الکترولیز، پودر کربونیل، و پودر احیا شده با هیدروژن، به روش های مختلفی تحت عملیات تصفیه قرار می گیرند. به طور کلی، هدف از تصفیه نیکل، کاهش ناخالصی های مضر به یک حد



قابل قبول است تا از اثرات منفی این ناخالصی ها بر خواص محصول یا فرایندهای بعدی تولید جلوگیری بعمل آید. این عناصر ناخالصی شامل آنتیمونی، آرسنیک، بیسموت، کبالت، مس، آهن، سرب، فسفر، گوگرد، قلع، و روی هستند. جداسازی کامل کبالت، که خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی با نیکل دارد، دشوار است و و هر چند که در اغلب کاربردهای نیکل به عنوان یک آلوده کننده جدی محسوب نمی شود، اما بسیاری از محصولات کلاس یک، درصد نسبتاً بالایی کبالت دارند.



شکل ۱۴ تصفیه نیکل

هدف از فرایند تصفیه، علاوه بر جدایش ناخالصی ها از نیکل، بازیابی ناخالصی هایی است که از ارزش اقتصادی برخوردارند، به عنوان مثال، فلزات نجیب و فلزات گروه پلاتین (Pd, Os, Rh, Ir, Pt و Ru)، کبالت و مس. گوگرد، سلنیوم، و توریوم نیز از عناصری هستند که در برخی موارد قابل بازیابی می باشند. تصفیه الکترولیزی، استحصال الکترولیزی، تصفیه کربونیلی، و احیای هیدروژنی به پودر نیکل نمونه هایی از روش های متداول تصفیه نیکل هستند.

### فراوری کانه های اکسیدی

همانطور که قبلاً گفته شد، کانه های اکسید نیکل دو نوعند: نوع لیمونیتی که در لایه های بالایی ذخیره لاتریتی زمین یافت می شود و مواد اکسید آهنی اصلی ترین مواد تشکیل دهنده آن است، و نوع سیلیکاتی یا گارنیریت، که در لایه های عمیق تر یافت شده و درصد آهن کمتری دارد. این کانه معمولاً نیکل بالاتری نسبت به لیمونیت دارد و حاوی درصد بالایی اکسید منیزیم و اکسید سیلیسیم است. در لیمونیت نیکل دار،  $(Fe,Ni)O(OH).nH_2O$ ، اکسید نیکل بیشتر به صورت محلول جامد با اکسیدهای آهنی وجود دارد. در سیلیکات نیکل دار، اکسیدهای نیکل، آهن و کبالت

با نسبت های متغیر حضور داشته و عموماً جایگزین بخشی از اکسید منیزیم در سرپرنتینیت،  $[Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8]$  می شوند. بیشتر ذخایر نیکلی هر دو نوع کانه را دارند و معمولاً این امکان وجود دارد تا با استخراج انتخابی و الک کردن، کانه را به دو جزء لیمونیتی آهن دار و سلیکاتی منیزیمی غنی از نیکل تقسیم نمود. متالورژی کانه های اکسید نیکل با کانه های سولفیدی تفاوت دارد، به این ترتیب که کانه های اکسیدی به دلیل پراکندگی شیمیایی نیکل در مواد معدنی اکسیدی قابل فراوری با تکنیک های استاندارد نیستند. هر چند که می توان از الک کردن برای جدا کردن تکه های کم- نیکل، که بیش از حد درشت بوده و خوب هوازده نشده اند، استفاده کرد، اما این روش تأثیر کمی در بالا بردن درجه محصول بالا خواهد داشت. در اغلب موارد، کانه مستقیماً توسط یک فرایند پیرومتالورژیکی یا هیدرومتالورژیکی تحت عملیات قرار می گیرد. اما دو فرایند دیگر نیز به این منظور توسعه یافته اند که در آنها نیکل ابتدا طی یک عملیات دما بالا به یک فاز فلزی تبدیل شده و بعد از آن با تکنیک های استاندارد فراوری کانی می توان آن را از کانه جدا کرد.

### پیرومتالورژی کانه های اکسیدی

کانه های لاتریتی نیکل از گذشته تقریباً به طور انحصاری به وسیله فرایندهای گدازشی فراوری شده اند و به جز کشور کوبا، که در آن از فرایند هیدرومتالورژی استفاده می شود، فراوری صنعتی نیکل همچنان پیرومتالورژیکی است. در توسعه فرایند گدازش کانه اکسید نیکل، از متالورژی آهن و فولاد در تولید فرونیکل و از متالورژی مس در تولید مات نیکل بهره برده شده است.

جداسازی نیکل از اکسیدهای دیرگداز نسبتاً ساده است، زیرا تفاوت زیادی میان انرژی آزاد تشکیل اکسید نیکل و اجزای پسماندی مانند اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم وجود دارد. تنظیم شرایط احیا امکان احیای کامل اکسید نیکل را فراهم کرده و درصد احیای اکسید آهن را نیز به حداقل می رساند، اما جدایش کامل نیکل از آهن به روش احیای انتخابی امکان پذیر نیست. دو فرایند دیگر برای رفع این مشکل توسعه یافته است.

در تولید فرونیکل، اکسید نیکل و بخشی از اکسید آهن در یک کوره الکتریکی احیا می شوند. مقدار آهن احیا شده به حالت فلزی تابعی از پتانسیل احیای سیستم است، به گونه ای که کانه های با نسبت  $Ni/Fe$  کم می توانند تحت گدازش قرار گرفته و فرونیکل با درجه قابل قبولی تولید نمایند. در تولید مات نیکلی، کانه همراه با یک احیاگر، یک فلاکس و یک منبع گوگرد، که ممکن است سنگ گچ، یک کانی سولفیدی یا عنصر گوگرد باشد، تحت عملیات گدازش قرار می گیرد. بیشتر نیکل و بخش عمده ای از آهن، احیا شده و سولفید می شوند تا یک فازی ماتی کم- گوگرد تشکیل

دهند. سپس جدایش آهن با روانسازی و اکسیداسیون انتخابی آهن در یک مبدل انجام می گیرد تا یک مات نیکلی با بیش از ۷۵٪ نیکل، ۲۰-۲۲٪ گوگرد و کمتر از ۱٪ آهن بدست آید.

### هیدرومتالورژی کانه های اکسیدی

همگنی شیمیایی و میرنالوژیکی کانه های نیکلی لیمونیتی به اضافه درصد بالای محصولات جانبی مفید مانند کبالت، کروم، و آهن سبب شده که این کانه ها مواد اولیه مناسبی برای عملیات هیدرومتالورژی باشند. بیشتر نیکل موجود در کانه های لاتریتی غنی از آهن، در جنوئیت ( $\alpha - \text{FeO.OH}$ ) جمع می شود، در حالیکه کبالت، تقریباً همیشه همراه با اکسیدهای منگنز یافت می گردد. بنابراین، بازیابی نیکل و کبالت اساساً شامل جداسازی این عناصر از آهن و منگنز است.

انواع فرایند های هیدرومتالورژی یا ترکیب هیدرومتالورژی و پیرومتالورژی جهت فراوری لاتریت تعریف شده اند. یک نمونه از این فرایندها شامل تشویه سولفات یا کلرید، شستشو با آب جهت بازیابی سولفات ها یا کلریدهای کبالت و نیکل حل شده، تشویه پسماندها با سود و شستشو با آب برای بازیابی کروم، و همچنین شستشوی مستقیم نیکل و کبالت با اسید سولفوریک، نیتریک یا هیدروکلریک است. تنها دو فرایند هیدرومتالورژیکی در مقیاس تجاری توسعه پیدا کرده و هر چند که با استفاده از هر دوی این فرایندها می توان کبالت و نیکل را بازیابی نمود، اما هیچ کدام در حال حاضر به منظور بازیابی کروم یا آهن بکار گرفته نمی شوند. دو فرایند صنعتی، روش کارون (Caron)، که در آن کانه احیای جزئی شده در محلول آمونیاک شستشو داده می شود، و روش موا بی (Moa Bay)، که از شستشوی مستقیم فشاری با اسید سولفوریک استفاده می کند، با هدف فراوری ذخایر عظیم لاتریتی غنی از آهن در کوبا توسعه یافته اند.

### مراجع

- 1) Gunnar F. Nordberg, Bruce A. Fowler and Monica Nordberg, Eds., Handbook on the Toxicology of Metals, 4rd ed., Vol. 2, Academic Press, 2014
- 2) U.S. Geological Survey (USGS) Minerals Information: Nickel and Cobalt, Mineral Commodity Summaries, 2015
- 3) Vignes, A., Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes. 2013: Wiley