

## فصل دوم

### دانسته هايي چند پيرامون لاتريت نيكل دار

اين نوشتار، ساختار و ژنزكاني سازيهاي نيكل لاتريتي را بررسي مي كند و روابط بين خصوصيات كانساري (زمين شناسي و غير زمين شناسي) و علل موفقيت كانسارهاي لاتريتي را در توليد اقتصادي نيكل مورد توجه قرار مي دهد. كانسارهاي لاتريتي به علت فراواني ذخاير، داراي اهميت بالايي مي باشند و در مقايسه با سولفيدها، بيشتر از مقدار كنوني مي توانند در توليد نيكل مورد نياز دنيا نقش داشته باشند.

اغلب منابع نيكل زمين در لاتريت ها ميزباني مي شوند. لاتريت فرآورده اي حاصل از هوازدگي شديد سنگهاي الترامافيك در اقليم آب و هوايي گرم و مرطوب در محيط خشكي است. فرآيند لاتريتي شدن نتيجه متلاشي شدن و تجزيه كانيهاي اوليه و رهايش عناصر شيميايي تشكيل دهنده اين كاني ها به آب هاي زيرزميني و شستشوي عناصر با تحرك بالا و در پي آن، تجمع پسماندهاي نامحلول يا ساكن و ايجاد كاني هاي پايدار در اين محيط مي باشد. در اثر تركيب اين عوامل، يك توالي از افق هايي با تركيب شيميايي و كاني شناسي متفاوت (پروفيل لاتريتي) ايجاد شده و تفاوت حركتي عناصر موجود در ناحيه هوازده، ساختارها و ساختمانهاي عمومي مشتركی را در افق های مختلف پروفیل سبب می شود. ساختارهای جزئی در افق ها به شدت متغیرند و در هر موقعیتی با عكس العمل متقابل مؤلفه های فعال آب و هوایی و عوامل زمين شناسي همچون توپوگرافي، زهكشي، تكتونيك، ساخت و جنس سنگ مادر ارتباط دارند.

#### نیکل دار

نیکل در مناطقی از لاتریت ها، در ساختمان کانی های نوبیاد و یا با دگرسانی کانی های مادر همراه می باشد که می تواند در پاره ای موارد به غنی شدگی کانساری برسد.

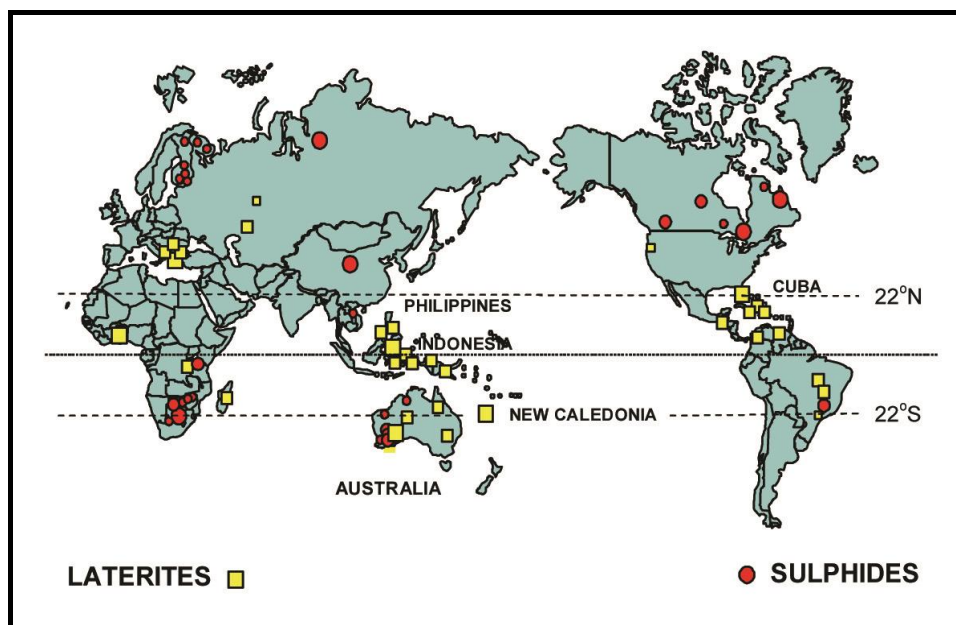
تقریباً 40 درصد تولید نیکل دنیا از لاتریت های نیکل دار بدست می آید. نیکل با سه فرآیند اصلی از کانسنگ نیکل دار استحصال می شود که هر کدام در محل بخصوصی از پروفیل خاک قرار دارند. برای استخراج نیکل و کبالت در افق های فوقانی و در مناطقی که از Mg فقیر است، از فرآیندهای هیدرومتالورژی، لیچینگ با اسید سولفوریک و لیچینگ احیایی با آمونیاک استفاده می شود. در افق های پائین تر سیلیکاتی که درصد Mg بالا است، از روش ذوب استفاده می گردد. ارزش اقتصادی نیکل لاتریتی به شدت با عیار و ترکیب کانسنگ، اندازه اقتصادی پروژه، دسترسی ارزان قیمت و زیرساخت های مورد نیاز وابسته می باشد. با نگاهی گذرا متوجه می شویم بیشترین درصد منابع نیکل در آینده نه چندان دور، در اختیار منابع نیکل لاتریتی خواهد بود.

#### 1-2- مقدمه

لاتریت ها محصول باقیمانده هوازدگی شیمیایی سنگ ها در سطح زمین می باشند. کانی های متعدد اولیه در حضور آب ناپایدار بوده و در نتیجه حل یا متلاشی می شوند و کانی های جدید پایدارتری در این محیط تشکیل می گردند. عکس العمل صورت گرفته در لاتریت ها باعث غنی شدگی مناسب بعضی عناصر می گردد و این باعث میزبانی مناسب لاتریت برای عناصر خاص می باشد. نمونه مشهور و شناخته شده از کانسار های لاتریتی، بوکسیت های آلومینیوم دار و کانسار های غنی از آهن می باشد و از گونه نامأنوس تر می توان به لاتریت های

### نيكل دار

طلادار (برای مثال بودینگتون (Boddington) در غرب استرالیا) اشاره کرد (Evans, 1993).  
 لاتريت هاي نیکل دار محصول لاتریتی شدن سنگ های غنی از Mg یا سنگ های الترامافیک با  
 0/2 تا 0/4 در صد نیکل اولیه هستند (Golightly, 1981) و بیشتر شامل سنگ های همچون  
 پریدوتیت، دونیت و هارزبورژیت یا کمپلکس های افیولیتی می باشند. انواع کماتیتی نیز با  
 گسترش کمتر و توده های الترامافیک- مافیک لایه ای که در موقعیت های تکتونیکی کراتونی  
 سکونی شکل قرار دارند از جمله سنگ منشأهای نیکل لاتریتی می باشند (Brand et al, 1998).  
 فرآیند لاتریتی شدن باعث تمرکز 3 تا 30 برابر نیکل و کبالت نسبت به سنگ مادر اولیه می  
 گردد. فرآیندهایی که باعث لاتریتی شدن در مقیاس های منطقه ای و محلی می شوند با  
 عوامل نقش آفرینی همچون آب و هوا، توپوگرافی، تکتونیکی و جنس و ساخت سنگ مادر  
 کنترل می گردند.



شکل (1-2): توزیع کانسارهای نیکل سولفیدی و لاتریتی جهان

#### نیکل دار

اغلب منابع لاتریتی در حدفاصل 22 درجه عرض جغرافیایی شمالی - جنوبی در طرفین استوا واقع گردیده اند (شکل 2-1). کانسارهای بزرگ، و در بعضی مواقع پرعیاری درمحل برخورد صفحات تکتونیکی (برای مثال اندونزی، فیلیپین و کالدونیای جدی) تشکیل می شوند، چراکه تیغه رورانده در شرایط آب و هوایی گرم حاره ای که حرارت بالا و نزولات جوی فراوان می باشد، دچار هوازگی افزایش یافته می شود. ضمن آنکه در این مناطق احتمال غنی شدگی سوپرژن بسیار بالا است. تناژ ذخایر موجود در کراتونها بالاست ولی عیار کمتری دارند (برای مثال مورین مورین (Murrin Murrin) در غرب استرالیا). نهشته های موجود در سپهرهای کراتونی غرب آفریقا (Nahonetal, 1982) و برزیل (Schobbenhaus, 1986) در محدوده استوا قرار گرفته اند، ولی منابع لاتریتی بالکان (یونان، آلبانی و یوگسلاوی سابق) (Valeton et al, 1987) و کراتون یلگاری (Yilgarn craton) غرب استرالیا در عرض های جغرافیایی بالاتر واقع شده اند. دو مثال قبلی کانسارهای قدیمی اند که هم اکنون در عرض های با آب و هوای خشک واقع شده اند و به عبارت دیگر با شرایط آب و هوایی مولدشان بسیار تفاوت پیدا کرده اند.

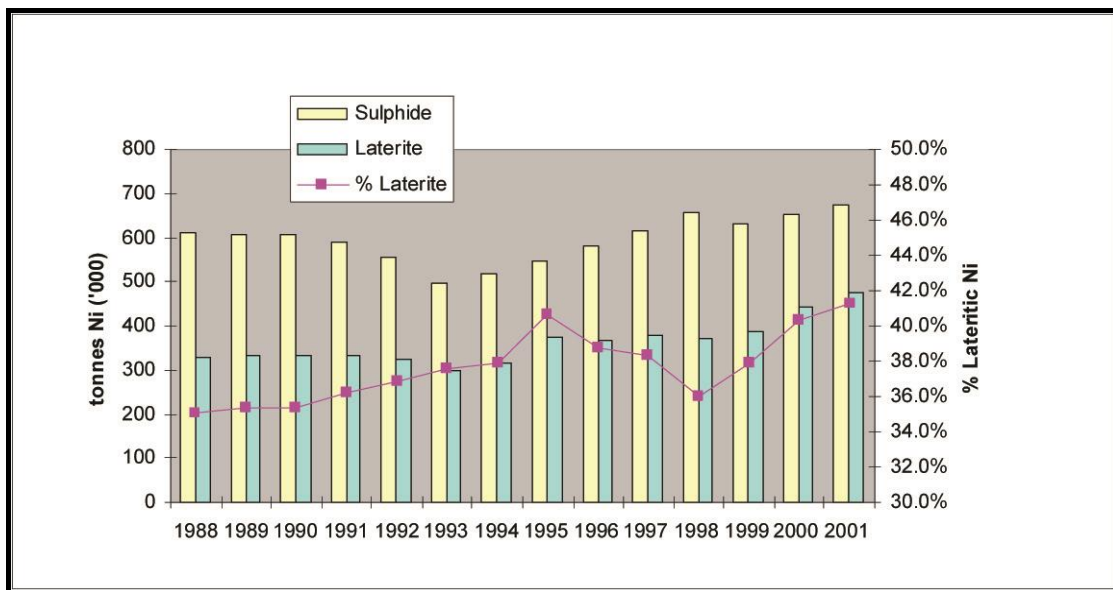
لاتریت نیکل دار نقش مهمی در صنایع جهانی نیکل ایفا می کنند و هم اکنون 40 درصد از تولید جهانی نیکل از لاتریت ها به دست می آید و تقریباً یک میلیون تن نیکل در سال توسط این صنعت تولید می شود. حدود 70 درصد کل ذخایر نیکل قاره ای زمین در لاتریت ها نهشته شده است. در 10 سال انتهایی درصد تولید نیکل از لاتریت ها نسبت به کل (سولفیدها و لاتریتها) ثابت بوده (شکل 2-2)، اما پیش بینی می شود با توجه به تهی شدگی و اتمام کانسارهای سولفیدی در سالهای آینده، این درصد نیز رشد چشمگیری پیدا کند. مهمترین مانع

دانسته هايي چند پيرامون لاتريت

نيكل دار

رشد فزاينده توليد نيكل لاتریتی هزینه بالای اقلام سرمایه ای، دستگاههای فرآوری، مقدار انرژی بالای مصرفی مورد نیاز و مشکلات فنی در بهینه سازی روش فرآوری هیدرومتالورژیکی است.

این نوشتار از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول فرآیندهای غنی سازی نیكل در لاتریت‌های حاصل از سنگهای الترامافیک و عوامل کنترلی این مؤلفه ها و طبیعت پروفیل های حاصل از آن را مورد بررسی قرار می دهد. در بخش دوم فرآیندهایی که در مقیاس بزرگ و اقتصادی و صنعتی برای استحصال نیكل بکار رفته و عواملی که از نظر اقتصادی بر موفقیت آنها اثر داشته است، مورد بحث قرار می گیرد.



شکل (2-2): تولید نیكل به تفکیک نوع کانسنگ، 2001-1988

• بخش اول

2-2- زمين شناسي پروفيلهاي لاتريتي در سنگ هاي الترامافيك

در فرآيندي كه از آن به عنوان لاتريتي شدن نام برده مي شود بايد هوازدگي شيميايي، در آب و هوايي گرم و در دوره زماني طولاني و همچنين در شرايط تكتونيكي ثابت صورت پذيرد كه در آن صورت امكان تشكيل سنگپوش (Regolithe) ضخيمي با خواص معين مهيا مي گردد (Terscases in Butt and Zeegers, 1992). در جدول (1-2) به صورت كلي آثار هوازدگي و نحوه عملكرد آن بر سنگ هاي الترامافيك آورده شده است.

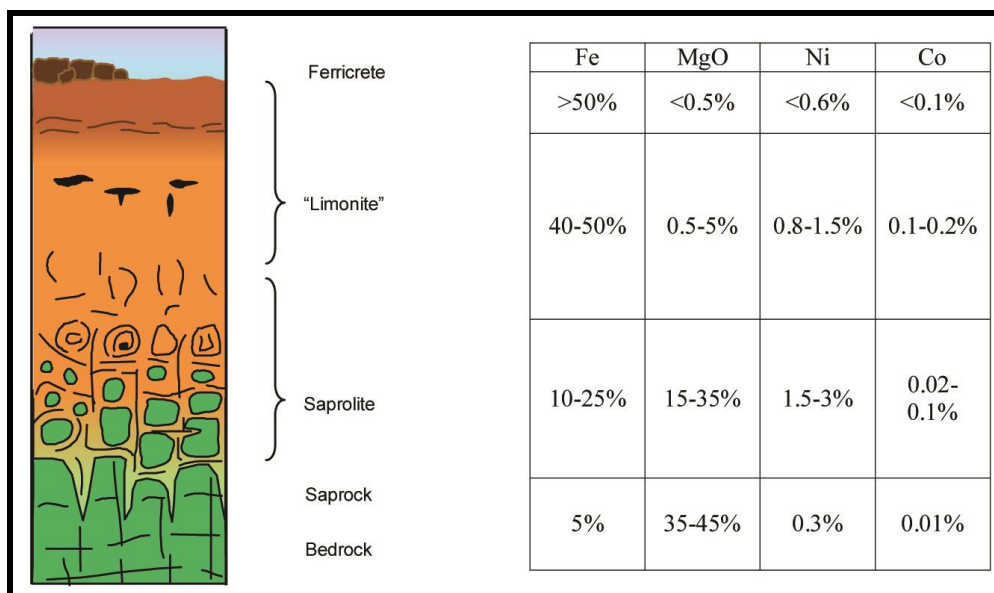
آثار مخرب روي سنگهاي الترامافيك	فرآيندهاي كلي
تجزيه اليوين، تخريب پيروكسن و سرپانتين و شستشوي Co , Mg , Ni , Mn	1- شستشوي عناصر متحرك : عناصر قليايي و قليايي خاكي
تشكيل گوتيت و اسمكتيت و جذب Ni محلول ها	2- تشكيل كاني هاي ثانويه پايدار : اكسيدهاي آهن، آلومينيم و رسها
شستشوي سيليس در محيط جنگلهاي باراني و آب و هواي مرطوب ساوانائي	3- شستشوي نسبي مواد با تحرك كمتر: سيلس، آلومينيم و تيتانيم
ته نشست اكسيدهاي Mn، جذب Ni و Co از محلولها	4- شرايط احيايي كنترل كننده تحرك و ته نشست نسبي Fe , Mn
تمرکز باقیمانده کرومیت	5- تمرکز كانيههاي مقاوم : زيركن، کروميت و كوارتز

جدول (1-2): هوازدگي و آثار مخرب آن بر سنگهاي الترامافيك (after Butt and Zeegers, 1992, p.10)

## دانسته هاي چند پيرامون لاتريت

### نيكل دار

به صورت خلاصه، فرآيند لاتريتي شدن شامل تجزيه و تخریب کانیهای اولیه و آمیزش بعضی از سازنده های شیمیایی آنها با آبهای زیرزمینی، تمرکز پسماند های غیر متحرک یا غیر محلول و در نتیجه تشکیل کانی هایی که در محیط هوازديگی پایداری دارند، می باشد. در اثر تبدیل کانیها و تحرک پذیری مختلف عناصر، پوشش لایه لایه ای از مواد هوازده در روی سنگ بستر شکل می گیرد که عموماً به عنوان «پروفیل لاتريتي» از آن نام می برند.



شکل (2-3): طرح شماتیکي از پروفیل ایجاد شده در سطح فوقانی سنگ های الترامافیک در آب و هوای حاره ای (به زون ضخیم لیمونیتی (اکسید آهن آمورف) توجه شود). ترکیب شیمیایی به صورت درصد وزنی (wt%) می باشد. در شکل (2-4) ضخامت افق آورده شده است.

فرآیند لاتريتي شدن فرآیندی پویا و تدریجی بوده و حالت لایه لایه لاتريت ها بی شک در آخرین مرحله لاتريتي شدن بوجود می آید. تحتانی ترین لایه، اولین مرحله هوازديگی سنگ

#### نيكل دار

بستر را نشان مي دهد و هرلايه نسبت به لايه هاي مجاور، تحولات خاصي را در خود دارد که بيانگر پيشروندگي فرآيند هوازدگي است.

- در تحتاني ترين قسمت پروفيل (Saprock)، هوازدگي در محل تماس ذرات و اطراف شکستگی ها صورت گرفته، سنگ هاي هوازده فراوان بوده و فرآورده هاي دگرساني کم مایه مي باشند.

- هرچه به سطح فوقاني نزديک تر شويم، مقادير کاني هاي اوليه کاهش يافته، نواحی و زون هاي شکستگی با دگرساني فراوان به سنگ بستري که به صورت قله سنگ هايي در مخلوطی از کاني هاي دگرسان و کاني هاي اوليه شناور است (ساپروليت Saprolith)، تبديل مي شود.

- درافق هاي بالاتر کاني ها کاملاً دگرسان شده بوده و بافت آنها از بين رفته است؛ اين افق در منابع تخصصی (Butt and Zeegers 1992) پدوليت (Pedolithe) نامگذاري شده که عملاً کاربرد چنداني نداشته و از نام افق ليمونيتي استفاده مي گردد. اين افق نام خود را از کاني شناسي غالب کاني هاي اکسیدی (گوتيت و هماتيت) در لاتريت هاي اکسیدی گرفته است.

### 3-2- عوامل مؤثر بر هوازدگي و گسترش پروفيل ها

فرآيندها و شرايط کنترل کننده لاتریتی شدن سنگهاي الترامافیک متعدد بوده و مقیاس متنوعی دارند، در نتیجه از جايی به جايی ديگر، طبيعت پروفيل از نظر جزئیات ضخامت و ترکیب شیمیایی و کاني شناسی و نسبت گسترش هر افق پروفيل متغير است. فاکتور هاي اساسی کنترل کننده کارایی و گسترش هوازدگي شیمیایی و در نتیجه طبيعت پروفيل بصورت زیر است:



### نيكل دار

#### 1-3-2- آب وهوا

مقدار نزولات جوي، مقدار آب عبوري از خاک را تعيين مي کند که در نتيجه بر شدت شستشو و حذف سازنده هاي محلول تأثير مي گذارد. علاوه بر مقدار نزولات جوي، کارايي يا مقدار نفوذ آب به پروفيل نيز مهم است. دماي بالاتر خاک (نسبت به دماي هوا) سرعت عملکرد واکنش هاي هوازدگي را بيشتري مي کند (Butt and Zeegers, 1992).

#### 2-3-2- توپوگرافي

شکل هندسي ارتفاعات و پستي و بلندي ها بر روي مقدار آب نفوذي به خاک و در نتيجه سطح آب زير زميني اثر دارد.

#### 3-3-2- زهکشي

بيلان آبي که براي شستشوي منطقه در دسترس است با عملکرد زهکشي تغيير مي کند.

#### 4-3-2- تکتونيك

بالا آمدگي تکتونيكي برروي فرسايش سطح فوقاني مؤثر مي باشد و ارتفاعات را افزايش داده و سطح آب زير زميني را کاهش مي دهد، ضمن آنکه پايداري تکتونيكي، شرايط رشد گياهان را نيز فراهم آورده و سرعت حرکت آب زير زميني را کاهش مي دهد.

#### 5-3-2- جنس سنگ مادر

کاني شناسي، استعداد سنگ را براي هوازدگي تعيين مي کند و عناصر لازم براي تشکيل کاني هاي جديد را مهيا مي سازد.

#### 6-3-2- ساختار

گسل ها و مناطق برشي، نفوذ پذيري قابل توجهي را ايجاد مي کنند و کليواژها پتانسيل نفوذ دگرساني را افزايش مي دهند.

عوامل زمين شناسي و آب و هوايي آشکارا به هم مرتبط اند. خواص پروفيل هاي لاتريتي با تأثير ترکيبي اين عوامل در طول زمان و نه صرفاً با حکمفرمايي يك عامل تعيين مي شود و به همین خاطر براي توصيف بهتر پروفيل، تمامی شرايط در نظر گرفته مي شود.

ضحامت پروفيل هاي لاتريتي با ميزان تعادل بين هوازدگي شيميايي سنگ بستر و فرسایش افق هاي بالايي تعيين مي شود. سرعت هوازدگي از 10 تا 50 متر بر ميليون سال متغير است و عموماً با مقدار آب نفوذی به پروفيل متناسب مي باشد که اين مقدار در سنگ هاي الترامافيك 2 تا 3 برابر سنگهاي اسیدی مي باشد (Nahon, 1986).

پروفسور تري سيس (Trescases) در سال 1975 سرعت هوازدگي را در ارتفاعات جنوبي کالدونيای جديد حدود 125 تا 140 متر در ميليون سال تخمين مي زند، ولي يکدهم از اين مقدار را در مناطق سکوئي و تراس ها در نظر مي گيرد. فرسایش سريع، گسترش پروفيل ها را بين 50 تا 100 متر محدود مي کند؛ بنابراین سن آنها کمتر از يك ميليون سال است. سرعت هوازدگي در کراتون هاي پايداري که ارتفاعات فرسوده شده اند و تا حدی بارش باران در آنها ناچيز است (براي مثال برزيل و غرب آفريقا) 10 متر در ميليون سال مي باشد (Golightly, 1981). در اين مناطق، پايداري تکتونيکی و فرسایش کم، امکان گسترش پروفيل هايي را با ضخامت 100 متر فراهم کرده است، ولي بايد توجه داشت که اين دسته از مناطق جزء مناطق فعال تکتونيکی قديمی تر مي باشند.

#### نيكل دار

با توجه به پيچيدگي و چندگانگي عوامل كنترلي مي توان چند طرح كلي را براي انواع لاتريت هايي كه در اغلب موارد با يكدیگر تشابه دارند برشمرد. پروفيل هاي لاتريتي را براساس كاني شناسي غالبشان مي توان به سه نوع تقسيم بندي نمود.

- **لاتريت هاي اكسیدی:** از اكسيدها و هيدروكسيد هاي آهن در قسمت فوقاني پروفيل تشكيل مي شوند كه سنگ هاي دگرسان شده يا سنگهاي تازه و هوانزده را مي پوشانند.
- **لاتريت هاي رسي:** از رس هاي اسمكتي در قسمت فوقاني تشكيل مي شوند.
- **لاتريت هاي سيليكاتي:** از سيليكات هاي آهن و نيكل آبدار (سرپانتين و گارنيريت) واقع در قسمت تحتاني و از اكسيد هاي آهن در سطح فوقاني تشكيل شده اند.

#### 1-4-2- لاتريت هاي اكسیدی

مهمترين محصول نهايي لاتريتي شدن، تجزيه سنگهاي الترامافيك مي باشد. در حضور آب، كاني هاي اوليه سازنده سنگ (اليوين يا سرپانتين، ارتوپيروكسن و تا حدي كلينوپيروكسن) بر اثر آبغيري تجزيه شده و عناصر سازنده خود را به شكل محلول، آزاد مي كنند. اليوين ناپايدارترين كاني است و در وهله اول هوازده و در محيط هاي گرم حاره اي Mg آن كاملاً شسته شده و به آب هاي زيرزميني مي پيوندد. سيليس به مقدار زياد شسته شده و از محيط خارج مي گردد. آهن دو ظرفيتي ( $Fe^{+2}$ ) نيز پس از آزاد شدن، اكسيده مي شود و به صورت هيدروكسيد آهن دو ظرفيتي كه در ابتدا به صورت آمورف (در برخي موارد تا حد كمی بلورش يافته) مي باشد، ته نشست پيدا کرده و بر اثر اين بلورش، گوتيت به اليوين دروغين

#### نيكل دار

شكل تبديل مي گردد. پس از آبرگيري اليوين، سرپانتين و اورتوپيروكسن هيدروليز شده و در پي آن Mg و Si مجدداً آزاد مي گردند و گوتيت دروغين شكل جاگزين آنها مي شود. در ابتدا كاني هاي همبود فرو منيزين كه سالم باقي مانده اند، از بافت سنگ محافظت مي كنند (تحولات و تغييرات، هم حجم بوده و ساخت اوليه باقي مي ماند)؛ اما همچنان كه تخریب كاني ها ادامه پيدا مي كند، ساخت باقي مانده با فرو ريزش كاني ها از بين مي رود و فشارش بافت، باعث ايجاد گوتيت با ساخت توده اي مي شود. جان كلام اينكه، تحولات كاني شناسي، آشكارا باعث کاهش مقادير Mg و تمرکز پسماند Fe مي شود و روند شيميايي مشخص کاهش Mg و افزايش Fe در افق هاي بالاتر پروفيل لاتريتي ديده مي شود (شكل 2-3).

Co و Ni به صورت كاملاً متفاوتي از عناصر اصلي رفتار مي كنند. به عبارت دقيق تر تقريباً همه Co و Ni به صورت محلول جامد در اوليوين و سرپانتين حاصل از اوليوين مي باشند. همچنانكه اين كاني ها تجزيه مي شوند، Ni و Co رها شده، با هيدرواكسيد Fe تا حدی بلورس یافته (Poor crystalline) وابستگي پيدا کرده، با آنها همراه شده و در تركيب ساختماني آنها جذب و جانشين  $Fe^{+3}$  مي شود (Gerth, 1990). در گوتيت هاي توده اي كه از اليويني با غلظت Ni 0/3% و Co 0/02% حاصل شده اند، مقدار نيكل 1/5% و كبالت 1% ديده شده است و در بعضی مواقع Co و Ni با اكسيد هاي منگنز (آسولان) همبستگي شديدي دارند كه در اثر واكنش هاي احيايي به صورت رگه ها و سطوح پوششي كاني ها و شكستگي ها ته نشست گردیده اند. در اكسيدهاي منيزيم، تا 12 درصد نيكل و 8/5 درصد كبالت شناسايي شده است (Elias et al 1981).

پدوليت (افق ليمونيتي) روندهاي كاني شناسي تدريجي گوتيت به هماتيت را نشان مي دهد. هيدروكسيدهاي آهن اوليه حاصل از تجزيه كاني هاي الترامافيك، بي شكل اند و يا تا

#### نيكل دار

حدی متبلور شده اند. درجه بلورش آنها با طی زمان تا ایجاد گوتیتی خوش ساخت با رنگ شاخص قهوه ای مایل به زرد، افزایش می یابد و همچنان تا آبگیری گوتیت و ایجاد هماتیتی با رنگ قهوه ای مایل به قرمز، ادامه می یابد. این تغییر رنگ ها معمولاً با اصطلاحات «لیمونیت زرد» و «لیمونیت قرمز» به ترتیب برای قسمت های تحتانی و فوقانی زون لیمونیتی، بیان می شوند. تبدیل گوتیت به هماتیت با خروج نیکل از ساختار هماتیت همراه است و این به علت عدم میزبانی نیکل قبلاً جایگزین شده در گوتیت، در شبکه هماتیت است. در بالاترین افق، بافت ندولی (nodular fabric) در بخش لیمونیتی قرمز، گسترش یافته که به صورت پوشش ممتد ندول های مجتمع و سخت شده در می آید. این پوسته به عنوان فری کرت (Ferricrete)، پوسته آهنی و یا با واژه فرانسوی "cuirass" شناخته می شود.

نهشته های اکسیدی با تغییر فاصله چند سانتی متری می تواند مستقیماً از ساپرولیت گوتیتی کاملاً دگرسان شده به سنگ بستر تازه تبدیل شود. عموماً مشابه شکل (2-3)، بخش های بینابینی در لاتریت های اکسیدی وجود دارد که از مخلوط گوتیت، سنگهای الترامافیک اکسید شده و سنگهای الترامافیک دست نخورده، در حد فاصل گوتیت ساپرولیتی و سطح تماس سنگ دست نخورده موجود می باشد.

کانسارهای مائوبای و پیناراس (Moa Bay and Pinares) (کوبا) (Linchenat and Shirokova, 1964) و گورو و پرنی (Goro and Prony) (جنوب کالدونیای جدید) (Golightly, 1981) مثال های مهمی از کانسارهای اکسیدی می باشند.

کانسارهای اکسیدی موجود بر روی سنگ بستردونیتی، نوع خاصی می باشند که از گوتیت و مقدار کمی رس و با درصد زیادی سیلیس کالسدونی آزاد در اشکال ذرات ریز تا

### نيكل دار

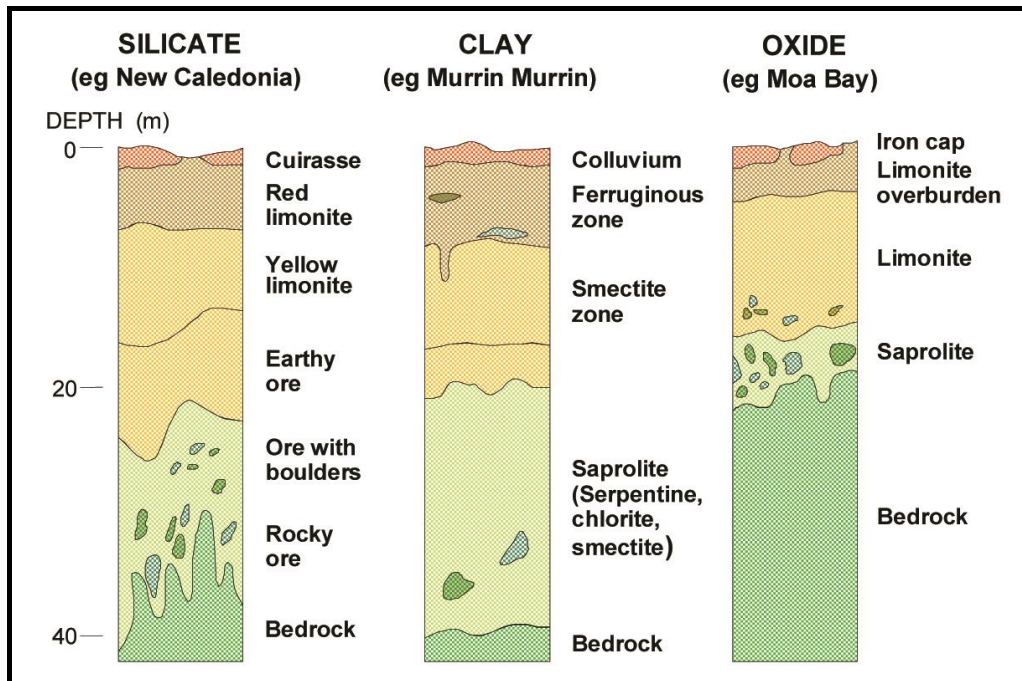
رگه هاي دانه درشت، عدسي ها و توده هاي غير ممتدد تشكيل مي شود. مثال هايي از اين نوع لاتريت ها را مي توان همراه با لاتريت هاي رسي كه در سطح پريدوتيت ها ايجاد و نمو يافته اند، مشاهده كرد و بنظر فقر آلومينيم در سنگ دونيت مانع از گسترش رس ثانويه شده است. كاوس و راونستورپ (Cawse and Ravensthorpe) در غرب استراليا نمونه اي از اين نوع كانسارهاي اكسیدی لاتریتی می باشند (Brand et al., 1998).

### 2-4-2 - لاتريت هاي رسي

در شرايط كم اثر تر هوازدي (سردتر يا خشك تر) سيليس، مانند محيط مرطوب حاره اي، سيليس از محيط خارج نمی شود و به جای افق اكسیدی آهن دار، آهن با مقدار کمی Al تركيب شده و افقی رسي با كانی شناسی غالب نانترونیتی و اسمكتیتی ايجاد می شود.

نانترونیت نقشی مانند هماتیت در محافظت و نگهداری درون شبکه ای Ni داشته كه در این عمل، جانشینی Ni بجای Fe در بین صفحات صورت می گیرد (Brand et al, 1998). رس های نانترونیتی شاخص در لاتریتهاي كانی زایی شده، 1 تا 1/5 درصد نيكل دارند. سيليس های مازاد برای تشكيل نانترونیت، به شكل ندول های اپال و كالسدون در رس ها شكل می گیرند و بیشتر در افق ها و مناطقی نظیر مناطق پست كه زهكشی کمی دارند، گسترش می یابند (Golightly, 1981).

افق های رسي را افقی غنی از Fe و فقیر از Ni می تواند پوشاند و در زیر افق رسي، افق نسبتاً هوازده ساپرولیتی كه دارای سرپانتین و نانترونیت می باشند، دیده می شود. پروفیل های غنی از رس در استراليا برای مثال در مورین مورین (Murrin Murrin) (Monti and Fazakerel, 1996) و بولنگ (Bulong) (Elias, et al., 1981) و مارلبورگ (Marlborough) (Golightly, 1981) و در برزیل گسترش وسیعی دارند.



شکل (4-2): مقایسه انواع مهم لاتريت ها با يکديگر

### 3-4-2- لاتريت های سيليكاتي

اگر چنانچه بالا آمدگی تکتونيکی کند و ممتد باشد و سطح آب زیر زمینی در پروفیل ها پایین باشد، هوازدي در طول مدت مدیدی می تواند زون ضخیم ساپرولیتی را گسترش داده و با توجه به شدت فرسایش، افق ضخیم لیمونیتی سطح فوقانی پروفیل را بپوشاند (Golightly, 1981). لاتريت های سيليكاتي، غنی شدگی مشخص نيكل را در زون ساپرولیتی نشان می دهند. در کانی های ثانویه حاصل از دگرسانی از جمله سرپانتین ثانویه، گوتیت هیدراته، اسمکتیت و گارنیریت (اصطلاحی است که برای ساختار پیچیده سيليكات Ni-Mg آبدار با درجه بلورش ضعیف که با کانی های سرپانتین، تالک و کلریت همراه می باشد استفاده می شود؛ به Pelletier, 1996 مراجعه گردد)، بیشتر نيكل مربوط به آزاد شدگی حاصل از تبلور دوباره

#### نيكل دار

گویت به هماتیت در افق بالایی می باشد. با جایگزینی Mg سرپانتین ثانویه، نیکل مجدداً ته نشست کرده و در ساپرولیت نگهداری می شود (می تواند تا 5 درصد نیکل داشته باشد). بیش از 20 درصد عیار نیکل در گارنیریت می باشد (Pelletier, 1996). میانگین مقدار نیکل در سیلیکات ها 2 تا 3 درصد می باشد. نمونه پروفیل های سیلیکاتی دارای ارزش اقتصادی در ماسیف کالدونیای جدید واقع می باشد (Golightly, 1981) که بیشترین درصد منابع نیکل را در خود جای داده اند. لازم به ذکر است مقایسه شماتیکی سه نوع پروفیل لاتریتی در شکل (2-4) آورده شده است.

#### 2-5-2- زمین شناسی محلی و ناحیه ای نهشته های لاتریتی نیکل

در گستره زمین، نیکل لاتریتی در دو موقعیت تکتونیکی یافت می شود (Brand et al., 1998):

#### 2-5-1- منشورهای انباشتی

این مناطق از نظر تکتونیکی فعال بوده و اغلب با مرزهای صفحات اقیانوسی یا قاره ای و زون های برخوردی مطابقت دارند. در این محدوده ها، گسل های تراستی همواره تگه هایی از پریدوتیت فوقانی گوشته و سنگ های تشکیل دهنده کمپلکس های افیولیتی را بر روی سنگهای زیری می رانند، بطوریکه در سطح زمین به صورت گسترده در معرض دید قرار می گیرد. فرآیندهای تکتونیکی (برای مثال بالا آمدگی ها)، نقش مهمی در شکل گیری انواع لاتریت ها دارند. سن سنگ میزبان الترامافیک لاتریتی شده از کرتاسه تا اواخر ترشیری می باشد و این پهنه ها به صورت خاص در جزایر قوسی فعال و غیر فعال اندونزی، فیلیپین و کالدونیای جدید یافت می شوند.



#### 2-5-2- فلات هاي كراتوني

لاتريت هايي كه در روي كوماتيت ها و كمپلكس هاي لايه اي به سن آر كئن تا پالئوزويك گسترش يافته اند، در اين رده جاي مي گيرند. پايداري تكتونيكي امكان تصحيح و پن پليني شدن (peneplanation) را مهيا مي سازد. لاتريت ها به صورت ارتفاعات متوسط تا فرسايش يافته ظاهر مي شوند. زهكشي محدود اغلب باعث تشكيل اسمكتيت به جاي اكسيدها مي شود و پايداري تكتونيكي، امكان لاتريتي شدن را در مدت زمان طولاني فراهم مي آورد كه اين خود باعث افزايش هوازدگي و گسترش لاتريت ها در آب و هواي سردتر و كم باران تر مي گردد. لاتريت ها و بوكسيت هاي لاتريتي نيكل دار كراتون يلگارن در غرب استراليا و قسمتي از برزيل، غرب افريقا، اورال در روسيه و اوكرين، مثالهايي از اين گونه لاتريت ها مي باشند.

بصورت محلي يا در اندازه كانساري، لاتريت هارا مي توان بر اساس موقعيت توپوگرافيشان به نهشته هاي سكوئي يا پلاتفرمي و تراسي (پلكاني) تقسيم بندي كرد (Troly et al., 1979).

نهشته هاي سكوئي اكثرأ تحت تأثير فرآيندهاي فعال زهكشي قرار دارند و كمتر فرسايش يافته اند، بنابر اين تا حد امكان پروفيل گسترش يافته اي را نشان مي دهند و به عبارت ديگر زون ساپروليتي ضخيم تري دارند. كانسارهاي صفحه اي ثيو و كونيامبو (Thio and Koniambo) در كالدونيای جديد مثال خوبي از نهشته هاي سكويي هستند. نهشته هاي زاويه دار (مايل) بيشتر تحت تأثير فرسايش قرار گرفته اند و زون اكسیدی ندارند يا اينكه ضخامت آنها ناچيز است.

گسترش لاتريت هاي سيليكاتي نسبت به نهشته هاي صفحه اي، به علت اينكه آب زيرزميني مؤلفه جانيبي شديدتري داشته، بيشتر است. اين جريان جانيبي شديدتر، باعث غني شدگي بيشتر نيكل مي شود.

#### نيكل دار

نهشته هاي پلكاني يا تراسي، باقيمانده اولين دشتگون ها (پن پلين) يا هر سطح فرسايشي مي باشند و توقف ناگهاني بالا آمدگي تكتونيكي را نشان مي دهند. آنها پروفيل هاي لاتريتي را كاملاً نشان داده و از افق ساپروليتي ضخيمي برخوردارند. نهشته هاي پلكاني، شامل فرآورده هاي فرسايش يافته لاتريت هاي سكوئي (خصوصاً بخش اكسیدی كه به راحتی فرسوده مي گردد) مي باشند كه اين نوع لاتريت ها را در بر گرفته اند. با افزايش چرخه هاي لاتريتي شدن متعدد، افزايش عيار نيكل محتمل است. مثال هاي خوبی از نهشته هاي سكوئي در جنوب كالدونيا شناخته شده است كه معروف ترين آنها نهشته گُرو (Goro deposit) مي باشد.

#### 6-2- منابع جهاني نيكل لاتريتي

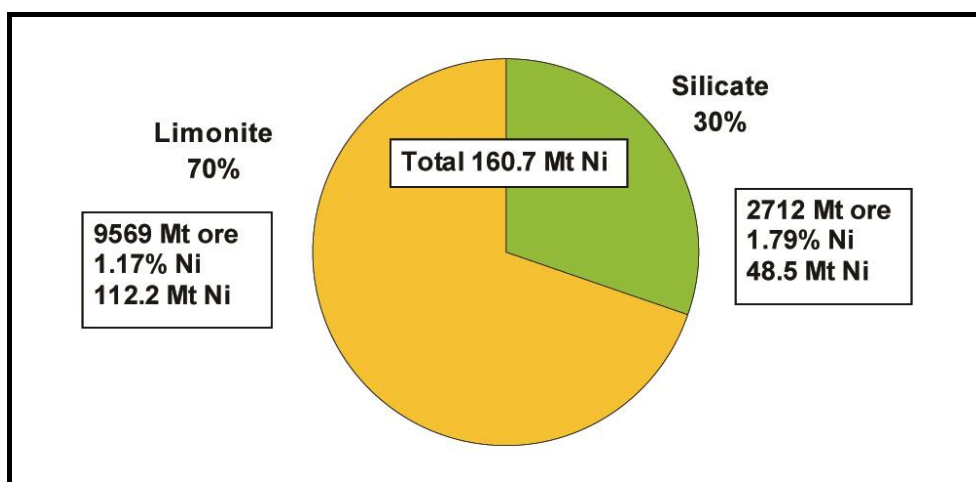
كل منابع نيكل لاتريتي 160 ميليون تن است (شكل 2-5). اگر آنها را به دو دسته ليمونيتي (مجموع منابع اكسیدی و رسي) و سيليكاتي، براساس كاني شناسي غالبشان (در بعضي مواقع با توجه به ديدگاه پروژه در حال انجام) تقسيم بندي كنيم، نهشته هاي ليمونيتي كه داراي Mg ناچيزي هستند، 70 درصد كل منابع نيكل لاتريتي را شامل مي شوند؛ ولي به علت اينكه عيار متوسط نهشته هاي ليمونيتي كم است، تناژي نزديك به 80 درصد نهشته ها را در بر گرفته اند.

اگر از ديدگاه منطقه اي كانسنگ هاي لاتريتي را مد نظر قرار دهيم، فقط سه كشور مهم كالدونيای جديد، اندونزي و استراليا ديده مي شود كه در مجموع 60 درصد كل منابع لاتريتي را در اختيار دارند. با توجه به مساحت كم كالدونيای جديد، چيزي در حدود 26 درصد منابع لاتريتي دنيا را در اختيار دارد (شكل 2-6). عيار نيكل و نسبت منابع لاتريت ليمونيتي در بين اين سه كشور متفاوت بوده و كالدونيای جديد از نظر كانسارهاي نيكل سيليكاتي و ليمونيتي بيشترين عيار را دارد. اين نسبت در مورد نيكل هاي لاتريتي ليمونيتي نزديك 70 درصد متوسط جهاني

دانسته هايي چند پيرامون لاتريت

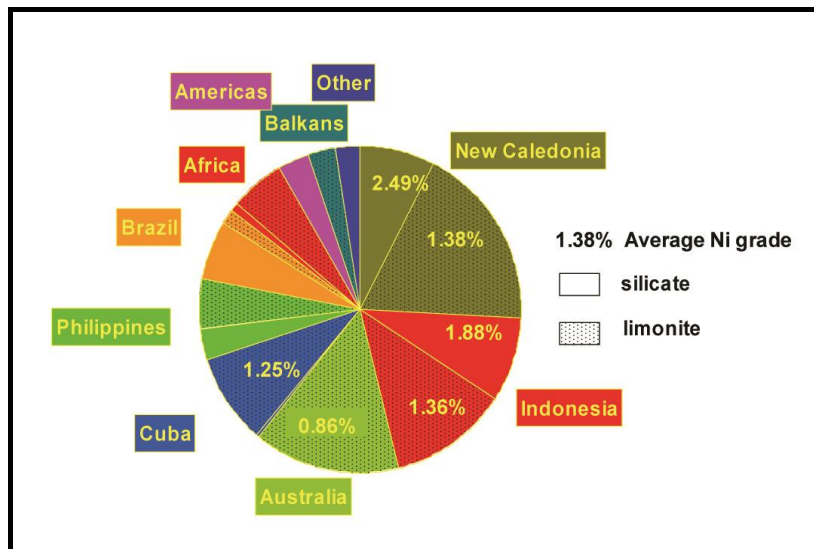
نيكل دار

است که در بخش کوچکی از جنوب کالدونیا (ماسیف دو سود) (Massif du Sud) واقع است. استرالیا هیچگونه ذخیره ساپرولیتی نداشته و عیار نهشته های لیمونیتی آن کمتر از دو کشور دیگر است.

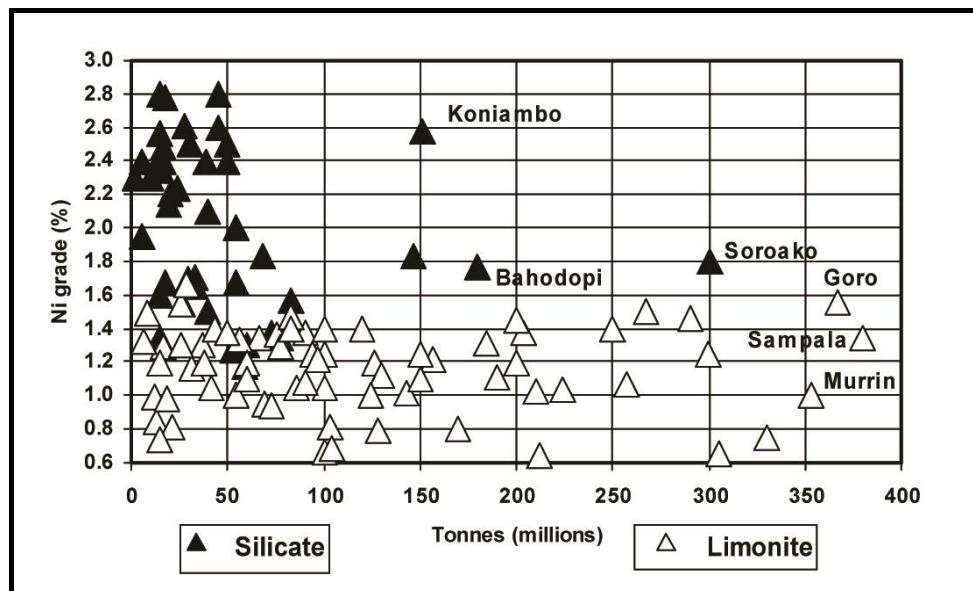


شکل (5-2): منابع نيكل لاتريتي دنيا

محدوده تغییرات تناژ و عیار نهشته های خاص در شکل (7-2) آورده شده است. بیشترین عیار نيكل در لاتريت های لیمونیتی 1/6 درصد بوده و کانسارهای مربوط به آن تناژ زیادی دارند. نهشته های سيليكاتي که کوچکتراند (کمتر از 50 ميليون تن) عیار نيکلی بين 2/4 تا 2/6 درصد دارند. نام تعدادی از کانسارهای مهم به همراه عیار و ذخیره آنها در تصویر (7-2) آورده شده است.



شكل (2-6): توزيع منابع نيكل لاتريتي كه شامل نيكل ليمونيتي (اكسیدی و رسی) و نهشته های سيليكاتي ميشود.



شكل (2-7): نمودار تناژ- عيار در مورد نهشته های خاص. نهشته های ليمونيتي شامل نهشته های لاتريتي اكسیدی و رسی می باشد. برای كسب اطلاعات بیشتر در مورد نهشته های نامبرده شده به جدول (2-4) مراجعه گردد.

## نيكل دار

### 7-2- بهره برداري از منابع نيكل لاتريتي

از اولين سالهاي توليد نيكل در دهه 1875 تا انتهاي قرن 19، هنگامي که نهشته عظيم سولفيدي سادبري (Sudbary) به توليد رسيد، تنها از منابع نيكل لاتريتي کالدونيای جديد نيكل استخراج می شد.

علي رغم اینکه 70 درصد نيكل دنيا در منابع لاتريتي است ولي توليد نيكل از لاتريت ها نسبت به سولفيد ها پيشرفت چندانى نداشته است. اخيراً 40 درصد نيكل مصرفی دنيا از فرآوری لاتريت ها به دست آمده که اين مقدار تا اواخر دهه 30، تا 40 درصد بوده و تا قبل از اواخر دهه 1950، ده درصد توليد نيكل را شامل می شده است. اما نياز آمريکا به نيكل در اثر جنگ گره باعث شد که تعداد عمليات انجام شده برروي لاتريت ها 2 برابر شود و 20 درصد کل نيكل مورد نياز از اين طريق تأمين شود.

دلایلی که نشان می دهد به چه علت توليد نيكل لاتريتي نسبت به حجم ذخاير موجود برابری نمی کند، در جدول (2-2) آورده شده است و اين دلایل، اقتصادی می باشد. متوسط وزنی هزينه به فايده (هزينه خالص برای توليد يک تن محصول) تا حدود 20 درصد بيشتر از اين هزينه در سولفيد ها می باشد. هزينه استخراج و معدنکاری لاتريت ها نسبت به سولفيدها که به روش زیرزمینی صورت می گیرد، بسيار کمتر می باشد. هزينه فرآوری نيكل در لاتريت ها نسبت به سولفيد ها بيشتر می باشد؛ آنقدر که صرفه جویی هزينه معدنکاری جواب گو نیست.

سولفيدها

لاتريت ها

<p>هزينه هاي فرآوري با توجه به كاني هاي نيمه پايدار نسبت به لاتريت ها كمتر بوده كه از انرژي پنهان فراوان K مي باشد.</p>	<p>نيكل در شكل اكسيدهاي پايدار نيازمند گرمادهي با مواد شيميايي مهاجم جهت تخریب كاني ها مي باشد.</p>
<p>كاني هاي نيكل دار به راحتی از مواد باطله يا عقيم در محل جدا سازي مي شوند و تنها كنستانتره كردن براي فرآوري باقي مي ماند.</p>	<p>احتمال جداسازي و تغليظ، محدود بوده و براي همه كانسنگ بايد به كار رود. مقادير زيادي كانسنگ با عيار كم بايد حمل گردد و در نتيجه حجم زيادي از مواد مصرفي به كارخانه فرآوري منتقل مي گردد.</p>
<p>كانه و كانسنگ براي عمليات متالورژي بسيار مناسب اند.</p>	<p>تغييرات فراوان كاني شناسي و شيميايي را در هنگام طراحي پروژه معدنكاري و مخلوط سازي براي ايجاد محصولي يكنواخت و خوراك قابل استفاده جهت پروژه فرآوري را بايد مد نظر داشت.</p>
<p>مقادير زيادي نيكل در يك فرآيند، باز يافت مي شوند.</p>	<p>تركيب متغير در كل پروفيل، مانع باز يافت نيكل از يك بخش بخصوص آن در طی يك فرآيند مي شود.</p>
<p>فرآورده هاي با ارزش (مثل Cu و PGE) امكان جبران هزينه فرآوري را دارند.</p>	<p>احتمال كمی وجود دارد كه فرآورده هاي ثانويه (به غير از Co) با ارزش باشند.</p>
<p>هزينه اقلام سرمايه اي براي هر واحد توليدي كارخانه فرآوري متوسط مي باشد.</p>	<p>هزينه اقلام سرمايه اي سرسام آور است و اگر انرژي را قسمتی از هزينه اقلام سرمايه اي در نظر بگيريم، بيشتر نیز مي شود.</p>

جدول (2-2): خلاصه مقايسه اقتصادي بين كانسارهاي سولفيدي ولاتريتي نيكل

## 8-2- فرآوري لاتريت ها

روش هاي استحصال نيكل در مقياس صنعتي شامل سه روش فرآوري اصلي مي باشد:

- 1- ذوب و گداخت براي ايجاد فرونيكل يا مات (matte) ؛
- 2- فرآوري كارون (Caron) (احيا گرم با شستشوي آمونياك) ؛
- 3- شستشو با فشار بالاي اسيد (HPAL) كه از اسيد سولفوريك استفاده مي شود.

### نیکل دار

در جدول (2-3) توليد نیکل از لاتريت ها در سال 2001 با هر يك از اين فرآيند ها نشان داده شده است. با توجه به ملزومات هر فرآيند و تغييرات شيميايي و كاني شناسي در پروفيل لاتريتها (شكل 2-3)، هريك از اين فرآيند ها فقط براي استفاده از بخش بخصوصي از پروفيل مناسب اند. ذوب حرارتي (Pyrometallurgy) قديمي ترين و پركاربرد ترين روش فرآوري است. اين روش بيشتر برروي بخش سيليكاته پروفيل كه غني از نیکل است، استفاده مي شود و در كوره هاي الكتريكي آلياژ فرونيكل (آلياژي احيا شده است كه مستقيماً براي توليد فولاد زنگ نزن مورد استفاده قرار مي گيرد، حاصل مي شود و براي ذوب كانسنگ هاي سولفيدي كه مي تواند به همراه روش هاي عادي فرآوري سولفيدي مورد استفاده قرار بگيرد، طراحي شده است. اين روش تكنولوژي ساده اي داشته، بارها اجراء گرديده و روش قابل اطميناني است. در آن تركيب كانسنگ به خودي خود روان مي گردد و مقدار بازيايي بالا بوده (90 درصد) اما هنگامي كه آلياژ فرونيكل شكل گرفت هيچ درصدي از Co بازيافت نمي شود. سودهي پروژه به هزينه سوخت وابسته مي باشد. پروژه هاي موفق (مثل سورواكو (Sorowako)) داراي منبع برق آبي مخصوص به خود مي باشند.

روش فرآوري كارون (Caron) بر روي اكسيدهاي لاتريتي (ليمونيتي) و در بعضي موارد بر روي لاتريت هاي سيليكاتي کاربرد داشته و وجود مقادير زياد Mg و سيليس باعث کاهش بازيايي نیکل مي شوند. اين فرآيند شامل رطوبت گيري و گرمادهي است كه در شرايط محيط احيايي و با شستشوي آمونياك كم فشار دنبال مي گردد. Ni , Co با حلال (استخراج گر) استحصال مي شوند و بهسازي بيشتر محصول با آهك زني و ايجاد شرايط احيايي دنبال مي شود. درصد بازيايي Ni تقريباً 80 و براي Co، 40 تا 50 درصد مي باشد. رطوبت گيري

### نيكل دار

واحيای گرمایی به انرژی قابل توجهی نیازمند است که در نتیجه، سوددهی این روش را به قیمت سوخت مصرفی بسیار وابسته ساخته است. پروژه های کارون قبل از شوک نفتی دهه 1970 ایجاد و گسترش یافتند و پس از آن به سختی سوددهی خود را حفظ کردند. هیچ پروژه ای بعد از آن ساخته نشد و به نظر در آینده نیز ساخته نخواهد شد.

روش فرآوری HPAL اولین بار در سال 1959 در مائوبای کوبا به صورت اقتصادی و در مقیاس بزرگ استفاده شد و تا اواخر 1990 تنها پروژه از این نوع بود که مقارن با ایجاد سه پروژه بولنگ، کاوس و مورین مورین در غرب استرالیا بود. در پروژه HAPL عملیات شستشوی کانسنگ با اسید سولفوریک در اتوکلاو با دمای 250 درجه سلیسیوس انجام می گیرد، ضمن آنکه استخراج Ni, Co از محلول، با روش های متعدد ته نشست و رسوب دهی سولفید و با استفاده از H<sub>2</sub>S یا محلول های استحصالی یا استخراج الکترولیتی انجام می شود. همچنین لازم به ذکر است که فرآیند HPAL بر روی قسمت اکسیدی لاتریت صورت می پذیرد و در این روش Ni, Co بازیابی بالایی (92٪ در مرحله شستشو) دارند. سود دهی پروژه بشدت وابسته به قیمت سولفور و هزینه تبدیل آن به اسید سولفوریک می باشد (پروژه های سوزاندن سولفور مقدار زیادی از انرژی مورد نیاز HPAL را تأمین می کنند)، چرا که مصرف اسید سولفوریک را درصد Mg کانسنگ تعیین می کند، این مطلب عامل مهمی در تعیین محل معدنکاری و نحوه مخلوط کردن کانسنگ می باشد.

روش فرآوری HPAL در لاتریت های رسی در صورتی که درصد بازیافت نیکل بالا باشد، عملی است؛ اما حضور سیلیس در کانسنگ به شکل نانترونیت و سرپانتین باعث بروز مشکل در نگهداری دوغاب در اتوکلاو می شود، ضمن آنکه نتایج بعدی دیگری را نیز در پی



#### نيکل دار

دارد که از آن جمله می توان به افزایش هزینه های عملیاتی برای غلبه بر این مشکل و نیز کاهش کارایی فرآیند، در نتیجه ورودی و خروجی های متفاوت به سیستم اشاره نمود. اکسیدهای خالص با مقدار کمی سیلیس، همچنانکه در معدن مائوبای صادق است، برای این فرآیند مناسبترین نوع کانسنگ می باشند.

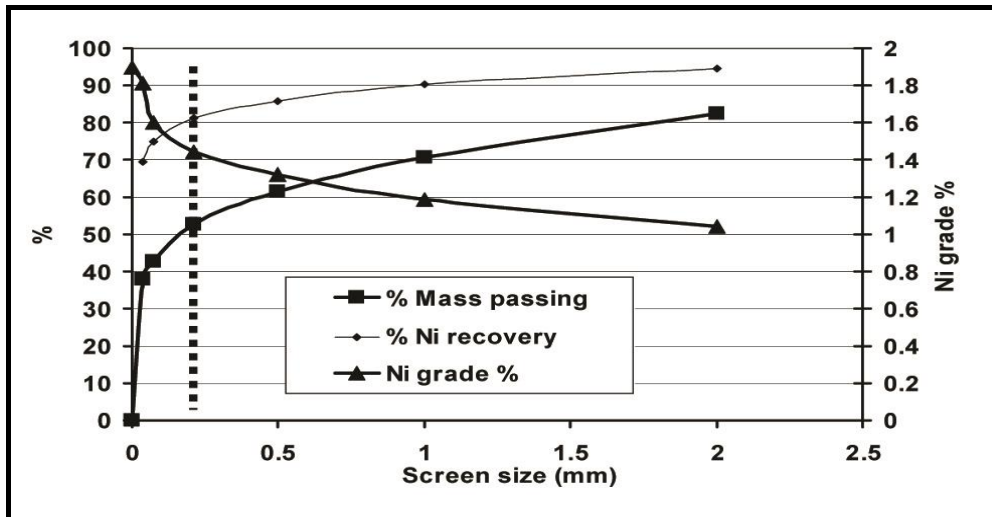
#### 9-2- پرعيار سازی

انواع مشخص کانسنگ های لاتریتی قبل از اینکه در فرآیند فرآوری مصرف شوند، وارد چرخه پرعيارسازی می گردند. پرعيارسازی جدایش اجزاء کم عيار از اجزاء پرعياری است که وارد چرخه فرآوری می شوند، که در نهایت اجزاء کم عيار قبل از ورود به چرخه فرآوری دور ریخته می شوند. این عمل معادل با کنستانتره سازی کانسنگ های سولفیدی می باشد. در این عمل مقداری نیکل همراه مواد زاید دور ریخته می شود؛ ولی این مورد با ایجاد خوراک پرعيارتر همراه می باشد.

حذف قلوه سنگ هایی که کمتر آلتزه شده اند نسبت به زمینه دگرسان شده ای که درصد بیشتری نیکل دارد، در کانسنگ های سیلیکاتی به صورت متناوب صورت گرفته است. پروژه هایی چون سورواکو (Sorowako) (اندونزی) و کوپتو (Kopéto) (کالدونیای جدید) با این روش به سوددهی رسیده اند ولی عملیات سرندی در همه معادن لاتریتی صورت می گیرد. در مورد کوپتو با این عمل افزایش ناگهانی 25٪ عيار در محصول حمل شده به کوره مشاهده می شود. پرعيارسازی در مورد لاتریت های اکسیدی-سیلیکاتی کاراتر بوده و اجزاء سیلیسی آن که یقیناً فاقد نیکل می باشند، با خردایش ساده از گویتیت، جدا می شوند. شکل (8-2) مثالی از معدن کاوس در غرب استرالیا است که در آن لاتریتی با عيار 1/04٪ نیکل و قطر 212

نيكل دار

ميكرون سرند، خردايش يافته و درصد محصول نهايي 53٪ ماده اوليه است. عيار نيكل بدست آمده 1/44٪ است كه 81٪ كل نيكل ماده اوليه مي باشد.



شكل (8-2): نمودار پرعيار سازي كانسنگ سيليس اكسیدی در شمال غرب استراليا. نمودار خواص مواد عبوري را به درصد بر روی محور X نشان می دهد. خط عمودی منقطع 212 میکرون (ماده عبوري)، به صورت درصد وزنی ذرات عبوري نسبت به وزن كل می باشد و درصد بازيافت Ni، نسبت گزارش شده نيكل ماده معدنی كل به نسبت نيكل ذرات عبوري می باشد.

كانسنگ های رسی برای پرعيار سازي مناسب نیستند، زیرا نيكل در آنها به صورت كاملاً يكسان توزیع شده است و جزئی فقیر از نيكل به غیر از سيليس ثانويه وجود ندارد كه بتوان جداسازی كرد.

Plant	Company	Country	Tonnes Ni	% of total production
<b>Smelting – Ferro-nickel</b>				
Doniambo	SLN	New Caledonia	45,912	
Hachinohe	Pamco*	Japan	35,700	
Hyuga	Sumitomo*	Japan	19,800	
Oheyama	Nippon Yakin*	Japan	13,600	
Falcondo	Falcondo	Domin. Republic	21,662	
Cerro Matoso	BHPBilliton	Colombia	38,500	
Larymna	Larco	Greece	18,600	
Morro/Codemin	Anglo-American	Brazil	6,000	
Loma de Niquel	Anglo-American	Venezuela	11,600	
Pomalaa	Aneka Tambang	Indonesia	10,300	
Various (4-5)	Various	Russia / Ukraine	21,600	
<b>S/T</b>			<b>243,274</b>	<b>51.2%</b>
<b>Smelting – Matte</b>				
Doniambo	SLN	New Caledonia	13,061	
Sorowako	PT Inco	Indonesia	62,600	
<b>S/T</b>			<b>75,661</b>	<b>15.9%</b>
<b>Caron Process (Ammonia leach)</b>				
Yabulu	Queensland Ni*	Australia	28,500	
Nicaro	Cuban Govt	Cuba	16,400	
Punta Gorda	Cuban Govt	Cuba	26,900	
Tocantins	Votorantim	Brazil	16,700	
<b>S/T</b>			<b>88,500</b>	<b>18.6%</b>
<b>HPAL (Acid leach)</b>				
Moa Bay	Sherritt/Cuban G.	Cuba	29,226	
Bulong	Preston Res.	Australia	6,262	
Cawse	OM Group	Australia	7,200	
Murrin Murrin	Anaconda Nickel	Australia	24,991	
<b>S/T</b>			<b>67,679</b>	<b>14.2%</b>
<b>Total Laterite Production</b>			<b>475,114</b>	<b>100%</b>
<b>Total Sulphide Production</b>			<b>674,886</b>	
<b>Total Nickel Production</b>			<b>1,150,000</b>	

جدول (2-3): ميزان توليد نيكل به تفكيك فرآيند استحصالی در سال 2001. پروژه های ستاره دار

كانسنگ های مصرفی خود را وارد می کنند.

## 10-2- ساختار صنعت استحصال نيكل از لاتريت ها

65 درصد نيكل لاتریتی از فرآيند ذوب بدست می آيد. كارخانه های ذوب دارای

ظرفیت های متغیر می باشند. اکثراً بالای 60 تا 70 هزار تن در سال، ظرفیت تولید دارند (برای

مثال سورواکو (Sorowako) و دنيامبو (Doniambo)). اغلب این كارخانه های ذوب در اطراف

معادن مستقرند و به صورت مجتمع صنعتی (بیش از يك كارخانه) فعالیت می کنند.

#### نيكل دار

کارخانه های ذوب ژاپنی، کانسنگ مورد نیاز خود را از کالدونیای جدید، فیلیپین و اندونزی خریداری کرده و در مورد پامکو و سومیوتومو (Pamco and Sumitomo) سهام داران این شرکت ها، سهمی نیز در فعالیت های معدنی مربوطه دارند که از این طریق، کانسنگ مورد نیاز خود را فراهم می آورند.

کارخانه فرآوری یابولو ( Yabulu refinery ) در تاون اسویل (Townsville) استرالیا، از فرآیند کارون (Caron) جهت فرآوری لاتریت های گرین وال (Greenvale) و کوینزلند (Queensland) استفاده می کنند. اکنون بعد از رقیق شدگی منابع گرین وال، بر روی کانسنگ های صادراتی از کالدونیای جدید، اندونزی و فیلیپین عملیات فرآوری انجام می گیرد. در پروژه های کارون کوبا از منابع اکسیدی محلی استفاده می شود.

پیشرفت های کنونی در پروژه های HPAL در دهه های اخیر تأثیرات شدیدی بر روی این صنعت داشته است. سالها پروژه مائوبای کوبا، تنها پروژه از این دست بوده است. مدتی کوتاه بعد از اتمام عملیات ساخت، فیدل کاسترو به حکومت رسید و این کشور به جمع بلوک شرق پیوست و صنایع، ملی گردید و به تبع آن، این طرح نیز ملی گشت. بعد از فروپاشی اقتصاد سوسیالیستی و مشارکتی، اطلاعات منتشر گردید و مشخص شد که با توجه به درآمد کم حاصل، کارایی خوبی دارد. این مورد با کاهش قیمت جهانی اسید سولفوریک و سولفور (به علت فشارهای زیست محیطی بر ذوبگران و افزایش عرضه محصول)، پیشرفت های تکنولوژیکی در مورد محلول های استحصالگر و بهبود عملکرد واکنش دهنده ها بر روی جدایش انتخابی نیکل و کبالت از محلول شستشو و بهبود طراحی و کسب تجربیات ارزنده در مورد اتوکلاوهای مورد استفاده در صنعت استحصال طلا، باعث جذابیت اقتصادی بیشتر این پروژه ها گردید.

در پس اين جذابيت، 15 تا 20 پروژه در اطراف و اکناف دنيا در دست بررسي قرار گرفت که اين مطالعات در محدوده بسيار متغيري (از مطالعات اوليه تا مطالعات اقتصادي بانکي) انجام مي شد. نمونه هاي شاخصي از اين پروژه ها در گرین فيلد (غرب استراليا) واقع شده اند که بولنگ و کاوس (پروژه هاي بزرگي با توليد ساليانه 6500 تن نيکل که در صورت امکان الحاق، بر ظرفيت خود مي افزودند) و ديگري مورين مورين (با توليد 4500 تن نيکل در سال) از آن جمله اند. اين سه پروژه در سال 1999 به توليد کامل رسيدند که البته عدم امکان الحاق و نقيصه هاي تکنولوژيکي و مهندسي باعث طويل شدن زمان انجام پروژه ها و افزايش هزينه هاي اجرايي شد؛ اکنون همه آنها زير ظرفيت اسمي خود کار مي کنند و از نظر اقتصادي در مضيقه هستند. در نتيجه اين مشکلات، بقيه پروژه ها به غير از پروژه گرو متوقف شدند. مالک اين پروژه شرکت اينکو مي باشد که در کالدونياي جديد در حال ساخت است و در سال 2007 با ظرفيت 5400 تن نيکل در سال به بهره برداري خواهد رسيد.

از نظر اقتصادي عمليات صورت گرفته بر روي لاتريت ها بسيار متغير مي باشد. در جدول (2-4)، ليست 20 پروژه نيکل لاتریتی در اقصی نقاط دنيا (توليد کننده - در مرحله اکتشافی و پروژه ها- در مرحله افزايش ظرفيت) آورده شده است که با توجه به آن، به درک بهتري از محرک هاي اقتصادي اين صنعت خواهيم رسيد. اين پروژه ها براساس مقادير ذخاير قطعي نيکل معاد نشان انتخاب شده اند و با توجه به عواملی که در بالا اشاره شد، قابل نقد و بررسي می باشند.

سود دهی پروژه های لاتریتی سورواکو و سروماتوسو (CerroMatoso) قابل توجه است که از دلایل آن، اندازه بزرگ آنها و وجود ذخاير سوخت ارزان قيمت می باشد. انرژی

#### نيكل دار

سورواكو از نيروگاه برق آبي تأمين مي شود و سودآوري پروژه SLN به عيار بالاي كانسنگ (بيش از 2/6٪ نيكل) و انرژي در دسترس برق آبي آنها وابسته مي باشد، كه البته از ژنراتوري پرهزينه اي با سوخت نفت بهره مي برند. كوره ذوب فالكون بريچ فالكندو (Falconbridge's Falcondo) در جمهوري دومينكن بر اساس سوخت نفت بنا نهاده شده است. كوره ذوب چندين بار هنگامي كه قيمت سوخت بالا رفت ولي قيمت نيكل ناچيز بود تعطيل شد و آخرين مورد آن سه ماه انتهائي سال 2001 مي باشد. پروژه اكس ميبال (Exmibal) از سال 1977 فقط سه سال به فعاليت پرداخت و تا امروز تعطيل است؛ به سختي به نصف توليد ظرفيت اسمي خود رسيد و در نتيجه به علت ظرفيت توليدي كم و وابستگي به ژنراتور نفتي جريره شد.

متقابلاً پروژه هاي بسيار زيادي از نيكل لاتريتي كه به لحاظ سوددهي اقتصادي سربه سراند و در شرف اضمحلال مي باشند، با كمك هاي زياد دولت است كه در حال فعاليت اند. اين كمك ها به علت حمايت از توليد محصولات استراتژيك، حمايت از اقتصاد ملي و ايجاد اشتغال مي باشد (گاهي اوقات اين توليدكنندگان به نام توليدكنندگان اجتماعي شناخته مي شوند). در مورد كوره هاي ژاپني به اين موارد بايد هزينه خريد كانسنگ و حمل و نقل كانسنگ و انرژي، اضافه شود. توليدكننده فقير يوناني، لاركو (Larco) به علت عيار كم نيكل (1/1٪) و هزينه سوخت بالا و دماي ذوب بالاي كانسنگ غني از Fe و دريافت قروض دولتي بي حد و حصر دچار مشكلات اقتصادي فراوان شده است.

سه پروژه در غرب استراليا به علت استهلاك فراوان اقلام سرمايه اي، هزينه عملياتي بالاتر از حد تخمين زده شده، به هدر رفتگي محصول به علت مشكلات فني بوجود آمده در پمپ ها

#### نیکل دار

و لوله‌ها و دستگاه‌های فشار (در اثر خوردگی بالای دوغاب غنی از اسید سولفوریک) با مشکلات اقتصادی فراوان روبرو شده‌اند. براساس تجربه، برای کاهش ریسک اقتصادی باید مطالعات اقتصادی دقیقی صورت گیرد. هزینه‌های ارقام سرمایه‌ای بالا بوده و بنابراین پروژه‌ها باید در حد اقتصادی بزرگ در نظر گرفته شوند. پروژه‌های HPAL نباید در اطراف مجتمع‌های مسکونی معدنی قرار گیرند. هزینه‌های بالای عملیاتی و اتلاف هزینه‌های ارقام سرمایه‌ای باعث شده تا دو تولیدکننده کوچک استرالیای غربی، داراییهای با ارزششان را برای بازسازی ارقام سرمایه‌ای کارخانه به مصرف برسانند.

با توجه به این موارد پروژه‌های جدیدی در حال مطالعه و یا ساخت می‌باشد (10 مورد از آنها در جدول (2-4) آورده شده است). حامیان مالی این پروژه‌ها و صاحب نظران بر این نکته تأکید دارند که تجربیات سه پروژه HPAL در استرالیا نشان داده که برای مقابله با مشکلات، باید چه تمهیداتی بیندیشیم تا براین مشکلات فائق آئیم. پس همچنان پروژه‌های HPAL از نظر اقتصادی جذابیت کافی را برای آنکه بتوان روی آنها سرمایه‌گذاری کرد را دارند. در مورد پروژه‌های در حال ساخت فقط اسپیلو، موسونگتی و مورامانگا (Sipilou, Musongati and Moramanga) از نظر موقعیت دور از ساحل می‌باشند، که مشکل ساز شده است؛ در تعدادی از این پروژه‌ها نیز شرایط سیاسی نامناسب است. این مسئله در هنگام بررسی هزینه‌های سرسام آور ارقام سرمایه‌ای بروز می‌نماید.

Project	Country	Ownership	Predom inant ore type	Contain ed Ni in resourc e	% Ni grade	% Co grad e	Project status	Product ion capacit y (t/yr Ni)	Processing route
Goro	New Caledonia	INCO-BRGM	Oxide	>5 Mt	1.56	0.18	Feas. Study		HPAL
Sorowako	Indonesia	INCO-Sumitomo	Silicate	>5 Mt	1.80		Producer	68000	Matte smelting
Sampala	Indonesia	Rio Tinto	Oxide	>5 Mt	1.34	0.10	Exploration		HPAL
Koniambo FeNi	New Caledonia	Falconbridge-SMSP	Silicate	3-5 Mt	2.58	0.07	Feas. Study		FeNi smelting
Sipilou	Cote d'Ivoire	Falconbridge-SODEMI	Oxide-silicate	3-5 Mt	1.48	0.11	Feas. Study		HPAL
Murrin Murrin	Western Australia	Anaconda-Glencore	Clay	3-5 Mt	0.99	0.06	Producer	45000	HPAL
Gag Island	Indonesia	BHP Billiton-Aneka Tambang	Oxide-silicate	3-5 Mt	1.35	0.10	Feas. Study		HPAL
Bahodopi	Indonesia	INCO	Silicate	3-5 Mt	1.77		Feas. Study		Matte smelting
SLN Operations	New Caledonia	Eramet-SLN	Silicate	3-5 Mt	2.40		Producer	60000	Smelting
Weda Bay	Indonesia	Weda Bay-Aneka Tambang	Oxide-silicate	2-3 Mt	1.37	0.12	Exploration		HPAL
Pinares de Mayari	Cuba	Cuban Government	Oxide	2-3 Mt	1.07	0.12	Exploration		HPAL
Pomalaa East	Indonesia	INCO	Silicate	2-3 Mt	1.83		Exploration		FeNi smelting
Camaguey	Cuba	BHP Billiton	Clay	2-3 Mt	1.30	0.05	Exploration		HPAL
Musongati	Burundi	Argosy	Oxide-silicate	2-3 Mt	1.31	0.08	Exploration		HPAL
Moramanga	Madagascar	Phelps Dodge	Oxide	2-3 Mt	1.11	0.10	Feas. Study		HPAL
Prony	New Caledonia	New Caledonian Government	Oxide	2-3 Mt	1.40	0.14	Exploration		HPAL
Euboea Island	Greece	Larco	Oxide	2-3 Mt	1.00		Producer	20000	FeNi smelting
Exmibal	Guatemala	INCO	Silicate	1-2 Mt	1.83		ex-producer	11300	Matte smelting
Cerro Matoso	Colombia	BHP Billiton	Silicate	1-2 Mt	2.35		Producer	55000	FeNi smelting
Falcondo	Dominican Republic	Falconbridge	Silicate	1-2 Mt	1.23		Producer	34000	FeNi smelting

جدول (2-4): خلاصه وضعیت 20 پروژه (تولید کننده های کنونی یا سابق پروژه های در حال گسترش

ظرفیت و اکتشاف منابع) که بر اساس ذخایر نیکل در دسترسشان انتخاب گردیده اند.

## 11-2- ملزومات موفقیت اقتصادی پروژه های نیکل لاتریتی

تجربیات نشان می دهد که پروژه های در حال ساخت نیکل لاتریتی مسیر دشواری باید

پیمایند تا به سوددهی اقتصادی لازم برسند. هر سه پروژه استرالیای غربی از مشکلات مشابهی

برخوردارند و باید از تکنولوژی و مهندسی بالایی برای تضمین سوددهی و موفقیت پروژه ها



## دانسته هايي چند پيرامون لاتريت

### نيكل دار

استفاده کنند. وجود تعدادی مشخصات خاص در کانسنگ ها امکان سوددهی و موفقیت پروژه را افزایش می دهد. این موارد به 4 دسته کیفیت، اندازه، موقعیت و زیرساخت ها تقسیم می شوند.

#### 1-11-2- کیفیت کانسنگ

این عقیده که وجود معدن سودده به توده ماده معدنی، تناژ و کیفیت مناسب بستگی دارد از قدیم مطرح بوده است. کیفیت کانسنگ در نهشته های لاتریتی نیکل دار به عوامل زیر وابسته است:

#### 1-11-1-1- عیار

بالاترین عیار از نیکل و عناصر همراه آن خصوصاً Co سوددهی پروژه را تضمین می نماید و آثار مواد باطله داخلی را در کل کاهش می دهد. پرعیارسازی کانسنگ پرفایده است ولی در این مورد هزینه معدنکاری با هزینه آسیاب کردن مقایسه می شود.

#### 2-11-1-2- انسجام و پیوستگی

انسجام و پیوستگی عیار و دیگر خواص فیزیکی و شیمیایی امکان تغییرات کانسنگ ورودی به مرحله فرآوری را کاهش می دهد.

#### 3-11-1-2- ضخامت روباره و کانسنگ

بیشترین ضخامت کانسنگ و کمترین ضخامت روباره، نسبت خاک برداری و روباره برداری را کاهش می دهد.

#### 4-11-1-2- کانی شناسی

در واحدهای HPAL، کانی های اکسیدی نسبت به کانیهای رسی ارجحیت داشته و با توجه به اینکه بازیافت نیکل در هر دو ثابت است ولی در لاتریت های رسی وجود سیلیس کلوئیدی در دوغاب و محلول های حاصل از تجزیه رس ها، مشکلاتی را در پمپاژ فشار بالا

### دانسته هاي چند پيرامون لاتريت

#### نيکل دار

ايجاد مي کند و در نتيجه باعث جدایش محلول از جامد مي شود. در کانسارهاي با ترکيب اکسیدی، دوغاب با چگالي بالا ايجاد مي شود که باعث افزايش سرعت جريان خروجی مي گردد.

در عمليات ذوب، نسبت Mg به Si خوراک، دمای ذوب، فعاليت و غلظت سرباره را کنترل مي کند. اين نسبت با وجود کانی شناسی مخصوصاً وجود سرپانتين تحت تأثير قرار مي گيرد.

#### 5-1-11-2- عناصر اسيد خوار

در پروژه هاي HPAL، منيزيم و آلومينيوم، مصرف کنندگان اسيد مي باشند. حضور Al (که علي الخصوص در روبراه يافت مي شود) باعث ايجاد آلونيت در اتوکلاوها مي شود. در همه لاتريت ها سيليس آزاد به صورت باکس ورک و رگه هاي نامنظم ديده مي شود. اگر در خوراک کارخانه ذوب، سيليس حضور داشته باشد، بشدت باعث تغييرات درصد Mg به Si مي شود و بايد از اين معضل جلوگيري کرد.

#### 6-1-11-2- اندازه

هزينه بالای اقلام سرمايه ای در پروژه هاي لاتريت نیازمند ظرفيت بالای واحد جهت رسيدن به مقياس اقتصادی است. معدنی با طول عمر زياد، امکان بازگشت سرمايه را فراهم مي کند. با يك حساب سرانگشتی ظرفيت 45000 تن نيکل، کمترین ظرفيت تولیدی در پروژه هاي HPAL می باشد که جهت کاهش واحد اقلام سرمايه ای بایستی اين مورد را در نظر داشت (هزينه سرمايه ای براساس واحد 10 دلار بر ظرفيت واحد تولیدی است که برحسب پوند بيان می گردد و گاهی پنج مارک نیز نامیده می شود). در کارخانه ذوب کمترین ظرفيت اقتصادی 2500-2000 تن نيکل در سال می باشد ولی اين شاخص به شدت به عيار و هزينه

### دانسته هايي چند پيرامون لاتريت

#### نيكل دار

سوخت وابسته است. منابع مورد نظر بايد براي 30 سال كافي باشد كه معادل با چند صد ميليون تن نهشته كم عيار و حداقل 10-50 ميليون تن كانسنگ سيليكاتي مي باشد.

#### 7-1-11-2- موقعيت

به علت مواد مصرفي فراوان در پروژه هاي HPAL و كارون (Caron)، موقعيت هاي ساحلي مناسب ترند و در صورت امكان، معدن بايد در نزديكي ساحل باشد تا هزينه حمل و نقل كانسنگ کاهش يابد. واحدهاي ذوب در بعضي موارد نزديك منابع انرژي يا بازار مصرف مي باشند و البته نزديكي به محل معدن نيز مهم است. مورين مورين از مشكل حمل 50 هزار تن سولفور در سال از راه دريايي 800 كيلومتری به محل معدن لطمه ديده است كه اين مورد در گرو، گيج ايسلند (Gag Island) و وداباي (Weda Bay) مطرح نيست.

#### 8-1-11-2- زير ساخت ها

سه زير ساخت لازم براي پروژه هاي لاتريتي شامل آب، سوخت و راه دسترسي مي باشد. مصرف آب در فرآيندهاي هيدرومتالورژي (كارون و HPAL) بالا است؛ اما اين مورد در آب و هواي مرطوب و حاره اي مطرح نيست. مشكل كيفيت و حضور آب در مناطق داخلي و صحرايي چون استراليا، مطرح است. ذوبگران مصرف كننده منابع سوخت اند و نزديكي به منابع سوختي ارزان قيمت چون الكتريسته، برق آبي و گاز پرفايده است. راه دسترسي، بخصوص در مناطق مرتفع و خشن و بالا آمده براي حمل كانسنگ و يا بارگيري در بندر ضروري است.

ايجاد زير ساخت ها مي تواند بر روي هزينه هاي بالاي اقليم سرمايه اي افزوده شود. سه پروژه در غرب استراليا در مسير خطوط لوله گاز مي باشند كه داراي سود خاص بالايي مي باشند، همچنين دو پروژه كاوس و بولنگ كه در نزديكي كارخانجات ذوب نيكل كالگري

#### نيكل دار

WMC (WMC Kalgoorlie) مي باشند، اسيد سولفوريك مورد نيازشان را از اين كارخانه تأمين مي كنند.

#### 2-11-2- ملاحظات زيست محيطي

در هنگام مطالعه طرح، نتايج زيست محيطي معدنكاري و فرآوري، دفن مواد زايد و غيره را بايد مد نظر قرار داد (Dalvi and Poetschke, 2000). معدنكاري در لاتريت هاي نيكل دار كم عمق بوده (عموماً كمتر از 50 متر) ولي آثار سوئي از نظر زيست محيطي به همراه دارد. بنا بر اين محدوده وسيع معدنكاري پس از اتمام عمليات بايد بازسازي گردد. شايدان ذكر است ايجاد پوشش گياهي در مناطق گرم و حاره اي كار سهل تري نسبت به مناطق خشك است. فرآوري، با دفن مواد باطله و پسابها و انتشار آنها به محيط همراه است. اين مشكل در مناطق حاره اي نسبت به مناطق خشك حادتر مي باشد. جا يگاه دفن اين پسابها به علت بارش زياد و تبخير كم در مناطق حاره اي مشكل ساز مي شود. دفن باطله ها در محيط هاي دريائي عميق و نزديك ساحل و يا محل هايي كه توپوگرافي بستر دريا مناسب باشد، از نظر فني قابل اجراء است اما با مقاومت گروههاي حاميان محيط زيست روبرو است. در بعضي موارد دولتها اين عمل را مجاز نمي دانند.

#### 2-12- خلاصه و نتيجه گيري

نيكل لاتريتي اغلب در مناطق داراي سنگ هاي غني از اوليوين و در شرايط گرم و حاره اي كه طی زمان طولاني دچار هوازدگی شيميايي گشته اند، ديده مي شود. اين مدت زمان

#### نيكل دار

طولاني امکان تمرکز نيکل را در افق های مشخصی فراهم می آورد. کانسارها در اندازه ها و درجه های غنی شدگی متفاوتی دیده می شود که البته ترکیب موزون عوامل زمین شناسی و آب و هوایی امکان ایجاد نهشته های عظیمی را می تواند فراهم آورد.

به صورت خلاصه شرایط ایجاد چنین نهشته هایی به شرح زیر است:

1- مناطق وسیعی از سنگهای غنی از اولیوین (خصوصاً دونیت و هارزبورژیت) را می توان در جزایر قوسی امروزی یا قدیمی یا در موقعیت های برخوردی صفحات اقیانوسی به یکدیگر یافت.

2- برای دوره طولانی (بیش از یک میلیون سال) شرایط آب و هوایی گرم فراهم باشد.

3- فرآیندهای تکتونیکی امکان موازنه بین سرعت فرسایش و پیشرفت هوازدگی را به وجود آورده و زهکشی ساده پروفیل را فراهم می کند.

4- شکستگی ها و درزها امکان نفوذ آب زیرزمینی را به سنگ بستر فراهم بیاورد.

ریسک اقتصادی در پروژه های اقتصادی نيکل لاتریتی از بالا بودن هزینه اقلام سرمایه ای و لزوم استفاده از جدیدترین تکنولوژی های مرتبط با فرآوری، نشأت می گیرد. وجود یک توده معدنی بزرگ جای بسی شگفتی است ولی برای موفقیت پروژه، ترکیب شرایط زمین شناسی، کانی شناسی، عوامل معدنکاری و فنی و مهندسی مرتبط با فلوشیت فرآوری، زیرساخت های مورد نیاز و ملاحظات زیست محیطی را باید در نظر گرفت (Dalvi and Poetschke, 2000). تاکنون لاتریت ها نسبت به سولفیدها در تولید نيکل عقب مانده اند ولی به علت وجود منابع فراوان نيکل، در موقعیت بهتری جهت افزایش تولید

دانسته هايي چند پيرامون لاتريت

---

نيكل دار

قراردارند. به علت پيشرفت هاي مستمر تكنولوجيكي در فراوري نيكل، کاهش هزينه توليد را شاهد مييم.