فصل دوم

دانسته هایی چند پیرامون لاتریت نیکل دار

این نوشتار، ساختار و ژنزکانی سازیهای نیکل لاتریتی را بررسی می کند و روابط بین خصوصیات کانساری (زمین شناسی و غیر زمین شناسی) و علل موفقیت کانسارهای لاتریتی را در تولید اقتصادی نیکل مورد توجه قرار می دهد.کانسارهای لاتریتی به علت فراوانی ذخایر، دارای اهمیت بالایی می باشند و در مقایسه با سولفیدها، بیشتر از مقدارکنونی می توانند در تولید نیکل مورد نیاز دنیا نقش داشته باشند.

اغلب منابع نیکل زمین در لاتریت ها میزبانی می شوند. لاتریت فرآورده ای حاصل از هوازدگی شدید سنگهای الترامافیک در اقلیم آب و هوایی گرم و مرطوب در محیط خشکی است. فرآیند لاتریتی شدن نتیجهٔ متلاشی شدن و تجزیه کانیهای اولیه و رهایش عناصر شیمیایی تشکیل دهندهٔ این کانی ها به آب های زیرزمینی و شستشوی عناصر با تحرک بالا و در پی آن، تجمع پسماندهای نامحلول یا ساکن و ایجاد کانی های پایدار در این محیط می باشد. در اثر ترکیب این عوامل، یک توالی از افق هایی با ترکیب شیمیایی و کانی شناسی متفاوت (پروفیل لاتریتی) ایجاد شده و تفاوت حرکتیِ عناصر موجود در ناحیه هوازده، ساختارها و ساختمانهای عمومی مشترکی را در افق های مختلف پروفیل سبب می شود. ساختارهای جزئی در افق ها به شدت متغیرند و در هر موقعیتی با عکس العمل متقابل مؤلفه های فعال آب و هوایی و عوامل زمین شناسی همچون توپوگرافی، زهکشی، تکتونیک، ساخت وجنس سنگ مادر ارتباط دارند.

نیکل دار

نیکل درمناطقی ازلاتریت ها، درساختمان کانی های نوبنیاد ویا با دگرسانی کانی های مادر همراه می باشدکه می تواند در پاره ای موارد به غنی شدگی کانساری برسد.

تقریباً40 درصد تولید نیکل دنیا از لاتریتهای نیکل دار بدست می آید. نیکل با سه فرآیند اصلی ازکانسنگ نیکل دار استحصال می شودکه هر کدام در محل بخصوصی ازپروفیل خاک قرار دارند. برای استخراج نیکل وکبالت در افق های فوقانی و در مناطقی که از Mg فقیر است، ازفرآیندهای 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 آیندهٔ نه چندان دور، دراختیار 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 درحضور 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. نمونهٔ مشهور و شناخته شده ازکانسار های لاتریتی، بوکسیت های آلومینیوم دار وکانسار های غنی ازآهن می باشد و از گونهٔ نامأنوس تر می توان به لاتریت های

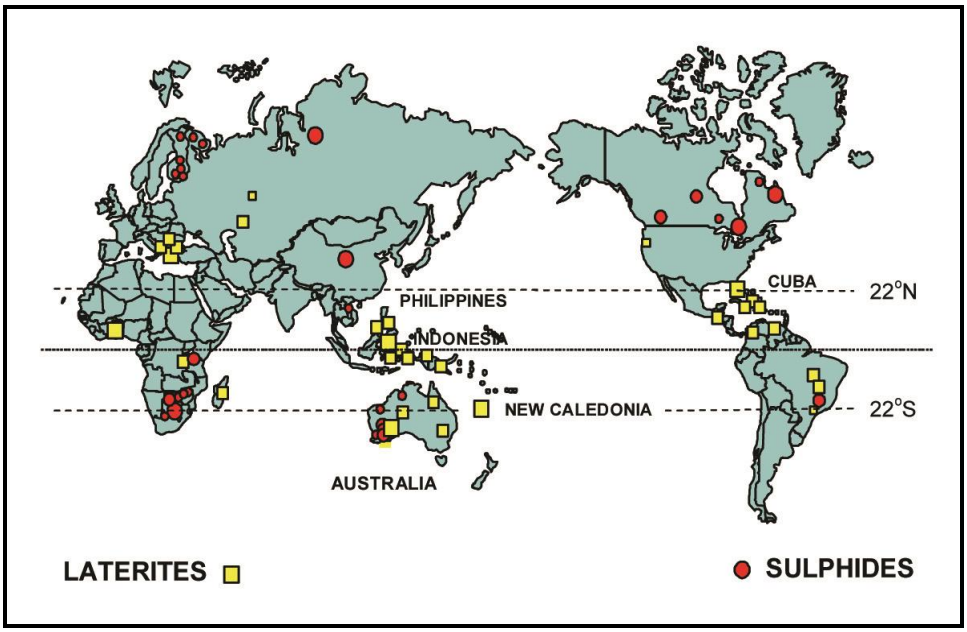
دانسته هایی چند پیرامون لاتریت

نیکل دار

طلادار (برای مثال بودینگتون (Boddington) در غرب استرالیا) اشاره کرد (Evans, 1993).

لاتریت های نیکل دار محصول لاتریتی شدن سنگ های غنی از Mg یا سنگ های الترامافیک با 0/2تا 0/4 در صد نیکل اولیه هستند (Golightly, 1981) و بیشتر شامل سنگ هایی همچون پریدوتیت، دونیت و هارزبورژیت یا کمپلکس های افیولیتی می باشند. انواع کماتئیتی نیز با گسترش کمتر وتوده های الترامافیک- مافیک لایه ای که در موقعیت های تکتونیکی کراتونی سکوئی شکل قرار دارند از جمله سنگ منشأهای نیکل لاتریتی می باشند (Brand et al, 1998).

فرآیندلاتریتی شدن باعث تمرکز 3 تا30 برابر نیکل وکبالت 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 وهوا، توپوگرافی، تکتونیک و جنس و ساخت سنگ مادر کنترل می گردند.



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

نیکل دار

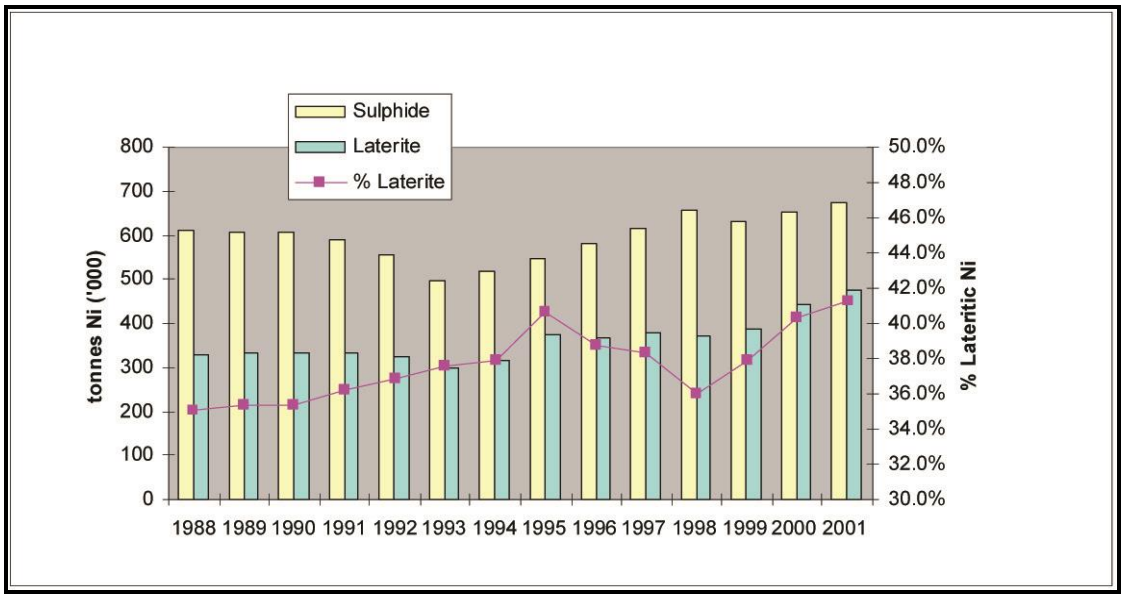
اغلب منابع لاتریتی در حدفاصل 22 درجهٔ عرض جغرافیایی شمالی- جنوبی در طرفین استوا واقع گردیده اند (شکل 2-1). کانسارهای بزرگ، و در بعضی مواقع پرعیاری درمحل برخورد صفحات تکتونیکی (برای مثال اندونزی، فیلیپین وکالدونیای جدی) تشکیل می شوند، چراکه تیغهٔ رورانده درشرایط آب وهوایی گرم حاره ای که حرارت بالا و نزولات جوی فراوان می باشد، دچار هوازدگی افزاینده می شود. ضمن آنکه دراین مناطق احتمال غنی شدگی سوپرژن بسیار بالا است. تناژ ذخایر موجود در کراتونها بالاست ولی عیارکمتری دارند (برای مثال مورین مورین (Murrin Murrin) درغرب استرالیا). نهشته های موجوددرسپهرهای کراتونی غرب آفریقا (Nahonetal, 1982) و برزیل (Schobbenhaus, 1986) در محدودهٔ استوا قرارگرفته اند، ولی منابع لاتریتی بالکان (یونان، آلبانی و یوگسلاوی سابق) (Valeton et al, 1987) وکراتون یلگارن (Yilgarn craton) غرب استرالیا در عرض های جغرافیایی بالاتر واقع شده اند. دو مثال قبلی کانسارهای قدیمی اندکه هم اکنون در عرض های با آب و هوای خشک واقع شده اند و به عبارت دیگر با شرایط آب و هوایی مولّدشان 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 درسالهای آینده، این درصد نیز رشد چشمگیری پیدا کند. مهمترین مانع

نیکل دار

رشد فزایندۀ تولید نیکل لاتریتی هزینۀ 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 نیکل درلاتریتهای حاصل از سنگهای الترامافیک و عوامل کنترلی این مؤلفه ها و طبیعت پروفیل های حاصل ازآن را مورد بررسی قرار می دهد. در بخش دوم فرآیند هایی که در مقیاس بزرگ و اقتصادی و صنعتی برای استحصال نیکل بکار رفته و عواملی که از نظر اقتصادی بر موفقیت آنها اثر داشته است، مورد بحث قرار می گیرد.



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

- **بخش اول**

2-2- زمین شناسی پروفیلهای لاتریتی در سنگ های الترامافیک

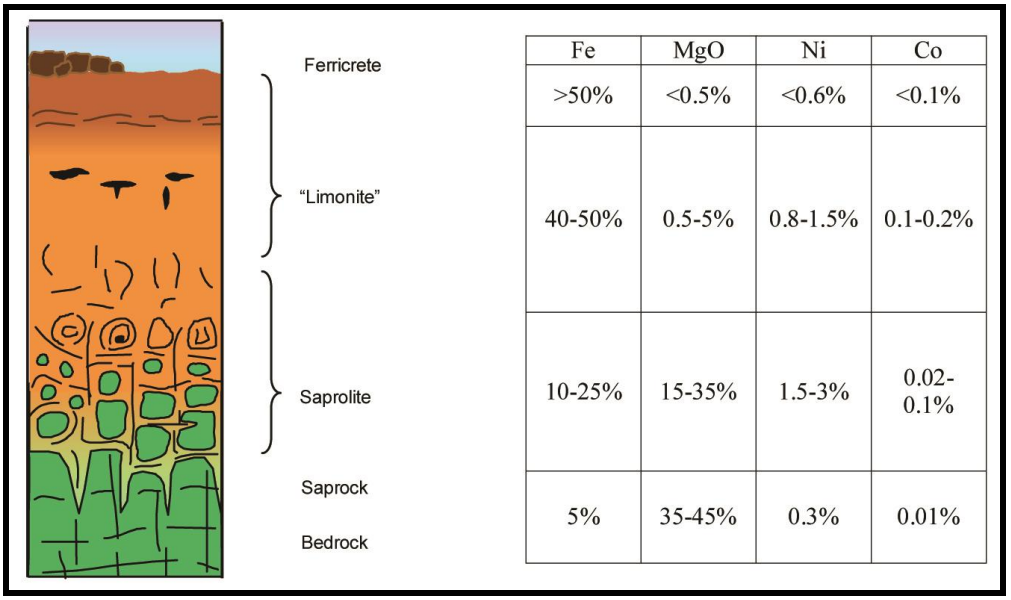
در فرآیندی که از آن به عنوان لاتریتی شدن نام برده می شود باید هوازدگی شیمیایی، در آب و هوایی گرم و در دورهٔ زمانی طولانی و همچنین در شرایط تکتونیکی ثابت صورت پذیرد که در آن صورت امکان تشکیل سنگپوش (Regolithe) ضخیمی با خواص معین مهیّا می گردد (Terscases in Butt and Zeegers, 1992). در جدول (2-1) به صورت کلی آثار هوازدگی و نحوهٔ عملکرد آن بر سنگ های الترامافیک آورده شده است.

فرآیندهای کلی	آثار مخرب روی سنگهای الترامافیک
1-شستشوی عناصرمتحرک : عناصر قلیایی و قلیایی خاکی	تجزیه الیوین، تخریب پیروکسن و سرپانتین و شستشوی Co , Mg , Ni , Mn
2-تشکیل کانی های ثانویه پایدار : اکسیدهای آهن، آلومینیم و رسها	تشکیل گوتیت و اسمکتیت و جذب Ni محلول ها
3-شستشوی نسبی مواد با تحرک کمتر: سیلس، آلو مینیم و تیتانیم	شستشوی سیلیس در محیط جنگلهای بارانی وآب و هوای مرطوب ساوانائی
4-شرایط احیایی کنترل کننده تحرک و ته نشست نسبی Fe , Mn	ته نشست اکسیدهای Mn، جذب Ni وCo از محلولها
5-تمرکزکانیهای مقاوم : زیرکن، کرومیت و کوارتز	تمرکز باقیمانده کرومیت

جدول (2-1): هوازدگی وآثارِ مخرب آن برسنگهای الترامافیک (after Butt and Zeegers, 1992, p.10)

نیکل دار

به صورت خلاصه، فرآیند لاتریتی شدن شامل تجزیه و تخریب کانیهای اولیه وآمیزش 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 هوازدگی پایدارند، 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 لاتریتی » از آن نام می برند.



Fe	MgO	Ni	Co
>50%	<0.5%	<0.6%	<0.1%
40-50%	0.5-5%	0.8-1.5%	0.1-0.2%
10-25%	15-35%	1.5-3%	0.02-0.1%
5%	35-45%	0.3%	0.01%

شکل (2-3): طرح شماتیکی از پروفیل ایجاده 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 لاتریتی شدن فرآیندی پویا وتدریجی بوده و حالت لایه لایهٔ لاتریت ها بی شک در آخرین مرحله لاتریتی شدن بوجود می آید. تحتانی ترین لایه، اولین مرحلهٔ هوازدگی سنگ

بستر را نشان می دهد و هرلایه نسبت به لایه های مجاور، تحولات خاصی را درخود داردکه بیانگر پیشروندگی فرآیند هوازدگی است.

– در تحتانی ترین قسمت پروفیل (Saprock)، هوازدگی در محل تماس ذرات و اطراف شکستگی ها صورت گرفته، سنگ های هوانزده فراوان بوده و فرآورده های دگرسانی کم مایه می باشند.

– هرچه به سطح فوقانی نزدیک تر شویم، مقادیر کانی های اولیه کاهش یافته، نواحی و زون های شکستگی با دگرسانی فراوان به سنگ بستری که به صورت قلوه سنگ هایی در مخلوطی از کانی های دگرسان و کانی های اولیه شناور است (ساپرولیت Saprolith)، تبدیل می شود.

– درافق های بالاترکانی ها کاملاً دگرسان شده بوده و بافت آنها از بین رفته است؛ این افق در منابع تخصّصی (Butt and Zeegers 1992) پدولیت (Pedolithe) نامگذاری شده که عملاً کاربرد چندانی نداشته و از نام افق لیمونیتی استفاده می گردد. این افق نام خود را از کانی شناسی غالب کانی های اکسیدی(گوتیت و هماتیت) در لاتریت های اکسیدی گرفته است.

3-2- عوامل مؤثر بر هوازدگی و گسترش پروفیل ها

فرآیندها و شرایط کنترل کنندهٔ لاتریتی شدن سنگهای الترا مافیک متعدد بوده و مقیاس متنوعی دارند، درنتیجه از جایی به جایی دیگر، طبیعتِ پروفیل از نظر جزئیات ضخامت و ترکیب شیمیایی وکانی شناسی و نسبت گسترش هر افقِ پروفیل متغیر است. فاکتور های اساسی کنترل کنندهٔ کارایی و گسترش هوازدگی شیمیایی و در نتیجه طبیعت پروفیل بصورت زیر است:

نیکل دار

2-3-1- آب وهوا

مقدار نزولات جوی، مقدار آب عبوری از خاک را تعیین می کند که در نتیجه بر شدت شستشو و حذف سازنده های محلول تأثیر می گذارد. علاوه بر مقدار نزولات جوی، کارایی یا مقدار نفوذ آب به پروفیل نیز مهم است. دمای بالاتر خاک (نسبت به دمای هوا) سرعت عملکرد واکنش های هوازدگی را بیشتر می کند (Butt and Zeegers, 1992).

2-3-2- توپو گرافی

شکل هندسی ارتفاعات و پستی و بلندی ها بر روی مقدار آب نفوذی به خاک و در نتیجه سطح آب زیر زمینی اثر دارد.

2-3-3- زهکشی

بیلان آبی که برای شستشوی منطقه در دسترس است با عملکرد زهکشی تغییر می کند.

2-3-4- تکتونیک

بالا آمدگی تکتونیکی برروی فرسایش سطح فوقانی مؤثر می باشد و ارتفاعات را افزایش داده و سطح آب زیر زمینی را کاهش می دهد، ضمن آنکه پایداری تکتونیکی، شرایط رشد گیاهان را نیز فراهم آورده و سرعت حرکت آب زیر زمینی را کاهش می دهد.

2-3-5- جنس سنگ مادر

کانی شناسی، استعداد سنگ را برای هوازدگی تعیین می کند و عناصر لازم برای تشکیل کانی های جدید را مهیّا می سازد.

2-3-6- ساختار

نیکل دار

گسل ها و مناطق برشی، نفوذ پذیری قابل توجهی را ایجاد می کنند و کلیواژها پتانسیل نفوذ دگرسانی را افزایش می دهند.

عوامل زمین شناسی و آب و هوایی آشکارا به هم مرتبط اند. خواص پروفیل های لاتریتی با تأثیر ترکیبی این عوامل در طول زمان و نه صرفاً با حکمفرمایی یک عامل تعیین می شود و به همین خاطر برای توصیف بهتر پروفیل، تمامی شرایط در نظر گرفته می شود.

ضخامت پروفیل های لاتریتی با میزان تعادل بین هوازدگی شیمایی سنگ بستر و فرسایش افق های بالایی تعیین می شود. سرعت هوازدگی از10 تا50 متر بر میلیون سال متغییر است و عموماً با مقدار آب نفوذی به پروفیل متناسب می باشدکه این مقدار در سنگ های الترامافیک 2 تا 3 برابر سنگهای اسیدی می باشد (Nahon, 1986).

پروفسور تری سیس (Trescases) درسال 1975سرعت هوازدگی را در ارتفاعات جنوبی کالدونیای جدید حدود 125 تا 140 متر در میلیون سال تخمین می زند، ولی یکدهم از این مقدار را در مناطق سکوئی و تراس ها در نظر می گیرد. فر سایش سریع، گسترش پروفیل ها را بین50 تا100 متر محدود می کند؛ بنابراین سن آنها کمتر از یک میلیون سال است. سرعت هوازدگی درکراتون های پایداری که ارتفاعات فرسوده شده اند و تا حدی بارش باران درآنها ناچیز است (برای مثال برزیل وغرب آفریقا) 10متر در میلیون سال می باشد (Golightly, 1981). در این مناطق، پایداری تکتونیکی و فرسایشِ کم، امکان گسترش پروفیل هایی را با ضخامت 100 متر فراهم کرده است، ولی باید توجه داشت که این دسته از مناطق جزء مناطق فعال تکتونیکی قدیمی تر می باشند.

4-2- انواع پروفیل های لاتریت

نیکل دار

با توجه به پیچیدگی و چند گانگی عوامل کنترلی می توان چند طرح کلی را برای انواع لاتریت هایی که در اغلب موارد با یکدیگر تشابه دارند برشمرد. پروفیل های لاتریتی را براساس کانی شناسی غالبشان می توان به سه نوع تقسیم بندی نمود.

- **لاتریت های اکسیدی** : از اکسیدها و هیدروکسید های آهن در قسمت فو قانی پروفیل تشکیل می شوند که سنگ های دگرسان شده یا سنگهای تازه و هوانزده را می پوشاند.
- **لاتریت های رسی :** از رس های اسمکتیتی در قسمت فوقانی تشکیل می شوند.
- **لاتریت های سیلیکاتی :** از سیلیکات های آهن و نیکل آبدار (سرپانتین و گارنیریت) واقع در قسمت تحتانی و از اکسید های آهن در سطح فو قانی تشکیل شده اند.

1-4-2- لاتریت های اکسیدی

مهمترین محصول نهایی لاتریتی شدن، تجزیهٔ سنگهای التر امافیک می باشد. در حضور آب، کانی های اولیه سازندهٔ سنگ (الیوین یا سر پانتین، ارتو پیروکسن و تا حدی کلینوپیروکسن) بر اثر آبگیری تجزیه شده و عناصر سازندهٔ خود را به شکل محلول، آزاد می کنند. الیوین ناپایدارترین کانی است و در وهلهٔ اول هوازده و در محیط های گرم حاره ای Mg آن کاملاً شسته شده و به آب های زیرزمینی می پیوندد. سیلیس به مقدار زیاد شسته شده و از محیط خارج می گردد. آهن دو ظرفیتی (Fe^{+2}) نیز پس از آزاد شدن، اکسیده می شود و به صورت هیدروکسید آهن دو ظرفیتی که در ابتدا به صورت آمورف (در برخی موارد تا حد کمی بلورش یافته) می باشد، ته نشست پیدا کرده و بر اثر این بلورش، گوتیت به الیوین دروغین

شکل تبدیل می گردد. پس از آبگیری الیوین، سرپانتین و اورتوپیروکسن هیدرولیز شده و در پی آن Mg و Si مجدداً آزاد می گردند و گوتیت دروغین شکل جایگزین آنها می شود. در ابتدا کانی های همبود فرو منیزین که سالم باقی مانده اند، از بافت سنگ محافظت می کنند (تحولات و تغییرات، هم حجم بوده و ساخت اولیه باقی می ماند)؛ اما همچنان که تخریب کانی ها ادامه پیدا می کند، ساخت باقی مانده با فرو ریزش کانی ها از بین می رود و فشارش بافت، باعث ایجاد گوتیت با ساخت توده ای می شود. جان کلام اینکه، تحولات کانی شناسی، آشکارا باعث کاهش مقادیر Mg و تمرکز پسماند Fe می شود و روند شیمیایی مشخص کاهش Mg و افزایش Fe در افق های بالاتر پروفیل لاتریتی دیده می شود (شکل 2-3).

Ni وCo به صورت کاملاً متفاوتی از عناصر اصلی رفتار می کنند. به عبارت دقیق تر تقریباً همهٔ Ni وCo به صورت محلول جامد در اولیوین و سرپانتین حاصل از اولیوین می باشند. همچنانکه این کانی ها تجزیه می شوند، Ni و Co رها شده، با هیدرواکسید Fe تا حدی بلورش یافته (Poor crystalline) وابستگی پیداکرده، با آنها همراه شده و در ترکیب ساختمانی آنها جذب و جانشین Fe^{+3} می شود (Gerth, 1990). در گوتیت های توده ای که از الیوینی با غلظت Ni 0/3 ٪ و Co 0٪/02 حاصل شده اند، مقدار نیکل 1/5٪ و کبالت 1٪ دیده شده است و در بعضی مواقع Ni وCo با اکسید های منگنز (آسبولان) همبستگی شدیدی دارند که در اثر واکنش های احیایی به صورت رگه ها و سطوح پوششی کانی ها و شکستگی ها ته نشست گردیده اند. در اکسیدهای منیزیم، تا 12 درصد نیکل و 8/5 درصد کبالت شناسایی شده است (Elias et al 1981).

پدولیت (افق لیمونیتی) روندهای کانی شناسی تدریجی گوتیت به هماتیت را نشان می دهد. هیدروکسیدهای آهن اولیهٔ حاصل از تجزیه کانی های الترامافیک، بی شکل اند و یا تا

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 بر ای 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 گوتیتیِ کاملاً دگرسان شده به سنگ بستر تازه تبدیل شود. عموماً مشابه شکل (2-3)، بخش های بینابینی در لاتریت های اکسیدی وجود داردکه از مخلوط گوتیت، سنگهای الترامافیک اکسید شده و سنگهای الترامافیک دست نخورده، در حد فاصل گو تیت ساپرو لیتی 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) (Golighty, 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

نیکل دار

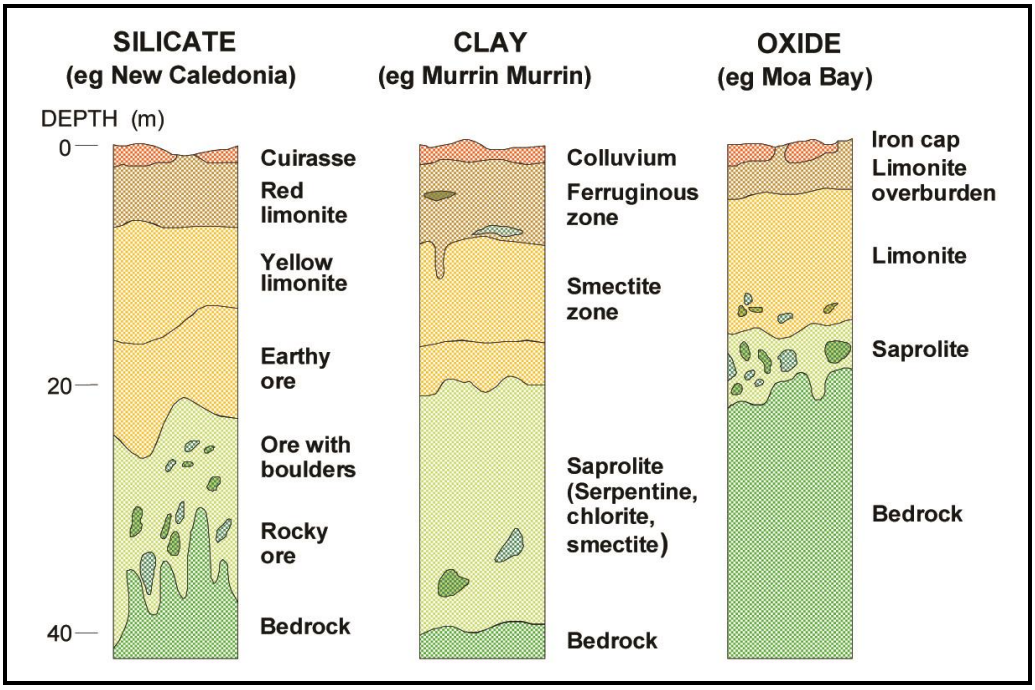
رگه های دانه درشت، عدسی ها و توده های غیر ممتدد تشکیل می شود. مثال هـایی از ایـن نـوع لاتریت ها را می توان همراه با لاتریـت هـای رسـی کـه در سـطح پریـدوتیت هـا ایجـاد و نمـو یافته اند، مشاهده کرد و بنظر فقر آلومینیم در سـنگ دونیـت مـانع از گسـترش رس ثانویـه شـده است. کاوس و راونستورپ (Cawse and Ravensthorpe) در غرب استرالیا نمونه ای از این نوع کانسارهای اکسیدی لاتریتی می باشند (Brand et al., 1998).

2-4-2 - لاتریت های رسی

درشرایط کم اثرترِ هوازدگی (سردتر یا خشک تر) سیلیس، مانند محیط مرطوب حاره ای، سیلیس از محیط خارج نمی شود و به جای افق اکسیدی آهن دار، آهن با مقدارکمیAl ترکیـب شده و افقی رسی با کانی شناسی غالب نانترونیتی و اسمکتیتی ایجاد می شود.

نانترونیت نقشی مانند هماتیت در محافظت و نگهداری درون شبکه ای Ni داشته که در این عمل، جانشینی Ni بجای Fe در بین صفحات صورت می گیـرد (Brand et al, 1998). رس هـای نانترونیتی شاخص در لاتریتهای کانی زایی شده، 1 تا 1/5 درصد نیکل دارند. سیلیس های مازاد برای تشکیل نانترونیت، به شکل ندول های اپال و کالسدون در رس ها شکل می گیرنـد و بیشـتر در افـق هـا و منـاطقی نظیـر منـاطق پسـت کـه زهکشـی کمـی دارنـد، گسـترش مـی یابنـد (Golightly, 1981).

افق ها ی رسی را افقی غنی از Fe و فقیر از Ni می تواند بپوشاند و در زیر افـق رسـی، افـق نسبتاً هوازده ساپرولیتی که دارای سرپانتین و نانترونیت می باشند، دیـده مـی شـود. پروفیـل هـای غنـــی از رس در اســـترالیا بـــرای مثـــال در مـــورین مـــورین (Murrin Murrin) (Monti and Fazakerel, 1996) و بولنـگ (Bulong) (Elias, et al., 1981) و مـارلبوروگ (Marlborough) (Golightly, 1981) و در برزیل گسترش وسیعی دارند.



شکل (2-4): مقایسه انواع مهم لاتریت ها با یکدیگر

3-4-2- لاتریت های سیلیکاتی

اگر چنانچه بالا آمدگی تکتونیکی کند و ممتد باشد و سطح آب زیر زمینی در پروفیل ها پایین باشد، هوازدگی 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). لاتریت های سیلیکاتی، غنی شدگی مشخص نیکل را در زون ساپرولیتی نشان می دهند. درکانی های ثانویه حاصل از دگرسانی از جمله سرپانتین ثانویه، گوتیت هیدراته، اسمکتیت و گارنیریت (اصطلاحی است که برای ساختار پیچیده سیلیکات 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 نیکل مربوط به آزاد شدگی حاصل از تبلور دو باره

گوتیت 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. نمونهٔ پروفیل های سیلیکاتی دارای ارزش اقتصادی در ماسیف کالدونیای جدید واقع می باشد (Golightly, 1981) که بیشترین درصد منابع نیکل را درخود جای داده اند. لازم به ذکر است مقایسه شماتیکی سه نوع پروفیل لاتریتی در شکل (2-4) آورده شده است.

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

درگستره 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 قارّه ای و زون های برخوردی مطابقت دارند. در این محدوده ها، گسل های تراستی همواره تکّه 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 الترا مافیکِ 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.

نیکل دار

2-5-2- فلات های کراتونی

لاتریت هایی که در روی کماتئیت ها و کمپلکس های لایه ای به سن آرکئن تا پالئوزوئیک گسترش یافته اند، در این رده جای می گیرند. پایداری تکتونیکی امکان تصحیح و پن پلینی شدن (peneplanation) را مهیا می سازد. لاتریت ها به صورت ارتفاعات متوسط تا فرسایش یافته ظاهر می شوند. زهکشی محدود اغلب باعث تشکیل اسمکتیت به جای اکسیدها می شود و پایداری تکتونیکی، امکان لاتریتی شدن را در مدت زمان طولانی فراهم می آورد که این خود باعث افزایش هوازدگی و گسترش لاتریت ها در آب و هوای سردتر و کم باران تر می گردد. لاتریت ها و بوکسیت های لاتریتی نیکل دارِکراتون یلگارن درغرب استرالیا و قسمتی از برزیل، غرب افریقا، اورال در روسیه و اوکراین، مثالهایی از این گونه لاتریت ها می باشند.

بصورت محلی یا در اندازه کانساری، لاتریت هارا می توان بر اساس موقعیت توپوگرافیشان به نهشته های سکوئی یا پلاتفرمی و تراسی (پلکانی) تقسیم بندی کرد (Troly et al., 1979). نهشته های سکوئی اکثراً تحت تأثیر فرآیندهای فعال زهکشی قرار دارند و کمتر فرسایش یافته اند، بنابر این تا حد امکان پروفیل گسترش یافته ای را نشان می دهند و به عبارت دیگر زون ساپرولیتی ضخیم تری دارند.کانسارهای صفحه ای ثیو و کونیامبو (Thio and Koniambo) در کالدونیای جدید مثال خوبی از نهشته های سکویی هستند. نهشته های زاویه دار (مایل) بیشتر تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته اند و زون اکسیدی ندارند یا اینکه ضخامت آنها ناچیز است. گسترش لاتریت های سیلیکاتی نسبت به نهشته های صفحه ای، به علت اینکه آب زیرزمینی مؤلفهٔ جانبی شدیدتری داشته، بیشتر است. این جریانِ جانبی شدیدتر، باعث غنی شدگی بیشتر نیکل می شود.

نهشته های پلکانی یا تراسی، باقیمانده اولین دشتگون ها (پن پلین) یا هر سطح فرسایشی می باشند و توقف ناگهانی بالا آمدگی تکتونیکی را نشان می دهند. آنها پروفیل های لاتریتی را کاملاً نشان داده و از افق ساپرولیتی ضخیمی برخوردارند. نهشته های پلکانی، شامل فرآورده های فرسایش یافتهٔ لاتریت های سکوئی(خصوصاً بخش اکسیدی که به راحتی فرسوده می گردد) می باشندکه این نوع لاتریت ها را در برگرفته اند. با افزایش چرخه های لاتریتی شدن متعدد، افزایش عیار نیکل محتمل است. مثال های خوبی از نهشته های سکوئی در جنوب کالدونیا شناخته شده است که معروف ترین آنها نهشتهٔ گُرو (Goro deposit) می باشد.

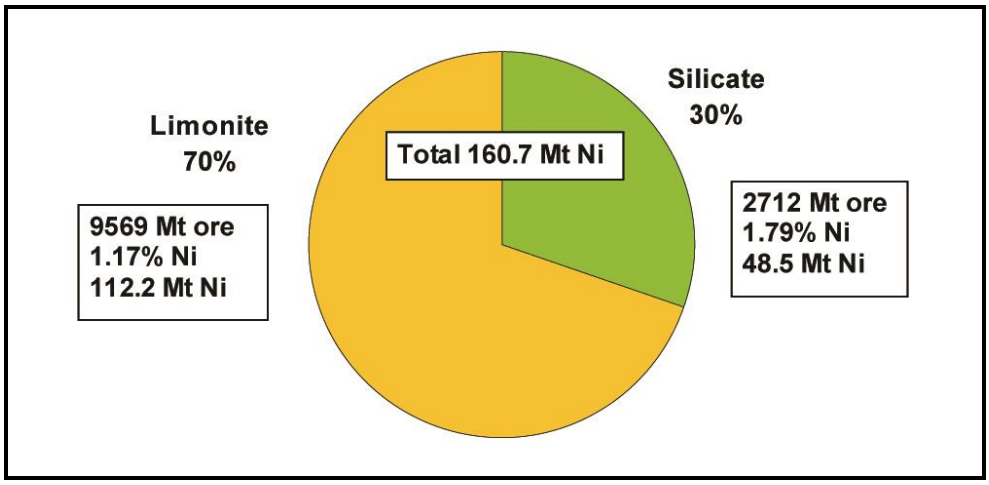
6-2- منابع جهانی نیکل لاتریتی

کل منابع نیکل لاتریتی160 میلیون تن است (شکل 2-5). اگرآنها را به دو دسته لیمونیتی (مجموع منابع اکسیدی و رسی) و سیلیکاتی، براساس کانی شناسی غالبشان (در بعضی مواقع با توجه به دیدگاه پروژه در حال انجام) تقسیم بندی کنیم، نهشته های لیمونیتی که دارای Mg ناچیزی هستند،70 درصدکل منابع نیکل لاتریتی را شامل می شوند؛ ولی به علت اینکه عیار متوسط نهشته های لیمونیتی کم است، تناژی نزدیک به 80 درصد نهشته ها را در برگرفته اند.

اگر از دیدگاه منطقه ای کانسنگ های لاتریتی را مد نظر قرار دهیم، فقط سه کشور مهم کالدونیای جدید، اندونزی و استرالیا دیده می شود که در مجموع 60 درصد کل منابع لاتریتی را در اختیار دارند. با توجه به مساحت کم کالدونیای جدید، چیزی در حدود 26 درصد منابع لاتریتی دنیا را در اختیار دارد (شکل 2-6). عیار نیکل و نسبت منابع لاتریت لیمونیتی در بین این سه کشور متفاوت بوده و کالدونیای جدید از نظر کانسارهای نیکل سیلیکاتی و لیمونیتی بیشترین عیار را دارد. این نسبت درمورد نیکل های لاتریتی لیمونیتی نزدیک 70 درصد متوسط جهانی

نیکل دار

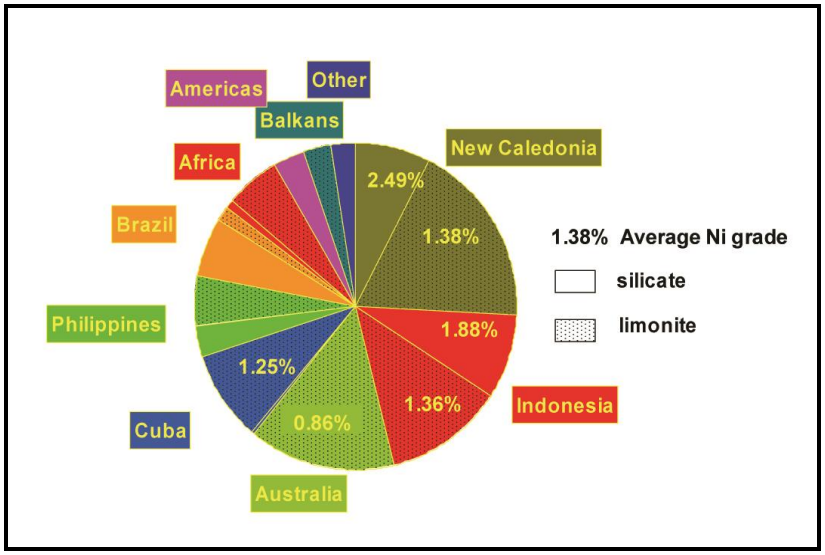
است که در بخش کوچکی از جنوب کالدونیا (ماسیف دو سود) (Massif du Sud) واقع است. استرالیا هیچگونه ذخیره ساپرولیتی نداشته و عیار نهشته های لیمونیتی آن کمتر از دو کشور دیگر است.



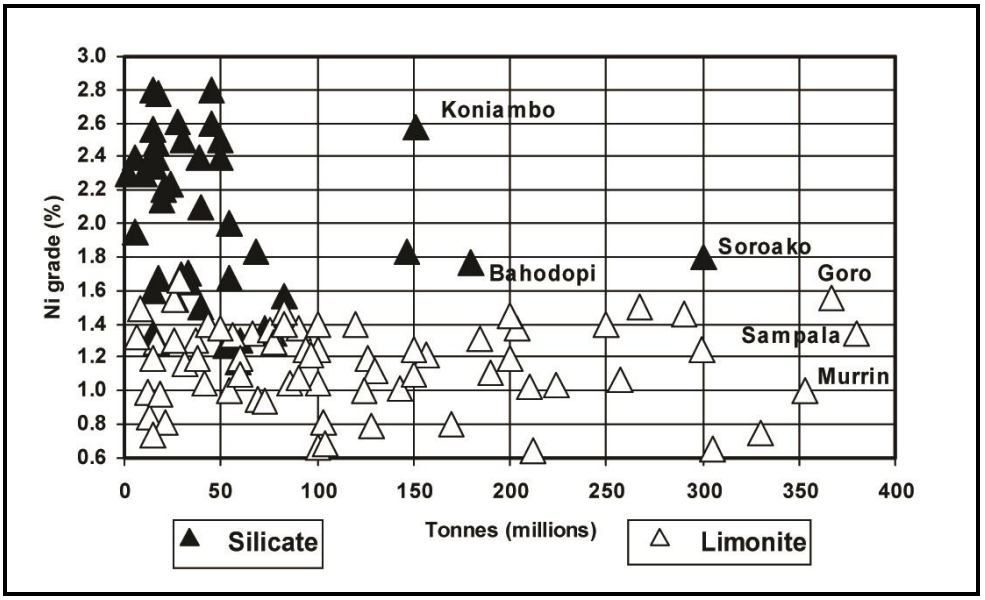
شکل (2-5): منابع نیکل لاتریتی دنیا

محدودهٔ تغییرات تناژ و عیار نهشته های خاص درشکل (2-7) آورده شده است. بیشترین عیار نیکل در لاتریت های لیمونیتی1/6 درصد بوده و کانسارهای مربوط به آن تناژ زیادی دارند. نهشته های سیلیکاتی که کوچکتراند (کمتر از50 میلیون تن) عیار نیکلی بین 2/4 تا2/6 درصد دارند. نام تعدادی از کانسارهای مهم به همراه عیار و ذخیره آنها در تصویر (2-7) آورده شده است.

نیکل دار



شکل (2-6): توزیع منابع نیکل لاتریتی که شامل نیکل لیمونیتی (اکسیدی و رسی) و نهشته های سیلیکاتی میشود.



شکل (2-7): نمودار تناژ- عیار در مورد نهشته های خاص. نهشته های لیمونیتی شامل نهشته های لاتریتی اکسیدی و رسی می باشد. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد نهشته های نامبرده شده به جدول (2-4) مراجعه گردد.

- **بخش دوم**

7-2- بهره برداری از منابع نیکل لاتریتی

از اولین سالهای تولید نیکل در دهۀ 1875 تا انتهای قرن 19 ، هنگامی که نهشتۀ عظیم سولفیدی سادبری (Sudbary) به تولید رسید، تنها از منابع نیکل لاتریتی کالدونیای جدید نیکل استخراج می شد.

علی رغم اینکه 70 درصد نیکل دنیا در منابع لاتریتی است ولی تولید نیکل از لاتریت ها نسبت به سولفید ها پیشرفت چندانی نداشته است. اخیراً 40 درصد نیکل مصرفی دنیا از فرآوری لاتریت ها به دست آمده که این مقدار تا اواخر دهۀ 30 ، تا 40 درصد بوده و تا قبل از اواخر دهه 1950، ده درصد تولید نیکل را شامل می شده است. اما نیاز آمریکا به نیکل در اثر جنگ کُره باعث شد که تعداد عملیات انجام شده برروی لاتریت ها 2 برابر شود و20 درصد کل نیکل مورد نیاز از این طریق تأمین شود.

دلایلی که نشان می دهد به چه علت تولید نیکل لاتریتی نسبت به حجم ذخایر موجود برابری نمی کند، درجدول (2-2) آورده شده است و این دلایل، اقتصادی می باشد. متوسط وزنی هزینه به فایده (هزینه خالص برای تولید یک تن محصول) تا حدود20 درصد بیشتر از این هزینه در سولفید ها می باشد. هزینه استخراج و معدنکاری لاتریت ها نسبت به سولفیدها که به روش زیرزمینی صورت می گیرد، بسیار کمتر می باشد. هزینه فرآوری نیکل در لاتریت ها نسبت به سولفید ها بیشتر می باشد؛ آنقدر که صرفه جویی هزینه معدنکاری جواب گو نیست.

لاتریت ها	سولفیدها

نیکل دار

نیکل در شکل اکسیدهای پایدار نیازمند گرمادهی با مواد شیمیایی مهاجم جهت تخریب کانی ها می باشد.	هزینه های فرآوری با توجه به کانی های نیمه پایدار نسبت به لاتریت ها کمتر بوده که از انرژی پنهان فراوان S می باشد.
احتمال جداسازی وتغلیظ، محدود بوده و برای همه کانسنگ باید به کار رود. مقادیر زیادی کانسنگ با عیار کم باید حمل گردد و در نتیجه حجم زیادی از مواد مصرفی به کارخانه فرآوری منتقل می گردد.	کانی های نیکل دار به راحتی از مواد باطله یا عقیم در محل جدا سازی می شوند و تنها کنستانتره کردن برای فرآوری باقی می ماند.
تغییرات فراوان کانی شناسی و شیمیایی را در هنگام طراحی پروژه معدنکاری و مخلوط سازی برای ایجاد محصولی یکنواخت و خوراک قابل استفاده جهت پروژه فرآوری را باید مد نظر داشت.	کانه و کانسنگ برای عملیات متالورژی بسیار مناسب اند.
ترکیب متغیر در کل پروفیل، مانع بازیافت نیکل از یک بخش بخصوص آن در طی یک فرآیند می شود.	مقادیر زیادی نیکل در یک فرآیند، بازیافت می شوند.
احتمال کمی وجود دارد که فرآورده های ثانویه (به غیر از Co) با ارزش باشند.	فرآورده های با ارزش (مثل Cu وPGE) امکان جبران هزینه فرآوری را دارند.
هزینه اقلام سرمایه ای سرسام آور است و اگر انرژی را قسمتی از هزینه اقلا م سرمایه ای در نظر بگیریم، بیشتر نیز می شود.	هزینه اقلام سرمایه ای برای هر واحد تولیدی کارخانه فرآوری متوسط می باشد.

جدول (2-2): خلاصه مقایسه اقتصادی بین کانسارهای سولفیدی ولاتریتی نیکل

2-8-فرآوری لاتریت ها

روش های استحصال نیکل در مقیاس صنعتی شامل سه روش فرآوری اصلی می باشد:

1- ذوب و گداخت برای ایجاد فرونیکل یا مات (matte) ؛

2- فرآوری کارون (Caron) (احیا گرم با شستشوی آمونیاک) ؛

3- شستشو با فشار بالای اسید (HPAL) که از اسید سولفوریک استفاده می شود.

در جدول (2-3) تولید نیکل از لاتریت ها در سال 2001 با هر یک از این فرآیند ها نشان داده شده است. با توجه به ملزومات هر فرآیند وتغییرات شیمیایی و کانی شناسی در پروفیل لاتریتها (شکل 2-3)، هریک از این فرآیند ها فقط برای استفاده از بخش بخصوصی از پروفیل مناسب اند. ذوب حرارتی (Pyrometallogy) قدیمی ترین وپرکاربرد ترین روش فرآوری است. این روش بیشتر برروی بخش سیلیکاته پروفیل که غنی از نیکل است، استفاده می شود و در کوره های الکتریکی آلیاژ فرونیکل (آلیاژی احیا شده است که مستقیماً برای تولید فولاد زنگ نزن مورد استفاده قرارمی گیرد، حاصل می شود و برای ذوب کانسنگ های سولفیدی که می تواند به همراه روش های عادی فرآوری سولفیدی مورد استفاده قرار بگیرد، طراحی شده است. این روش تکنولوژی ساده ای داشته، بارها اجراء گردیده و روش قابل اطمینانی است. در آن ترکیب کانسنگ به خودی خود روان می گردد و مقدار بازیابی بالا بوده (90 درصد) اما هنگامی که آلیاژ فرونیکل شکل گرفت هیچ درصدی از Co بازیافت نمی شود. سوددهی پروژه به هزینه سوخت وابسته می باشد. پروژه های موفق (مثل سورواکو (Sorowako)) دارای منبع برق آبی مخصوص به خود می باشند.

روش فرآوری کارون (Caron) بر روی اکسیدهای لاتریتی (لیمونیتی) ودر بعضی موارد بر روی لاتریت های سیلیکاتی کاربرد داشته و وجود مقادیر زیاد Mg و سیلیس باعث کاهش بازیابی نیکل می شوند. این فرآیند شامل رطوبت گیری و گرمادهی است که در شرایط محیط احیایی و با شستشوی آمونیاک کم فشار دنبال می گردد. Ni , Co با حلال (استخراج گر) استحصال می شوند و بهسازی بیشتر محصول با آهک زنی و ایجاد شرایط احیایی دنبال می شود. درصد بازیابی Ni تقریباً 80 و برای Co ،40 تا 50 درصد می باشد. رطوبت گیری

نیکل دار

واحیای گرمایی به انژری 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 دهه1970 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 بزر گ استفاده شد و تا اواخر 1990 تنها پروژه از این نوع بود که مقارن با ایجاد سه پروژۀ بولنگ، کاوس و مورین مورین در غرب استرالیا بود. در پروژۀ HAPL عملیّات 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_2S 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 اسیدسولفوریک 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

نیکل دار

دارد که از آن جمله می توان به افزایش هزینه های عملیاتی برای غلبه براین مشکل و نیز کاهش کارایی فرآیند، در نتیجهٔ 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.

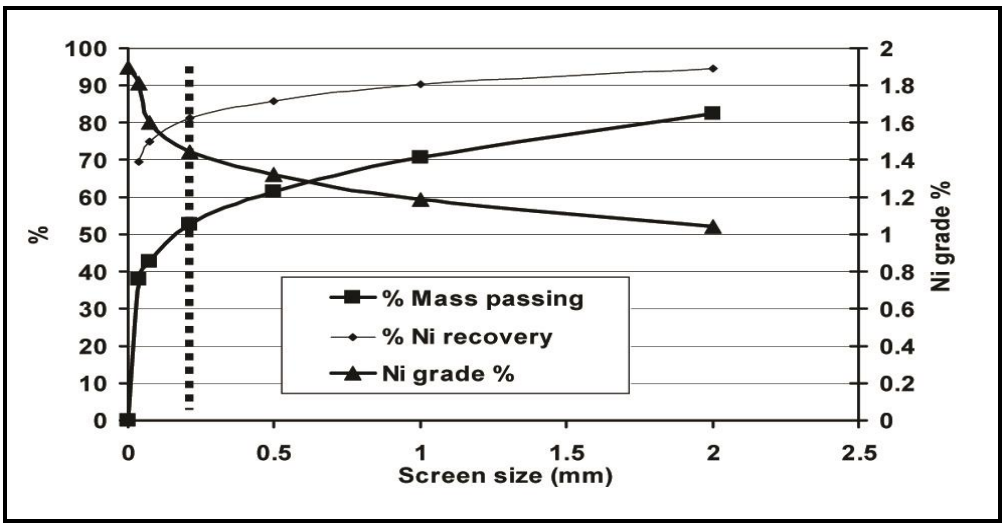
9-2-پرعیار سازی

انواع مشخص کانسنگ های لاتریتی قبل از اینکه در فرآیند فرآوری مصرف شوند، وارد چرخه پرعیارسازی می گردند. پرعیارسازی جدایش اجزاء کم عیار از اجزاء پرعیاری است که وارد چرخه فرآوری می شوند، که در نهایت اجزاء کم عیار 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 پرعیارتر همراه می باشد.

حذف قلوه سنگ هایی که کمتر آلتره 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 موردکوپتو با این عمل افزایش ناگهانی 25٪ عیار در محصول حمل شده به کوره مشاهده می شود. پرعیارسازی در مورد لاتریت های اکسیدی- سیلیکاتی کاراتر بوده و اجزاء سیلیسی آن که یقیناً فاقد نیکل می باشند، با خردایش ساده از گوتیت، جدا می شوند. شکل (2-8) مثالی از معدن کاوس در غرب استرالیا است که درآن لاتریتی با عیار 1/04٪ نیکل و قطر212

نیکل دار

میکرون سرند، خردایش یافته و درصد محصول نهایی 53 ٪ ماده اولیه است. عیار نیکـل بدسـت آمده 1/44٪ است که 81 ٪ کل نیکل ماده اولیه می باشد.



شکل (2-8): نمودار پر عیار سازی کانسنگ سیلیس اکسیدی در شمال غـرب اسـترالیا. نمـودار خـواص مـواد عبوری را به درصد بر روی محور X نشان می دهـد. خـط عمـودی منقطـع 212میکـرون (مـاده عبـوری)، بـه صورت درصد وزنی ذرات عبوری نسبت به وزن کل می باشد و درصد بازیافت Ni، نسبت گزارش شده نیکل ماده معدنی کل به نسبت نیکل ذرات عبوری می باشد.

کانسنگ های رسی برای پرعیارسازی مناسب نیستند، زیرا نیکل در آنها به صـورت کـاملاً یکسان توزیع شده است و جزئی فقیر از نیکل به غیـر از سـیلیس ثانویـه وجـود نـدارد کـه بتـوان جداسازی کرد.

Plant	Company	Country	Tonnes Ni	% of total production
Smelting – Ferro-nickel				
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	
S/T			243,274	**51.2%**
Smelting – Matte				
Doniambo	SLN	New Caledonia	13,061	
Sorowako	PT Inco	Indonesia	62,600	
S/T			**75,661**	**15.9%**
Caron Process (Ammonia leach)				
Yabulu	Queensland Ni*	Australia	28,500	
Nicaro	Cuban Govt	Cuba	16,400	
Punta Gorda	Cuban Govt	Cuba	26,900	
Tocantins	Votorantim	Brazil	16,700	
S/T			**88,500**	**18.6%**
HPAL (Acid leach)				
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	
S/T			**67,679**	**14.2%**
Total Laterite Production			475,114	**100%**
Total Sulphide Production			**674,886**	
Total Nickel Production			**1,150,000**	

جدول (2-3): میزان تولید نیکل به تفکیک فرآیند استحصالی در سال 2001. پروژه های ستاره دار کانسنگ های مصرفی خود را وارد می کنند.

10-2-ساختار صنعت استحصال نیکل از لاتریت ها

65 درصد نیکل لاتریتی از فرآیند ذوب بدست می آید. کارخانه های ذوب دارای ظرفیت های متغییر می باشند. اکثراً بالای60 تا 70 هزار تن در سال، ظرفیت تولید دارند (برای مثال سورواکو (Sorowako) و دنیامبو (Doniambo)). اغلب این کارخانه های ذوب در اطراف معادن مستقرند و به صورت مجتمع صنعتی (بیش از یک کارخانه) فعالیت می کنند.

دانسته هایی چند پیرامون لاتریت

نیکل 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.

کارخانهٔ 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 ازکالدونیای 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 پروژهٔ 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 شدکه 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 وکبالت از محلول شستشو و بهبود طراحی وکسب تجربیات ارزنده در مورد اتوکلاوهای مورد استفاده در صنعت استحصال طلا، باعث جذابیت اقتصادی بیشتر این پروژه ها گردید.

نیکل دار

در پس این جـذابیت، 15 تـا 20 پـروژه در اطـراف و اکنـاف دنیـا در دسـت بررسـی قـرار گرفت که این مطالعات در محدوهٔ بسیار متغیّری (از مطالعات اولیه تا مطالعات اقتصـادی بـانکی) انجام می شد. نمونه های شاخصی از این پروژه ها در گرین فیلد (غرب استرالیا) واقع شـد ه انـد که بولنگ وکاوس (پروژه های بزرگی با تولید سالیانه 6500 تن نیکـل کـه در صـورت امکـان الحاق، بر ظرفیت خود می افزودند) و دیگری مورین مورین (با تولید 4500 تن نیکل در سـال) از آن جمله اند. این سه پروژه در سال 1999 به تولید کامل رسیدند که البته عدم امکان الحاق و نقیصه های تکنولوژیکی و مهندسی باعث طویل شدن زمان انجام پروژه ها و افزایش هزینه های اجرایی شد؛ اکنون همه آنها زیر ظرفیت اسمی خود کار می کنند و از نظـر اقتصـادی در مضـیقه هستند. در نتیجهٔ این مشکلات، بقیهٔ پروژه ها به غیـر از پـروژهٔ گُـرو متوقـف شـدند. مالـک ایـن پروژه شرکت اینکو می باشد که در کالدونیای جدید در حال ساخت است و در سـال 2007 بـا ظرفیت 5400 تن نیکل در سال به بهره برداری خواهد رسید.

از نظر اقتصادی عملیات صورت گرفته بر روی لاتریت ها بسیار متغیّر می باشد. در جـدول (4-2)، لیست20 پروژهٔ نیکل لاتریتی در اقصی نقاط دنیـا (تولیـد کننـده - در مرحلـهٔ اکتشـافی وپروژه ها- در مرحله افزایش ظرفیت) آورده شده است کـه بـا توجـه بـه آن ، بـه درک بهتـری ازمحرک های اقتصادی این صنعت خواهیم رسید. این پروژه هـا براسـاس مقـادیر ذخـایر قطعـی نیکل معادنشان انتخاب شده اند و با توجه به عواملی که در بـالا اشـاره شـد، قابـل نقـد و بررسـی می باشند.

سود دهی پروژه های لاتریتی سورواکو و سروماتوسـو (CerroMatoso) قابـل توجـه اسـت که از دلایـل آن، انـدازه بـزرگ آنهـا و وجـود ذخـایر سـوخت ارزان قیمـت مـی باشـد. انـرژی

نیکل دار

سورواکو از نیروگاه برق آبی تأمین می شود و سودآوری پروژهٔ SLN به عیار بالای کانسنگ (بیش از 2/6 ٪ نیکل) و انرژی در دسترس برق آبی آنها وابسته می باشد،که البته از ژنراتوری پرهزینه ای با سوخت نفت بهره می برند.کوره ذوب فالکون بریج فالکندو (Falconbridge's Falcondo) در جمهوری دومینکن بر اساس سوخت نفت بنا نهاده شده است.کوره ذوب چندین بار هنگامی که قیمت سوخت بالا رفت ولی قیمت نیکل ناچیز بود تعطیل شد وآخرین مورد آن سه ماه انتهایی سال 2001 می باشد. پروژهٔ اکس میبل (Exmibal) از سال 1977 فقط سه سال به فعالیت پرداخت و تا امروز تعطیل است؛ به سختی به نصف تولید ظرفیت اسمی خود رسید و در نتیجه به علت ظرفیت تولیدی کم و وابستگی به ژنراتور نفتی جریمه شد.

متقابلاً پروژه های بسیار زیادی از نیکل لاتریتی که به لحاظ سوددهی اقتصادی سربه سراند و در شرف اضمحلال می باشند، با کمک های زیاد دولت است که درحال فعالیت اند. این کمک ها به علت حمایت از تولید محصو لات استراتژیک، حمایت از اقتصاد ملی و ایجاد اشتغال می باشد (گاهی اوقات این تولیدکنندگان به نام تولیدکنندگان اجتماعی شناخته می شوند). در مورد کوره های ژاپنی به این موارد باید هزینهٔ خرید کانسنگ و حمل و نقل کانسنگ و انرژی، اضافه شود. تولیدکنندهٔ فقیر یونانی، لارکو (Larco) به علت عیار کم نیکل(1/1٪) و هزینهٔ سوخت بالا و دمای ذوب بالای کانسنگ غنی از Fe و دریافت قروض دولتی بی حد و حصر دچار مشکلات اقتصادی فراوان شده است.

سه پروژه در غرب استرالیا به علت استهلاک فراوان اقلا م سرمایه ای، هزینه عملیاتی بالاتر از حّد تخمین زده شده، به هدر رفتگی محصول به علت مشکلات فنی بوجود آمده در پمپ ها

و لوله ها و دستگاه های فشار (در اثر خورندگی بالای دوغاب غنی از اسید سولفوریک) با مشکلات اقتصادی فراوان روبرو شده اند. براساس تجربه، برای کاهش ریسک اقتصادی باید مطالعات اقتصادی دقیقی صورت گیرد. هزینهٔ اقلام سرمایه ای بالا بوده و بنابراین پروژه ها باید در حد اقتصادی بزرگ در نظر گرفته شوند. پروژه های HPAL نباید در اطراف مجتمع های مسکونی معدنی قرار گیرند. هزینه های بالای عملیاتی و اتلاف هزینه های اقلام سرمایه ای باعث شده تا دو تولیدکنندهٔ کوچک استرالیای غربی، داراییهای با ارزششان را برای بازسازی اقلام سرمایه ای کارخانه به مصرف برسانند.

با توجه به این موارد پروژه های جدیدی در حال مطالعه و یا ساخت می باشد (10مورد از آنها درجدول (2-4) آورده شده است). حامیان مالی این پروژه ها و صاحب نظران بر این نکته تأکید دارند که تجربیات سه پروژهٔ HPAL در استرالیا نشان داده که برای مقابله با مشکلات، باید چه تمهیداتی بیندیشیم تا براین مشکلات فائق آئیم. پس همچنان پروژه های HPAL از نظر اقتصادی جذابیت کافی را برای آنکه بتوان روی آنها سرمایه گذاری کرد را دارند. در مورد پروژه های در حال ساخت فقط اسیپیلو، موسونگتی و مورامانگا (Sipilou, Musongati and Moramanga) از نظر موقعیت دور از ساحل می باشند،که مشکل ساز شده است؛ در تعدادی از این پروژه ها نیزشرایط سیاسی نامناسب است. این مسئله در هنگام بررسی هزینه های سرسام آور اقلام سرمایه ای بروز می نماید.

Project	Country	Ownership	Predominant ore type	Contained Ni in resource	% Ni grade	% Co grade	Project status	Production capacity (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 بپیمایند تا به سوددهی اقتصادی لازم برسند. هر سه پروژهٔ استرالیای غربی از مشکلات مشابهی برخوردارند و باید از تکنولوژی و مهندسی بالایی برای تضمین سوددهی و موفقیت پروژه ها

نیکل دار

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

1-11-2- کیفیت کانسنگ

این عقیده که وجود معدن سودده به تودهٔ ماده معدنی، تناژ و کیفیت مناسب بستگی دارد از قدیم مطرح بوده است. کیفیت کانسنگ در نهشته های لاتریتی نیکل دار بـه عوامـل زیـر وابسـته است :

1-1-11-2- عیار

بالاترین عیار از نیکل و عناصر همراه آن خصوصاً Co سـوددهی پـروژه را تضـمین مـی نماید و آثار مواد باطله داخلی را درکل کاهش می دهـد. پرعیارسـازی کانسـنگ پرفایـده اسـت ولی در این مورد هزینهٔ معدنکاری با هزینه آسیاب کردن مقایسه می شود.

2-1-11-2- انسجام و پیوستگی

انسجام و پیوسـتگی عیـار و دیگـر خـواص فیزیکـی و شـیمیایی امکـان تغییـرات کانسـنگ ورودی به مرحلهٔ فرآوری را کاهش می دهد.

3-1-11-2- ضخامت روباره وکانسنگ

بیشـترین ضـخامت کانسـنگ و کمتـرین ضـخامت روبـاره، نسـبت خـاک بـرداری و روباره برداری را کاهش می دهد.

4-1-11-2- کانی شناسی

در واحدهای HPAL ، کانی های اکسیدی نسبت بـه کانیهـای رسـی ارجحیـت داشـته و بـا توجه به اینکه بازیافت نیکل در هر دو ثابـت اسـت ولـی در لاتریـت هـای رسـی وجـود سـیلیس کلوئیدی در دوغاب و محلول های حاصل از تجزیـهٔ رس هـا، مشـکلاتی را در پمپـاژ فشـار بـالا

ایجاد می کند و در نتیجه باعث جدایش محلول از جامد می شود. درکانسار های با ترکیب اکسیدی، دوغاب با چگالی بالا ایجاد می شود که باعث افزایش سرعت جریان خروجی می گردد.

در عملیات ذوب، نسبت Mg به Si خوراک، دمای ذوب، فعالیت و غلظت سرباره را کنترل می کند. این نسبت با وجود کانی شناسی مخصوصاً وجود سرپانتین تحت تأثیر قرار می گیرد.

5-1-11-2- عناصر اسید خوار

در پروژه های HPAL، منیزیم و آلومینیوم، مصرف کنندگان اسید می باشند. حضور Al (که علی الخصوص در روباره یافت می شود) باعث ایجاد آلونیت در اتوکلاوها می شود.

در همهٔ لاتریت ها سیلیس آزاد به صورت باکس ورک و رگه های نامنظم دیده می شود. اگر در خوراکِ کارخانهٔ ذوب، سیلیس حضور داشته باشد، بشدت باعث تغییرات درصد Mg به Si می شود و باید از این معضل جلوگیری کرد.

6-1-11-2- اندازه

هزینهٔ بالای اقلام سرمایه ای در پروژه های لاتریت نیازمند ظرفیت بالای واحد جهت رسیدن به مقیاس اقتصادی است. معدنی با طول عمر زیاد، امکان بازگشت سرمایه را فراهم می کند. با یک حساب سرانگشتی ظرفیت 45000 تن نیکل، کمترین ظرفیت تولیدی در پروژه های HPAL می باشد که جهت کاهش واحد اقلام سرمایه ای بایستی این مورد را در نظر داشت (هزینه سرمایه ای براساس واحد10 دلار بر ظرفیت واحد تولیدی است که برحسب پوند بیان می گردد وگاهی بنچ مارک نیز نامیده می شود). درکارخانه ذوب کمترین ظرفیت اقتصادی 2500- 2000 تن نیکل در سال می باشد ولی این شاخص به شدت به عیار و هزینه

سوخت وابسته است. منابع مورد نظر باید برای30 سال کافی باشد که معادل با چند صد میلیون تن نهشته کم عیار و حداقل 50-10 میلیون تن کانسنگ سیلیکاتی می باشد.

7-1-11-2- موقعیت

به علت مواد مصرفی فراوان در پروژه های HPAL و کارون (Caron)، موقعیت های ساحلی مناسب ترند و درصورت امکان، معدن باید در نزدیکی ساحل باشد تا هزینهٔ حمل و نقل کانسنگ کاهش یابد. واحدهای ذوب در بعضی موارد نزدیک منابع انرژی یا بازار مصرف می باشند و البته نزدیکی به محل معدن نیز مهم است. مورین مورین از مشکل حمل 50 هزار تن سولفور در سال از راه دریایی 800 کیلومتری به محل معدن لطمه دیده است که این مورد در گُرو، گیج ایسلند (Gag Island) و وداباى (Weda Bay) مطرح نیست.

8-1-11-2- زیر ساخت ها

سه زیر ساخت لازم برای پروژه های لاتریتی شامل آب، سوخت و راه دسترسی می باشد. مصرف آب در فرآیندهای هیدرومتالوژی (کارون و HPAL) بالا است؛ اما این مورد در آب و هوای مرطوب و حاره ای مطرح نیست. مشکل کیفیت و حضور آب در مناطق داخلی و صحرایی چون استرالیا، مطرح است. ذوبگران مصرف کنندهٔ منابع سوخت اند و نزدیکی به منابع سوختی ارزان قیمت چون الکتریسته، برق آبی و گاز پرفایده است. راه دسترسی، بخصوص در مناطق مرتفع و خشن و بالا آمده برای حمل کانسنگ و یا بارگیر ی در بندر ضروری است.

ایجاد زیر ساخت ها می تواند بر روی هزینه های بالای اقلا م سرمایه ای افزوده شود. سه پروژه در غرب استرالیا در مسیر خطوط لوله گاز می باشند که دارای سود خاص بالایی می باشند، همچنین دو پروژهٔ کاوس و بولنگ که در نزدیکی کارخانجات ذوب نیکل کالگری

نیکل دار

WMC (WMCKalgoorlie) می باشند، اسید سولفوریک مورد نیازشان را از این کارخانه تأمین می کنند.

2-11-2- ملاحظات زیست محیطی

در هنگام مطالعه طرح، نتایج زیست محیطی معدنکاری و فرآوری ،دفن مواد زاید و غیره را باید مدّ نظر قرار داد (Dalvi and Poetschke, 2000). معدنکاری در لاتریت های نیکل دار کم عمق بوده (عموماً کمتر از50 متر) ولی آثار سوئی از نظر زیست محیطی به همراه دارد. بنابراین محدوده وسیع معدنکاری پس از اتمام عملیات باید بازسازی گردد. شایان ذکر است ایجاد پوشش گیاهی در مناطق گرم و حاره ای کار سهل تری نسبت به مناطق خشک است. فرآوری، با دفن مواد باطله و پسابها و انتشار آنها به محیط همراه است. این مشکل در مناطق حاره ای نسبت به مناطق خشک حادتر می باشد. جایگاه دفن این پسابها به علت بارش زیاد و تبخیر کم در مناطق حاره ای مشکل ساز می شود. دفن باطله ها در محیط های دریایی عمیق و نزدیک ساحل و یا محل هایی که توپوگرافی بستر دریا مناسب باشد، از نظر فنی قابل اجراء است اما با مقاومت گروههای حامیان محیط زیست روبرو است. دربعضی موارد دولتها این عمل را مجاز نمی دانند.

2-12- خلاصه و نتیجه گیری

نیکل لاتریتی اغلب در مناطق دارای سنگ های غنی از اولیوین و در شرایط گرم و حاره ای که طی زمان طولانی دچار هوازدگی شیمیایی گشته اند، دیده می شود. این مدت زمان

دانسته هایی چند پیرامون لاتریت

نیکل دار

طولانی امکان تمرکز نیکل 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 درموقعیت های برخوردی صفحات اقیانوسی به یکدیگریافت.

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 نیکل لاتریتی از بالا بودن هزینه اقلا م سرمایه ای و لزوم استفاده از جدیدترین تکنولوژی های مرتبط با فرآوری، نشأت می گیرد. وجود یک توده معدنی بزرگ جای بسی شعف 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 نیکل عقب مانده اند ولی به علت وجود منابع فراوان نیکل، در موقعیت بهتری جهت افزایش تولید

نیکل دار

قراردارند. به علت پیشرفت هـای مسـتمر تکنولـوژیکی در فـرآوری نیکـل، کـاهش هزینـهٔ تولید را شاهدیم.