



لاتریت‌های نیکل‌دار

به عنوان یکی از منابع مهم نیکل

خلیل رضائی



دانشیار گروه زمین شناسی دانشگاه خوارزمی تهران

چکیده

نیکل عنصری مهم و بسیار پرکاربرد است. اخیراً مشخص شده که بسیاری از هماتیت‌ها دارای نیکل هستند. البته این هماتیت‌ها منشأ لاتریتی دارند. به نظر می‌رسد باید کلیه محدوده‌ها و معادن دارای هماتیت از این دیدگاه و با تأکید ویژه بر عناصر خاص از جمله نیکل و ژرمانیوم و کبالت مورد ارزیابی مجدد قرار گیرند. از نظر فراوانی سنگ‌های لاتریت نیکل دار بیش از ۶۰ درصد از عرضه جهانی نیکل را تشکیل می‌دهند. آنها محصول هوازدگی شدید و عمیق سرپانتینیت‌ها در شرایط گرمسیری مرطوب هستند. میزان نیکل گاهی تا بیش از ۱ درصد وزنی هم می‌رسد و در انواع اکسیدهای ثانویه، سیلیکات‌های منیزیم آب‌دار و اسمکتیت‌ها دیده می‌شود. تشکیل، کانی‌شناسی و عیار رسوبات توسط واکنش‌های ناشی از سنگ‌شناسی، تکتونیک، آب و هوا و ژئومورفولوژی کنترل می‌شود. اکثر این رسوبات دارای تکامل و توسعه چند مرحله‌ای هستند که با تغییر محیط آب و هوایی و/یا توپوگرافی آنها تکامل می‌یابند. غنی‌ترین رسوبات (بالای ۳ درصد نیکل) در جایی تشکیل شده‌اند که رگولیت یا سنگ‌پوشه‌های غنی از اکسید بالا آمده و نیکل به سمت پایین شسته شده و در سیلیکات‌های نو تشکیل شده در ساپرولیت متمرکز شده‌اند.

مقدمه

خواص مغناطیسی و شیمیایی مشابهی با این فلزات دارد. کانی‌های اصلی آن شامل پنتلاندیت، پیروتیت و گارنیریت هستند. به دلیل خواص منحصربه‌فردی مانند مقاومت در برابر خوردگی، استحکام بالا، رسانایی خوب و غیرسمی بودن، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. از جمله این کاربردها شامل استفاده برای آلیاژهای فولاد ضد زنگ، باتری‌های نیکل-کادمیم، آبکاری فلزات، قطعات الکترونیکی و تولید سکه است. نیکل به‌طور گسترده در تولید فولادهای زنگ‌نزن، سوپرآلیاژها، آلیاژهای مقاوم به خوردگی و صنایع

با گسترش فناوری‌های نوین و افزایش نیاز صنایع پیشرفته به فلزات استراتژیک، اهمیت اکتشاف و فراوری عناصر فلزی خاص به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. نیکل (Ni) و کبالت (Co) از جمله عناصر راهبردی محسوب می‌شوند که نقش مهمی در صنایع متالورژی، انرژی، الکترونیک و فناوری‌های نوین ایفا می‌کنند (Dalvi et al., 2004; IEA, 2021). نیکل عنصری فلزی با رنگ براق و سفید-نقره‌ای، از گروه آهن و کبالت بوده و

شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بخش عمده مصرف جهانی آن مربوط به صنایع فولاد است (USGS, 2023a). در مقابل، کبالت به دلیل کاربرد گسترده در باتری‌های لیتیوم - یون، صنایع هوافضا، سوپراپایاها و فناوری‌های ذخیره انرژی، به‌عنوان یکی از عناصر استراتژیک قرن حاضر شناخته می‌شود (IEA, 2021; USGS, 2023b). این موضوع سبب شده است که توجه پژوهشگران و صنایع معدنی به منابع جدید و جایگزین این عناصر افزایش یابد. اگرچه بخش مهمی از تولید جهانی نیکل و کبالت از کانسارهای سولفیدی تأمین می‌شود، اما کاهش ذخایر پرعیار سولفیدی، افزایش هزینه‌های استخراج و مسائل زیست‌محیطی مرتبط با آنها، موجب توجه بیشتر به کانسارهای لاتریتی و سنگ‌های اولترامافیک دگرسان‌شده به‌عنوان منابع بالقوه این عناصر شده است (Golightly, 1981; Elias, 2002). بزرگ‌ترین تولیدکنندگان نیکل کشورهای روسیه، استرالیا، کانادا، اندونزی و فیلیپین هستند.

لاتریت‌های نیکل‌دار، که رگولیت‌های هوازده (به‌عنوان لایه‌ای از سنگ یا پوششی از سنگ و خاک است که بلافاصله روی سنگ بستر قرار می‌گیرد) حاوی نیکل، کبالت و گاهی اسکاندیم هستند، ۶۰ تا ۷۰ درصد از منابع نیکل جهان را تشکیل می‌دهند. این کانسارها روی سرپانتینیت‌ها تشکیل می‌شوند. با وجود اینکه استخراج لاتریت‌ها ۱۴۰ سال قدمت دارد، تا سال ۲۰۰۰ تنها ۴۰ درصد از تولید نیکل جهان را تأمین می‌کردند، اما این سهم به سرعت در حال افزایش است و در سال ۲۰۱۰ از ۵۰ درصد فراتر رفت. لاتریت‌ها همچنین ۲۰ تا ۳۰ درصد از کبالت جهان را تولید می‌کنند. توسعه کند این کانسارها در گذشته به دلیل عیار پایین‌تر، فرآیندهای پیچیده فرآوری و نیاز به انرژی زیاد بوده است. برخی از لاتریت‌های نیکل‌دار در حال حاضر نیز در حال تشکیل هستند، در حالی که اکثر آنها در شرایط آب و هوایی و تکتونیکی متغیر در طول زمان تکامل یافته‌اند. این مقاله به بررسی عوامل مؤثر بر منشأ و ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی این ذخایر می‌پردازد.

منابع غیرسولفیدی نیکل و کبالت محسوب می‌شوند. فرآیند هوازدگی سنگ‌های اولترامافیک موجب تمرکز نیکل در افق‌های لاتریتی می‌شود و نوع سنگ مادر، شرایط اقلیمی و شدت هوازدگی نقش مهمی در تشکیل این ذخایر دارند (Golightly 1981). در این محیط‌ها، فرآیندهای هوازدگی، دگرسانی و تمرکز سوپرزون نقش مهمی در آزادسازی و تمرکز عناصر فلزی ایفا می‌کنند (Butt & Cluzel, 2013).

با این حال، رفتار ژئوشیمیایی نیکل و کبالت در لاتریت‌های هماتیتی و سرپانتینیت‌ها متفاوت بوده و این تفاوت‌ها می‌تواند بر نحوه استحصال و میزان بازیابی فلزات تأثیر قابل توجهی داشته باشد (Elias, 2002). با وجود اهمیت اقتصادی این ذخایر، استحصال نیکل و کبالت از منابع لاتریتی و سرپانتینیتی به دلیل پیچیدگی‌های کانی‌شناسی، حضور فازهای مقاوم سیلیکاتی و انحلال همزمان عناصر مزاحم به‌ویژه آهن، با چالش‌های فنی و فرآوری همراه است (Dalvi et al., 2004). رگولیت‌های لاتریتی از چندین افق شامل سنگ‌پوش، ساپرولیت، منطقه پلاسمایی، منطقه لکه‌دار، پوسته آهن‌دار یا آلومینی تشکیل شده‌اند که بیشتر ضخامت آنها را ساپرولیت تشکیل می‌دهد. این رگولیت‌ها در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری شکل می‌گیرند و زمانی که بر روی سنگ‌های اولترامافیک حاوی مقادیر اقتصادی نیکل قرار گیرند، «لاتریت نیکل‌دار» نامیده می‌شوند. سه نوع اصلی سنگ معدن بر اساس کانی‌های نیکل‌دار شامل اکسیدها، سیلیکات‌های منیزیم آبدار و سیلیکات‌های رسی وجود دارد. اغلب کانسارهای لاتریت نیکل‌دار دارای دو نوع سنگ معدن (اکسیدی و سیلیکاتی یا رسی) هستند، که در ادامه توضیح داده می‌شود. اما به دلیل نیازهای فرآوری متفاوت، معمولاً تنها یک نوع کانی از این دو کانسنگ، استخراج می‌شود. تغییرات ژئوشیمیایی در طول پروفیل لاتریتی می‌تواند بر نحوه تمرکز نیکل و کبالت تأثیرگذار باشد (Brand et al. 1998). تفاوت فازهای کانی‌دار در لیمونیت و ساپرولیت تأثیر مستقیمی بر روش‌های استحصال دارد (Elias 2002).

رسوبات اکسیدی (لیمونیتی)

این رسوبات عمدتاً از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، به ویژه گوتیت، تشکیل شده‌اند که نیکل در آنها جایگزین

ویژگی‌های کانسار و رسوبات اکسیدی لاتریتی

کانسارهای لاتریتی نیکل‌دار و سرپانتینیت‌ها از مهم‌ترین

ذخایر سیلیکات منیزیم آبدار

این ذخایر در ساپرولیت میانی تا پایینی تشکیل می‌شوند و نیکل در کانی‌هایی مانند سرپانتین، تالک، کلریت و سپیولیت (که گاهی به طور غیررسمی "گرنیریت" نامیده می‌شوند) متمرکز شده است. این ذخایر دارای بالاترین عیار نیکل (به طور محلی ۲ تا بیش از ۵ درصد) هستند و از نظر تاریخی، بیشتر لاتریت‌های نیکل‌دار از این نوع بوده‌اند. آن‌ها حدود ۳۲ درصد از کل منابع لاتریت نیکل‌دار را با میانگین عیار ۱/۴۴ درصد تشکیل می‌دهند. بیشتر این ذخایر بر روی پریدوتیت‌ها و هارزبورگیت‌های افیولیتی سرپانتینیزه شده ایجاد می‌شوند و بیشتر در مناطق فعال تکتونیکی با پستی و بلندی زیاد در اطراف اقیانوس آرام و کارائیب یافت می‌شوند. هوازدهی کروی یک ویژگی رایج در این ذخایر است و ساپرولیت از بلوک‌هایی تشکیل شده است که شدت هوازدهی از هسته به حاشیه افزایش یافته است. لیزاردیت اولیه که منیزیم آن با نیکل جایگزین شده، یک کانی میزبان مهم در بسیاری از کانسارها است. به دلیل پستی و بلندی زیاد و نرخ فرسایش بالا، رگولیت در این نوع ذخایر به ندرت ضخیم‌تر از ۴۰ متر است.

ذخایر سیلیکات رسی

رسوبات لاتریت نیکل‌دار از نوع سیلیکات رسی اخیراً به عنوان سنگ معدن شناخته شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی این ذخایر، ساپونیت و اسمکتیت غنی از نیکل در ساپرولیت و پدولیت میانی تا بالایی هستند. این ذخایر عموماً دارای عیار ۱۰ تا ۱۵ درصد نیکل هستند و حدود ۸ درصد از کل منابع لاتریت را تشکیل می‌دهند. به نظر می‌رسد این ذخایر محدود به مکان‌هایی با پستی و بلندی نسبتاً کم، عمدتاً بر روی پریدوتیت سرپانتینی شده تا عمق ۴۰ تا ۶۰ متری و در مناطق سپر در استرالیا، غربی، اورال جنوبی، بوروندی و برزیل هستند. ساپروک و ساپرولیت پایینی از سرپانتین اولیه و هوازده، کلریت و ساپونیت تشکیل شده‌اند. مرز بالایی سنگ معدن تقریباً با ناپیوستگی منیزیم مطابقت دارد و در بالای آن یک افق گوتیتی و پوسته دوریکراست هماتیتی قرار دارد. در مورین، نیکل در لایه هشت‌وجهی اسمکتیت‌ها قرار دارد.

آهن می‌شود یا جذب آن می‌گردد. اکسیدهای منگنز نیز که غنی از کبالت و نیکل هستند، در این رسوبات فراوانند. رسوبات اکسیدی حدود ۶۰ درصد از منابع لاتریت نیکل را تشکیل می‌دهند و عیار متوسط آن‌ها ۱/۰ تا ۱/۶ درصد نیکل است. نوع فازهای میزبان نیکل، از جمله گوتیت، هماتیت و سیلیکات‌های منیزیم‌دار، کنترل‌کننده رفتار ژئوشیمیایی نیکل در فرآیندهای فرآوری است (Gleeson et al. 2003). در طی فرآیند سرپانتینی‌شدن و هوازدهی، عناصر نیکل و کبالت می‌توانند از ساختار کانی‌های اولیه آزاد شده و در فازهای ثانویه تمرکز یابند (Golightly, 1981; Elias, 2002). در طی این فرآیند، کانی‌های سیلیکاته اولیه نظیر البوین و پیروکسن تحت تأثیر آب‌های اکسیدکننده و محلول‌های اسیدی دچار تجزیه شده و عناصر متحرک از محیط خارج می‌شوند، در حالی که آهن به صورت فازهای اکسیدی و هیدروکسیدی پایدار باقی می‌ماند (Butt & Cluzel, 2013). تداوم هوازدهی و اکسیداسیون موجب تشکیل افق‌های لاتریتی غنی از هماتیت، گوتیت و لیمونیت می‌شود.

لاتریت‌های هماتیتی معمولاً دارای مقدار زیادی هماتیت (Fe_2O_3)، گوتیت و لیمونیت هستند و در بسیاری موارد نیکل و کبالت به صورت جانشینی در شبکه اکسیدهای آهن یا جذب‌شده بر روی سطوح این فازها حضور دارند (Elias, 2002). نوع و میزان فازهای آهن‌دار، شدت هوازدهی و ترکیب سنگ مادر، از عوامل اصلی کنترل‌کننده تمرکز عناصر فلزی در این نوع نهشته‌ها محسوب می‌شوند (Gleeson et al., 2003). در این نوع کانسارها، افق پلاسمایی بالایی و پوسته دوریکراست آهن‌دار، دارای نیکل بسیار کمی هستند.

در بخش‌های پایین‌تر، با افزایش محتوای منیزیم و فراوانی سیلیکات‌هایی مانند سرپانتین و اسمکتیت‌ها، از سنگ معدن اکسیدی به ساپرولیت و سنگ دوریکراست پایین‌تر تغییر می‌کنند. وجود سیلیس ثانویه (مانند کلسدونی و کوآرتز) در بسیاری از ذخایر اکسیدی می‌تواند باعث کاهش عیار نیکل شود. در چنین مواردی، حذف سیلیس از طریق خرد کردن و غربالگری برای افزایش عیار و بهبود فرآوری ضروری است. ضخامت افق‌های سنگ معدن در این ذخایر متغیر است، (از ۲۰ تا ۲۵ متر در کوبا تا حدود ۸۰ متر در استرالیا).

عوامل مؤثر بر توزیع و تشکیل لاتریت نیکل دار

زمین شناسی سنگ بستر

لاتریت های نیکل دار تقریباً همیشه بر روی سنگ های اولترامافیک غنی از الومین و سرپانتین تشکیل می شوند که حاوی ۰/۲ تا ۰/۴ درصد نیکل هستند.

نوع سنگ اولترامافیک بر نوع کانسار تأثیر دارد

سرپانتینیت ها می توانند منجر به تشکیل اکسید، سیلیکات منیزیم آبدار یا سیلیکات رسی شوند، در حالی که دونیت ها بیشتر رسوبات اکسیدی با سیلیس فراوان ایجاد می کنند.

درجه سرپانتینی شدن پریدوتیت ها بر نوع و فراوانی سیلیکات های منیزیم آبدار تأثیر می گذارد. سنگ های سرپانتینی نشده بیشتر اکسیدی و سنگ های سرپانتینی شده ضعیف تا متوسط، دارای منطقه سیلیکاتی ضخیم تر هستند. در

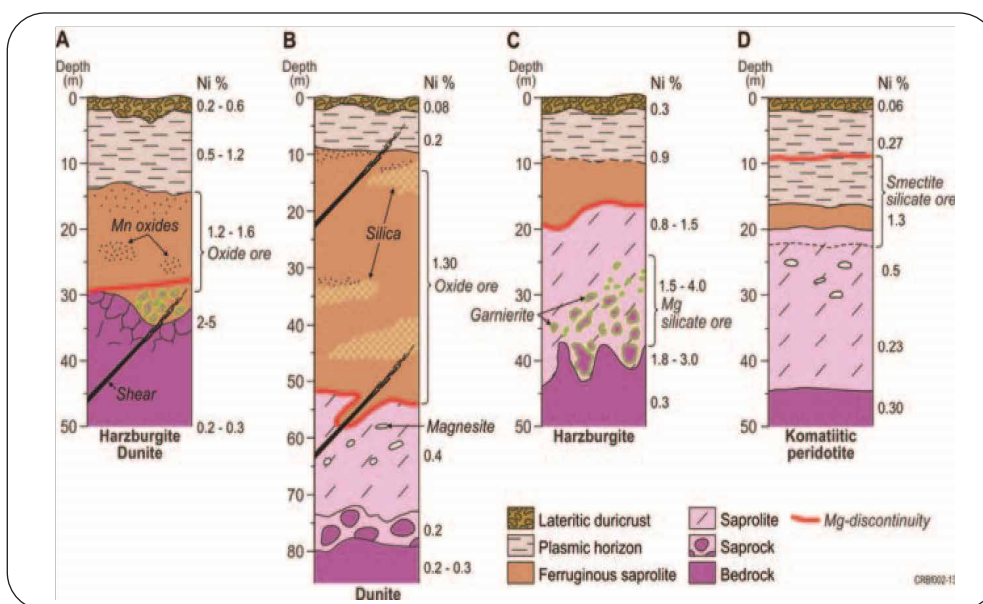
سنگ های بسیار سرپانتینی شده، لیزاردیت دگرسان شده غنی از نیکل، کانی اصلی سنگ معدن است.

دونیت ها تمایل به تشکیل رسوبات اکسیدی دارند، اگرچه تجمع سیلیس ممکن است در جایی که زهکشی با مانع مواجه است، بیشتر باشد.

یک پروفیل کامل از بالا به پایین شامل بخش های متوالی و متعددی است که در شکل های ۱ تا ۳ مثال هایی از آن دیده می شود (Brand et al., 1998; Gleeson et al., 2003).

شرایط تکتونیسم منطقه (شکستگی ها، گسل ها و مناطق برشی)

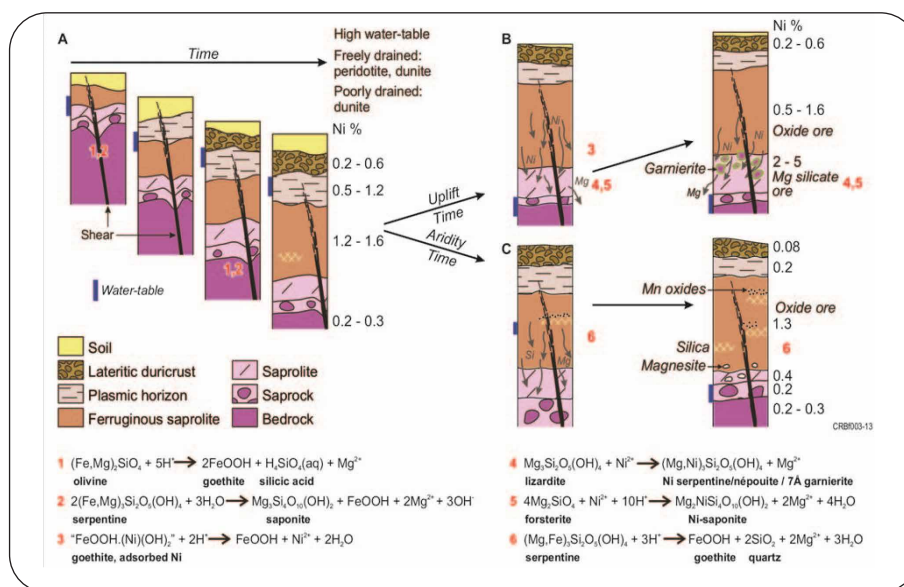
- حدود ۸۵ درصد از منابع لاتریت نیکل دار در زمین های برافزایشی کمر بند سیرکوم پاسیفیک، کارائیب و بالکان



شکل ۱- پروفیل های لاتریتی ایجاد شده بر روی سنگ های اولترامافیک سرپانتینی شده که کانی های اصلی لاتریتی نیکل دار را نشان می دهند. (الف) اکسید؛ (ب) اکسید تا حدی سیلیسی شده؛ (ج) سیلیکات منیزیم آبدار؛ (د) سیلیکات رسی



شکل ۲- سنگ معدن اکسید (OX) و سیلیکات منیزیم آبدار (Mg) (راست)، سنگ معدن اکسید روی سنگ بستر (وسط)، سنگ معدن سیلیکات رسی (چپ)



شکل ۳- تشکیل و تکامل رسوبات سیلیکات منیزیم اکسیدی و آبدار

آب و هوا

- بیشتر رسوبات لاتریتی نیکل دار در مناطق گرمسیری مرطوب دیده می شوند.

- بسیاری از رسوبات در آب و هوای جنگل های پرباران (بیش از ۱۸۰۰ میلی متر باران در سال) یا ساواناهای مرطوب فصلی (بارندگی تابستانی ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ میلی متر و فصل خشک زمستانی ۲ تا ۵ ماهه) قرار دارند.

- لاتریت های نیکل دار در نقاطی با بارندگی بیش از ۱۰۰۰ میلی متر در سال و میانگین دمای ماهانه بین ۲۲ تا ۳۱ درجه سانتی گراد (تابستان) و ۱۵ تا ۲۷ درجه سانتی گراد (زمستان) توسعه می یابند.

- ذخایر زیادی در آب و هوای گرم، نیمه خشک تا خشک و در مناطق مدیترانه ای تا معتدل مرطوب نیز وجود دارد. تصور می شود که این مناطق در زمان تشکیل رسوبات، آب و هوای گرم تر و مرطوب تر داشته اند.

- هیچ رابطه مشخصی بین آب و هوای فعلی و نوع سنگ معدن، عیار یا اندازه وجود ندارد. توزیع سیلیکات های منیزیم آبدار در مناطق گرمسیری و سیلیکات های رسی در مناطق نیمه خشک عمدتاً به دلیل شرایط تکتونیکی، ساختاری و ژئومورفولوژیکی است. از نگاه کلی و آماری تمرکز بیشتر نهشته های لاتریت نیکل دار در حواشی استوا می باشد (شکل ۴).

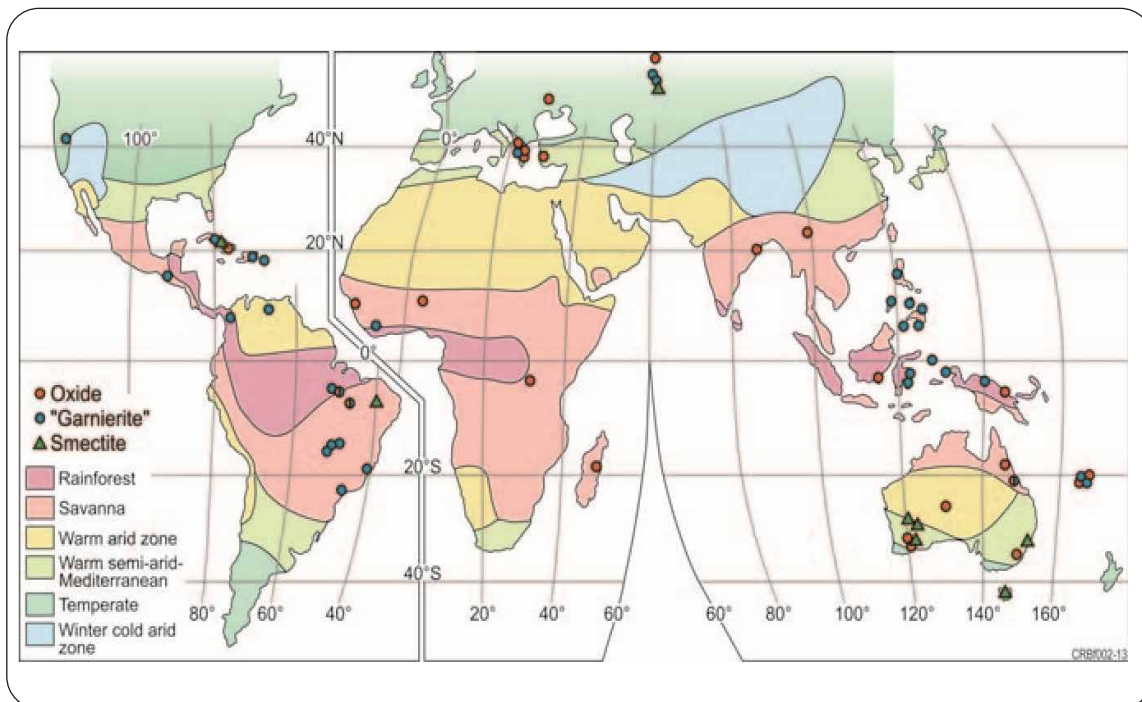
واقع شده اند. فعالیت تکتونیکی در این مناطق باعث تشکیل رسوبات سیلیکات منیزیم آبدار می شود، اما نرخ بالای فرسایش، ضخامت و حفظ آن ها را محدود می کند.

- رسوبات باقی مانده در سرپانتینیت ها در زمین های کراتونی یافت می شوند. پایداری و پستی و بلندی کم کراتون ها منجر به دوره های طولانی هوازدگی و تشکیل رسوبات اکسیدی و سیلیکات رسی می شود.

- ذخایر اورال ویژگی های هر دو محیط تکتونیکی (چین خورده و گسل دار در مقابل سکوهای پایدار) را دارند. این ساختارها می توانند بر ضخامت، عیار و نوع رسوب لاتریت نیکل دار تأثیر بگذارند.

- ساختارهای از پیش موجود می توانند با تشکیل موانع در برابر جریان آب یا با افزایش نفوذپذیری و تشدید هوازدگی عمیق تر، بر ویژگی های زهکشی تأثیر بگذارند.

- حرکت همزمان با هوازدگی در گسل ها و برش ها ممکن است کانون تمرکز نیکل باشد. در کالدونیای جدید، سیلیکات های منیزیم آبدار، رگه ها و ترک ها را پر می کنند و فعالیت تکتونیکی و کانی سازی سوپرژن همزمان بوده اند. غلظت بالای نیکل در ساپرولیت در برخی مناطق به برش هایی مرتبط است که هنگام فرونشست بلوک های تراسی ایجاد شده اند.



شکل ۴- توزیع جهانی لاتریت‌های نیکل دار (Charballo Pena et al., ۲۰۱۹)

سن هوازدگی

کافی و پستی و بلندی کم با نرخ هوازدگی بیشتر از فرسایش انجام می‌شود.

- حفظ رسوبات به دلیل پستی و بلندی کم و محافظت در برابر فرسایش توسط دهن شدن یا پوشیده شدن توسط پوسته‌های دوریکراست (لایه‌ای سخت و محکم از خاک) آهن دار یا سیلیسی صورت می‌گیرد.

- در زمین‌های مرتفع برافزایشی، بیشتر رسوبات در فلات‌های جدا شده رخ می‌دهند که بقایای پوشش رگولیتی در زیر پوسته دوریکراست حفظ شده‌اند.

- توپوگرافی بر میزان زهکشی و ماهیت و عیار لاتریت نیکل تأثیر می‌گذارد. پستی و بلندی کم و سطح آب‌های زیرزمینی بالا منجر به اختلال در زهکشی و کاهش میزان تمرکز نیکل می‌شود و رسوبات رسی اسمکتیت با درجه پایین را تشکیل می‌دهد. در مناطق با پستی و بلندی زیاد، زهکشی آزاد و سطح آب زیرزمینی عمیق، سرعت آبشویی را افزایش می‌دهد و غنی‌سازی مطلق از نیکل را در ساپرولیت با سیلیکات‌های منیزیم آبدار درجه بالا ایجاد می‌کند.

- تعیین دقیق زمان تشکیل رگولیت (به ویژه لاتریت‌های نیکل دار) دشوار است.

- قدیمی‌ترین رسوبات در کراتون‌ها قرار دارند که ممکن است در بیشتر دوران فانروزوئیک در معرض هوازدگی زیرسطحی قرار گرفته باشند.

- بیشتر تاریخ‌ها به فازهای اصلی هوازدگی گرمسیری مرطوب در کرتاسه میانی تا پسین، پالتوسن و اتوسن پسین-الیگوسن اشاره دارند.

- هوازدگی در جزایر تازه ظهور یافته کارائیب و غرب اقیانوس آرام از اتوسن-الیگوسن شروع می‌شود.

- سرعت تشکیل برخی رسوبات بسیار سریع بوده است (به عنوان مثال، افیولیت‌های سولاوسی).

ژئومورفولوژی

- لاتریت‌های نیکل در مناطقی با سنگ پوش عمیق و به شدت هوازده رخمون دارند.

- تشکیل لاتریت در زمین‌هایی با پایداری تکتونیکی

مراحل تشکیل و تکامل لاتریت‌های نیکل‌دار

۱- مرحله اولیه: جایگیری و سرپانتینی شدن سنگ‌های اولترامافیک

در این مرحله، سنگ‌های اولترامافیک در معرض فرآیند سرپانتینی شدن قرار می‌گیرند که منجر به تغییرات کانی‌شناسی در سنگ می‌شود.

۲- مرحله هوازدهی عمیق در آب و هوای گرمسیری مرطوب

سنگ‌های سرپانتینی شده در معرض آب و هوای گرمسیری مرطوب قرار گرفته و فرآیند هوازدهی عمیق آغاز می‌شود.

سطح آب‌های زیرزمینی بالا و نرخ فرسایش پایین، هوازدهی را تا عمق زیادی (۵۰ تا ۸۰ متر) تسهیل می‌کند. در این مرحله، نیکل آزاد شده از هیدرولیز الیوین توسط گوئیت میزبانی می‌شود و منیزیم و سیلیس شسته می‌شوند. در محیط‌های با زهکشی ضعیف، سیلیس ممکن است به طور کامل شسته نشود و به صورت کوارتز رسوب کند.

در پریدوتیت‌های سرپانتینی شده، مقداری منیزیم، سیلیسیم و نیکل در اسمکتیت‌ها باقی می‌ماند.

۳- غنی‌سازی نیکل: به دلیل از دست دادن جرم (حدود ۷۰ درصد)، نیکل در منطقه اکسید آهن‌دار متمرکز می‌شود (۰.۶ تا ۱ درصد نیکل).

- عیارهای بالاتر نیکل (بیش از ۱/۵ درصد) به دلیل غنی‌سازی مطلق توسط نیکل شسته شده از افق‌های سطحی ایجاد می‌شود.

- کبالت و مقداری نیکل در اکسیدهای منگنز در منطقه اکسید پایینی متمرکز می‌شوند.

- در محیط‌های با زهکشی آزاد، نیکل جذب شده به گوئیت شسته شده و در عمق پروفیل جابجا می‌شود و در ساپرولیت پایینی غنی‌سازی نیکل رخ می‌دهد.

۴- تغییرات تکتونیکی و اقلیمی بعدی، رسوبات لاتریتی نیکل‌دار ممکن است در معرض تغییرات تکتونیکی و اقلیمی قرار گیرند.

- در مناطقی با بالآمدگی تکتونیکی، نیکل از مناطق اکسیدی شسته شده و در سیلیکات‌های منیزیم آبدار در اعماق ساپرولیت تجمع می‌یابد.

- در آب و هوای نیمه خشک، نرخ هوازدهی کاهش یافته و منیزیت و سیلیسی شدن بیشتر رخ می‌دهد.

۵- حفظ یا تغییر رسوبات، در صورتی که تغییرات تکتونیکی و اقلیمی باعث فرسایش کمی شوند یا در اثر آب و هوای خشک‌تر، سرعت هوازدهی کم شود، رسوبات با تغییرات جزئی حفظ می‌شوند.

در مناطقی با بالآمدگی تکتونیکی و هوازدهی مداوم، غنی‌سازی نیکل در سیلیکات‌های منیزیم آبدار جدید که در رگولیت باقی‌مانده‌اند، جبران می‌شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به دلیل توسعه کاربرد وسایل و ماشین‌آلات الکترونیکی، اهمیت نهشته‌های لاتریت نیکل‌دار به طور روزافزونی در حال افزایش است. در کشورمان ایران نیز انجام مطالعات جامع اکتشافی بر روی لاتریت‌ها و سرپانتینیت‌ها به شدت ضروری به نظر می‌رسد. این نهشته‌ها در مناطق مختلف کشور گزارش شده‌اند. عمدتاً این رسوبات و سنگ‌ها در مجاورت یا روی سنگ‌های اولترامافیک، افیولیت‌ها، سرپانتینیت‌ها و دونیت‌ها استقرار دارند. علاوه بر زمین‌شناسی و تکتونیسم، اقلیم و مورفولوژی و سن نهشته‌ها نیز از عوامل مؤثر در تشکیل این نهشته‌ها هستند. برای ایجاد این ته نشست‌ها طی مراحل مشخصی لازم است تا به ترتیب انجام پذیرند و به همین دلیل وجود یا عیار متفاوتی از آنها را می‌توان در نقاط مختلف جهان مشاهده نمود.

منابع

- 1-Brand, N. W., Butt, C. R. M., & Elias, M. (1998). Nickel laterites: Classification and features. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(4), 81-88.

- 2- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel laterite ore deposits: Weathering, supergene enrichment and mining. *Economic Geology*, 108(4), 723–748.
- 3- Carballo Peña A., José Nicolás M., Orozco-Melgar G., Luis Rojas Purón A., 2019, Geological and Economic Criteria about the Existence of Scandium in the lateritic deposits of Moa, Cuba Criterios Geológicos y Económicos sobre la Existencia de Escandio en los yacimientos lateríticos de Moa, Cuba, *Mineria y Geología* 34(English version):371-383.
- 4- Dalvi, A. D., Bacon, W. G., & Osborne, R. C. (2004). The past and the Future of Nickel laterites. *Prospectors & Developers Association of Canada*, 30, 1–27.
- 5- Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits—Geological Overview, Resources and Exploitation. *Ore Geology Reviews*, 19(1–2), 1–51.
- 6- Gleeson, S. A., Butt, C. R. M., & Elias, M. (2003). Nickel laterites: A review. *SEG Newsletter*, 54, 9–16.
- 7- Golightly, J. P. (1981). Nickeliferous Laterite Deposits. In B. J. Skinner (Ed.), *Economic Geology: 75th Anniversary Volume* (pp. 710–735). Society of Economic Geologists.
- 8- International Energy Agency (IEA). (2021). *The role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris: International Energy Agency.
- 9- U. S. Geological Survey (USGS). (2023a). Nickel Statistics and information. National Minerals Information Center.
- 10- U. S. Geological Survey (USGS). (2023b). Cobalt Statistics and Information. National Minerals Information Center.