



نقش pH، ماده آلی و شدت هوازدگی بر روی ویژگی‌های ژئوشیمیایی و کانی‌شناختی لاتریت‌های نیکل‌دار در منطقه بوانات، استان فارس

محمدعلی رجب‌زاده* و معصومه هدایتی

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

دریافت مقاله: 1397/12/14، پذیرش: 1398/08/25

چکیده

لاتریت‌های نیکل‌دار منطقه چشمه رستمی شهرستان بوانات در امتداد حدها فصل رشته کوه‌های رسوبی زاگرس و کمربند دگرگونی - ماگمایی سنندج - سیرجان بر روی زمین رخنمون دارند. نهشته‌های لاتریتی نیکل‌دار بر جا در منطقه مورد بررسی به طور مستقیم بر روی سنگ مادر هارزبورژی خود قرار می‌گیرند و از پایین به بالا شامل افق‌های پروتولیت، ساپروولیت، انتقالی و اکسیدی می‌شوند. کانی‌شناسی این نهشته‌ها از کوارتز، الیوین، لیزاردیت در افق پروتولیت به طور پیوسته به سمت بخش‌های بالایی به مجموعه تالک، کلینوکلر، هماتیت، گوتیت در زون اکسیدی تغییر می‌کند. هم‌زمان مقادیر عناصر Fe، Cr، Co و Mn از افق‌های پایین به سمت افق‌های بالای لاتریت افزایش می‌یابند. داده‌های pH، ماده آلی و غلظت عناصر در افق‌های مختلف نهشته‌های لاتریتی نشان‌دهنده افزایش تدریجی مقدار نیکل در امتداد عمودی زون لاتریت به سمت افق اکسیدی است. این افزایش در غلظت نیکل از طریق جذب سطحی و جانشینی در اکسی-هیدروکسیدهای آهن صورت می‌گیرد. با توجه به شدت هوازدگی ضعیف تا متوسط که موجب عدم خروج میزان بالایی از Ni از ساختار کانی الیوین سنگ مادر شده است، نهشته‌های لاتریتی منطقه نتوانسته‌اند به عیار بالایی از این فلز برسند.

واژه‌های کلیدی: pH، ماده آلی، ژئوشیمی، کانی‌شناسی، نیکل، لاتریت، بوانات

مقدمه

ذخایر لاتریتی (Dalvi et al., 2004; Butt and Cluzel, 2013b; Van der Ent et al., 2013) اهمیت شناخت این ذخایر را هرچه بیشتر روشن می‌کند. در سرتاسر جهان خاک‌های لاتریتی نیکل‌دار اغلب بر روی سنگ‌های اولترامافیک نوع افیولیتی تشکیل شده‌اند. با توجه به اینکه این سنگ‌ها می‌توانند تا 0/4 درصد وزنی حاوی نیکل باشند (Golightly, 2010; Katzagiannakis et al., 2014)،

ویژگی‌های خاص عنصر نیکل موجب شده است که این فلز به جایگاه یک فلز استراتژیک در صنایع آلیاژی و الکترونیکی دست یابد. ذخایر معدنی نیکل در دو گروه ذخایر سولفیدی با میزان سنگ‌های اولترامافیک نظیر مجموعه‌های کوماتیتی و گروه ذخایر اکسیدی-سیلیکاتی با میزان خاک‌های لاتریتی قابل تقسیم هستند. تولید بیش از 40 درصد نیکل مصرفی دنیا از

پژوهش‌ها مثل خادمی و هاشمی‌نسب (Khademi and Hasheminassab 2010) با هدف پتانسیل‌یابی اولیه و به‌روش نمونه‌برداری چکشی انجام شده است و برخی نیز نظیر راستی و رجب‌زاده (Rasti and Rajabzadeh, 2017) پژوهش‌های اولیه زمین‌شناسی اقتصادی در مقیاس محلی را دربرمی‌گیرند. در این پژوهش، خاک‌های لاتریتی منطقه چشمه رستمی در شهرستان بوانات از نقطه نظر فرایند لاتریت‌زایی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی، شدت هوازدگی و عوامل کنترل‌کننده میزان نیکل در افق‌های مختلف نهشته‌های لاتریتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

زمین‌شناسی منطقه

خاک‌های لاتریتی نیکل‌دار در استان فارس در امتداد دو کمربند موازی به نام‌های کمربند شمالی (سوریان) و جنوبی (قادرآباد-کره‌ای) در حاشیه حدهای رشته کوه‌های رسوبی زاگرس و کمربند دگرگونی-ماگمایی سنندج-سیرجان قرار گرفته‌اند. این خاک‌ها به‌صورت توده‌های ناپیوسته در ارتباط با مجموعه‌های افیولیتی نیریز به سن کرتاسه (Rajabzadeh, 1998) ایجاد شده‌اند. منطقه چشمه رستمی در کمربند شمالی ناحیه‌ای کوهستانی است که در فاصله 270 کیلومتری شمال باختری شیراز قرار دارد. راه دسترسی به منطقه جاده آسفالت بوانات-مزایجان بوده و رخنمون‌های لاتریتی از طریق مسیرهای فرعی جاده خاکی چشمه کدو به کوه رستمی قابل دسترسی هستند. از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد بررسی در حاشیه پهنه زاگرس خردشده⁷ با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و در قسمت جنوب‌غرب دره بوانات واقع شده است. این منطقه به‌وسیله گسل جیان از زون سنندج-سیرجان و گسل جوکان از زاگرس مرتفع جدا می‌شود. قطعات سنگی افیولیت نیریز به‌صورت آمیزه‌های رنگین کوچک شامل چرت‌های رادیولاریتی و سنگ‌های اولترامافیک در نواحی جنوب غربی نقشه 1:100000 سوریان

فرایند لاتریتی شدن با تغلیظ فلزاتی چون Ni، Fe، Cr و Co و کاهش عناصری نظیر Si و Mg موجب تشکیل خاک‌های غنی از نیکل به‌عنوان محصولات هوازدگی در شرایط گرم و مرطوب می‌شود (Villanova-de-Benavent et al., 2014). خاک‌های لاتریتی نیکل‌دار بر اساس ویژگی‌های کانی‌شناسی خود به سه گروه اصلی اکسیدی، سیلیکاتی و رسی تقسیم می‌شوند (Berger et al., 2011). لاتریت‌های اکسیدی با فراوانی کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن نظیر همتایت و گویت شناخته می‌شوند و عیار نیکل در آنها 1 تا 1/6 درصد وزنی است (Butt et al., 2013). کانسارهای مائوبای¹ و پیناراس² در کوبا و کانسارهای گورو³ و پرنی⁴ در جنوب کالدونیای جدید مثال‌های مهمی از کانسارهای اکسیدی هستند. در ذخایر لاتریتی نوع سیلیکاتی کانی‌های منیزیم آب‌دار نوع فیوسیلیکاتی مانند کانی گارنیریت حامل اصلی عنصر نیکل هستند. عیار نیکل در این ذخایر بالا و از 1/8 تا 2/5 درصد وزنی در تغییر است (Golightly, 2010; Van der Ent et al., 2013a). کانسار بزرگ ماسیف کالدونیای جدید که بیشترین ذخایر ثانویه نیکل را در خود جای داده است، نمونه شاخص این نوع ذخایر است که حدود 25 درصد نیکل تولیدی جهان را به‌خود اختصاص داده است. لاتریت‌های نوع رسی به تازگی شناخته شده‌اند. کانی‌های غالب در این ذخایر شامل رس‌های گروه ساپونیت و اسمکتیت می‌شوند و عیار نیکل در آنها بین 1 تا 1/5 درصد است. این ذخایر در مناطق کراتونی با توپوگرافی پایین نظیر مناطقی از کشور استرالیا تشکیل شده‌اند. از این مناطق می‌توان بولونگ⁵ و مورین مورین⁶ را نام برد (Butt et al., 2013).

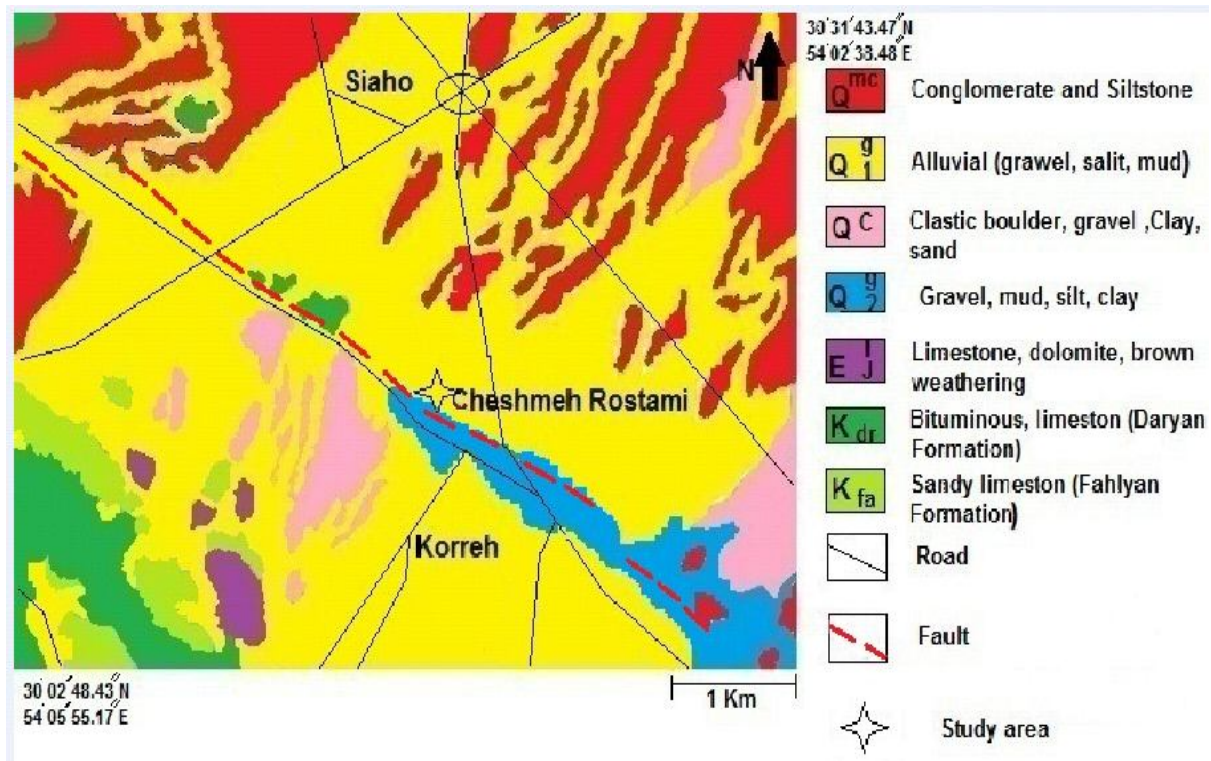
محدوده شهرستان بوانات دربرگیرنده خاک‌های لاتریتی برج‌جا و نابرجاست که به‌صورت رخنمون‌های ناپیوسته در ارتباط با سنگ‌های افیولیتی تشکیل شده‌اند. تاکنون پژوهش‌های جامعی بر روی خاک‌های این منطقه انجام نشده است. برخی از این

1. Moa Bay
2. Pinares
3. Goro
4. Prony

5. Bulong
6. Murrin Murrin
7. Crushed Zone

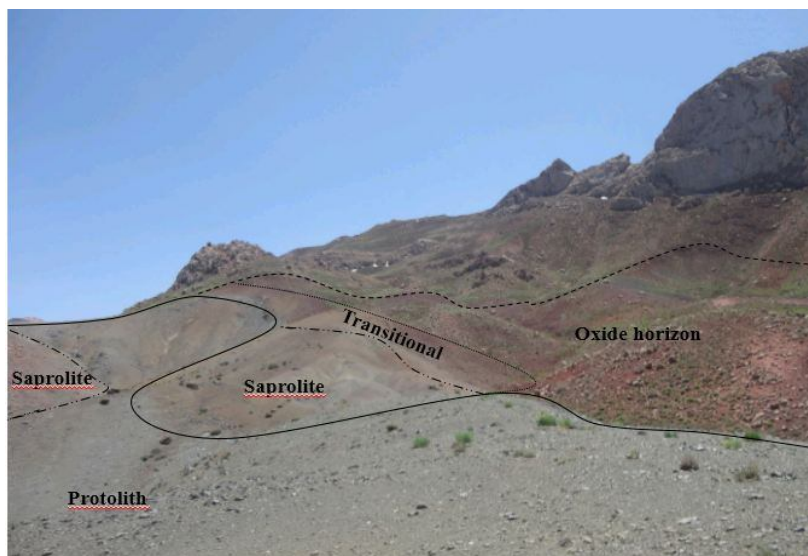
اولترامافیکی است. نوع رخساره این واحد شبیه فلیش است که طی کوهزایی لارامید نهشته شده است، 3- واحد لوتیتی ائوسن که دربرگیرنده پکستون و سنگ‌های رسی به رنگ قرمز است و گاه آثاری از توف و گدازه‌های آندزیتی را نیز در خود دارد، 4- واحد مارنی به سن اولیگومیوسن که شامل تناوب کم‌ویش یکنواخت از مارن، آهک‌های رسی، کنگلومراهای میان سازندی، کالکاریت است. این واحد را می‌توان به گونه‌ای در گروه مولاس‌های الیگومیوسن دانست و 5- واحد کنگلومرا و آهک نومولیت‌دار اولیگومیوسن که دارای دو بخش قابل جدایش است. بخش بالایی که دربرگیرنده آهک‌های بیومیکریتی کرم‌رنگ نومولیت‌دار با لایه‌بندی خوب است و بخش زیرین که از تناوبی از کنگلومرا، میکروکنگلومرا، آهک‌های ماسه‌ای، ماسه‌سنگ، مارن اویستردار و آهک‌های کرم‌رنگ تشکیل شده است (شکل 2).

ثبت شده‌اند (شکل 1). سنگ‌های اولترامافیک منطقه مورد بررسی اغلب از نوع هارزبورژیت و به مقدار کمتری دونیت هستند. تغییر شرایط آب و هوایی در کرتاسه بالایی و همچنین پس‌روی و خروج حوضه رسوبی از زیر آب، موجب شکل‌گیری خاک‌های لاتریتی شده است. فرسایش این خاک‌ها در عصر حاضر نیز به‌نوبه خود موجب تشکیل لاتریت‌های نابرجا در دشت‌های منطقه شده است. رخنمون‌های سنگی در منطقه شامل 5 واحد اصلی سنگ شناختی می‌شوند: 1- توده‌های اولترابازیک دگرسان‌شده که اغلب شامل هارزبورژیت‌های به‌شدت سرپانتینی شده می‌شوند، 2- واحد کنگلومرای-آهک دولومیتی به سن پائوسن-ائوسن زیرین که شامل تناوبی از مارن، شیل، کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آهک‌های چرت‌دار و آهک‌های مارنی می‌شود. کنگلومرا حجم اصلی این واحد را تشکیل می‌دهد و دربرگیرنده قطعات رادیولاریتی و سنگ‌های



شکل 1. موقعیت منطقه چشمه رستمی بوانات در نقشه زمین‌شناسی برگه 1:100000 سوریان، اقتباس از اویسی (Oveisi, 2001)

Fig. 1. Location of Cheshmeh Rostami area on the geological map of Souryan. 1:100000 (after Oveisi, 2001)



شکل 2. افق‌های مختلف نهشته‌های لاتریتی نیکل‌دار در منطقه چشمه رستمی شهرستان بوانات، دید به سمت شمال
Fig. 2. Different horizons of Ni-bearing laterites in the Cheshmeh Rostami area, Bavanat, view to the north

روش مطالعه

برداشت اطلاعات صحرائی و انجام نمونه‌برداری از افق‌های برجای لاتریت‌های نیکل‌دار در امتداد 3 مقطع عرضی انجام شد. پس از انجام بررسی‌های میکروسکوپی بر روی نمونه‌های لاتریتی با استفاده از روش‌های معمول نور انکساری و انعکاسی، تعداد 9 نمونه شاخص از یک مقطع کامل با استفاده از روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمایی جفت شده القایی¹ برای تعیین غلظت عناصر جزئی در شرکت فرآوری مواد معدنی کرج مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. همچنین با استفاده از روش نیمه کمی پراش پرتو ایکس² نمونه‌ها مورد بررسی دقیق کانی‌شناسی قرار گرفتند. تفسیر داده‌های XRD با استفاده از نرم‌افزار Xp powder انجام شد. اندازه‌گیری مؤلفه‌های pH و ماده آلی (OM) با استفاده از روش‌های معمول شیمیایی انجام شد. در این مورد مقادیر pH به وسیله دستگاه Metrohm و کاغذ pH اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده pH مواد محلول بین دانه‌ای در آب است. برای اندازه‌گیری مقدار ماده آلی خاک نیز از روش تیتراسیون استفاده شده است. در پایان با استفاده از نمودارهای

استاندارد ژئوشیمیایی نتایج به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

مؤلفه pH

pH مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده جذب سطحی فلزات و از جمله نیکل در دما، فشار و غلظت معینی از مواد اولیه است. داده‌های مربوط به pH در جدول 1 خلاصه شده‌اند. چنان‌که در این جدول نشان داده شده است، تغییرات این مؤلفه در امتداد مقطع عرضی نهشته‌های لاتریتی محدود بوده و بین 6/82 و 7/99 در تغییر است. کمترین میزان در جبهه هوازدگی (بخش بالایی افق پروتولیت) دیده می‌شود که بیشترین فعالیت نیکل و فلزات دیگر در این شرایط وجود دارد و بیشترین مقدار آن در بالاترین بخش افق اکسیدی مشاهده می‌شود که موجب جذب بیشترین فلزات بر روی سطوح کانی‌های جاذب می‌شود. محلول‌های اکسیدی با این ویژگی‌های pH موجب تبدیل کانی‌های سرپانتین به اکسید-هیدروکسیدهای آهن (مانند هماتیت و گوتیت) می‌شوند (Thorne et al., 2009). pH بالا جذب سطحی Ni را

1. Inductively coupled plasma mass spectrometry

2. X-ray diffraction

پروتولیت به سمت افق اکسیدی افزایش می‌یابد. مقدار زیادی از آن در عمق 40 سانتی‌متری از سطح زمین دیده می‌شود. کاهش ماده آلی در بالاترین سطح خاک احتمالاً مربوط به اکسایش و تخریب آن در سطح حدفاصل بین خاک و هوای آزاد است (جدول 1 و شکل 3).

راحت‌تر می‌کند و بنابراین جذب سطحی نقشه‌ی مهم در نگهداری Ni به‌وسیله ترکیبات اکسی هیدروکسیدهای آهن دارد (Giménez et al., 2007; Dimirkou et al., 2009).

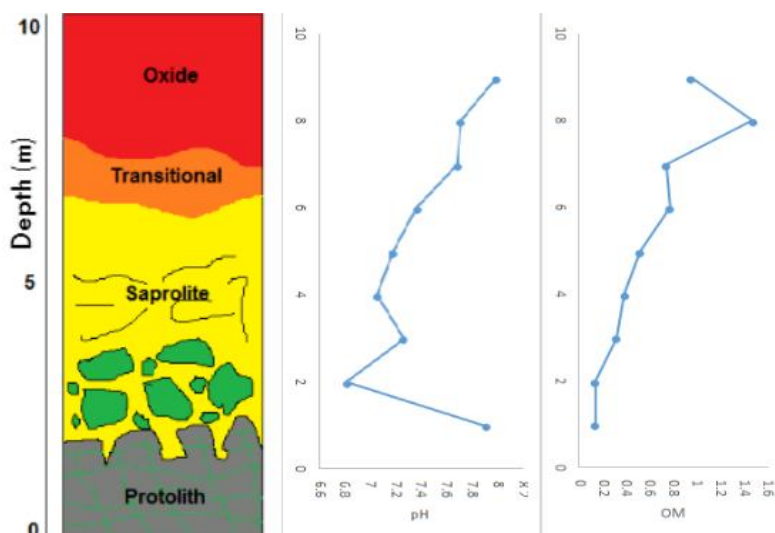
مؤلفه ماده آلی (OM)

داده‌های مربوط به اندازه‌گیری ماده آلی در نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهند که این ماده به‌طور فزاینده‌ای از افق

جدول 1. مقادیر pH و OM در افق‌های مختلف لاتریت منطقه چشمه رستمی منطقه بوانات. ماده آلی بر حسب درصد وزنی است.

Table 1. pH and OM values in different horizons from Cheshmeh Rostami area, Bavanat region. Organic matter is in weight percent.

Zone	Sample	pH	OM
Oxide	R2-9	7.99	0.951
	R2-8	7.71	1.475
	R2-7	7.69	0.741
Transitional	R2-6	7.37	0.773
	R2-5	7.18	0.521
Saprolite	R2-4	7.06	0.386
	R2-3	7.27	0.317
Protolith	R2-2	6.82	0.140
	R2-1	7.91	0.140



شکل 3. تغییرات pH و OM در افق‌های مختلف نهشته‌های لاتریتی منطقه چشمه رستمی بوانات

Fig. 3. Variations of pH and OM in different horizons of laterites in Cheshmeh Rostami, Bavanat

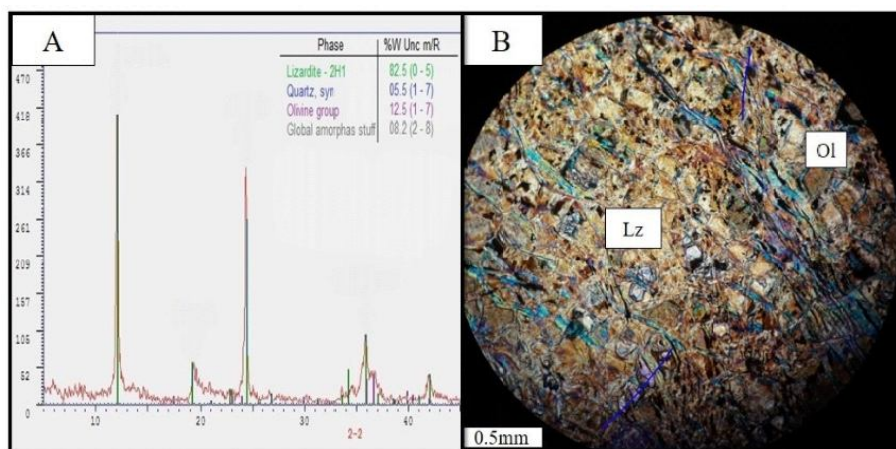
حفظ‌شدن بافت مش و لانه زنبوری سنگ سرپانتینیت است. ضخامت این بخش در مناطقی که فرسایش موجب رخنمون آن در سطح زمین شده، بین 5 تا 15 متر متغیر و رنگ آن سبز زیتونی تا لجنی است. آثار باقی‌مانده از کانی‌های الیون و ارتوپروکسن در قطعات منفصل سنگی بیانگر آن است که سنگ مادر اغلب اولترامافیکی نوع هارزبورژیت است. در مقاطع میکروسکوپی مقادیر بالایی از کانی‌های سرپانتینی نوع لیزاردیت به همراه باقی‌مانده‌های ارتوپروکسن و الیون مشاهده می‌شوند. همچنین مقادیر کمی از کانی‌های ثانویه مانند کوارتز، برداشت‌شده از بخش بالایی این افق افزایش می‌یابند. داده‌های به‌دست آمده از آنالیز XRD، یک نمونه از این افق که نشان‌دهنده فراوانی کانی‌های لیزاردیت، الیون، کوارتز و مواد آمورف است، در شکل 4 نشان‌داده شده است.

بررسی‌های صحرایی، میکروسکوپی و کانی‌شناسی

در این بخش داده‌های صحرایی، میکروسکوپی و آنالیز دستگاهی نمونه‌های زمین‌شناختی در امتداد مقاطع عرضی از نهشته‌های لاتریتی منطقه ارائه می‌شوند. مقاطع عرضی نهشته‌های لاتریتی برجا در منطقه مورد بررسی دارای کلیه افق‌های یک لاتریت معمولی هستند که به ترتیب از بخش زیرین به بخش بالایی شامل چهار افق پروتولیت، ساپرولیت، انتقالی و اکسیدی می‌شوند (شکل 2).

افق پروتولیت

این افق که در پایین‌ترین بخش لاتریت قرار دارد، معمولاً یک سنگ هارزبورژیتی به شدت هوازده است؛ هرچند در برخی موارد نادر، سنگ مادر می‌تواند یک دونیت باشد. هوازدگی در این افق موجب متلاشی شدن حداقل 30 درصد سنگ مادر شده است. با این حال، قطعات باقی‌مانده سنگ مادر نشان‌دهنده



شکل 4. A: نمودار آنالیز XRD نمونه و B: تصویر میکروسکوپی نمونه سنگ از افق پروتولیت در منطقه چشمه رستمی بوانات. علائم اختصاری کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ol: الیون، Lz: لیزاردیت).

Fig. 4. A: XRD spectrum of the analyzed sample, and B: microscopic image of the sample from protolith horizon in Cheshmeh Rostami, Bavanat. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ol: olivine, Lz: lizardite).

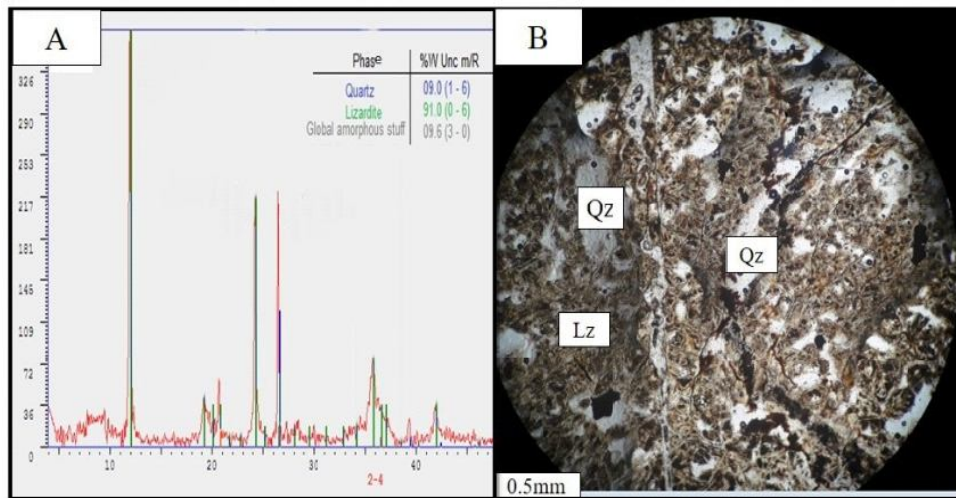
می‌توان آن را به دو بخش تقسیم کرد: ساپرولیت سخت در زیر که حدود 40 تا 50 درصد از قطعات به شدت هوازده سنگ مادر را داراست و بخش ساپرولیت نرم در بالا که کمتر از 30 درصد

افق ساپرولیت

این افق به‌طور پیوسته در بالای زون پروتولیت قرار دارد. مرز آن با افق زیرین تدریجی است و براساس نسبت سنگ به خاک

هیدروکسیدهای آهن و سیلیس دیده می‌شود. حضور سیلیس با داده‌های XRD تطبیق دارد. داده‌های کانی شناختی نشان‌دهنده حضور کانی‌های لیزاردیت به میزان 90/8 و کوارتز به میزان 9/2 درصد حجمی به‌عنوان فراوان‌ترین کانی‌های شاخص این افق هستند (شکل 5).

آن قطعات سنگی هستند. قطعات سنگی این افق بسیار ترد و شکننده بوده و با فشار دست به راحتی به تکه‌های ریز تبدیل می‌شوند. ضخامت این افق 2 تا 7 متر و رنگ آن سبز مایل به خاکستری است. در بررسی‌های میکروسکوپی فقط آثار نادری از کانی‌های سرپانتین در زمینه‌ای از خاک تیره حاوی اکسیدها و



شکل 5. A: نمودار آنالیز XRD نمونه و B: تصویر میکروسکوپی نمونه سنگ افق ساپرولیت در منطقه چشمه رستمی بوانات. علائم اختصاری کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Lz: لیزاردیت).

Fig. 5. A: XRD spectrum of the analyzed sample, and B: microscopic image of the sample from saprolite horizon in Cheshmeh Rostami, Bavanat. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qz: quartz, Lz: lizardite).

کانی‌های این افق هستند. همچنین کانی‌های ثانویه کلسیت (10/8 درصد) و هماتیت (7/4 درصد) نیز حضور دارند (شکل 6).

افق اکسیدی

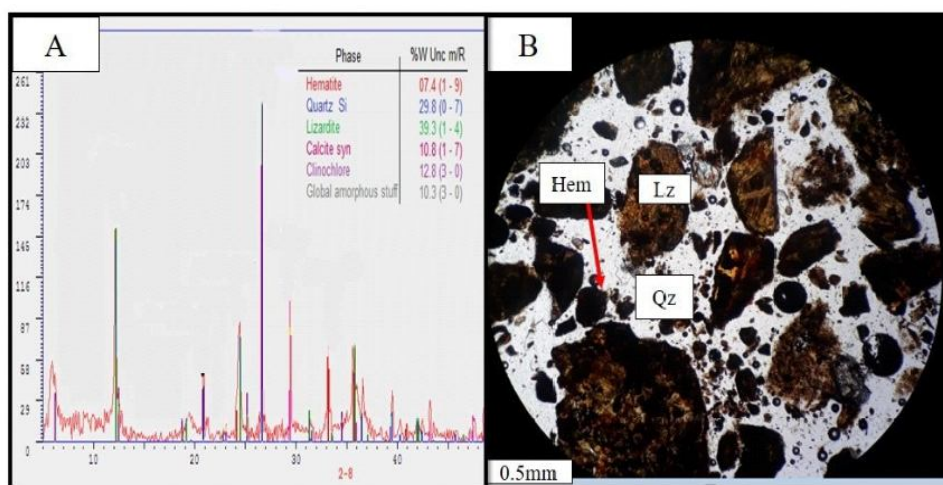
افق اکسیدی در بالاترین بخش نهشته‌های لاتریتی برجا مشاهده می‌شود. این بخش شامل خاک بسیار نرم به رنگ قرمز تیره تا روشن با ضخامتی تا 12 متر می‌شود که در اثر فرسایش در توپوگرافی‌های با شیب ملایم به داخل مناطق میان کوه و حتی دشت‌های مجاور گسترش یافته است. کانی‌های ثانویه اکسیدی - هیدروکسیدی آهن اصلی‌ترین کانی‌های این افق خاک بوده که به‌همراه آثاری فراوانی از سیلیس و مواد آمورف از اکسیدهای

افق انتقالی

بر روی افق ساپرولیتی، یک افق نرم و دانه‌ریز با ویژگی‌های دو زون ساپرولیت و اکسیدی قرار گرفته که تقریباً بدون قطعات باقی‌مانده از سنگ مادر هوازده است. ضخامت این بخش در مناطق با توپوگرافی ملایم به 5 متر می‌رسد و رنگ آن سبز روشن تا قرمز با ته‌رنگ زرد تا نارنجی است. نبود بافت و کانی مشخص در مقاطع میکروسکوپی نشان از هوازدگی و فرسایش شدید سنگ مادر در این افق و تبدیل کامل سنگ به خاک دارد. با این وجود در برخی از نمونه‌ها، وجود کانی‌های اکسیدی آهن (هماتیت و گوتیت) و رگچه‌های سیلیسی از ویژگی‌های این افق است. بر اساس داده‌های XRD، لیزاردیت و کوارتز با فراوانی 39/3 و 29/8 درصد حجمی، فراوان‌ترین

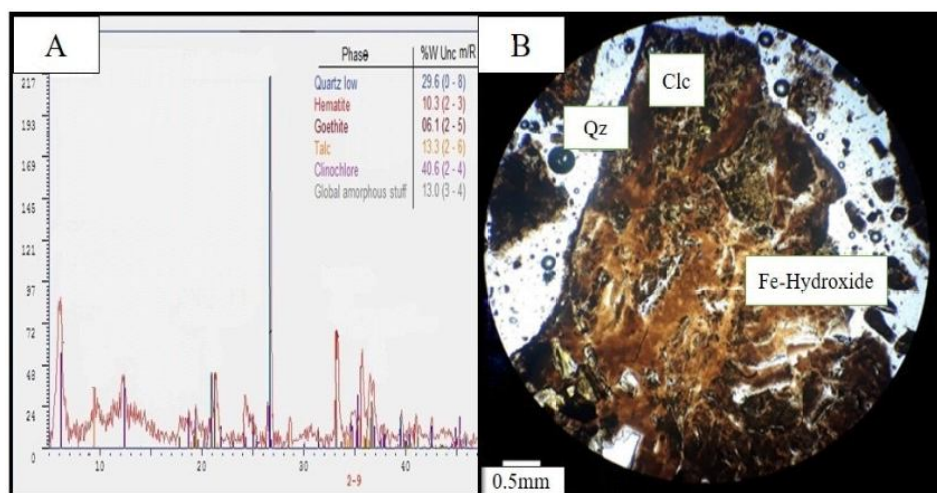
هیدروکسید آهن (گوتیت) در افق اکسیدی 16/4 درصد است (شکل 7).

آهن دیده می‌شوند. وجود تالک تا فراوانی 13/3 درصد و کلینوکلر با فراوانی 40/6 درصد در داده‌های XRD مربوط به این افق گزارش شده است. کانی‌های متبلور اکسید (هماتیت) و



شکل 6. A: نمودار آنالیز XRD نمونه و B: تصویر میکروسکوپی نمونه خاک افق انتقالی در منطقه چشمه رستمی بوانات. علائم اختصاری کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Lz: لیزاردیت، Hem: هماتیت).

Fig. 6. A: XRD spectrum of the analyzed sample, and B: microscopic image of the sample from transitional horizon in Cheshmeh Rostami, Bavanat. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qz: quartz, Lz: lizardite, Hem: hematite).



شکل 7. A: نمودار آنالیز XRD نمونه و B: تصویر میکروسکوپی نمونه خاک افق اکسیدی در منطقه چشمه رستمی بوانات. علائم اختصاری کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Clc: کلینوکلر، Fe-Hydroxide: هیدروکسید آهن).

Fig. 7. A: XRD spectrum of the analyzed sample and B: microscopic image of the sample from oxide horizon in Cheshmeh Rostami, Bavanat. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qz: quartz, Clc: clinocllore

ژئوشیمی عناصر

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های یک مقطع عرضی کامل از نهشته لاتریتی در جدول 2 آمده است. با توجه به اینکه در این پژوهش رفتار عناصر اصلی Ni, Fe, Al, Mg, Mn, Si و عناصر فرعی Co, Cr, V, Zn مورد بررسی قرار گرفته‌اند، جدول 2 با توجه به این نکته تهیه شده است.

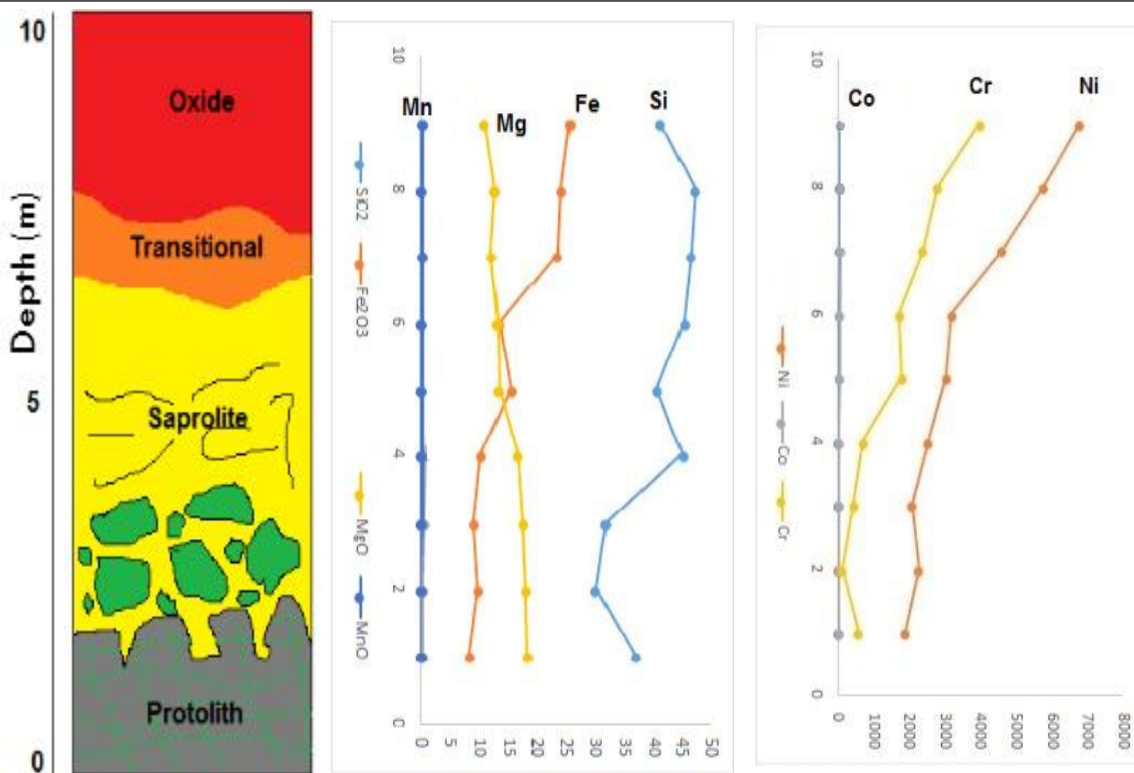
آهن: رفتار ژئوشیمیایی آهن در خاک‌های مورد بررسی شبیه به دیگر فلزات و به‌ویژه Ni و Co است؛ به طوری که رفتار این فلز در فرایند هوازدگی وابستگی زیادی به سامانه Eh-pH و حالت اکسایشی گونه‌های شیمیایی این عنصر دارد. در شرایط اکسایشی و قلیایی، آهن به صورت ترکیبات اکسیدی و هیدروکسیدی ته‌نشین می‌شود. توزیع آهن در نیم‌رخ‌های خاک

متغیر بوده و توسط چندین مؤلفه خاک کنترل می‌شود. به طور مثال، بافت خاک و شرایط اقلیمی (میزان بارندگی، دما) بر روی میزان فعالیت آهن تأثیر گذاشته است (Kabata-Pendias and Pendias, 1999) که اثرات آن در رنگ خاک نشان داده می‌شود. علی‌رغم تأثیر این متغیرها بر رفتار آهن، از غلظت و توزیع ترکیبات آهن در نیم‌رخ خاک برای توصیف فرایندها و رده‌بندی خاک استفاده زیادی شده است. واکنش‌های زیادی بر انحلال‌پذیری آهن در خاک نقش دارند؛ اما چنان که به نظر می‌آید، آب‌کافت و تشکیل گونه‌های کمپلکس شده از مهم‌ترین فرایندها هستند. عنصر آهن در مقطع عرضی لاتریت منطقه چشمه رستمی از افق پروتولیت به سمت بخش‌های بالایی به طور پیوسته افزایش می‌یابد و در افق اکسیدی به بیشترین مقدار خود 25/75 wt.% می‌رسد (شکل 8).

جدول 2. نتایج آنالیز شیمیایی خاک‌های لاتریتی منطقه چشمه رستمی با استفاده از روش ICP-MS

Table 2. Chemical analysis data of lateritic soils from Cheshmeh Rostami area by using ICP-MS method

Zone	Oxide			Transitional		Saprolite		Protolith	
Sample	R2-9	R2-8	R2-7	R2-6	R2-5	R2-4	R2-3	R2-2	R2-1
	Wt. %								
SiO ₂	37.17	30.20	31.98	45.25	40.67	45.25	46.60	47.30	41.17
Al ₂ O ₃	2.50	2.58	2.04	2.58	2.28	0.67	0.54	0.29	0.32
Fe ₂ O ₃	25.75	24.25	23.62	13.55	15.65	10.38	9.09	9.92	8.31
MnO	0.27	0.18	0.34	0.18	0.20	0.15	0.14	0.10	0.11
MgO	10.97	12.80	12.16	13.33	13.59	16.87	17.65	18.23	18.45
	ppm								
Ni	6793	5775	4608	3208	3044	2549	2091	2275	1898
Zn	156	151	135	94	84	77	69	69	82
Cr	3985	2807	2391	1734	1802	721	454	131	589
Co	152	140	95	64	61	53	50	49	40
V	77	70	68	47	51	25	20	dl	17



شکل 8. تغییرات عناصر اصلی و فرعی در طول پروفیل نهشته لاتریتی منطقه چشمه رستمی بوانات

Fig. 8. Variations of major and minor elements through vertical profile of the laterite in Cheshmeh Rostami, Bavanat

افق پروتولیت مقدار منیزیم در بیشینه مقدار خود 18/45 درصد وزنی است. فرایند آبشویی موجب می‌گردد با فاصله از سنگ مادر بطور پیوسته‌ای میزان منیزیم به سمت افق اکسیدی کاهش می‌یابد (10/97 wt.%) (شکل 8).

منگنز: عنصر منگنز در فرایندهای زمین‌شیمیایی همراهی نزدیکی با آهن دارد. بنابراین، چرخه منگنز در محیط‌های مختلف زمین‌شیمیایی از چرخه آهن پیروی می‌کند. طی فرایند هوازدگی در شرایط گرمسیری و نیمه گرمسیری، منگنز در ذخایر بازمانده متمرکز می‌شود؛ در حالی که این عنصر در شرایط اقلیمی مرطوب و سرد توسط محلول‌های اسیدی از رسوبات و خاک آب‌شویی می‌شود (Kabata-Pendias and Pendias, 1999). تحرک منگنز در خاک به شدت به pH و

سیلیسیم: کانی کوارتز معمولاً انحلال‌ناپذیر است؛ اما سیلیس می‌تواند توسط واکنش‌های آب‌کافت در گستره وسیعی از pH متحرک شود. در اغلب آب‌های زیرزمینی با گستره pH 5 تا 9، سیلیسیم از آلومینیم انحلال‌پذیرتر است و در نتیجه هوازدگی موجب آب‌شویی سیلیس و برجای ماندن مجموعه‌ای از ترکیبات اکسیدی و هیدروکسیدی نامتحرک آهن و آلومینیم می‌شود (Robb, 2005). با توجه به داده‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های مورد بررسی، میزان عنصر سیلیسیم در منطقه چشمه رستمی در افق پروتولیت از 41/17 درصد وزنی به میزان 37/17 درصد وزنی در افق اکسیدی کاهش می‌یابد (شکل 8).

منیزیم: تغییرات عنصر منیزیم در منطقه تحت تاثیر فاصله از سنگ مادر (هارزبورژیت) می‌باشد. به همین دلیل است که در

حامل این عنصر (اغلب کرومیت) در فرایند لائتریتی شدن در خاک تغلیظ شده‌اند. عنصر کروم مانند عناصر آهن، نیکل و منگنز از بخش‌های پایین پروفیل عمودی نهشته‌های لائتریتی به سمت قسمت‌های بالایی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد (شکل 8).

کبالت: در محیط‌های دما-فشار بالا، کبالت از لحاظ ژئوشیمی رفتاری شبیه به نیکل دارد. به علت شباهت شعاع یونی کبالت با منیزیم، بخش اعظم کبالت در ماگما حین تشکیل کانی‌های منیزیم اولیه به‌خصوص الیون از فاز سیال خارج می‌شود. در شرایط سطحی نظیر لائتریتی شدن، به دنبال تجزیه سرپانتین، دو عنصر نیکل و کبالت از هم جدا می‌شوند. در این زمان، نیکل وارد سیلیکات‌های منیزیم دار شده و کبالت در فازهای اکسیدی تمرکز می‌یابد (Mason and Moore, 2003). در منطقه مورد بررسی، بیشترین مقدار این عنصر 152 ppm در افق اکسیدی و کمترین غلظت آن 40 ppm مربوط به افق پروتولیت است. تغییرات غلظت به‌طور تدریجی از بخش‌های پایین به سمت قسمت‌های بالای پروفیل عمودی خاک دارای روندی افزایشی است (شکل 8).

تعیین شدت هوازدگی سنگ مادر

برای تعیین میزان هوازدگی سنگ مادر در منطقه چشمه رستمی از نمودار شدت هوازدگی (Selvaraj and Chen, 2006) و همچنین اندازه‌گیری اندیس‌های هوازدگی CIA^1 ، CIW^2 و RW^3 با استفاده از فرمول‌های زیر استفاده شده است.:

$$CIA = (Al_2O_3 / Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) * 100$$

$$CIW = (Al_2O_3 / Al_2O_3 + CaO + Na_2O) * 100$$

$$RW = SiO_2 / (Fe_2O_3 + Al_2O_3)$$

با توجه به محاسبات انجام‌شده، شدت هوازدگی در منطقه چشمه رستمی از نوع هوازدگی متوسط و ضعیف است (جدول 3 و شکل 9).

توانایی اکسیداسیون وابسته است. منگنز در لائتریت منطقه چشمه رستمی از افق پروتولیت از مقدار 0/11 wt.% به مقدار 0/27 wt.% در افق اکسیدی افزایش می‌یابد (شکل 8).

نیکل: این فلز دارای رفتار ژئوشیمیایی شبیه به آهن، کبالت و مس است. بر خلاف کبالت و آهن، نیکل معمولاً در محلول‌های آبگون به حالت اکسیداسیون +2 پایدار است. یون نیکل به‌طور اساسی، دارای شعاع و بار یونی مشابه منیزیم است، بنابراین می‌تواند در کانی‌های منیزیم‌دار به‌صورت پنهان‌شده حضور داشته باشد. عنصر نیکل در بین یون‌های دو ظرفیتی دارای انرژی بالایی در موقعیت‌های بلوری است و به‌همین دلیل در رقابت با یون‌های Fe و Mn برای اشغال مواضع بلوری به‌صورت قوی رقابت می‌کند (Mason and Moore, 2003). مقدار نیکل در افق پروتولیت منطقه مورد بررسی دارای کمینه غلظت (ppm 1898) و در افق اکسیدی بیشینه غلظت (ppm 6793) است. با این حال، روند افزایشی میزان نیکل در طول پروفیل عمودی دارای همبستگی بسیار خوبی با غلظت آهن بوده و بنابراین به نظر می‌رسد نیکل در افق اکسیدی وارد شبکه اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن شده و یا به شکل جذب سطحی بر روی این ترکیبات قرار می‌گیرد (شکل 8).

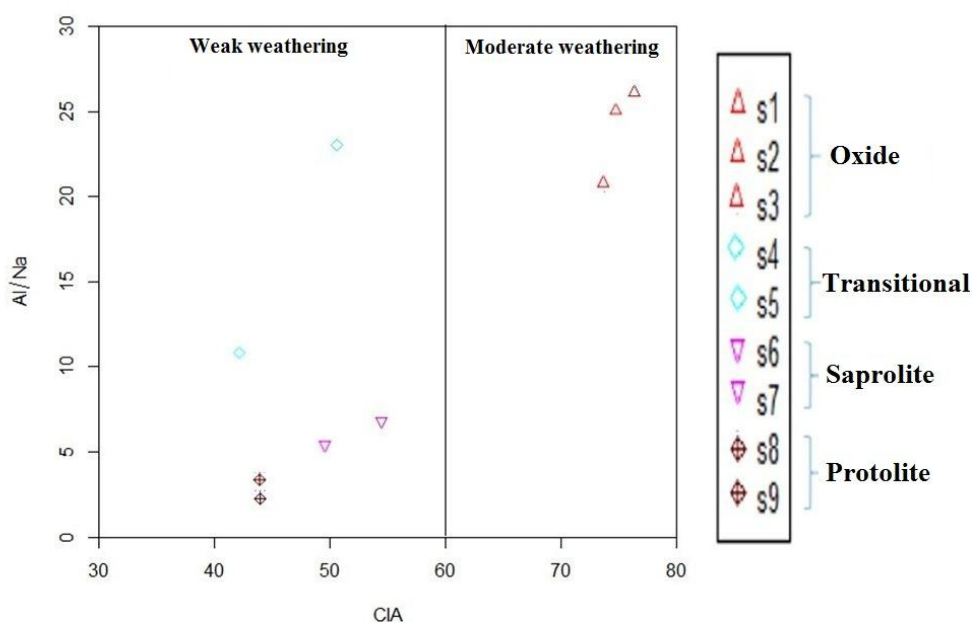
کروم: در سنگ‌های اولترامافیک، غلظت کروم ممکن است به بیش از 2000 ppm برسد. گونه‌های شیمیایی کروم در شرایط سطحی به Eh-pH محیط بستگی دارد (Kotaš and Stasicka, 2000). با این وجود، چون عنصر کروم اغلب در کانی کرومیت محبوس است و این کانی در شرایط سطحی در مقابل هوازدگی بسیار مقاوم است، در خاک به‌صورت نامتحرک باقی می‌ماند (Kabata-Pendias and Pendias, 1999). حضور غلظت‌های بالای کروم در افق‌های خاک‌های لائتریتی و به‌خصوص در افق اکسیدی نشان می‌دهد که کانی‌های

1. Chemical Index of Alteration
2. Chemical Index of Weathering
3. Rate Weathering

جدول 3. داده‌های محاسبه‌شده مربوط به شدت هوازدگی در منطقه چشمه رستمی بوانات

Table 3. Calculated data of weathering intensity in Cheshmeh Rostami area, Bavanat

Zone	CIA	OIW	RW	Al/Na
Oxide	75.32	77.42	1.31	25.33
	76.33	78.41	1.12	26.13
Transitional	73.72	73.72	1.24	20.66
	35.19	35.34	2.80	21.86
Saprolite	50.55	52.9	2.26	23.06
	54.47	58.77	4.09	6.80
Protolith	49.09	53.46	4.83	5.46
	43.93	50.87	4.63	2.93
	43.91	50.07	4.77	2.26



شکل 9. موقعیت نمونه‌های لاتریتی منطقه چشمه رستمی بوانات بر روی نمودار شدت هوازدگی (Selvaraj and Chen, 2006)

Fig. 9. Location of the laterite samples from Cheshmeh Rostami area, Bavanat on the weathering diagram (after Selvaraj and Chen, 2006).

سنگ‌های اولترامافیک نوع افیولیتی پوسته اقیانوس نئوتیس به سن کرتاسه بالایی تشکیل شده‌اند. هارزبورژیت‌های

نتیجه‌گیری

لاتریت‌های نیکل‌دار منطقه چشمه رستمی بوانات بر روی

نیکل و منگنز از یک سو و افزایش pH، OM در افق اکسیدی از سوی دیگر نشان می‌دهد که نیکل به صورت جذب سطحی و یا جانشینی در هماتیت و گوتیت حضور دارد. و مهم ترین عامل در تثبیت نیکل و غنی‌شدگی این فلز در خاک‌های لاتریتی است. همچنین داده‌های ژئوشیمیایی بر روی غلظت نیکل از یک سو و محاسبات مربوط به شدت هوازدگی سنگ مادر از سوی دیگر، نبود عیارهای بسیار بالای نیکل در خاک‌های لاتریتی منطقه چشمه رستمی شهرستان بوانات را توجیه می‌کند. غلبه داشتن ترکیبات اکسیدی آهن حامل نیکل، این خاک‌ها را در گروه لاتریت‌های نوع اکسیدی قرار می‌دهد. هرچند در برخی از مناطق عیار نیکل ممکن است به حد اقتصادی برسد و با فناوری‌های جدید نظیر آب‌شویی اسیدی قابل استخراج باشند؛ اما با توجه به عیار پایین نیکل در بخش‌های عمده‌ای از نهشته‌های لاتریتی مورد بررسی، به نظر می‌رسد، به علت تناژ کم نمی‌توان از واژه کانسار نیکل برای آنها استفاده کرد. این موضوع در مورد عناصر همراه با نیکل نیز صادق است؛ هرچند این پژوهش نوید آن را می‌دهد که می‌توان با بررسی مناطق دیگر در محدوده شهرستان بوانات امکان یافتن کانسارهای لاتریتی نیکل‌دار را فراهم آورد.

افیولیت‌های نیریز در اثر تغییر شرایط اقلیمی و جای‌گیری سنگ‌های اولترامافیک بر روی پوسته قاره‌ای تحت‌تأثیر هوازدگی ضعیف تا متوسط لاتریتی شده‌اند. از لایه کنگلومرایی -آهک دولومیتی به سن پالتوسن -ائوسن زیرین که بر روی نهشته‌های لاتریتی قرار گرفته‌اند، می‌توان به عنوان کلید اکتشافی در پی جویی این نهشته‌ها استفاده کرد. هوازدگی سنگ مادر هارزبورژیتهی موجب ایجاد لاتریت نیکل‌دار با 4 افق مختلف با ویژگی‌های صحرایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی متفاوت شده است. افق پروتولیت با رنگ سبز و قطعات خردشده سنگ مادر، ابتدا به افق ساپروولیت خاکستری رنگ با خردشدگی بیشتر و ایجاد خاک تبدیل می‌شود و سپس به افق انتقالی به رنگ نارنجی و در نهایت افق اکسیدی به صورت خاک قرمز رنگ تغییر می‌کند.

تبدیل کانی‌های فراوان سرپانتین (اغلب لیزاردیت) با مقادیر کمی از الیون در افق پروتولیت به سمت کانی‌های ثانویه مانند کلینوکلر، هماتیت، گوتیت در افق اکسیدی نشان‌دهنده پیش‌روی هوازدگی در افق‌های لاتریتی است که به تجزیه شدن بیشتر سنگ‌ها و تبدیل کانی‌های اولیه به کانی‌های ثانویه منجر می‌شود. حضور فراوان کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن، مانند هماتیت و گوتیت و همچنین همبستگی مثبت عناصر آهن،

References

- Berger, V.I., Singer, D.A., Bliss, J.D. and Moring, B.C., 2011. Ni- Co Laterite Deposits of the World-database and Grade and Tonnage Models. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 30 pp.
- Butt, C. and Cluzel, D., 2013. Nickel laterite ore deposits: weathered serpentinites. *Elements*, 9(2): 123-128.
- Dalvi, D., Bacon, W.G. and Osborne, R.C., 2004. Past and the future of nickel laterite projects. In: W. P. Imrie, D.M. Lane (Editors), *International Nickel Laterite Symposium TMS. 133 Annual Meeting and Exhibition, Charlotte, North Carolina*, pp. 23-50.
- Dimirkou, A., Ioannou, Z., Golia, E.E., Danalatos, N. and Mitsios, I.K., 2009. Sorption of cadmium and arsenic by goethite and clinoptilolite. *Communications in soil science and plant analysis*, 40(1-6): 259-272.
- Giménez, J., Martínez, M., de Pablo, J., Rovira, M. and Duro, L., 2007. Arsenic sorption onto natural hematite, magnetite, and goethite. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3): 575-580.
- Golightly, J.P., 2010. Progress in understanding the evolution of nickel laterites. In: R.J. Goldfarb, E.E. Marsh and T. Monecke

- (Editors), *The Challenge of Finding New Mineral Resources: Global Metallogeny, Innovative Exploration, and New Discoveries*. Special Publications of the Society of Economic Geologists, V. 15. Society of Economic Geologists, McLean, pp. 451–485.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 1999. *Biogeochemistry of trace elements*. Polish Scientific Publishing Company (PWN), Warsaw, Poland, 400 pp.
- Katzagiannakis, N., Alevizos, G., Stamboliadis, E., Stratakis, A. and Petrakis, E., 2014. Mineralogical investigation and washability treatment of the nickeliferous lateritic deposit of nome (Albania). *Geomaterials*, 4(3): 87–105.
- Khademi, A. and Hasheminassab, M., 2010. Study on mining potential of Ni-laterites from Ghader Abad, Fars province. 29th symposium of Earth Sciences, Tarbiat Moallem University Tehran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Kotaś, J. and Stasicka, Z., 2000. Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. *Environmental pollution*, 107(3): 263–283.
- Mason, B. and Moore, K.B. (translated by Moore, F. and Sharafi, A.A.), 2003. *Principle of Geochemistry*. Shiraz University Press, Shiraz, 566 pp.
- Oveisi, B., 2001. Geological map of Surian. Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Rajabzadeh, M.A., 1998. Mineralisation en chromite et elements du groupe du platine dans les ophiolites d'Assemion et de Neyriz centrure du Zagros, Iran. Ph.D. Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 358 pp.
- Rasti, S. and Rajabzadeh, M.A., 2017. Mineralogical and Geochemical Characteristics of Serpentinite-Derived Ni-Bearing Laterites from Fars Province, Iran: Implications for the Lateritization Process and Classification of Ni-Laterites. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 11(7): 541–546.
- Robb, J., 2005. *Hydrothermal ore forming processes*. Introduction to ore forming processes. Black well publishing Company, Carlton, Australia, 355 pp.
- Selvaraj, K. and Chen, C.T.A., 2006. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan, constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks. *Geology*, 114(1): 101–116.
- Thorne, R., Herrington, R. and Roberts, S., 2009. Composition and origin of the Çaldağ oxide nickel laterite, W. Turkey. *Mineralium Deposita*, 44(5): 565–581.
- Van der Ent, A., Baker, A.J., Reeves, R.D., Pollard, A.J. and Schat, H., 2013a. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction. *Plant and Soil*, 362(1–2):319–364.
- Van der Ent, A., Baker, A.J.M., van Balgooy, M.M.J. and Tjoa, A., 2013b. Ultramafic nickel laterites in Indonesia (Sulawesi, Halmahera): Mining, nickel hyperaccumulators and opportunities for phytomining. *Journal of Geochemical Exploration*, 362(1–2): 319–334.
- Villanova-de-Benavent, C., Proenza, J.A., Galí, S., García-Casco, A., Tauler, E., Lewis, J.F. and Longo, F., 2014. Garnierites and garnierites: Textures, mineralogy and geochemistry of garnierites in the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*, 58: 91–109.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rockforming minerals. *Journal of American Mineralogist*, 95(1): 185–187.



The role of pH, organic matter and weathering intensity on geochemical and mineralogical characteristics of Ni-bearing laterites in the Bavanat region, Fars province

Mohammad Ali Rajabzadeh* and Masoumeh Hedayati

Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Submitted: Mar. 05, 2019

Accepted: Nov. 16, 2019

Keywords: *pH, organic matter, geochemistry, mineralogy, nickel, laterite, Bavanat*

Introduction

The Ni-laterites were mostly derived from ultramafic rocks in ophiolite complexes during weathering in tropical climate. Lateritization processes result in leaching of some major elements (Si and Mg) from the source rocks and concentration of some others (Ni, Fe, Cr and Co) in the residual soils. The Ni-bearing laterites are divided into three major subgroups including oxides, silicates and clay types (Berger et al., 2011). Hematite and goethite are the main constituents of the oxides type, whereas garnierite is the main carrier for Ni in silicates type. In the clay laterite, saponite and smectite are the main Ni-carriers.

The Bavanat region contains Ni-bearing laterites as discontinuous outcrops which have formed on ophiolite ultramafic rocks in the northeast Fars province. These ultramafics are remnants of Neo-Tethys oceanic lithosphere which have been emplaced on continental margin along the Zagros Suture Zone in the Late Cretaceous era (Rajabzadeh, 1998). These laterites have recently attracted some geologists to work on them (e.g. Khademi and Hasheminassab, 2010; Rasti and Rajabzadeh, 2017). The aim of this study is to determine the effects of pH, organic matter (OM) and weathering intensity on the geochemical and mineralogical characteristics of Ni-laterites in the Chesmeh Rostami area, Bavanat region.

Materials and methods

Sampling was carried out along three geological

cross sections on undisturbed laterite profiles. The samples were studied using refracted and reflected light microscopic methods. Nine of the representative samples were analyzed using XRD and ICP-MS methods at the Iran Minerals Processing Research Center. PH and OM values of the samples from different soil horizons were determined using routine analytical methods.

Results

An undisturbed laterite profile consists of four major horizons from base to top including protolith, saprolite, transitional and oxide zones. pH values vary in a narrow range through the soil profiles. The minimum (6.82) and maximum (7.99) values were determined just in the weathering front at the top of the protolith and at the top of oxide horizon, respectively. In the same way, OM of the soils increases from protolith (0.140 wt.%) to the oxide zone (1.475 wt.%).

Protolith is generally a decomposed harzburgite that appears in dark green color. It mainly consists of lizardite with relicts of olivine and orthopyroxene and minor amounts of quartz, clinocllore and hematite. Protolith traditionally transforms to saprolite. The latter is easily discriminated by its softness in field and its light green to gray color. Lizardite and quartz are the major minerals which are accompanied with amorphous iron oxy-hydroxides and silica. Transitional zone is located as a narrow zone between saprolite below and oxide horizon above. No relicts of the source rock are preserved here. It

*Corresponding author Email: mrjrabzadeh@shirazu.ac.ir

appears as a soil of yellow to orange in color. XRD data from this horizon indicated that calcite and hematite are present as major phases along with minor lizardite and quartz. Oxide horizon is a very soft and porous dark to light red soil that has 12m thickness. This horizon mainly consists of hematite, goethite and clinocllore with variable amounts of amorphous silica and iron oxides.

Geochemically, Fe₂O₃ (8.31-25.75 wt.%), MnO (0.11-0.27 wt.%), Ni (1898-6793 ppm), Co (40-152 ppm) and Cr (131-3985 ppm) concentrations increase continuously from base to top of the laterites. There is good correlation between Ni and Fe₂O₃. On the contrary, silica (41.17 to 37.17 wt.%) and MgO (18.45 to 10.97 wt.%) contents decrease from base towards the top of laterites.

Chemical Index of Alteration (CIA), Chemical Index of Weathering (CIW) and Rate Weathering (RW) were used in determination of the weathering intensity during lateralization processes. The calculated data indicated that weathering intensity is medium to weak in the Bavanat region.

Discussion

Ni-bearing laterites in the Bavanat region were formed during weathering of the ophiolite ultramafic rocks at semi-tropical conditions. Four major horizons were formed through vertical profiles of the laterites. However, low concentration of Ni in the source rock by one side and medium to weak intensity of weathering by other side result in production of low-grade Ni-laterites. This is confirmed by pH values and remnants of chromite grains in the protolith horizon. However, weathering causes decomposition of the source rocks resulting in weak liberation of elements. Some elements such as Si and Mg have leached away, but high values of OM and pH at the top of the soils helped Fe fixation (Kabata- Pendias and Pendias, 1999; Thorne et al., 2009). Good correlation between Fe and Ni indicates that iron oxides and hydroxides play the role of scavenger for Ni. Mobility of Ni decreases in the presence of OM and high pH. It

thus adsorbs on the Fe compounds. The Ni-laterites in the Bavanat are classified in oxide type clan.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Research Council of Shiraz University for financial support of this work.

References

- Berger, V.I., Singer, D.A., Bliss, J.D. and Moring, B.C., 2011. Ni- Co Laterite Deposits of the World-database and Grade and Tonnage Models. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 30 pp.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 1999. Biogeochemistry of trace elements. Polish Scientific Publishing Company (PWN), Warsaw, Poland, 400 pp.
- Khademi, A. and Hasheminassab, M., 2010. Study on mining potential of Ni-laterites from Ghader Abad, Fars province. 29th symposium of Earth Sciences, Tarbiat Moallem University Tehran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Rajabzadeh, M.A., 1998. Mineralisation en chromite et elements du groupe du platine dans les ophiolites d'Assemion et de Neyriz centre du Zagros, Iran. Ph.D. Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 358 pp.
- Rasti, S. and Rajabzadeh, M.A., 2017. Mineralogical and Geochemical Characteristics of Serpentinite-Derived Ni-Bearing Laterites from Fars Province, Iran: Implications for the Lateritization Process and Classification of Ni-Laterites. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 11(7): 541–546.
- Thorne, R., Herrington, R. and Roberts, S., 2009. Composition and origin of the Çaldağ oxide nickel laterite, W. Turkey. *Mineralium Deposita*, 44(5): 565–581.