

نقش مواد آلی در چگونگی نهشت کانسار بوکسیتی دوپلان، استان چهارمحال بختیاری

سمیه سلامب اللهی^۱، بتول تقی پور^{۲*}، علیرضا زراسوندی^۳

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

۲- استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۸/۴

چکیده

کانسار بوکسیت دوپلان در زون زاگرس مرتفع بین دو سازند خانه‌کت و نیریز قرار گرفته است. این نهشته ۵ افق بوکسیتی دارد که به ترتیب از پایین به بالا شامل افق آهن‌دار، رسی، آلیتی، پیزولیتی و غنی از مواد آلی می‌باشند. مطالعات کانی‌شناسی شامل مطالعه میکروسکوپ نوری، الکترونی و طیف رامان نشان‌دهنده حضور دیاسپور در افق پیزولیتی، آلیتی و رسی و حضور پیریت، کائولینیت، ناکریت و بوهمیت در افق‌های غنی از مواد آلی و غنی از آهن می‌باشند. مطالعات ریز ریخت‌شناسی نشان می‌دهد که آهن شویی از فرایندهای مهم در تشکیل کانسار دوپلان می‌باشد. نتایج تجزیه مواد آلی (TOC) نشان می‌دهد که دو افق غنی از مواد آلی و غنی از آهن بالاترین میزان TOC و آهن را دارند. مهم‌ترین ویژگی این دو افق فراوانی پیریت است. حضور کانی پیریت با محتوای مواد آلی بالا قابل تفسیر است. تشکیل پیریت، حاصل کاهیدگی باکتریایی سولفات به H_2S در حضور مواد آلی است. توزیع مواد آلی در افق‌های بوکسیتی نشان می‌دهد که مواد آلی نقش مهمی در تحرک نسبی Fe و Al طی تشکیل بوکسیت دارند. به‌طوریکه دو شرایط محیطی متفاوت در تشکیل کانسار بوکسیتی دوپلان حاکم بوده است: (۱) محیطی که در آن قابلیت انحلال کانی‌های آلومینیوم‌دار بیشتر از آهن است (افق غنی از آهن، افق غنی از مواد آلی)، (۲) محیطی که در آن قابلیت انحلال کانی‌های Fe دار بیشتر از Al دار می‌باشد (افق بوکسیت پیزولیتی، آلیتی و رسی).

واژه‌های کلیدی: کانسار بوکسیتی دوپلان، ریز ریخت‌شناسی، زمین شیمی، مواد آلی.

مقدمه

بوکسیت‌ها به دو دسته بوکسیت‌های لاتریتی و بوکسیت‌های کارستی تقسیم‌بندی می‌شوند (باردوسی، ۱۹۸۲). انواع لاتریتی عمدتاً به صورت برجا و بر روی سنگ منشایی که غالباً آذرین است تکامل می‌یابند، ولی بوکسیت‌های کارستی منشأ پیچیده‌تری دارند و بر روی سنگ‌های کربناتی و در محیط کارستی تشکیل می‌شوند. فرایند زایش بوکسیت وابسته به آبشویی انتخابی عناصر در طول سیستم‌های زهکش می‌باشد. این دلیل باعث عدم یکنواختی در پروفیل بوکسیتی می‌باشد. پروفیل‌های بوکسیتی اغلب شامل توالی از لایه‌ها با بیشترین مواد هوازده در بالا و به دنبال آن لایه‌هایی از بوکسیت با ویژگی‌های متغیر می‌باشد. عموماً در زیر افق‌های بوکسیتی لایه‌های رسی یا سنگ مادر قرار می‌گیرد (گروکات، ۱۹۹۱؛ پاور، ۱۹۹۱). مواد آلی در خاک‌ها شامل مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات با وزن ملکولی بسیار بالا تا ترکیبات آلی سبک و ساده می‌باشد (پاور و لوح، ۲۰۱۰). مواد آلی از سطح به لایه‌های زیرین به دو طریق انتقال می‌یابند، (۱) غنی‌شدگی و تهی‌شدگی با آب‌های زهکشی، (۲) فرایندهای بیولوژیکی، شامل نفوذ ریشه و فعالیت میکروب‌های زیرزمینی. مواد آلی در اکثر کانسارهای بوکسیتی به سمت بالای پروفیل در حد فاصل بوکسیت و سنگ فرادپواره بیشترین مقدار را نشان می‌دهد. این مقادیر با افزایش عمق در طول پروفیل کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مواد آلی در محیط نهشت و کانی‌شناسی بوکسیت‌ها نقش مهم و کنترل‌کننده‌ای را دارند (هاو و همکاران، ۲۰۱۰؛ کالاتا و اکونومو-ایلیپوس، ۲۰۱۵؛ لاسکو و اکونومو-ایلیپوس، ۲۰۰۷). یکی از روش‌های شناسایی مواد آلی طیف بینی رامان می‌باشد. طیف‌بینی رامان برای تجزیه

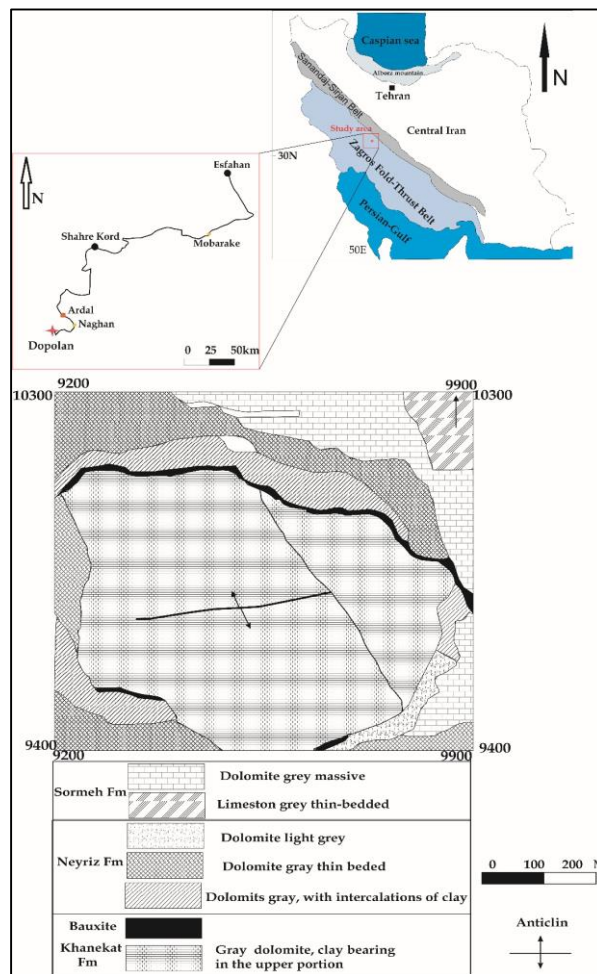
کیفی و کمی سامانه‌های معدنی، آلی و زیست-شناختی به کار گرفته شده است (گراسلی و بوکان، ۱۹۹۱). طیف‌های رامان دارای نواحی‌ای برای آشکارسازی گروه‌های عاملی مفیدند و همچنین دارای نواحی اثرانگشتی‌اند که شناسایی ترکیبات ویژه‌ای را ممکن می‌سازند. طیف‌های رامان در مقایسه با طیف‌های فروسرخ اطلاعات بیشتری در مورد انواع خاص ترکیبات آلی در اختیار می‌گذارند (نمانیچ و سولین، ۱۹۷۹). مواد کربن‌دار در مرتبه اول (1100 cm^{-1} تا 1800 cm^{-1} جابه‌جایی رامان) و دوم (2500 cm^{-1} تا 3100 cm^{-1} جابه‌جایی رامان) طیف رامان پیک‌های واضحی را نشان می‌دهند (تونیستا و کونیک، ۱۹۷۰). کانسار مورد مطالعه از لحاظ توزیع زمانی و مکانی جز ذخایر با سن تریاس زاگرس مرتفع می‌باشد. این کانسار بین دو سازند خانه‌کت و نیریز قرار دارد و به صورت عدسی‌هایی با ضخامت متوسط ۱۲ تا ۱۵ متر می‌باشد. ذخیره کانسار حدود ۱۵ میلیون تن با عیار متوسط ۴۸ درصد آلومینا است (پرخیده، ۱۳۷۵). براساس اطلاعات در دسترس، بیشتر مطالعات صورت گرفته بر روی ذخایر بوکسیت کشور، غالباً بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی کانسار بوکسیت بوده است و تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با زمین‌شیمی و نقش مواد آلی در طول فرایند بوکسیتی‌شدن انجام نشده است. هدف این مقاله بررسی ریز ریخت‌شناسی بافتی، زمین‌شیمی و تعیین ارتباط مواد آلی با محیط نهشت و کانی‌شناسی افق‌های بوکسیتی این کانسار می‌باشد.

محدوده مورد مطالعه

کانسار بوکسیت دوپلان، با طول $33^{\circ} 50'$ شمالی و عرض $54^{\circ} 31'$ شرقی در زون ساختاری زاگرس رانده قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه از نظر

ناهم‌سازی فرسایشی بر روی سازند دالان قرار گرفته‌اند. سازند خانه‌کت رخساره عمدتاً کربناتی دارد و شامل تناوبی از لایه‌های آهکی، آهک دولومیتی و دولومیت برشی با میان لایه‌هایی از مارن و رس است که لایه‌بندی آن از متوسط تا توده‌ای تغییر می‌کند. عدسی‌ها و گرهک‌های چرتی در بخش‌های میانی و بالایی این کربنات‌ها وجود دارد. سازند خانه‌کت توسط سازند نیریز به سن ژوراسیک پوشیده شده است. افق بوکسیتی در حد فاصل دو سازند خانه‌کت و نیریز قرار دارد (خدادادی، ۱۳۹۲). دیگر سازندهای موجود در این منطقه شامل سورمه، سروک و گورپی می‌باشد.

ساختاری یک تاقدیس خوابیده است. شیب لایه‌های این تاقدیس پلانژدار به طرف شمال‌غرب، با زاویه بین ۱۵ تا ۵۵ درجه می‌باشد. در یال جنوبی شیب به سمت جنوب‌غرب است. از لحاظ توپوگرافی معدن به شکل یک گودال قیف مانند بزرگ دیده می‌شود که در وسط این گودال رسوبات قدیمی‌تر طبقات پرمین رخمون دارند (احسان بخش، ۱۳۷۱). دولومیت صورتی رنگ سازند دالان با سن پرمین، قدیمی‌ترین لایه‌های رسوبی را در منطقه مورد مطالعه تشکیل می‌دهند و در بخش‌هایی از این سازند ساخت‌های برشی همراه با ترکیبات هماتیت و لیمونیت نیز ظاهر می‌شوند. دولومیت‌های متوسط لایه سازند خانه‌کت با سن تریاس با



شکل ۱: (A) موقعیت جغرافیائی و راه‌های دسترسی به کانسار دوپلان، (B) نقشه زمین‌شناسی کانسار بوکسیتی دوپلان (احسان بخش، ۱۳۷۱).

مواد و روش‌ها

(ICP-MS) به منظور تعیین عناصر اصلی (برحسب درصد اکسیدها) و عناصر فرعی (برحسب ppm) و عناصر گروه REE (تا حد تشخیص 0.1ppm) در آزمایشگاه Acme کانادا مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. به منظور تعیین محتوای مواد آلی (TOC) از هر افق در رخنمون‌های مختلف چند نمونه برداشت شد و پس از همگن‌سازی از هر افق نمونه-ای در آزمایشگاه شرکت زاگرس آشناس فارس مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. روش مورد استفاده در اندازه‌گیری ترکیبات کربن آلی روش تیتراسیون با فرو آمونیوم سولفات می‌باشد (والکی و بلک، ۱۹۳۷). در این روش از رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ جهت اندازه‌گیری درصد مواد آلی استفاده شده است.

اساس این مطالعه مبتنی بر داده‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمی و محتوای مواد آلی (TOC) است که از افق‌های مختلف بوکسیتی کانسار دوپلان انتخاب شده‌اند. در بررسی صحرایی، ویژگی‌های ماکروسکوپی نمونه‌ها و چگونگی ارتباط نهشته‌ها با سنگ بستر و پوشش، مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس ۳۰ نمونه از افق‌های مختلف بر مبنای تغییرات بافتی، کانی‌شناسی و رنگ ظاهری جهت انجام مطالعات پتروگرافی، کانی‌شناسی و تجزیه شیمیایی جمع‌آوری شد (جدول ۱). ترکیب کانی-شناسی ۶ نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در شرکت کانساران بینالود تهران مشخص شد. همچنین تعداد ۱۱ نمونه برای انجام آزمایشات طیف سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی

رابطه ۱)

$$\% \text{ Oxidizable Organic Carbon (w/w)} = ([V_{\text{blank}} - V_{\text{sample}}] * 0.3 * M) / Wt$$

M = مولاریته فرو آمونیوم سولفات

$$V_{\text{blank}} = \text{حجمی از محلول فرو آمونیوم سولفات مورد نیاز برای تیتراسیون}$$

$$V_{\text{sample}} = \text{حجمی از محلول فرو آمونیوم سولفات مورد نیاز برای تیتراسیون نمونه}$$

$$Wt = \text{وزن نمونه خشک}$$

رابطه ۲)

$$\% \text{ Total Organic Carbon (w/w)} = 1.334 * \% \text{ Oxidizable Organic Carbon}$$

رابطه ۳)

$$\% \text{ Organic Matter (w/w)} = 1.724 * \% \text{ Total Organic Carbon}$$

BX60 و دوربین CCD-CV-252 متصل به صفحه مانیتور و سیستم کامپیوتری بوده‌است. تفسیرهای بعدی با استفاده از نرم‌افزار CrystalSleuth مجهز به دیتابیس RRUFF انجام شد (داونز، ۲۰۰۶). هم-چنین داده‌های SEM از دو افق بوکسیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Leo 1455 VP) با دستگاه سیستم تجزیه‌ای INCA اکسفورد در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت.

طیف سنجی رامان برای تجزیه کیفی و کمی سامانه‌های معدنی، آلی و زیست‌شناختی به کار گرفته شده است، سنجش طیف نمایی رامان در دمای اتاق، آزمایشگاه HORIBA کشور اتریش با دستگاه (ISA JOBIN YVON) با Nd-YAG laser انجام گرفت. طیف‌نمای رامان نوع Horiba Yvon-Jobin با لیزر فرودی ۰.۵ mW و طول موج ۵۳۲ نانومتر برای انجام این مطالعه استفاده شد. این دستگاه متصل به یک میکروسکوپ الیمپوس

جدول ۱: نتایج آنالیز شیمیایی طیف سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) نمونه‌های کانسار بوکسیتی دوپلان. Do-1، Do1-1: بوکسیت غنی از آهن. Do-2، Do2-2: بوکسیت رسی. Do-3، Do3-3: بوکسیت آلیتی. Do-4، Do4-4: بوکسیت پیزولیتی. Do-5: بوکسیت غنی از مواد آلی. Kha1، Kha: سازند خانه‌کت.

Elements	Do-1	Do1-1	Do-2	Do2-2	Do-3	Do3-3	Do-4	Do4-4	Do-5	Kha	Kha1
SiO ₂	37.1	37.34	32.17	38.63	7.18	1.2	3.11	4.64	35.83	0.81	0.29
TiO ₂	1.5	4.17	2.384	2.158	3.831	2.977	2.767	2.767	2.104	0.105	0.021
Al ₂ O ₃	32.6	49.41	49.35	43.36	50.69	49.65	79.09	79.32	26.55	1.98	1.96
Fe ₂ O ₃	7.82	32.49	0.71	0.73	0.64	0.56	0.95	0.95	7.33	0.26	0.34
MnO	0	0.023	0	0	0	0	0.002	0.002	0.013	0.01	0.01
MgO	0.42	0.23	0.28	0.34	0.24	0.29	0.34	0.07	0.91	20.73	21.32
CaO	0.13	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.07	0.02	0.13	30.64	31.24
Na ₂ O	0.06	0.57	0.06	0.05	0.07	0.04	0.06	0.06	0.09	0.06	0.05
K ₂ O	0.85	0.32	0.36	0.34	1.21	0.34	0.29	0.26	2.83	0.13	0.15
P ₂ O ₅	0.09	0.022	0.07	0.111	0.066	0.102	0.04	0.04	0.048	0.006	0.005
Trace Elements											
V	472	764	472	721	485	765	442	435	163	50	51
Cr	281	157	255	243	329	15	303	303	188	17	7
Cu	14	61	63	62	143	64	9	11	5	1	3
Zn	12	5	9	14	4	3	5	5	21	3	1
Ga	30	65	68	67	117	67	113	120	41	2	3
Rb	10	12	5	6	12	3	2	113	50	0	0
Sr	97	22	67	76	63	220	46	68	55	66	71
Y	52.8	42	46.26	47	41.06	47.53	57	4202	56	6.97	10
Zr	342	122	512	513	612	754	602	967	961	27	8
Nb	38.34	30.22	54.43	54	60.35	59	42.81	72.03	56.34	2.64	1.45
Ba	24	24	21	41	12	28	8	23	28	3	0
Pb	102.67	27	22.83	28	25.5	16	8.35	15	8.66	2.13	2
Th	36.16	13	48.64	45.63	58	49.07	53	57.34	37.3	2.21	2.24
Ta	2.72	3.56	3.97	3.21	4.49	3.87	3.14	4.58	3.97	0.19	0.21
Hf	9.66	8.05	14.82	14.7	17.72	15.32	17.78	15.09	8.66	0.74	0.56
Ni	15	4	89	112	27	15	17	13	27	3	0
La	188.85	198	200.59	195	128.79	185	10.2	130	82.12	4.18	4.17
Ce	567.88	381	389.69	865	143.22	384	30.04	532	209.95	6.82	3
Pr	42.23	39.21	40.16	40.31	23.97	41.06	4	142.36	26.69	1.09	1.08
Nd	114.71	120	123.71	118	69.31	120	20.12	14.74	105.56	4.25	3
Sm	9.04	13.41	12.31	14.21	7.76	11.14	6.43	7.75	23.48	0.98	0.94
Eu	1.53	1.9	1.98	1.93	1.35	1.96	1.44	1.31	3.51	0.24	0.54
Gd	7.32	1.94	8.38	1.92	5.66	8.36	6.71	5.56	16.25	1.1	1.12
Tb	1.73	1.41	1.58	1.46	1.2	1.57	1.58	1.23	2.3	0.2	0.23
Dy	13.95	11.91	10.95	11.2	8.36	1.57	10.85	8.31	13.03	1.22	1.23
Ho	3.21	2.21	2.24	2.23	1.81	2.31	2.21	1.8	2.64	0.25	0.26
Er	9.88	6.71	6.74	6.73	5.48	6.69	5.84	5.41	7.34	0.67	0.62
Tm	1.64	1.12	1.11	1.11	0.92	1.12	0.84	0.98	1.51	0.09	0.08
Yb	11.04	7.34	7.36	7.62	6.34	7.46	5.1	6.45	7.41	0.61	0.64
Lu	1.71	1.12	1.15	1.14	1.02	1.16	0.78	1.03	1.17	0.09	0.08

مطالعه را به‌وجود آورده است. رخداد بوکسیتی منطقه از طبقات مختلفی تشکیل شده است. این طبقات از پایین به بالا شامل بوکسیت غنی از آهن، بوکسیت رسی، بوکسیت آلیتی، بوکسیت پیزولیتی، بوکسیت غنی از مواد آلی هستند (شکل ۲).

براساس نتایج کانی‌شناسی کیفی، مشخص شد که کانسار بوکسیت دوپلان از نوع دیاسپوری همراه پیریت است که کائولینیت، ناکریت و کوارتز به-عنوان کانی‌های اصلی آن را همراهی می‌کنند.

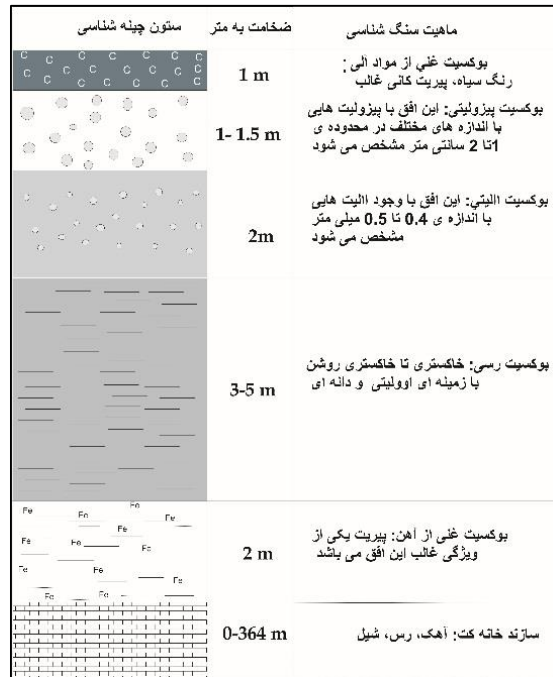
پتروگرافی و کانی‌شناسی افق‌های بوکسیتی: کانسار بوکسیتی دوپلان بین دو سازند خانه‌کت و نیریز قرار دارد. در سنگ بستر بوکسیت دوپلان آثار فرسایش شدید به صورت حفراتی عمیق که در اثر محلول‌های سطحی و حل‌کننده دولومیت ایجاد شده، به خوبی مشخص می‌باشد. انحلال سنگ دولومیتی خانه‌کت در شرایط آب و هوایی مناسب، افقی از باقی‌مانده‌های رسی را در گودال‌های کارستی بر جای گذاشته و توالی بوکسیتی مورد

کشیده و دمبلی دارند (شکل ۳e) که نشان دهنده تغییر شکل در طی فعالیت‌های تکتونیکی و فشردگی می‌باشند (لیو، ۲۰۱۰). فرایند آهن شویی یکی از فرایندهای دیرزاد مشاهده شده در افق بوکسیت پیزولیتی می‌باشد که در اثر آن عنصر آهن آب‌شویی و در درجات مختلف از سنگ خارج می‌شود. شدت آهن‌شویی در بخش‌های مختلف این لایه متغیر است به گونه‌ای که در بعضی از بخش‌ها پیزولیت‌ها آهن‌شویی اندکی را تحمل کرده‌اند (شکل ۳d). باسکار و همکاران (۲۰۰۳) بر این باورند که فرایندهای آهن‌شویی می‌تواند مرتبط با فعالیت میکرو ارگانسیم‌ها در این لایه‌ها باشد به گونه‌ای که این میکرو ارگانسیم‌ها الکترون‌های لازم برای تامین انرژی و متابولیسم خود را از اکسیدهای آهن موجود در لایه‌های بوکسیتی دریافت می‌کنند و باعث تبدیل Fe^{3+} نامحلول به Fe^{2+} محلول و خروج آهن از این لایه‌ها می‌شوند. از ویژگی‌های بارز افق بوکسیت غنی از مواد آلی که باعث تمایز این بوکسیت از دیگر افق‌ها شده است وجود پیریت و مواد آلی در این افق می‌باشد (شکل ۳f).

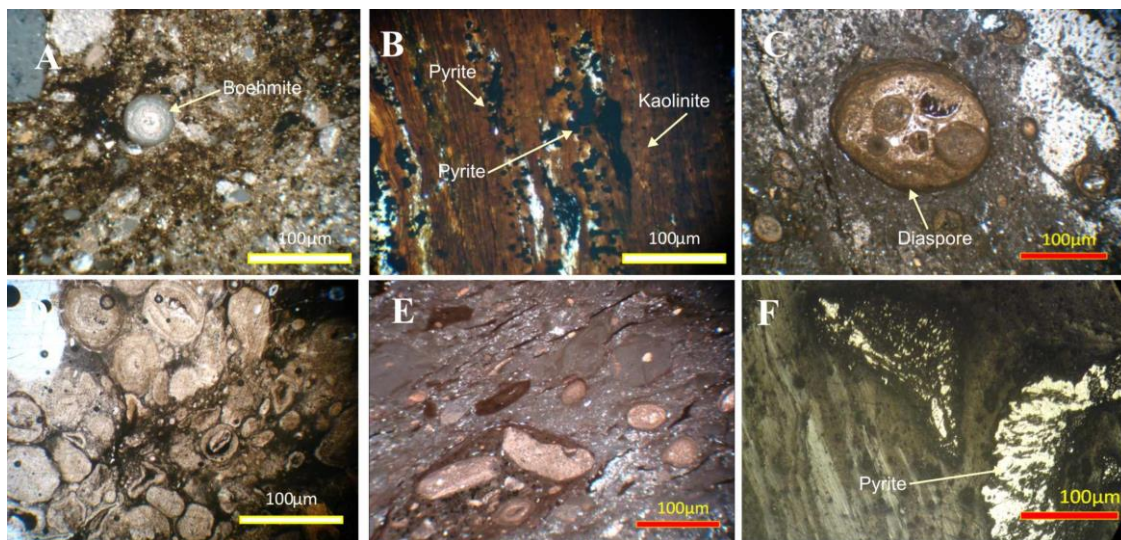
روتیل و آناتاز، بوهمیت و مسکویت مهم‌ترین کانی‌های فرعی تشکیل‌دهنده لایه‌های مختلف این کانسار می‌باشد (جدول ۲). پیزولیت‌های ساده در زمینه پان‌ایدومورفیک بوکسیت غنی از آهن دیده می‌شود که هسته واضح پیزولیت‌ها، بیانگر این است که پوسته‌های این پیزولیت‌ها در اطراف قطعاتی که از قبل (پیزولیت‌های قبلی) وجود داشته رشد کرده‌اند (شکل ۳a). این نوع پیزولیت‌ها نشانگر برجا بودن لایه بوکسیتی می‌باشند (دل‌ویگنه، ۱۹۹۸) و در سایر افق‌های بوکسیتی نیز وجود دارند. هم‌چنین پیریت به دو حالت شکل‌دار و بی‌شکل در کنار پیزولیت‌ها دیده می‌شود (شکل ۳b). زمینه این نوع بوکسیت کائولینیت می‌باشد (شکل ۳b). حضور کمپلکسی از قطعات گرد شده در بوکسیت رسی که کوچک‌ترین قطر آن‌ها ۰/۲ میکرون می‌باشد، بیانگر این است که قطعات قبل از نهشت در ماتریکس نرم، دست‌خوش حمل‌ونقل شده‌اند و معرف پیزولیت‌های نابرجازاد یا پیزولیت‌های هسته آلیتی می‌باشند (شکل ۳c). هسته این پیزولیت‌ها با کائولینیت پر شده است. بعضی از پیزولیت‌ها حالت

جدول ۲: کانی‌های اصلی و فرعی موجود در افق‌های مختلف بوکسیت دوپلان بر اساس نتایج مطالعات پراش پرتو X (XRD).

کد نمونه	لایه‌های بوکسیتی	فازهای اصلی	فازهای فرعی
Do-5	بوکسیت غنی از مواد آلی	پیریت، کائولینیت، ناکریت	آناتاز، بوهمیت، روتیل
Do-4	بوکسیت پیزولیتی	دیاسپور	آناتاز، ناکریت، مسکویت، روتیل
Do-3	بوکسیت آلیتی	دیاسپور، ناکریت	آناتاز، مسکویت (۱۰٪)، روتیل
Do-2	بوکسیت رسی	کائولینیت، کوارتز، دیاسپور	بوهمیت
Do-1	بوکسیت غنی از آهن	پیریت، کائولینیت، ناکریت	آناتاز، بوهمیت، مسکویت (۱۰٪)، روتیل



شکل ۲: ستون چینه شناسی و توالی افق بوکسیتی در کانسار بوکسیت دوپلان.



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک کانسار بوکسیتی دوپلان: (A) تصویر میکروسکوپی از پیزولیتی ساده با قطر ۵۰ میکرومتر، با پوسته های کاملا مشخص در بوکسیت غنی از آهن، (B) نمایی از تصویر میکروسکوپی دانه های پیریت خود شکل و بی شکل در بوکسیت غنی از آهن، (C) پیزولیت آلورن یا پیزولیت های هسته آلیتی در بوکسیت رسی، (D) فرایند آهن شویی در پیزولیت ها بوکسیت رسی، (E) کشیدگی و تغییر شکل پیزولیت ها در نزدیکی محل گسلش در افق بوکسیت رسی، (F) دانه های پیریت در مقطع صیقلی بوکسیت غنی از مواد آلی کاملا مشخص است.

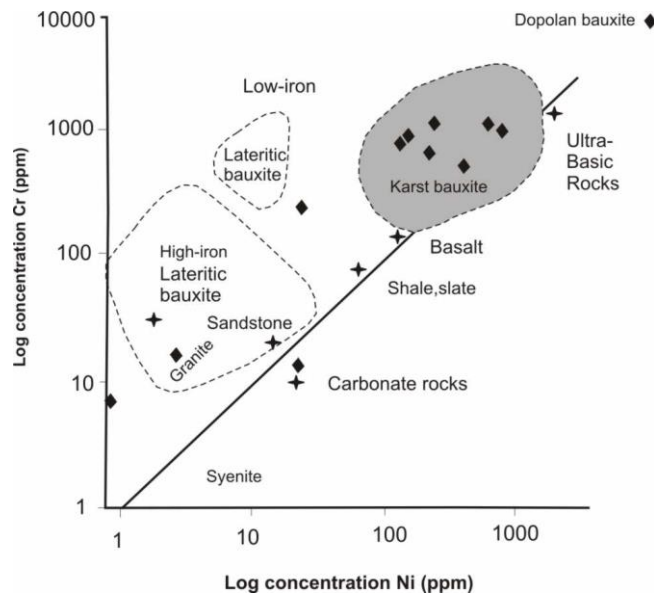
بحث و نتایج

استفاده گردید. با استفاده از نمودار دو متغیره عناصر کرم و نیکل (اسچرول و ساور، ۱۹۶۸) مشخص شد که کانسار بوکسیتی مورد مطالعه از

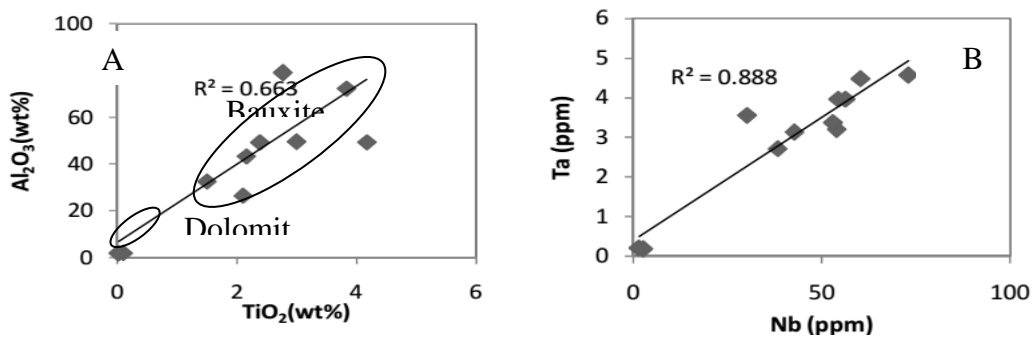
تعیین سنگ منشا: در این مطالعه برای تعیین سنگ منشاء کانسار از نمودارهای مختلف زمین شیمیایی

به‌عنوان سنگ مادر بوکسیت می‌باشد (شکل ۵). هم‌چنین از بررسی نسبت Ta به Nb در این کانسار، به خوبی مشاهده می‌شود که این نسبت در سنگ کربناتی (دولومیت خانه‌کت) نزدیک نمونه‌های بوکسیتی است و اغلب آن‌ها نزدیک خط هوازدهی قرار می‌گیرند (شکل ۵). به طور معمول کانسارهای بوکسیتی کارستی در نزدیکی این خط قرار می‌گیرند (لیو و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین این نمودار نشان می‌دهد که یک ارتباط ژنتیکی بین سنگ کربناتی و کانسار بوکسیت دوپلان وجود دارد.

نوع کارستی بوده و سنگ منشاء آن کربناتی است (شکل ۴). هم‌چنین نمودارهای نسبت عناصر اصلی TiO_2, Al_2O_3 و عناصر کمیاب Ta/Nb نشان‌دهنده منشا کربناتی این کانسار است (لیو و همکاران، ۲۰۱۰). پراکندگی نمونه‌ها در نمودار دو متغیره TiO_2 در مقابل Al_2O_3 در دو منطقه جدا از هم تجمع می‌یابد. در این نمودار ضریب همبستگی TiO_2 با Al_2O_3 بیش از ۰/۶۶ درصد است. پراکندگی نمونه‌ها در دو ناحیه جدا ولی در طول خط همبستگی نشان می‌دهد که دولومیت خانه‌کت



شکل ۴: نمودار دو متغیره کروم - نیکل که مبین نوع کانسار بوکسیت دوپلان و منشاء آن است (اسچرول و ساور، ۱۹۶۸).



شکل ۵: (A) نمودار دو متغیره $Al_2O_3-TiO_2$ با ضریب همبستگی ۰/۶۶ درصد که ارتباط نمونه‌ها با سنگ منشاء کربناتی را نشان می‌دهد، (B) نمودار دو متغیره Ta به Nb در کانسار بوکسیتی دوپلان (لیو و همکاران، ۲۰۱۰).

از سنگ مادر به افق‌های بالایی بوکسیت افزایش می‌یابد (شکل ۷). دو افق بوکسیت غنی از مواد آلی (Do-5) و بوکسیت غنی از آهن (Do-1) بالاترین مقدار TOC را نشان می‌دهد. هم‌چنین از مقایسه میزان محتوی مواد آلی در برابر میزان آهن در افق‌های بوکسیتی مشخص می‌شود دو افق غنی از مواد آلی و آهن بالاترین میزان آهن را نشان می‌دهد که می‌تواند در ارتباط با کانی‌شناسی شاخص این دو افق و وجود پیریت باشد. هم‌چنین وجود محتوای بالای مواد آلی در این دو افق ارتباط مثبتی با میزان Fe_2O_3 نشان می‌دهد (شکل ۸).

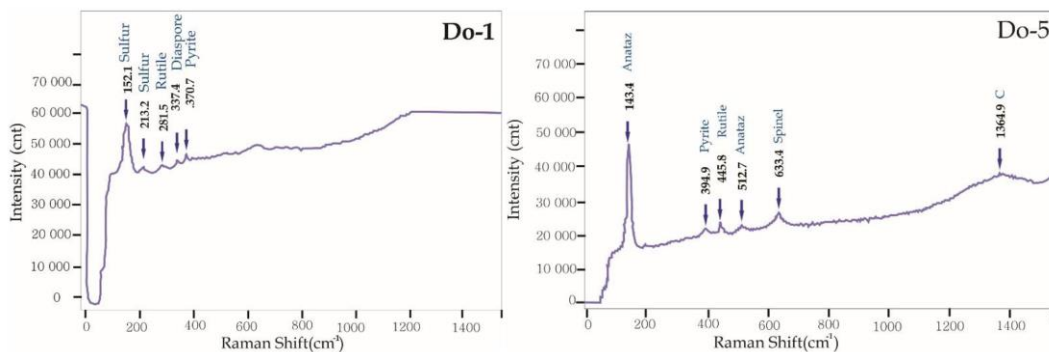
توزیع مواد آلی در افق‌های بوکسیتی: محتوای کلی مواد آلی (TOC) کانسارهای بوکسیتی در محدوده-ای از ۰٫۱۵ تا ۱٫۱۱ % می‌باشد (باردوسی و آلوا، ۱۹۹۰). همان‌طور که نتایج آنالیز مواد آلی نشان می‌دهد میانگین کربن آلی در افق‌های بوکسیتی کانسار دوپلان ۰٫۳۲ % می‌باشد (جدول ۳). بالا بودن محتوای مواد آلی (TOC) در این افق‌ها نشان از فعالیت‌های بیولوژیکی در این افق‌ها می‌باشد (لاسکو و اکونومو-ایلپوس، ۲۰۰۷). داده‌های آنالیز رامان انجام گرفته از افق غنی از مواد آلی حضور کربن را در این افق تایید می‌کند (شکل ۶). نمودار نسبت TOC با آهن نشان می‌دهد که میزان

جدول ۳: درصد محتوای مواد آلی (TOC) و OM% در افق‌های بوکسیتی کانسار دوپلان و برخی از کانسارهای بوکسیتی دنیا. دو افق بوکسیت غنی از آهن و بوکسیت غنی از مواد آلی بالاترین مقادیر OM% و TOC% را نشان می‌دهند.

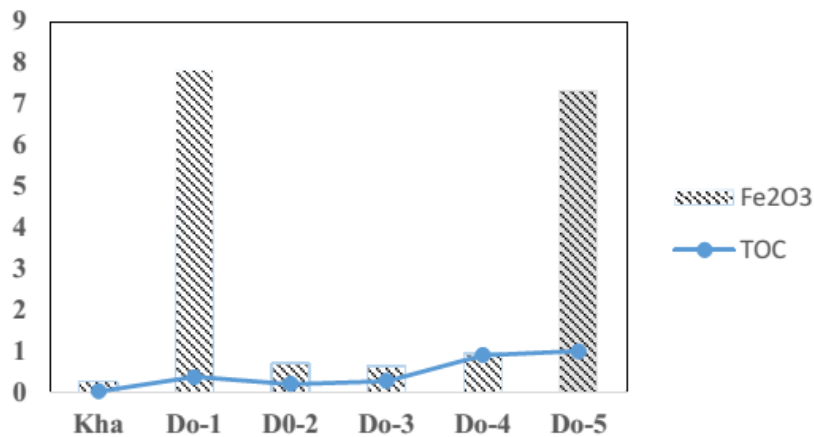
کد نمونه	افق‌های بوکسیتی و سایر کانسارها	%TOC	%OM
Nyr-1	سازند نیریز	0.32	0.55
Do-5	بوکسیت غنی از مواد آلی	1	1.72
Do-4	بوکسیت پیزولیتی	0.09	0.15
Do-3	بوکسیت آلیتی	0.27	0.46
Do-2	بوکسیت رسی	0.2	0.34
Do-1	بوکسیت غنی از آهن	0.37	0.64
Kha-1	سازند خانه‌کت	0.02	0.03
_____	Pinjara ¹ استرالیای غربی	0.19	_____
_____	Guinea ² آفریقا	0.18	_____
_____	Ghads ² هند	0.24	_____

۱- (پاور و لوح، ۲۰۱۰)

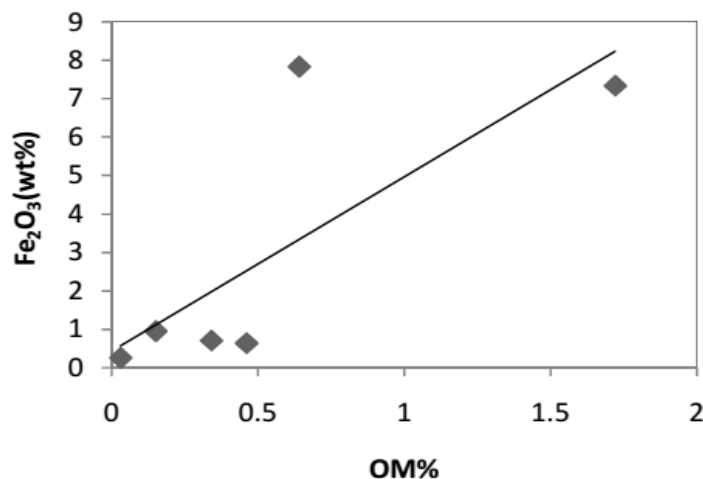
۲- (رجکوبیر و واندرمی، ۱۹۹۳)



شکل ۶: طیف رامان از نمونه‌های بوکسیت غنی از مواد آلی و بوکسیت غنی از آهن که نشان دهنده حضور کربن و پیریت در این دو افق می‌باشد.



شکل ۷: نمودار درصد Fe₂O₃ و محتوای کلی کربن آلی در افق‌های مختلف کانسار بوکسیت دوپلان.



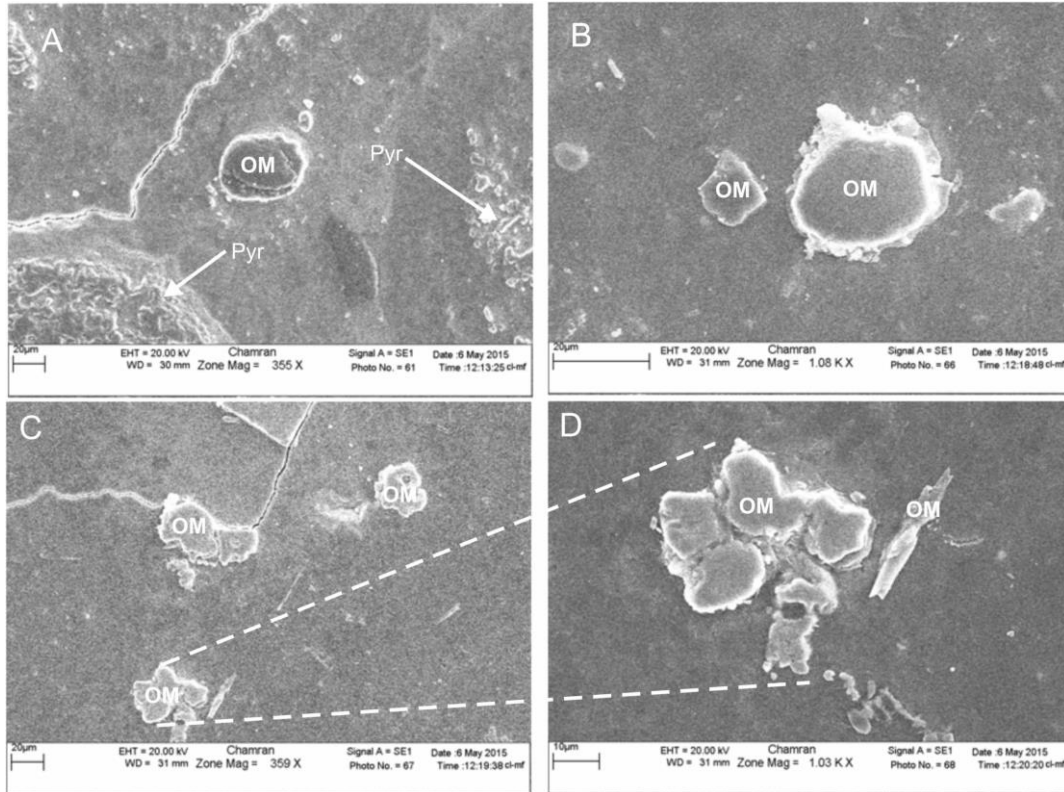
شکل ۸: تغییرات نسبت Fe₂O₃ در مقابل درصد مواد آلی در افق‌های بوکسیتی

شکل‌دار می‌باشد. باکتری‌های احیا کننده سولفات در ارتباط با تشکیل پیریت تمشکی هستند. بافت تمشکی پیریت حاکی از تمرکز بالای آهن حل شده می‌باشد (لاسکو، ۲۰۰۵). ارتباط مواد آلی و پایداری فازهای کانیایی مانند پیریت در رسوبات توسط فاکتورهایی مانند Eh، pH، دما، وجود مواد آلی قابل کنترل می‌باشد. بنابراین وجود پیریت در این دو افق به دلیل کاهش سریع باکتریایی سولفات به H₂S در محیط غنی از کربن آلی می‌باشد که خود منجر به تشکیل سولفیدهای فلزی شده است (شکل ۹).

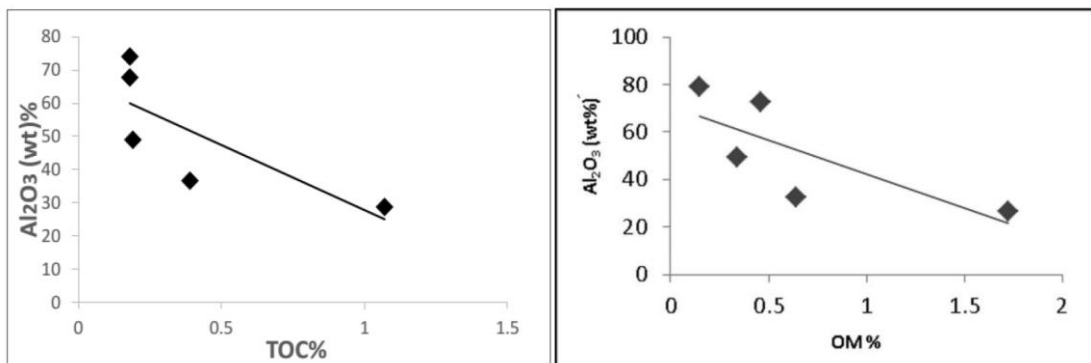
ارتباط مواد آلی با محیط نهشت و کانی‌شناسی افق‌های بوکسیتی: از ویژگی‌های رخداد بوکسیتی دوپلان که موجب تمایز افق‌های بوکسیتی این کانسار از یکدیگر شده است، افق‌های بوکسیتی غنی از پیریت می‌باشد. پیریت یکی از کانی‌های بوکسیت‌های کارستی است که وجود آن به فراوانی مواد آلی، اکسی هیدروکسیدهای آهن و سولفات بستگی دارد (لاسکو و اکونومو-ایلیپوس، ۲۰۰۷؛ کلایتریس و همکاران، ۲۰۰۹). در طی مطالعات ریزریخت‌شناسی از افق‌های بوکسیتی غنی از مواد آلی (Do-1) و غنی از آهن (Do-5) دو نوع پیریت شناسایی شد که شامل پیریت تمشکی و پیریت

ماتریکس آلی نقش اصلی در هسته‌های پیریتی که تشکیل دهنده پیریت‌های تمشکی است بازی می‌کند (مکلین و همکاران، ۲۰۰۷؛ هیم، ۲۰۱۰) (شکل ۹).

قابل ذکر است که فاکتور کنترل کننده اصلی تشکیل پیریت شامل وجود مواد آلی و کانی‌های آهن‌دار در رسوب و سولفات‌های قابل حل می‌باشد (لاسکو و اکونومو-ایلیپوس، ۲۰۰۷). بنابراین



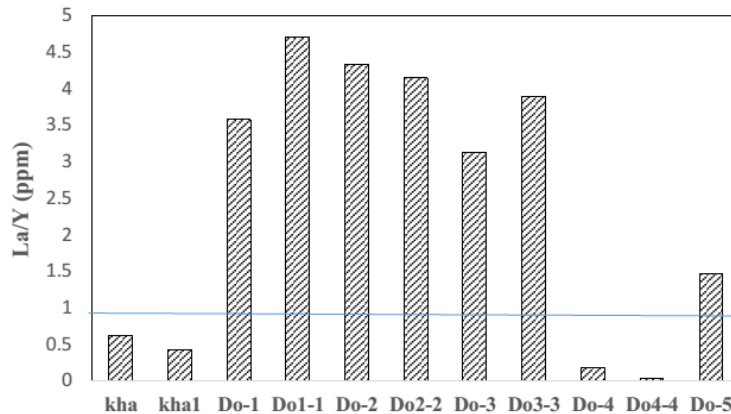
شکل ۹: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از تغییرات زیست زمین شیمیایی نمونه بوکسیت غنی از مواد آلی. (A) تصاویری از پیریت در حضور مواد آلی، (B) تصویری از مواد آلی در زمینه بوکسیت غنی از مواد آلی، (C و D) حضور مواد آلی در زمینه بوکسیت غنی از مواد آلی.



شکل ۱۰: تغییرات نسبت Al_2O_3 در مقابل درصد مواد آلی (OM%) و محتوی کلی کربن (TOC%) در افق‌های بوکسیتی.

(شکل ۱۱). بررسی شرایط pH سامانه بوکسیتی مورد مطالعه با استفاده از نسبت La/Y (کریسی و جورکویک، ۱۹۹۰؛ مسکوسیمویک و پنت، ۱۹۹۱) نشان داد که افق بوکسیتی پیزولیتی شرایط pH اسیدی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱).

همچنین یک ارتباط منفی بین Al_2O_3 و محتوی مواد آلی و محتوی کلی کربن (%TOC) در افق‌های بوکسیتی وجود دارد (شکل ۱۰). بنابراین نقش اصلی مواد آلی ایجاد شرایط احیایی و تسهیل هسته سازی و رشد سولفیدها برای باکتری‌ها می‌باشد



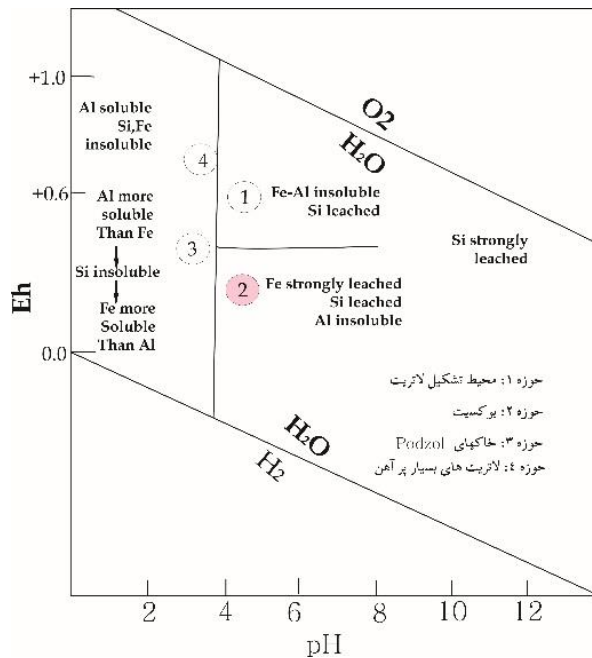
شکل ۱۱: روند تغییرات نسبت La/Y در کانسار دوپلان. افق‌های با نسبت $La/Y < 1$ نشان از شرایط محیطی با pH اسیدی و نسبت $La/Y > 1$ شرایط pH قلیایی را نشان می‌دهد.

زمان احیایی بوده است. در محدوده pH (۶-۹) انحلال پذیری یون‌های آلومینیوم و آهن به صفر می‌رسد و این یون‌ها به صورت کانی‌های اکسید و هیدروکسید نهشته می‌شود (کومولوسی، ۱۹۷۰). در pHهایی در محدوده ۵ تا ۹ انحلال Si حدود ۱۰ تا ۲۰ برابر انحلال Al و Fe می‌باشد. در این شرایط بعد از گذشت زمان زیادی از هوازدگی، انحلال مشخصی از Si رخ خواهد داد اما Fe و Al بدون تغییر باقی خواهد ماند. در یک محیط با pH ثابت، انحلال Fe در مقایسه با Al در نتیجه کاهش Eh می‌تواند افزایش یابد (پترسون، ۱۹۶۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ زانگ و همکاران، ۲۰۱۳) (شکل ۱۲). توزیع محتوی مواد آلی در افق‌های بوکسیتی نشان می‌دهد که مواد آلی کنترل موثر و مهمی در تحرک نسبی Al, Fe و در نتیجه روی انحلال و ته نهشت کانی‌های مربوطه در طی تشکیل بوکسیت

وجود مواد آلی در محیط باعث کاهش Eh شده به طوری که در Eh اندکی احیایی و pH اندکی اسیدی آهن آبشویی و آلومینیوم برجای گذاشته می‌شود. در این شرایط آهن با اسید هیومیک از محیط خارج می‌شود. کمپلکس فلزی-آلی تحت شرایط fO_2 پایین انتقال می‌یابند، درحالی که هیدرواکسیدهای آلومینیوم غیر قابل انحلال باقی می‌ماند (فرنزی، ۲۰۰۱). وقوع فرایند آهن‌شویی در این افق بیانگر فعالیت‌های زیستی گیاهان باتلاقی و میکروبی‌های مربوطه می‌باشد که خود ایجاد کننده محیطی اسیدی و شرایط احیایی تمرکز آلومینیوم می‌شود (رحیم پور بناب و اسماعیلی، ۱۳۸۶). نتایج کانی‌شناسی و زمین شیمیایی نشانگر شرایط احیایی و بازی در دو افق غنی از آهن و غنی از مواد آلی می‌باشد. حضور پیریت در این دو افق گواه این است که محیط دیاژنیک بوکسیت در این

قابلیت انحلال کانی‌های Fe بیشتر از Al می‌باشد (افق بوکسیت پیزولیتی)، مشخص می‌شود. لذا می‌توان نقش مواد آلی به عنوان یکی از فاکتورهای مهم در کنار دیگر عوامل محیطی موثر در بوکسیت زایی منظور نمود.

دارند (ارلیچ و ویکر، ۱۹۹۷؛ ارلیچ و نیومن، ۲۰۰۹). بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده نقش مواد آلی در کانسار دوپلان با ایجاد دو شرایط محیطی متفاوت (۱) محیطی که در آن قابلیت انحلال کانی‌های آلومینیوم‌دار بیشتر از آهن است (افق غنی از آهن، افق غنی از مواد آلی)، (۲) محیطی که در آن



شکل ۱۲: رابطه بین pH و Eh و تشکیل بوکسیت، آهن شویی و انحلال سیلیس (نورتن، ۱۹۷۳).

نتیجه‌گیری

می‌باشد. در مطالعه مقاطع میکروسکوپی، دو نوع هسته پیزولیتی تشخیص داده شد: هسته ساده و هسته مرکب. پیزولیت‌های با هسته ساده نشانگر منشا درجازا می‌باشد. پیزولیت‌های با هسته مرکب نشانگر انتقال مواد بوکسیتی هستند. وجود این پیزولیت‌ها نشان دهنده این است که نهشته به دو نوع برجازا و نابرجازا تقسیم می‌شود. براساس مطالعات چینه‌شناسی، بافت، کانی‌شناسی و زمین-شیمیایی می‌توان نتیجه گرفت که سازند خانه‌کت می‌تواند به عنوان سنگ مادر کانسار دوپلان باشد. همچنین عناصر فرعی نظیر Cr و Ni نشان می‌دهد که کانسار مورد مطالعه از نوع بوکسیت کارستی با

در قاعده افق‌های بوکسیتی مورد مطالعه سازند دولومیتی با میان لایه‌های رسی خانه‌کت قرار دارد. براساس ترکیب و رنگ رخداد بوکسیتی دوپلان به ۵ واحد قابل تفکیک بوده که از پایین به بالا شامل: (۱) بوکسیت غنی از آهن، (۲) بوکسیت رسی، (۳) بوکسیت آلیتی، (۴) بوکسیت پیزولیتی، (۵) بوکسیت غنی از مواد آلی. کانسار بوکسیت دوپلان از لحاظ کانی‌شناسی از نوع دیاسپوری همراه پیریت است که کائولینیت، ناکریت و کوارتز به عنوان کانی‌های اصلی آن را همراهی می‌کنند. روتیل، آنتاز، بوهمیت و مسکویت مهم‌ترین کانی‌های فرعی تشکیل دهنده لایه‌های مختلف این کانسار

درصد) در محیط باعث کاهش Eh شده به طوری که در Eh، pH مناسب آهن آبشویی و آلومینیوم برجای گذاشته می‌شود. مواد آلی کنترل موثر و مهمی در تحرک نسبی Al, Fe و در نتیجه روی انحلال و ته نهشت کانی‌های مربوطه در طی تشکیل کانسار بوکسیتی دوپلان دارند. به طوری که این نقش، با ایجاد دو شرایط محیطی متفاوت (۱) محیطی که در آن قابلیت انحلال کانی‌های آلومینیوم‌دار بیشتر از آهن است (افق غنی از آهن، افق غنی از مواد آلی) (۲) محیطی که در آن قابلیت انحلال کانی‌های Fe بیشتر از Al می‌باشد (افق بوکسیت پیزولیتی)، مشخص می‌شود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از حمایت‌های کمیته تحقیقات دانشگاه شیراز جهت انجام این پژوهش تشکر می‌کنند.

-رحیم پور بناب، ح. و اسماعیلی، د.، ۱۳۸۶. پتروگرافی و ژنز کانسار بوکسیت جاجرم، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و سوم، شماره یک، ص ۱۰۷-۱۲۳.
-خدادای، م.، ۱۳۹۲. کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و خاستگاه کانسار بوکسیت دوپلان، چهار محال و بختیاری، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد اقتصادی، دانشگاه شیراز، ۱۷۴ ص.

سنگ منشاء کربناتی است. نتایج آنالیز مواد آلی نشان می‌دهد که میانگین محتوای کلی مواد آلی در افق‌های بوکسیتی کانسار دوپلان ۰/۳۲ درصد می‌باشد که این مقدار در محدوده سایر کانسارهای بوکسیتی می‌باشد. افق‌های بوکسیت غنی از مواد آلی و بوکسیت غنی از آهن غنی از کانی پیریت می‌باشند دارای بیشترین مقدار (۰/۵۱ درصد) کربن آلی هستند. از ویژگی‌های رخداد بوکسیتی دوپلان، افق‌های بوکسیتی غنی از پیریت می‌باشد. وجود پیریت در این دو افق به دلیل احیای باکتریایی سولفید از SO₄ در محیط غنی از کربن آلی است. هم‌چنین وجود محتوای بالای مواد آلی در این دو افق یک ارتباط مثبت با میزان Fe₂O₃ را نشان می‌دهد. در بررسی شرایط pH سامانه بوکسیتی مورد مطالعه با استفاده از نسبت La/Y مشخص شد که افق بوکسیت پیزولیتی شرایط pH اسیدی را نشان می‌دهد. وجود مواد آلی اندک (۰/۰۹ تا ۰/۱۵

منابع

-احسان بخش، م. ح.، ۱۳۷۱. بررسی زمین‌شناسی اقتصادی بوکسیت منطقه دوپلان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۳۴۷ ص.
-پرخیده، ه.، ۱۳۷۵. گزارش اکتشاف بخش شمالی کانسار بوکسیت دوپلان، سازمان صنایع و معادن اصفهان، ۴۷ ص.

-Bardossy, G., 1982. Karst bauxite, Development in Economic Geology 14, Elsevier, Amsterdam.
-Bardossy, G. and Aleva, G.J.J., 1990. Lateritic bauxites, Elsevier, 624 p.
-Baskar, S., Baskar, R. and Kaushik, A., 2003. Role of microorganisms in weathering of the Konkan-Goa laterite formation, Current Science, v. 85, p. 1129-1134.

-Crinci, J. and Jurkowic, I., 1990. Rare earth elements in Triassic bauxites of Croatia, Yugoslavi, Travaux, v. 19, p. 239-248.
-Delavigne, J.E., 1998. Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering Mineralogical association of Canada, 494 p.
-Downs, R.T., 2006. The RRUFF Project: an integrated study of the

- chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals, - In: Proceedings of the 19th general meeting of the IMA, Kobe, Japan, p. 3 - 13.
- Ehrlich, H.L. and Wickert, L.M., 1997. Bacterial action on bauxites in columns fed with full-strength and dilute sucrose-mineral salts medium, In: Lortie L, Bédard P, Gould WD, eds, *Biotechnology and the Mining Environment*, SP 97-1, Ottawa, Canada: CANMET Natural Resources Canada, p. 74-89.
- Ehrlich, H.L. and Newman, D., 2009. *Geomicrobiology*, Taylor and Francis Group, 605 p.
- Ferenczi, P., 2001. Iron ore, manganese and bauxite deposits of the Northern Territory, Geological Survey of Canada, Report, v. 13. 113 p.
- Graselli, J.G. and Bulkin, B.J. (eds), 1991. *Analytical Raman Spectroscopy*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 480 p.
- Grocott, S. C., 1988. Bayer liquor impurities: measurement of organic carbon, oxalate and carbonate extraction from bauxite digestion, *Light Metals, The Minerals, Metals and Materials Society*, v. 15, p. 833-841.
- Hao, X., Leung, K., Wang, R., Sun, W. and Li, Y., 2010. The geomicrobiology of bauxite deposits", *Geoscience Frontiers*, v. 1, p. 81-89.
- Heim, C., 2010. *An Integrated Approach to the Study of Biosignatures in Mineralizing Biofilms and Microbial Mats*, Ph.D. Thesis, University of Gottingen, Germany, 175 p.
- Kalaitzidis, S., Siavalas, G., Skarpelis, N., Araujo, V.C. and Christa, k., 2009. Late Cretaceous coal overlying Karstic bauxite deposits in the Parnassus-Ghiona unit, Central Greece: coal characteristics and depositional environment, *International Journal of Coal Geology*, v. 81, p. 211-226.
- Kalatha, S. and Economou-Eliopoulos, M., 2015. Framboidal pyrite and bacterio-morphic goethite at transitional zones between Fe-Ni-laterites and limestones: Evidence from Lokris, Greece, *Ore Geology Reviews*, v. 65, p. 413-425.
- Komlossy, G.y., 1970. The Iszkaszentgyörgy bauxite (SE Bakony Mts., Hungary), Problems of genesis and mineral formation, *Annales Instituti Geologici Publici Hungarici*, v. 54, p. 347-358. ,
- Laskou, M., 2005. Pyrite-rich bauxite from the Parnassos-Ghiona zone, Greece, In: MAO et al. (eds), 8th SGA Meeting, *Mineral Deposits Research Meeting the Global Challenge Beijing*, p. 1007-1010.
- Laskou, M. and Economou-Eliopoulos, M., 2007. The role of microorganisms on the mineralogical and geochemical characteristics of the Parnassos-Ghiona bauxite deposits, Greece, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 93, p. 67-77.
- Liu, X., Wang, Q., Deng, J., Zhang, Q., Sun, S. and Meng, J., 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 105, p. 137-152.
- Liu, X., Wang, Q., Feng, Y. and Cai, Z., 2013. Genesis of the Guangou karstic bauxite deposit in western Henan, China. *Ore Geology Reviews*, v. 55, p. 162-175.
- MacLean, L.C.W., Pray, T.J., Onsted, T.C., Brodie, E.L., Hazen, T.C. and Southam, G., 2007. Mineralogical, chemical and biological characterization of an anaerobic biofilm collected from a borehole in a deep gold mine in South Africa, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, v. 24, p. 491-504.
- Maksimovic, Z. and Panto, G., 1991, Contribution to the geochemistry of the

- rare earth elements in the karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece, *Geoderma*, v. 51, p. 93-109.
- Nemanich, R. J. and Solin, S. A., 1979. First- and second-order Raman scattering from finite-size crystals of graphite, *Physics, Review*, B20, 392 p.
- Norton, S.A., 1973. Laterite and bauxite formation, *Economic Geology*, v. 68, p. 353-361.
- Patterson, S.H., 1967. Bauxite reserves and potential aluminum resources of the World, *U.S. Geological Survey Bulletin*, v.1228, 176 p.
- Power, G. and Loh, J., 2010. Organic compounds in the processing of lateritic bauxites to alumina, Part 1: Origins and chemistry of organics in the Bayer process, *Hydrometallurgy*, v. 105, p. 1-29.
- Power, G.P., 1991. The impact and control of organic compounds in the extraction of alumina from bauxite, *Fifth Aus IMM Extractive Metallurgy Conference*, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Perth, Western Australia, p. 337-345.
- Rijkeboer, A. and van der Meer, A.P., 1993. Bauxite roasting—an option to reduce the organic input to Bayer plant liquor, *Third International Alumina Quality Workshop*, Hunter Valley, NSW, Australia, p. 254-269.
- Schroll, E. and Sauer, D., 1968. Beiträge zur Geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, Vanadium und Molybdän in bauxitischen Gesteinen und das Problem der stofflichen Herkunft des Aluminiums, *Travaux du ICSOBA*, Zagreb, v. 5, p. 83-96.
- Tuinstra, F. and Koenig, J. L., 1970. Raman spectrum of graphite, *J. Chemistry and Physics*, v. 53(3), p. 1126-1130.
- Walkey, A. and Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil Science*, v. 37, p. 29-38.
- Zhang, Zh., Zhou, L., Yujiao, Li., Chengquan, Wu. and Zheng, Ch., 2013. The “coal-bauxite iron” structure in the ore-bearing rock series as a prospecting indicator for southeastern Guizhou bauxite mines, *Ore Geology Reviews*, v. 53, p. 145-158.