



## زمین‌شیمی کانسار منگنز جون‌آباد، شمال خاش، استان سیستان و بلوچستان

محمودرضا رحمتیان<sup>۱\*</sup>، محمد لطفی<sup>۲</sup> و مجید قادری<sup>۳</sup>

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(۲) پژوهشکده علوم زمین وابسته به سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

(۳) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۹، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۲

### چکیده

کانسار منگنز جون‌آباد در ۱۶ کیلومتری جنوب‌شرق روستای جون‌آباد در شمال خاش و از لحاظ پهنه‌بندی رسوبی - ساختمانی در بخش میانی زون فلشی شرق ایران واقع شده است. سنگ میزبان لایه‌های منگنز در این کانسار، شیل‌های قرمز رنگ است که در قسمت‌های بالایی و به صورت بین‌لایه‌ای یا به صورت آغشتگی، کانی‌سازی منگنز در آنها دیده می‌شود. هندسه ماده معدنی به صورت لایه‌ای شکل و اغلب هم‌شیب و همراه با واحدهای دربرگیرنده (شیل‌های قرمز رنگ) است. شیمی عناصر اصلی، نسبت‌های  $\text{Si:Al}$ ،  $\text{Mn:Fe}$  و وجود ضرایب همبستگی مثبت بین  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان فرایندهای گرمایی در محیطی کم‌عمق همراه با ورود مواد آواری خاکی از جنس مافیک به درون حوضه رسوبی در محل شکل‌گیری کانسار است. نمودارهای عناصر فرعی، همگی بر محتوای پایین کانسنگ از عناصری همچون  $\text{Ni}$ ،  $\text{Cu}$  و  $\text{Co}$  دلالت دارند که نمایانگر قرارگیری کانسار در محدوده کانسارهای با منشأ گرمایی است. نسبت‌های  $\text{LREE:HREE}$ ،  $\text{Co:Zn}$ ،  $\text{Co:Ni}$ ، غنی‌شدگی عناصر  $\text{LREE}$  نسبت به عناصر  $\text{HREE}$  و آنومالی‌های منفی  $\text{Ce}$  نیز بیانگر نقش سیال گرمایی کانه‌دار در این کانسار است. الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی برای این کانسار، همخوانی زیادی با الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در کانسارهای با منشأ گرمایی دارد.

### واژه‌های کلیدی: منگنز، گرمایی، زمین‌شیمی، جون‌آباد، خاش

### مقدمه

منگنز نوع آب‌زاد به تدریج (به میزان ۲ تا ۱۰ میلی‌متر در میلیون سال) در آب دریا تشکیل می‌شوند (Ingram et al., 1990). این کانسارها حاوی مقادیری آهن بوده و از لحاظ اکسیدهای منگنز فقیر هستند. نسبت  $\text{Mn:Fe}$  در این کانسارها تقریباً برابر با

کانسارهای منگنز بر پایه مشخصات کانی‌شناسی، ترکیب شیمیایی و شرایط زمین‌ساختی به انواع آب‌زاد<sup>۱</sup>، دیاژنتیک<sup>۲</sup> و گرمایی<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند (Hein et al., 1997). کانسارهای

1. Hydrogenous  
2. Diagenetic  
3. Hydrothermal

\*مسئول مکاتبات: rahmatian60@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.22067/econg.v11i1.52594>

نام خانوادگی مسئول مکاتبات در زمان پذیرش مقاله کهرآزی بوده و بعد از آن به رحمتیان تغییر کرده است.

قرار گرفت. در طی بررسی‌های صحرایی نمونه‌های کانسنکی مورد نیاز (۲۰ نمونه) از قسمت‌های مختلف کانسار و به وزن حدود ۰/۵ تا ۱ کیلوگرم برای هر نمونه، برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی برداشت شد. نمونه‌های سخت و توده‌ای به قطعات کوچک‌تر شکسته شدند، سپس نمونه‌ها برای سنجش اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و عناصر نادر خاکی به روش‌های XRF، ICP-OES و ICP-MS در آزمایشگاه کانساران بینالود تهران مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج آنالیز شیمیایی حاصل از نمونه‌های کانسار منگنز جون‌آباد در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ آمده است.

### زمین‌شناسی کانسار

واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی شامل ردیفی از سنگ‌های ترشیری همراه با رسوبات کواترنری است و واحد سنگی قدیمی‌تر از ائوسن در منطقه مورد بررسی وجود ندارد. از لحاظ چینه‌شناسی، واحدهای مختلف سنگی در این محدوده قابل مشاهده هستند که با در نظر گرفتن زمان قرارگیری به ترتیب سنی از قدیم به جدید عبارتند از: ۱- شیل‌های پلیتی دگرگون‌شده خاکستری مایل به سبز کم‌رنگ تا خاکستری (فلیت) همراه با مقداری از سنگ‌های آتشفشانی دگرگون‌شده بازیک (بازالت دگرگون‌شده)، ۲- شیل‌های قرمز رنگ به عنوان میزبان کانه‌زایی منگنز، ۳- ماسه‌سنگ‌های کربناته ریزدانه قرمز رنگ، ۴- رسوبات آبرفتی کهن و جوان و ۵- آبرفت‌های در حال تشکیل در بستر رودخانه‌های فعلی (شکل ۳). در پیمایش‌ها و برداشت‌های صحرایی انجام‌شده در منطقه معدنی جون‌آباد، چندین افق از لایه‌های منگنز شناسایی شدند. این لایه‌های حاوی ماده معدنی، بیشتر در امتداد شمال غرب- جنوب شرق با شیبی بین ۳۵ تا ۵۰ درجه به سمت شرق و به موازات لایه‌های شیلی قرار گرفته‌اند. لایه‌های منگنز به دو گروه تقسیم می‌شوند: گروه اول لایه‌هایی با روند شمال غرب- جنوب شرق که گسترش بیشتری داشته و نوع دوم دارای روند شمال شرق- جنوب غرب بوده و گسترش کمتری دارند. در واقع لایه‌های منگنز نوع دوم توسط گسل‌ها (از نوع امتدادلغز) جابه‌جا شده‌اند و تفاوت

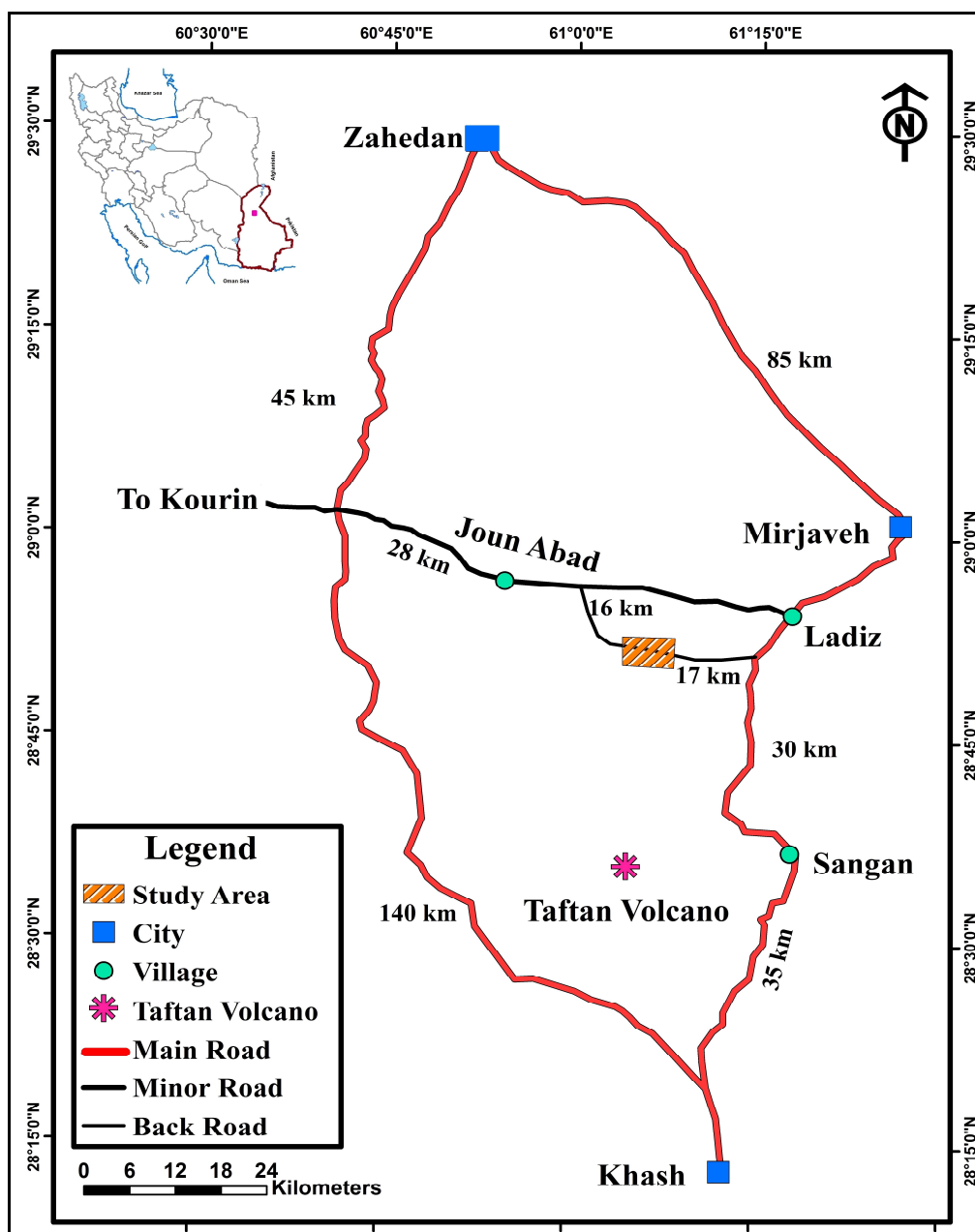
یک است و غلظت Cu و Ni در آنها بالاست (بیش از ۳۰۰۰ ppm) (Hein et al., 1997; Usui and Someya, 1997). کانسارهای منگنز نوع دیاژنتیک به شکل نودول هستند و در اثر ته‌نشینی از محلول‌های گرمابی یا آب‌های اشباع از رسوبات تغییر شکل یافته، به وجود می‌آیند (Klinkhammer et al., 1982). این کانسارها معمولاً در ارتباط با اکسیدشدگی مواد ارگانیکی بوده و از کانی‌های کربناته منگنز تشکیل می‌شوند (Polgari et al., 2012). کانسارهای منگنز نوع گرمابی به صورت مستقیم از محلول‌های گرمابی دما پایین ته‌نشین می‌شوند (Ingram et al., 1990; Hein et al., 1997). این کانسارها به طور عمده ساختار لامیناسیون و استراتاباند داشته و به شکل توده‌های نامنظم و رگه‌های اپی ترمال هستند (Hein et al., 1997). کانسارهای منگنز نوع گرمابی و دیاژنتیک دارای مقادیر بالای Mn:Fe بوده؛ اما تمرکز عناصر فرعی در این کانسارها پایین است (Hein et al., 1994; Hein et al., 1996). شباهت‌هایی بین این دو نوع کانسارهای منگنز وجود دارد؛ اما این کانسارها به راحتی از لحاظ ریخت‌شناسی، شرایط زمین ساختی و سرعت رشد از یکدیگر قابل تشخیص هستند (Kuhn et al., 1998). کانسار منگنز جون‌آباد در ۱۶ کیلومتری جنوب شرق روستای جون‌آباد و ۷۲ کیلومتری شمال خاش در ۶۱° ۶' ۷" طول شرقی و ۵۱° ۵۱' ۲۳" عرض شمالی واقع شده است. منطقه مورد بررسی از لحاظ پهنه‌بندی رسوبی- ساختری در بخش میانی زون فلیشی شرق ایران قرار دارد (شکل‌های ۱ و ۲). در این مقاله سعی شده است تا به بررسی نتایج حاصل از داده‌های اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و همچنین عناصر نادر خاکی نمونه‌های کانسنکی پرداخته شود که این امر می‌تواند رهیافتی در تعیین شرایط تشکیل کانسار مورد بحث باشد.

### روش مطالعه

در گام نخست، پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به منطقه، ویژگی‌های زمین‌شناسی محدوده معدنی مورد بررسی صحرایی

ناپیوسته باشد و به فاصله اندکی، لایه‌ای دیگر از منگنز نمایان شود. در این محدوده، هندسه ماده معدنی به صورت لایه‌ای شکل و غالباً هم‌شیب و هم‌روند با سنگ‌های رسوبی (شیل‌های قرمز رنگ) است (شکل ۴-ب).

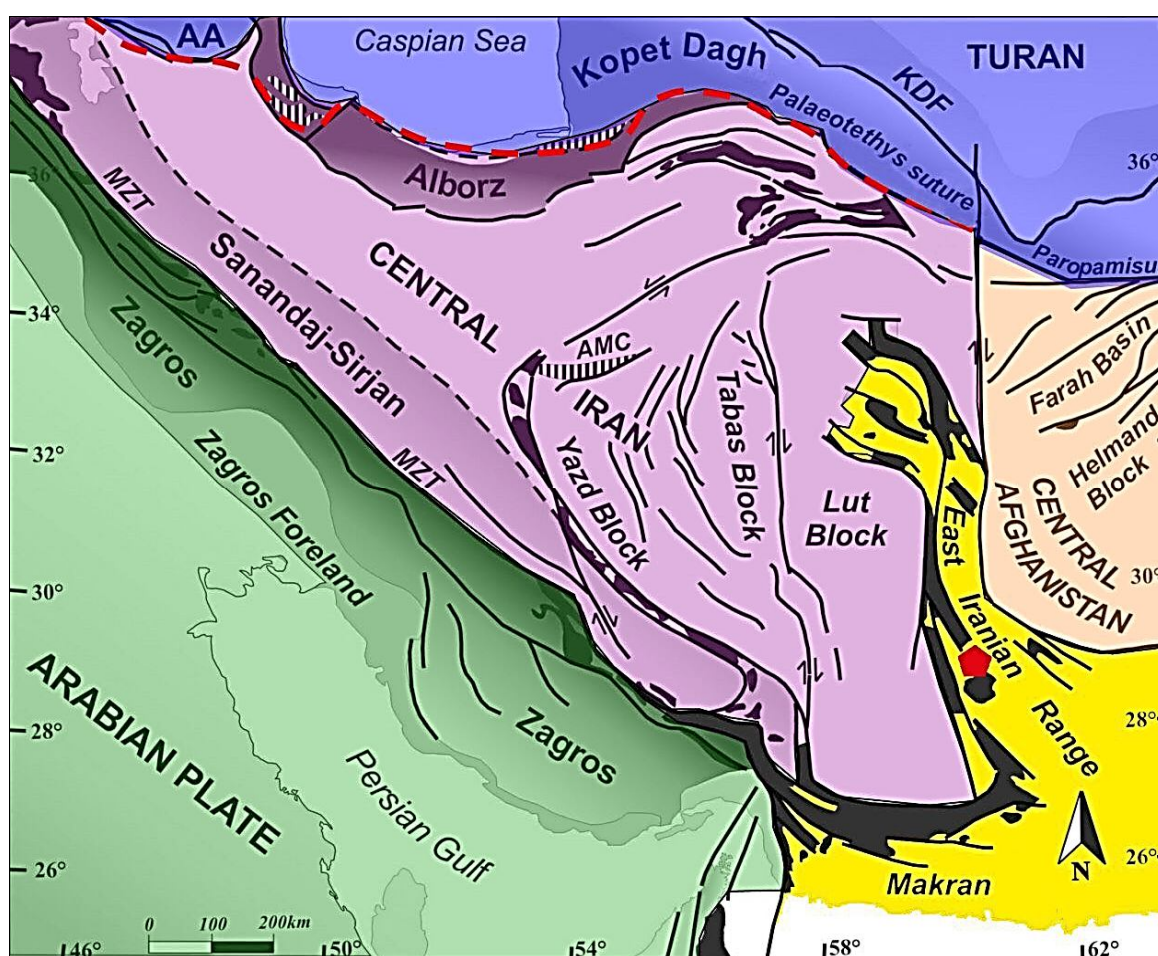
چندانی با لایه‌های نوع اول ندارند. ضخامت این لایه‌ها به پیروی از رفتار گسل‌ها کم و زیاد شده‌اند و حالت پیچ و تاب خورده<sup>۱</sup> دارند (شکل ۴-ا). بیشتر این لایه‌ها ضخامت کم تا متوسط دارند؛ به طوری که ضخامت آنها از ۰/۵ تا ۳ متر تغییر می‌کند. در یک افق کانه‌دار، امتداد یک لایه منگنز ممکن است به صورت



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به کانسار منگنز جون‌آباد  
Fig. 1. Geographical location and access roads to Joun Abad manganese deposit

کانسار اغلب به صورت هم‌زمان با شیل قرمزرنگ و کوارتز تشکیل شده‌اند. در واقع، کوارتز (به عنوان باطله اصلی)، همان لایه‌های سیلیسی از نوع ژاسپروئید است که در بالای واحد شیل قرمزرنگ، کانه‌های منگنز را به طور هم‌زمان همراهی می‌کند که احتمالاً بیانگر تشکیل هم‌زمان آنهاست (شکل ۴-د).

سنگ میزبان لایه‌های منگنز در این کانسار، شیل‌های قرمزرنگ است که در قسمت‌های بالایی و به صورت بین‌لایه‌ای یا به صورت آغشتگی، کانی‌سازی منگنز در آنها دیده می‌شود؛ یعنی می‌توان اظهار داشت که این واحد سنگی (شیل قرمزرنگ) به عنوان لایه شاخص و یا کلیدی برای ردیابی منگنز در منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۴-ج). کانه‌های منگنز در این



شکل ۲. نقشه زمین‌ساختی ایران و موقعیت کانسار منگنز جونا آباد در حوضه فلیشی شرق ایران. AA: بلوک ارمنستان-آناطولی، AMC: کمپلکس دگرگونی انارک، KDF: حوضه عمیق کپه‌داغ، MZT: راندگی زاگرس. تغییرات از یاراحمدزهی (Yarahmadzahi et al., 2016)

**Fig. 2.** Tectonic map of Iran and location of Joun Abad manganese deposit in the Eastern Iran Flysch Zone. AA: Anatolian-Armenian Block, AMC: Anarak Metamorphic Complex, KDF: Kopet Dagh Foredeep, MZT: Main Zagros Thrust (modified from Yarahmadzahi et al. 2016)

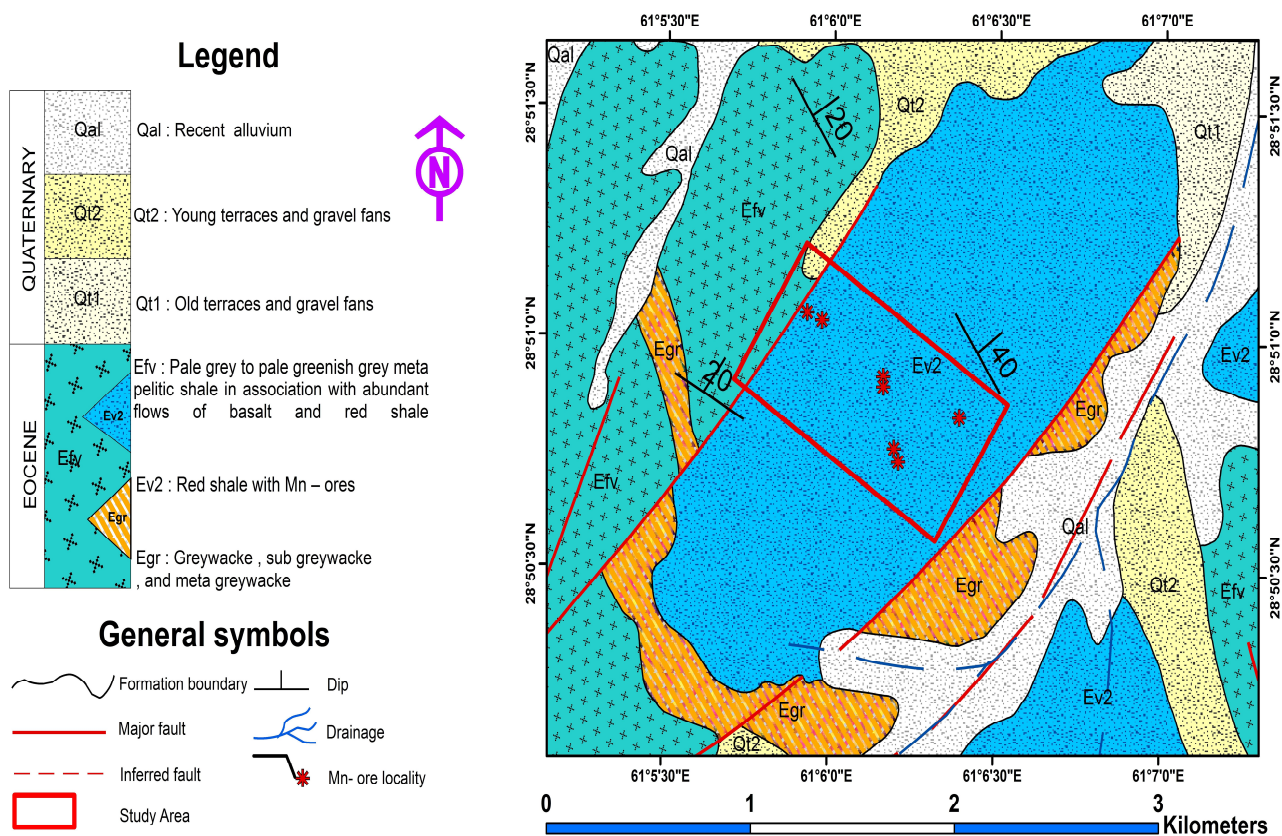
### کانی‌شناسی کانسار

نتیجه فرایندهای سوپرژن و گرمایی ته‌نشین می‌شوند (Nicholson, 1992b; Roy, 1992). مشخص شده است که

کانی‌های منگنز در گستره‌ای از محیط‌های خشکی و دریایی، در

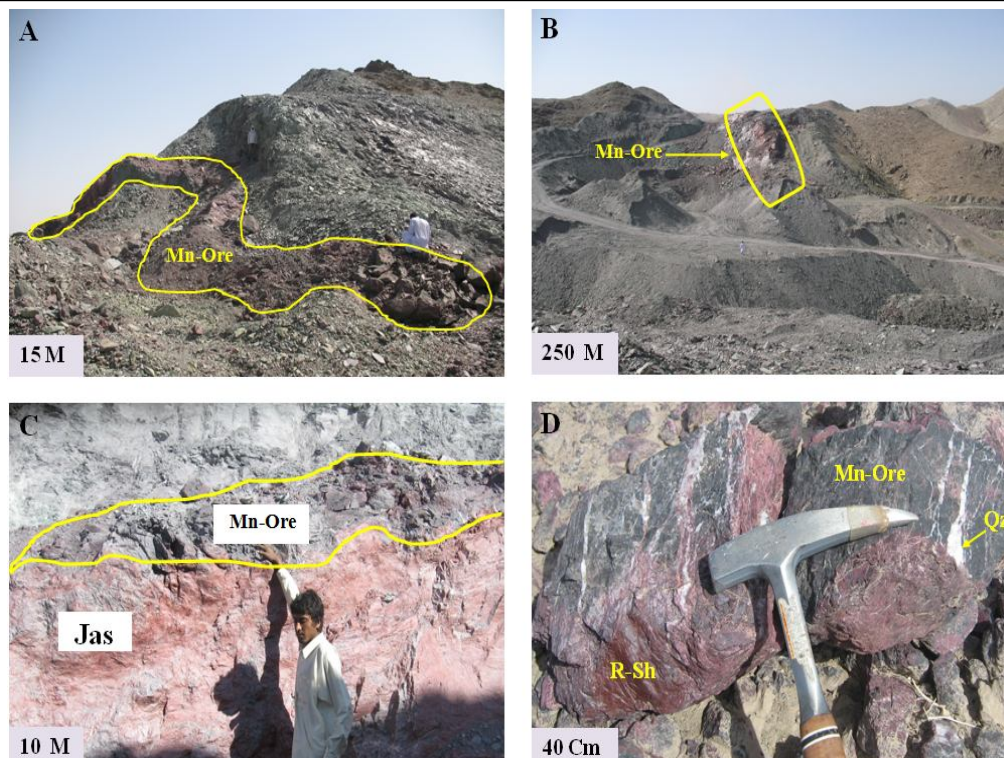
جدول ۱). براونیت فراوان‌ترین و اصلی‌ترین کانی است. براونیت ممکن است حاصل سیلیس‌های شکل‌دار موجود در سنگ‌های میزبان و در ارتباط با فرایندهای دیاژنز اخیر و یا متامورفیک قدیمی باشد؛ اما دلیل کمی برای این تغییرات و مطرح شدن بعدتر سیلیس وجود دارد. اما باز هم با این تفاسیر می‌توان اظهارداشت که محتمل‌ترین منبع سیلیس، آتشفشان‌های زیر دریایی است. همچنین این بررسی‌ها نشان‌دهنده فازهای آهن‌دار به میزان کم و به عنوان فاز فرعی بوده که این موضوع نشان‌دهنده تفریق و جدایش آهن نسبت به منگنز و وجود کانه‌زایی در عمق کم و متأثر از سیال گرمایی است.

کانی‌های منگنز مانند پیرولولزیت و پسیلوملان در محیط‌های متنوعی از قبیل سوپرژن دریایی، هوازده و گرمایی (Nicholson, 1992b) و کانی‌هایی مانند براونیت، بیکسبایت و جاکوبسیت در محیط‌های گرمایی رخ می‌دهند (Hewett and Fleischer, 1960; Nicholson, 1992b). بررسی‌های میکروسکوپی و نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> در محدوده مورد بررسی، کانی‌های متنوعی را در واحد شیل قرمز رنگ آشکار کرد. این بررسی‌ها نشان‌دهنده حضور غالب فازهای منگنزدار مانند براونیت، رودوکروزیت، پیرولولزیت و پسیلوملان و کانی‌های هماتیت، سیلیس، باریت و کلسیت به عنوان کانی‌های باطله است (شکل ۵-A, B, C, D و E،



شکل ۳. بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ تفتان و موقعیت کانسار منگنز جون‌آباد (Mehrpartou and Padyar, 1984)

**Fig. 3.** Part of geological map (1:100,000 scale) of Taftan and location of Joun Abad manganese deposit (Mehrpartou and Padyar, 1984)



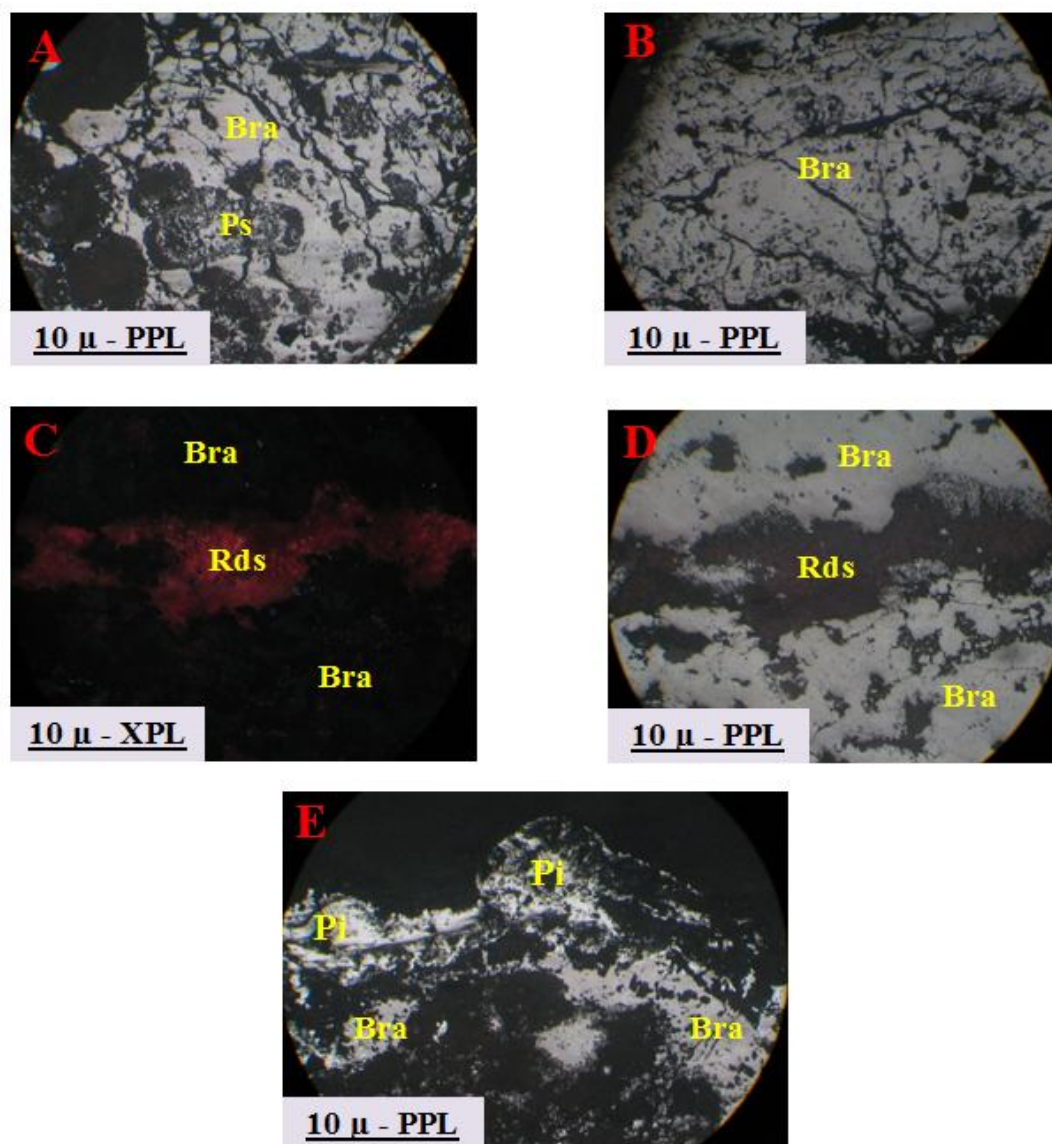
شکل ۴. A: لایه منگنز به شکل پیچ و تاب‌خورده، B: کانه‌زایی به صورت هم‌روند با سنگ میزبان، C: کانه‌زایی در بالای لایه ژاسپروئیدی و D: واحد شیل قرمز رنگ کانه‌دار در مقیاس نمونه دستی در کانسار منگنز جون‌آباد. Mn: کانسنگ منگنز، Qz: کوارتز، RSh: شیل قرمز رنگ، Jas: ژاسپروئید، علایم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

**Fig. 4.** A: Mn layer in the form of Pinch and Swell, B: Mineralization with the same direction as the host rock, C: Mineralization on top jasperoid layer, and D: Red shale ore unit in hand specimen scale in Joun Abad Mn deposit. Mn: Manganese Ore, Qz: Quartz, RSh: Red Shale, Jas: Jasperoid, (symbols from Whitney and Evans, 2010).

جدول ۱. نتایج حاصل از شناسایی کانی‌ها به روش XRD در کانسار منگنز جون‌آباد

**Table 1.** The results of minerals identification using XRD method in Joun Abad Mn deposit

| Sample          | Sample type     | Major phase          | Minor phase              |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| J <sub>1</sub>  | Manganese layer | Quartz               | Braunite, Barite         |
| J <sub>4</sub>  | Manganese layer | Braunite             | Quartz                   |
| J <sub>5</sub>  | Manganese layer | Braunite             | Barite, Quartz           |
| J <sub>6</sub>  | Manganese layer | Braunite, Quartz     | Calcite                  |
| J <sub>7</sub>  | Manganese layer | Braunite, Quartz     | Barite                   |
| J <sub>8</sub>  | Manganese layer | Braunite             | Quartz                   |
| J <sub>11</sub> | Manganese layer | Braunite             | Quartz, Barite           |
| J <sub>12</sub> | Manganese layer | Braunite             | Quartz, Hematite, Barite |
| J <sub>13</sub> | Manganese layer | Braunite             | Barite, Hematite         |
| J <sub>16</sub> | Manganese layer | Braunite, Pyrolusite | Quartz                   |
| J <sub>17</sub> | Manganese layer | Braunite             | Barite                   |
| J <sub>19</sub> | Manganese layer | Braunite             | Quartz, Hematite         |



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از انواع کانه‌های اولیه و ثانویه در کانسار منگنز جون‌آباد. A: واپاشی و درنهایت تبدیل براونیت به پسیلوملان، B: نمایی از براونیت توده‌ای با رنگ روشن. C و D: هم‌رشدی بین براونیت و رودوکروزیت و E: تبدیل‌شدگی تحولی براونیت به پیرولولزیت. Bra: براونیت، Ps: پسیلوملان، Rds: رودوکروزیت، Pi: پیرولولزیت، علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010).

**Fig. 5.** Microphotographs of primary and secondary ore minerals in Joun Abad Mn deposit. A: Decay and finally replacement of Braunite to Psilomelane, B: View of massive braunite with light color, C and D: Intergrowth of braunite and rhodochrosite, and E: Transitional replacement of Braunite to Pyrolusite. Bra: Braunite, Ps: Psilomelane, Rds: rhodochrosite, Pi: Pyrolusite, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

### زمین‌شیمی عناصر اصلی

معیارهای زمین‌شیمی برای تشخیص کانسارهای منگنز با منشأهای گوناگون به‌خوبی پذیرفته شده‌اند؛ به‌طوری‌که نسبت‌های اکسیدهای اصلی به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی منشأ

کانسارهای منگنز استفاده شده‌اند (Shah and Khan, 1999; Polgari et al., 2012). از میان اکسیدهای اصلی  $MnO$ ،  $SiO_2$  و  $TiO_2$ ،  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$  به‌طور گسترده برای تعیین منشأ ذخایر منگنز به‌کار برده می‌شوند (Karakus et al., 2010).

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و MnO -**

بسیاری از پژوهشگران از نسبت منگنز در مقابل آهن (Mn:Fe) که به نوعی نشان‌دهنده میزان تفریق و جدایش آهن از منگنز است، به عنوان عاملی کلیدی در تعیین منشأ ذخایر منگنز استفاده می‌کنند. به عنوان مثال این نسبت برای ذخایر منگنز شکل گرفته در محیط‌های دریاچه‌ای<sup>۱</sup> کمتر از یک (Mn:Fe < 1) است. ذخایر آب‌زاد دارای نسبتی برابر ۱ (Mn:Fe = 1) هستند و در ذخایر نوع سدکس<sup>۲</sup>، تغییرات نسبت منگنز به آهن از بیشتر از ۰/۱ تا کمتر از ۱۰ (Mn:Fe < 10) متغیر است (Nicholson et al., 1997). ذخایر گرمابی و یا ذخایر گرمابی همراه با فرایندهای آب‌زاد معمولاً نشان‌دهنده نسبت‌های بالای منگنز به آهن و یا آهن به منگنز (Mn >> Fe) یا (Fe >> Mn) است (Jach and Dudek, 2005; Mazhari et al., 2015). در واقع، نسبت بالای Mn:Fe نشان‌دهنده خروج سیال در دمای کم و میزان فوران اندک است. مقادیر MnO برای کانسار منگنز جون‌آباد از ۳۲/۱۸ تا ۷۳/۳۴ (میانگین ۵۱/۶) درصد وزنی متغیر بوده و مقادیر Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> دارای دامنه تغییراتی از ۰/۹۳ تا ۸/۸۳ (میانگین ۴/۵) درصد وزنی است. نسبت منگنز به آهن (Mn:Fe) در تمامی نمونه‌های کانسار از ۴/۸۷ تا ۷۸/۸۹ (میانگین ۱۷/۲) برای کانسار جون‌آباد متغیر است (جدول ۲). این موضوع بیانگر تفریق و جدایش نسبتاً شدید آهن و منگنز در طی حمل‌ونقل، در فعالیت‌های گرمابی این کانسار بوده و بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که کانسار منگنز مورد بررسی دارای زایش گرمابی زیردریایی است.

**SiO<sub>2</sub> و TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -**

حضور Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در رسوبات شیمیایی اولیه کانسارهای منگنز، به کانی‌های رسی موجود در رسوبات یادشده (Crerar et al., 1982; Sasmaz et al., 2013) و همچنین به ورود مواد آواری (تخریبی) به درون حوضه رسوبی نسبت داده می‌شود (Maynard, 2010; Polgari et al., 2012; Zarasvandi

et al., 2013). علاوه بر این، TiO<sub>2</sub> در محلول‌های گرمابی بی‌تحرك است و بنابراین به عنوان مبنای سنجش ورود مواد آواری قلمداد می‌شود (Sugisaki, 1984; Shah and Khan, 1999; Sasmaz et al., 2013).

مقادیر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در نمونه‌های کانسار از ۰/۰۸ تا ۴/۰۱ (میانگین ۱/۹) درصد وزنی برای کانسار جون‌آباد متغیر است. این مقدار برای TiO<sub>2</sub> نیز از ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ (میانگین ۰/۰۴) درصد وزنی متغیر است (جدول ۲). چنان‌که مشاهده می‌شود، نمونه‌های بررسی شده، غلظت پایینی از Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub> را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد غلظت‌های Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در نمونه‌های کانسار منگنز جون‌آباد، مربوط به محتوای کانی‌های رسی یا ورود مواد آواری (تخریبی) به درون حوضه رسوبی، تجزیه و تخریب فلدسپارها در طی حمل‌ونقل از خشکی به حوضه رسوبی و یا ممکن است از سنگ‌های میزبانی ناشی شده باشد که کانسنگ را همراهی می‌کنند. مقادیر پایین TiO<sub>2</sub> بیانگر ورود بسیار کم و محدود مواد آواری در طول کانسازایی است. علاوه بر این، همبستگی مثبت قوی میان غلظت‌های Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub> وجود دارد (شکل ۶) که نشان‌دهنده ورود این مواد از یک منشأ تقریباً یکسان به محیط رسوبی کانسار منگنز مورد بررسی است (Shah and Khan, 1999). برخلاف اکسیدهای Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub>، تقریباً تمامی نمونه‌های کانسار در کانسار مورد بررسی، از لحاظ SiO<sub>2</sub> غنی‌شدگی نشان می‌دهند. در نواحی دارای فعالیت‌های گرمابی غالب، اصولاً میزان SiO<sub>2</sub> نسبت به سازندهای رسوبی بیشتر است (Karakus et al., 2010). دامنه تغییرات SiO<sub>2</sub> در نمونه‌های کانسار از ۷/۱۶ تا ۴۶/۰۶ (میانگین ۲۳/۳) درصد وزنی برای کانسار منگنز جون‌آباد متغیر است. با این وجود، علاوه بر فرایندهای گرمابی، سایر عوامل مانند حضور شیل‌های قرمزرنگ حاوی سیلیس، اجزای دیاژنتیک و حتی مواد آواری نیز می‌توانند مقادیر Si را افزایش دهند (Toth, 1980; Polgari et al., 2012). نمودار دوتایی Al-Si (Toth, 1980; Peters, 1988) که به‌طور گسترده توسط پژوهشگران

مختلف (Nicholson, 1992a; Mucke et al., 1999; Karakus et al., 2010; Oksuz, 2011) برای تعیین منشأ کانسارهای منگنز به کار برده می‌شود، نشان‌دهنده ارتباط کانه‌زایی در منطقه مورد بررسی با فعالیت‌های گرمایی است (شکل ۷).

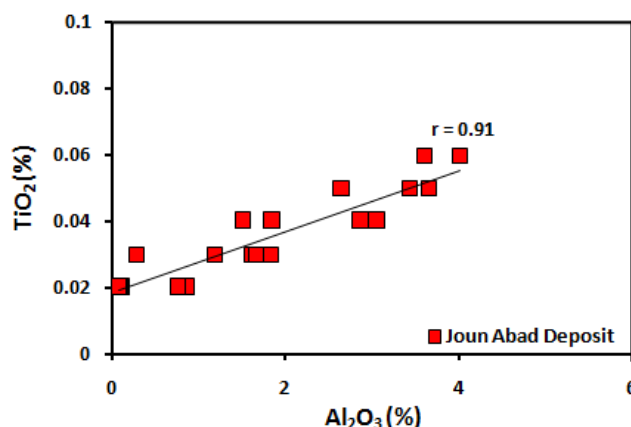
جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی عناصر اصلی نمونه‌های کانسار منگنز جون‌آباد به روش XRF (مقادیر برحسب درصد)

Table 2. Major element composition of Joun Abad manganese ore samples using XRF method (values are in percent)

| Sample                         | J <sub>1</sub> | J <sub>2</sub> | J <sub>3</sub> | J <sub>4</sub> | J <sub>5</sub> | J <sub>6</sub> | J <sub>7</sub> | J <sub>8</sub> | J <sub>9</sub> | J <sub>10</sub> | J <sub>11</sub> | J <sub>12</sub> |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 46.06          | 22.52          | 18.93          | 13.7           | 7.16           | 36.62          | 33.8           | 17.3           | 31.13          | 21.43           | 11.48           | 25.14           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.02           | 0.06           | 0.05           | 0.03           | 0.02           | 0.04           | 0.02           | 0.05           | 0.04           | 0.04            | 0.04            | 0.04            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.86           | 4.01           | 3.65           | 1.64           | 0.76           | 2.97           | 0.12           | 3.43           | 3.07           | 2.88            | 1.86            | 1.51            |
| FeO <sub>t</sub>               | 5.04           | 8.83           | 7.83           | 2.33           | 3.62           | 6.24           | 2.39           | 6.94           | 5.79           | 5.51            | 3.09            | 5.31            |
| MnO                            | 38             | 43.1           | 53.15          | 63.03          | 60.03          | 46.28          | 32.18          | 45.98          | 51.89          | 52.12           | 64.49           | 47.66           |
| MgO                            | 0.2            | 0.45           | 0.42           | 0.24           | 0.23           | 0.39           | 0.2            | 0.32           | 0.38           | 0.33            | 0.34            | 0.26            |
| CaO                            | 3              | 8.21           | 4.67           | 4.11           | 3.57           | 4.19           | 1.38           | 8.85           | 6.31           | 6.55            | 4.8             | 5.32            |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.06           | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.18           | 0.1            | 0.06           | 0.14           | 0.3            | 0.1             | 0.15            | 0.08            |
| K <sub>2</sub> O               | 0.02           | 0.14           | 0.25           | 0.1            | 0.04           | 0.04           | 0.03           | 0.05           | 0.01           | 0.04            | 0.02            | 0.05            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.04           | 0.09           | 0.03           | 0.05           | 0.11           | 0.05           | 0.05           | 0.06           | 0.05           | 0.05            | 0.13            | 0.11            |
| L.O.I                          | 3.41           | 8.18           | 4.67           | 11.87          | 21.82          | 2.98           | 23.81          | 14.03          | 0.58           | 4.44            | 12.6            | 13.05           |
| SUM                            | 96.71          | 95.69          | 93.75          | 97.20          | 97.54          | 99.90          | 94.04          | 97.15          | 99.55          | 93.49           | 99              | 99.53           |
| Mn:Fe                          | 7.51           | 4.87           | 6.76           | 26.97          | 16.54          | 7.39           | 13.40          | 6.61           | 8.93           | 9.43            | 20.81           | 8.94            |

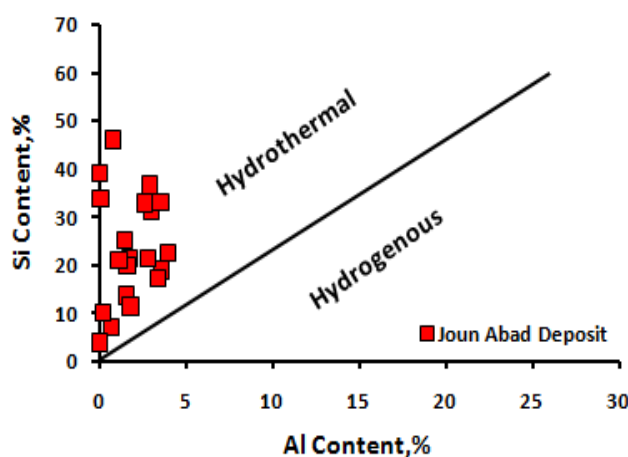
  

| Sample                         | J <sub>13</sub> | J <sub>14</sub> | J <sub>15</sub> | J <sub>16</sub> | J <sub>17</sub> | J <sub>18</sub> | J <sub>19</sub> | J <sub>20</sub> | Min.  | Max.   | Ave.  |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|--------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 21.31           | 33.16           | 3.89            | 32.91           | 19.9            | 21.02           | 10.22           | 39.14           | 7.16  | 46.06  | 23.34 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.03            | 0.06            | 0.02            | 0.05            | 0.03            | 0.03            | 0.03            | 0.02            | 0.02  | 0.06   | 0.04  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.84            | 3.6             | 0.11            | 2.66            | 1.66            | 1.19            | 0.29            | 0.08            | 0.08  | 4.01   | 1.91  |
| FeO <sub>t</sub>               | 2.58            | 8.03            | 0.93            | 6.72            | 2.56            | 1.99            | 2.74            | 1.87            | 0.93  | 8.83   | 4.52  |
| MnO                            | 66.4            | 51.68           | 73.34           | 35.84           | 51.72           | 55.8            | 67.19           | 32.89           | 32.18 | 73.34  | 51.64 |
| MgO                            | 0.31            | 0.46            | 0.21            | 0.3             | 0.27            | 0.3             | 0.27            | 0.22            | 0.2   | 0.46   | 0.31  |
| CaO                            | 4.04            | 1.58            | 2.39            | 5.86            | 4.93            | 4               | 2.36            | 1.51            | 1.38  | 8.85   | 4.38  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.11            | 0.07            | 0.16            | 0.53            | 0.29            | 0.13            | 0.12            | 0.04            | 0.04  | 0.53   | 0.15  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.03            | 0.04            | 0.03            | 0.02            | 0.06            | 0.02            | 0.04            | 0.02            | 0.01  | 0.25   | 0.05  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.11            | 0.09            | 0.03            | 0.06            | 0.05            | 0.04            | 0.05            | 0.07            | 0.03  | 0.13   | 0.07  |
| L.O.I                          | 2.15            | 1.02            | 16.49           | 14.5            | 16.34           | 15.98           | 15.63           | 23.3            | 1.02  | 23.3   | 13.1  |
| SUM                            | 98.91           | 99.79           | 97.6            | 99.45           | 97.81           | 100.5           | 98.94           | 99.16           | 97.6  | 100.55 | 99.06 |
| Mn:Fe                          | 25.59           | 6.41            | 78.89           | 5.32            | 20.13           | 27.88           | 24.43           | 17.57           | 4.87  | 78.89  | 17.22 |



شکل ۶. همبستگی مثبت قوی میان  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  در نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد

**Fig. 6.** Strong positive correlation between  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  for ore samples from Joun Abad Mn deposit



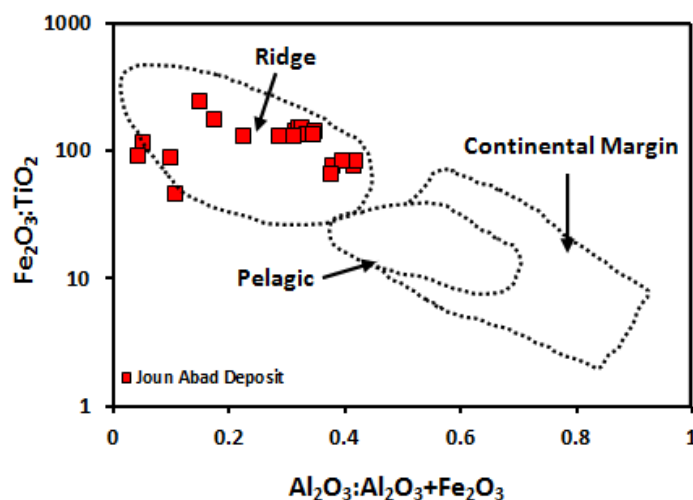
شکل ۷. نمودار دوتایی Si به Al (Toth, 1980; Peters, 1988) و موقعیت نمونه‌های کانه‌دار مربوط به کانسار منگنز جون‌آباد و خاستگاه آنها

**Fig. 7.** Binary diagram of Si vs. Al (Toth, 1980; Peters, 1988) and position of ore samples from the Joun Abad Mn deposit and their origin

است (Murray, 1994). در این شکل، محیط رسوبی پشته‌های میان اقیانوسی با نسبت‌های بالای  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2$  مشخص می‌شود. در مقابل محیط‌های حاشیه قاره‌ای با نسبت‌های بالای  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  مشخص شده‌اند. طبق شکل، نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد در محدوده محیط رسوبی کانه‌زایی پشته‌های میان اقیانوسی قرار گرفته‌اند که شاخص فعالیت‌های گرمابی در منطقه است.

#### $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ -

یکی از موارد کاربرد اکسیدهای اصلی، استفاده از آن برای تعیین محیط رسوبی کانه‌زایی است. از میان اکسیدهای اصلی،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  در رسوبات فلزدار نزدیک به منشأ پشته‌های میان اقیانوسی غنی‌شدگی دارد (Shah and Moon., 2007). لذا از این عنصر می‌توان به‌عنوان شاخصی از فعالیت‌های گرمابی در محل پشته‌های میان اقیانوسی استفاده کرد. شکل ۸، نشان‌دهنده نمودار  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2$  در مقابل  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$



شکل ۸. نمودار  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2$  در مقابل  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  (Murray, 1994) و موقعیت نمونه‌های کانه‌دار مربوط به کانسار منگنز جون‌آباد و محیط رسوبی کانه‌زایی آنها

**Fig. 8.** Diagram  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  (Murray, 1994) and position of ore samples from the Joun Abad Mn deposit and their mineralization of sedimentary environment

وابستگی و یا عدم وابستگی به دابیه‌ها مشخص شده است. این نمودار نشان می‌دهد، کانسار منگنز جون‌آباد از هوازدگی توالی‌های کانه‌زایی شده پیشین به‌دست نیامده است.

#### Ni و Co، Cu -

از میان عناصر کمیاب، نیکل، کبالت و مس بیشترین استفاده را در تبیین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی ذخایر منگنز دارند (Roy, 1997; Takahashi et al., 2007; Sabatino et al., 2011). به‌دلیل سرعت رسوب‌گذاری کم و در نتیجه زمان کافی برای جذب کاتیون‌ها در نهشته‌های آب‌زاد منگنز، این ذخایر نسبت به سایر ذخایر از لحاظ تمرکز عناصر فرعی، غنی‌شدگی بیشتری دارند (Heshmatbehzadi and Shahabpour, 2010). بسیاری از پژوهشگران، از میزان تمرکز مس، نیکل و کبالت به‌عنوان عاملی برای تفکیک فرایندهای مختلف دخیل در کانه‌زایی ذخایر منگنز استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال، میزان غنی‌شدگی مس، کبالت و نیکل در ذخایر گرمابی منگنز کمتر از یک درصد وزنی است و این میزان در ذخایر آب‌زاد بالاتر از یک درصد وزنی است (Jach and Dudek, 2005).

#### زمین‌شیمی عناصر فرعی

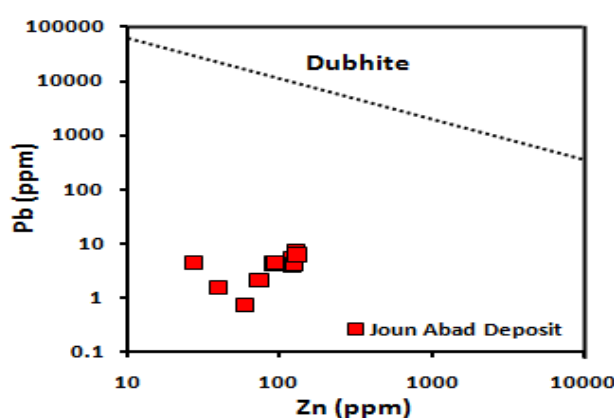
علاوه بر عناصر اصلی، تمرکز عناصر فرعی نیز به‌طور گسترده برای تفکیک فرایندهای تشکیل‌دهنده ذخایر منگنز مورد استفاده قرار می‌گیرند (Crerar et al., 1982; Shah and Khan, 1999). تمرکز عناصر فرعی برای لایه‌های منگنزدار در جدول ۳ نمایش داده شده است.

#### Pb-Zn - دابیه

این گروه از کانسارهای منگنز، مشتق‌شده از هوازدگی توالی‌های کانه‌زایی شده پیشین هستند. از مهم‌ترین ویژگی‌های این ذخایر، افزایش تدریجی میزان سرب و روی در آن است. از لحاظ زایشی، دابیه‌ها با کلاهک‌های آهنی<sup>۱</sup> قابل مقایسه بوده و به خاک‌های سیاه معروف هستند (Nicholson, 1992a). چنان‌که در شکل ۹ دیده می‌شود، بر اساس میزان سرب و روی موجود در کانسنگ می‌توان دابیه‌ها را از سایر گروه‌های زایشی تشخیص داد. در این نمودار از غلظت سرب و روی استفاده شده است. با استفاده از این دو مؤلفه نمی‌توان سایر گروه‌های زایشی را تفکیک کرد؛ لذا در این نمودار تنها

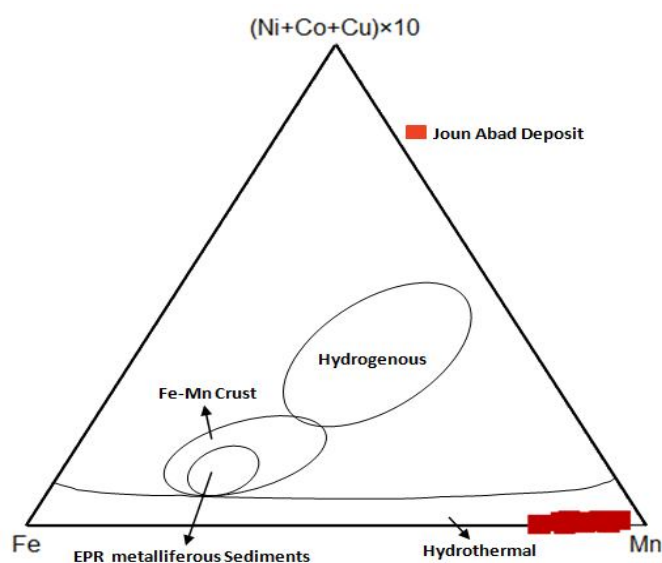
نمودار به‌طور گسترده توسط پژوهشگران متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (Shah and Khan, 1999; Shah and Moon, 2004; Jach and Dudek, 2005; Shah and Moon, 2007; Heshmatbehzadi and Shahabpour, 2010; Karakus et al., 2010; Oksuz, 2011). طبق شکل ۱۰، نمونه‌های کانه‌دار کانسار مورد بررسی در این نمودار، در محدوده ذخایر گرمابی قرار می‌گیرند.

نمونه‌های کانه‌دار منطقه مورد بررسی، مجموع مس، نیکل و کبالت از ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۶۳ (میانگین ۰/۰۳) درصد وزنی متغیر است (جدول ۳) که همخوان با نهشته‌های گرمابی است. بر اساس اطلاعات موجود در مورد ذخایر آب‌زاد و گرمابی منگنز، محدوده این ذخایر برای اولین بار در نموداری مثلی مشخص شد (Bonatti et al., 1972). سایر پژوهشگران، بخش‌های دیگری را به این نمودار اضافه کردند (Crerar et al., 1982). این



شکل ۹. نمودار Pb به Zn (Nicholson, 1992a) که بیانگر عدم وابستگی کانسار منگنز جون‌آباد به دابهیت‌هاست.

Fig. 9. Diagram of Pb vs. Zn (Nicholson, 1992a) showing the independence of Joun Abad Mn deposit from Dubhite.



شکل ۱۰. نمودار سه‌تایی  $(\text{Fe-Mn}-(\text{Co}+\text{Cu}+\text{Ni}) \times 10)$  (Bonatti et al., 1972; Crerar et al., 1982)، نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد در موقعیت ذخایر گرمابی قرار گرفته‌اند.

Fig. 10. Ternary diagram of  $\text{Fe-Mn}-(\text{Co}+\text{Cu}+\text{Ni}) \times 10$  (Bonatti et al., 1972; Crerar et al., 1982), Joun Abad Mn deposit ore samples are plotted in the field of hydrothermal deposits.

عناصر  $\text{Co}$ ،  $\text{Cu}$  و  $\text{Ni}$  بیانگر ورود اندک این عناصر از طریق فعالیت‌های گرمابی و در عوض اشتقاق بیشتر  $\text{Zn}$  را از منبع گرمابی نشان می‌دهد (Toth, 1980; Maanijou et al., 2015). نمونه‌های کانه‌دار کانسار مورد بررسی از قرابت بسیار بالایی با ذخایر نوع گرمابی برخوردار هستند.

#### Co-Ni-Zn -

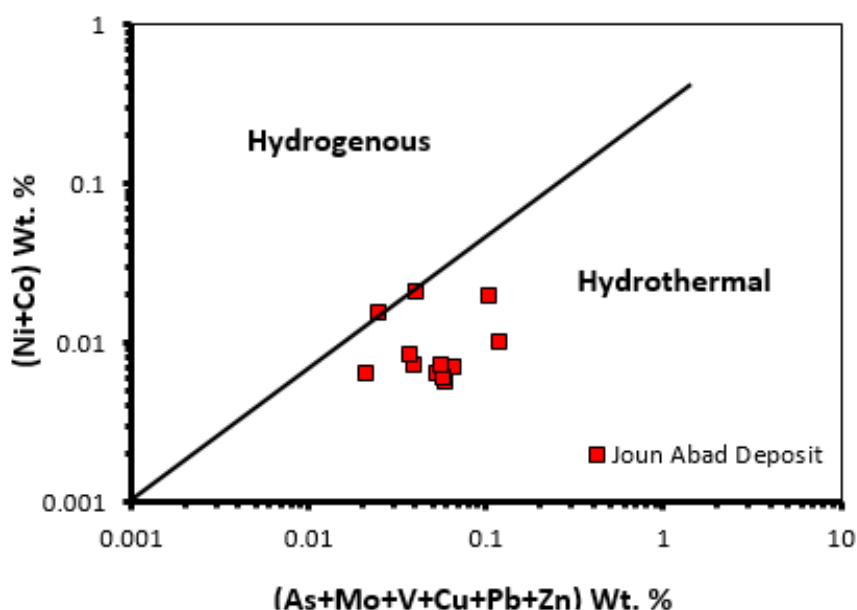
ذخایر آب‌زاد منگنز از ذخایر گرمابی با بررسی روابط بین عناصر  $\text{Zn}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Co}$  در یک نمودار سه‌تایی مشخص شده‌اند (Choi and Hariya, 1992). طبق بررسی‌های انجام‌شده، غلظت‌های پایین عناصر نیکل (۲۲-۹۰۰)، مس (۸-۴۵۰)، کبالت (۲-۷۵) و روی (۱۸-۱۰۷۰) مشخصه ذخایر منگنز گرمابی است. در کانسار مورد بررسی، غلظت‌های عناصر به ترتیب نیکل (۲۳-۱۹۸)، مس (۳۵-۵۳۱)، کبالت (۹/۷-۴۱/۵) و روی (۴-۲۷) ppm است؛ به طوری که در نمودار مزبور، اغلب نمونه‌های کانه‌دار در محدوده ذخایر گرمابی قرار می‌گیرند (شکل ۱۳).

#### As+Mo+V+Cu+Pb+Zn / Co+Ni -

این نمودار نخستین‌بار برای تفکیک ذخایر گرمابی و آب‌زاد توسط نیکلسون (Nicholson, 1990) به کار برده شده است. وی غنی‌شدگی در مجموعه عناصر  $\text{As}$ ،  $\text{Ba}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Li}$ ،  $\text{Mo}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Sb}$ ،  $\text{Sr}$  و  $\text{Zn}$  را نشانه ذخایر گرمابی دانسته و در عوض معتقد است، این ذخایر برخلاف ذخایر آب‌زاد از عناصر  $\text{Ni}$  و  $\text{Co}$  تهی شده‌اند. اغلب نمونه‌های کانه‌دار مربوط به کانسار مورد بررسی با توجه به نمودار (شکل ۱۱) از عناصر  $\text{As}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Mo}$ ،  $\text{Pb}$  و  $\text{Zn}$  غنی؛ اما از لحاظ عناصر  $\text{Ni}$  و  $\text{Co}$  تهی شده‌اند، در نتیجه در محدوده کانسارهای گرمابی قرار گرفته‌اند.

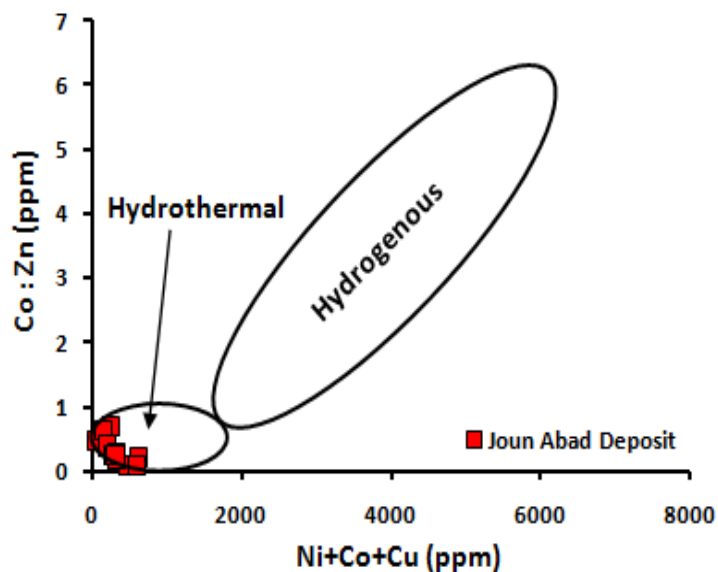
#### Co+Cu+Ni / Co:Zn -

این نمودار برای تفکیک ذخایر منگنز گرمابی از آب‌زاد مورد استفاده قرار گرفته است (Toth, 1980). چنان‌که در نمودار (شکل ۱۲) نشان داده شده است، ذخایر منگنز نوع آب‌زاد نسبت به ذخایر گرمابی، غنی‌شدگی بالاتری را در عناصر  $\text{Co}$ ،  $\text{Cu}$  و  $\text{Ni}$  نشان می‌دهند (Bonatti et al., 1972). مقادیر پایین



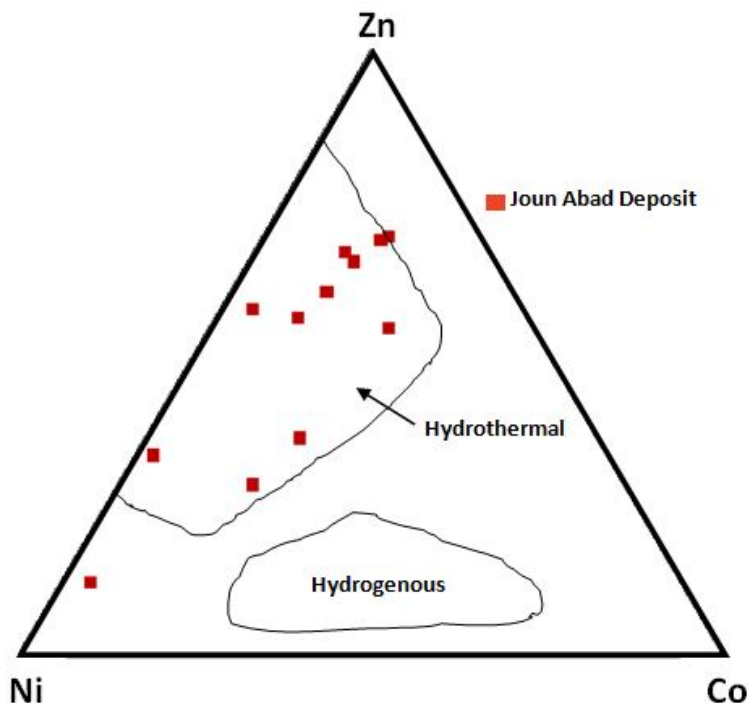
شکل ۱۱. نمودار دوتایی  $\text{Co}+\text{Ni}$  در مقابل  $\text{As}+\text{Mo}+\text{V}+\text{Cu}+\text{Pb}+\text{Zn}$  (Nicholson, 1990)، نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد در موقعیت ذخایر گرمابی قرار گرفته‌اند.

**Fig. 11.** Binary diagram of  $(\text{Co}+\text{Ni})-(\text{As}+\text{Mo}+\text{V}+\text{Cu}+\text{Pb}+\text{Zn})$  (Nicholson, 1990), Joun Abad Mn deposit ore samples are plotted in the field of hydrothermal deposits.



شکل ۱۲. نمودار دوتایی Co:Zn در مقابل Co+Cu+Ni (Toth, 1980)، نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد در محدوده ذخایر گرمایی قرار گرفته‌اند.

**Fig. 12.** Binary diagram of (Co:Zn)-(Ni+Co+Cu) (Toth, 1980), Joun Abad Mn deposit ore samples are plotted in the field of hydrothermal deposits.



شکل ۱۳. نمودار سه تایی Co-Ni-Zn (Choi and Hariya, 1992)، نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد در موقعیت ذخایر گرمایی قرار گرفته‌اند.

**Fig. 13.** Co-Ni-Zn ternary diagram (Choi and Hariya, 1992), Joun Abad Mn deposit ore samples are plotted in the field of hydrothermal deposits.

جدول ۳. ترکیب عناصر کمیاب نمونه‌های کانسار منگنز جون‌آباد به روش ICP-OES (مقادیر بر حسب ppm)

Table 3. Trace element composition of Joun Abad manganese ore samples using ICP-OES method (values are in ppm)

| Sample     | J <sub>1</sub> | J <sub>2</sub>  | J <sub>3</sub>  | J <sub>4</sub>  | J <sub>5</sub> | J <sub>6</sub> | J <sub>7</sub> | J <sub>8</sub> |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Pb         | 0.7            | 2               | 1.5             | 4.7             | 4.3            | 4.1            | 3.8            | 4.9            |
| Ba         | 298            | 454             | 626             | 1240            | 408            | 898            | 1630           | 2290           |
| Co         | 41.5           | 35.2            | 24.7            | 27.3            | 10.6           | 7.9            | 28.8           | 32.6           |
| Ga         | 10.6           | 12.3            | 8.07            | 18.9            | 2.74           | 10.2           | 14.3           | 19.8           |
| Hf         | 1.33           | 1.03            | 0.43            | 2.27            | 0.04           | 0.02           | 0.02           | 0.24           |
| Nb         | 0.9            | 0.8             | 0.5             | 0.4             | 1.1            | 0.5            | 0.5            | 0.8            |
| Rb         | 24.7           | 16.2            | 2.7             | 31.7            | 5.3            | 0.5            | 3.7            | 10.8           |
| Sr         | 76.3           | 85              | 684             | 1190            | 942            | 275            | 380            | 546            |
| Ta         | 0.33           | 0.32            | 0.5             | 1.26            | 1.23           | 0.38           | 0.35           | 0.8            |
| Th         | 0.37           | 0.18            | 0.02            | 0.23            | 0.04           | 0.02           | 0.02           | 0.63           |
| U          | 0.5            | 0.21            | 0.08            | 0.32            | 0.46           | 0.51           | 0.33           | 0.28           |
| V          | 32             | 68              | 153             | 236             | 197            | 72             | 7              | 47             |
| W          | 0.2            | 0.2             | 0.1             | 1.5             | 0.8            | 4.9            | 2.7            | 3.1            |
| Zr         | 19             | 23              | 10              | 50              | 1              | 1              | 1              | 9              |
| Y          | 11.8           | 16.5            | 13.4            | 42.6            | 5.44           | 8.95           | 15.7           | 12.5           |
| Mo         | 0.5            | 0.1             | 0.1             | 0.4             | 1              | 1.7            | 2.4            | 1              |
| Cu         | 110.4          | 9.35            | 102.4           | 531.4           | 10.8           | 420            | 200.8          | 283.7          |
| Zn         | 59.7           | 73.8            | 39.7            | 126             | 27.4           | 92.3           | 123            | 124            |
| Ni         | 113            | 28              | 47              | 74              | 198            | 62             | 54             | 23             |
| As         | 47             | 66              | 97              | 287             | 162            | 66.1           | 42.1           | 138            |
| Tl         | 0.3            | 0.2             | 0.1             | 0.3             | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.1            |
| Cs         | 1.4            | 0.8             | 0.1             | 0.7             | 0.1            | 0.1            | 0.1            | 0.1            |
| Be         | 0.2            | 0.3             | 0.3             | 1.1             | 0.2            | 0.5            | 0.5            | 1.2            |
| Ge         | 1.06           | 1.07            | 1.28            | 9.84            | 0.05           | 6.2            | 5.81           | 11.4           |
| Co:Zn      | 0.7            | 0.48            | 0.62            | 0.22            | 0.39           | 0.09           | 0.23           | 0.26           |
| Co:Ni      | 0.37           | 1.26            | 0.53            | 0.37            | 0.05           | 0.13           | 0.53           | 1.42           |
| (Co+Cu+Ni) | 264.9          | 72.55           | 174.1           | 632.7           | 219.4          | 489.9          | 283.6          | 339.3          |
| V:(V+Ni)   | 0.22           | 0.71            | 0.77            | 0.76            | 0.5            | 0.54           | 0.11           | 0.67           |
| Sample     | J <sub>9</sub> | J <sub>10</sub> | J <sub>11</sub> | J <sub>12</sub> | Min.           | Max.           | Ave.           |                |
| Pb         | 4              | 7               | 4.2             | 6               | 0.7            | 7              | 4              |                |
| Ba         | 2280           | 2170            | 896             | 2193            | 298            | 2290           | 1282           |                |
| Co         | 25             | 33              | 8               | 31              | 7.9            | 41.5           | 25.47          |                |
| Ga         | 14             | 17              | 11              | 16              | 2.74           | 19.8           | 12.91          |                |
| Hf         | 0.23           | 0.2             | 0.02            | 0.2             | 0.02           | 2.27           | 0.50           |                |
| Nb         | 0.6            | 0.7             | 0.5             | 0.7             | 0.4            | 1.1            | 0.67           |                |
| Rb         | 9              | 11              | 2.5             | 11              | 0.5            | 31.7           | 10.76          |                |
| Sr         | 950            | 860             | 1325            | 684             | 76.3           | 1325           | 666.44         |                |
| Ta         | 0.4            | 0.7             | 0.3             | 0.6             | 0.3            | 1.26           | 0.60           |                |
| Th         | 0.02           | 0.75            | 0.03            | 0.64            | 0.02           | 0.75           | 0.25           |                |
| U          | 0.3            | 0.45            | 0.51            | 0.41            | 0.08           | 0.51           | 0.36           |                |
| V          | 50             | 53              | 257             | 52              | 7              | 257            | 102            |                |
| W          | 4              | 4.5             | 4.3             | 4.5             | 0.1            | 4.9            | 2.57           |                |
| Zr         | 10             | 12              | 2               | 12              | 1              | 50             | 12.50          |                |
| Y          | 14             | 17              | 9               | 17              | 5.44           | 42.6           | 15.32          |                |
| Mo         | 1.5            | 2               | 1.9             | 1.7             | 0.1            | 2.4            | 1.19           |                |
| Cu         | 273            | 257             | 415             | 260             | 9.35           | 531.4          | 239.49         |                |
| Zn         | 125            | 130             | 95              | 131             | 27.4           | 131            | 95.58          |                |
| Ni         | 38             | 27              | 187             | 40              | 23             | 198            | 74.25          |                |
| As         | 78             | 123             | 284             | 119             | 42.1           | 287            | 125.77         |                |
| Tl         | 0.1            | 0.1             | 0.1             | 0.1             | 0.1            | 0.3            | 0.14           |                |
| Cs         | 0.1            | 0.1             | 0.1             | 0.1             | 0.1            | 1.4            | 0.32           |                |
| Be         | 1              | 1.5             | 1               | 1.3             | 0.2            | 1.5            | 0.76           |                |
| Ge         | 9              | 7               | 6.5             | 6               | 0.05           | 11.4           | 5.43           |                |
| Co:Zn      | 0.2            | 0.25            | 0.08            | 0.24            | 0.08           | 0.7            | 0.31           |                |
| Co:Ni      | 0.66           | 1.22            | 0.04            | 0.78            | 0.04           | 1.42           | 0.61           |                |
| (Co+Cu+Ni) | 336            | 317             | 610             | 331             | 72.55          | 632.7          | 339.20         |                |
| V:(V+Ni)   | 0.57           | 0.66            | 0.58            | 0.57            | 0.11           | 0.77           | 0.55           |                |

### زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی

نتایج آنالیز شیمیایی مربوط به عناصر نادر خاکی نمونه‌های کانسنکی کانسار منگنز مورد بررسی در جدول ۴ آمده است. ویژگی رایج ذخایر گرمابی منگنز، آنومالی منفی Ce و آنومالی مثبت Eu است. علت این امر طبیعت سیالات گرمابی است که اصولاً دارای میزان کمتری Ce هستند. به علت وجود فازهای پلاژیوکلاز در سنگ‌های بستر اقیانوس، سیال منشأ گرفته از شست‌وشوی این سنگ‌ها دارای آنومالی مثبت Eu است. اصولاً ذخایر متأثر از فرایندهای گرمابی، مخلوط گرمابی-آب‌زاد و ذخایر دیاژنتیک دارای محتوای REE کمتری نسبت به ذخایر آب‌زاد هستند. به عبارت دیگر می‌توان اظهار داشت که میزان غنی‌شدگی REE‌ها در کانسارهای آب‌زاد چندین برابر کانسارهای گرمابی است (Hein et al., 1990; Usui and Someya, 1997; Kato et al., 2011; Sasmaz et al., 2013)، به طوری که مجموع REE‌ها در کانسارهای گرمابی در حدود ۱۰۰ ppm است؛ ولی این مقدار در کانسارهای آب‌زاد نزدیک به ۱۰۰۰ ppm است (Maanijou et al., 2015).

### -آنومالی Ce

در این پژوهش برای محاسبه بی‌هنجاری Ce از فرمول  $Ce:Ce^* = Ce_n : (La_n \times Pr_n)^{1/2}$  (Kato et al., 2006). در اینجا n نشان‌دهنده Ce بهنجار شده با مقادیر کندریت (Evensen et al., 1978) است. آب دریا دارای بی‌هنجاری منفی Ce است (Douville et al., 1999) و لذا این انتظار وجود دارد که ذخایر آب‌زاد منگنز، این بی‌هنجاری منفی را از آب دریا به ارث ببرند. اما در عمل سرعت رسوب‌گذاری کم و همچنین سطح جذب بالای اکسیدهای منگنز، باعث ارتقای جذب Ce توسط منگنز و بی‌هنجاری مثبت Ce در نهشته‌های آب‌زاد می‌شود (Mills et al., 2001). علاوه بر این، در شرایطی که محیط غنی از اکسیژن باشد، اکسایش  $Ce^{3+}$  به  $Ce^{4+}$  و ته‌نشینی  $Ce^{4+}$  از محلول به صورت  $CeO_2$  صورت می‌گیرد (Chen et al., 2006) که این فرایند نیز باعث بی‌هنجاری مثبت و قوی Ce می‌شود. در ذخایر گرمابی

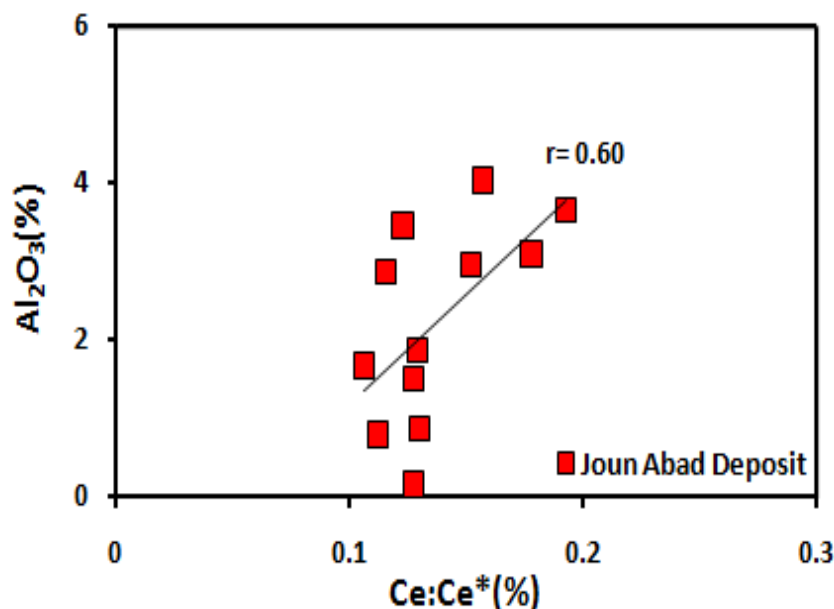
منگنز، به علت منشأگیری این سیالات از سنگ‌های مافیک بستر اقیانوس و با توجه به تهی‌شدگی شدید Ce در این سنگ‌ها، این انتظار وجود دارد که ذخایر گرمابی از لحاظ Ce تهی شده باشند و بازتاب‌دهنده آنومالی منفی Ce باشند (Sabatino et al., 2011). مقادیر بی‌هنجاری Ce برای نمونه‌های منطقه مورد بررسی در جدول ۴ آمده است. چنان‌که در این جدول دیده می‌شود، تمامی نمونه‌های کانسار در آب‌زاد دارای مقادیر منفی قوی Ce (۰/۱۱ تا ۰/۱۹ به طور میانگین ۰/۱۴ ppm) هستند که مشابه با ذخایر گرمابی درجه حرارت پایین است. همچنین این موضوع نشان‌دهنده تغییرات ناچیز شرایط فیزیکوشیمیایی محیط و نوسان اندک در جذب Ce توسط اکسیدهای منگنز است که به علت تغییرات سرعت رشد کم اکسیدهای منگنز است. در شکل ۱۴ نمودار دوتایی  $Al_2O_3$  و  $Ce:Ce^*$  نمایش داده شده است. این نمودار نشان‌دهنده همبستگی مثبت بی‌هنجاری Ce و ورود مواد آواری به درون حوضه رسوبی کانسار مورد بررسی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در منطقه مورد بررسی، ارتباطی مستقیم میان ورود مواد آواری، تغییرات اندک در سرعت رشد منگنز و در نتیجه نوسان بسیار کم در جذب Ce از محلول کانسار وجود دارد.

### - آنومالی Eu

همانند آنومالی Ce، برای محاسبه آنومالی Eu از فرمول  $Eu:Eu^* = Eu_n : (Sm_n \times Gd_n)^{1/2}$  (Kato et al., 2006) و نمونه‌ها با استفاده از مقادیر کندریت (Evensen et al., 1978) بهنجار شدند. عنصر Eu در حالت  $Eu^{2+}$  به صورت محلول و در حالت  $Eu^{3+}$  به صورت نامحلول است. به علت وجود فازهای پلاژیوکلازدار در سنگ‌های مافیک بستر اقیانوس و در نتیجه وجود Ca در این سنگ‌ها، این سنگ‌ها دارای عنصر Eu هستند. در نتیجه این انتظار وجود دارد که سیالات گرمابی منشأ گرفته از شست‌وشوی این سنگ‌ها دارای آنومالی مثبت Eu باشند. بررسی‌های انجام شده بر روی ذخایر منگنز گرمابی نشان

زیرزمینی با سنگ‌های آتشفشانی زیر لایه‌ای به علت دمای کم (Usui and Mita, 1995)، آلوده شدن و تأثیر گرفتن کانسار منگنز جون‌آباد از پوسته قاره‌ای و یا مشارکت رسوب‌گذاری در طی فرایند آب‌زدایی (Sun and McDonough, 1989; Oksuz, 2011; Sasmaz et al., 2013)، افزایش فاصله سیال گرمایی از دودکش گرمایی منشأ و در نتیجه جدایش تدریجی Eu از سیال گرمایی و یا رقیق‌شدگی شدید سیال گرمایی با آب دریا (Sabatino et al., 2011) نسبت داده شود.

می‌دهد، این ذخایر دارای آنومالی شدید مثبت Eu هستند (Hongo and Nozaki, 2001). با توجه به موارد مطرح‌شده در بخش زمین‌شیمی عناصر اصلی و فرعی می‌توان به وجود و تأثیر سیالات گرمایی منگنزدار در منطقه مورد بررسی پی‌برد. بنابراین با وجود سیالات گرمایی دخیل در کانه‌زایی انتظار می‌رود، نمونه‌های مورد بررسی دارای آنومالی مثبت Eu باشند؛ اما کلیه نمونه‌های کانه‌دار در کانسار جون‌آباد دارای آنومالی منفی Eu (۰/۲۳ تا ۰/۷۰، به‌طور میانگین ۰/۴۶ ppm) هستند (جدول ۴). علت این امر می‌تواند به تعامل ناکافی آب‌های



شکل ۱۴. همبستگی مثبت بین  $Al_2O_3$  و  $Ce:Ce^*$  در نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد

Fig. 14. Positive correlation between  $Al_2O_3$  and  $Ce:Ce^*$  for Joun Abad Mn deposit ore samples

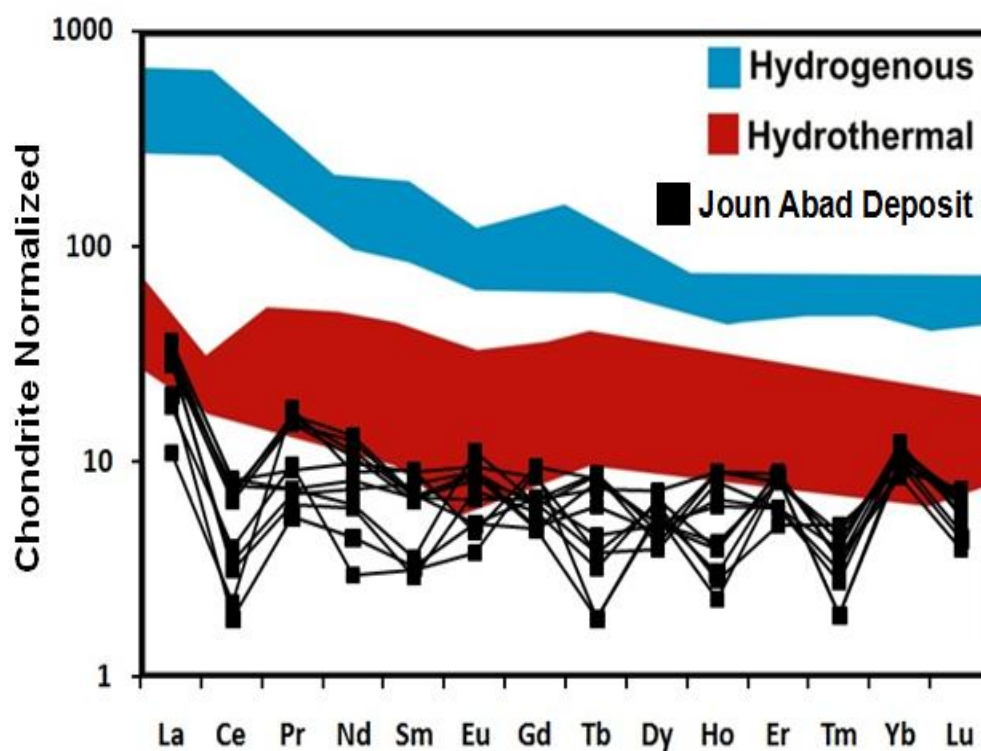
آب‌زاد، آنومالی مثبت Ce را نمایش می‌دهند؛ در حالی که کانسارهای گرمایی آنومالی منفی Ce را نشان می‌دهند. کلیه نمونه‌های کانه‌دار برداشت‌شده از کانسار منگنز مورد بررسی، شبیه کانسارهای گرمایی، آنومالی منفی Ce را نشان می‌دهند. عنصر Eu در تمام این نمونه‌ها به صورت آنومالی منفی جزئی وجود دارد (جدول ۴). به‌طور کلی چنین درک شده است که کانسارهای منگنز نوع گرمایی نسبت به کانسارهای آب‌زاد،

#### - الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی

الگوی پراکنش عناصر نادر خاکی کانسار منگنز جون‌آباد که با مقادیر کندریت (Evensen et al., 1978) بهنجار شده‌اند، با الگوهای کانسارهای منگنز نوع گرمایی و آب‌زاد مقایسه شدند (شکل ۱۵). نتایج بیانگر آن است که کانسارهای منگنز نوع آب‌زاد نسبت به کانسارهای گرمایی، غنی‌شدگی بیشتری را از عناصر نادر خاکی نشان می‌دهند. همچنین کانسارهای منگنز

مهم در شکل‌گیری کانسار مورد بررسی ایفا کرده‌اند و همچنین بیانگر غنی‌شدگی اولیه عناصر نادر خاکی سبک در طول شکل‌گیری کانسار به‌خصوص در فرایند اکسیدشدگی منگنز هستند (Jiancheng et al., 2006). این امر به‌علت پایداری نسبی کمپلکس‌های عناصر نادر خاکی سنگین نسبت به عناصر نادر خاکی سبک است که در نتیجه باعث تمرکز بیشتر عناصر نادر خاکی سبک در کانسار می‌شود (Ruhlin and Owen, 2009; Bau and Koschinsky, 1986).

دارای مقادیر بسیار کمتری از عناصر نادر خاکی هستند. مقادیر مجموع عناصر نادر خاکی<sup>۱</sup> نمونه‌های کانه‌دار در کانسار منگنز جون‌آباد از ۱۴/۰۴ تا ۲۶/۵۹ (میانگین ۲۱/۷) ppm متغیر است (جدول ۴). این مقادیر پایین مجموع عناصر نادر خاکی، قابل انطباق با کانسارهای منگنز گرمابی هستند (Xu Bao et al., 2008; Mazhari et al., 2015). نسبت مقادیر مجموع عناصر نادر خاکی سبک<sup>۲</sup> به عناصر نادر خاکی سنگین<sup>۳</sup> در کانسار منگنز جون‌آباد بین ۱/۹۰ تا ۴/۷۷ (میانگین ۳/۵) ppm است (جدول ۴). این مقادیر نشان می‌دهد، محلول‌های گرمابی نقش



شکل ۱۵. مقایسه الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی نمونه‌های کانه‌دار کانسار منگنز جون‌آباد با کانسارهای منگنز نوع گرمابی (Usui and Someya, 1997) و نوع آب‌زاد (Stackelberg, 1997)

**Fig. 15.** Comparison of distribution of rare earth elements the Joun Abad Mn deposit ore samples as well as hydrogenous (Stackelberg, 1997) and hydrothermal Mn deposits (Usui and Someya, 1997)

1.  $\Sigma$ REE
2.  $\Sigma$ LREE
3.  $\Sigma$ HREE

جدول ۴. نتایج آنالیز شیمیایی عناصر نادر خاکی نمونه‌های کانسار منگنز جون‌آباد به روش ICP-MS (مقادیر برحسب ppm)

**Table 4.** Rare earth element composition of Joun Abad manganese ore samples using ICP-MS method (values are in ppm)

| Sample                           | J <sub>1</sub> | J <sub>2</sub>  | J <sub>3</sub>  | J <sub>4</sub>  | J <sub>5</sub> | J <sub>6</sub> | J <sub>7</sub> | J <sub>8</sub> |
|----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| La                               | 7              | 8.84            | 6.85            | 2.7             | 8.15           | 4.39           | 7.43           | 7              |
| Ce                               | 2.18           | 5.18            | 4.96            | 1.4             | 4.39           | 2.53           | 2              | 4.19           |
| Pr                               | 0.68           | 0.88            | 0.72            | 1.7             | 1.58           | 0.92           | 0.61           | 1.45           |
| Nd                               | 3.5            | 4.64            | 3.84            | 4.2             | 6.2            | 1.41           | 2.88           | 5.93           |
| Sm                               | 1.22           | 1.37            | 1.04            | 1.39            | 1.08           | 0.48           | 0.45           | 1.04           |
| Eu                               | 0.52           | 0.55            | 0.39            | 0.27            | 0.3            | 0.22           | 0.42           | 0.47           |
| Gd                               | 1.27           | 1.72            | 1.35            | 1.92            | 1.39           | 1.87           | 1.2            | 1.36           |
| Tb                               | 0.32           | 0.14            | 0.33            | 0.31            | 0.17           | 0.07           | 0.12           | 0.28           |
| Dy                               | 1.04           | 1.61            | 1.19            | 1.31            | 1.29           | 1.41           | 1.7            | 1.87           |
| Ho                               | 0.51           | 0.16            | 0.51            | 0.24            | 0.22           | 0.13           | 0.22           | 0.51           |
| Er                               | 1.35           | 0.84            | 1.33            | 1.32            | 1.49           | 1.37           | 1.48           | 1.46           |
| Tm                               | 0.11           | 0.13            | 0.12            | 0.11            | 0.09           | 0.05           | 0.09           | 0.09           |
| Yb                               | 0.19           | 0.15            | 0.17            | 0.18            | 0.14           | 0.17           | 0.19           | 0.15           |
| Lu                               | 0.17           | 0.19            | 0.12            | 0.15            | 0.1            | 0.16           | 0.16           | 0.19           |
| Y                                | 11.8           | 16.5            | 13.4            | 14.6            | 15.44          | 8.95           | 15.7           | 12.5           |
| ΣREE                             | 20.06          | 26.4            | 22.92           | 17.2            | 26.59          | 15.18          | 18.95          | 25.99          |
| ΣLREE                            | 15.1           | 21.46           | 17.8            | 11.66           | 21.7           | 9.95           | 13.79          | 20.08          |
| ΣHREE                            | 4.96           | 4.94            | 5.12            | 5.54            | 4.89           | 5.23           | 5.16           | 5.91           |
| LREE:HREE                        | 3.04           | 4.34            | 3.48            | 2.10            | 4.44           | 1.90           | 2.67           | 3.40           |
| Ce:La                            | 0.31           | 0.59            | 0.72            | 0.52            | 0.54           | 0.58           | 0.27           | 0.60           |
| Y:Ho                             | 23.14          | 103.13          | 26.27           | 60.83           | 70.18          | 68.85          | 71.36          | 24.51          |
| Ce:Ce*                           | 0.13           | 0.16            | 0.19            | 0.11            | 0.11           | 0.15           | 0.13           | 0.12           |
| Eu:Eu*                           | 0.43           | 0.36            | 0.39            | 0.23            | 0.33           | 0.36           | 0.65           | 0.42           |
| La <sub>n</sub> :Nd <sub>n</sub> | 3.87           | 3.69            | 3.46            | 1.25            | 2.55           | 6.03           | 5              | 2.29           |
| Dy <sub>n</sub> :Yb <sub>n</sub> | 0.36           | 0.7             | 0.45            | 0.47            | 0.6            | 0.54           | 0.58           | 0.81           |
| La:Ce                            | 3.21           | 1.71            | 1.38            | 1.93            | 1.86           | 1.74           | 3.72           | 1.67           |
| Sample                           | J <sub>9</sub> | J <sub>10</sub> | J <sub>11</sub> | J <sub>12</sub> | Min.           | Max.           | Ave.           |                |
| La                               | 8.5            | 8               | 5               | 7.5             | 2.7            | 8.84           | 6.78           |                |
| Ce                               | 5.3            | 4.5             | 1.2             | 4.7             | 1.2            | 5.3            | 3.54           |                |
| Pr                               | 0.72           | 1.55            | 0.53            | 1.43            | 0.53           | 1.7            | 1.06           |                |
| Nd                               | 3              | 5.3             | 2.1             | 5               | 1.41           | 6.2            | 4.00           |                |
| Sm                               | 0.55           | 1.06            | 0.5             | 1               | 0.45           | 1.39           | 0.93           |                |
| Eu                               | 0.65           | 0.5             | 0.3             | 0.53            | 0.27           | 0.65           | 0.43           |                |
| Gd                               | 1.3            | 1               | 1               | 1.02            | 1              | 1.92           | 1.37           |                |
| Tb                               | 0.14           | 0.3             | 0.07            | 0.23            | 0.07           | 0.33           | 0.21           |                |
| Dy                               | 1              | 1.3             | 1.45            | 1.2             | 1              | 1.87           | 1.36           |                |
| Ho                               | 0.45           | 0.35            | 0.17            | 0.38            | 0.13           | 0.51           | 0.32           |                |
| Er                               | 1              | 1               | 1.4             | 1               | 0.84           | 1.49           | 1.25           |                |
| Tm                               | 0.1            | 0.07            | 0.05            | 0.08            | 0.05           | 0.13           | 0.09           |                |
| Yb                               | 0.2            | 0.19            | 0.16            | 0.18            | 0.14           | 0.2            | 0.17           |                |
| Lu                               | 0.14           | 0.17            | 0.11            | 0.18            | 0.1            | 0.19           | 0.15           |                |
| Y                                | 14             | 17              | 9               | 17              | 8.95           | 17             | 13.82          |                |
| ΣREE                             | 23.05          | 25.29           | 14.04           | 24.43           | 14.04          | 26.59          | 21.68          |                |
| ΣLREE                            | 18.72          | 20.91           | 9.63            | 20.16           | 9.63           | 21.7           | 16.75          |                |
| ΣHREE                            | 4.33           | 4.38            | 4.41            | 4.27            | 4.27           | 5.91           | 4.93           |                |
| LREE:HREE                        | 4.32           | 4.77            | 2.18            | 4.72            | 1.90           | 4.77           | 3.45           |                |
| Ce:La                            | 0.62           | 0.56            | 0.24            | 0.63            | 0.24           | 0.72           | 0.52           |                |
| Y:Ho                             | 31.11          | 48.57           | 52.94           | 44.74           | 23.14          | 103.13         | 52.14          |                |
| Ce:Ce*                           | 0.18           | 0.12            | 0.13            | 0.13            | 0.11           | 0.19           | 0.14           |                |
| Eu:Eu*                           | 0.7            | 0.51            | 0.57            | 0.53            | 0.23           | 0.7            | 0.46           |                |
| La <sub>n</sub> :Nd <sub>n</sub> | 5.49           | 2.92            | 4.61            | 2.91            | 1.25           | 6.03           | 3.67           |                |
| Dy <sub>n</sub> :Yb <sub>n</sub> | 0.32           | 0.44            | 0.59            | 0.43            | 0.32           | 0.81           | 0.52           |                |
| La:Ce                            | 1.60           | 1.78            | 4.17            | 1.60            | 1.38           | 4.17           | 2.20           |                |

### نتیجه‌گیری

کانسار منگنز جون آباد درون سازندهای رسوبی-آتشفشانی ائوسن واقع شده است. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده، سنگ‌های موجود در منطقه اغلب شامل شیل‌های پلیتی، بازالت، شیل‌های قرمز رنگ به عنوان میزبان کانه‌زایی منگنز، ماسه‌سنگ، رسوبات آبرفتی کهن و جوان و آبرفت‌های در حال تشکیل در بستر رودخانه‌های فعلی است. بررسی‌های زمین‌شیمیایی که برای تشخیص منشأ ماده معدنی بر روی ترکیب کانسنگ منگنز جون آباد انجام شد، شامل بررسی عناصر اصلی، عناصر کمیاب و عناصر نادر خاکی است. در بررسی ژئوشیمی عناصر اصلی، نسبت‌های  $\text{Si:Al}$ ،  $\text{Mn:Fe}$  و وجود ضرایب همبستگی مثبت بین  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان فرایندهای گرمابی در محیطی کم‌عمق همراه با ورود مواد آواری خاکی از جنس مافیک به درون حوضه رسوبی در محل شکل‌گیری کانسار است. نمودارهای عناصر کمیاب همگی بر محتوای پایین کانسنگ از عناصری همچون  $\text{Co}$ ،  $\text{Ni}$

و  $\text{Cu}$  دلالت دارند که نمایانگر قرارگیری کانسار مورد بررسی در نمودار عناصر کمیاب در محدوده کانسارهای با منشأ گرمابی است. همچنین مقایسه الگوی توزیع عناصر نادر خاکی منگنز کانسار جون آباد با انواع کانسارهای منگنز آب‌زاد و گرمابی نشان می‌دهد که الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در کانسار جون آباد شباهت بیشتری به کانسارهای گرمابی دارد. بر اساس شواهد زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی می‌توان نتیجه گرفت که هر دو شرایط رسوبی و گرمابی موجب تشکیل کانسار منگنز جون آباد شده‌اند؛ بدین صورت که بر اثر فعالیت‌های گرمابی زیر دریایی (برون‌دمی)، عناصر کانسارساز همراه با سیلیس وارد حوضه رسوبی و بخش‌های احیایی شده و به وسیله جریان‌های بالارو به مناطق کم‌عمق آمده و در آنجا در شرایط آرام و به‌طور هم‌زمان با رسوبات ته‌نشست کرده‌اند. با این وصف، کانسار جون آباد می‌تواند در رده کانسارهای منگنز رسوبی-آتشفشانی قرار داده شود.

### References

- Bau, M. and Koschinsky, A., 2009. Oxidative scavenging of cerium on hydrous Fe oxide: Evidence from the distribution of rare earth elements and yttrium between Fe oxides and Mn oxides in hydrogenetic ferromanganese crusts. *Geochemical Journal*, 43(1): 37–47.
- Bonatti, E., Kraemer, T. and Rydel, H., 1972. Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. In: D.R. Horn (Editor), *Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor*. National Science Foundation, Washington DC, pp. 149–166.
- Chen, D., Qing, H., Yan, X. and Li, H., 2006. Hydrothermal venting and basin evolution (Devonian, South China): constraints from rare earth element geochemistry of chert. *Sedimentary Geology*, 183(3–4): 203–216.
- Choi, J.H. and Hariya, Y., 1992. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in the Tokora Belt, northeastern Hokkaido, Japan. *Economic Geology*, 87(5): 1265–1274.
- Crerar, D.A., Namson, J., Chyi, M.S., Williams, L. and Feigenson, M.D., 1982. Manganiferous cherts of the Franciscan assemblage: I. General geology, ancient and modern analogues, and implications for the hydrothermal convection at oceanic spreading centers. *Economic Geology*, 77(3): 519–540.
- Douville, E., Bienvenu, P., Charlou, J.L., Donval, J.P., Fouquet, Y., Appriou, P. and Gamo, T., 1999. Yttrium and rare earth elements in fluids from deep-sea hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(5): 627–643.
- Evensen, M.N., Hamilton, P. and O’Nions, R.K., 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8): 1199–1212.
- Hein, J.R., Gibbs, A.E., Clague, D. and Torresan, M., 1996. Hydrothermal mineralization along

- submarine rift zones, Hawaii. *Marine Georesources & Geotechnology*, 14(2): 177–203.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Halbach, P., Manheim, F.T., Bau, M., Kang, J.K. and Lubick, N., 1997. Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific. In: K. Nicholson, J.R. Hein, B. Buhn, and S. Dasgupta, (Editors), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 123–138.
- Hein, J.R., Schulz, M.S. and Kang, J.K., 1990. Insular and submarine ferromanganese mineralization of the Tonga-Lau region. *Marine Mining*, 9(3): 305–354.
- Hein, J.R., Yeh, H.W., Gunn, S.H., Gibbs, A.E. and Wang, C.H., 1994. Composition and origin of hydrothermal iron stones from central Pacific seamounts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(1): 179–189.
- Heshmatbehzadi, K. and Shahabpour, J., 2010. Metallogeny of manganese and ferro manganese ores in Baft ophiolitic Mélange, Kerman, Iran. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(2): 302–313.
- Hewett, D.F. and Fleischer, M., 1960. Deposits of the manganese oxides. *Economic Geology*, 55(1): 1–55.
- Hongo, Y. and Nozaki, Y., 2001. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits and Calyptogena shell from the Iheya Ridge vent field, Okinawa Trough. *Geochemical Journal*, 35(5): 347–354.
- Ingram, B.L., Hein, J.R. and Farmer, G.L., 1990. Age determinations and growth rates of Pacific ferromanganese deposits using strontium isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(6): 1709–1721.
- Jach, R. and Dudek, T., 2005. Origin of a Toarcian manganese carbonate: silicate deposit from the Krizna unit, Tatra Mountains, Poland. *Chemical Geology*, 224(1-3): 136–152.
- Jiancheng, X., Xiaoyong, Y., Jianguo, D. and Wei, X., 2006. Geochemical characteristics of sedimentary manganese deposit of Guichi, Anhui Province, China. *Journal of Rare Earths*, 24(3): 374–380.
- Karakus, A., Yavuz, B. and Koc, S., 2010. Mineralogy and major-trace element geochemistry of the Haymana manganese mineralizations, Ankara, Turkey. *Geochemistry International*, 48(10): 1014–1027.
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Toda, R., Nakashima, T. and Iwamori, H., 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, 4(8): 535–539.
- Kato, Y., Yamaguchi, K.E. and Ohmoto, H., 2006. Rare earth elements in Precambrian banded iron formations: secular change of Ce and Eu anomalies and evolution of atmospheric oxygen. *Geological Society of America Memoirs*, Denver, pp. 269–289.
- Klinkhammer, G.P., Heggie, D.T. and Graham, D.W., 1982. Metal diagenesis in oxic marine sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 61(2): 211–219.
- Kuhn, T., Bau, M., Blum, N. and Halbach, P., 1998. Origin of negative Ce anomalies in mixed hydrothermal-hydrogenetic Fe-Mn crusts from the Central Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1–4): 207–220.
- Maanijou, M., Nasiri, A., Aliani, F., Mostaghimi, M., Gholipour, M. and Maghsoodi, A., 2015. The study of major, trace and rare earth elements geochemistry in Shahrestanak Mn deposit, south of Qom: Implications for genesis. *Journal of Economic Geology*, 7(1): 1–21. (in Persian with English abstract)
- Maynard, J.B., 2010. The chemistry of manganese ores through time: a signal of increasing diversity of earth-surface environments. *Economic Geology*, 105(3): 535–552.
- Mazhari, N., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Ghaderi, M., 2015. Geology, mineralogy and geochemistry of Ferezh ferromanganese anomaly, east of Sangan mines complex, NE Iran. *Journal of Economic Geology*, 7(1): 23–37. (in Persian with English abstract)
- Mehrpour, M.R. and Padyar, M., 1984. Geological map of Taftan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Mills, R.A., Wells, D.N. and Roberts, S., 2001. Genesis of ferromanganese crusts from the TAG hydrothermal field. *Chemical Geology*, 176(1–4): 283–293.
- Mucke, A., Adjimah, K. and Annor, A., 1999. Mineralogy, petrography, geochemistry and genesis of the Paleoproterozoic Birimian

- manganese-formation of Nsuta/Ghana. *Mineralium Deposita*, 34(3): 297–311.
- Murray, R.W., 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications. *Sedimentary Geology*, 90(3–4): 213–232.
- Nicholson, K., 1990. Stratiform manganese mineralization near Inverness, Scotland: a Devonian sub lacustrine hot-spring deposit? *Mineralium Deposita*, 25(2):126–131.
- Nicholson, K., 1992a. Genetic types of manganese oxide deposits in Scotland: Indicators of paleo-ocean-spreading rate and a Devonian geochemical mobility boundary. *Economic Geology*, 87(5): 1301–1309.
- Nicholson, K., 1992b. Contrasting mineralogical-geochemical signatures of manganese oxides: Guides to metallogenesis. *Economic Geology*, 87(5):1253–1264.
- Nicholson, K., Nayak, V.K. and Nanda, J.K., 1997. Manganese ores of the Ghorajhor Monmunda area, Sundergarh District, Orissa, India: geochemical evidence for a mixed Mn source. In: K. Nicholson, J.R. Hein, B. Buhn and S. Dasgupta (Editors), *Manganese mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 117–121.
- Oksuz, N., 2011. Geochemical characteristics of the Eymir (Sorgun-Yozgat) manganese deposits, Turkey. *Journal of Rare Earths*, 29 (3): 287–296.
- Peters, T., 1988. Geochemistry of manganese-bearing cherts associated with Alpine ophiolites and the Hawasina formations in Oman. *Marine Geology*, 84(3–4): 229–238.
- Polgari, M., Hein, J.R., Vigh, T., Szabo-Drubina, M., Forizs, I., Biro, L., Muller, A. and Toth, A.L., 2012. Microbial processes and the origin of the Urkut manganese deposit, Hungary. *Ore Geology Reviews*, 47: 87–109.
- Roy, S., 1992. Environment and processes of manganese deposition. *Economic Geology*, 87(5): 1218–1236.
- Roy, S., 1997. Genetic diversity of manganese deposition in the terrestrial geological record. In: K. Nicholson, J.R. Hein, B. Buhn, and S. Dasgupta, (Editors), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 5–27.
- Ruhlin, D.E. and Owen, R.M., 1986. The rare earth element geochemistry of hydrothermal sediments from the East Pacific Rise: examination of a seawater scavenging mechanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(3): 393–400.
- Sabatino, N., Neri, R., Bellanca, A., Jenkyns, H.C., Masetti, D. and Scopelliti, G., 2011. Petrography and high-resolution geochemical records of Lower Jurassic manganese rich deposits from Monte Mangart, Julian Alps. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(1–2): 97–109.
- Sasmaz, A., Turkyilmaz, B., Ozturk, N., Yavuz, F. and Kumral, M., 2013. Geology and geochemistry of Middle Eocene Maden complex ferromanganese deposits from the Elazığ–Malatya region, eastern Turkey. *Ore Geology Reviews*, 56: 352–372.
- Shah, M.T. and Khan, A., 1999. Geochemistry and origin of Mn deposits in the Waziristan ophiolite complex, north Waziristan, Pakistan. *Mineralium Deposita*, 34(7): 697–704.
- Shah, M.T. and Moon, C.J., 2004. Mineralogy, geochemistry and genesis of the ferromanganese ores from the Hazara area, NW Himalayas, northern Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(1):1–15.
- Shah, M.T. and Moon, C.J., 2007. Manganese and ferromanganese ores from different tectonic settings in the NW Himalayas, Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2–3): 455–465.
- Stackelberg, V., 1997. Growth history of manganese nodules and crusts of the Peru Basin. In: K. Nicholson, J.R. Hein, B. Buhn, and S. Dasgupta (Editors), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 153–176.
- Sugisaki, R., 1984. Relation between chemical composition and sedimentation rate of Pacific Ocean floor sediments deposited since the middle Cretaceous: basic evidence for chemical constraints on depositional environments of ancient sediments. *The Journal of Geology*, 92(3): 235–259.

- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 313–345.
- Takahashi, Y., Manceau, A., Geoffroy, N., Marcus, M.A. and Usui, A., 2007. Chemical and structural control of the partitioning of Co, Ce and Pb in marine ferromanganese oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(4): 984–1008.
- Toth, J.R., 1980. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron. *Geological Society of America Bulletin*, 91(1): 44–54.
- Usui, A. and Mita, N., 1995. Geochemistry and mineralogy of a modern buserite deposit from a hot spring in Hokkaido, Japan. *Clays and Clay Minerals*, 43(1): 116–127.
- Usui, A. and Someya, M., 1997. Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the Northwest Pacific. In: K. Nicholson, J.R. Hein, B. Buhn, and S. Dasgupta (Editors), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 177–198.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Xu Bao, S., Yang Zhou, H., Tong Peng, X., Wu Ji, F. and Qiang Yao, H., 2008. Geochemistry of REE and yttrium in hydrothermal fluids from the Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge. *Geochemical Journal*, 42(4): 359–370.
- Yarahmadzahi, H., Vachard, D. and Dibadin, B., 2016. Smaller foraminifers from the Lower Permian Emarat Formation, East of Firuzkuh (Central Alborz, Iran). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 122(3): 103–118.
- Zarasvandi, A., Lentz, D., Rezaei, M. and Pourkaseb, H., 2013. Genesis of the Nasirabad manganese occurrence, Fars province, Iran: Geochemical evidences. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 73(4): 495–508.



## Geochemistry of the Joun Abad manganese deposit, north Khash, Sistan and Baluchestan province

Mahmoudreza Rahmatian<sup>1\*</sup>, Mohammad Lotfi<sup>1&2</sup> and Majid Ghaderi<sup>3</sup>

1) Department of Geology, Faculty of Science, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2) Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran

3) Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Submitted: Dec. 30, 2015

Accepted: Dec. 23, 2017

**Keywords:** *Manganese, Hydrothermal, Geochemistry, Joun Abad, Khash*

### Introduction

Manganese deposits are classified as hydrogenous, diagenetic and hydrothermal deposits based on their mineralogy, chemical composition, and tectonic setting (Hein et al., 1997). Hydrogenous manganese deposits have slowly precipitated from seawater (2-10 mm/Myr) (Ingram et al., 1990). These deposits contain iron and are poor in manganese oxide. The Mn:Fe ratio is ~1 and Ni and Cu are represented by high concentrations (>3000 ppm) (Hein et al., 1997; Usui and Someya, 1997). Diagenetic manganese deposits occur as nodules and have precipitated from hydrothermal solutions or pore water within altered sediments (Klinkhammer et al., 1982). These deposits are usually related to organic matter oxidation and formation of Mn carbonate minerals (Polgari et al., 2012). Hydrothermal manganese deposits have directly precipitated from low-temperature hydrothermal solutions (Hein et al., 1997; Ingram et al., 1990). These deposits are generally laminated and stratabound or occur as irregular bodies and epithermal veins (Hein et al., 1997). Diagenetic and hydrothermal deposits are characterized by high Mn:Fe contents and low trace metal concentrations (Hein et al., 1994; Hein et al., 1996). Although there are similarities between these two deposit types, they are mostly distinguished by their morphologic, tectonic and growth rates (Kuhn et al., 1998). The Joun Abad manganese deposit is located 16 km southeast of the Joun Abad village, 72 km north of the city of Khash in the eastern longitude of 61°

06' 0.7" and the northern latitude of 28° 51' 2.3". This zoning is structural-sedimentary that is located in the middle part of the flysch zone of Eastern Iran. In this paper, major, trace and rare earth element compositions of ores have been used as an approach to determine the conditions of ore formation.

### Materials and methods

Twenty representative ore samples (~450 g) were selected from the Joun Abad manganese deposit. Geochemical analyses were made of samples taken from different surface mineral outcrops at various locations. Crushed and grounded ores (under 200 mesh) were analyzed at the Kansaran Binaloud Laboratories, Tehran, Iran. Major oxide and trace element contents were determined by X-Ray Fluorescence (XRF) and Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES), respectively, and the REEs were analyzed using the Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) method.

### Discussion and results

The Joun Abad manganese deposit is located 16 km southeast of the Joun Abad village, north of the city of Khash, and with respect to structural-sedimentary zoning in the middle part of the flysch zone of Eastern Iran. The host rocks of manganese layers are red shale, manganese mineralization is visible on the upper parts, as interlayers and/or contamination. The geometry of the ore mineral is in layered form and it is often

\*Corresponding authors Email: rahmatian60@gmail.com

conformable with units including red shales. The chemistry of the major elements, Mn:Fe and Si:Al ratios and the positive correlation coefficients between  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  indicate that they were affected by hydrothermal processes in a shallow environment together with entering mafic clastic materials in sedimentary basin where the ore formed. All trace element diagrams show low contents of elements such as Ni, Co and Cu in the manganese ores. The deposits of the study area in these diagrams plot in the field of hydrothermal deposits. Co:Ni, Co:Zn, LREE > HREE contents and total REE and negative Ce anomalies also indicate the role of ore-bearing hydrothermal fluid in the deposit. REE distribution patterns of the deposit are quite similar to those of hydrothermal deposits.

## References

- Hein, J.R., Gibbs, A.E., Clague, D. and Torresan, M., 1996. Hydrothermal mineralization along submarine rift zones, Hawaii. *Marine Georesources & Geotechnology*, 14(2): 177–203.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Halbach, P., Manheim, F.T., Bau, M., Kang, J.K. and Lubick, N., 1997. Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific. In: K. Nicholson, J.R. Hein, B. Buhn, and S. Dasgupta, (Editors), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 123–138.
- Hein, J.R., Yeh, H.W., Gunn, S.H., Gibbs, A.E. and Wang, C.H., 1994. Composition and origin of hydrothermal iron stones from central Pacific seamounts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(1): 179–189.
- Ingram, B.L., Hein, J.R. and Farmer, G.L., 1990. Age determinations and growth rates of Pacific ferromanganese deposits using strontium isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(6):1709–1721.
- Klinkhammer, G.P., Heggie, D.T. and Graham, D.W., 1982. Metal diagenesis in oxic marine sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 61(2): 211–219.
- Kuhn, T., Bau, M., Blum, N. and Halbach, P., 1998. Origin of negative Ce anomalies in mixed hydrothermal-hydrogenetic Fe-Mn crusts from the Central Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1–4): 207–220.
- Polgari, M., Hein, J.R., Vigh, T., Szabo-Drubina, M., Forizs, I., Biro, L., Muller, A. and Toth, A.L., 2012. Microbial processes and the origin of the Urkut manganese deposit, Hungary. *Ore Geology Reviews*, 47: 87–109.
- Usui, A. and Someya, M., 1997. Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the Northwest Pacific. In: K. Nicholson, J.R. Hein, B. Buhn, and S. Dasgupta (Editors), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 177–198.