

GemTOF: یک روش انقلابی برای شناسایی اصالت و خاستگاه گوهرها

زهرا مختاری^۱، فاطمه تقی زاده^{۲*}

- ۱- استادیار گروه فناوری فرآورده های طبیعی و مواد معدنی، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه نیشابور
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فناوری فرآورده های طبیعی و مواد معدنی، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه نیشابور

چکیده

در دنیای امروز گوهرشناسی، پاسخ به سوالات مهمی مانند این گوهر از کجا آمده؟ اصل است یا تقلبی؟ و آیا بهسازی شیمیایی روی آن انجام شده؟ نیازمند ابزارهای بسیار پیشرفته است GemTOF. جدیدترین و قدرتمندترین این ابزارهاست. این دستگاه با تاباندن یک پرتو لیزر بسیار باریک به سطح گوهر، در کسری از ثانیه تقریباً تمام عناصر شیمیایی موجود در آن را شناسایی و اندازه‌گیری می‌کند، بدون اینکه کوچک‌ترین آسیبی به زیبایی یا ارزش گوهر وارد کند. در این مقاله، پس از معرفی این فناوری، هفت کاربرد اصلی آن در گوهرشناسی به طور جداگانه شرح داده شده و نشان می‌دهیم که GemTOF چگونه می‌تواند برای شناسایی خاستگاه فیروزه های معروف جهان، تشخیص تقلبی بودن و مطالعه علمی رنگ این گوهرسنگ به کار رود.

کلیدواژه‌ها: گوهرشناسی، دستگاه GemTOF، تشخیص خاستگاه، فیروزه، عناصر شیمیایی

"GemTOF is a revolutionary method for identifying the authenticity and origin of gemstones."

Zahra Mokhtari¹, Fatemeh Taghizadeh¹

1. Department of Natural Products Technology and Mineral Processing, Faculty of New Technologies, University of Nishabur

Abstract

In modern gemology, answering key questions such as "Where is this gem from?", "Is it genuine or fake?", and "Has it been chemically treated?" requires highly advanced tools. GemTOF is the latest and most powerful of these tools. By directing an extremely fine laser beam onto the surface of the gem, this device identifies and measures nearly all chemical elements present within it in a fraction of a second—without causing any damage to the gem's beauty or value. In this article, after introducing this technology, its seven main applications in gemology are separately explained, demonstrating how GemTOF can be used to identify the origin of the world's famous turquoises, detect imitations, and conduct scientific studies on the color of this precious gemstone.

Keywords: Gemology, GemTOF, Origin determination, Turquoise, Chemical elements

۱- مقدمه: گوهرشناسی در عصر فناوری‌های نوین

تشخیص گوهرسنگ‌ها سال‌ها تنها با چشم، ذره‌بین و اندازه‌گیری خواص ساده‌ای مانند چگالی و رنگ انجام می‌شد. اما امروزه با پیشرفت روش‌های ساخت گوهرهای مصنوعی یا تکنیک‌های پیچیده برای تغییر رنگ و پایداری سنگ‌های طبیعی، نیاز به روش‌های علمی دقیق‌تر بیش از پیش احساس می‌شود. تاکنون دستگاه‌هایی مانند میکروسکوپ‌های پیشرفته و دستگاه‌های پرتو ایکس کمک زیادی کرده‌اند، اما یک محدودیت بزرگ دارند: آن‌ها یا نمی‌توانند تمام عناصر موجود در سنگ را به طور همزمان بررسی کنند، یا برای این کار به نمونه‌برداری زیادی نیاز دارند.

اینجاست که GemTOF بازی را تغییر می‌دهد. تصور کنید بتوانید با یک «عکس‌برداری شیمیایی» فوری، تمام مواد تشکیل‌دهنده یک گوهر را ببینید؛ از عناصر اصلی گرفته تا عناصر بسیار نادر که تنها چند اتم از آن‌ها در کل سنگ وجود دارد. این دقیقاً کاری است که GemTOF انجام می‌دهد. این دستگاه ترکیب شیمیایی منحصربه‌فرد هر گوهر را - که مانند «انگشت شیمیایی» آن است - آشکار می‌کند. این اثر انگشت، کلید پاسخ به بسیاری از سوالات مهم در گوهرشناسی است.

۲- GemTOF چیست و چگونه کار می‌کند؟

Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Time-Of-Flight Mass Spectrometry (LA-ICP-TOF-MS) در واقع یک دستگاه طیف‌سنج جرمی بسیار پیشرفته است که برای تحلیل گوهرها بهینه‌سازی شده است (شکل ۱). کار آن را می‌توان به سه مرحله ساده تقسیم کرد:

۱- نمونه‌برداری با لیزر (لیزر ابلیشن): یک پرتو لیزر بسیار دقیق و کم‌انرژی، برای چند میلی‌ثانیه روی نقطه‌ای بسیار کوچک از سطح گوهر (معمولاً در قسمت کمر بند یا پشت سنگ که دیده نمی‌شود) متمرکز می‌شود. این لیزر به اندازه‌ای ظریف عمل می‌کند که پس از کار، هیچ خراش یا حفره قابل مشاهده‌ای باقی نمی‌گذارد. انرژی لیزر، مقدار بسیار ناچیزی از ماده را از سطح سنگ بلند می‌کند و به ابر ریزدیزی از ذرات تبدیل می‌نماید.

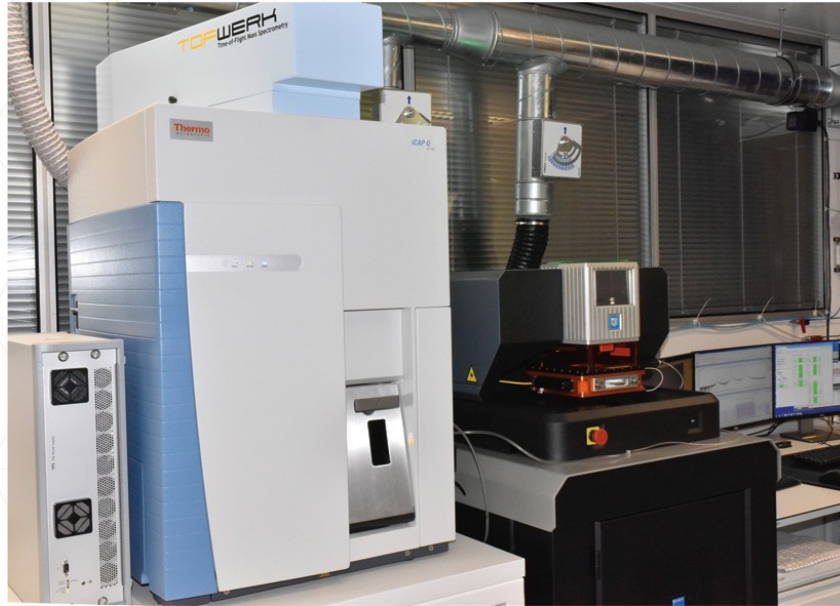
۲- تبدیل نمونه به اتم (پلاسمای داغ): این ابر ذرات ریز به داخل یک مشعل پلازما که دمایی هزاران درجه سانتیگراد دارد، فرستاده می‌شود. در این گرمای شدید، همه ذرات کاملاً تبخیر و به اتم‌های منفرد سازنده خود شکسته می‌شوند.

۳- شمارش و شناسایی اتم‌ها (Time of Flight): اتم‌ها سپس وارد بخش اصلی دستگاه (طیف‌سنج جرمی) می‌شوند. در اینجا، به هر اتم یک بار الکتریکی مثبت داده می‌شود که به آن یون گفته می‌شود. سپس همه یون‌ها با یک ضربه الکتریکی به سوی یک مسیر طولانی (لوله درایفت) پرتاب می‌شوند. یون‌های سبک‌تر سریع‌تر و یون‌های سنگین‌تر کندتر در این مسیر حرکت می‌کنند. یک حسگر در انتهای مسیر، زمان رسیدن هر گروه از یون‌ها را ثبت می‌کند. از آنجایی که می‌دانیم هر عنصر وزن اتمی مشخصی دارد، با اندازه‌گیری این زمان‌ها می‌توانیم دقیقاً بفهمیم هر یونی متعلق به کدام عنصر است (مثلاً آهن، مس، روی) و چند اتم از آن در نمونه وجود دارد. اما چرا GemTOF یک انقلاب است؟

* سرعت باورنکردنی: این کل فرآیند در کمتر از یک ثانیه اتفاق می‌افتد.

* دقت فوق‌العاده: می‌تواند حتی یک اتم از یک عنصر خاص را در میان میلیاردها اتم دیگر تشخیص دهد.

* ثبت همه چیز: برخلاف روش‌های قدیمی، GemTOF در همان یک لحظه، سیگنال همه عناصر موجود را ثبت می‌کند.

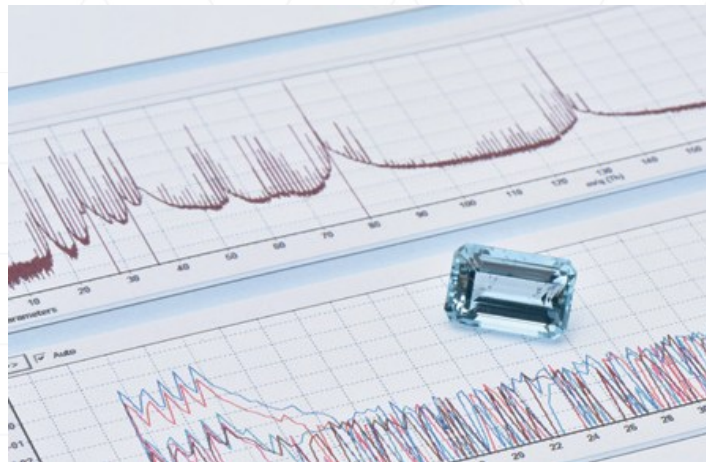


شکل ۱- عکس کامل از دستگاه GemTOF نصب‌شده در آزمایشگاه SSEF

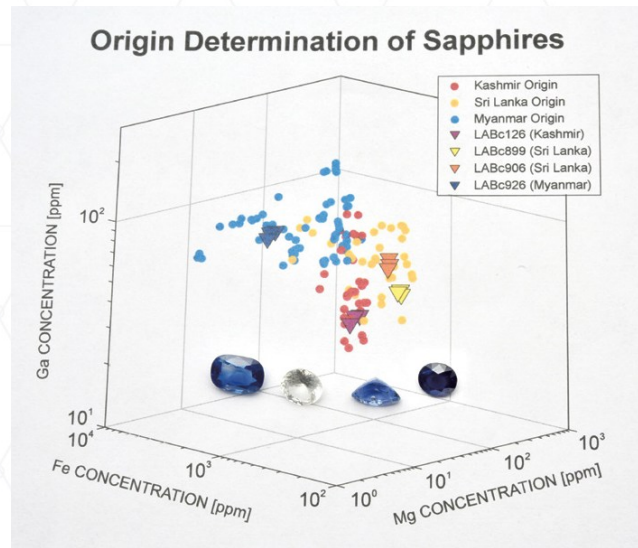
۳- کاربردهای اصلی GemTOF در گوهرشناسی

الف - تعیین خاستگاه جغرافیایی گوهرها

هر معدن گوهرسنگی، به دلیل تفاوت در ترکیب خاک و سنگ‌های مادر، الگوی شیمیایی منحصر به فردی در گوهرهای خود ایجاد می‌کند. GemTOF با مقایسه «اثر انگشت شیمیایی» یک گوهر ناشناخته با بانک اطلاعاتی از هزاران نمونه با خاستگاه معلوم، می‌تواند با احتمال بسیار بالا بگوید که آن گوهر از کدام معدن یا منطقه جغرافیایی آمده است. این برای گوهرهای مشهوری مانند سفیرآبی کشمیر که ارزش بسیار بالاتری دارند، حیاتی است. GemTOF مقادیر عناصری مانند آهن، تیتانیوم و گالیم را اندازه می‌گیرد و با الگوی شناخته‌شده سفیرآبی کشمیر مقایسه می‌کند (شکل ۲ و ۳).



شکل ۲- اسکرین‌شات از طیف جرمی کامل و سیگنال زمان (مثال: آکوامارین)



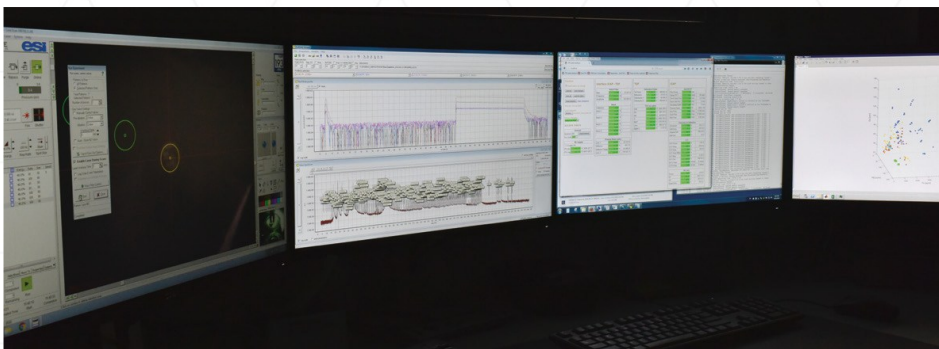
شکل ۳- نمودار سه بعدی پراکندگی عناصر Ga ، Fe ، Mg برای سفایرهای آبی سه منطقه

ب- شناسایی گوهرهای مصنوعی و بدلی

گوهرهای مصنوعی (ساخته شده در آزمایشگاه) و بدلی (مانند شیشه یا سرامیک رنگ شده) دارای ترکیب شیمیایی کاملا متفاوتی نسبت به نمونه‌های طبیعی هستند GemTOF. به سرعت این تفاوت‌ها را تشخیص می‌دهد. یک زمرد مصنوعی ممکن است فاقد ناخالصی‌های خاص طبیعی باشد یا مقادیر غیرعادی از عناصر رنگ‌دهنده داشته باشد. بدل شیشه‌ای نیز مقدار بسیار بالای سیلیسیم را نشان می‌دهد.

ج- تشخیص بهسازی‌های شیمیایی و فیزیکی

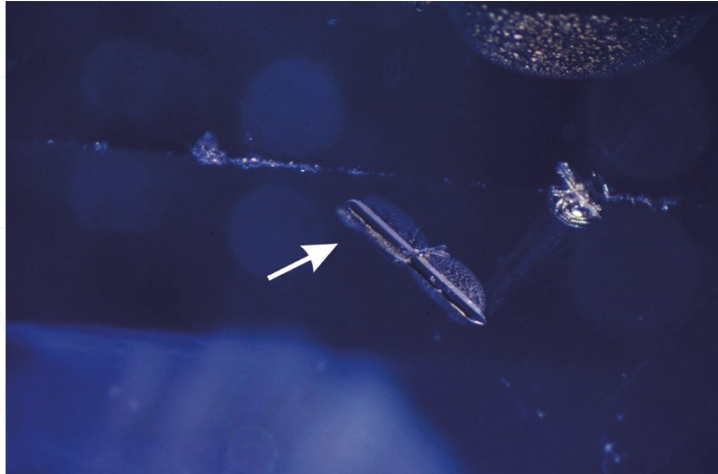
بسیاری از گوهرهای طبیعی برای بهبود رنگ یا شفافیت، تحت بهسازی مانند حرارت‌دهی، پرتودهی یا رنگ‌آمیزی شیمیایی قرار می‌گیرند. GemTOF قادر است کوچکترین اثرات این بهسازی‌ها را کشف کند. در سفایرهای آبی بهسازی شده با بریلیم، GemTOF می‌تواند حتی مقادیر بسیار کم بریلیم (در حد بخش در میلیون) را در سطح سنگ تشخیص دهد که شاهدهی قوی بر بهسازی بودن آن است (شکل ۴).



شکل ۴- نمای زمان واقعی از مانیتور سیستم که عناصر غیرمنتظره (ناشی از بهسازی) را نشان می‌دهد

د- تعیین سن گوهرها از طریق ناخالصی‌ها

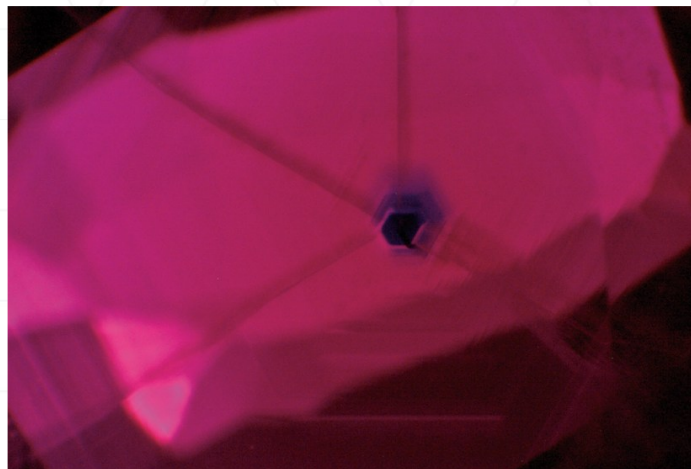
برخی گوهرها حاوی ناخالصی‌های میکروسکوپی مانند کانی زیرکن هستند که مانند ساعت زمین‌شناسی عمل می‌کنند. GemTOF می‌تواند نسبت ایزوتوپ‌های اورانیوم و سرب را در این ناخالصی‌های ریز اندازه‌گیری کرده و سن تشکیل گوهر را تخمین بزند. اندازه‌گیری سن یک سفایر آبی از طریق ناخالصی زیرکن داخل آن، می‌تواند به تعیین خاستگاهش کمک کند، زیرا گوهرهای مناطق مختلف در دوره‌های زمین‌شناسی متفاوتی تشکیل شده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی از ناخالصی زیرکن درون یک سفایر آبی کشمیری

ن- نقشه‌برداری شیمیایی و مطالعه منطقه‌بندی رنگ

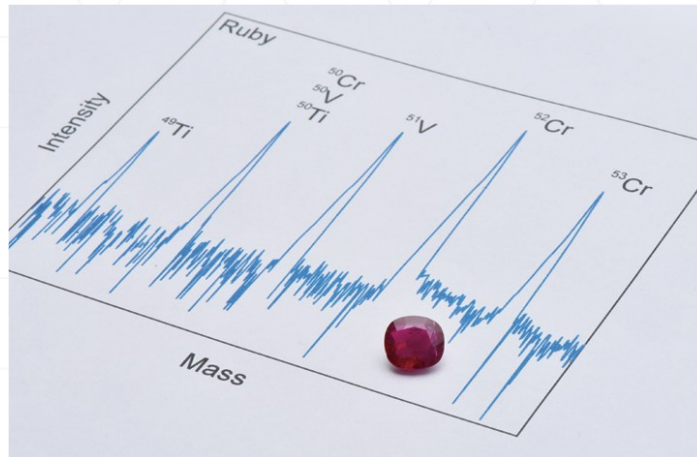
در بسیاری از گوهرها، توزیع عناصر در سطح سنگ یکنواخت نیست و این باعث ایجاد ناحیه‌های رنگی مختلف می‌شود. GemTOF می‌تواند یک نقشه شیمیایی دقیق از سطح گوهر ایجاد کند. در یک توپاز، GemTOF می‌تواند نشان دهد که مناطق آبی رنگ حاوی چه عنصر یا حالتی از آهن هستند که مناطق بی‌رنگ فاقد آنند (شکل ۷).



شکل ۷- تصویری از منطقه‌بندی رنگی یا نقشه‌برداری عنصری دریاقوت میانمار

و- تحلیل ایزوتوپی برای مطالعات پیشرفته

ایزوتوپ‌ها اتم‌های یک عنصر با وزن‌های متفاوت هستند. نسبت ایزوتوپ‌ها در گوه‌ها می‌تواند اطلاعاتی درباره منشأ زمین‌شناختی آنها ارائه دهد. GemTOF به دلیل دقت بالا برای این نوع مطالعات ایده‌آل است. نسبت ایزوتوپ‌های اکسیژن در زمرد می‌تواند نشان دهد که آیا سنگ در اعماق زمین تشکیل شده یا در نزدیکی سطح (شکل ۸).



شکل ۸- تحلیل ایزوتوپی دقیق یک یاقوت سرخ با استفاده از GemTOF حضور ایزوتوپ‌های مختلف تیتانیوم، وانادیوم و کروم را آشکار می‌سازد.

ه- ایجاد بانک داده‌های مرجع و استانداردسازی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای GemTOF، ایجاد بانک اطلاعاتی گسترده از ترکیب شیمیایی گوه‌های با خاستگاه معلوم است. این بانک داده به عنوان مرجع برای شناسایی گوه‌های ناشناخته استفاده می‌شود. آزمایشگاه‌های جهانی می‌توانند داده‌های GemTOF از زمردهای کلمبیایی اصیل را به اشتراک بگذارند تا نمونه‌های جدید با آن مقایسه شوند.

۴- مطالعه فیروزه با کمک GemTOF

فیروزه، این سنگ آبی‌سبز محبوب، مثال بسیار خوبی برای نشان دادن قدرت GemTOF است. فیروزه‌های معادن مختلف (مثلاً نیشابور در ایران، مصر یا معادن آریزونا در آمریکا) از نظر تاریخی و زیبایی‌شناسی ارزش متفاوتی دارند. یک کارشناس ممکن است نتواند تنها با نگاه کردن، فیروزه نیشابور اصیل را از یک نمونه مشابه دیگر تشخیص دهد. اما «اثر انگشت شیمیایی» این فیروزه‌ها با هم تفاوت دارد. این دستگاه نه تنها عناصر اصلی فیروزه (مس، آلومینیوم و فسفر) را اندازه می‌گیرد، بلکه به دنبال عناصر جزئی بسیار ریز (کم‌مقدار) مانند روی، سرب، باریوم و به ویژه گروهی از عناصر به نام «خاکی‌های نادر» می‌گردد. نسبت و مقدار این عناصر کم‌مقدار، مانند یک کد پستی شیمیایی برای معدن فیروزه عمل می‌کند. فیروزه‌های مصنوعی یا بازسازی‌شده الگوی عناصر جزئی طبیعی را ندارند و GemTOF به راحتی چسب (معمولاً حاوی سیلیسیم) را در آنها تشخیص می‌دهد. بسیاری از فیروزه‌ها برای افزایش استحکام، با رزین یا پلاستیک بهسازی می‌شوند

GemTOF می‌تواند حضور کربن و دیگر عناصر سازنده رزین را در منافذ سنگ تشخیص دهد. حتی می‌تواند دلیل علمی رنگ‌های مختلف فیروزه (آبی خالص تا سبز) را با اندازه‌گیری دقیق نسبت مس (عامل رنگ آبی) به آهن (عامل رنگ سبز) توضیح دهد.

۵- نتیجه‌گیری

دستگاه GemTOF مرزهای علم در گوهرشناسی را جابجا کرده است. این فناوری با ارائه تحلیلی سریع، دقیق و غیرمخرب***، نه تنها به خریداران و مجموعه‌داران اطمینان خاطر می‌دهد، بلکه ابزاری قدرتمند در دست پژوهشگران است تا اسرار تشکیل و رنگ‌آمیزی زیباترین سنگ‌های قیمتی جهان را کشف کنند. مطالعه فیروزه تنها یک مثال از توانایی‌های این دستگاه است***. در آینده، با گسترش بانک اطلاعاتی شیمیایی گوهرها، GemTOF به استاندارد طلایی برای اصالت‌سنجی و تعیین خاستگاه در آزمایشگاه‌های پیشرفته گوهرشناسی تبدیل خواهد شد.

۶- مراجع

- 1- Wang, H. A. O., Cartier, L. E., & Krzemnicki, M. S. (n.d.). GemTOF: A Pioneering Technique in Gemology. Swiss Gemological Institute SSEF, Basel, Switzerland
- 2- Wang, H. A. O., Krzemnicki, M. S., Chalain, J.-P., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2016). Simultaneous high sensitivity trace-element and isotopic analysis of gemstones using laser ablation inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry. *The Journal of Gemmology*, 35(3)
- 3- Abduriyim, A., & Kitawaki, H. (2006). Determination of the origin of blue sapphires using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Journal of Gemmology*, 30(1/2), 23–36.
- 4- Bomal, F., Hatert, F., Philippo, S., Guennou, M., Depret, M., Wang, H., Lefèvre, P., & Erambert, M. (2025). Crystal chemistry and trace-element behaviour in tourmalines from Minas Gerais, Brazil. *European Journal of Mineralogy*, 37, 709–731. <https://doi.org/10.5194/ejm-37-709-2025>
- 5- Coenraads, R. R., Sutherland, F. L., & Kinny, P. D. (1990). The origin of sapphires: U-Pb dating of zircon inclusions sheds new light. *Mineralogical Magazine*, 54, 113–122.
- 6- Giuliani, G., Chaussidon, M., Schubnel, H.-J., Piat, D. H., Rollion-Bard, C., France-Lanord, C., Giard, D., de Narvaez, D., & Rondeau, B. (2000). Oxygen isotopes and emerald trade routes since antiquity. *Science*, 287(5453), 631–633.
- 7- Guillong, M., & Günther, D. (2001). Quasi 'non-destructive' laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry fingerprinting of sapphires. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 56(7), 1219–1231. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00185-9](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00185-9)
- 8- Halicki, P. (2013). Part I: Chemical characterization of gem quality sapphires from metamorphic and magmatic host rocks: a LA-ICP-MS study [Master's thesis, University of Basel].
- 9- Krzemnicki, M. S., Wang, H. A. O., Wälle, M., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2024). Gemmological characterisation of emeralds from Musakashi, Zambia, and implications for their geographic origin determination. *The Journal of Gemmology*, 39(4)

- 10- Krzemnicki, M. S., Wang, H. A. O., & Buche, S. (2021). A new type of emerald from Afghanistan's Panjshir Valley. *The Journal of Gemmology*, 37(5)
- 11- Krzemnicki, M. S., Leuenberger, A., & Balmer, W. A. (2023). Cobalt-bearing Blue Spinel from Lukande, near Mahenge, Tanzania. *The Journal of Gemmology*, 38(5)
- 12- Krzemnicki, M. S., Wang, H. A. O., Wälle, M., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2024). Gemmological characterization of emeralds from Musakashi, Zambia, and implications for their geographic origin determination. *The Journal of Gemmology*, 39(4)
- 13- Link, K. (2015). Age determination of zircon inclusions in faceted sapphires. *Journal of Gemmology*, 34(8), 692–700.
- 14- Nyfeler, D. (2016). 10 years of Laser Ablation - ICPMS Applied in Gem Labs. *Journal of the GAHK*, 37, 73–75.
- 15- Pay, D., Shigley, J., & Padua, P. (2014, August 26). *Carbon isotope studies reveal diamond growth history*. GIA. Retrieved August 26, 2016, from <http://www.gia.edu/gia-news-research-carnegie-carbon-isotope-studies-diamond>
- 16- Rankin, A. H., Greenwood, J., & Hargreaves, D. (2003). Chemical fingerprinting of some East African gem rubies by laser ablation ICP-MS. *Journal of Gemmology*, 28(8), 473–482.
- 17- Schwarz, D. (2015, December). The geographic origin determination of emeralds. *InColor, Special Issue*, 98–114.
- 18- Sutherland, F. L., Duroc-Danner, J. M., & Mettre, S. (2008). Age and origin of gem corundum and zircon megacrysts from the Mercaderes-Rio Mayo area, South-west Colombia, South America. *Ore Geology Reviews*, 34(1–2), 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.01.004>
- 19- Wang, H. A. O., Krzemnicki, M. S., Chalain, J.-P., Lefèvre, P., Zhou, W., & Cartier, L. E. (2016). Simultaneous high sensitivity trace-element and isotopic analysis of gemstones using laser ablation inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Gemmology*, 35(3), 212–223. <https://doi.org/10.15506/JoG.2016.35.3.212>

کانی‌شناسی و مجموعه‌های دگرسانی سامانه کانه‌سازی بغم، جنوب اردستان

مهشید کریم‌آبادی^{۱*}، غلامحسین شمعانیان^۲، هادی عمرانی^۲، مسلم آقایی^۳
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان
^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان
^۳ دانش آموخته دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mahshidkarimabadi79@gmail.com

چکیده

سامانه کانه‌سازی بغم در ۲۶ کیلومتری جنوب اردستان و در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه - دختر واقع شده است. کانی‌سازی در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری حدواسط تا اسیدی ائوسن بالایی به‌صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و برش گرمایی رخ داده و شامل دو نسل متمایز کوارتز همراه با پیریت، کالکوپیریت و کالکوسیت است. دگرسانی گرمایی در این سامانه شامل مجموعه‌های سیلیسی، سریسیتی، پروپیلیتی و رسی است که به‌صورت جانیشینی و آکندگی شکافی-حفره‌ای ایجاد شده و شدت آن‌ها در مجاورت رگه‌ها افزایش می‌یابد. کوارتز، اپیدوت، کلریت، سریسیت، ایلیت و کلسیت از مهم‌ترین کانی‌های شناسایی شده در این مجموعه‌ها است. بر پایه شواهد کانی‌شناسی و دگرسانی، محلول‌های گرمایی در سامانه کانه‌سازی بغم دارای دامنه دمایی °C ۱۰۰ تا ۳۰۰ و pH خنثی تا کمی اسیدی بوده که در طی سرگذشت خود دستخوش فرآیندهای سردشدگی و جوشش شده است.

کلیدواژه‌ها: کانه‌سازی، مجموعه دگرسانی، جانیشینی، آکندگی شکافی، اردستان

Mineralogy and alteration assemblages of the Bagham mineralization system, South of Ardestan

M. Karimabadi^{1*}, G.H. Shamanian², H. Omrani², M. Aghaei³

¹ M.Sc. student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University
mahshidkarimabadi79@gmail.com

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of sciences, Golestan University

³ Ph.D. graduate in Economic Geology, Faculty of sciences, Tarbiat Modares University

Abstract

The Bagham mineralization system is located 26 km south of Ardestan, within the central part of the Urumieh-Dokhtar magmatic belt. Mineralization occurs within Upper Eocene intermediate to acidic volcanic and pyroclastic rocks in the form of veins, veinlets, and hydrothermal breccias. It comprises two distinct generations of quartz associated with pyrite, chalcopyrite, and chalcocite. Hydrothermal alteration includes silicic, sericitic, propylitic, and argillic assemblages, formed through replacement and fracture-vug filling, with intensity increasing in proximity to the veins. Quartz, epidote, chlorite, sericite, illite, and calcite are the main identified minerals within the alteration zones. Based on mineralogical and alteration evidence, hydrothermal fluids in the Bagham mineralization system had temperatures ranging from 100 to 300 °C and neutral to slightly acidic pH, undergoing cooling and boiling processes during their evolution.

Keywords: Mineralization, Alteration assemblage, Replacement, fracture-filling, Ardestan

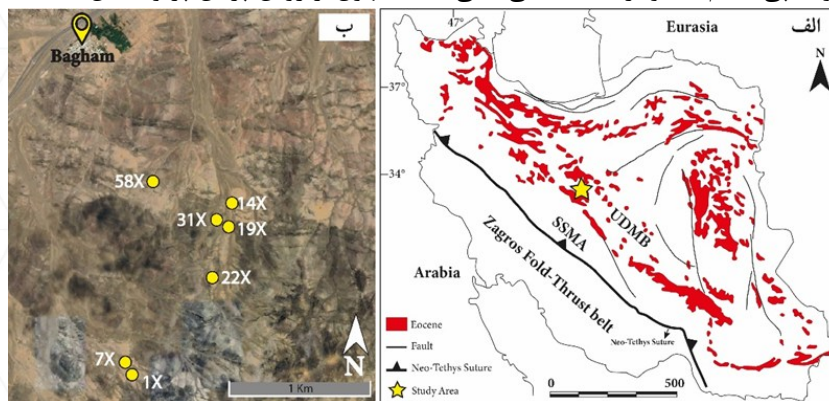
۱- مقدمه

دگرسانی گرمابی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای مرتبط با کانی‌سازی در سامانه‌های گرمابی است که بر اثر برهمکنش محلول‌های گرمابی با سنگ دیواره رخ می‌دهد (Hedenquist & Lowenstern, 1994; Pirajno, 2009). بررسی مجموعه‌های دگرسانی گرمابی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره دما، فشار و pH محلول‌های گرمابی فراهم آورد (Sillitoe, 2010). شناسایی زون‌های دگرسانی گرمابی نه تنها در تفسیر شرایط فیزیکوشیمیایی سامانه‌های کانه‌سازی کاربرد دارد بلکه می‌تواند در اکتشاف زون‌های کانه‌سازی به‌ویژه در کانسارهای رگه‌ای Cu-Au مورد استفاده قرار گیرد (Hezarkhani, 2006; Richards, 2013).

سامانه کانه‌سازی بغم با موقعیت جغرافیایی $33^{\circ} 10' 15''$ عرض شمالی و $52^{\circ} 17' 52''$ طول شرقی در فاصله ۲۶ کیلومتری جنوب اردستان واقع شده است. این سامانه، بخشی از چهارگوش زمین‌شناسی اردستان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ بوده (رادفر و امینی چهارق، ۱۳۷۸) که از دیدگاه ساختاری در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (UDMB) قرار دارد (شکل ۱ الف). بررسی‌های اکتشافی در این سامانه از سال ۱۳۹۹ توسط شرکت توسعه صنایع و معادن کوثر به انجام رسیده است. در این مقاله، کانی‌شناسی مجموعه‌های دگرسانی و منطقه‌بندی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و بر پایه این اطلاعات درباره شرایط کانه‌سازی و ویژگی‌های محلول‌های گرمابی اظهار نظر شده است.

۲- مواد و روش‌ها

بررسی مجموعه‌های دگرسانی گرمابی در سامانه کانه‌سازی بغم در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی به انجام رسید. در بخش صحرایی، تغییرات ریخت‌شناسی و کانی‌شناختی زون‌های کانه‌سازی و دگرسانی گرمابی بررسی شد و نمونه‌برداری از رگه‌ها، زون‌های دگرسانی و سنگ دیواره به عمل آمد. موقعیت جغرافیایی نمونه‌ها و توصیف ماکروسکوپی آن‌ها در صحرا انجام شد و موقعیت نمونه‌ها بر روی نقشه به نمایش درآمد (شکل ۱ ب). در بخش آزمایشگاهی، مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی به روش‌های مرسوم میکروسکوپی انجام شد و برای شناسایی کانی‌های مجهول از روش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد.



شکل ۱ الف) موقعیت سامانه کانه‌سازی بغم (ستاره توپر) در کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (با اصلاحات از Agard et al., 2011)، ب) موقعیت نمونه‌های کانی‌شناسی (دایره توپر) به روش پراش اشعه ایکس (XRD).

۳- بحث

زمین‌شناسی و کانی‌سازی

سامانه کانه‌سازی بغم از نظر زمین‌شناسی بخشی از کمربند ماگمایی ارومیه-دختر است. این کمربند ماگمایی در راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق گسترش یافته و از سنگ‌های آذرین ائوسن و جوان‌تر (Allen and Armstrong, 2008) بر روی پوسته قاره‌ای تشکیل شده است (Babazadeh et al., 2023). در سامانه کانه‌سازی بغم مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن بالایی شامل گدازه‌های بازالتی تا آندزیتی و سنگ‌های آذرآواری داسیتی و ریوداسیتی برونزد دارد (شکل ۲ الف) که توسط توده‌های نیمه آتشفشانی داسیتی و دایک‌های دیابازی تا میکرودیوریتی با دو راستای غالب شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و شرقی-غربی قطع شده است. بر اساس یگانه‌فر (۱۳۸۶)، سنگ‌های آتشفشانی این منطقه از نوع کالک‌آکالن بوده و ویژگی‌های ژئوشیمیایی مرتبط با فرورانش حاشیه فعال قاره را نشان می‌دهد.

کانه‌سازی در سامانه گرمابی بغم به‌طور عمده از نوع شکافه‌پرکن است که به‌صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و برش گرمابی در میزبانی از سنگ‌های آتشفشانی تظاهر داشته و از چند سانتی‌متر تا چند متر در تغییر است (شکل ۲ ب). کانی‌شناسی کانسنگ نسبتاً ساده بوده و به‌طور عمده از کوارتز، پیریت، کالکوپریت و کالکوسیت تشکیل شده است. شواهد بافتی نشانگر تشکیل کوارتز در طی دو نسل مختلف است. کوارتزهای نسل اول (Qtz I) به صورت شکافه‌پرکن در سنگ دیواره تظاهر داشته و رگه‌های اصلی را پدید آورده است. کوارتزهای نسل دوم (Qtz II)، کوارتزهای نسل اول را قطع کرده و فضای خالی بین قطعات سنگی و قطعات کوارتزی را آکنده است. این کوارتزها وجه‌دار تا بی‌وجه بوده و گاه با کلسدونی، اکتینولیت و تورمالین همراهی می‌شوند.

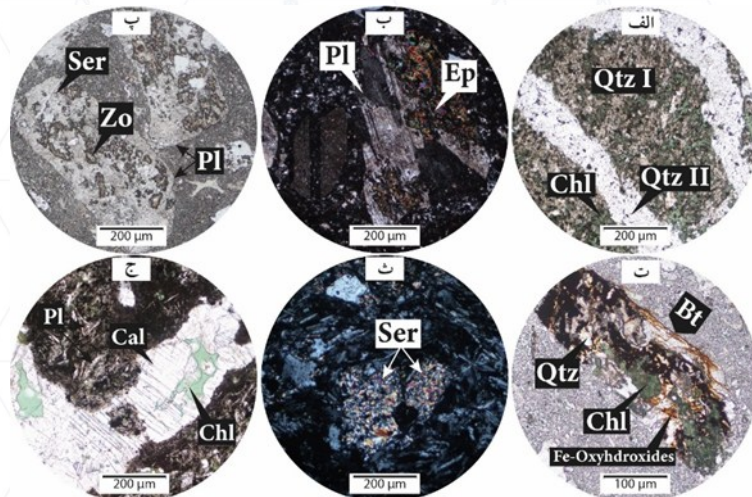
دگرسانی گرمابی

کانه‌سازی در سامانه گرمابی بغم با دگرسانی گرمابی همراه است که بر اثر برهمکنش محلول‌های گرمابی با سنگ دیواره پدید آمده و باعث تغییرات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی در سنگ دیواره شده است. گسترش زون‌های دگرسانی بسته به ماهیت فیزیکی‌وشیمیایی سنگ دیواره و محلول‌های گرمابی از چند سانتی‌متر تا چند متر در اطراف زون‌های کانه‌سازی در تغییر است (شکل ۲ پ و ت).



شکل ۲ تصاویر صحرایی از سنگ دیواره (الف)، زون‌های کانی‌سازی (ب) و زون‌های دگرسانی گرمابی (پ، ت) در سامانه کانه‌سازی بغم.

دگرسانی گرمابی در سامانه بغم به دو صورت جانیشینی در بطن کانی‌های قبلی و نهشت مستقیم در فضاهای خالی و شکستگی‌ها رخ داده است. کوارتز، اپیدوت، کلریت، سریسیت، ایلیت و کلسیت از مهم‌ترین کانی‌های شناسایی شده در نمونه‌های مورد مطالعه است. کوارتز به صورت جانیشینی و آکندگی حفرات در تمام مراحل کانی‌سازی تظاهر داشته و در نزدیکی رگه‌ها از فراوانی بیشتری برخوردار است (شکل ۳ الف). اپیدوت به صورت جانیشینی به جای پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند و نیز آکندگی‌های شکافی و حفره‌ای تظاهر دارند (شکل ۳ ب). زوئیزیت از دیگر فرآورده‌های دگرسانی گرمابی در سامانه بغم است که اغلب جانشین پلاژیوکلازها شده است (شکل ۳ پ). کلریت نیز به دو شکل شکافه‌پرن و جانیشینی قابل مشاهده است. این کانی همراه با اپیدوت جانشین بیوتیت و پلاژیوکلاز شده است (شکل ۳ ت). سریسیت از محصولات دگرسانی گرمابی است که به طور عمده جانشین درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (شکل ۳ ث)، فلدسپات پتاسیک (سانیدین) و گاه هورنبلند، بیوتیت و زمینه سنگ شده است. کلسیت دارای فراوانی کمتری نسبت به اپیدوت و کلریت است و به صورت آکندگی‌های شکافی-حفره‌ای و جانیشینی تظاهر دارد (شکل ۳ ج). بر اساس شواهد میکروسکوپی، فضاهای خالی باقی‌مانده در سنگ دیواره در مراحل پایانی کانی‌سازی توسط کوارتز و کلسدونی آکنده شده است.



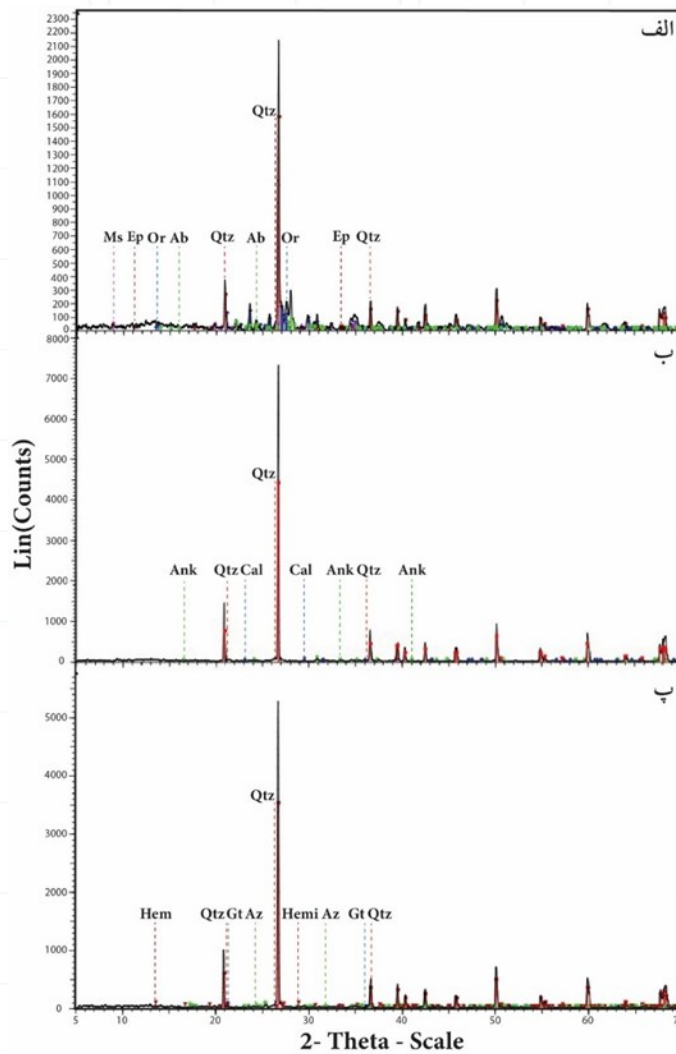
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی گرمابی در سامانه کانه‌سازی بغم. الف) تشکیل کوارتز در زمینه سنگ دیواره (Qtz I) و آکندگی‌های شکافی (Qtz II). ب) اپیدوت به صورت جانیشینی به جای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و آکندگی فضاهای خالی، پ) دگرسانی شدید پلاژیوکلاز به سریسیت و زوئیزیت، ت) دگرسانی بیوتیت به کلریت، ث) دگرسانی پلاژیوکلاز به سریسیت، ج) کلریت و کلسیت به صورت آکندگی شکافی، Qtz I = کوارتز نسل اول، Qtz II = کوارتز نسل دوم، Chl = کلریت، pl = پلاژیوکلاز، Ep = اپیدوت، Ser = سریسیت، Zo = زوئیزیت، Bt = بیوتیت، Qtz = کوارتز، Cal = کلسیت. (تصاویر الف، پ، ت، ج، در نور عبوری عادی و تصاویر ب و ث در نور عبوری پلاریزه).

مطالعات پراش پرتو ایکس

برای شناسایی کانی‌های مجهول در مجموعه‌های دگرسانی، تعداد ۷ نمونه از زون‌های دگرسانی گرمابی انتخاب و در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به روش پراش پرتو ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱ ب). نتایج بدست آمده نشانگر حضور ایلیت، آنکریت و همی‌مورفیت افزون بر کانی‌های دگرسانی معرفی شده در بخش قبل است (جدول ۱).

جدول ۱ نتایج مطالعات کانی‌شناسی به روش پراش پرتو ایکس

کانی‌های شناسایی شده	شماره نمونه
Quartz, Orthoclase, Albite, Illite, Epidote	1X
Quartz, Ankerite, Calcite	7X
Quartz, Albite, Microcline, Illite	14X
Quartz, Epidote, Geothite, Pyrite	19X
Albite, Quartz, Epidote, Hematite	22X
Quartz, Epidote	31X
Quartz, Geothite, Hemimorphite, Azurite	58X



شکل ۴ نمونه‌ای از نمودارهای XRD در این پژوهش. الف) نمونه شماره 1X، ب) نمونه شماره 7X، پ) نمونه شماره 58X. اختصارات: Qtz= کوارتز، Or= ارتوکلاز، Ab= آلبیت، Ms= موسکوویت، Ep= اپیدوت، Ank= آنکریت، Cal= کلسیت، Gt= گوتیت، Hemi= همی مورفیت، Az= آزوریت.

مجموعه‌های دگرسانی و شیمی محلول گرمابی

مجموعه‌های دگرسانی گرمابی در سامانه کانه‌سازی بغم شامل دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی، پروپیلیتی و رسی است که در پیرامون زون‌های کانی‌سازی به دو صورت جان‌شینی و آکندگی شکافی-حفره‌ای رخ داده است. تلفیق یافته‌های این پژوهش به‌طور عمده نشانگر نقش محلول‌های گرمابی خنثی تا کمی اسیدی است که با سامانه‌های اپی‌ترمال نوع کم‌سولفید همخوانی دارد (White & Hedenquist, 1995). دگرسانی پروپیلیتی در فاصله نسبتاً دور از زون‌های کانی‌سازی گسترش دارد. فراوانی اپیدوت و کلریت در مجموعه دگرسانی پروپیلیتی پیشنهاد دهنده شرایط خنثی و دمای بالاتر از 200°C برای محلول گرمابی است (Arribas, 1995) (شکل ۵). با این حال، حضور کلسیت در این مجموعه که از فراوانی کمتری برخوردار است می‌تواند معرف شرایط دمایی 100°C تا 300°C و pH قلیایی باشد. دگرسانی سریستی در نزدیکی زون‌های کانی‌سازی تظاهر دارد. حضور ایلیت و سریسیت در این مجموعه بیانگر شرایط خنثی تا کمی اسیدی و دمایی بیش از 200°C است. سیلیسی شدن سنگ دیواره یکی از رخداد‌های مهم دگرسانی در سامانه بغم است که بیانگر شرایط اسیدی و دمای بالاتر از 100°C می‌باشد. دگرسانی رسی به‌صورت لیتوکپ‌هایی پراکنده‌ای تظاهر دارد که بر اثر میعان بخارات داغ اسیدی ناشی از جوشش پدید آمده‌اند.



شکل ۵ محدوده pH و دمای پایداری کانه‌های حاصل از دگرسانی گرمابی در منطقه مورد مطالعه بر اساس White & Hedenquist (1995)

۴- نتیجه‌گیری

سامانه کانه‌سازی بغم یک سامانه گرمابی اپی‌ترمال است که با کانی‌سازی فلزات پایه و گران‌بها مشخص می‌شود. این سامانه با مجموعه‌های دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی، پروپیلیتی و رسی همراه است که در اطراف زون‌های کانی‌سازی توسعه یافته‌اند. بررسی این مجموعه‌ها منجر به تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی محلول‌های گرمابی در این سامانه شد که می‌تواند در درک فرآیندهای کانی‌سازی و ارزیابی‌های اکتشافی بکار رود. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که محلول‌های گرمابی در نزدیکی زون‌های کانی‌سازی از شرایط pH اسیدی تا خنثی برخوردار بوده و باعث رخداد دگرسانی‌های سیلیسی و سریسیتی شده است. در بخش‌های دورتر از زون‌های کانی‌سازی، برهمکنش محلول‌های گرمابی با سنگ‌های آندزیتی منجر به افزایش pH و تشکیل دگرسانی پروپیلیتی شده که با فراوانی اپیدوت و کلریت مشخص می‌شود. به‌طور کلی، محلول‌های گرمابی در سامانه کانه‌سازی بغم با دامنه دمایی 100°C تا 300°C و pH خنثی تا کمی اسیدی کانی‌سازی کرده و دستخوش فرآیندهای سردشدگی و جوشش شده است.

۵- مراجع

- رادفر، ج، امینی چهراق، م.ر، امامی، م.ه.، ۱۳۷۸. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یگانه‌فر، ح.، ۱۳۸۶. ژئوشیمی و پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی جنوب اردستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., and Wortel, R. (2011). Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148, 692-725. <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>.
- Allen, M. B., and Armstrong, H. A. (2008). Arabia–Eurasia collision and the forcing of mid–Cenozoic global cooling, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 265, 52-58.
- Arribas Jr., A. (1995). Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. *Mineralogical Association of Canada short course* 23, 419-454.
- Babazadeh, S., Haase, K., Ghalamghash, J., Regelous, M., Poujol, M., Raeisi, D., & Zhao, M. (2023). Magmatic evolution of the migrating central Urumieh-Dokhtar arc, Iran: Implications for magma production. *International Journal of Earth Sciences*, 112, 1577-1597. <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02314-5>.
- Hedenquist, J. W., & Lowenstern, J. B. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
- Hezarkhani, A. (2006). Controls of alteration and mineralization in the sungun porphyry copper deposit, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(3), 326-338.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer.
- Richards, J. P. (2013). Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nature Geoscience*, 6, 911-916.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41.
- White, N. C., & Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: Styles, Characteristics, and exploration. *SEG Newsletter*, 23, 1, 9 – 13.

پیریت به عنوان نشانگر محیط احیایی-گوگردی و کاربرد آن در شناسایی مناطق تضعیف پوش سنگ (مطالعه موردی: ناحیه ماماتین، جنوب غرب ایران)

سیدعباس نجفی^{*}، ساسان بختیاری نژاد^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف، گروه مهندسی نفت، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدچمران اهواز

*Email: abbas.najafi@ait.put.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی ارتباط میان شرایط احیایی-گوگردی، تراوشات هیدروکربنی و تشکیل پیریت در ناحیه ماماتین واقع در فروافتادگی دزفول شمالی انجام شد. بمنظور بازسازی محیط ته‌نشست و منشأ تراوشات، نمونه‌های بیتومن خشک‌شده از ناحیه ماماتین برداشت و تحت بررسی میکروسکوپی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که پیریت‌های شناسایی‌شده عمدتاً از نوع توده‌ای و پرکننده حفره بوده و اندازه نسبتاً درشت آن‌ها (۰.۲ تا ۱ میلی‌متر) بیانگر تشکیل دیاژنزی ثانویه در اثر واکنش سولفید هیدروژن حاصل از تجزیه مواد آلی و مهاجرت هیدروکربن‌هاست. این تراوشات و نمونه‌های برداشت‌شده، نشان‌دهنده فعالیت یک سیستم هیدروکربنی فعال بوده که از مخزن کربناته آسماری نشأت گرفته و گسترش مخزن آسماری را تا دماغه شمال غربی میدان نفتی پارس تأیید می‌کنند. همچنین گسل‌های ناحیه‌ای ماماتین نیز در تضعیف پوش سنگ گچساران و ایجاد مسیرهای ترجیحی برای صعود سیالات، عامل اصلی تمرکز تراوشات سطحی بشمار می‌روند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کانی پیریت می‌تواند بعنوان یک نشانگر از محیط احیایی-گوگردی در تعیین گسترش و تداوم مخازن هیدروکربنی ایفای نقش نماید.

کلیدواژه‌ها: پیریت، ناحیه ماماتین، محیط احیایی-گوگردی، تضعیف پوش سنگ

Pyrite as an Indicator of Sulfidic-Reducing Environments and Its Application in Identifying Caprock Weakening Zones (Case Study: Mamatain Region, SW Iran)

SyedAbbas Najafi^{*1}; Sasan Bakhtiary Nejad²

1- M. Sc student in Petroleum Engineering - Exploration, Department of Petroleum Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

2- M. Sc student in Petroleum Geology, Department of Petroleum Geology & Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran

*Email: abbas.najafi@ait.put.ac.ir

Abstract

This study aims to investigate the relationship between reducing-sulfurous conditions, hydrocarbon seepages and pyrite formation in Mamatain area in Northern Dezful Embayment. To reconstruct the depositional environment and determine the origin of the seepages, dry bitumen samples were collected from the Mamatain area and examined through microscopic observation. The results indicate that the identified pyrite occurs mainly as coarse-grained, pore-filling aggregates, with grain sizes ranging from 0.2 to 1 mm, reflecting secondary diagenetic formation through reactions between hydrogen sulfide generated from organic matter degradation and hydrocarbon migration and reactive iron. The presence of seepages and dry bitumen samples, confirms the activity of a dynamic hydrocarbon system, that sourced from the Asmari carbonate reservoir and also confirms the extension of Asmari reservoir to Northwestern flank of Parsi oilfield. Structurally, the Mamatain local faults play a key role in weakening the Gachsaran cap rock and creating preferential pathways for fluid ascent, thereby controlling the concentration of surface seepages. Overall, the findings demonstrate that pyrite as an indicator of reducing-sulfurous system can play a role to identifying the extension of hydrocarbon reservoirs.

Keywords: Pyrite, Mamatain area, Sulfidic-Reducing Environment, Caprock Weakening

۱- مقدمه

پیریت (FeS_2) یکی از مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی در رسوبات دریایی و دیازنتیکی است که بطور گسترده به‌عنوان نشانگر ژئوشیمیایی شرایط احیایی و چرخه گوگرد در حوضه‌های رسوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Berner, 1984). تشکیل پیریت وابسته به برهم‌کنش پیچیده میان آهن واکنش‌پذیر، سولفید هیدروژن و شرایط اکسایش-کاهش محیط است و از این‌رو اطلاعات ارزشمندی درباره تاریخچه ژئوشیمیایی رسوبات و سیالات در اختیار قرار می‌دهد (Rickard & Luther, 2007). از دیدگاه ژئوشیمیایی، اصلی‌ترین منبع سولفید لازم برای تشکیل پیریت در محیط‌های رسوبی، فرآیند احیای میکروبی سولفات (Bacterial Sulfate Reduction; BSR) است که طی آن باکتری‌ها، سولفات محلول در آب دریا را به سولفید هیدروژن تبدیل می‌کنند (Seal, 2006). این فرآیند معمولاً در رسوبات غنی از ماده آلی و در شرایط پتانسیل اکسایش-کاهش پایین رخ می‌دهد و نقش کلیدی در کنترل ژئوشیمی گوگرد، آهن و کربن ایفا می‌کند. سولفید تولیدشده در این محیط‌ها با آهن واکنش‌پذیر ترکیب شده و منجر به تشکیل پیریت در اشکال مختلفی نظیر فرامبوئیدی، اوهدرال یا توده‌ای می‌شود که هر یک بازتاب‌دهنده شرایط ژئوشیمیایی متفاوتی هستند (Canfield et al., 2005).

در سیستم‌های نفتی، پیریت علاوه بر نقش رسوبی-دیازنتیکی، به‌عنوان یک نشانگر غیرمستقیم مهاجرت و حضور هیدروکربن‌ها نیز شناخته می‌شود. ورود هیدروکربن‌ها به رسوبات می‌تواند شرایط احیایی را تشدید کرده و از طریق مصرف اکسیژن و تحریک فرآیندهای میکروبی، تولید سولفید و در نتیجه تشکیل پیریت را افزایش دهد (Seal, 2006; Gibson et al., 2004). از این منظر، هم‌زمانی پیریت‌زایی و تراوشات بیتومنی می‌تواند بیانگر فعالیت یک سامانه فعال مهاجرت هیدروکربن و برهم‌کنش سیالات نفتی با محیط‌های گوگرددار باشد (Aplin & Macquaker, 2011).

ناحیه ماماتین در فروافتادگی دزفول شمالی واقع در کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس، یکی از بارزترین نواحی تراوشات طبیعی هیدروکربنی در جنوب‌غرب ایران محسوب می‌شود (Motiei, 1993). وجود این چشمه‌های هیدروکربنی، نشان‌دهنده تضعیف و ناپیوستگی پوش سنگ و مهاجرت فعال هیدروکربن‌ها از عمق به سطح است (Moradi et al., 2017; Bordenave, 2014). گزارش‌ها حاکی از آن است که بسیاری از تراوشات این ناحیه با آغشتگی قابل توجه گوگرد همراه هستند که این ویژگی می‌تواند به ماهیت احیایی-گوگردی سنگ منشأ و فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر سیستم نفتی ناحیه نسبت داده شود (نجفی و همکاران، ۱۴۰۴; Moradi et al., 2017; Bordenave, 2014; Sherkati & Letouzey, 2004).

در ناحیه ماماتین، رخنمون‌های سطحی عمدتاً به گروه فارس پایینی تا میانی (سازندهای گچساران و میشان) و رسوبات عهدحاضر تعلق دارند. توالی‌های تبخیری و مارنی گچساران در این ناحیه، به‌عنوان پوش سنگ برای سنگ مخزن کربناته آسماری عمل می‌کنند (Motiei, 1993; Alavi, 2004).

هدف این مطالعه، بررسی روابط میان محیط احیایی-گوگردی، تراوشات هیدروکربنی و تشکیل پیریت در ناحیه ماماتین با استفاده از بررسی میکروسکوپی است. این پژوهش همچنین به بازسازی حوادث حوضه، شناسایی پیریت مرتبط با محیط احیایی-گوگردی و ارتباط آن با تراوشات هیدروکربنی و کنترل ساختاری گسل‌ها می‌پردازد. بنابراین، مطالعه حاضر با پرکردن شکاف علمی موجود، اطلاعات ارزشمندی درباره محیط ته‌نشست و منشأ تراوشات در ناحیه ماماتین ارائه می‌دهد.

۲- مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

ناحیه ماماتین اولین منطقه خوزستان است که بعلت تراوشات متعدد سطحی مورد توجه کاوشگران اولیه نفت واقع شده است. این ناحیه در ۱۰ کیلومتری شمال خاوری شهرستان رامهرمز و ۱۰۰ کیلومتری شمال خاوری اهواز در بین و در امتداد محوری میداین نفتی هفتکل و پارسی قرار دارد. ساختار ناحیه تحت‌تأثیر رانش‌های زاگرس بوده و دارای سیستم پیچیده‌ای از گسل‌های ناحیه‌ای (Local) است که نقش مهمی در کنترل مهاجرت هیدروکربن و تجمع تراوشات سطحی دارند (Bordenave, 2014; Alavi, 2004).

سازند پابده به عنوان سنگ منشأ، محیط دریایی کم‌اکسیژن تا نیمه‌اکسیژن دار داشته و منبع اصلی هیدروکربن‌های گوگرددار منطقه محسوب می‌شود (رشیدی و همکاران، ۱۳۸۷؛ Mahmoudzadeh et al., 2022). بررسی نجفی و همکاران (۱۴۰۴) بر روی داده‌های چینه‌شناسی و لرزه‌ای در میداین ماماتین و پارسی نشان داد که تاق‌دیس آسماری ماماتین تا دماغه شمال غربی تاق‌دیس آسماری پارسی گسترش و تداوم یافته و بایستی در مورد محدوده میداین مذکور تجدیدنظر صورت گیرد. نمونه‌های این پژوهش (شامل بیتومن‌های خشک‌شده)، در فاصله ۸.۵ کیلومتری جنوب شرق ناحیه ماماتین، بصورت سیستماتیک برداشت شده و جهت بررسی میکروسکوپی به آزمایشگاه منتقل گردیدند. این نمونه‌ها پایه‌ای برای شناسایی پیریت و ارتباط آن با تراوشات هیدروکربنی و شرایط احیایی-گوگردی فراهم نمودند.



شکل ۲: نمونه بیتومن خشک‌شده. بلورهای پیریت با پیکان قرمز مشخص شده‌اند. (بزرگ‌نمایی ۱۱۰X)



شکل ۱: نمونه بیتومن خشک‌شده. بلورهای پیریت با پیکان قرمز مشخص شده‌اند. (بزرگ‌نمایی ۱۱۰X)

۳- بحث

بررسی‌های میدانی و تصاویر میکروسکوپی حاصل از نمونه‌های برداشت‌شده در ناحیه ماماتین نشان می‌دهد که این ناحیه تحت تأثیر یک سامانه احیایی-گوگردی فعال قرار داشته که از عمق تا سطح امتداد یافته است. حضور پیریت در نمونه‌های برداشت‌شده و گزارشات و مطالعات پیشین، مجموعه‌ای از شواهد هم‌راستا را فراهم می‌کند که بیانگر مهاجرت هیدروکربن‌های گوگرددار از سنگ منشأ پابده به سمت سطح است.

پیریت مشاهده‌شده در نمونه‌های برداشتی، بر اساس اندازه‌گیری‌ها و بافت میکروسکوپی، عمدتاً به صورت توده‌ای و پرکننده حفره (pore-filling pyrite aggregates) با اندازه دانه‌های ۰.۲ تا ۱ میلی‌متر ظاهر می‌شود که بسیار بزرگ‌تر از پیریت‌های فرامبوئیدی کلاسیک است. تجمع این دانه‌ها در فضاهای خالی و شکستگی‌های ریز، همراه با ویژگی‌های بافتی، نشان‌دهنده ماهیت دیاژنزی ثانویه آن است که احتمالاً از واکنش Fe^{2+} با H_2S حاصل از تجزیه مواد آلی و مهاجرت هیدروکربن‌ها تشکیل شده است. این نوع پیریت معمولاً در محیط‌هایی با شرایط احیایی قوی، فراوانی مواد آلی و حضور سیالات هیدروکربنی مهاجر شکل می‌گیرد؛ بنابراین، پیریت ماماتین را می‌توان به‌عنوان نشانگر دیاژنتیکی مهاجرت هیدروکربن در نظر گرفت.

تحلیل نمونه‌های برداشت‌شده نشان می‌دهد مخزن آسماری تا محل برداشت نمونه‌ها گسترش یافته و با تضعیف پوش سنگ گچساران، سیالات مخزن به سطح زمین راه یافته و تشکیل چشمه‌های هیدروکربنی داده‌اند. با گذشت زمان، این چشمه‌ها خشک‌شده و حالت کنونی را به خود گرفته‌اند. همچنین وجود پیریت در نمونه‌ها، وضعیت احیایی-گوگردی بودن سیالات مخزن را همانگونه که در ناحیه ماماتین حکمفرما بوده، در محل برداشت نمونه‌ها نیز تأیید می‌کند. بنابراین صحت مطالعه نجفی و همکاران (۱۴۰۴) که گسترش تاق‌دیس آسماری ماماتین را نشان می‌داد، بیش از پیش تأیید می‌گردد (شکل ۳).

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ناحیه ماماتین تحت تأثیر یک سامانه احیایی-گوگردی فعال قرار داشته که از عمق تا سطح امتداد یافته است. حضور پیریت‌های توده‌ای و پرکننده حفره با اندازه‌های نسبتاً درشت، بیانگر تشکیل دیاژنزی ثانویه آن‌ها در اثر واکنش سولفید هیدروژن حاصل از تجزیه مواد آلی و مهاجرت هیدروکربن‌هاست. این ویژگی‌ها پیریت را به یک نشانگر مؤثر برای ردیابی مهاجرت هیدروکربن‌های گوگرددار در ناحیه تبدیل می‌کند. نقش ساختاری گسل‌های ناحیه‌ای ماماتین در تضعیف پوش سنگ گچساران و ایجاد مسیرهای ترجیحی برای صعود سیالات، عامل اصلی تمرکز تراوشات سطحی محسوب می‌شود. در مجموع، ترکیب شواهد چینه‌شناسی، ساختاری و میکروسکوپی نشان می‌دهد که یک سامانه واحد احیایی-گوگردی در ماماتین، کنترل اصلی مهاجرت هیدروکربن‌ها و تشکیل پیریت در این ناحیه را بر عهده داشته است.

۵- مراجع

- رشیدی، م.، تژه، ف.، طاهرخانی، ر.، ۱۳۸۷. بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی چشمه‌های نفتی در ناحیه ماماتین، دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، اهواز، ایران.
- نجفی، س.، ع. صفارزاده حسینی، ص.، رادمهر، الف.، عبدالهی‌فرد، الف.، سراج، م.، ۱۴۰۴. بررسی ارتباط ساختاری چاه پارسی-۵۱ با تاقدیس‌های پارسی و ماماتین با تلفیق داده‌های چینه‌شناسی و لرزه‌ای (فروافتادگی دزفول، جنوب غرب ایران). هفتمین کنفرانس ژئوفیزیک کاربردی در اکتشاف نفت، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران.
- نجفی، س.، ع. صفارزاده حسینی، ص.، رادمهر، الف.، عبدالهی‌فرد، الف.، سراج، م.، ۱۴۰۴. بررسی بزرگ‌تراوشات هیدروکربنی در سازند تبخیری گچساران (ناحیه ماماتین، دزفول شمالی، جنوب غرب ایران). دهمین همایش ملی انجمن رسوب‌شناسی ایران، دانشگاه آزاد اسلامی (واحد خوراسگان)، اصفهان، ایران.
- Alavi, M. (2004). Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American journal of Science*, 304(1), 1-20.
- Aplin, A. C., & Macquaker, J. H. (2011). Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems. *AAPG bulletin*, 95(12), 2031-2059.
- Berner, R. A. (1984). Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 48(4), 605-615.
- Bordenave, M. L. (2014). Petroleum systems and distribution of the oil and gas fields in the Iranian part of the Tethyan region.
- Canfield, D. E., Kristensen, E., & Thamdrup, B. (2005). The sulfur cycle. In *Advances in Marine Biology* (Vol. 48, pp. 313-381). Academic Press.
- Gibson, R. G., Dzou, L. I., & Greeley, D. F. (2004). Shelf petroleum system of the Columbus basin, offshore Trinidad, West Indies. I. Source rock, thermal history, and controls on product distribution. *Marine and Petroleum Geology*, 21(1), 97-108.
- Mahmoudzadeh, N., Fardoust, F., Ghavami Riabi, R., & Jafarzadeh, M. (2022). Organic geochemistry of Paleogene Pabdeh Formation in Northern Dezful Embayment, Zagros, SW Iran. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(1), 81-112.
- Moradi, S., Kalantari, N., & Charchi, A. (2017). Geomorphology of karst features in the northeast of Khuzestan, Iran. Springer.
- Motiei, H., 1993, Geology of Iran: stratigraphy of Zagros: Geological Survey of Iran, Tehran, v. 572.
- Rickard, D., & Luther, G. W. (2007). Chemistry of iron sulfides. *Chemical reviews*, 107(2), 514-562.
- Seal, R. R. (2006). Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 61(1), 633-677.
- Sherkati, S., & Letouzey, J. (2004). Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and petroleum geology*, 21(5), 535-554.

کانی‌شناسی و شیمی‌کانی گارنت در لوکوگرانیت شاولی (شمال ازنا، استان لرستان)

سیدوحید شاهرخی^{*۱}

۱- گروه زمین‌شناسی، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

چکیده

گارنت به‌عنوان کانی فرعی در لوکوگرانیت شاولی در شمال ازنا، که بخشی از پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان را تشکیل می‌دهد، حضور دارد. لوکوگرانیت شاولی در میان سنگ‌های دگرگونی رخمون یافته است. گارنت‌ها عمدتاً بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار بوده، فاقد حاشیه‌های واکنشی و اذخال هستند و ترکیب شیمیایی یکنواختی از خود نشان می‌دهند. این گارنت‌ها غنی از مؤلفه اسپسارتین می‌باشند. بر اساس شواهد پتروگرافی و شیمی‌کانی، گارنت‌ها دارای منشأ ماگمایی بوده و از مذاب‌های فلسیک مشتق شده‌اند. مقدار پایین CaO (کمتر از ۴ درصد وزنی) و مقادیر متغیر اما نسبتاً بالای MnO نشان می‌دهد که این گارنت‌ها در یک ماگمای نوع S، شدیداً پرآلومینه و تحت فشار کم در پوسته بالایی متبلور شده‌اند. همچنین، محتوای پایین CaO همراه با غنای MnO بیانگر خاستگاه متاپلیتی مذاب مادر است. بررسی شیمی‌کانی گارنت‌ها دلالت بر S-تایپ بودن ماگمای لوکوگرانیت شاولی دارد.

کلیدواژه‌ها: گارنت، لوکوگرانیت، شیمی‌کانی، شاولی، ازنا.

Mineralogy and Mineralchemistry of Garnet in Shavali leucogranite (North Azna, Lorestan Province)

Seyed Vahid Shahrokhi^{*1}

¹Department of Geology, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

Vahid.shahrokhi@iau.ac.ir

Abstract

Garnet occurs as an accessory mineral in the Shavoli leucogranite located in the north of Azna within the Sanandaj-Sirjan metamorphic zone. The Shavoli leucogranite intrudes metamorphic rocks and is spatially associated with high-grade metamorphic lithologies. Garnet crystals are predominantly anhedral to subhedral, lack reaction rims and mineral inclusions, and display a homogeneous chemical composition. The garnets are notably enriched in the spessartine component. Petrographic observations combined with mineral chemical data indicate a magmatic origin for the garnets, crystallized directly from felsic melts. The low CaO contents (<4 wt.%) and variable but relatively elevated MnO values suggest crystallization from a strongly peraluminous S-type magma under low-pressure conditions in the upper crust. The low CaO coupled with high MnO concentrations further implies a metapelitic source for the parental melt. Mineral chemical characteristics of the garnets provide robust evidence for an S-type affinity of the Shavoli leucogranite magma, consistent with partial melting of metasedimentary protoliths within the Sanandaj-Sirjan zone.

Keywords: Garnet, Leucogranite, Mineralchemistry, Shavali, Azna.

۱- مقدمه

لوکوگرانیت شاولی میزبان کانی مهم گارنت است. این کانی ترکیبات متغیری داشته و یکی از تشکیل دهنده‌های نامتداول در گرانیت‌ها به شمار می‌رود. بر اساس مطالعات انجام شده گرانیت‌های گارنت‌دار در نوارهای کوهزایی گسترش دارد (برای مثال Samadi et al., 2014) و انواع غنی از اسپسارتین معمولاً در گرانیت‌های نوع S و در واقع در ماگماهای گرانیتی سرشار از آلومینیوم و منگنز و در فشارهای نسبتاً پایین متبلور می‌شود (Dalquist, 2007). گارنت‌ها بر اساس طبیعت گرانیت میزبانشان ترکیب شیمیایی متغیری نشان می‌دهد. گارنت موجود در گرانیت‌های نوع S دارای مقادیر بالایی از FeO, MnO و مقادیر پایین MgO می‌باشند (Zhang et al., 2012). همچنین گارنت ماگمایی موجود در سنگ‌های آذرین را می‌توان به سه گروه ۱- گارنت‌هایی که در گرانیت‌های شدیداً پرآلومینه که تحت فشار کم در پوسته بالایی متبلور شده است و دارای مقدار بالای FeO (بیشتر از ۳۰ درصد) و MnO بین ۵ تا ۱۵ درصد می‌باشد (Zhang et al., 2012). گارنت‌هایی که در بازالت‌ها، آندزیت‌ها، داسیت‌ها، ریولیت‌ها، تونالیت‌ها، و گرانیت‌های پورفیری که تحت فشار بالا در پوسته زیرین و یا گوشته متبلور شده باشد و دارای مقدار FeO (۲۰ تا ۳۰ درصد) MgO (۵ تا ۱۰ درصد) و CaO حدود ۵ درصد است (Zhang et al., 2012; Yuan et al., 2009) گارنت‌هایی که در پگماتیت‌ها، آپلیت‌ها و گرانیت‌هایی که از سیالات پست ماگماتیک یا ماگمای شدیداً تفریق یافته متبلور شده دارای MnO حدود ۳۰٪ و FeO بین ۱۰-۱۵٪ می‌باشد (Whithworth, 1992). هدف از این مقاله استفاده از ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمی کانی گارنت در لوکوگرانیت شاولی جهت شناسایی نوع این کانی‌ها و شرایط تشکیل آن‌ها می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور شناسایی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه، بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام گرفت. در ابتدا از کلیه رخنمون‌های سنگ‌های منطقه بیش از ۲۰۰ نمونه برداشت شد. سپس از نمونه‌ها برای مطالعات میکروسکوپی به تعداد یکصد و بیست مقاطع نازک تهیه گردید. بررسی دقیق کانی‌شناسی و روابط بافتی انجام شد و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان (Olympus) مدل BH-2 ۸ نقطه از چهار مقطع از نمونه‌های مناسب جهت انجام تجزیه الکترونی انتخاب گردید. تعیین ترکیب و مقادیر اکسیدهای کانی گارنت با استفاده از دستگاه تجزیه الکترونی (الکترون مایکروپروب) مدل Cameca Sx-50 با ولتاژ شتاب دهنده KeV 20 (کیلو الکترون ولت) و شدت جریان 20 nA (نانو آمپر) در دانشگاه دولتی مسکو کشور روسیه به روش آنالیز نقطه‌ای صورت پذیرفته است (جدول ۱). محاسبه فرمول ساختاری این کانی بر پایه ۳۱ آنیون (O, OH) و آهن کل دوزلفیتی انجام شد. در محاسبه فرمول ساختاری کانی‌ها و ترسیم نمودارها از نرم افزارهای Minpet, Mineral structural formulae, Excel استفاده گردید.

۳- بحث

۳-۱- زمین‌شناسی

ناحیه شاولی به عنوان بخشی از زون دگرگونه سندرچ-سیرجان بین طول جغرافیایی ۲۴' ۴۹° تا ۳۲' ۴۹° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱' ۳۳° تا ۳۸' ۳۳° شمالی، در جنوب محدوده نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شازند (سهندی و همکاران، ۱۳۸۵) و در ۷ کیلومتری شمال ازنا، استان لرستان واقع شده است (شکل ۱). گرانیت‌های شمال ازنا از نوع لوکوگرانیت، گرانیت و گرانودیوریت معرفی شده و مطالعات ژئوشیمیایی بیانگر ماهیت ساب آکالن (کالک آکالن)، سرشت پرآلومین و نوع S است و خاستگاه این

سنگ‌ها پوسته بالایی (ذوب بخشی متاپلیت‌ها) و از لحاظ ژئوتکتونیک در جایگاه همزمان با برخورد است (Darvishi et al., 2015).

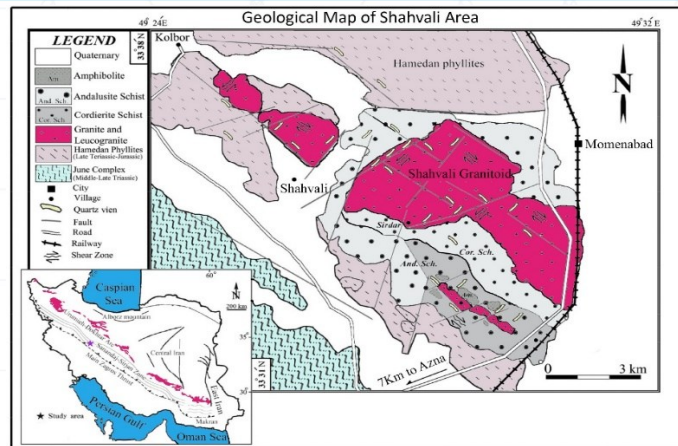
جدول ۱: نتایج آنالیز مایکروپروب کانی گارنت موجود در سنگ‌های لوکوگرانیتی منطقه شاولی

Sample	Az-24	Az-24	Az-24	Az-24	S-20	S-20	S-20	S-20
Rock type	Leucogranite	Leucogranite	Leucogranite	Leucogranite	Leucogranite	Leucogranite	Leucogranite	Leucogranite
SiO ₂	36.28	36.24	36.22	36.26	36.12	36.21	36.09	36.15
Al ₂ O ₃	20.75	20.71	20.74	20.73	20.70	20.65	20.75	20.70
FeO _t	32.57	33.20	33.22	32.8	33.14	32.83	32.9	32.85
MnO	7.70	7.06	7.09	7.20	7.18	7.22	7.1	7.16
MgO	2.02	2.09	2.05	2.06	1.95	2.16	1.96	2.06
CaO	0.28	0.26	0.24	0.25	0.26	0.25	0.24	0.25
Total	99.60	99.56	99.54	99.3	99.35	99.32	99.04	99.17
O	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.97	2.96	2.95	2.96	2.96	2.97	2.97	2.97
Al	2	2	2	2	2.002	1.96	2.01	1.98
Fe ³⁺	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06
Fe ²⁺	2.16	2.2	2.3	2.19	2.2	2.18	2.21	2.20
Mn	0.533	0.489	0.482	0.51	0.499	0.501	0.495	0.498
Mg	0.246	0.255	0.250	0.25	0.239	0.264	0.24	0.25
Ca	0.025	0.023	0.021	0.024	0.023	0.022	0.021	0.022
Total	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Almandine	72.9	74.1	74.6	73.2	74.3	73.5	74.5	74.1
Spessartine	18	16.5	16.2	17.2	16.8	16.9	16.7	16.8
Pyrope	8.3	8.6	8.2	8.5	8	8.9	8.1	8.5
Grossular	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7

بر اساس مشاهدات صحرایی، گارنت در نمونه دستی به صورت بلورهای دانه درشت به رنگ قهوه‌ای روشن مایل به کرم در لوکوگرانیت‌های منطقه دیده می‌شود که از فراوانی متوسطی برخوردار است. (شکل ۵). در اطراف هاله دگرگونی توده اصلی شاولی مجموعه‌ای از لوکوگرانیت‌های تورمالین و گارنت‌دار، آپلیت‌ها و پگماتیت‌ها، میگماتیت‌ها و میلونیت‌ها وجود دارد. این سنگها دارای کانیهای عمدتاً کوارتز، پلاژیوکلاز، ارتوزکلاز و کانیهای فرعی بیوتیت، تورمالین، گارنت، موسکویت و سیلیمانیت بوده که براساس شواهد پتروگرافی و داده‌های ژئوشیمیایی این سنگ‌ها را میتوان در شمار گرانیت‌های تیپ S طبقه بندی نمود (Darvishi et al., 2015).

۳-۲- کانی‌شناسی

از دیدگاه کانی‌شناسی، گارنت همراه با تورمالین و موسکویت کانی فرعی لوکوگرانیت‌ها بوده و کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم و بیوتیت نیز کانی‌های اصلی این سنگ‌ها می‌باشد. براساس مطالعات پتروگرافی بافت اصلی این سنگ‌ها گرانولار تا سری‌ایت تغییر می‌کند و مرز بین دانه‌ها پلی‌گونال تا اینترلوبیت می‌باشد. کوارتزها دارای خاموشی موجی وصله‌ای و صفحه شطرنجی می‌باشند. پلاژیوکلازها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و دارای ماکل آلبیت و آلبیت پریکلین هستند. فلدسپار پتاسیم به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل در اندازه‌های بزرگ تا ریز بلور و برخی مواقع به صورت میکروکلین پرتیتی دیده می‌شود. گارنت‌ها بی‌شکل تا شکل‌دار، در نور عادی به صورت قهوه‌ای کم رنگ با برجستگی بالا، بدون حاشیه واکنشی با کانی‌های مجاور و بدون ادخال مشاهده شدند.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ناحیه شاولی برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شازند (سهندی و همکاران، ۱۳۸۵) همراه با اندکی تغییر.

گارنت در لوکوگرانیت‌های منطقه در نمونه دستی به رنگ قهوه‌ای روشن مایل به کرم (حنایی) و به صورت متوسط تا درشت دانه دیده می‌شود (شکل ۲، a و b). فراوانی این کانی در حاشیه توده نفوذی، و به‌ویژه در لوکوگرانیت‌ها بیشتر می‌باشد. در زیر میکروسکوپ و در نور عادی به صورت قهوه‌ای کم رنگ با برجستگی بالا، بی‌شکل تا شکل دار (به صورت چند ضلعی با مرزهای واضح و صاف) و نیز به شکل اتول (دارای فرورفتگی‌های خلیج مانند)، خرد شده با اندازه‌های کوچک و بزرگ (حدود ۲ میلی‌متر تا یک سانتی‌متر) بدون واکنش با کانی‌های مجاور دیده می‌شود که گاه به کلریت و بیوتیت تبدیل شده است (شکل ۳، a و b). بر اساس بررسی‌های پتروگرافی، وجود گارنت بدون ادخال و بی‌شکل در گرانیت‌های پرآلومینه نشانگر تبلور گارنت در شرایط حرارت و فشار بالا و اکتیویته کم آب می‌باشد (Clemens and wall, 1981). گارنت عموماً در مجموعه رستیت پایدار است که نتیجه ذوب لیتولوژی پوسته‌ای می‌باشد، مگر اینکه ذوب در درجه حرارت کمتر از ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد توسط واکنش زیر رخ دهد (Guillot et al., 1995):

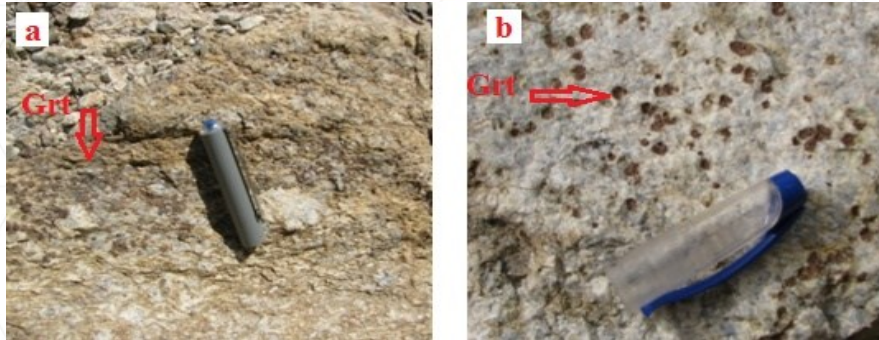


از طریق این واکنش در یک پروتولیت بدون گارنت یا ذوب در فشار کمتر از ۵ کیلوبار، کوارتز و مسکویت به‌وسیله گارنت و فلدسپار جایگزین می‌شود.

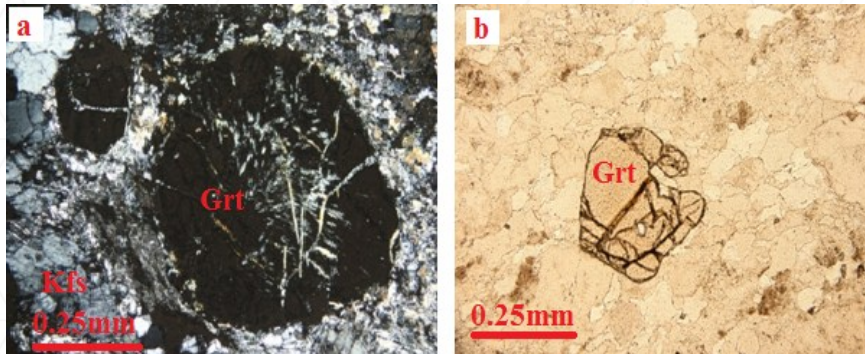
۳-۳- ترکیب شیمیایی و تعیین شرایط تشکیل گارنت:

بر اساس فرمول ساختاری و طبق تقسیم‌بندی کارپر، ترکیب گارنت‌های مورد مطالعه به سری اسپسارتین ($[SiO_4]_3$) (Al_2Mn_3) و آلماندین $([SiO_4]_3 Al_2Fe_3)$ تعلق دارد (جدول ۱) (Miller and Stoddard, 1981). فنوکریست بودن گارنت‌ها، با توجه به این که گارنت‌های شکل دار و فاقد منطقه‌بندی معمولاً به عنوان فنوکریستال شناخته می‌شوند (Harrison, 1988) می‌تواند دلیلی بر غنی بودن آنها از اسپسارتین باشد (Miller and Stoddard, 1981).

گارنت ماگمایی با ویژگی محلول جامد آلماندین- اسپسارتین در گرانیت‌های پرآلومینه گزارش شده است. همچنین گارنت‌هایی که در گرانیت‌های شدیداً پرآلومینه که تحت فشار کم در پوسته بالایی متبلور شده است و دارای مقدار بالای FeO (بیشتر از ۳۰ درصد) و MnO بین ۵ تا ۱۵ درصد می‌باشد (Zhang et al., 2012; Samadi et al., 2014). بنابراین با توجه به ترکیب شیمیایی گارنت‌های لوکوگرانیت‌های منطقه مورد مطالعه (که دارای بیش از ۳۰ درصد FeO و حدود ۸ درصد MnO)، می‌توان نتیجه گرفت که گارنت‌های مورد بحث در یک ماگمای نوع S و شدیداً پرآلومینه و تحت فشار کم در پوسته بالایی متبلور شده و نظر به محتوای CaO کمتر از ۴ درصد و MnO بالا، دارای خاستگاه متاپلیتی است.

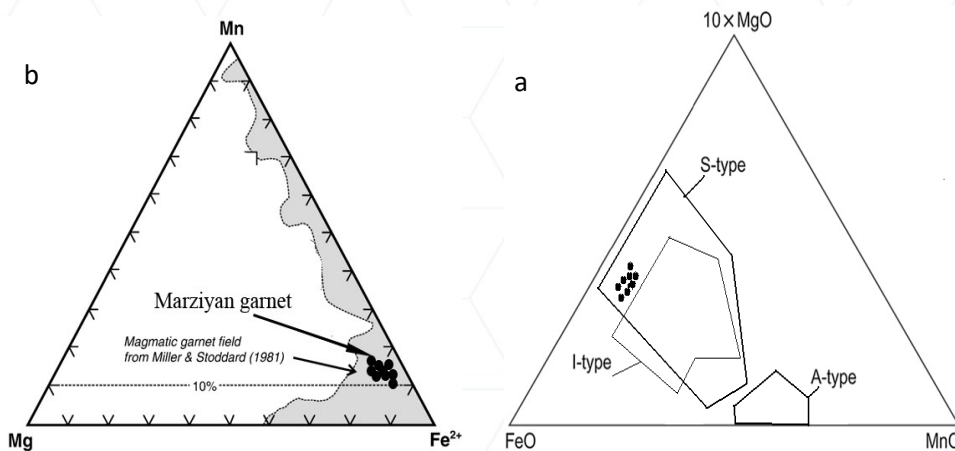


شکل ۲- (a) نمایی از رشد بلورهای گارنت بصورت پراکنده. (b) نمایی از تجمع گارنت‌ها درون لوکوگرانیت‌ها



شکل ۳- (a) بلوهای گارنت تبدیل شده به کلریت. (b) تجمع بلورهای درشت گارنت در لوکوگرانیت‌های منطقه شاولی (تصویر a: XPL، تصویر b: PPL).

گارنت‌های منطقه مرزبان بر اساس نمودار $FeO-10*MgO-MnO$ در محدوده گارنت‌های موجود در گرانیت‌های S-type واقع می‌شود (شکل ۵-ا). بررسی‌های Harangi و همکاران (۲۰۰۱)، نشان می‌دهد که گارنت‌های دارای MnO کمتر از ۴ درصد و CaO بالا، طبیعت ماگمایی (ماگمای نوع I یا M) دارد و گارنت‌های دارای MnO بیشتر از ۴ درصد دارای خاستگاه متاپلیتی است. لذا با توجه به مقدار MnO گارنت‌های منطقه (بیشتر از ۷ درصد) و نیز ترکیب محلول جامد آلماندین- اسپسارتین (جدول ۱)، می‌توان خاستگاه متاپلیتی را برای آنها تصور نمود. در نمودار $Mn-Mg-Fe^{2+}$ (Miller, 1981)، گارنت‌های منطقه تحت مطالعه در محدوده گارنت‌های ماگمایی واقع می‌شود (شکل ۵-ب).



شکل ۵- (a) موقعیت گارنت‌های گرانیت شاولی در نمودار مثلثی $FeO-MgO*10-MnO$ (Zhang et al., 2012). (b) ترکیب گارنت‌های گرانیت شاولی در نمودار $Fe^{2+}-Mg-Mn$ (Miller and Stoddard, 1981).

۴- نتیجه‌گیری

بررسی شیمی کانی‌های سنگ‌های گرانیتی شاولی نشان می‌دهد که گارنت‌ها از نوع ماگمایی و متعلق به سری آلماندین-اسپسارترین می‌باشد و با توجه به اینکه دارای بیش از ۳۰ درصد FeO و حدود ۸ درصد MnO می‌باشند، می‌توان نتیجه گرفت که گارنت‌های مورد بحث در یک ماگمای نوع S و شدیداً پرآلومینه و تحت فشار کم در پوسته بالایی متبلور شده و نظر به محتوای کمتر از ۴ درصد و MnO بالا، احتمالاً گارنت‌ها دارای خاستگاه متاپلیتی است. تورمالین‌های منطقه در محدوده شورلیت تا دراویت قرار دارند که حاکی از زیاد بودن مقدار آهن در مقایسه با منیزیم در ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه است و با توجه به مقدار $Fe^{\#}$ تورمالین‌های منطقه (۰/۷ - ۰/۴۸) در یک سیستم ماگمایی با نسبت بالای Al و Fe/Fe+Mg و هیدروترمالی با $Fe^{\#}$ پایین رده‌بندی می‌شوند. و نیز مقدار کم تیتان در تورمالین‌های منطقه می‌تواند به خوبی دلالت بر S تایپ بودن ماگمای گرانیت شاولی داشته باشد. وجود گارنت و تورمالین ماگمایی دلالت بر پرآلومینه لوکوگرانیت‌های منطقه دارد.

۵- مراجع

- سهندی، م، ا، رادفر، ج، حسینی دوست، محجل، م، ۱۹۸۵. نقشه زمین‌شناسی سازند به مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰.
- Allan, B.D. and Clarke, D.B., 1981. Occurrence and origin of garnets in the south mountain batholith, Nova Scotia. *The Canadian Mineralogist* 19, 19-24.
- Clemens, J.D., Wall, V.J., 1981. Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas, *Canadian Mineralogist* 19, 111-131.
- Darvishi, E. Khalili, M, Koksals, S, Koksals, F. Roy, B., 2015. Geochemistry, Sr-Nd isotope data and petrogenesis of the Marziyan granitoid, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran, *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry* 192, 195-210.
- Guillot, S., Le Fort, P., 1995. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites, *Lithos* 95, 221-234.
- Harangi, S., Downes, H., Kosa, L., Szabo, C., Thirlwall, M.F., Mason, P.R.D. and Matthey, D., 2001. Almandine garnet in calc-alkaline volcanic rocks of the Northern Pannonian Basin (Eastern-Central Europe): geochemistry, petrogenesis and geodynamic implications. *Journal of Petrology* 42, 1813-1843.
- Harrison, T.N., 1988. Magmatic garnets in the Cairngorm granite. *Mineralogical Magazine* 52, 4, 659-670.
- Miller, C.F. and Stoddard, E.F., 1981. The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet: an example from the Old Woman-Piute Range, California. *Journal of Geology* 89, 233-246.
- Samadi, R., Miller, N.R., Mirnejad, H., Harris, C., Kawabata, H., Shirdashtzadeh, N., 2014. Origin of garnet in aplite and pegmatite from Khajeh Morad in northeastern Iran: A major, trace element, and oxygen isotope approach, *Lithos* 208-209, 378-392.
- Shakerardakani, F., Neubauer, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Liu, X.m Dong, Y., Mohajjel, M., Monfaredi, B. and Friedl, G., 2015. Panafrican basement and Mesozoic gabbro in the Zagros orogenic belt in the Dorud-Azna region (NW Iran): Laser-ablation ICP-MS zircon ages and geochemistry. *Tectonophysics* 647: 146-171.
- Whithworth, M.P., 1992. Petrogenetic implications of garnets associated with lithium pegmatites from SE Ireland. *Mineralogical Magazine* 56, 1, 75-83.
- Yuan, C., Sun, M., Xiao, W., Wilde, S., Li, X., Liu, X., Long, X., Xia, X., Ye, K., Li, J., 2009. Garnet-bearing tonalitic porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: implications for adakite and magmas from the MASH zone, *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)* 98, 1489-1510.
- Zhang, J., Ma, C., She, Z., 2012. An Early Cretaceous garnet-bearing metaluminous A-type granite intrusion in the East Qinling Orogen, central China: Petrological, mineralogical and geochemical constraints. *Geoscience Frontiers* 3, 5, 635-646.

پتروگرافی و نظم بلوری (استوشیومتری) در بلورهای دولومیت (مثالی از سازند شهبازان، زاگرس چین خورده)

سیدمحمد رضا امامی^{۱*}، بیژن یوسفی یگانه^۱، مصطفی صداقت‌نیا^۲

۱- گروه زمین شناسی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- دانش آموخته مقطع دکتری، کارشناس آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

*luckpages@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش دولومیت‌های سازند شهبازان (ائوسن) از دیدگاه پتروگرافی و نظم بلوری (استوشیومتری) در یک برش از یال جنوبی تقادیس خرم‌آباد مورد ارزیابی قرار گرفته است. مرز زیرین سازند شهبازان با سازند آواری کشکان به صورت پیوسته و مرز زیرین آن با کربنات‌های آسماری به صورت ناپیوسته است. دو گروه از دولومیت‌ها (اولیه و ثانویه) در هر دو سازند شناسایی گردید. در دولومیت‌های مورد مطالعه یک روند افزایشی از عناصر Fe و Mn و یک روند کاهشی از عنصر Sr از دولومیت‌های اولیه به سمت دولومیت‌های ثانویه مشاهده می‌شود. میانگین نسبت Ca/Mg برای دولومیت‌های سازند شهبازان بیش از ۱/۶ می‌باشد و لذا این دولومیت‌ها هنوز به حالت استوکیومتری (نظم بلوری) نرسیده‌اند. این موضوع را می‌توان با توجه به سن سازندها توجیه نمود به گونه‌ای که با گذشت زمان دولومیت‌ها به حالت استوکیومتری نزدیک‌تر می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: پتروگرافی، دولومیت، سازند شهبازان، نظم بلوری، زاگرس

Petrography and crystal order (stoichiometry) in dolomite crystals (An Example of the Shahbazan Formation, Folded Zagros)

SMR, Emami^{1*}; Bizhan Yousefi Yeganeh¹; Mostafa Sedaghatnia²

¹Geology Department, Lorestan University, Khoramabad

²Central Laboratory, Lorestan University, Khoramabad

*luckpages@yahoo.com

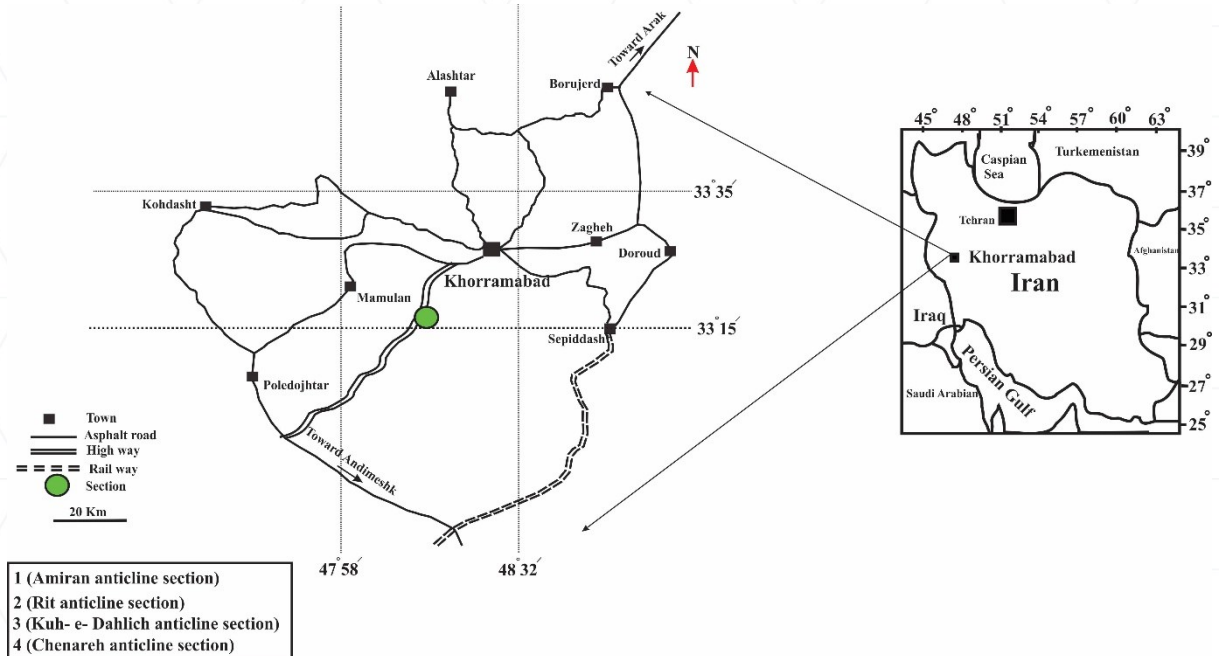
Abstract

In this study, dolomites of the Shahbazan Formation (Eocene) have been evaluated from the perspective of petrography and crystal order (stoichiometry) in a section of the southern ridge of the Khorramabad anticline. The lower boundary of the Shahbazan Formation is continuous with the Kashkan Alluvial Formation, and its upper boundary is discontinuous with the Asmari carbonates. Two groups of dolomites (primary and secondary) were identified in both formations. In the studied dolomites, an increasing trend of Fe and Mn elements and a decreasing trend of Sr element are observed from primary dolomites towards secondary dolomites. The average Ca/Mg ratio for dolomites of the Shahbazan Formation is more than 1.6, and therefore these dolomites have not yet reached the stoichiometric state (crystalline order). This can be explained by the age of the formations, as dolomites become closer to a stoichiometric state over time.

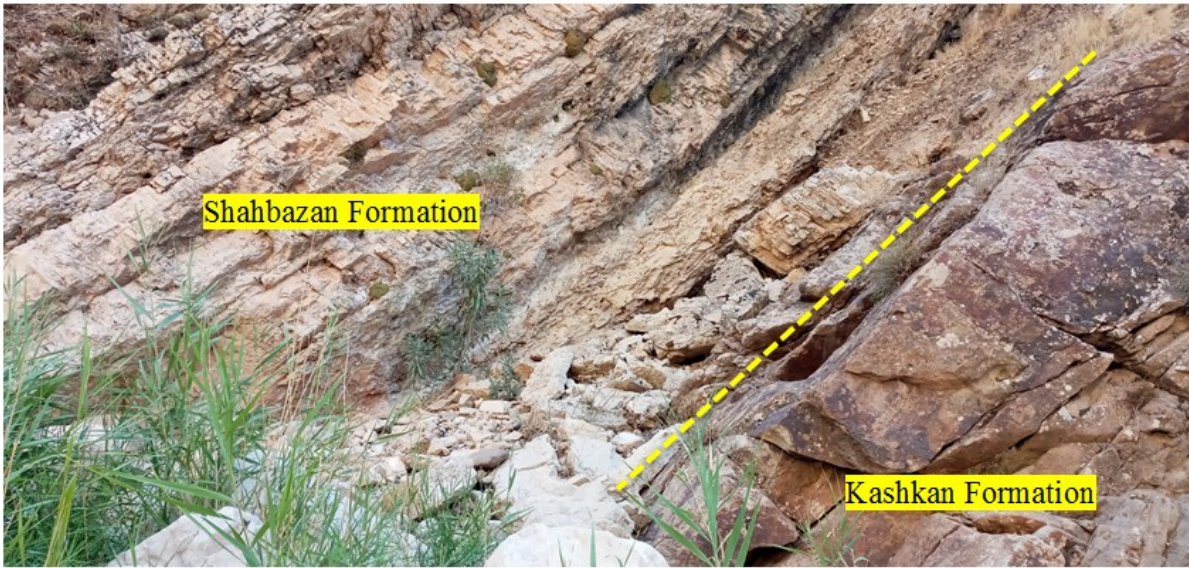
Keywords: Petrography, Dolomite, Shahbazan formation, Crystal order, Zagros

۱- مقدمه

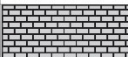
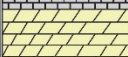
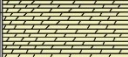
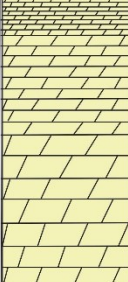






نام سازند شهبازان از روستای شهبازان (در کنار راه آهن اندیمشک - دورود) گرفته شده و برش الگوی آن در ادامه سازند تله‌زنگ در تنگ دو، در ۴/۵ کیلومتری جنوب باختری ایستگاه تله‌زنگ قرار دارد (جیمز و وایند، ۱۹۶۵). سازند شهبازان شامل ۳۳۳/۸ متر دولومیت و آهک‌های دولومیتی با رنگ هوازده سفید تا قهوه‌ای با سیمای ضخیم‌لایه است که به طور پیوسته بر روی سازند آواری کشکان و به طور ناپیوسته در زیر سازند آسماری قرار دارد. با توجه به فسیل‌های موجود، سن آن ائوسن میانی تا بالایی تعیین شده است (جیمز و وایند، ۱۹۶۵). برش چینه‌شناسی انتخاب شده برای سازند شهبازان در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد و در یال جنوبی تاقدیس خرم‌آباد واقع شده است که از طریق جاده آزادراه خرم‌آباد به سمت اندیمشک پس از طی مسافت ۱۵ کیلومتر قابل دسترسی است (شکل ۱). سازند شهبازان در برش مورد مطالعه دارای ضخامت ۱۱۰ متر می‌باشد که مرز پایینی آن به صورت هم‌شیب بر روی سازند آواری کشکان و مرز بالایی توسط کربنات‌های سازند آسماری به صورت ناپیوسته پوشیده شده است (شکل ۲). در شکل ۳ ستون سنگ‌چینه‌ای سازندهای شهبازان در برش مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی برش‌های مورد مطالعه. برش‌ها با علامت دایره سبزرنگ رنگ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمایی از سازند دولومیتی شهبازان در یال جنوبی تاقدیس خرم‌آباد

Series	Formation	Thickness (m)	Lithology	Description
Eocene	Shahbazan	110		Limestone
				Medium bedded dolomite
				Thin bedded limestone
				Medium to thick bedded dolomite
				Thin bedded dolomite
				Thin bedded limestone
				Medium bedded dolomite
				Medium bedded limestone
				Thin bedded dolomite
	Kashkan			Conglomerate and sandstone

شکل ۳: ستون سنگ‌چینه‌ای سازند شهبازان در یال جنوبی تاقدیس خرم‌آباد

۲- مواد و روش‌ها

جهت انجام مطالعات پتروگرافی و تشخیصی بافت دولومیت‌ها ۱۱۰ مقطع نازک رسوبی مطالعه قرار گرفت. تمام مقاطع نازک به روش (دیکسون، ۱۹۶۵) توسط محلول آلیزارین قرمز (ARS) برای تشخیص کانی‌های کلسیت از دولومیت و محلول فروسیانید پتاسیم برای تشخیص دولومیت‌های آهن دار رنگ آمیزی شدند. نامگذاری دولومیت‌ها بر پایه تلفیقی از رده‌بندی بافتی سیبلی و گرک (۱۹۸۷) و مزالو (۱۹۹۲) صورت گرفت. برای اندازه بلورهای دولومیت از مقیاس ارائه شده توسط (فولک، ۱۹۶۵) و آدابی (۲۰۰۹) استفاده شد. برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی تعداد ۱۵ نمونه از دولومیت‌ها جهت آنالیز عنصری به روش (EDS) انتخاب شده است. مطالعات پتروگرافی توسط میکروسکوپ پلاریزان Olympus BH-2 و میکروسکوپ الکترونی (SEM) و مطالعات ژئوشیمیایی بر مبنای آنالیز عنصری به روش‌های (EDS) و (EPMA) در آزمایشگاه مرکزی شماره ۱ دانشگاه لرستان صورت گرفت. از دولومیت‌های ریزبلور تصویربرداری الکترونی (SEM) در دانشگاه لرستان صورت گرفته است.

۳- بحث

پتروگرافی دولومیت‌های سازند شهبازان

سه نوع دولومیت بر اساس اندازه بلورها در سازند شهبازان شناسایی گردید.

دولومیت نوع اول یا دولومیکرایت‌ها (دولومیت‌های ریز بلور)

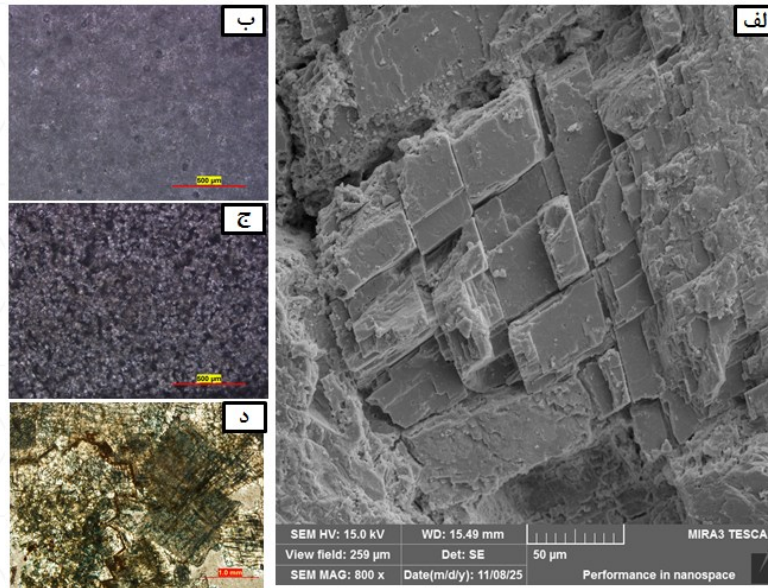
این نوع از دولومیت‌ها با بافت موزائیکی و اغلب شکل‌دار تا بی‌شکل در اندازه‌های بین ۴ تا ۲۰ میکرون در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۴- الف و ب). فابریک متراکم، تیره رنگ و فاقد فسیل این نوع از دولومیت‌ها، وجود شواهد بافتی رسوبی اولیه به نظر می‌رسد تحت شرایط سطحی و دمای پایین تشکیل شده‌اند (آدابی، ۲۰۰۹). این نوع دولومیت‌ها احتمالاً همزمان با رسوبگذاری یا در مراحل اولیه دیاژنز در محیط بالای جزر و مدی یا بین جزر و مدی تشکیل شده است (فولک، ۱۹۶۵).

دولومیت نوع دوم یا دولومیکرواسپارایت (دولومیت‌های متوسط بلور)

دولومیت‌های متوسط بلور بصورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در اندازه‌های بین ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۴- ج). این دولومیت‌ها حاصل تبلور مجدد از بلورهای ریزتر دولومیکرایت هستند به گونه‌ای که بقایایی از بافت اولیه در این نوع از دولومیت‌ها دیده می‌شود. این نوع از دولومیت‌ها معادل فابریک Idiopic - P گرگ و سیبلی (۱۹۸۷) و دولومیت‌های Planar - P مزالو (۱۹۹۲) می‌باشد (آدابی، ۲۰۰۹).

دولومیت نوع سوم (دولومیت‌های درشت بلور)

در مقاطع مورد مطالعه این نوع از دولومیت‌ها به صورت بی‌شکل، نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار و در اندازه‌های چندین بلور (بزرگتر از چند میلیمتر) به صورت پر کننده شکستگی‌ها و در بین دانه‌ها به صورت سیمان درشت بلور دیده می‌شوند (شکل ۴- د). رنگ آمیزی این گروه از دولومیت‌ها با آلیزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم بیانگر وجود عنصر آهن در آن‌ها می‌باشد.



شکل ۴: الف: دولومیت ریزبلور تحت میکروسکوپ الکترونی، ب: دولومیت ریزبلور با بافت متراکم، ج: دولومیت متوسط بلور، د: دولومیت درشت بلور آهن دار

زمین‌شیمی عنصری و نظم بلوری در دولومیت‌های مورد مطالعه

نتایج آنالیز EDS بلورهای دولومیت مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: نتایج آنالیز بلورهای دولومیت مورد مطالعه به روش EDS

Dolomite type	Samples	Ca(%)	Mg(%)	Fe(ppm)	Mn(ppm)	Sr(ppm)	Na(ppm)	C(%)	O(%)	Ca/Mg
Dolomicrite	Max	21.60	12.90	0.07	0.03	0.09	0.91	44.25	40.20	1.88
	Min	18.80	10.50	0.02	0.01	0.06	0.02	23.05	20.30	1.65
	Average	21.06	11.22	0.02	0.02	0.71	0.03	32.80	31.20	1.78
Dolomicrosparite	Max	20.3	11.20	0.04	0.05	0.06	0.02	40.95	43.25	1.90
	Min	18.5	9.8	0.03	0.02	0.02	0.01	20.3	24.60	1.83
	Average	18.84	10.45	0.04	0.03	0.04	0.02	38.2	31.33	1.96
Dolosparite	Max	21.3	10.45	0.1	0.1	0.03	0.02	48.1	40.2	1.98
	Min	18.50	9.12	0.05	0.02	0.02	0.01	26.45	20.25	1.95
	Average	19.07	9.6	0.08	0.06	0.01	0.01	30.36	35.68	1.99

نسبت Ca/Mg در دولومیت‌های ایده آل برابر ۱/۶ می‌باشد (آدابی، ۲۰۰۹؛ حیکت و همکاران، ۲۰۲۴). میانگین این نسبت برای فازهای مختلف آنالیز شده برای دولومیت‌های سازند شهبازان برابر ۱/۷۸ برای دولومیت‌های ریزبلور، ۱/۹۶ برای دولومیت‌های متوسط بلور و ۱/۹۹ برای دولومیت‌های درشت بلور می‌باشد. می‌توان گفت دولومیت‌های سازند شهبازان هنوز به حالت استوکیومتری نرسیده‌اند. این موضوع را می‌توان با توجه به سن سازندها توجیه نمود به گونه‌ای که با گذشت زمان دولومیت‌ها به حالت استوکیومتری نزدیک‌تر می‌شوند و هرچه سن نهشته‌ها جوانتر باشد به حالت غیراستوکیومتری نزدیک‌تر می‌شوند (السیناوی و همکاران، ۲۰۲۴).

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات پتروگرافی و زمین‌شیمی عنصری بر روی عناصر اصلی نظیر Mg و Ca و عناصر فرعی نظیر Sr, Fe, Na, Mn دو گروه اصلی از دولومیت‌ها در سازند شهبازان شناسایی شده است که شامل دولومیت‌های اولیه (هم‌زمان با رسوب‌گذاری) و دولومیت‌های ثانویه (پس از رسوب‌گذاری) می‌باشند. در برش سازند خانه‌کت دولومیت‌های بسیار درشت‌بلور دارای منطقه‌بندی مشاهده گردید که اغلب در امتداد استیلولیت‌ها شکل گرفته‌اند. در دولومیت‌های مورد مطالعه هر دو سازند یک روند افزایشی از عناصر Fe و Mn و یک روند کاهش از عنصر Sr از دولومیت‌های اولیه (ریزبلور) به سمت دولومیت‌های ثانویه (متوسط و درشت‌بلور) دیده می‌شود. میانگین نسبت Ca/Mg در دولومیت‌های سازند شهبازان بیش از ۱/۶ می‌باشد و بیانگر این است که دولومیت‌های سازند شهبازان هنوز به حالت استوکیومتری نرسیده‌اند و نظم بلوری کمتری دارند. این موضوع را می‌توان با توجه به سن سازندها توجیه نمود به گونه‌ای که با گذشت زمان دولومیت‌ها به حالت استوکیومتری نزدیک‌تر می‌شوند.

۵- مراجع

- Adabi, M. H., 2009. Multistage dolomitization of upper Jurassic Muzduran Formation, Kopet-Dagh basin, N.E. Iran: *Crab. Eva.*, v:24, p:16-32.
- Al-Sinawi, N., Hollis, C., Duval-Arnould, A., Koeshidayatullah, A., Schroder, S., Redfern, J., 2024. Dolomitization of early-post rift Lower Jurassic carbonate platforms along the Moroccan Atlantic margin: origin and significance. *J African Earth Sci* 211:105167. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105167>
- Folk, R. L., 1965. Some aspects of recrystallization in ancient limestones. In: Pray, L.C. and Murray, R.C. (eds.): *Dolomitization and limestone diagenesis*. Society of Economic Paleontologist and Mineralogists. *Spec. Publ.*, v:13, p:14-48.
- Hikmat, S., Jaleel, A., Tobia, F., Idrees, A., Jaleel, B., 2024. Geochemical characteristics of dolomite: a case study from lower jurassic formations, imbricated zone, Iraqi Kurdistan region. *Carbonates and Evaporites*, <https://doi.org/10.1007/s13146-024-01012-w>
- James, G.A. and Wynd, J.G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium, agreement area, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 49(12), 2182-2245.
- Mazzollo, S.J., 1992. Geochemical and neomorphism alteration of dolomite: a review: *Carbonates and Evaporites*, v: 7, p:21-37.
- Sibley, D.F., Gregg, J.K., 1987. Classification of dolomite rock textures. *J. Sediment. Petrol.*, v: 57, p: 967-975.

ارتباط بین شیمی بلورهای دولومیت و عمق تدفین (مثالی از سازند خانه‌کت، زاگرس مرتفع)

سیدمحمدرضا امامی^{۱*}، بیژن یوسفی یگانه^۱، مصطفی صداقت‌نیا^۲

۱- گروه زمین‌شناسی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- دانش‌آموخته مقطع دکتری، کارشناس آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

*luckpages@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش دولومیت‌های سازند خانه‌کت (تریاس) در پهنه لرستان (زاگرس مرتفع) مورد مطالعه قرار گرفته است. مرز زیرین و زبرین سازند خانه‌کت به ترتیب با کربنات‌های سازند دالان و کربنات‌های لیاس (سازند سورمه) به صورت ناپیوستگی فرسایشی است. دو گروه از دولومیت‌ها (اولیه و ثانویه) در سازند خانه‌کت شناسایی گردید. در بلورهای دولومیت مورد مطالعه یک روند افزایشی از عناصر Mn و Fe و یک روند کاهش از عنصر Sr و Na از دولومیت‌های اولیه به سمت دولومیت‌های تدفینی مشاهده می‌شود. تمرکز بالای عناصر Mn و Fe در دولومیت‌های تدفینی به دلیل شرایط احیایی در طی عمق تدفین است. تمرکز بالای عناصر Sr و Na در دولومیت‌های سطحی (عمق تدفین کم) به دلیل هسته‌زایی فراوان بلورهای دولومیت در شرایط جزر و مدی و تأثیر شورابه‌های سبخایی است.

کلیدواژه‌ها: پتروگرافی، شیمی بلور دولومیت، سازند خانه‌کت، زاگرس مرتفع

The relationship between dolomite crystal chemistry and burial depth (An example of Khaneh-Kat Formation, high Zagros)

SMR, Emami^{1*}; Bizhan Yousefi Yeganeh¹; Mostafa Sedaghatnia²

¹Geology Department, Lorestan University, Khoramabad

²Central Laboratory, Lorestan University, Khoramabad

*luckpages@yahoo.com

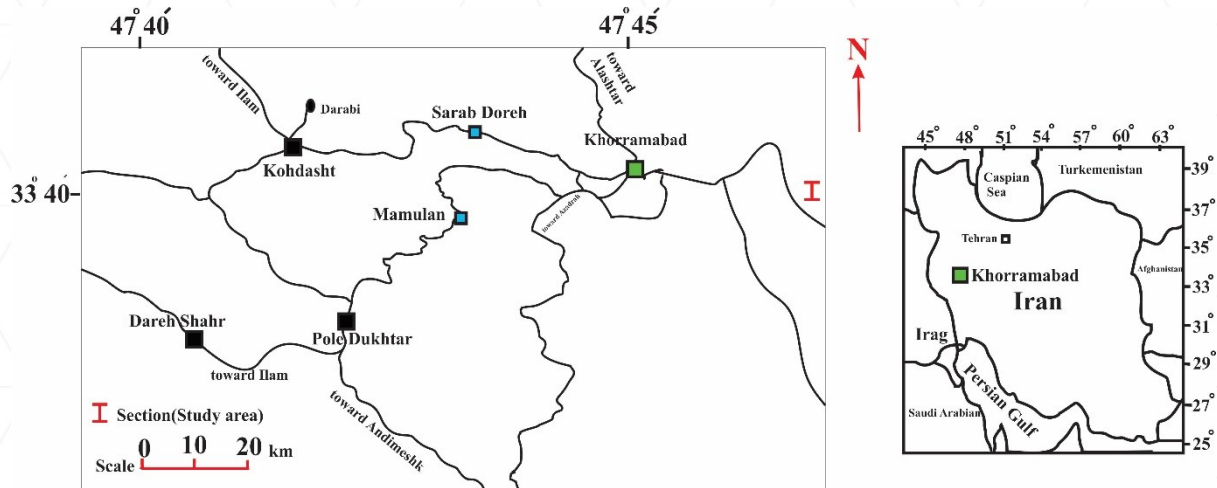
Abstract

In this research, dolomites of the Khaneh-Kat formation (Triassic) in the Lorestan area (high Zagros) have been studied. The lower and upper boundaries of the Khaneh-Kat Formation are erosional discontinuities with the carbonates of the Dalan Formation and the Liassic carbonates (Surmeh Formation), respectively. Two groups of dolomites (primary and secondary) were identified in the Khaneh Kat Formation. In the studied dolomite crystals, an increasing trend of Fe and Mn elements and a decreasing trend of Sr and Na elements are observed from the primary dolomites towards the buried dolomites. The high concentration of Fe and Mn elements in buried dolomites is due to the redox conditions during burial depth. The high concentration of Sr and Na elements in surface dolomites (shallow burial depth) is due to the abundant nucleation of dolomite crystals under tidal conditions and the influence of Sabkha brines.

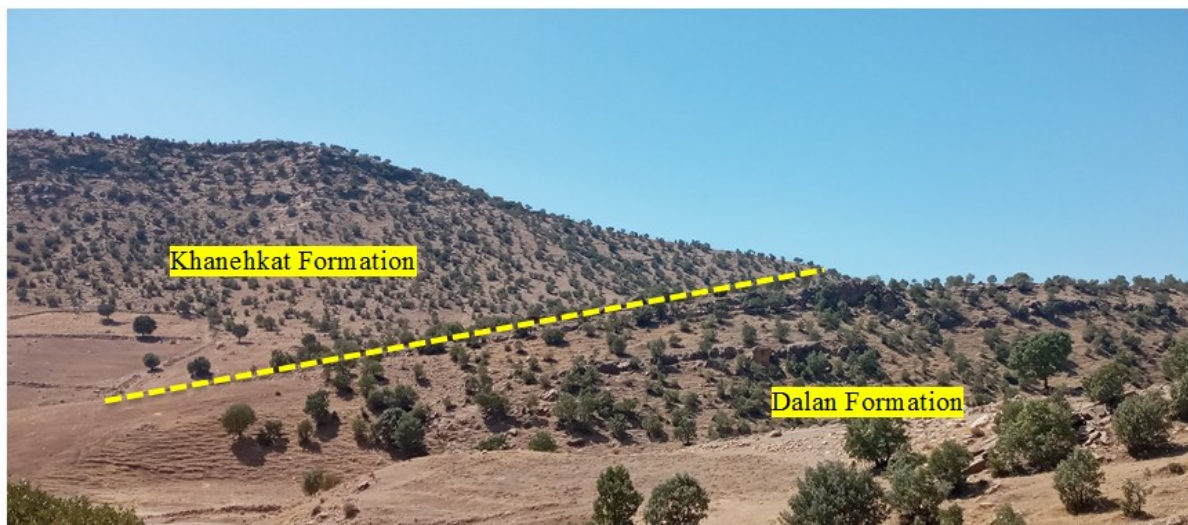
Keywords: Petrography, Crystal chemistry, Dolomite, Khaneh Kat Formation, High Zagros

۱- مقدمه

در زاگرس مرتفع، کربنات‌های تریاس، سازند دولومیتی خانه‌کت نامیده شده‌اند که هم‌ارز مجموعه‌ی دو سازندکنگان و دشتک است. برش الگوی این سازند، در تنگ قُمبَری، واقع در تاق‌دیس خانه‌کت (۱۱۰ کیلومتری خاور شیراز)، و برش مرجع آن در اشترانکوه است. از نظر سنگ‌شناسی، برش الگوی سازند خانه‌کت شامل ۳۶۴ متر دولومیت‌های خاکستری رنگ تیره، بسیار ریزدانه، سیلیسی، متوسط تا نازک‌لایه است که ۱۲۲ متر بالای آن حالت فروریختگی و برشی دارد و در رأس آن، دولومیت‌های توده‌ای متبلور و متخلخل به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شوند. در برش مرجع، این سازند شامل کربنات‌های رسی و شیل در بخش پایین و باقی توالی شامل آهک و دولومیت‌هایی از محیط رسوبی کم عمق‌اند که واجد ترک‌های گلی، ساختمان‌های استروماتولیتی و برش‌های انحلالی است. در برش الگو، مرز زیرین سازند خانه‌کت چندان روشن نیست ولی در اشترانکوه سنگ‌آهک‌های لایه‌لایه، حاوی آثار کرم، بر روی کربنات‌های سازند دالان، با ناپیوستگی، جای دارند (شکل ۲). مرز زیرین دولومیت‌های خانه‌کت با شیل و دولومیت‌های لیاس (سازند نیریز) ناپیوسته و فرسایشی است (جیمز و وایند، ۱۹۶۵). برش چینه‌شناسی انتخاب شده برای سازند خانه‌کت در شمال شرق غربی ورقه بروجرد واقع شده است. دسترسی به این برش از طریق جاده بروجرد- دورود میسر می‌باشد که بعد از ۱۵ کیلومتر طی مسیر در این جاده می‌توان به این برش دست یافت (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی برش‌های مورد مطالعه.



شکل ۲: نمای از سازند خانه‌کت در برش مورد مطالعه

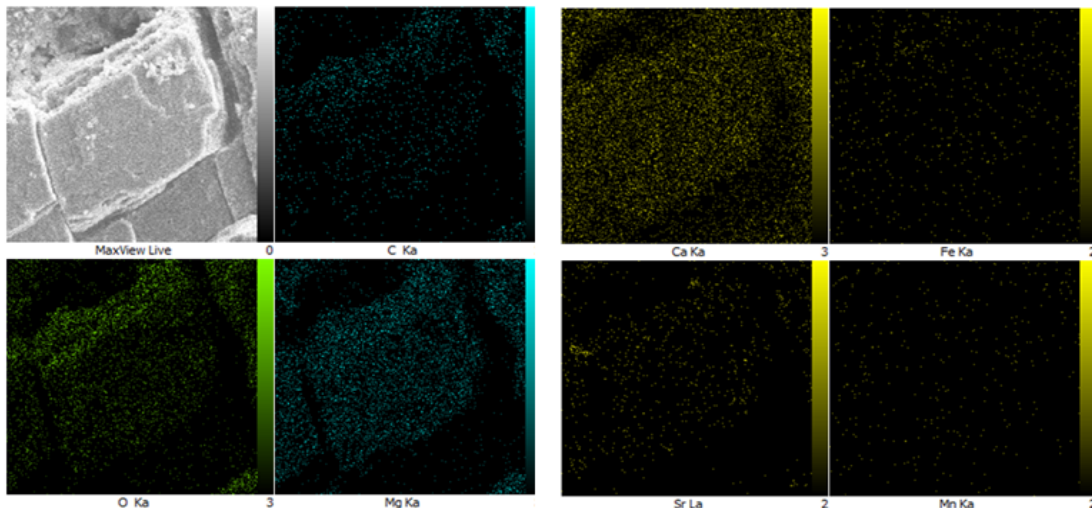
۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش تعداد ۶۵ مقطع نازک رسوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی تعداد ۱۶ نمونه از دولومیت‌ها جهت آنالیز عنصری به روش (EDS) انتخاب شده است. مطالعات پتروگرافی توسط میکروسکوپ پلاریزان Olympus BH-2 و میکروسکوپ الکترونی (SEM) و مطالعات ژئوشیمیایی بر مبنای آنالیز عنصری به روش‌های (EDS) و (EPMA) در آزمایشگاه مرکزی شماره ۱ دانشگاه لرستان صورت گرفت.

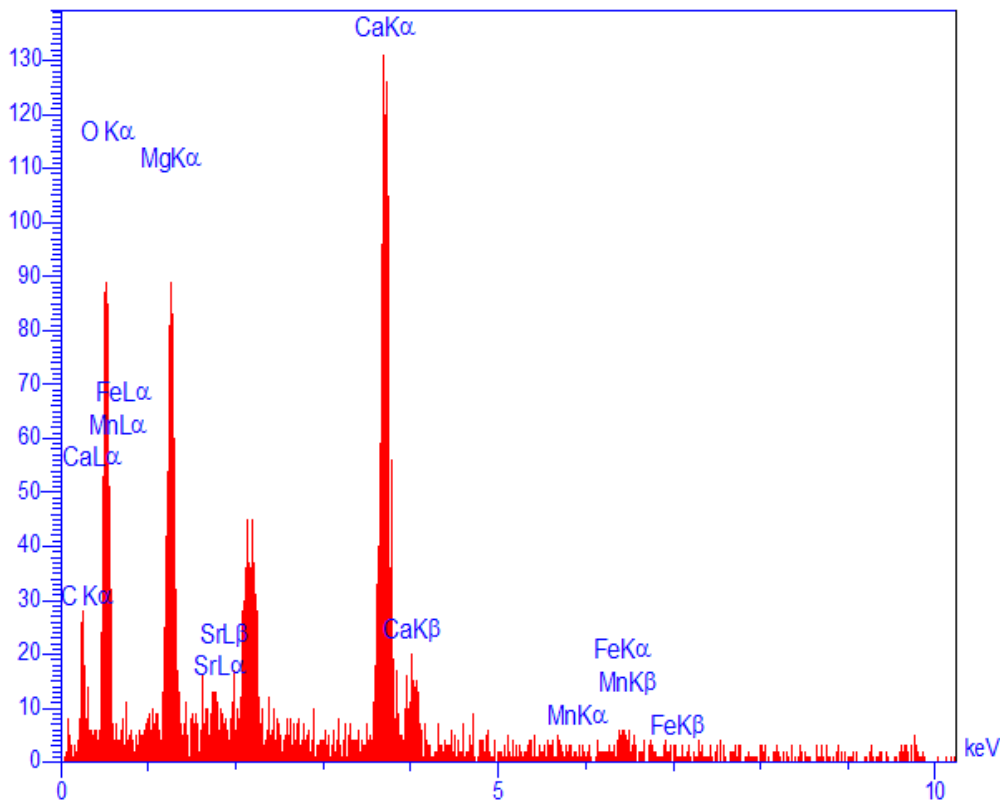
۳- بحث

عناصر آهن (Fe) و منیزیم (Mg): توزیع این دو عنصر اغلب نسبت به تغییرات pH و Eh سیال حساس می باشند. در سیالات اکسیدان با Eh مثبت، Fe^{+2} و Mn^{+2} بیشتر به صورت اکسید می باشند و برای مشارکت در ساختار کربنات‌ها (سیدریت‌ها) حضور ندارند (تاگر و رایت، ۱۹۹۰). میزان Fe و Mn در طی تبلور مجدد و عمق تدفین به تناوب افزایش می یابند (بنگ و همکاران ۲۰۱۷). از آنجایی که مقادیر آهن و منیزیم در آب دریا بسیار پایین تر از آب درون سازندی است، یک محیط کاهش‌ی برای آهن و منگنز با کلسیم و منیزیم در شبکه دولومیت به صورت جاننشینی را مساعد می سازد. در مقایسه با استرانسیم و سدیم، مقادیر آهن و منگنز در دولومیت‌های دیاژنتیکی (تدفینی) بالاتر از دولومیت‌های اولیه است (شانلی و همکاران ۲۰۱۸).

استرانسیم (Sr): دولومیت‌های اولیه ریز بلور به دلیل داشتن شبکه بلوری با نظم کمتر (غیر استوکیومتری) دارای مقادیر بیشتری استرانسیم نسبت به دولومیت‌های درشت بلور حاصل از دیاژنز تاخیری هستند (کیرماسی، ۲۰۰۸؛ السیناوی و همکاران، ۲۰۲۴). در دولومیت‌های تدفینی مقدار استرانسیم به دلیل رسیدن به حالت ایده آل در شبکه بلوری کاهش یافته است (آدابی، ۲۰۰۹). توسعه فرآیند دولومیتی شده به طور کلی سبب کاهش میزان عنصر استرانسیم در شبکه بلورها می‌گردد (هو و همکاران، ۲۰۱۶). تمرکز بالای استرانسیم در دولومیت‌های سطحی می‌تواند (شکل ۲) به دلیل فرایندهای دیاژنتزی باشد که بر روی پوسته‌های آراگونیتی برخی دوکفه‌ای‌ها، فرامینیفراهای بنتیک و برخی جلبک‌های سبز در نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شود. در دولومیت‌های سطحی به دلیل هسته زایی فراوان تمرکز عنصر منیزیم و استرانسیم بالاست ولی به دلیل شرایط اکسیدی تمرکز عناصر آهن و منگنز در این دولومیت‌ها پایین است (شکل ۲ و ۳).



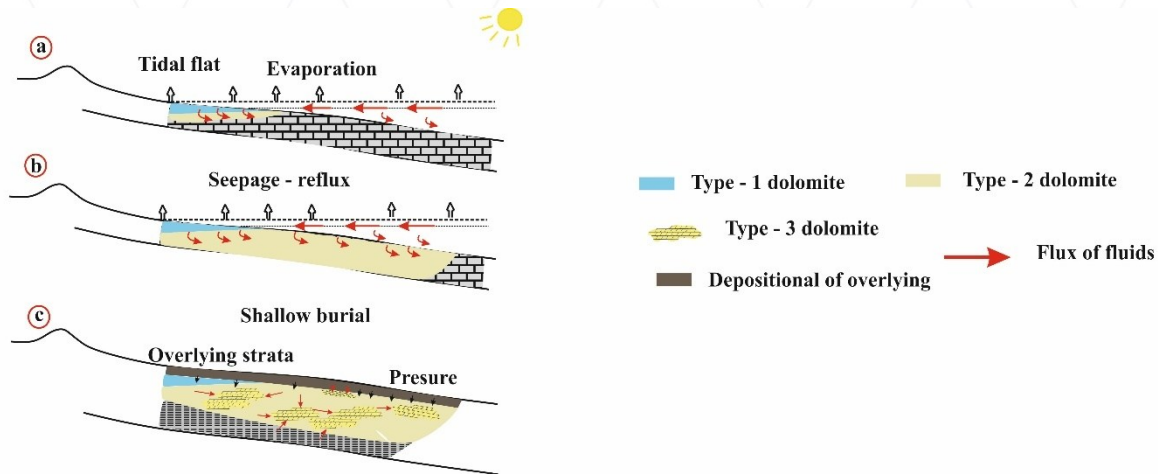
شکل ۲: نقشه رقمی شده (Digi maps) دولومیت‌های ریزبلور سطحی



شکل ۳: طیف آنالیز (EDS) دولومیت‌های ریزبلور سطحی

مقادیر پایین استرانسیم (میانگین ۰/۸۸ درصد) و به نسبت بالاتر آهن (میانگین ۱/۵۶ درصد) در دولومیت‌های درشت بلورتر، احتمالاً بیانگر افزایش اندازه بلورهای دولومیت و تبلور دوباره بلورهای دولومیت در طی تدفین است. در طی دیاژنز تدفینی تبلور مجدد در بلورهای دولومیت مشاهده می‌شود همچنین انحلال در پوسته ی آلومکم ها و جانشینی آن‌ها توسط کلسیت و دولومیت رخ داده است. در برخی نمونه‌ها فضای حاصل از شکستگی‌ها و حفرات توسط کلسیت اسپارایت و دولواسپارایت‌ها پر شده است، اندازه این بلورها در حد چند ده میکرون می‌باشد که حاصل دیاژنز تدفینی بوده و در آن‌ها با توجه به نتایج آنالیز ژئوشیمیایی و رنگ آمیزی با محلول فروسیانید پتاسیم عنصر آهن یافت می‌شود. به نظر می‌رسد این نوع از دولومیت‌ها آخرین نسل از دولومیت‌ها باشند که در نمونه‌های سازند خانه کت شکل گرفته‌اند و تخلخل حاصل از شکستگی‌ها را پر کرده‌اند. دولومیت نوع یک (دولومیکرایت‌ها) به عنوان دولومیت تقریباً همزمان با رسوب گذاری در نظر گرفته شده است. دولومیت نوع دوم (دولومیکروسپارایت‌ها) و دولومیت نوع سوم (دولواسپارایت‌ها) از تبلور دوباره دولومیت‌های پیشین به وجود می‌آیند. دولواسپارایت‌ها به سه شکل در نمونه‌ها قابل مشاهده می‌باشند، به صورت جانشینی در دانه‌های آلومکی، تبلور مجدد از دولومیت‌های ریز بلور تر و به صورت سیمان همراه با کلسیت هم بعد پر کننده شکستگی‌ها و حفرات سنگ. وجود سیمان کلسیت هم بعد در داخل شکستگی‌ها می‌تواند تأیید کننده دیاژنز تدفینی باشد. به نظر می‌رسد که برای دولومیتی شدن اولیه و یا همزمان با رسوب گذاری، تنها منشأ منیزیم، آب دریا است (لادابی، ۲۰۰۹). این منشأ تنها برای دولومیت‌های نوع ۱ در نظر گرفته می‌شوند که در نزدیک سطح و تحت شرایط دمای پایین در یک پهنه جزر و مدی و احتمالاً در اثر پمپاژ آب دریا به این پهنه تشکیل شده‌اند. اما منیزیم مورد نیاز برای دولومیت‌های نوع ۲ و نوع ۳ از منابع مختلفی قابل تأمین می‌باشد که از میان آنها می‌توان به آب‌های دریایی محبوس یا آب‌های درون روزنه‌ای و دیاژنز کانی‌های رسی در طی

تدفین در نظر گرفت. در نهایت با توجه به شواهد پتروگرافی و ژئوشیمیایی، دلومیت‌های سازند خانه کت را می‌توان از مدل جزرومدی، تراوش و سپس دفن کم عمق تا متوسط در نظر گرفت (شکل ۳).



شکل ۳: مدل دولومیتی شدن دولومیت‌های سازند خانه کت در برش مورد مطالعه

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به روند تغییرات عناصر اصلی نظیر Mg و Ca و عناصر فرعی نظیر Sr, Fe, Na دو گروه اصلی از دولومیت‌ها در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده است که شامل دولومیت‌های اولیه (هم‌زمان با رسوب‌گذاری) و دولومیت‌های ثانویه (پس از رسوب‌گذاری و تدفینی) می‌باشند. مقادیر پایین Fe و مقادیر بالای Sr و Na در دولومیت‌های سطحی با عمق تدفین کم و تمرکز بالای Fe و Mn در دولومیکرواسپارایت‌ها و دولواسپارایت‌ها (دولومیت‌های تدفینی) نشان دهنده تشکیل این دولومیت‌ها از مدل جزرومدی، تراوش و سپس دفن کم عمق تا متوسط و عمیق می‌باشد. لذا می‌توان گفت دولومیت‌های سطحی به دلیل هسته زایی فراوان غنی از عنصر استرانسیم هستند و این درحالی است که دولومیت‌های درشت بلور تدفینی به دلیل قرارگیری در شرایط احیایی تمرکز بالاتری از عناصر آهن و منگنز در خود نشان می‌دهند.

۵- مراجع

- Adabi, M. H., 2009. Multistage dolomitization of upper Jurassic Muzduran Formation, Kopet-Dagh basin, N.E. Iran: *Crab. Eva.*, v:24, p:16-32.
- Al-Sinawi, N., Hollis, C., Duval-Arnould, A., Koeshidayatullah, A., Schroder, S., Redfern, J., 2024. Dolomitization of early-post rift Lower Jurassic carbonate platforms along the Moroccan Atlantic margin: origin and significance. *J African Earth Sci* 211:105167. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105167>
- Hou, Y., Azmy, K., Berra, F., Jadoul, F., Blamey, N.J.F., Gleeson, S.A. and Brand, U., 2016. Origin of the Breno and Esino dolomites in the western southern Alps (Italy): implications for a volcanic influence: *Marine and Petroleum Geology*, v. 69, p. 38-52.
- James, G.A. and Wynd, J.G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium, agreement area, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 49(12), 2182-2245.
- Kirmaci, M.Z., 2008. Dolomitization of the late Cretaceous-Paleocene platform carbonates, Golkoy (Ordu), eastern Pontides, NE Turkey: *Sedimentary Geology*, v. 203, p. 289-306

Tucker, M.E., Wright, V.P., 1990. Carbonate Sedimentology: Blackwell, Oxford, 482 p.

Ying, R., Dakang, Z., Chonglong, G., Queqi, Y., Rui, X., Langbo, J., Yangjinfeng, J., Ningcong, Zh (2017)
Dolomite geochemistry of the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin: Implication
for dolomitization and reservoir prediction. Petroleum Research 2 (2017) 64e76.

زمین‌شناسی، کانه‌زایی و دگرسانی رخداد آنتیموان در محدوده اکتشافی آرپالیق، ورزقان، شمال غرب ایران

رضا ملازاده^۱، محمدرضا حسین‌زاده^۲، فردین سعیدی^{۳*}، وارطان سیمونز^۴، محسن مؤید^۲

۱- کارشناسی‌ارشد، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز

۲- استاد، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز - Fardinsaeeidi6@gmail.com

۴- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز

چکیده

محدوده اکتشافی آنتیموان آرپالیق در شمال ورزقان (استان آذربایجان شرقی)، بخشی از زون متالوژنی اهر - آرسباران است که کانی‌سازی در آن به صورت رگه‌های کوارتز - استیبینیت در هورنفلسی توف و سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی کرتاسه و توده‌های نفوذی گرانودیوریتی رخ داده است. در این پژوهش، با استفاده از مطالعات میکروسکوپی، XRD، Raman و SEM، ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژنتیکی این رخداد بررسی شد. زون‌های دگرسانی غالب شامل آرژیلیک (گسترده‌ترین زون)، سیلیسی و پروپیلیتیک است. بررسی‌های پاراژنزی نشان می‌دهد که استیبینیت کانی اصلی سولفیدی است که همراه با مقادیر کمتری از پیریت، اسفالریت و گالن مشاهده می‌شود. نتایج آنالیز Raman و XRD حضور فاز استیبینیت و بیسموت را تایید کرد. با توجه به بافت‌های کانی‌سازی (رگه‌ای، شکافه‌پرکن و برشی) و ماهیت دگرسانی‌ها، رخداد آنتیموان آرپالیق در دسته ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین تا متوسط طبقه‌بندی می‌شود که تشکیل آن تحت کنترل ساختارهای تکتونیکی و فعالیت‌های هیدروترمال مرتبط با توده‌های نفوذی منطقه بوده است.

کلیدواژه‌ها: آرپالیق، استیبینیت، اپی‌ترمال، دگرسانی گرمایی

Geology, Mineralization, and Alteration of the Antimony Occurrence in the Arpaligh Exploration Area, Varzeqan, Northwest Iran

Reza Mollazadeh¹; Mohammad Reza Hosseinzadeh²; Fardin Saeedi³; Vartan Simmonds⁴; Mohsen Moayyed²

¹ M.Sc., Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Professor, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ M.Sc. Student, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran - Fardinsaeeidi6@gmail.com

⁴ Associate Professor, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The Arpaligh antimony prospect, situated north of Varzeqan (East Azerbaijan Province), is part of the Ahar-Arasbaran metallogenic zone. Mineralization occurs as quartz-stibnite veins hosted within hornfelsed tuffs, Cretaceous andesitic volcanic rocks, and granodioritic intrusions. In this study, the mineralogical and genetic characteristics of the occurrence were investigated using optical microscopy, XRD, Raman spectroscopy, and SEM analysis. The predominant alteration assemblages consist of widespread argillic (the most extensive zone), silicic, and propylitic alterations. Paragenetic studies reveal that stibnite is the principal sulfide mineral, associated with minor pyrite, sphalerite, and galena. Raman and XRD analytical results confirmed the presence of both stibnite and bismuth phases. Based on the mineralization textures (vein, fissure-filling, and brecciated) and the nature of the hydrothermal alterations, the Arpaligh antimony occurrence is classified as a low-to-intermediate sulfidation epithermal deposit. Its formation was controlled by tectonic structures and hydrothermal fluid circulation related to regional intrusive activity.

Keywords: Arpaligh, Stibnite, Epithermal, Hydrothermal alteration

۱- مقدمه

زون متالوژی اهر - ارسباران در شمال غرب ایران، به دلیل استقرار در کمر بند تین و فعالیت‌های ماگمایی گسترده در دوران نوزیست، یکی از مهم‌ترین مناطق پتانسیل‌دار برای ذخایر پورفیری و اپی‌ترمال (مس، طلا، مولیبدن و آنتیموان) محسوب می‌شود. ذخایر آنتیموان در ایران عمدتاً با سیستم‌های گرمابی در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی - نفوذی میوسن - پلیوسن مرتبط بوده و اغلب در زون‌های تکتونیزه و گسلی متمرکز شده‌اند.

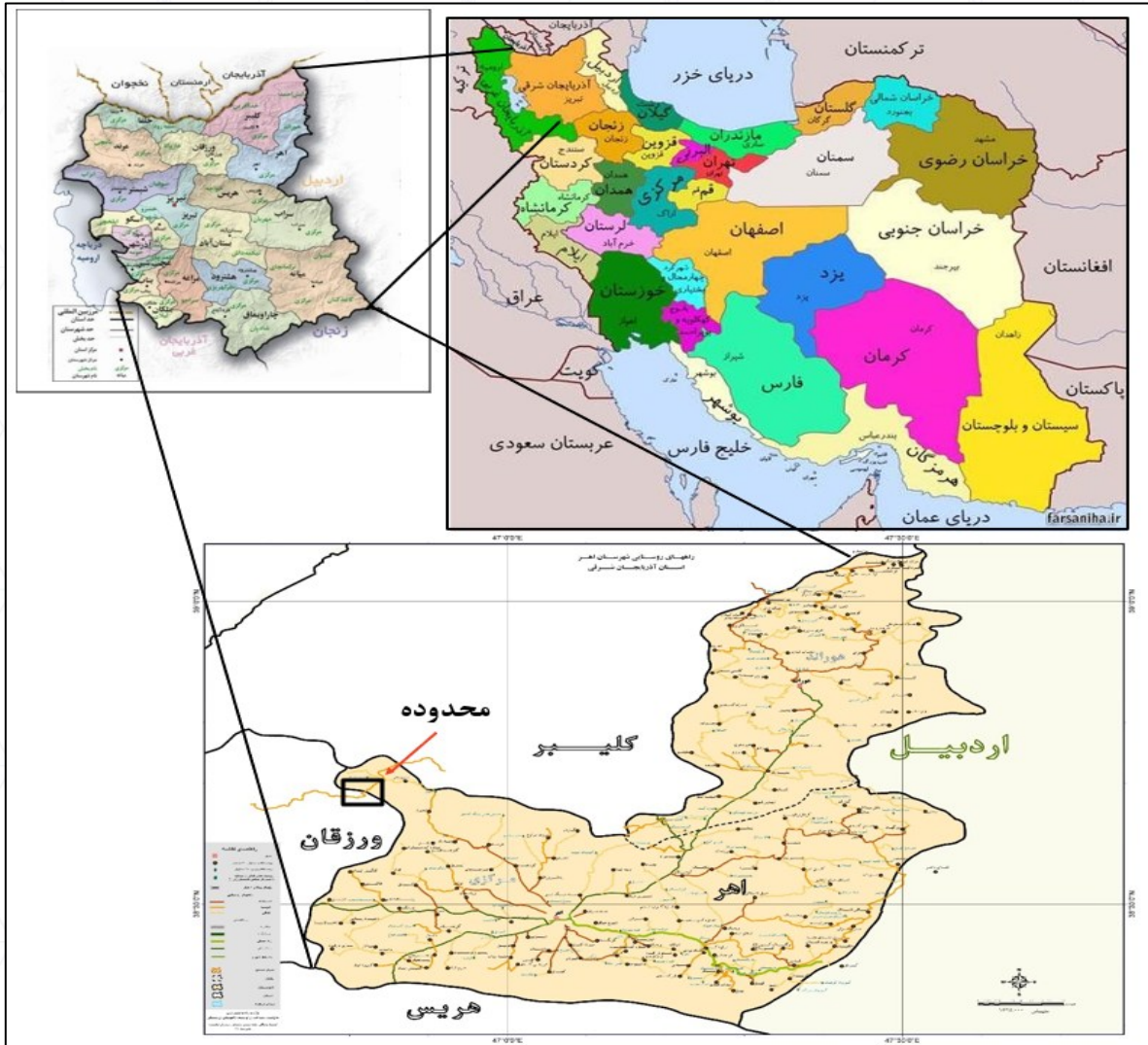
محدوده اکتشافی آرپالیک به مختصات جغرافیایی $46^{\circ} 44' 42''$ تا $46^{\circ} 53' 24''$ طول شرقی و $38^{\circ} 40' 53''$ تا $45^{\circ} 02' 45''$ عرض شمالی در شمال شهرستان ورزقان، استان آذربایجان شرقی و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان واقع گردیده است. شکل‌های ۱ و ۲ جغرافیایی محدوده اکتشافی آرپالیک نسبت به شهرها و روستاهای مجاور و معادن سونگون و انجرد و راه‌های دسترسی به محدوده را نشان می‌دهند.

محدوده مورد مطالعه (آرپالیک) در حاشیه توده‌های پورفیری شناخته شده‌ای نظیر سونگون قرار دارد. با وجود پتانسیل‌های معدنی در این منطقه، رخدادهای آنتیموان آن کمتر مورد واکاوی علمی قرار گرفته است. کانی‌سازی آنتیموان در این محدوده با زون‌های دگرسانی شدیدی همراه است که شناسایی دقیق آن‌ها کلید فهم تکامل سیستم گرمابی منطقه است. در این تحقیق، تلاش شده است تا با تلفیق داده‌های صحرایی، میکروسکوپی و آنالیزهای پیشرفته دستگاهی (SEM و Raman)، ضمن تعیین توالی پاراژنری و الگوهای دگرسانی، مدل ژنتیکی کانی‌سازی آنتیموان در این بخش از زون اهر-ارسباران ارائه گردد.

۲- زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

در محدوده آرپالیک، رخنمون‌های سنگی عمدتاً از واحدهای آتشفشانی کرتاسه تشکیل شده و در کنار آن‌ها، با گستره‌ای محدودتر، توده‌های نفوذی الیگوسن دیده می‌شود. سنگ‌های آتشفشانی منطقه متنوع بوده و شامل لایه‌بندی‌هایی از ولکانوکلاستیک‌ها همراه با گدازه‌های حدواسط، توفیت‌های حاوی فسیل نومولیت، توف‌های شیشه‌ای، مارن‌های توفی و نیز توالی‌هایی از توف و گدازه‌های آندزیتی هستند. این مجموعه آتشفشانی نقش سنگ میزبان برای نفوذی‌های الیگوسن را ایفا می‌کند. ترکیب توده‌های نفوذی از میکرودیوریت، گرانودیوریت تا کوارتز دیوریت، میکروگرانودیوریت تا دیوریت پورفیری و دایک داسیتی متغیر می‌باشد.

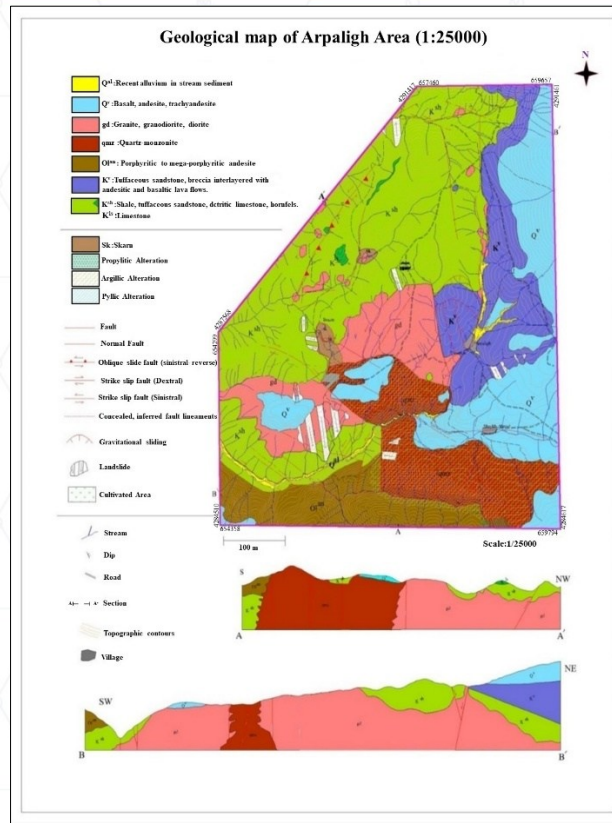
سایر واحدهای سنگی محدوده آرپالیک بر اساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰ آرپالیک (شکل ۳) از قدیم به جدید عبارتند از واحد شیل و ماسه‌سنگی کرتاسه فوقانی (K^{sh})، ولکانیک و ولکانو-کلاستیک کرتاسه فوقانی (K^v)، آندزیت بازالت تا آندزیت‌های پورفیری الیگوسن (OI^{an})، توده کوارتز مونزونیت پورفیری (qmz)، توده گرانودیوریتی تا دیوریتی (gd) به سن الیگوسن و سنگ‌های آتشفشانی کواترنری (Q^v) می‌باشد (فریدی، ۱۳۹۳).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران، استان آذربایجان شرقی و شهرستان اهر و ورزقان



شکل ۲- الف: تصویر ماهواره‌ای از موقعیت محدوده مطالعاتی آرپالیک نسبت به معادن نزدیک (تصویر برگرفته از Google Earth) و ب: نمایی از روستای آرپالیک، توده‌ی پورفیری آرپالیک و موقعیت آن نسبت به معدن مس سونگون



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده از کل محدوده مورد مطالعه (فریدی، ۱۳۹۳)

۳- مواد و روش‌ها

مطالعات این پژوهش در سه مرحله صحرایی، آزمایشگاهی و دفتری صورت گرفت. در پیمایش‌های صحرایی، ضمن ثبت ویژگی‌های ساختاری و لیتولوژیکی، تعداد ۱۶ نمونه سنگی از زون‌های دگرسانی و رگه‌های کانی‌سازی جهت مطالعات آزمایشگاهی برداشت شد. از این میان، ۱۶ مقطع نازک برای بررسی‌های پتروگرافی واحدهای سنگی نفوذی، آتشفشانی و دگرسان، با هدف شناسایی بافت سنگ، ترکیب کانی‌شناسی، نوع و شدت دگرسانی و ۱۲ مقطع صیقلی برای بررسی‌های کانه‌نگاری نوری و تصویربرداری با میکروسکوپ پلاریزه انعکاسی جهت شناسایی کانی‌های کدر و ساختارهای میکروسکوپی کانی‌زایی، تهیه و در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه تبریز مورد مطالعه میکروسکوپی و کانی‌شناسی قرار گرفت.

جهت شناسایی دقیق فازهای کانیایی در زون‌های دگرسانی و کانی‌های سولفیدی، تعداد ۶ نمونه تحت آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) با دستگاه مدل Tongda/TD-3700 مجهز به تابش CuK α با طول موج ۱/۵۴۰۶ آنگستروم و ۶ نمونه تحت آنالیز طیف‌سنجی رامان (Raman) با استفاده از دستگاه Uni-Dron-A ساخت شرکت Andor Technology مجهز به لیزر ۵۳۲ نانومتر و آشکارساز CCD خنک‌شونده با پلتیر (هر دو آنالیز در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز انجام شدند) قرار گرفتند.

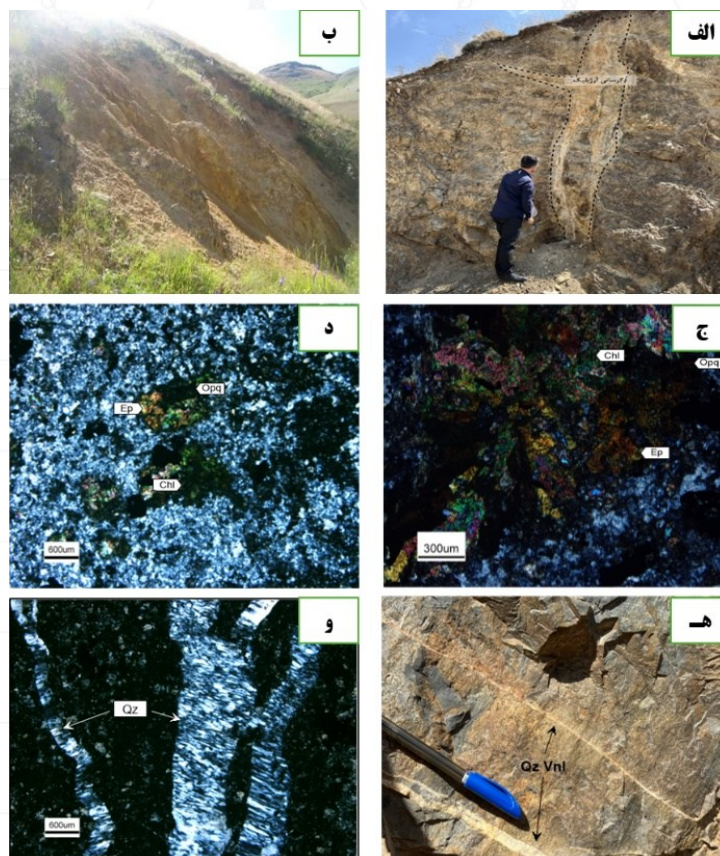
همچنین، جهت بررسی بافت‌های ریز و ترکیب نیمه‌کمی کانی‌ها، تعداد ۶ نمونه از رگه‌های کانه‌دار حاوی استیبنیت توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (SEM-FE) مورد مطالعه قرار گرفتند. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی با استفاده از دستگاه Tescan/MIRA3 SEM-FE مجهز به آشکارساز EDS در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز انجام گرفت. تصاویر در بزرگنمایی تا ۵۰,۰۰۰ برابر و با قدرت تفکیک ۱ نانومتر ثبت شدند. در این مطالعه، تعداد ۱۰ تصویر با وضوح بالا از ۶ نمونه استیبنیت برداشت گردید.

۴- بحث

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی در محدوده آرپالیک، بیانگر یک سیستم گرمایی پویا است که تحت کنترل مستقیم فاکتورهای لیتولوژیکی و ساختاری شکل گرفته است. در این بخش، با تلفیق شواهد کانی‌شناسی، الگوهای دگرسانی و نتایج آنالیزهای دستگاهی (SEM و Raman)، فرآیندهای فیزیکوشیمیایی حاکم بر تشکیل رخدادهای آنتیموان و مدل ژنتیکی آن مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

۴-۱- دگرسانی و کنترل‌های ساختاری

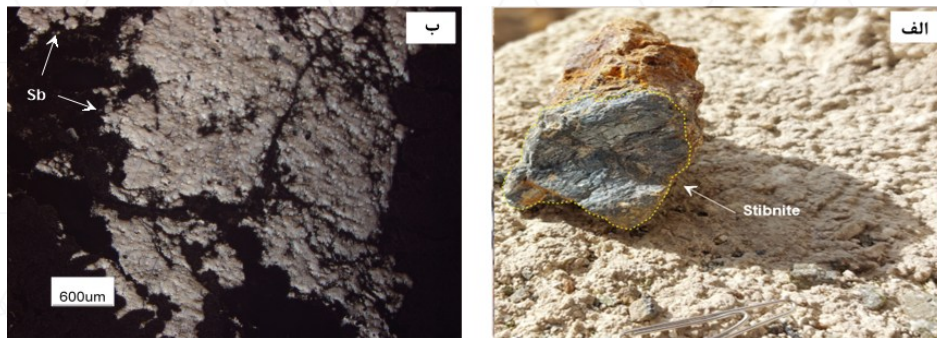
کانی‌سازی استبنیت در منطقه آرپالیک بصورت رگه‌ای و پرکننده شکاف داخل سنگ‌های واحدهای توفی و هورنفلسی کرتاسه مشاهده می‌شود (شکل ۴ - الف) و به‌طور مستقیم تحت کنترل سیستم‌های گسلی فرعی منشعب از گسل‌های اصلی با روند غالب NW-SE است که به عنوان معبری برای صعود سیالات گرمایی عمل کرده‌اند. بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که سیال مهاجم باعث ایجاد یک زونینگ دگرسانی منظم شده است. دگرسانی آرژیلیک به عنوان گسترده‌ترین هاله، با حضور کانی‌های رسی (کائولینیت و دیکیت) شناسایی شد (شکل ۴ - ب) که نشان‌دهنده فعالیت سیالات اسیدی در دمای پایین (کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) است. حضور دگرسانی پروپیلیتیک در حاشیه دورتر، بیانگر کاهش تدریجی دما و خنثی شدن سیال در واکنش با سنگ دیواره (توده‌های نفوذی الیگوسن) است (شکل ۴ - ج - د). در مرکز رگه‌ها، دگرسانی سیلیسی (Silicification) مشاهده می‌شود که مستقیماً با کانی‌سازی استبنیت در ارتباط است. (شکل ۴ - ه - و).



شکل ۴- الف: تصویر صحرایی از دگرسانی آرژیلیک در اطراف شکستگی‌های داخل واحد هورنفلس. ب: نمایی از آلتراسیون آرژیلیکی در جنوب روستای آرپالیک (دید به سمت شمال شرق). ج: تصویر میکروسکوپی از دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای انودپوریتی که پلاژیوکلازها به اپیدوت تبدیل شده‌اند. د: تصویر میکروسکوپی از دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای انودپوریتی که اپیدوت به کلریت تبدیل گردیده‌اند. ه: تصویر صحرایی رگچه کوارتزی در داخل واحد هورنفلسی. و: تصویر میکروسکوپی از رگچه کوارتزی داخل واحد هورنفلسی

۲-۴- کانی‌شناسی و توالی پاراژنزی:

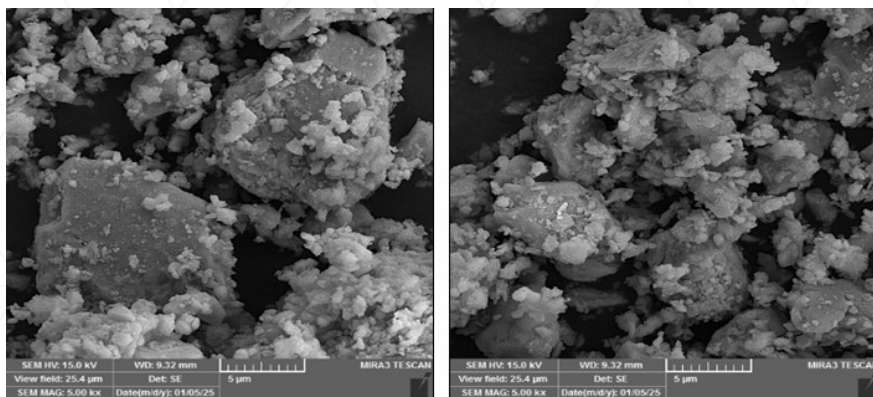
مطالعات مقاطع صیقلی نشان داد که استیبنیت (Stibnite) کانی اصلی و شاخص منطقه است که در نمونه دستی اغلب به صورت تیغه‌ای و رگچه‌ای و همچنین گاهی اوقات به صورت توده‌ای مشاهده می‌شود. کانی استیبنیت در نمونه دستی به رنگ خاکستری و در مقاطع میکروسکوپی به صورت کریستال‌های تیغه‌ای کنار هم تا انهدرال آمیبی شکل و فراوانی آن بیشتر از ۵۰ درصد مشاهده می‌شود (شکل ۵). در زون سوپرژن، تحت شرایط اکسیدان، استیبنیت به اکسیدهای ثانویه آنتیموان (نظیر والنیت یا استیبیکونیت) تغییر یافته که همراه با گوتیت و لیمونیت دیده می‌شوند.



شکل ۵- الف) نمونه دستی دارای کانی زایی شکاف پرکن از محدوده آرپالیک ب) تصویر میکروسکوپی از کانی سازی استیبنیت

۳-۴- تحلیل داده‌های دستگاهی (SEM, XRD, Raman):

آنالیزهای پیشرفته، نتایج کانی‌شناسی نوری را تایید و تکمیل کردند: آنالیز XRD: علاوه بر تایید استیبنیت، حضور فاز بیسموت در برخی نمونه‌ها شناسایی شد. همراهی Sb-Bi در سیستم‌های گرمایی معمولاً نشان‌دهنده پیوند ژنتیکی با توده‌های نفوذی عمیق‌تر و احتمالاً دمای بالاتر در مراحل آغازین سیال است. طیف‌سنجی رامان: پیک‌های قوی در فرکانس‌های ۱۵۶، ۱۸۸ و ۲۵۰ سانتی‌متر معکوس، حضور استیبنیت را با ساختار بلوری منظم تایید کرد. جابجایی جزئی در برخی پیک‌ها می‌تواند ناشی از جانشینی‌های عنصری در شبکه بلوری باشد. تصویربرداری SEM: تصاویر الکترونی، بلورهای کشیده و تیغه‌ای استیبنیت را در ابعاد میکرونی نشان داد که در فضاهای متخلخل کوارتز رشد کرده‌اند. تحلیل EDS نیز خلوص بالای آنتیموان و گوگرد را در این فازها اثبات کرد.



شکل ۶- تصاویر SEM از نمونه‌های استیبنیت آرپالیک

۴-۴- مدل ژنتیکی و نوع کانسار:

با تلفیق یافته‌ها، مدل کانی‌سازی آرپالیک یک سیستم اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین (Low-Sulfidation) پیشنهاد می‌شود. شواهدی که این ادعا را تقویت می‌کنند، شامل: ۱- بافت‌های برشی، رگه‌ای و پرکننده فضای خالی، ۲- همراهی کوارتز با بافت شکافه پرکن با استیبنیت، ۳- چیرگی دگرسانی آرژلیک و سیلیسی، ۴- شکل‌گیری در سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی ترشیری، می‌باشند. منشأ سیال احتمالاً ترکیبی از سیالات ماگمایی (مشتق شده از توده‌های پورفیری منطقه) و آب‌های جوی است که در اثر چرخش همرفتی، آنتیموان را از سنگ‌های دیواره شسته و در زون‌های شکسته و گسلی نهشته کرده‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

رخداد آنتیموان آرپالیک بر اساس پاراژنز کانیایی (استیبنیت-پیریت)، بافت‌های رگه‌ای-شکافه‌پرکن و زون‌های دگرسانی آرژلیک-سیلیسی، در دسته ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین تا متوسط طبقه‌بندی می‌شود. کنترل‌های ساختاری (گسل‌های NW-SE) و حضور فاز بیسموت در آنالیزهای XRD و Raman، نشان‌دهنده پیوند ژنتیکی این کانی‌سازی با سیستم‌های ماگمایی - هیدروترمال عمیق‌تر در حاشیه توده‌های پورفیری منطقه است.

۶- مراجع

شاهی، ا.، (۱۳۹۵). کانی‌شناسی و ژئوشیمی زون‌های دگرسان منطقه آرپالیک (شمال ورزقان، استان آذربایجان شرقی)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه اورمیه، ۱۲۶ ص.

ملازاده، ر. (۱۴۰۴). رخداد آنتیموان در حاشیه توده پورفیری آرپالیک (شمال ورزقان، استان آذربایجان شرقی) با تاکید بر دگرسانی، کانی‌شناسی و مینرال شیمی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تبریز، ۹۷ ص

موید، م.، عظیم زاده، م.، اعظمی‌راد، ح.، تقیزاده، م.، اسمعیلی، ع.، مرنگی، ح.، (۱۳۹۵): معرفی اندیس طلای پورفیری آرپالیک بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری، سنگ‌شناسی، دگرسانی و میانبارهای سیال (شهرستان اهر، شمال‌غرب ایران). دومین همایش تخصصی و ملی کاربرد سیالات درگیر در علوم زمین

Akçay, M., Özkan, H. M., Moon, C. J., & Spiro, B. (2006). Geology, mineralogy and geochemistry of the gold-bearing stibnite and cinnabar deposits in the Emirli and Halıköy areas (Ödemiş, İzmir, West Turkey). *Ore Geology Reviews*, 29(1), 19–51.

Calagari, A. A. (2004). Geology and Fracture-Related Hypogene Hydrothermal Alteration and Mineralization of Porphyry Copper Deposit at Sungun, Iran. *Journal of the Geological Society of India*, 64(5), 595–618.

Mehrprou, M., Amini Fazl, A., and Radfar, J. (1992). Geologic map of Varzeghan. Geological Survey of Iran, scale 1:100000, 1 sheet.

Sillitoe, R. (1993). Epithermal models: genetic types, geometrical controls and shallow features. *Geological Association of Canada Special Paper*. 40. 403-417.

Wang, L., Qin, K.-Z., Song, G.-X., & Li, G.-M. (2019). A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107, 434–456

بررسی انواع سنگ کلیه از دیدگاه کانی‌شناسی پزشکی

حانیه رقیمی^{1*}، مریم رضانی مجاوری^۲ و مصطفی رقیمی^۳

۱- پزشک عمومی، مرکز بهداشت و درمان کردکوی، استان گلستان

۲- پزشک عمومی، گرگان، استان گلستان

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

*Email: HRaghimi@gmail.com

چکیده

کانی‌شناسی زیست محیطی بر تعامل بین کانی و لایه‌های مختلف سطح زمین و همچنین کانی‌ها منعکس‌کننده تکامل طبیعت، جلوگیری از آسیب‌های زیست محیطی، ارزیابی کیفیت محیط زیست، تصفیه آلودگی و مشارکت در فرآیندهای بیولوژیکی تمرکز دارد. مادامی که، کانی‌شناسان پزشکی که دانش خود را برای بهبود سلامتی انسان به کار می‌گیرند، باید کانی‌های زیستی انسان را مطالعه نمایند. کانی‌سازی زیستی یک فرآیند رایج در پستانداران است. یکی از قدیمی‌ترین آسیب‌شناسی‌ها، سنگ کلیه است. سنگ کلیه بیماری است که باعث تولید سنگ کلیه توسط موجودات مختلف مانند انسان، گربه، سگ و به طور کلی پستانداران می‌شود و معمولاً به راحتی عود می‌کند. این بیماری عموماً از تغییرات در تعادل فیزیوشیمیایی در دستگاه ادراری ناشی می‌شود که به عوامل مختلفی نسبت داده می‌شود، اگرچه آنها علل انحصاری نیستند. بنابراین، می‌توان به منطقه محل سکونت، آب و هوا، قومیت، رژیم غذایی و ژنتیک فکر کرد. شیوع این بیماری در ایران ۴.۲ در هزار گزارش شده است که شیوع بالایی است. بیشترین شیوع در ایران در استان‌های غربی و جنوب غربی مانند ایلام، کرمانشاه، همدان، کردستان و لرستان گزارش شده است. این مقاله با زیرگروه‌های سنگ کلیه مخصوصاً. مونوهیدرات اگزالات کلسیم (وولیت)، دی‌هیدرات اگزالات کلسیم (ودلیت)، فسفات کلسیم (کارباتیت)، استروویت و سایر کانی‌های دیگر، برطبق دستورالعمل‌های انجمن اورولوژی اروپا (EAU) با نگاه کانی‌شناسی پزشکی سروکار دارد.

کلیدواژه‌ها: سنگ کلیه، کانی‌شناسی پزشکی، کانی‌های زیستی

The Investigation of Kidney Stones with Medical Mineralogy aspects

Haneih Raghimi^{1*}, Maryam Ramezani², Mostafa Raghimi³

¹ GP, Medical & Health Center Kordkoy

² GP. Gorgan, Golestan Province

³Geology Department, Science College, Golestan University

*Email: HRaghimi@gmail.com

Abstract

Environmental mineralogy focuses on the interaction between minerals and the various layers on the earth's surface, as well as minerals reflecting nature evolution, preventing ecological damage, evaluating environmental quality, purifying pollution, and participating in biological processes. While, medical mineralogists who apply their knowledge to improve human well-being should study biominerals. Biomineralization is a common process in mammals. One of the oldest pathologies is nephrolithiasis. Urolithiasis is a disease that causes kidney stones to be generated by various organisms such as humans, cats, dogs and, in general, mammals and usually recurs easily. It generally arises from changes in the physicochemical balance in the urinary tract attributed to different factors, although they are not exclusive causes. Thus, one can think of region of residence, climate, ethnicity, diet and genetics. The prevalence of this disease in Iran has been reported 4.2 per thousand, which is a high prevalence. The highest prevalence in Iran has been reported in western and southwestern provinces such as Ilam, Kermanshah, Hamedan, Kurdistan, and Lorestan. This paper deals with Kidney stones subtypes such as: Calcium oxalate monohydrate (Whewellite), calcium oxalate dihydrate (Weddellite), calcium phosphate (carapatite), struvite and some other minerals types, According to European Association of Urology (EAU) Guidelines (2020) with medical mineralogy aspects

Keywords: Kidney Stone, Medical Mineralogy, Biominerals

۱- مقدمه

کانی‌شناسی زیست محیطی بر تعامل بین کانی و لایه‌های مختلف سطح زمین و همچنین کانی‌ها منعکس‌کننده تکامل طبیعت، جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی، ارزیابی کیفیت محیط زیست، تصفیه آلودگی و مشارکت در فرآیندهای بیولوژیکی تمرکز دارد (Lu and et al., 2023). کانی‌شناسان پزشکی که دانش خود را برای بهبود سلامتی انسان به کار می‌گیرند، باید کانی‌های زیستی مانند سنگ‌های کلیه و ادراری انسان را مطالعه نمایند. آیا چیزی وجود دارد که آنها بتوانند به عنوان یک کمک علمی بیشتر برای دامن زدن به بحث در مورد این موضوع ارائه دهند؟ احتمالاً، تنها کنجکاو علمی که فعالیت افراد را هدایت می‌کند، ممکن است برای مقابله با چالش واقعی کافی نباشد (Izzo, et al., 2022).

سنگ کلیه عمدتاً در کلیه (کلیه‌ها) قرار می‌گیرد (Grases ad et al. 1998). بشر از قرن‌ها پیش، از ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد، با سنگ‌های ادراری مواجه بوده است (Reynolds, 2005) و این بیماری شایع‌ترین بیماری دستگاه ادراری است. پیشگیری از عود سنگ کلیه همچنان یک مشکل جدی در سلامت انسان است (Heilberg and Schor 2006). کانی‌سازی زیستی یک فرآیند رایج در پستانداران است. یکی از قدیمی‌ترین آسیب‌شناسی‌ها، سنگ کلیه است. سنگ کلیه بیماری است که باعث تولید سنگ کلیه توسط موجودات مختلف مانند انسان، گربه، سگ و به طور کلی پستانداران می‌شود و معمولاً به راحتی عود می‌کند. این بیماری عموماً از تغییرات در تعادل فیزیوشیمیایی در دستگاه ادراری ناشی می‌شود که به عوامل مختلفی نسبت داده می‌شود، اگرچه آنها علل انحصاری نیستند. بنابراین، می‌توان به منطقه محل سکونت، آب و هوا، قومیت، رژیم غذایی و ژنتیک فکر کرد (González-Enguita and García-Giménez, 2024).

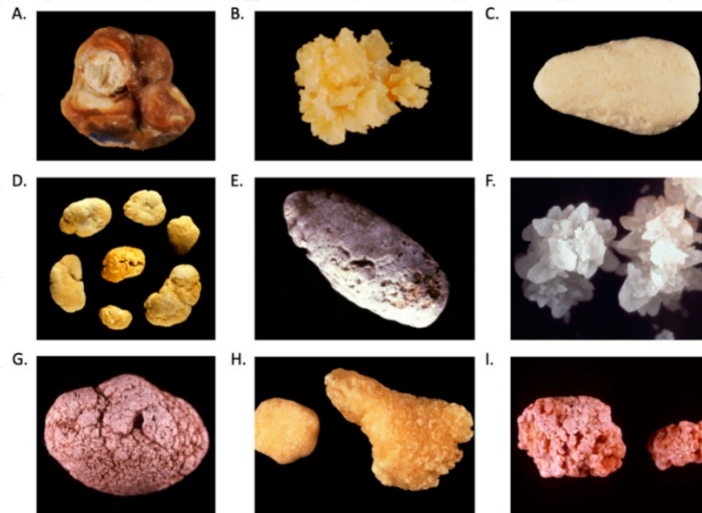
این بیماری بیشترین شیوع را در کشورهای توسعه‌یافته و ثروتمند دارد؛ شیوع آن در کشورهای توسعه‌یافته ۲ تا ۳ درصد و در کشورهای در حال توسعه ۰.۵ تا ۱.۵ درصد گزارش شده است. شیوع این بیماری در ایران ۴.۲ در هزار گزارش شده است که شیوع بالایی است. بیشترین شیوع در ایران در استان‌های غربی و جنوب غربی مانند ایلام، کرمانشاه، همدان، کردستان و لرستان گزارش شده است (Nikpay and et al., 2016).

سنگ‌های کلیه ناهمگن هستند (شکل ۱). سنگ‌های حاوی کلسیم شایع‌ترین نوع سنگ کلیه هستند که بیش از ۸۰٪ موارد را تشکیل می‌دهند و بیشتر آنها از اگزالات کلسیم یا به ندرت از فسفات کلسیم تشکیل شده‌اند. اسید اوریک ۵ تا ۱۰ درصد از کل سنگ‌ها، استروویت ۱ تا ۵ درصد و سنگ‌های نادر (مانند سیستین، آمونیوم اورات، دارو، دی‌هیدروکسی‌آدنین) ۳ درصد یا کمتر را تشکیل می‌دهند (شکل ۱) (Courbebaiss, et al. 2023).

این مقاله به بررسی کانی‌شناسی برخی از کانی‌های زیرگروه‌های سنگ کلیه بر اساس دستورالعمل‌های انجمن اورولوژی اروپا (EAU) (EAU, ۲۰۲۰) می‌پردازد.

۲- مواد و روش‌ها

جهت انجام این تحقیق که اساساً بر مبنای پایگاه‌های داده PubMed، Cochrane library و Google Scholar را برای یافتن عبارات جستجو «بیماری سنگ کلیه» و «سنگ ادراری» جستجو شده است. مبنای این کار بر طبق روش تحقیقی راهبردی پوپوفا و همکاران در سال ۲۰۲۵ میلادی می‌باشد.



شکل ۱. زیرگروه‌های سنگ کلیه. (A) مونوهیدرات‌های اگزالات کلسیم (وولیت)، (B) دی‌هیدرات‌های اگزالات کلسیم (ودلایت)، (C) فسفات کلسیم (کارباپاتیت)، (D) اسید اوریک، (E) اورات آمونیوم، (F) استروویت، (G) دی‌هیدروکسی آدنین، (H) سیستین، (I) دارو (ان-استیل سولفادیازین) (Courbebaïsse, et al. 2023).

۳ - بحث

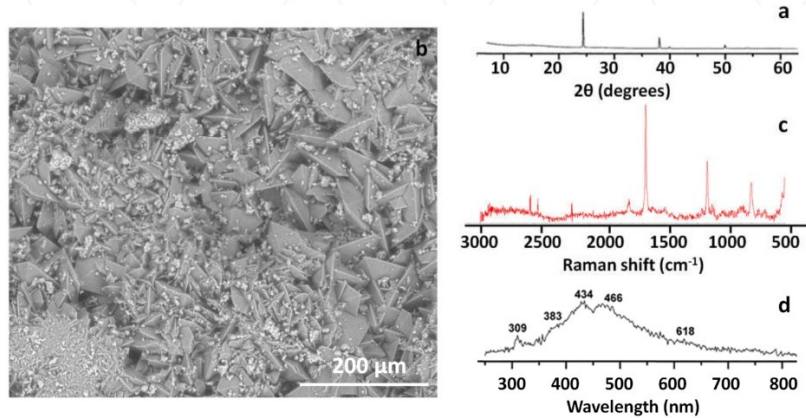
با توجه به این که سنگ‌های کلیه ناهمگن هستند، لذا به بررسی کانی‌شناسی برخی از سنگ‌های کلیه با ترکیبات معدنی بر طبق دستورالعمل‌های EAU (۲۰۲۰) می‌پردازیم (جدول ۱).

جدول ۱- خصوصیات کانی‌شناسی سنگ‌های کلیه و مجاری ادراری بر اساس دستورالعمل‌های انجمن اورولوژی اروپا (EAU) (EAU, ۲۰۲۰)

فرمول شیمیایی	نام رایج کانی	نام شیمیایی
$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	وولیت	کلسیم اگزالات مونوهیدرات
$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	ودلایت	کلسیم اگزالات دی‌هیدرات
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot (\text{OH})_2$	آپاتیت	کلسیم فسفات بنیانی
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	بروشیت	کلسیم فسفات
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 (\text{Mg}, \text{Fe})\text{H}(\text{PO}_4)_7$	ویتلوکیت	تری کلسیم فسفات
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	دالیت	کربنات آپاتیت فسفات
CaCO_3	آراگونیت	کلسیم کربنات
$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	استروویت	منیزیم آمونیوم فسفات هگزاهیدرات
$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	دیت ماریت	منیزیم آمونیوم فسفات مونوهیدرات

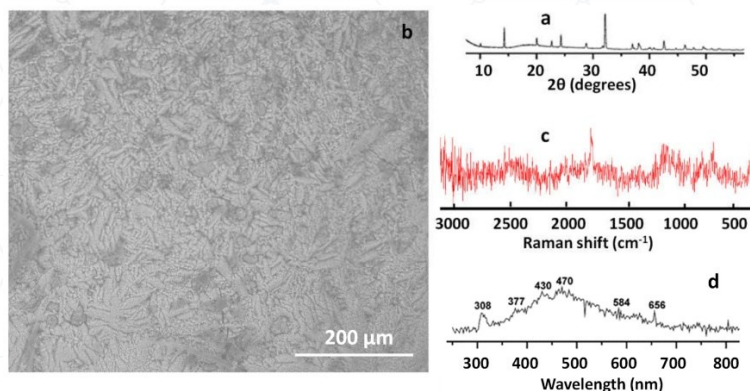
وولیت یا اگزاکلسیت $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ترکیبی با انحلال‌پذیری کم است، در آب محلولی با حلالیت کم که در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد کمی افزایش می‌یابد و منجر به تشکیل کریستال‌های فیبری می‌شود. ساختار وولیت مربوط به کلاس منشوری سینگونی مونوکلینیک است. سلول بنیادی دارای گروه فضایی تقارن P21/b است. این ساختار به ریزپراش اشعه ایکس (شکل 2a) پاسخ می‌دهد، با پیک‌های پراش بالا در آنکسترم ۳.۶۵۲ و ۲.۳۵۷. مورفولوژی آن (شکل b) با منشورهای مونوکلینیک معمولی و شکافتگی واضح آن مطابقت دارد که نشان دهنده تقارن شبه رومبیک بیشتر است و اگزالات کلسیم است که معمولاً در اکثر سنگ‌ها وجود دارد. کریستال در تراز منشوری کوتاه [۰۰۱] قرار دارد و معمولاً با سطوح معمولاً نامنظم توسعه یافته، تعریف می‌شود. دوقلوی آن در {۱۰۱} به صورت دوقلو و صفحه تماس، با یا بدون زاویه بازگشت، قلبی

شکل یا منشوری و با ظاهری شبه ارتورومبیک بسیار رایج است. بلورها، همانطور که قبلاً ذکر شد، در مراحل متوالی با فازهای همپوشانی رشد می‌کنند که نشان‌دهنده یک هسته‌زایی همگن است که به دلیل اشباع بیش از حد در محیط اگزالات کلسیم، باعث تبلور سنگ کلیه می‌شود. اگزالات کلسیم در صورت وجود مواد دیگر در سیستم با اندازه‌های کوچکتر از اندازه بحرانی یا به دلیل رقابت در رشد به دلیل عدم وجود فضای کافی برای توسعه آنها، به صورت معلق (بدون تبلور) باقی می‌ماند. تجزیه و تحلیل‌های طیف‌سنجی رامان و کاتدولومینسانس (CL) در شکل 2c و 2d ارائه شده است.



شکل-۲. وولیت. (الف) آنالیز میکرودیفرکشن اشعه ایکس، (ب) آنالیزهای SEM/EDX، (ج) آنالیز رامان، (د) آنالیز CL (Daudon et al. 2016)

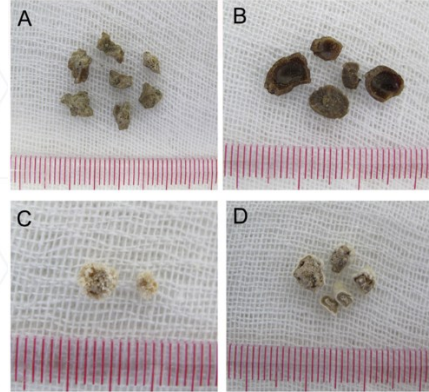
وِدیلت یا اگزالات کلسیم هیدراته دارای یک سلول بنیادی با گروه فضایی تقارن $I4/m$ دی پیرامیدال است. کریستال‌ها معمولاً به صورت ایزوله، با $\{011\}$ ، کشیده $[010]$ و با انتهای $\{001\}$ ظاهر می‌شوند، معمولاً خورده شده‌اند. الگوی پراش نمونه در شکل 3a با پیک‌های پراش در 2θ ۲۰.۷۴۴، ۲۶.۱۹ و ۳۳.۳۵ (شدت بالا) ارائه شده است. تشکیل هسته تبلور اولین مرحله رشد سنگ است، سپس، روی این هسته و در دوره‌های زمانی متوالی، رشد فازها و تجمع آنها ایجاد می‌شود. نتایج طیف‌سنجی رامان و CL توسط طیف‌های کاتدولومینسانس ثبت‌شده روی سطوح جامد با مولکول‌های هیدراته مطابقت دارد. هر دو اگزالات، بیومینرال‌های بسیار رایجی هستند که وقتی ادرار از اگزالات و کلسیم اشباع می‌شود، رسوب می‌کنند و روی مواد از قبل متبلور شده مانند اورات رسوب می‌کنند و کریستال‌هایی با مورفولوژی‌های معمول برای هر فاز تشکیل می‌دهند.



شکل-۳. وِدیلت. (الف) آنالیز میکرودیفرکشن اشعه ایکس، (ب) آنالیز SEM/EDX، (ج) آنالیز رامان، (د) آنالیز CL (Daudon et al. 2016)

وِدیلت و وولیت دو کانی دی‌هیدرات اگزالات کلسیم هستند که معمولاً در سنگ کلیه یافت می‌شوند (ترکیبات آلی در طبقه‌بندی کانی‌شناسی دانا-استرانز) (شکل ۴). ساختارهای بلوری آنها مشابه است؛ هر دو در سیستم بلورشناسی مونوکلینیک متبلور می‌شوند، با تناوب دو یون تشکیل‌دهنده آنها: کلسیم و اگزالات. تفاوت در توالی جانشینی یون‌های فوق‌الذکر ظاهر می‌شود؛ بنابراین، وِدیلت تکرار منظم‌تری نسبت به وولیت دارد. این تفاوت‌ها در تناوب، در خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف

هر دو اگزالات کلسیم، مانند حلالیت و واکنش‌پذیری و پیامدهای آنها در تشکیل سنگ کلیه (ثابت‌های ترمودینامیکی در هر دو فاز تغییر می‌کنند) آشکار می‌شود.



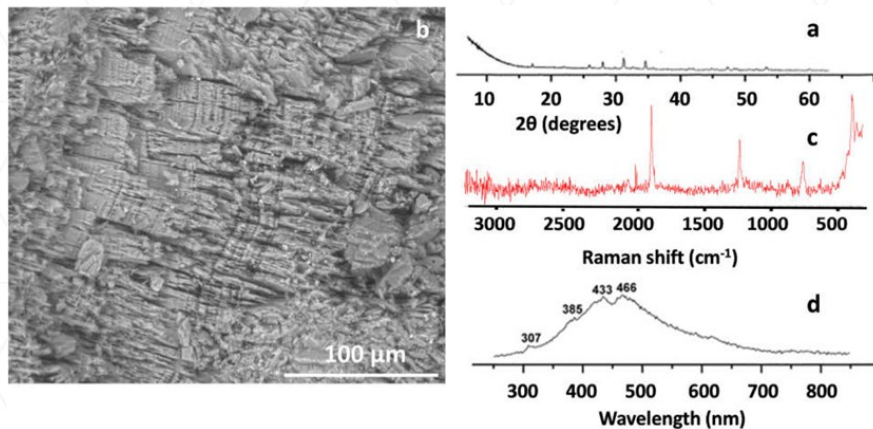
شکل ۴- ظاهر هر نوع سنگ ادراری. A، سنگ وولیت؛ B سنگ وولیت؛ C، سنگ ودلیت؛ D، سنگ مخلوط وولایت و ودلیت (لایه بیرونی ودلیت و هسته وولایت بود) (Daudon et al. 2016)

فسفات‌ها

فسفات‌های موجود در سنگ کلیه شامل گروه آپاتیت مانند هیدروکسی آپاتیت ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$)، کربنات هیدروکسی آپاتیت یا هر یک از اعضای این سری؛ بروشیت ($\text{Ca}(\text{PO}_3\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، ویتلوکیت ($\text{Ca}_9\text{Mg}(\text{PO}_3\text{OH})(\text{PO}_4)_6$) و استروویت ($\text{Mg}(\text{NH}_4)(\text{PO}_4)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) هستند. ترکیب این سنگ‌های کلیه به دلیل فازهای زیادی که با ترکیب شیمیایی یکسان یا ترکیبی از ترکیبات مختلف تشکیل شده‌اند، بسیار دشوار است.

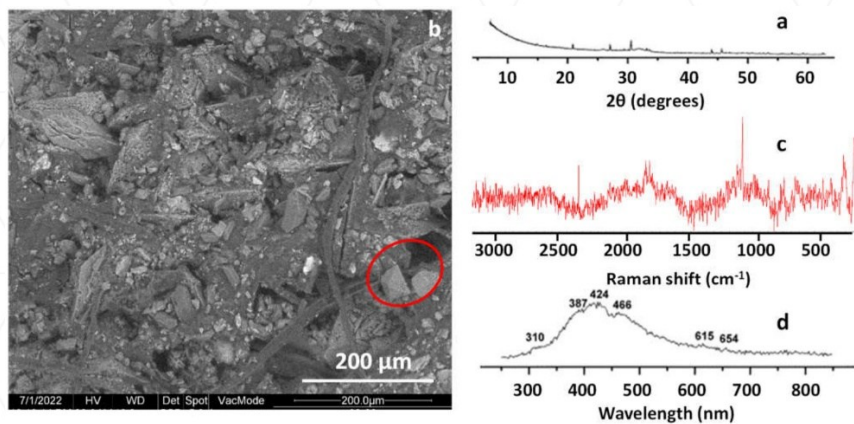
گروه آپاتیت

کانی آپاتیت ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$) پایدارترین فازهای فسفات کلسیم در محدوده وسیعی از pH است. همه ترکیبات بر اساس فسفات‌ها، آرسنات‌ها و وانادات‌ها طبقه‌بندی می‌شوند و سیستم تبلور آنها شش ضلعی است. وجود فسفات‌ها به pH بستگی دارد و فازهای مختلفی را نشان می‌دهد. با استفاده از آنالیز میکرودیفرانسیال اشعه ایکس، فسفات‌ها پیک‌های پراش را در 2θ ۲۸۱۴، 2θ ۲۷۷۸ و 2θ ۳۰۴۴ نشان می‌دهند. شکل (a، b). آنها با استفاده از SEM، گویچه‌های هیدروکسی آپاتیت را که به عنوان هسته‌های ناهمگن نمک‌های کلسیم عمل می‌کنند، تشخیص دهند. آنالیزهای رامان و CL.



شکل ۵- کلسیم فسفات هگزاهیدرات: (الف) آنالیز میکرودیفرانسیال اشعه ایکس، (ب) آنالیز SEM/EDX، (ج) آنالیز رامان، (د) آنالیز CL (Daudon et al. 2016)

استروویت یک کانی است که معمولاً در مجاری ادراری تشکیل می‌شود و جزء اصلی انواع خاصی از سنگ کلیه است. فرمول شیمیایی آن $(NH_4)MgPO_4 \cdot 6H_2O$ است و ساختار بلوری آن ترکیبی از یون‌های منیزیم، آمونیوم و فسفات است. استروویت در کلاس هرمی ارتورومبیک $Mm2$ متبلور شده است. تراز بلور: گوه‌ای شکل (به دلیل توسعه بزرگ و نابرابر $\{101\}$ و $\{10\bar{1}\}$)، تابوت شکل (هنگام مشاهده در امتداد $[100]$)؛ منشوری کوتاه $[001]$ ، $[010]$ یا $[100]$ ؛ جدولی ضخیم $\{100\}$. توزیع سطوح هرمی یا گنبدی اغلب نامنظم است و گاهی اوقات به صورت دولایه ظاهر می‌شود. با آنالیز XRD، پیک‌هایی در 5.601 آنگستروم، 4.257 آنگستروم، 2.919 آنگستروم و 2.690 آنگستروم (شکل a) نشان داده شد. مورفولوژی آن، با آنالیز SEM/EDX، اغلب ظاهری هرمی ارتورومبیک (شکل b) را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده شرایط تبلور بسیار مطلوب است. طیف‌های رامان در شکل c هستند. باندهای CL در شکل d هستند. استروویت فسفاتی است که به دلیل تصفیه پرهزینه و استفاده به عنوان زباله، مشکلات دفع زیادی را در آب‌های مدفوع شهرهای بزرگ ایجاد می‌کند



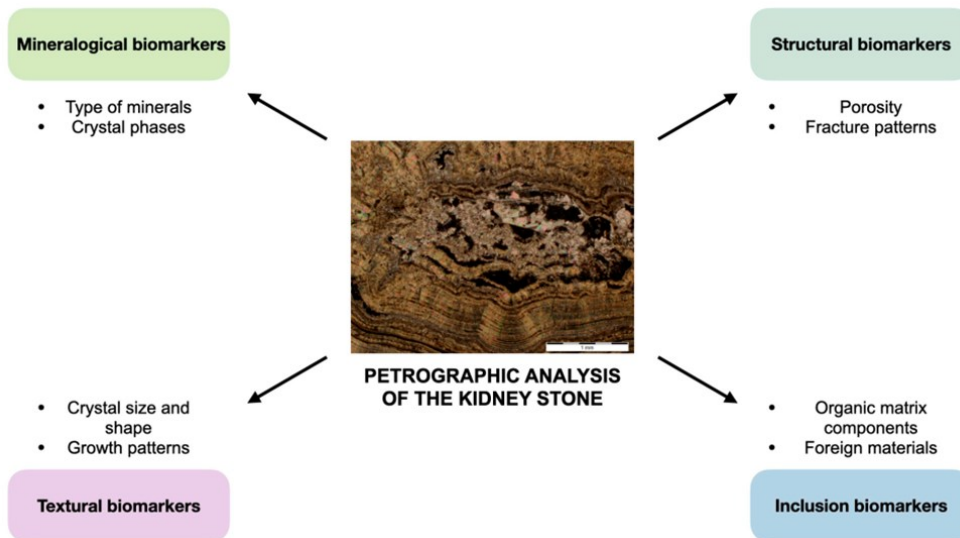
شکل ۶- استروویت: (الف) آنالیز میکرودیفرکشن اشعه ایکس، (ب) آنالیز SEM/EDX کریستال هرمی ارتورومبیک؛ دایره قرمز مربوط به کریستال‌های استروویت است)، (ج) آنالیز رامان، (د) آنالیز CL. (Daudon et al. 2016)

سایر ترکیبات از جمله ترکیبات دیگری که در سنگ کلیه یافت می‌شوند، اما توصیف کامل آنها دشوار است، می‌توان به ویتلوکیت، براشیت و مونیتیت اشاره کرد که همگی از گروه فسفات‌ها، آرسنات‌ها و وانادات‌ها در طبقه‌بندی استرانز هستند و همراه با سایر فسفات‌های اصلی شناسایی شده اند ویتلوکیت، با فرمول $Ca_9Mg(PO_4)_6(PO_3OH)$ ، در سیستم تریگونال، کلاس هرمی دیتریگونال متبلور می‌شود. در ساختار آن پیک‌های پراش مشخصه در 3.21 آنگستروم، 2.88 آنگستروم و 2.60 آنگستروم شناسایی شدند. همچنین از گروه فسفات‌ها، آرسنات‌ها و وانادات‌ها، و با فرمول $Ca(PO_3OH)$ ، مونیتیت ظاهر می‌شود، شبیه به براشیت اما در سیستم تریکلینیک، کلاس هرمی متبلور می‌شود. کریستال‌ها ریز هستند و روی کریستال‌های موجود یا روی سطوح ناهموار، با تبلور شعاعی رشد می‌کنند. بیشترین شدت پراش پیک در 2.96 Å، 3.35 Å و 3.37 Å است. براشیت یک ترکیب فسفات کلسیم، $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ است که بسیار شبیه به گچ معدنی رایج (سولفات کلسیم) است. براشیت یک کانی نادر در خارج از دستگاه ادراری است و حتی در آنجا نیز احتمالاً در کمتر از 10% از کل سنگ‌ها وجود دارد. این یک کانی نرم و ابریشمی است که معمولاً به رنگ قهوه‌ای عسلی است و ساختار فیبری شعاعی ظریفی را نشان می‌دهد. این ماده فقط می‌تواند در محدوده محدودی از pH (اسیدیته) متبلور شود، بنابراین درمان ممکن است شامل تغییر تعادل اسید-باز افرادی باشد که سنگ کلیه براشیت می‌سازند

ویتلوکیت (Whitlockite) به ندرت در سیستم ادراری یافت می‌شود، اما رایج‌ترین ماده معدنی موجود در سنگ‌های پروستات است. این ماده یک فسفات کلسیم با مقادیر کمی منیزیم، $Ca_9(Mg,Fe)H(PO_4)_7$ است و وجود آن ممکن است با مقادیر کمی روی تثبیت شود.

نیوبریت (NEUBERYITE) یک فسفات منیزیم اسیدی، $MgHP0_4 \cdot 3H_2O$ (برخلاف استروویت که حاوی آمونیوم است) است که در سنگ‌های کلیه نادر است. وقتی این ماده تشکیل می‌شود، اغلب به صورت کریستال‌های کروی کوچک و جدا شده روی سطوح سنگ‌های آپاتیت-استروویت دیده می‌شود. این احتمالاً نشان دهنده تغییر استروویت به نیوبریت یا شاید تغییر شرایط به محلول‌های اسیدی‌تر است. نیوبریت ممکن است با عفونت‌های باکتری پروتئوس مرتبط باشد. برخی از کانی دیگر که به ندرت در سنگ کلیه یافت می‌شوند عبارتند از: **مونیتیت** (فسفات کلسیم)، **کلسیت** (کربنات کلسیم)، **آراگونیت** (کربنات کلسیم) و **هاناییت** (فسفات منیزیم).

با توجه به کانی موجود در سنگ کلیه، تاریخچه ای از عملکرد کلیه را می توان در سنگ نگاری را نیز دنبال کرد. آنالیز سنگ‌نگاری امکان شناسایی بسیاری از نشانگرهای زیستی جدید را فراهم می‌کند. علاوه بر تعیین دقیق نوع سنگ کلیه، مرحله توسعه آن، الگوی کانی‌شناسی، معماری کریستالی، چینه‌شناسی و دیاژنز، سنگ کلیه می‌تواند به عنوان یک سابقه تاریخی از عملکرد کلیه و ارگانیسیم به عنوان یک کل عمل کند. به عنوان یک سابقه تاریخی از عملکرد کلیه و ارگانیسیم به عنوان یک کل عمل کند. بنابراین، با استفاده از آنالیز سنگ‌نگاری، می‌توان عملکرد متابولیک بدن بیمار را تعیین کرد و وضعیت بیمار را بهتر درک کرد تا اختلالات مرتبط را درمان کرد شکل ۲. (Popova, E., et al., 2025). با توجه به شیوع این بیماری در ایران، ۴.۲ در هزار گزارش شده است که شیوع بالایی است. بیشترین شیوع در ایران در استان‌های غربی و جنوب غربی مانند ایلام، کرمانشاه، همدان، کردستان و لرستان گزارش شده است، لذا می‌توان با شناخت و تشخیص نوع سنگ کلیه از دیدگاه کانی‌شناسی پزشکی می‌تواند کمک ارزشمندی به جامعه پزشکی نماید.



شکل ۷- آنالیز سنگ‌نگاری مقاطع نازک سنگ کلیه (Popova, E., et al., 2025).

۴- نتیجه‌گیری

نظر به اینکه این بیماری سنگ کلیه عموماً از تغییرات در تعادل فیزیوشیمیایی در دستگاه ادراری ناشی می‌شود که به عوامل مختلفی نسبت داده می‌شود، اگرچه آنها علل انحصاری نیستند. بنابراین، می‌توان به منطقه محل سکونت، آب و هوا، قومیت، رژیم غذایی و ژنتیک فکر کرد، هم چنین شیوع این بیماری در ایران ۴.۲ در هزار گزارش شده است که از نظر جامعه پزشکی بسیار زیاد است. لذا ابا شناخت کانی‌شناسی دقیق سنگ کلیه نسبت به امر پیشگیری و درمان مبادرت نمود.

۵- مراجع

- Courbebaisse, M., et al. (2023). Hydration for Adult Patients with Nephrolithiasis: Specificities and Current Recommendations. *Nutrients* 2023, 15, 4885
- Daudon, M. et al. (2016). Comprehensive morpho-constitutional analysis of urinary stones improves etiological diagnosis and therapeutic strategy of nephrolithiasis. *C. R. Chimie* 19, 1470e1491
- EAU Guidelines, (2020). Edn. presented at the EAU Annual Congress Amsterdam 2020. <http://uroweb.org/guidelines/compilations-of-all-guidelines/>
- Gibson, D., (1995). MINERALOGY OF KIDNEY STONES. Gibson Consulting 4 pages
- González-Enguita, C. and García-Giménez R. (2024) Kidney Stones: Crystal Characterization. *Crystals* 2024, 14, 238. 1-12.
- Grases F., Costa-Bauzá A., García-Ferragut L (1998): Biopathological crystallization: a general view about the mechanisms of renal stone formation. *Adv Colloid Interface Sci.* 74: 169–194.
- Heilberg I.P., Schor N. (2006): Renal Stone Disease: Causes, Evaluation and Medical Treatment. *Arq Bras Endocrinol Metab.* 2006; 50: 823–831.
- Izzo, F., et al., (2022). Morpho-Constitutional Classification of Urinary Stones as Prospective Approach for the Management of Human Pathological Biomineralization: New Insights from Southern Italy *Minerals* 2022, 12, 1421.
- Lu, A., et al., (2023) Introduction to Environmental Mineralogy. Science Press and Springer. 265p.
- Nikpay, S., and et al., (2016) Frequency of Kidney Stone in Ilam *J Ped. Nephrology* 2016;4(3):102
- Popova, E., et al., (2025). Kidney Stones as Minerals: How Methods from Geology Could Inform Urolithiasis Treatment *J. Clin. Med.* 2025, 14, 997
- Reynolds T.M. (2005): Chemical Pathology Clinical Investigation and Management of Nephrolithiasis. *J Clin Pathol.* 58: 134–140.

بررسی کانی گلسرخ بیابانی باریت (نوع اوکلاهمایی)

مصطفی رقیمی^{*}، مجتبی قره محمودلو^۲، عزیز رحیمی^۱، هادی عمرانی^۱، محمد زمان دماوندی^۱

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

۲- گروه مهندسی آب، دانشگاه گنبد کاووس

*Email: raghimi@gmail.com

چکیده

گلسرخ بیابانی یک کانی طبیعی و چشمگیر است که از بلورهای ژپیس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) یا باریت (BaSO_4) تشکیل شده است که به صورت گلسرخ مانند رشد می‌کنند و اغلب شامل شن ریز کوارتزار هستند. این کانی شبیه گلبرگ‌های گلسرخ شکوفا شده هستند، از این رو نام گلسرخ بیابانی به آنها داده شده است. اگرچه آنها شبیه گل هستند، اما به سادگی خوشه‌هایی از بلورهای کانی هستند که در اثر تبخیر آب‌های زیرزمینی غنی از سولفات در محیط‌های کویری تشکیل شده‌اند. با این شرایط، در دنیا مکان‌های مختلفی از جمله در کشورهای استرالیا، آمریکا، آلمان و مراکش یافت می‌شود. گل‌های سرخ باریت اوکلاهما - که اغلب "سنگ‌های گلسرخ" نامیده می‌شوند - از متمایزترین تشکیل کانی در جهان هستند. لایه‌های گلبرگ‌مانند و درزهای ماسه‌سنگی قرمز تیره آنها باعث می‌شود که تقریباً تراشیده به نظر برسند، اما کاملاً طبیعی هستند. درک چگونگی شکل‌گیری آنها ما را به اعماق تاریخ زمین‌شناسی اوکلاهما مرکزی، به شیمی آب‌های زیرزمینی قدیمی و به اسراری می‌برد که دانشمندان هنوز در تلاش برای کشف آنها هستند. این مقاله به بررسی نحوه تشکیل نمونه اهدایی کانی گلسرخ بیابانی باریت (نوع اوکلاهمایی) می‌پردازد.

کلیدواژه‌ها: گلسرخ بیابانی، کانی باریت، نوع اوکلاهمایی

The Investigation of Rose Desert Barite Mineral (Oklahoma Variety)

Mostafa Raghimi^{*1}, Mojtaba Ghareh Mahmoudloo², Aziz Rahimi¹, Hadi Omrani¹,
Mohammad zaman Damavandi¹

¹ Geology Dept. Science College, Golestan

² Dept. Water Engg., University of Konbad Kavous

*Email: raghimi@gmail.com

Abstract

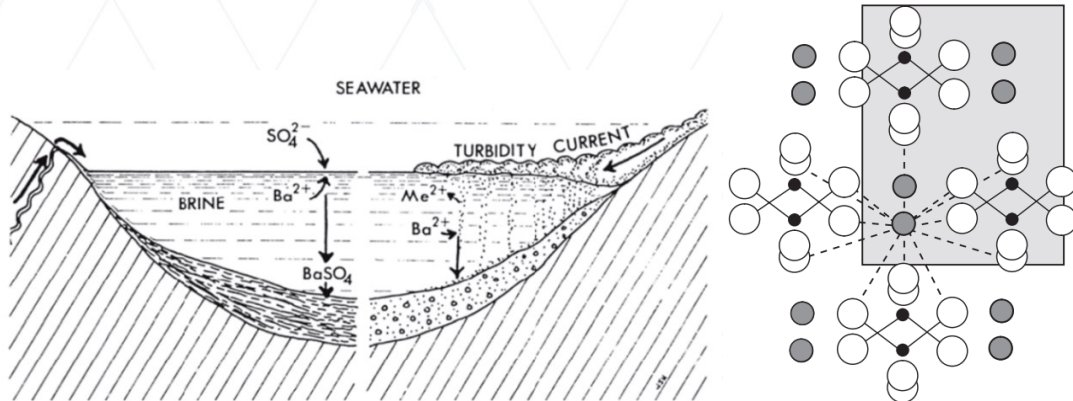
The Desert Rose is a striking, naturally occurring mineral formation composed of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) or barite (BaSO_4) crystals that grow in a rosette-like habit, often incorporating fine quartz sand. These formations resemble blooming rose petals; hence the name desert rose. Although they look like flowers, they are simply clusters of mineral crystals formed by the evaporation of sulfate-rich groundwater in playas environments. With this condition, in different countries of the world such as Australia, America, Germany and Morocco are found. Oklahoma's barite roses—often called "rose rocks"—are among the most distinctive mineral formations in the world. Their petal-like layers and deep red sandstone seams make them look almost sculpted, but they are entirely natural. Understanding how they formed takes us deep into the geological history of central Oklahoma, into the chemistry of ancient groundwater, and into mysteries that scientists are still working to unravel. In this paper deals with gifted sample of Rose Desert Barite Mineral (Oklahoma Variety) on its formation.

Keywords: Rose Desert, Barite Mineral, Oklahoma

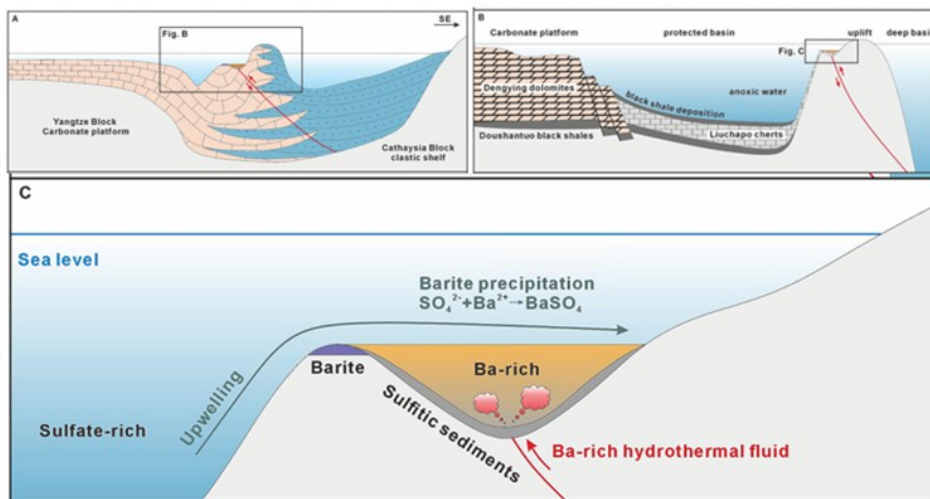
۱- مقدمه

گل سرخ بیابانی یک کانی طبیعی و چشمگیر تشکیل شده از بلورهای ژپس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) یا باریت (BaSO_4) است که به صورت گل سرخ مانند رشد می‌کنند و اغلب شامل شن کوارتز ریز هستند. این ساختار شبیه گلببرگ‌های گل سرخ شکوفا شده هستند، از این رو نام گل سرخ بیابانی به آنها داده شده است.

کانی باریت که با نام‌های باریت، اسپار سنگین و تیف نیز شناخته می‌شود، از کلمه یونانی باروس به معنای سنگین گرفته شده است. ساختار بلورشناسی کانی باریت (BaSO_4) ارتورومبیک، دو هرمی و دارای گروه فضایی Pnma است. اتم‌های گوگرد (S) و دو اتم اکسیژن (O) از هر چهاروجهی سولفات (SO_4^{2+}) در ساختار باریت روی یک صفحه آینه‌ای قرار دارند (گینز و همکاران، ۱۹۹۷) (شکل ۱). باریت (BaSO_4) در طیف متنوعی از محیط‌های زمین‌شناسی با منابع سیال مختلف، از جمله سیالات ماگمایی، دگرگونی، هیدروترمال، یا رسوب‌گذاری در محیط‌های اقیانوسی مختلف: در ستون آب، در کف دریا و در رسوبات دریایی، رایج است (گریفید و پایتان، ۲۰۱۲، بایومی، ۲۰۱۵). از نظر زمین‌شناسی، ذخایر باریت را می‌توان به چهار نوع اصلی زیر تقسیم کرد: لایه‌ای-رسوبی؛ لایه‌ای-آتشفشانی؛ رگه‌ای، پرکننده حفره و متاسوماتیک؛ و باقیمانده. ذخایر لایه‌ای-رسوبی که در سنگ‌های رسوبی با ویژگی‌های بهره‌وری بیولوژیکی بالا در طول تجمع رسوب یافت می‌شوند، منابع اصلی تولید باریت هستند. محتوای باریت می‌تواند تا ۹۵٪ باشد، اما ممکن است به دلیل وجود کوارتز، رس، پیریت، چرت یا سیلت دانه‌ریز، ۵۰٪ یا کمتر تشکیل شود. کانی‌های کربناتی نادر هستند. عامل کلیدی برای درک رفتار ژئوشیمیایی باریت، نامحلول بودن شدید آن است. سولفات با افزودن Ba^{2+} به طور کامل از محلول حذف می‌شود. در نتیجه، Ba^{2+} و SO_4^{2-} نمی‌توانند در یک سیال منتقل شوند. کانی‌سازی یا نیاز به اختلاط دو سیال، یکی با Ba^{2+} و دیگری با SO_4^{2-} ، یا انتقال گوگرد در حالت اکسیداسیون پایین‌تر، معمولاً به صورت سولفید، دارد. سپس، S و Ba در محلول همزیستی دارند و وقتی سیال در شرایط اکسیداسیون قرار می‌گیرد و SO_4^{2-} تشکیل می‌شود، رسوب می‌کنند (گینز و همکاران، ۱۹۹۷). بلور باریت با ریخت‌شناسی و اندازه بلور محیط‌های مختلف تشکیل منجر به طیف وسیعی از شرایط اشباع و نرخ‌های رسوب‌گذاری می‌شوند، بنابراین منجر به تفاوت‌هایی در اندازه‌های بلور و ریخت‌شناسی باریت می‌شوند که برای حالت‌های مختلف رسوب‌گذاری متمایز به نظر می‌رسند (به عنوان مثال، دریایی، هیدروترمال، تراوش سرد و دیاژنتیکی؛ پایتان و همکاران، ۲۰۰۲؛ شکل ۱). ریخت‌شناسی و اندازه بلور تا حد زیادی به شرایط رشد بلور بستگی دارد که به دما، فشار، ترکیب سیالات و در دسترس بودن سطح برای رشد بلور بستگی دارد. تغییرات در شکل بلورهای باریت معمولاً توسط شرایط اولیه محلول که کانی از آن رسوب می‌کند، کنترل می‌شود. بلورهای باریت گلسرخ مانند، مانند آنهایی که معمولاً در چشمه‌های آب گرم مشاهده می‌شوند، بلورهای یوهدرال در دماهای بالاتر (۴۰ درجه سانتیگراد) تشکیل شده‌اند، که ممکن است سرعت انتشار املاح و انرژی جنبشی مولکول‌ها را افزایش داده و در نتیجه شرایط رسوب را تغییر داده و منجر به تشکیل شکل بلوری جدیدی شده باشد. برخلاف دیدگاه قبلی مبنی بر اینکه فرآیندهای هیدروترمال آب‌های عمیق، کانی‌سازی را هدایت می‌کنند، یافته‌های جدیدتر نشان داده‌اند که چین‌های پهن و ملایم ابتدا از طریق فشرده‌سازی تشکیل شده‌اند و منجر به مجموعه‌ای از جزایر قدیمی شده‌اند. گسل‌های سین‌ژنتیک در دو طرف این چین‌ها توسعه یافته‌اند که نشان می‌دهد آنها در مناطق عمیق دریای حوضه توسعه نیافته‌اند. در عوض، لایه‌های نازکی از چرت و شیل‌های سیاه در آنجا رسوب کرده‌اند. گسل‌های همزمان در اطراف چین‌های پهن و ملایم (جزایر قدیمی) توزیع شده‌اند که به عنوان کانال‌های هیدروترمال عمل می‌کنند و ذخایر باریت فراوانی را تشکیل می‌دهند. محیط‌های بی‌هوازی همچنین برای رسوب باریت، که اغلب در مناطق ردوکس-انتقالی رخ می‌دهد، نامطلوب هستند (دونگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ وی و همکاران، ۲۰۲۴). در مراحل اولیه، سیالات غنی از Ba در امتداد گسل‌های اطراف جزایر قدیمی به سمت بالا فوران کرده و در حوضه‌های محدود انباشته شدند (شکل ۲).



شکل ۱. ساختار باریت ($BaSO_4$) (سمت راست) که بر روی سطح [۰۰۱] تصویر شده است، ۱۲ اتم دو ظرفیتی هماهنگ Ba را نشان می‌دهد. دایره‌های سفید، سیاه و خاکستری به ترتیب اتم‌های S، O و Ba هستند (گریفید و پایتان، ۲۰۱۲). (سمت چپ) تشکیل بلور باریت در محیط‌های مختلف تشکیل منجر به رسوب‌گذاری می‌شوند (پایتان و همکاران، ۲۰۰۲).



شکل ۲- در مراحل اولیه، سیالات غنی از Ba در امتداد گسل‌های اطراف جزایر قدیمی به سمت بالا فوران کرده و در حوضه‌های محدود انباشته شدند (وی و همکاران، ۲۰۲۴).

۲- مواد و روش‌ها

نام "بلور باریت ماسه‌ای" که اولین بار توسط نیکولز استفاده شد، نام‌های دیگری نیز برای این بلورها استفاده شده است، مانند "بلورهای ماسه‌ای"، "رزت‌های باریت"، "رزت‌های باریت ماسه‌ای" و "باریت‌های ماسه‌ای". حدود ۲۵۰ میلیون سال پیش، مرکز اوکلاهما با چشم‌اندازی وسیع و نیمه‌خشک با نهرها، دشت‌های سیلابی و رسوبات قرمز غنی از آهن پوشیده شده بود. با گذشت زمان، این ماسه‌ها و لجن‌ها دفن و به چیزی که اکنون ماسه‌سنگ گاربر می‌نامیم، سیمانی شدند - یک لایه سنگی که سنگ بستر را در بیشتر مرکز اوکلاهما تشکیل می‌دهد، با ادامه نشست و جابجایی زمین، ماسه‌سنگ گاربر در مکان‌هایی شکست. این ترک‌ها و مناطق متخلخل به مسیره‌های زیرزمینی برای آب‌های زیرزمینی تبدیل شدند که مواد معدنی محلول را از طریق سنگ حمل می‌کردند. اینجا جایی است که تشکیل سنگ گلسرخ واقعاً آغاز می‌شود منطقه اصلی حاوی باریت‌های ماسه‌ای در اوکلاهما شاید بیش از ۳۰ متر ضخامت نداشته باشد و این افق در امتداد خط شمالی و جنوبی از مجاورت دره پاولز،

احتمالاً تا گاتری، با فاصله حدود ۱۴۰ کیلومتر، روی سطح رخنمون دارد. با این حال، بدون شک، افق‌های دیگری در سطح پایین‌تر از نظر چینه‌شناسی وجود دارند که حاوی بلورها هستند. اشکال اصلی بلورها، همانطور که به وفور در شهرستان کیلوند یافت می‌شوند، برای اکثر ما کاملاً شناخته شده است و در حال حاضر نیازی به اثبات کمی دارد (سایت سنگ گلسرخ اوکلاهما، ۲۰۲۶).



**BARYTE (BARITE) VAR. ROSE MINERALS
FROM AROUND THE WORLD**



شکل ۳- پراکنش انواع کانی باریت گل سرخی در دنیا (سمت راست)، نمونه مورد مطالعه کانی گلسرخ بیابانی باریت نوع اوکلاهما (سمت چپ).

کانی باریت گل سرخی اوکلاهما - که با نام گلسرخ بیابانی نیز شناخته می‌شود - یک شکل طبیعی منحصر به فرد از باریت و شن و ماسه به شکل یک گل شکفته است. این کانی در خاک رس قرمز و یکی از انواع کانی باریت گل سرخی بیابانی است با توجه به خصوصیات بارز آن در اوکلاهما یافت می‌شود، مادامی که در سایر مناطق دنیا از نظر شکل ظاهری کاملاً متفاوت هستند (شکل ۳). نمونه ای از کانی باریت گل سرخی اوکلاهما که به صورت هدیه دریافت شده است مورد مطالعه اولیه قرار گرفته است.

۳- بحث

گل سرخ بیابانی نامی عامیانه است که به ساختارهای گل سرخ مانند خوشه‌های بلوری گچ یا باریت که شامل دانه‌های شن فراوان هستند، داده می‌شود. «گلبرگ‌ها» بلورهایی هستند که روی محور بلورشناسی C مسطح شده‌اند و در خوشه‌های بلوری مسطح و تابشی باز می‌شوند. شکل بلورهای گلسرخ زمانی رخ می‌دهد که بلورها در شرایط شنی خشک، مانند تبخیر یک حوضه نمکی کم‌عمق، تشکیل شوند. بلورها یک آرایه دایره‌ای از صفحات مسطح تشکیل می‌دهند و به سنگ شکلی شبیه به شکوفه گل سرخ می‌دهند. گل‌های سرخ ژئوپسی معمولاً لبه‌های مشخص‌تر و تیزتری نسبت به گل‌های رز باریت دارند. سلسنتین و سایر کانی‌های تبخیری تیغه‌دار نیز ممکن است خوشه‌های رزت تشکیل دهند. آنها می‌توانند به صورت یک شکوفه گل سرخ یا به صورت خوشه‌هایی از شکوفه‌ها ظاهر شوند که معمولاً از اندازه نخود تا ۱۰ سانتی‌متر قطر دارند. شن و ماسه محیطی که در ساختار بلوری گنجانده شده است، یا به هر نحوی بلورها را پوشانده است، با توجه به محیط محلی متفاوت است. اگر اکسیدهای آهن وجود داشته باشد، گل‌های سرخی رنگ زنگ‌زده به خود می‌گیرند. تجزیه و تحلیل، غلظت بالاتری از سیلیکون را در هسته گل سرخ بیابانی، در مقایسه با قسمت‌های پیرامونی آن، نشان می‌دهد که این دیسک‌ها از دانه‌های سیلیکون رشد می‌کنند. این واقعیت که گل سرخ بیابانی به ندرت در رسوبات هولوسن یافت می‌شود، نشان دهنده زمان تشکیل طولانی‌تر از ۱۰۰۰۰ سال سن رسوبات هولوسن است. (هانور، ۲۰۰۰).

نحوه تشکیل

تشکیل گل سرخ بیابانی فرآیندی پیچیده است که شامل تبخیر آب در محیط‌های خشک می‌شود:

در محیط‌های خشک و حوضه‌های کم‌عمق: حاوی مواد معدنی محلول (مانند ژیپس، باریت) تبخیر سریع، آب را تجربه می‌کنند. این امر باعث تغلیظ املاح معدنی در آب باقیمانده می‌شود.

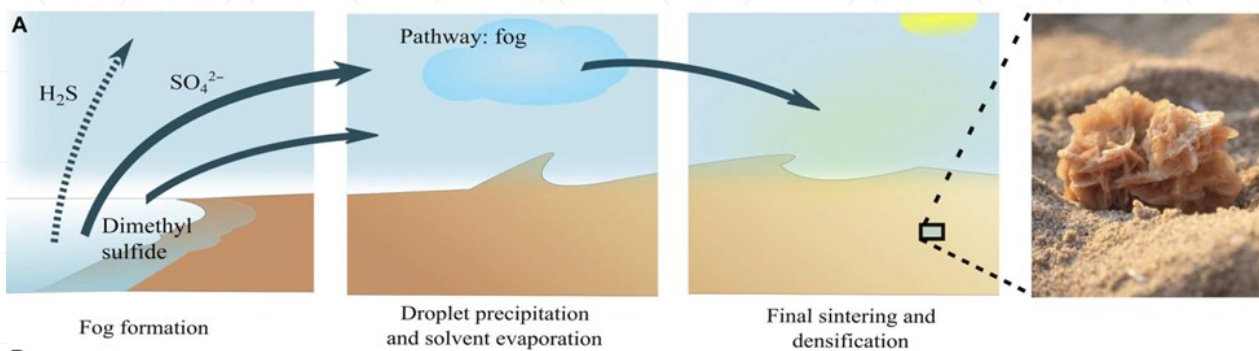
تبلور: پس از رسیدن به حالت فوق اشباع، مواد معدنی تغلیظ شده رسوب کرده و متبلور می‌شوند. این بلورها معمولاً به صورت صفحه شکل می‌گیرند و ساختارهای نازک و تیغه‌ای شکل تشکیل می‌دهند.

گنجاندن شن: انتقال شن‌های بادی در حوضه منجر به ادغام دانه‌های شن در ماتریس معدنی متبلور می‌شود.

رشد شعاعی: بلورها رشد ترجیحی را در امتداد محورهای بلورشناسی خاص نشان می‌دهند و منجر به انبساط شعاعی به سمت بیرون می‌شوند. دانه‌های شن در شبکه بلوری در حال رشد به دام می‌افتند و به مورفولوژی گل سرخی مشخصه کمک می‌کنند.

تغییر رنگ: ناخالصی‌ها و عناصر کمیاب موجود در طول تبلور، رنگ نهایی گل سرخ بیابانی را تعیین می‌کنند. به عنوان مثال، اکسیدهای آهن در ایجاد رنگ‌های قرمز و قهوه‌ای نقش دارند.

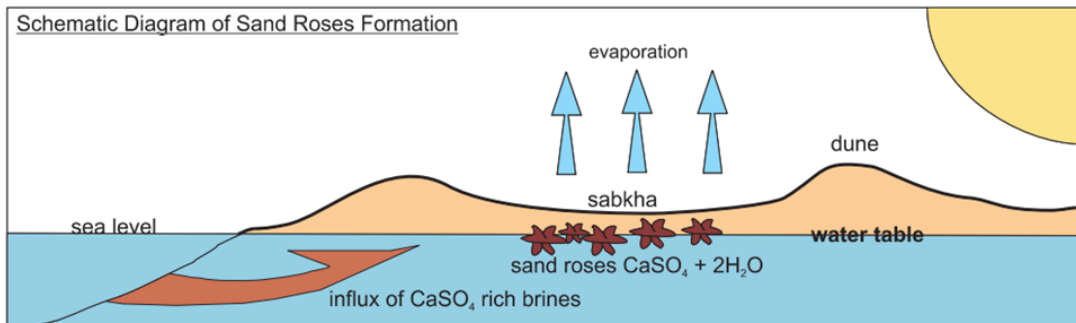
بلورهای ژیپسی گلبزرگ شکل که معمولاً در بیابان‌های غرب آفریقا یافت می‌شوند و "گل سرخ بیابانی" نامیده می‌شوند، با رسوب و تراکم قطرات مایع آئروسول شده (در مه) که ترکیبات گوگرد محلول را حمل می‌کنند، تشکیل می‌شوند. سپس کریستال با تبخیر حلال‌ها توسط گرمای بیابان به صورت سه‌بعدی تشکیل می‌شود. این فرآیند به صورت شماتیک در شکل ۴ A نشان داده شده است (صادق صالح و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۴- (A) تصویری از فرآیند تشکیل گل سرخ بیابانی با تراکم مه حاوی گوگرد به همراه دمای بالای آب و هوای بیابانی (صادق صالح و همکاران، ۲۰۱۷).

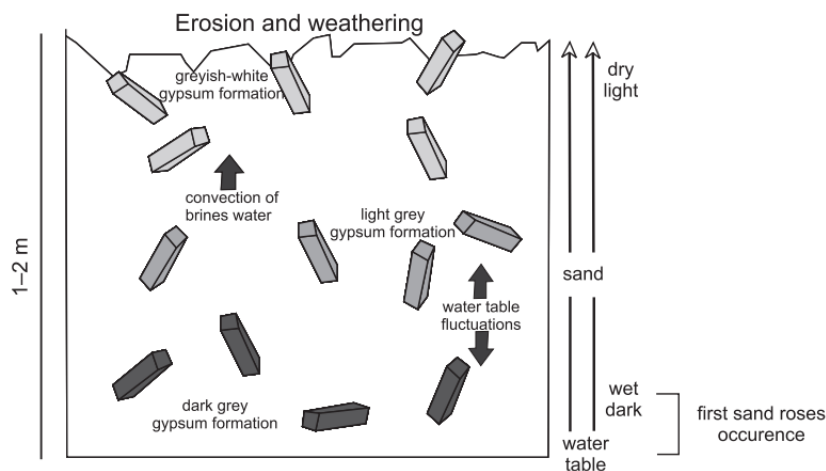
گل سرخ ماسه ای یک سنگ رسوبی است که در اعماق بسیار کم تشکیل می‌شود و عمدتاً در نتیجه تبلور ژیپس در محیط‌های رسوبی خشکی، دریاچه‌ای و دریایی بالای جزر و مدی تشکیل می‌شود (واتسون، ۱۹۸۵). گل‌های ماسه‌ای حاوی ذرات شن در برخی از نقاط جهان از جمله شمال آفریقا، عمدتاً الجزایر مرکزی و تونس یافت شده‌اند (واتسون، ۱۹۸۸). یکی از شناخته‌شده‌ترین نمونه‌های گل‌های ماسه‌ای، دروازه‌های بزرگ بلوری از لاگونا مادره، تگزاس است (ماسون، ۱۹۵۵). پوسته‌های ژیپس کم ارتفاع در صحرای نامیب (واتسون، ۱۹۸۸) و استرالیا (وارن، ۱۹۸۲) ثبت شده‌اند. عربستان سعودی یکی از بزرگترین کشورهای بیابانی جهان با شرایط آب و هوایی خشک برجسته است که برای تشکیل گل‌های ماسه‌ای مناسب است (موگنوت، ۲۰۰۰). این گل‌های سرخ ماسه‌ای که در مناطق بین تپه‌های شنی (در سبخاهای خشکی) رخ می‌دهند، از شورابه‌هایی تشکیل می‌شوند که نسبت

به گل‌های سرخ ژئوپسی اشباع شده‌اند (شکل ۵). شورابه‌های سبخای خلیج فارس از طریق فرآیند تبخیر از سطح سبخاهای میان‌تپه، زمانی که با عمل مویینگی به سمت بالا و به داخل ماسه نفوذ می‌کنند، متمرکز می‌شوند (موگنوت، ۲۰۰۰).



شکل ۵- نحوه تشکیل گل‌سرخ‌های ژئوپس در سبخا یا مناطق بین تلماسه‌ای (موگنوت، ۲۰۰۰).

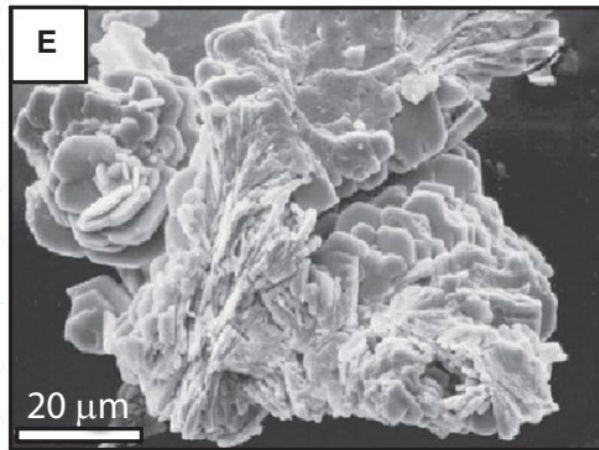
نوسانات سطح آب منجر به رسوب مداوم کریستال‌های گچ در فضاهای خالی ماسه‌ها بین سطح آب و سطح سبخا می‌شود و دانه‌های ماسه‌ای سست را جابجا می‌کند. سیمانی شدن توسط ژئوپس می‌تواند تبدیل بلورهای ماسه تیره و گچ سیاه به بلورهای سفید و گل‌های ماسه‌ای روشن را توضیح دهد (شکل ۵). این شرایط توسط تفاوت در ترکیب خود ماسه بادی و بلورهای ژئوپس و همچنین شدت تبخیر، که در نزدیکی سطح منطقه بین تلماسه‌ها شدیدتر می‌شود، کنترل می‌شود (واتسون، ۱۹۸۵). بنابراین، افزایش مقدار ژئوپس به سمت سطح بین تلماسه‌ها به افزایش تدریجی نرخ تبخیر نسبت داده می‌شود (شکل ۶). یکی از ویژگی‌های جذابی که در هر مطالعه‌ای در مورد گل‌های سرخ ماسه‌ای یافت شده است، ظهور گل‌های سرخ ماسه‌ای کمی تا شدیداً هوازده بر روی سطح با گل‌های سرخ ماسه‌ای بزرگ و متمایز (حدود ۶۰ سانتی‌متر تا ۱ متر) است. مهم‌ترین فرآیند در توضیح ظهور گل‌های سرخ ماسه‌ای هوازده در سطح میان‌تپه‌های شنی، احتمالاً فرسایش ناشی از باد و باد کردن ماسه‌های ساحلی در ارتباط با نوسانات سطح آب است.



شکل ۶- مدل شماتیک نحوه تشکیل گل‌ماسه، گل‌ماسه‌های تیره و کوچک در نزدیکی سطح آب یافت شدند در حالی که گل‌ماسه‌های روشن‌تر و بزرگ‌تر در نزدیکی سطح آب یافت شدند (موگنوت، ۲۰۰۰).

باریت هیدروترمال

باریت هیدروترمال از سیالات غنی از باریم که در ارتباط با فعالیت هیدروترمال آتشفشانی تشکیل شده‌اند، رسوب می‌کند. این سیالات از عمق به بالا می‌آیند و با آب دریا در نزدیکی کف دریا مخلوط می‌شوند. گسل‌ها و شکستگی‌های کششی، سیالات هیدروترمال را به سمت بالا و روی کف دریا متمرکز می‌کنند، جایی که با آب دریا مخلوط می‌شوند - منبع اصلی SO_4 برای رسوب باریت. منبع اصلی باریم برای سیالات هیدروترمال، شسته شدن سنگ‌های اقیانوسی یا قاره‌ای است که توسط گرمای حاصل از فعالیت ماگمایی هدایت می‌شوند. شسته شدن هیدروترمال رسوبات پلاژیک غنی از باریم، یکی دیگر از منابع بالقوه باریم برای این سیالات است (مورچی و همکاران، ۱۹۸۷). شکل ساختار گل‌سرخ در باریت نشانه خوبی از تبلور در دماهای پایین با منشأ هیدروترمال است (شکل ۷) (گریفید و پایتان، ۲۰۱۲).



شکل ۷- ساختارهای گل‌سرخ مانند باریت هیدروترمال، خط‌الرأس میانی اقیانوس اطلس، دودکش در لاک‌ استرایک (گریفید و پایتان، ۲۰۱۲).

کانی گل‌سرخ باریت اوکلاهما - که اغلب "سنگ‌های گل‌سرخ" نامیده می‌شوند - از متمایزترین تشکیل کانی در جهان هستند. لایه‌های گلبرگ‌مانند و درزهای ماسه‌سنگی قرمز تیره آنها باعث می‌شود که تقریباً تراشیده به نظر برسند، اما کاملاً طبیعی هستند. درک چگونگی شکل‌گیری تشکیل در تاریخ زمین‌شناسی اوکلاهما است. کانی گل‌سرخ باریت از باریت ($BaSO_4$)، یک کانی متشکل از باریم و سولفات، ساخته شده‌اند. "گلبرگ‌ها" بلورهای باریت هستند که در داخل ماسه‌سنگ رشد کرده‌اند و دانه‌های شن کوارتز قرمز را که به کانی گل‌سرخ اوکلاهما رنگ می‌دهند، در خود جای داده‌اند. برای تشکیل سنگ‌های گل‌سرخ، سه چیز باید در کنار هم قرار گیرند: ۱- آب‌های زیرزمینی حاوی باریم، ۲- آب‌های زیرزمینی حاوی سولفات و ۳- فضاهای باز در سنگ (منافذ و شکستگی‌هایی که بلورها می‌توانند در آنها رشد کنند). وقتی باریم و سولفات در آب به هم می‌رسند، به راحتی به هم متصل می‌شوند و باریت را تشکیل می‌دهند. باریت بسیار نامحلول است - به این معنی که وقتی شرایط برای تشکیل آن فراهم شود، تمایل به رسوب (بلور شدن) سریع دارد. مطالعات مدرن آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که بخش زیادی از سولفات موجود در منطقه از انحلال ژپس قدیمی در سنگ‌های بالای ماسه‌سنگ گاربر ناشی می‌شود. این آب‌های غنی از سولفات می‌توانند به سمت پایین و به داخل سفره آب زیرزمینی ماسه‌سنگ مهاجرت کنند. به احتمال زیاد حداقل مقداری از سولفاتی که کانی گل‌سرخ باریت را تشکیل داده است، از همان منبع آمده است. باریم به وفور در خود ماسه‌سنگ گاربر وجود ندارد، بنابراین محققان معتقدند که در آب‌های زیرزمینی عمیق و غنی از مواد معدنی که از حوضه رسوبی بزرگتر

در زیر آن قرار گرفته شده است، حمل شده است. این شورابه‌های عمیق‌تر گاهی اوقات حاوی باریم محلول کافی برای رسوب باریت هنگام برخورد با سولفات هستند. نحوه رشد یک سنگ گلسرخ به طور معمول آماده است: یک منفذ یا شکستگی کوچک، فضای اولیه را فراهم می‌کند، آب زیرزمینی از آن عبور می‌کند و باریم و سولفات را حمل می‌کند، وقتی شرایط اجازه دهد، آب از باریت اشباع می‌شود، بلورهای باریت شروع به رشد می‌کنند، که اغلب به صورت تیغه‌های نازکی که از یک نقطه مرکزی منشعب می‌شوند، شروع می‌شوند، با رشد تیغه‌ها، آنها به منافذ همسایه یا در امتداد شکستگی‌ها گسترش می‌یابند، بلورها فشار رشد را اعمال می‌کنند که می‌تواند به آرامی دانه‌های شن را به کناری هل دهد یا فضای جدید موجود را اشغال کند، با ادامه جریان سیال غنی از مواد معدنی، ساختار گلسرخ لایه به لایه گسترش می‌یابد. طی هزاران یا احتمالاً میلیون‌ها سال، این مراحل می‌توانند یک سنگ گلسرخ با قطری از چند میلی‌متر تا بیش از ۲۰ سانتی‌متر تشکیل دهند. این بلورها فقط تا زمانی رشد می‌کنند که فضا (شبه‌های منافذ یا شکستگی‌ها)، منبعی از یون‌های تشکیل‌دهنده باریت و شرایطی که آب را از باریت اشباع نگه می‌دارد، وجود داشته باشد. به محض تغییر هر یک از این عوامل، رشد متوقف می‌شود (سایت گلسرخ بیابانی باریت اوکلاهامایی، ۲۰۲۶).

۴- نتیجه‌گیری

گل سرخ بیابانی یک کانی طبیعی و چشمگیر تشکیل شده از بلورهای ژپیس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) یا باریت (BaSO_4) است که به صورت گل سرخ مانند رشد می‌کنند و اغلب شامل شن کوارتز ریز هستند. این ساختار شبیه گلبیگ‌های گل سرخ شکوفا شده هستند، از این رو نام گل سرخ بیابانی به آنها داده شده است. کانی گلسرخ باریت از باریت (BaSO_4)، یک کانی متشکل از باریم و سولفات، ساخته شده‌اند. "گلبیگ‌ها" بلورهای باریت هستند که در داخل ماسه‌سنگ رشد کرده‌اند و دانه‌های شن کوارتز قرمز را که به کانی گلسرخ اوکلاهما رنگ می‌دهند، در خود جای داده‌اند. برای تشکیل سنگ‌های گلسرخ، سه چیز باید در کنار هم قرار گیرند: ۱- آب‌های زیرزمینی حاوی باریم، ۲- آب‌های زیرزمینی حاوی سولفات و ۳- فضاهای باز در سنگ (منافذ و شکستگی‌هایی که بلورها می‌توانند در آنها رشد کنند). وقتی باریم و سولفات در آب به هم می‌رسند، به راحتی به هم متصل می‌شوند و باریت را تشکیل می‌دهند. باریت بسیار نامحلول است - به این معنی که وقتی شرایط برای تشکیل آن فراهم شود، تمایل به رسوب (بلور شدن) سریع دارد. مطالعات مدرن آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که بخش زیادی از سولفات موجود در منطقه از انحلال ژپیس قدیمی در سنگ‌های بالای ماسه‌سنگ گاربر در منطقه اوکلاهما مرکزی ناشی شده است.

۵- تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از جناب آقای دکتر مهروز اسپندیار استاد گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشگاه فنی کر تین، استرالیا به دلیل هدیه نمونه کانی گل سرخ بیابانی باریت اوکلاهامایی در دوره فرصت مطالعاتی نویسنده اول.

۶- مراجع

- Baioumy, H. (2015): Rare earth elements, S and Sr isotopes and origin of barite from Bahariya Oasis, Egypt: Implication for the origin of host Ehya iron ores. – Journal of African Earth Sciences, 106: 99–107.
- Dong, Y.P., Hui, B., Sun, S.S., He, D.F., Sun, J.P., Zhang, F.F., Cheng, C., Yang, Z., Shi, X. H., Zang, R.T., Long, X.P., Zhang, G.W., 2024b. Neoproterozoic tectonic evolution and proto-basin of the Yangtze Block. China. Earth-Sci. Rev. 249, 104669.
- Gaines, R.V., Skinner, H.C.W., Foord, E.E., Mason, B. and Rosenzweig, A. (1997) Dana's New Mineralogy. Wiley, New York, 1819 pp.

- Griffith, E.M. & Paytan, A. (2012): Barite in the ocean occurrence, geochemistry and palaeoceanographic applications. – *Sedimentology*, 59 (6): 1817–1835.
- Hanor, J.S. (2000). Barite-celestine Geochemistry and Environments of Formation. *Rev. Mineral. Geochem.* 2000, 40, 193–275.
- Masson, P.H., 1955. An occurrence of gypsum in South-west Texas. *Journal of Sedimentary Petrology*, 25: 72–77.
- Mougenot, D., 2000. Sand Roses of Saudi Arabia. Adapted from Poster Presentation. GEO 2000 Conf and Exhib, Bahrain.
- Murchev, B.L., Madrid, R.J. and Poole, F.G. (1987) Paleozoic bedded barite associated with chert in western North America. In: *Siliceous Sedimentary Rock-Hosted Ores and Petroleum* (Ed. J.R. Hein), pp. 269–283. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Paytan, A., Mearon, S., Cobb, K. and Kastner, M. (2002) Origin of marine barite deposits: Sr and S isotope characterization. *Geology*, 30, 747–750.
- Sadeq Saleh, M., et al., (2017). Three-dimensional micro architected materials and devices using nanoparticle assembly by pointwise spatial printing. *Sci. Adv.* 2017;3
- Warren, J.K., 1982. The hydrological setting, occurrence and significance of gypsum in Late Quaternary salt lakes in South Australia. *Sedimentology*, 29: 609–637.
- Watson, A., 1985. Structure, chemistry and origins of gypsum crusts in southern Tunisia and Central Namib Desert. *Sedimentology*, 32: 855–875.
- Watson, A., 1988. Desert gypsum crusts as paleoenvironmental indicators: a micropetrography study of crusts from southern Tunisia and the central Namib Desert. *Journal of Arid Environments*, 15: 19–42.
- Wei, W., Dong, L.H., Xiao, S.H., Lin, Y.B., Xu, L.G., Wei, G.Y., Wang, W.Z., Tian, L.L., Wei, H.Z., Huang, F., 2024. Seawater barium and sulfide removal improved marine habitability for the Cambrian Explosion of early animals. *Natl. Sci. Rev.* nwae237.
- www.Oklaham'S Rose Desert Barite.

مدلسازی تعادلات فازی میکا شیستهای درجه پایین حاصل از رسوبات حاشیه فعال قاره -

جنوب ارومیه، افیولیت ملانژ سیلوانا

منیر مجرد

دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

m.modjarrad@urmia.ac.ir

چکیده

میکا شیستهای درجه پایین منطقه زیوه واقع در جنوب ارومیه از اجزاء موجود در آمیزه رنگین افیولیت سیلوانا در منتهی‌الیه شمالغربی ایران بوده و در نزدیکی مرز با ترکیه و عراق برونزد دارند. کانی‌شناسی ساده این واحد سنگی شامل موسکویت، بیوتیت، کلریت، کوارتز، فلدسپار و دانه‌های اپک بوده و فقدان کانی‌های شاخص متاپلیتی در آنها مانعی در جهت تخمین شرایط دگرگونی دقیق این سنگها می‌باشد. این واحد دگرگونی در یک محیط تکتونیکی نظیر حاشیه فعال قاره تکوین یافته و سپس با تصادم قاره‌ها دچار دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین (LT/LP-MP) شده‌اند. تخمین دما و فشار به روش مختلف از جمله مدلسازی شبه‌برش دما- فشار، دما- ترکیب، فشار- ترکیب و بررسی فراوانی مودال کانیهای مشاهده شده برای ترکیب سنگ کل معین شیستهای زیوه، به کمک نرم‌افزار GeoPS انجام شده است. با قطع تعادل‌های مربوط به اعضای نهایی کانیها در نهایت دمای حدود 450 ± 20 درجه سانتیگراد در فشاری معادل 3.4 ± 0.2 کیلو بار برای این شیستها ارزیابی شده که دگرگونی ناحیه‌ای از نوع بارووین در حد رخساره شیست سبز فوقانی تا اوایل رخساره آمفیبولیت می‌باشد. این شرایط نشان‌دهنده تدفین در عمق متوسط و شیب زمین‌گرایی نسبتاً بالا بوده و با دگرگونی درون یک آمیزه رنگین طی فرایندهای پس از برخورد سازگار است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدلسازی بر مبنای تعادلات فازی ابزاری قدرتمند در جهت برآورد شرایط دگرگونی حتی در شیستهای درجه پایین فاقد کانیهای شاخص می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مدلسازی تعادلات فازی، دگرگونی در حد رخساره شیست سبز، میکاشیست، آمیزه رنگین، منطقه زیوه، افیولیت سیلوانا

Phase equilibrium modeling of low-grade schists derived from active-margin sediments: insights from the south of Urmia, Silvana ophiolite mélangé

Monir Modjarrad

Urmia University, Faculty of Sciences, Geology department

m.modjarrad@urmia.ac.ir

Abstract

Low-grade mica schists of the Ziveh area, located south of Urmia, constitute part of the Silvana ophiolitic colored mélangé in the northwesternmost part of Iran, near the borders with Turkey and Iraq. The simple mineral assemblage of these rocks, consisting of muscovite, biotite, chlorite, quartz, feldspar, and opaque minerals, together with the absence of index metapelitic minerals, hampers direct estimation of regional metamorphic conditions. These metamorphic rocks were formed in a tectonic setting comparable to an active continental margin and were subsequently affected by low-grade regional metamorphism (LT/LP-MP) during continental collision. Temperature and pressure conditions were estimated using several approaches, including P-T pseudosection modeling, T-X and P-X diagrams, and evaluation of the modal abundances of observed minerals for a representative whole-rock composition of the Ziveh schists, employing the GeoPS software. After accounting for equilibrium relationships among mineral end members, peak metamorphic conditions of approximately 450 ± 20 °C at 3.4 ± 0.2 kbar were obtained for these schists. These conditions correspond to Barrovian-type regional metamorphism at the **upper greenschist facies to the lower amphibolite facies transition**. These conditions suggest moderate burial depths and a relatively elevated geothermal gradient, compatible with metamorphism within an accretionary mélangé during subduction-collision processes. The results demonstrate that phase equilibrium modeling provides robust constraints on metamorphic conditions even in low-grade schists lacking classical index minerals.

Keywords: Phase equilibrium modeling; Greenschist-facies metamorphism; Mica schist; Accretionary mélangé; Ziveh area; Silvana ophiolite

۱- مقدمه

طی فرورانش یک پوسته اقیانوسی، رسوبات حاشیه قاره و سنگهای زیرین از روی ورقه اقیانوسی فرورانده تراشیده شده و بصورت یک توده گوه‌ای شکل روی هم انباشته می‌شوند. این رسوبات تحت عنوان رسوبات افزایشی حاشیه فعال شناخته شده و اغلب بر روی ورقه فرورفته جا می‌گیرند (Sengor and Okurogullari, 1991; Tarbuck and Lutgens, 1994). چنین واحد تکتونیکی اغلب دگرگونی درجه پایین را تحمل کرده و در کنار سایر اجزاء آمیزه رنگین در زون تصادمی یافت می‌شود (Zheng et al., 2005). چنین سرگذشتی بر روی سنگهای رسوبی حاشیه فعال قاره با پروتولیت آرکوز و شیل زیوه در جنوب ارومیه (مجرد، ۱۴۰۰) روی داده و با فرورانش اقیانوس نئوتتیس در شمالغرب ایران، در میان محصولات آمیزه رنگین و به همراه رسوبات منشور برهم افزایشی دگرگون شده و در این منطقه برونزد یافته است.

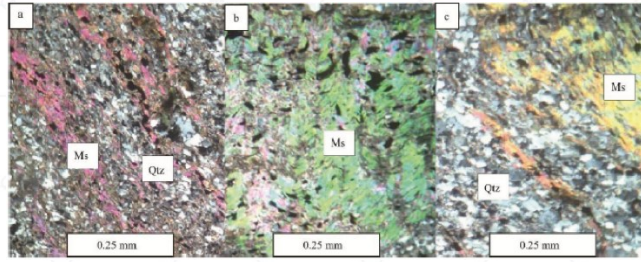
با توجه به فقدان کانیهای شاخص متاپلیتی در این سنگها، تخمین شرایط دگرگونی با دشواری روبروست. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از مدل‌سازی دما- فشاری بر اساس ترکیب سنگ کل نمونه‌ها و دقت در مجموعه کانیایی مشاهده شده این شرایط تا حدی روشن شود. با توجه به برونزد این واحد درون آمیزه رنگین افیولیت سیلوانا، ارزیابی چگونگی دگرگونی می‌تواند در بازسازی وقایع مرتبط با بسته شدن اقیانوس نئوتتیس در این بخش از ایران کمک کننده باشد. همچنین این مدل‌سازی روشی برای مطالعه سنگهای درجه پایین دگرگونی امتداد زون سندج - سیرجان قلمداد خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

جهت پیشبرد هدف پژوهشی ذکر شده در مقدمه، از نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل متاپلیتهای درجه پایین منطقه زیوه که در مطالعه قبلی به چاپ رسیده است (مجرد، ۱۴۰۰)، استفاده شد. این ترکیب بعنوان ورودی به نرم افزار GeoPS (Xiang and Connolly, 2021) داده شد و تنوعی از نمودارهای تعادلی بر اساس مشاهدات میکروسکوپی بر این مبنا تهیه شد. نمودارها عبارتند از: شبه برش T-X, P-X, P-T. همچنین با تخمین فراوانی مودال فازها با پیشرفت شدت دگرگونی، اقدام به ترسیم فراوانی و نسبت کانیها در نمودار دما - فشار شده است. سپس با قطع ایزوپلتهای مربوط به اعضای نهایی کانیهای غالب، شرایط دگرگونی ارزیابی شده است. در نهایت تحلیل و تفسیر موقعیت تکتونیکی واحد مذکور با نتایج بدست آمده انجام گرفته است.

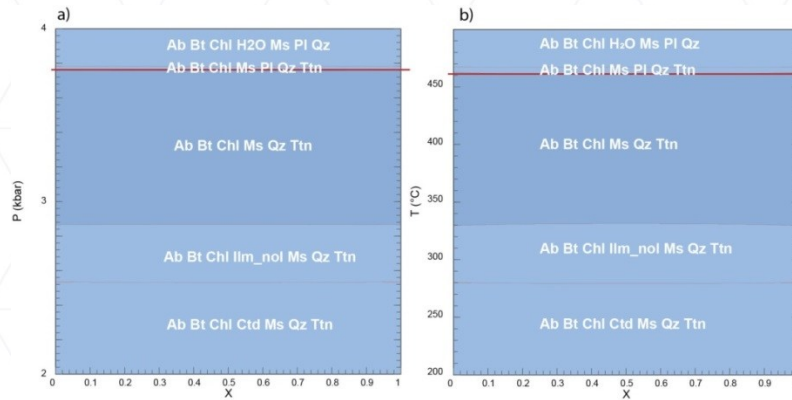
۳- بحث

میکاشیستهای منطقه زیوه ارومیه فاقد هر نوع پورفایروبلاستی بوده و شیستوزیته بافت غالب آنهاست (شکل ۱). مطالعه قبلی نشان داده است که دو فاز دگرشکلی بر روی این سنگها عمل کرده است (مجرد، ۱۴۰۰). این شیستها دارای ۷۰-۵۶ درصد سیلیس، فراوانی اکسید آلومینیم در آنها بالا و در طیف ۲۰-۱۴ درصد، اکسید آهن کل که بصورت آهن سه ظرفیتی گزارش شده تغییراتی بین ۸-۴ درصد داشته، مقدار اکسید تیتانیم اغلب کمتر از ۱ درصد (احتمالا جمع شده در بیوتیت و ایلمنیت) و فراوانی منگنز بسیار اندک و قابل اغماض می‌باشد. این متاپلیتها از نظر اکسید عناصر قلیایی غنای مناسبی داشته و حدود ۲ درصد اکسید سدیم و ۴ درصد اکسید پتاسیم دارند. چنین ترکیبی نشان می‌دهد می‌توان این سنگها را با سامانه KFMASH مطالعه نمود.



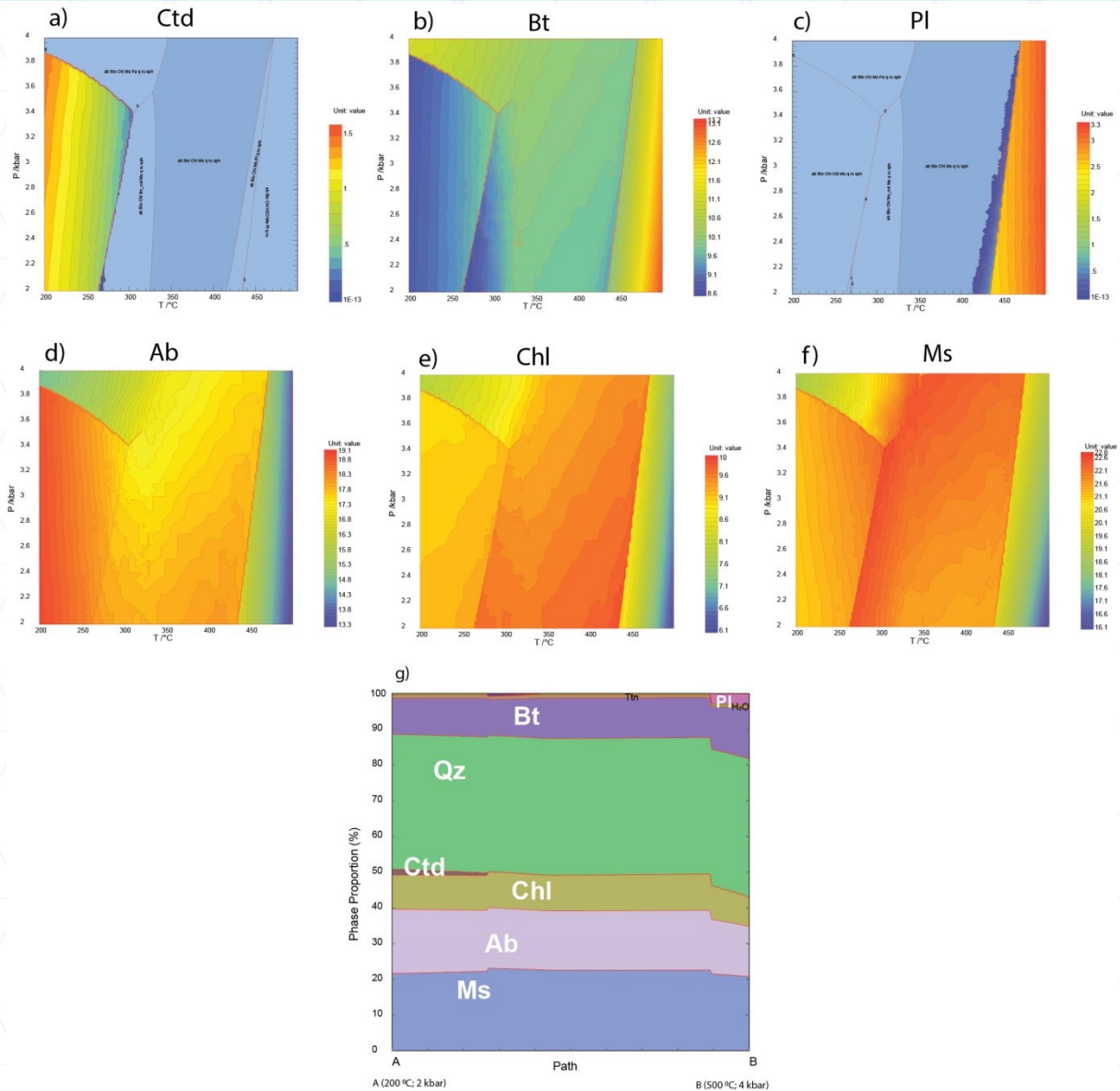
شکل ۱- تصاویر میکروسکوپی از متاپلیتهای منطقه زیوه جنوب ارومیه در حالت XPL.

جهت بررسی شدت دگرگونی در این سنگها نمودارهای T-X و نیز P-X برای آنها ترسیم شد (شکل ۲). همانگونه که نمودارها نشان می‌دهند، سقف فرایند دگرگونی در این واحد با مجموعه کانیایی $Ab + Bt + Chl + Ms + Pl + Qz + Ttn$ مشخص شده و فشاری معادل $3/8$ کیلوپار و دمایی برابر 460 درجه سانتیگراد برای این سنگها ارزیابی می‌شود. علائم اختصاری کانیها از Whitney and Evans (2010) گرفته شده است.



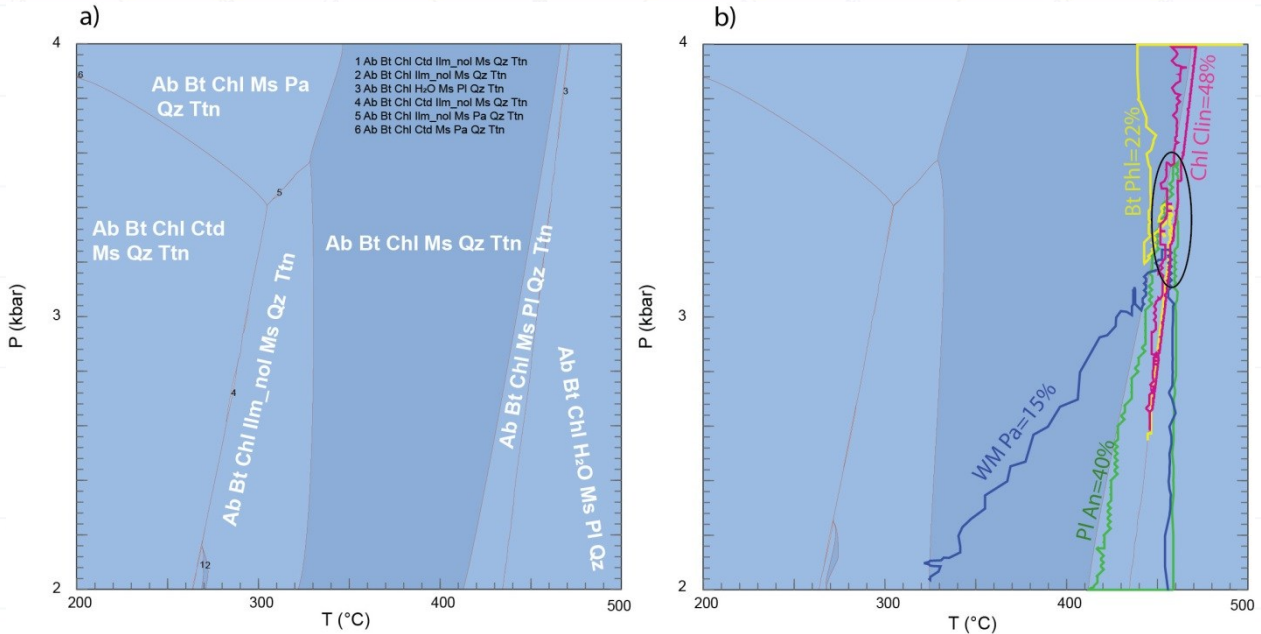
شکل ۲- a نمودار فشار - ترکیب و b نمودار دما - ترکیب برای شیستهای منطقه زیوه ارومیه.

در ادامه با بررسی دقیق کانیهای مشاهده شده و نیز فازهای پیش‌بینی شده توسط مدل تعادلی، نمودارهای مربوط به فراوانی مودال هر کانی در بازه دما و فشاری مشخص شده، ترسیم شد (شکل ۳). در این نمودارها معلوم شد که فاز کلریتوئید با پیشرفت دگرگونی مصرف و فاز پلاژیوکلاز در انتهای بازه به مجموعه افزوده شده است. فراوانی ساین فازها با افزایش دما و فشار تغییراتی داشته است که در نمودارها معلوم است.



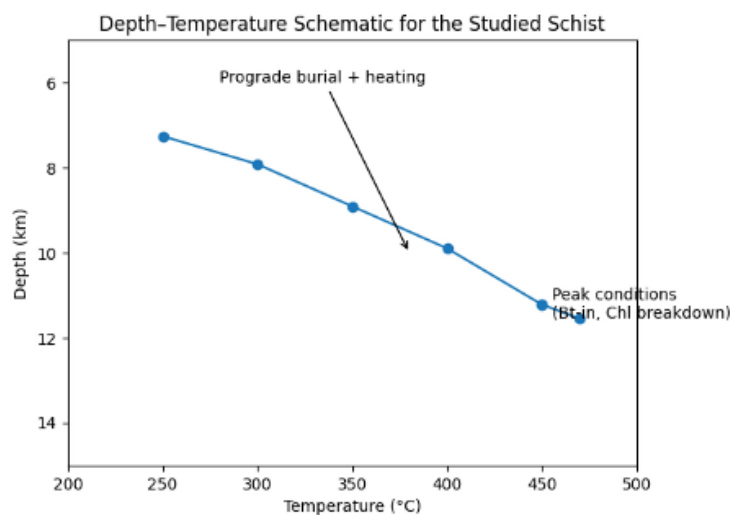
شکل ۳- a-f نمودارهای مربوط به فراوانی مودال پیش‌بینی شده فازهای مختلف در بازه تعریف شده دما - فشار و g طرح شماتیک فراوانی نسبی کانیها در مسیر AB که کمینه و بیشینه شرایط دگرگونی است.

با هدف دستیابی به دما و فشار دگرگونی در سنگهای مورد بحث، اقدام به ترسیم شبه‌برشی از دما در برابر فشار در بازه پیشنهادی شد (شکل ۴a). بر روی این نمودار چندین میدان برای پایداری مجموعه‌های کانیایی ظاهر شده که روی هر کدام اسامی کانیها درج شده است. این مجموعه‌ها با مشاهدات پتروگرافی سازگار است. سپس برای تخمین دقیق‌تر شرایط ترمودینامیکی دگرگونی، ایزوپلت‌های مربوط به تمامی اعضای نهایی این فازها ترسیم و از هر کدام، ایزوپلت‌های منتخب قطع داده شد (شکل ۴b). محل تقاطع این تعادلها در فشار ۳ تا ۳/۵ کیلو بار و دمای حدود ۴۵۰ درجه سانتیگراد منطبق بر دما و فشار ارزیابی شده در شبه برشهای P-X و T-X در شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۴ - a شبه برش دما - فشار برای بازه تعیین شده در مدل پیشنهادی برای شیستهای زیوه به همراه مجموعه کانیایی پایدار در هر میدان. b قطع ایزوپلتیهای مربوط به اعضای نهایی کانیهای در حال تعادل در نمونه‌های مورد مطالعه. در این نمودار ایزوپلتیهای میکای سفید، بیوتیت، کلریت و پلاژیوکلاز همدیگر را در فشار ۳ تا ۳/۵ کیلو بار و دمای حدود ۴۵۰ درجه سانتیگراد قطع کرده‌اند.

چنین شرایطی نشانگر شرایط دگرگونی ناحیه‌ای از نوع باروین است که در آن دما پایین و فشار کم تا متوسط می‌باشد. بیشینه عمق معادل چنین فشاری حدود ۱۲ کیلومتر است که پس از افزایش دمای نسبی با ورود بیوتیت و شکست کلریت و آبزدایی در این واحد روی داده است (شکل ۵). جدول ۱ پاراژنزها و واکنشهای احتمالی رویداده در شیستهای زیوه را خلاصه کرده است.



شکل ۵ - نمودار عمق - دما برای نمایش شماتیک مسیر دگرگونی در شیستهای مورد مطالعه.

جدول ۱- خلاصه مراحل دگرگونی پیش‌رونده در شیستهای منطقه زیوه جنوب ارومیه.

Metamorphic Stages	PT conditions	Main occurrences
Low-grade assemblage	~200 °C; 2 kbar/Lower greenschist facies	Bt absent or very minor; Ms + Chl the hydrous phases
Prograde reaction	Chl + Ms decrease; Bt + Qz increase; H ₂ O release	Bt-in by reaction: Chl + Ms + Qz = Bt + Ab + H ₂ O
Intermediate-grade	Continuous Fe-Mg transfer	No sharp isograd (Fe-Mg vector substitution between Chl and Bt); Ab stable
High-grade	~500 °C; 4 kbar/ Upper greenschist to Lower amphibolite facies	Chl + Ms = Bt + Qz + H ₂ O Chl: zero, Bt: max abundance, Ms: begins to decline, Fluid production peaks
One line summary	LP-MP/LT conditions Chl + Ms + Ab + Qz = Bt + Qz + Ab + H ₂ O	Rock type: Bt-bearing Chl-schist Tectonic setting: Moderate burial into the mid-crust/ Strong thermal increase relative to depth/ A high geothermal gradient (~30–35 °C/km)/ Regional metamorphism during crustal thickening

۴- نتیجه‌گیری

میکاشیستهای منطقه زیوه در جنوب ارومیه بعنوان یک واحد تکتونیکی در حاشیه فعال قاره درون آمیزه رنگین مرتبط با لکه افیولیتی سیلوانا برونزد دارند. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد از نقطه نظر عمق - دما این واحد در سطوح پوسته میانی معادل ۱۲ کیلومتر تدفین شده و با شیب زمین‌گرایی فزاینده دچار دگرگونی شده‌است. چنین شرایطی بیانگر وجود منشورهای افزایشی در محدوده واحد آمیزه رنگین است که همزمان با جایگیری افیولیت در سطح و با ضخیم‌شدگی پوسته‌ای تکوین یافته‌اند. این واحد در شرایط دگرگونی فشار بالای زون فرورانشی تکامل نیافته است و از نوع ناحیه‌ای باروین می‌باشد. اوج شرایط دگرگونی در این واحد ۴۴۰ تا ۴۷۰ درجه سانتیگراد دما و ۳/۲ تا ۳/۶ کیلو بار فشار تخمین زده شده است.

۵- مراجع

- مجرد، م.، ۱۴۰۰. مطالعه زادگاه و دگرگونی درجه پایین میکاشیست‌های حاشیه قاره‌ای مرتبط با آمیزه رنگین گسیان ارومیه. پژوهش‌های دانش زمین، سال ۱۲، شماره ۴۸، صفحات ۱-۱۹.
- Şengör, A. M. C, and Okurogullari, A. H., 1991. The role of accretionary wedges in the growth of continents: Asiatic examples from Argand to plate tectonics: *Eclogae Geologicae Helvetiae* v. 84, p. 535–597.
- Tarback, E. J., and Lutgens, F. K., 1994. *Earth science*, 7th ed.: New York, NY, Macmillan College Publishing Company, 659 p.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals: *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.
- Xiang, H., and Connolly, J. A. D., 2021. GeoPS: An interactive visual computing tool for thermodynamic modelling of phase equilibria. *Journal of Metamorphic Geology* 1–13. <https://doi.org/10.1111/jmg.12626>
- Zheng Y.F., Zhou J.B., Wu Y.B. and Xie Z., 2005. Low-Grade Metamorphic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt: A Passive-Margin Accretionary Wedge Deformed during Continent Subduction. *International Geology Review* v. 47, p. 851–871.

بررسی پتانسیل گوهرسنگ‌های خراسان رضوی با تأکید بر فیروزه نیشابور و نقش آن در اقتصاد گردشگری

زهرا مختاری^۱، علیرضا علی‌زاده مقدم^{۲*}، مهدیه رافعی^۳، مصطفی ستوده^۴

۱. استادیار گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده فناوری های نوین بین رشته ای، دانشگاه نیشابور
۲، ۳، ۴. دانشجوی کارشناسی ارشد گوهرشناسی کاربردی و کانی‌های صنعتی، گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده فناوری‌های نوین بین رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

*a.alizadeh@neyshabur.ac.ir

چکیده

استان خراسان رضوی با واقع شدن در زون بینالود (بین ایران مرکزی و کپه‌داغ)، یکی از مناطق مهم معدنی کشور به‌ویژه در حوزه گوهرسنگ‌ها محسوب می‌شود. این مقاله با هدف تحلیل پتانسیل‌های گوهرسنگ‌های استان با تمرکز بر فیروزه نیشابور به عنوان یکی از شاخص‌ترین ذخایر گوهرسنگ ایران با شهرت جهانی و با تکیه بر داده‌های نقشه راه علوم زمین و معدن استان (۱۳۹۴) و گزارش‌های سازمان زمین‌شناسی و مطالعات Gems & Gemology به بررسی سه محور می‌پردازد: (۱) پراکندگی ذخایر اصلی، (۲) وضعیت صنعت تراش و زنجیره ارزش، و (۳) امکان‌سنجی پیوند این بخش با گردشگری مذهبی. نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم پتانسیل زمین‌شناسی برجسته، موانع اصلی شامل استخراج سنتی، فرآوری ناکافی و فقدان برندینگ و بازاریابی، مانع تحقق ارزش افزوده کامل می‌شود. در پایان، راهکارهای عملیاتی نظیر توسعه اکتشاف هدفمند، ارتقای صنعت فرآوری، ثبت GI فیروزه نیشابور و طراحی تورهای گردشگری هوشمند پیشنهاد شده است.

کلیدواژه‌ها: گوهرسنگ، فیروزه نیشابور، بازاریابی، گردشگری، خراسان رضوی.

Analysis of the Potential of Gemstones in Razavi Khorasan Province, with a Focus on Neyshabur Turquoise and Its Implications for the Tourism Economy

Zahra Mokhtari¹; Alireza Alizadeh Moghaddam^{2*}; Mahdiah Rafei³; Mostafa Sotoudeh⁴

¹ Assistant Professor, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabur.

^{2, 3, 4} M.Sc. student in Applied Gemology and Industrial Minerals, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabur.

a.alizadeh@neyshabur.ac.ir

Abstract

Razavi Khorasan Province, situated within the Binaloud structural zone between Central Iran and the Kopeh-Dagh orogenic belt, constitutes one of Iran's principal gemstone-bearing provinces. This study aims to evaluate the gemstone potential of the province, with particular emphasis on the Neyshabur turquoise deposit, a globally renowned gemstone resource with a long history of exploitation and cultural significance. The analysis is based on data from the provincial Earth Sciences and Mining Roadmap (2015), reports of the Geological Survey of Iran, and peer-reviewed studies published in Gems & Gemology. The research addresses three main aspects: (1) the spatial distribution of major gemstone occurrences, (2) the current status of gemstone cutting, processing, and value-chain development, and (3) the feasibility of integrating gemstone resources with religious tourism. The results indicate that, despite the favorable geological potential, the main obstacles—including traditional mining methods, inadequate processing, and the lack of branding and marketing—hinder the full realization of value added. Finally, practical solutions such as the development of targeted exploration, upgrading the processing industry, registration of a Geographical Indication (GI) for Neyshabur turquoise, and the design of smart tourism tours are proposed.

Keywords: Gemstone, Neyshabur Turquoise, Marketing, Tourism, Razavi Khorasan.

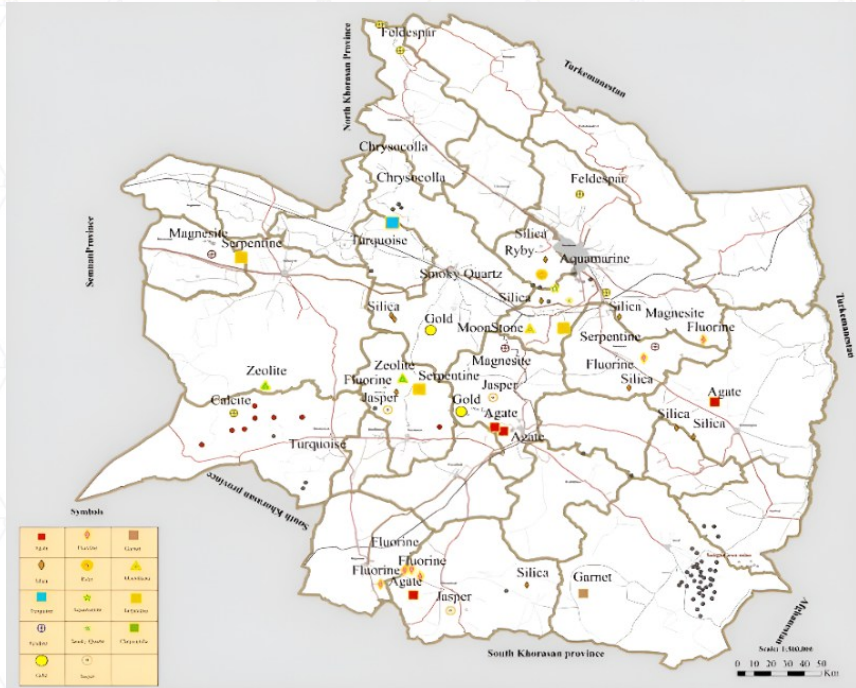
۱- مقدمه

گوهرسنگ‌ها به دلیل ارزش افزوده بالا و پتانسیل اشتغال‌زایی، جایگاهی ویژه در اقتصاد معدنی دارند. گوهرسنگ‌ها به عنوان میراث طبیعی زمین‌شناختی، نه تنها نمادی از فرآیندهای پترولوژیکی و متامورفیک عمیق پسته زمین هستند، بلکه پتانسیل عظیمی برای توسعه اقتصادی پایدار فراهم می‌آورند. ایران با تنوع زمین‌شناسی گسترده، از ذخایر قابل توجهی برخوردار است. (Ghorbani, 2013) استان خراسان رضوی نیز با دارا بودن ذخایر غنی فیروزه نیشابور - یکی از مشهورترین معادن جهان با قدمت بیش از ۷۰۰۰ سال (خادمی و مومنی، ۱۳۹۱) - و سایر گوهرسنگ‌هایی چون عقیق، یشم و لاجورد، می‌تواند سهم مهمی در این بخش ایفا کند. با این حال، علی‌رغم پتانسیل‌های اکتشافی و اقتصادی، بهره‌برداری ناکافی از این منابع و عدم پیوند مؤثر با صنایع گردشگری، فرصت‌های درآمدزایی را محدود کرده است. بهره‌برداری کامل از این پتانسیل نیازمند نگاهی یکپارچه است که سه رکن اصلی زمین‌شناسی و اکتشاف، صنعت فرآوری و بازار و گردشگری را به هم پیوند دهد. این پژوهش با تحلیل داده‌های اسناد رسمی و مشاهدات ساختاریافته، در پی ترسیم نقشه راهی عملی برای توسعه این بخش است.

۲- مبانی زمین‌شناسی و پراکندگی ذخایر در استان خراسان رضوی

استان خراسان رضوی در زون بینالود واقع شده که به عنوان کمربند کوه‌زایی داخلی، بین زون ایران مرکزی (جنوب) و زون کپه‌داغ (شمال) قرار دارد (Alavi, M. 1991). این استان به دلیل موقعیت زمین‌شناسی خاص در شمال شرق ایران، دارای تنوع چشمگیر واحدهای سنگی و فرآیندهای زمین‌ساختی است که زمینه تشکیل و تجمع گونه‌های مختلف گوهرسنگ‌های طبیعی را فراهم آورده است. بر اساس گزارش‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (سازمان زمین‌شناسی، ۱۳۹۴) و مطالعات میدانی، نشان می‌دهد که این استان میزبان ذخایر قابل توجهی از گوهرسنگ‌هایی مانند فیروزه، عقیق (agate)، آمیتست، کوارتز شفاف، رز کوارتز، اپال، فلوریت، گارنت (گروه گارنت)، اپیدوت و غیره است که اکثراً منشأ آن‌ها به فرآیندهای ماگمایی-هیدروترمال و ثانویه برمی‌گردد (شکل ۱). این مطالعه‌ها نشان می‌دهند که بیشتر این گوهرسنگ‌ها در واحدهای آتشفشانی و ولکانیک-رسوبی ناحیه رخنمون یافته‌اند و تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر پراکندگی آن‌ها قابل توجه است. به‌ویژه در پهنه‌هایی که فعالیت‌های تکتونیکی و هیدروترمال قوی داشته‌اند (سازمان زمین‌شناسی، ۱۳۹۴).

فیروزه نیشابور شناخته‌شده‌ترین ذخیره گوهرسنگ استان با شهرت جهانی است. این گوهر با ترکیب شیمیایی $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ و رنگ آبی-سبز (Foord & Taggart, 1998) منحصربه‌فرد ناشی از حضور مس و آهن، نتیجه فعالیت‌های هیدروترمال در واحدهای ولکانیکی ائوسن است. رنگ فیروزه به‌طور مستقیم با ترکیب شیمیایی و جانشینی‌های یونی در ساختار بلوری آن مرتبط است. رنگ آبی فیروزه ناشی از حضور یون مس دوظرفیتی (Cu^{2+}) در شبکه بلوری کانی است که عامل اصلی جذب انتخابی نور و ایجاد طیف آبی می‌باشد. اگرچه آهن جزو ترکیب شیمیایی ایده‌آل فیروزه نیست، اما در نمونه‌های طبیعی ممکن است مقدار اندکی Fe^{3+} به‌صورت جانشینی ایزومورفیک به جای Al^{3+} وارد ساختار شود. این جانشینی محدود، که اغلب در شرایط اکسیدان و طی فرآیندهای دگرسانی ثانویه رخ می‌دهد، موجب تغییر رنگ از آبی خالص به سبز یا سبز مایل به آبی می‌گردد. بنابراین، نسبت Cu به ناخالصی‌های آهن و شرایط ژئوشیمیایی محیط تشکیل، کنترل‌کننده اصلی تنوع رنگی فیروزه محسوب می‌شود (Shirdam et al., 2021).



شکل ۱- نقشه پراکندگی سنگ های قیمتی در خراسان رضوی (Ahmadirouhani et al., 2019)

عقیق های خراسان رضوی، به عنوان یکی از مهم ترین گوهرسنگ های نیمه قیمتی استان، عمدتاً در مناطق کوهستانی جنوب و شرق مانند درگز، تربت حیدریه و کلات و نیشابور پراکنده اند و در واحدهای رسوبی-ولکانو کلاستیک کرتاسه تا پالئوسن تشکیل شده اند. این گوهرسنگ ها اغلب به صورت رگه ای در بازالها و توف های ائوسن ظاهر می شوند و انواع نواری، ستاره ای و آتشین با رنگ های جذاب قرمز، قهوه ای، سفید و زرد - ناشی از حضور اکسیدهای آهن و منگنز - از ویژگی های بارز آن هاست (رضایپور و همکاران، ۱۳۹۷). از معروف ترین منبع عقیق های خراسان می توان به عقیق بایگ در شمال غرب استان اشاره کرد که در حفره های توف های آتشفشانی ترشیری تشکیل شده است.

کانی های پگماتیتی نیز در ارتباط با توده های گرانیتی نفوذی (مانند منطقه تربت حیدریه)، حضور تورمالین و انواع کوارتز رنگین با کیفیت کلکسیونی و تزئینی گزارش شده است. بریل نیز به صورت پراکنده و عمدتاً با کیفیت صنعتی یا نمونه های کلکسیونی یافت می شود (Mahmoudi et al., 2018).

۳- تحلیل اقتصادی و صنعت فرآوری

شهر مشهد به دلیل سابقه تاریخی، زیرساخت های تجاری و حضور صنعتگران ماهر، به یکی از قطب های مهم تراش و فرآوری سنتی سنگ های تزئینی در ایران تبدیل شده است [مشاهدات میدانی نویسندگان، ۱۴۰۴]. حجم قابل توجهی از سنگ های خام استخراجی از سراسر استان و حتی دیگر مناطق کشور، در کارگاه های سنتی این شهر فرآوری اولیه می شوند. حضور بیش از ۸۵ درصد واحد های تراش سنگ های قیمتی و نیمه قیمتی در مشهد و اشتغال بیش از ۷۰ درصد تولیدکنندگان طلا و جواهر (اتحادیه طلا و جواهر مشهد، ۱۴۰۳)، این شهر را به بزرگترین مرکز داد و ستد گوهرسنگ ها تبدیل کرده است. معدن فیروزه نیشابور نیز با تولید سالیانه ۵۰ الی ۶۰ تن سنگ خام فیروزه و نزدیک به ۲۰۰ نفر پرسنل شاغل (شرکت معدنی فیروزه نیشابور، ۱۴۰۲) یکی از موفق ترین معادن کشور در زمینه کارآفرینی بوده و با ایجاد هزاران نفر اشتغال غیرمستقیم نیز یکی از بزرگترین صنایع استان را بوجود آورده است. با این حال، علی رغم قوت نسبی در مرحله میانی فرآوری، شکاف های ساختاری مانع تحقق ارزش افزوده کامل صنعت گوهرسنگ در استان می شوند که عبارتند از:

۱. شکاف بالادست: استخراج سنتی و غیرمکانیزه (به جز معدن فیروزه نیشابور) منجر به اتلاف ماده معدنی، کاهش بازیابی و تخریب ذخیره می‌گردد.

۲. شکاف پایین‌دست: محصول نهایی عمدتاً به صورت سنگ تراش‌خورده خام یا مصنوعات ساده عرضه می‌شود. فقدان برند معتبر، ضعف در طراحی مدرن جواهرات و نبود شبکه بازاریابی حرفه‌ای باعث می‌شود ارزش افزوده اصلی در این مرحله محقق نشود و سود نهایی عمدتاً نصیب واسطه‌ها و بازرگانان خارج از استان گردد.

۴- پیوند صنعت گوهرسنگ با گردشگری مذهبی و تحلیل فرصت‌ها

مشهد، به عنوان پایتخت معنوی ایران، میزبان بیش از ۳۰ میلیون زائر و گردشگر (آمار رسمی اوقاف خراسان رضوی، ۱۴۰۴) در سال است. این جریان عظیم انسانی یک بازار طبیعی با ظرفیت قابل توجه برای محصولات گوهرسنگ با ارزش افزوده بالا فراهم می‌آورد. این ظرفیت منحصربه‌فرد، فرصتی طلایی برای پیوند صنعت گوهرسنگ خراسان رضوی (به ویژه فیروزه نیشابور) با گردشگری مذهبی است که می‌تواند درآمدزایی پایدار و اشتغال‌زایی محلی را محقق سازد. پیوند این بازار با صنعت گوهرسنگ می‌تواند از مسیرهای کلیدی زیر ممکن باشد:

۱. سوغات با هویت محلی و فرهنگی: طراحی و تولید زیورآلات و صنایع دستی اصیل با استفاده از فیروزه نیشابور و سایر سنگ‌های بومی، به عنوان سوغاتی اصیل و متمایز.

۲. ایجاد مراکز نمایش و آموزش و تجربه‌محور: تأسیس گالری-موزه‌های سنگ و گوهر در مجاورت قطب‌های گردشگری به خصوص در شهر نیشابور، با هدف معرفی میراث زمین‌شناختی و معدنکاری منطقه از جمله نمایش فرآیند تراش زنده، تاریخچه ۷۰۰۰ ساله معدن نیشابور و کارگاه‌های آموزشی کوتاه‌مدت. این مراکز، آگاهی عمومی را افزایش داده و فروش مستقیم را ترویج می‌کنند.

۳. تورهای تخصصی زمین‌گردشگری (ژئوتوریسم): پس از مطالعات ایمنی، زیست‌محیطی و امکان‌سنجی، طراحی تورهای یک‌روزه "از حرم تا معدن فیروزه" (نیشابور- مشهد، ۲ ساعته) برای گردشگران علاقه‌مند به زمین‌شناسی و میراث معدنی می‌تواند بسیار جذاب باشد.

۵- تحلیل SWOT صنعت گوهرسنگ نیشابور (با پیوند گردشگری)

برای ارزیابی جامع موقعیت صنعت گوهرسنگ نیشابور در زنجیره ارزش گردشگری، از مدل تحلیلی SWOT استفاده شده است. این مدل، نقاط قوت ذاتی (مانند شهرت جهانی فیروزه)، ضعف‌های ساختاری (استخراج سنتی)، فرصت‌های بازار (۳۰ میلیون زائر مشهد) و تهدیدهای رقابتی را شناسایی کرده و مبنای راهکارهای عملی قرار می‌دهد. با توجه به پتانسیل‌های معدنی منحصربه‌فرد نیشابور و نزدیکی به بازار ۳۰ میلیونی زائران مشهد، تحلیل SWOT زیر (جدول ۱) جهت تدوین استراتژی‌های توسعه پایدار ارائه می‌شود:

جدول ۱- تحلیل SWOT در راستای تدوین استراتژی‌های توسعه پایدار صنعت فیروزه و گردشگری

نقاط قوت (Strengths)	نقاط ضعف (Weaknesses)	فرصت‌ها (Opportunities)	تهدیدها (Threats)
-معدن فیروزه نیشابور با ذخیره قابل توجه و شهرت ۷۰۰۰ ساله جهانی -کیفیت منحصربه‌فرد (رنگ آبی-سبز) -نزدیکی به ۳۰ میلیون زائر مشهد (۲ ساعت فاصله)	-استخراج سنتی با اتلاف ۳۰-۵۰٪ ماده معدنی (World Bank, 2020) -فرآوری محدود محلی بدون نوآوری خاص -فقدان برند "فیروزه نیشابور اصل"	-سوغات حرم با فیروزه (۳-۵ برابر فروش) - تورهای ژئوتوریسم "حرم تا معدن" -صادرات به چین/ترکیه با گواهی traceability	-رقابت فیروزه مصر/آمریکا -تخریب محیطی معدن -واسطه‌گری مشهد/خارج استان

۵-۱- راهکارهای پیشنهادی زنجیره ارزش گوهرسنگ در نیشابور و استان خراسان

با استخراج راهکارها از تحلیل SWOT، استراتژی‌های عملی زیر برای تکمیل زنجیره ارزش گوهرسنگ در نیشابور و استان خراسان پیشنهاد می‌شود:

۱. بالادست (استخراج): مکانیزاسیون معادن فیروزه با دریل‌های هوایی و مدل GIS به اضافه طراحی تورهای بازدید ایمن برای زائران و گردشگران (پس از مطالعات ایمنی و زیست‌محیطی).
 ۲. میانی (فرآوری): ایجاد خوشه صنعتی تراش نیشابور با فناوریهای پیشرفته به همراه نمایش زنده تراش در گالری‌های مستقر در محل معدن و سایت‌های گردشگری ویژه نیشابور و مشهد.
 ۳. پایین‌دست (بازاریابی): برندینگ "فیروزه نیشابور اصل" با گواهی معتبر از مراکز علمی از جمله دانشگاه نیشابور به اضافه سوغات‌فروشی تخصصی در حرم مطهر رضوی، فرودگاه مشهد و سایت‌های گردشگری اصلی نیشابور.
- نتیجه مورد انتظار: افزایش چشمگیر ارزش افزوده ۳ الی ۵ برابر و ایجاد حدود ۱۰۰۰-۱۵۰۰ شغل مستقیم در نیشابور + گردش مالی چند صد میلیارد تومانی سالانه از ژئوتوریسم

۶- نتیجه‌گیری

پتانسیل‌های گوهرسنگ خراسان رضوی عمدتاً حول محور فیروزه نیشابور و عقیق‌های این استان متمرکز است. مزیت نسبی این صنعت در وجود صنعتگران سنتی ماهر در مشهد و نیشابور است، اما برای تبدیل این مزیت به ثروت پایدار، نیاز به عبور از رویکرد سنتی و حرکت به سمت مدیریت زنجیره ارزش یکپارچه است. پژوهش حاضر با تحلیل جامع پتانسیل‌های گوهرسنگ‌های خراسان رضوی - به ویژه فیروزه نیشابور با شهرت جهانی - نشان داد که این استان پتانسیل قابل توجه از گوهرسنگ‌های مهم را دارد اما علی‌رغم قوت‌های ذاتی مانند کیفیت منحصر به فرد و نزدیکی به بازار ۳۰ میلیونی زائران مشهد، چالش‌های استخراج سنتی و فرآوری ناکافی، مانع تحقق ارزش افزوده کامل می‌شود. تحلیل SWOT و مدل زنجیره ارزش پیشنهادی، راهکارهایی عملی برای مکانیزاسیون بالادست، خوشه تراش میانی و برندینگ پایین‌دست ارائه داد که با پیوند به گردشگری مذهبی و ژئوتوریسم، افزایش ۳-۵ برابری ارزش افزوده و ایجاد حدود ۱۰۰۰-۱۵۰۰ شغل محلی را پیش‌بینی می‌نماید. (طرح توسعه صنعت گوهرسنگ، ۱۴۰۳)

این صنعت در اقتصاد استان در ۳ بخش و به ترتیب شامل موارد زیر است: ۱- اکتشاف و استخراج: اجرای برنامه‌های اکتشاف سیستماتیک نوین با روش‌های ژئوفیزیک و ژئوشیمی برای فیروزه و عقیق و دیگر گوهرسنگ‌های محتمل، ساماندهی و مکانیزه کردن استخراج معادن کوچک‌مقیاس جهت افزایش بازیابی و کاهش ضایعات. ۲- فرآوری و ارزش افزوده: حمایت از ارتقاء فناوری کارگاه‌های تراش، ثبت نشان جغرافیایی (GI) برای فیروزه نیشابور جهت حفاظت اصالت و برند ملی، راه‌اندازی مراکز طراحی و آموزش تلفیقی جواهرسازی مدرن و سنتی. ۳- بازار و گردشگری: مطالعه امکان‌سنجی "مسیر بازدید کنترل‌شده معدن فیروزه نیشابور" با استانداردهای ایمنی، توسعه شبکه‌های توزیع تخصصی در نقاط گردشگری مشهد و نیشابور برای فروش مستقیم. اجرای گام‌به‌گام این پیشنهادات، صنعت گوهرسنگ را از خام‌فروشی به موتور محرک اقتصاد غیرنفتی، اشتغال‌زایی و هویت فرهنگی-طبیعی استان تبدیل می‌نماید.

۷- مراجع

- ۶- اتحادیه طلا و جواهر مشهد، ۱۴۰۳. گزارش عملکرد صنف طلا و جواهر استان خراسان رضوی، مشهد.
- ۷- خادمی، ف.، مومنی، ا.، ۱۳۹۱. شواهد باستان‌شناسی معدن‌کاری فیروزه در نیشابور: یک مرور تاریخی. مطالعات باستان‌شناسی، جلد ۸، شماره ۱، صفحات ۴۵-۶۰.
- ۸- رضاپور، م.، فلاح، ع.، کریمی، پ.، ۱۳۹۷. بررسی زمین‌شناسی و ژئو ذخایر عقیق در ناحیه بایگ، شمال غرب خراسان رضوی. نشریه بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، جلد ۲۶، شماره ۴، صفحات ۹۰۲-۸۹۱.
- ۹- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۴. نقشه راه علوم زمین و معدن استان خراسان رضوی، تهران.

- ۱۰- سازمان اوقاف و امور خیریه خراسان رضوی، ۱۴۰۴. آمار سالانه زائران حرم مطهر امام رضا (ع)، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
- ۱۱- شرکت معدنی فیروزه نیشابور، ۱۴۰۲. گزارش سالانه تولید و اشتغال معدن فیروزه نیشابور، نیشابور.
- ۱۲- طرح توسعه صنعت گوهرسنگ خراسان رضوی، ۱۴۰۳. گزارش اقتصادی-اجتماعی توسعه صنعت گوهرسنگ، استانداری خراسان رضوی، مشهد.
- ۱۳- مشاهدات میدانی نویسندهگان، ۱۴۰۴. داده‌ها و یادداشت‌های برداشت میدانی از معادن گوهرسنگ استان خراسان رضوی.
- 14- Ahmadirouhani, R., Karimpour, M. H., Ghasemi, H., 2019. Geological and mineralogical characteristics of turquoise deposits in northeastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 176, 130–145.
- 15- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Zagros fold-thrust belt. *American Journal of Science*, 291, 1–47.
- 16- Estiri, H., Moghadam, A. A., Rafei, M., 2016. Spectroscopic and chemical determinants of color in Neyshabur turquoise. *Journal of Gemmology*, 35, 154–167.
- 17- Foord, E. E., Taggart, J. E., 1998. A reexamination of the turquoise group: the mineral aheylite, planerite (redefined), turquoise and coeruleolactite. *Mineralogical Magazine*, 62, 93–111.
- 18- Ghorbani, M., 2013. *The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources*. Springer, Dordrecht.
- 19- Mahmoudi, S., Ghasemi, H., Karimpour, M. H., 2018. Gemstone potential of Khorasan Razavi Province: focus on agate and turquoise. *Journal of Gemmology*, 37, 340–355.
- 20- World Bank, 2020. *Sustainable mining practices in artisanal and small-scale mining*. World Bank Publications, Washington, DC.

تشخیص فیلهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه: مروری بر مطالعات اخیر و پیشنهاد چارچوب

بهینه‌ی ارزیابی

زهرا مختاری^۱، مهدیه رافعی^{۲*}، علیرضا علیزاده مقدم^۳، مصطفی ستوده^۴

^۱ استادیار گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

Zahra.mokhtari@neyshabur.ac.ir

^۲ و ^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد گوهرشناسی کاربردی و کانی‌های صنعتی، گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده

فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

چکیده

فیروزه، یکی از گوهرسنگ‌های ارزشمند و متخلخل، به‌طور طبیعی دارای ریزترک‌ها، خلل و فرج و ناپایداری رنگ است که دوام، سختی و کیفیت ظاهری آن را محدود می‌کند. به همین دلیل، بهسازی با استفاده از فیلهای شامل مواد طبیعی، رزین‌های پلیمری، پلیمرهای نفوذی و ترکیبات پیشرفته، به منظور افزایش استحکام، بهبود رنگ و جلای فیروزه، و افزایش مقاومت آن در برابر عوامل محیطی، به‌طور گسترده به کار گرفته می‌شود. شناخت و شناسایی نوع فیلهای برای تشخیص اصالت، تعیین ارزش، گزارش‌دهی آزمایشگاهی، انتخاب روش نگهداری و جلوگیری از تقلب ضروری است. در این مطالعه، انواع فیلهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه و روش‌های شناسایی آن‌ها مرور شد. بررسی‌ها نشان داد که روش‌های کلاسیک مانند میکروسکوپ نوری، UV و اندازه‌گیری وزن مخصوص، صرفاً نشانه‌های اولیه ارائه می‌دهند و برای تعیین نوع فیلر ناکافی هستند. از سوی دیگر، روش‌های طیف‌سنجی پیشرفته شامل FTIR، رامان، UV-Vi، فلورسانس و XR، امکان شناسایی دقیق و تفکیک انواع فیلهای آلی و معدنی را فراهم می‌کنند. تحلیل محدودیت‌های روش‌ها و چالش‌های ناشی از حضور متشابهات فیروزه و فیلهای پیشرفته، ضرورت یک چارچوب چندمرحله‌ای و یکپارچه را نشان داد. چارچوب پیشنهادی شامل: غربالگری اولیه، تشخیص ساختاری و شیمیایی، آزمون‌های تکمیلی و تفسیر یکپارچه داده‌ها است و با تلفیق روش‌های کلاسیک و پیشرفته، دقت تشخیص، استانداردسازی فرآیندها و شفافیت گزارش‌دهی در آزمایشگاه‌ها و بازار گوهرسنگ‌ها را افزایش می‌دهد. این رویکرد امکان ارزیابی علمی و کاربردی فیروزه‌های بهسازی‌شده و ارتقای اعتماد در بازار جهانی گوهرسنگ‌ها را فراهم می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: بهسازی، طیف‌سنجی FTIR، فیلر، گوهرسنگ فیروزه

Identification of Fillers Used in Turquoise Treatment: A Review of Recent Studies and Proposed Optimal Evaluation Framework

Zahra Mokhtari¹; Mahdiah Rafeie^{2*}; Alireza Alizadeh Moghaddam³; Mostafa Sotoudeh⁴

¹. Assistant Professor, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabour, Neyshabour, Iran

Zahra.mokhtari@neyshabur.ac.ir

^{2,3,4}. Master's student in Applied Gemology and Industrial Minerals, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabour, Neyshabour, Iran.

Abstract

Turquoise is a valuable and porous gemstone, naturally exhibits microfractures, porosity, and color instability, which limit its durability, hardness, and overall aesthetic quality. Therefore, treatment using fillers—including natural materials, polymeric resins, penetrating polymers, and advanced compounds—has been widely applied to enhance strength, color, luster, and environmental resistance. Accurate identification of these fillers is essential for authenticity verification, valuation, laboratory reporting, conservation strategies, and fraud prevention. This study reviews the types of fillers commonly used in turquoise treatment and their detection methods. The findings indicate that conventional techniques, such as optical microscopy, UV inspection, and specific gravity

measurements, provide only preliminary indications and are insufficient for precise filler characterization. In contrast, advanced spectroscopic methods, including FTIR, Raman, UV-Vis, fluorescence, and X-ray analysis, enable accurate identification and differentiation of both organic and inorganic fillers. Furthermore, the analysis of methodological limitations and challenges posed by turquoise simulants and advanced fillers underscores the need for a multi-step, integrated framework. The proposed workflow—comprising initial screening, structural and chemical identification, confirmatory tests, and integrated data interpretation—enhances diagnostic accuracy, standardizes laboratory procedures, and improves reporting transparency. This approach facilitates scientific and practical evaluation of treated turquoise and strengthens confidence in the global gemstone market.

Keywords: Treatment, FTIR spectroscopy, filler, turquoise gemstone

۱- مقدمه

فیروزه یک کانی ثانویه کمیاب از گروه فسفات‌ها است که به صورت یک ترکیب پیچیده ی هیدروفسفات مس و آلومینیوم تشکیل می‌شود و فرمول شیمیایی ایده‌آل آن به صورت $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ بیان می‌گردد. این گوهرسنگ به دلیل رنگ منحصر به فرد، پیشینه فرهنگی و جایگاه ویژه در تاریخ هنر و گوهرشناسی، همواره مورد توجه بوده است. به باور بسیاری از گوهرشناسان و بر اساس گزارش‌های منتشر شده از سوی مؤسسه گوهرشناسی آمریکا (GIA)، مرغوب‌ترین و شناخته‌شده‌ترین نوع فیروزه جهان متعلق به ایران و به ویژه معدن فیروزه نیشابور است که از نظر کیفیت رنگ، یکنواختی و شهرت تاریخی جایگاهی ممتاز دارد. فیروزه از نظر ساختاری یک گوهر متخلخل محسوب می‌شود و به طور طبیعی دارای ریزترک‌ها، حفره‌های میکروسکوپی و ناپایداری رنگ در برابر چربی، نور و عوامل محیطی است (Han et al., 2015 & Frontiere, 2023). این ویژگی‌ها سبب کاهش دوام مکانیکی و افت کیفیت ظاهری فیروزه خام می‌شوند. از این رو، در دهه‌های اخیر روش‌های مختلف بهسازی، پایدارسازی و پر کردن تخلخل‌ها با استفاده از فیلرهای طبیعی و به ویژه مواد پلیمری به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف از این فرآیندها افزایش استحکام، بهبود رنگ، کاهش تخلخل و در نهایت ارتقای قابلیت مصرف تجاری فیروزه است. شناخت نوع فیلر به کاررفته در بهسازی فیروزه از جنبه‌های مختلف اهمیت اساسی دارد؛ از جمله تشخیص اصالت گوهر، تعیین ارزش و قیمت‌گذاری، گزارش‌دهی دقیق آزمایشگاهی، ارزیابی دوام و پایداری، شناسایی روش‌های تقلب و جعل، انتخاب شیوه مناسب تمیزکاری و نگهداری، و همچنین کاربردهای آموزشی و پژوهشی در گوهرشناسی که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. اگرچه روش‌های کلاسیک مانند میکروسکوپ نوری، تابش فرابنفش (UV) و اندازه‌گیری وزن مخصوص می‌توانند سرنخ‌های اولیه‌ای در این زمینه ارائه دهند، اما این روش‌ها اغلب توان تفکیک دقیق نوع فیلر را ندارند (McClure & Smith, 2000). در مقابل، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) به دلیل توانایی بالا در شناسایی و تفکیک گروه‌های عاملی آلی، یکی از قابل اعتمادترین روش‌ها برای تشخیص فیلرها و مواد پلیمری در فیروزه محسوب می‌شود و در بسیاری از موارد، تنها ابزار مؤثر برای شناسایی بهسازی است (Lind et al., 1983). با این حال، تشخیص بهسازی در فیروزه در بسیاری موارد چالش‌برانگیز است و حتی گوهرشناسان آموزش‌دیده یا برخی آزمایشگاه‌های معتبر نیز همواره قادر به شناسایی آن نیستند. این موضوع باعث شکل‌گیری بحث‌هایی در خصوص ارزش‌گذاری و ضرورت بهسازی‌هایی شده است که پایدار و تقریباً غیرقابل تشخیص هستند. با این وجود، چنانچه هدف از بهسازی ارتقای کیفیت مواد کم‌ارزش و افزایش قابلیت استفاده آن‌ها باشد و اطلاعات مربوط به نوع بهسازی به طور شفاف در اختیار مصرف‌کننده قرار گیرد، این فرایند در چارچوب اصول علمی و اخلاقی صنعت گوهرسنگ قابل پذیرش خواهد بود. در مجموع، بهسازی بخشی اجتناب‌ناپذیر از چرخه تولید گوهرسنگ‌ها به شمار می‌رود و امکان بهره‌برداری مؤثرتر از منابع طبیعی محدود را فراهم می‌سازد (Read, 2005). از این رو، با توجه به گسترش روزافزون روش‌های بهسازی فیروزه و افزایش استفاده از فیلرهای متنوع و گاه پیچیده، ضرورت یک مرور نظام‌مند بر مطالعات اخیر و ارائه چارچوبی بهینه و کاربردی برای تشخیص و ارزیابی این فیلرها، انگیزه اصلی انجام این پژوهش را تشکیل می‌دهد.

۲- روش تحقیق

روش تحقیق این مطالعه مبتنی بر پژوهش کتابخانه‌ای و مروری است و بر گردآوری و تحلیل داده‌ها از منابع معتبر علمی استوار می‌باشد. بدین منظور، در گام نخست، منابع معتبر علمی شامل کتاب‌های تخصصی گوهرشناسی، مقالات منتشر شده در مجلات معتبر داخلی و

بین‌المللی، پایان‌نامه‌های دانشجویی و استانداردهای مرتبط با بهسازی گوه‌سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز اصلی بر مطالعاتی بود که به روش‌های بهسازی فیروزه، انواع فیلرهای مورد استفاده و شیوه‌های تشخیص آن‌ها پرداخته‌اند. در ادامه، به منظور دسترسی به جدیدترین یافته‌ها و تکمیل داده‌ها، از پایگاه‌های اطلاعاتی علمی، وبسایت‌های معتبر پژوهشی و گزارش‌های آزمایشگاهی منتشر شده استفاده شد. داده‌های گردآوری شده با رویکرد تحلیل محتوایی تطبیقی بررسی و مقایسه گردیدند تا نقاط قوت، محدودیت‌ها و خلأهای موجود در روش‌های تشخیص فیلرها مشخص شود. همچنین، از ابزارهای نوین پردازش داده و سامانه‌های هوش مصنوعی صرفاً به‌عنوان ابزار کمکی برای دسته‌بندی، خلاصه‌سازی و یکپارچه‌سازی اطلاعات استخراج شده از منابع علمی استفاده گردید. تمامی تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌ها بر پایه قضاوت علمی نویسندگان و منابع معتبر انجام شده است. در نهایت، نتایج این تحلیل‌ها، مبنای ارائه یک چارچوب بهینه برای ارزیابی و تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه قرار گرفت.

۳- موقعیت و جایگاه فیروزه در ایران و جهان

فیروزه (Turquoise) کانی‌ای از گروه فسفات‌های آلومینیوم-مس است که به‌صورت ثانویه و در نتیجه‌ی تجزیه و تخریب سنگهای دارای سیلیکات و فسفات آلومینیوم واجد سولفور مس در طبیعت به وجود می‌آید. از میان تمامی ذخایر شناخته شده، فیروزه ایران به‌ویژه معدن تاریخی نیشابور برجسته‌ترین جایگاه را داراست. این معدن با قدمتی بیش از هفت هزار سال، بافت متراکم، سختی بالا، رنگ آبی یکنواخت و پایداری شیمیایی فیروزه را فراهم می‌کند؛ ویژگی‌هایی که فیروزه ایران را با عنوان Persian Turquoise به استاندارد جهانی کیفیت تبدیل کرده است (Shirdam et al., 2021). حضور رگه‌ها، ماتریکس کم، و رنگ از آبی آسمانی تا آبی لاجوردی، عوامل مؤثر در ارزش‌گذاری این سنگ در بازار جهانی هستند. در مقیاس جهانی، ذخایر مهم فیروزه در کشورهایی نظیر ایالات متحده آمریکا (آریزونا، نیومکزیکو، نوادا)، چین (هوبئی)، تبت، مصر (صحرای سینا)، مکزیک، شیلی و تاجیکستان گزارش شده‌اند. هرچند برخی از این ذخایر از نظر میزان تولید قابل توجه‌اند، اما اغلب آن‌ها از نظر کیفیت رنگ، میزان تخلخل، پایداری نوری و قابلیت پولیش، در سطحی پایین‌تر از فیروزه ایران قرار می‌گیرند. به همین دلیل، ایران از گذشته تاکنون نقش تعیین‌کننده‌ای در بازار جهانی داشته و همچنان به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین منابع فیروزه طبیعی مرغوب در جهان شناخته می‌شود. جایگاه برخی از معادن مهم فیروزه در جهان به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. ویژگی‌های زمین‌شناسی و اهمیت تاریخی معادن مهم فیروزه ایران و جهان نیز به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: نقشه شماتیک از موقعیت برخی از معادن فیروزه در سایر کشورهای جهان

MyRings On December 19, 2020

جدول ۱- پراکندگی و ویژگی‌های زمین‌شناسی ذخایر شاخص فیروزه در ایران و جهان

منبع: با استفاده از Sinkankas Schumann (2006) ، O'Donoghue (1997) (2013) و امامی (۱۳۸۸).

شهرت / اهمیت	ویژگی زمین‌شناسی	کشور / منطقه	رده
قدیمی‌ترین و با کیفیت‌ترین فیروزه جهان	زون اکسیداسیون کانسارهای مس در سنگ‌های ولکانیکی	نیشابور (خراسان رضوی)	ایران
تولید طیف سبز تا آبی	واحدهای ولکانیکی - رسوبی غنی از مس	دامغان (سمنان)	ایران
کیفیت متوسط تا خوب برداشت محدود	سنگ‌های آتشفشانی دارای مس محیط خشک با رسوبات مس‌دار	کرمان (شهربابک) یزد	ایران
تنوع رنگ و استخراج پراکنده	زون‌های مس‌دار	آذربایجان شرقی و غربی (ورزقان، تخت سلیمان)	ایران
تولید بالا با کیفیت متغیر	ذخایر سطحی در مناطق خشک	چین (نینگ شیا، هبی)	جهان
اهمیت تاریخی بسیار بالا	کانسارهای باستانی مس	مصر (صحرای سینا)	جهان
رنگ متمایز آبی سیر	واحدهای کوهستانی غنی از مس	تبت	جهان
معادن سنتی با تنوع کیفیت	محیط ولکانیکی - رسوبی	افغانستان	جهان
تولید محدود	زون‌های مس‌دار	مکزیک	جهان

۴- انواع فیله‌های مورد استفاده در بهسازی فیروزه

«فیله» به هر ماده‌ای اطلاق می‌شود که برای پرکردن خلل و فرج، ترک‌ها، ریزحفره‌ها و ناپیوستگی‌های سطحی یا درونی فیروزه به کار می‌رود. استفاده از فیله موجب افزایش استحکام مکانیکی، بهبود رنگ و جلای سطحی، و ارتقای مقاومت فیروزه در برابر عوامل مخرب محیطی نظیر چربی، عرق، مواد شیمیایی و فرآیند خشک‌شدن می‌شود. از آنجا که فیروزه ذاتاً کانی متخلخل است؛ بسیاری از نمونه‌های خام بدون انجام فرآیند پرکردن، شکننده و کم‌دوام باقی می‌مانند؛ به همین دلیل استفاده از فیله یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌های بهسازی فیروزه محسوب می‌شود. در ادامه انواع فیله‌های مورد استفاده در بهسازی فیروزه آورده شده است.

۴-۱- فیله‌های طبیعی

فیله‌های طبیعی از قدیمی‌ترین مواد مورد استفاده در بهسازی فیروزه به شمار می‌روند و معمولاً کم‌اثرترین نوع بهسازی را ایجاد می‌کنند. این گروه شامل موادی نظیر موم‌های طبیعی، روغن‌های گیاهی (مانند روغن گردو) و چربی‌های حیوانی است که عمدتاً با هدف براق کردن سطح و افزایش محدود استحکام مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، این مواد از پایداری کمی برخوردار بوده و در اثر گذشت زمان، افزایش دما یا تماس با مواد شوینده به تدریج از ساختار فیروزه خارج می‌شوند؛ از این‌رو، ارزش افزوده پایداری ایجاد نمی‌کنند.

۴-۲- فیله‌های پلیمری

فیله‌های پلیمری پرکاربردترین گروه در بازار امروزی فیروزه هستند و نقش مهمی در بهسازی‌های مدرن ایفا می‌کنند. از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به رزین‌های اپوکسی (Epoxy Resins) اشاره کرد که به دلیل پایداری بالا، دوام مناسب و افزایش سختی و انسجام ساختاری فیروزه، کاربرد گسترده‌ای دارند. این مواد معمولاً با روش‌هایی مانند طیف‌سنجی UV و FTIR قابل شناسایی هستند (Liu, Wang, &

Zhang, 2021). رزین‌های پلی‌ایمید (Polyimide Resins) به دلیل مقاومت حرارتی بالا عمدتاً در کاربردهای صنعتی شناخته می‌شوند، اما در برخی بهسازی‌های پیشرفته فیروزه نیز گزارش شده‌اند (Zhang, Li, wang & chen, 2023). رزین‌های اکریلیک (Acrylic Resins) با ایجاد جلای سطحی بالا، بیشتر در فیروزه‌های تجاری و ارزان‌قیمت استفاده می‌شوند (Han, Lu, Dai & SU, 2015). همچنین استفاده از پلیمرها و پلاستیک‌های مایع (Liquid Plastics) برای پر کردن ترک‌ها و ریز حفره‌ها با هدف افزایش انسجام و دوام مکانیکی فیروزه گزارش شده است که معمولاً دوام متوسط داشته و از طریق طیف سنجی قابل شناسایی هستند (McClure & Smith, 2000).

۳-۴- فیلرهای شیمیایی تثبیت‌کننده

فیلرهای شیمیایی تثبیت‌کننده (Stabilizing Agents) علاوه بر نقش پرکنندگی، موجب افزایش انسجام ساختار فیروزه نیز می‌شوند. موادی نظیر سیلیکون‌ها (Silicone Fillers)، پلیمرهای نفوذی (Impregnation Polymers) و مواد سخت‌شونده ی حرارتی (Heat-hardening fillers) در این دسته قرار می‌گیرند. این فیلرها با افزایش چقرمگی، کاهش پوسته‌شدن و بهبود دوام بلندمدت فیروزه، به‌ویژه در نمونه‌های با تخلخل بالا، کاربرد دارند (Liu, Yang, He, & Cao, 2021).

۴-۴- فیلرهای رنگی

فیلرهای رنگی (Color Fillers / Dye + Resin) که در این روش، مواد رنگی همراه با فیلر به درون ساختار فیروزه نفوذ می‌کنند. نمونه‌هایی از این گروه شامل رزین‌های رنگی، روغن‌های رنگی و ترکیب رنگ با رزین‌های اپوکسی هستند. هدف اصلی این نوع بهسازی، یکنواخت کردن رنگ یا تبدیل رنگ‌های کم‌رنگ به آبی تیره‌تر است. از دیدگاه گوهرشناسی، این روش به‌عنوان بهسازی شدید طبقه‌بندی می‌شود و تأثیر مستقیمی بر ارزش‌گذاری سنگ دارد (Han, Lu, Dai & Su, 2015).

۵-۴- فیلرهای پیشرفته

فیلرهای پیشرفته یا (Advanced Fillers) عمدتاً در فیروزه‌های صادراتی یا صنعتی دیده می‌شوند و شامل نانوپلیمرهای نفوذی، ترکیبات سیلیکون-آلی و میکروکامپوزیت‌ها هستند. مزیت اصلی این مواد، نفوذ بالا و دشواری تشخیص آن‌ها با روش‌های کلاسیک است که همین امر، اهمیت استفاده از تکنیک‌های تحلیلی پیشرفته را دوچندان می‌کند.

۵- روش‌های طیف‌سنجی برای تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه

روش‌های طیف‌سنجی از مهم‌ترین و کارآمدترین ابزارها برای شناسایی فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه به شمار می‌روند. این روش‌ها امکان تشخیص ترکیبات آلی و معدنی را فراهم کرده و در بسیاری از موارد، تنها راه شناسایی بهسازی‌های پیشرفته محسوب می‌شوند.

۵-۱- طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌سنجی FTIR به‌عنوان اصلی‌ترین و قابل‌اعتمادترین روش تشخیص فیلر در فیروزه شناخته می‌شود. این روش توانایی بالایی در شناسایی انواع فیلرها دارد. از جمله، رزین‌ها (C=O، C-H stretch)، وکس و روغن (بند‌های CH₂ و CH₃)، سیلیکون باند (Si-O) (Si) و پلیمرهای قدیمی (پیک‌های PVC یا PVA) و نانوپلیمر (با حساسیت بالا). غیرمخرب بودن، عدم نیاز به آماده‌سازی پیچیده نمونه و وجود پیک‌های واضح و قابل تفسیر، FTIR را به یکی از مؤثرترین روش‌ها برای شناسایی مواد پلیمری و آلی در فیروزه بهسازی‌شده تبدیل کرده است (Liu, Yang, He, & Cao, 2021).

۲-۵- طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy)

طیف‌سنجی رامان یکی دیگر از روش‌های قدرتمند در شناسایی پلیمرها و فیلرهای سیلیکونی است. این روش امکان تشخیص باندهای مشخص C=C و C-C در ترکیبات پلیمری و باندهای Si-O در سیلیکون‌ها را فراهم می‌کند و همچنین در تمایز فیروزه طبیعی از فیروزه‌های ترکیبی یا بازساخته، نقش مهمی دارد. با این حال، یکی از محدودیت‌های این روش آن است که در مواردی که مقدار فیلر بسیار کم باشد، پیک‌های قوی ساختار فیروزه می‌توانند بر سیگنال‌های مربوط به پلیمر غلبه کنند. اما، در نمونه‌هایی با بهسازی آشکار، مانند رزین‌ها و سیلیکون‌ها، رامان عملکرد بسیار مطلوبی دارد (Kiefert & Hanni, 2000).

۳-۵- طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی (UV-Vis Spectroscopy)

طیف‌سنجی UV-Vis عمدتاً برای تشخیص فیروزه‌های رنگ‌شده کاربرد دارد. این روش امکان شناسایی حضور رنگ‌های آلی، بررسی یکنواختی رنگ و مقایسه تغییرات تون رنگ قبل و بعد از استفاده از فیلتر چلسی را فراهم می‌کند. با این حال، UV-Vis در شناسایی فیلرهایی مانند رزین‌ها، وکس‌ها و سیلیکون‌ها کارایی محدودی دارد و به‌تنهایی روش مناسبی برای تشخیص نوع فیلر محسوب نمی‌شود (Jin et al., 2024).

۴-۵- آزمون فلورسانس تحت نور فرابنفش (UV Light Test)

آزمون فلورسانس روشی کمکی و غیرقطعی در تشخیص بهسازی فیروزه است. بسیاری از رزین‌ها تحت نور فرابنفش بلند، فلورسانس آبی یا سبز از خود نشان می‌دهند، در حالی که فیروزه طبیعی معمولاً فاقد فلورسانس قابل توجه است. با این وجود، نتایج این آزمون باید همواره در کنار روش‌هایی مانند FTIR یا رامان تفسیر شوند و به‌تنهایی مبنای تشخیص قرار نگیرند (Liu, Yang, He, & Cao, 2021).

۵-۵- طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

روش XRF برای تعیین ترکیب شیمیایی عنصری کاربرد دارد، و به‌طور مستقیم برای شناسایی فیلرها مناسب نیست. کاربرد اصلی این روش در بررسی عناصر همراه مانند Al, Cu, Fe و همچنین در تشخیص متشابهات فیروزه نظیر هولایت و مگنیزیت رنگ‌شده است. محدودیت اساسی XRF آن است که قادر به شناسایی فیلرهای آلی نظیر رزین‌ها، وکس‌ها و روغن‌ها نیست (Rigaku, 2025).

۶- مقایسه روش‌های تشخیص، محدودیت‌ها و شکاف‌های مطالعاتی

با وجود تنوع روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای تشخیص فیلرهای به‌کاررفته در بهسازی فیروزه، هیچ‌یک از این روش‌ها به‌تنهایی پاسخ‌گوی تمامی چالش‌های تشخیصی نیستند. روش‌های کلاسیک نظیر بررسی میکروسکوپی، آزمون فلورسانس و اندازه‌گیری وزن مخصوص، اگرچه می‌توانند نشانه‌های اولیه‌ای از بهسازی ارائه دهند، اما عموماً فاقد توان تفکیک دقیق نوع فیلر بوده و نتایج آن‌ها وابستگی زیادی به تجربه کارشناس دارد. از سوی دیگر، روش‌های عنصری مانند XRF اگرچه در تشخیص ترکیب شیمیایی و شناسایی متشابهات فیروزه مفید هستند، اما در شناسایی فیلرهای آلی و پلیمری کارایی محدودی دارند.

در میان روش‌های طیف‌سنجی، FTIR به دلیل توانایی بالا در شناسایی گروه‌های عاملی آلی و غیرمخرب بودن، جامع‌ترین ابزار برای تشخیص فیلرهای پلیمری، رزینی، سیلیکونی و مواد تثبیت‌کننده محسوب می‌شود (جدول ۲). مطالعات سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ (Breeding & Ahline, 2024) نشان داده‌اند که FTIR یکی از اصلی‌ترین و قابل اعتمادترین روش‌ها برای شناسایی فیلرهای اپوکسی، رزین‌های فنولی، پلی‌یورتان، موم/پارافین، پلی‌وینیل استات (PVA) و پلی‌استر در فیروزه‌های بهسازی شده است و با تشخیص قله‌های طیفی مشخص، تمایز بین فیروزه طبیعی و فیروزه‌ی بهسازی شده را ممکن می‌سازد. با این حال، تفسیر نتایج FTIR در نمونه‌هایی با میزان کم فیلر یا در حضور بهسازی‌های پیچیده و چندمرحله‌ای می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. طیف‌سنجی رامان به‌عنوان روش مکمل، به‌ویژه در تشخیص پلیمرها و تمایز فیروزه طبیعی از مواد ترکیبی نقش مهمی ایفا می‌کند، اما در مواردی که سیگنال فیلر ضعیف باشد، تحت تأثیر

پیک‌های غالب ساختار فیروزه قرار می‌گیرد. روش UV-Vis نیز بیشتر محدود به تشخیص رنگ‌شدگی است و قابلیت محدودی در شناسایی نوع فیلر دارد. در جدول ۳ مقایسه‌ای کوتاه از انواع روش‌های طیف‌سنجی در شناسایی فیلرهای مورد استفاده در بهسازی آورده شده است. بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که یکی از شکاف‌های اصلی پژوهشی در حوزه تشخیص بهسازی فیروزه، نبود یک رویکرد نظام‌مند و چندروشی است که بتواند نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف را به صورت یکپارچه تفسیر کند. در بسیاری از گزارش‌ها، اتکا به یک روش منفرد منجر به عدم قطعیت یا حتی خطای تشخیص شده است؛ به‌ویژه در مواردی که فیلرهای پیشرفته، نانوپلیمرها یا ترکیبات سیلیکون-آلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. افزون بر این، شباهت برخی پاسخ‌های طیفی فیلرها با متشابهات فیروزه، تفسیر نتایج را پیچیده‌تر می‌سازد و بر ضرورت تحلیل تطبیقی داده‌ها تأکید می‌کند. بر این اساس، نیاز به ارائه یک چارچوب بهینه ارزیابی که بر پایه ترکیب هدفمند روش‌های کلاسیک، طیف‌سنجی و تحلیل‌های تکمیلی بنا شده باشد، بیش از پیش احساس می‌شود. چنین چارچوبی می‌تواند ضمن کاهش عدم قطعیت در تشخیص، به استاندارد سازی فرآیندهای آزمایشگاهی، افزایش شفافیت در گزارش‌دهی و بهبود اعتماد در بازار گوهرسنگ‌ها کمک کند؛ موضوعی که در بخش بعدی این مقاله به‌عنوان محور نوآورانه پژوهش ارائه خواهد شد.

جدول ۲: جدول شناسایی فیلرها و رزین‌ها براساس طیف FTIR (Lind et al., 1983)

نوع فیلر	باند‌های FTIR شاخص (cm ⁻¹)	توضیح تشخیصی
رزین / پلیمرهای آلی (Epoxy, Acrylic, Polyester)	1740-1720 (C=O) 2925-2850 (C-H stretch) 1500-1450 (C-H bending) 1250-1150 (C-O-C)	حضور باند 1730cm ⁻¹ تقریباً ۱۰۰٪ نشان‌دهنده رزین است.
واکس / روغن (Wax / Oil)	2915-2845 (CH ₂ , CH ₃ stretch) 1475-1460 (CH ₂ bending)	شدت بالاتر باند‌های CH ₂ نسبت به رزین؛ باند C=O ندارد.
سیلیکون‌ها / سیلکسان (Silicone / Siloxane)	1100-1000 (Si-O-Si) 850-800 (Si-C)	باند Si-O-Si خیلی قوی است و از ساختار فیروزه قابل تفکیک است.
پلی‌وینیل‌ها / PVC / PVA / Plastic Fillers)	1440-1430 (CH ₂) 2915 (C-H) 1300-1250 (C-O)	پهن‌تر از رزین‌های مدرن، اغلب با باندهای CH قوی.
نانوپلیمرها (Nano-polymer stabilization)	1750-1730 (C=O) 2920-2850 (C-H) اما پیک‌ها کم‌شدت تر هستند.	قله‌ها ضعیف‌اند ولی همچنان حضور پلیمر را نشان می‌دهند.
نمونه‌های رنگ‌شده (Dyed Turquoise)	1650-1500 رنگ‌های آلی 1600 باندهای آروماتیک	باند‌های رنگ آلی معمولاً کم‌شدت‌اند؛ در کنار رزین دیده می‌شوند.

جدول ۳: جدول مقایسه روش‌های طیف‌سنجی در بهسازی فیروزه؛ رتبه‌بندی کارایی دستگاه‌ها بر اساس قدرت تفکیک پیوندهای آلی و معدنی طبق گزارش‌های مؤسسه GIA و استانداردهای بین‌المللی گوهرشناسی (The Journal of Gemmology, 1998)

روش طیف‌سنجی	قدرت تشخیص فیلر	مناسب برای
FTIR	قوی‌ترین	رزین، واکس، روغن، سیلیکون، پلیمرها
Raman	بسیار خوب	رزین، سیلیکون، نانوپلیمر
UV-Vis	متوسط	نمونه‌های رنگ‌شده
UV Fluorescence	مکمل	رزین‌های دارای فلورسانس
XRF	ضعیف	شناسایی بدل‌ها، نه فیلر

۷- پیشنهاد چارچوب بهینه ارزیابی و تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه

با توجه به تنوع بالای فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه و محدودیت‌های ذاتی هر یک از روش‌های تشخیصی، اتکا به یک آزمون منفرد نمی‌تواند پاسخ‌گوی نیازهای آزمایشگاهی و تجاری باشد. بر این اساس، در این پژوهش یک چارچوب بهینه، مرحله به مرحله و چندروشی برای ارزیابی و تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه پیشنهاد می‌شود که هدف آن کاهش عدم قطعیت تشخیص، افزایش دقت گزارش‌دهی و استانداردسازی فرآیند ارزیابی است.

۷-۱- مرحله غربالگری اولیه (Initial Screening)

در گام نخست، استفاده از روش‌های غیرمخرب و کم‌هزینه به‌عنوان ابزار غربالگری توصیه می‌شود. این مرحله شامل بررسی‌های چشمی و میکروسکوپ نوری به‌منظور شناسایی ریزترک‌ها، پرشدگی‌های غیرطبیعی، جلای غیرمعمول و تغییرات بافت سطحی است. آزمون فلورسانس تحت نور فرابنفش (UV) نیز می‌تواند به‌عنوان روشی مکمل، نشانه‌های اولیه‌ای از حضور رزین‌ها یا فیلرهای آلی ارائه دهد. در این مرحله، هدف دستیابی به تشخیص قطعی نیست، بلکه شناسایی نمونه‌های مشکوک برای بررسی‌های دقیق‌تر مدنظر است.

۷-۲- مرحله تشخیص ساختاری و شیمیایی (Core Analytical Stage)

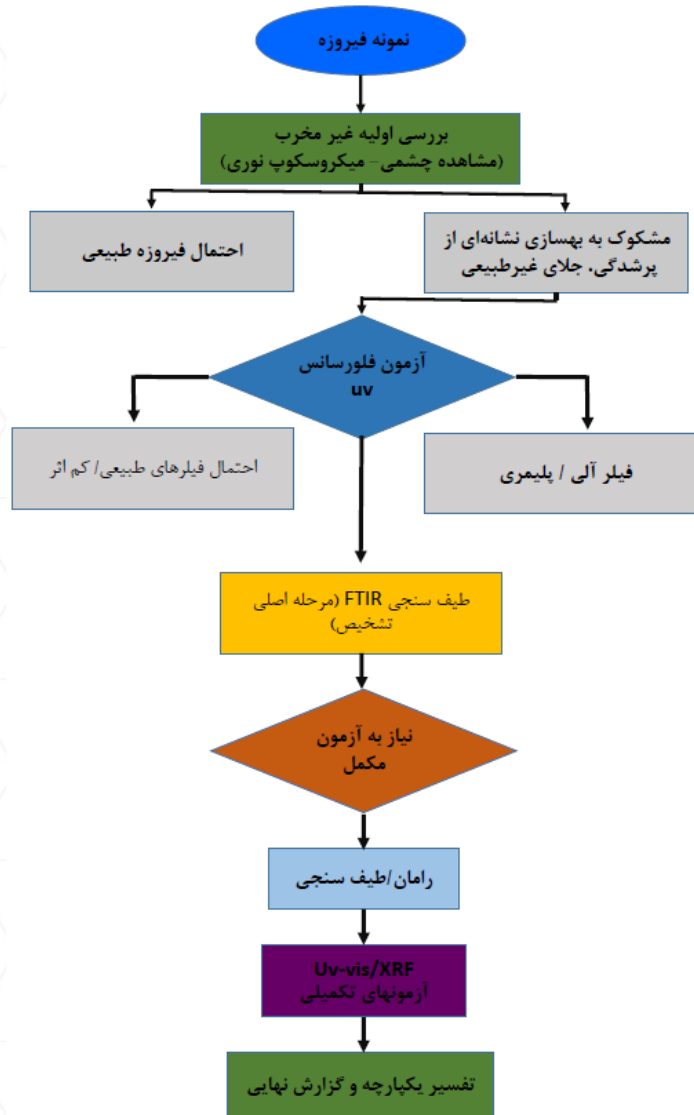
در مرحله دوم، طیف‌سنجی FTIR به‌عنوان ستون اصلی چارچوب پیشنهادی به کار گرفته می‌شود. این روش به دلیل توانایی بالا در شناسایی گروه‌های عاملی آلی و پلیمری، امکان تشخیص اغلب فیلرهای رایج از جمله رزین‌های اپوکسی، اکریلیک، سیلیکونی، وکس‌ها، روغن‌ها و پلیمرهای نفوذی را فراهم می‌کند. تفسیر طیف‌ها باید با توجه به شدت پیک‌ها، موقعیت باندها و هم‌پوشانی احتمالی آن‌ها با پاسخ‌های ساختاری فیروزه انجام شود. در مواردی که نتایج FTIR با عدم قطعیت همراه باشد، استفاده هم‌زمان از طیف‌سنجی رامان به‌عنوان روش مکمل توصیه می‌شود، به‌ویژه برای تشخیص پلیمرها، سیلیکون‌ها و تمایز فیروزه طبیعی از نمونه‌های ترکیبی یا بازساخته.

۷-۳- مرحله آزمون‌های تکمیلی و کنترلی

در گام سوم، بسته به نوع پرسش تشخیصی، استفاده هدفمند از روش‌های تکمیلی پیشنهاد می‌شود. طیف‌سنجی UV-Vis عمدتاً برای بررسی رنگ‌شدگی و یکنواختی رنگ کاربرد دارد و می‌تواند در شناسایی فیلرهای رنگی نقش مؤثری ایفا کند. XRF نیز اگرچه برای تشخیص مستقیم فیلرها مناسب نیست، اما در بررسی ترکیب عنصری، کنترل اصالت فیروزه و تفکیک آن از متشابهاتی نظیر هولایت و مگنیزیت رنگ‌شده اهمیت دارد. این مرحله به‌ویژه در گزارش‌دهی آزمایشگاهی رسمی، نقش کنترلی و تأییدی ایفا می‌کند.

۷-۴- تفسیر یکپارچه و گزارش‌دهی استاندارد

آخرین و شاید مهم‌ترین بخش چارچوب پیشنهادی، تفسیر یکپارچه داده‌ها و ارائه گزارش شفاف است. در این مرحله، نتایج حاصل از تمامی آزمون‌ها به‌صورت تطبیقی تحلیل شده و نوع بهسازی، ماهیت فیلر (طبیعی، پلیمری، تثبیت‌کننده یا رنگی) و میزان قطعیت تشخیص به‌طور دقیق مشخص می‌شود. تأکید بر ذکر محدودیت‌ها، احتمال وجود فیلرهای پیشرفته یا بهسازی‌های چندمرحله‌ای، و استفاده از اصطلاحات استاندارد گوهرشناسی در گزارش نهایی، از ارکان اساسی این چارچوب به شمار می‌رود. چارچوب ارائه شده در این پژوهش با تلفیق منطقی روش‌های کلاسیک و پیشرفته، ضمن افزایش دقت تشخیص، امکان کاربرد عملی در آزمایشگاه‌های گوهرشناسی، مراکز آموزشی و بازار تجارت فیروزه را فراهم می‌کند (شکل ۳). این رویکرد چندروشی نه تنها از اتکای بیش‌ازحد به یک آزمون منفرد جلوگیری می‌کند، بلکه زمینه استانداردسازی فرآیند تشخیص فیلرها و افزایش شفافیت در ارزش‌گذاری فیروزه‌های بهسازی‌شده را نیز مهیا می‌سازد (شکل ۳).



شکل ۲ فلوجارت پیشنهادی جهت بررسی، تفسیر یکپارچه و گزارش‌دهی استاندارد در مطالعه فیروزه

۸- نتیجه گیری

فیروزه، به عنوان یک گوهر ارزشمند و متخلخل، به‌طور طبیعی با ریزحفره‌ها و ترک‌های میکروسکوپی همراه است که دوام و کیفیت ظاهری آن را محدود می‌کند. این ویژگی‌ها ضرورت استفاده از فیلرها برای بهسازی و ارتقای خواص مکانیکی، رنگ و جلای سنگ را آشکار می‌سازد. بررسی انواع فیلرهای مورد استفاده نشان داد که از مواد طبیعی و سنتی مانند موم و روغن گرفته تا رزین‌های مدرن، پلیمرهای نفوذی و نانوکامپوزیت‌ها، هر یک ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاص خود را دارند. مطالعه روش‌های تشخیص فیلرها نیز مشخص کرد که هیچ روش منفردی نمی‌تواند تمامی انواع فیلرها را با قطعیت تشخیص دهد. در این راستا، طیف‌سنجی FTIR به‌عنوان ستون اصلی تشخیص، در کنار روش‌های مکمل مانند رامان، UV-Vis، فلورسانس و XRF، امکان شناسایی دقیق و یکپارچه فیلرها را فراهم می‌کند. بررسی محدودیت‌های روش‌ها و چالش‌های تشخیصی ناشی از حضور فیلرهای پیشرفته یا متشابهات، ضرورت طراحی یک چارچوب مرحله‌ای و چندروشی را روشن کرد. چارچوب پیشنهادی این مقاله با تلفیق غربالگری اولیه، تشخیص ساختاری و شیمیایی، آزمون‌های تکمیلی و تفسیر یکپارچه داده‌ها، ضمن کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت، قابلیت کاربرد عملی در آزمایشگاه‌های گوهرشناسی، آموزش

و بازار تجارت فیروزه را داراست. استفاده از این رویکرد می‌تواند علاوه بر استانداردسازی فرآیند تشخیص، موجب ارتقای شفافیت و اعتماد در بازار و بهبود ارزش‌گذاری فیروزه‌های بهسازی شده شود. در نهایت، این پژوهش نشان داد که ادغام روش‌های کلاسیک و پیشرفته همراه با چارچوب ارزیابی ساختاریافته، راهکاری مؤثر برای حل چالش‌های تشخیص فیلهاست. مطالعات آینده می‌تواند بر بهسازی‌های چندمرحله‌ای پیچیده، استفاده از فناوری‌های طیف‌سنجی پیشرفته و پایگاه داده‌های مقایسه‌ای فیله‌ها تمرکز کند تا دقت تشخیص و قابلیت کاربرد در سطح بین‌المللی افزایش یابد.

۹- مراجع

- ۱- امامی، م.، مریدپور، م. (۱۳۹۱). گوهرشناسی (شناخت سنگ‌های قیمتی و نیمه‌قیمتی). انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور صفحات ۳۳-۴۵.
- 2- Jin, Y., Chen, Q., & Li, G. (2024). Discrimination of turquoise treatments using UV-Vis-NIR and FTIR spectroscopy. *Journal of Gemmology*, 39(1), pp. 45-58.
- 3- Read, P. G. (2005). *Gemmology*. 3rd ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 112-125.
- 4- Rigaku. (2025). *Handheld Raman Analyzers for Gemstone Identification*. Technical Report, Rigaku Analytical Devices, pp. 14-22.
- 5- O'Donoghue, M. (2006). *Gems: Their Sources, Descriptions and Identification*. 6th ed. Butterworth-Heinemann, pp. 210-223.
- 6- Liu, Y., Wang, L., & Zhang, Z. (2021). Characterization of fillers in turquoise by FTIR and Raman spectroscopy. *Journal of Gemmology*, 37(5), pp. 512-525.
- 7- Zhang, Y., Li, H., Wang, L., & Chen, X. (2023). Gemmological and Spectroscopic Characteristics of Natural, Treated, and Synthetic Turquoise. *Crystals*, 13(5), pp. 782-790.
- 8- Han, X., Lu, T., Dai, H., & Su, Y. (2015). Characterization of turquoise from Hubei Province, China. *Gems & Gemology*, 51(3), pp. 244-259.
- 9- Kiefert, L., Hänni, H. A., & Chalain, J. P. (2000). Identification of fillers in gemstones by FTIR and Raman spectroscopy. *Gems & Gemology*, 36(4), pp. 336-359.
- 10- Shirdam, M., et al. (2021).
- 11- The Journal of Gemmology. (1998). Standard spectroscopic methods for gem identification 112-120.
- 12- Lind, T., et al. (1983). FTIR studies for filler identification in turquoise. 45-52.

تحلیل آماری عناصر نادرخاکی با هدف شناسایی کانی‌های شاخص محیط‌های فرورانشی؛ جنوب

شرق پهنه جبالبارز

اکرم انگار^{۱*}، محمدعلی رجب‌زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شیراز، a.engar@hafez.shirazu.ac.ir

۲- استاد بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، mrajabzadeh@shirazu.ac.ir

چکیده

عناصر نادرخاکی (REEs) به دلیل پایداری نسبی رفتار ژئوشیمیایی و وابستگی مستقیم به ویژگی‌های منبع و فرآیندهای ماگمایی، از شاخص‌های قابل اتکا برای تفسیر منشأ ماگما و محیط‌های زمین‌ساختی به‌شمار می‌روند. در این مقاله، الگوی توزیع REEs در شمال‌شرق شهر زهک‌کوت واقع در جنوب‌شرق پهنه جبالبارز، جنوب استان کرمان بر پایه تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمیایی بررسی شده است. بدین منظور، تعداد ۱۶۹۵ نمونه سنگی به روش ICP-MS آنالیز شده و غلظت REEs به همراه Sc و Y اندازه‌گیری شده است. شاخص‌های آمار توصیفی برای عناصر نادرخاکی سبک (LREEs) و سنگین (HREEs) محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده غنی‌شدگی سیستماتیک LREEs در برابر تهی‌شدگی نسبی HREEs و تفاوت معنادار در درجه تمرکز و تفکیک ژئوشیمیایی این دو گروه عنصری می‌باشد. انحراف از توزیع نرمال و غالب‌بودن چولگی مثبت در بسیاری از LREEs، بیانگر ناهمگنی ژئوشیمیایی و نقش فرآیندهای تفریق ماگمایی در تمرکز انتخابی REEs در سنگ‌های آگلومرا-توف، داسیتی و آندزیتی منطقه مورد مطالعه است. این الگوی آماری با شرایط زمین‌ساختی فرورانشی منطقه سازگار بوده و می‌تواند بازتابی از کنترل فازهای کانیایی حامل REEs نظیر مونازیت، آپاتیت، اپیدوت، بیوتیت و گارنت در طی تبلور و تکامل ماگما باشد.

کلیدواژه‌ها: عناصر نادرخاکی (REEs)، تحلیل آماری، محیط فرورانشی، پهنه جبالبارز، استان کرمان

Statistical Analysis of Rare Earth Elements for Identifying Diagnostic Minerals of Subduction-Related Environments; Southeastern Jebal Barez Zone

Akram Engar¹; Mohammad Ali Rajabzadeh²

¹Msc, Department of Earth Sciences, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz,
a.engar@hafez.shirazu.ac.ir

²Professor, Department of Earth Sciences, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz,
mrajabzadeh@shirazu.ac.ir

Abstract

Rare earth elements (REEs) are considered reliable indicators for interpreting magma origin and tectonic environments because they have relative stability in geochemical behavior and direct dependence on the characteristics of the source and magmatic processes. In this study, the distribution pattern of REEs in the northeastern part of Zahaklut City, located in the southeastern Jebal Barez zone, southern Kerman Province, was investigated based on statistical analysis of geochemical data. Accordingly, a total of 1,695 rock samples were analyzed using ICP-MS, and the concentrations of REEs, together with Sc and Y, were measured. Descriptive statistical indices for light rare earth elements (LREEs) and heavy rare earth elements (HREEs) were calculated and compared. The results indicate an enrichment of LREEs relative to HREEs, with distinct geochemical concentrations and fractionation patterns between the two groups. Geochemical heterogeneity and magmatic fractionation, indicated by deviation from normal distribution and positive skewness in light rare earth elements (LREEs), controlled selective REE concentration in agglomerate-tuff, dacite, and andesite rocks. This statistical pattern is consistent with the subduction-related tectonic setting of the region and may reflect the control exerted by REE-bearing minerals such as monazite, apatite, epidote, biotite, and garnet during magma crystallization and evolution.

Keywords: Rare earth elements (REEs), Statistical analysis, Subduction-related environment, Jebal Barez zone, Kerman Province

۱- مقدمه

عناصر نادر خاکی (REEs) علاوه بر کاربرد ویژه در فناوری‌های پیشرفته (High Tech) در مباحث علم ژئوشیمی نیز بسیار حائز اهمیت هستند. این عناصر به دلیل رفتار ژئوشیمیایی منسجم، دامنه تغییرات پیش‌بینی‌پذیر و مقاومت نسبی در برابر فرآیندهای ثانویه، از جمله معتبرترین شاخص‌های ژئوشیمیایی برای بررسی منشأ ماگما و شرایط زمین‌ساختی تشکیل سنگ‌ها محسوب می‌شوند. وجود کانی‌های میزبان REEs مانند گارنت، موناژیت، زیرکن، اپیدوت و بیوتیت نقش مهمی در کنترل توزیع عناصر نادر خاکی سبک LREEs و عناصر نادر خاکی سنگین HREEs دارد (McDonough and Sun, 1995). مطالعات گسترده نشان داده‌اند که الگوی توزیع عناصر نادر خاکی می‌تواند به‌طور مؤثری در تمایز محیط‌های زمین‌ساختی مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Pearce, 1983). در این میان، سامانه‌های مرتبط با فرورانش اغلب با غنی‌شدگی نسبی LREEs و تهی‌شدگی HREEs همراه هستند؛ الگویی که معمولاً به حضور فازهایی مانند گارنت در ناحیه ذوب و تأثیر سیالات آزادشده از صفحه فرورانشده نسبت داده می‌شود (Tatsumi and Eggins, 1995). منطقه مورد مطالعه، واقع در شمال شرق شهر زهک لوت در جنوب شرق پهنه جبالبارز، بخشی از یک کمر بند تکتونیکی فعال با سابقه ماگماتیسیم وابسته به فرآیندهای همگرایی صفحه‌ای است (Berberian and King, 1981). اگرچه مطالعات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی متعددی در این پهنه انجام شده است، اما بررسی سیستماتیک الگوهای توزیع و غنی‌شدگی REEs، به‌ویژه با تکیه بر داده‌های آماری، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از تحلیل داده‌های آماری سعی شده است ابتدا به شناسایی سنگ‌های میزبان و سپس تشخیص کانی‌های حامل REEs اقدام گردد.

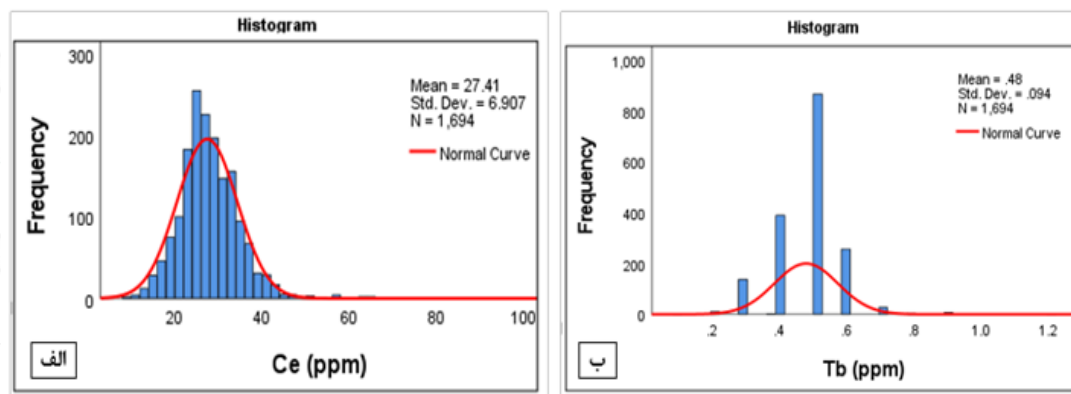
۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کمان ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) یکی از مهم‌ترین کمر بندهای ماگمایی ایران به‌شمار می‌رود که شامل مجموعه‌ای گسترده از واحدهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی است. بر اساس دیدگاه‌های ارائه‌شده (Mohajjel et al., 2003)، این زون در امتداد حاشیه فعال خردقاره ایران مرکزی و در حد فاصل پهنه‌های سندرچ-سیرجان و ایران مرکزی توسعه یافته است. شکل‌گیری این کمر بند عمدتاً به فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی از اواخر کرتاسه تا سنوزوئیک نسبت داده می‌شود (Alavi, 1980). بخش جنوب شرقی کمان ارومیه-دختر که با عنوان زون ماگمایی سنوزوئیک کرمان شناخته می‌شود، میزبان توده‌های نفوذی و واحدهای آتشفشانی با ترکیب کالک‌آلکالن تا آداکیتی و سن ائوسن پسین تا میوسن میانی-بالایی است (Aghanabati, 2004). در این پهنه، دو گروه عمده گرانیتوئیدی شامل گرانیتوئیدهای تیپ جبالبارز و کوه پنج شناسایی شده‌اند. گرانیتوئیدهای جبالبارز عموماً پتانسیل کانی‌زایی محدودی دارند، در حالی که توده‌های کم‌عمق کوه پنج به‌عنوان میزبان اصلی کانی‌زایی مس پورفیری در این کمر بند شناخته می‌شوند و در واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن تا الیگوسن جای‌گیری یافته‌اند (Asadi et al., 2014). کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان به سه بخش شمال باختری، مرکزی و جنوب‌خاوری تقسیم می‌شود. بخش جنوب‌خاوری آن، موسوم به پهنه خانه‌خاتون-جبالبارز، عمدتاً از باتولیت‌های گرانیتوئیدی و واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن تشکیل شده است (Khosravi et al., 2019، شفییعی بافتی، ۱۳۸۶). منطقه مورد مطالعه در حدود ۸۵ کیلومتری شرق شهر رودبار جنوب در استان کرمان و در بخش انتهایی پهنه جبالبارز واقع شده است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰، رخنمون‌های اصلی منطقه شامل واحدهای آتشفشانی، آذرآواری و توفی می‌باشند (شکل ۱).

۴- بحث

۴-۱- تحلیل آماری عناصر نادر خاکی (REEs)

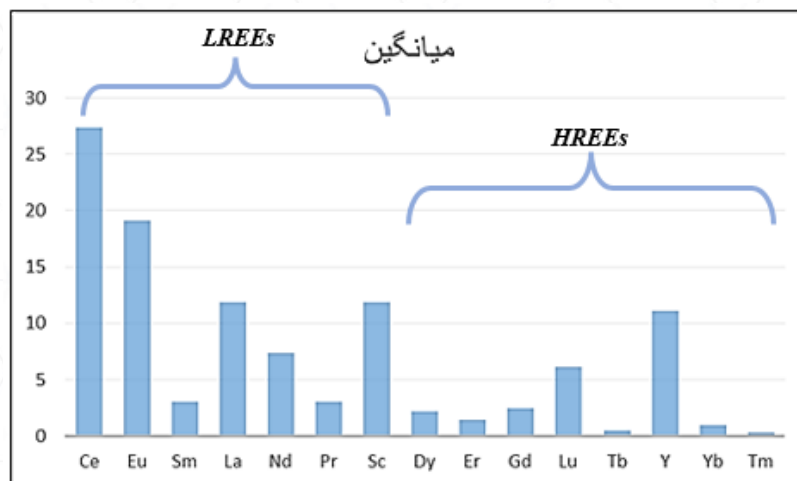
به منظور شناسایی رفتار آماری و نحوه پراکندگی عناصر نادر خاکی در مجموعه داده‌های مورد مطالعه، تحلیل اولیه بر پایه آماره‌های توصیفی انجام شد. بر اساس دیدگاه حسنی پاک (۱۳۹۵)، شاخص‌هایی نظیر میانگین، واریانس و انحراف معیار ابزارهای کلیدی در تبیین الگوی توزیع داده‌های ژئوشیمیایی محسوب می‌شوند و می‌توانند مبنای مقایسه کمی رفتار عناصر مختلف را فراهم سازند. از این رو، محاسبه این شاخص‌ها به عنوان گام نخست، چارچوب لازم برای بررسی تفاوت‌های توزیعی LREEs، HREEs و تفسیرهای بعدی را فراهم کرد. نتایج آماره‌های توصیفی نشان می‌دهد که LREEs به طور کلی دارای میانگین و میانه بالاتر و مقادیر نسبتاً نزدیک به یکدیگر هستند که بیانگر تمرکز و غنی‌شدگی نسبی این عناصر در داده‌های منطقه است. در مقابل، HREEs عمدتاً دارای میانگین پایین‌تری بوده و حضور محدود مقادیر خارج از رده، موجب ایجاد چولگی مثبت و انحراف از توزیع نرمال شده است. بررسی هم‌زمان شاخص‌های مرکزی و پراکندگی، الگوی کلی غنی‌شدگی LREEs و تهی‌شدگی نسبی HREEs را در مجموعه داده‌ها تأیید می‌کند. به منظور بررسی دقیق‌تر شکل توزیع داده‌ها، هیستوگرام REEs مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۲).



شکل ۲- نمودارهای هیستوگرام REEs منتخب در منطقه مورد مطالعه. الف) سربیم (Ce) به عنوان عنصر نماینده از گروه LREEs. ب) تربیم (Tb) به عنوان عنصر نماینده از گروه HREEs.

نتایج نشان می‌دهد که توزیع آماری اغلب عناصر از نرمال بودن کامل فاصله دارد و تفاوت میان شاخص‌های مرکزی، همراه با مقادیر قابل توجه چولگی و کشیدگی، بیانگر توزیع‌های نامتقارن و عمدتاً راست‌چوله است. در LREEs، مانند عنصر سربیم (Ce)، هیستوگرام عمدتاً تمرکز داده‌ها را در بازه‌های مشخص و یک قله اصلی نشان می‌دهد، اما وجود دم کشیده در سمت مقادیر بالا و کشیدگی بیش از حد نرمال در سایر عناصر این گروه، حاکی از انحراف از توزیع نرمال و حضور مقادیر غنی‌شده است. با این حال، شدت این ناهنجاری‌ها در همه LREEs یکسان نیست و برخی از آن‌ها توزیعی نسبتاً متعادل‌تر دارند. در مقابل، رفتار آماری متنوع‌تری از خود نشان می‌دهند؛ به طوری که برخی از HREEs مانند عنصر تربیم (Tb)، دارای توزیعی نسبتاً متقارن، تک‌قله‌ای و نزدیک به نرمال با چولگی و کشیدگی پایین می‌باشد. در ادامه، نمودار میانگین غنی‌شدگی REEs به منظور جمع‌بندی نتایج آماری مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). این نمودار اختلاف آشکار میان میانگین LREEs و HREEs را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که مقادیر میانگین LREEs به صورت سیستماتیک بالاتر از HREEs است. یکنواختی نسبی روند تغییرات میانگین در LREEs و کاهش محسوس مقادیر در HREEs، بیانگر تمرکز LREEs در مقادیر بالاتر و تجمع HREEs در بازه‌های پایین‌تر است. این الگو با نتایج آماره‌های توصیفی و تحلیل هیستوگرام‌ها همخوانی دارد و نشان می‌دهد که غنی‌شدگی LREEs یک روند غالب و ساختاری در داده‌های ژئوشیمیایی منطقه است. الگوی به‌دست‌آمده با نتایج

مطالعات پیشین در پهنه جبالبارز و کمر بند ارومیه-دختر نیز همخوانی دارد، به گونه‌ای که غنی‌شدگی LREEs نسبت به HREEs به‌عنوان یکی از ویژگی‌های شاخص سامانه‌های ماگمایی مرتبط با فرورانش گزارش شده است (Berberian and King, 1981; Shahabpour, 2007). از این رو، تطابق نتایج این پژوهش با الگوهای منطقه‌ای، مؤید نقش فرآیندهای فرورانشی در کنترل ترکیب ژئوشیمیایی ماگمای والد و شکل‌گیری الگوی توزیع REEs در جنوب‌شرق پهنه جبالبارز است.



شکل ۳- میزان غنی‌شدگی REEs در منطقه مورد مطالعه

۲-۴- کانی‌های شاخص و کنترل‌کننده در محیط‌های فرورانشی

رفتار ژئوشیمیایی REEs در محیط‌های فرورانشی به‌طور مستقیم تحت تأثیر فازهای کانیایی میزبان و شرایط تبلور ماگمایی قرار دارد. عناصر LREEs به دلیل شعاع یونی بزرگ‌تر و بار یونی پایدار (+۳)، تمایل بیشتری به جای‌گیری در ساختار کانی‌های سیلیکاتی و آلومینوسیلیکاتی دارند و در نتیجه، در سامانه‌های ماگمایی مرتبط با فرورانش، به‌صورت انتخابی در برخی فازهای کانیایی متمرکز می‌شوند (Henderson, 1984). در پهنه‌های فرورانشی، ذوب جزئی گوشته متأثر از سیالات آزادشده از صفحه فرورانده‌شده و تکامل ماگماهای کالک‌آلکان تا گرانیتوئیدی، شرایط مناسبی برای تمرکز LREEs فراهم می‌کند. این فرآیندها موجب می‌شوند که LREEs در مراحل مختلف تبلور ماگما، در کانی‌های شاخصی همچون مونازیت، آپاتیت، اپیدوت، بیوتیت و گارنت متمرکز شوند. این کانی‌ها، که در سنگ‌های آذرین و آذرآواری مرتبط با محیط‌های فرورانشی فراوان گزارش شده‌اند، به‌عنوان مهم‌ترین میزبان‌های بالقوه LREEs در منطقه مورد مطالعه شناخته می‌شوند. مونازیت یکی از اصلی‌ترین فازهای غنی از LREEs به‌شمار می‌رود که به‌ویژه در سنگ‌های گرانیتوئیدی و واحدهای آذرآواری تکامل‌یافته تشکیل می‌شود و توانایی بالایی در تمرکز عناصری مانند La، Ce و Nd دارد. آپاتیت نیز به‌عنوان یک کانی فراگیر اولیه در بسیاری از سنگ‌های آذرین، نقش مؤثری در ذخیره‌سازی LREEs ایفا می‌کند. حضور اپیدوت و بیوتیت، چه به‌صورت کانی‌های اولیه و چه ثانویه، می‌تواند به تثبیت و بازتوزیع LREEs در طی فرآیندهای ماگمایی و دگرسانی محدود کمک کند. گارنت، به‌ویژه در شرایط فشار نسبتاً بالا که مشخصه نواحی فرورانشی است، نقش مهمی در تفکیک REEs ایفا می‌کند. این کانی با تمایل بیشتر به جذب HREEs می‌تواند سبب تهی‌شدگی نسبی این عناصر در مذاب باقی‌مانده و در نتیجه، غنی‌شدگی نسبی LREEs در فاز ماگمایی شود. چنین رفتاری به‌عنوان یکی از دلایل اصلی الگوی شیب‌دار REEs با غنی‌شدگی LREEs و افت HREEs در محیط‌های فرورانشی شناخته می‌شود (McDonough & Sun, 1995). اگرچه در این پژوهش شناسایی مستقیم کانی‌ها از طریق روش‌های کانی‌شناسی انجام نشده است، اما الگوی آماری به‌دست‌آمده از توزیع عناصر نادرخاکی، به‌ویژه غنی‌شدگی سیستماتیک LREEs و پراکندگی بیشتر HREEs، با رفتار ژئوشیمیایی مورد انتظار در حضور کانی‌های میزبان یادشده سازگاری دارد.

از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل کانی‌شناسی، در کنار فرآیندهای ماگمایی وابسته به فرورانش، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوی توزیع REEs در جنوب شرق پهنه جبالبارز ایفا می‌کند (McLennan, Lipin, & McKay, 198).

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل‌های آماری توصیفی REEs در شمال شرق زهک‌لوت نشان می‌دهد که الگوی ژئوشیمیایی منطقه با غنی‌شدگی LREEs و تهی‌شدگی نسبی HREEs مشخص می‌شود. تفاوت شاخص‌های مرکزی و پراکندگی LREEs و HREEs بیانگر رفتار ژئوشیمیایی ناهمگن این دو گروه و تأثیر ویژگی‌های منبع ماگما و فرآیندهای تکاملی ماگمایی بر توزیع آن‌ها است. توزیع نامتقارن داده‌ها، همراه با چولگی و کشیدگی قابل توجه، نشان‌دهنده نقش فازهای کانیایی و فرآیندهای تفریق ماگمایی در تمرکز انتخابی REEs می‌باشد. با توجه به غنی‌شدگی LREEs، می‌توان احتمال حضور کانی‌های میزبان نظیر موناژیت، آپاتیت، اپیدوت، بیوتیت و گارنت را در منطقه مورد مطالعه مطرح کرد. ترکیب تحلیل‌های آماری گسترده با تفسیر ژئوشیمیایی، ابزار مؤثری برای شناسایی ویژگی‌های محیط‌های ماگمایی وابسته به فرورانش و درک الگوی توزیع REEs در پهنه جبالبارز فراهم می‌کند.

۶- تقدیر و تشکر

از شرکت معدنی-صنعتی گهرزمین که داده‌ها و نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها را در اختیار نویسندگان این مقاله قرار دادند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

حسنی پاک، ع.ا. (۱۳۹۵). اصول اکتشافات ژئوشیمیایی (مواد معدنی). نوبت چاپ نهم. انتشارات دانشگاه تهران، تهران
شفیعی بافتی، ب. (۱۳۸۶). الگوی فلزائی کمر بند مس پورفیری کرمان و رهیافت‌های اکتشافی آن، رساله دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه باهنر کرمان، ۲۷۲ ص.

- Aghanabati, A. (2004). *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran.
- Alavi, M. (1980). Tectonics of the Sanandaj–Sirjan Zone. *Geological Society of Iran*, 3(2), 45–60.
- Asadi, S., Moore, F., & Zarasvandi, A. (2014). Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. *Earth-Science Reviews*, 138, 25–46.
- Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210–265.
- Geological Survey of Iran (GSI) (n.d.). Geological map of Negisan, scale 1:100,000. Tehran.
- Henderson P (1983) Rare Earth Element Geochemistry: Elsevier Science Publishers B.V. 511.
- Khosravi, M., Rajabzadeh, M. A., Qin, K., & Asadi, H. (2019). Tectonic setting and mineralization potential of the Zefreh porphyry Cu–Mo deposit, central Iran: Constraints from petrographic and geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, 199, 106–118.
- McDonough, W.F., & Sun, S.S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- McLennan, S., Lipin, B., & McKay, G. (1989). Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. *Reviews in Mineralogy*, 21, 169–200.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L., & Nouri, S. (2003). The geology of the Urumieh–Dokhtar magmatic belt, Iran: Implications for continental collision and magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4), 437–455.
- Pearce, J.A. (1983). Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Geological Society, London, Special Publications*, 16, 230–249.

- Shahabpour, J. (2007). Magmatic belts of Iran: A tectono-magmatic approach. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 1(2), 1–20.
- Tatsumi, Y., & Eggins, S. (1995). *Subduction Zone Magmatism*. Blackwell, Oxford, 211 p.

تحلیل منشأ و شرایط تشکیل کانی پیریت در قاعده سازند پابده با استفاده از روش‌های پتروگرافی آلی (برش الگوی تنگ‌هتی، تاقدیس کوه گورپی)

ساسان بختیاری نژاد^۱، مجید علیپور*^۲، نرگس شگری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

*Email: alipour@scu.ac.ir

چکیده

کانی پیریت (FeS_2) یکی از شاخص‌های مهم در تفسیر شرایط اکسید-احیایی و فرآیندهای دیاژنزی در سنگ‌های رسوبی به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، منشأ و شرایط تشکیل پیریت در قاعده سازند پابده در برش الگوی تنگ‌هتی (تاقدیس کوه گورپی) با استفاده از روش‌های پتروگرافی آلی مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور دستیابی به این هدف، تعداد ۲۴ نمونه سنگی از بخش قاعده‌ای سازند پابده برداشت و پس از آماده‌سازی مقاطع صیقلی، مطالعات میکروسکوپی در نور بازتابی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که پیریت در نمونه‌ها دارای فراوانی اندک و پراکندگی محدود بوده و اغلب به‌صورت ثانویه، همراه با شواهد اکسیدشدگی مشاهده می‌شود. حضور محدود پیریت‌های فرامبوئیدی، در کنار فقر ماده آلی، غالب بودن ماسرال‌های منشأ گیاهی، فراوانی اکسیدهای آهن و روشن بودن زمینه سنگ‌ها، بیانگر موقتی و موضعی بودن شرایط احیایی تا نیمه احیایی و غلبه شرایط اکسیک در زمان رسوب‌گذاری و دیاژنز اولیه قاعده سازند پابده است. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه رخداد گرمایش بیشینه پالئوسن-ائوسن و نوسانات سطح آب دریا بر ویژگی‌های رخساره‌ای و ورود ماده آلی تأثیر گذاشته‌اند، اما این تغییرات منجر به شکل‌گیری شرایط احیایی پایدار و گسترده در این برش نشده‌اند. در مجموع، پیریت‌های مشاهده‌شده بیشتر بازتاب‌دهنده شرایط احیایی موقتی یا فرآیندهای ثانویه بوده و نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان شاخصی قطعی برای احیایی بودن محیط رسوب‌گذاری قاعده سازند پابده در نظر گرفت.

کلیدواژه‌ها: پیریت ثانویه، تاقدیس کوه گورپی، تنگ‌هتی، پتروگرافی آلی، محیط اکسید-احیا

Analysis of the Origin and Formation Conditions of Pyrite in the Basal Part of the Pabdeh Formation Using Organic Petrography Methods (Tang-e-Hati Type Section, Kuh-e Gurpi Anticline)

Sasan Bakhtiary Nejad¹; Majid Alipour*²; Narges Shokri²

¹ M. Sc student in Petroleum Geology, Department of Petroleum Geology & Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, ShahidChamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran

² Assistant Professor, Department of Petroleum and Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran

*Email: alipour@scu.ac.ir

Abstract

Pyrite (FeS_2) is one of the key indicators for interpreting redox conditions and diagenetic processes in sedimentary rocks. In this study, the origin and formation conditions of pyrite in the basal part of the Pabdeh Formation were investigated using organic petrography methods in the type section of Tang-e Hati (Kuh-e Gourpi anticline, Zagros Basin). For this purpose, 24 rock samples were collected from the basal interval of the Pabdeh Formation and examined under reflected light microscopy after preparation of polished sections. The results

indicate that pyrite occurs in low abundance and shows limited distribution, commonly appearing as allochthonous grains associated with evidence of secondary oxidation. The limited occurrence of framboidal pyrite, together with low organic matter content, dominance of plant-derived macerals, abundance of iron oxides, and a bright matrix, indicates prevailing oxic conditions during deposition and early diagenesis of the basal Pabdeh Formation. Comparison with previous studies suggests that although the Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM) and sea-level fluctuations influenced facies characteristics and organic matter input, these changes did not lead to the development of persistent and widespread reducing conditions in the studied section. Overall, the observed pyrites mainly reflect transient reducing microenvironments or secondary processes and cannot be considered definitive evidence for reducing depositional conditions in the basal Pabdeh Formation.

Keywords: Secondary pyrite, Kuh-e Gurpi Anticline, Tang-e-Hati, Organic petrography, Redox environment

۱- مقدمه

کانی پیریت (FeS_2) یکی از رایج‌ترین سولفید آهن‌های موجود در سنگ‌های رسوبی به شمار می‌رود و حضور آن نقش مهمی در تفسیر شرایط رسوب‌گذاری و فرآیندهای دیاژنزی ایفا می‌کند (Berner, 1984). تشکیل پیریت عموماً در محیط‌های کم‌اکسیژن تا بی‌اکسیژن رخ می‌دهد و به‌عنوان شاخصی کلیدی برای بازسازی شرایط اکسید-احیایی محیط‌های رسوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rickard & Luther, 2007). این کانی می‌تواند به‌صورت اولیه (Syngenetic) همزمان با رسوب‌گذاری یا به‌صورت ثانویه در مراحل بعدی دیاژنز تشکیل شود که تشخیص این دو حالت برای تفسیر تاریخچه رسوبی و دیاژنزی سنگ‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Raiswell & Canfield, 2012). فرآیند پیریت‌زایی عمدتاً تحت کنترل فعالیت باکتری‌های کاهنده سولفات، حضور ماده آلی قابل تجزیه و دسترسی به آهن واکنش‌پذیر است (Canfield et al., 1993). در محیط‌های رسوبی، تجزیه بی‌هوازی ماده آلی توسط باکتری‌های کاهنده سولفات منجر به تولید سولفید هیدروژن شده و این ترکیب در واکنش با آهن محلول یا آهن موجود در کانی‌های اولیه، پیریت را تشکیل می‌دهد (Rickard, 2012). از این‌رو، حضور پیریت ارتباط مستقیمی با میزان و نوع ماده آلی، نرخ دفن رسوبات و شدت شرایط احیایی دارد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت اکسیژن ستون آب و رسوبات در زمان رسوب‌گذاری ارائه دهد (Raiswell & Canfield, 2012). همچنین ریخت‌شناسی کانی پیریت مانند فرامبوئیدهای ریز (فرامبوئیدی با قطر < 5 میکرومتر) یا بلورهای اوهدری (تجمعی)، اطلاعات ارزشمندی از شدت احیا و زمان تشکیل ارائه می‌دهد. این ویژگی‌ها پیریت را به ابزاری کلیدی در ژئوشیمی آلی تبدیل کرده، جایی که هم‌زمانی آن با ماسرال‌ها، چرخه‌های کربن-گوگرد-آهن را بازتاب می‌دهد (Wilkin et al., 1996; Idrisova et al., 2021).

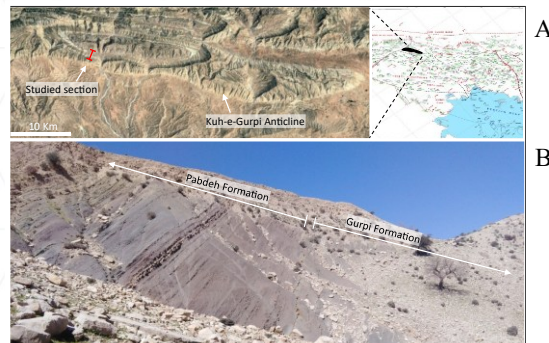
در این میان، پتروگرافی آلی به‌عنوان یکی از روش‌های مهم در مطالعات زمین‌شناسی نفت، امکان بررسی همزمان ماده آلی، کانی‌های همراه و روابط بافتی آن‌ها را فراهم می‌کند (Taylor et al., 1998). این روش با استفاده از مقاطع صیقلی و نور بازتابی، قابلیت شناسایی انواع پیریت، بررسی اندازه، شکل و نحوه پراکندگی آن در ماتریکس سنگی را داشته و نقش مؤثری در تشخیص پیریت اولیه از ثانویه ایفا می‌کند (Suárez-Ruiz et al., 2012). علاوه بر این، پتروگرافی آلی می‌تواند ارتباط فضایی میان پیریت و اجزای ماده آلی را مشخص کرده و در تفسیر شرایط اکسید-احیایی و فرآیندهای دیاژنزی نقش مکملی در کنار داده‌های ژئوشیمی آلی ایفا نماید (Hackley & Cardott, 2016).

سازند پابده یکی از واحدهای مهم و غنی از ماده آلی در حوضه زاگرس به شمار می‌رود که نقش قابل توجهی در سیستم‌های نفتی این حوضه ایفا می‌کند (Alavi, 2004). اگرچه مطالعات متعددی بر روی ویژگی‌های ژئوشیمی آلی این سازند، از جمله میزان ماده آلی و پتانسیل هیدروکربن‌زایی، انجام شده است، اما بررسی دقیق منشأ و شرایط تشکیل کانی پیریت قاعده این سازند، به‌ویژه در برش تنگ هتی و با تکیه بر روش پتروگرافی آلی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، هدف از این پژوهش تحلیل منشأ و شرایط تشکیل کانی پیریت در قاعده سازند پابده در برش الگوی تنگ هتی واقع در تاق‌دیس کوه گوری، به‌منظور تفسیر شرایط اکسید-احیایی و بازسازی محیط رسوبی در زمان نهشت این واحد چینه‌ای است.

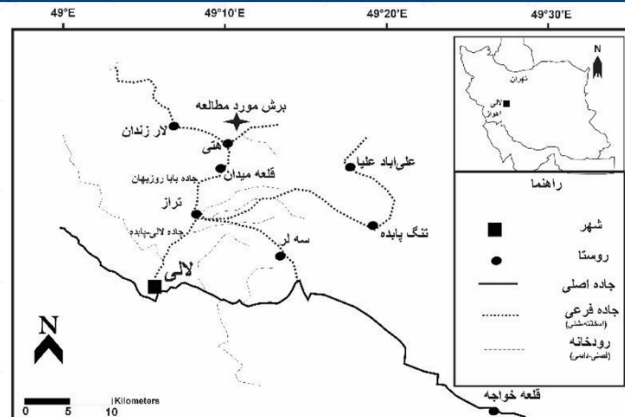
۲- مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی

حوضه رسوبی زاگرس یکی از مهم‌ترین حوضه‌های پیش‌بومی خاورمیانه به شمار می‌رود که در نتیجه همگرایی و برخورد صفحه عربی با صفحه ایران در طی سنوزوئیک شکل گرفته است (Alavi, 2004; Alipour, 2023). این حوضه شامل توالی‌های ضخیم و پیوسته‌ای از رسوبات مزوزوئیک تا سنوزوئیک بوده و به دلیل توسعه گسترده سنگ‌های منشأ، مخزن و پوش سنگ، میزبان سامانه‌های هیدروکربنی بزرگ و متعددی است (Bordenave, 2014; Alipour, 2024). سازند پابده با سن پالئوسن تا الیگوسن، یکی از واحدهای کلیدی سنوزوئیک محسوب می‌شود و به‌عنوان جوان‌ترین سنگ منشأ معرفی شده است؛ هرچند در بخش عمده‌ای از گستره خود هنوز به بلوغ حرارتی مطلوب برای تولید گسترده هیدروکربن نرسیده است (Alipour, 2025d). این سازند عمدتاً از شیل‌ها و مارن‌های ارغوانی تا خاکستری روشن و تیره، همراه با میان‌لایه‌های آهنی تشکیل شده است (James & Wynd, 1965).

برش مورد بررسی در این پژوهش در تنگه هتی و بر روی یال جنوبی تاق‌دیس کوه گورپی واقع شده است (شکل ۱A). از دیدگاه تقسیم‌بندی ساختاری-جغرافیایی، ناحیه مورد مطالعه در زون ایذه از کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس قرار دارد (Motiei, 1993). این برش در حدود ۲۴ کیلومتری شمال‌شرقی شهر لالی در استان خوزستان قرار دارد. دسترسی به رخنمون از طریق جاده لالی-پابده امکان‌پذیر بوده و پس از عبور از مسیر منتهی به شهر تراز و ادامه مسیر در جهت جاده بابرزهان می‌توان به محل مقطع دست یافت (شکل ۲). مختصات جغرافیایی برش مورد مطالعه برابر با طول شرقی $49^{\circ}10'22''$ و عرض شمالی $32^{\circ}31'35''$ است. محدوده مورد مطالعه شامل حدود ۴۷ متر از بخش قاعده‌ای سازند پابده است که عمدتاً از شیل‌های ارغوانی همراه با میان‌لایه‌هایی از مارل خاکستری تشکیل شده است (شکل ۱B). در این برش، مرز میان سازند گورپی و سازند پابده به‌وسیله یک لایه مشخص اکسید آهن با ضخامت تقریبی ۳۵ سانتی‌متر مشخص می‌شود. سازند پابده در برش تنگه هتی بلافاصله بالای این لایه اکسید آهن آغاز شده و با تناوبی از شیل‌های ارغوانی توسعه می‌یابد که بیانگر تغییر شرایط رسوبی در ابتدای نهشت این سازند است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی تاق‌دیس کوه گورپی در برش تنگه هتی (A)؛ عکس از رخنمون سطحی سازند گورپی-پابده در برش تنگه هتی (B).



شکل ۲- موقعیت و مسیر دسترسی به برش تنگ هتی

در این پژوهش، در مجموع ۲۴ نمونه سنگی از بخش قاعده‌ای سازند پابده در رخنمون تنگ هتی برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده پس از انتقال به آزمایشگاه دانشکده علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، جهت انجام مطالعات پتروگرافی آلی مورد آماده‌سازی قرار گرفتند. بدین منظور، قطعاتی با ابعاد تقریبی 10.5×10.5 سانتی‌متر از هر نمونه جدا شده و در قالب‌های مخصوص قرار داده شدند. سپس مخلوط رزین اپوکسی و سخت‌کننده با نسبت دو به یک به قالب‌ها افزوده شد تا نمونه‌ها به‌طور کامل درون رزین تثبیت شوند. پس از گذشت حدود ۲۴ ساعت و تکمیل فرآیند سخت‌شدن اپوکسی، قرص‌های حاصل از قالب خارج شده و مطابق دستورالعمل‌های استاندارد سیقل داده شدند تا سطحی یکنواخت و مناسب برای بررسی‌های میکروسکوپی فراهم گردد (Bustin et al., 1985; Taylor et al., 1998). مطالعات پتروگرافی آلی با استفاده از میکروسکوپ Zeiss Axioplan II انجام شد. بررسی‌ها در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر و در حالت غوطه‌ور در روغن ایمرسیون صورت گرفت. در این مرحله، نوع، ریخت‌شناسی، اندازه و نحوه پراکندگی کانی پیریت در ارتباط با اجزای ماده آلی و ماتریکس سنگی مورد ارزیابی قرار گرفت و تصاویر میکروسکوپی لازم جهت تحلیل‌های بعدی ثبت شد.

۳- بحث

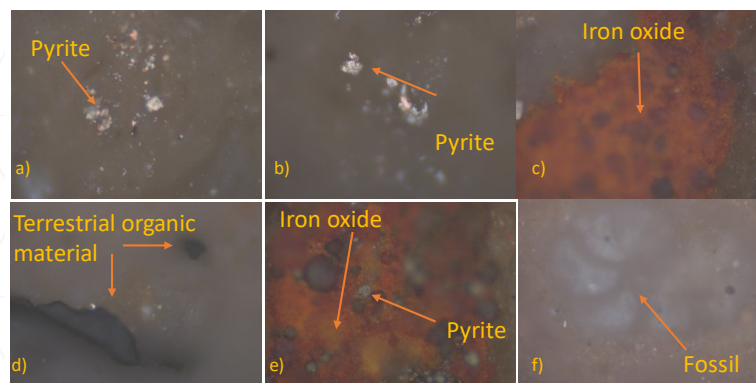
مطالعات پتروگرافی آلی انجام‌شده بر روی نمونه‌های قاعده سازند پابده در برش تنگ هتی نشان می‌دهد که اگرچه کانی پیریت در برخی از نمونه‌ها قابل مشاهده است، اما فراوانی آن پایین بوده و پیریت‌ها به‌صورت پراکنده در ماتریکس سنگی حضور دارند (شکل ۳ a و b). این میزان اندک پیریت، برخلاف آنچه در محیط‌های رسوبی پایداراً احیایی انتظار می‌رود، نشان‌دهنده شرایطی است که برای تشکیل گسترده پیریت اولیه مناسب نبوده است (Berner, 1984). بررسی‌های میکروسکوپی در نور بازتابی نشان می‌دهد که زمینه سنگ‌ها عمدتاً روشن بوده و بیانگر فقر نسبی ماده آلی در این بخش از سازند پابده است (شکل ۳). حضور ماده آلی به‌صورت پراکنده و نابرجا، همراه با غالب بودن ماسرال ویتترینایت (کروژن نوع III) با منشأ گیاهی، بیانگر ورودی محدود و ناپیوسته مواد آلی به حوضه رسوبی است (Bakhtiary Nejad et al., 2026) (شکل ۳ d). از سوی دیگر، مشاهده برخی بلورهای پیریت که آثار اکسیدشدگی در آن‌ها قابل تشخیص است (شکل ۳ e)، شاهدی قوی بر ناپایداری این کانی در محیط رسوبی اولیه و یا قرارگیری آن در معرض شرایط اکسیک پس از تشکیل است (Rickard & Luther, 2007). فراوانی قابل توجه اکسیدهای فلزی در مقاطع بررسی شده نیز این تفسیر را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که محیط رسوب‌گذاری و یا دیاژنز اولیه تحت شرایط غالباً اکسیدان انجام شده است.

در برخی نمونه‌ها، پیریت به‌صورت فرامبوئیدی مشاهده شده است. پیریت فرامبوئیدی به‌طور کلاسیک به‌عنوان شاخصی از محیط‌های آنوکسیک یا احیایی در نظر گرفته می‌شود. با این حال، وجود این نوع پیریت به‌تنهایی برای تفسیر قطعی محیط

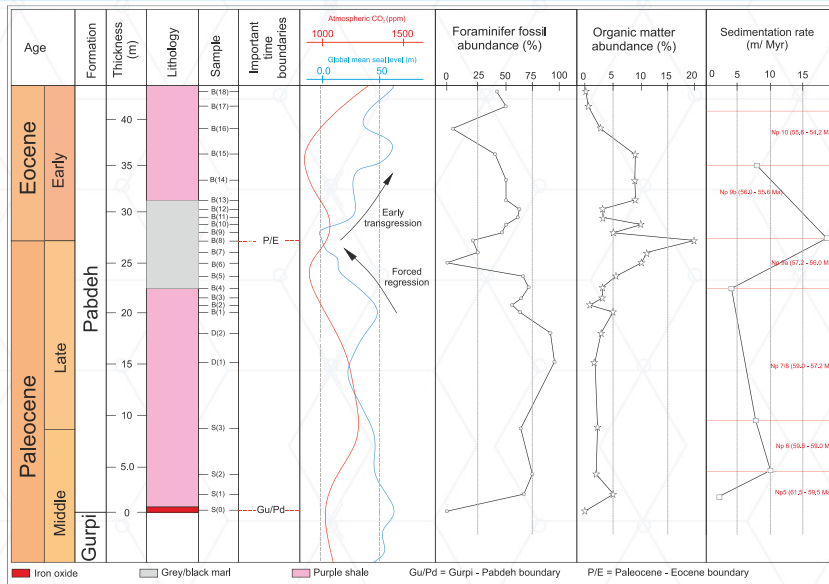
رسوبی احیایی کافی نیست و باید در چارچوب شواهد دیگر سنگ‌نگاری، ژئوشیمی آلی و رخساره‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد (Wilkin et al., 1996). حضور پیریت‌های فرامبوئیدی در نمونه‌های برداشت‌شده از برش تنگ هتی، در زمینه‌ای روشن، فقیر از ماده آلی و همراه با فراوانی قابل توجه اکسیدهای آهن مشاهده می‌شود. این هم‌زمانی نشان می‌دهد که اگرچه در برخی بازه‌های زمانی کوتاه، شرایط احیایی تا نیمه‌احیایی به‌طور موقتی در حوضه رسوبی برقرار شده است، اما این شرایط از پایداری و تداوم کافی برخوردار نبوده‌اند. ناپایداری شرایط احیایی مانع از گسترش محیط‌های کاملاً آنوکسیک شده و تنها امکان تشکیل محدود و موضعی پیریت‌های فرامبوئیدی را فراهم کرده است. از این رو، پیریت‌های فرامبوئیدی مشاهده‌شده در این برش را می‌توان حاصل دوره‌های گذرای کاهش اکسیژن در محیط رسوبی دانست که در ادامه، با بازگشت شرایط اکسیک، تکامل نیافته و به‌صورت پراکنده در ماتریکس سنگی باقی مانده‌اند.

مشاهدات این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین انجام‌شده توسط Bakhtiary Nejad et al. (2026) که به بررسی تغییرات رخساره‌ای، ویژگی‌های ماده آلی و تحلیل نوسانات سطح آب دریا در قاعده سازند پابده در برش تنگ هتی پرداخته‌اند، همخوانی قابل توجهی دارد. بر اساس نتایج Bakhtiary Nejad و همکاران (۲۰۲۶)، افزایش سطح آب جهانی در زمان ته‌نشینی شیل‌های ارغوانی قاعده سازند پابده موجب کاهش نرخ رسوب‌گذاری و محدود شدن ورود مواد آلی گیاهی به حوضه شده است؛ به‌طوری‌که مقدار اندک ماده آلی موجود توانایی احیای آهن آواری را نداشته و در نتیجه رنگ‌های سرخ تا نارنجی رسوبات حفظ شده‌اند. در مقابل، در بازه‌های متناظر مارل‌های خاکستری، با افزایش اسیدیته آب دریا ناشی از آزادسازی گسترده CO₂ طی رخداد گرمایش بیشینه پالئوسن-ائوسن (PETM) در ارتباط است (شکل ۴). اگرچه در این بازه‌ها به‌دلیل افزایش انرژی محیط و نرخ رسوب‌گذاری، ورود مواد آلی گیاهی به حوضه افزایش یافته است (شکل ۴)، اما شواهد پتروگرافی آلی نشان می‌دهد که ماده آلی همچنان به‌صورت پراکنده و نابرجا باقی مانده و شرایط احیایی پایدار و گسترده‌ای در محیط رسوبی برقرار نشده است (Bakhtiary Nejad et al., 2026).

مجموع شواهد پتروگرافی آلی، ویژگی‌های ماده آلی، فراوانی اندک پیریت، وجود اکسیدهای آهن، اکسیدشدگی ثانویه پیریت‌ها و داده‌های رخساره‌ای نشان می‌دهد که محیط رسوب‌گذاری قاعده سازند پابده در برش تنگ هتی به‌طور کلی محیطی اکسیک بوده است. پیریت‌های مشاهده‌شده، به ویژه پیریت‌های فرامبوئیدی، احتمالاً در شرایط احیایی تا نیمه‌احیایی مقطعی و بسیار محدود و کوتاه‌مدت تشکیل شده‌اند. از این رو، حضور پیریت در این برش را نمی‌توان به‌عنوان شاهده قطعی بر احیایی بودن محیط رسوبی پابده در نظر گرفت و تفسیر محیطی باید بر اساس مجموعه‌ای از شواهد چندگانه انجام شود.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از نمونه‌های قاعده سازند پابده



شکل ۴- نمودارهای مقایسه فراوانی فسیل، فراوانی ماده آلی و نرخ رسوب گذاری در توالی مورد مطالعه از قاعده سازند پابده در تنگ هتی (Bakhtiyar) (Nejad et al., 2026).

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی آلی قاعده سازند پابده در برش الگوی تنگ هتی نشان می دهد که کانی پیریت در این بخش از سازند دارای فراوانی اندک و پراکندگی محدود است و عمدتاً به صورت ثانویه و گاه همراه با شواهد اکسیدشدگی مشاهده می شود. فقر نسبی ماده آلی، غالب بودن ماسرال های منشأ گیاهی، حضور گسترده اکسیدهای آهن و روشن بودن زمینه سنگ ها همگی بیانگر غلبه شرایط اکسیک در زمان رسوب گذاری و دیاژنز اولیه این بخش از سازند پابده هستند. اگرچه حضور محدود پیریت های فرامبوئیدی در برخی نمونه ها می تواند نشان دهنده شکل گیری شرایط احیایی کوتاه مدت و موضعی باشد، اما این شرایط به صورت پایدار و گسترده در محیط رسوبی برقرار نبوده است. در مجموع، حضور پیریت در این بخش از سازند بیشتر بازتاب دهنده فرآیندهای محدود و ناپایدار احیایی تا نیمه احیایی یا انتقال ثانویه بوده و نمی توان آن را به عنوان شاخصی قطعی از احیایی بودن محیط رسوب گذاری در نظر گرفت.

۵- مراجع

- Alavi, M. (2004). Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American journal of Science*, 304(1), 1-20.
- Alipour, M. (2023). Collision along irregular plate margin controlled the tectono-stratigraphic evolution of the Iranian Zagros fold and thrust belt: *Marine and Petroleum Geology*, v. 154, p. 106311.
- Alipour, M. (2024). Petroleum systems of the Iranian Zagros Fold and Thrust Belt: *Results in Earth Sciences*, v. 2, p. 100027.
- Alipour, M. (2025d). Source Rocks of the Zagros Fold and Thrust Belt (ZFTB), in Alipour, M., ed., *Basics of Petroleum Geochemistry*, Springer, p. 57-76.

- Bakhtiary Nejad, S., Alipour, M., & Shokri, N. (2026). Impact of the Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM) on organic petrographic characteristics of the basal Pabdeh Formation at Kuh-e-Gurpi Anticline, SW Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 42(1), 1-14.
- Berner, R. A. (1984). Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 48(4), 605-615.
- Bordenave, M. (2014). Petroleum systems and distribution of the oil and gas fields in the Iranian part of the Tethyan region.
- Bustin, R. M., Cameron, A. R., Grieve, D. A., and Kalkreuth, W. D. (1985). *Coal Petrology - its principles, methods, and applications*, 250 p.
- Canfield, D. E., Raiswell, R., & Bottrell, S. H. (1992). The reactivity of sedimentary iron minerals toward sulfide. *American Journal of Science*, 292(9), 659-683.
- Hackley, P. C., & Cardott, B. J. (2016). Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review: *International Journal of Coal Geology*, v. 163, p. 8-51.
- Idrisova, E., Gabitov, R., Karamov, T., Voropaev, A., Liu, M. C., Bogdanovich, N., & Spasennykh, M. (2021). Pyrite morphology and $\delta^{34}\text{S}$ as indicators of deposition environment in organic-rich shales. *Geosciences*, 11(9), 355.
- James, G., and Wynd, J. (1965). Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area: *AAPG bulletin*, v. 49, no. 12, p. 2182-2245.
- Motiei, H. (1993). *Geology of Iran: stratigraphy of Zagros: Geological Survey of Iran, Tehran*, v. 572.
- Raiswell, R., & Canfield, D. E. (2012). The iron biogeochemical cycle past and present. *Geochemical perspectives*, 1(1), 1-220.
- Rickard, D., & Luther, G. W. (2007). Chemistry of iron sulfides. *Chemical reviews*, 107(2), 514-562.
- Rickard, D. (2012). *Sulfidic sediments and sedimentary rocks (Vol. 65)*. Newnes.
- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Mendonça Filho, J. G., & Hackley, P. C. (2012). Review and update of the applications of organic petrology: Part 2, geological and multidisciplinary applications. *International Journal of Coal Geology*, 98, 73-94.
- Taylor, G., Teichmüller, M., Davis, A., Diessel, C., Littke, R., & Robert, P. (1998). *Organic petrology (p. 704): Gebrüder Borntraeger*.
- Wilkin, R. T., Barnes, H. L., & Brantley, S. L. (1996). The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions. *Geochimica et cosmochimica acta*, 60(20), 3897-3912.

نقش کانی‌شناسی و زمین‌شناسی در متالورژی کهن ماسوله، شمال ایران

مرجان نادری نسب^{*1} (دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران)
marjan.naderinasab64@gmail.com

ناهید شبانیان (دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران)

علیرضا داودیان دهکردی (دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران)

سیدمحمدامین امامی (گروه مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان)

صارم امینی (شرکت پژوهشی زمین ریزکاوآن)

چکیده: این پژوهش از نوع مقالات بین‌رشته‌ای است که در حوزه‌های زمین‌شناسی، پترولوژی، باستان‌شناسی و متالورژی کهن انجام شده است. هدف این تحقیق، خروج علم از چارچوب‌های تک‌بعدی و کلاسیک و ارائه تحلیلی جامع برای کمک به محققین در تحلیل بهتر مواد زمین‌شناسی است، لذا تحلیل‌ها و دیدگاه‌ها بر اساس رویکرد پترولوژی انجام گرفته است. منطقه ماسوله از نظر پتانسیل‌های زمین‌شناسی به ویژه در اثر فعالیت‌های تکتونیکی فعال، هم از لحاظ زیبایی‌شناسی و هم از منظر پتانسیل‌های اقتصادی بسیار غنی است. نمونه‌های جمع‌آوری شده از محوطه‌های زمین‌شناسی و باستان‌شناسی ماسوله شامل چهار دسته از مواد زمین‌شناسی می‌شوند: محصولات گداخت کانسنگ آهن (سرباره)، دیواره سنگی کوره، اندود گلی کوره و سنگ‌های حرارت‌دیده در سطح محوطه باستانی که تشابه زیادی با نمونه‌های زمین‌شناسی تشابه دارند. کانه‌زایی آهن در ماسوله به صورت سولفیدی پس از اکسیدشدگی در نتیجه نفوذ سیالات هیدروترمال در رگچه‌ها و شکستگی‌ها، در سنگ‌های میزبان کلسیتی و دولومیتی به صورت جانشینی ایجاد شده است. فرآیند کانه‌زایی در دو نوع هیپوژن (درون‌زاد) و سوپرژن (برون‌زاد) در ارتفاعات ماسوله رخ داده و در سطح زمین به شکل گوسن یا کلاهک‌های آهنی هماتی و گوتیتی قابل مشاهده اند. این رخنمون‌ها نقش اساسی در فرآیندهای متالورژیکی باستان ایفا کرده‌اند این پژوهش شامل بررسی‌های دقیق از مقیاس‌های مختلف: مگاسکوپی، مزوسکوپی، ماکروسکوپی تا تحلیل‌های میکروسکوپی و پتروگرافی را شامل می‌شود. مطالعات بر روی ۶ نمونه جمع‌آوری شده از ماسوله که از دیدگاه‌های ماکروسکوپی (رنگ، تخلخل، اندازه) و بطور کل از نظر پارامترهای فیزیکی و از دیدگاه میکروسکوپی در جهت تغییرات فازی (فازهای فلزی و سیلیسی)، ویزیکول‌ها، قطعات لیتیک، قطعات خرد شده و افزوده، آمورف‌شدگی و شوک حرارتی انجام گرفته است.

کلیدواژه‌ها: کانه‌زایی آهن ماسوله، دگرگونی حرارتی، تغییرات فازی، پترولوژی، متالورژی کهن ماسوله.

The Role of Mineralogy and Geology in Ancient Metallurgy of Masuleh, Northern Iran

Marjan, Naderinasab*1 (Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran)

marjan.naderinasab64@gmail.com

Nahid, Shabanian (Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran)

Alireza Davodian Dehkordi (Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran)

Seyed Mohammad Amin Emami (Historical and Cultural Heritage Conservation Group, Faculty of Conservation and Restoration, Isfahan University of Art)

Sarem Amini (Zamin Rizkavan Research Co)

Abstract

This study is an interdisciplinary, situated at the intersection of geology, mineralogy, archaeology, and ancient metallurgy. The aim of this research is to move beyond traditional, unidimensional frameworks of science and

offer a comprehensive analytical approach to assist researchers in the improved analysis of geological materials. Consequently, the analyses and perspectives have been framed from a petrological standpoint. The Masuleh region, in terms of geological potential—particularly influenced by active tectonic activities—presents both aesthetic and economic richness.

The geological and archaeological samples collected from the Masuleh site can be categorized into four types of geological materials: molten iron ore products (slag), furnace stone walls, clay furnace coatings, and thermally altered stones from the archaeological site, all of which exhibit considerable similarities to geological samples from the region. Iron mineralization in Masuleh occurs in a sulfide form after oxidation due to the infiltration of hydrothermal fluids into veins and fractures, with the mineralization taking place as a replacement in the host rocks of calcite and dolomite.

The mineralization process has occurred in two forms: hypogene (endogenous) and supergene (exogenous) in the Masuleh highlands, and at the surface, it is visible as iron caps or hematite and goethite nodules. These outcrops have played a fundamental role in ancient metallurgical processes.

This research includes detailed investigations at multiple scales: megascopic, mesoscopic, macroscopic, and microscopic, including petrographic analyses. The study focused on six samples collected from Masuleh, considering both macroscopic aspects (color, porosity, size) and overall physical parameters. Microscopic analyses were conducted to examine phase changes (metallic and siliceous phases), vesicles, lithic fragments, shattered and added particles, amorphization, and thermal shock effects.

Keywords: Masouleh Iron Mineralization, Thermal Metamorphism, Phase Changes, Petrology, Ancient Metallurgy of Masouleh.

۱- مقدمه

منطقه ماسوله در شمال غربی ایران، استان گیلان و در ارتفاع حدود ۱۰۵۰ متر از سطح دریا قرار دارد. این منطقه که در نقشه ۱:۲۵۰۰۰ (بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۸۹) ماسوله به صورت دره‌ای میان ارتفاعاتی با قله‌هایی تا حدود ۴۰۰۰ متر شناخته می‌شود، ویژگی‌های ژئومورفولوژیک خاص و پوشش گیاهی متراکم دارد و در نزدیکی دریای خزر و دامنه‌های غربی رشته کوه البرز واقع شده است که به دلیل اقلیم معتدل و مرطوب، بارندگی بالایی دارد. از نظر زمین‌شناسی، ماسوله در پهنه زمین‌ساختی البرز میانی و بین سه استان گیلان، اردبیل و زنجان قرار دارد (شکل ۱-۱) و سنگ‌های منطقه شامل توالی‌های پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک هستند که تحت تأثیر فرآیندهای کوه‌زایی، ماگماتیسم و فعالیت‌های آتشفشانی قرار گرفته‌اند. این سنگ‌ها شامل کربنات‌ها، ولکانیک‌ها و سنگ‌های رسوبی مانند شیل و ماسه‌سنگ هستند. کانسارهای معدنی متنوعی مانند آهن، مس و باریت در این منطقه شناسایی شده‌اند (Pettijohn, 1984; Guilbert, 2015). کانه‌زایی آهن ماسوله سولفیدی، به‌ویژه در مراحل ثانویه، پس از کانه‌زایی اکسیدی و عمدتاً به صورت جانیشینی در رگچه‌های سیلیسی، شکستگی‌ها، و حفرات سنگ میزبان رخ می‌دهد. این کانه‌زایی به دو صورت هیپوژن (درونزاد) و سوپروژن (برونزاد) مشاهده شد (Bamari et al., 2025; Emami, 2021). اندیس‌های معدنی مهم ماسوله در دهرسو، خاله و رگه‌های کانه‌زایی منگنز و باریت واقع شده‌اند. آنها عمدتاً در امتداد گسل‌ها و واحدهای آتشفشانی قرار دارند. فعالیت‌های معدنی و فلزکاری در ماسوله، به‌ویژه در دوران ژوراسیک و پرکامبرین، به دلیل فرآیندهای زمین‌شناسی پیچیده و منابع معدنی منطقه بوده که در کنار شواهد تاریخی، اهمیت ماسوله را به‌عنوان یک مرکز فلزکاری قدیمی برجسته می‌کند (Davies et al., 1972; Firoozi et al., 2010). این منطقه در طول تاریخ به‌عنوان مرکز فلزگری آهن شناخته شده و شواهد باستان‌شناسی از جمله کوره‌های ذوب آهن و سرباره‌های آهن، قدمت فعالیت‌های فلزکاری را تایید می‌کند (مقری، ۱۳۷۴; Robertson, 1840; Goblith, 1770). بنابراین دیدگاه زمین‌باستان‌شناسی یکی از حوزه‌های میان‌رشته‌ای نوظهور محسوب می‌شود که با بهره‌گیری از روش‌ها و مفاهیم علوم زمین، به تحلیل و تبیین مسائل مرتبط با باستان‌شناسی می‌پردازد (مرتضوی مهریزی و فرجامی، ۱۴۰۲) و نیز بر اهمیت به‌کارگیری دانش‌هایی همچون زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، شیمی مواد، معدن‌شناسی، باستان‌شناسی و حتی فیزیک در مطالعات

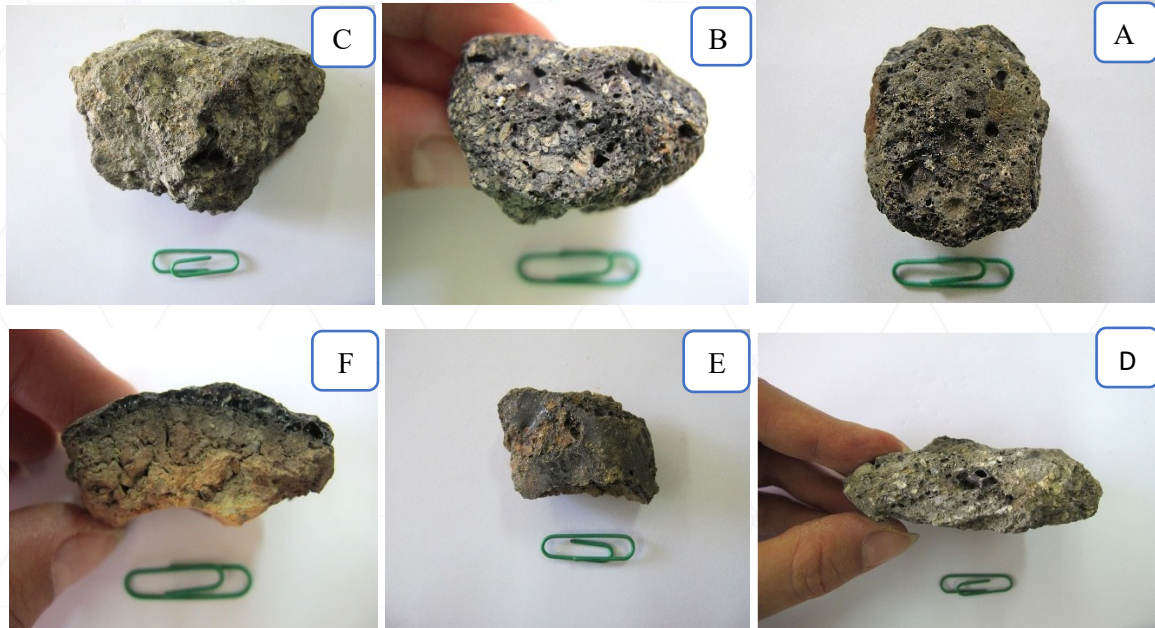
۳- بحث: نمونه KL-TCW-20: از نظر میکروسکوپی ابعاد: $4 \times 6 \times 3/8 \times 3$ سانتی‌متر. این نمونه از دیواره کوره است و دارای سطح مقعر، بافت درشت‌دانه و ویزیکول‌های دایره‌ای و بیضی‌شکل است. شوک حرارتی غیر یکنواخت و آمورف‌شدگی بخشی از نمونه دیده می‌شود. ادخال‌ها لیتیک هستند و اثرات هوازدگی متوسط در آن مشاهده می‌شود. تحلیل میکروسکوپی: شواهدی از هم‌رشدی فازهای فلزی و سیلیسی به صورت بافتی مشابه سیمپلکتیت مشاهده می‌شود (Hauptmann, 2020). ویزیکول‌ها عمدتاً دایره‌ای و گاهی شیاری هستند. در برخی قسمت‌ها، دانه‌های کوارتز با لبه‌های گرد شده و گاهی خرد شده مشاهده می‌شوند (شکل ۱-۲ A, B). نتیجه‌گیری: این نمونه نشان‌دهنده آثار شوک حرارتی و فرآیندهای ذوب و تغییرات فازی ناشی از حرارت شدید است.

نمونه AC-TCW-4: از نظر میکروسکوپی ابعاد: $7/4 \times 5/2 \times 3$ سانتی‌متر. این نمونه از دیواره کوره است و بافت آن شامل دانه‌های متوسط در ماتریکسی ریزدانه است. ویزیکول‌های دایره‌ای، نامنظم و شیاری شکل در آن دیده می‌شوند. تحلیل میکروسکوپی: نفوذ فاز فلزی درون ماتریکس و قطعات سنگی خردشده قابل مشاهده است. ویزیکول‌ها دایره‌ای شکل و نواری-بیضی هستند و تفاوت‌های موجود در ویزیکول‌ها به تفکیک سه محیط مختلف کمک می‌کند. همچنین، در تصاویر بازتابی، حضور آهن فلزی شناسایی شد (شکل ۱-۲ C, D). نتیجه‌گیری: این نمونه نشان‌دهنده اثرات شوک حرارتی و نفوذ فلزات در ماتریکس است که نشان از فرآیندهای ذوب و تاثیرات حرارتی بر ویژگی‌های سنگ‌ها دارد.

نمونه AC-TCT-58: از نظر میکروسکوپی ابعاد: $2/1 \times 3/1 \times 4/3$ سانتی‌متر. این نمونه متعلق به لوله دمنده است و دارای سطح مقعر است. بافت آن درشت بوده و ویزیکول‌های نامنظم و شیاری را نشان می‌دهد. آثار هوازدگی و آمورف‌شدگی به صورت جزئی و یکنواخت در آن دیده می‌شود. تحلیل میکروسکوپی: ویزیکول‌ها عمدتاً دایره‌ای و شیاری هستند و فازهای فلزی اکسید و هیدروکسید آهن در این نمونه شناسایی شده‌اند. همچنین، برخی از سنگ‌های لیتیک به طور کامل دگرگون شده‌اند (شکل ۱-۲ E, F). نتیجه‌گیری: فرآیندهای هوازدگی و تغییرات حرارتی در این نمونه نشان‌دهنده تاثیرات ناشی از دما و فشار در کوره‌ها و لوله‌های دمنده است.

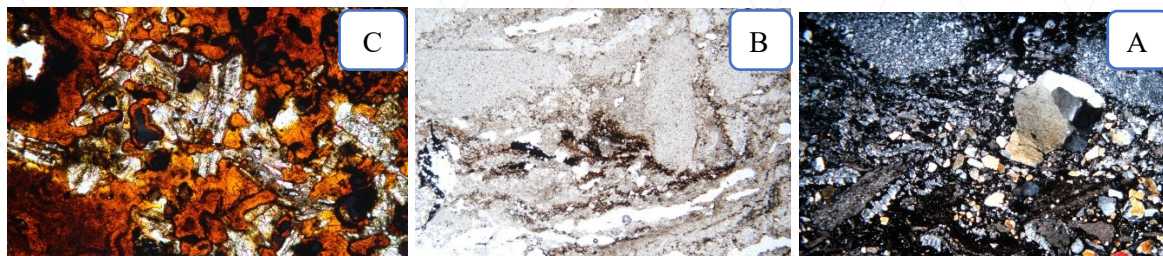
نمونه SK-GS-1: این نمونه سنگی رسوبی یا آهکی است که اثرات سیلیسی شدن در آن مشهود است. کوارتزها به صورت پلی کریستالین با خاموشی موجی و آثار دگرگونی در سنگ‌های رسی مشاهده می‌شوند. تحلیل میکروسکوپی: وجود قطعات کربناتی که با اکسید آهن جانشین شده‌اند و دانه‌های ریز کوارتز نشان‌دهنده تغییرات سیلیسی شدن و دگرگونی است.

نتیجه‌گیری: این نمونه به خاطر فرآیندهای سیلیسی شدن و دگرگونی ناشی از فشار و حرارت در محیط‌های زمین‌شناسی تغییرات فازی و ساختاری را نشان می‌دهد (شکل ۲-۲ A).



شکل شماره ۱-۲: تصاویر A و B از نمونه KL-TCW-20، تصاویر C و D از نمونه AC-TCW-4، تصاویر E و F از نمونه AC-TCT-58. نمونه VK-GS-1: این نمونه سنگی ولکانیکی و آتشفشانی است که ترکیب آن به طور عمده متاولکانیک و شیشه‌ای شده است. تحلیل میکروسکوپی: سیلیسی شدن بخش‌هایی از سنگ، به ویژه کوارتزهای درشت و کشیده، و مشاهده شیشه‌های آتشفشانی مشابه Tachylite در این نمونه، شواهدی از تغییرات فازی در اثر دما و فشار بالا است. نتیجه‌گیری: این نمونه بیانگر فرآیندهای شیشه‌ای شدن و تغییرات متاولکانیکی در اثر فعالیت‌های آتشفشانی است (شکل ۲-۲ B).

نمونه AC-GS-40: این نمونه ترکیبی از شیشه‌های سیلیکاته و فلزات آهنی است. تغییرات در بافت‌های شیشه‌ای و فلزی ناشی از فرآیندهای احیا و اکسیداسیون است. دارای بافت Amibic texture است. تحلیل میکروسکوپی: فشارهای گازی داخلی، ترکیب کانی‌شناسی و شرایط حرارتی باعث شکل‌گیری بافت‌های متخلخل، شیشه‌ای و آمورف شده‌اند. ویزیکول‌ها و مسیره‌های جریان مذاب نشان‌دهنده نوسانات فشار و دما در داخل کوره‌ها هستند (Craddock, 2000). نتیجه‌گیری: این نمونه شواهدی از فرآیندهای احیا و اکسیداسیون و تاثیرات دما و فشار بر بافت‌های شیشه‌ای و فلزی را نشان می‌دهد (شکل ۲-۲ C).



شکل شماره ۲-۲: تصویر میکروسکوپی A با بزرگنمایی 4X از نمونه SK-GS-1، تصویر میکروسکوپی B با بزرگنمایی 10X از نمونه VK-GS-1، تصویر میکروسکوپی C با بزرگنمایی 20X از نمونه AC-GS-40.

۴- نتیجه‌گیری: این پژوهش به بررسی فرآیندهای کانه‌زایی و ذوب کانسنگ‌های آهن در کوره‌های باستانی می‌پردازد. مطالعات پترولوژیکی و کانی‌شناسی اطلاعات جدیدی در مورد فرآیندهای حرارتی، تغییرات فازی و دگرگونی‌های ناشی از سیالات

هیدروترمال در کوره‌های ذوب آهن باستانی ارائه می‌دهد. فرآیندهای ذوب شامل ذوب کامل کانی‌ها و کریستالیزاسیون جزئی در ماتریکس شیشه‌ای است. در کوره‌ها، نوسانات فشار گازی باعث ایجاد بافت‌های متخلخل و ضعف در دیواره‌ها و لوله‌های دمنده می‌شود. بررسی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی نشان می‌دهند که قطعات سنگی خردشده و سفال‌های قدیمی به ماتریکس خمیره اضافه شده و ویزیکول‌ها و شیارهای نامنظم ناشی از سوختن مواد آلی ایجاد شده است. حضور فاز آهن فلزی و تغییرات فازی در نمونه‌ها نشان‌دهنده فرآیندهای حرارتی و آلتراتیو است. این نتایج به درک بهتر فناوری‌های متالورژیکی باستان و ارتباط آن‌ها با محیط ژئولوژیکی منطقه کمک می‌کند. در این راستا، زمینه پژوهشی مقاله، بر شناخت مواد و فرآیندها، از منشأ زمین‌شناسی و رخدادهای کانه‌زایی گرفته تا مرحله گداخت کانسنگ و فرآورده‌های حاصل از آن متمرکز است.

۵- تقدیر و تشکر: در اینجا لازم می‌دانیم از همکاری دکتر فریدون بیگلری و دکتر مجتبی چرمچیان برای راهنمایی‌ها و حمایت‌های علمی‌شان و دکتر مصطفی پورعلی، مهندس رسول فروغی، عاطفه شانی ماسوله، سعید نیرومند، هادی کوهی برای همکاری و کمک‌هایشان در پیشبرد این کار علمی، سپاسگزاریم.

۶- منابع

- امامی، ا. (۱۴۰۰). علم مواد در باستان‌شناسی و باستان‌سنجی؛ با تکیه بر مواد معدنی و فلزی. اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان، ۵۷۴ صفحه.
- بهار فیروزی، خ. و هفت‌لنگ، ر. و شافعی، ع. (۱۳۹۲). گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ ماسوله.
- چرمچیان، م. (۱۴۰۱). گزارش مقدماتی سومین فصل از پژوهش‌های باستان‌شناختی در محوطه‌ی کهنه ماسوله - گیلان، ۳۴۱ صفحه.
- درویش‌زاده، ع. (۱۳۹۴). زمین‌شناسی ایران (چاپ ششم). تهران: انتشارات امیرکبیر، ۴۳۴ صفحه.
- مقری، ع. (۱۳۷۴). گزارش بررسی و گمانه‌زنی در کهنه ماسوله، ۲۲ صفحه.
- مرتضوی مهریزی & فرجامی. (۲۰۲۴). مطالعه پتروگرافی سفالینه‌های باستانی محوطه کهنک سربیشه (خراسان جنوبی) به منظور بررسی ماهیت مواد افزودنی به ماتریکس رسی و تعیین منشأ آن‌ها: کاربردی در راستای زمین‌باستان‌شناسی. دوفصلنامه رسوب‌شناسی کاربردی، 1-23, 12(24), بهار فیروزی، خ. و هفت‌لنگ، ر.، ۱۳۸۹. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ ماسوله، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- Bamari, A., Hosseini, R., & Kalantari, M. (2025). Supergene and hypogene mineralization in iron-bearing formations of Masouleh. *Iranian Journal of Economic Geology*, 18(2), 85–102.
- Craddock, P. T. (2000). From hearth to furnace: Evidences for the earliest metal smelting technologies in the eastern Mediterranean. *Paléorient*, 151-165.
- Davies, C.; Jones, C.; Hamzpour, B; Clark, G. C., (1972). 1:100,000 Geological Map of Masuleh. Tehran: Geological Survey of Iran.
- Goblith, G. S. (2007). *Travels Through Northern Persia 1770–74*. Washington, DC: Mage.
- Guilbert, J. M., & Park Jr, C. F. (2007). *The geology of ore deposits*. Waveland Press.
- Hauptmann, A. (2020). *Archaeometallurgy-Materials Science Aspects*. Cham: Springer International Publishing.
- Pettijohn, F. J. (1984). *Sedimentary Rocks* (3rd ed.). New York: Harper & Row.
- Robinson, J. (1987). The impact of the orient on European thought, 1770–1850. *Culture, Theory and Critique*, 31(1), 102-133.

شیمی کانی کروم اسپینل در هارزبورژیت های مجموعه افیولیتی اشنویه

ایوب ویسی نیا^{۱*}، ایمان منصف^۲، بهمن رحیم زاده^۱، محمد رهگشای

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱، ایران

آدرس پستی نویسنده مسئول a.vaisy69@gmail.com

چکیده

مجموعه افیولیتی شمال شرق اشنویه (افیولیت دالامپر) بخش ناشناخته ای از افیولیت نئو تتیس است که بین افیولیت های پیرانشهر و سلماس در داخل کمربند دگرگونی سندج - سیرجان در شمال غرب ایران قرار دارد. پریدوتیت های سرپانتینی شده، بازالت بالشی، گابرو، سنگ آهک پلاژیک و رادیولاریت همراه با واحدهای رسوبی-آتشفشانی از انواع سنگ های اصلی در این منطقه هستند. پریدوتیت های مجموعه تحت تاثیر دگرسانی گرمایی به صورت کامل و یا بخشی با سرپانتینیت جایگزین شده اند. بافت های موجود در پریدوتیت های دالامپر، همچون جهت یافتگی، کشیدگی و انحنا در بلورها و وجود تیغه های جدایشی کلینوپیروکسن در اورتوپیروکسن نشان می دهد که این سنگ ها در شرایط گوشته بالایی تشکیل و سپس در محیط پوسته ای قرار گرفته اند. داده های به دست آمده از تجزیه نقطه ای بیوین بیانگر میزان بالای فورستریت (Fo) ۹۰-۹۲ است. اسپینل ها دارای عدد منیزیم Mg# بین ۶۴ تا ۶۸، مقادیر بالای عدد کروم Cr# (۷۷-۸۳) و محتوای پایین TiO₂ هستند که نشان دهنده خاستگاه گوشته ای تهی شده آنهاست. ترکیب شیمی کانی کروم اسپینل در هارزبورژیت ها نشانگر آن است که این سنگ ها به پریدوتیت های آبیسال شباهت دارند و در گروه پریدوتیت های تهی شده و پسماندی که باقی مانده های ناشی از جدایش مذاب های با ترکیب مورب می باشند و احتمالاً در یک محیط حوضه پیشانی کمان شکل گرفته اند.

کلیدواژه ها: شیمی کانی، ذوب بخشی، گوشته پسماندی، پریدوتیت، زون فرا فرورانش.

The mineral chemistry of Cr-spinel in Harzburgite from Oshnavieh ophiolitic complex

Ayoub Veisinia^{1*}, Iman Monsef², Bahman Rahimzadeh¹, Mohammad Rahgoshay¹

¹ Department of Mineral Resource and Groundwater, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran, a.vaisy69@gmail.com

² Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract

The Northeast Oshnavieh ophiolite complex (Dalampar ophiolite) is an unknown part of the Neo-Tethys ophiolite located between the Piranshahr and Salmas ophiolites within the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt in northwestern Iran. Serpentinized peridotites, pillow basalt, various gabbro, pelagic limestone, and radiolarite along with volcano-sedimentary units are the main rock types in the area. Peridotite rocks in the complex were replaced by serpentinite completely or partly due to hydrothermal alteration. Textures such as orientation and elongation of crystals, clinopyroxene exsolution lamellae in orthopyroxenes and different generations of minerals in these rocks show that they have been formed in the upper mantle and then emplaced in the crust. The chrome spinels have Mg# (64-68), high Cr# (77-83), and very low TiO₂ amount, which is show the chromium spinels

belong to the mantle and have ophiolitic and depleted nature. The mineral chemistry of Cr-spinel in Harzburgite shows that these rocks are similar to abyssal peridotites and belong to depleted and residual peridotites remaining after the extraction of mid-ocean ridge basalt (MORB) and they were likely formed in a forearc basin setting.

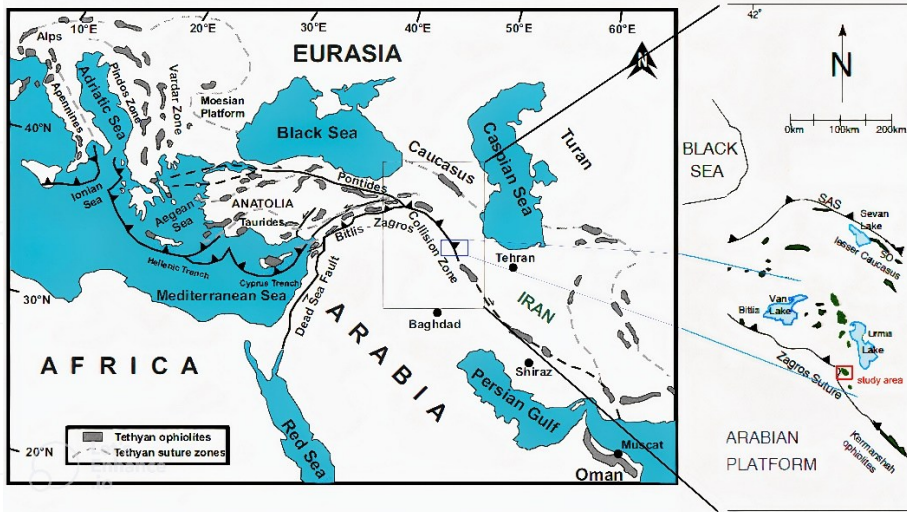
Keywords: mineral chemistry, partial melting, residual mantle, peridotite, Suprasubduction zone.

۱- مقدمه

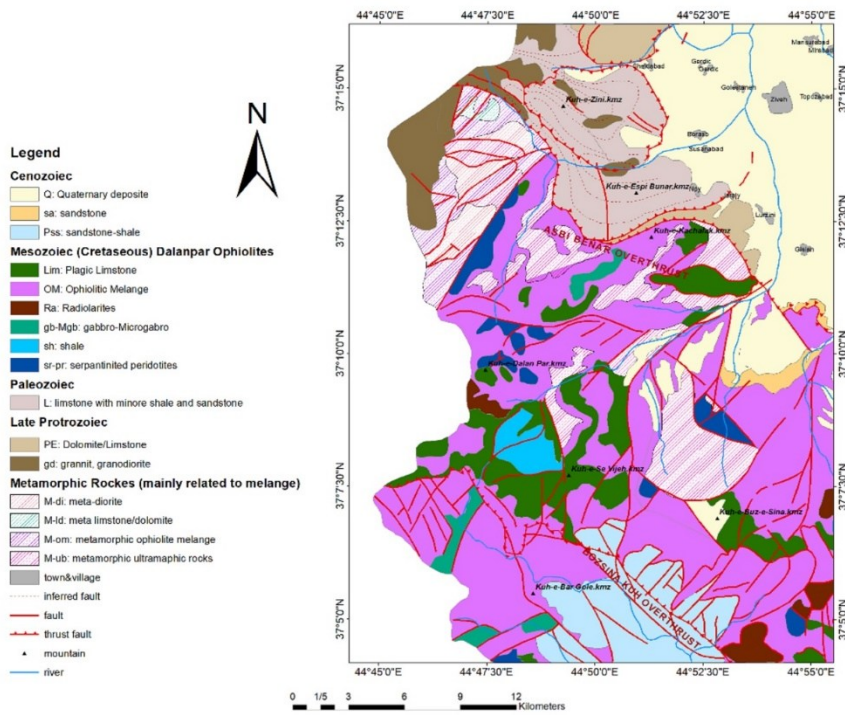
متن بخش‌هایی از لیتوسفر اقیانوسی قدیمی که در کمربندهای کوهزایی حفظ شده‌اند، مجموعه‌های افیولیتی را تشکیل می‌دهند که آرشیوهای سه بعدی برای بررسی محصولات فرآیندهای ژئوشیمیایی، ماگمایی، متاسوماتیک و تکتونیکی که در مراکز گسترش کف دریا و محیط‌های منطقه فرورانش در گذشته زمین عمل می‌کردند را، فراهم می‌کنند (Furnes et al., 2018; Dilek and Yang, 2015). بررسی داده‌های کانی‌شناختی و سنگ‌شناختی واحدهای گوناگون سنگی گوشته بالایی در مجموعه‌های افیولیتی، برای ارزیابی فرآیندهای تأثیرگذار در پیدایش مجموعه افیولیتی، تعیین دما و فشار تعادلی و شناخت جایگاه زمین‌ساختی آن‌ها اهمیت بسیاری دارد. با وجود پیچیدگی فراوان ویژگی‌های زمین‌شناسی پریدوتیت‌ها، داده‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی موجود در این سنگ‌ها برای تشخیص جایگاه ژئوتکتونیکی و تعیین دما و فشار تعادلی مجموعه‌های افیولیتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Ahmed et al., 2005).

زمین‌شناسی عمومی و صحرایی

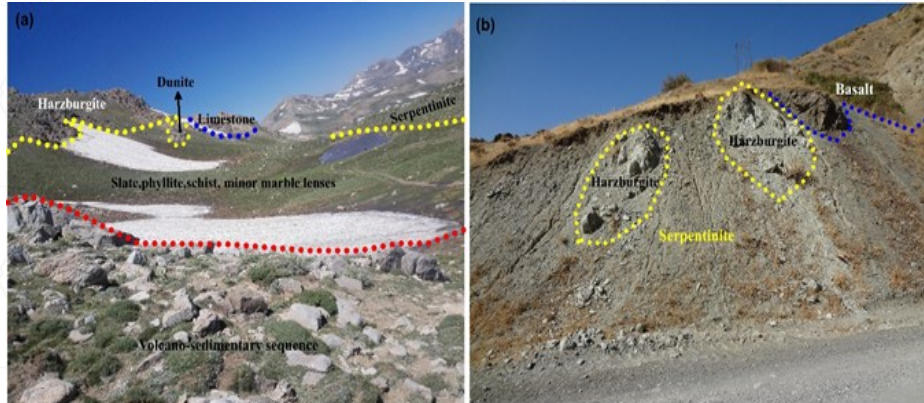
زمین درز نئوتتیس منطبق بر گسل اصلی راندگی زاگرس بوده (Agard et al., 2005) و افیولیت‌ها در امتداد این منطقه به صورت پراکنده قرار دارند (شکل ۱). تحولات تکتونیکی اقیانوس نئوتتیس در شمال غرب زاگرس خیلی پیچیده بوده و با وجود پژوهش‌های انجام گرفته (Ao et al., 2020; Hassanzadeh and Wernicke, 2016) هنوز اطلاعات ما در این باره کم می‌باشد. به طور خاص برخی از افیولیت‌های شمال غرب زاگرس در امتداد مرز ایران-عراق-ترکیه، با این که فاقد سن‌های ایزوتوپی هستند می‌توانند حاوی اطلاعات مهم و ارزشمندی درباره تاریخچه تشکیل و انباشت افیولیت‌ها در این قسمت از کوهزاد زاگرس باشند (Ao et al., 2020). مکانیسم جایگیری توده‌های افیولیتی اشنویه بر روی خرد قاره ایران و تکامل ساختاری آن هنوز ناشناخته است و به خوبی درک نشده است. ملائز افیولیتی دالامپر به عنوان بخشی از افیولیت اشنویه در تقسیم بندی زون‌های ساختاری ایران توسط Ghasemi و Talbot (2006) در محدوده سنندج سیرجان واقع شده است (شکل ۲). در منطقه دالامپر مجموعه‌ای از افیولیت‌های زاگرس با واحدهای متناوب سنگی و رخنمون‌های گسترده وجود دارند. در آمیزه رنگی دالامپر که روستاهای کچله، سوسن آباد، سوره دوکل، پروانه، چریک آباد و گند ملاءعیسی را شامل می‌شود: مجموعه‌ای از سنگ‌های الترامافیک سرپانتینیته شده (هارزبورژیت و دونیت) با ساختار ورقه‌ای و به رنگ سبز روشن تا تیره، خاکستری و سیاه رنگ، انواع مختلف گابرو (میکروگابرو، پگماتیت گابرو)، بازالت، دیوریت، دیاباز، توف‌های آتشفشانی، شیل، چرت‌های رادیولاریت دار و سنگ آهک پلاژیک گلوبوترونکانایی (Arabshahi and Sabzeie, 2013) همراه با مقداری سنگ‌های دگرگونه با همبری گسله، واحد افیولیتی منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۳ a). سنگ‌های هارزبورژیتی گسترده ترین واحد سنگی مجموعه پریدوتیتی منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند (شکل ۳ b). در نمونه دستی، این سنگ‌ها در قسمت‌های هوازده، به رنگ قهوه‌ای بوده و در سطوح شکست تازه به رنگ سیاه تا سبز تیره دیده می‌شوند. پریدوتیت‌ها در امتداد مناطق برشی و شکستگی‌ها در اثر دگرسانی خرد شده و اغلب به سرپانتینیته تبدیل شده‌اند.



شکل ۱: نقشه تکتونیکی ساده شده نواحی شرق مدیترانه که توزیع افیولیت های نئوتتیس و زمین درزها را نشان می دهد (Dilek et a.,2007).



شکل ۲: نقشه زمین شناسی ساده شده ملانژ افیولیتی دالامپر.



شکل ۳: (a) نمای کلی ملائز افیولیتی دالامپر و مرز تدریجی بین این واحد و واحد دگرگونی؛ (b) رخنمون سنگ‌های هارزبورژیتی (Hz).

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی شیمی کانی‌ها، تعداد 3 مقطع نازک- صیقلی از نمونه‌های هارزبورژیتی تهیه شد. پس از مشخص کردن کانی‌های مورد نظر برای آنالیز نقطه‌ای به روش میکروپروب و پس از انجام پوشش کربنی، از کانی‌های مزبور توسط دستگاه میکروسوند الکترونی مدل JEOL.JXA-8600 در دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن با ولتاژ ۲۰ کیلو وات و جریان 2×10^{-8} آمپر با روش WDS انجام شد. قطر پرتوی الکترونی ۵ میکرون و غلظت داده‌ها بر اساس برنامه کامپیوتری ZAF محاسبه شده‌است.

۳- بحث

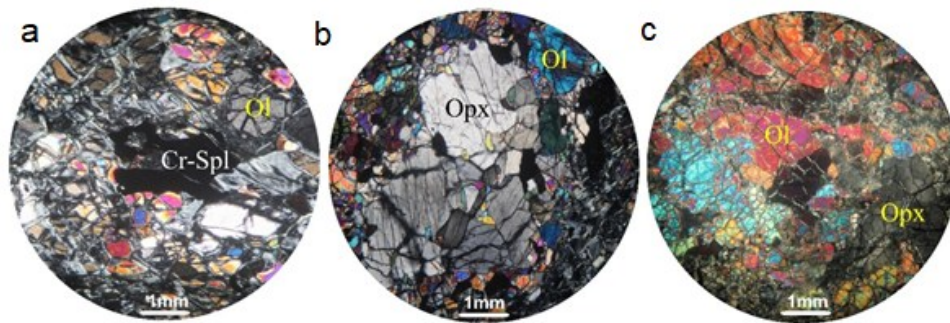
سنگ نگاری

هارزبورژیت: این سنگ‌ها از نظر ترکیب کانیایی دارای الیوین (۶۰-۷۰ درصد)، ارتوپیروکسن (۱۰-۲۰ درصد) و کروم اسپینل (حدود ۲-۵ درصد) هستند. هارزبورژیت‌ها دارای بافت گرانولار (مشبک) و پورفیروکلاست می‌باشند (شکل ۴a). بافت اولیه الیوین‌ها دانه‌ای بوده و به شدت شکسته شده‌اند که در امتداد این شکستگی‌ها سرپانتین تشکیل شده‌است. کلینوپیروکسن بی‌شکل بوده و بقایای آن خیلی کم و به صورت بین‌بلوری در بین الیوین و ارتوپیروکسن‌ها دیده می‌شوند. ارتوپیروکسن‌ها دارای حواشی سینوسی و به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار، خرد شده و در برخی موارد دگرشکل دیده می‌شوند (شکل ۴b). حضور شکنج در الیوین (شکل ۴c)، ارتوپیروکسن‌های دانه‌درشت و کلینوپیروکسن‌ها را می‌توان دال‌بر تغییر شکل پلاستیک گوشته‌ای در دمای بالا دانست. اسپینل‌ها نیز عمدتاً بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و به رنگ قرمز تا قهوه‌ای هستند.

شیمی کانی

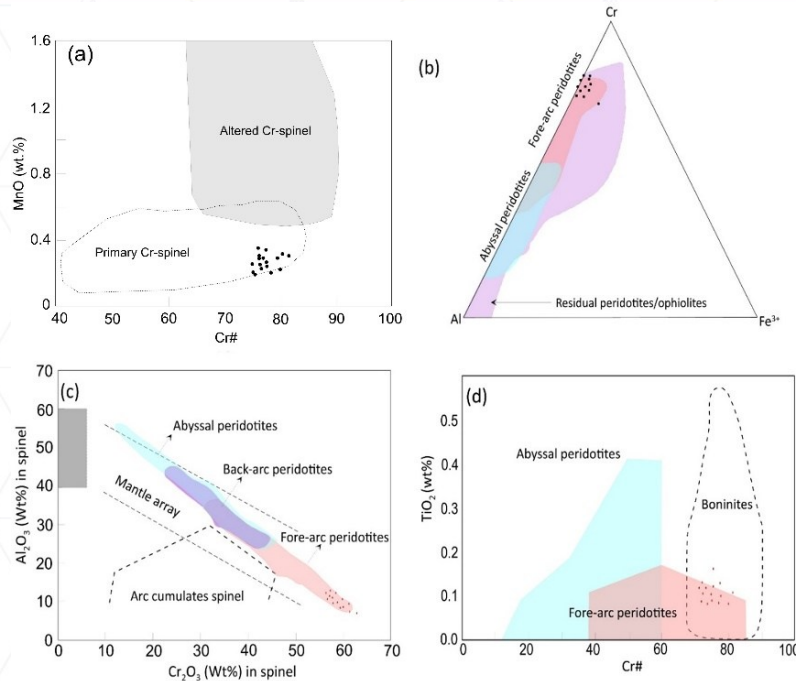
کروم اسپینل

مقادیر عدد کروم (Cr#) و عدد منیزیم (Mg#) در کروم اسپینل‌ها به ترتیب از ۷۷ تا ۸۳ و ۶۴ تا ۶۸ درصد تغییر می‌کند. میزان تغییرات Al_2O_3 و Cr_2O_3 نیز به ترتیب بین ۸-۱۲ و ۴۵-۵۹ درصد وزنی است. دیک و بولن (Dick and Bullen, 1984) اسپینل‌های غنی از کروم و فقیر از آلومینیوم را به‌عنوان بازمانده و تفاله فرآیندهای ذوب بخشی گوشته در شرایط ذوب بالا و یا به‌عنوان محصول تبلور بخشی در نظر می‌گیرند. در نمودار Cr# در مقابل MnO اسپینل‌ها در محدوده اسپینل



شکل ۴: (a) بافت مشبک و بقایای الیوین در میان شبکه های سرپانتینی؛ (b) کشیدگی بلور ارتوپيروكسن دارای نوارهای شکنجی، حاشیه سینوسی و خلیج خوردگی؛ (c) ساختار کینک باند (نوار شکنجی) در پورفیروکلاست های الیوین دارای ساختار کشیده.

های اولیه قرار می‌گیرند (شکل a ۵). بررسی کروم اسپینل‌ها در نمودار سه تایی $Cr-Al-Fe^{3+}$ (Proenza et al., 2007) نیز نشان می‌دهد که این کانی‌ها از نوع افیولیتی بوده و دارای ماهیت پسماندی هستند (شکل b ۵). بنا بر بررسی‌های کامنتسکی و همکاران (Kamenetsky et al., 2001)، کروم اسپینل‌ها با میزان پایین $Cr\#$ و Al_2O_3 بالا و مقادیر پایین TiO_2 اسپینل‌هایی را نشان می‌دهند که از یک پسماند با ترکیب MORB متبلور شده‌اند، در حالی که اسپینل‌های با میزان بالای $Cr\#$ نشانگر تبلور از گدازه‌های بونینیتی است که خود حاکی از محیط زمین‌ساختی فرورانشی است. پریدوتیت‌های شکل گرفته در محیط های SSZ با حضور کروم اسپینل‌هایی با عدد کروم $Cr\#$ بسیار بالاتر از آنچه در پریدوتیت‌های پشته‌های میان اقیانوسی موجود است، از یکدیگر جدا می‌شوند. مقادیر $Cr\#$ اسپینل‌ها در هارزبورژیت‌های مورد مطالعه، پریدوتیت‌های فرافروانش را در بر می‌گیرد و همپوشانی کاملی با مقادیر $Cr\#$ اسپینل در پریدوتیت‌های حوضه‌های پیشانی قوس دارد. بر این اساس کروم اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌های افیولیت دالامپر در نمودار Cr_2O_3 در برابر Al_2O_3 (Kepezhinskas et al., 1995)، علاوه بر اینکه دارای آرایه گوشته‌ای بوده در قلمرو جلو قوس نیز قرار می‌گیرند (شکل c ۵). در نمودار TiO_2 در برابر $Cr\#$ ، نیز نمونه‌ها در محدوده پریدوتیت‌های جلو قوس و بونینیتی قرار گرفته‌اند (شکل d ۵).



شکل ۵: (a) ویژگی‌های ژئوشیمیایی کروم اسپینل در نمودار MnO در برابر Cr# (Khedr and Arai, 2017); (b) نمودار سه تایی Cr-Al-Fe³⁺ ترکیب کانی کروم اسپینل (Barnes and Roeder, 2001); (c) نمودار عدد کروم Cr# در برابر TiO₂ (Jan and Windley, 1990); (d) نمودار Al₂O₃ در برابر Cr₂O₃ محدوده‌ها از (Arai et al., 2004).

۴- نتیجه‌گیری

شواهد صحرایی، سنگ نگاری و شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که توالی گوشته‌ای افیولیت دالامپر، تحولی چند مرحله‌ای را تجربه کرده است، به گونه‌ای که در مرحله اول در یک محیط پشت‌زمین اقیانوسی تشکیل و سپس به محیط مرتبط با فرورانش منتقل شده و تحت تأثیر سیال‌های برخاسته از پوسته فرورونده قرار گرفته است. بررسی شیمی کانی کروم اسپینل و الیون که کانی باقی‌مانده از پریدوتیت‌های گوشته اولیه در نظر گرفته می‌شوند، نشان می‌دهد که کروم اسپینل‌ها غنی از Cr بوده و مقادیر پایین Ti و Al دارند که مشابه با کروم اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌های جلو قوس هستند. شیمی کانی کروم اسپینل در هارزبورژیت‌ها بیانگر این است که مذاب بونینیتی وابسته به محیط جلوی قوس مسئول شکل‌گیری کانی کرومیت با Cr# و Mg# بالا و مقدار پایین Ti و Al در هارزبورژیت‌های افیولیت دالامپر است.

۵- مراجع

- Ahmed A.H., Arai S., Abdel-Aziz Y.M. and Rahimi A., 2005. Spinel composition as a petrogenetic indicator of the mantle section in the NW Eoproterozoic Bou Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco, Precambrian Research, 138, 225-234.
- Ao, S., Mao, Q., Khalatbari-Jafari, M., Windley, B.F., Song, D., Zhang, Z., Zhang, J., Wan, B., Han, C. and Xiao, W., 2020. U-Pb age, Hf-O isotopes, and geochemistry of the Sardasht ophiolite in the NW Zagros orogen: Implications for the tectonic evolution of Neo-Tethys. Geological Journal 56, 1315-1329.

- Arabshahi, A. H., Sabzei, M., 2013. Geological 1:25000 map of Silvaneh1. No.4964 II NW: Geological Survey of Iran. Tehran.
- Arai, S., Uesugi, J., Ahmed, A.H., 2004. Upper crustal podiform chromitite from the northern Oman ophiolite as the stratigraphically shallowest chromitite in ophiolite and its implication for Cr concentration. *Contrib. Miner. Petrol.* 147, 145-154.
- Barnes, S.J., Roeder, P.L., 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *J. Petrol.* 42, 2279–2302.
- Dick, H. J. B. and Bullen, T., 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86: 54-76.
- Dilek, Y., Yang, J. S., 2018. Ophiolites, diamonds, and ultrahigh-pressure minerals: new discoveries and concepts on upper mantle petrogenesis *Lithosphere*, 10,3-13.
- Furnes, H., Dilek, Y., de Wit, M., 2015. Precambrian greenstone sequences represent different ophiolite types *Gondwana Res.*, 27,649-68.
- Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 683-693.
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B. P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35,586-621.
- Jan, M.Q., Windley, B.F., 1990. Chromian spinel-silicate chemistry in ultramafic rocks of the Jijal Complex, northwest Pakistan. *J. Petrol*, 31, 667-715.
- Kamenetsky, V. S., Crawford, A. J., Meffre, S., 2001. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology* 42: 655-671.
- Kepezhinskas, P. K., Defant, M. J. and Drummond, M. S., 1995. Na metasomatism in the island-arc mantle by slab melt-peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the North Kamchatka arc. *Journal of petrology* 36: 1505-1527.
- Khedr, M.Z., Arai, S., 2017. Peridotite–chromitite complexes in the Eastern Desert of Egypt: insight into Neoproterozoic sub-arc mantle processes. *Gondwana Research*, 52, 59-79.
- Proenza, J. A., Zaccarini, F., Lewis, J. F., Longo, F. and Garuti, G., 2007. Chromian spinel composition and the platinum-group minerals of the PGE-rich Loma Peguera chromitites, Loma Caribe peridotite, Dominican Republic. *The Canadian Mineralogist* 45: 631-648.

ویژگی های ماگمایی و زمین-دما فشار سنجی سنگ های گابرویی ملانژ افیولیتی اشنویه

ایوب ویسی نیا^{۱*}، ایمان منصف^۲، بهمن رحیم زاده^۱، محمد رهگشای^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱، ایران

آدرس پستی نویسنده مسئول a.vaisy69@gmail.com

چکیده

مجموعه افیولیتی شمال شرق اشنویه (افیولیت دالامپر) بخش ناشناخته ای از افیولیت نئو تتیس است که بین افیولیت های پیرانشهر و سلماس در داخل کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان در شمال غرب ایران قرار دارد. پریدوتیت های سرپانتینی شده، بازالت بالشی، گابرو، سنگ آهک پلاژیک و رادیولاریت همراه با واحدهای رسوبی-آتشفشانی از انواع سنگ های اصلی در این منطقه هستند. کانی های اصلی سنگ های گابرویی شامل پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن می باشند. از کانی های ثانوی نیز می توان به سرسیت، کلریت، کربنات، ترمولیت و اکتینولیت اشاره کرد. بررسی های کانی‌شناسی و زمین‌دماسنجی کلینوپیروکسن و پلاژیوکلازها نشان می‌دهند که گابروها در دمای ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد پدید آمده‌اند. ترکیب شیمیایی کانی های پیروکسن، بیانگر تبلور آن ها از یک ماگمای دارای فوگاسیته اکسیژن بالا می باشد.

کلیدواژه‌ها: شیمی کانی، زمین دما فشار سنجی، محیط زمین ساختی، فرورانش، دالامپر.

Magma signification and geothermobarometry of Gabbroic rocks of the Oshnavieh ophiolitic mélange

Ayoub Veisinia ^{1*}, Iman Monsef ², Bahman Rahimzadeh ¹, Mohammad Rahgoshay¹

¹ Department of Mineral Resource and Groundwater, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran,
a.vaisy69@gmail.com

² Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract

The Northeast Oshnavieh ophiolite complex (Dalampar ophiolite) is an unknown part of the Neo-Tethys ophiolite located between the Piranshahr and Salmas ophiolites within the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt in northwestern Iran. Serpentinized peridotites, pillow basalt, various gabbro, pelagic limestone, and radiolarite along with volcano-sedimentary units are the main rock types in the area. The main minerals of gabbroic rocks include plagioclase and clinopyroxene. Secondary minerals include Sericite, chlorite, carbonate, tremolite, and actinolite. Mineralogical and geothermometry studies of the clinopyroxene and the plagioclase from the gabbro reveal that these rocks have originated at 900 to 1100 °C. The chemical composition of pyroxene minerals indicates their crystallization from a magma with high oxygen fugacity.

Keywords: Mineral chemistry, Geothermobarometry, Tectonic setting, Subduction, Dalampar.

۱- مقدمه

استفاده از ترکیب شیمیایی کانی‌ها برای برآورد شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تبلور توده‌های ماگمایی و جایگزینی نهایی آنها در پوسته، یکی از موضوعات مهم در سنگ‌شناسی آذرین است. به باور بسیاری از پژوهشگران، ترکیب شیمیایی کانی‌های سازنده سنگ از سری ماگمایی سنگ میزبان پیروی می‌کنند. از اینرو بررسی‌های سنگ‌نگاری و شیمی کانی‌ها از بهترین راه‌های شناخت فرآیندهای ماگمایی است که شرایط تبلور و فرآیندهای تأثیرگذار بر تبلور کانی‌ها را با دقت بیشتری توضیح می‌دهد. به این منظور، پژوهشگران از کانی‌های مختلفی چون پیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز استفاده می‌کنند. در این پژوهش، شیمی کانی‌ها، دما، فشار و گریزندگی اکسیژن ماگمای مادر سنگ‌های گابرویی ملانژ افیولیتی دالامپر و محیط زمین‌ساختی ماگمایی تشکیل دهنده آنها بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

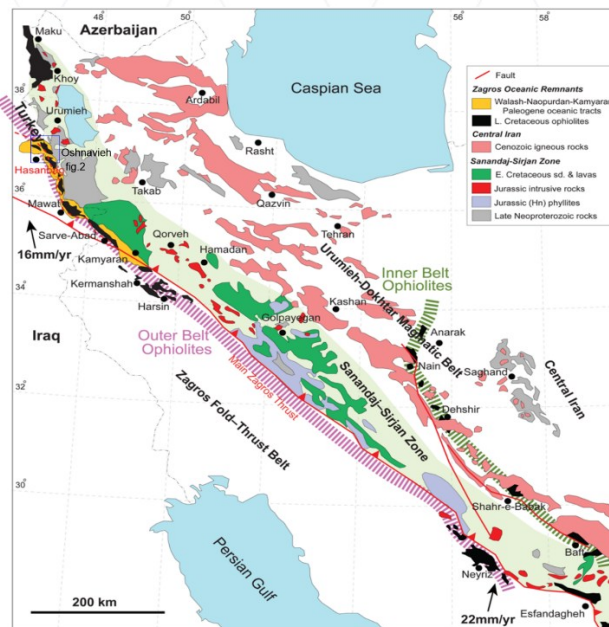
در جریان بازدیدهای صحرایی ضمن جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی تعداد ۴۰ نمونه از واحدهای سنگی افیولیت دالامپر (پریدوتیت و گابروها) که دارای حداقل هوازدگی و دگرسانی بودند برای تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی و همچنین تجزیه شیمیایی کانی‌ها انجام گرفت. مطالعات سنگ‌نگاری مقاطع نازک و نازک-صیقلی میکروسکوپی به منظور تعیین بافت سنگ‌ها و ریز ساختارهای آنها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان دو منظوره GX انجام گردید. سپس از تعدادی از نمونه‌های گابرویی، مقاطع نازک-صیقلی به تعداد ۱۰ نمونه، تهیه و پس از مشخص کردن کانی‌های مورد نظر برای آنالیز نقطه‌ای به روش میکروپروپ و پس از انجام پوشش کربنی، از کانی‌های مزبور توسط دستگاه میکروسوند الکترونی مدل JEOL.JXA-8600 در دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن با ولتاژ ۲۰ کیلو وات و جریان 2×10^{-8} آمپر با روش WDS انجام شد. قطر پرتوی الکترونی ۵ میکرون و غلظت داده‌ها بر اساس برنامه کامپیوتری ZAF محاسبه شده است.

۳- بحث

زمین‌شناسی عمومی و منطقه

کوهزاد زاگرس نتیجه بسته شدن نئوتتیس جنوبی بوده و بین صفحات ایران و عربی قرار گرفته است (Alavi 1994). افیولیت‌ها که بقایای لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس هستند در امتداد این کوهزاد قرار گرفته‌اند و شامل دو کمربند اصلی هستند: کمربند افیولیتی زاگرس داخلی شامل مناطق خوی-نابین-شهربابک-دهشیر-بافت که بین سسندج-سیرجان و ایران مرکزی قرار گرفته‌اند و کمربند افیولیتی زاگرس خارجی که شامل مناطق اشنویه-کردستان-کرمانشاه-نیریز و حاجی آباد بوده و بین سسندج-سیرجان و زاگرس قرار گرفته‌اند (شکل ۱) (Shafaii Moghadam and Stern, 2011). هنوز دیدگاه‌های متفاوتی درباره چگونگی تکامل نئوتتیس در زاگرس به ویژه زمان بسته شدن و برخورد پایانی آن وجود دارد و اطلاعات ما در این باره کم می‌باشد و نیازمند درک بهتر از این افیولیت‌هاست. به طور خاص برخی از افیولیت‌های شمال غرب زاگرس از جمله آمیزه افیولیتی دالامپر در امتداد مرز ایران-عراق-ترکیه، می‌توانند حاوی اطلاعات مهم و ارزشمندی درباره تاریخچه تشکیل و انباشت افیولیت‌ها در این قسمت از کوهزاد زاگرس باشند (Ao et al., 2020). منطقه دالامپر در نقشه زمین‌شناسی 1:10000 سیلوانا (Hajmolla Ali et al., 2006) در جنوب ارومیه بین طول‌های جغرافیایی $44^{\circ} 45'$ و $44^{\circ} 55'$ و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 5'$ و $37^{\circ} 15'$ قرار دارد (شکل ۲). در منطقه دالامپر مجموعه‌ای از افیولیت‌های زاگرس با واحدهای متناوب سنگی و رخنمون‌های گسترده وجود دارند. از نظر ساختاری این منطقه به پنج زیر زون تقسیم شده است: زون آمیزه افیولیتی (OMZ) که توسط گسل معکوس اسبی بنار از شمال با زون‌های فروافتادگی سیلوانه-زیوه (SZD)، واحد پرکامبرین-پالئوزوئیک (Pr-Pz) و واحد مولاس (Mo) هم مرز بوده و از جنوب با زون آمیزه افیولیتی-رسوبی (SOZ) و زون دگرگونه

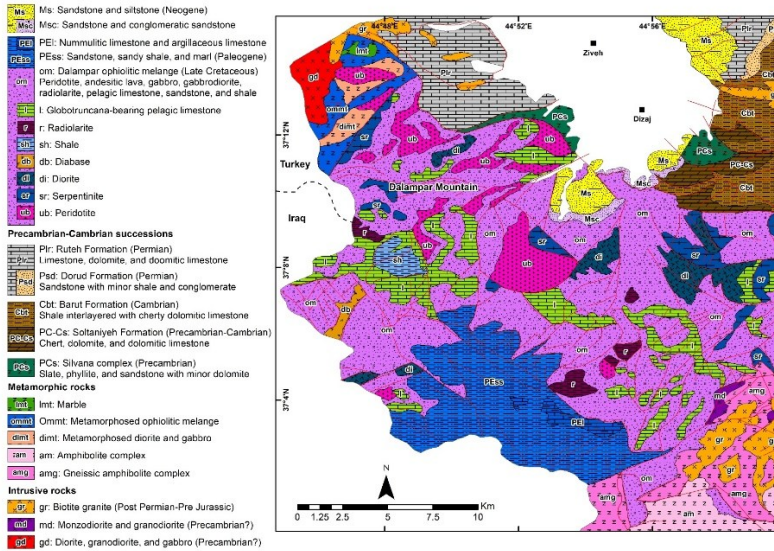
(MZ) مجاور است (Hajmolla Ali et al., 2006). در آمیزه رنگی دالامپر که روستاهای کچله، سوسن آباد، سوره دوکل، پروانه، چریک آباد و گند ملاعیسی را شامل می‌شود: مجموعه‌ای از سنگ‌های الترامافیک سرپانتینیته شده (هارزبورژیت و دونیت) با ساختار ورقه‌ای و به رنگ سبز روشن تا تیره، پیروکسنیت، انواع مختلف گابرو (میکروگابرو، پگماتیت گابرو)، بازالت، دیوریت، دیاباز، توف‌های آتشفشانی، شیل، چرت‌های رادیولاریت دار و سنگ‌آهک پلاژیوک گلوبوترونکانایی همراه با مقداری سنگ‌های دگرگونه با همبری گسله، واحد افیولیتی منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۳ a). در نقاط مختلف دایک و توده‌های مافیک از جنس گابرو، دیوریت و گرانیت به فراوانی در ملانژ افیولیتی دیده شده و در آن نفوذ نموده‌اند. در بیشتر موارد به دلیل قطع امتداد دایک‌ها توسط گسل در سطح رخنمون بیشتر از یک الی چند متر قابل مشاهده نیستند که شاهدی دیگر بر گسل خوردگی و فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید در آمیزه دالامپر می‌باشد. گابروها به دو صورت دانه‌درشت با بافت پگماتوئیدی و گابروهای ریزبلور به صورت توده‌ای و دایک قابل تفکیک هستند (شکل ۳ b, c). گابروها مزوکرات بوده و دارای ساخت توده‌ای و متراکم هستند و در نمونه دستی عمدتاً متوسط تا درشت دانه می‌باشند. گابروها تحت تأثیر نیروهای برشی و چین خوردگی می‌لونیته شده‌اند (شکل ۳ d).



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده شده ایران که افیولیت‌های کرتاسه پایانی کمربند داخلی و خارجی زاگرس، زون سنندج-سیرجان، کمربند ماگمایی ارومیه-دختر و سنگ‌های نئوپروتروزئیک پایانی را نشان می‌دهد (Azizi et al., 2018).

۳-۱. سنگ نگاری

به صورت کلی گابروها از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز (۶۰-۵۰ درصد حجمی) و کلینوپیروکسن (۳۰-۲۰ درصد حجمی) تشکیل شده‌اند. سربیسیت، کلریت، کلسیت و ترمولیت-اکتینولیت از کانی‌های ثانوی این سنگ‌ها هستند. بافت غالب سنگ گرانولار هم بعد تا ناهم بعد می‌باشد (شکل ۵ a). ولی بافت‌های فرعی مانند افیتیک، ساب‌افیتیک نیز مشاهده می‌شوند. پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی سازنده سنگ‌های گابرویی منطقه است. فنوکریستال پلاژیوکلاز با ابعاد (کوچکتر از ۱ میلی‌متر تا

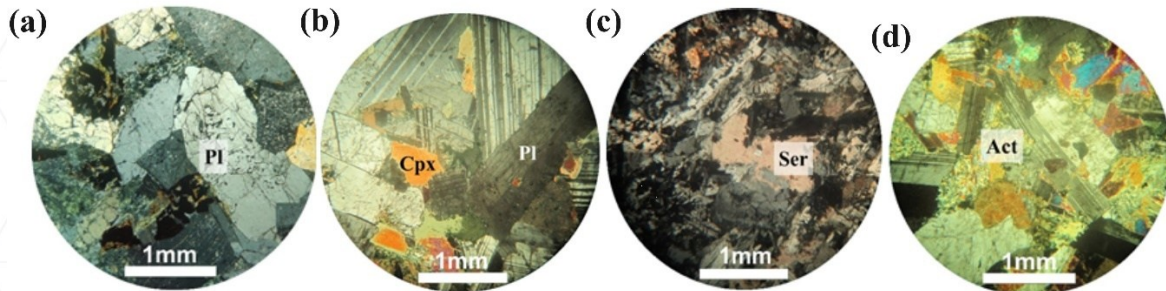


شکل ۳: نقشه زمین شناسی ساده شده ملانژ افیولیتی دالامپر اقتباس از (Hajmolla Ali et al., 2006).



شکل ۴: تصاویر صحرایی ملانژ افیولیتی دالامپر. (a) نمایی کلی ملانژ افیولیتی دالامپر و مرز تدریجی بین این واحد و واحد دگرگونی؛ (b) توده گابرویی درشت بلور درون پریدوتیت ها؛ (c) دایک گابرویی در پریدوتیت ها؛ (d) لنز گابرویی شدیداً تکتونیزه شده درون هارزبورژیت های گوشته ای.

۳ میلی‌متر) به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و دارای ماکل‌های نواری و آلبیت-کارلسباد می‌باشد (شکل b ۵). پلاژیوکلازها گاه دارای منطقه بندی بوده به درجات متفاوتی متحمل دگرسانی سریسیتی و سوسوریتی (اپیدوت، آلبیت، کلسیت، کلریت و اکتینولیت) شده‌اند (شکل c ۵). فنوکریست‌های کلینوپیروکسن به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار دارای حاشیه‌ی واکنشی هستند و به کانی‌های ترمولیت-اکتینولیت، اپک و کلریت دگرسان شده‌اند (شکل d ۵). در بعضی از فنوکریست‌های کلینوپیروکسن، خوردگی‌هایی دیده می‌شود که بافت غربالی را به وجود آورده است.



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپی گابروهای ملانژ افیولیتی دالامپر. (a) پلاژیوکلاز در کنار کلینوپیروکسن و کانی‌های اپک و ایجاد بافت گرانولار؛ (b) درشت بلورهای پلاژیوکلاز دارای ماکل پلی سنتتیک در کنار پیروکسن های دگرسان به اکتینولیت و کانی‌های اپک؛ (c) دگرسانی سرسیتی در بلورهای پلاژیوکلاز؛ (d) بلورهای پیروکسن تجزیه شده به اکتینولیت همراه با پلاژیوکلاز دارای ماکل نواری.

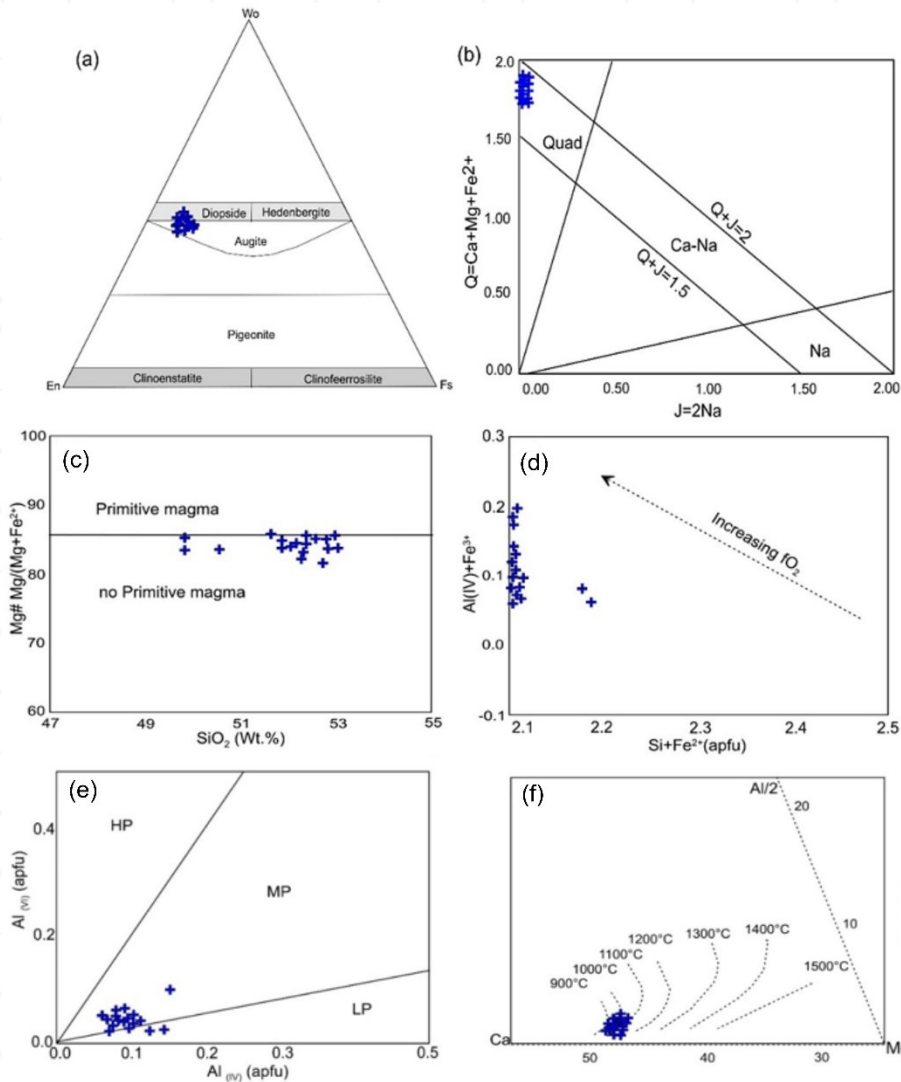
۲-۳. شیمی کانی

کلینوپیروکسن

نتایج آنالیز شیمی کانی کلینوپیروکسن در (جدول ۱) ارائه شده است. در کلینوپیروکسن میزان TiO_2 تمرکز بالایی نداشته و حدود ۰/۲ تا ۰/۹۵ درصد وزنی است. Na_2O هم از ۰/۴ درصد وزنی فراتر نمی رود. Al_2O_3 و Cr_2O_3 به ترتیب تمرکزی در حدود ۲/۱۵ تا ۴/۶ و ۰/۱۵ تا ۰/۸۶ درصد وزنی دارند که مقادیر نسبتاً بالایی محسوب می شوند. کلینوپیروکسن های مورد بررسی در نمودار مثلثی Wo-En-Fs (شکل a ۶) در گستره دیوپسید قرار می گیرند و نسبت سه سازنده ولاستونیتی، انستاتیتی و فروسیلیتی به ترتیب $Wo_{45.35-48.09}En_{48.07-50.61}Fs_{3.69-4.08}$ درصد است. در نمودار تغییرات Q در برابر J (Morimoto, 1988) هم از نوع پیروکسن های آهن-کلسیم -منیزیم دار می باشند (شکل b ۶). برای تعیین اولیه یا تحولی بودن ماگمای تشکیل دهنده کلینوپیروکسن ها از نمودار تغییرات میزان سیلیس در برابر عدد منیزیم (Vaca, 2012) استفاده شد (شکل c ۶)، در این نمودار نمونه های مورد مطالعه در زیر خط جدا کننده انواع ماگما قرار می گیرند، این موضوع نشان دهنده اولیه نبودن ماگمای تشکیل دهنده سنگ میزبان است. کلینوپیروکسن ها در نمودار تغییرات $Si^{4+}+Fe^{2+}$ در مقابل $Fe^{3+}+Al(IV)$ شیب منفی نشان می دهند، چنین روندی نشانگر فوگاسیته بالای اکسیژن در زمان شکل گیری این کانی هاست (شکل d ۶). وس (Wass, 1979) پیشنهاد کرد که $Al(VI)/Al(IV)$ پیروکسن ها می تواند برای تعیین فشار تبلور مورد استفاده قرار گیرد. در نمودار $Al(VI)/Al(IV)$ ملاحظه می شود، نمونه ها در منطقه فشار پایین تا متوسط قرار می گیرند (شکل e ۶). برای تعیین میزان دمای تشکیل این کانی ها نیز از نمودار مثلثی Ca-Al-Mg استفاده شد (Nickel et al., 1985) و تمامی پیروکسن های مورد بحث در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد جای گرفتند (شکل f ۶).

۴- نتیجه گیری

در آمیزه رنگی دالامپر مجموعه‌ای از سنگ‌های الترامافیک سرپانتینیته شده (هارزبورژیت) و توده‌های کوچکی از دونیت با ساختار ورقه‌ای، انواع مختلف گابرو، بازالت، دیوریت، دیاباز، توف‌های آتشفشانی، شیل، چرت های رادیولاریت دار و سنگ آهک پلاژیک گلوبوترونکانایی آمیزه افیولیتی منطقه را تشکیل می‌دهند. در نقاط مختلف دایک و توده های مافیک از جنس گابرو، دیوریت و گرانیت به فراوانی در ملانژ افیولیتی دیده شده و در آن نفوذ نموده اند. بررسی شیمی کانی ها نشان می دهد که ترکیب کلینوپیروکسن ها از نوع دیوپسید-اوزیتی می باشد. پلاژیوکلازها نیز در محدوده آلبیت تا آندزین قرار می گیرند. ترمومتری بر اساس روش های مختلف، دامنه حرارتی تبلور توده ها و دایک های گابرویی را از ۹۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد و فشار جایگیری آن را ۳ تا ۵ کیلوبار در یک محیط با فوگاسیته بالای اکسیژن نشان می دهند.



شکل ۶- نمودارهای رده بندی پیروکسن ها در گابروها، (a) نمودار مثلثی Wo-En-Fs (Morimoto, 1989)، (b) نمودار Q-J (Morimoto et al., 1988)، (c) نمودار تغییرات سیلیس در برابر عدد منیزیم (Vaca, 2012)، (d) نمودار تغییرات $Si^{4+}+Fe^{2+}$ در مقابل $Fe^{3+}+Al(IV)$ (Schweitzer et al., 1979)، (e) نمودار توزیع آلومینیوم در موقعیت چهار وجهی و هشت وجهی (Wass, 1979)، (f) نمودار سه تایی Ca- Al-Mg (Nickel et al., 1985).

۵- مراجع

- Alavi, M. (1994) Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics* 229,211-238.
- Ao, S., Mao, Q., Khalatbari-Jafari, M., Windley, B.F., Song, D., Zhang, Z., Zhang, J., Wan, B., Han, C. and Xiao, W., 2020. U-Pb age, Hf-O isotopes, and geochemistry of the Sardasht ophiolite in the NW Zagros orogen: Implications for the tectonic evolution of Neo-Tethys. *Geological Journal* 56, 1315-1329.

Azizi, H., Lucci, F., Stern, R. J., Hasannejad, S., Asahara, Y., 2018. The Late Jurassic Panjeh submarine volcano in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Northwest Iran: Mantle plume or active margin? *Lithos* 308, 364-380.

Hajmolla Ali, E., Shahrabi, M., Tahooneh, M., Shokri, S., 2006. *Silvana*, geological quadrangle map, 1:100000 scale. Geological Survey of Iran.

Morimoto, N. (1988) Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology* 39,55-76.

Vaca, S., 2012. Variability in the Nicola/Takla Group basalts and implications for alkalic Cu-Au porphyry prospectivity in the Quesnel terrane, British Columbia, Canada.

Wass, S.Y. (1979) Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks. *Lithos* 12, 115-132.

Nickel, K.G., Brey, G.P. and Kogarko, L. (1985) Orthopyroxene-clinopyroxene equilibria in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS): new experimental results and implications for two-pyroxene thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 91(1), 44-53.

Shafaii Moghadam, H., and Stern, R.J. (2011) Geo-dynamic evolution of late Cretaceous Zagros ophiolites: Formation of Oceanic Lithosphere above a Nascent Subduction Zone. *Geological Magazine*, 148, 762-801.

بازسازی رویداد بارشی کارنین و شرایط اکسیژن دیرینه، با استفاده از داده‌های کانی‌شناسی: مثالی از سازند میانکوهی (تریاس بالایی) منطقه آق دربند، شمال شرق ایران

مهناز کشمیری^۱، محمد خانه باد^{۲*}، بهنام رحیمی^۳

^۱ دانشجوی دکتری رسوب‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

این پژوهش به بررسی شیل‌های سازند میانکوهی در برش کال‌جمعه، واقع در محدوده آق‌دربند در شمال‌شرق ایران می‌پردازد. نتایج تحلیل‌های پتروگرافی نشان می‌دهد که اغلب نمونه‌ها گل‌سنگ توده‌ای و شیل سیلته‌ای بوده و برخی از آنها غنی از مواد آلی هستند. وجود لامیناسیون‌های تیره و روشن به همراه حضور حفره‌های کوچک، رگه‌های آلی و پیریت فرامبوئیدی، بیانگر رسوبگذاری معلق در محیطی کم‌انرژی با نرخ پایین رسوبگذاری است. آنالیزهای XRD و SEM حضور غالب کانی‌های کائولینیت، کوارتز و پیریت را نشان می‌دهند. فراوانی کائولینیت بیانگر حاکمیت شرایط اقلیمی مرطوب و گرمسیری است. رنگ تیره لایه‌ها به همراه حضور کانی پیریت نشانه شرایط احيایی تا نیمه احيایی در زمان نهشت است. مجموعه این ویژگی‌ها، در کنار داده‌های میدانی و شواهد رسوبی، گواه وقوع رویداد بارشی کارنین در منطقه مورد مطالعه است. این پژوهش، با بازسازی شرایط دیرینه اقلیمی و محیطی، نقش تغییرات کانی‌شناسی و ویژگی‌های رسوبی را در تفسیر این رویداد و بازسازی شرایط اکسیژن دیرینه را روشن می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: آق دربند، سازند میانکوهی، تریاس بالایی، کارنین، پیریت، کائولینیت.

Reconstruction of the Carnian Pluvial Episode and paleo-oxygenation conditions using mineralogical data: An example from the Miankuhi Formation (Upper Triassic), Aghdarband area, Northeastern Iran

Mahnaz Keshmiri¹, Mohammad Khanehbad^{2*}, Behnam Rahimi³

¹ PhD student in sedimentology, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad

² Associated Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad

³ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad

mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

Abstract

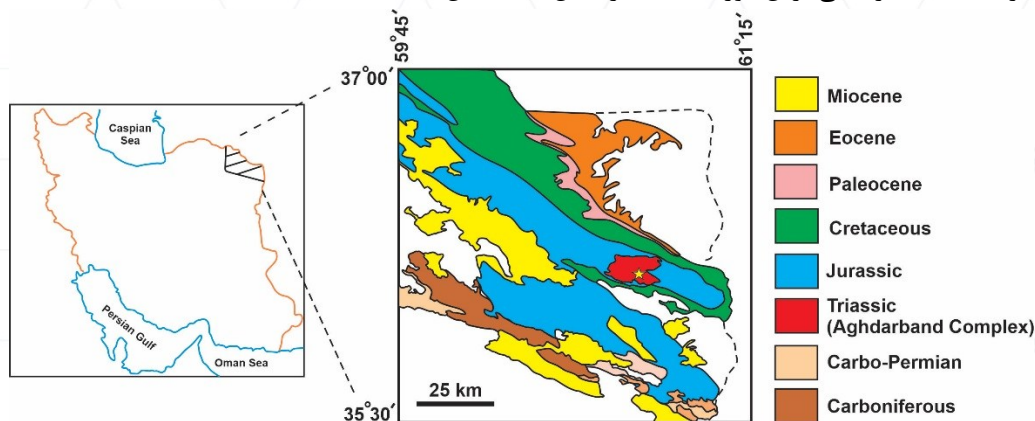
This study examines the shales of the Miankuhi Formation at the Kale-Jomeh section, located in the Aghdarband area of northeastern Iran. The results of petrographic studies show that most of the samples are massive mudstone and silty shale, and some of them are rich in organic matter. The presence of dark and light laminations, along with small pores, organic streaks, and framboidal pyrite, suggests suspension settling in a low-energy depositional environment with a low sedimentation rate. XRD and SEM analyses reveal the dominance of kaolinite and quartz minerals. The abundance of kaolinite indicates warm and humid climatic conditions during deposition. The dark coloration of the layers, their horizontal orientation, and the presence of pyrite all indicate anoxic to suboxic

conditions during sedimentation. These characteristics, along with field observations and sedimentological evidence, support the occurrence of the **Carnian Pluvial Episode (CPE)** in the study area. This study highlights the role of mineralogical variations and sedimentary features in interpreting the CPE and reconstructing past oxygenation conditions by reconstructing the paleoclimatic and paleoenvironmental conditions.

Keywords: Aghdarband, Miankuhi Formation, Upper Triassic, Carnian, Kaolinite, Pyrite

۱- مقدمه

رویداد بارشی کارنین با مجموعه‌ای از تغییرات عمده محیطی و اقیانوسی همراه بوده است که از آن جمله می‌توان به نوسانات سطح دریا (Franz et al., 2015)، گرمایش جهانی (Jim et al., 2020)، افزایش فرسایش قاره‌ای (Mazaheri-Johari et al., 2022)، نابودی سکویای کربناته (Franz et al., 2019)، عمیق‌تر شدن عمق موازنه کربنات (Rigo et al., 2007) و رویداد کم اکسیژنی در محیط‌های دریایی حاشیه‌ای (Sousa, 2014) اشاره کرد. ثبت محلی پدیده‌ای که با عنوان «رویداد بارشی کارنین» (Carnian Pluvial Episode; CPE) شناخته می‌شود، بیانگر یک اختلال اقلیمی کوتاه‌مدت است (Dal Corso et al., 2018). این رویداد در طیفی از محیط‌ها، از دریایی حاشیه‌ای تا قاره‌ای، با افزایش رواناب، ورود ناگهانی رسوبات آواری، بریدگی رودخانه‌ها، توسعه پالئوسول‌های شاخص اقلیم مرطوب (Kozur and Bachmann, 2010) و همچنین کاهش چشمگیر سطح آب دریا مشخص می‌شود (Barrenchea et al. 2018). این مطالعه به بررسی این رویداد در سازند میانکوهی در برش کال‌جمعه، واقع در محدوده آق‌دربند، اختصاص دارد. جایگاه جغرافیایی برش مورد مطالعه در شکل ۱ مشخص شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی برش مورد مطالعه که در پنجره تکتونیکی آق‌دربند با علامت ستاره مشخص شده است

(Afshar-Harb, 1982)

این سازند در ناودیس آق‌دربند رخنمون یافته و ستبرای آن در حدود ۱۵۰ متر برآورد می‌شود. از دیدگاه سنگ‌شناسی، سازند میانکوهی شامل یک توالی نسبتاً یکنواخت از شیل‌های قهوه‌ای‌رنگ است که میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز درون آن مشاهده می‌شود. در بخش قاعده‌ای این واحد، یک افق زغالی با ستبرای بیش از ده متر توسعه یافته که در قاعده آن، شواهدی از یک خاک دیرینه از نوع هیستوسول تشخیص داده شده است. در سطوح بالاتر سازند، که عمدتاً از شیل تشکیل شده‌اند، بقایای گیاهی، ذرات زغال و ندول‌های سپتاریا به‌طور پراکنده مشاهده می‌شوند. بر پایه نتایج مطالعات پالینولوژیکی انجام‌شده توسط مظاهری‌جوهری و همکاران (۲۰۲۲)، سن نهشته‌های سازند میانکوهی در برش کال‌جمعه به تریاس پسین، در بازه زمانی کارنین تا نورین، نسبت داده شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی و تفسیر رویداد بارانی کارنین در سازند میانکوهی با تکیه بر داده‌های کانی‌شناسی است. نتایج حاصل از این مطالعات امکان شناسایی تغییرات کانی‌شناسی، و شرایط محیطی حاکم بر زمان

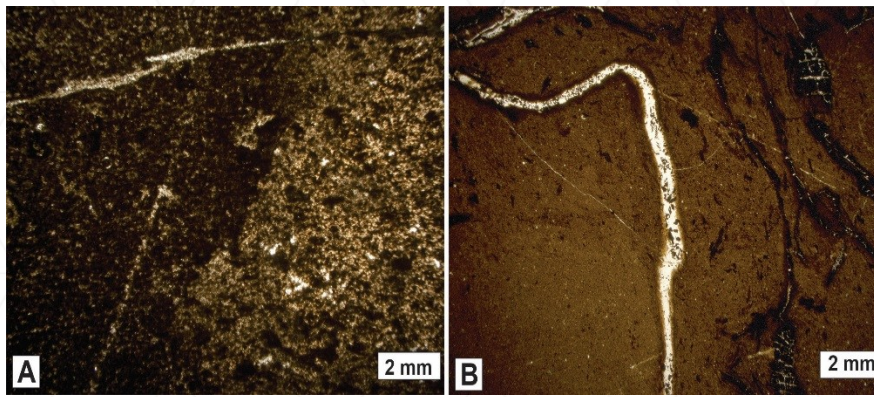
نهشت را فراهم می‌کند و نقش این عوامل را در ارتباط با این رویداد روشن می‌سازد. این رویکرد، چارچوبی مناسب برای بازسازی شرایط دیرینه اقلیمی و دیرینه محیطی حاکم بر منطقه مورد مطالعه در زمان وقوع این رویداد ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

در مرحله‌ی ابتدایی پژوهش و بر پایه‌ی بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، برش کال جمعه از سازند میانکوهی، به‌عنوان مناسب‌ترین رخنمون جهت انجام نمونه‌برداری انتخاب شد. در این رخنمون، ۵۰ نمونه‌ی دستی به‌صورت ترکیبی از واحدهای ماسه‌سنگی و شیلی جمع‌آوری گردید. طی فرآیند برداشت نمونه‌ها، خصوصیات فیزیکی رسوبات شامل رنگ، اندازه‌ی دانه و الگوی لایه‌بندی به‌طور دقیق مشاهده و ثبت گردید. به منظور افزایش دقت داده‌ها و جلوگیری از تأثیر عوامل مزاحم، آلودگی‌های سطحی موجود بر روی نمونه‌های شیلی پیش از انجام مراحل بعدی به‌دقت پاک‌سازی شدند. ویژگی‌های بافتی شامل دانه‌بندی بسیار ریز و همگنی بالای شیل‌ها سبب شده است که این واحدهای سنگی برای آنالیزها به منظور مطالعات کانی‌شناسی، از قابلیت و اعتبار بالایی برخوردار باشند. نمونه‌های شیلی به منظور بررسی‌های دقیق‌تر، به صورت مقطع نازک تهیه شدند. به منظور تکمیل داده‌ها، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با دستگاه LEO 1450 VP در دانشگاه فردوسی مشهد برای تهیه تصاویر با قدرت تفکیک بالا از نمونه‌های شیلی انجام شد. در ابتدا، دو قطعه از هر نمونه با ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر به روش اولتراسونیک و با استفاده از حلال مناسب پاک‌سازی شدند تا آلودگی‌های سطحی حذف گردد. سپس نمونه‌ها به منظور افزایش رسانایی، با لایه‌ای نازک از فلز پوشش داده شدند و در نهایت تحت تابش پرتوی متمرکز الکترون‌ها قرار گرفتند که برهم‌کنش آن‌ها با نمونه، ویژگی‌های ریزساختاری را آشکار ساخت. به منظور شناسایی کانی‌های رسی موجود در نمونه‌های شیلی، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه SIEMENS D-5000 در آزمایشگاه آمیتیس شرق بر روی پنج گرم از هر نمونه انجام شد. شرایط عملکرد دستگاه شامل ولتاژ ۴۰ کیلوولت، جریان ۴۰ میلی‌آمپر و بازه اسکن ۴ تا ۶۰ درجه بود. این روش بر پایه‌ی ساختار بلوری و فاصله‌ی بین اتم‌ها در فضای سه‌بعدی برای شناسایی کانی‌ها استوار است. در طی فرآیند آنالیز، پرتوهای ایکس تولیدشده توسط لوله کاندی پس از فیلتر شدن به سمت نمونه‌ها هدایت شدند. برهم‌کنش پرتوهای تابشی با نمونه‌ها منجر به ایجاد تداخل سازنده گردید که سپس ثبت و شمارش شد. در نهایت، با مقایسه مقادیر زاویه ۲θ (زاویه بین پرتو تابشی و پرتو پراش‌یافته) و فاصله‌ی بین‌صفحه‌ای (d-spacing) با الگوهای استاندارد، کانی‌های موجود در هر نمونه شناسایی شدند.

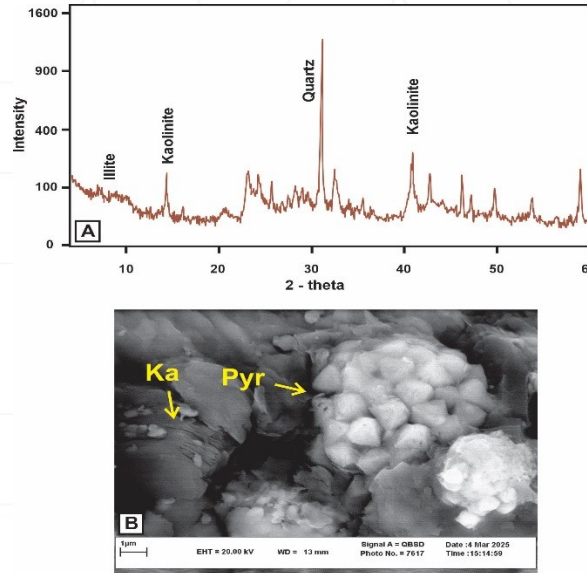
۳- بحث

تمرکز اصلی این پژوهش بر روی نمونه‌های شیلی سازند میانکوهی بوده است. مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که شیل‌های سازند میانکوهی شامل نمونه‌های ریزدانه گلسنگی و شیل سیلتی است. اندازه متوسط دانه‌ها حدود ۵۰ تا ۷۰ میکرومتر و شکل آن‌ها از نیمه زاویه‌دار تا کروی متغیر است. برخی از نمونه‌ها غنی از مواد آلی هستند. در گلسنگ‌های توده ای، دانه‌ها بدون جهت‌یافتگی ترجیحی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، در حالی که شیل‌های لایه‌لایه با لامیناسیون‌های نازک تیره و روشن مشخص می‌شوند (شکل ۲A). لامیناسیون‌های تیره شامل کانی‌های رسی و مواد آلی هستند و لامیناسیون‌های روشن عمدتاً از کانی‌های سیلیسی متراکم تشکیل شده‌اند. گاهی به‌طور موضعی، این لامیناسیون‌ها به تدریج محو می‌شوند. در برخی نمونه‌ها، حفره‌های کوچک بیضوی و کروی شکل هم‌راستا با لامینه‌ها قابل مشاهده است. رگه‌های آلی در نمونه‌های شیلی به فراوانی مشاهده می‌شوند (شکل ۲B).



شکل ۲: تصاویر پتروگرافی از نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از نور پلاریزان (XPL)، (A) شیل لامینه (B) رگه‌های مواد آلی در نمونه شیلی به رنگ تیره

الگوی XRD نمونه‌های شیلی سازند میانکوهی در شکل ۳A ارائه شده است. تفسیر الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های شیلی نشان می‌دهد که کانی‌های کوارتز، کائولینیت به عنوان کانی‌های غالب در تمامی نمونه‌ها حضور دارند، هرچند نسبت آن‌ها در نمونه‌های مختلف متفاوت است. الگوی مورفولوژیکی یکی از نمونه‌های شیلی که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی به تصویر در آمده است، حضور کانی‌های کائولینیت و پیریت را آشکار می‌سازد (شکل ۳B). کائولینیت معمولاً به صورت صفحات شبه شش‌ضلعی مشاهده می‌شود که اغلب به شکل ساختار کتابی روی هم انباشته شده‌اند. وجود این کانی شرایط اقلیمی مرطوب و گرمسیری را نشان می‌دهد (Vassilev and Vassiliva, 1996; Worden and Morad, 2003). همچنین، پیریت‌های فرامبوئیدی به‌طور گسترده در سراسر نمونه‌ها پراکنده هستند (شکل ۳B). وجود لامیناسیون‌های موازی و حضور پیریت، نشان می‌دهد که ته‌نشینی رسوبات عمدتاً به صورت معلق انجام شده است (Knapp et al., 2017). همراهی مواد آلی با پیریت، نشان می‌دهد که شرایط احیایی تا نیمه احیایی بر محیط حاکم بوده است (Guo et al., 2025). همانطور که گفته شد حضور کانی رسی کائولینیت در رسوبات مورد مطالعه، بیانگر شرایط اقلیمی مرطوب بوده و به عنوان شاهدی بر وقوع رویداد بارشی کارنین تفسیر می‌شود. شواهد میدانی همانند فسیل‌های گیاهی، وجود لایه زغالی و خاک دیرینه هیستوسول نیز تأیید کننده این رویداد است که نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی (کشمیری و همکاران، ۱۴۰۴) و مطالعات پالینومورفی مظاهری و همکاران، ۲۰۲۲، مطابقت دارد و تأیید کننده ثبت این رویداد در برش مورد مطالعه در بازه زمانی تریاس بالایی است. نتایج این پژوهش با موقعیت مکانی سازند میانکوهی در تریاس بالایی و موقعیت جغرافیایی دیرینه آن در عرض‌های نزدیک به استوا مطابقت دارد (Golanka, 2007).



شکل ۳: (A) تصویر آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) که فراوانی کانی کائولینیت را در نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد (B) تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از نمونه شیلی مورد مطالعه که نشان دهنده همراهی کانی پیریت و کانی رسی کائولینیت است.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه شیلهای سازند میانکوهی نشان داده است که توالی‌های شیلهای تیره و روشن، حضور گسترده پیریت و مواد آلی، بازتاب‌دهنده این موضوع است که رسوب‌گذاری در محیط کم‌انرژی با نرخ پایین و غالباً به فرم معلق بوده‌است. ماهیت افقی و رنگ تیره لایه‌ها به همراه کانی پیریت، گواهِ حاکمیت شرایط احیایی تا نیمه احیایی در زمان نهشت است. حضور کائولینیت شاهد محکمی از وقوع رویداد بارشی کارنین (Carnian Pluvial Episode) ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات کانی‌شناسی و رسوبی، بازتاب‌دهنده تأثیر تغییرات اقلیمی کارنین بر محیط‌های دریایی حاشیه‌ای و قاره‌ای بوده و این عوامل نقش مهمی در شکل‌گیری شرایط کم‌اکسیژنی و کنترل رسوب‌گذاری در سازند میانکوهی داشته‌اند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به درک بهتر شرایط اقلیمی دیرینه در منطقه آق دربند کمک کند.

۵- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح پژوهشی ۳/۶۳۰۶۶ انجام شده است.

۶- مراجع

کشمیری، م.، خانه باد، م.، رحیمی، ب.، ۱۴۰۴. تحلیل ژئوشیمیایی و تفسیر دیرینه‌اقلیمی سازند میانکوهی (تریاس بالایی) در منطقه آق‌دربند، شمال شرق ایران. دهمین همایش ملی انجمن رسوب‌شناسی ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، خوراسگان، ایران.

Afshar-Harb, A., 1982. Sarakhs geological quadrangle map: National Iranian Oil Company, scale 1:250,000.

Barrenechea, J. F., López-Gómez, J., De La Horra, R. 2018. Sedimentology, clay mineralogy and palaeosols of the Mid-Carnian Pluvial Episode in eastern Spain: insights into humidity and sea-level variations. *Journal of the Geological Society*, 175(6), 993-1003.

Dal Corso, J., Gianolla, P., Rigo, M., Franceschi, M., Roghi, G., Mietto, P., Manfrin, S., Raucsik, B., Budai, T., Jenkyns, H.C., Reymond, C.E., Caggiati, M., Gattolin, G., Breda, A., Merico, A., Preto, N. 2018. Multiple negative carbon-isotope excursions during the Carnian Pluvial Episode (late Triassic). *Earth-Science Reviews*, 185, 732–750.

Franz, M., Kaiser, S. I., Fischer, J., Heunisch, C., Kustatscher, E., Luppold, F. W., Berner, U., & Röhlting, H. G., 2015. Eustatic and climatic control on the Upper Muschelkalk Sea (late Anisian/Ladinian) in the Central European Basin. *Global and Planetary Change*, 135, 1-27.

Golonka, J., 2007. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 244, 297 - 307.

Guo, L., Fang, Z., Peng, X., Liu, J., 2025. *Major and trace elements in marine black shales from the Lower Cambrian, Yangtze Plate, SW China: implications for depositional environment. Journal of Oceanology and Limnology*, 43, 1769-1791.

Jin, X., Gianolla, P., Shi, Z., Franceschi, M., Caggiati, M., Du, Y., & Preto, N. 2020. Synchronized changes in shallow water carbonate production during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic) throughout Tethys. *Global and Planetary Change*, 184, 103035.

Knapp L J, McMillan J M, Harris N B. 2017. A depositional model for organic-rich Duvernay Formation mudstones. *Sedimentary Geology*, 347, 160-182.

Kozur, H.W. & Bachmann, G.H. 2010. The Middle Carnian Wet Intermezzo of the Stuttgart formation (Schilfsandstein), Germanic Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 290, 107–119.

Mazaheri-Johari, M., Righi, G., Caggiati, M., Kustatscher, E., Ghasemi- Nejad, E., Zanchi, A., Gianolla, P. 2022. Disentangling climate signal from tectonic forcing: The Triassic Aghdarband Basin (Turan Domain, Iran). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 568, 1-21.

Rigo, M., Preto, N., Roghi, G., Tateo, F., Mietto, P. 2007. A rise in the Carbonate Compensation Depth of western Tethys in the Carnian (Late Triassic): deep-water evidence for the Carnian Pluvial Event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 246, 188–205.

Soua, M., 2014. Early Carnian anoxic event as recorded in the southern Tethyan margin, Tunisia: an overview, *International Geology Review*, 56:15, 1884-1905.

Vassilev, S.V., Vassiliva, C.G. 1996. Occurrence, abundance and origin of minerals in coals and coal ashes. *Fuel processing Technology*. 48, 85-106.

Worden, R. H., Morad, S. 2003. *Clay Mineral cement in sandstones*. Hoboken: Wiley-Blackwell.

شرایط تشکیل و پایداری کانی کیانیت در سنگ های دگرگونی

محبوبه جمشیدی بدر*

* گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

m_jamshidi@pnu.ac.ir

چکیده

کیانیت (دستین) به عنوان یک کانی شاخص فشار بالا در مطالعات دگرگونی شناخته می‌شود. با این حال، پتانسیل این کانی به عنوان یک ترموبارومتر مستقل و کمی، به ویژه با اندازه‌گیری ترکیب دقیق شیمیایی آن، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف بررسی قابلیت‌های ترموبارومتری ترکیب کانی کیانیت، بر روی نمونه‌های مجموعه دگرگونی سورسات در شمال غرب ایران متمرکز شده است. با استفاده از داده‌های حاصل از آنالیز میکروپروب الکترونی (EPMA)، تغییرات جزئی در محتوای عناصر فرعی مانند Fe در بلورهای کیانیت اندازه‌گیری شد. ترکیب هسته بلورهای پورفیروبلاستی کیانیت که با گارنت، استارولیت، مسکویت و کوارتز هم‌زیست هستند، برای محاسبه شرایط فشار-دما مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی ترمودینامیکی بر پایه سامانه Fe-Al بین کیانیت و گارنت، فشار اوج دگرگونی را در محدوده ۶ کیلوپار در حدود دمای ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همچنین، پروفایل‌گذاری از مرکز به حاشیه بلورهای کیانیت، کاهش سیستماتیک در نسبت Fe/(Fe+Al) را آشکار می‌سازد که این الگو، نه تنها بر وجود یک زونینگ شیمیایی، بلکه بر ثبت یک مسیر دگرگونی پسروده با کاهش فشار غالب در حین صعود تکتونیکی سنگ دلالت دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که تحلیل کمی ترکیب کیانیت می‌تواند به عنوان روشی مستقیم در تعیین تاریخچه فشار-دمای سنگ‌های دگرگونی کاربرد داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: کیانیت، شیمی کانی، آنالیز میکروپروب الکترونی

Formation and Stability Conditions of Kyanite in Metamorphic Rocks

Mahboobeh Jamshidibadr*

* Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Abstract

Kyanite (Destine) is recognized as a key high-pressure index mineral in metamorphic studies. However, its potential as an independent and quantitative thermobarometer, particularly through the precise measurement of its chemical composition, has received less attention. This research focuses on investigating the thermobarometric capabilities of Kyanite composition using samples from the Soursat metamorphic complex in northwestern Iran. Based on data obtained from Electron Probe Micro-Analysis (EPMA), minor variations in the content of minor elements such as Fe within Kyanite crystals were measured. The composition of the cores of porphyroblastic Kyanite crystals, coexisting with garnet, staurolite, muscovite, and quartz, was used to calculate pressure-temperature (P-T) conditions. The results of thermodynamic modeling based on the Fe-Al exchange between Kyanite and garnet indicate peak metamorphic pressures around 6 kbar at temperatures of approximately 630 °C. Furthermore, profiling from the core to the rim of the Kyanite crystals reveals a systematic decrease in the Fe/(Fe+Al) ratio. This pattern not only confirms the existence of chemical zoning but also suggests the recording of a retrograde metamorphic path dominated by decreasing pressure during the tectonic uplift of the rock. This study demonstrates that quantitative analysis of Kyanite composition can serve as a direct method for determining the pressure-temperature history of metamorphic rocks.

Keywords: Kyanite, Mineral chemistry, EPMA analyses.

۱- مقدمه

کانی کیانیت (Al_2SiO_5) به دلیل محدوده پایداری مشخص در شرایط فشار متوسط تا بالا، همواره به عنوان یک کانی راهنمای کلیدی در پترولوژی دگرگونی مورد استفاده قرار گرفته است. حضور این کانی در سنگ‌های متاپلیتی، به همراه پاراژنهای مشخصی مانند گارنت و استارولیت، نشانگر رخساره‌های شیست آبی و آمفیبولیت است. با این حال، نقش کیانیت فراتر از یک شاخص کیفی است. ترکیب شیمیایی این کانی، به ویژه میزان جانشینی ایزومورفیک Al^{3+} توسط کاتیون‌هایی مانند Fe^{3+} ، تابعی حساس از شرایط فشار، دما و ترکیب کلی پاراژنز میزبان است (Miyemeck et al., 2025; Yoneguchi et al., 2021). در مجموعه دگرگونی سورسات در شمال غرب ایران، با دارا بودن کیانیت‌های پورفیروبلاستی درشت‌بلور در یک بافت دگرگونی ناحیه‌ای پیچیده، بستری ایده‌آل برای آزمودن و به‌کارگیری این روش‌های نوین فراهم می‌آورد. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه سورسات و برونزد انواع کانی‌های دگرگونی در متاشیست‌های منطقه نمایش داده شده است (جمشیدی بدر و همکاران، ۲۰۱۲). منطقه سورسات در شمال غرب ایران بین شهرهای تکاب و شاهین دژ برونزد دارد و در زون ساختاری سندج-سیرجان قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، ارائه یک تحلیل کمی و دقیق بر پایه داده‌های آنالیز میکروپروپ الکترونی (EPMA) است تا نشان دهد چگونه ترکیب شیمیایی کیانیت می‌تواند به‌عنوان یک ترموبارومتر مستقل، برای تعیین تاریخچه فشار-دمای سنگ‌های دگرگونی کاربرد داشته باشد.

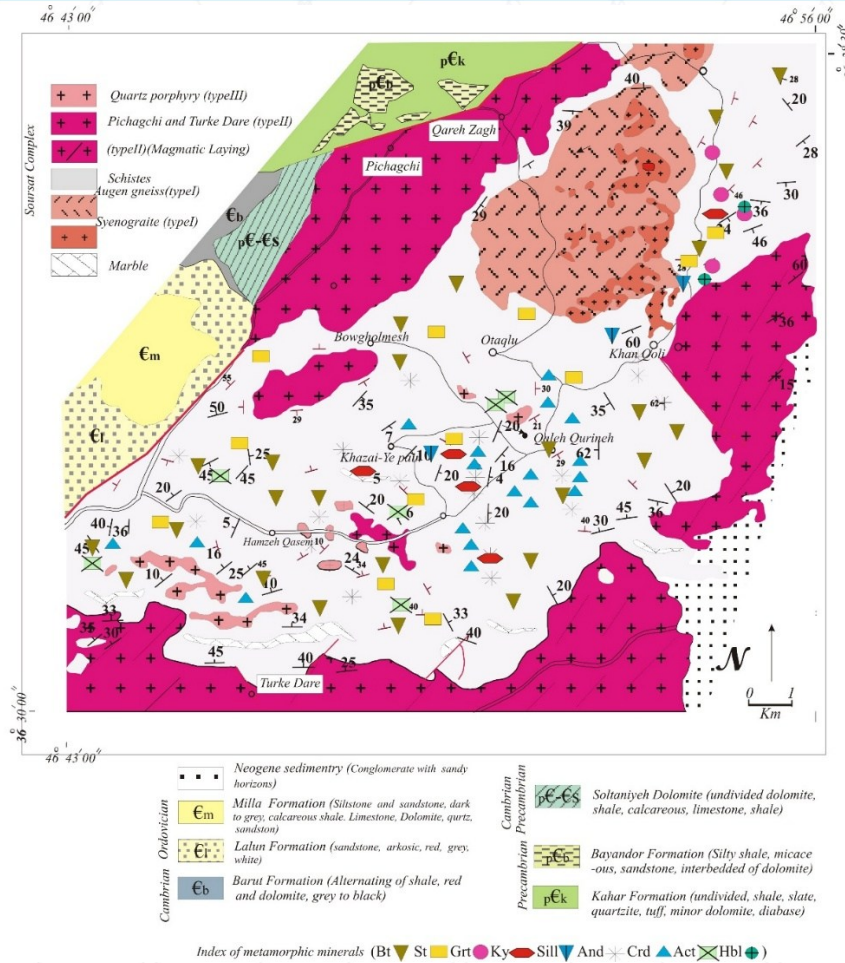
مواد و روش‌ها

آنالیز میکروپروپ برای تعیین شیمی کانی‌های دگرگونی با کاربرد دستگاه میکروپروپ Cameca SX 51 Electron Microprobe در آزمایشگاه میکروسکوپ آدلاید در دانشگاه آدلاید استرالیا با ولتاژ ۱۵ keV و جریان اشعه الکترونی با اندازه ۱۰ nA انجام شده است که استانداردهای طبیعی و مصنوعی برای مقایسه استفاده شده و اصلاح RAF بکار رفته است.

۱- بحث

۱-۲- پتروگرافی کیانیت شیست‌ها

در شمال شرق مجموعه دگرگونی سورسات، کیانیت در سنگ‌های شیست به دو صورت پایدار و ناپایدار مشاهده می‌شود (شکل ۱). در حاشیه شمال شرقی مجموعه، کیانیت به‌صورت پایدار و هم‌راستا با پاراژنهای متعادل نظیر استارولیت و گارنت مشاهده می‌شود. در بخش‌های مرکزی این مجموعه، کیانیت حالتی ناپایدار و در حال دگرگونی پسروده نشان می‌دهد (شکل ۱). کیانیت شیست‌های موجود در حاشیه مجموعه عموماً همراه با دیگر آلومینوسیلیکات‌ها، به ویژه آندالوزیت، برونزد دارند. در صحرا، بلورهای کیانیت با رنگ آبی مشخص و اندازه‌ای معمولاً بیش از ۲ میلی‌متر قابل شناسایی هستند. این بلورها از رخ دو جهته واضح و خاصیت خاموشی مایل در نور پلاریزه قابل شناسایی می‌باشند.

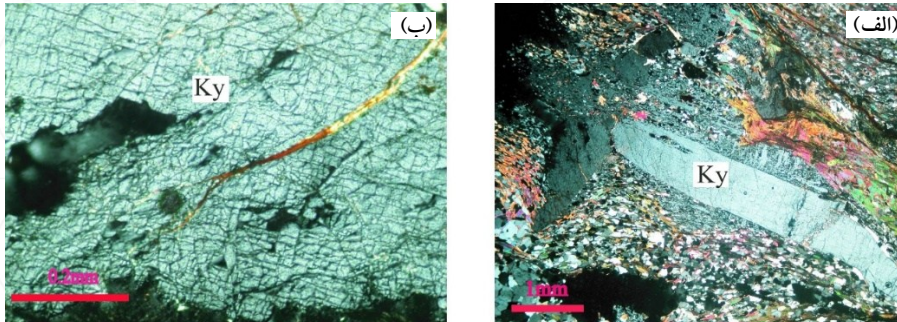


شکل ۱. نقشه توزیع کانی های دگرگونی در مجموعه دگرگونی سورات (اقتباس از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهین دژ).

شواهد میکروسکوپی و ماکروسکوپی هر دو گوبای ناپایداری کیانیت در شرایط ترمودینامیکی جدید هستند. نمونه‌های جدا شده بلورهای کیانیت در زیر میکروسکوپ بیناکولار، اغلب دارای مرکزی به رنگ آبی (باقی‌مانده کیانیت اولیه) و حاشیه‌ای صورتی‌رنگ (ناشی از تبدیل به آندالوزیت) هستند. این کرونا (هاله واکنشی) نشان‌دهنده واکنش تدریجی کیانیت و تبدیل آن به آندالوزیت در طی فرآیندهای دگرگونی ثانویه است. با توجه به اندازه درشت (ماکروسکوپی) کیانیت‌ها، این پدیده تبدیلی حتی در مقیاس صحرایی نیز قابل مشاهده است.

ناپایداری و تبدیل تدریجی بین فازهای آلومینوسیلیکاتی (کیانیت، آندالوزیت) در مقیاس میکروسکوپی نیز با استفاده از شواهد نوری (نظیر وجود بافت‌های کرونا، رخ‌های واکنشی و تغییرات در خواص نوری) به‌خوبی قابل تشخیص و مطالعه است (شکل ۲). این تغییرات بازتاب‌کننده تغییر در شرایط فشار و دمای محیط دگرگونی، به ویژه کاهش فشار در طی فرآیند بالآمدگی و فرسایش مجموعه سنگی است.

سه کانی کیانیت، آندالوزیت و سیلیمانیت، پلی مورف های آلومینوسیلیکات ها هستند و ترکیب شیمیایی یکسانی (Al_2SiO_5) دارند، ولی ساختار بلوری و شرایط پایدارسازی فشار-دمایی متفاوتی دارند (Holdaway, 1993; Wei et al., 2007). کیانیت در شرایط فشار نسبتاً بالا پایدار است. مشاهده کیانیت در حال تبدیل به آندالوزیت نشان‌دهنده تغییر در شرایط ترمودینامیکی سنگ، عموماً به سمت کاهش فشار و/یا تغییر در ترکیب سیال دگرگونی است.



شکل ۲. الف) کیانیت شیبست با پورفیروبلاست کیانیت که به صورت ناپایدار بوده و از حاشیه در حال تبدیل شدن به آندالوزیت است، کیانیت خاموشی مایل نشان می دهد. ب) رخ دو جهت پورفیروبلاست کیانیت در این تصویر نشان داده شده است.

بررسی این گونه تبدیل‌های کانی‌ایی (بافت‌های واکنشی) کلید مهمی برای بازسازی تاریخچه فشار-دمایی (P-T Path) و تعیین سیر تکاملی مجموعه‌های دگرگونی است. نشان می‌دهد این مجموعه پس از اوج دگرگونی (که احتمالاً در شرایط فشار بالاتر و تشکیل کیانیت بوده) دستخوش فرآیندهای کاهش فشار و افزایش دما شده است.

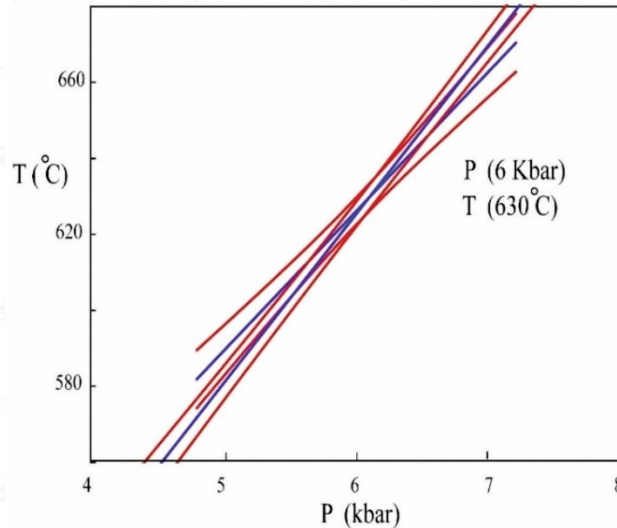
۲-۲- ترکیب شیمیایی کیانیت و شرایط اوج دگرگونی

در طی بررسی بلورهای پورفیروبلاست ناپایدار کانی کیانیت مقادیر متوسط به‌دست‌آمده از آنالیز هسته کیانیت‌های پورفیروبلاستی، نشان‌دهنده ترکیبی نزدیک به فرمول ایده‌آل با مقادیر جزئی Fe_2O_3 (در محدوده ۰.۷ تا ۱.۲ درصد وزنی) و Cr_2O_3 (کمتر از ۰.۱ درصد وزنی) است. محاسبه نسبت $X_{Fe} = Fe/(Fe+Al)$ در ساختار بلوری، مقادیری بین ۰.۰۲۲ تا ۰.۰۲۸ را نشان می‌دهد. با وارد کردن این مقادیر همراه با ترکیب گارنت آلماندین دار هم‌زیست با $(X_{Alm} \approx 0.75)$ با روش ترمودینامیکی ترموکالک (Powell et al., 1998)، محدوده فشار-دمای شکل‌گیری این پارائز به‌دست آمد. نتایج، شرایط اوج دگرگونی را در دمای ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشاری ۶ کیلوبار تعیین می‌کند.

جدول ۱. نتایج ترمومتری نقاط گارنت آنالیز شده در نمونه از کیانیت گارنت شیبست ها، علائم استفاده شده در جدول شامل: **PL83** کالیبراسیون پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳)؛ **B92-HW** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲)، **B92-GS** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲).

Sample No.	Sh-68										
Spot Gr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B92-HW	659	660	668	665	667	659	661	656	658	668	669
B92-GS	663	665	672	669	672	663	666	662	664	673	673
PL83	651	651	658	656	654	651	653	643	648	659	658

نمودارهای تعیین حرارت و فشار گارنت کیانیت شیست‌ها با استفاده از تقاطع نمودار ترمومتر با نمودار بارومتر در شکل ۳ نمایش داده شده است. خطوط آبی میانگین ترمومتر و بارومتر محاسبه شده با نرم افزار ترموکالک می باشد و خطوط قرمز میزان انحراف معیار برای ترمومتر و بارومتر را نشان می دهد.



شکل ۳. نمودارهای تعیین حرارت و فشار سنگ های دگرگونی مجموعه سورسات با استفاده از تقاطع نمودار ترمومتر با نمودار بارومتر کیانیت گارنت شیست‌ها. خطوط آبی میانگین ترمومتر و بارومتر محاسبه شده با نرم افزار ترموکالک می باشد و خطوط قرمز میزان انحراف معیار برای ترمومتر و بارومتر را نشان می دهد.

۲-۲- زونینگ ترکیبی

پروفایل‌های ترسیم‌شده از مرکز به حاشیه بلورهای کیانیت ناپایدار، یک روند کاهشی واضح و سیستماتیک در مقدار X_{Fe} را آشکار می‌سازد. به‌عنوان مثال، مقدار X_{Fe} از حدود ۰.۰۲۷ در مرکز بلور، به تدریج به حدود ۰.۰۲۰ در نزدیکی حاشیه می‌رسد. این الگوی زونینگ، شاهدهی بر تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی در حین رشد بلور است. کاهش تدریجی X_{Fe} به سمت حاشیه، یک مسیر دگرگونی همراه با کاهش فشار در حین صعود تکتونیکی سنگ سازگار است. در چنین سناریویی، سنگ پس از رسیدن به حداکثر عمق (فشار اوج)، شروع به بازگشت به سمت سطح می‌کند. در حین این صعود، فشار کاهش می‌یابد و اگر دما نیز کاهش سریعی نداشته باشد (مسیر ساعت‌گرد)، ترکیب کیانیت در حال تبلور یا در حال بازتعادل، با شرایط فشار پایین‌تر تطبیق یافته و میزان کمتری از Fe^{3+} را در ساختار خود جای می‌دهد. این تفسیر، توضیح جایگزین و پویاتری برای تشکیل پاراژنهای کم‌فشار بعدی (مانند ظهور آندالوزیت در حاشیه کیانیت) ارائه می‌دهد.

این مطالعه نشان می‌دهد که ترموبارومتري مبتنی بر ترکیب کیانیت، با مزایایی چون مستقیم بودن (تمرکز بر خود کانی شاخص)، حساسیت مناسب به تغییرات فشار و قابلیت ثبت تاریخچه درون یک بلور، می‌تواند مکمل ارزشمندی برای روش‌های مرسوم مبتنی بر جفت‌کانی‌ها باشد. با این حال، موفقیت این روش وابسته به دقت آنالیز شیمیایی، وجود تعادل موضعی بین کیانیت و فازهای هم‌زیست (به ویژه گارنت)، و انتخاب مدل ترمودینامیکی مناسب است.

۲- نتیجه‌گیری

ترکیب شیمیایی دقیق کانی کیانیت، به ویژه محتوای Fe آن، می‌تواند به عنوان یک ترموبارومتر کمی و مستقیم برای تخمین فشار در سنگ‌های دگرگونی به کار رود. الگوی زونینگ کاهشی در نسبت $Fe/(Fe+Al)$ از مرکز به حاشیه بلورهای کیانیت، ثبت یک مسیر دگرگونی با کاهش فشار غالب را در تاریخچه تکتونیکی این مجموعه تأیید می‌کند. مدل‌سازی ترمودینامیکی داده‌های میکروپروب از کیانیت‌های مجموعه سورات، فشار اوج دگرگونی را در محدوده ۶ کیلو بار در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

۳- تقدیر و تشکر

از پشتیبانی‌های ارزشمند معاونت پژوهشی دانشگاه پیام نور که انجام این پژوهش را میسر ساخت قدردانی می‌نمایم. همچنین، از پرفسور Alan Collins به دلیل مساعدت و همراهی ایشان در انجام آنالیزهای EPMA در دانشگاه آدلاید استرالیا قدردانی ویژه‌ای دارم. افزون بر این، قدردانی صمیمانه خود را از برگزارکنندگان محترم همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران اعلام می‌دارم که فرصت ارائه‌ی دستاوردهای این تحقیق را فراهم آوردند.

۴- مراجع

خلقی خسرقی، م.ح.، علوی نائینی، م.، ۱۳۷۳. نقشه زمین‌شناسی شاهین‌دژ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Bhattacharya, A., Mohanty, L., Maji, A., Sen, S.K., Raith, M., 1992. Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 111, 87–93.

Holdaway, M.J., 1993. The Al-silicate phase diagram is that of Holdaway and Mukhopadhyay. *American Mineralogist* 78, 298–315.

Jamshidi Badr, M., Masoudi, F., Collins, A.S., Sorbi, A., 2012. Mineralogical Evidence for Regional Metamorphism Overprinted by Contact Metamorphism. *Acta Geologica Sinica (English Edition)* 86(1), 48–64.

Miyemeck, T. V. N., Bayamack, J. F. N., Venyite, P., Tchouatcha, M. S., Nyemb, S. P., Kamseu, E., Bayiga, E. C., & Etame, J. (2025). Characterization of the Dibang kyanite minerals from the southern domain of the Central African Fold Belt in Cameroon for refractory applications. *Discover Geoscience*, 3, 252.

Perchuk, L.L., Lavrent'eva, I.V., 1983. Experimental Investigation of Exchange Equilibria in the System Cordierite–Garnet–Biotite. In: Saxena, S.K. (Ed.), *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 199–239.

Powell, R., Holland, T., Worley, B., 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 577–588.

Wei, C.J., Clarke, G., Tian, W., Qiu, L., 2007. Transition of metamorphic series from the Kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KMnFMASH and KFMASH phase relations. *Lithos* 96, 353–374.

Yoneguchi, Y., Tsunogae, T., Takahashi, K., Sakuwaha, K. G., & Ikehata, K. (2021). Pressure-temperature evolution of andalusite-kyanite-sillimanite-bearing pelitic schists from Nishidohira, southern Abukuma Mountains, Northeast Japan: Implications for Cretaceous rapid burial and exhumation in the Northeast Asian continental margin. *Lithos*, 406–407, 106522.

ترموبارومتري سنگ های دگرگونی با کاربرد کانی شاخص استرولیت

محبوبه جمشیدی بدر*

* گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

m_jamshidi@pnu.ac.ir

چکیده

مجموعه دگرگونی سورسات در شمال غرب زون سنندج-سیرجان واقع شده و حاوی سنگ‌های پلیتی با کانی‌های شاخص دگرگونی از جمله استرولیت است. این مطالعه با هدف تعیین شرایط فشار-دمایی (P-T) تشکیل کانی استرولیت و تعیین تاریخچه دگرگونی ناحیه‌ای انجام شده است. پتروگرافی و آنالیز میکروپروب الکترونی بر روی نمونه‌های شاخصی از متاپلیت‌ها که پاراژنز کینایت-گارنت-استارولیت است، انجام گرفته است. ترمومتري مبتنی بر تعادل توزیع Fe-Mg بین جفت کانی گارنت-بیوتیت با استفاده از سه کالیبراسیون مختلف، دمای اوج دگرگونی را بین ۶۷۰ تا ۶۷۳ درجه سانتی‌گراد نشان داد. بارومتري غیروابسته به سیال با روش Grt-Ms-Als-Qtz و همچنین مدلسازی ترمودینامیکی پیشرفته با نرم‌افزار THERMOCALC، فشار اوج را در محدوده ۶/۳ تا ۶/۴ کیلوپار تعیین نمود. ترکیب شیمیایی استرولیت‌ها مقدار (X_{Fe}) نیز تغییراتی منطبق با شرایط فیزیکی شیمیایی محیط تشکیل را نشان می‌دهد. نتایج همگرا حاکی از وقوع یک رویداد دگرگونی ناحیه‌ای فشار-بالا و دمای-بالا (رخساره آمفیبولیت بالا) در عمق حدود ۲۳ کیلومتری است. حضور همزمان کینایت و استرولیت و عدم حضور کوردیریت در این پاراژنز اولیه (M1)، مؤید شرایط فشار بالا می‌باشد. این داده‌ها یک مسیر تکتونوترمال ساعت‌گرد را برای این بخش از زون سنندج-سیرجان پیشنهاد می‌کنند که با مدل فروانش و برخورد قاره‌ای سازگار است.

کلیدواژه‌ها: استرولیت، ترموبارومتري، رخساره آمفیبولیت بالا، سنندج-سیرجان.

Thermo-barometry of Metamorphic Rocks Using Staurolite as an Index Mineral

Mahboobeh Jamshidibadr*

* Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Abstract

The Soursat metamorphic complex, situated in the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan Zone, contains pelitic rocks bearing key index metamorphic minerals such as staurolite. This study aims to determine the pressure-temperature (P-T) conditions of staurolite formation and to reconstruct the regional metamorphic history. Petrographic and electron microprobe analyses were conducted on characteristic metapelite samples exhibiting a kyanite-garnet-staurolite paragenesis. Thermometry based on Fe-Mg exchange equilibrium between garnet-biotite mineral pairs, using three independent calibrations, yielded peak metamorphic temperatures between 670 and 673 °C. Fluid-independent barometry (Grt-Ms-Als-Qtz method), coupled with advanced thermodynamic modeling using THERMOCALC software, constrained the peak pressure to 6.3–6.4 kbar. The chemical composition of staurolites, particularly their X_{Fe} values, also shows systematic variations consistent with the physicochemical conditions of formation. The convergent results indicate the occurrence of a regional high-pressure, high-temperature metamorphic event (upper amphibolite facies) at depths of approximately 23 km. The coexistence of kyanite and staurolite, and the absence of cordierite in this primary paragenesis (M1), corroborate high-pressure conditions. These data collectively suggest a clockwise P-T path for this segment of the Sanandaj-Sirjan Zone, which is compatible with a tectonic model involving subduction and continental collision.

Keywords: Staurolite, Thermobarometry, Amphibolite Facies, Sanandaj-Sirjan Zone.

۱- مقدمه

کمپلکس سورات در شمال غرب ایران واقع شده و از نظر ساختاری در بخش شمال غربی زون ساختاری-رسوبی سندرچ-سیرجان قرار می‌گیرد. موقعیت دقیق این مجموعه در نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰ شاهین‌دژ (مربوط به سال ۱۳۷۳ و توسط خلقی خسروی و علوی نائینی) ترسیم و معرفی شده است.

این کمپلکس از طیف گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین و دگرگونی تشکیل شده است. واحدهای آذرین در بخش‌های شمالی، جنوبی، شمال شرقی و مرکزی مجموعه رخنمون دارند که از نظر کانی‌شناسی و ویژگی‌های بافتی تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند (Jamshidibadr et al., 2012) و واحدهای دگرگونی عمدتاً در مرکز این کمپلکس و در میان توده‌های آذرین برونزد یافته‌اند.

بر پایه مطالعات کانی‌شناختی، ژئوشیمیایی و تعیین سن مطلق، سنگ‌های آذرین این مجموعه توسط جمشیدی‌بدر و همکاران (۲۰۱۳) در سه گروه اصلی دسته‌بندی شده‌اند:

-گرانیتوئیدهای گروه I: این سنگ‌ها در شمال شرق کمپلکس رخنمون دارند و از نظر بافت به دو گونه دیده می‌شوند: گونه‌ای با ساختار دگرشکل یافته (به صورت گنیس چشمی) و گونه‌ای بدون نشانه‌های تغییرشکل آشکار. بر اساس تاریخ‌گذاری انجام‌شده بر کانی زیرکُن به روش اورانیوم-سرب، سن این گروه حدود ۴۵۰ میلیون سال تعیین شده است.

-گرانیتوئیدهای گروه II: این گروه شامل دو توده نفوذی مجزا است: توده ترکه‌دره در جنوب و توده پیچاقچی در شمال مجموعه سورات. سن این گرانیتوئیدها نیز با روش اورانیوم-سرب بر روی زیرکُن حدود ۶۰ میلیون سال برآورد شده است.

-گرانیتوئیدهای گروه III: این گروه شامل گرانیت‌های کوارتزپورفیری است که تنها در بخش مرکزی کمپلکس مشاهده می‌شوند و از نظر زمان تشکیل، جوان‌ترین فاز گرانیتی مجموعه را تشکیل می‌دهند.

سنگ‌های دگرگونی این مجموعه دارای پروتولیت‌های متنوعی هستند. در میان آن‌ها، شیست‌های حاصل از دگرگونی سنگ‌های پلیتی، شاهد شکل‌گیری کانی‌های شاخص دگرگونی مانند گارنت، استرولیت، کیانیت، کوردیریت و آندالوزیت می‌باشند. بخش‌های مرکزی و شمال غربی کمپلکس سورات، محل اصلی رخنمون این استرولیت‌شیست‌ها هستند. تمرکز اصلی این تحقیق، بررسی و تحلیل شرایط تشکیل و محدوده پایداری کانی استرولیت در شیست‌های مجموعه است.

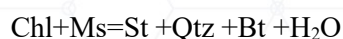
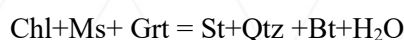
مواد و روش‌ها

آنالیز میکروپروب برای تعیین شیمی کانی‌های دگرگونی با کاربرد دستگاه میکروپروب Cameca SX 51 Electron در آزمایشگاه میکروسکوپ آدلاید در دانشگاه آدلاید استرالیا با ولتاژ ۱۵ keV و جریان اشعه الکترونی با اندازه ۱۰ nA انجام شده است که استانداردهای طبیعی و مصنوعی برای مقایسه استفاده شده و اصلاح RAF بکار رفته است.

۲- بحث

۲-۱- پتروگرافی استرولیت شیست‌ها

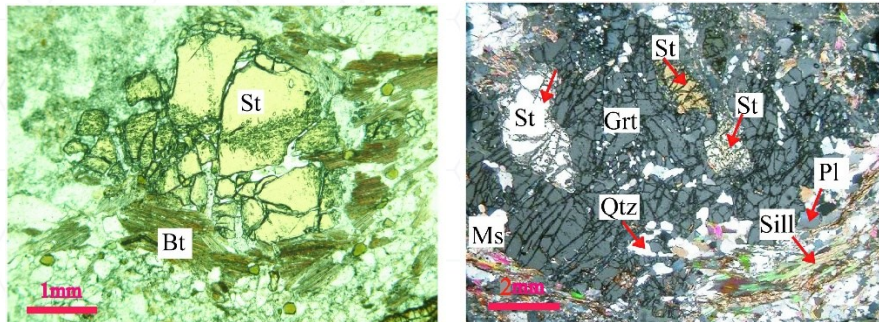
کانی استرولیت گسترش زیادی در مجموعه دگرگونی سورات دارد و همراه زون گارنت از شمال غرب منطقه شروع می‌شود و تا مرکز و جنوب منطقه توسعه دارد. واکنش تشکیل استرولیت با توجه به همراه بودن آن با گارنت در شمال غرب منطقه از طریق واکنش زیر تولید شده است:



در جنوب و مرکز منطقه استرولیت بدون حضور گارنت و همراه با آلومینوسیلیکات‌ها حضور دارد که بدلیل عدم ظهور گارنت به نظر می‌رسد با مصرف کامل گارنت و بدلیل حضور آلومینوسیلیکات‌ها از طریق واکنش زیر استرولیت تشکیل شده است (شکل ۱).



برونزد استارولیت شیست‌ها در اکثر نقاط مجموعه دگرگونی سورات بوده و دارای رنگ خاکستری و با جلای واضح شیستی می‌باشند. کانی استارولیت به صورت نیمه شکل دار تا بی شکل و با بافت پورفایروپلاستیک و اسکلتی بوده و بیوتیت دارای بافت لپیدوبلاستیک و به صورت شکل دار مشخص می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. الف) گارنت- استرولیت شیست که در این تصویر گارنت دارای اذخال‌های از استرولیت است. کانی‌های کوارتز، بیوتیت، مسکویت و فیبرولیت نیز در این سنگ حضور دارند (نور XPI). ب) استرولیت شیست که کانی‌های کوارتز، بیوتیت، مسکویت، فیبرولیت و تورمالین نیز در سنگ حضور دارند (نور XPI).

۲-۲- شیمی کانی استرولیت و ترموبارومتري استرولیت شیست‌ها

استرولیت در سه نمونه آنالیز شده است.

۱) استرولیت‌های که کاملاً شکل دار هستند.

۲) استرولیت‌هایی که به صورت اذخال داخل گارنت تشکیل شده‌اند.

۳) استرولیت‌هایی که همراه کوردیریت یا به صورت اذخال داخل کوردیریت هستند.

تغییرات ترکیب شیمیایی استرولیت‌ها به صورت بلور منفرد (نمونه Sh-123) و یا به صورت اذخال داخل گارنت (نمونه Sh-123) محسوس نمی‌باشد $(X_{Fe} = Fe / (Fe + Mg + Mn + Zn)) = 0.79 - 0.84$ ولی استرولیت‌هایی که همراه با کوردیریت (نمونه Sh-161) هستند دارای کسر مولی آهن کمتری می‌باشد. $X_{Fe} = 0.76$ و نسبت عناصر روی، منگنز و تا حدودی منیزیم افزایش یافته است، تهی شدگی آهن در این استرولیت‌ها می‌تواند مربوط به کاهش فشار باشد (وی، ۲۰۰۷). مقدار اکسید روی در استرولیت‌های منطقه کم می‌باشد $(ZnO = 0.03 - 0.24)$.

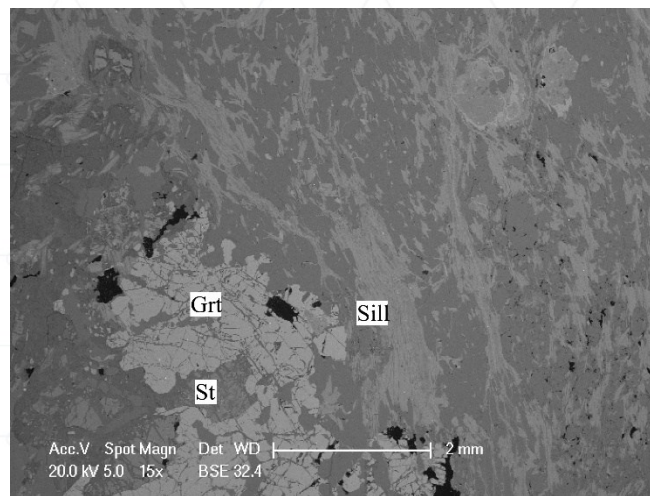
نمونه Sh-123 یک متاپلیت کیانیت-گارنت-استارولیت است که به‌عنوان شاهدهی کلیدی برای بازسازی شرایط اوج دگرگونی ناحیه‌ای (فاز M1) در مجموعه دگرگونی سورات است (جمشیدی بدر و همکاران، ۲۰۱۲). وجود این پاراژنز خاص، محدوده بسیار دقیقی از دما و فشار را تعریف می‌کند (شکل ۲).

مجموعه کانی‌ایی $Grt + St + Ky + Bt + Ms + Pl + Qtz \pm Fib$ (گارنت + استارولیت + کیانیت + بیوتیت + مسکویت + پلاژیوکلاز + کوارتز \pm فیبرولیت) یک پاراژنز تشخیصی رخساره‌ای است:

حضور همزمان کیانیت (Ky) و استارولیت (St) در کنار گارنت (Grt) و مسکویت (Ms)، این سنگ را در محدوده رخساره آمفیبولیت بالا (High-Pressure Amphibolite Facies) و در شرایط فشار نسبتاً بالا قرار می‌دهد.

عدم حضور کوردیریت (Crd) یا آندالوزیت (And) در این نمونه، نشان‌دهنده آن است که فشار به اندازه‌ای بالا بوده که کیانیت، فاز آلومینوسیلیکات پایدار است.

وجود مسکویت (و نه فلدسپات پتاسیم) به همراه کیانیت و کوارتز، نشان می‌دهد که سنگ هنوز به شرایط ذوب بخشی نرسیده یا در آستانه آن قرار داشته است، زیرا واکنش مسکویت + کیانیت + کوارتز = فلدسپات پتاسیم + سیال + گرانیات یک واکنش درجه اول و مهم در شروع ذوب است.



شکل ۲. تصویر BSC استرولیت به صورت ادخال داخل بلور گارنت (نمونه Sh-123).

ترمومتری گارنت-بیوتیت (Fe-Mg Exchange Thermometry):

انتخاب کالیبراسیون‌های گانگولی و ساکسنا (۱۹۸۴)، پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳) و باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲) بر اساس سازگاری ترکیب شیمیایی کانی‌های نمونه با پیش‌فرض‌های هر مدل بود. این مدل‌ها برای گارنت‌های غنی از آلمان‌دین-پیروپ (با Fe/Mg بالا و کلسیم کم) مناسب‌تر هستند.

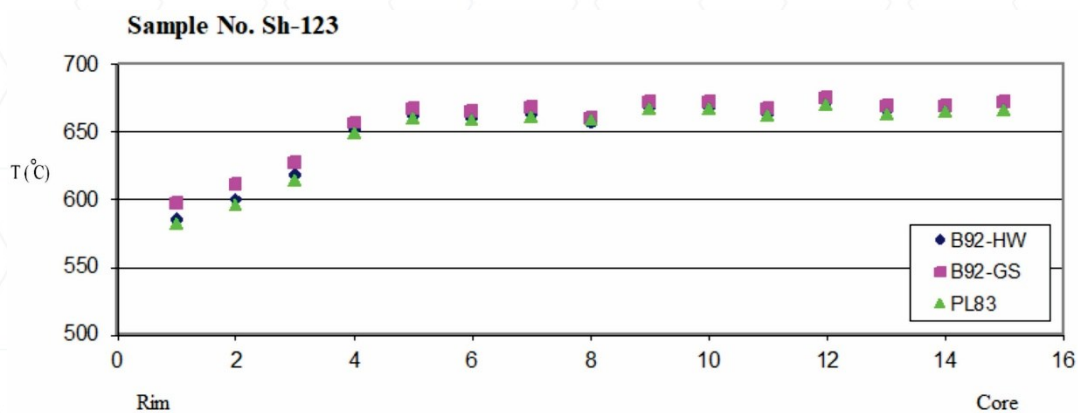
گارنت: انتخاب نقطه با بیشترین XMg (مقدار $Mg/(Mg+Fe)$) برای ترمومتری، یک رویکرد استاندارد است. زیرا هسته گارنت‌های دگرگونی معمولاً در دمای بالاتر و فشار بیشتری متبلور شده و با افزایش دما، مقدار Mg در گارنت افزایش می‌یابد. بنابراین، هسته‌های غنی از Mg، دمای اوج دگرگونی را بهتر ثبت می‌کنند.

بیوتیت: استفاده از بیوتیت‌های مجاور گارنت (در تماس) به شرطی که واکنش‌های برگشتی رخ نداده باشد، ایده‌آل است. گزارش اشاره می‌کند از بیوتیت‌های نزدیک (ولی نه در تماس مستقیم) استفاده شده که ممکن است برای جلوگیری از اثرات واکنش‌های رترگراد باشد، اما این خود می‌تواند منبع خطای جزئی باشد.

نتایج و تفسیر: دمای ۶۷۳-۶۷۰ درجه سانتی‌گراد حاصل از این روش، دمای اوج را نشان می‌دهد. تطابق خوب نتایج سه کالیبراسیون مختلف، قابلیت اطمینان این برآورد را افزایش می‌دهد (جدول ۱) و (شکل ۳).

جدول ۱. نتایج ترمومتری نقاط بیوتیت آنالیز شده در نمونه Sh-123 از گارنت- استرولیت شیبست های مجموعه سورسات. علائم استفاده شده در جدول شامل: **PL83** کالیبراسیون پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳)؛ **B92-HW** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲)، **B92-GS** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲).

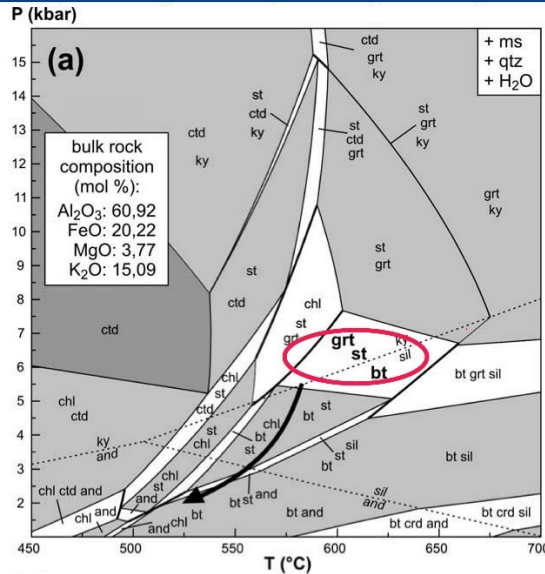
Sample No.	Sh-123														
Spot Gr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B92-HW	585	600	618	652	663	661	664	657	668	668	664	672	666	666	666
B92-GS	597	611	627	657	667	665	668	661	672	672	667	675	669	669	669
PL83	582	596	614	649	661	659	662	659	667	667	663	670	664	664	664



شکل ۳. الف) تغییرات حرارت در نقاط مختلف آنالیز شده از گارنت نمونه Sh-68، ب) تغییرات حرارت در نقاط مختلف آنالیز شده از گارنت نمونه Sh-123. علائم استفاده شده در شکل شامل: **PL83** کالیبراسیون پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳)؛ **B92-HW** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲)، **B92-GS** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲).

ترموبارومتری THERMOCALC

این روش به جای یک واکنش، همزمان چندین واکنش تعادلی بین تمام فازهای موجود (گارنت، استارولیت، کینایت، بیوتیت، مسکویت، پلاژیوکلاز، کوارتز، سیال) را در نظر می‌گیرد. بنابراین، نتایج آن نسبت به خطاهای آنالیز نقطه‌های یا اثرات محلی مقاوم‌تر است (شکل ۴).
دمای متوسط: 665 ± 42 درجه سانتی‌گراد
فشار متوسط: 6.4 ± 1.2 کیلوبار
محدوده خطای گزارش شده (مثلاً ± 42 درجه برای دما) عمدتاً ناشی از عدم قطعیت ذاتی در داده‌های ترمودینامیکی مدل‌های محلول جامد کانی‌ها و نیز خطای آنالیز میکروپروب است. با این حال، مقدار متوسط به دست آمده به طور قابل توجهی با نتایج روش ترمومتری گارنت-بیوتیت همپوشانی دارد.



شکل ۴. پseudosection مربوط به دگرگونی استرولیت شیبست ها در مجموعه دگرگونی سورسات (اقتباس از مزکر و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج حاصل از ترموبارومتري ترموکالک (THERMOCALC 3.26) هولند و پاول (۱۹۹۸) بر روی نمودار پایداری آلومینوسیلیکات ها از هولداوی (۱۹۹۳) برای استرولیت شیبست های نشان داده شده است.

۳- نتیجه‌گیری

ترموبارومتري سنگ‌های استرولیت‌دار مجموعه دگرگونی سورسات منجر به بازسازی دقیق شرایط فیزیکی-شیمیایی حاکم بر دگرگونی ناحیه‌ای در این بخش از زون سنندج-سیرجان گردید. آنالیزهای پتروگرافی و شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که کانی استرولیت در این مجموعه هم در پاراژنز فشار-بالای فاز اصلی (M1) و هم در ارتباط با کانی‌های فشار-پایین در فاز متأخر (M2) حضور دارد. ترکیب شیمیایی استرولیت‌ها شاخص (X_{Fe}) به خوبی انعکاس‌دهنده تغییرات فشار است، به طوری که استرولیت‌های همراه با کوردیریت دارای مقادیر کمتری از آهن می‌باشند.

تعیین شرایط اوج دگرگونی با استفاده از روش‌های مکمل ترمومتري گارنت-بیوتیت و مدلسازی ترمودینامیکی تعادل چندگانه، هم‌خوانی بسیار خوبی را نشان می‌دهد. بر این اساس، شرایط تشکیل پاراژنز شاخص کیانیت-گارنت-استرولیت در محدوده دمایی ۶۶۵ تا ۶۷۵ درجه سانتی‌گراد و فشاری بین ۶/۳ تا ۶/۵ کیلوپار تعیین شد. این شرایط منطبق بر رخساره آمفیبولیت بالا است.

مجموعه داده‌های به‌دست آمده، گواه یک رویداد دگرگونی ناحیه‌ای همراه با دفن عمیق و گرمایش قابل توجه پوسته است. تطابق این شرایط با یک مسیر فشار-دمای ساعت‌گرد، مؤید یک تاریخچه تکتونیکی فعال مرتبط با فرآیندهای برخوردی در کمربند سنندج-سیرجان می‌باشد. بالا آمدن سریع تکتونیکی پس از اوج دگرگونی، منجر به کاهش فشار و ایجاد پاراژن‌های ثانویه فشار-پایین (شامل کوردیریت) گردیده است. بنابراین، کانی استرولیت در این مجموعه نه تنها به عنوان یک بارومتر دقیق فشار و دما عمل کرده، بلکه به عنوان یک شاخص کلیدی در بازشناسی توالی رویدادهای دگرگونی و استنباط مسیر تکتونوترمال منطقه محسوب می‌شود.

۴- تقدیر و تشکر

از پشتیبانی‌های ارزشمند معاونت پژوهشی دانشگاه پیام نور که انجام این پژوهش را میسر ساخت، قدردانی می‌نمایم. همچنین، از پرفسور Alan Collins به دلیل مساعدت و همراهی ایشان در انجام آنالیزهای EPMA در دانشگاه آدلاید استرالیا قدردانی ویژه‌ای داریم. افزون بر این، قدردانی صمیمانه خود را از برگزارکنندگان محترم همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران اعلام می‌دارم که فرصت ارائه‌ی دستاوردهای این تحقیق را فراهم آوردند.

۵- مراجع

خلقی خسرقی، م.ح.، علوی نائینی، م.، ۱۳۷۳. نقشه زمین‌شناسی شاهین‌دژ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Bhattacharya, A., Mohanty, L., Maji, A., Sen, S.K., Raith, M., 1992. Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 111, 87–93.

Ganguly, J., Saxena, S.K., 1984. Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry. *American Mineralogist* 69, 88–97.

Hodges, K.V., Spear, F.S., 1982. Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist* 67, 1118–1134.

Holdaway, M.J., 1993. The Al-silicate phase diagram is that of Holdaway and Mukhopadhyay. *American Mineralogist* 78, 298–315.

Holdaway, M.J., 2001. Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist* 86, 1117–1129.

Holland, T.J.B., Powell, R., 1998. An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 309–343.

Jamshidi Badr, M., Collins, A.S., Masoudi, F., Cox, G., Mohajjel, M., 2013. The U-Pb Age, Geochemistry and Tectonic Significance of Granitoids In The Soursat Complex, Northwest Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences* 22, 1-31.

Jamshidi Badr, M., Masoudi, F., Collins, A.S., Sorbi, A., 2012. Mineralogical Evidence for Regional Metamorphism Overprinted by Contact Metamorphism. *Acta Geologica Sinica (English Edition)* 86(1), 48–64.

Mezger, M., Passchier, C.W., Régnier, J.L., 2004. Metastable staurolite-cordierite assemblage of the Bossost dome: Late Variscan decompression and polyphase metamorphism in the Axial Zone of the central Pyrenees. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 827–837.

Perchuk, L.L., Lavrent'eva, I.V., 1983. Experimental Investigation of Exchange Equilibria in the System Cordierite-Garnet-Biotite. In: Saxena, S.K. (Ed.), *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 199–239.

Powell, R., Holland, T., Worley, B., 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 577–588.

Spear, F.S., 1982. Phase equilibria of amphibolites from the Post Pond volcanics, Mt. Cube quadrangle, Vermont. *Journal of Petrology* 23, 383–426.

Wei, C.J., Clarke, G., Tian, W., Qiu, L., 2007. Transition of metamorphic series from the Kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KMnFMASH and KFMASH phase relations. *Lithos* 96, 353–374.

پetrology توده نفوذی مافیک آلماقولاغ در شمال زون سنندج-سیرجان

محبوبه جمشیدی بدر*

* گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

m_jamshidi@pnu.ac.ir

چکیده

این پژوهش به بررسی زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی توده نفوذی مافیک آلماقولاغ در شمال غربی ایران (زون ساختاری سنندج-سیرجان) می‌پردازد. سن توده در محدوده اواخر ژوراسیک تا اوایل کرتاسه قرار دارد. بررسی‌های پتروگرافی نشان می‌دهد که سنگ‌های این توده عمدتاً از نوع دیوریت و پیروکسن دیوریت با کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، کلینوپیکروکسن (اویژیت) و آمفیبول (فروهورنبلند تا چرماکیت) هستند و بافت‌هایی گرانولار، اینترگرانولار و گاه پورفیری دارند. داده‌های ژئوشیمیایی حاکی از تعلق سنگ‌ها به سری ماگمایی کالکوالکالن با غنی‌شدگی در عناصر LILE نظیر Rb، Cs، K و تهی‌شدگی در عناصر HFSE به ویژه Nb، Ti، Zr، P است. الگوی عناصر نادر خاکی (REE) نرمالیزه شده به کندریت تقریباً مسطح تا دارای اندکی غنی‌شدگی در LREE نسبت به HREE است و فاقد ناهنجاری Eu آشکار می‌باشد. این ویژگی‌ها همراه با نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd مقادیر پایین $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و مقادیر مثبت ϵNd نشان‌دهنده منشأ گوشته‌ای ماگما در یک محیط فرورانشی مرتبط با قوس جزیره‌ای و تأثیر سیالات ناحیه فرورانش است. همچنین، شواهد ژئوشیمیایی دلالت بر تبلور تفریقی ماگما با نقش مهم پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک و نیز وجود گارنت به عنوان فاز باقیمانده در منبع ذوب در عمق زیاد (پایداری گارنت) دارد. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که توده مافیک آلماقولاغ به عنوان بخشی از فعالیت‌های ماگمایی مرتبط با فرورانش در زون سنندج-سیرجان در مرز ژوراسیک-کرتاسه تشکیل شده است.

کلیدواژه‌ها: توده مافیک، آلماقولاغ، سنندج-سیرجان، ژئوشیمی، پتروژنز، فرورانش نئوتیس

Petrology of the Almogholagh Mafic Intrusion in the Northern Sanandaj-Sirjan Zone

Mahboobeh Jamshidibadr*

* Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Abstract

This research investigated the geology, petrography, and geochemistry of the Almogholagh mafic intrusion in northwestern Iran (Sanandaj-Sirjan structural zone). The intrusion age ranges from Late Jurassic to Early Cretaceous. Petrographic studies reveal that the rocks are predominantly diorite and pyroxene diorite, with essential minerals including plagioclase, clinopyroxene (augite), and amphibole (ferrohornblende to tschermakite). They exhibit granular, intergranular, and locally porphyritic textures. Geochemical data indicate that the rocks belong to the calc-alkaline magmatic series, enriched in Large-Ion Lithophile Elements (LILE) such as Rb, Cs, and K, and depleted in High Field Strength Elements (HFSE), particularly Nb, Ti, Zr, and P. The chondrite-normalized Rare Earth Element (REE) patterns are relatively flat to slightly enriched in Light Rare Earth Elements (LREE) compared to HREE, with no significant Eu anomaly. These characteristics, combined with Sr and Nd isotopic ratios (low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial ratios and positive ϵNd values), suggest a mantle-derived magma source within a subduction-related environment, specifically an island arc setting, influenced by subduction zone fluids. Furthermore, geochemical evidence points to magmatic differentiation through fractional

crystallization involving significant roles of plagioclase and mafic minerals, as well as the presence of garnet as a residual phase in the deep melting source (garnet stability field). The present study demonstrates that the Almogholagh mafic intrusion formed as part of subduction-related magmatic activities in the Sanandaj-Sirjan Zone during the Jurassic-Cretaceous boundary.

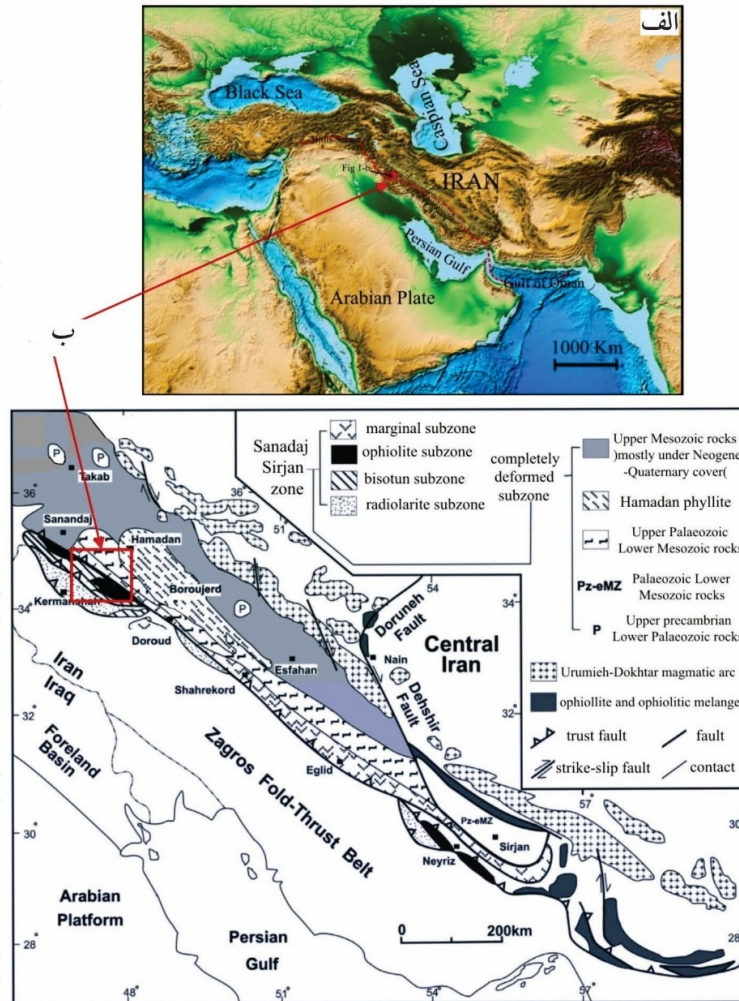
Keywords: Mafic intrusion, Almogholagh, Sanandaj-Sirjan Zone, Geochemistry, Petrogenesis, Neotethys subduction.

۱- مقدمه

توده نفوذی مافیک آماقولاغ در برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تویسرکان واقع در شمال زون ساختاری سنندج-سیرجان معرفی شده است. این توده به عنوان یکی از قدیمی‌ترین واحدهای رخنمون‌یافته در کوه آماقولاغ، بخشی از مجموعه رسوبی-آتشفشانی با ضخامت حدود ۳۰۰-۴۰۰ متر را تشکیل می‌دهد (Jamshidibadr et al., 2018). زون سنندج-سیرجان عرصه رویدادهای دگرگونی، ماگماتیسم و پلوتونیسم گسترده‌ای است و مطالعه توده‌های نفوذی آن در درک تک‌تونیوم‌گمایی این زون کلیدی محسوب می‌شود. هدف این تحقیق، ارائه تحلیلی جامع از ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه تکتونیکی توده مافیک آماقولاغ و مقایسه آن با توده‌های همسان در زون سنندج-سیرجان است (شکل ۱).

۲- زمین‌شناسی عمومی

توده مذکور با نام توده متادیوریت-گابرو آماقولاغ در نقشه زمین‌شناسی تویسرکان نمایش داده شده است و در سه نقطه برون‌زد دارد. وسعت آن به مراتب کمتر از توده گابرویی الوند است. سنگ‌ها عموماً به رنگ خاکستری تا خاکستری تیره بوده و گاه لکه‌های سبز یا تیره در آن‌ها دیده می‌شود. از نظر بافتی، سنگ‌ها گرانوبلاستیک و اپیدیوبلاستیک بوده و بافت‌های اولیه شامل پورفیری، دانه‌ریز تا متوسط بلوری، افیتیکی و در مواردی دلریتی است. فنوکریست‌های اصلی پلاژیوکلاز بوده که شدیداً تحت تأثیر دگرسانی و متاسوماتیسم قرار گرفته و به کانی‌های ثانویه‌ای مانند کلریت، اپیدوت و کائولینیت تبدیل شده‌اند. حضور کانی‌های مافیک سدیم‌دار ثانویه در شکستگی‌ها، همراه با رگه‌های اکسید آهن آبدار و کربنات کلسیم، نشانه‌هایی از احتمال تشکیل اسکارن در ارتباط با این توده است. درجه دگرگونی در حد رخساره شیست سبز ارزیابی می‌شود.



شکل ۱. الف) جایگاه زون سنندج-سیرجان اقتباس از (Mohajjel et al., 2003)، ب) برونزد توده‌های فلسیک و مافیک در زون سنندج-سیرجان، محدوده‌ی آماقولاغ به شکل مربع نشان داده شده است (Ashragi and Mahmoudi Garaii, 2003).

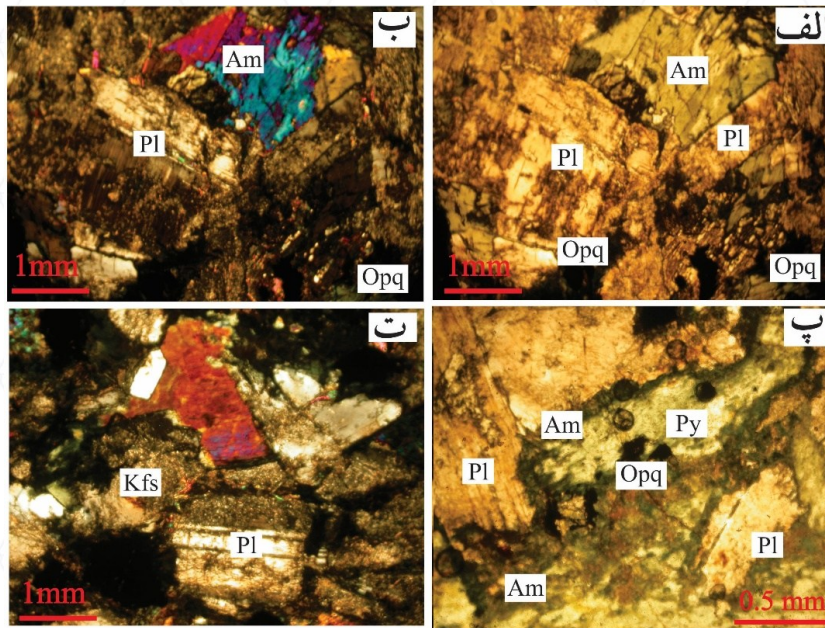
۳- مواد و روش‌ها

شش نمونه از سنگ‌های نفوذی مافیک آماقولاغ که کمترین میزان دگرسانی را نشان می‌دهند، انتخاب و برای تعیین عناصر اصلی و فرعی، آنالیز ICP-MS با حد آشکارسازی عناصر فرعی بین ۰.۱-۰.۲ ppm در آزمایشگاه Labwest Minerals Analysis کشور استرالیا با کدهای آنالیز MMS-01 و WR-01 انجام گرفت و آنالیز XRF در شرکت مطالعات مواد معدنی زرآرما تهران - ایران انجام گرفت.

۴- بحث

۴-۱- پتروگرافی

سنگ‌های توده مذکور با رنگ خاکستری تا خاکستری تیره و متوسط بلور، دارای کانی‌شناسی مشخصی هستند. کانی‌های اصلی شامل پلاژیوکلاز (۴۰-۶۰ درصد حجمی، صفحه‌ای شکل، شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار)، کلینوپروکسن (۱۰-۳۸ درصد حجمی، از نوع اوژیت که اغلب در حاشیه به آمفیبول تبدیل شده) و آمفیبول (۱۲-۲۵ درصد حجمی، از نوع فروهورنبلند تا چرماکیت) می‌باشند. مقادیر کم (کمتر از ۵ درصد) کوارتز و آلکالی فلدسپار نیز مشاهده می‌شود. بافت سنگ‌ها عمدتاً گرانولار و اینترگرانولار است. کانی‌های ثانویه شامل اپیدوت و کلریت بوده و ایلمنیت کانی فرعی اصلی است. بر اساس ترکیب کانی‌شناختی، سنگ‌ها در رده دیوریت و پیروکسن دیوریت طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۲. الف) و ب) بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپار با بافت گرانولار و اینترگرانولار در نور PPL و XPL. پ) پیروکسن‌هایی که توسط آمفیبول در بخش حاشیه جایگزین شده‌اند، ت) بافت اینترگرانولار (علامت اختصاری از Whitney and Evans, 2010).

۲-۴ ژئوشیمی

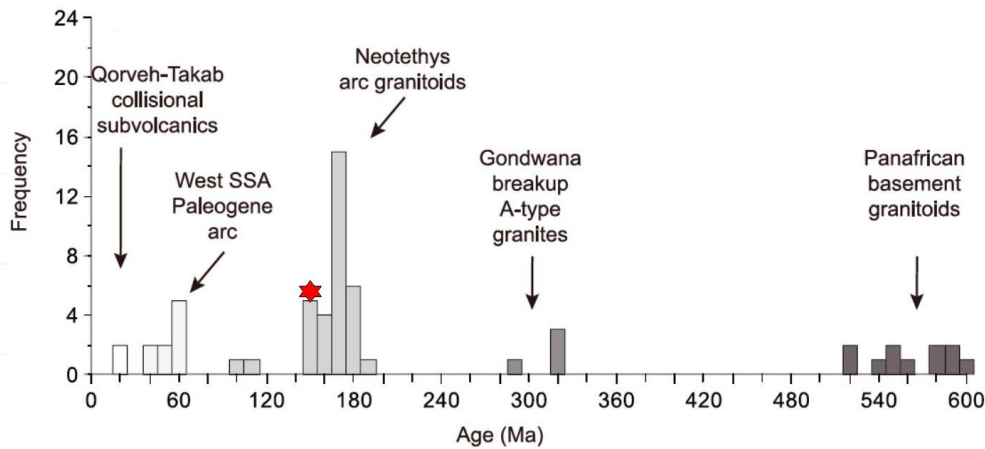
آنالیز عناصر اصلی و فرعی بر روی شش نمونه با حداقل آلتراسیون انجام گرفته است. با افزایش SiO_2 ، مقادیر FeO ، TiO_2 ، CaO ، P_2O_5 ، MgO ، Sr و Eu روند کاهشی نشان می‌دهند که بیانگر تبلور تفریقی ماگما با مشارکت پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک مانند هورنبلند است. در نمودار عناصر ناسازگار نرمالیزه شده به گوشته اولیه، غنی‌شدگی در عناصر LILE مانند Rb ، Cs ، K و تهی‌شدگی بارز در عناصر Ti ، Zr ، Nb و P مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر سیالات فرورانشی و حضور کانی‌های مقاوم مانند زیرکن و روتیل در منبع است (Sun and McDonough, 1989). الگوی REE نرمالیزه شده به کندی، تقریباً مسطح تا دارای غنی‌شدگی خفیف LREE نسبت به HREE بوده و فاقد ناهنجاری Eu واضح است. در نمودارهای تشخیص محیط تکتونیکی پیرس و همکاران (۱۹۸۴)، نمونه‌ها در محدوده سنگ‌های مرتبط با قوس‌های آتشفشانی قرار می‌گیرند.

۳-۴ جایگاه تکتونیکی و منشأ ماگما

ویژگی‌های ژئوشیمیایی از جمله سری کالکوالکانل، الگوی خاص عناصر ناسازگار و نسبت‌های REE، همگی دلالت بر تشکیل توده در یک محیط فرورانشی مرتبط با جزایر قوسی دارند. مقادیر پایین Y و Yb و شیب ملایم REE ها، همراه با شواهدی مانند آنومالی منفی Nb و Ti، مؤید وجود فازهای باقیمانده غنی از گارنت و آمفیبول/پیروکسن در منبع ذوب در عمق زیاد (پایداری گارنت) است (e.g., Wang et al., 2015; Jiang et al., 2013; Sun and McDonough, 1989). نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd مقادیر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بین ۰/۷۰۲۴ تا ۰/۷۰۶۹ و ϵNd مثبت بین ۲.۳+ تا ۳.۳+ که از مطالعات شهبازی و همکاران (۲۰۱۵) و امیری و همکاران (۲۰۱۷) استفاده شده است، منشأ گوشته‌ای ماگما و ارتباط آن با محیط فرورانش را تأیید می‌کنند. بر اساس سناریوهای تکتونیکی ارائه شده توسط حسن زاده و ورنیکه (۲۰۱۶) برای زون سنندج-سیرجان، جایگیری توده‌های مافیک آماقولاغ نیز همانند سایر توده‌های مافیک زون سنندج-سیرجان همانند توده نفوذی مافیک کانگرو (Azizi et al., 2015) و توده نفوذی مافیک قروه (Mahmoudi et al., 2011) در بازه اواخر ژوراسیک تا اوایل کرتاسه رخ داده است (جدول ۱).

جدول ۱. توده های نفوذی مافیک زون سنندج-سیرجان در بازه زمانی اواخر ژوراسیک تا اوایل کرتاسه.

نام توده نفوذی	نوع سنگ	نوع سن سنجی	روش	سن (Ma)	رفرنس	نوع سنگ
آماقولاغ	مونزونیت (دگرگون و تغییر شکل یافته)	تیتانیت	U(Th)-Pb	۱۳۸-۹۵	Shahbazi et al. (2015)	سنگ‌های مافیک زون سنندج-سیرجان
آماقولاغ	دیوریت	سنگ کل	Rb-Sr	۱۷± ۱۴۴	Valizadeh & Zarian (1976)	
کانگرو (DKDJ-1)	گابرو	زیرکن	U-Pb	۳/۶ ± ۱۴۸/۳	Azizi et al. (2015)	
کانگرو (KMS-1)	گابرو	زیرکن	U-Pb	۸/۷±۱۴۶/۹	Azizi et al. (2015)	
قروه	گابرو	زیرکن	U-Pb	۱۴۹/۲±۰/۳	Mahmoudi et al. (2011)	



شکل ۳. نمایش جایگاه سن توده های نفوذی و مافیک آلماقولاغ (علامت ستاره) در هیستوگرام سنی توده های نفوذی زون سنندج-سیرجان که توسط حسن زاده و ورنیکه (۲۰۱۶) ارائه شده است.

۵- نتیجه گیری

توده نفوذی مافیک آلماقولاغ به عنوان بخشی از فعالیت های پلوتونیک مرتبط با فرورانش در زون سنندج-سیرجان، در اواخر ژوراسیک تا اوایل کرتاسه در یک محیط قوس جزیره ای تشکیل شده است. ترکیب کانی شناختی، ژئوشیمی کالکوالکان، الگوی غنی شدگی LILE و تهی شدگی HFSE، ویژگی های REE و داده های ایزوتوپی Sr-Nd همگی بر منشأ گوشته ای ماگما تحت تأثیر سیالات ناحیه فرورانش و تبلور تفریقی آن در طول صعود دلالت دارند. وجود گارنت به عنوان فاز باقیمانده در منبع، نشان دهنده تشکیل ماگما در عمق قابل توجهی از گوشته است. این مطالعه گامی در جهت درک بهتر تاریخچه پیچیده تکتونوماگمایی زون سنندج-سیرجان در طی کرتاسه پایینی محسوب می شود.

۶- تقدیر و تشکر

از پشتیبانی های ارزشمند معاونت پژوهشی دانشگاه پیام نور که انجام این پژوهش را میسر ساخت قدردانی می نمایم. افزون بر این، قدردانی صمیمانه خود را از برگزارکنندگان محترم همایش بلورشناسی و کانی شناسی ایران اعلام می دارم که فرصت ارائه ی دستاوردهای این تحقیق را فراهم آوردند.

۷- مراجع

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148, 692–725.
- Amiri, M., Ahmad Khalaji, A., Tahmasbi, Z., Francisco Santos, J., Zarei Sahamieh, R., Zamanian, H., 2017. Geochemistry, petrogenesis, and tectonic setting of the Almogholagh batholith in the Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of African Earth Sciences* 134, 113–133.
- Ashragi, S. A., Mahmoudi Garaii, M., 2003. Geological report of the Tuyserkhan Sheet, scale (1:100000). Iran Geological Survey and Mineral Exploration country, Tehran, 12 p.

- Azizi, H., Najari, M., Asahara, Y., Catlos, E. J., Shimizu, M., Yamamoto, K., 2015. U–Pb zircon ages and geochemistry of Kangareh and Taghiabad mafic bodies in northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran: Evidence for intra-oceanic arc and back-arc tectonic regime in Late Jurassic. *Tectonophysics* 660, 47–64.
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B. P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35 (3), 586–621.
- Jamshidibadr, M., Collins, A. S., Salomao, G. N., Costa, M., 2018. U-Pb zircon ages, geochemistry and tectonic setting of felsic and mafic intrusive rocks of Almogholagh complex, NW Iran. *Periodico di Mineralogia* 87, 21-53.
- Jiang, Y. H., Jia, R. Y., Liu, Z., Liao, S. Y., Zhao, P., Zhou, Q., 2013. Origin of Middle Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Kunlun orogen, northwest China: a record of the closure of Paleo-Tethys. *Lithos* 156–159, 13–30.
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Mohajjel, M., 2011. U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 41 (2), 238–249.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L., Sahandi, M. R., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21 (4), 397–412.
- Pearce, J. A., Harris, N. B., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25 (4), 956–983.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Ghorbani, M., Pourmoafee, M., Sepahi, A. A., Vousoughi Abedini, M., Shang, C. K., 2015. The Almogholagh pluton, Sanandaj-Sirjan zone, Iran: geochemistry, U-(Th)-Pb titanite geochronology and implications for its tectonic evolution. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen. Journal of Mineralogy and Geochemistry* 192, 85-99.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications 42, 313–345.
- Valizadeh, M. V., Zarian, S., 1976. A petrological study of the Almogholagh, Asadabad and Hamedan plutons. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 8, 49-59.
- Wang, G. C., Jiang, Y. H., Liu, Z., Ni, C. Y., Qing, L., Zhang, Q., 2015. Elemental and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Jurassic adakitic granodiorite in central Fujian province, southeast China. *Mineralogy and Petrology* 109 (4), 501–518.
- Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95 (1), 185–187.

بررسی مورفوسکوپی بلورهای زیرکن در میکروگابروهای جنوب سلماس با استفاده از تصاویر کاتدولومینسانس

منیژه اسدپور

دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

m.asadpour@urmia.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، مورفوسکوپی بلورهای زیرکن موجود در میکروگابروهای منطقه جنوب سلماس در شمال غرب دریاچه ارومیه با استفاده از مطالعات سنگ‌نگاری، بررسی‌های کانی‌شناسی و تصاویر کاتدولومینسانس (CL) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌برداری از بخش‌های سالم و غیرهوازده انجام شد و پس از جداسازی زیرکن‌ها، ریخت بلوری و ساختارهای داخلی آن‌ها به‌طور دقیق مطالعه شد. نتایج تصاویر CL نشان‌دهنده حضور جمعیت‌های متنوعی از زیرکن‌ها با منشأ ماگمایی، دگرگونی و وراثتی است. بر اساس طبقه‌بندی مورفوسکوپی Pupin، زیرکن‌ها در محدوده تیپ‌های S، L و G، به‌همراه دانه‌هایی خارج از نمودار پوپین قرار می‌گیرند. زیرکن‌های منشوری کشیده و کوتاه با روشی یکنواخت و زون‌بندی ضعیف عمدتاً به‌عنوان زیرکن‌های ماگمایی اولیه تفسیر می‌شوند، در حالی که زیرکن‌های نیمه‌گرد تا گرد با زون‌بندی نوسانی و ساختار هسته-حاشیه، به زیرکن‌های وراثتی و دگرگون‌شده نسبت داده می‌شوند. همچنین برای هر دانه زیرکن، شماتیک ریخت‌شناسی بر اساس تصاویر CL تهیه شد که امکان تطبیق دقیق‌تر ویژگی‌های مورفوسکوپی با سیستم پوپین را فراهم نمود. نتایج این مطالعه بیانگر تاریخچه پیچیده ماگمایی-تکتونیکی میکروگابروهای جنوب سلماس و نقش مورفوسکوپی زیرکن در بازسازی شرایط تبلور و تحول سنگ میزبان است.

کلیدواژه‌ها: زیرکن، کاتدولومینسانس، تقسیم‌بندی پوپین، مورفوسکوپی دانه،

Morphoscopic Study of zircon crystals in the mmicrogabbros of south Salmas using cathodoluminescence imaging

Manijeh Asadpour

Urmia University, Faculty of Sciences, Department of Geology

Abstract

In this study, the morphoscopy of zircon crystals from the Khannik microgabbros, located in the northwestern part of Lake Urmia, was investigated using petrographic and mineralogical analyses together with cathodoluminescence (CL) imaging. Sampling was carried out on fresh and unweathered rocks, and after zircon separation, crystal morphology and internal structures were examined in detail. CL images reveal the presence of multiple zircon populations with magmatic, metamorphic, and inherited origins. Based on the morphoscopic classification of Pupin, the studied zircons fall within the S-, L-, and G-type fields, as well as grains plotting outside the Pupin typology. Elongated and short prismatic zircons with homogeneous CL brightness and weak zoning are mainly interpreted as primary magmatic zircons, whereas subrounded to rounded grains displaying oscillatory zoning and core-rim structures are attributed to inherited and metamorphosed zircons. In addition, schematic morphologic representations were constructed for each zircon grain based on CL observations, allowing a more precise correlation between crystal morphology and the Pupin classification scheme. The results highlight the complex magmatic-tectonic history of the Khannik microgabbros and emphasize the significance of zircon morphoscopy in reconstructing crystallization conditions and the evolutionary history of the host rocks

Keywords: Zirco, Cathodoluminescence, Crystal morphology

۱- مقدمه

زیرکن ($ZrSiO_4$) یکی از فراوان‌ترین کانی‌های فرعی در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی است که به دلیل پایداری شیمیایی و فیزیکی بالا، توانایی حفظ اطلاعات مربوط به شرایط تبلور و تحولات پساتبلوری را دارد. ریخت‌شناسی بلورهای زیرکن، به‌ویژه مورفولوژی خارجی و ساختارهای درونی آن‌ها، بازتابی از شرایط فیزیکی-شیمیایی محیط تبلور، ترکیب ماگما و فرآیندهای دگرگونی و تکتونیکی بعدی است (Pupin, 1980, Hoskin and Schaltegger, 2003).

مطالعات مورفوسکوپی زیرکن‌ها نشان داده است که شکل بلورها می‌تواند به‌عنوان شاخصی ترمومتریک و ژنتیکی برای تفسیر محیط تبلور مورد استفاده قرار گیرد. سیستم طبقه‌بندی ریخت‌شناسی (Pupin (1980 با معرفی تیپ‌های مختلف بلوری و شاخص A (اندیس آلکالینیت)، امکان تفسیر شرایط دمایی و شیمیایی ماگما را بر اساس شکل زیرکن‌ها فراهم کرده است. علاوه بر این، تصاویر کاتدولومینسانس (CL) ابزار مؤثری برای شناسایی نواربندی داخلی، هسته‌های موروثی و مراحل مختلف رشد بلور محسوب می‌شوند (Vavra, 1990). یکی از روش‌های مؤثر در بررسی شرایط تبلور و تاریخچه ژنتیکی زیرکن‌ها، مطالعه مورفوسکوپی بلورها و تحلیل ریخت‌شناسی آن‌ها است. ریخت بلوری زیرکن تابعی از عوامل متعددی از جمله دما، ترکیب شیمیایی ماگما، میزان اشباع زیرکن و نرخ رشد بلور می‌باشد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد محیط تبلور فراهم آورد. در این میان، سیستم طبقه‌بندی مورفوسکوپی (Pupin (1980 به‌عنوان یکی از پرکاربردترین چارچوب‌های ترمومتریک-ژنتیکی زیرکن، امکان تفکیک زیرکن‌های ماگمایی، دگرگونی و وراثتی و همچنین برآورد نسبی شرایط دمایی تبلور را فراهم می‌سازد. با وجود اهمیت این روش، مطالعات مورفوسکوپی زیرکن در سنگ‌های مافیک به‌ویژه میکروگابروهای شمال غرب دریاچه ارومیه محدود بوده است. از این رو، هدف اصلی این پژوهش بررسی مورفوسکوپی بلورهای زیرکن در میکروگابروهای جنوب سلماس بر اساس تصاویر کاتدولومینسانس و سیستم (Pupin (1980 و تفسیر پیامدهای ماگمایی-تکتونیکی آن‌ها می‌باشد.

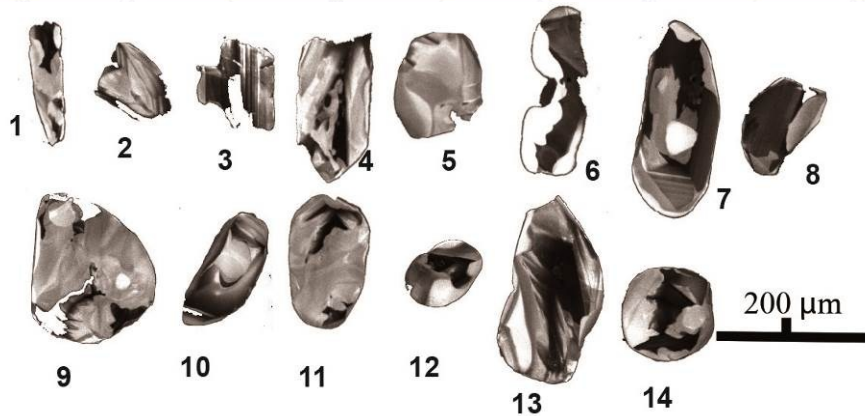
۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی دانه‌های زیرکن انجام شده است. نمونه‌برداری از نمونه‌های سالم و غیرهوازده صورت گرفت تا تغییرات کانی‌شناسی واقعی سنگ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در مجموع، ۱۵ نمونه از میکروگابروهای جنوب سلماس برداشت شد. پس از تهیه مقاطع نازک، مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان انجام گرفت.

به‌منظور بررسی مورفوسکوپی و ساختارهای درونی زیرکن‌ها، دانه‌های زیرکن از سنگ میزبان جدا شده و ۱۴ دانه منتخب بر اساس تنوع ریخت‌شناسی مورد مطالعه قرار گرفتند. این دانه‌ها با استفاده از تصاویر کاتدولومینسانس (CL) بررسی و تصویربرداری شدند. طبقه‌بندی ریخت‌شناسی زیرکن‌ها بر اساس سیستم ترمومتریک (Pupin (1980 انجام شد. و شاخص A (اندیس آلکالینیت) برای تفسیر شرایط تبلور اولیه مورد استفاده قرار گرفت.

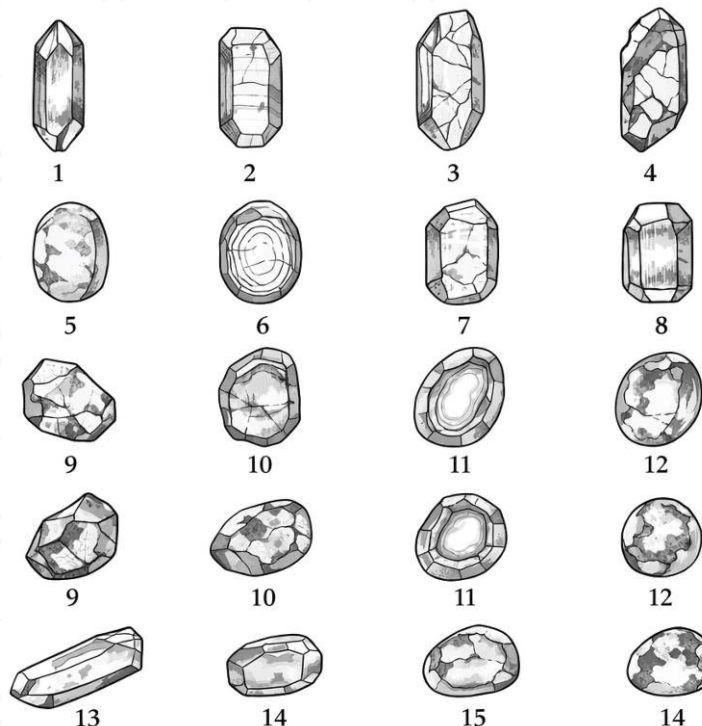
۳- بحث

بررسی مورفوسکوپی بلورهای زیرکن در میکروگابروهای جنوب سلماس، بر پایه تصاویر کاتدولومینسانس (CL) و طبقه‌بندی ریخت‌شناسی (Pupin (1980، نشان‌دهنده حضور همزمان چندین جمعیت ژنتیکی از زیرکن‌ها با منشأ ماگمایی، دگرگونی و وراثتی است. تنوع ریختی و ساختاری مشاهده‌شده در ۱۴ دانه زیرکن مورد مطالعه، از منشوری نسبتاً شکل‌دار تا گرد و کاملاً بی‌شکل، بازتابی از تاریخچه پیچیده ماگمایی-تکتونیکی سنگ میزبان و برهم‌کنش ماگمای مافیک با سنگ‌های قدیمی‌تر بی‌سنگ در طی جایگیری میکروگابروها می‌باشد.



شکل ۱: تصاویر کاتدولومینسانس از زیرکن‌های گابروهای مورد مطالعه.

به‌منظور نمایش و مقایسه دقیق ویژگی‌های مورفوسکوپی، طرحواره‌های شماتیک ریخت‌شناسی بلورهای زیرکن (شکل ۲) بر اساس تصاویر CL تهیه شد. این طرحواره‌ها ویژگی‌های نسی شامل نسبت طول به عرض بلور، میزان توسعه یا تخریب وجوه بلوری، گردشگی، حضور ساختار هسته-حاشیه و الگوی زون‌بندی داخلی را نشان می‌دهند. هر طرحواره متناظر با یک دانه زیرکن شماره‌گذاری شده در تصاویر CL بوده و طبقه‌بندی مورفوسکوپی آن‌ها بر اساس سیستم Pupin (1980) انجام شده است. لازم به تأکید است که این طرحواره‌ها بازسازی هندسه واقعی بلورها نیستند، بلکه نمایش شماتیک ویژگی‌های شاخص ریخت‌شناسی با هدف تفسیر ژنتیکی زیرکن‌ها می‌باشند.



شکل ۲. طرحواره‌های شماتیک ریخت‌شناسی بلورهای زیرکن انتخابی از میکروگابروهای جنوب سلماس

مطابق با طبقه‌بندی Pupin (1980) (جدول ۱)، ریخت بلوری زیرکن‌ها تابعی از شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما، به‌ویژه دما، ترکیب شیمیایی و نرخ رشد بلور است. در نمونه‌های مورد مطالعه، بخش قابل توجهی از زیرکن‌ها (مانند دانه‌های ۱، ۳ و ۱۳)

دارای ریخت منشوری کشیده با نسبت طول به عرض بالا و سطوح نسبتاً سالم بوده و در محدوده تیپ S-type قرار می‌گیرند. این تیپ ریختی معمولاً با تبلور در دماهای بالا و ماگماهای مافیک تا حدواسط مرتبط دانسته می‌شود (Pupin, 1980; Corfu et al., 2003) و حضور آن‌ها مؤید تبلور مستقیم زیرکن‌های ماگمایی اولیه همزمان با تکوین میکروگابروهای منطقه است. در مقابل، زیرکن‌های با ریخت منشوری کوتاه‌تر و ضخیم‌تر (مانند دانه‌های ۲، ۴ و ۸) در محدوده L-type قرار می‌گیرند که بیانگر شرایط دمایی متوسط تا نسبتاً بالا و کاهش نرخ رشد ترجیحی در امتداد محور C می‌باشد. این ویژگی‌ها می‌تواند ناشی از تغییرات موضعی در ترکیب ماگما، میزان اشباع زیرکن یا نوسانات جزئی در شرایط تبلور در طی سرد شدن ماگمای مافیک باشد (Pupin, 1980; Hoskin & Schaltegger, 2003).

بخش قابل توجهی از زیرکن‌های بررسی‌شده (مانند دانه‌های ۵، ۹، ۱۲ و ۱۴) دارای ریخت نیمه‌گرد تا کاملاً بی‌شکل (anhedral) بوده و در چارچوب کلاسیک نمودار Pupin به‌عنوان خارج از تیپ (out of typology) طبقه‌بندی می‌شوند. این زیرکن‌ها اغلب دارای زون‌بندی نوسانی، مرزهای فرسایش‌یافته و ساختارهای داخلی پیچیده در تصاویر CL هستند. چنین ویژگی‌هایی معمولاً به زیرکن‌های وراثتی نسبت داده می‌شود که پیش از جایگیری ماگمای مافیک، در سنگ‌های قدیمی‌تر پی‌سنگ یا سنگ‌های مسیر تبلور یافته‌اند و در طی تزریق ماگمای میکروگابرویی مجدداً وارد سیستم ماگمایی شده‌اند (Watson et al., 2006; Corfu et al., 2003). et al., 2006; Corfu et al., 2003). جزئی و رشد مجدد ناقص دانست؛ فرآیندی که در آن، بلور زیرکن به‌طور کامل ذوب نمی‌شود، اما لبه‌های بلوری آن دچار فرسایش و از بین رفتن وجوه بلوری اولیه می‌گردد (Hoskin, 2000). این تفسیر با گستره سنی وسیع زیرکن‌های وراثتی (حدود ۳۷۰ تا ۵۴۱ میلیون سال) گزارش‌شده در مطالعات سن‌سنجی U-Pb (اسدپور و همکاران، ۱۳۹۲) سازگاری دارد.

در سیستم (Pupin, 1980)، علاوه بر شاخص دمایی (T)، اندیس آلکالینیته (A) نیز نقش مهمی در کنترل ریخت بلوری زیرکن‌ها ایفا می‌کند. توزیع زیرکن‌های مورد مطالعه در محدوده تیپ‌های S و L نشان می‌دهد که ماگمای مولد میکروگابروهای جنوب سلماس عمدتاً دارای گرایش کم‌قلیایی تا قلیایی متوسط بوده است. غلبه تیپ‌های منشوری کشیده (S-type) بیانگر شرایط ماگمایی با آلکالینیته پایین‌تر و دمای بالاتر است، در حالی که حضور تیپ‌های منشوری کوتاه‌تر (L-type) می‌تواند نشان‌دهنده افزایش نسبی آلکالینیته یا تغییرات موضعی در ترکیب ماگما در طی تبلور باشد. زیرکن‌های تیپ G و دانه‌های خارج از نمودار Pupin نیز احتمالاً بازتاب شرایط دگرگونی یا برهم‌کنش ماگمای مافیک با سنگ‌های غنی‌تر از عناصر قلیایی در سنگ‌های مسیر و پی‌سنگ هستند.

زیرکن‌هایی با ریخت نیمه‌گرد، ساختار هسته-حاشیه و زون‌بندی نسبتاً منظم (مانند دانه‌های ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱) در محدوده G-type قرار می‌گیرند. این تیپ معمولاً به زیرکن‌هایی نسبت داده می‌شود که یا در شرایط دگرگونی رشد کرده‌اند، یا زیرکن‌های وراثتی هستند که در طی یک رویداد دگرگونی یا ماگمایی متأخر دچار باز تبلور و رشد حاشیه‌ای شده‌اند (Pupin, 1980; Rubatto, 2002). حضور هسته‌های قدیمی با حاشیه‌های جوان‌تر در تصاویر CL بیانگر چندمرحله‌ای بودن تاریخچه رشد این زیرکن‌ها است.

منطقه جنوب سلماس در یک پهنه برشی و تکتونیکی فعال قرار دارد (حقی‌پور و آقانباتی، ۱۳۸۳) و این فعالیت‌ها نقش مهمی در تغییر شکل و ویژگی‌های ساختاری زیرکن‌ها ایفا کرده‌اند. وجود شکستگی‌های داخلی، خمیدگی بلورها و اعوجاج در زون‌بندی CL، به‌ویژه در زیرکن‌های وراثتی و دگرگونی، نشان‌دهنده تأثیر تنش‌های تکتونیکی پس از تبلور است. عدم ترمیم این شکستگی‌ها و حفظ ساختارهای شکننده، حاکی از آن است که تغییر شکل در شرایط نسبتاً خشک و با حضور محدود فازهای سیال رخ داده است؛ زیرا در حضور سیالات فعال، انتظار می‌رود که بلورها از طریق باز تبلور پویا ترمیم شوند (Passchier and Trouw, 2005).

جدول ۲. طبقه‌بندی مورفوسکوپی زیرکن‌های میکروگابروهای جنوب سمااس بر اساس سیستم (Pupin 1980).

شماره زیرکن	ریخت بلور	ویژگی‌های تصویر CL	تیپ Pupin (1980)	محدوده دمایی نسبی	تفسیر ژنتیکی
1	منشوری کشیده با انتهای نسبتاً سالم	روشنایی یکنواخت، بدون زون‌بندی مشخص	S	دمای بالا	زیرکن ماگمایی اولیه
2	منشوری کوتاه‌شده (Stubby)	زون‌بندی بسیار ضعیف	L	دمای متوسط تا بالا	زیرکن ماگمایی
3	منشوری کشیده با لبه‌های شکسته	CL یکنواخت	S	دمای بالا	زیرکن ماگمایی، متأثر از تنش
4	منشوری ناقص و نامتقارن	ناهمگنی خفیف در CL	L	دمای متوسط تا بالا	زیرکن ماگمایی
5	نیمه‌گرد تا بی‌شکل	زون‌بندی نامنظم	خارج از تیپ	متغیر	زیرکن وراثتی
6	نیمه‌گرد با کشیدگی کم	زون‌بندی نوسانی ناقص	G	دمای متوسط	زیرکن دگرریخت‌شده
7	منشوری بزرگ با هسته مشخص	هسته روشن و حاشیه تیره	G (هسته) / L (حاشیه)	متوسط	زیرکن وراثتی با رشد مجدد
8	منشوری کوتاه	CL تقریباً یکنواخت	L	دمای متوسط تا بالا	زیرکن ماگمایی
9	بی‌شکل و گرد شده	زون‌بندی نامنظم	خارج از تیپ	متغیر	زیرکن وراثتی
10	نیمه‌گرد با ترک‌های داخلی	CL ناهمگن	G	دمای متوسط	زیرکن وراثتی دگرریخت
11	نیمه‌گرد با مرز هسته-حاشیه	ساختار هسته-حاشیه	G	دمای متوسط	زیرکن وراثتی با باز تبلور
12	کوچک و گرد	روشنایی یکنواخت	خارج از تیپ	متغیر	زیرکن وراثتی یا آواری
13	منشوری کشیده و سالم	بدون زون‌بندی	S	دمای بالا	زیرکن ماگمایی اولیه
14	گرد و بی‌شکل	زون‌بندی نامنظم	خارج از تیپ	متغیر	زیرکن وراثتی

در مجموع، غلبه تیپ‌های S و L در نمودار Pupin (1980) بیانگر شرایط تبلور دمای بالا برای زیرکن‌های ماگمایی اولیه میکروگابروهای جنوب سلماس است که با ترکیب مافیک سنگ میزبان همخوانی دارد. حضور تیپ‌های G و زیرکن‌های نامنظم خارج از نمودار Pupin نیز نشان‌دهنده بقای زیرکن‌های وراثتی و تأثیر فرآیندهای دگرگونی و تکتونیکی پس از تبلور اولیه می‌باشد. این تنوع ریخت‌شناسی، ثبت‌کننده تاریخچه چندمرحله‌ای تبلور، بازبلوری و دگرشکلی زیرکن‌ها در محیط پویا و برشی شمال‌غرب دریاچه ارومیه است (Pupin, 1980; Corfu et al., 2003).

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های مورفوسکوپی و تصاویر کاتدولومینسانس زیرکن‌های میکروگابروهای جنوب سلماس نشان می‌دهد که این دانه‌ها از تنوع قابل توجهی از نظر ریخت بلوری، ساختارهای داخلی و میزان حفظ وجوه بلوری برخوردارند. بر اساس طبقه‌بندی Pupin، زیرکن‌ها در محدوده تیپ‌های S، L و G به همراه دانه‌هایی خارج از نمودار پوپین قرار می‌گیرند. زیرکن‌های منشوری کشیده و کوتاه با روشنایی یکنواخت CL عمدتاً فاقد زون‌بندی مشخص بوده، در حالی که زیرکن‌های نیمه‌گرد تا گرد، اغلب دارای زون‌بندی نوسانی و ساختار هسته-حاشیه هستند. همچنین، وجود شکستگی‌ها و اعوجاج‌های بلوری در بخشی از زیرکن‌ها مشاهده می‌شود.

۵- مراجع

- آقانباتی، آ.، حقی پور، آ.، ۱۳۸۳. نقشه ۱:۱۰۰۰۰ سرو. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- اسدپور، م.، پورمعافی، س.م.، و هویس، ث.، ژئوشیمی، پترولوژی و تعیین سن توده مافیک - اولترامافیک غازان، شما غرب ایران، مجله پترولوژی، جلد ۴، شماره ۱۴، ص ۱ - ۱۶.
- Hoskin, P. W. O., & Black, L. P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18, 423–439.
- Hoskin, P. W. O., & Schaltegger, U., 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hanchar, J. M., & Hoskin, P. W. O. (Eds.), *Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Vol. 53, Mineralogical Society of America, Washington, DC, pp. 27–62.
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. J., 2005. *Microtectonics* (2nd ed.). Springer-Verlag, Berlin, 366 p.
- Pupin, J. P., 1980). Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73, 207–220.
- Rubatto, D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184, 123–138.
- Vavra, G., 1990. On the kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: a cathodoluminescence study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106, 90–99.

ویژگی‌های صحرایی و پتروگرافی مگاکریست‌های اولیه آمفیبول در سنگ‌های مافیک- اولترامافیک شمال غرب دریاچه ارومیه

منیژه اسدپور *

دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی
m.asadpour@urmia.ac.ir

چکیده

بلورهای درشت آمفیبول (مگاکریست‌ها) از جمله کانی‌های شاخص در سنگ‌های مافیک-اولترامافیک بوده و مطالعه آن‌ها می‌تواند اطلاعات مهمی درباره شرایط فیزیکیوشیمیایی و مراحل اولیه تبلور ماگما فراهم آورد. در این پژوهش، ویژگی‌های صحرایی و پتروگرافی مگاکریست‌های آمفیبول در کمپلکس مافیک-اولترامافیک لایه‌ای ممکن در شمال غرب ایران بررسی شده است. این بلورها با اندازه‌های در حدود ۳ تا ۸ سانتی‌متر و در برخی موارد بزرگ‌تر، به‌صورت خوشه‌ای در هورنبلندیت‌ها و یا به‌صورت منفرد در رگه‌های فلدسپاتی و پگماتیت‌های گابرویی رخ می‌دهند. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که مگاکریست‌های آمفیبول دارای مرزهای تیز با سنگ میزبان بوده و تمرکز آن‌ها به شکستگی‌ها یا زون‌های دگرسانی محدود نمی‌شود. در مقاطع نازک، این بلورها شکل euhedral تا subhedral، کلیواژهای مشخص و خواص نوری تیپیک آمفیبول‌های ماگمایی شامل پلی‌کروئیسیم قوی و زاویه خاموشی منظم را نشان می‌دهند. نبود جان‌شینی گسترده توسط کانی‌های ثانویه و فقدان بافت‌های فیبری یا نامنظم، منشأ ثانویه یا دگرسانی‌زاد این آمفیبول‌ها را منتفی می‌سازد. مجموعه شواهد صحرایی و پتروگرافی بیانگر آن است که آمفیبول‌های مورد مطالعه مگاکریست‌های اولیه با منشأ ماگمایی بوده و در یک سیستم مافیک-اولترامافیک نسبتاً غنی از H_2O تبلور یافته‌اند.

کلیدواژه‌ها: مگاکریست آمفیبول، هورنبلندیت، پگماتیت گابرو، ممکن، شمال غرب ایران

Field and petrographic characteristics of primary amphibole megacrysts in mafic-ultramafic rocks NW of Lake Urmia

Manijeh Asadpour
Urmia University, Faculty of Sciences, Department of Geology

Abstract

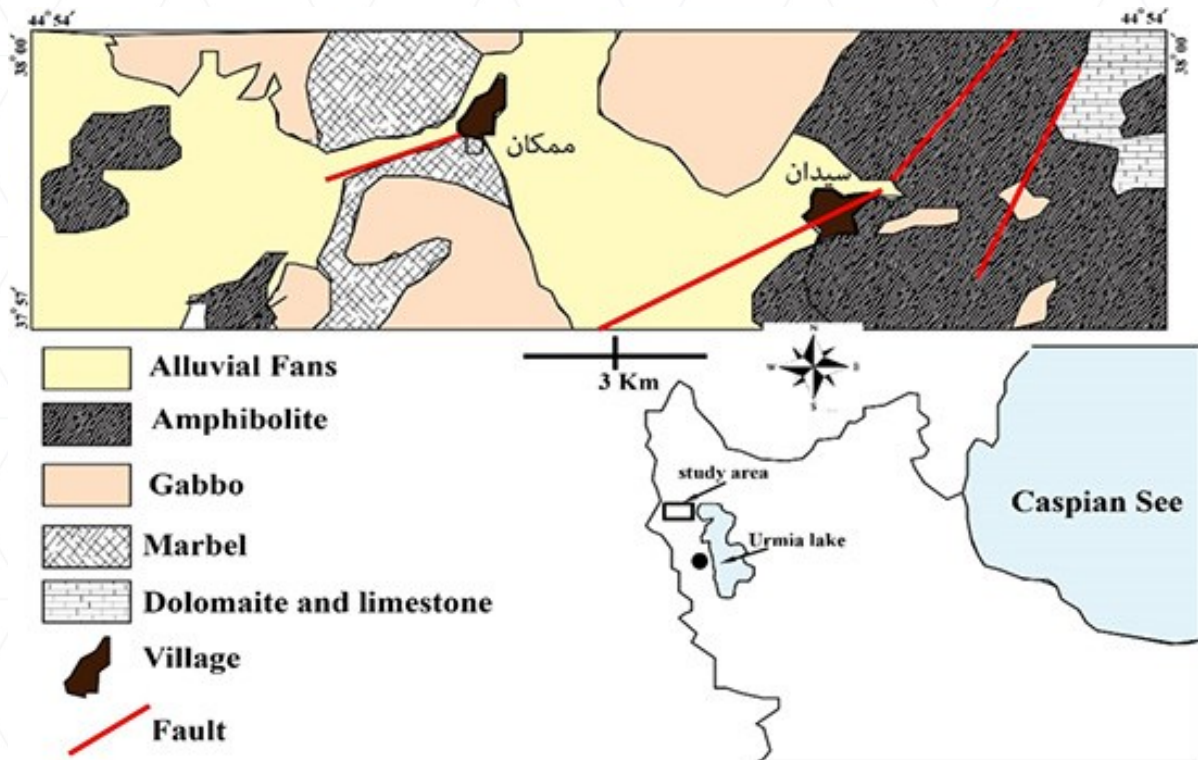
Amphibole megacrysts are important constituents of mafic-ultramafic rocks and provide valuable insights into the physicochemical conditions and early stages of magma crystallization. This study investigates the field occurrence and petrographic characteristics of amphibole megacrysts from the layered mafic-ultramafic Mamakan Complex, located in northwestern Iran within the Sanandaj-Sirjan Zone. The amphibole crystals occur as clusters within hornblendites and as isolated crystals within feldspathic veins and gabbroic pegmatites, with crystal sizes commonly ranging from ~3 to 8 cm and locally exceeding this range. Field observations show that the megacrysts have sharp to very sharp contacts with their host rocks and are not spatially associated with fractures or alteration zones, arguing against a secondary or metasomatic origin. Petrographic studies reveal euhedral to subhedral crystal forms, well-developed cleavage, and typical magmatic optical properties, including strong pleochroism and well-defined extinction angles. The absence of pervasive replacement by secondary minerals such as chlorite, epidote, or tremolite, as well as the lack of fibrous or irregular textures, further supports a primary magmatic origin for these amphiboles. Textural relationships indicate that the amphibole megacrysts crystallized prior to final solidification of the magma and represent early or near-early phases in the crystallization sequence of the mafic-ultramafic system. The abundance of amphibole relative to olivine and pyroxenes, together with the widespread development of hornblende-rich gabbros and gabbroic pegmatites, suggests crystallization from unusually H_2O -rich mafic magmas evolving in a relatively "wet" magmatic system. These amphibole megacrysts thus play a key role in reconstructing the crystallization history and magmatic evolution of the Mamakan Complex.

Keywords: Amphibole megacryst; Hornblendite; Gabbroic pegmatite; Mamakan; Northwestern Iran

۱- مقدمه

بلورهای درشت (Megacrysts) کانی‌های مافیک، به‌ویژه آمفیبول‌ها، از جمله اجزای مهم و در عین حال پیچیده در سنگ‌های مافیک و اولترامافیک محسوب می‌شوند که مطالعه آن‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط تبلور ماگما، نرخ رشد بلورها و تاریخچه تحول ماگمایی فراهم آورد. آمفیبول‌ها به دلیل حساسیت بالای ترکیب و پایداری خود نسبت به فشار، دما و میزان آب ماگما، از شاخص‌ترین کانی‌ها در تفسیر فرآیندهای ماگمایی به‌شمار می‌روند. حضور آمفیبول به‌صورت بلورهای درشت و اغلب euhedral معمولاً بیانگر تبلور زود هنگام در محیطی نسبتاً عمیق و غنی از سیالات بوده و می‌تواند نشان‌دهنده شرایط ویژه فیزیکیوشیمیایی در مراحل اولیه تبلور ماگما باشد.

شمال غرب ایران، به‌ویژه ناحیه ممکن، بخشی از پهنه زون سنندج - سیرجان (آقنابتی و حقی پور، ۱۳۸۳) است که در آن رخنمون‌های متنوعی از سنگ‌های مافیک تا اولترامافیک گزارش شده است (اسدپور و همکاران، و ۱۳۹۲). این منطقه به‌دلیل جایگاه زمین‌ساختی ویژه و سابقه فعالیت‌های ماگمایی، بستر مناسبی برای شکل‌گیری و حفظ بلورهای درشت آمفیبول فراهم کرده است. با وجود مطالعات متعدد ژئوشیمیایی و سنگ‌نگاری در مقیاس منطقه‌ای، توصیف دقیق ویژگی‌های صحرایی و پتروگرافی آمفیبول‌های درشت بلور در منطقه ممکن تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر مشاهدات صحرایی و بررسی‌های پتروگرافی، به توصیف مورفولوژی، روابط بافتی و ویژگی‌های نوری بلورهای درشت آمفیبول همراه با سنگ‌های مافیک - اولترامافیک منطقه ممکن می‌پردازد و تلاش می‌کند شواهدی پتروگرافی از نحوه و شرایط تبلور این بلورها را ارائه کند.



شکل-۱- نقشه زمین‌شناسی ساده شده از منطقه مورد مطالعه با اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرو (آقنابتی و حقی پور، ۱۳۸۳).

۲- مواد و روش‌ها

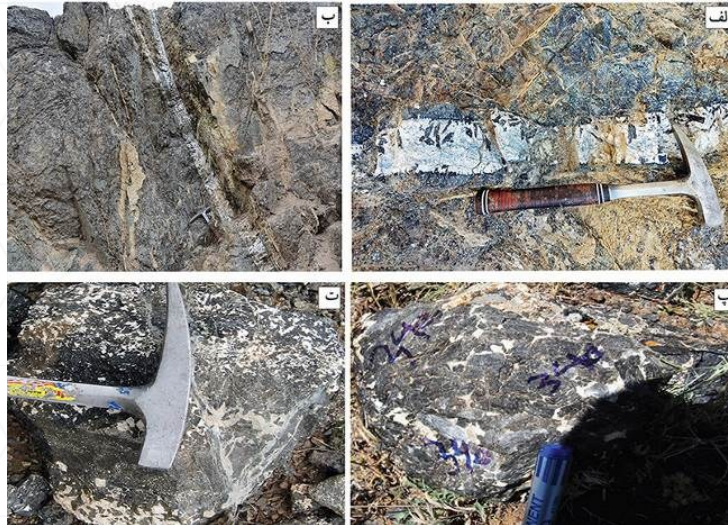
برای مطالعه آمفیبولیت‌های منطقه بعد از پیمایش و اندازه‌گیری‌های صحرائی، تعداد ۳۰ نمونه سنگ برداشت شد. تمام نقاط نمونه برداری توسط دستگاه GPS ثبت مختصات گردیدند. با استفاده از دستگاه برش سنگ از ۲۰ نمونه سالم تر، مقاطع نازک تهیه گردید. سپس مطالعه دقیق کانی‌شناسی و بافتی مقاطع نازک با استفاده از میکروسکوپ انجام گردید.

۳- بحث

منطقه مورد مطالعه (مکان) در شمال‌باختر ورقه سرو و در فاصله حدود ۷۵ کیلومتری شمال شهرستان ارومیه واقع شده و بخشی از زون سنندج-سیرجان به شمار می‌آید (Stocklin, 1968). این منطقه شامل واحدهای رسوبی پرکامبرین و پالئوزوئیک زیرین است. کمپلکس مافیک-اولترامافیک لایه‌ای درون این واحدها نفوذ کرده است (اسدپور و همکاران، ۱۳۹۲ و شکل ۱). این منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های مافیک تا اولترامافیک است که عمدتاً به صورت لایه‌های متناوب گابروهای متوسط دانه تا پگماتیت گابرو، آنورتوزیت (با مرز تدریجی) و بخش‌هایی از سنگ‌های اولترامافیک نظیر ورلیت، دونیت، هارزبورگیت، پیروکسنیت و هورنبلندیت رخمون دارند. مرز میان این واحدها در مقیاس صحرائی می‌تواند تیز یا تدریجی باشد که بیانگر تغییرات پیوسته ترکیب ماگما طی فرآیند تبلور است. هر دو بخش مافیک و اولترامافیک توسط دایک‌های فلدسپاتی، عمدتاً آنورتوزیت‌های پگماتی، قطع شده‌اند. در برخی موارد، توده‌های عدسی‌شکل گابرو در داخل پگماتیت گابروها و یا برعکس قرار گرفته‌اند. این روابط لیتولوژیکی و بافتی نشان می‌دهد که تغییرات ترکیب سنگ‌ها عمدتاً حاصل فرآیندهای درون‌محفظه‌ای مانند تفریق بلوری و تبلور تفاضلی بوده است و نه دگرگونی یا متاسوماتیسم بعدی.

بافت غالب بخش مافیک گرانولار متوسط تا درشت است. مجموعه کانیایی اولیه عمدتاً ساده بوده و شامل $Plg + Cpx \pm Opx \pm Ol$ و گاهی آمفیبول بصورت بلورهای متوسط تا درشت است. از کانی‌های فرعی می‌توان به کانی‌های اپاک، زوئیزیت، کلریت، اپیدوت، اسفن، کانی‌های سولفیدی و کربنات‌ها اشاره کرد. پگماتیت گابروها دارای بلورهای بسیار درشت پیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز هستند که اندازه آن‌ها گاه به بیش از ۱۰ سانتی‌متر می‌رسد؛ به طوری که در مقاطع نازک، معمولاً تنها یک یا دو بلور در میدان دید میکروسکوپ قابل مشاهده است. هورنبلندیت‌ها بخش کوچکی ولی مهم از سنگ‌های اولترامافیک این کمپلکس را تشکیل می‌دهند و به صورت عدسی‌های مجزا یا لایه‌های متناوب همراه با گابروهای لایه‌ای رخ می‌دهند. این سنگ‌ها اغلب حاوی رگچه‌ها و عدسی‌های لویکوکراتی فلدسپاتی هستند که احتمالاً حاصل ذوب‌بخشی محدود گابروها در اثر دگرشکلی شدید و دماهای بالا می‌باشند. بلورهای درشت و اغلب خوش‌رخ هورنبلند به وضوح در صحرا و نمونه دستی در داخل آنها قابل مشاهده‌اند (شکل ۲ و ۳).

بلورهای درشت آمفیبول در منطقه ممکن با اندازه‌های عمدتاً در حدود ۳ تا ۸ سانتی‌متر به صورت خوشه‌ای در هورنبلندیت‌ها و یا به صورت منفرد در رگه‌های فلدسپاتی همراه با سنگ‌های مافیک-اولترامافیک رخ می‌دهند (شکل ۲ و ۳). مشاهدات صحرائی نشان می‌دهد که این بلورها دارای مرزهای نسبتاً تیز در هورنبلندیت‌ها و کاملاً تیز در رگه‌های فلدسپاتی هستند و تمرکز آن‌ها به شکستگی‌ها یا زون‌های دگرسانی محدود نمی‌شود. این ویژگی‌ها نخستین شواهدی هستند که با منشأ اولیه و ماگمایی آمفیبول‌ها سازگارند.

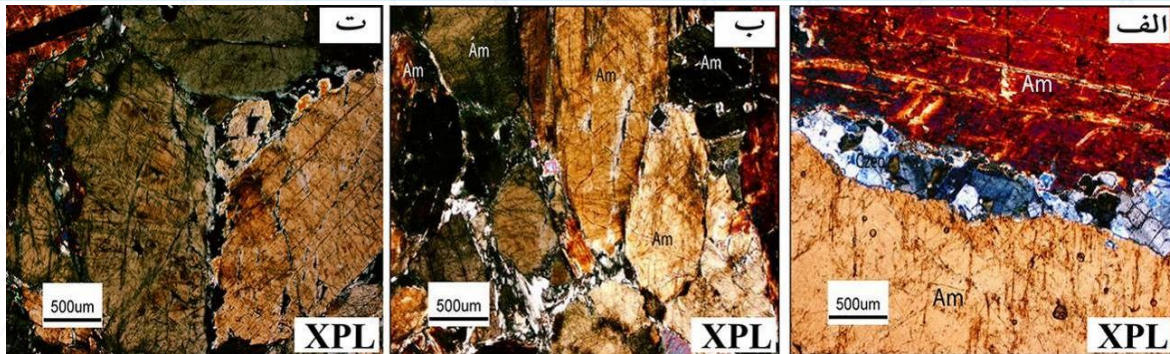


شکل ۲: الف و ب: نمایی از رگه فلدسپاتی حاوی مگاکریست های آمفیبول در داخل بخش مافیکی، (پ) رخنمون هورنبلندیت با دشت بلورهای آمفیبول، (ت) یک نمونه با مرز تدریجی از پگماتیت گابرو، هورنبلندیت و بخش آنورتوزیتی (مگاکریست های آمفیبول بوضوح دیده می شود).



شکل ۳: الف و ب: بخش های عدسی مانند فلدسپاتی با بلورهای درشت و شکل دار آمفیبول در داخل بخش مافیکی، (پ) نمونه دستی یک هورنبلندیت با مگاکریست های درشت آمفیبول، (ت) نمونه صحرایی از مگاکریست های آمفیبول در یک متن فلدسپاتی.

در مقاطع نازک، آمفیبول‌ها عمدتاً دارای شکل euhedral در رگه‌های فلدسپاتی و شکل subhedral تا euhedral در پگماتیت گابروها و هورنبلندیت‌ها هستند. این بلورها کلیواژهای مشخص و خواص نوری تیپیک آمفیبول‌های ماگمایی شامل پلی کروئیسیم قوی، زاویه خاموشی مشخص و رنگ‌های تداخلی منظم را نشان می‌دهند. نبود جانشینی گسترده توسط کانی‌های ثانویه نظیر کلریت، اپیدوت یا ترمولیت و فقدان بافت‌های فیبری یا نامنظم، تشکیل ثانویه یا دگرسانی‌زاد این آمفیبول‌ها را منتفی می‌سازد (شکل ۴).



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی بلورهای درشت آمفیبول همراه با مقداری از کانی‌های فلدسپار، اپیدوت و کوارتز.

ویژگی‌های مورفولوژیکی و روابط بافتی آمفیبول‌های درشت‌بلور منطقه ممکن حاکی از تبلور آن‌ها در مراحل نسبتاً اولیه تحول ماگما است. شکلدار بودن بلورها و رشد آزاد آن‌ها نشان می‌دهد که تبلور آمفیبول‌ها در شرایطی انجام شده که فضای کافی و نرخ رشد نسبتاً پایین فراهم بوده است؛ شرایطی که معمولاً با تبلور در اعماق بیشتر یا در مراحل اولیه صعود ماگما مطابقت دارد. قرارگیری بلورهای آمفیبول در تماس مستقیم با ماتریکس سنگ میزبان و نبود شواهدی از رشد ثانویه در امتداد شکستگی‌ها نشان می‌دهد که این بلورها پیش از انجماد نهایی مذاب شکل گرفته‌اند. از این‌رو، آمفیبول‌ها را می‌توان به‌عنوان فازهای اولیه یا نزدیک به اولیه در توالی تبلور ماگمایی سنگ‌های مافیک-اولترامافیک منطقه در نظر گرفت. در برخی نمونه‌ها، حضور هاله‌های واکنشی بسیار محدود یا حاشیه‌های کلریتی ضعیف در اطراف بلورها مشاهده می‌شود که احتمالاً به برهم‌کنش محدود آمفیبول‌ها با مذاب یا سیالات در مراحل پایانی تبلور مربوط است و ماهیت اولیه این بلورها را زیر سؤال نمی‌برد. در مجموع، شواهد صحرایی، کانی‌شناسی و پتروگرافی نشان می‌دهد که آمفیبول‌های درشت‌بلور منطقه ممکن مگاکریست‌های اولیه با منشأ ماگمایی هستند. فراوانی بالای هورنبلند نسبت به الیون، پیروکسن‌ها و پلاژیوکلاز در سنگ‌های مافیک، همراه با توسعه گسترده گابروهای پگماتیته و هورنبلنددار، بیانگر آن است که ماگماهای مافیک این منطقه به‌طور غیرمعمولی از H_2O غنی بوده و در یک سیستم ماگمایی نسبتاً آبدار تکامل یافته‌اند. این آمفیبول‌ها نقش کلیدی در بازسازی تاریخچه تبلور و شرایط فیزیکوشیمیایی ماگمای مولد کمپلکس ممکن ایفا می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی انجام شده بر روی کمپلکس مافیک-اولترامافیک لایه‌ای ممکن نشان می‌دهد که بلورهای درشت آمفیبول موجود در این مجموعه، مگاکریست‌های اولیه با منشأ ماگمایی هستند. رخداد این بلورها به صورت خوشه‌ای در هورنبلندیت‌ها و یا منفرد در رگه‌های فلدسپاتی، همراه با مرزهای تیز با سنگ میزبان و نبود تمرکز آن‌ها در امتداد شکستگی‌ها یا زون‌های دگرسانی، با تشکیل ثانویه یا متاسوماتیسم سازگار نیست. ویژگی‌های نوری تیپیک آمفیبول‌های ماگمایی، شکل subhedral to euhedral و فقدان جانیشینی گسترده توسط کانی‌های ثانویه در مقاطع نازک، این تفسیر را تقویت می‌کند. روابط بافتی و لیتولوژیکی میان هورنبلندیت‌ها، گابروهای لایه‌ای و گابروهای پگماتیته نشان می‌دهد که این سنگ‌ها از یک سامانه ماگمایی مشترک منشأ گرفته‌اند و تغییرات ترکیب آن‌ها عمدتاً حاصل فرآیندهای درون‌محفظه‌ای بوده است. در مجموع، شواهد موجود حاکی از آن است که ماگماهای مافیک منطقه ممکن در یک سیستم نسبتاً غنی از H_2O تکامل یافته‌اند که شرایط لازم برای تبلور زودهنگام آمفیبول و تشکیل مگاکریست‌های درشت را فراهم کرده است.

۵- مراجع

- آقانباتی، آ.، حقی پور، آ.، ۱۳۸۳. نقشه ۱:۱۰۰۰۰ سرو. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- اسدپور، م.، پورمعافی، س.م.، و هویس، ث.، ۱۳۹۲. ژئوشیمی، پترولوژی و تعیین سن توده مافیک - اولترامافیک غازان، شما غرب ایران، مجله پترولوژی، جلد ۴، شماره ۱۴، ص ۱ - ۱۶.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin 52, 1229-1258.