



RESEARCH ARTICLE

10.22067/econg.2025.1156



Evaluating the Economic Potential of Listvenitization of Anarak Ophiolite Serpentinites using Mineralogical and Geochemical Evidence

Mohammad Vahedi¹ , Hassan Zamanian^{2*} , Zahra Alaminia^{3*} ¹ Ph.D. student, Department of Geology, Faculty of Basic Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran² Professor, Faculty of Geology, Faculty of Science, University of Tehran, Tehran, Iran³ Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 16 August 2025
Revised: 21 October 2025
Accepted: 22 October 2025

Keywords

Serpentinite
Listvenite
Geochemistry
Hydrothermal alteration
Central Iran

*Corresponding author

Hassan Zamanian
✉ hasanzamanian@ut.ac.ir

Zahra Alaminia
✉ alaminia@um.ac.ir

ABSTRACT

The Anarak ophiolite complex is in northeastern Isfahan, at the northwestern boundary of the Central Iranian Microcontinent. This complex consists of serpentinitized mantle peridotites, cumulate gabbros, pillow lavas, mafic-ultramafic dikes, glaucophane-bearing metabasalts, and listvenites, which are associated with metamorphic schists of Chah-Ghorbeh, Morghab, and Patyar, as well as the Lakh marble unit. The serpentinites and listvenites in this region are recognized as host rocks for Cu, Ni, Co, Sb, and Au mineralization. The serpentinites are primarily composed of antigorite, lizardite, chrysotile, chlorite, talc, and chromian spinel, along with pyrite, chalcopyrite, nickeline, and magnetite. Through hydrothermal processes, these have been transformed into an assemblage of magnesite, dolomite, calcite, quartz, fuchsite, and secondary sulfides within the listvenites. This study focuses on the geochemical investigation of Anarak serpentinites and listvenites to analyze their origin and alteration processes. Results from geochemical diagrams indicate that the serpentinites fall within the subducted field with a harzburgitic protolith. The listvenites are predominantly of carbonate, silica-carbonate, and birbirite types, reflecting the influence of Ni-Sb-As-rich hydrothermal processes and metasomatism in their evolution. These findings highlight the economic geological significance of this complex for valuable element mineralization.

How to cite this article

Vahedi, M., Zamanian, H. and Alaminia, Z., 2025. Evaluating the Economic Potential of Listvenitization of Anarak Ophiolite Serpentinites using Mineralogical and Geochemical Evidence. *Journal of Economic Geology*, 17(3): 93–129. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1156>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Listvenites, resulting from carbonation alteration of ultramafic rocks by CO₂-rich hydrothermal fluids, have recently gained considerable scientific interest due to their dual significance in carbon sequestration and economic potential (Beinlich et al., 2020). These rocks form through metasomatic alteration of peridotite protoliths under temperatures of 150 to 250°C and moderate pressures (Klein and Garrido, 2011) in tectonically active zones, particularly along greenstone belts and crustal-scale fault systems (Sieber et al., 2018). Petrologically, listvenites are characterized by an assemblage of magnesite ± dolomite, quartz, and relict Cr-spinel, with variable amounts of serpentine, talc, and accessory sulfides. Their precursor serpentinites exhibit geochemical signatures fundamentally controlled by protolith composition and the tectonic environment of hydration, with three principal genetic types recognized: 1) abyssal serpentinites formed at mid-ocean ridges, 2) mantle wedge serpentinites developed in subduction interfaces, and 3) subducted serpentinites metamorphosed under high-P/T conditions (Deschamps et al., 2013).

The transformation from serpentinite to listvenite occurs through progressive carbonation reactions along structurally controlled fluid pathways, typically involving sequential replacement of serpentine minerals by silica-carbonate assemblages. This process is particularly active in subduction zone environments, transcurrent fault systems, and extensional tectonic regimes. While historically noted for their association with gold mineralization, contemporary studies reveal that listvenites may host diverse mineralization types including Ni-Co-Sb-Cu assemblages, particularly when derived from Cr-rich harzburgitic protoliths. The present investigation focuses on the geochemical evolution of listvenitized serpentinites within the Anarak ophiolite complex (Central Iran), employing whole-rock geochemistry and mineral phase analysis to clarify their alteration pathways, petrogenesis, and role in ore-forming processes. Complementary studies of serpentinite-listvenite transitions in the Anarak area aim to establish genetic relationships between progressive alteration stages and ore-forming processes.

Materials and methods

Representative serpentinite and listvenite samples were systematically collected from the Anarak ophiolitic complex, with particular focus on the Patyar and Chah-Gorbeh tectonic units, ensuring coverage of both protolith and variably altered lithologies. Detailed petrographic studies utilizing transmitted and reflected light microscopy documented primary mineral relics, alteration paragenesis, and critical microtextural relationships, with special emphasis on pseudomorphic replacement textures and vein networks indicative of progressive carbonation. Whole-rock geochemical analyses were conducted using X-ray fluorescence spectrometry (XRF) for major oxides and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-OES) for minor elements at ZarAzma laboratory. Mineralogical characterization was performed using X-ray diffraction (XRD).

Result

Petrography

The Anarak serpentinites, derived from harzburgite/lherzolite protoliths, exhibit characteristic mesh-textured lizardite (after olivine) and bastite pseudomorphs (after orthopyroxene) with relict chromian spinels. Antigorite replacement of lizardite indicates prograde overprinting of initial retrograde serpentinitization. Listvenites display two alteration facies: 1) carbonate-dominated and 2) silica-rich, reflecting progressive CO₂-metasomatism. Mineralization includes Au (up to 7278 ppb) associated with primary Ni-Co-Sb-Cu sulfides and secondary oxidation products.

Serpentinite Geochemistry

Geochemical analyses of Anarak-Patyar serpentinites show SiO₂ (36–44 wt.%), CaO (0.5–4.5 wt.%), Al₂O₃ (0.5–3.3 wt.%), MgO (31.6–37.3 wt.%), and LOI (11–13.8 wt.%). FeO-MgO plots (7–9 wt.% FeO) indicate uniform alteration intensity. High LOI values correlate with antigorite-dominated serpentinitization (~12% structural water), while MgO depletion reflects both mantle source depletion and magmatic fractionation. The major oxide plots of MgO versus FeO, CaO, and LOI demonstrate compositional consistency with the field of subducted serpentinites (Fig. 5).

The Anarak serpentinites, enriched in mobile trace elements such as Cs, U, Pb, and Sr, which are absent

in primary peridotitic protoliths, serve as key indicators for fluid–rock interaction processes. While their major-element composition largely reflects the mantle-derived protolith, the distribution of mobile elements has been modified by the nature, composition, and physicochemical conditions of fluids (hydrothermal, seawater, or slab-derived). Enrichment in Ba, Pb, Th, U, La, Nb, and Yb relative to global serpentinites partly results from pre-serpentinization processes and partly from the infiltration of oxidizing and sediment-derived fluids during subduction. The distribution of chalcophile elements such as As, Sb, and Pb highlights the influence of subducted sediments and sediment-derived fluids, and Pb isotope signatures together with As and Sb enrichment suggest two scenarios for secondary serpentinization, in which serpentinites act as both reservoirs and carriers of mobile elements. Geochemical data on sulfides-bearing samples indicate that copper and nickel mineralization in the area are genetically independent, as evidenced by distinct trends in Ni–Co and Cu–Co plots, with Co/Ni ratios directly related to the degree of cobalt mineralization and nickel concentrations.

Listvenite Geochemistry

Major oxides show wide ranges: SiO₂ (14–96 wt.%), MgO (0.07–7.32 wt.%), FeO_t (1–19 wt.%), and LOI (0.6–34 wt.%), reflecting carbonation variability. CaO–SiO₂ enrichment coupled with MgO loss confirms carbonate (dolomite–magnesite–calcite) formation in type-I listvenites. Patyar listvenites are distinguished by quartz–fuchsite assemblages (elevated K₂O–Al₂O₃). Ternary diagrams position samples above the terrestrial melting line, demonstrating extensive carbonation, with Patyar specimens reaching 90 wt.% SiO₂ (birbirite-like). This siliceous-carbonate spectrum correlates with observed hydrothermal alteration intensities.

Discussion

The results indicate that the Anarak and Patyar serpentinites, formed in a subduction setting, have played a significant role in concentrating and transporting ore-related elements, particularly gold. Serpentinization, involving substantial water addition (11–~14 wt.%) to peridotitic protoliths, facilitated both pervasive alteration of ultrabasic

rocks and the mobilization of gold from primary opaque minerals (Fig. 5B). Gold contents (0.02–0.1 g/t) in these serpentinites are several times higher than the global average for upper mantle peridotites (0.001–0.01 g/t), reflecting secondary enrichment through subduction-related hydrothermal processes mediated by CO₂[–], S[–], and As-rich fluids (Buisson and Leblanc, 1987). Possible sources of arsenic and sulfur include adjacent sedimentary–metamorphic host rocks, crystallized products of sulfide–arsenide melts in ultrabasic protoliths, and mantle metasomatism (Leblanc and Billaud, 1982; Buckman and Ashley, 2010). Nickel sulfides and arsenides precipitated during antigorite formation within the subduction channel, increasing As, Sb, Te, Bi, and Pb contents. Listvenites share Cr, Co, and Ni mineralogy with their serpentinite protoliths, indicating compositional inheritance, but deformation and brecciation liberated these elements, with shear zones focusing Cu-, As-, and Sb-rich ore-bearing fluids. Two main stages of listvenite formation are recognized: early carbonate-rich type I formed under CO₂[–], H₂O[–], and Ca²⁺-rich fluids at high pH, and later silica-rich type II formed through Si transfer from serpentine minerals under lower pH hydrothermal conditions, with associated magnetite dissolution and gold mobilization. Listvenites experienced greenschist facies metamorphism (290–340°C, 100–300 MPa), later overprinted by retrograde metamorphism during Tethys closure and post-orogenic uplift (Bagheri and Stampfli, 2008). Their silica–carbonate composition, high shear deformation, and mineralogical evidence point to a genetic link with serpentinite protoliths, with tectonic deformation controlling fluid pathways and creating localized reducing environments favorable for selective ore deposition.

Conclusion

The integrated geochemical and petrographic investigation of serpentinites and listvenites in the Anarak area reveals a complex alteration history linked to subduction zone processes. Serpentinites formed from subducted mantle peridotites underwent extensive hydration and metasomatism, promoting significant enrichment in economically important elements such as gold. Listvenites represent advanced hydrothermal alteration stages involving carbonation and silicification, which contribute to ore concentration.

This study highlights the importance of serpentinite and listvenite alteration in controlling fluid composition, metal mobility, and mineralization in subduction-related settings, emphasizing their role in

economic geology exploration frameworks. Further studies integrating isotopic and fluid inclusion data could refine the understanding of fluid sources and pathways in this region.



ارزیابی پتانسیل اقتصادی لیستونیت‌زایی سرپانتینیت‌های افیولیت انارک با استفاده از شواهد کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی

محمد واحدی^۱، حسن زمانیان^{۲*}، زهرا اعلمی‌نیا^{۳*} 

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

^۲ استاد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

مجموعه افیولیتی انارک در شمال‌شرقی اصفهان و مرز شمال‌غربی خردقاره ایران مرکزی واقع شده است. این مجموعه شامل پریدوتیت‌های سرپانتینه‌شده گشته، گابروهای کومولایی، گدازه‌های بالشی، دایک‌های بازیک-اولترابازیک، متابازالت‌های گلاکوفان‌دار و لیستونیت‌هاست که با دگرگونه‌های شیبستی چاه‌گره، مرغاب و پتیار و واحد مرمرلاخ همراه شده‌اند. سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌های این منطقه به عنوان سنگ‌های میزبان کانه‌زایی مس، نیکل، کبالت، آنتیموان و طلا هستند. سرپانتینیت اغلب از کانی‌های آنتی‌گوریت، لیزاردیت، کریزوتیل، کلریت، تالک و اسپینل کروم‌دار همراه با پیریت، کالکوپیریت، نیکلین و مگنتیت تشکیل شده‌اند که طی فرایندهای گرمایی به مجموعه‌ای از منیزیت، دولومیت، کلسیت، کوارتز، فشایت و سولفیدهای ثانویه در لیستونیت‌ها تبدیل شده‌اند. این پژوهش با تمرکز بر بررسی زمین‌شیمیایی سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌های انارک به تحلیل خاستگاه و فرایندهای دگرسانی آنها پرداخته است. نتایج به دست آمده از نمودارها نشان می‌دهد که سرپانتینیت‌ها در گروه فروزانده با سنگ مادر هارزبورژیت قرار می‌گیرند. لیستونیت‌های منطقه اغلب از انواع کربناته، سیلیسی-کربناته و کمتر بیربیریتی هستند که نشان‌دهنده تأثیر فرایندهای گرمایی غنی از عناصر Ni-As-Sb و متاسوماتیسم در تکامل آنهاست. این یافته‌ها اهمیت زمین‌شناسی اقتصادی این مجموعه را در کانه‌زایی عناصر با ارزش برجسته می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

واژه‌های کلیدی

سرپانتینیت

لیستونیت

زمین‌شیمی

دگرسانی گرمایی

ایران مرکزی

نویسنده مسئول

حسن زمانیان

hasanzamanian@ut.ac.ir 

زهرا اعلمی‌نیا

alaminia@um.ac.ir 

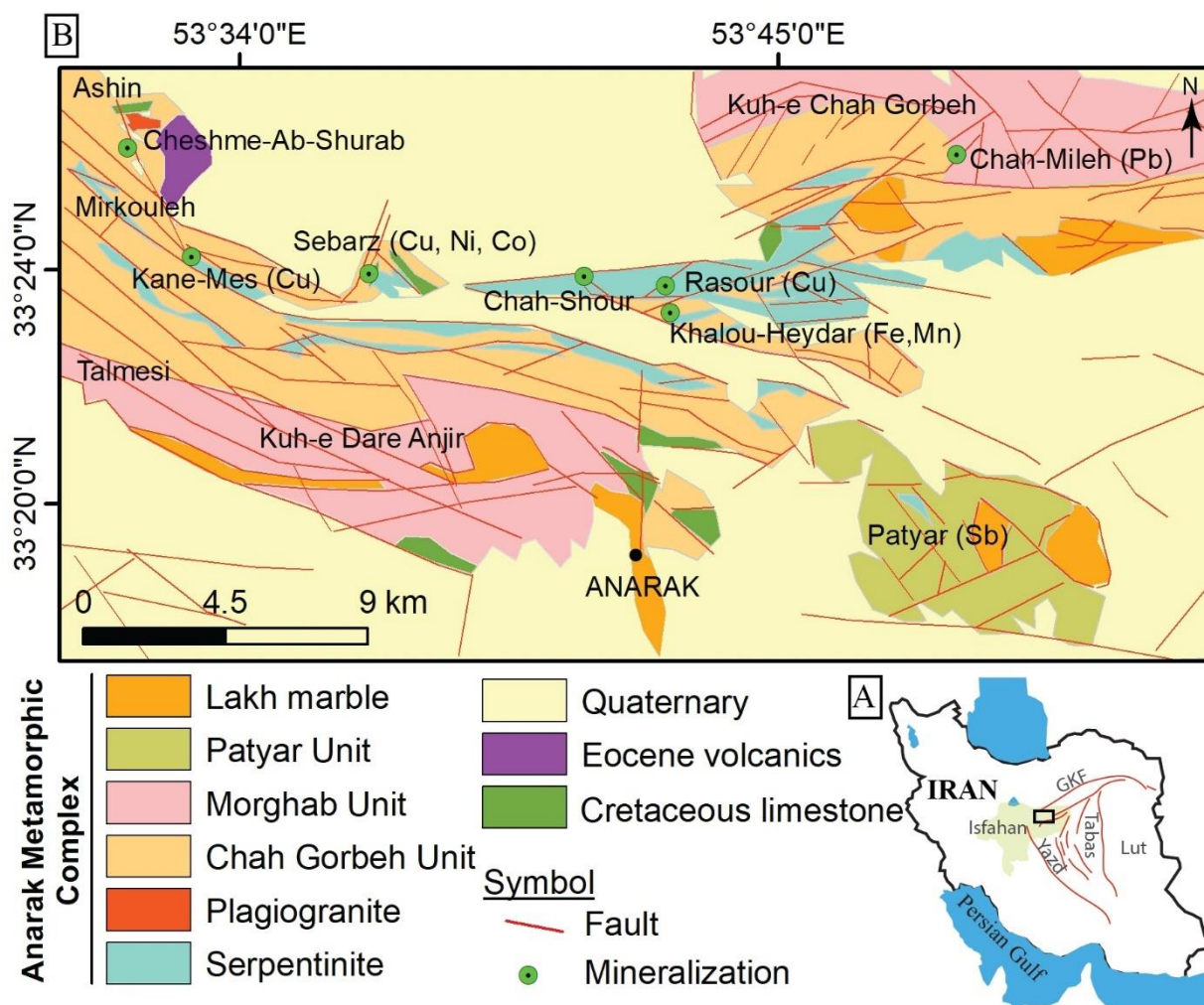
استناد به این مقاله

واحدی، محمد؛ زمانیان، حسن و اعلمی‌نیا، زهرا، ۱۴۰۴. ارزیابی پتانسیل اقتصادی لیستونیت‌زایی سرپانتینیت‌های افیولیت انارک با استفاده از شواهد کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۳): ۹۳-۱۲۹. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1156>

مقدمه

در سال‌های اخیر، لیستونیت‌ها که حاصل دگرسانی پریدوتیت‌های کم و بیش سرپانتینه‌شده توسط سیالات حاوی CO_2 هستند، به دلیل اهمیت دوگانه زیست‌محیطی و اقتصادی، به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند (Hansen et al., 2005; Radosavljević et al., 2015; Boskabadi et al., 2017; Beinlich et al., 2020; Mederski et al., 2024; Visalli et al., 2025). تشکیل لیستونیت به شار بالای سیال در طول زمان نیاز دارد و معمولاً شامل کربنات‌های منیزیم، آهن و کلسیم (مانند منیزیت، دولومیت، انکريت، سیدریت و کلسیت) همراه با کوارتز، کلسدونی و اپال است (Sideridis et al., 2022). این سنگ‌ها به صورت محلی در کمرندهای شیب‌سبز، پهنه‌های گسلی و سنگ‌های اولترابازیک خردشده و متخلخل، به‌ویژه در ارتباط با گسل‌های رانده مشاهده می‌شوند (Ucurum, 2000; Schandl and Gorton, 2012). فرایند کربناته‌شدن سرپانتینیت‌ها معمولاً در گستره دمایی ۸۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۳ تا ۱/۴ گیگاپاسکال انجام می‌شود (Plissart et al., 2009)؛ هرچند دمای بهینه آن در محدوده ۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (Klein and Garrido, 2011). دگرسانی گرمایی به ایجاد منطقه‌بندی مشخصی منجر می‌شود که در آن سرپانتینیت‌ها به ترتیب به افی کربنات (سرپانتین - کربنات)، سوپ‌استون (تالک - کربنات) و در نهایت به لیستونیت‌های غنی از کوارتز - کربنات تبدیل می‌شوند (Menzel et al., 2018; Kluza et al., 2024). بررسی‌های ایزوتوپی نشان می‌دهد سیالات غنی از CO_2 می‌توانند از سیالات دگرگونی حاصل از فرایندهای گاززدایی، انحلال رسوب‌های دگرگون‌شده کربناته (مواد آلی)، سیالات دریایی، آب‌های جوی و به ندرت سیالات با منشأ ماگمایی مشتق شوند (Beinlich et al., 2012; Boskabadi et al., 2017; Menzel et al., 2018). از نظر زمین‌ساختی، تشکیل لیستونیت‌ها می‌تواند در محیط پیش کمان نواحی فرورانش، گسل‌های امتدادلغز، نواحی زمین‌درزهای بزرگ

کوه‌زایی و یا همراه با گسل‌های کششی تشکیل شود (Sieber et al., 2018; Hajjar et al., 2021; Menzel et al., 2024). گذشته، لیستونیت‌ها اغلب به عنوان سنگ‌میزبان ذخایر طلای رگه‌ای شناخته می‌شدند (Aydal, 1990; Abdel-Karim et al., 2025)؛ درحالی‌که یافته‌های جدید نشان می‌دهند که این سنگ‌ها می‌توانند میزبان کانی‌زایی نیکل، آنتیموان و کبالت نیز باشند (Dzemua and Gleeson, 2012; Kiefer et al., 2023). از این رو، بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سرپانتینیت‌ها و فرایندهای دگرسانی مرتبط با آنها، در درک منشأ و مهاجرت فلزها اهمیت به سزایی دارد (Scambelluri et al., 2004; Deschamps et al., 2013; Collins et al., 2015). مجموعه افیولیتی انارک واقع در شمال‌شرقی استان اصفهان، یکی از پهنه‌های شاخص اولترابازیک در ایران مرکزی است که میزبان کانسارها و نشانه‌های معدنی متعددی از جمله آهن - منگنز خالوحیدر (هالوحیدر)، سرب چاه‌خیزه و چاه‌گره، آنتیموان پتیار، مس راسور و کانه مس، مس و نیکل گودمراد، مس - نیکل - کبالت سبزرز، چاه‌شور، تالمسی و مسکنی است (شکل ۱- A) (Sharkovski et al., 1984). با توجه به نقش زمین‌شیمیایی مهم سرپانتینیت‌ها در کنترل ترکیب سیالات و انتقال عناصر فلزی، هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی سرپانتینیت‌های لیستونیتی‌شده در نواحی پتیار، خالوحیدر، راسور، چاه‌شور، سبزرز و میرکوله شمالی و جنوبی و تعیین ارتباط آنها با کانه‌زایی‌های گرمایی منطقه است (شکل ۱- B). انتخاب این محدوده‌ها به دلیل پراکندگی مکانی در پهنه افیولیتی انارک، تنوع شدت دگرسانی و حضور شواهد کانه‌زایی فلزها همراه صورت گرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند به درک بهتر نقش سنگ‌های اولترابازیک در کنترل فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی و نیز به عنوان راهنمایی برای اکتشافات آینده در پهنه فلززایی انارک مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱. A: جایگاه منطقه انارک در مرز شمال غربی خرد قاره ایران مرکزی نمایش شده است، GKF- گسل کویر بزرگ و B: موقعیت سرپانتینیت‌های پتیار، خالوحیدر، راسور، چاه‌شور، سبرز، میرکوله شمالی و میرکوله جنوبی در میان شیست‌های واحد چاه‌گره در نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده پهنه انارک، اقتباس از شارکوفسکی و همکاران (Sharkovski et al., 1984) با تغییرات

Fig. 1. A: Location of the Anarak area along the northwestern margin of the Central Iranian microcontinent. GKF – Great Kavir Fault, and B: Distribution of the Patyar, Khalou-Heydar, Rasour, Chah-Shour, Sebarz, Northern Mirkouleh, and Southern Mirkouleh serpentinites in the Chah-Gorbeh schist unit on a simplified geological map of the Anarak zone (modified after Sharkovski et al., 1984)

جایگاه زمین‌شناسی منطقه انارک

و مجموعه سنگی آن طی فرایندهای زمین‌ساختی پالئوزوئیک تا مزوزوئیک (۲۲۵ تا ۴۵۰ میلیون سال پیش) دچار دگرشکلی‌های متعدد شده است (Balini et al., 2009; Zanchi et al., 2015). این مجموعه در حد فاصل دو زمین‌درز تتیس کهن (جنوب شرق پتیار) و تتیس نو (شمال غرب عشین) قرار دارد (شکل

مجموعه انارک در مجاورت کمربند افیولیتی- ملائز احاطه‌کننده مرز شمال غربی خردقاره ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۱-A) و از دید پهنه‌بندی ساختاری، بخشی از بلوک یزد محسوب می‌شود (Alavi, 1991). این ناحیه در حاشیه جنوبی دشت کویر واقع شده

(B-۱) (Buchs et al., 2013; Pirnia et al., 2020) و شامل پریدوتیت‌های سرپانتینه‌شده گوشته، گابروهای کومولایی، گدازه‌های بالشی، دایک‌های بازیک-اولترابازیک، متابازالت‌های گلاکوفان‌دار و لیستونیت‌هاست که با مجموعه دگرگونه‌های شیستی چاه‌گربه، مرغاب و پتیار و واحد مرمر لایخ همراه شده است (شکل B-۱) (Torabi, 2014; Eslami et al., 2018). پژوهش‌های قبلی، افیولیت انارک-نخلک را بقایای پالئوتتیس می‌دانند (Stampfli and Borel, 2004) و برخی آن را مشابه افیولیت‌های میان اقیانوسی و توده‌های لرزولیتی کوه‌زایی تفسیر می‌کنند (Torabi, 2009). شیست‌های مرغاب و چاه‌گربه به عنوان یک گوه‌برافزایشی در حاشیه فعال جنوبی صفحه اوراسیا پنداشته می‌شوند (Bagheri and Stampfli, 2008) که در طی کربونفر، پرمین و تریاس شکل گرفته، برخاسته و نمایان شده‌اند (Buchs et al., 2013). دگرگونه‌های انارک شامل سنگ‌های دگرگونی رخساره شیست‌سبز، آمفیولیت و شیست‌آبی هستند. واحدهای مرغاب، چاه‌گربه و پتیار اغلب از فیلیت و میکاشیست تشکیل شده‌اند که همراه با مقادیر کم متابازیت‌ها و محصولات آتشفشانی فلسیک دیده می‌شوند (شکل B-۱). بیشتر بافت‌های اولیه این سنگ‌ها در اثر دگرریختی چندمرحله‌ای و دگرگونی از بین رفته‌اند؛ اما در برخی نقاط، رخساره‌های توربیدیتی حفظ شده‌اند که نشان‌دهنده محیط رسوبی شیب‌قاره یا مخروط افکنه دریای عمیق است (Bagheri and Stampfli, 2008). واحد مرغاب فقط در شرایط دگرگونی شیست‌سبز حفظ شده؛ در حالی که در واحدهای چاه‌گربه و پتیار، هم شیست‌سبز و هم شیست‌آبی گزارش شده است (شکل B-۱). نمونه‌های شیست‌آبی از واحد چاه‌گربه نشان‌دهنده گذار از شرایط رخساره شیست‌آبی به شیست‌سبز هستند که شرایط اوج دگرگونی آنها فشار ۰/۴ تا ۰/۹ گیگاپاسکال و دمای بیش از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. برخی پژوهشگران مرمر لایخ را بازمانده کربنات‌های مرجانی پرمین می‌دانند که بر روی متابازیت‌های واحد پتیار (بازالت‌های جزایر اقیانوسی) نهشته شده‌اند (Bagheri and

(Stampfli, 2008). در محدوده پرمین-تریاس (واحد چاه‌گربه)، نازک لایه‌های مرمر (۱۰ تا ۵۰ متری) به صورت محلی در تماس با متابازیت مشاهده می‌شوند که احتمالاً نشان‌دهنده توالی اولیه سنگ‌های آتشفشانی همراه با رسوب‌های مرتبط هستند (Buchs et al., 2013). سنگ‌های اولترابازیک با منشأ نامشخص اغلب به صورت قطعه‌های بزرگ سرپانتینیت در واحد چاه‌گربه و قطعه‌های کوچک‌تر در امتداد واحد مرغاب و گسل بیابانک رخمون دارند (شکل‌های B-۱ و A-۲) (Lensch and Davoudzadeh, 1982). این سنگ‌ها شامل هارزبورژیت‌های شیستوز با درشت‌زادهای اسپینل غنی از کروم هستند و در برخی نواحی، بخش‌هایی با بافت توده‌ای حاوی کلسوپروکسن و اسپینل غنی از آلومینیم دیده می‌شود که احتمالاً بیانگر یک فاز اولیه هستند (Zanchi et al., 2009; Zanchi et al., 2015). در بخش مرکزی مجموعه انارک، سرپانتینیت‌ها تحت تأثیر پهنه‌های برشی برگ‌واره شده (Mohammadiha et al., 2017) و توسط دایک‌ها و استوک‌های پلاژیوگرانیت (ترونجمیت) قطع شده‌اند (شکل B-۲). سن‌سنجی آرگون-آرگون آمفیول‌های رخساره شیست‌آبی سن ۲۸۵ میلیون سال (پرمین بالایی) و سن‌سنجی زیرکن‌های ترونجمیت به روش U-Pb سن ۲۶۲ میلیون سال را نشان می‌دهد (Bagheri, 2007). همچنین، دگرگونی کربونفر (۳۱۹ تا ۳۳۴ میلیون سال) با روش آرگون-آرگون تأیید شده است (Bagheri and Stampfli, 2008). افیولیت انارک-نخلک به صورت ناپیوسته و دگرشیب توسط رسوب‌های کرتاسه پوشیده شده و شامل بلوک‌های سرگردان سرپانتینه، گدازه‌های بالشی و گابرویی است (Torabi, 2004). این بلوک‌ها خاستگاه‌هایی از پشته‌های میان اقیانوسی و محیط‌های پشت‌کمان پهنه فرافروانش دارند که در یک گوه‌برافزایشی تجمع یافته‌اند (Zarei et al., 2021). این ناحیه تحت تأثیر چندین فاز زمین‌ساختی، از جمله فروورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان در کرتاسه پیشین و برخورد قاره‌ای در ترشیاری، دچار دگرگونی‌های شدید شده است. فعالیت‌های بعد از برخوردی نیز به تشکیل

حوضه‌های پشت‌کمانی و ماگماتیسیم مرتبط منجر شده است (Shayanfar et al., 2016).

روش مطالعه

هم‌زمان با انجام بررسی‌های صحرایی، از دو پهنه سرپانتینیتی مجاور کانه‌زایی در منطقه انارک، نمونه‌برداری صورت گرفت. پهنه نخست در ناحیه پتیار واقع شده و با واحد دگرگونه پتیار همراه است. پهنه دوم در ارتباط با واحد چاه‌گره قرار دارد و نمونه‌برداری از آن به صورت پیوسته و خطی از خالوحیدر در امتداد غرب تا میرکوله جنوبی انجام شد. همچنین به منظور پوشش کامل گستره دگرسانی، نمونه‌هایی از میرکوله شمالی در امتداد شمال منطقه جمع‌آوری شد (شکل ۱-ب). از هر ایستگاه نمونه‌برداری، حدود ۲/۵ کیلوگرم سنگ به روش لب‌پری برداشت شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، ابتدا توسط سنگ‌شکن فکی خرد شده و اندازه ذرات آنها به حدود ۸ میلی‌متر کاهش یافت. سپس برای همگن‌سازی، نمونه‌ها با استفاده از روش مخروط‌سازی و ربع کردن، کاهش حجم داده شدند. در مرحله نهایی از هر نمونه حدود ۵۰ گرم برداشت و با هاون آگات به ذراتی با قطر تقریبی ۱۰۰ میکرون پودر شدند. برای انجام بررسی‌های سنگ‌نگاری، تعداد ۴۸ مقطع نازک و نازک-صیقلی از سنگ‌های سرپانتینیت و لیستونیت تهیه شد. بر اساس نتایج بررسی‌های میکروسکوپی، ترکیب سنگ‌شناسی نمونه‌ها شامل پریدوتیت‌هایی با درجه‌های متفاوت سرپانتینه‌شدگی و لیستونیت است. همچنین، تعداد ۶۳ نمونه شامل ۲۸ نمونه سرپانتینیت با کمترین میزان ترمولیت و بدون کربنات (جدول ۲) و ۳۵ نمونه لیستونیت (جدول ۴) برای تجزیه شیمیایی سنگ کل به منظور تعیین مقادیر اکسیدهای اصلی به ویژه سیلیس و منیزیم، با استفاده از دستگاه فلورسانس پرتو ایکس به آزمایشگاه زرآرما ارسال شد. برای اندازه‌گیری مقدار افت حرارتی، از هر نمونه یک گرم پودر برداشت و به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. برای تکمیل داده‌ها و بحث بر روی خاستگاه و فرایندهای دگرسانی از

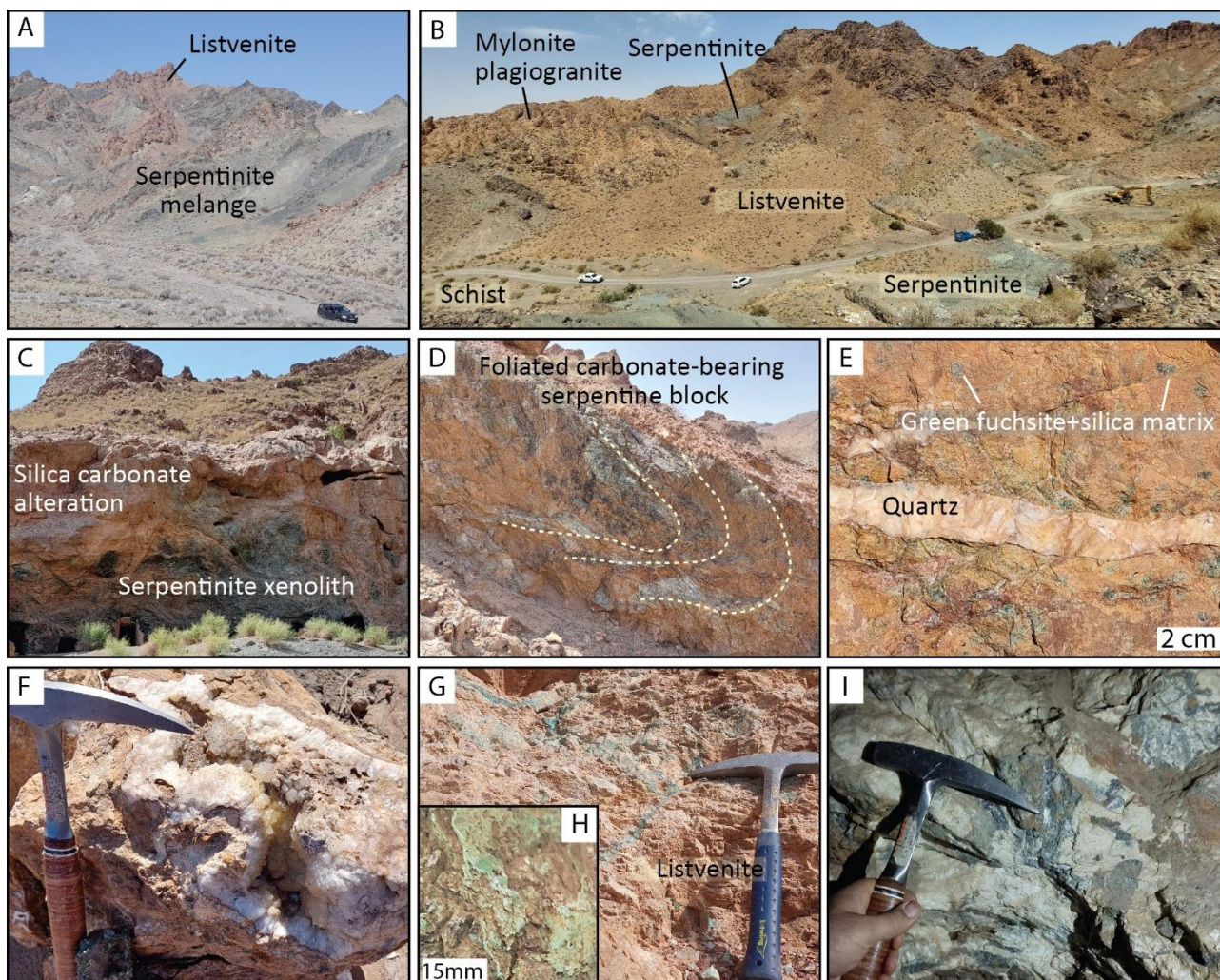
نتایج حاصل از تجزیه ۷۶ نمونه سرپانتینیت شامل نمونه‌های کانه‌دار و بدون کانه برای بررسی عناصر فرعی و کمیاب با روش طیف‌سنجی نشری پلاسما جفت‌شده القایی و همچنین از داده‌های مربوط به ۸۷ نمونه برای سنجش میزان طلا با روش Fire Assay در آزمایشگاه زرآرما استفاده شده است (داده‌های اکتشافی فولاد مبارکه، جدول ۳). همچنین ۸ نمونه از سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌ها (جدول ۱) برای تجزیه پراش پرتو ایکس با دستگاه فیلیس مدل PW/800 در آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود بررسی شدند.

نتایج

سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی

پریدوتیت‌های گوه‌ای در افیولیت‌های انارک مراحل متعددی از سرپانتینه‌شدن را پشت سر گذاشته و سرپانتینیت به عنوان یکی از اصلی‌ترین سنگ‌های این مجموعه، در بسیاری از مناطق به ویژه در امتداد گسل‌های اصلی، درجه‌های گوناگونی از لیستونیتی شدن را نشان می‌دهند (شکل ۲-ب و C-D). سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌ها در منطقه مورد بررسی همراه با یکدیگر یافت می‌شوند و روابط صحرایی و بافتی بین آنها نشان‌دهنده پیوند تکنوشیمیایی این دو سنگ در اثر فرایندهای دگرسانی و برهم‌کنش سیالات است (شکل ۲-ب تا I). در این بررسی، ویژگی‌های سنگ‌نگاری این دو سنگ به طور جداگانه بررسی شده است.

سرپانتینیت: در نمونه‌های مورد بررسی، پریدوتیت‌ها به طور گسترده‌ای سرپانتینه شده‌اند و اغلب حاوی اسپینل‌های کروم‌دار هستند. در نمونه دستی به رنگ سبز روشن، سبز تیره تا سیاه‌رنگ دیده می‌شوند. در برخی نمونه‌ها رگه‌های کربناتی به همراه کانی‌های درشت‌زاد نیز مشاهده می‌شوند. بر پایه بررسی‌های سنگ‌نگاری در مقاطع میکروسکوپی، پروتولیت آنها بیشتر از نوع هارزبوژیت و لِرزولیت بوده و دونیت‌ها توسعه کمتری دارند. حضور اورتوپروکسن در مقاطع نازک، دلالت بر پروتولیت‌های هارزبورژیتی سنگ‌های سرپانتینه دارد.



شکل ۲. نمایی از برون زد سنگ‌های سرپانتینیت و لیستونیت درون آنها در ناحیه انارک. A: آلیستولیت پریدوتیت سرپانتینه شده که درون شیست‌ها جای گرفته است. لیستونیت در امتداد گسل‌ها درون ملائزهای سرپانتینه در منطقه راسور (دید عکس به طرف غرب)، B: تزریق پلاژیوگرانیت در شیست‌های چاه گربه و همبری میان سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌های به شدت خرد شده در منطقه میرکوله شمالی (دید عکس به طرف شمال)، C: دست‌کنده‌های قدیمی در میان سرپانتینیت‌های لیستونیتی در میرکوله جنوبی (دید عکس به طرف جنوب شرق)، D: چین برگشته در سرپانتینیت لیستونیتی شده در خالو حیدر (دید عکس به طرف شرق)، E: کانی فشایت و رگه کوارتز در لیستونیت طلا دار پتیار، F: کوارتزهای بلوری به صورت پرکننده حفره در لیستونیت‌های نوع غنی از سیلیس در غرب پتیار، G: رگه‌های نیکل در لیستونیت سبرز، H: نمای نزدیک از کانی انابرژیت و I: رگه نیکل دار در میان هارزبورژیت سرپانتینه چاه شور

Fig. 2. Outcrops of serpentinite and associated listvenite in the Anarak area. A: Serpentinized peridotite olistolite embedded within schists; listvenite developed along faults within serpentinite mélangé in the Rasour area; view looking to west, B: Plagiogranite intrusion into Chah-Gorbeh schists and the contact between serpentinites and intensely brecciated listvenite in the Northern Mirkooleh area; view looking to north, C: Ancient mine workings within listvenitized serpentinites in the Southern Mirkooleh area; view looking to southeast, D: Recumbent fold in listvenitized serpentinite at Khalou Heydar; view looking to east, E: Fuchsite and quartz vein in Patyar gold-bearing listvenite, F: Drusy quartz filling cavities within silica-rich listvenites in the west of Patyar, G: Nickel-bearing veins in Sebarz listvenite, H: Close-up view of annabergite mineral, and I: Nickel-bearing vein within serpentinitized harzburgite at Chah-Shour

(جدول ۱ و شکل ۵-A تا H).

سرپانتینیت‌ها بر اساس طبقه‌بندی کلمن (Coleman, 1977) به دو دسته سودومورف و آنتی‌گوریتی تقسیم شده است: سرپانتین‌های سودومورف اغلب از لیزاردیت و مقادیر کمی کریزوتیل تشکیل شده‌اند و از دگرگونی پس‌رونده کانی‌های اولیه مانند الیوین و پیروکسن‌ها به وجود آمده‌اند. لیزاردیت معمولاً در شرایط دگرگونی ضعیف تا حد رخساره شایست‌سبز تشکیل می‌شود. در مقابل، آنتی‌گوریت در طی دگرگونی پیش‌رونده و تبلور مجدد سرپانتین‌های سودومورف در دماهای بالاتر شکل می‌گیرد. بنابراین حضور غالب آنتی‌گوریت در کنار مقادیر فرعی لیزاردیت و کریزوتیل در نمونه‌ها نشان می‌دهد که سرپانتینیت‌ها ابتدا تحت دگرگونی پس‌رونده تشکیل شده و سپس با دگرگونی پیش‌رونده دستخوش تبلور مجدد شده‌اند (Zanchi et al., 2015). سرپانتینیت‌ها معمولاً با کانی‌های سرپانتین، مگنتیت، بروسیت و تالک شناسایی می‌شوند (Bach et al., 2004) و مجموعه کانیایی سرپانتین به سه گروه تقسیم می‌شوند: ۱- سرپانتین، بروسیت (یا منیزیت) و مگنتیت، ۲- سرپانتین و مگنتیت، و ۳- سرپانتین، کوارتز، مگنتیت و تالک. این سه مجموعه تحت تأثیر سنگ مادر سرپانتینیت کنترل می‌شوند (Xiaomei et al., 2009). گروه اول معمولاً مربوط به پروتولیت دونیت غنی از پیروکسن می‌شود، گروه سوم اغلب از پریدوتیت‌های پیروکسن‌دار تشکیل شده است و گروه دوم از دونیت‌هایی تشکیل می‌شود که در حضور فعالیت شدید سیلیکا یا پیروکسنیت در فعالیت شدید منیزیم و یا با نسبت متعادل الیوین و اورتوپیروکسن به وجود می‌آید. واکنش‌های اصلی سرپانتینیت شدن (O'Hanley, 1996) به ویژه در حضور آب عبارتند از:

واکنش ۱:

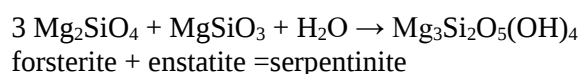


واکنش ۲:

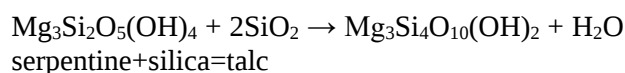


بافت‌های اولیه سرپانتینیت شدن با تبدیل اورتوپیروکسن به لیزاردیت باسیتی و تالک (شکل ۳-A) و تبدیل الیوین به لیزاردیت توری‌شکل و مگنتیت (شکل ۳-B) شناخته می‌شوند. کانی اصلی، سرپانتین است که بافت‌هایی مانند شبکه‌ای، غربالی، رشته‌ای، پورفیروبل‌استی، کینگ‌شدگی و چشمی در آن قابل مشاهده است (شکل ۳-C و D). در بررسی‌های میکروسکوپی، چندریخت‌های سرپانتین شامل لیزاردیت با بافت تورمانند، کریزوتیل رشته‌ای و آنتی‌گوریت صفحه‌ای شناسایی و متمایز شدند. در مقاطع، بقایای کانی‌های اولیه مانند الیوین، اورتوپیروکسن و کمتر کلینوپیروکسن دیده می‌شود که در حاشیه یا در امتداد شکستگی‌ها به باسیت و دیگر کانی‌های ثانویه تبدیل شده‌اند (شکل ۳-A و B). برخی از این کانی‌ها خاموشی موحی دارند که نشان‌دهنده تأثیر دگرشکلی است. وجود پیروکسن‌های دگرشکل می‌تواند دگرریختی در بخش گوشته‌ای را نشان می‌دهد (شکل ۳-D). در اثر دگرگونی رخساره شایست‌سبز، کلینوپیروکسن‌ها به ترمولیت تبدیل شده‌اند و اسپینل‌های کروم‌دار نیز اغلب مگنتیتی شده‌اند. بقیه آهن آزاد شده در طی سرپانتینه‌شدن نیز به صورت مگنتیت در اطراف کانی‌های اولیه تجمع یافته است (شکل‌های ۳-E و ۴-A). لیزاردیت به تدریج توسط آنتی‌گوریت در سرپانتینیت جایگزین می‌شود (شکل ۳-C). حضور تالک، ترمولیت و لیزاردیت پس از پیروکسن در سرپانتینیت نشان‌دهنده آغاز آبدگیری هارزبورژیت اولیه در دماهای بالاتر از ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است (Allen and Seyfried, 2003; Bach et al., 2004; Klein et al., 2013). بروسیت اغلب از آبدگیری الیوین تشکیل می‌شود. بروسیت بی‌رنگ تا قهوه‌ای کم‌رنگ و برجستگی پایینی دارد. در برخی از مقاطع مورد بررسی، کانی کلریت، بلورهای کرومیت را دربرگرفته و با پیشرفت فرایند دگرسانی، کلریت به آنتی‌گوریت تبدیل شده است. احتمالاً کلریت و کرومیت در طی آبدگیری هارزبورژیت شکل گرفته‌اند و مرتبط با دگرسانی اسپینل باشند (شکل ۴-A). نتایج پراش پرتو ایکس بر روی سه نمونه نشان‌داده که سرپانتین موجود از سه چندریخت آنتی‌گوریت، لیزاردیت و کمتر کریزوتیل است

واکنش ۳:



واکنش ۴:



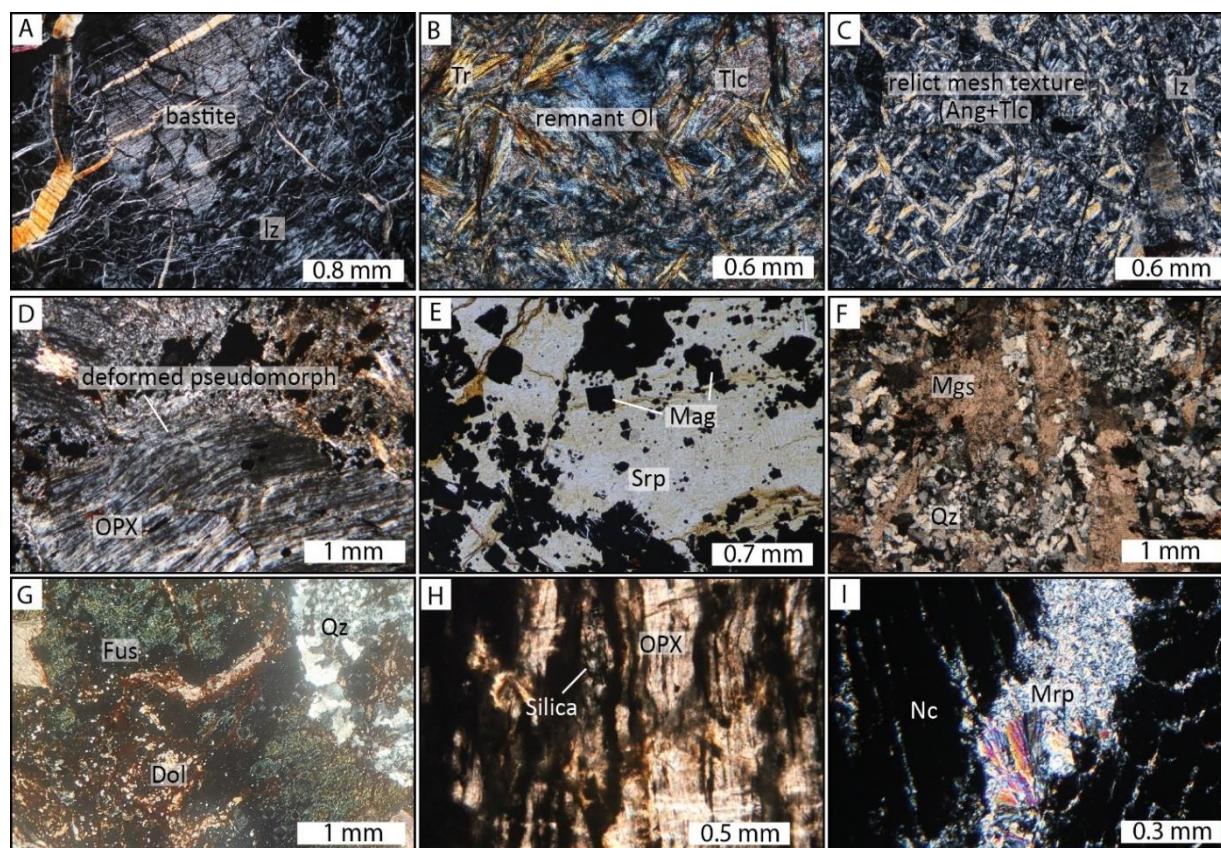
این واکنش‌ها نشان می‌دهد که فرایند سرپانتینه‌شدن نه تنها در حضور آب بلکه در حضور سیلیس نیز شدت می‌یابد و به شکل‌گیری انواع سرپانتین و کانی‌های همراه در سرپانتینیت‌های انارک منجر می‌شود. فرایند سرپانتینه‌شدن گرمازا بوده و می‌تواند دمایی تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد کند که همراه با افزایش قابل توجه حجم سرپانتین است. این پدیده می‌تواند سرپانتینیت شکل‌پذیر را به درون گسل‌ها و شکستگی‌ها رانده و بافت شیستوزی مشخصه آنها را ایجاد کند (Wenner and Taylor 1973; Moody, 1976).

سرپانتینیت‌ها یکی از مهم‌ترین سنگ‌های میزبان کانه‌زایی در منطقه انارک هستند. کانی‌های کدر شامل پیریت، آرسنوپیریت، پیرویت، نیکلین، کالکوپیریت، کوولیت، اسپینل کروم‌دار، کرومیت و مگنتیت هستند (شکل‌های ۳-۱ و ۴-۱ تا ۴-۲). بقایای کرومیت و پیرویت همراه با جدایش‌های کالکوپیریت همچنان حفظ شده‌اند (شکل ۴-۳). به نظر می‌رسد بلورهای کرومیت همراه با آنتی‌گوریت تشکیل شده و ممکن است به عنوان منبعی برای آهن آزادشده در طی رشد آنتی‌گوریت از لیزاردیت عمل کرده باشند (Zhang et al., 2019). پیریت به صورت ذرات شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار مشاهده می‌شود و جانشینی چشمگیر گوتیت به جای پیریت فرایند اکسایش و آبگیری را نشان می‌دهد. آرسنوپیریت و کالکوپیریت هم‌رشدی با آنتی‌گوریت داشته و هم‌زمان با آن تشکیل شده است و در برخی مناطق به کوولیت جانشین شده است (شکل ۴-۲). اسپینل‌های گرمابی بر اساس شکل و رنگ روشن از اسپینل‌های اولیه قابل شناسایی هستند. اسپینل‌های کروم‌دار اغلب شکسته و به ندرت به صورت شکل‌دار دیده می‌شوند. در مرکز آنها رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز مشاهده

می‌شود و در حاشیه به مگنتیت تبدیل شده‌اند. مگنتیت‌ها اندکی مارتیتی شده‌اند و در دو حالت شکل‌دار و دانه‌ریز یا دانه‌درشت همراه با اسپینل‌ها دیده می‌شوند که نسل دانه‌ریز جوان‌تر از مرحله سرپانتینی‌شدن است (شکل ۴-۱). همچنین کانی ثانویه گارنیریت نیز در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود.

لیستونیت: لیستونیت‌ها بر اساس ترکیب کانی‌شناسی، محصول دگرسانی شدید واحدهای سرپانتینه هستند که درجه‌های مختلفی از تغییرات شیمیایی را تجربه کرده‌اند (Sideridis et al., 2022). وجود کروم‌اسپینل‌های بازمانده و قطعه‌های خردشده سرپانتین، شواهدی از وجود سنگ مادر سرپانتینه در آنهاست (شکل ۲-۲ و ۲-۳). بررسی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌های لیستونیت انارک به شناسایی دو نوع لیستونیت منجر شده است: لیستونیت‌های نوع I (غنی از کربنات) و نوع II (غنی از سیلیکا). در لیستونیت‌های نوع اول، کانی‌های کربناتی شامل منیزیت، دولومیت، کلسیت، انکريت و کانی‌های تیره آهن‌دار غالب هستند (شکل ۳-۱ و ۳-۲). همچنین مقادیر کمی کوارتز، کلسدون، فشايت، ترمولیت، سرپانتین، کلریت و تالک در نمونه‌های حاوی درشت‌زادهای کربناتی دیده می‌شود (شکل‌های ۲-۲ و ۳-۲ و ۳-۳). (جدول ۱).

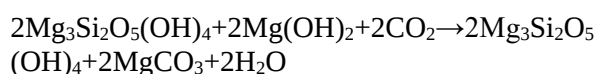
بر اساس بررسی‌های پیشین، حضور CO_2 به صورت گاز در سامانه، pH را کنترل کرده و شرایط اسیدی را حفظ می‌کند (Barnes et al., 1973). در چنین شرایطی، سرپانتینیت با CO_2 واکنش داده و یون‌های Mg^{2+} ، Fe^{2+} و SiO_4^{4-} را در محلول آزاد می‌سازد (واکنش ۱۰). با توجه به پتانسیل‌های شیمیایی، انتظار می‌رود منیزیت، دولومیت، سیدریت یا انکريت از محلول رسوب کنند؛ زیرا یون‌های H^+ در واکنش با سرپانتینیت مصرف شده (واکنش ۸) و یون‌های HCO_3^- باقی‌مانده با یون‌های Mg^{2+} و Fe^{2+} واکنش داده (واکنش ۱۱) و منیزیت آهن‌دار را تشکیل می‌دهند (شکل ۵). تولید آب و دی‌اکسید کربن اضافی در واکنش‌های ۶ و ۷، نتیجه مثبتی بر واکنش اسید کربنیک ایجاد کرده است و این فرایند را تسریع و تداوم می‌بخشد.



شکل ۳. تصویرهای میکروسکوپی نور عبوری از سرپانتینیت و لیستونیت‌های انارک در نور XPL به جز E، G و H: A: باستیت حاصل تجزیه پیروکسن به سرپانتین در هارزبورژیت سرپانتینه‌شده، ترمولیت در امتداد ترک خوردگی‌ها توسعه یافته است، B: بافت پورفیروبلاست در بقایای الوین در لرزولیت سرپانتینه‌شده، C: بافت شبکه‌ای آنتی‌گوریت و تالک در سرپانتینیت، D: دگرشکلی شکل‌پذیر شامل ریزچین و کینگ‌شدگی در باستیت، E: بلور شکل‌دار مگنتیت بر روی سرپانتین. سایر کانی‌های کدر در سرپانتینیت مگنتیت و کرومیت اکسید شده هستند، F: مگنتیت در نوع I لیستونیت (غنی از کربنات) که کوارتز جانشین کربنات قبلی شده است، G: فشایت در نوع II لیستونیت (غنی از سیلیس) که با رگچه دولومیت قطع شده است، H: آفی کربنات، آزاد شدن آهن در تبدیل سرپانتینیت به لیستونیت همراه با بقایای باستیت و I: رگچه ماریپوزیت، نیکولیت را قطع کرده است و حاشیه دندانه‌دار در آن ایجاد کرده است. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Ang: آنتی‌گوریت، Dol: دولومیت، Fus: فوشایت، Lz: لیزاردیت، Mag: مگنتیت، Mgs: مگنسیت، Mrp: ماریپوزیت، Nc: نیکلین، Tlc: تالک، Opx: اورتوپیروکسن، Ol: الوین، Srp: سرپانتین، Tr: ترمولیت، Qz: کوارتز).

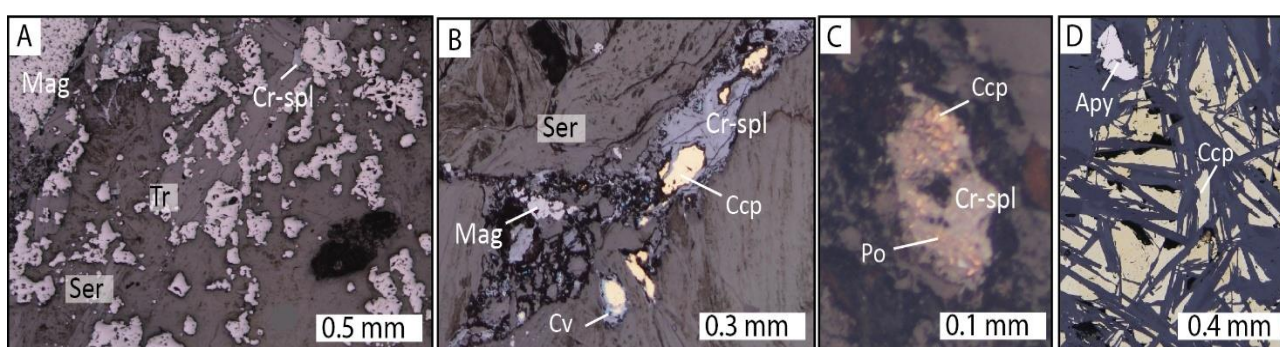
Fig. 3. Transmitted light photomicrographs of serpentinite and listvenite from the Anarak area under XPL, except for E, G, and H. A: Bastite, formed by pyroxene alteration to serpentine in serpentinitized harzburgite; tremolite is developed along fractures, B: Porphyroblastic texture in relic olivine within serpentinitized lherzolite, C: Mesh texture of antigorite and talc in serpentinite, D: Ductile deformation features, including microfolds and kink bands in bastite, E: Euhedral magnetite crystal on serpentine; other opaque minerals in serpentinite include oxidized magnetite and chromite, F: Magnesite in Type I (carbonate-rich listvenite) in which quartz is replacing the earlier formed carbonates, G: Fuchsite in Type II listvenite (silica-rich), cross-cut by dolomite veinlets, H: Ophicarbonate, Iron liberation during the transformation of serpentinite to listvenite, accompanied by bastite relics, and I: Muscovite (mariposite) vein cross-cutting nickolite, producing an embayed margin. Abbreviations after Warr (2021) (Ang: antigorite, Dol: dolomite, Fus: fuchsite, Lz: lizardite, Mag: magnetite, Mgs: magnesite, Mrp: mariposite, Nc: nickeline, Tlc: talc, Opx: orthopyroxene, Ol: olivine, Srp: serpentinite, Tr: tremolite, Qz: quartz).

واکنش ۵:



در دماهای بالاتر، کربناته‌شدن کانی‌های سرپانتین توسط سیال غنی از CO_2 ، می‌تواند به آزادشدن سیلیس (به صورت آنتی‌گوریت، تالک یا کوارتز) و آهن (به صورت مگنتیت، منیزیت، تالک یا کلریت) منجر شود، یا اینکه سیلیس و آهن به طور کامل از سیستم خارج شوند (Hansen et al., 2005; Buckman and Ashley, 2010; Kelemen et al., 2011).

کلسیت به ندرت رسوب می‌کند؛ زیرا میزان اشباع آن کمتر از منیزیت یا دولومیت است. کانی‌های کربناته معمولاً در شرایط دمای بالا ($>100^\circ\text{C}$) و pH قلیایی (>8) تشکیل می‌شوند (Buckman and Ashley, 2010; Menzel et al., 2024). در دماهای پایین منیزیت به صورت سودومورف از بروسیت تشکیل می‌شود که بیانگر وقوع یک واکنش ساده آب‌زدایی کربناته‌شدن است که به تحرک عناصر اصلی منجر نمی‌شود. نمونه‌ای از این واکنش به صورت زیر ارائه شده است (Kelemen et al., 2011):



شکل ۴. تصویرهای میکروسکوپی نور انعکاسی (PPL) از کانه‌زایی محدوده انارک، A: بلورهای شکل دار مگنتیت در اطراف اسپینل‌های دگرسان‌شده که روی بلورهای ترمولیت و سرپانتین تشکیل شده‌اند، B: اسپینل دگرسان‌شده و مگنتیت به همراه کالکوپیریت و کولیت در سرپانتینیت، C: اکسید و سولفیدها در سرپانتینیت، کالکوپیریت و پیرویت در اسپینل کروم‌دار در زمینه‌ای از کانی‌هایی که از حاشیه با مگنتیت جایگزین شده‌اند و D: کالکوپیریت و آرسنوپیریت هم‌رشدی با آنتی‌گوریت دارند. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Cr-spl: اسپینل کروم‌دار، Tr: ترمولیت، Mag: مگنتیت، Ser: سرپانتین، Ccp: کالکوپیریت، Cv: کولیت، Po: پیرویت، Apy: آرسنوپیریت).

Fig. 4. Reflected light photomicrographs (PPL) of mineralization from the Anarak area. A: Euhedral magnetite crystals are developed around altered spinels formed on tremolite and serpentine crystals, B: Altered spinel and magnetite occur in association with chalcopyrite and covellite within the serpentinite, C: Oxide and sulfide phases in serpentinite. Chalcopyrite and pyrrhotite within chromian spinel, with margins replaced by magnetite, and D: Chalcopyrite and arsenopyrite are coexisting with antigorite. Abbreviations after Warr (2021) (Cr-spl: Cr-spinel, Tr: tremolite, Mag: magnetite, Ser: serpentine, Ccp: chalcopyrite, Cv: covellite, Po: pyrrhotite, Apy: arsenopyrite).

(Zoheir, 2013). نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی با روش پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌شناسی لیستونیت‌ها از منطقه میرکوله به سمت خالوحیدر و پتیار تغییر یافته و شدت سیلیسی‌شدن در این روند افزایش می‌یابد (جدول ۱).

لیستونیت‌های نوع II اغلب شامل کوارتز، کلسدون، کریستوبالیت و به ندرت اپال و میکا (ماریپوزیت) است (شکل ۳-I). رگه‌های ثانویه کربناتی و کوارتزی به وفور در این نمونه‌ها یافت می‌شوند. تشکیل ریزبلور و درشت‌بلورهای کوارتز ناشی از آزادسازی سیلیس از سرپانتینیت‌هاست (شکل ۲-F) (Emam and

جدول ۱. ترکیب فازهای نمونه‌های انتخابی سرپانتینیت و لیستونیت‌های انارک و پتیار حاصل XRD

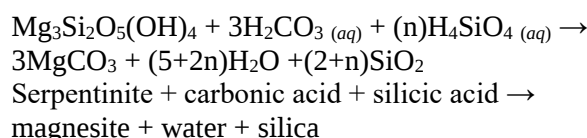
Table 1. Composition of phases in the selected serpentinite and listvenite samples of Anarak and Patyar obtained by XRD

sample ID	major	minor	trace
Chr-30	lizardite, chrysotile	quartz, magnetite	-
Ras-6	antigorite, lizardite	calcite, dolomite, chlorite	hematite
Mkn-126	lizardite, chrysotile, antigorite, tremolite, chlorite	calcite	-
Khl-49	quartz, dolomite, magnesite	goethite	calcite
Pty-102	magnesite, quartz	dolomite, cristobalite	clay mineral
T10-21	annabergite	-	quartz, clay mineral
Pty-300	amphibol, antigorite, lizardite, chlorite	calcite	
Khl-07	chrysotile	magnetite, quartz, calcite	

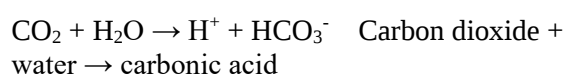
سیلیسیک در دماهای پایین رسوب و در قالب سیلیس بی‌شکل تشکیل می‌شود که به مرور زمان به کریستوبالیت نوع β تبدیل می‌شود (Tuysuz and Erler, 1993). اگر منابع سرپانتینیت در مسیر جریان سیال پیش از کاهش CO_2 به پایان برسند، فشار بالای CO_2 باعث می‌شود pH سیال همچنان پایین باقی بماند. در این شرایط، دیگر یون‌های Mg^{2+} تأمین نشده و رسوب‌گذاری کانی‌های کربناتی متوقف می‌شود (O'Hanley, 1996). نقطه‌ای که در آن لیستونیت‌های فاز I به تدریج به لیستونیت‌های غنی از سیلیس فاز II تبدیل می‌شوند. از این‌رو، با توجه به رخنمون اندک سرپانتینیت در منطقه پتیار، شدت سیلیسی شدن در فاز II بیش از سایر افیولیت‌های انارک مشاهده می‌شود (شکل ۱-B). این سیالات اسیدی، مجموعه کربناتی موجود را حل کرده و آن را با سیلیس تقریباً خالص جایگزین می‌کنند (شکل ۳-F). در این فرایند CO_2 بیشتری آزاد شده (واکنش ۱۰) و واکنش اسید کربنیک (واکنش ۱۰) را بیش از پیش تقویت می‌کند. سیلیس در دما و pH پایین به صورت سیلیس آمورف یا در قالب رگه‌های کوارتز ته‌نشین می‌شود (شکل ۲-E).

واکنش‌های اصلی کربناتی شدن (لیستونیت) (O'Hanley, 1996) عبارتند از:

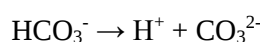
واکنش ۶:



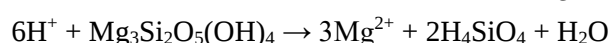
واکنش ۷:



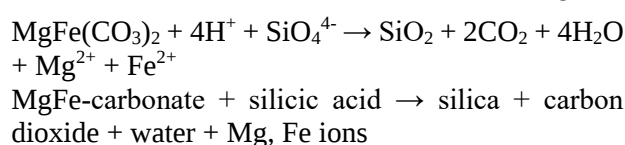
واکنش ۸:



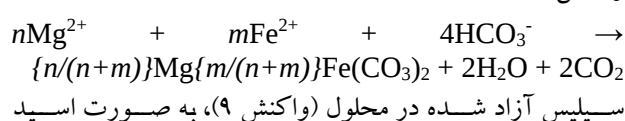
واکنش ۹:

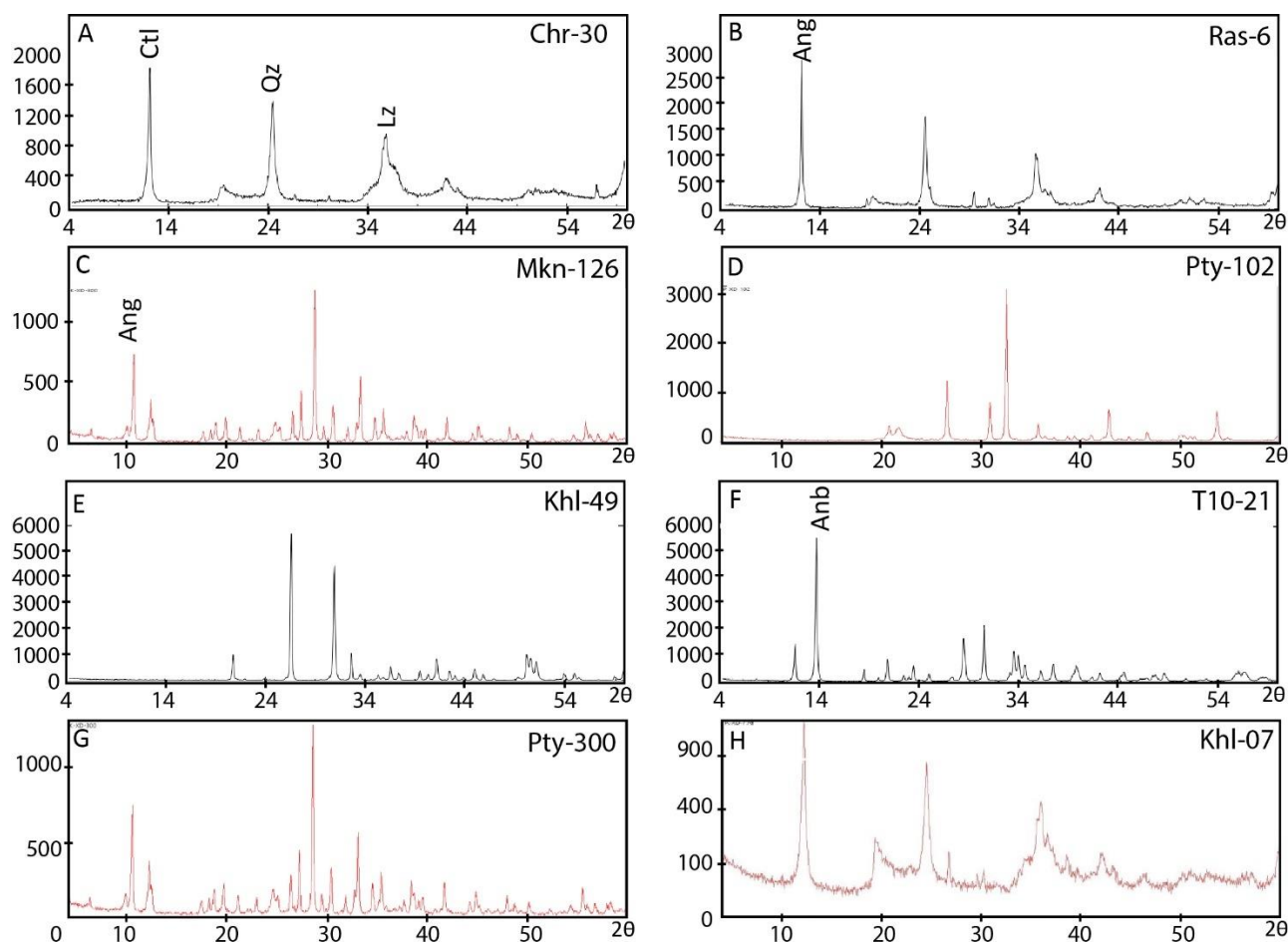


واکنش ۱۰:



واکنش ۱۱:





شکل ۵. نتایج پراش پرتو ایکس از سنگ کل سرپانتینیت و سنگ‌های سیلیسی - کربناته در انارک. A: نمونه Chr-30 از چاه‌شور، B: نمونه Ras-6 از راسور، C: نمونه MKN-126 از میرکوله، D: نمونه Pty-102 از پتیار، E: نمونه Khl-49 از خالو حیدر، F: نمونه T10-21 از سبرز، G: نمونه Pty-300 از پتیار و H: نمونه Khl-07 از خالو حیدر. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Anb: انابرژیت، Ang: آنتی گوریت، Ctl: کریزوتیل، Lz: لیزاردیت، Qz: کوارتز).

Fig. 5. XRD profiles of bulk-rock serpentinites and silica-carbonate rocks in the Anarak. A: sample Chr-30 from Chah Shour, B: Sample Ras-6 from Rasour, C: Sample MKN-126 from Mirkouleh, D: Sample Pty-102 from Patyar, E: Sample Khl-49 from Khalou Heydar, F: Sample T10-21 from Sebarz, G: Sample Pty-300 from Patyar, and H: Sample Khl-07 from Khalou Heydar. Abbreviations after Warr (2021) (Anb: annabergite, Ang: antigorite, Ctl: chrysotile, Lz: lizardite, Qz: quartz).

و شواهد اکسایش پیریت به وفور دیده می‌شود (شکل ۲- G و H). غلظت طلا در لیستونیت‌های سیلیسی - کربناته در منطقه پتیار بین ۵ تا ۷۲۷۸ میلی گرم بر تن گزارش شده است (داده‌های اکتشافی فولاد مبارکه).

بخش قابل توجهی از کانه‌زایی در لیستونیت‌ها رخ داده و بیشتر دست‌کندهای قدیمی نیز در همین واحدها مشاهده می‌شوند. کانه‌زایی در لیستونیت‌های سیلیسی - کربناته شامل کانی‌هایی همچون پیریت، نیکلین، راملزبرژیت، آرسنوپیریت و پیریت است. علاوه بر کانه‌زایی اولیه، آثار ثانویه‌ای از جمله انابرژیت، مالاکیت

زمین‌شیمی سنگ کل

مجموعه دگرگونه پتیار، بر اساس موقعیت زمین‌شناسی متمایز

خود، الگوی ترکیبی متفاوت‌تری نسبت به سایر نمونه‌های انارک (جای گرفته در واحد چاه‌گربه) نشان می‌دهند (شکل ۱-۱-B).

نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی سنگ کل نمونه‌های سرپانتینیت و لیستونیت منطقه انارک در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. نتایج داده‌ها در نمودارها نشان می‌دهد، نمونه‌های پتیار واقع در

جدول ۲. محاسبات آماری مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی (درصد وزنی) سنگ کل حاصل XRF از نمونه‌های سرپانتینیت ناحیه انارک و منطقه پتیار

Table 2. Summary statistics for whole-rock major oxide (wt. %) element concentrations of serpentinite samples from the Anarak area and Patyar region obtained by XRF analysis

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	LOI
Anarak n=18											
Count	18	18	17	18	4	18	18	12	8	12	18
Median	40.24	1.68	1.49	7.83	0.09	34.82	0.11	0.08	0.16	0.08	12.45
Average	40.05	1.83	1.46	8.23	0.10	35.13	0.11	0.09	0.29	0.11	12.41
St. Deviation	1.88	0.69	1.04	1.15	0.03	2.15	0.01	0.04	0.32	0.09	0.61
Maximum	44.07	3.28	4.53	11.95	0.14	38.53	0.13	0.2	0.98	0.36	13.27
Minimum	37.75	0.87	0.69	6.86	0.07	31.59	0.09	0.06	0.05	0.05	11.06
Patyar n=10											
Count	10	10	10	10	1	10	10	2	9	3	10
Median	38.41	1.82	0.58	7.77	0.06	37.14	0.11	0.07	0.27	0.06	12.57
Average	38.45	1.78	0.71	8.06	0.06	37.28	0.12	0.07	0.34	0.06	12.54
St. Deviation	1.29	0.76	0.52	2.11	-	1.06	0.03	0.02	0.31	0.02	0.57
Maximum	40.65	2.97	1.56	12.30	0.06	39.37	0.20	0.08	1.13	0.08	13.82
Minimum	36.00	0.51	0.05	4.67	0.06	35.50	0.08	0.05	0.07	0.05	11.78

جدول ۳. محاسبات آماری مقادیر طلا (ppb) و عناصر فرعی (گرم در تن) سنگ کل حاصل ICP-OES از نمونه‌های سرپانتینیت از ناحیه انارک و منطقه پتیار

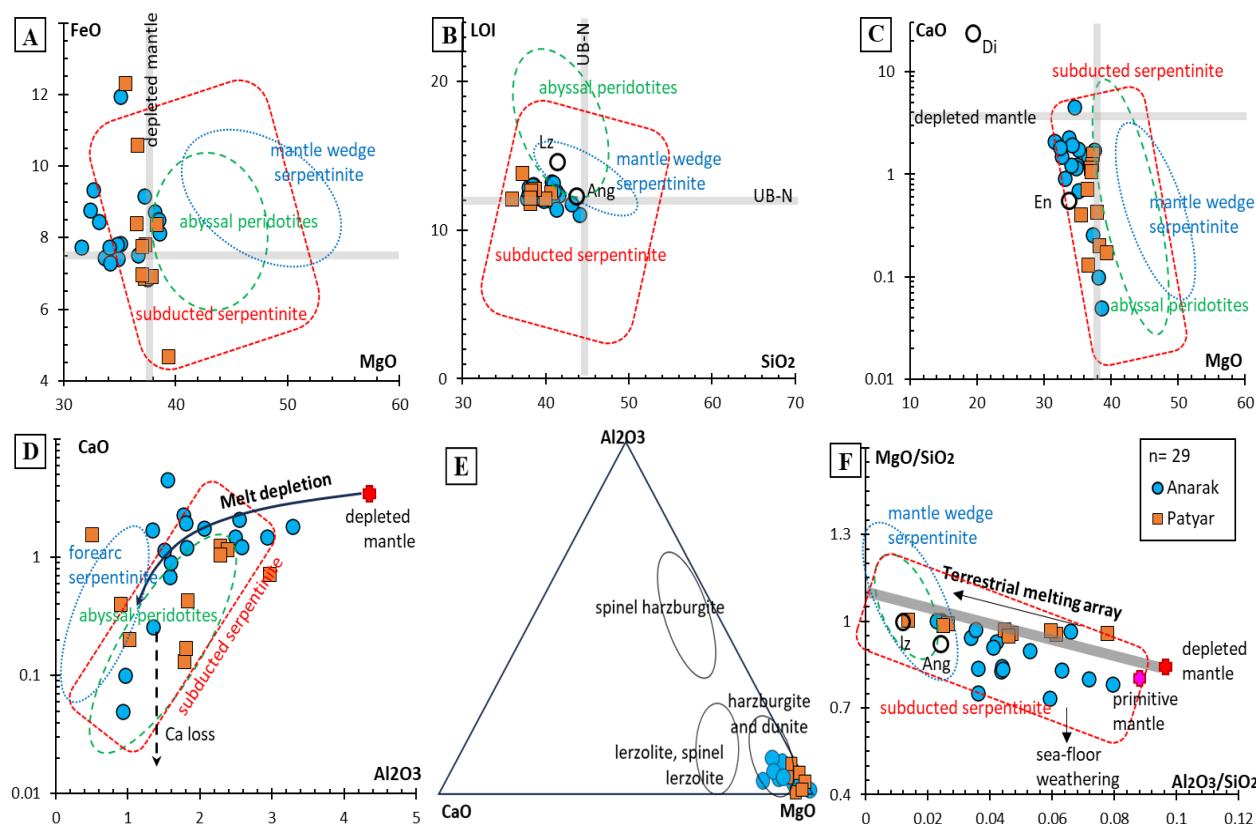
Table 3. Summary statistics for whole-rock gold (ppb) and minor (ppm) element concentrations of serpentinite samples from the Anarak area and Patyar region obtained by ICP-OES analysis

	Au	Ag	Ba	Pb	U	Yb	S	As	Sb	Cu	Co	Ni
Anarak n=68												
Count	68	57	65	68	66	68	63	61	67	67	68	68
Median	5	0.3	61.5	26	2.6	1.39	559	21.1	3.36	91	73	1392
Average	16.3	1.5	436	227	126	4.4	1829	85.2	34.2	3163	193	3843
St. Deviation	54.0	3.5	131 1	573	960	7.9	3940	348	165	7405	264	10908
Maximum	410	23	729 1	3006	7806	41	25718	>100	> 0.01%	35593	1105	83104
Minimum	5	0.1	0.75	1	0.1	0.0	191	0.8	0.38	2	14.6	32
Patyar n=8												
Count	19	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Median	35	0.3	59.5	48.9	7.83	0.8	665	24.2	2.45	89.5	67.6	1752
Average	82.2	1.1	64.5	52.9	7.83	1.2	4383	101	10.6	1976	86.8	2415
St. Deviation	147	2.1	39.9	28.4	6.00	1.0	8727	171	16.1	5337	68.9	1439
Maximum	589	7.0	116	108	18.6	2.9	25718	509	> 0.01%	15184	238	4744
Minimum	5	0.1	14.6	14.7	0.77	0.1	229	4.2	1.58	44.3	33.9	1037

زمین‌شیمی عناصر اصلی و فرعی سرپانتینیت

فرایند سرپانتینه‌شدن می‌تواند به طور چشمگیری مقادیر سیلیس، منیزیم و کلسیم سنگ اولیه را تغییر دهد (Deschamps et al., 2013). تحلیل داده‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی نشان می‌دهد که سرپانتینیت‌های مورد بررسی دارای تغییرات ترکیبی مشخصی هستند؛ به گونه‌ای که محتوای SiO_2 بین ۳۶ تا ۴۴/۰۷ درصد وزنی، CaO بین ۰/۰۵ تا ۴/۵۳ درصد وزنی، Al_2O_3 بین ۰/۵۱ تا ۳/۲۸ درصد وزنی، MgO بین ۳۱/۵۹ تا ۳۹/۳۷ درصد وزنی و مقدار LOI (مواد فرار) بین ۱۱/۰۶ تا ۱۳/۸۲ درصد وزنی متغیر است (جدول ۲). نسبت Si/Mg در نمونه‌های انارک از ۰/۷۷ تا ۱/۰۶ متغیر است؛ در حالی که نسبت Si/Mg در نمونه‌های پتیار از ۰/۷۷ تا ۰/۸۲ است و همبستگی خوبی ($R^2=0.71$) دارند. نمونه‌های پتیار در مقایسه با سایر سرپانتینیت‌های انارک از نظر Cr_2O_3 ($<1.5\%$) غنی‌شدگی نشان می‌دهند (Gleeson et al., 2003). ترسیم داده‌های به دست آمده بر روی نمودار FeO در برابر MgO (درصد وزنی) نشان می‌دهد که ترکیب نمونه‌ها به ویژه از نظر محتوای FeO که اغلب بین ۷ تا ۹ درصد قرار دارد، نسبتاً یکنواخت است (شکل ۶-۱). مقادیر نسبتاً بالای LOI که با یافته‌های سنگ‌نگاری از سرپانتینه‌شدن گسترده همخوانی دارد، بیانگر تأثیر فرایندهای آب‌زدایی طی فرورانش و دگرگونی پیش‌رونده و ارتباط آن با غلظت بالای آنتی‌گوریت در این سرپانتینیت‌هاست (شکل ۶-۲). آنتی‌گوریت، LOI کمتری نسبت به لیزاردیت دارد (حدود ۱۲ درصد در برابر ۱۳ درصد در لیزاردیت) (Evans, 2004). دلیل اصلی کاهش محتوای MgO می‌تواند منشأ گوشته‌ای و تهی‌شدگی ماگمایی پیش از سرپانتینه‌شدن باشد (Deschamps, 2010). از نظر کانی‌شناسی، سرپانتین حاصل از الیون معمولاً دارای MgO بالا (۳۵ تا ۴۵ درصد وزنی) است؛ در حالی که سرپانتین‌های منشأ گرفته از پیروکسن، MgO کمتری (میانگین ۲۵ تا ۴۰ درصد وزنی) ولی Al_2O_3 بالاتر (تا ۴ درصد وزنی) دارند (Deschamps et al., 2013). با این حال، تمایز سرپانتین‌های حاصل از اورتوپروکسن و

کلینوپروکسن تنها بر پایه عناصر اصلی دشوار است؛ زیرا کلسیم طی فرایند سرپانتین‌زایی تقریباً به طور کامل حذف می‌شود (Moll et al., 2007; Deschamps, 2010). ترمولیت در سرپانتینیت معمولاً به عنوان فاز در نظر گرفته می‌شود که در طی آبگیری کلینوپروکسن تشکیل شده و می‌تواند محتوای کلسیم را در برخی نمونه‌ها افزایش دهد. با این حال، همخوانی مقادیر پایین CaO با مشاهدات سنگ‌نگاری، کمبود کلینوپروکسن در سنگ مادر برخی نمونه‌ها را تأیید می‌کند (شکل ۶-۳). آنتی‌گوریت نسبت به دیگر انواع سرپانتین، اندکی SiO_2 بیشتری و در مقابل H_2O و MgO کمتری دارد. در نمودار Al_2O_3 در برابر CaO روند تهی‌شدگی مذاب ماگمایی پیش از سرپانتینه‌شدن را نسبت به گوشته تهی‌شده تأیید می‌کند (شکل ۶-۴). هارزبورژیت‌های سرپانتینی‌شده CaO کمتری نسبت به دونیت‌ها و لرزولیت‌ها دارند. بررسی نمونه‌ها در نمودار سه‌تایی $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ موقعیت سنگ مادر آنها را در محدوده هارزبورژیت و دونیت و در میدان پریدوتیت‌های دگرگونی مشخص می‌کند (شکل ۶-۵). تحلیل داده‌ها در نمودار MgO/SiO_2 در برابر $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها موازی و در زیر خط آرایه زمینی ذوب قرار گرفته‌اند که بیانگر تهی‌شدگی سنگ مادر سرپانتینیت به عنوان باقی‌مانده‌های حاصل از ذوب گوشته در محیط فرورانش است (شکل ۶-۶) (Hart and Zindler, 1986; Peters et al., 2020; Steinthorsdottir et al., 2022). کاهش MgO/SiO_2 که اغلب ناشی از اتلاف MgO در شرایط دگرسانی اقیانوسی است، بیشتر به فرایندهای هوازگی کم‌دما در محیط اقیانوسی نسبت داده می‌شود تا به فرایند سرپانتینه‌شدن (Snow and Dick, 1995; Niu, 2004; Pelletier et al., 2008). افزایش نسبی $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ می‌تواند بیانگر غلظت بالاتر آنتی‌گوریت (با محتوای Al_2O_3 بیشتر نسبت به لیزاردیت و کریزوتیل) باشد. نمونه‌های سرپانتینیتی مشتق از هارزبورژیت در نسبت‌های کمتری از $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ قرار می‌گیرند (Jagoutz et al., 1979; Deer et al., 1992).



شکل ۶. نمودارهای زمین‌شیمیایی تفکیک خاستگاه زمین‌ساختی سرپانتینیت‌ها (سرپانتینیت‌های اقیانوسی، فرورانده و گوه‌گوشته‌ای) بر اساس تغییرات ترکیب شیمیایی سنگ‌کل عناصر اصلی شامل FeO، LOI، و CaO در برابر MgO (Deschamps et al., 2013) برای نمونه‌های انارک و پتیار. خطوط خاکستری نشان‌دهنده ترکیب گوه‌گوشته‌ای شده از سالتر و استراک (Salters and stracke, 2004) و گوه‌گوشته اولیه از مک‌دوناف و سان (McDonough and Sun, 1995). A: نمودار FeO (بر حسب درصد وزنی) در برابر MgO (بر حسب درصد وزنی)، B: نمودار تغییرات LOI در برابر MgO، C: نمودار CaO در برابر MgO، D: نمودار Al_2O_3 در برابر CaO، E: نمودار سه‌تایی Al_2O_3 -CaO-MgO برای تفکیک سنگ‌مادر سرپانتینیت بر پایه ترکیب سنگ‌کل (Li and Bucher, 2004). نمونه‌ها در محدوده پریدوتیت‌های دیگرگونی نیز قرار گرفته‌اند و F: نمودار MgO/SiO_2 در برابر Al_2O_3/SiO_2 برای تفکیک محیط‌های مختلف زمین‌شناسی تشکیل سرپانتینیت. خط پهن آرایه زمینی نام دارد (Jagoutz et al., 1979; Hart and Zindler, 1986). فلش سیاه تأثیر ذوب‌بخشی را نشان می‌دهد. ترکیب‌های پریدوتیت اقیانوسی از نیو (Niu, 2004) = LOI، افت حرارتی (wt.%). علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Ang: آنتی گوریت، Lz: لیزاردیت، Di: دیوپسید، En: انستاتیت). چهار گوش‌های نارنجی از منطقه پتیار و دایره‌های آبی از نمونه‌های سرپانتینیت جای گرفته در واحد چاه‌گربه انارک هستند.

Fig. 6. Geochemical discrimination diagrams of serpentinite tectonic settings (oceanic, subducted, and mantle wedge serpentinites) based on whole-rock major element compositions, including FeO, LOI, and CaO versus MgO (Deschamps et al., 2013) for the Anarak and Patyar samples. Grey lines indicate the depleted mantle composition from Salters and Stracke (2004) and the primitive mantle composition from McDonough and Sun (1995). A: FeO (wt.%) vs. MgO (wt.%), B: LOI vs. MgO, C: CaO vs. MgO, D: Al_2O_3 vs. CaO, E: Al_2O_3 -CaO-MgO ternary diagram for discriminating the serpentinite protolith based on whole-rock composition (Li and Bucher, 2004). Samples also plot within the metamorphosed peridotite field, and F: MgO/SiO_2 versus Al_2O_3/SiO_2 diagram for distinguishing various geological settings of serpentinite formation. The thick line represents the terrestrial array (Jagoutz et al., 1979; Hart and Zindler, 1986). The black arrow indicates the effect of partial melting. Oceanic peridotite compositions are from Niu (2004). LOI = loss on ignition (wt.%). Abbreviations after Warr (2021) (Ang: antigorite, Lz: lizardite, Di: diopside, En: enstatite). Orange squares represent the Patyar area, while blue circles denote serpentinite samples located within the Chah Gorbah unit in the Anarak.

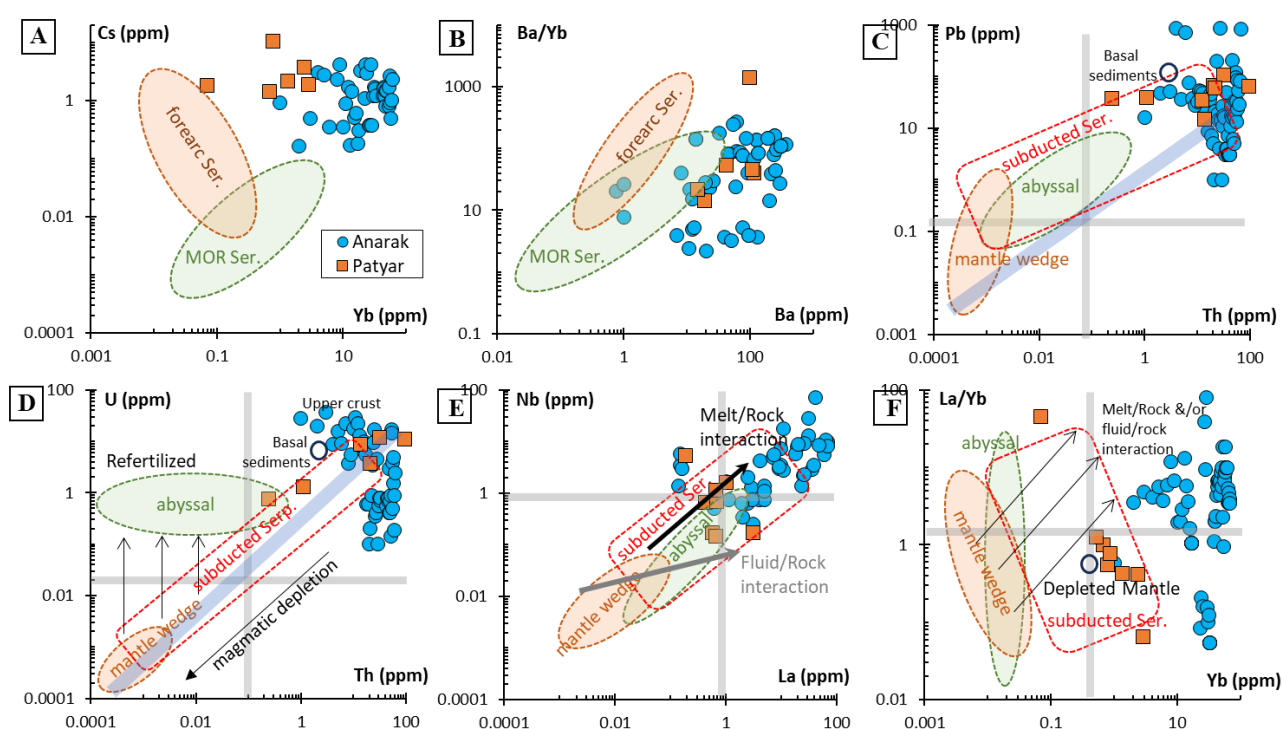
مناطق گسترش کف اقیانوس تا مناطق فرورانش، چه در سرپانتینه‌شدن اولیه و چه در دگرگونی پیش‌رونده، ردیابی شود. ترکیب عناصر در فازهای مختلف سرپانتین وابسته به دمای تشکیل و منبع عناصر است؛ به طور مثال، آنتی‌گوریت به دست آمده از الیون در As و Sb و آنتی‌گوریت به دست آمده از اورتوپروکسن در Pb، Cs، Li و Ba غنی می‌شود (Deschamps et al., 2013). محتوای عنصر سبک لیتیم در سرپانتینیت‌های انارک در مقایسه با مقدار سرپانتینیت‌های جهانی (۰/۱ تا ۲۰ گرم در تن) (Agranier et al., 2007) بین ۱ تا ۸۵ گرم در تن و در پتیار بین ۴ تا ۶۹ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. غنی‌شدگی لیتیم می‌تواند تا حدی ناشی از فرایندهایی باشد که پیش از سرپانتینه‌شدن رخ داده است (Kodolányi et al., 2012).

عناصر کالکوفیل مانند As، Sb و Pb به دلیل تحرک بالا، شاخص مناسبی برای منشأ سیالات هستند و غنی‌شدگی آنها بازتاب تأثیر رسوب‌های دفن‌شده و سیالات رسوب‌زاد است (Deschamps et al., 2010). محتوای آنتیموان در سرپانتینیت‌های انارک در مقایسه با مقدار آن در گوشته اولیه و تهی‌شده ($0.001 < \text{Sb} < 1$ ppm)، بین ۰/۴ گرم در تن تا بیش از ۰/۱ درصد وزنی و در پتیار بین ۱/۶ گرم در تن تا بیش از ۰/۱ درصد وزنی است و مقدار آرسنیک در سرپانتینیت‌های انارک در مقایسه با غلظت آن در گوشته اولیه و تهی‌شده ($0.1 < \text{As} < 10$ ppm)، بین ۰/۸ تا بیش از ۱۰۰ گرم در تن و در سرپانتینیت‌های برداشت‌شده از پتیار به بیشینه ۵۰۹ گرم در تن می‌رسد (جدول ۳) (De Hoog et al., 2009). در مقایسه با سرپانتینیت‌های اقیانوسی و گوه‌گوشته‌نشان می‌دهد که مقادیر عناصر متحرک و کالکوفیل در سرپانتینیت‌های فرورنده به ترکیب رسوبی نزدیک می‌شود و این سنگ‌ها تاریخچه‌ای شامل غنی‌شدگی اولیه و افزودگی عناصر از سیالات رسوبی در طول فرورانش دارند. شواهد ایزوتوپی Pb و غنی‌شدگی As و Sb دو فرضیه برای سرپانتینه‌شدن ثانویه پیشنهاد می‌کند: ۱- فعال‌سازی یا تشکیل گسل‌ها در مراحل اولیه ورود لیتوسفر اقیانوسی به منطقه فرورانش و نفوذ سیالات رسوب‌زاد، و

در سرپانتینیت‌های انارک، عناصر کمیاب متحرک (Pb، U، Cs) و Sr شاخصی حساس برای بررسی برهم‌کنش‌های سیالی هستند؛ زیرا سنگ‌های اولیه پریدوتیتی فاقد این عناصر بوده و افزایش غلظت آنها اغلب ناشی از تأثیر سیالات است. ترکیب عناصر اصلی سرپانتینیت‌ها بیشتر بازتاب ترکیب سنگ اولیه گوشته‌ای است (جدول ۳ و شکل ۶)؛ اما بازتوزیع عناصر متحرک تحت تأثیر ماهیت و ترکیب سیالات (گرمابی، آب دریا یا سیالات مشتق از ورقه فرورنده)، شرایط اکسایش-کاهش، دما و مدت زمان برهم‌کنش سیال-سنگ قرار دارد (Niu, 2004; Drouin et al., 2009). سرپانتینی‌شدن در کف اقیانوس در دماهای پایین ($< 200^\circ\text{C}$) و در دماهای بالاتر از طریق سامانه‌های گرمابی انجام می‌شود (Spandler et al., 2008). نمونه‌های سرپانتینیتی انارک نسبت به ترکیب میانگین سرپانتینیت‌های جهانی در بیشتر عناصر Ba، Pb، Th، U، La، Nb و Yb غنی‌شدگی بالاتری نشان می‌دهند که بخشی از آن به برهم‌کنش‌های پیش‌سرپانتینی‌شدن مانند گدازه/سنگ (غنی‌شدگی عناصر نامتحرک Nb و Yb) نسبت داده می‌شود (Raia et al., 2022) (شکل v-E و F). الگوهای جدایش رفتاری Ba و Cs بیانگر ورود سیالات با Ba بالا و Cs پایین یا جذب ترجیحی Cs در مراحل اولیه فرورانش است (شکل v-A و B). غنی‌شدگی شدید Pb بیشتر به نفوذ سیالات آب‌دار نسبت داده شده است و حضور کربنات‌های همراه با سرپانتینیت نیز می‌تواند در محتوای Pb نقش داشته باشد (Kodolányi et al., 2012) (شکل v-C). منشأ غنی‌شدگی U می‌تواند حاصل برهم‌کنش آب دریا و سنگ در طی سرپانتینه‌شدن یا تأثیر مذاب/سنگ باشد و احتمال نفوذ سیالات رسوب‌زاد نیز مطرح است (Schmidt et al., 2007). روندهای غنی‌شدگی U و Th بیانگر نقش شرایط اکسیدکننده در طول کاهش فشار مرتبط با ورقه فرورونده هستند (شکل v-D). تشکیل مگنتیت غنی از Cr در اطراف دانه‌های کرومیت بیانگر حضور سیالات اکسیدکننده است. سرپانتینیت‌ها به عنوان مخزن مهم عناصر متحرک سیال در فرایندهای فرورانش عمل کرده و غنی‌شدگی آنها می‌تواند از

2013). فرضیه دوم با شواهد صحرایی مانند پیچیده شدن سرپانتینیت‌ها به دور بلوک‌های رسوبی دگرگون شده در انارک تأیید می‌شود (شکل ۱-ب).

۲- نفوذ گسترده این سیالات در کانال فرورانش که در آن سرپانتینیت‌ها و رسوب‌ها (دگرگونه) درهم آمیخته‌اند و سرپانتینیت‌ها نقش اسفنج را در ذخیره و انتقال نشانه‌های شیمیایی رسوبی تا اعماق بیشتر ایفا می‌کنند (Deschamps et al.,



شکل ۷. روند تغییرات عناصر متحرک سیال (FME) در سرپانتینیت‌های انارک و پتیار. A: نمودار Yb در برابر Cs، B: نمودار Ba در برابر Ba/Yb، C: نمودار Th در برابر Pb، D: نمودار Th در برابر U، E: نمودار La در برابر Nb و F: نمودار Yb در برابر La/Yb. داده‌های مقایسه‌ای از مجموعه داده‌های سرپانتینیت‌های MOR (اقیانوسی) و Forearc (پیش کمان) از رایا و همکاران (Raia et al., 2022) و داده‌های سرپانتینیت‌های اقیانوسی (آب‌سال)، فرورانده و گوه گوشته از دشام و همکاران (Deschamps et al., 2013) ترسیم شده‌اند.

Fig. 7. Fluid-mobile elements (FME) trends in the Anarak and Patyar serpentinites. A: Yb vs. Cs diagram; B: Ba vs. Ba/Yb diagram; C: Th vs. Pb diagram; D: Th vs. U diagram; E: La vs. Nb diagram; and F: Yb vs. La/Yb diagram. Comparative data are plotted from datasets of MOR (oceanic) and forearc serpentinites (Raia et al., 2022) as well as abyssal, subducted, and mantle wedge serpentinites (Deschamps et al., 2013).

نقش کلیدی در تبیین فراوانی عناصر کانه‌ساز در این منطقه، در بررسی‌های زمین‌شیمی عناصر کمیاب مورد مطالعه قرار گرفتند. بررسی داده‌ها بر روی نمودارهای دوتایی Ni-Co و Cu-Co

رخدادهای سولفیدی در نمونه‌های انارک را می‌توان به دو گروه اصلی تفکیک کرد: رخدادهای سولفیدی حاوی مس و رخدادهای سولفیدی غنی از نیکل و فقیر از مس. نمونه‌های سرپانتینیت به دلیل

است که تفاوت آشکار آنها با کانه‌زایی انارک قابل مشاهده است (Hadjistavrinou and Constantinou, 1982; Kase and Yamamoto, 1988; Goodfellow et al., 1999). نمونه‌های سنگی منطقه انارک دارای نسبت Co/Ni در دامنه ۰/۹ تا ۰/۱ هستند که این نسبت در نمونه‌های پرعیار مس تغییر چشمگیری ندارد (شکل ۸-۸). بیشترین مقادیر Co/Ni در نمونه‌هایی مشاهده می‌شود که بیشترین میزان کانه‌زایی کبالت را دارند (شکل ۸-۸). همچنین، مقادیر بسیار پایین Co/Ni در این ناحیه تحت تأثیر غلظت‌های بالا تا متوسط نیکل قرار دارد (شکل ۸-۸).

ماهیت متفاوت و خاستگاه مستقل سولفیدهای مس و نیکل را آشکار می‌کند (شکل ۸). در نمودار Ni-Co، نمونه‌های کانه‌دار در یک روند صعودی نسبتاً خطی قرار می‌گیرند (شکل ۸-۸)؛ در حالی که در نمودار Cu-Co، کانه‌زایی مس و پراکندگی‌های سولفیدی نیکل دو روند تقریباً موازی را نشان می‌دهند که اختلاف قابل توجهی نه تنها در فراوانی Cu و Ni بلکه در نسبت Cu/Co نیز دارند (شکل ۸-۸ و C). به منظور مقایسه، در این نمودارها ترکیب میانگین سولفیدهای توده‌ای مدرن میان‌اقیانوسی، سولفیدهای توده‌ای انواع قبرس و بشی (ژاپن) نیز نمایش داده شده

جدول ۴. محاسبات آماری مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی (درصد وزنی) سنگ کل حاصل XRF از نمونه‌های لیستونیت ناحیه انارک و منطقه پتیار

Table 4. Summary statistics for whole-rock major oxide (wt. %) element concentrations of listvenite samples from the Anarak area and Patyar region obtained by XRF analysis

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	LOI
Anarak n=14											
Count	14	14	14	14	8	14	13	9	8	13	14
Median	41.61	1.62	4.49	7.47	0.34	20.97	0.24	0.16	0.09	0.08	9.77
Average	50.64	1.72	7.68	7.42	0.40	17.89	1.09	0.62	0.10	0.36	12.35
St. Deviation	27.07	1.43	7.53	4.51	0.31	13.22	1.94	1.14	0.06	0.53	10.12
Maximum	96.75	5.35	22.09	13.24	1.04	32.65	5.51	3.56	0.21	1.48	34.10
Minimum	21.43	0.01	0.13	1.07	0.09	0.19	0.02	0.05	0.02	0.03	0.63
Patyar n=21											
Count	21	21	21	21	20	21	20	18	20	8	20
Median	39.17	1.61	9.87	6.77	0.17	7.65	0.14	0.47	0.68	0.19	20.63
Average	41.62	2.55	11.85	7.91	0.37	11.26	0.30	0.73	1.44	0.21	20.19
St. Deviation	19.22	2.53	9.68	4.50	0.41	9.37	0.62	0.62	1.74	0.11	10.20
Maximum	74.48	9.30	31.64	19.21	1.49	31.01	2.9	2.52	6.09	0.38	33.19
Minimum	14.00	0.10	0.30	3.39	0.06	0.07	0.05	0.18	0.06	0.08	3.90

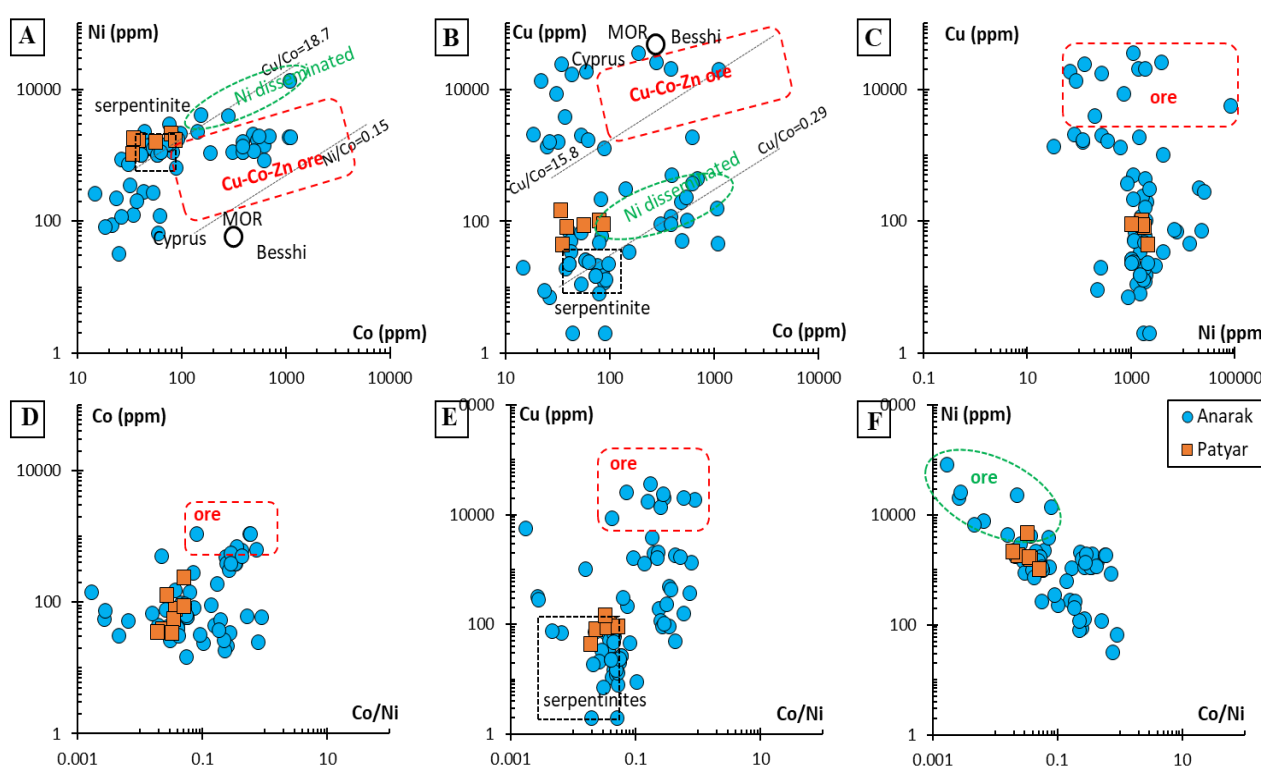
زمین‌شیمی لیستونیت

است تا ۵ درصد کاهش یابد (Tuysuz and Erler, 1993). لیستونیت‌های نوع سیلیسی با افزایش محتوای کوارتز (تا حدود ۲۰ درصد) مشخص می‌شوند (Stanger 1985; Wilde et al., 2002). بررسی ترکیب شیمیایی لیستونیت‌های انارک تفاوت‌های معناداری در محتوای SiO₂، CaO، MgO، Al₂O₃، Fe₂O₃ و K₂O و LOI نشان می‌دهد که با مشاهدات سنگ‌نگاری از کانی‌شناسی متنوع این سنگ‌ها کاملاً همخوانی دارد. ترکیب

بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان‌دهنده تشکیل لیستونیت‌ها از دگرسانی سرپانتینیت‌ها تحت فرایندهای گرمایی و/یا سطحی است که این تغییرات به وضوح در داده‌های اکسیدهای اصلی قابل ردیابی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد تشکیل لیستونیت زمانی آغاز می‌شود که مقدار MgO به حدود ۳۲ درصد کاهش یابد و تا رسیدن به ۱۵ درصد ادامه یابد؛ در حالی که غلظت سیلیس ممکن

لیستونیت‌های نوع I، فرایند غالب کربناتی شدن بوده که به تشکیل سنگ‌های غنی از کربنات با بقایای سرپانتینه منجر شده است (شکل ۹-A و B). این فرایند با کاهش تدریجی کانی‌های کربناتی و افزایش هم‌زمان کانی‌های سیلیکاته همراه بوده است. تحلیل داده‌ها در نمودارهای هارکر با در نظر گرفتن ترکیب استوکیومتری کانی‌های عضو نهایی مانند کوارتز، منیزیت، دولومیت، کلسیت، مگنتیت و سرپانتین انجام شده است (شکل ۹).

اکسیدی سنگ‌های انارک و پتیار اغلب شامل ۱۴۱۴ تا ۹۶/۸ درصد SiO_2 ، ۰/۷ تا ۳۲/۷ درصد MgO و ۱ تا ۱۹/۲ درصد Fe_2O_3 است؛ در حالی که مقادیر LOI بین ۰/۶ تا ۳۴/۱ درصد متغیر بوده که نشان‌دهنده درجه‌های مختلف لیستونیتی شدن است (جدول ۴ و شکل ۹-A تا D). روندهای غنی‌شدگی هم‌زمان CaO و SiO_2 همراه با کاهش MgO ، شواهد محکمی از این تغییرات شیمیایی ارائه می‌دهند (شکل ۹-A و B). در

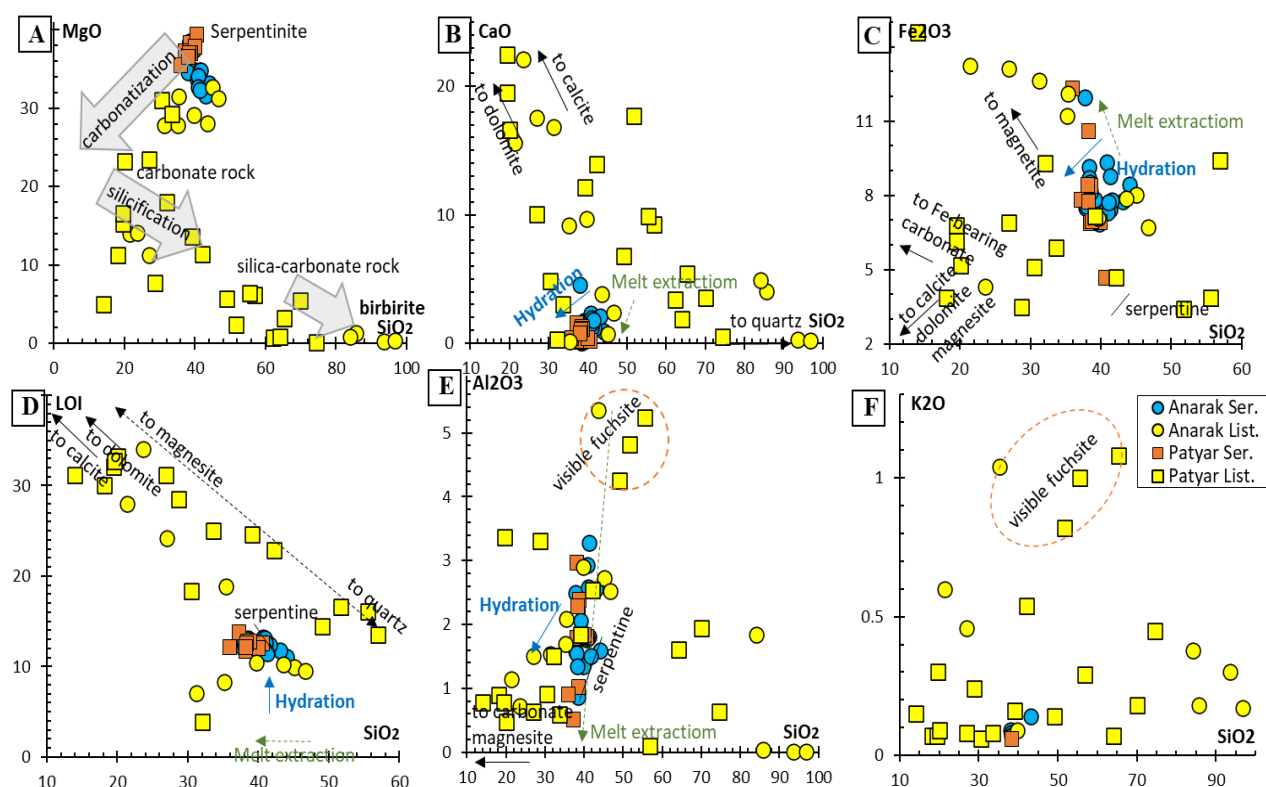


شکل ۸. روند تغییرات لگاریتمی عناصر کانه‌ساز در سرپانتینیت و سرپانتینیت‌های لیستونیتی انارک و پتیار. A: نمودار Co در برابر Ni، B: نمودار Co در برابر Ni، C: نمودار Ni در برابر Cu، D: نمودار نسبت Co/Ni در برابر Cu، E: نمودار نسبت Co/Ni در برابر Cu، F: نمودار نسبت Co/Ni در برابر Ni. برای مقایسه ترکیب سولفید MOR (Goodfellow et al., 1999)، سولفید قبرس (Hadjistavrinou and Constantinou, 1982)، سولفید بشی (Kase and Yamamoto, 1988) و کانه‌زایی مس - کبالت - روی و نیکل همراه با سنگ‌های اولترابازیک لیستونیتی (Peltonen et al., 2008) نشان داده است.

Fig. 8. Logarithmic variation trends of ore-forming elements in the Anarak and Patyar serpentinites and listvenite-hosted serpentinites. A: Logarithmic Co vs. Ni diagram, B: Logarithmic Co vs. Cu diagram, C: Logarithmic Ni vs. Cu diagram, D: Logarithmic Co/Ni ratio vs. Co diagram, E: Logarithmic Co/Ni ratio vs. Cu diagram, and F: Logarithmic Co/Ni ratio vs. Ni diagram. For comparison, MOR (Goodfellow et al., 1999), Cyprus-type sulfide (Hadjistavrinou and Constantinou, 1982), Besshi-type sulfide (Kase and Yamamoto, 1988), and Cu-Co-Zn and Ni mineralization associated with listvenitized ultramafic rocks (Peltonen et al., 2008) compositions are also shown.

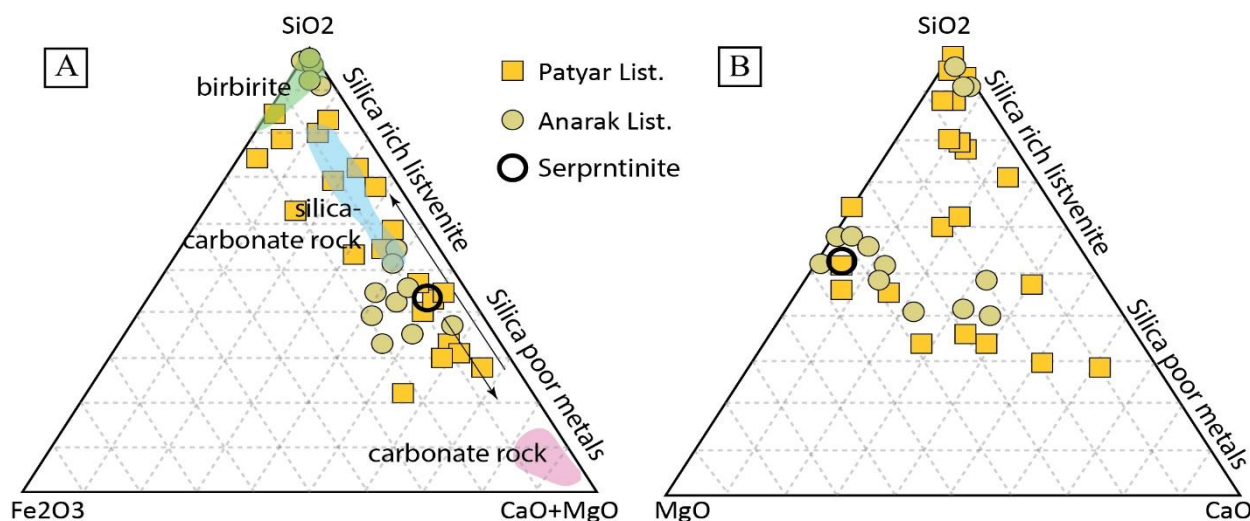
مقادیر بیشتری از $\text{CaO}+\text{MgO}$ نسبت به SiO_2 کسب کرده‌اند؛ در حالی که نمونه‌های کانه‌دار اندکی غنی‌شدگی سیلیکا نشان می‌دهند (شکل ۱۰-A و B). به عبارتی، بیشتر لیستونیت‌های انارک از نوع لیستونیت‌های کربناته هستند؛ درحالی که لیستونیت‌های پتیار با مقادیر بالاتر SiO_2 ، از نوع سیلیسی-کربناته و حتی تا بیش از ۹۰ درصد وزنی کوارتز داشته و ترکیب بیریریت دارند (شکل ۱۰-A). این یافته‌ها با مشاهدات صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی کاملاً همخوانی دارند.

غنی‌شدگی چشمگیر CaO در لیستونیت‌ها نسبت به سرپانتینیت‌های اولیه، بیانگر تشکیل کانی‌های کربناتی مانند دولومیت، منیزیت، کلسیت و انکریت است که با فراوانی منیزیت در منطقه پتیار نیز سازگاری دارد (شکل ۹-A). بررسی تغییرات عنصری نشان می‌دهد که لیستونیت‌های پتیار محتوای بالاتری از SiO_2 ، Al_2O_3 و K_2O نسبت به سایر نمونه‌های انارک دارند که به حضور کانی‌های کوارتز و فشایت (با محتوای بیشتر پتاسیم و آلومینیم) مربوط می‌شود (شکل ۹-A، E و F). تحلیل داده‌ها در نمودارهای سه‌تایی تأیید می‌کند که نمونه‌های لیستونیت انارک



شکل ۹. ترکیب‌های شیمیایی عناصر اصلی سنگ کل از لیستونیت‌های انارک و پتیار، A: SiO_2 vs. MgO ، B: SiO_2 vs. CaO ، C: SiO_2 vs. Fe_2O_3 ، D: SiO_2 vs. LOI، E: SiO_2 vs. Al_2O_3 و F: SiO_2 vs. K_2O . روند خروج مذاب با نرم‌افزار pMELTS (Ghiorsio et al., 2002) محاسبه شده است. ترکیب معمول سرپانتین از دیر و همکاران (Deer et al., 1992) آمده است.

Fig. 9. Whole-rock major element compositions of listvenites from Anarak and Patyar, A: SiO_2 vs. MgO , B: SiO_2 vs. CaO , C: SiO_2 vs. Fe_2O_3 , D: SiO_2 vs. LOI, E: SiO_2 vs. Al_2O_3 , and F: SiO_2 vs. K_2O . The melt extraction trend was calculated using the pMELTS software (Ghiorsio et al., 2002). Typical serpentinite composition is reported from Deer et al. (1992).



شکل ۱۰. تعیین ترکیب لیستونیت‌های انارک و پتیار، A: نمودار سه تایی $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO+CaO}$ با روند‌های دگرسانی سرپانتینیت (Akbulut et al., 2006) و B: نمودار سه تایی $\text{MgO-SiO}_2\text{-CaO}$. ترکیب سرپانتینیت از دیر و همکاران (Deer et al., 1992) آمده است.

Fig. 10. Composition of listvenites from Anarak and Patyar, A: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-(MgO+CaO)}$ ternary diagram with alteration trends of serpentinite (Akbulut et al., 2006), and B: $\text{MgO-SiO}_2\text{-CaO}$ ternary diagram. Serpentinite composition is reported from Deer et al. (1992).

خاستگاه سرپانتینیت

زمین‌شیمی سرپانتینیت‌ها به شدت تحت تأثیر محیط زمین‌ساختی و تابعی از دما و ماهیت سیالات آبدار است که خود تحت کنترل شرایط زمین‌شناسی قرار دارند (Deschamps et al., 2013). بر این اساس، سه گروه اصلی شامل سرپانتینیت‌های اقیانوسی (آبیسال)، گوه‌گوشته و فرورانده شناخته می‌شوند. سرپانتینیت‌های اقیانوسی در اثر آبدیگری پریدوتیت‌های کف اقیانوس توسط سامانه‌های گرمایی یا نفوذ آب دریا شکل گرفته و تا عمق حدود ۷ کیلومتر و دمای ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد گسترش می‌یابند. فازهای اصلی آنها لیزاردیت و کریزوتیل است (Evans et al., 1976; Escartin et al., 1997). سرپانتینیت‌های گوه‌گوشته از آبدیگری پریدوتیت‌های گوه‌گوشته‌ای توسط سیالات آزادشده از ورقه فرورانده ایجاد شده و در گرم‌ترین و عمیق‌ترین بخش‌های بالای منطقه فروران، به صورت لایه‌هایی چند کیلومتری و در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند؛ در حالی که نمونه‌های پیش‌کمان آنها در سردترین بخش‌های بالایی و نزدیک

ورقه قرار دارند و ترکیب زمین‌شیمیایی پیچیده‌ای ناشی از ورود مداوم مواد از ورقه و خروج مذاب کم‌آبی دارند (Schwartz et al., 2001; Bostock et al., 2002; DeShon and Schwartz, 2004). سرپانتینیت‌های فرورانده از نظر زمان‌بندی و شرایط سرپانتینه‌شدن ناهمگن بوده و معمولاً با سنگ‌های دگرگونی فشار بالا-دما پایین همراه هستند. منشأ آنها می‌تواند پریدوتیت‌های اقیانوسی یا قاره‌ای آبدار شده باشد که طی فروران با رسوب‌ها و پوسته اقیانوسی دگرسان‌شده واکنش داده و آبدیگری جزئی را تجربه کرده‌اند (Boillot et al., 1980; Skelton and Valley, 2000). مرحله‌ای از سرپانتینه‌شدن ثانویه نیز در عمق کم و در امتداد گسل‌ها نزدیک گودال رخ می‌دهد که در آن لیزاردیت حاصل از تبلور مجدد کریزوتیل تشکیل می‌شود. در اعماق بیشتر، لیزاردیت به آنتی‌گوریت در حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تبدیل می‌شود و همراه با برهم‌کنش با رسوب‌های نیمه‌آبدار سبب افزایش Al_2O_3 در سرپانتینیت می‌شود (Ranero et al., 2003; Contreras-Reyes et al., 2007; Deschamps et al., 2011; Lafay et al., 2013). در محل تماس صفحه فروران،

لایه‌ای نسبتاً نازک از کانی‌های سرپانتین به ضخامت ۵ تا ۱۰ کیلومتر و عمق ۲۰ تا ۸۰ کیلومتر ایجاد می‌شود که به کانال سرپانتینیت فرورانش معروف است. این کانال می‌تواند شامل سرپانتینیت‌های اقیانوسی فرورفته، سنگ‌های فشار بالا از ورقه فرورونده و پریدوتیت‌های سرپانتینیزه شده گوه گشته باشد که ممکن است از پوسته یا گوه جدا شده به سمت بالا حرکت کرده و به منشور تجمعی افزوده شوند (Gorczyk et al., 2007; Blanco-Quintero et al., 2011; Schwartz et al., 2020). بررسی زمین‌شیمیایی سرپانتینیت‌های انارک و پتیار نشان می‌دهد که این سنگ‌ها از گروه سوم و نوع فرورانده هستند (شکل ۶). شواهد نمودارهای اکسیدهای اصلی MgO در برابر FeO و LOI و نمودار SiO_2 در برابر CaO نشان می‌دهد که ترکیب نمونه‌ها با محدوده ترکیبی سرپانتینیت‌های فرورانده همخوانی دارد (شکل ۶-A تا D). بر اساس نمودار CaO در برابر Al_2O_3 ، نمونه‌ها در محدوده ترکیب سرپانتینیت‌های فرورانده و اقیانوسی قرار می‌گیرند؛ اما مقدار CaO آنها کمتر از مقدار معمول در گوه‌تهی شده است؛ موضوعی که می‌تواند به ماهیت سنگ مادر مرتبط باشد. عناصر کمیاب متحرک علاوه بر شناسایی تاریخچه سیال، ردیاب‌های حساسی برای تعیین محیط زمین‌ساختی سرپانتینیت‌ها هستند (Peters et al., 2017). سرپانتینیت‌های انارک غنی‌شدگی شدیدتری نسبت به سرپانتینیت‌های جهانی نوع فرورانده نشان می‌دهند و مقادیر عناصر متحرک در سیال به سمت ترکیب‌های رسوبی میل می‌کند (شکل ۷).

نقش سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌ها در تمرکز و انتقال عناصر کانه‌ساز در ناحیه انارک

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سرپانتینیت‌های انارک و پتیار به عنوان سرپانتینیت‌های حاصل از فرورانش، نقشی مهم در تمرکز و انتقال عناصر کانه‌زا به ویژه طلا داشته‌اند. فرایند سرپانتینیت شدن که با افزودن مقادیر قابل توجهی آب (حدود ۱۱ تا ۱۴ درصد وزنی) به سامانه پریدوتیتی همراه بوده است (شکل ۶-B)، نه تنها

به دگرسانی گسترده سنگ‌های اولترابازیک منجر شده است؛ بلکه به عنوان یک سازوکار مؤثر در آزادسازی و جابه‌جایی طلا از کانی‌های کدر اولیه نظیر سولفیدها، کرومیت و مگنتیت عمل کرده است. محتوای طلا در این سرپانتینیت‌ها (حدود ۰/۰۲ تا ۰/۱ گرم در تن) چندین برابر میانگین جهانی پریدوتیت‌های گوه‌تهی بالایی (۰/۰۱ تا ۰/۰۱ گرم در تن) است که این امر نشان‌دهنده غنی‌شدگی ثانویه طی فرایندهای گرمایی مرتبط با فرورانش است (Buisson and Leblanc, 1987; Gahlan et al., 2022). این افزایش، گواه نقش سیالات گرمایی غنی از CO_2 ، S و As در انتقال و رسوب طلا به صورت ترکیب‌های سولفیدی، سولفوآرسنید یا آرسنیدی است (Leblanc and Billaud, 2010; Buckman and Ashley, 1982). منابع احتمالی آرسنیک و گوگرد می‌تواند شامل سنگ‌های رسوبی و دگرگونی مجاور رگه‌های کانه‌دار، محصولات متبلور شده از ذوب‌های سولفیدی-آرسنیدی در سنگ‌های اولترابازیک مادر، یا متاسوماتیسم گوه‌تهی باشد (Kiefer et al., 2023). سنگ‌های اولترابازیک به ندرت میزبان آرسنیدها هستند و بررسی‌های این پژوهش نشان داد که در منطقه انارک از طریق آلودگی پوسته‌ای در عناصر آرسنیک و گوگرد غنی شده‌اند (شکل ۵-F) (Ishimaru and Arai, 2008). نتایج بررسی‌های اخیر نشان داده‌اند که ترسیب سولفیدهای نیکل و آرسنیدها در اثر سیالات $S-As-Sb$ طی آنتی‌گوریت‌زایی (شکل‌های ۳-D و ۴-G) در کانال فرورانش رخ داده و موجب افزایش مقادیر As ، Sb ، Te ، Pb و Bi شده است و آرسنیک به همراه آنتیموان به سرعت توسط سیالات در حین فرورانش آزاد می‌شود (González-Jiménez et al., 2021). در زمینه کانه‌زایی آهن در افیولیت انارک، شواهد قطعی برای سازوکار تشکیل در دست نیست؛ اما بررسی‌های سنگ‌نگاری، آزادسازی آهن در طی سرپانتینیت شدن و نقش سیالات گرمایی را نشان می‌دهد (شکل ۴-A). این یافته با بررسی‌های انجام‌شده در افیولیت نایین (غرب انارک) همخوانی دارد که تشکیل مگنتیت از هارزبورژیت را در محیط نیمه‌شکننده

و با افزایش نسبت سیال/سنگ طی سرپانتینیت شدن چند مرحله‌ای تأیید می‌کند (Eslami et al., 2018). شیمی‌کانی‌های اسپینل کروم‌دار دایک‌های هورنبلندی مجموعه افیولیتی ناین نیز منشأ غیرماگمایی این کانیه‌ها و نقش سیالات دریایی را در تشکیل آنها تأیید می‌کند (Naderi et al., 2024). شواهد نشان می‌دهد این سیالات پس از عبور از واحدهای مختلف پوسته اقیانوسی با پریدوتیت‌های گوشته بالایی برهم‌کنش داشته و موجب تشکیل این کانیه‌ها شده‌اند (Naderi et al., 2024).

عناصر کروم، کبالت، منگنز و نیکل موجود در لیستونیت، که اغلب به صورت اسپینل کروم‌دار و پنتلاندیت حضور دارند، شباهت زیادی با سنگ مادر سرپانتینیت دارند و این تشابه بیانگر ارث‌بری ترکیبی از سنگ مادر است (Eslami et al., 2018) (شکل ۳-I). در مورد کانه‌زایی پراکنده و کم‌عیار سولفیدهای نیکل، هم منبع فلز و هم فرایند کانه‌زایی مشخص هستند. منشأ این رخدادهای نیکل را می‌توان به لیستونیتی شدن نسبت داد، فرایندی که طی آن نیکل سیلیکاتی (حدود ۲۰۰۰ گرم در تن) موجود در سنگ مادر به فاز سولفیدی در لیستونیت تبدیل شده است. این امر مستلزم آن است که سیالات دگرسانی، مقدار کافی گوگرد داشته باشند تا اتم‌های نیکل (و کبالت) آزادشده از سیلیکات‌ها و اکسیدهای در حال انحلال را به‌طور هم‌زمان پیوند داده و به صورت سولفیدهای نیکل‌دار سودوکتونیک رسوب دهند (Peltonen et al., 2008). بررسی داده‌ها بر روی نمودارهای دوتایی Ni-Co و Cu-Co ماهیت متفاوت و خاستگاه مستقل سولفیدهای مس و نیکل را در منطقه انارک نشان می‌دهد (شکل ۸). این یافته‌ها به خوبی با نتایج بررسی‌های سیالات درگیر مختارزاده محمدی و باقری (Mokhtarzadeh Mohammadi and Bagheri, 2011) در کانسار مس، نیکل، کبالت و اورانیوم مسکنی (غرب انارک) همسو است. داده‌های ایشان نیز بر وجود دو سامانه کانه‌زایی مجزا برای مس و نیکل دلالت دارد. این دوگانگی در نوع کانیه‌سازی و هم‌گرایی آنها در لیستونیت، احتمالاً در طی بازتوزیع گرمایی با کمک سیالات هم‌زمان با دگرشکلی و

جای‌گیری سولفیدهای Cu در سنگ‌های لیستونیتی حاوی سولفید نیکل اتفاق افتاده است (Peltonen et al., 2008). به نظر می‌رسد کانیه‌های اولیه پریدوتیت سرپانتینیتی انارک، طی شکل‌گیری زون برشی دچار تجزیه شده و عناصر یادشده آزاد شده‌اند؛ به طوری که در گذار از شرایط شکل‌پذیر به شکنا، رگه‌های کانه‌دار شکل گرفته‌اند. غلظت بالای Cu، As و Sb در ارتباط لیستونیت‌های دارای دگرشکلی برشی، نشان می‌دهد که دگرشکلی مهم‌ترین عامل در تمرکزدهی مسیرهای جریان سیال کانه‌دار درون زون برشی بوده است. شواهد به دست آمده، بیانگر آن است که لیستونیت‌های منطقه انارک در دو مرحله اصلی شکل گرفته‌اند. در مرحله نخست، لیستونیت‌های نوع I بر اثر کربناته شدن سنگ‌های اولترابازیک تحت تأثیر سیالات غنی از CO_2 ، H_2O و Ca^{2+} در شرایط pH بالاتر تشکیل شده‌اند. در مرحله دوم، بخشی از این لیستونیت‌ها با انتقال سیلیس از کانیه‌های سرپانتین و تحت تأثیر سیالات گرمایی غنی از SiO_2 و H_2O در شرایط pH نسبتاً پایین همراه با کاهش $f\text{S}_2$ و $f\text{O}_2$ ، به لیستونیت‌های نوع II تبدیل شده‌اند. نبود مگنتیت در لیستونیت‌های نوع دو، درحالی که این کانیه در سرپانتینیت‌های مجاور فراوان است (شکل ۲-C و D)، بیانگر انحلال کامل آن طی لیستونیتی شدن و انتقال طلای مرتبط به سیالات گرمایی است. لیستونیت‌های انارک شرایط رخساره شایست سبز (دمای ۲۹۰ تا ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۰ تا ۳۰۰ مگاپاسکال) را تحمل کرده‌اند (Bagheri and Stampfli, 2009; Plissart et al., 2008). به نظر می‌رسد لیستونیت‌های بررسی شده در این منطقه با بسته شدن دریای تیس، بالاآمدگی پس از کوه‌زایی و دگرگونی پس‌رونده (دمای ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال) ارتباط داشته باشند. لیستونیت‌های حاصل از این سرپانتینیت‌ها اغلب ترکیب سیلیسی-کربناته دارند و شدت دگرشکلی برشی در آنها نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های زمین‌ساختی، علاوه بر کنترل مسیرهای نفوذ سیال، با ایجاد محیط‌های احیای موضعی شرایط را برای رسوب انتخابی این عناصر فراهم کرده‌اند.

لیستونیتی شدن نوع II (سیلیسی) و کانه‌زایی: فعال شدن پهنه‌های برشی و ورود سیالات غنی از Si و K، همراه با کاهش فشار ناگهانی، محرک اصلی شکست کمپلکس‌های طلا و رسوب هم‌زمان طلا و سولفیدهای فلزهای پایه بوده است.

مرحله ۴، دگرگونی ناحیه‌ای: مجموعه انارک، رویداد دگرگونی در شرایط رخساره شست سبز را تجربه کرده است که سبب شده هم‌یافت کانه‌زایی اصلی را به طور گسترده بازآرایی نکند.

پیامدهای اکتشافی و زمین‌شناسی اقتصادی

یافته‌های این پژوهش دارای پیامدهای اکتشافی مستقیم برای شناسایی ذخایر مشابه در کمرندهای افیولیتی ایران است. مدل ژنتیکی ارائه‌شده، شاخص‌های کلیدی متعددی را به عنوان راهنمای اکتشاف معرفی می‌کند. از جمله شاخص‌های سنگ‌شناسی و ساختمانی می‌توان به حضور لیستونیت‌های سیلیسی-کربناتی (نوع II)، به ویژه انواع تحت‌تأثیر دگرشکلی برشی اشاره کرد که اولویت اول اکتشافی محسوب می‌شوند. در حوزه شاخص‌های زمین‌شیمیایی، الگوی غنی‌شدگی هم‌زمان طلا با آرسنیک، آنتیموان، نیکل، کبالت و مس، یک امضای زمین‌شیمیایی متمایز و قابل اتکا برای این سامانه‌ها به شمار می‌آید. همچنین کانی‌های راهنمای آرسنوپیریت و پیریت غنی از آرسنیک، شاخص‌های میکروسکوپی مستقیمی برای هدف‌گیری مناطق امیدبخش محسوب می‌شوند.

این پژوهش نشان می‌دهد که در کمرندهای افیولیتی ایران، راهبرد اکتشاف باید از جستجوی تک‌عنصری طلا به سمت اکتشاف یکپارچه و چندعنصری تغییر جهت دهد. تمرکز صرف بر طلا می‌تواند باعث نادیده گرفته شدن پتانسیل اقتصادی قابل توجه ذخایر همراه نیکل، کبالت و مس در این محیط‌ها شود. بنابراین، برنامه‌ریزی اکتشافی در این پهنه‌ها باید مبتنی بر شناسایی هم‌زمان ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی چندعنصری و پهنه‌های دگرسانی لیستونیتی شدید باشد.

تجزیه کانی‌های حاوی Cr-Ni مانند اسپینل کروم‌دار در طی میلونیتی شدن و تشکیل کانی‌های ثانویه‌ای چون ماریپوزیت، بیانگر تحرک این عناصر در سیالات کانه‌زا و وجود ارتباط ژنتیکی میان سرپانتینیت‌های مادر و لیستونیت‌های غنی‌شده است (شکل ۳-I). همچنین تفاوت ترکیب شیمیایی بین سرپانتینیت‌های مشتق‌شده از الیون و پیروکسن، اثر سنگ مادر اولیه را بر الگوی توزیع عناصر آشکار می‌سازد.

الگوی پیشنهادی کانه‌زایی افیولیت انارک

بر پایه داده‌های سنگ‌نگاری، زمین‌شیمیایی و زمین‌ساختی، مدل پیشنهادی زیر برای تکامل سرپانتینیت‌های لیستونیتی و کانه‌زایی مرتبط در منطقه انارک پیشنهاد می‌شود. این مدل، توالی پویای فرایندها در چارچوب زمین‌ساختی فرورائش را نشان می‌دهد.

مرحله ۱، تشکیل پروتولیت و سرپانتینیتی شدن اولیه در پشته میانی اقیانوس: پروتولیت مجموعه، هارزبورژیت گوشته بالایی بوده است که در محیط پشته میانی اقیانوس جای‌گیری و تحت سرپانتینیتی شدن اولیه با آب دریا قرار گرفته است. این فرایند موجب تشکیل کانی‌های سرپانتین و آزادسازی اولیه عناصری مانند Ni، Co و Cr شده است.

مرحله ۲، فرورائش و متاسوماتیسم غنی‌ساز: هم‌گرایی صفحه‌ها و فرورائش، این بخش از پوسته اقیانوسی را به عمق برده و در معرض سیالات ناشی از آب‌زدایی صفحه فرورونده قراردادده است. این سیالات اکسیدی غنی از عناصر LILE، As، Sb و S با برهم‌کنش با سرپانتینیت‌ها، سامانه را برای کانه‌زایی طلا و عناصر مرتبط بارور کرده‌اند.

مرحله ۳، لیستونیتی شدن و کانه‌زایی اصلی هم‌زمان با بالآمدگی: این مرحله کلیدی به دو زیرمرحله تقسیم می‌شود:

- لیستونیتی شدن نوع I (کربناته): نفوذ سیالات CO₂ دار به کربناته شدن گسترده و تشکیل لیستونیت‌های غنی از کربنات منجر شده است. این فرایند با افزایش pH، شرایط را برای حمل طلا به صورت کمپلکس پایدار [Au(HS)₂]⁻ فراهم کرده است.

مقایسه با مدل‌های جهانی

مدل پیشنهادی انارک، هم‌پوشانی‌ها و تمایزهای مهمی با مدل‌های شناخته‌شده جهانی لیستونیت‌های طلا دار (مانند کانسارهای کمر بند نوپروتروژئیک عربستان-نوبیا و عمان) نشان می‌دهد (Zoheir et al., 2023; Abdel-Karim et al., 2025). با وجود خاستگاه مشابه فرورانشی و نقش متاسوماتیسم سیالات غنی از CO₂ در لیستونیت‌های صحراء النوبه، کانه‌زایی اغلب بر طلا در لیستونیت‌های سیلیسی-کربناتی متمرکز است و کانی‌سازی سولفیدی تأخیری شامل پیریت، آرسنوپیریت و کالکوپیریت مشاهده می‌شود. در مقابل، لیستونیت‌های انارک، علاوه بر طلا، طیف گسترده‌تری از کانه‌زایی شامل سولفیدهای نیکل، کبالت و مس را نشان می‌دهند که حاصل دگرسانی چندمرحله‌ای تحت تأثیر سیالات غنی از گوگرد، آرسنیک و آنتیموان است. این تمایز را می‌توان به تفاوت در ترکیب سنگ مادر اولترامافیک، شرایط دما-فشار بالاتر (رخساره شیبست سبز در انارک)، ماهیت سیالات متاسوماتیک با مشارکت قوی تر پوسته و شدت بیشتر دگرشکلی برشی در آزادسازی و تمرکز هم‌زمان عناصر کانه‌زا در محیط انارک نسبت داد. بنابراین، این پژوهش مدل رایج لیستونیت‌ها را با معرفی یک زبرده چندفلزی در چارچوب فرورانش گسترش می‌دهد و بر اهمیت اتخاذ راه‌کار اکتشافی جامع‌تر در چنین محیط‌های پیچیده‌ای تأکید می‌ورزد.

نتیجه‌گیری

سرپانتینیت‌های مجموعه افیولیت انارک متشکل از کانی‌های آنتی‌گوریت، لیزاردیت، کریزوتیل و مگنتیت به همراه کانی‌های فرعی پیروکسن، ترمولیت و اسپینل هستند. همراهی این سنگ‌ها با واحدهای دگرگونی فشار بالا-دما پایین (رخساره شیبست آبی)، نشان‌دهنده فرورانش پوسته اقیانوسی در این منطقه است. بر اساس ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، سرپانتینیت‌های انارک تحت تأثیر سنگ مادر اولیه (هارزبورژیت)، شرایط دما-فشار تشکیل و سیالات دگرسان کننده قرار گرفته و ماهیت فرورانش آنها را تأیید می‌کند.

این سنگ‌ها پیش از جای‌گیری در منشورهای افزایشی و رخنمون در سطح، تاریخچه زمین‌شناسی پیچیده‌ای را طی کرده‌اند. نفوذ سیالات ناشی از فرورانش به درون پریدوتیت‌ها به متاسوماتیسم، غنی‌شدگی از عناصر متحرک و بارورشدگی سرپانتینیت‌ها منجر شده است. از جنبه زمین‌ساختی، این سرپانتینیت‌ها طی فرایندهای کوه‌زایی به درون پوسته قاره‌ای رانده شده‌اند. لیستونیت‌های منطقه اغلب در اثر دگرگونی پس‌رونده همراه با نفوذ CO₂ در زمان بالاآمدگی کوه‌زایی تشکیل شده‌اند. در سایر مناطق انارک، لیستونیت‌ها بیشتر از نوع کربناته هستند؛ در حالی که انواع سیلیسی-کربناته (کانه‌دار)، سیلیسی و بیریریت در منطقه پتیار، از تنوع دگرسانی و پتانسیل متغیر کانه‌زایی در این محیط حکایت دارد. از دید زمین‌شناسی اقتصادی، سرپانتینیت‌ها و لیستونیت‌های منطقه انارک از پتانسیل قابل توجهی برای کانه‌زایی طلا، نیکل، کبالت و همچنین عناصر گروه پلاتین برخوردارند که غنی‌شدگی اخیر به ویژه در جریان فرایند لیستونیتی شدن امکان‌پذیر بوده و توجه به آن در برنامه‌های اکتشافی آتی ضروری به نظر می‌رسد. برای تکمیل و توسعه یافته‌های این پژوهش، بررسی نظام‌مند کانی‌سازی طلا با استفاده از بررسی‌های میکروآنالیزی EPMA و تعیین ترکیب شیمیایی عناصر کانه‌ساز می‌تواند به درک بهتر سازوکارهای کانه‌زایی کمک کند. مدلسازی زمین‌شیمیایی رفتار عناصر نادر خاکی (REE) در طی فرایندهای متاسوماتیسم و لیستونیتی شدن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سرپانتینیت‌های لیستونیتی انارک به عنوان میزبان و منبع مهمی برای عناصر کانه‌زا، به ویژه طلا، عمل کرده‌اند. فرایندهای گرمایی، متاسوماتیسم و دگرشکلی نقش کلیدی در کنترل کانه‌زایی این سامانه‌ها داشته‌اند. این یافته‌ها اهمیت سرپانتینیت‌های فرورانده را در سامانه‌های کانه‌زایی مرتبط با محیط‌های فرورانشی برجسته می‌سازد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

با تشکر و قدردانی از سردبیر محترم نشریه و داوران ارجمند که با دقت و حوصله، این مقاله را مورد بررسی قرار دادند، این مقاله بخشی از رساله دکتری نویسنده اول است. بدین وسیله از

حمایت‌های علمی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه لرستان در انجام این پژوهش قدردانی می‌شود. تجزیه‌های این مقاله بخشی از پروژه تحقیقاتی با شماره قرارداد ۴۸۵۸۳۳۷۶ در شرکت فولاد مبارکه اصفهان است.

-
1. XRF
 2. LOI
 3. ICP-OES
 4. XRD
 5. fuchsite
 6. MOR
 7. FME
 8. semibrittle
 9. ductile
 10. brittle

References

- Abdel-Karim, A.A.M., El-Shafei, S.A. and Azer, M.K., 2025. Listvenitization of Ophiolitic Serpentinites and Related Gold Mineralization in the Neoproterozoic Nubian Shield of Egypt. In: Z. Hamimi, R.J. Goldfarb, B. Pradhan, Y. Abd El-Rahman, A.R. Fowler, A. Abdelnasser and M.A. El Monsef (Editors), *Gold Deposits in Egypt: Geology, Settings, Types, Genesis and Spatiotemporal Distribution*. Springer Nature Switzerland, pp. 323–352.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.08.008>
- Agranier, A., Lee, C.T.A., Li, Z.X.A. and Leeman, W.P., 2007. Fluid mobile element budgets in serpentinized oceanic lithospheric mantle: insights from B, As, Li, Pb, PGEs and Os isotopes in the Feather River Ophiolite, California. *Chemical Geology*, 245(3–4): 230–241.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.08.008>
- Akbulut, M., Pişkin, Ö. and KArAyiğit, A.i., 2006. The genesis of the carbonatized and silicified ultramafics known as listvenites: a case study from the Mihaliççik region (Eskişehir), NW Turkey. *Geological Journal*, 41(5): 557–580.
<https://doi.org/10.1002/gj.1058>
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, Scale 1:5000000. Tehran: Geological Survey of Iran.
- Allen, D.E. and Seyfried, W.E., 2003. Compositional controls on vent fluids from ultramafichosted hydrothermal systems at mid-ocean ridges: an experimental study at 400°C, 500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(8): 1531–1542.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01173-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01173-0)
- Aydal, D., 1990. Gold-bearing listwaenites in the Araç Massif, Kastamonu, Turkey. *Terra Nova*, 2(1): 43–52. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1990.tb00035.x>
- Bach, W., Garrido, C.J., Harvey, J., Paulick, H. and Rosner, M., 2004. Variable seawater–peridotite interactions—first insights from ODP Leg 209, MAR 115°N: *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5(9).
<https://doi.org/10.1029/2004GC000744>
- Bagheri, S., 2007. The exotic Paleo-tethys terrane in Central Iran: new geological data from Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam areas. Ph.D. Thesis, University of Lausanne, Switzerland, 208 pp.
- Bagheri, S. and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in Central Iran: new geological data, relationships, and tectonic implications. *Tectonophysics*, 451(1–4): 123–55.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.047>
- Balini, M., Nicora, A., Berra, F., Garzanti, E., Levera, M., Mattei, M., Muttoni, G., Zanchi, A., Bollati, I., Larghi, C., Zanchetta, S., Salamati, R. and Mossavvari, F., 2009. The Triassic stratigraphic succession of Nakhlaq (Central Iran), a record from an active margin. In: M.F. Brunet, J.W. Granath and M. Wilmsen (Editors), *South Caspian to Central Iran Basins*, Geological Society of London, Special Publications no. 312. pp. 287–321. <https://doi.org/10.1144/SP312.14>
- Barnes, I., O'Neil, J.R., Rapp, J.V. and White, D.E., 1973. Silica-carbonate alteration of serpentine: Wall rock alteration in mercury deposits of the California Coast Ranges. *Economic Geology*, 68(3): 388–398.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.68.3.388>
- Beinlich, A., Plümper, O., Boter, E., Müller, I.A., Kourim, F., Ziegler, M., Harigane, Y., Lafay, R. and Kelemen, P.B., 2020. Ultramafic Rock Carbonation: Constraints from Listvenite Core BT1B, Oman Drilling Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(6): e2019JB019060.
<https://doi.org/10.1029/2019JB019060>
- Beinlich, A., Plümper, O., Hövelmann, J., Austrheim, H. and Jamtveit, B., 2012. Massive Serpentine Carbonation at Linnajavri, N–Norway. *Terra Nova*, 24(6): 446–455.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01083.x>
- Blanco-Quintero, I., Proenza, J.A., Garcia-Casco, A., Tauler, E. and Gali, S., 2011. Serpentinites and serpentinites within a fossil subduction channel: La Corea mélange, Eastern Cuba. *Geologica Acta* 9(3–4): 389–405.
<https://doi.org/10.1344/105.000001662>
- Boillot, G., Grimaud, S., Mauffret, A., Mougnot, D., Kornprobst, J., Mergoill-Daniel, J. and Torrent, G., 1980. Ocean–continent boundary off the Iberian margin: a serpentine diapir west of the Galicia Bank. *Earth and Planetary Science Letters*, 48(1): 23–34.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90166-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90166-1)
- Boskabadi, A., Pitcairn, I.K., Broman, C., Boyce, A.,

- Teagle, D.A.H., Cooper, M.J., Azer, M.K., Stern, R.J., Mohamed, F.H. and Majka, J., 2017. Carbonate Alteration of Ophiolitic Rocks in the Arabian–Nubian Shield of Egypt: Sources and Compositions of the Carbonating Fluid and Implications for the Formation of Au Deposits. *International Geology Review*, 59(4): 391–419. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1227281>
- Bostock, M.G., Hyndman, R.D., Rondenay, S. and Peacock, S.M., 2002. An inverted continental Moho and serpentinization of the forearc mantle. *Nature*, 417: 536–538. <https://doi.org/10.1038/417536a>
- Buchs, D.M., Bagheri, S., Martin, L., Hermann, J. and Arculus, R., 2013. Paleozoic to Triassic ocean opening and closure preserved in Central Iran: constraints from the geochemistry of meta-igneous rocks of the Anarak area. *Lithos*, 172–173: 267–287. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.009>
- Buckman, S. and Ashley P.M., 2010. Silica-carbonate (listwanites) related gold mineralisation associated with epithermal alteration of serpentinite bodies. University of Wollongong. Conference contribution. Retrived October 13, 2025 from <https://hdl.handle.net/10779/uow.27692145.v1>
- Buisson, G. and Leblanc, M., 1987. Gold in mantle peridotites from Upper Proterozoic ophiolites in Arabia, Mali, and Morocco. *Economic Geology*, 82(8): 2091–2097. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.8.2091>
- Coleman, R., 1977. *Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere?* Springer-Verlag, New York, 229 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-66673-5>
- Collins, N.C., Bebout, G.E., Angiboust, S., Agard, P., Scambelluri, M., Crispini, L. and John, T., 2015. Subduction zone metamorphic pathway for deep carbon cycling: II. Evidence from HP/UHP metabasaltic rocks and opihicarbonates. *Chemical Geology*, 412: 132–150. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.06.012>
- Contreras-Reyes, E., Grevemeyer, I., Flueh, E.R. and Scherwath, M., 2007. Alteration of the subducting oceanic lithosphere at the southern central Chile trench/outer rise. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(7). <http://dx.doi.org/10.1029/2007GC001632>
- De Hoog, J.C.M., Janák, M., Vrabec, M. and Froitzheim, N., 2009. Serpentinised peridotites from an ultrahigh-pressure terranes in the Pohorje Mts. (Eastern Alps, Slovenia): geochemical constraints on petrogenesis and tectonic setting. *Lithos*, 109(3-4): 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.05.006>
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992. *An Introduction to the Rock-forming Minerals*, 2nd edition. Longman Scientific & Technical, Harlow, 712 PP. <https://doi.org/10.1180/DHZ>
- Deschamps, F., 2010. Caractérisation in situ des serpentines en contexte de subduction: De la nature à l'expérience. Ph.D. Thesis, Université Joseph Fourier-Grenoble-1, Grenoble, France, 402 pp.
- Deschamps, F., Godard, M., Guillot, S. and Hattori, K., 2013. Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review. *Lithos*, 178: 96–127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.05.019>
- Deschamps, F., Guillot, S., Godard, M., Andreani, M. and Hattori, K., 2011. Serpentinities act as sponges for fluid-mobile elements in abyssal and subduction zone environments. *Terra Nova*, 23(3): 171–178. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.00995.x>
- Deschamps, F., Guillot, S., Godard, M., Chauvel, C., Andreani, M. and Hattori, K., 2010. In situ characterization of serpentinites from forearc mantle wedges: timing of serpentinization and behavior of fluid-mobile elements in subduction zones. *Chemical Geology*, 269(3–4): 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.10.002>
- DeShon, H.R. and Schwartz, S.Y., 2004. Evidence for serpentinization of the forearc mantle wedge along the Nicoya Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 31(21). <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL021179>
- Drouin, M., Godard, M., Ildefonse, B., Bruguier, O. and Garrido, C., 2009. In situ geochemistry of olivine-rich troctolites (IODP Hole U1309D, Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, 30°N): a record of magmatic impregnation in the lower oceanic lithosphere. *Chemical Geology*, 264(1–4): 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.02.013>
- Dzemua, G.L. and Gleeson, S.A., 2012. Petrography, mineralogy, and geochemistry of the Nkamouna serpentinite: implications for the formation of the cobalt-manganese laterite deposit, Southeast Cameroon. *Economic Geology*, 107(1): 25–41. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.1.25>

- Emam, A. and Zoheir, B., 2013. Au and Cr mobilization through metasomatism: Microchemical evidence from ore-bearing listvenite, South Eastern Desert of Egypt. *Journal of Geochemical Exploration*, 125: 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.11.004>
- Escartin, J., Hirth, G. and Evans, B., 1997. Effects of serpentinization on the lithospheric strength and the style of normal faulting at slow-spreading ridges. *Earth and Planetary Science Letters*, 151(3–4): 181–189. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)81847-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)81847-X)
- Eslami, A., Arai, S., Miura, M. and Mackizadeh, M.A., 2018. Metallogeny of the peridotite-hosted magnetite ores of the Nain ophiolite, Central Iran: Implications for Fe concentration processes during multi-episodic serpentinization. *Ore Geology Reviews*, 95: 680–694. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.020>
- Evans, B.W., 2004. The serpentinite multisystem revisited: Chrysotile is metastable. *International Geology Review*, 46(6): 479–506.
- Evans, B.W., Johannes, W., Oterdoorn, H. and Trommsdorf, V., 1976. Stability of chrysotile and antigorite in the serpentine multisystem. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 56: 79–93. Retried October 13, 2025 from <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=smp-001%3A1976%3A56%3A%3A87>
- Gahlan, H.A., Azer, M.K., Asimow, P.D. and Al-Kahtany, K.M., 2022. Formation of gold-bearing listvenite in the mantle section of the Neoproterozoic Bir Umq ophiolite, Western Arabian Shield, Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences*, 190: 104517. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104517>
- Ghiorso, M.S., Hirschmann, M.M., Reiners, P.W. and Kress, III, V.C., 2002. The pMELTS: a revision of MELTS for improved calculation of phase relations and major element partitioning related to partial melting of the mantle to 3 GPa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(5): 1–35. <https://doi.org/10.1029/2001GC000217>
- Gleeson, S.A., Butt, C.R.M. and Elias, M., 2003. Nickel laterites: A review: *SEG Discovery*, 54: 1–18. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2003-54.fea>
- González-Jiménez, J.M., Piña R., Saunders J.E., Plissart G., Marchesi C., Padrón-Navarta J.A., Ramón-Fernandez, M., Garrido, L.N.F. and Gervilla, F., 2021: Trace element fingerprints of Ni–Fe–S–As minerals in subduction channel serpentinites. *Lithos*, 400–401: 106432. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106432>
- Gorczyk, W., Guillot, S., Gerya, T.V. and Hattori, K.H., 2007. Asthenospheric upwelling, oceanic slab retreat and exhumation of UHP mantle rocks: insights from Greater Antilles. *Geophysical Research Letters*, 34(21). <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031059>
- Hajjar, Z., Gervilla, F., Fanlo, I., Jiménez, J.M.G. and Ilmen, S., 2021. Formation of serpentinite-hosted, Fe-rich arsenide ores at the latest stage of mineralization of the Bou-Azzer mining district (Morocco). *Ore Geology Reviews*, 128: 103926. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103926>
- Hansen, L.D., Dipple, G.M., Gordon, T.M. and Kellett, D.A., 2005. Carbonated Serpentinite (listwanite) at Atlin, British Columbia: a geological analogue to carbon dioxide sequestration. *The Canadian Mineralogist*, 43(1): 225–239. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.1.225>
- Hart, S.R. and Zindler, A., 1986. In search of a bulkEarth composition. *Chemical Geology*, 57(3–4): 247–267. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90053-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90053-7)
- Ishimaru, S. and Arai, S., 2008. Arsenide in a metasomatized peridotite xenolith as a constraint on arsenic behavior in the mantle wedge. *American Mineralogist*, 93(7): 1061–1065. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2746>
- Jagoutz, E., Palme, H., Baddenhausen, H., Blum, K., Cendales, M., Dreibus, G., Spettel, B., Lorenz, V. and Vanke, H., 1979. The abundance of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules. In: R.B. Merrill, D.D. Bogard, F. Hoerz, D.S. McKay and P.C. Robertson (Editors), *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*. Pergamon, New York. United States of America, pp. 2031–2050. Retried October 13, 2025 from <https://adsabs.harvard.edu/full/1979LPSC...10.2031J>
- Kelemen, P. B., Matter, J., Streit, E. E., Rudge, J. F., Curry, W. B. and Blusztajn, J., 2011. Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: natural processes and recipes for enhanced, in situ

- CO₂ capture and storage. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39: 545–576. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-092010-152509>
- Kiefer, S., Ivan, P., Kaufmann, A.B., Vd'ačný, M. and Majzlan, J., 2023. Remobilization of Ni–Co–As and Platinum-Group Elements by Carbonate Metasomatic Alteration (Listvenitization) of Metaultramafic Rocks from Dobšiná, Slovakia. *Geologica Carpathica*, 74(2): 139–153. <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.2023.10>
- Klein, F., Bach, W. and McCollom, T.M., 2013. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Lithos*, 178: 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.008>
- Klein, F. and Garrido, C.J., 2011. Thermodynamic Constraints on Mineral Carbonation of Serpentinized Peridotite. *Lithos*, 126(3–4): 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.020>
- Kluza, K., Pršek, J. and Mederski, S., 2024. Mineralogy and Geochemistry of Listvenite-Hosted Ni–Fe Sulfide Paragenesis-A Case Study from Janjevo and Melenica Listvenite Occurrences (Kosovo). *Minerals*, 14(10): 1008. <https://doi.org/10.3390/min14101008>
- Kodolányi, J., Pettke, T., Spandler, C., Kamber, B.S. and Gmélíng, K., 2012. Geochemistry of ocean floor and fore-arc serpentinites: constraints on the ultramafic input to subduction zones. *Journal of Petrology*, 53(2): 235–270. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr058>
- Lafay, R., Deschamps, F., Schwartz, S., Guillot, S., Godard, M., Debret, B. and Nicollet, C., 2013. High-pressure serpentinites, a trap-and-release system controlled by metamorphic conditions: example from the Piedmont zone of the western Alps. *Chemical Geology*, 343: 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.02.008>
- Leblanc, M. and Billaud, P., 1982. Cobalt arsenide orebodies related to an Upper Proterozoic ophiolite: Bou Azzer (Morocco). *Economic Geology*, 77(1): 162–175. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.1.162>
- Lensch, G., Davoudzadeh, M., 1982. Ophiolites in Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Mh. Heft*: 306–320. <https://doi.org/10.1127/njgpm/1982/1982/306>
- Li, X.P.R.M. and Bucher, K., 2004. Serpentinization of the Zermatt- Saas ophiolite complex and their texture evolution. *Journal of Metamorphic Geology*, 22 (3): 159–177. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00503.x>
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Mederski, S., Pršek, J. and Dimitrova, D., 2024. Distribution of In, Sn, Ga, Ge, and Other Critical Metals in Sulfide Ores from Epithermal Listvenite-Associated Badovc Pb–Zn–Sb–Ni Deposit (Kosovo): Insights from Mineralogy and Geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 164: 105824. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105824>
- Menzel, M.D., Garrido, C.J., López Sánchez-Vizcaíno, V., Marchesi, C., Hidas, K., Escayola, M.P. and Delgado Huertas, A., 2018. Carbonation of Mantle Peridotite by CO₂-Rich Fluids: The Formation of Listvenites in the Advocate Ophiolite Complex (Newfoundland, Canada). *Lithos*, 323: 238–261. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.001>
- Menzel, M.D., Sieber, M.J. and Godard, M., 2024. From peridotite to listvenite—perspectives on the processes, mechanisms and settings of ultramafic mineral carbonation to quartz-magnesite rocks. *Earth-Science Reviews*, 255: 104828. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104828>
- Mohammadiha, K., Moazzen, M., Altenberger, U. and Hajialioghli, R., 2017. The geochemical nature of serpentinites from the Mashhad mafic-ultramafic complex as an evidence for Palaeotethys oceanic crust subduction in NE Iran, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(102): 15–26. <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.44064>
- Mokhtarzadeh Mohammadi, B. and Bagheri, H., 2011. Geochemical, mineralogical and fluid inclusion studies of Cu, Ni, Co and U of Meskani ore deposit, Anarak (Central Iran). *Petrological Journal*, 2(5): 1–18. Retrived October 13, 2025 from https://ijp.ui.ac.ir/article_16061.html?lang=en
- Moll, M., Paulick, H., Suhr, G. and Bach, W., 2007. Data report: microprobe analyses of primary phases (olivine, pyroxene, and spinel) and alteration products (serpentine, iowaite, talc, magnetite, and sulfides) in Holes 1268A, 1272A,

- and 1274A. In: J. Kelemen, E. Kikawa and D.J. Miller (Editors), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 209: 1–13. <http://dx.doi.org/10.2973/odp.proc.sr.209.003.2007>
- Moody, J.B., 1976. Serpentinization; a review. *Lithos*, 9(2): 125–138. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(76\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(76)90030-X)
- Naderi, F., Torabi, G. and Shirdashtzadeh, N., 2024. Seawater-originated fluids interactions with oceanic lithospheric mantle peridotites and formation of hornblendite dykes, as well as spadaite and dolomite veins in the Naein ophiolite (Isfahan Province, Iran). *Journal of Economic Geology*, 16(4): 75–99. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1128>
- Niu, Y., 2004. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges. *Journal of Petrology*, 45(12): 2423–2458. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh068>
- O'Hanley, D.S., 1996. Serpentinities: records of tectonic and petrological history. *Oxford monographs on Geology and Geophysics*, 34. Oxford University Press, New York, 277 pp. Retrived October 13, 2025 from https://rruff.geo.arizona.edu/doclib/MinMag/Vol_ume_61/61-408-742.pdf
- Pelletier, L., Müntener, O., Kalt, A., Vennemann, T.W. and Belgia, T., 2008. Emplacement of ultramafic rocks into the continental crust monitored by light and other trace elements: an example from the Geisspfad body (Swiss-Italian Alps). *Chemical Geology*, 255(1–2): 143–159. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.024>
- Peltonen, P., Kontinen, A., Huhma, H. and Kuronen, U., 2008. Outokumpu revisited: New mineral deposit model for the mantle peridotite-associated Cu–Co–Zn–Ni–Ag–Au sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 33(3–4): 559–617. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.07.002>
- Peters, D., Bretscher, A., John, T., Scambelluri, M. and Pettke, T., 2017. Fluid-mobile elements in serpentinites: Constraints on serpentinisation environments and element cycling in subduction
- Scambelluri, M., Fiebig, J., Malaspina, N., Muntener, O. and Pettke, T., 2004. Serpentine subduction: implications for fluid processes and zones. *Chemical Geology*, 466: 654–666. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.017>
- Peters, D., Pettke, T., John, T. and Scambelluri, M., 2020. The role of brucite in water and element cycling during serpentinite subduction—insights from Erro Tobbio (Liguria, Italy). *Lithos*, 360–361: 105431. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105431>
- Pirnia, T., Saccani, E., Torabi, G., Chiari, M., Goričan, Š. and Barbero, E., 2020. Cretaceous tectonic evolution of the Neo-Tethys in Central Iran: Evidence from petrology and age of the Nain-Ashin ophiolitic basalts. *Geoscience Frontiers*, 11(1): 57–81. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.008>
- PlissArt, G., fêMénias, O., Maruntiu, M., diot, H. and deMAiffe, D., 2009. Mineralogy and geothermometry of gabbro-derived listvenites in the Tisovita-Iuti ophiolite, southwestern Romania. *The Canadian Mineralogist*, 47(1): 81–105. <https://doi.org/10.3749/canmin.47.1.81>
- Radosavljević, S.A., Stojanović, J.N., Vuković, N.S., Radosavljević Mihajlović, A.S. and Kašić, V.D., 2015. Low-Temperature Ni-As-SbS Mineralization of the Pb (Ag)-Zn Deposits within the Rogozna Ore Field, Serbo-Macedonian Metallogenic Province: Ore Mineralogy, Crystal Chemistry and Paragenetic Relationships. *Ore Geology Reviews*, 65(Part 1): 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.029>
- Raia, N.H., Whitney, D.L., Teyssier, C. and Lesimple, S., 2022. Serpentinities of different tectonic origin in an exhumed subduction complex (New Caledonia, SW Pacific). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(8): e2022GC010395. <https://doi.org/10.1029/2022GC010395>
- Ranero, C., Morgan, J.P., McIntosh, K. and Reichert, C., 2003. Bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench. *Nature*, 425: 367–373. Retrived October 13, 2025 from <https://www.nature.com/articles/nature01961>
- Salter, V.J.M. and Stracke, A., 2004. Composition of the depleted mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(5). <http://dx.doi.org/10.1029/2003GC000597>
- trace-element recycling. *International Geology Review*, 46(7): 595–613. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.7.595>

- Schandl, E.S. and Gorton, M.P., 2012. Hydrothermal alteration and CO₂ metasomatism (natural carbon sequestration) of komatiites in the south-western Abitibi greenstone belt. *The Canadian Mineralogist*, 50(1): 129–146.
<https://doi.org/10.3749/canmin.50.1.129>
- Schmidt, K., Koschinsky, A., Garbe-Schönberg, D., de Carvalho, L.M. and Seifert, R., 2007. Geochemistry of hydrothermal fluids from the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field, 15°N on the Mid-Atlantic Ridge: temporal and spatial investigation. *Chemical Geology*, 242(1–2): 1–21.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.01.023>
- Schwartz, S., Allemand, P. and Guillot, S., 2001. Numerical model of the effect of serpentinites on the exhumation of eclogitic rocks: insights from the Monviso ophiolitic massif (Western Alps). *Tectonophysics*, 42(1–2): 193–206.
[https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00162-7)
- Schwartz, S., Gautheron, C., Ketcham, R. A., Brunet, F., Corre, M., Agranier, A., et al., 2020. Unraveling the exhumation history of high-pressure ophiolites using magnetite (U-Th-Sm)/He thermochronometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 543: 116359.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116359>
- Sharkovski, M., Susov, M., Krivyakin, B., Morozov, L., Kiristaev, V. and Romanko, E., 1984. Geology of the Anarak area (Central Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report Technoexport 19, 143 pp.
- Shayanfar, M., Ghorashi, M., Ahmadi, S., Saeedi, A. and Shahidi, A., 2016. Geology and structural pattern of Anarak-Talmessi sedimentary basin. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25(98): 315–320.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2016.41231>
- Sideridis, A., Koutsovitis, P., Tsikouras, B., Karkalis, C., Hauzenberger, C., Zaccarini, F., Tsitsanis, P., Lazaratou, C.V., Skliros, V., Panagiotaras, D., et al. 2022. Pervasive Listwaenitization: The Role of Subducted Sediments within Mantle Wedge, W. Chalkidiki Ophiolites, N. Greece. *Minerals*, 12(8): 1000.
<https://doi.org/10.3390/min12081000>
- Sieber, M.J., Hermann, J. and Yaxley, G.M., 2018. An Experimental Investigation of C–O–H Fluid-Driven Carbonation of Serpentinites under Forearc Conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 496: 178–188.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.05.027>
- Skelton, A.D.L. and Valley, J.W., 2000. The relative timing of serpentinitisation and mantle exhumation at the ocean–continent transition, Iberia: constraints from oxygen isotopes. *Earth and Planetary Sciences*, 179(3–4): 327–338.
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00087-X)
- Snow, J.E. and Dick, H.J.B., 1995. Pervasive magnesium loss by marine weathering of peridotite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20): 4219–4235.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00239-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00239-V)
- Spandler, C., Hermann, J., Faure, K., Mavrogenes, J.A. and Arculus, R.J., 2008. The importance of talc and chlorite “hybrid” rocks for volatile recycling through subduction zones; evidence from the high-pressure subduction mélange of New Caledonia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(2): 181–198.
<https://doi.org/10.1007/s00410-007-0236-2>
- Stampfli, G.M. and Borel, G.D., 2004. The TRANSMED transects in space and time: constraints on the paleotectonic evolution of the Mediterranean domain. In: W. Cavazza, F. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli and P.A. Ziegler (Editors), *The TRANSMED Atlas. The Mediterranean region from crust to mantle: Geological and geophysical framework of the Mediterranean and the surrounding areas*. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 53–80. Retrieved October 13, 2025
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-18919-7_3
- Stanger, G., 1985. Silicified serpentinite in the Semail nappe of Oman. *Lithos*, 18: 13–22,
[https://doi.org/10.1016/0024-4937\(85\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0024-4937(85)90003-9)
- Steinhorsdottir, K., Dipple, G.M., Cutts, J.A., Turvey, C.C., Milidragovic, D. and Peacock, S.M., 2022. Formation and preservation of brucite and awaruite in serpentinitized and tectonized mantle in central British Columbia: implications for carbon mineralization and nickel mining. *Journal of Petrology*, 63(11): egac100.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egac100>
- Torabi, G., 2004. Petrology of Anarak area ophiolites (Central Iran, NE of Isfahan Province): Tarbiat Modarres University, Iran, Ph.D. Thesis in petrology, Isfahan, 233 pp.

- Torabi, G., 2009. Chromitite potential in mantle peridotites of the Jandaq ophiolite (central Iran) Les péridotites de l'ophiolite de Jandaq (Iran central) peuvent-elles renfermer des gisements de chromite? *Comptes Rendus Geoscience*, 341(12): 982–992. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.014>
- Torabi, G., 2014. Late Permian blueschist from Anarak ophiolite (Central Iran, Isfahan province), a mark of multi-suture closure of the Paleo-Tethys ocean. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 28(3). Retrieved October 13, 2025 from <https://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/190>
- Tuysuz, N. and Erler, A., 1993. Geochemistry and evolution of listwaenites in the Kagizman region (Kars, NE—Turkey). *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 1(53): 315–329. Retrived October 13, 2025 from <https://avesis.ktu.edu.tr/yayin/70302c7e-98a4-4129-9f2e-d421459e700c/geochemistry-and-evolution-of-listwaenites-in-the-kagizman-region-kars-ne-turkey>
- Ucurum, A., 2000. Listwaenites in Turkey: perspectives on formation and precious metal concentration with reference to occurrences in east-central Anatolia. *Ofoliti*, 25(1): 15–29. Retrived October 13, 2025 from <https://ofioliti.it/index.php/ofioliti/article/view/110/110>
- Visalli, R., Navarro, R., Buccione, R., Indelicato, V., Rizzo, G., Cirrincione, R. and Punturo, R., 2025. Multi-Analytical Characterization of Serpentinite Rocks Employed as Stone Material: An Example from Andalusia (Southern Spain), Basilicata, and Calabria (Southern Italy). *Minerals*, 15(5): 522. <https://doi.org/10.3390/min15050522>
- Wenner, D.B. and Taylor, H.P., 1973. oxygen and Hydrogen isotopic studies of serpentinization of ultramafic rocks in oceanic environments and continental ophiolite complexes. *American Journal of science*, 273(3): 207–239. <https://doi.org/10.2475/ajs.273.3.207>
- Wilde, S.A., Zhao, G. and Sun, M., 2002. Development of the North China Craton during the late Archaean and its final amalgamation at 1.8 Ga; some speculations on its position within a global Palaeoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 85–94. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70892-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70892-3)
- Xiaomei, W., Zhigang, Z. and Junbing, C., 2009. Serpentinization of peridotites from the southern Mariana forearc. *Progress in Natural Science*, 19(10): 1287–1295. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.04.004>
- Zanchi, A., Malaspina, N., Zanchetta, S., Berra, F., Benciolini, L., Bergomi, M., Cavallo, A., Javadi, H.R. and Kouhpeyma, M., 2015. The Cimmerian accretionary wedge of Anarak, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 102: 45–72. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.08.030>
- Zanchi, A., Zanchetta, S., Garzanti, E., Balini, M., Berra, F., Mattei, M. and Muttoni, G., 2009. The Cimmerian evolution of the Naxhlak–Anarak area, Central Iran, and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin. In: M.F. Brunet, J.W. Granath, and M. Wilmsen (Editors), *South Caspian to Central Iran Basins*, Geological Society, London, Special Publications, 312, pp. 261–286. <https://doi.org/10.1144/SP312.13>
- Zarei, E., Sharifi, M. and Tadayon, M., 2021. Evolution history of north Anarak, Central Iran ophiolitic olistoliths using petrographical and mineral chemistry studies. *Petrological Journal*, 12(2): 125–148. <https://doi.org/10.22108/ijp.2021.127663.1225>
- Zhang, L., Sun, W.D. and Chen, R.X., 2019. Evolution of serpentinite from seafloor hydration to subduction zone metamorphism: Petrology and geochemistry of serpentinite from the ultrahigh pressure North Qaidam orogen in northern Tibet. *Lithos*, 346–347: 105158. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105158>
- Zoheir, B., Holzheid, A., Zeh, A., McAleer, R., El-Beahry, M., Schwarz-Schampera, U., Graupner, T.R., Lentz, D. and Xiong, F., 2023. The Sukari Gold Deposit, Egypt: Geochemical and Geochronological Constraints on the Ore Genesis and Implications for Regional Exploration. *Economic Geology*, 118(4): 719–744. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4990>