

Original Research Paper

Metamorphism, deformation, and migmatization evolution in amphibolites from the Southeastern Aligudarz Region (Sanandaj – Sirjan Zone)

Sonia Tayebi¹, Nahid Shabanian Boroujeni^{1*}, Alireza Davoudian Dehkordi¹, and Ashraf Torkian²¹ Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran² Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 August 11

Accepted: 2025 September 15

Available online: 2026 March 21

Keywords:

Migmatitic amphibolites

Boudinage

Metatexite

Shear zone

Southeastern Aligudarz

Sanandaj–Sirjan Zone

ABSTRACT

This study investigates the metamorphic, migmatitic, and deformational processes in amphibolites of the southeastern Aligudarz region, located in the central part of the Sanandaj–Sirjan Zone. These metamorphic rocks occur as lens-shaped bodies and show a mineral assemblage of amphibole, titanite, clinozoisite, zoisite, quartz, garnet, plagioclase, biotite, and minor zircon. The presence of lepidogranoblastic, granoblastic, nematoblastic, and diablastic textures, along with anastomosing foliation and S/C to S/C' fabrics, reflects dynamic deformation in these rocks. The mineral paragenesis indicates a transition from the upper amphibolite facies (up to the granulite boundary), followed by retrogression toward the greenschist facies. Based on thermodynamic calculations, these rocks experienced metamorphism and migmatization at high temperatures (approximately 650 to 860 °C) and medium pressures (6.5 to 9 kbar), indicating a high geothermal gradient. The widespread presence of boudinage and mylonitic textures, along with evidence of partial melting, suggests metatexitic migmatization under high-pressure and high-temperature conditions. Boudin-like structures in leucosome and melanosome domains, folding of leucosome bands, and microstructures such as undulose and chessboard extinction, polysynthetic twinning, and grain boundary migration represent deformation during and after crystallization. Based on these features, deformation includes dynamic shearing in shear zones, melt-present deformation, and solid-state deformation before and after crystallization.

1. Introduction

Migmatites are heterogeneous rocks formed by partial melting of metamorphic rocks under high temperature and pressure conditions in the continental crust (Sawyer, 2008; Li et al., 2016; Wang et al.,


2025). They provide valuable insights into pressure-temperature conditions and the rheological behavior of the crust during tectonic events (Ghosh and Sengupta, 1999; Li et al., 2023a). The Sanandaj–

* Corresponding author: Nahid Shabanian Boroujeni; Email: Shabanian.nahid@sku.ac.ir

Citation:

Tayebi, S., Shabanian Boroujeni, N., Davoudian Dehkordi, A.R., and Torkian, A., 2026. Metamorphism, deformation, and migmatization evolution in amphibolites from the Southeastern Aligudarz Region (Sanandaj – Sirjan Zone). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 36(1), 139, 1-20. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.540575.2220>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.540575.2220

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.1.9



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Sirjan Zone in western Iran is a significant metamorphic belt including extensive migmatites that mainly have been derived from gneisses and amphibolites (Berberian and King, 1981; Shabanian and Neubaure, 2024; Saki et al., 2012; Sepahi et al., 2019). This study focuses on migmatitic amphibolites in the southeast of Aligudarz, analyzing boudinage structures to investigate deformation related to melting and their rheological behavior. Geothermobarometry results were used to constrain the conditions of migmatization. The results contribute to a better understanding of partial melting processes and crustal evolution in this part of the Sanandaj–Sirjan Zone.

2. Research methodology

Fieldwork involved the systematic collection of hand samples from key outcrops with GPS coordinates recorded. Scale-calibrated photos document metamorphic and deformation features. Thin and polished sections were prepared and studied under an Olympus BX50 polarizing microscope to analyze mineralogy, textures, and microstructures in 40 samples. Additionally, the mineral chemistry of four representative samples) was analyzed using a Camera SXFive Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) at Pennsylvania State University, with spot analyses performed on mineral cores, rims, and across zoned crystals.

3. Results

The area is in the southeastern Aligudarz region, within the central Sanandaj–Sirjan metamorphic zone near the Zagros thrust (Soheili et al., 1992; Figure 2). The amphibolites, associated with marbles and schists, occur as massive, lenticular, and pillow-like bodies aligned NW–SE (Figure 3A–B). Field evidence such as leucosome boudins, quartz veins, and mineral stretching within a shear zone indicates syn-tectonic migmatization and ductile deformation (Figure 3C–D; Davoudian et al., 2016; Shabanian and Neubauer, 2024). Petrographic analysis reveals a metatexite migmatite fabric, with light-colored leucosome (quartz, plagioclase) and dark-colored melanosome (amphibole, biotite, garnet, clinozoisite, and titanite). Amphibole appears in three distinct generations, with varying pleochroism and textures, indicating multi-stage metamorphism. Features such as S-C and S-C' fabrics, undulose extinction, and pressure-solution structures support intense ductile deformation (Malek-Mahmoudi et al., 2017; Moradian et al., 2023; Figure 4).

4. Discussions

Microscopic and field evidence from migmatitic amphibolites in SE Aligudarz (Figs. 5–7) indicate that boudin structures, composed of garnet, amphibole, plagioclase, and melt products (leucosome–melanosome), formed due to rheological heterogeneities during

syn-anatectic deformation (Li et al., 2023a). Melanosomes, being more viscous, resisted flow more than leucosomes, leading to varied boudin types such as object, multilayered, and blocky forms (Fig. 7; Li et al., 2023b). These structures evolved under progressive strain and melt segregation, reflecting dynamic melt flow in an active shear zone (Saweyr, 2008; Fig. 8). Textural features like syn-deformational plagioclase crystallization and foliation-parallel boudins highlight extensional and shearing forces (Johnson et al., 2015; Pereira et al., 2017). The spatial and rheological evolution—from homogeneous to anisotropic flow and back—marks a cyclic migmatitic regime (Li et al., 2023b). In-situ partial melting (Yakymchuk, 2021), enhanced by free H₂O, played a key role in lowering melting points and driving melt-related deformation (Patiño and Johnston, 1991; Weinberg and Hasalova, 2015; Holness, 2008). Necking, folding, and rotation of boudins indicate complex strain partitioning and localized melt flow paths (Figs. 4, 8; Vernon, 2011; Li et al., 2023a). These observations affirm the interplay of melt generation, deformation, and fluid processes in shaping migmatitic fabric within shear zones.

Thermodynamic pseudosection modeling based on geochemical data reveals stability fields of key mineral assemblages in amphibolites, indicating metamorphism at 730–860 °C and 5.7–9 kbar (Fig. 9). Thermobarometric estimations based on key mineral chemistry, particularly calcic amphibole (Table 1), provide reliable constraints on the pressure-temperature conditions of metamorphism. According to Smith's barometry method (Schmidt, 1992), the pressure calculated for magnesiohornblende amphibole in sample ST2-10 is approximately 1.7 kbar, consistent with pressures derived from pseudosection modeling. Temperature estimations using Ridolfi's thermometer (2021) indicate a temperature of about 801 °C, characteristic of high-temperature amphiboles. Conversely, the Holland and Blundy (1994) thermometer applied to the amphibole–plagioclase pair in the same sample yields a lower temperature estimate near 566 °C at 7.75 kbar, likely reflecting thermodynamic disequilibrium during system closure. Additionally, Bartoli et al.'s (2024) ilmenite-involved thermometer estimates a temperature of 624 °C, indicating amphibole stability under medium- to high-temperature metamorphic conditions. These thermobarometric results support amphibolite-facies metamorphism with partial melting, consistent with regional tectonothermal evolution. Extensive amphibole stability and presence of partial melt (leucosome) signify amphibolite-facies metamorphism with the onset of partial melting (Sawyer, 2008; Spear, 1993). Syn-deformational melting and dynamic recrystallization are evidenced by fabrics such as S-C structures and fish-shaped amphiboles (Fig. 10-B; Weinberg and Hasalova, 2015). Estimated geothermal gradient (~30 °C/km) and pressures correspond to Barrovian metamorphism at 23–32 km depth (Bucher

and Grapes, 2011). Coexistence of deformation and melt formation confirms migmatization under high-temperature, mid-crustal conditions (Vernon, 2011; Li et al., 2023a).

The tectonothermal conditions controlling migmatization in metabasites of SE Aligoodarz are constrained by P–T diagrams showing partial melting onset near the solidus (~650–830°C, 5–10 kbar) (Fig. 11A–C; Bucher and Grapes, 2011; Weinberg and Hasalova, 2015). Field and petrographic evidence confirm incongruent melting involving hydrous phases and formation of peritectic minerals (Fig. 4–6, 10; Weinberg and Hasalova, 2015). Thermobarometry results indicate high-pressure amphibolite to granulite facies metamorphism at 23–32 km depth (Fig. 9, 11), consistent with regional Barrovian metamorphism in the Sanandaj–Sirjan Zone (Shabani and Neubauer, 2024). P–T trends show increasing pressure toward the zone center, reflecting Jurassic tectonic processes and active shear zones facilitating localized migmatization (Jalali et al., 2024; Miri et al., 2025). Overall, migmatization in SE Aligoodarz aligns well with regional tectonothermal evolution and shear zone dynamics (Fatehi and Ahmadipour, 2018).

5. Conclusion

The integrated analysis of field observations, petrography, geochemistry, mineral chemistry from electron microprobe analyses, and thermodynamic modeling reveals that the migmatitic amphibolites in SE Aligoodarz experienced metamorphism and partial melting under upper amphibolite to granulite facies conditions (650–860 °C; 6.5–9 kbar; ~23–32 km depth). The dominance of melanosome over leucosome, presence of peritectic garnet and second-generation amphibole, as well as leucosome–melanosome structures, indicate metatexite-type migmatization in a closed to semi-closed system with free H₂O. Field and microstructural evidence, along with thermobarometric calculations based on mineral chemistry, suggest that melt generation and segregation occurred syn-tectonically within an active shear zone. These findings point to a mid-crustal setting within the Sanandaj–Sirjan Zone, consistent with Barrovian-type metamorphism during continental collision, possibly accompanied by local extensional regimes. Further research is recommended to investigate the role of fluid composition and melt extraction pathways in controlling the evolution of migmatitic fabrics in shear zones.

تحول دگرگونی، دگرشکلی و میگماتیته شدن در آمفیولیت‌های منطقه جنوب خاور الیگودرز (پهنه سنندج - سیرجان)

سونا طیبی^۱، ناهید شبانیان بروجنی*^۱، علیرضا داودیان دهکردی^۱ و اشرف ترکیان^۲^۱ گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی فرایندهای دگرگونی، میگماتیته شدن و دگرشکلی در آمفیولیت‌های منطقه جنوب خاور الیگودرز، واقع در بخش مرکزی پهنه سنندج-سیرجان می‌پردازد. این سنگ‌های دگرگونی به صورت توده‌های عدسی (لنزی) رخنمون یافته‌اند و مجموعه کانی‌شناسی شامل آمفیبول، تیتانیت، کلینوئوزیت، زوئیزیت، کوارتز، گارنت، پلاژیوکلاز، بیوتیت و مقادیر اندک زیرکن را نشان می‌دهند. حضور بافت‌های لپیدوگرانوبلاستیک، گرانوبلاستیک، نماتوبلاستیک و دیابلاستیک همراه با برگ‌وارگی آناستاموزینگ و فابریک‌های S/C تا S/C'، بیانگر دگرشکلی دینامیکی در این سنگ‌هاست. پاراژنز کانی‌ها گذار از رخساره آمفیولیت بالایی (تا مرز گرانولیت) و سپس سیر قهقرایی به سوی رخساره شیست سبز را نشان می‌دهد. بر اساس محاسبات ترمودینامیکی، این سنگ‌ها در دماهای بالا (حدود ۶۵۰ تا ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد) و فشارهای متوسط (۶/۵ تا ۹ کیلوبار) دچار دگرگونی و میگماتیته شده‌اند که بیانگر شیب زمین‌گرایی بالا است. حضور گسترده ساختارهای بودین و میلونیتی، همراه با شواهد ذوب جزئی، بیانگر میگماتیته شدن متاتکسیتی تحت فشار و دمای بالا است. ساختارهای بودین‌واره در نواحی لوکوسوم و ملانوسوم، چین‌خوردگی لوکوسوم، و ریزساختارهایی مانند خاموشی موجی، خاموشی تخته‌شطرنجی، ماکل پلی‌سنتیک و مهاجرت مرز دانه‌ای، بیانگر دگرشکلی حین و پس از تبلور هستند. در کل، دگرشکلی این منطقه شامل دگرشکلی دینامیکی پهنه برشی، دگرشکلی در حضور مذاب و دگرشکلی در حالت جامد پیش و پس از تبلور بوده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

آمفیولیت‌های میگماتیته

ساختارهای بودین

متاتکسیت

پهنه برشی

جنوب خاور الیگودرز

پهنه سنندج-سیرجان

۱- پیش‌نوشتار

به گونه‌ای که تشکیل آن‌ها اغلب با شرایط دما بالا، حضور سیال‌ها، و فعالیت‌های زمین‌ساختی همراه است که می‌تواند موجب ضعف پوسته، مهاجرت مذاب، و تسهیل در فرایندهای زمین‌ساختی کمرندهای کوهزایی شود (Sawyer, 2008; Yakymchuk, 2021; Abdulla et al., 2025; Renna, 2023). در واقع در کمرندهای کوهزایی، میگماتیته‌ها نه تنها بازتاب‌دهنده شرایط دمایی بالا و فرایندهای ذوب‌بخشی هستند، بلکه می‌توانند به‌عنوان شاخص‌هایی برای واکاوی رفتار مکانیکی و زمین‌ساختی پوسته قاره‌ای در فرایندهای زمین‌ساختی به کار روند (Sawyer, 2008; Yakymchuk, 2021; Li et al., 2023a). رفتار مکانیکی این سنگ‌ها به عواملی مانند میزان مذاب، ترکیب کانی‌شناسی و شرایط فیزیکی-شیمیایی محیط وابسته است.

میگماتیته‌ها سنگ‌هایی مرکب از نظر ساختاری و ترکیبی ناهمگن هستند که در نتیجه ذوب‌بخشی سنگ‌های دگرگونی در شرایط فشار و به‌ویژه دمای بالا در پوسته قاره‌ای تشکیل می‌شوند. این سنگ‌ها شامل بخش‌های اصلی: پالئوسوم (یا مزوسوم؛ بخشی از سنگ اولیه که دچار ذوب نشده) و نئوسوم (مذاب حاصل از آتاکسی و ذوب‌بخشی) هستند که نئوسوم خود شامل ملانوسوم (بخش تیره غنی از کانی‌های مافیک) و لوکوسوم (بخش روشن غنی از فلدسپار و کوارتز) می‌شوند (Sawyer, 2008; Li et al., 2016, 2023b; Wang et al., 2025). سنگ‌های میگماتیته، شواهد ارزشمند و مهمی از شرایط فشار، دما، حضور سیال و رفتار رئولوژیکی پوسته در زمان تشکیل خود ارائه می‌دهند (Ghosh and Sengupta, 1999; Li et al., 2023a).

* نویسنده مسئول: ناهید شبانیان بروجنی؛ E-mail: Shabaniyan.nahid@sku.ac.ir

ماخذنگاری:

طیبی، س.، شبانیان بروجنی، ن.، داودیان دهکردی، ع.ر.، ترکیان، ا.، ۱۴۰۵، تحول دگرگونی، دگرشکلی و میگماتیته شدن در آمفیولیت‌های منطقه جنوب خاور الیگودرز (پهنه سنندج-سیرجان). فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۱)، ۱۳۹-۲۰۱. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.540575.2220>

doi: 10.22071/gsj.2025.540575.2220



doi: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.1.9

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

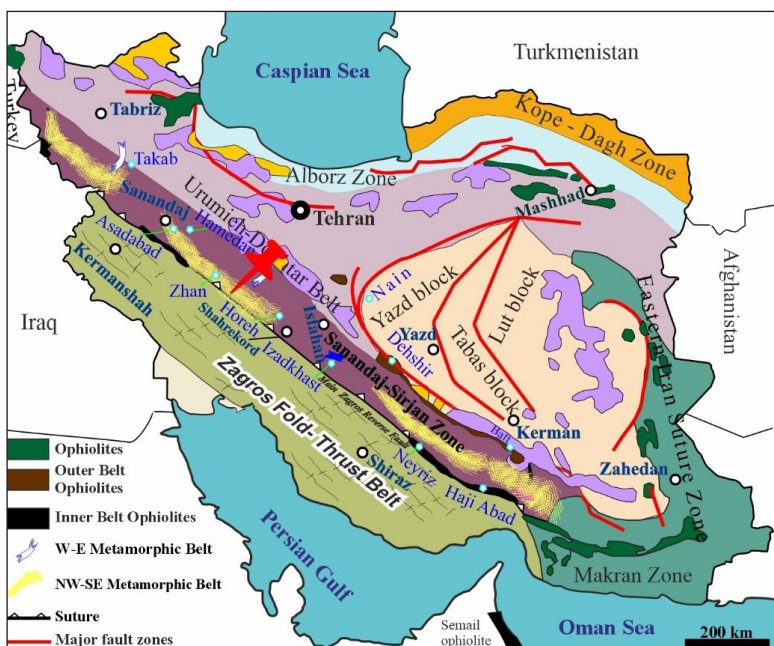
و همکاران، ۱۳۹۹) هستند که در شرایط دگرگونی ناحیه‌ای یا پهنه‌های برشی شکل گرفته‌اند (شکل ۱).

یکی از بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی مهم برای مطالعه میگماتیته‌ها، بودین‌هایی هستند که طی فرایند میگماتیته شدن در منطقه مورد مطالعه تحت دگرشکلی، تغییر هندسه توسعه یافته‌اند که اطلاعات ارزشمندی درباره ناهمگنی ترکیبی، تکامل تضادهای رئولوژیکی، تاثیر دگرشکلی دینامیک و نحوه تقسیم تنش در این محیط‌ها را ارائه می‌کنند. ساختارهای بودین در سنگ‌های دگرگونی و میگماتیته، شواهدی کلیدی از ناهمگنی رفتاری، تقسیم تنش، و تاریخچه دگرشکلی ارائه می‌دهند. در سنگ‌های میگماتیته، بودین‌ها می‌توانند در مراحل پیش، حین یا پس از ذوب‌بخشی ایجاد شوند و هندسه آن‌ها بازتابی از تفاوت‌هایی در رفتار مکانیکی اجزای سنگ در طول کرنش است (Goscombe et al., 2004; Li et al., 2023b). همچنین، تفاوتی که تغییر شکل با هندسه بودین ثبت می‌کند بیانگر تفاوت‌های رئولوژیکی بخش‌های مختلف میگماتیته، تاثیر کشش و کرنش، در سنگ‌های مورد مطالعه است (Li et al., 2023b).

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، بخشی از پهنه سندج-سیرجان در جنوب-خاور الیگودرز که در امتداد پهنه برشی فعال بین دره حوض (استان اصفهان) تا شهر چمن سلطان (جنوب‌خاور الیگودرز) قرار گرفته است (شکل ۲). این منطقه به سبب قرارگیری در بخش میانی پهنه سندج-سیرجان در مجاورت با راندگی-زاگرس، از نظر رخدادهای دگرگونی، زمین‌ساختی و حرارتی تحت تاثیر حوادث زمین‌ساختی و حرارتی پهنه سندج-سیرجان قرار گرفته است (Berberian and King, 1981; Ghasemi and Talbot, 2006; Shabanian and Neubaure, 2024). هدف این پژوهش، تحلیل ساختارهای میگماتیته و به ویژه بودین‌ها در آفیبیولیت‌های میگماتیته شده این محدوده، و بررسی ارتباط آن‌ها با فرایندهای ذوب‌بخشی، رفتار رئولوژیکی و دگرشکلی دینامیک در مقیاس صحرایی و میکروسکوپی است. در این بررسی به تشکیل بودین مرحله ذوب، حین، یا پس از تبلور و تغییر شکل آن‌ها همراه مذاب یا حالت جامد نیز پرداخته می‌شود. همچنین داده‌های زمین‌دما فشارسنجی (ژئوترموبارومتري) به دست آمده از این سنگ‌ها، شواهد روشنی از فرایند میگماتیته شدن سنگ‌های منطقه مورد مطالعه را در رخساره‌های دگرگونی ارائه می‌دهند. نتایج این پژوهش در درک دقیق‌تر از فرایندهای ذوب‌بخشی و نقش آن‌ها در تکوین و دگرشکلی پوسته‌قاره‌ای در این بخش از پهنه سندج-سیرجان موثر خواهد بود.

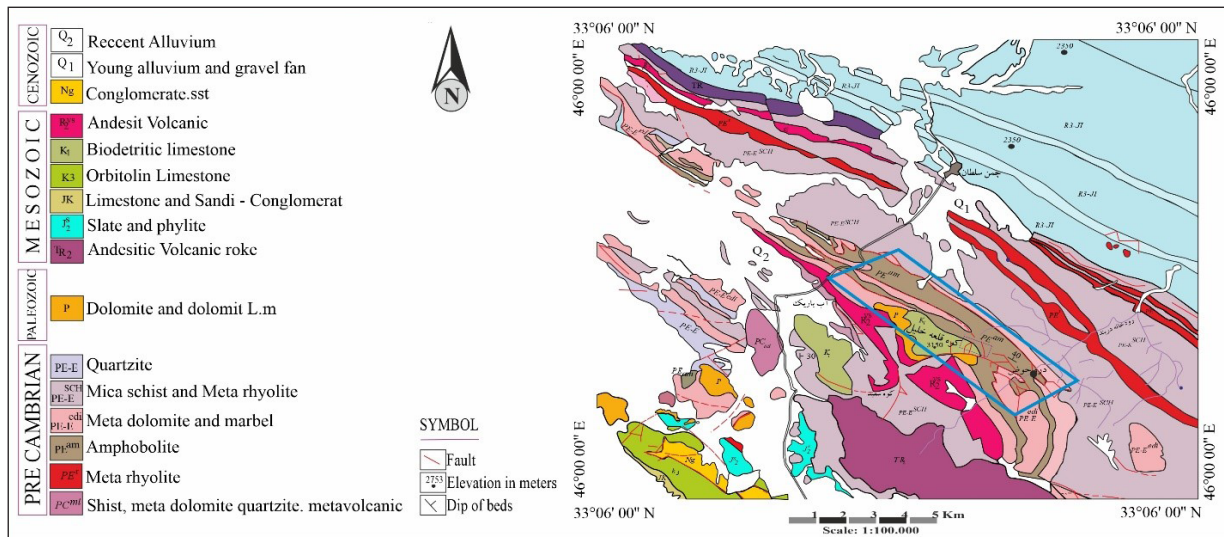
توده‌های ناهمگن میگماتیته حاصل آناتکسی، ذوب، تبلور و تبلور مجدد هستند. این ناهمگنی‌ها بازتاب تفاوت‌های رئولوژیکی میان اجزای مختلف سنگ و کرنش‌های پیچیده‌ای هستند که طی فرایندهای زمین‌ساختی بر سنگ‌های مورد مطالعه تحمیل شده‌اند (Cao, 2025; Tao et al., 2025; Ghosh and Sengupta, 1999; Li et al., 2023a; Li and). بر پایه نسبت مذاب تولیدی و میزان تغییر بافت و ساختار سنگ اولیه (پروتولیت)، میگماتیته‌ها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: متاتکسیته‌ها، با مقدار کم مذاب (معمولاً ۲۰٪)، که در آن‌ها ساختار اولیه سنگ میزبان تا حد زیادی حفظ شده است. دیاتکسیته‌ها، که دارای میزان بالاتری از مذاب (بیش از ۲۰٪) هستند و اغلب با از بین رفتن ساختار اولیه و تبلور مجدد گسترده همراه هستند (جعفری و ایزدی کیان، ۱۴۰۳; Sawyer, 2008; Weinberg et al., 2020; Sepidnameh et al., 2025). متاتکسیته‌ها را می‌توان میگماتیته‌هایی در نظر گرفت که ساختارهای منسجم و پیش از ذوب بخشی در پالئوسوم و بازمانده (Residuum) را حفظ می‌کنند (Li et al., 2023b; Suarez et al., 2024). فرایند میگماتیته شدن معمولاً در شرایط رخساره آفیبیولیت بالایی تا گرانولیت رخ می‌دهند و تحت تاثیر عواملی مانند دگرشکلی، مهاجرت سیال‌ها و وضعیت فشار-دما در پوسته میانی تا پایینی قرار دارند (Xiao et al., 2011; Yakymchuk, 2023; Li et al., 2023a; Palummo et al., 2024).

پهنه سندج-سیرجان در باختر ایران، یکی از مهم‌ترین پهنه‌های دگرگونی است که در طی تکامل سیستم کوهزایی زاگرس، تحت تاثیر رویدادهای زمین‌ساختی متعددی قرار گرفته است (Berberian and King, 1981; Shabanian and Neubaure, 2024). این پهنه میزبان مجموعه‌ای گوناگون از سنگ‌های دگرگونی و ماگمایی است که مطالعه آن‌ها برای بازسازی پیشینه زمین‌ساختی این پهنه اهمیت فراوانی دارد. گزارش‌های متعددی از حضور سنگ‌های میگماتیته در بخش‌های مختلف پهنه سندج-سیرجان منتشر شده است؛ از جمله در مناطق همدان (جعفری و ایزدی کیان، ۱۴۰۳; Saki et al., 2012; Sepahi et al., 2019; Shooli et al., 2020). بهاری‌فر و همکاران، (۱۳۹۷; Jafari et al., 2020)، تخت سلیمان (قربانی و همکاران، ۱۳۹۹) و گلپایگان (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۸). حضور گسترده میگماتیته‌ها در این پهنه، گواهی بر اثرگذاری فرایندهای دگرگونی و گرمایی شدید در این پهنه است. بر پایه شواهد سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی، این میگماتیته‌ها به‌طور عمده حاصل ذوب بخشی سنگ‌های گنیسی (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۸)، سنگ‌های آفیبیولیتی (قربانی



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در پهنه سندج-سیرجان (برگرفته از Shabanian and Neubaure, 2024) با سنجاق قرمز رنگ مشخص شده است.

Figure 1. Location of the area within the Sanandaj-Sirjan Zone, indicated by a red pin (modified after Shabanian and Neubaure, 2024).



شکل ۲- نقشه ساده شده زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (مستطیل آبی رنگ)، برگرفته شده از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ الیگودرز (سهیلی و همکاران، ۱۳۷۱).

Figure 2. Geological map of the area (blue rectangle), adapted from the 1:100,000-scale geological map of Aligudarz (Soheili et al., 1992).

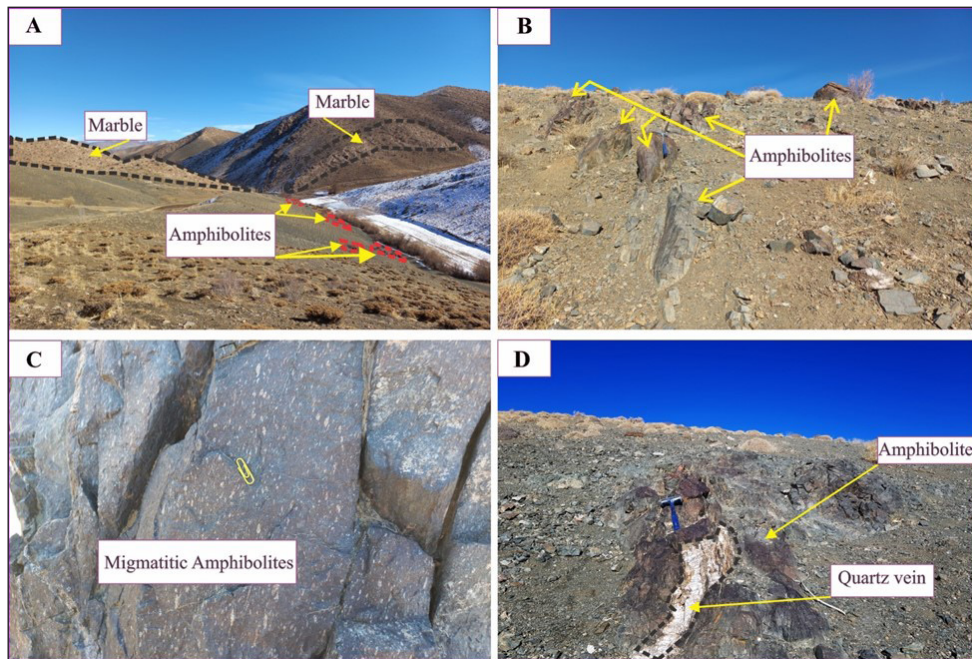
و فرایند میلوئیتی شدن افزون بر ایجاد ساختار عدسی شکل سبب جهت یافتگی و کشیدگی کانی‌های روشن و تیره و تفکیک آن از یکدیگر شده است (شکل ۳- C). در بررسی صحرایی، ساختار میگماتیته این سنگ‌ها شامل لخته‌های روشن و بودین‌های حاصل از ذوب بخشی در زمینه تیره‌رنگ و شواهدی از ذوب بخشی با درصد کم که نشان از میگماتیت متاکسیته می‌باشد را ارائه می‌کند (شکل ۳- C). در نمونه‌های مورد مطالعه در صحرا، رگه‌های کوارتزی نیز دیده می‌شوند که گسترش این رگه‌های روشن کوارتزی گویای نفوذ سیال‌ها طی دگرگونی یا شاید هم‌زمان با میگماتیته شدن است (شکل ۳- D). این رگه‌ها متحمل شکستگی‌های شکنا (Brittle) تحت تاثیر نیروهای زمین ساختی منطقه شدند.

۲- روش پژوهش

طی بررسی‌های صحرایی، نمونه‌هایی از رخنمون‌های شاخص به صورت سامانه‌مند و با ثبت موقعیت جغرافیایی به وسیله دستگاه GPS جمع‌آوری شدند. عکس‌های صحرایی دارای مقیاس و ثبت موقعیت، از پدیده‌های دگرگونی و دگرشکلی موجود در منطقه گرفته شده است. پس از آماده‌سازی مقاطع نازک و مقاطع نازک صیقلی از نمونه‌های جهت دار و غیر جهت دار، مطالعات سنگ‌نگاری (پتروگرافی) از آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان Olympus مدل BX50 انجام گرفت. این مطالعات شامل تهیه ریزنگاره میکروسکوپی (Microphotographs) از بررسی‌های کانی‌شناسی، ویژگی‌های بافتی، ریزساختارهای دگرگونی، شواهد میگماتیته شدن و میلوئیتی شدن در دو نور طبیعی و قطبیده (پلاریزه) بوده که بر روی ۴۰ مقطع نازک انجام شده است. همچنین به منظور شناخت ترکیب شیمیایی کانی‌ها، چهار نمونه جهت آنالیز شیمی کانی‌ها با استفاده از دستگاه میکروپروپ الکترونی مدل Camera SXFive Electron Probe Micro Analyzer در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا مورد بررسی قرار گرفتند. شرایط کاری دستگاه شامل ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلوالکترون‌ولت، جریان پرتو ۲۰ نانوآمپر و قطر پرتو ۱ میکرومتر بوده است و کالیبراسیون دستگاه با استفاده از استانداردهای طبیعی و مصنوعی انجام شد. نقاط آنالیز برای هر کانی معمولاً در چند بخش شامل هسته و حاشیه برداشت شد؛ در مورد بلورهای دارای بافت‌های مشخص مانند منطقه‌بندی، نواحی حل شده یا حاشیه‌های متفاوت از نظر ترکیب، پیمایش‌های دقیق از هسته تا حاشیه با فاصله‌ای بین ۳ تا ۳۰ میکرومتر انجام گرفت.

منطقه مورد پژوهش در گستره‌ای به طول‌های جغرافیایی "۳۶' ۵۵' ۴۹" تا "۱۴' ۵۰' ۴۹" خاوری و عرض‌های جغرافیایی "۱۰' ۱۱' ۳۳" تا "۳۳' ۵۲' ۱۵" شمالی واقع شده است (شکل ۲). این ناحیه در حد فاصل روستای دره‌حوض در استان اصفهان و کوه قلعه‌خلیل و شهر چمن‌سلطان و روستاهای آب‌باریک‌علیا و سفلی در جنوب‌خاور شهر الیگودرز (استان لرستان) قرار دارد. سنگ‌های مورد مطالعه براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ الیگودرز (سهیلی و همکاران، ۱۳۷۱؛ شکل ۲) و شباهت با سایر آمفیبولیت‌های دیگر نواحی کمپلکس‌های دگرگونی سنندج-سیرجان به انتهای پرکامبرین (نئوپروتروزوییک) - کامبرین نسبت داده شده‌اند (Malek-Mahmoudi et al., 2017; Moradian et al., 2023) و سنگ اولیه (پروتولیت) آن‌ها یک ماگمای بازالتی یا گابرو در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مطالعات انجام گرفته (برای مثال: Davoudian et al., 2016; Shabanian and Neubauer, 2024)، حوادث دگرگونی و ماگماتیسم ژوراسیک در پهنه سنندج-سیرجان با فرورانش قاره‌ای حاشیه غیرفعال پالتوزوییک-تریاس اقیانوس تیتیس کهن (پالتوتیتیس) و سربرآوری آن در ارتباط است. پی سنگ این حاشیه غیرفعال در یک سیستم کمان و پشت کمان در حاشیه شمالی گندوانا ایجاد شده است. سنگ‌های پالتوزوییک در این پهنه (به‌عنوان شاخه فرعی تیتیس کهن) که بر روی پی سنگ پرکامبرین قرار گرفته‌اند؛ طی ژوراسیک زیرین در پی رویداد فرورانش درون قاره‌ای و شکست اسلب تیتیس کهن، دچار دگرگونی و سپس سربرآوری گردیده و در نهایت به واحدهایی چون میکاشیست، گارنت شیست، آمفیبولیت، اکلوتیت، مرمر، کوارتزیته تبدیل شده‌اند. این سنگ‌ها طی این حوادث افزون بر دگرگون شدن، تحت تاثیر دگرشکلی دینامیک قرار گرفته و شواهد میگماتیته شدن و میلوئیتی شدن را نشان می‌دهند (Davoudian et al., 2016; Shabanian and Neubauer, 2024).

واحدهای همراه آمفیبولیت‌های مورد مطالعه، مرمر و شیست هستند. مرمرها با رنگ روشن و ظاهر قهوه‌ای روشن تا بژ دیده می‌شوند، در حالی که شیست‌ها با رنگ قهوه‌ای روشن تا خاکستری با برگ‌وارگی آشکاری مشاهده می‌شوند (شکل ۳- A). رخنمون آمفیبولیت‌های مورد مطالعه در ساختار صحرایی عمدتاً به صورت شبه‌بالشی، توده‌ای، عدسی‌های کوچک و بزرگ با رنگ سبز تیره تا خاکستری مشاهده می‌شوند (شکل ۳- B). عدسی‌های آمفیبولیتی دارای کشیدگی در امتداد شمال‌باختر-جنوب‌خاور و به موازات راندگی زاگرس هستند. برخی نمونه‌ها دارای برگ‌وارگی چیره می‌باشند. قرارگیری منطقه در پهنه برشی، دگرشکلی شدید



شکل ۳- تصاویر صحرایی با جهت دید شمال باختری از آمفیبولیت‌های میگماتیته شده در جنوب‌خاور الیگودرز؛ (A) رخنمون آمفیبولیت‌ها در امتداد یک پهنه کشیده و تیره‌رنگ در میان پوشش گیاهی منطقه؛ همجواری آمفیبولیت‌ها با واحدهای مرمری در امتداد رخنمون. (B) رخنمون عدسی‌گونه توده‌های آمفیبولیت که ترکیب سنگی مقاوم‌تری نسبت به سنگ‌های در برگیرنده دارند. (C) ساختار میگماتیته در آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه. (D) گسترش رگه کوارتزی درون توده آمفیبولیتی رگه نشان‌دهنده نفوذ سیالات است.

Figure 3. Field photographs of the migmatitized amphibolites in the southeastern Aligudarz: A) Outcrop of amphibolites along an elongated, dark zone within the local vegetation cover; contact between amphibolites and marble units exposed along the outcrop. B) Multiple lens-shaped outcrops of amphibolite bodies, which are more resistant compared to the surrounding rocks. C) Migmatitic structure developed in the amphibolites of the area. D) Occurrence of quartz veins within the amphibolitic body, indicating fluid infiltration.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- سنگ‌نگاری

کانی‌های اصلی در این سنگ‌ها شامل آمفیبول، تیتانیت، کلینوزویزیت، زویزیت بوده و کانی‌های فرعی بیوتیت، پلاژیوکلاز، کوارتز، گارنت، و زیرکن است. آمفیبول‌ها در ۳ نسل قابل تشخیص‌اند: نسل اول با پلئوکروئیسیم خاکی تا قهوه‌ای رنگ (بخش پالتوسوم)؛ نسل دوم که طی میگماتیته شدن رشد کرده‌اند (ملانوسوم)، با چندرنگی (پلئوکروئیسیم) سبز تا زرد مایل به سبز که در برخی نمونه‌ها به صورت پورفیروبلاست با ماکل ساده و خاموشی موجی مشخص می‌شوند، و نسل سوم دارای بافت سوزنی و پویک‌سان، چندرنگی ضعیف بیشتر بر روی پلاژیوکلازها رشد کرده‌اند (رخساره شیبست سبز). همچنین آمفیبول‌های نسل دوم با ظاهر دیابلاستیک در کنار آمفیبول‌های نسل اول ظاهر می‌شوند (شکل‌های ۴-A-D). پلاژیوکلازها به صورت آل بیت نفورم با ماکل پلی‌سنتیک، ریزساختار ماهی‌گون و بودینی مشاهده می‌شوند و کوارتز به صورت نواری و دانه‌های نئوگرن گسترش یافته‌اند (شکل ۴-A). بیوتیت به صورت صفحات برهم‌نهشته شده (overprint) بر روی آمفیبول‌ها دیده می‌شود. همچنین تیتانیت به صورت خودشکل، تجمعی و کشیده در اطراف بلورهای آمفیبول قابل تشخیص است. گارنت‌ها به دو صورت دیده می‌شوند: برخی بلورها کاملاً خود شکل و بدون حاشیه واکنشی هستند که بیانگر پایداری نسبی آن‌ها در شرایط دگرگونی پس از رشد اولیه می‌باشد؛ در مقابل، برخی دیگر دچار شکستگی شده‌اند و رشد آمفیبول در امتداد این شکستگی‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۵-A).

میگماتیته‌های متاکستی جنوب خاور الیگودرز از دو بخش روشن (لوکوسوم) و تیره (ملانوسوم) تشکیل شده‌اند. پالتوسوم در آمفیبولیت‌های مورد مطالعه، آمفیبول‌های نسل اولی هستند که دچار ذوب‌بخشی نشده‌اند. لوکوسوم به‌طور عمده شامل کانی‌هایی چون کوارتز و پلاژیوکلاز است (شکل‌های ۴-A-F) که بازتابی از بخش‌های متبلور شده از مذاب هستند. در مقابل، ملانوسوم (شکل‌های ۴-A-F) متشکل از آمفیبول (با درصد فراوانی بالای ۸۰٪)، بیوتیت، کلینوزویزیت، زویزیت و گارنت است. بر اساس مشاهدات سنگ‌نگاری، اختلافات بافتی و کانی‌شناسی بین لوکوسوم و ملانوسوم آشکار است به گونه‌ای که، لوکوسوم‌ها اغلب دارای بافت گرانوبلاستیک با کوارتز و پلاژیوکلاز در حالی که ملانوسوم‌ها با حضور بالاتر آمفیبول دارای بافت دیابلاستیک و مقادیر متغیر گارنت، کلینوزویزیت، زویزیت و تیتانیت مشخص می‌شوند. به‌طور کلی، بافت‌های متنوعی از جمله لیدوگرانوبلاستی، نماتوبلاستی، گرانوبلاستیک و دیابلاستیک در بخش‌های متفاوت مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۴ و ۶). شواهد متعددی از دگرشکلی شکل‌پذیر، مانند برگ‌وارگی آناستاموزینگ، فابریک‌های رخ (کلیواژ) باند برشی از نوع S-C و S-C'، خط‌وارگی، ساختار بودین، کانی‌های ماهی‌گون آمفیبول، خاموشی موجی و موجی تخته شطرنجی کوارتز (شکل‌های ۵-C, D)، چین‌خوردگی، خم‌شدگی و ماکل‌های دگرشکلی در کانی‌هایی چون آمفیبول، کوارتز، پلاژیوکلازها مشاهده شده است (شکل‌های ۴-۶).

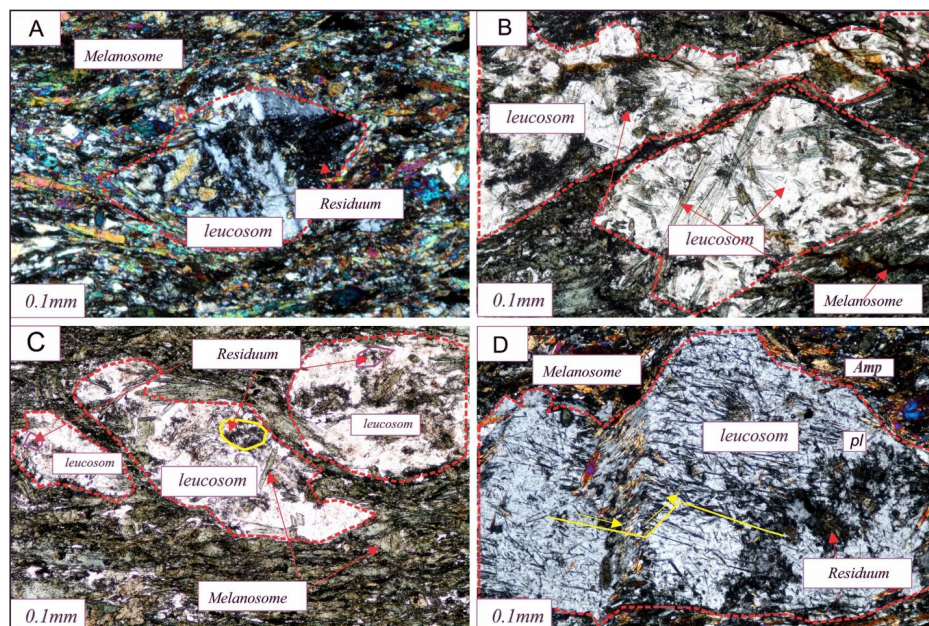


Figure 4. Photomicrographs of migmatitized amphibolites under polarized light: A) Fish-shaped plagioclase in the leucosome, surrounded by dark, amphibole-rich melanosome. Leucosome, melanosome, and relict domains are well distinguished. B) Presence of continuous banded boudins of leucosome (plagioclase). C) Boudin structures of the leucosome associated with darker melanosome domains. D) Lecosome boudin with gentle folding (plagioclase), surrounded by melanosome. On this leucosome, third-generation amphiboles (actinolite) have developed as blade-shaped crystals, representing retrograde metamorphism following migmatization. Pl: Plagioclase, Amp: Amphibole (Whitney and Evans, 2010).

شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از آمفیبولیت‌های میگماتیته شده در نور پلاریزه؛ (A) لوکوسوم (پلاژیوکلاز ماهی‌گون) توسط ملانوسوم تیره‌رنگ و غنی از آمفیبول (نسل دوم) احاطه شده است. لوکوسوم، ملانوسوم و بازمانده تفکیک شده است. (B) حضور بودین‌های نواری ممتد لوکوسوم (پلاژیوکلاز). (C) ساختار بودینی لوکوسوم همراه با بخش‌های تیره ملانوسوم. (D) لوکوسوم بودینی با چین‌خوردگی ملایم (پلاژیوکلاز)، که توسط ملانوسوم احاطه شده است. بر روی این لوکوسوم، آمفیبول نسل سوم (اکتینولیت) به صورت تیغه‌ای رشد کرده‌اند که حاصل دگرگونی قهقرایی پس از میگماتیته شدن است. Pl: پلاژیوکلاز، Amp: آمفیبول (Whitney and Evans, 2010).

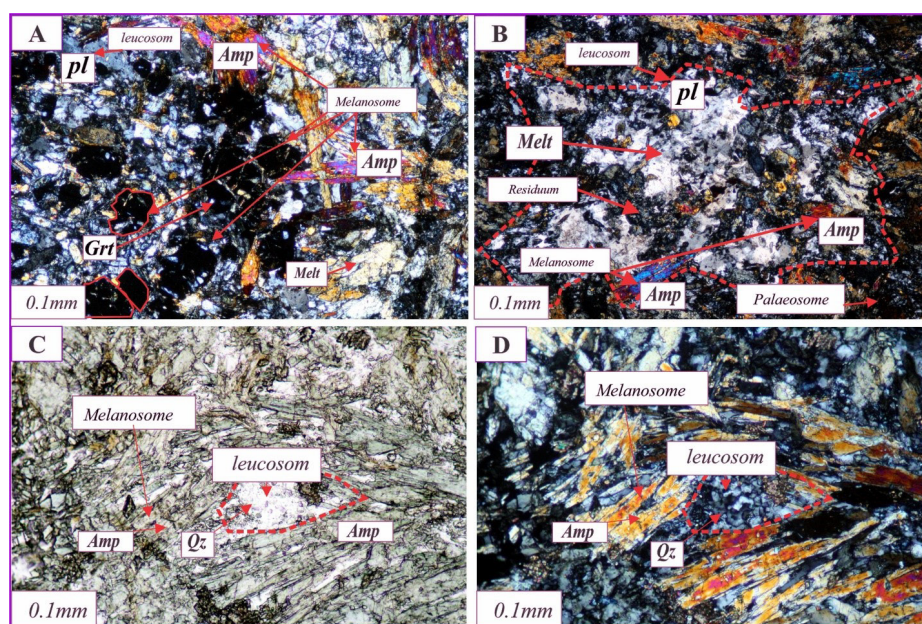


Figure 5. Photomicrographs of the studied amphibolites under cross-polarized light; (A) Presence of plagioclase leucosome (Pl) (bright areas) as a product of partial melting, melanosome (dark areas rich in amphibole), and peritectic minerals such as garnet (Grt) and second-generation amphibole (Amp). (B) Distinction of the paleosome (the protolith), residual after partial melting, and plagioclase (leucosome). Pl: Plagioclase, Amp: Amphibole, Grt: Garnet, Qz (Whitney and Evans, 2010).

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از آمفیبولیت‌های مورد مطالعه در نور پلاریزه؛ (A) حضور لوکوسوم پلاژیوکلاز (بخش‌های روشن) به‌عنوان محصول ذوب جزئی، ملانوسوم (بخش‌های تیره و غنی از آمفیبول) و کانی‌های پریکتیت مانند گارنت (Grt) و آمفیبول نسل دوم (Amp). (B) تفکیک بخش‌های پالئوسوم (بخش اولیه سنگ)، بازمانده پس از ذوب جزئی، پلاژیوکلاز (لوکوسوم). (C) و (D) کوارتز (Qz) با خاموشی تخته‌شمرنجی (لوکوسوم)، بافت نماتوبلاستیک. Pl: پلاژیوکلاز، Amp: آمفیبول، Grt: گارنت، Qz: کوارتز (Whitney and Evans, 2010).

۴- بحث

۴-۱- شواهد سنگ‌نگاری فرایند میگماتیته شدن

سنگ‌نگاری آمفیبولیت‌های میگماتیته شده در منطقه مورد مطالعه، آشکارا جدایش فازی میان لوکوسوم‌ها (پلاژیوکلاز و کوارتز) و ملانوسوم‌ها (حاوی درصد بالای آمفیبول) را نشان می‌دهند، که این ویژگی با مدل‌های ذوب‌بخشی و تکوین لوکوسوم در اثر تفکیک مذاب سازگار است (Sawyer, 2008, 2014; Li et al., 2023b) (شکل ۴). مرزهای مشخص میان ملانوسوم و لوکوسوم (Melanosome-Leucosome boundary) بیانگر فرایند تجمع و مهاجرت جزئی مذاب هستند (Renna, 2023)؛ فرایندهایی که در فشارهایی مانند ۴-۶ کیلوپا به بالا و دماهای ۷۵۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در مطالعات میدانی و آزمایشگاهی گزارش شده‌اند (Yoshimura et al., 2020; Lee et al., 2023; Renna, 2023; Saki et al., 2020). وجود ساختارهای بودین در لوکوسوم (شکل‌های ۶-۵)، نشانه‌مسیرهای کانالی جریان مذاب در یک سیستم بسته است (Festa et al., 2024; Gosh and Sengupta, 1999; Brown, 2008; Festa et al., 2024). همچنین، چین‌خوردگی‌های خفیف در لوکوسوم و خاموشی موجی در بلورهای آمفیبول‌ها، ارتباط هم‌زمان بین دگرشکلی و تبلور مذاب را نشان می‌دهند؛ ویژگی‌هایی که در میگماتیته‌های گزارش شده در سایر نقاط جهان نیز مشاهده شده است (Goswami et al., 2023).

مشاهده الگوی بودین‌های کشیده لوکوسوم‌ها و یا ماهی‌گون ملانوسوم (آمفیبول نسل دوم) همراه چین‌خوردگی‌های ملایم و کشیدگی در راستای برگ‌وارگی، گویای تاثیر تنش‌های دگرشکلی هم‌زمان یا پس از تبلور مذاب است (شکل‌های ۶-B, C) (Sawyer, 2008; Weinberg and Hasalova, 2015). وجود پلاژیوکلاز (لوکوسوم) در بین ملانوسوم و تیتانیت‌پراکنده در مرزهای آمفیبول‌های دونسل، معرف جدایش فازی بین بخش‌های فلسیک و مافیک سیستم در حین ذوب‌بخشی و تبلور در شرایط سیستم نسبتاً بسته است (Kriegsman, 2001; Festa et al., 2024). در واقع، شواهد ریزساختاری دگرشکلی و بافتی مانند کانی‌های کشیده، ماهی‌گون یا چین‌خورده بیان شده در مقاطع نازک مورد مطالعه، گویای مهاجرت موضعی مذاب و نقش دگرشکلی متمرکز در سنگ‌های میگماتیته شده در منطقه مورد مطالعه است (Korhonen et al., 2012).

با توجه به فراوانی بالای ملانوسوم و درصد پایین لوکوسوم، آمفیبولیت‌های میگماتیته شده منطقه مورد مطالعه را می‌توان در رده میگماتیته‌های متاتکستی قرار داد. در بسیاری از مقاطع مورد مطالعه، لوکوسوم به شکل بودین‌هایی درون پالئوسوم بوده و توسط ملانوسوم در بر گرفته شده‌اند (شکل ۴)، که نشان‌دهنده تشکیل مذاب در محل و محصور شدن آن در یک سیستم بسته است (شکل ۵). در برخی نمونه‌ها، لکه‌های ابری و تیره رنگ پراکنده‌ای در لوکوسوم مشاهده می‌شود که احتمالاً نشان‌دهنده ورود مجدد یا پراکندگی فازهای بازمانده (Residuum) (شکل ۷) به ناحیه مذاب هستند. این اتفاق می‌تواند بیانگر تعامل پیچیده بین ذوب و فرایند دگرشکلی در میگماتیته‌های مورد مطالعه است (شکل ۴-D).

در برخی مقاطع (شکل ۶-B و C) جهت‌گیری هم‌راستا نوارهای لوکوسوم‌ها و جهت‌گیری ترجیحی آمفیبول‌ها گروه دوم، گویای تاثیرات دگرشکلی هم‌زمان با فرایندهای ذوب‌بخشی است (Vernon, 2011). همچنین بخش لوکوسوم میگماتیته‌های مورد مطالعه، تمایل به استقرار در بخش‌های کرنش پایین، بودین‌ها، چین‌ها و نواحی کششی در این سنگ‌های آمفیبولیتی را دارند. لوکوسوم‌ها غنی از پلاژیوکلاز (Pl) و کوارتز (Qz) با رنگ روشن و زمینه‌ای تیره‌تر شامل ملانوسوم غنی از آمفیبول (Amp) هستند (شکل ۶-A). از نظر اندازه بلورها، لوکوسوم‌ها عمدتاً به‌صورت بودین با بافت نسبتاً دانه ریز تا متوسط و گاهی همراه با بلورهای درشت پلاژیوکلاز یا ساختار بودین در میان ملانوسوم‌ها دیده می‌شوند.

شواهد میکروسکوپی نشان‌دهنده حضور کانی‌های دیگری نیز هستند که طی واکنش‌های بین مذاب و یک کانی جامد اولیه، در یک دمای خاص متبلور می‌شوند

(کانی‌های پرتکتیکی) که در مقاطع مورد مطالعه، در لوکوسوم و برخی دیگر در ملانوسوم تشکیل شده‌اند (شکل ۵-A). این کانی‌ها بیشتر در سیستم‌های دگرگونی-ماگمایی مشاهده می‌شوند و حضور آن‌ها، می‌تواند بیانگر شرایط خاص تعادلی در دما و فشار بالا باشد (Weinberg and Hasalova, 2015). با کاهش دما، گارنت‌های پرتکتیکی که در بخش لوکوسوم تبلور یافته‌اند در اثر دگرشکلی، دچار چرخش شده‌اند (شکل ۵-A). این گارنت‌ها گویای شرایطی هستند که در آن، جدایش مذاب در یک سیستم به‌نسبت بسته تشکیل و حفظ شده‌اند (Festa et al., 2024). در واقع با بالا رفتن دما طی دگرگونی در مرز رخساره آمفیبولیت بالایی تا مرز گرانولیت، ذوب آتاکسی در بخش‌هایی از سنگ که مقاومت کمتری داشته، اتفاق افتاده است (Li et al., 2023b). مذاب به وجود آمده در همان مکان محاصره شده است و در ادامه با پایین آمدن دما تجمعی از گارنت‌های پرتکتیک (شکل ۵-A) (ملانوسوم)، در بخش لوکوسوم تشکیل شده‌اند که سبب انسداد و جلوگیری از انتشار مذاب شده است (شکل‌های ۵-A-B). با ادامه دگرشکلی، تجمعی از گارنت‌های بیضی‌شکل و خود شکل، دچار چرخش شده‌اند که نشان‌دهنده یک سیستم بسته و نیمه بسته در بخشی از نمونه‌های مورد مطالعه است (Festa et al., 2024; Costa et al., 2009; Weinberg and Hasalova, 2015).

در نمونه‌های مورد مطالعه، فرایند میولینیته شدن سبب کشیده شدن بودین‌ها و ایجاد بافت نواری شکل شده است (شکل ۶-D)، بودین‌ها، شواهد روشنی از فرایند میگماتیته شدن آمفیبولیت‌ها را در یک محیط دگرگونی و دگرشکلی در شرایط نسبتاً فشار متوسط-دما بالا در پهنه برشی ارائه می‌دهند.

۴-۲- ساختار بودین و رفتار رئولوژیکی مذاب

مشاهدات میکروسکوپی نشان می‌دهند که بودین‌ها نه تنها از گارنت (شکل ۵-A)، بلکه از آمفیبول‌های کشیده شده ماهی‌گون (شکل ۶-B)، بلورهای درشت پلاژیوکلاز و بقایای ذوب (لوکوسوم و ملانوسوم) (شکل ۶-۵) تشکیل شده‌اند. ویژگی‌های سنگ‌نگاری بررسی شده، بیانگر ناهمگنی‌های موضعی در ترکیب و رفتار رئولوژیکی سنگ هستند. این ناهمگنی‌ها نقش مهمی در شکل‌گیری ساختارهای میگماتیته و الگوی جریان مذاب داشته‌اند. همچنین بررسی شواهد صحرایی، در مجموع گویای تاریخچه‌ای از دگرگونی، ذوب‌بخشی و تزریق سیال‌ها در این سنگ‌ها هستند که با شواهد سنگ‌نگاری فوق‌همخوانی دارد. این روندها نشان می‌دهند که محیط تشکیل میگماتیته‌ها در پهنه برشی فعال و پیچیده بوده و تحت تاثیر چندین فاز فرایند زمین‌ساختی و حرارتی قرار گرفته‌اند. مشاهدات میدانی از ساختار میگماتیته‌ها، گویای آن است که در طول آتاکسی پیش‌رونده، ملانوسوم‌ها به دلیل گرانروی بالاتری نسبت به لوکوسوم، در برابر کرنش مقاومت بیشتری داشته‌اند و به صورت بخش‌های با ساختار بودین‌ها درآمده‌اند (Li et al., 2023b). این تفاوت در گرانروی میان اجزای مختلف سنگ، از جمله آمفیبول‌های هر دو نسل، تجمع گارنت‌ها، پلاژیوکلاز، کوارتز، بقایای ذوب و آمفیبول‌های با ساختار ماهی‌گون موجب شکل‌گیری بودین‌ها شده است (شکل ۷). عوامل موثر بر تشکیل بودین‌ها عبارتند از: تضاد گرانروی میان بخش‌های مختلف سنگ، نوع و جهت جریان مذاب، زاویه لایه‌بندی نسبت به محورهای کرنش، شدت کرنش پهنه برشی، دگرشکلی دینامیکی و ساختارهای حاصل از آن (Li et al., 2023a,b).

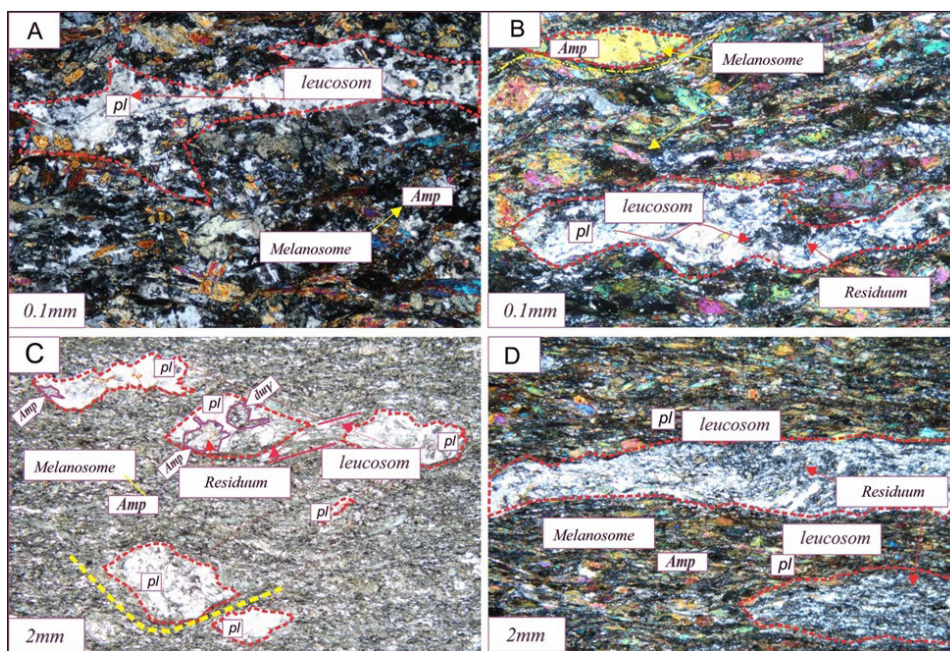
نوع و هندسه این بودین‌ها با اجزای مختلف میگماتیته (شکل ۷) به صورت زیر است: کوارتزهای نوظهور، لوکوسوم‌های دارای ساختار بودین با بافت به‌نسبت درشت‌دانه و در بخش چین‌خورده که هم‌زمانی تبلور و تاثیر دگرشکلی را نشان می‌دهد (پلاژیوکلاز)؛ ملانوسوم‌های بودین شده درشت‌دانه و ریزدانه (نسل دوم آمفیبول، گارنت) (Li et al., 2023b). تکامل هندسی بودین‌ها در طول فرایند میگماتیته شدن در منطقه به‌ترتیب شامل بودین‌های توده‌ای (Object boudins)،

جزئی در محل است (Yakymchuk, 2021). بسته به میزان آب (H_2O) موجود در سیستم، شدت دگرگونی و میزان ذوب جزئی، ممکن است برخی از بخش‌های میگماتیته به طور کامل تشکیل نشوند یا قابل شناسایی نباشند (Halla, 2020; Tao et al., 2025). آب و سیال‌ها نقش کلیدی در فرایندهای میگماتیته شدن و دگرگونی فشار-دما متوسط و بالا ایفا می‌کنند (Patíño and Johnston, 1991; Weinberg and Hasalova, 2015). از جمله آب سبب انتقال حرارت، واکنش‌های دگرگونی و کاهش نقطه ذوب کانی‌هایی چون پلاژیوکلاز و کوآرتز می‌شود که به تشکیل و گسترش نئوسوم در میگماتیته‌ها کمک می‌کند (Holness, 2008; Renna, 2023; Tao et al., 2025). مقدار آب در سیستم‌های میگماتیته می‌تواند شدت و گستردگی ذوب‌بخشی را کنترل کند و بر ترکیب شیمیایی مذاب نیز تاثیرگذار باشد (Weinberg and Hasalova, 2015; Tao et al., 2025). حضور یک فاز آبی آزاد در مناطق آاناتکسی (نواحی دارای ذوب جزئی) بر تمامی جنبه‌های فیزیکی و شیمیایی اصلی فرایندهای ذوب تاثیرگذار است؛ از جمله حجم مذاب تولیدی، گرانیروی، توانایی جدایش مذاب از فضاهای بین دانه‌ای کانی‌ها در سنگ، ترکیب شیمیایی و ایزوتوپی مذاب (Weinberg and Hasalova, 2015). تغییر در رئولوژی سنگ‌ها، تفکیک فازهای ملانوسوم و لوکوسوم شود (Vernon, 2011; Li et al., 2023a; Tao et al., 2025).

بودین‌های چندلایه‌ای (Multiple-layer boudins)، بلوک‌های لوکوسومی‌اند (Leucosome block boudins) (شکل ۷)، که بازتاب اثرات متفاوت کرنش و شدت جریان کششی در بخش‌های ملانوسوم و لوکوسوم بر شکل‌گیری ساختارهای میگماتیته در منطقه مورد بررسی است. بنابر دیدگاه رئولوژیکی و فضایی، با افزایش میزان ذوب‌بخشی و تشکیل لوکوسوم در میگماتیته‌ها، رفتار سنگ از حالت همگن به ناهمگن و ناهمسانگرد تغییر می‌کند و در ادامه با تداوم فرایندهای تفکیک و تبلور مجدد، ترکیب سنگ دوباره به حالت همگن بازمی‌گردد (Li et al., 2023b). این روند نمایانگر چرخه دینامیکی از تکوین میگماتیته‌ها است.

۴-۳- شواهد دگرشکلی همزمان با ذوب (Syn-anatectic Deformation)

ساختارهای مطرح شده در بررسی سنگ‌نگاری مقاطع نازک، نشان‌دهنده تاثیر دگرشکلی شکل‌پذیر در طی زمین‌ساخت فعال پهنه برشی در جنوب خاور الیگودرز هستند. از آنجا که برگ‌وارگی و خط‌وارگی سنگ‌های دگرگونی با فرایندهای زمین‌ساختی مرتبط هستند، ماهیت برگ‌وارگی این توالی و همچنین ناهمگنی ساختاری و ترکیبی سنگ‌های میگماتیته می‌توان به عنوان پاسخی به دینامیک پهنه برشی فعال تعبیر کرد (Kozlovsky and Rusinov, 2008; Saweyr, 2008). وجه تمایز میگماتیته‌ها با سنگ‌هایی با ظاهر مشابه، اما با منشا تزریق خارجی، وجود ذوب



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی از آمفیبولیت‌های میگماتیته شده در نورپلاریزه و طبیعی؛ (A) لوکوسوم روشن با پلاژیوکلاز درون زمینه تیره ملانوسوم غنی از آمفیبول هر دونسل. (B) لوکوسوم سفیدرنگ در میان ملانوسوم تیره، با حضور آمفیبول‌های ماهی‌گون نسل دوم، کشیده شده در امتداد نوارها. (C) بودین‌های لوکوسوم (پلاژیوکلاز) با چین‌خوردگی ملایم و آمفیبول‌های درشت در زمینه ملانوسوم. (D) نوارهای کشیده لوکوسوم (پلاژیوکلاز) در کنار ملانوسوم حاوی آمفیبول. PI: پلاژیوکلاز، Amp: آمفیبول (Whitney and Evans, 2010).

Figure 6. Photomicrographs of migmatitized amphibolites under cross-polarized and plane-polarized light: A) Bright leucosome with plagioclase within a dark melanosome matrix rich in both generations of amphibole. B) Whitish leucosome surrounded by dark melanosome, with fish-shaped second-generation amphiboles aligned along the bands. C) Leucosome boudins (plagioclase) with gentle folding and coarse amphiboles in the melanosome matrix. D) Stretched leucosome bands (plagioclase) adjacent to a melanosome containing amphibole. Pl: Plagioclase, Amp: Amphibole (Whitney and Evans, 2010).

Stage	Geometry and evolution of boudins (Li et al., 2023b)	Boudin structures in the study area	Strain - Migmatite type
Boudinage during progressive strain accumulation	Object boudins A 	Object boudins B 	Deformation is controlled by the stretch flow in melanosome (Li et al., 2023b). migmatite is classified as metatexite
	Multiple-layer boudins C 	Multiple-layer boudins D 	Deformation is created by the high strain rates in melanosome domain (Li et al., 2023b). migmatite is classified as metatexite
	Leucosome block boudins E 	Leucosome block boudins F 	Deformation is dominated by high strain rate and stretch flow in melanosome (Li et al., 2023b). migmatite is classified as metatexite

شکل ۷- مراحل مختلف تکامل ساختار بودین ها در سنگ های میگماتیته مورد مطالعه به دنبال افزایش نرخ کرنش و تغییر در رژیم جریان کششی در ملانوسوم (برگرفته از لی و همکاران - Li et al., 2023b).

Figure 7. Different stages of boudin structure evolution in the studied migmatitic rocks, following an increase in strain rate and a shift in the extensional flow regime within the melanosome (adapted from Li et al., 2023b).

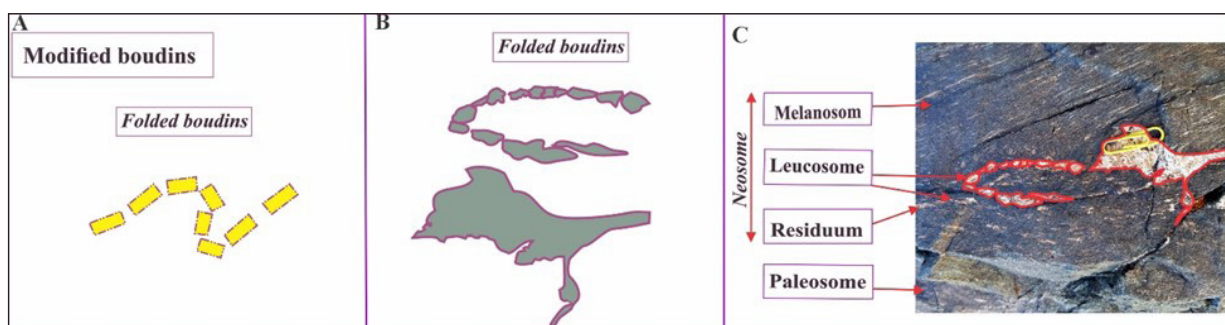
و میزان کشش در پهنه برشی است (Saweyr, 2008). همچنین، بودین های مورد مطالعه، در امتداد برگ واریگی و کشش اولیه به بودین های مخروطی تبدیل شده اند و سپس تحت تاثیر دگرشکلی و جریان کششی پهنه برشی دچار چین خوردگی خمشی شده اند. این رفتار می تواند به عنوان پاسخی به جهت یافتگی نوارهای برشی و کشش چیره منطقه در نظر گرفته شود (Johnson et al., 2015; Pereira et al., 2017; Li et al., 2023b).

۴-۵- شرایط فشار- دما دگرگونی و میگماتیته شدن

نمودارهای شبه برش تعادلی فشار-دما (Pseudosection) حاصل از مدل سازی ترمودینامیکی بر مبنای ترکیب ژئوشیمی سنگ های دگرگونی منطقه، محدوده های پایداری مجموعه کانی های اصلی را در شرایط مختلف فشار-دما (P-T) مشخص می کنند و مسیر دگرگونی سنگ ها را روشن می سازند (شکل ۹). ترکیب ژئوشیمی عناصر اصلی در سنگ های متابازیتی منطقه، با SiO_2 در محدوده ۴۵/۴ تا ۴۷/۳ درصد، MgO بین ۶/۹ تا ۱۰/۳ درصد، Al_2O_3 از ۱۳/۳ تا ۱۴/۸ درصد، Fe_2O_3 کل بین ۱۰/۵ تا ۱۳/۳ درصد، CaO در محدوده ۹/۸ تا ۱۴/۸ درصد، TiO_2 از ۱/۳۹ تا ۱/۸۲ درصد و مقدار LOI نیز بین ۲/۵ تا ۳/۴ درصد مشخص شده است (اسحاقی و همکاران، ۱۳۹۱). بر اساس تحلیل نمودار شبه برش تعادلی فشار-دما، دو مجموعه کانی قابل تشخیص است از جمله مجموعه کانی های (نمودار ۹-۸) آمفیبول، گارنت، پلاژیوکلاز، بیوتیت، ایلمنیت و مذاب در گستره دمایی ۷۸۰ تا ۸۶۰ درجه سانتی گراد و فشار ۶/۵ تا ۹ کیلو بار و همچنین مجموعه کانی هایی که (نمودار ۹-۸) شامل آمفیبول، گارنت، ایلمنیت، مذاب، پلاژیوکلاز، کوارتز در گستره دمایی ۷۳۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۵/۷ تا ۹ کیلو بار پایدار هستند.

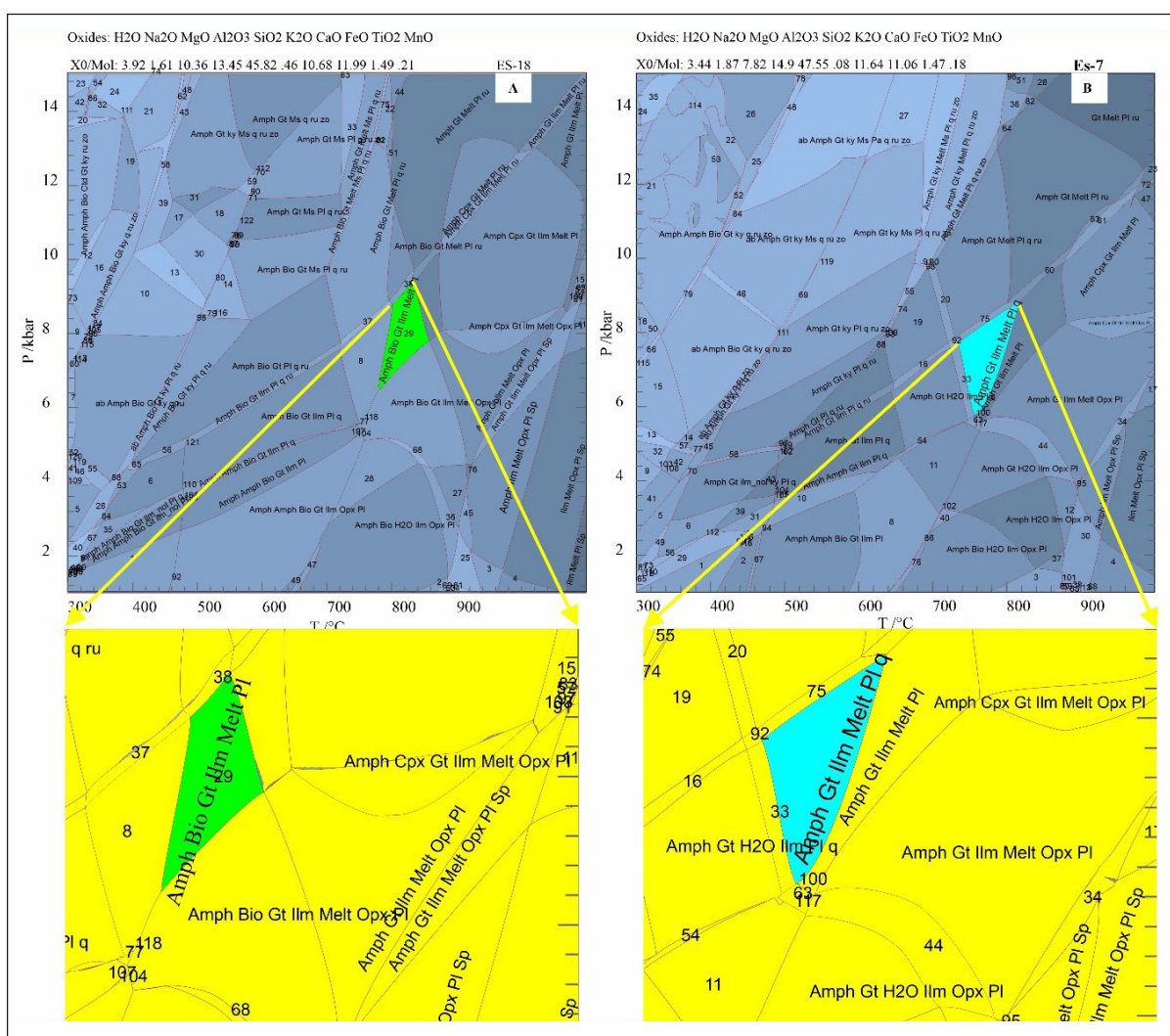
در توده های سنگی ناهمگن مورد مطالعه، که تحت آناتکسی قرار گرفته اند، ذوب، تبلور جدید و تبلور مجدد به صورت مکانی و زمانی ناهمگن رخ داده است (شکل های ۴-۶). این ناهمگنی در تضادهای رئولوژیکی در حال تکامل بین بخش های مختلف آمفیبولیت های میگماتیته شده و تقسیم بندی پیچیده ی تنش در طول فرایند میگماتیته شدن و ساختار بودین منعکس شده است (شکل ۸) (Li et al., 2023b). در مرحله اول، جریان کششی کنترل شده به ایجاد بودین های جداگانه و پراکنده انجامیده، در حالی که در مراحل بعدی با افزایش نرخ کرنش، بودین های چندلایه و نهایتاً قطعه قطعه شدن لوکوسوم با تفکیک آشکار بین بخش های بازمانده و مذاب شکل گرفته است (Li et al., 2023b) (شکل ۷). بررسی علت های رخداد بودیناژ و دگرشکلی آن ها در میگماتیته های مورد مطالعه، نشان می دهد که تقسیم بندی شایان توجه تنش، معمولاً در طول میگماتیته شدن رخ داده است (شکل ۸). این تحلیل ساختارهای بودیناژ به درک تکامل رئولوژیکی سنگ های تحت آناتکسی منطقه منتج شده است (Li et al., 2023b).

الگوی هندسی، گردن های کشیده شده بودین های منطقه مورد بررسی، گویای هم زمانی ذوب و دگرشکلی و تاثیرات پهنه برشی است (شکل ۸-۸). مراحل تحول ساختاری بودین ها از تاخوردگی تا تفکیک مکانیکی، نشانه شرایط دگرگونی بالا و کرنش متمرکز پهنه برشی است که به تمرکز و کنترل جریان مذاب در نواحی خاصی از سنگ های مورد مطالعه انجامیده است (شکل ۸-۸) (Li et al., 2023b; Saweyr, 2008). این بودین ها که در طول میگماتیته شدن تشکیل شده اند، بیانگر نقش تنش و ویژگی های رئولوژیکی سنگ های منطقه مورد مطالعه هستند. در واقع هندسه این بودین ها و چرخش و چین خوردگی آن ها، نشان از تضاد گرانی و مقاومت بین بخش های مختلف سنگ در طول دگرشکلی، میگماتیته شدن، نوع جریان مذاب



شکل ۸- A، B، و C) برهم کنش میان فرایندهای دگرشکلی و ذوب جزئی در ایجاد و تحول ساختارهای میگماتیته و بودین چین خورده؛ جایگاه لوکوسوم، ملانوسوم، بازمانده و پالئوسوم در یک میگماتیت دگرشکل یافته در مقیاس صحرایی (برگرفته از لی و همکاران- Li et al., 2023b).

Figure 8. A, B, and C: Interaction between deformation and partial melting processes in the formation and evolution of migmatitic structures and folded boudins; the position of leucosome, melanosome, residuum, and paleosome in a deformed migmatite at outcrop scale (adapted from Li et al., 2023b).



شکل ۹- نمودار شبه برش تعادلی فشار-دما در منطقه مورد مطالعه بر اساس داده‌های اسحاقی و همکاران (۱۳۹۱).

Figure 9. Pseudosection diagram of the area based on data from Eshaghi et al. (2012).

تا مرز گرانولیت همخوانی دارد. مهم‌تر آن که، این فابریک‌ها در مجاورت یا درون نوارهای روشن (لوکوسوم) مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده فرایند ذوب‌بخشی تحت تاثیر یا هم‌زمان با دگرشکلی شکل‌پذیر اتفاق افتاده است که در چنین شرایطی، تولید مذاب می‌تواند از طریق تمرکز تنش در نواحی خاص، افزایش دمای موضعی و یا از طریق دگرشکلی فعال شده با دما تسهیل شود (Vernon, 2011; Sawyer, 2014; Weinberg and Hasalova, 2015; Li et al., 2023a). در واقع بررسی فابریک‌های دگرشکلی در کانی‌های اصلی شامل کوارتز، پلاژیوکلاز و آمفیبول (شکل ۱۰-B) بیانگر ثبت شرایط دمایی متفاوت در ناحیه دگرشکلی پلاستیک و شکل‌پذیر (داکتیل) است. کوارتز در برخی نواحی دارای ساختارهای دگرشکلی مانند SGR نشان‌دهنده دمای حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و مهاجرت مرزدانه‌ای GBM است. درحالی‌که پلاژیوکلاز با فابریک مشابه در حدود ۶۰۰ درجه و آمفیبول با فابریک‌های SGR/BIG دمایی بین ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. این طیف دمایی با نتایج فشار و دما به‌دست آمده از داده‌های نمودار شبه برش تعادلی فشار-دما تطابق داشته و تایید کننده شرایط دگرگونی و دگرشکلی در دمای بالا است. بنابراین، شواهد فابریکی نه تنها به دمای بالا اشاره دارند، بلکه وجود آن‌ها در کنار بخش‌های ذوب شده سنگ (لوکوسوم) نشان می‌دهد که بین دگرشکلی و تشکیل مذاب همزمانی وجود داشته است.

۴-۶- شرایط زمین‌ساختی موثر بر میگماتیته شدن

در چارچوب تحلیل‌های تحلیل‌های زمین‌ساخت-حرارتی (Tectonothermal)، بررسی نمودارهای فشار-دما (P-T)، امکان شناخت شرایط زمین‌ساختی موثر بر فرایند میگماتیته شدن در آمفیبولیت‌های متابازیتی جنوب‌خاور الیگودرز را فراهم می‌آورد. در این نمودارها، مرز سالیدوس نشان‌دهنده (شکل ۱۱-A) آستانه آغازین ذوب جزئی در حضور فاز سیال را نشان می‌دهد. محدوده میگماتیته‌ها معمولاً در دمایی ۶۵۰ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۱۱-B) و فشارهای میان‌بار (حدود ۵ تا ۱۰ کیلوبار) (شکل ۱۱-C) جای می‌گیرد، که نشان‌دهنده رخداد میگماتیته شدن در فشار-دما نسبتاً بالا و فشار متوسط است (Bucher and Grapes, 2011; Weinberg and Hasalova, 2015).

در این شرایط، سنگ‌های آمفیبولیت منطقه مورد مطالعه، با رسیدن به دماهای بحرانی، به آستانه واکنش‌های آناتکسی رسیده‌اند و با حضور فازهای آب‌دار در ساختارشان (شکل ۱۱-A)، با کاهش دمای ذوب، موجب تولید مذاب شده‌اند (Weinberg and Hasalova, 2015). همچنین این مذاب‌ها به‌طور عمده در رگه‌ها و نواحی لوکوسومی در زمینه سنگ تبلور می‌یابند (شکل ۴-۶) (Li et al., 2023b). شواهد صحرایی و میکروسکوپی در نمونه‌های مورد مطالعه، نشان از تولید مذاب در شرایط دمایی بالا دارد. با در نظر گرفتن داده‌های دما-فشار و ویژگی‌های کانی‌شناسی، به ویژه وجود کانی‌های پرتکتیک و واکنشی می‌توان نتیجه گرفت که ذوب در این منطقه ناهمخوان و با حضور آب (شکل ۱۱-A) (Incongruent melting) بوده است (Weinberg and Hasalova, 2015). یکی از واکنش‌های شاخص ذوب ناهمخوان در آمفیبولیت‌های مورد مطالعه، با توجه به نمودار شبه برش تعادلی فشار-دما (شکل ۱۰) به صورت زیر است:



واکنش‌های ذوب ناهمخوان نیز در منطقه مورد مطالعه، به تشکیل کانی‌های پرتکتیکی مانند تبلور گارنت و آمفیبول‌های نسل دوم انجامیده‌اند که خود نشان از ذوب ناهمخوان و پیچیده در سنگ‌های منطقه دارد. در مجموع، تطابق داده‌های فشار-دما با شواهد صحرایی و موقعیت نمونه‌ها (شکل ۱۰-۱۱) با مسیرهای دگرگونی باروین در نمودارهای فاز و عبور آن‌ها از مرز سالیدوس، تأیید کننده این است که میگماتیته شدن تحت شرایط دگرگونی ناحیه‌ای و در طی یک رویداد دگرشکلی-گرمایی روی داده است.

پایداری گسترده آمفیبول در بیشتر مراحل دگرگونی، معرف شرایط رخساره آمفیبولیت است؛ در حالی که حضور فاز مذاب در دماهای بالاتر، نشان‌دهنده آغاز ذوب بخشی (به میزان جزئی) در سنگ‌های مطالعه شده است (Sawyer, 2008). ذوب نسبی سبب تغییر سیستم‌های تک‌فازی (جامد) به سیستم‌های دو فازی (جامد + مذاب) می‌شود که آغاز آناتکسی (ذوب بخشی) مرز تغییر از فاز جامد-محور به فاز مذاب - محور را مشخص می‌کند (Spear, 1993). در واقع توزیع مذاب توسط دگرشکلی دینامیک کنترل شده است که به تاثیر مذاب از طریق شکست‌های ناشی از مذاب انجامیده است (Weinberg and Hasalova, 2015; Singh and Kushwaha, 2023).

ترکیب‌های گارنت، پلاژیوکلاز و مذاب در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، ورود به مرحله میگماتیته شدن را نشان می‌دهند و افزایش تدریجی میزان مذاب همراه با ناپدید شدن فازهای پایدار در دماهای پایین‌تر، گذار به آناتکسی را مشخص می‌کند. به‌طور کلی، آمفیبولیت‌های منطقه تحت تاثیر شرایط دگرگونی درجه متوسط تا رو به بالا قرار گرفته‌اند. پایداری گسترده آمفیبول و گارنت در دماهای متوسط و افزایش مذاب در دماهای بالاتر، با حضور سیال بیانگر نقش فرایندهای دگرگونی و ذوب بخشی در تحول حرارتی منطقه است. این یافته‌ها با شواهد سنگ‌نگاری و نقش موثر ذوب بخشی در این سنگ‌های متابازیتی و یا آمفیبولیتی را تایید می‌کند.

بر اساس فشار و دمای به دست آمده گرادیان زمین گرمایی حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلومتر ژرفا در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۱-C). به‌طور کلی می‌توان دریافت که دگرگونی و میگماتیته شدن در یک شرایط با درجه بالای دگرگونی (مرز بین رخساره‌های آمفیبولیت تا گرانولیت) اتفاق افتاده است. این دما با یک فشار متوسط با شرایط دگرگونی نوع باروین در ژرفای ۲۳ تا ۳۲ کیلومتری (با متوسط ژرفای ۲۷ کیلومتر) با پوسته زیرین هم‌خوانی دارد (Bucher and Grapes, 2011) از سوی دیگر هم می‌توان با استفاده از روش‌های متداول زمین‌دما فشارسنجی، شرایط فیزیکی حاکم در طی دگرگونی این سنگ‌ها را با به کارگیری شیمی کانی‌هایی مانند آمفیبول تعیین نمود. بنابراین استفاده از کانی کلیدی آمفیبول کلسیک (جدول ۱) در محاسبات فشار و دمای سنگ‌های دگرگونی، روش دیگر محاسبه دما و فشار نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد؛ این کانی به دلیل ترکیب شیمیایی متنوع و حساسیت ترمودینامیکی، شاخص قابل اعتمادی در تحلیل‌های دما فشارسنجی به‌شمار می‌رود (Holland and Blundy, 1994). بر اساس فشارسنجی به روش اسمیت (Schmidt, 1992) فشار به‌دست آمده برای آمفیبول منیزوهورنبلند در نمونه ST2-10، برابر با ۷/۱ کیلوبار است، سایر روش‌های فشارسنجی بر روی آمفیبول مانند هالیستر و همکاران (Hollister et al., 1987) و هامرستروم و زن (Hammarstrom and Zen, 1986) نیز به ترتیب بیشینه فشارهای ۶/۷ تا ۷/۲ کیلوبار را نشان می‌دهند، که این مقادیر با فشار محاسبه شده در روش نمودار شبه برش تعادلی فشار-دما سازگاری دارد. از سوی دیگر، با استفاده از روش دما سنجی رودلفی (Ridolfi, 2021)، دماهای به‌دست آمده برابر با ۷۰۵ تا ۸۰۱ درجه سانتی‌گراد است که در محدوده دمایی آمفیبول‌های درجه حرارت بالا قرار می‌گیرد. این محدوده دما و فشار به‌دست آمده برای آمفیبول‌های منیزوهورنبلند بر اساس روش‌های زمین‌دما-فشارسنجی شرایط دگرگونی دما بالا - فشار متوسط رخساره آمفیبولیت بالایی را نشان می‌دهند و با شرایط فیزیکی لازم برای میگماتیته شدن این سنگ‌ها تطابق دارد.

شواهد متعددی از هم‌زمانی دگرشکلی شکل‌پذیر و ذوب بخشی در آمفیبولیت‌های مورد مطالعه قابل مشاهده است. حضور ساختارهای S-C و S-C'، فابریک‌های خط‌وارگی و برگ‌وارگی‌های آناستاموزینگ در کنار کانی‌های ماهی‌گون آمفیبول و پلاژیوکلاز، ماکل‌های دگرشکلی در پلاژیوکلاز و خاموشی-موجی و تخته شطرنجی در کوارتز تاکید کننده دگرشکلی در دماهای بالا (حدود ۶۵۰-۸۳۰ درجه سانتی‌گراد) است، که با شرایط دگرگونی رخساره آمفیبولیت بالا

همکاران، ۱۳۹۸) دما ۶۵۰ تا ۸۵۰ و فشار ۵ تا ۹ کیلوبار، نزدیک به نتایج دما و فشار جنوب خاور الیگودرز گزارش شده است. در بخش‌های دیگر از پهنه سنندج-سیرجان مانند منطقه شهرکرد (نزدیکی روستای صادق آباد) به حدود ۸ تا ۱۲ کیلوبار و دما به بیش از ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (مهانی و همکاران، ۱۳۹۷) (Davoudian et al., 2008; Montemagni et al., 2023) و در بخش جنوبی پهنه مانند سیرجان، میگماتیته‌هایی که در ارتباط با سنگ‌های متابازیک شناسایی شده‌اند شرایط دمایی حدود ۷۰۰ °C و فشار حدود ۸ تا ۵ Kbar است (غفوری و معین زاده، ۱۴۰۲؛ Fatehi and Ahmadipour, 2018). بررسی روند تغییرات دما و فشار در امتداد شمال‌باختر به جنوب‌خاور پهنه سنندج-سیرجان نشان می‌دهد که به‌طور کلی، با حرکت از شمال و از جنوب پهنه به مرکز پهنه (شمال شهرکرد)، فشار دگرگونی افزایش یافته و دما نوسانات موضعی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از محاسبات دمافشارسنجی در ۲ نمونه از منطقه مورد مطالعه، فشارهایی در بازه ۵/۷ تا ۹ و ۶/۵ تا ۹ کیلوبار و دماهایی بین ۷۳۰ تا ۸۰۰ و ۷۸۰ تا ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند که در امتداد خط سالدوس و در مرز رخساره‌های آمفیبولیتی-گرانولیتی قرار می‌گیرند. تخمین ژرفای دگرگونی این نمونه‌ها بین ۲۳ تا ۳۲ کیلومتر، با میانگین ۲۷ کیلومتر به‌دست آمده که نشان از ژرفای شایان توجه دگرگونی دارد.

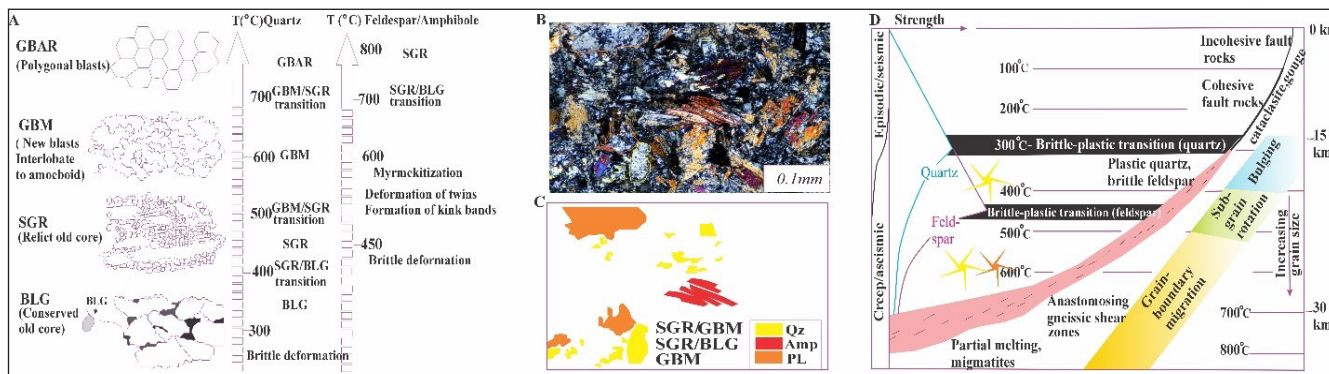
تطابق شواهد سنگ‌نگاری (شکل‌های ۶-۹) با بررسی و مقایسه نمودارهای فشار-دما (شکل‌های ۹ و ۱۱) و موقعیت زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه، الگوی مشابه با سایر پهنه‌های برشی فعال در پهنه سنندج-سیرجان نشان می‌دهند که در مناطق نیز میگماتیته شدن به‌طور موضعی توسط پهنه برشی تسهیل شده است (Shabanian et al., 2025; Miri et al., 2025; Jalali et al., 2024; and Neubauer, 2024). داده‌های دما-فشار به دست آمده از سنگ‌های میگماتیته پهنه سنندج-سیرجان از شمال تا جنوب این پهنه شرایط متفاوتی از دما و فشار را نشان می‌دهد.

در شمال‌باختر این پهنه جنوب سلماس (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۵) (همدان و بروجرد)، شرایط دگرگونی عمدتاً در محدوده رخساره آمفیبولیتی بوده و دماها بین ۶۴۰ تا ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشارها حدود ۲ تا ۶ کیلوبار تخمین زده شده‌اند (زارع شولی و همکاران، ۱۳۹۸؛ طهماسبی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Heydarianmanesh et al., 2016; Baharifar et al., 2019; Sepahi et al., 2019; Saki et al., 2020; Rahmani et al., 2021; Jafari., 2022; Miri et al., 2025). در مناطق مرکزی پهنه از جمله دورود و میدانک، شرایط دما و فشار بالاتری گزارش شده، به طوری که دما بین ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار در حدود ۴ تا ۷ کیلوبار متغیر بوده است (Sepidnameh et al., 2025). در گلپایگان (هاشمی و

جدول ۱- نتایج آنالیز نقطه‌ای با میکروپروپ الکترونی آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های آمفیبولیتی جنوب‌خاوری الیگودرز.

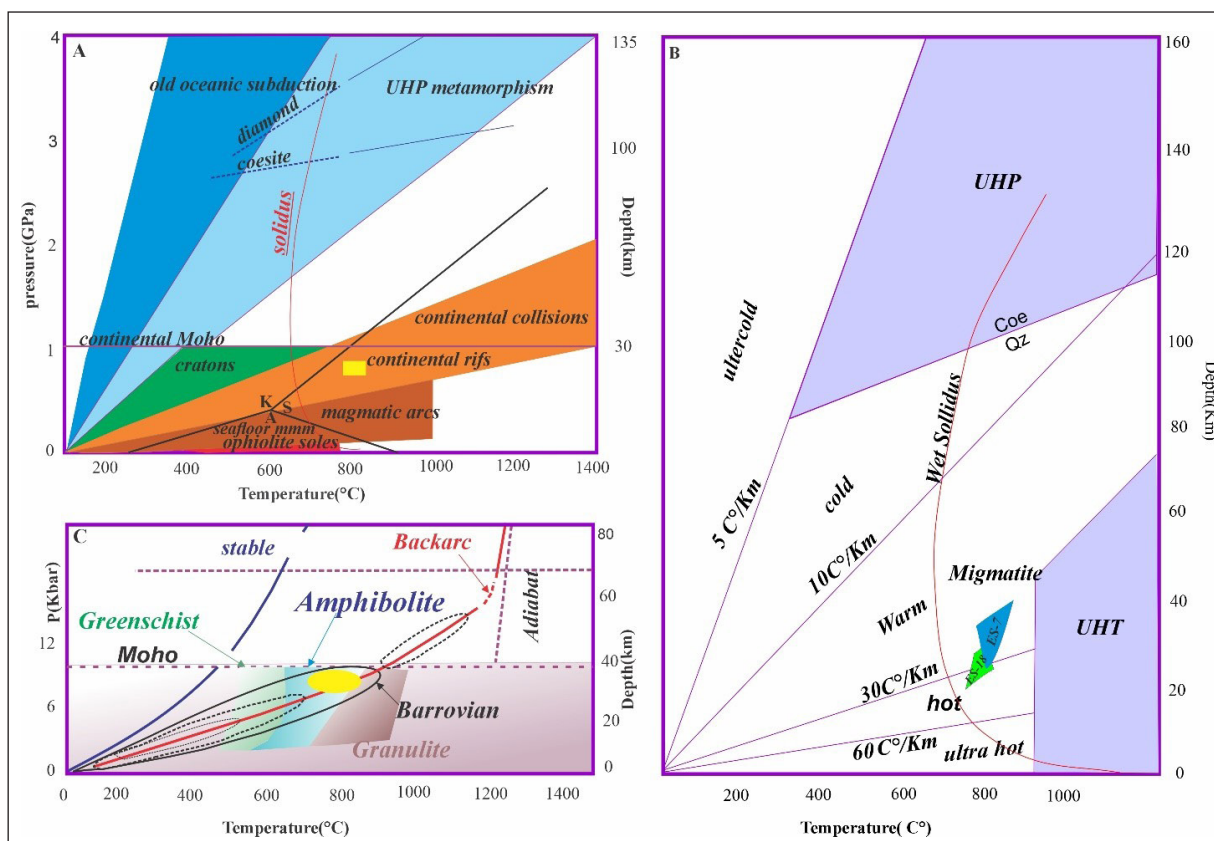
Table 1. Electron microprobe analysis results of amphiboles from amphibolitic rocks of the SE - Aligudarz region.

Sample	ST2-10-129	ST2-10-131	ST2-1A-210	ST2-1A-211	ST2-1A-212	ST2-1A-213	ST5-3-292	ST5-3-288
SiO ₂ (wt.%)	52.381	45.792	52.020	51.111	50.268	52.734	53.714	44.944
TiO ₂ (wt.%)	0.038	0.284	0.067	0.098	0.056	0.058	0.021	0.034
Al ₂ O ₃ (wt.%)	3.805	12.042	3.577	5.293	4.589	2.700	1.746	2.659
FeO (wt.%)	11.821	14.522	13.057	13.262	14.181	11.586	12.303	11.285
MgO (wt.%)	14.571	10.041	13.918	13.877	12.995	16.013	14.867	13.461
MnO (wt.%)	0.272	0.276	0.434	0.436	0.480	0.377	0.285	0.229
CaO (wt.%)	11.400	10.166	11.354	11.108	11.064	11.558	11.796	10.981
Na ₂ O (wt.%)	0.460	1.590	0.367	0.589	0.585	0.334	0.317	0.353
K ₂ O (wt.%)	0.107	0.313	0.096	0.181	0.168	0.074	0.070	0.068
Cr ₂ O ₃	0.068	0.144	0.008	0.013	0.012	0.010	0.014	0.045
Fe ₂ O ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BaO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Number of ions on the basis of 23 oxygen apfu								
Si	7.712	6.811	7.712	7.492	7.537	7.701	7.907	7.493
Al	0.660	2.111	0.625	0.914	0.811	0.465	0.303	0.522
Na	0.131	0.459	0.105	0.167	0.170	0.095	0.090	0.114
Mg	3.198	2.226	3.076	3.032	2.905	3.486	3.263	3.346
K	0.020	0.059	0.018	0.034	0.032	0.014	0.013	0.014
Ca	1.798	1.620	1.804	1.744	1.777	1.808	1.860	1.962
Ti	0.004	0.032	0.007	0.011	0.006	0.006	0.002	0.004
Cr	0.008	0.017	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.006
Mn	0.034	0.035	0.054	0.054	0.061	0.047	0.036	0.032
Fe ³	0.006	0.352	0.013	0.129	0.144	0.152	0.000	0.471
Fe ²	1.449	1.454	1.606	1.497	1.634	1.263	1.515	1.102
Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sum	6.648	6.254	6.684	6.670	6.730	6.872	6.781	7.051
Al ^{IV}	0.288	1.189	0.288	0.508	0.463	0.299	0.087	0.507
Al ^{VI}	0.372	0.922	0.337	0.406	0.348	0.166	0.216	0.016



شکل ۱۰- A) نمودار دگرشکلی دینامیک کوارتز- فلدسپار/ آمفیبول (Owona et al., 2013). B) یک نمونه فابریک‌های دگرشکلی کوارتز، پلاژیو کلاز و آمفیبول در منطقه مورد مطالعه (جنوب خاور الیگودرز). C) تصویر نمادین فابریک دگرشکلی و نوع آن برای کانی‌های کوارتز، پلاژیو کلاز و آمفیبول. D) نمودار تغییرات عمودی در پهنه‌های برشی و فابریک‌های پهنه برشی (Fossen and Cavalcante, 2017).

Figure 10. A) Dynamic deformation diagram of quartz–feldspar/amphibole (Owona et al., 2013). B) An example of deformation fabrics of quartz, plagioclase, and amphibole from the study area (southeast of Aligudarz). C) Schematic illustration of deformation fabrics and their types for quartz, plagioclase, and amphibole. D) Diagram of vertical variation in shear zones and associated shear zone fabrics (Fossen and Cavalcante, 2017).



شکل ۱۱- نمودارهای فشار-دما (شکل‌های A، B، C) شرایط دمایی و فشاری را که در آن میگماتیته شدن در آمفیبولیت‌ها آغاز می‌شود. A) با توجه به محدوده قرارگیری در نمودار دما-فشار می‌توان نتیجه گرفت که ذوب در این منطقه ناهمخوان و با حضور آب (Incongruent melting) بوده است. B) میگماتیته‌ها، همزمان با فرایندهای زمین‌ساختی در محدوده رخساره آمفیبولیت بالایی تا گرانولیت و گذر از خط سالیدوس پدید آمده‌اند (Zheng, 2019). C) میگماتیته شدن تحت شرایط دگرگونی ناحیه‌ای باروین و طی یک رویداد دگرشکلی-گرمایی (عبور آن‌ها از مرز سالیدوس) روی داده است (Hyndman, 2019).

Figure 11. Pressure–temperature (P–T) diagrams (A, B, C) illustrating the thermal and baric conditions under which migmatitization initiated in the amphibolites. A) Based on the position within the P–T field, it can be inferred that melting in this region was incongruent melting in the presence of water. B) The migmatites formed synchronously with (Zheng, 2019) C) Migmatitization occurred under Barrovian-type regional metamorphic conditions, during a deformation–thermal event associated with the transgression of the solidus boundary (Hyndman, 2019).

بالای ملانوسوم نسبت به لوکوسوم و ویژگی‌های ساختاری مانند بودین‌های پراکنده لوکوسومی، حضور کانی‌های پریکتیک (گارت و آمفیبول نسل دوم)، ساختارهای لوکوسوم-ملانوسوم، شواهد آشکار ذوب ناهمخوان، نشان‌دهنده رفتار سیستم بسته تا نیمه‌بسته و تشکیل میگماتیت‌های نوع متاکسیته است. بیانگر میگماتیته شدن در یک سیستم متاکسیته بسته تا نیمه‌باز، و در حضور سیال‌های گرمایی (H₂O) است. ساختارهای لخته‌ای و لکه‌ای، بودین‌شدن آمفیبول‌ها، و مرزهای پخش شده لوکوسوم با سنگ میزبان، نشان می‌دهد که ذوب‌بخشی به‌طور هم‌زمان با دگرشکلی در یک پهنه برشی فعال رخ داده است. نسبت بالای ملانوسوم نیز نشان‌دهنده تمرکز مذاب‌زدایی و تبلور مجدد در حضور جریان سیالات است. شرایط به دست آمده از بررسی، مطابق با فشارهای متوسط رو به بالا است و با توجه به موقعیت زمین‌ساختی منطقه در یک پهنه برشی فعال در پهنه سنندج-سیرجان، می‌توان گفت این سنگ‌های آمفیبولیتی میگماتیته شده در یک محیط زمین‌ساختی احتمالاً برخورد قاره‌ای ترجیحاً تا محیط‌های کششی به وجود آمده‌اند.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از دستاورد رساله دکتری نگارنده اول مقاله است، که با حمایت مالی دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد و همچنین این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح ۴۰۴۴۷۴۴ انجام شده است. نویسندگان مقاله ضمن تشکر از دانشگاه شهرکرد و بنیاد ملی علم ایران، از خانم پرفسور تانیا فورمن و دپارتمان علوم زمین در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا بابت یاری در آنالیزهای ماکروپروب و مسئولین محترم مجله و داوران محترم که سبب ارتقای کیفی مقاله شدند، کمال تشکر را دارند.

به طور کلی، فشار به دست آمده از منطقه جنوب‌خاور الیگودرز با دیگر بخش‌های پهنه سنندج-سیرجان نشان می‌دهد که یک روند افزایشی فشار از شمال و از جنوب به بخش میانی پهنه قابل تشخیص است. در حالی که بخش‌های شمالی پهنه، مانند همدان، فشارهای نسبتاً پایین تری (۴ تا ۶ کیلو بار) با دماهای متوسط گزارش شده‌اند که عمدتاً ناشی از نفوذ توده‌های گرانیتی ژوراسیک و کاهش ستبرای پوسته بوده‌اند (Shabanian and Neubauer, 2024). در بخش‌های مرکزی و جنوبی تر فشارها حدود ۸-۱۲ کیلو بار افزایش یافته‌اند که در کنار دماهای بالا (۷۰۰-۸۵۰ سانتی‌گراد) معرف شرایط دگرگونی در رخساره آمفیبولیت تا مرز رخساره گرانولیت هستند. این شرایط، نشان‌دهنده اثرات ترکیبی دگرشکلی شدید، گرا دیان حرارتی بالا، و فرایندهای زمین‌ساختی دوره ژوراسیک-سنندج-سیرجان است (Shabanian and Neubauer, 2024). از این رو، منطقه جنوب-خاور الیگودرز که معرف فرایندهای میگماتیته شدن مرتبط با ذوب ناهمخوان در پهنه‌های برشی فعال پهنه سنندج-سیرجان است و شواهد صحرایی و سنگ‌نگاری و زمین‌دما فشارسنجی ثبت شده در این مطالعه، با هم همخوانی کامل دارند.

۵- نتیجه گیری

مطالعه فرایندهای دگرگونی و میگماتیته شدن در آمفیبولیت‌های جنوب‌خاور الیگودرز، با تکیه بر شواهد صحرایی، داده‌های سنگ‌نگاری، ژئوشیمیایی، شیمی کانی و مدل‌های ترمودینامیکی، نشان می‌دهد که این سنگ‌ها تحت شرایط دمایی حدود ۶۵۰ تا ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای میانی ۶/۵ تا ۹ کیلو بار دگرگون و میگماتیته شده‌اند. این شرایط دگرگونی، گویای ژرفایی در حدود ۲۳ تا ۳۲ کیلومتر و قرارگیری در رخساره‌های آمفیبولیت بالایی تا گرانولیت است. درصد

کتابنگاری

- اسحاقی سیجانی، ا. داوودیان دهکردی، ع. شبانیان بروجنی، ن. ۱۳۹۱، ژئوشیمی آمفیبولیت‌های جنوب غرب چمن سلطان، الیگودرز (استان - لرستان). ژئوشیمی، ۱(۱)، ۵۹-۶۹. <https://sid.ir/paper/230840/en>
- انتظاری، ر.، علوی، س.ا.، قاسمی، م.ر.، ۱۳۹۵، ریزساختار در پهنه‌های میلونیته جنوب سلماس (شمال باختر ایران). علوم زمین، ۲۵(۹۹)، ۲۱-۳۸. [gsj.2016.40768/10.22071](https://doi.org/10.22055/aag.2019.26638.1878)
- بهاری‌فر، ع.، ماله میرچگینی، س.، محمودی، ش.، ۱۳۹۷، متاسوماتیسم و تشکیل کوندوم در میگماتیت‌های منطقه بروجرد، زون سنندج-سیرجان. مقاله پژوهشی. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. آبان، دوره ۸، شماره ۳، صص ۲۹-۴۲. <https://doi.org/10.22055/aag.2019.26638.1878>
- جعفری، س. ر. ایزدی کیان، ل.، ۱۴۰۳، ارتباط فابریک‌های دگرریختی و ذوب بخشی در میگماتیت‌های پلیته منطقه همدان، پهنه سنندج-سیرجان. پترولوژی، ۱۵(۱)، ۱۱۷-۱۳۸. <https://doi.org/10.22108/ijp.2024.140789.1323>
- زراع شولی، م.، طهماسبی، ز.، ساکی، ع.، ۱۳۹۸، مقایسه واکنش‌های متداول ذوب و روابط فازی در سنگ‌های رسی دگرگون شده منطقه تویسرکان و بروجرد. پژوهش‌های دانش زمین، ۱۰(۳۸)، ۱۶۵-۱۸۱. [ESRJ.10.2.165/10.52547](https://doi.org/10.22108/ijp.2017.21586)
- سپهلی، م.، جعفریان، م. ب.، عبدالمی، م. ر.، ۱۳۷۱، نقشه چهارگوش زمین‌شناسی الیگودرز مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور.
- طهماسبی، ز.، قاسمی فرد، ح.، احمدی خلجی، ا.، ایزدی کیان، ل.، ۱۳۹۶، زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی دایک‌های بازیک منطقه بروجرد (پهنه سنندج-سیرجان). پترولوژی، ۸(۲۹)، ۱۵۳-۱۷۰. [doi: 10.22108/ijp.2017.21586](https://doi.org/10.22108/ijp.2017.21586)
- غفوری، ل.، معین زاده، س. ح.، ۱۴۰۲، بررسی سنگ‌نگاری، شیمی کانی و زمین‌دما فشارسنجی آمفیبولیت‌های معدن گل‌گهر سیرجان، استان کرمان. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۳۱(۳)، ۴۶۷-۴۷۸. [doi: 10.61186/ijcm.31.3.467](https://doi.org/10.61186/ijcm.31.3.467)
- قربانی، ه.، حاجی‌علی‌اوغلی، ر.، موذن، م.، ۱۳۹۹، بررسی فرایند ذوب بخشی در میگماتیت‌های مافیک هورنبلنددار قره‌ناز، شمال غرب ایران. نشریه علوم زمین. دوره ۳۰ شماره ۱۱۷. [gsj.2019.200297.1699/10.22071](https://doi.org/10.22055/aag.2019.26638.1878)
- مهانی، ی.، داوودیان دهکردی، ع.، شبانیان بروجنی، ن.، ۱۳۹۷، بررسی زمین‌فشار-دماسنجی گارت آمفیبولیت‌های صادق آباد، شمال شهرکرد (زون سنندج-سیرجان). دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
- هاشمی، م.، داوودیان دهکردی، ع.، شبانیان بروجنی، ن.، عزیزی، ح.، ۱۳۹۸، بررسی سنگ‌نگاری پاراگنیس‌های شمال شرق گلپایگان: میگماتیته شدن و شواهد دگرگونی پسرورنده. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دوره ۲۷، شماره ۱، صص ۱۷۹-۱۹۰. <https://doi.org/10.29252/IJCM.27.1.179>

References

- Abdulla, K. L., Mohammad, Y. O., and Azizi, H., 2025. Migmatite marvels: Unveiling the mysteries of high-grade metamorphism in Qandol, Bulfat Mountain, and Kurdistan region of Iraq. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 17(2), 1-14. <https://doi.org/10.57647/j.ijes.2025.1702.14>.
- Baharifar, A. A., Whitney, D. L., Pang, K. N., Chung, S. L., and Iizuka, Y., 2019. Petrology, geothermobarometry, and PT path of spinel-bearing symplectite migmatites from the Simin area, Hamedan, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28(2), 275-298. <https://doi.org/10.3906/yer-1802-9>.
- Baharifar, A., Maleh Mirchegini, S., and Mahmoudi, Sh., 2018. *Metasomatism and corundum formation in the migmatites of the Boroujerd area, Sanandaj-Sirjan Zone. Advanced Applied Geology Journal, November, Vol. 8(3), pp. 29-42. https://doi.org/10.22055/aag.2019.26638.1878. (In Persian).*
- Bartoli, O., Carvalho, B. B., and Farina, F., 2024. Effectiveness of Ti-in-amphibole thermometry and performance of different thermometers across lower continental crust up to UHT metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179(6), 65. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02149-6>.
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of earth sciences*, 18(2), 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- Brown, M., 2008. Granites, migmatites and residual granulites: relationships and processes. <https://doi.org/10.3749/9780921294740.ch06>.
- Bucher, K., Grapes, R., 2011. Metamorphic grade. Petrogenesis of metamorphic rocks, 119-187.
- Costa, A., Caricchi, L., and Bagdassarov, N., 2009. A model for the rheology of particle-bearing suspensions and partially molten rocks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(3). <https://doi.org/10.1029/2008GC002138>.
- Davoudian, A. R., Genser, J., Dachs, E., and Shabanian, N., 2008. Petrology of eclogites from north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Mineralogy and Petrology*, 92(3), 393-413. <https://doi.org/10.1007/s00710-007-0204-6>.
- Davoudian, A. R., Genser, J., Neubauer, F., and Shabanian, N., 2016. ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran: implications for the tectonic evolution of Zagros orogen. *Gondwana Research*, 37, 216-240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.05.013>.
- Entezari, R., Alavi, S. A., and Ghassemi, M. R., 2016. *Microstructure in mylonitic zones of south of Salmas (north-west of Iran). Geosciences, 25(99), 21-38. https://sid.ir/paper/31902/en. (In Persian).*
- Eshaghi Sichani, E., Davodian Dehkordi, A., and Shabanian Boroujeni, N., 2012. *Geochemistry of amphibolites from Aligudarz in southwestern of Chaman-Soltan, Lorestan Province. Geochemistry, 1(1), 59-69. SID. https://sid.ir/paper/230840/en. (In Persian).*
- Fatehi, H., and Ahmadipour, H., 2018. Geochemistry and petrogenesis of metabasites from the Gol-e-Gohar Complex in southern Sanandaj-Sirjan metamorphic zone, South of Iran; Evidences for crustal extension and magmatism at early Palaeozoic. *Geologica Acta*, 16(3), 293-319. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2018.16.3.4>.
- Festa, V., Spiess, R., and Tursi, F., 2024. Garnet coalescence clogs melt extraction channels in migmatite. *Lithos*, 472, 107581. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107581>.
- Fossen, H., and Cavalcante, G. C. G., 2017. Shear zones—A review. *Earth-Science Reviews*, 171, 434-455. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.002>.
- Ghafoori, L., and Moeinzadeh, S. H. D., 2023. *Petrography, mineral chemistry and geothermobarometry of amphibolites in Gol-e-Gohar area (Sirjan), Kerman Province. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 31(3), 467-478. https://doi.org/10.61186/ijcm.31.3.467. (In Persian).*
- Ghasemi, A., and Talbot, C. J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6), 683-693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>.
- Ghorbani, H., Hajialilooghli, R., and Moazzen, M., 2020. *Study of partial melting processes in hornblende-bearing mafic migmatites of Qarahnaz, northwest Iran. Journal of Earth Sciences, 30(117), https://doi.org/10.22071/GSJ.2019.200297.1699. (In Persian).*
- Ghosh, S. K., and Sengupta, S., 1999. Boudinage and composite boudinage in superposed deformations and syntectonic migmatization. *Journal of Structural Geology*, 21(1), 97-110. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(98\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(98)00096-0).
- Goscombe, B. D., Passchier, C. W., and Hand, M., 2004. Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. *Journal of structural Geology*, 26(4), 739-763. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.015>.
- Goswami, S., Swain, S., Tiwari, R. P., Natarajan, V., and Saravanan, B., 2024. Abnormal enrichment of Th and U in melanosome of migmatite in Jivumdnubanda, Eastern Dharwar Craton, India: A unique occurrence in the world. *Ore and Energy Resource Geology*, 17, 100055. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2024.100055>.
- Halla, J., 2020. The TTG-amphibolite terrains of Arctic Fennoscandia: infinite networks of amphibolite metatexite-diatexite transitions. *Frontiers in Earth Science*, 8, 252. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00252>.
- Hammarstrom, J. M., and Zen, E. A., 1986. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American mineralogist*, 71(11-12), 1297-1313.

- Hashemi, M., Davoudian-Dehkordi, A., Shabani-Boroujeni, N., and Azizi, H., 2010. Petrography of paragneisses from northeast of Golpayegan: Migmatization and evidence of retrograde metamorphism. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 27(1), 179–190. <https://doi.org/10.29252/IJCM.27.1.179>. (In Persian).
- Heydarianmanesh, A., Tahmasbi, Z., and Ahmadi Khalaji, A., 2016. Mineral chemistry and thermobarometry of migmatitic rocks of Boroujerd area (north of Sanandaj-Sirjan zone). *Petrological Journal*, 7(25), 117-138. <https://doi.org/10.22108/IJP.2016.20836>.
- Holland, T., and Blundy, J., 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to mineralogy and petrology*, 116(4), 433-447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>.
- Hollister, L. S., Grissom, G. C., Peters, E. K., Stowell, H. H., and Sisson, V. B., 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American mineralogist*, 72(3-4), 231-239.
- Holness, M. B., 2008. Decoding migmatite microstructures. <https://doi.org/10.3749/9780921294740.ch04>.
- Hyndman, R. D., 2019. Origin of regional Barrovian metamorphism in hot backarcs prior to orogeny deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(1), 460-469. <https://doi.org/10.1029/2018GC007650>.
- Jafari, S. R., 2022. Study of structure and morphology of zircons in pelitic migmatites in Hamedan, Touyserkan and Boroujerd regions, Sanandaj-Sirjan zone. *Petrological Journal*, 12(4), 51-76. <https://doi.org/10.22108/IJP.2022.131054.1255>.
- Jafari, S. R., and Izadi Kian, L., 2024. Relationship between deformation structure and partial melting in pelitic migmatites of Hamaden region, Sanandaj-Sirjan Zone. *Petrological Journal*, 15(1), 117-138. <https://doi.org/10.22108/ijp.2024.140789.1323>. (In Persian).
- Jafari, S. R., Sepahi, A., and Osanai, Y., 2020. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology on migmatites from the Boroujerd region, Sanandaj-Sirjan zone, Zagros Orogen, Iran: provenance analysis and metamorphic age. *Geopersia*, 10(2), 367-380. <https://doi.org/10.22059/GEOPE.2020.288587.648501>.
- Jalali, N., Shabani, N., Davoudian, A., and Bendokht, M., 2024. Textural features indicating brittle-ductile deformation in Tutak mylonitic leucogranite, northeast of Shiraz, Sanandaj-Sirjan Zone. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 32(4), 759-772. <https://doi.org/10.61186/ijcm.32.4.759>.
- Johnson, T. E., Kirkland, C. L., Reddy, S. M., and Fischer, S., 2015. Grampian migmatites in the Buchan block, NE Scotland. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(7), 695-709. <https://doi.org/10.1111/jmg.12147>.
- Korhonen, F. J., Brown, M., Grove, M., Siddoway, C. S., Baxter, E. F., and Inglis, J. D., 2012. Separating metamorphic events in the Fosdick migmatite-granite complex, West Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(2), 165-192. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00961.x>.
- Kozlovsky, V. M., and Rusinov, V. L., 2008. Transformation of amphibolites and fractal dimension of migmatites of the Belomorian Complex as evidence for synchronism and periodicity of shear deformation and migmatization. In *Doklady Earth Sciences* (Vol. 419, No. 2, p. 511). Springer Nature BV. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08030355>.
- Kriegsman, L. M., 2001. Partial melting, partial melt extraction and partial back reaction in anatectic migmatites. *Lithos*, 56(1), 75-96. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00060-8](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00060-8).
- Lee, Y., Cho, M., and Kim, J., 2023. Fluid-fluxed partial melting of the Buncheon granitic gneiss in the Yeongnam Massif, Korea: Protracted (ca. 1.86–1.84 Ga) reworking of the Paleoproterozoic Korean arc. *Lithos*, 456, 107308. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107308>.
- Li, J., and Cao, S., 2025. Strain Localization and Seismic Properties in the Heterogeneous Ailaoshan-Red River Shear Zone, Southeast Asia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 26(2), e2024GC011929. <https://doi.org/10.1029/2024GC011929>.
- Li, W. C., Chen, R. X., Zheng, Y. F., Tang, H., and Hu, Z., 2016. Two episodes of partial melting in ultrahigh-pressure migmatites from deeply subducted continental crust in the Sulu orogen, China. *Bulletin*, 128(9-10), 1521-1542. <https://doi.org/10.1130/B31366.1>.
- Li, Y., Sun, S., Dong, Y., He, D., Cheng, C., Yang, Z., and Zhang, B., 2023a. Rheological behavior of amphibolite facies migmatites during orogenesis: A case study from the North Qinling Belt, China. *Lithos*, 454, 107240. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107240>.
- Li, Z., Zeng, Z., and Liu, Y., 2023b. Boudinage and the rheology of syntectonic migmatites in the high-strain Taili deformation zone, NE China. *Geosphere*, 19(1), 75-99. <https://doi.org/10.1130/GES02523.1>.
- Mahani, Y., Davoudian-Dehkordi, A., and Shabani-Boroujeni, N., 2018. Thermobarometric study of garnet amphibolites from Sadeqabad, north of Shahr-e Kord (Sanandaj-Sirjan Zone). In *Proceedings of the 10th Conference of the Iranian Society of Economic Geology*. (In Persian).
- Malek-Mahmoudi, F., Davoudian, A. R., Shabani, N., Azizi, H., Asahara, Y., Neubauer, F., and Dong, Y., 2017. Geochemistry of metabasites from the North Shahrekord metamorphic complex, Sanandaj-Sirjan Zone: Geodynamic implications for the Pan-African basement in Iran. *Precambrian Research*, 293, 56-72. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.003>.
- Miri, M., Alavi, S. A., and Sepahi, A. A., 2025. Interplay between polyphase deformation and metamorphism in the Hamedan Area, NW Sanandaj-Sirjan Zone, and Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 106655. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2025.106655>.
- Montemagni, C., Zanchetta, S., Malaspina, N., Javadi, H. R., and Zanchi, A., 2023. The onset of Neo-Tethys subduction in the early Jurassic: evidence from the eclogites of the North Shahrekord Metamorphic complex (Sanandaj-Sirjan Zone, W Iran). *Geological Magazine*, 160(12), 2067-2090. <https://doi.org/10.1017/S0016756824000098>.

- Montemagni, C., Zanchetta, S., Malaspina, N., Javadi, H. R., and Zanchi, A., 2023. The onset of Neo-Tethys subduction in the early Jurassic: evidence from the eclogites of the North Shahrekord Metamorphic complex (Sanandaj-Sirjan Zone, W Iran). *Geological Magazine*, 160(12), 2067-2090. <https://doi.org/10.1017/S0016756824000098>.
- Moradian, E., Shabaniyan, N., Davoudian, A. R., Dong, Y., and Cottle, J. M., 2023. Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of amphibolitic rocks from the Tutak metamorphic Complex, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 255, 105764. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2023.105764>.
- Owona, S., Ondo, J. M., and Ekodeck, G. E., 2013. Evidence of quartz, feldspar and amphibole crystal plastic deformations in the paleoproterozoic Nyong Complex Shear Zones under Amphibolite to Granulite conditions (west Central African Fold Belt, SW Cameroon). *Journal of Geography and Geology*, 5(3), 186. <https://doi.org/10.5539/jgg.v5n3p186>.
- Palummo, F., Perinelli, C., Bonechi, B., Fabbriozio, A., Misiti, V., Scarlato, P., and Gaeta, M., 2024. Experimental re-melting of a continental crust: probing the deep storage zone of Campi Flegrei and Vesuvius magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179(5), 41. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02127-y>.
- Patiño Douce, A. E., and Johnston, A. D., 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2), 202-218. <https://doi.org/10.1007/BF00310707>.
- Pereira, I., Dias, R., Bento dos Santos, T., and Mata, J., 2017. Exhumation of a migmatite complex along a transpressive shear zone: inferences from the Variscan Juzbado–Penalva do Castelo Shear Zone (Central Iberian Zone). *Journal of the Geological Society*, 174(6), 1004-1018. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-15>.
- Rahmani Javanmard, S., Verdecchia, S. O., Yakymchuk, C., and Broekmans, M. A., 2021. P–T–t path of the Boroujerd Complex, north-west Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran: Insights from phase equilibrium modelling and thermobarometry. *Geological Journal*, 56(6), 3396-3414. <https://doi.org/10.1002/gj.4135>.
- Renna, M. R., 2023. Reactive interaction between migmatite-related melt and mafic rocks: clues from the Variscan lower crust of Palmi (southwestern Calabria, Italy). *European Journal of Mineralogy*, 35(1), 1-24. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-1-2023>.
- Ridolfi, F., 2021. Amp-TB2: an updated model for calcic amphibole thermobarometry. *Minerals*, 11(3), 324. <https://doi.org/10.3390/min11030324>.
- Saki, A., Miri, M., and Oberhänsli, R., 2020. High temperature–low pressure metamorphism during subduction of Neo-Tethys beneath the Iranian plate: evidence for mafic migmatite formation in the Alvand complex (western Iran). *Mineralogy and Petrology*, 114, 539-557. <https://doi.org/10.1007/s00710-020-00721-z>.
- Saki, A., Moazzen, M., and Baharifar, A. A., 2012. Migmatite microstructures and partial melting of Hamadan metapelitic rocks, Alvand contact aureole, western Iran. *International geology review*, 54(11), 1229-1240. <https://doi.org/10.1080/00206814.2011.636639>.
- Sawyer, E. W., 2008. Atlas of migmatites (Vol. 9). NRC Research press.
- Sawyer, E. W., 2014. The inception and growth of leucosomes: microstructure at the start of melt segregation in migmatites. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(7), 695-712. <https://doi.org/10.1111/jmg.12088>.
- Schmidt, M. W., 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to mineralogy and petrology*, 110(2), 304-310. <https://doi.org/10.1007/BF00310745>.
- Sepahi, A. A., Jafari, S. R., Osanai, Y., Shahbazi, H., and Moazzen, M., 2019. Age, petrologic significance and provenance analysis of the Hamedan low-pressure migmatites; Sanandaj-Sirjan Zone, west Iran. *International Geology Review*, 61(12), 1446-1461. <https://doi.org/10.1080/00206814.2018.1517392>.
- Sepidnameh, N., Davoudian Dehkordi, A. R., and Shabaniyan Boroujeni, N., 2025. Mineral chemistry and Geothermobarometry of metabasites from Meydanak area, North of Doroud, Sanandaj-Sirjan Zone. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 35(3), 137. [10.22071/gsj.2025.520526.2192](https://doi.org/10.22071/gsj.2025.520526.2192).
- Shabaniyan, N., and Neubauer, F., 2024. From Early Jurassic intracontinental subduction to Early-Middle Jurassic slab break-off magmatism during the Cimmerian orogeny in the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 106153. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2024.106153>.
- Shooli, M. Z., Khalaji, A. A., Zhang, H. F., and Saki, A., 2020. The genetic relation between migmatites and granites, Tuyserkan area, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, western Iran: Constraints by mineralogy, geochemistry and thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, 89(1). <https://doi.org/10.2451/2020PM875>.
- Singh, S., and Kushwaha, A., 2023. Melt Enhanced Deformation in Migmatites of Higher Himalayan Crystallines (HHC), India. *Journal of the Geological Society of India*, 99(1), 9-12. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2261-9>.
- Soheyl, M., Jafarian, M. B., and Abdollahi, M. R., 1992. *Geological map of Aligudarz quadrangle, scale 1:100,000. Geological Survey & Mineral Exploration of Iran. (In Persian)*.
- Spear, F. S., 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure–temperature–time paths. *Mineralogical Society of America Monograph*. 352.

- Suarez, K. A., Williams, M. L., Grover, T. W., Jercinovic, M. J., and Pless, C. R., 2024. Evolution of layering in a migmatite sample: Implications for the petrogenesis of multidomain monazite and zircon. *American Mineralogist*, 109(5), 915-933. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8679>.
- Tahmasbi, Z., Ghasemifard, H., Ahmadi khalaji, A. and Izadikian, L., 2017. *Geochemistry and tectonic setting of basic dykes in the Boroujerd area (Sanandaj- Sirjan Zone)*. *Petrological Journal*, 8(29), 153-170. doi: 10.22108/ijp.2017.21586. (In Persian).
- Tao, L., Cao, S., Li, W., Cheng, X., Liu, J., Dong, Y., and Tian, Y., 2025. Water-fluxed melting and rheological weakening within the continental-scale Ailaoshan-Red River strike-slip shear zone, Western Yunnan, China. *Journal of Structural Geology*, 197, 105416. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2025.105416>.
- Vernon, R. H., 2011. Microstructures of melt-bearing regional metamorphic rocks. [https://doi.org/10.1130/2011.1207\(01\)](https://doi.org/10.1130/2011.1207(01)).
- Wang, L., Ji, M., GAO, X. Y., and Chen, X. J., 2025. Multistage crustal reworking in the Dabie orogen: Evidence from zircons in migmatites and retrograded eclogites. *Lithos*, 492, 107872. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107872>.
- Weinberg, R. F., and Hasalová, P., 2015. Water-fluxed melting of the continental crust: A review. *Lithos*, 212, 158-188. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.021>.
- Weinberg, R. F., Wolfram, L. C., Nebel, O., Hasalová, P., Závada, P., Kylander-Clark, A. R., and Becchio, R., 2020. Decoupled U-Pb date and chemical zonation of monazite in migmatites: The case for disturbance of isotopic systematics by coupled dissolution-reprecipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 269, 398-412. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.024>.
- Whitney, D. L., and Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1), 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.
- Xiao, L. L., Wu, C. M., Zhao, G. C., Guo, J. H., and Ren, L. D., 2011. Metamorphic P-T paths of the Zhanhuang amphibolites and metapelites: constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen. *International Journal of Earth Sciences*, 100, 717-739. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0522-5>.
- Yakymchuk, C., 2021. Migmatites. [dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00021-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00021-7).
- Yakymchuk, C., 2023. Prograde zircon growth in migmatites. *Journal of Metamorphic Geology*, 41(5), 719-743. <https://doi.org/10.1111/jmg.12715>.
- Yoshimura, Y., 2004. Mineral chemistry of the pelitic gneisses and migmatites from the Higo metamorphic rocks, west-central Kyushu, Japan. *Memoirs of the Faculty of Science, Kochi University. Ser. E, Geology*, 25, 9-33.
- Zare Shooli, M., Tahmasebi, Z., Saki, A., and Ahmadi Khalaji, A. (2019). *Comparison of melt reactions and phase relationships in metapelite rocks of Tuyserkhan and Boroujerd*. *Researches in Earth Sciences*, 10(38), 165-181. <https://doi.org/10.52547/ESRJ.10.2.165>. (In Persian).
- Zheng, Y. F., 2019. Subduction zone geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1223-1254. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.003>.