

Research Article

Deformation style change in the transition zone from mantle to crust: NW Khoy ophiolite

Mahdi Behyari*, Farzad Fathollahzadeh

Keywords: *Ophiolite, Khoy, Moho discontinuity, Northwest Iran, Deformation, Remote sensing*

1- Introduction

The Mohorovicic discontinuity, or "Moho," is the boundary between the crust and the mantle. This boundary may expose the surface of the ophiolite terrain (Mohorovičić, 1910). Therefore, discrimination of Moho footprint on the surface is essential for geodynamic interpretation and mineral exploration. Variations in temperature and pressure accompany the transition from the mantle to the crust. These caused to change in the deformation style.

In this research, we focused on the discrimination of the Moho transition zone in the Khoy ophiolite. Remote sensing technique applied for detecting rock unit change. The structural analysis was also conducted to distinguish the deformation style and variation of structures on the micro and macro scale and the mantle's transition to the crust.

2- Geology background

The Khoy ophiolite is a part of the Neo-Tethys oceanic crust in NW Iran. The geodynamic setting of this ophiolite is accompanied by uncertainty (Agard et al., 2005; Alavi, 1994; Mohajjel and Fergusson, 2000; Sarem et al., 2021). Some researchers believe this ophiolite has a Jurassic age and is part of Inner Iranian ophiolite (Khalatbari-Jafari et al., 2004), and others expressed that this ophiolite is the result of convergence between the Iranian and Arabian plates. However, the geochemical data and radiometric dating revealed a discrepancy in the source of the ophiolite. In the east part of the study region, deformed ophiolite with Jurassic age origin is island arc (Alavi, 1994; Behyari et al., 2018; Berberian and King, 1981; Ghazi and Hassanipak, 1999; Moghadam and Stern, 2015; Mohajjel et al., 2003). In the west part, ophiolite belongs to the oceanic crust and has Cretaceous age (Khalatbari-Jafari et al., 2003a). The ophiolite sequence in the study area consists of peridotite (harzburgite and dunite), gabbro, basalt and carbonate. These rocks were influenced by hydrothermal fluid and formed alteration rocks such as serpentine. Metamorphic facies are developed from greenschist to amphibolite in the study region.

2- Material and methods

For discrimination of Moho discontinuity in the first step, use the Aster Satellite image (Abrams et al., 1988; Hunt et al., 1974; Niromand et al., 2021; Rajendran et al., 2012). Next, the principal mineral of the rock unit specified and investigated the absorption and reflection region of spectra to detect significant ophiolite minerals. Applied band ratio and principal component analysis methods were applied for precise discrimination of harzburgite and dunite from gabbro and basalt. Several band ratio combinations are used for the discrimination of rock units. Selected bands were based on the rock composition's spectral characteristics of major minerals. In the first step for discrimination of harzburgite and serpentine from gabbro and basalt applied $(2+4)/3$, $(5+7)/6$, $(7+9)/8$ band ratio (Rajendran et al., 2012). In this band ratio,

* Corresponding author: m.behyari@gmail.com

DOI: [10.22055/AAG.2022.40767.2296](https://doi.org/10.22055/AAG.2022.40767.2296)

Received 2022-05-17

Accepted 2022-08-28

harzburgite is highlighted with a bluish colour. The second applied band ratio is (4/7, 3/4, 2/1) (Abdeen et al., 2001; Amer et al., 2010a). In this image, harzburgite was revealed with turquoise to purple colour, and finally, for discrimination of meta-basalt, meta-gabbro and serpentinite were used ((2+4)/3, (5+7)/6, (7+9)/8) band combination (Amer et al., 2010b). In the principal component analysis, the spectral response of target minerals is used to extract the image. This method is one of the best approaches to mapping rock units in the ophiolite terrain. The components of PC5, PC4 and PC2 were applied to extract the RGB colour map. The ASTER satellite image component PC2 revealed serpentinite and harzburgite, and component PC4 discriminated gabbro; thus, these two components are the best selection for mapping Moho discontinuity (Amer et al., 2010b; Rajendran et al., 2012). Structural analysis was conducted on two micro- and mesoscales for the track-changing deformation style. Some factors such as pyroxene mineral elongation, micro-folding and evidence of ductile and brittle deformation are documented on the micro-scale and in the mesoscale investigated the shear zone's and shear structures' orientation

3-Results and discussions

The Aster reflectance image showed serpentinitized harzburgites propagated in the two distinct parts of the study area and restricted by fault boundary (Khalatbari-Jafari et al., 2003b; Khalatbari-Jafari et al., 2004). In the SW of the study area, harzburgite contact is with un-deformed gabbro and basalt unit and NE with highly deformed amphibolite units.

A structured change accompanies temperature and pressure variation in the Moho transition zone. In the mantle, the origin rock unit formed a ductile shear zone with NW-SE trending, and this shear zone is cut by with NE-SW fault zone.

The pyroxene mineral elongated significantly in the thin section from mantle rock and implied high-temperature deformation conditions. In the ductile shear zone, folded pyroxene minerals were propagated. The preferred orientation of pyroxene minerals is also widely seen in the study region. In the crust unit with decreasing temperature, pyroxene minerals show brittle deformation and develop cracks in the mineral. In the crust, rock units formed hydrothermal alteration.

4-Conclusion

The remote sensing analysis indicated in the Khoy ophiolite mantle-related rock units exposed in the two distinct regions. Structural analysis revealed the transition from mantle to crust accompanied by temperature change, and deformation style converted from ductile to brittle. The analysis reveals that the Khoy region Moho transition zone was exposed in two regions with NW-SE trend.

References

- Abdeen, M.M., Allison, T., Abdelsalam, M.G., Stern, R.J., 2001. Application of ASTER band-ratio images for geological mapping in arid regions; the Neoproterozoic Allaqi Suture, Egypt. *Geological Society of America* 3, 289.
- Abrams, M., Rothery, D., Pontual, A., 1988. Mapping in the Oman ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images. *Tectonophysics* 151, 387-401. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90254-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90254-5).
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International journal of earth sciences* 94, 401-419. doi: <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238. doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Amer, R., Kusky, T., Ghulam, A., 2010a. Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data. *Journal of African Earth Sciences* 56, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004>.
- Amer, R., Kusky, T., Ghulam, A., 2010b. New methods of processing ASTER data for lithological mapping: examples from Fawakhir, Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 56, 75-82. doi: <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0539-0>.

- Behyari, M., Nouraliee, J., Ebrahimi, D., 2018. Structural control on the Salmas geothermal region, northwest Iran, from fractal analysis and paleostress data. *Acta Geologica Sinica-English Edition* 92, 1728-1738. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13673>.
- Berberian, M., King, G., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of earth sciences* 18, 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-163>.
- Ghazi, A.M., Hassanipak, A., 1999. Geochemistry of subalkaline and alkaline extrusives from the Kermanshah ophiolite, Zagros Suture Zone, Western Iran: implications for Tethyan plate tectonics. *Journal of Asian Earth Sciences* 17, 319-332. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(98\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(98)00070-1).
- Hunt, G.R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* 42, 501-513. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1440721>.
- Khalatbari-Jafari, M., Juteau, T., Bellon, H., Emami, H., 2003. Discovery of two ophiolite complexes of different ages in the Khoy area (NW Iran). *Comptes Rendus Geoscience* 335, 917-929. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00123-8).
- Khalatbari-Jafari, M., Juteau, T., Bellon, H., Whitechurch, H., Cotton, J., Emami, H., 2004. New geological, geochronological and geochemical investigations on the Khoy ophiolites and related formations, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 23, 507-535. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.07.005>.
- Moghadam, H.S., Stern, R.J., 2015. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia:(II) Mesozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Sciences* 100, 31-59. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.12.016>.
- Mohajjel, M., Fergusson, C., Sahandi, M., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00035-4).
- Niromand, M., Behyari, M., Rahimsouri, Y., 2021. Strain geometry and structural analysis of the Oshnavieh ophiolite (NW Iran): A new segment of the Neo-Tethys puzzle. *Iranian Journal of Earth Sciences* 13, 266-278. <https://doi.org/10.30495/ijes.2021.685394>.
- Rajendran, S., Al-Khribash, S., Pracejus, B., Nasir, S., Al-Abri, A.H., Kusky, T.M., Ghulam, A., 2012. ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman Mountains: Exploration strategy. *Ore geology reviews* 44, 121-135 <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.010>.
- Sarem, M.N., Abedini, M.V., Dabiri, R., Ansari, M.R., 2021. Geochemistry and petrogenesis of basic Paleogene volcanic rocks in Alamut region, Alborz mountain, north of Iran. *Earth Sciences Research Journal* 25, 237-245. <https://doi.org/10.15446/esri.v25n2.74025>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Behyari, M., Fathollahzadeh, F., 2023. Deformation style change in the transition zone from mantel to crust: NW Khoy ophiolite. *Adv. Appl. Geol.* 13(1), 144-160.

DOI: 10.22055/AAG.2022.40767.2296

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_17951.html

©2023 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

تغییر سبک دگرشکلی در پهنه گذر از گوشته به پوسته در افیولیت‌های شمال غرب خوی

مهدی بهیاری*

دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه ارومیه

فرزاد فتح اله زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه ارومیه

* m.behyari@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

چکیده

افیولیت‌ها به عنوان باقیمانده‌ای از پوسته اقیانوسی شامل بخش‌های فوقانی گوشته و زیرین پوسته هست که مرز بین این دو قسمت اصلی بر ناپیوستگی موهو منطبق می‌باشد. افیولیت خوی در شمال غرب ایران بخش باقیمانده پوسته اقیانوسی نئوتتیس می‌باشد. با توجه به اینکه افیولیت‌ها در بسیاری از موارد میزبان کانی‌های ارزشمندی همچون کرومیت می‌باشد شناسایی بخش‌های مختلف آن دارای اهمیت می‌باشد و همچنین تعیین سبک دگرشکلی از لحاظ تفسیرهای ژئودینامیکی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در این پژوهش از مطالعات ساختاری در مقیاس ریز و رخنمون به منظور مستند کردن تغییرات سبک دگرشکلی در گذر از واحدهای گوشته به پوسته استفاده شده است. همچنین از روش‌های مبتنی بر سنجش از دور همچون ترکیب‌های مختلف باندی و روش‌های آنالیز مولفه‌های اصلی جهت تفکیک واحدهای سنگی با منشا گوشته از پوسته استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داده که در محدوده مورد مطالعه برای جداسازی واحدهای هارزبورژیتی و دونیتی گوشته از گابروها و بازالت‌ها استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور همچون ترکیب باندی و آنالیز مولفه‌های اصلی بسیار کارساز است. همچنین در محدوده مورد مطالعه گذر از پوسته به گوشته همراه با تغییر سبک دگرشکلی است. در واحدهای متعلق به گوشته پهنه‌های برشی شکل‌پذیر با راستای شمال غرب - جنوب شرق گسترش یافته که سبب شکل‌گیری واحدهای آمفیبولیتی با ساختار میلونیتی شده است. کانی‌های پیروکسن در این واحدها طویل شده‌اند و ریزچین‌ها گسترش فراوان دارند. در واحدهای پوسته پهنه‌های گسلی شکنا با راستای شمال شرق - جنوب غرب شکل گرفته است. با توجه کنار هم قرار دادن شواهد فوق در محدوده خوی در دو منطقه برونزد یافته است که متعلق به نسل‌های مختلف افیولیت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: افیولیت، خوی، ناپیوستگی موهو، شمال غرب ایران، دگرشکلی، سنجش از دور

۱- مقدمه

بالشی می‌باشند.

شناسایی ناپیوستگی بین پوسته و گوشته در مناطق افیولیتی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشند، معمولاً غنی‌شدگی کرومیت و شکل‌گیری اندیس‌های معدنی مربوط به آن منطبق بر ناپیوستگی موهو می‌باشد، همچنین این بخش در بسیار از نقاط میزبان کانی‌زایی هیدروترمال می‌باشد که با دگرسانی گسترده سرپانتینیتی مشخص می‌شود.

گذر از پوسته به گوشته با توجه به تغییرات دمایی و گذر از دگرشکلی شکل‌پذیر به شکنا همراه با تغییرات در ساختارها در ریز مقیاس و بزرگ مقیاس می‌باشد که بررسی این ساختارها کمک زیادی به تشخیص ناپیوستگی موهو می‌کند همچنین با توجه به پیشرفت‌های گسترده در تکنولوژی‌های سنجش از دور و از طرفی هزینه‌بر و زمان‌بر بودن مطالعات صحرایی از این

ناپیوستگی موهو مرز زیرین پوسته عمدتاً سیلیکاتی از گوشته بازیک و الترابازیک می‌باشد. شناسایی این مرز نخستین بار توسط موهوروویچ با توجه به ناپیوستگی لرزه‌ای انجام گرفت (Mohorovičić 1910). در اثر فرآیندهای زمین‌ساختی مانند فرارانش یا فرایش ممکن است این ناپیوستگی بر روی زمین رخنمون پیدا کند. این رویداد اغلب در مناطق افیولیتی رخ می‌دهد که قسمتی از پوسته اقیانوسی که شامل بخش‌های مربوط به پوسته و گوشته هستند بر روی پوسته قاره‌ای رانده می‌شود.

در مناطق افیولیتی بخش‌های مربوط به گوشته شامل واحدهای سنگی الترامافیک از قبیل هارزبورژیت، دونیت هستند و سنگ‌های پوسته‌ای ترکیبی از گابروهای مافیک و گدازه‌های

هستند (Khalatbari-Jafari et al. 2004)، در نتیجه بسته شدن شاخه اقیانوسی باریکی که خرد قاره ایران مرکزی را احاطه کرده بود تشکیل شده است. برخی دیگر بر این باور هستند که این افیولیت‌ها به سن کرتاسه ادامه افیولیت‌های پهنه سندنجد سرجان هستند که در نتیجه همگرایی بین فلات ایران و صفحه عربی و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس بر روی حاشیه قاره‌ای قلات ایران رانده شده است (Berberian and King 1981; Alavi 1994; Ghazi and Hassanipak 1999; Mohajjel et al. 2003; Moghadam and Stern 2015; Behyari et al. 2018). داده‌های سن سنجی و آنالیزهای ژئوشیمیایی در این محدوده نشان داده است که منشأ افیولیت‌ها خوی یکسان نیست و در واقع دو دسته افیولیت با سن‌های متفاوت وجود دارد سری اول افیولیت‌های با منشأ جزایر میان اقیانوسی به سن ژوراسیک است و گروه دوم افیولیت‌های پوسته اقیانوسی هستند به سن کرتاسه فوقانی که توسط یک سری از رسوبات توریدایتی و ولکانیکی به همراه رسوبات لایه‌ای پلاژیک پوشیده‌اند (Khalatbari-Jafari et al. 2003; Pessagno et al. 2005). سکانس افیولیتی در این منطقه از پایین به بالا شامل پریدوتیت، گابرو، بازالت‌ها به عنوان دایک‌های لایه‌ای و کربنات‌های لایه‌ای فسیل‌دار را شامل می‌شود. که در برخی از قسمت‌ها شاهد حضور دونیت و هارزبورژیت هستیم. معمولاً در این منطقه فعالیت‌های گرمایی در امتداد ناپیوستگی واحد هارزبورژیتی با گابروهای بازیکی می‌باشد (شکل ۱b). بررسی سکانس افیولیتی خوی نشان داده است که رخساره‌های دگرگونی آمفیبولیتی تا شیست سبز در این منطقه توسعه قابل توجه دارد همچنین بر اساس داده‌های سن سنجی ^{40}Ar - ^{39}Ar و تعیین سن هورنبلاندهای بخش گابرویی سن 154.9 ± 1.0 میلیون سال را به دست آورده‌اند و این داده‌ها نشان داده است که سن فعالیت‌های آذرین افیولیت خوی در ژوراسیک پایانی شکل گرفته است (Ghazi and Hassanipak 1999). داده‌های سنی ^{40}Ar - ^{39}Ar هورنبلاندهای آمفیبولیت‌های زیرین سکانس افیولیتی سن 110-104 میلیون سال را نشان داده است که دلالت بر جایگیری افیولیت‌ها در کرتاسه فوقانی دارند (Khalatbari-Jafari et al. 2003). افیولیت‌های خوی را می‌توان به دو مجموعه دگرگونی و غیردگرگونی نیز تقسیم نمود. بخش دگرگونی در شرق محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است، به نظر می‌رسد این بخش از قطعات مختلف تکتونیکی به سن مزوزویک تشکیل شده است که به صورت تکتونیکی به حاشیه

روش‌ها می‌توان برای تعیین موقعیت ناپیوستگی موهو در مناطق افیولیتی استفاده کرد که اطلاعات بدست آمده از این مطالعات می‌تواند به عنوان شاخص قابل توجهی در پی جویی‌ها و تعیین مناطق با پتانسیل بالای کانه‌زایی استفاده کرد. افیولیت‌های خوی به عنوان بخشی از پوسته اقیانوسی نئوتتیس در شمال غرب ایران واقع شده است که گسترش آن تا مرز ترکیه امتداد دارد. این منطقه تحت تاثیر پهنه‌های برشی و گسل‌های متعدد تحت تاثیر قرار گرفته و دارای ساختار پیچیده‌ای می‌باشد (Haji Hosseinlou 2020). مطالعات ساختاری که در این منطقه انجام شده است نشان داده است که این منطقه تحت تاثیر دگرشکلی شکنا، شکل پذیر، نیمه شکنا قرار گرفته است (Haji Hosseinlou 2019). تغییرات رفتاری ساختارها در این منطقه نشان دهنده این است که در منطقه مورد مطالعه ساختارها تحت تاثیر شرایط متفاوت دما، فشار و عمق تشکیل شده است. همچنین شواهد عملکرد چندین فاز دگرشکلی در این منطقه ثبت شده است (Haji Hosseinlou 2019) با توجه به ارزش بالای تهیه نقشه مرز موهو بر روی زمین در این پژوهش سعی شده تا مرز واحدهای هارزبورژیت و دونیت با گابروهای مافیک و گدازه‌های بالشی تفکیک گردد. همچنین ساختارهای موثر در فرایش افیولیت‌های خوی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور با استفاده از قابلیت پردازش تصاویر ماهواره ASTER و خاصیت طول موج‌های محدوده‌های VNIR و SWER و بهره‌گیری از تکنیک‌های آنالیز مولفه-های اصلی PCA و نسبت باندهای Band ratio مرز موهو را جهت تعیین پهنه کانی‌زایی کرومیت و سایر منابع زمین‌گرمایی شناسایی گردد. سپس با استفاده تحلیل ریز ساختارها، ویژگی‌های این مرز گذر از پوسته به گوشته مورد بررسی قرار گرفته است (Amer et al. 2010a; Tangestani et al. 2011; Niromand et al. 2021).

۲- زمین شناسی منطقه

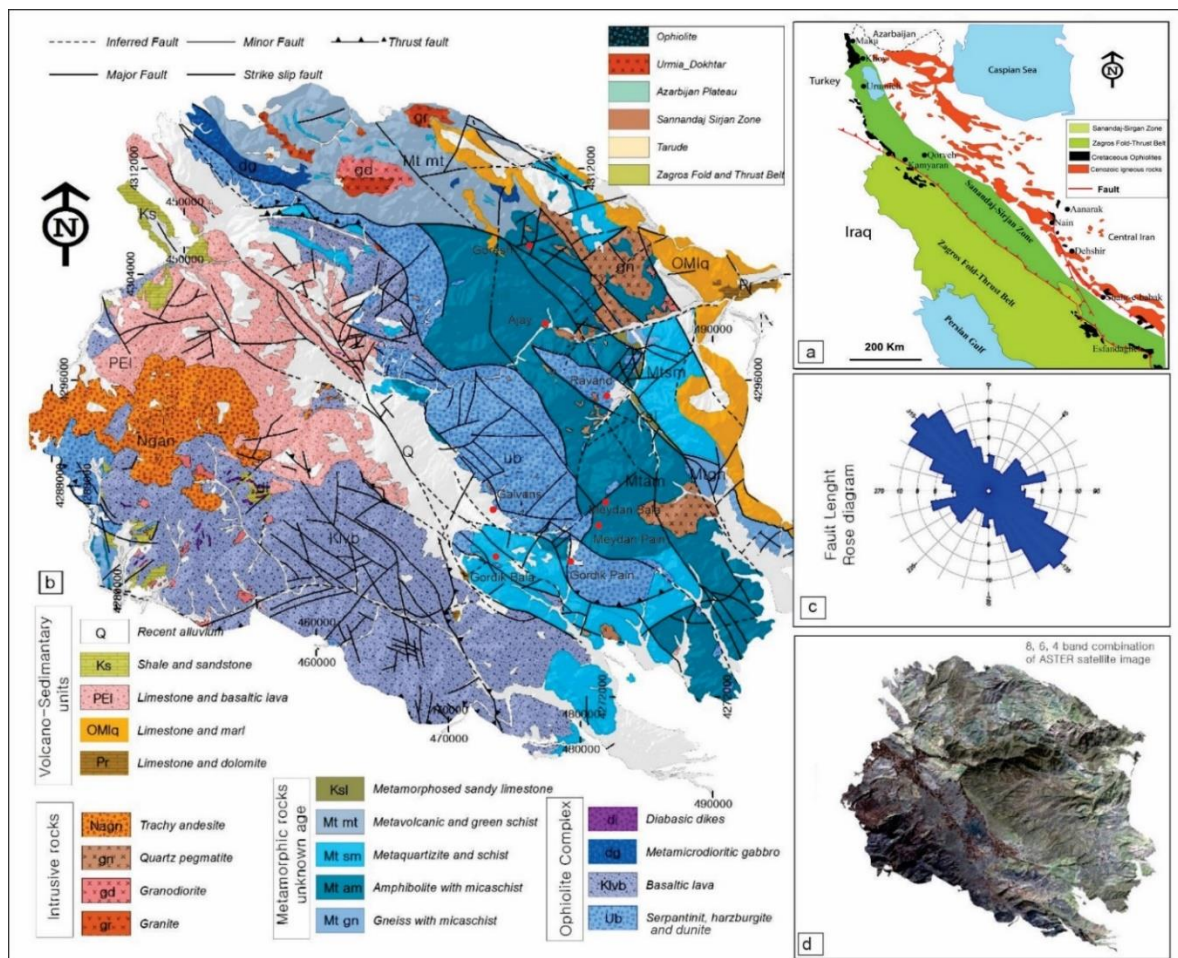
افیولیت‌های خوی یکی از بزرگترین کمپلکس‌های افیولیتی ایران را در بر می‌گیرد که مساحتی در حدود ۷۷۰ کیلومتر را شامل می‌شود (شکل ۱a). جایگاه ژئودینامیکی افیولیت‌های خوی دارای ابهامات زیادی است (Alavi 1994; Mohajjel and Fergusson 2000; Agard et al. 2005; Sarem et al. 2021). برخی از پژوهشگران بر این باور هستند این افیولیت‌ها به سن ژوراسیک جز افیولیت‌های داخلی ایران (همانند افیولیت‌های نایین، شهربابک، سبزواری و بند زیارت)

بررسی قرار گرفت (شکل ۲). در گام بعدی با توجه به اینکه گذر از گوشته به پوسته همراه با تغییر در دما و فشار محیط دگرشکلی می‌باشد بررسی‌های لازم بر روی ساختارها در بزرگ مقیاس و ریز مقیاس انجام گرفت. در مطالعات بزرگ مقیاس تغییرات رفتارشناسی ساختارها با توجه به تغییرات فشار و دما مورد بررسی قرار گرفته است. و در مقاطع نازک تاثیر این تغییرات بر روی دگرشکلی کانی‌ها انجام شده است با توجه به اینکه در واحدهای سنگی گوشته (هارزبورژیت و دونیت) و پوسته (گابرو) کانی‌های پیروکسن، الیوین و پلاژیوکلاز به صورت مشترک می‌باشد دگرشکلی این کانی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

جنوب غربی بلوک ایران در راستای گسل‌های که عمدتاً شمال غرب- جنوب شرق (شکل ۱c) افزوده شده است در واقع این افیولیت‌های دگرگونی بخشی از لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس می‌باشد. بخش دوم افیولیت‌های جوان غیر دگرگونی به سن کرتاسه پسین می‌باشد که بیشتر در غرب محدوده مورد مطالعه قرار دارد.

۳- مواد و روش‌ها

برای شناسایی ناپیوستگی موهو در افیولیت‌های خوی ابتدا با بررسی تصاویر ماهواره‌ای (شکل ۱d) و محدوده‌های طیف بازتاب و جذب کانی‌های اصلی تشکیل دهنده واحدهای سنگی پوسته و گوشته موقعیت تقریبی این مرز در منطقه مورد مطالعه مورد



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (a) پهنه‌های ساختاری ایران و قرارگیری افیولیت‌های خوی در شمال غربغرب ایران، (b) نقشه بازنگری شده زمین‌شناسی منطقه بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های صحرایی، (c) رزیدیاگرام جهت‌گیری شکستگی‌ها و گسل‌ها در محدوده مورد مطالعه و (d) تصویر ماهواره‌ای ASTER منطقه بر اساس ترکیب باندی ۸-۶-۴.

Fig. 1- Geological map of study area. (a) Iran structural zone and ophiolite unite in the NW Iran. (b) revised geological map based of satellite image and (c) Rose diagram of faults and lineaments in studied area, and (d) Aster satellite image 8-6-4 bands combination.

دانه‌ها است استفاده می‌شود (Amer et al. 2010b). این روش برای تهیه نقشه‌های زمین شناسی در بسیاری از مناطق جهان نتایج قابل قبولی را فراهم آورده است (Abdeen et al. 2001; Bedell 2001; Hewson et al. 2001; Rajendran et al. 2012). انتخاب باندهای مورد نظر در این روش انتخاب باندهای مناسب بر اساس ویژگی‌های طیفی کانی‌ها انجام می‌شود. در روش نسبت بانندی برای رسیدن به بهترین تفکیک واحدهای سنگی گوشته به پوسته از ترکیبی از نسبت های با طول موج کوتاه (3/1, 4/1 or 4/2)، طول موج‌های بلند (5/7) و ترکیبی از طول موج‌های بلند و کوتاه (5/4 or 5/3) استفاده شده است. این نسبت‌های بانندی تباین طیفی سنگ‌های پوسته و گوشته را برپایه جذب طیفی کانی‌های آن فراهم می‌آورد.

برای شناسایی بخش‌های هارزبورژیتی متعلق به گوشته در افیولیت‌های خوی از توانمندی نواحی VNIR و SWIR تصاویر ماهواره ای ASTER استفاده شده است. نسبت بانندی (4/7, 4/3×2/3, 4/1) و (4/7, 3/4, 2/1) توسط (Abdeen et al. 2001) برای نقشه برداری از سکانس افیولیتی در جنوب شرق صحرای مصر پیشنهاد گردیده است. این نسبت بانندی این امکان را می‌دهد که واحدهای سرپانتینی را از دیگر واحدهای الترامافیک جدا کرد.

در روش آنالیز مولفه‌های اصلی پاسخ طیفی کانی‌های هدف در هارزبورژیت‌ها مانند الیوین، پیروکسن‌ها از روی ماتریس بردار ویژه برای محاسبه مولفه‌های اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳). با استفاده از این روابط می‌توان مشخص کرد که کدام یک از مولفه‌های اصلی بیشترین اطلاعات طیفی مربوط به کانی‌های هدف را دارا می‌باشد. معمولاً عمده اطلاعات طیفی در سه مولفه اصلی اول قرار دارد به همین دلیل برای تفکیک لیتولوژی‌های مربوط به گوشته از لیتولوژی‌های مربوط به پوسته از اطلاعات این سه مولفه استفاده شده است مولفه‌های چهارم تا ششم کمتر از یک درصد اطلاعات طیفی ذخیره می‌شود، البته اطلاعات این مولفه‌ها برای تشخیص برخی از کانی‌زایی‌ها یا تشخیص برخی لیتولوژی سودمند می‌باشد. بنابراین ترکیب مولفه‌های مرتبه پایین با مولفه‌های مرتبه بالا می‌تواند رویکرد قابل توجه برای شناسایی اطلاعات طیفی برخی کانی‌ها باشد.

تصاویر مستخرج از اطلاعات طیفی ASTER در محدوده‌های افیولیتی که واحدهای سنگی مشابه خوی دارد و شامل واحدهای سنگی هارزبورژیت‌های سرپانتینی و گابرو متابازلت هستند با توجه به اینکه هارزبورژیت یکی از مهمترین بخش‌های

برای تفکیک بهتر هارزبورژیت و دونیت از گابروهای مافیک و گدازه‌های بالشی به منظور تشخیص ناپیوستگی موهو از داده‌های ماهواره ASTER استفاده شده است. سیستم تصویر برداری ASTER در سال ۱۹۹۹ راه اندازی شد. بر روی مدار خورشید آهنگ با شیب تقریبی ۹۸٫۲۰ و در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد، همچنین چرخه تکرار ۱۶ روزه را دارا می‌باشد. داده‌هایی که مورد استفاده قرار گرفته است مربوط به ۱۴ باند ماهواره ASTER در سطح B1 می‌باشد که در تاریخ ۲۰۰۵/۵/۲۱ با پوشش کمتر از ۱۰٪ ابر ثبت شده است در جدول (۱) مشخصات سنجنده ASTER بیان شده است. بر روی تصاویر تصحیحات رادیومتریک و هندسی اعمال شده است. این پروژه به وسیله UTM و WGS 1984 زمین مرجع‌سازی شده است. داده‌های ASTER شامل سه محدوده با طول موج VNIR با دقت مکانی ۱۵ متر SWIR با دقت مکانی ۳۰ متر و TIR با دقت مکانی ۹۰ متر می‌باشند. در این مطالعه ۹ باند SWIR-VNIR برای شناسایی مرز موهو در افیولیت‌های خوی مورد پردازش قرار گرفته است.

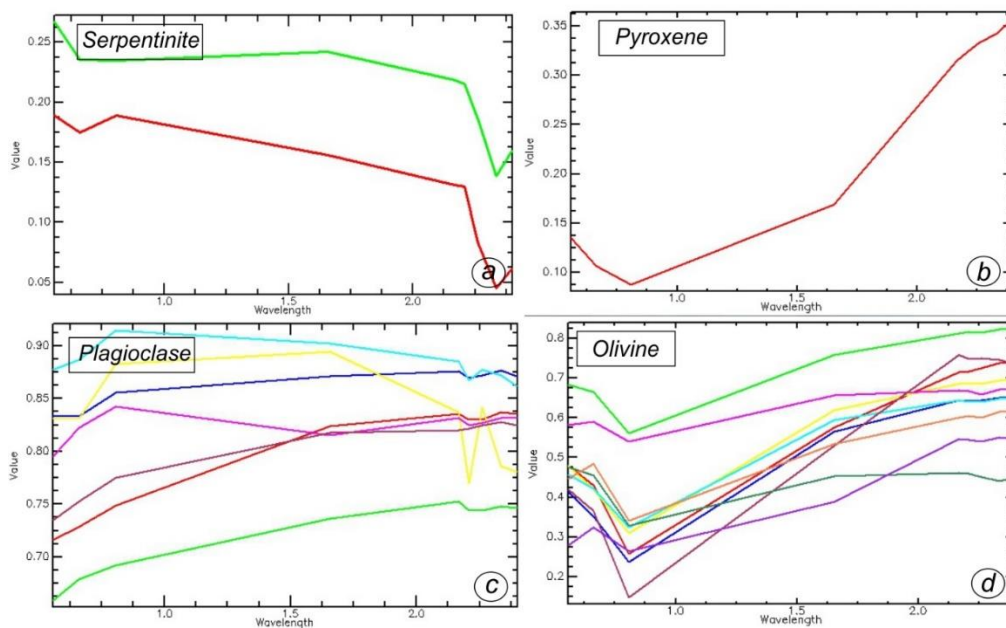
۳-۱- مشخصات طیفی افیولیت‌ها

بازتاب طیفی سنگ‌ها بستگی به ترکیب کانی‌شناسی آنها دارد که معمولاً ترکیبی از کل کانی‌هایی است که در سطح آن دچار فرسایش و هوازدگی شده است. بازتاب طیفی اولیه مطالعات مهمی را در مورد علل تغییرات طیفی ارائه می‌دهد مانند بررسی‌های ارائه شده از سنگ شناسی افیولیتی توسط (Hunt 1977). برای مشخص کردن مساحت منطقه پریدوتیتی و کانی‌های دونیت و هارزبورژیت از دیگر مناطق افیولیتی از قابلیت‌های تصاویر ASTER استفاده گردید بازتاب طیفی کانی‌های اصلی در سنگ‌های افیولیتی مورد بحث در چندین تحقیق قبلی به عنوان مثال: (Abrams et al. 1988; Hunt 1977; Rajendran et al. 2012; Niromand et al. 2021). استفاده از روش‌های نسبت بانندی (band ratio) و روش آنالیز مولفه اصلی (PCA) این امکان را به ما می‌دهد که درک درست‌تری از پراکندگی واحدهای سنگی و به تبعیت از آن ناپیوستگی موهو در منطقه داشته باشیم. در این مطالعه از نقشه‌های زمین‌شناسی و مطالعات میدانی برای پشتیبانی از سنجش از دور استفاده شده است.

تصاویر نسبت بانندی معمولاً برای حذف اثر تغییرات توپوگرافی و تفاوت در روش‌شناسی تصویر که ناشی از تغییرات سائز

گوشته به پوسته همراه است با ظهور گابروها و متابازالت‌ها که عمدتاً شامل پیروکسن‌ها با جذب طیفی در ۲,۳۵ میکرومتر و (شکل ۲ b) و پلاژیوکلازهای کلسیم دار با جذب در محدوده‌های ۲ و ۲,۴ میکرومتر هستند (شکل ۲ c) همچنین مقادیر کم الیوین در این سنگ‌ها دارای جذب در محدوده‌های ۰.۸ تا ۱,۲ میکرومتر است (شکل ۲ d).

مربوط به قسمت گوشته‌ای افیولیت‌ها می‌باشد شناسایی این واحد دارای اهمیت زیادی می‌باشد. بررسی مقاطع نازک در محدوده مورد مطالعه نشان داده است که سرپانتین‌ها مهم‌ترین مولفه تشکیل دهنده هارزبورژیت‌های سرپانتینی است. سرپانتین‌ها در دو طول موج ۱,۴ تا ۲,۳۵ میکرومتر دارای جذب قوی می‌باشد (Abrams et al. 1988). (شکل ۲ a). عبور از



شکل ۲- پاسخ طیفی کانی‌های مورد مطالعه جهت بازسازی لیتولوژی (a) رفتار طیفی سرپانتین‌ها (b) رفتار طیفی پیروکسن‌ها (c) رفتار طیفی پلاژیوکلازها و (d) رفتار طیفی اولیوین

Fig. 2. Spectral response of target minerals (a) Spectral response of serpentine. (b) Spectral response of pyroxene. (c) Spectral response of plagioclase, and (d) spectral response of olivine

آبی (CD) بازالت به رنگ سبز مایل به زرد (E) پریدوتیت به رنگ صورتی روشن و بنفش روشن (CD) دونیت و هارزبورژیت، سبز با لکه-های آبی (E) پیلولاوا، نواحی بنفش رنگ دایک‌های ورقه‌ای، بنفش کمرنگ، گابرو (G) و آهک‌های کوتاه‌تری (Q) با لکه‌های زرد رنگ دیده می‌شود. از نسبت باندی (4/7, 4/1, 2/3×4/3) ترکیب صورتی روشن و بنفش روشن (CD) دونیت و هارزبورژیت، سبز با لکه-های آبی (E) پیلولاوا، نواحی بنفش رنگ دایک‌های ورقه‌ای، بنفش کمرنگ، گابرو (G) و آهک‌های کوتاه‌تری (Q) با لکه‌های زرد رنگ دیده می‌شود.

از نسبت باندی (4/7, 3/4, 2/1) برای تمایز واحدهای هارزبورژیتی و واحدهای گابرویی از دیگر واحدهای استفاده شده است. (Amer et al. 2010) و همکاران (۲۰۱۰) نسبت باندی (7+9)/8، (5+7)/6، (2+4)/3 معرفی کرد که باندهایی با ویژگی‌های جذب در مخرج و باندهای با ویژگی بازتاب مشابه در صورت‌تقرار می‌گیرند و به منظور تفکیک متابازالت، متاگابرو و سرپانتینیت به کار برده می‌شود که سرپانتینیت به رنگ صورتی با لکه‌های

در نسبت باندی (4/7, 4/1, 2/3×4/3) ترکیب صورتی روشن و بنفش روشن (CD) دونیت و هارزبورژیت، سبز با لکه-های آبی (E) پیلولاوا، نواحی بنفش رنگ دایک‌های ورقه‌ای، بنفش کمرنگ، گابرو (G) و آهک‌های کوتاه‌تری (Q) با لکه‌های زرد رنگ دیده می‌شود.

از نسبت باندی (4/7, 3/4, 2/1) برای تمایز واحدهای هارزبورژیتی و واحدهای گابرویی از دیگر واحدهای استفاده شده است. (Amer et al. 2010) و همکاران (۲۰۱۰) نسبت باندی (7+9)/8، (5+7)/6، (2+4)/3 معرفی کرد که باندهایی با ویژگی‌های جذب در مخرج و باندهای با ویژگی بازتاب مشابه در صورت‌تقرار می‌گیرند و به منظور تفکیک متابازالت، متاگابرو و سرپانتینیت به کار برده می‌شود که سرپانتینیت به رنگ صورتی با لکه‌های

داده شده است. این واحد سنگی در دو بخش از محدوده مورد مطالعه گسترش قابل توجهی دارد یکی در قسمت مرکزی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که با راستای تقریبی شمال غرب- جنوب شرق قرار گرفته است. و دیگری در همان راستا در قسمت جنوب غربی منطقه واقع شده است. گابروهای دگرگون Gr شده با رنگ نزدیک به قرمز و نارنجی در مجاورت واحد هارزبورژیتی با امتداد شمال غرب- جنوب شرق قرار گرفته است و مرز مشخصی با این واحد می‌سازد. در قسمت جنوب غرب نقشه لایه مجاور هارزبورژیت‌ها مجموعه‌ای از دایک‌های دیابازی D با رنگ فیروزه‌ای است که بر روی آن پیلولواها P با رنگ آبی کم رنگ قرار گرفته است. با توجه به تفسیری که بر روی این تصویر انجام گرفته در محدوده افیولیتی خوی دو مجموعه هارزبورژیتی جدا از هم شناسایی شده است که با روند شمال غرب جنوب شرق قرار گرفته است.

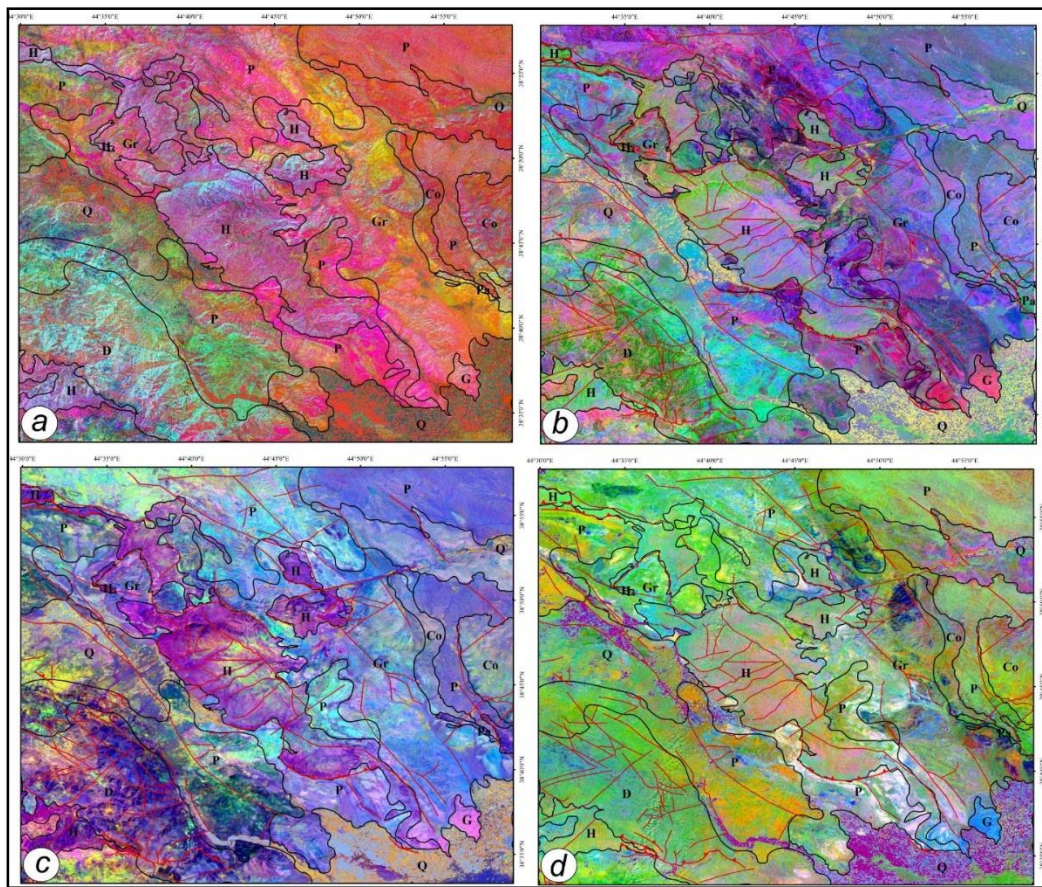
نسبت باندی دیگری برای تفکیک واحدهای افیولیتی استفاده شده است (4/7, 3/4, 2/1) می‌باشد (Amer et al. 2012; Rajendran et al. 2010b). در این تصویر هارزبورژیت‌ها به رنگ فیروزه‌ای تا ارغوانی دیده می‌شود و گابروهای لایه‌ای با رنگ آبی تیره مشخص هستند. در این تصویر تفکیک مجموعه هارزبورژیت که در جنوب غرب محدوده مورد مطالعه قرار دارد با دشواری همراه است و تقریباً به رنگ سبز روشن دیده می‌شود (شکل ۳b). در نهایت آخرین نسبت باندی که استفاده شده است ترکیب (4/7, 4/1, 2/3×4/3) می‌باشد. در این ترکیب هارزبورژیت‌ها به رنگ بنفش یا لکه‌های کوچک آبی رنگ و سبز در مرکز و جنوب غرب محدوده مورد مطالعه قابل تفکیک می‌باشد گابروهای مربوط به پوسته با رنگ فیروزه- ای مشخص شده است و پیلولواها تقریباً به رنگ آبی کم رنگ دیده می‌شود. برخلاف نسبت باندی قبلی در این ترکیب هم مرز گوشته به پوسته کاملاً مشخص است که در راستای شمال غرب- جنوب شرق در دو قسمت مجزا قرار گرفته است (شکل ۳b). در روش آنالیز مولفه‌های اصلی از ترکیبی از مولفه‌های مرتبه پایین و بالا برای شناسایی مرز موهو استفاده شده است. در تصویر نتیجه هارزبورژیت‌ها به رنگ صورتی کم‌رنگ همراه با لکه‌های سفید دیده می‌شود. گابروها به رنگ سبز و دایک‌های دیابازی به رنگ آبی فیروزه‌ای مشخص شده است (شکل ۳c, d).

چهارمین مولفه (PCA4) گابروهای بازیک را در مناطق افیولیتی مشخص می‌کند بنابراین مقایسه نقشه‌های که بر مبنای PC2 و PC4 ایجاد شده است اطلاعات مفیدی را برای مشخص کردن پهنه گذر از گوشته به پوسته را در اختیار قرار می‌دهد. بررسی‌های انجام شده همچنین مشخص کرده است که استفاده از اطلاعات طیفی مولفه پنجم نیز در جداسازی متابازالت‌ها توانمندی مناسبی دارد (Amer et al. 2010b; Rajendran and Nasir 2019).

۴- بحث

تعیین موقعیت ناپیوستگی موهو و مرز گذر از گوشته به پوسته چه از نظر گسترش پهنه‌های کانه‌زایی مانند کرومیت‌ها و چه از لحاظ مباحث ژئودینامیکی دارای اهمیت زیادی می‌باشد (Abdullah et al. 2018; Rajendran and Nasir 2019; Eslami et al. 2021; Jouselin et al. 2021; Mehdikhani and Imamipour 2021). در منطقه خوی پژوهش‌هایی که بر مبنای تحلیل‌های ساختاری و یا داده‌های سن‌سنجی انجام گرفته نشان داده است که در این منطقه دو بخش شبه افیولیتی وجود دارد که از لحاظ ویژگی‌های ساختاری و سن تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند (Khalatbari-Jafari et al. 2003; Khalatbari-Jafari et al. 2004). در بخش شرقی واحدهای الترامافیک با چندین نسل دگرشکلی دیده می‌شود که اساساً تعلق آن به پوسته اقیانوسی با ابهام مواجه هست و در قسمت شرقی بخش افیولیتی جوان تر قرار دارد که سن آن کرتاسه فوقانی است و دگرشکلی چندانی در آن دیده نمی‌شود. بنابراین یکی از سوالات اساسی در منطقه افیولیتی خوی این است که آیا مرز موهو در یک محدوده دیده می‌شود یا در چند منطقه دیده می‌شود و اگر در چند منطقه دیده می‌شود آیا بر اثر فعالیت‌های گسل تکرار اتفاق افتاده است یا مرزهای ناپیوستگی موهو مستقل از یکدیگر هست.

اولین ترکیب نسبت باندی که برای تفکیک ناپیوستگی موهو مابین واحد هارزبورژیتی و سرپانتینی از گابروها و بازالت‌ها استفاده شده است نسبت باندی (7+9)/8, (5+7)/6, 3, (2+4)/ می‌باشد (Amer et al. 2010b; Rajendran et al. 2012). در این تصویر واحد هارزبورژیتی و دونیتی به رنگ تقریبی نیلی مشخص است که با نماد H نشان



شکل ۳ - واحدهای هارزبورژیتی و دونیتی با (H)، واحدهای گابرویی دگرگونی (Gr)، دایک‌های دیابازی (D)، پیلولاوا (P) نشان داده شده است. شکل (a) نسبت باندهای T $(2+4)/3, (5+7)/6, (7+9)/8$ ، شکل (b) نسبت باندهای $(4/7, 3/4, 2/1)$ ، شکل (c) RGB حاصل از PC542 و شکل (d) RGB حاصل از PC542 ارائه شده است.

Fig. 3: Harzburgite and dunit unites indicated by (H), metamorphic gabbro (Gr), Diabaz dike (D), and pillow lava (P). (a) $(2+4)/3, (5+7)/6, (7+9)/8$ band ratio. (b) $(4/7, 3/4, 2/1)$ band ratio (c) RGB image of PC542, and (d) RGB image of PC542.

واحدهای آمفیبولیتی نفوذ کرده در اثر دگرشکلی در منطقه چین خورده است این آپلیت‌های گرانیتی توسط گسل‌های شکننا قطع شده و در برخی موارد پهنه‌های برشی شکننا نیز شکل گرفته است جهت گیری کلی این گسل‌ها در منطقه $020/60$ می‌باشد (شکل ۴ a). از دیگر شواهد پوسته اقیانوسی در این منطقه نفوذ دایک‌های دیابازی که در داخل متامفیبولیت‌ها نفوذ کرده‌اند است. این دایک‌ها تحت تاثیر حوادث تکتونیکی به صورت کامل دگرشکل شده‌اند تعیین سن به روش $^{40}K/^{40}Ar$ سن این دایک‌ها را 64.9 ± 3.8 (Khalatbari-Jafari et al. 2004).

را نشان داده است. جهت گیری کلی این دایک‌ها $N20E/80NW$ می‌باشد (شکل ۴ b) همچنین در واحدهای آمفیبولیتی منطقه رگه‌های کوارتز به صورت پلی هارمونیک و

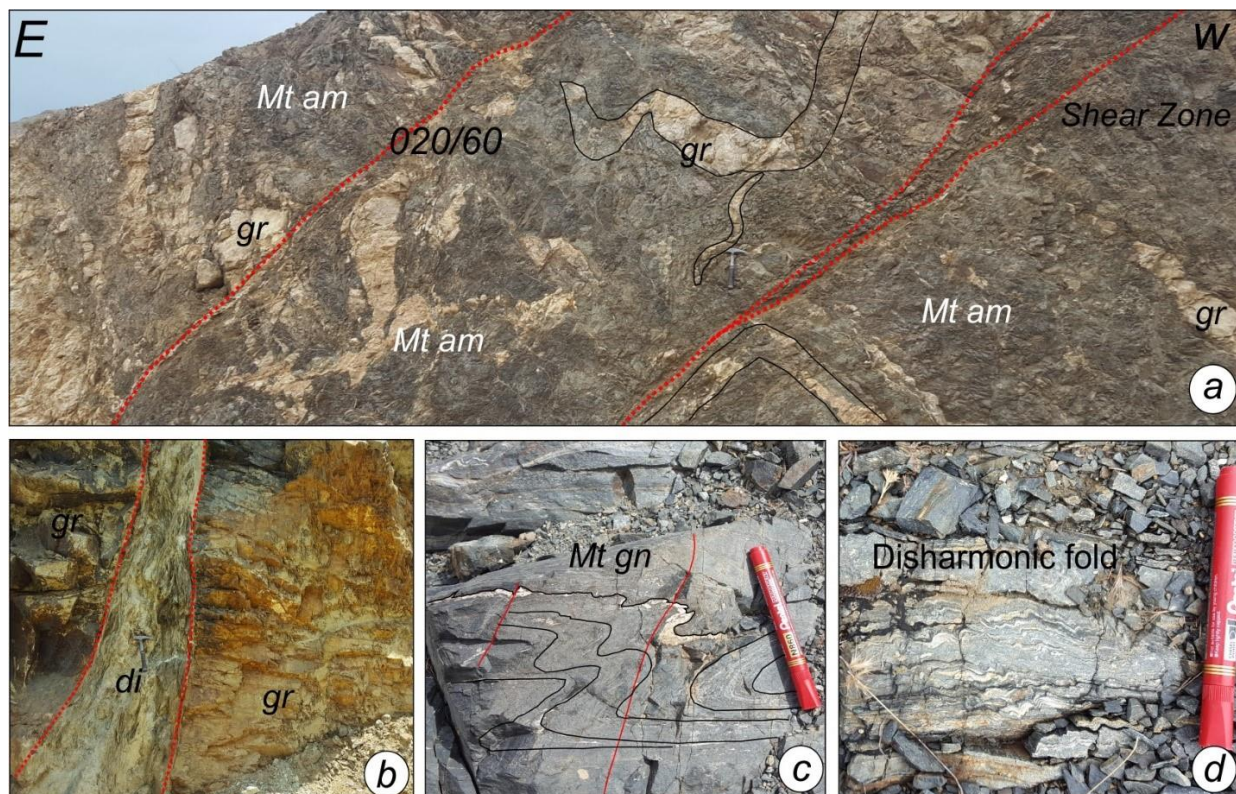
۴-۱- سازوکار دگرشکلی در محدوده مورد مطالعه

با توجه به تغییرات دما و فشار در پهنه گذر از گوشته به پوسته این انتظار می‌رود که این تغییرات تاثیر قابل توجهی بر سبک دگرشکلی در منطقه داشته باشد. بررسی‌های تکتونیت‌های ساختاری در این منطقه منجر به تفکیک دو دسته ساختار اصلی شده است گروه اول شامل پهنه‌های برشی دما بالا با راستای تقریبی شمال‌شرق- جنوب غرب می‌باشد و سبب دگرشکلی شدید در واحدهای دگرگونی آمفیبولیتی و هارزبورژیتی شده است، این پهنه‌ها توسط پهنه‌های دگرشکلی دما پایین با راستای شمال‌غرب جنوب شرق قطع شده است (Haji Hosseinlou 2019). شواهد ساختاری متعددی از این سازوکارهای دگرشکلی با دمای متفاوت در محدوده مورد مطالعه جمع آوری شده است. واحدهای گرانیتی که در داخل

شده است این گسل‌ها عمدتاً دارای راستای NW-SE هست و از لحاظ جهت تقریباً به موازات یا در امتداد پهنه‌های برشی شکل-پذیر در این منطقه است. دسته دوم گسل‌های با راستای تقریبی E-W هستند این گسل‌ها عمدتاً امتداد لغز هستند. عملکرد این چند دسته گسل سبب به هم ریختگی واحدهای سنگی افیولیتی شده است به طوری که در بسیاری مناطق امکان تشخیص و یا بازسازی سکانس اولیه واحد افیولیتی مقدور نیست.

به طور کلی در ساختارهای بزرگ مقیاس تغییر سبک دگرشکلی از شکل‌پذیر به شکننا در مرز پوسته به گوشته کاملاً محسوس است و مشخص است که از لحاظ دمایی تشکیل این ساختارها در خواستگاه متفاوت از لحاظ دما و عمق بوده است.

ناهماهنگ چین‌خورده‌اند که نشانگر دمای بالا و شرایط شکل‌پذیر محیط دگرشکلی می‌باشد (شکل ۴ c,d). چین‌خوردگی در این منطقه عموماً در شرایط شکل‌پذیر و دما بالا رخ داده است. با توجه به اینکه در این چین‌ها اکثراً در لولا چین‌ها ضخامت نسبت به یال‌ها افزایش یافته تایید کننده جریان مواد از یال‌ها به سمت لولا تحت مکانیسم خمشی-جریانی است. همچنین در داخل پهنه‌های برشی شواهد برش در چین‌خوردگی‌ها مشاهده می‌گردد که چین‌های Z شکل از جمله این ساختارها هستند. ساختارهای دما پایین بیشتر در قسمت‌های متعلق به پوسته سکانس افیولیتی گسترش یافته است. عمده این ساختارها شامل گسل‌ها می‌باشد که سبب جابه‌جایی در واحدهای سنگی شده است. گسل‌های شکننا را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد گسل‌های معوس که سبب افزایش ضخامت سکانس افیولیتی



شکل ۴- ساختارهای موجود در افیولیت خوی (a) پهنه برشی در واحدهای آمفیبولیتی و گرانیت‌های برش خورده و تاثیر گسل‌های ثانویه شکننا در نزدیکی روستای آجای، (b) دایک‌های دیابازی در واحد گرانیتی، (c) چین‌های جریانی در واحدهای گنیسی و (d) چین‌های ناهماهنگ در واحدهای دگرگونی در نزدیکی روستا گورش

Fig. 4. Structure in the Khoy ophiolite (a) Shear zone in amphibolite unite and sheared granite (b) Diabase dike within granite unit. (c) ptygmatic fold in the gneiss unit, and (d) Dis-harmonic folding in the metamorphic rock unit.

توان در نظر گرفت (شکل ۵ c). پس از گذر از گوشته به پوسته در واحدهای گابرویی که در واقع کف پوسته می‌باشد از لحاظ ریزساختاری و هندسی شکل کانی‌های پیروکسن به طور کلی عوض می‌شود کشیدگی به مراتب کمتر می‌شود که نشان از کاهش دما نسبت به لایه‌های پایین‌تر دارد (شکل ۵ d). البته در مطالعات ریزساختاری واحدهای پوسته و گوشته علاوه بر پیروکسن‌ها سایر کانی‌ها همچون اولیوین و یا پلاژیوکلاز و رگه‌های کوارتز نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است لیکن به دلیل اشتراک این کانی بین واحدهای متعلق به گوشته تمرکز بر روی آنها بوده است. دگرسانی و کانی‌های همچون سرپانتین در واحدهای گابرویی پوسته گسترش یافته است که در مقاطع متعلق به هارزبورژیت و دونیت کمتر دیده می‌شود (شکل ۵ e). کانی‌های اولیوین چه در هارزبورژیت و چه در گابروها کشیدگی چندانی نشان نمی‌دهد تفاوتی که بین این دو نوع اولیوین وجود دارد این است که بر روی اولیوین‌های که در واحدهای گابرویی وجود دارد شکستگی‌های فراوان شکنا دیده می‌شود (شکل ۵ f).

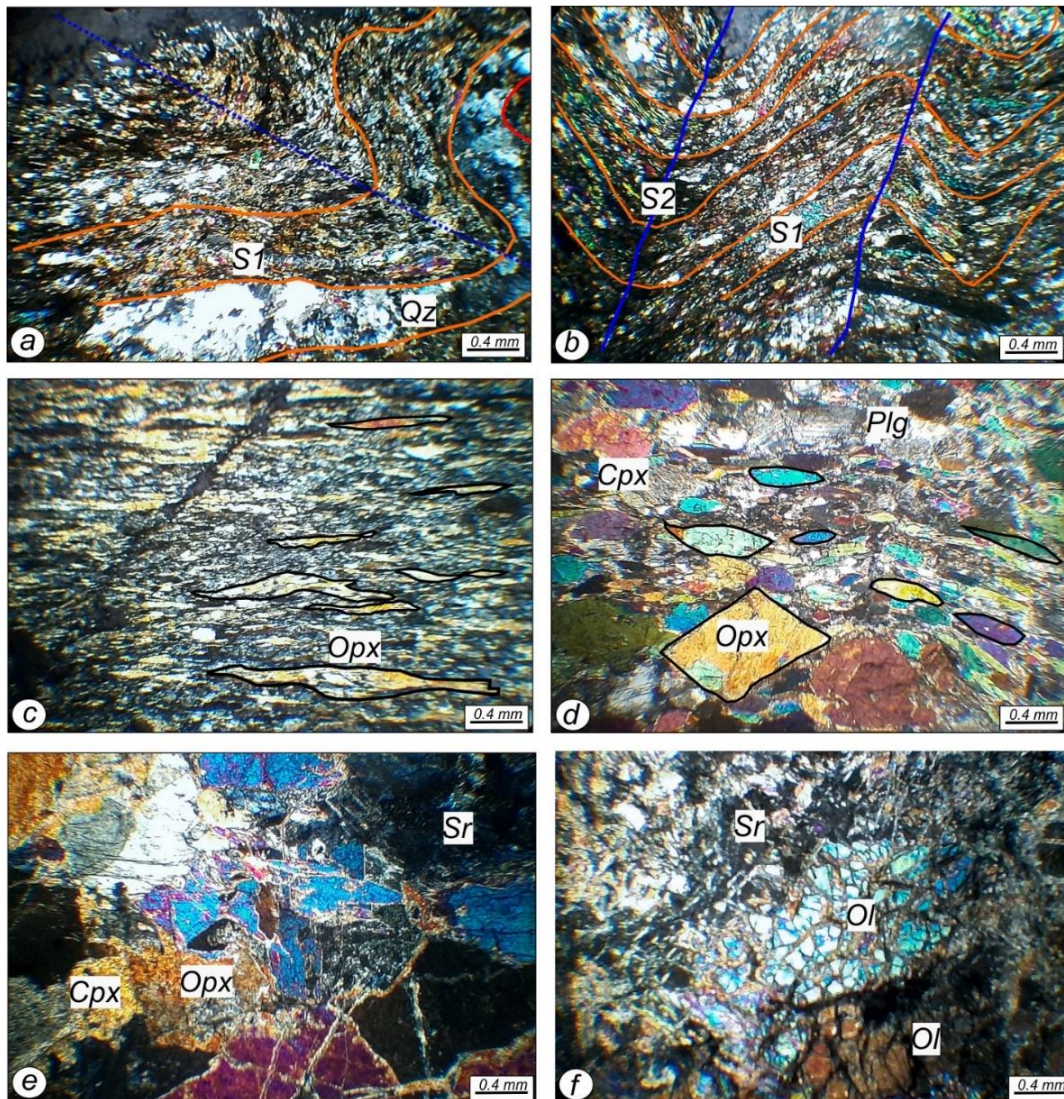
عبور از توالی گوشته به واحدهای متعلق به پوسته که همراه با ناپیوستگی موهروویچ است از لحاظ لیتولوژیک و ساختاری نیز قابل پیگیری می‌باشد. داده‌های سنجش از دور در منطقه مورد مطالعه که برای تفکیک واحدهای گوشته از واحدهای دگرشکل شده‌ای پوسته استفاده شده است، نشان می‌دهد که این ناپیوستگی در دو نوار با راستای شمال غرب جنوب شرق در منطقه مورد مطالعه برونزد یافته است. نوار اول که در شمال شرق منطقه قرار دارد به مراتب گسترش وسیع‌تری دارد مرز واحد هارزبورژیت با دگرگونی‌های هست که سن دقیق آن به درستی مشخص نیست. مرز دوم در جنوب غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارد و در واقع بین واحدهای هارزبورژیت و بازالت و گابرو می‌باشد.

رفتار طیفی کاملاً متفاوت واحدهای سنگی دو سمت ناپیوستگی موهو امکان تعیین موقعیت این مرز را فراهم آورده است. همچنین داده‌های ساختاری چه در ریز مقیاس و چه در بزرگ مقیاس تغییر سبک دگرشکلی را در طی گذر از پوسته به گوشته به روشنی نشان می‌دهد. اما برونزد دو مرز موهو در این منطقه از موارد جالب توجه می‌باشد. با توجه به اینکه واحد سنگی در فرا دیواره گسل‌های راندگی منطقه متفاوت می‌باشد احتمال تکرار شدگی در اثر گسل خوردگی را رد می‌نماید

بررسی ریز ساختارهای مقاطع نازک اطلاعات ارزشمندی درباره دما، فشار و وجود فاز سیال در محیط دگرشکلی در اختیار قرار می‌دهد. که تمامی این اطلاعات برای شناسایی پهنه گذر از گوشته به پوسته دارای اهمیت می‌باشد. مقاطعی که برای مطالعات ریزساختار استفاده شده است به صورت جهت‌دار بوده و از مقاطع XZ برای بررسی شرایط دگرشکلی استفاده شده است. در مقاطع بررسی شده از واحدهای هارزبورژیتی، دونیتی و گابروها کانی‌های اصلی شامل ارتوپروکسن، کلینوپروکسن، اولیوین و پلاژیوکلازها به همراه رگه‌های کوارتز و فلدسپار می‌باشد. از میان این کانی‌های اصلی کانی‌های مربوط به خانواده پیروکسن‌ها کم و بیش بین واحدهای سنگی مربوط به گوشته و پوسته مشترک هستند، لذا دگرشکلی این کانی‌ها مبنای برای ارزیابی شرایط دگرشکلی و مستند کردن این تغییرات استفاده شده است اگرچه ریزساختار سایر کانی‌های اصلی نیز به عنوان شاهد شرایط دگرشکلی مد نظر قرار گرفته است (Haji Hosseiniou and Padidar 2015). نسبت طول به عرض پیروکسن‌ها به عنوان یک شاخص برای شناسایی شرایط محیط دگرشکلی استفاده شده است به طور مثال در شرایط گوشته‌ای نسبت طول به عرض پیروکسن‌ها ۱:۱۰ است در حالی که در پوسته این نسبت در حدود ۱:۲ است همچنین شواهد برشی مانند لنزهای پیروکسنی یا ساختارهای زیگموییدی نشانگر واتنش بالا در کنار دمای زیاد می‌باشد (Haji Hosseiniou and Padidar 2015) در مقاطع نازک مطالعه شده در محدوده مورد مطالعه در مقاطع مربوط به واحدهای هارزبورژیتی چین-خوردگی از جمله ساختارهای قابل توجه می‌باشد. چین خوردگی برگواگی‌های اولیه می‌باشد پیشرفت این چین خوردگی‌ها در برخی مقاطع به حدی هست که سطح محور این چین‌ها برگواگی جدید را شکل داده است. در پهنه‌های برشی این ریزچین‌ها از حالت متقارن خارج شده که نشانگر تاثیر برش بر این ساختارها هست. از نکات جالب دگرشکلی در واحدهای هارزبورژیتی این است که بخش کلیواژ عمدتاً شامل کانی‌های پیروکسینتی طویل شده است و بخش میکرولیتون شامل اولیوین‌ها هستن و نشان از شرایط بالای دمایی و فشاری دارد که سبب طویل شدگی کانی‌های پیروکسینتی شده است (شکل ۵ a و b). در مناطقی که چین خوردگی توسعه نیافته است طویل شدگی کانی‌های پیروکسن بسیار چشمگیر می‌باشد به طور میانگین نسبت محور طویل شده به کوتاه شده را حدود ۱۰ به ۱ می‌

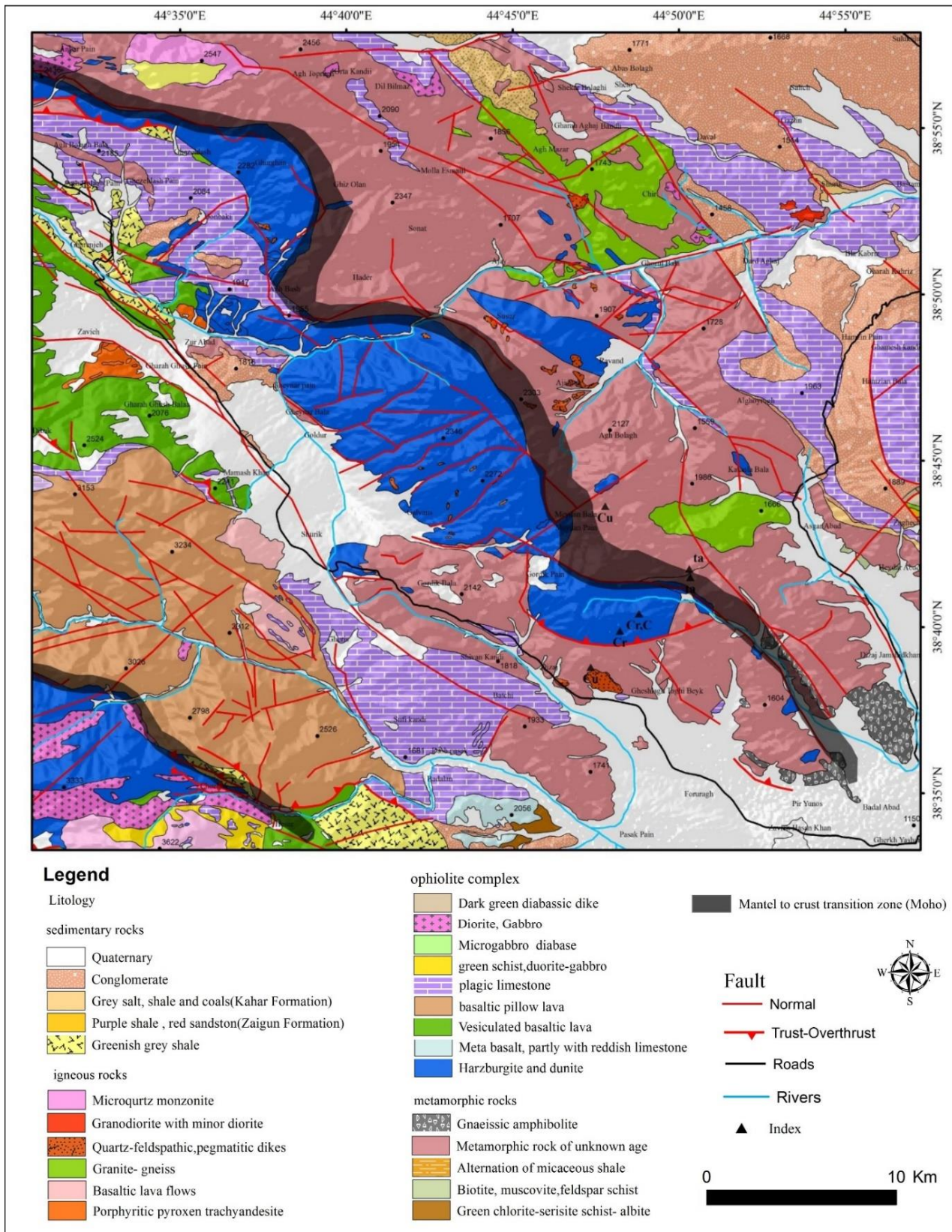
را دارد. با توجه به تغییرات قابل توجه سبک دگرشکلی در واحدهای گوشته و پوسته ای می توان نتیجه گرفت که در محدوده خوی با دو نوع توده افیولیتی برونزد یافته و بنابراین ناپیوستگی موهو هم در دو منطقه دیده می شود.

مطالعات انجام شده از لحاظ ژئوشیمیایی بر روی واحدهای سنگی مختلف این افیولیت ها نشان داده است که در این منطقه دو نوع افیولیت با سن های مختلف وجود دارد که از لحاظ جایگاه ژئودینامیکی هم با یکدیگر تفاوت دارند. بخش شرقی این افیولیت ها دگرشکلی شدیدی را نشان می دهد داده های سنی پتاسیم- آرگون سن ژوراسیک را برای این بخش پیشنهاد می کند. بخش جنوب غربی غیر دگرشکل نیز سن کرتاسه فوقانی



شکل ۵- ریز ساختارهای مورد بررسی در مقاطع میکروسکوپی مربوط به گوشته و پوسته (a) چین خوردگی در واحدهای هارزبورژیتی و طولی شدن کانی های پیروکسن در شرایط دما و فشار بالا، (b) چین خوردگی واحدهای هارزبورژیتی، (c) کشیدگی کانی های ارتوپیروکسن و شکل گیری برگوارگی ها در واحدهای مربوط به گوشته فوقانی، (d) ارتوپیروکسن های جهت یافته ولی با دگرشکلی به نسبت کمتر، (e) شکستگی ها شکنا بر روی کانی های اولیوین و (f) شکستگی های شکنا بر روی کانی اولیوین و تشکیل کانی های دگرسان سرپانتین.

Fig. 5. Micro-structures in thin section of mantle and crust rock unit. (a) Folding and elongation of pyroxene mineral in the harzburgite rock unit in the high temperature and pressure condition. (b) Folding in the harzburgite unit. (c) Elongation of pyroxene minerals and propagation of foliation in the mantle rock unit. (d) Preferred orientation of orthopyroxene. (e) Brittle fractures in the olivine mineral, and (f) brittle crack in olivine mineral, and serpentine formed.



شکل ۶ - جانمایی مرز موهو بر روی نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

Fig. 6. Location of Moho transition zone on the geology map of study area.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه داده های ماهواره ASTER در محدوده طول موجی VNIR و SWIR برای تفکیک سنگ های افیولیتی با استفاده از تکنیک های نسبت باندی (Band ratio) و تجزیه ی مولفه اصلی (PCA) مورد پردازش قرار گرفت. از RGB حاصل از نسبت باندی و مولفه اصلی (PCA) برای تمایز واحدهای هارزبورژی و سرپانتینی از گابرو ها و بازالت ها و همچنین تمایز و بارزسازی مرز پوسته و گوشه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از سنجش از دور نشانگر رخنمون مرز پوسته و گوشه در دو منطقه جدا از هم در شمال شرق و جنوب غرب محدوده مورد مطالعه است.

بررسی های ساختاری نشانگر دو دسته ساختار اصلی در منطقه است که شامل پهنه برشی با راستای شمال شرق - جنوب غرب می باشد که توسط پهنه های با راستای شمال غرب جنوب شرق قطع شده اند. دگرشکلی در واحدهای مربوط به گوشه شرایط دما بالا و شکل پذیر را نشان می دهد که منجر به شکل گیری پهنه های برشی شکل پذیر با گسله سنگ های آمفیبولیتی و گنایسی شده است. اما گسل های با راستای شمال شرق - جنوب غرب که بیشتر در واحدهای بخش پوسته ای شکل گرفته است دگر شکلی شکن را نشان می دهد. لذا سبک ساختارهای منطقه موید شرایط متفاوت تشکیل در گوشه و

پوسته است.

همچنین مطالعات در ریز ساختار به منظور بررسی تغییرات ساختاری که در گذر از گوشه به پوسته اتفاق می افتد نشان داده است که کانی های خانواده پیروکسن تحت تاثیر دمای بالای محیط در شرایط شکل پذیر تشکیل شده و کاملاً جهت یافته هستند و در مناطق برشی ریز چین ها شکل گرفته است ولی همین کانی ها در واحدهای پوسته دگرشکلی شکن را نشان می دهد بنابراین تغییر شکل کانی های چون پیروکسن و اولیوین می تواند به عنوان شاخصی برای تشخیص گذر از گوشه به پوسته باشد.

مطالعات این پژوهش نشان داده است که در واحدهای افیولیتی گذر از گوشه به پوسته همراه با تغییرات قابل توجه در سبک دگرشکلی هم در ریز مقیاس هم در بزرگ مقیاس می باشد، همچنین نتایج این مطالعه نشان داده است که ابزار توانمندی در تفکیک واحدهای پوسته از گوشه و همچنین تشخیص مرز موهو می باشد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله مراتب امتنان خود را از داوران و سردبیر محترم مجله به خاطر بازنگری این مقاله اعلام می داریم همچنین به خاطر حمایت های دانشگاه ارومیه از نویسندگان جهت به نتیجه رسیدن این پژوهش سپاسگزار هستیم.

مراجع

- Abdeen, M.M., Allison, T., Abdelsalam, M.G., Stern, R.J., 2001. Application of ASTER band-ratio images for geological mapping in arid regions; the Neoproterozoic Allaqi Suture, Egypt. Geological Society of America 3, 289.
- Abdullah, S., Misra, S., Ghosh, B., 2018. Melt-rock interaction and fractional crystallization in the Moho transition Zone: evidence from the cretaceous Naga Hills Ophiolite, North-East India. Lithos 322, 197-211. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.10.012>.
- Abrams, M., Rothery, D., Pontual, A., 1988. Mapping in the Oman ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images. Tectonophysics 151, 387-401. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90254-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90254-5).
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. International Journal of Earth Sciences 94, 401-419. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229, 211-238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Amer, R., Kusky, T., Ghulam, A., 2010a. Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data. Journal of African Earth Sciences 56, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004>.

- Amer, R., Kusky, T., Ghulam, A., 2010b. New methods of processing ASTER data for lithological mapping: examples from Fawakhir, Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 56, 75-82. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0539-0>.
- Bedell, R., 2001. Geological mapping with ASTER satellite: new global satellite data that is a significant leap in remote sensing geologic and alteration mapping, Special Publication. Geological Society of Nevada 33, 329-334.
- Behyari, M., Nouraliee, J., Ebrahimi, D., 2018. Structural control on the Salmas geothermal region, northwest Iran, from fractal analysis and paleostress data. *Acta Geologica Sinica-English Edition* 92, 1728-1738. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13673>.
- Berberian, M., King, G., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of earth sciences* 18, 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-163>.
- Eslami, A., Malvoisin, B., Grieco, G., Aradi, L.E., Marchesi, C., Cavallo, A., Montanini, A., Borghini, G., Mathur, R., Ikehata, K., 2021. Native copper formation associated with serpentization in the Cheshmeh-Bid ophiolite massif (Southern Iran). *Lithos* 382, 105953. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105953>.
- Ghazi, A.M., Hassanipak, A., 1999. Geochemistry of subalkaline and alkaline extrusives from the Kermanshah ophiolite, Zagros Suture Zone, Western Iran: implications for Tethyan plate tectonics. *Journal of Asian Earth Sciences* 17, 319-332. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(98\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(98)00070-1).
- Haji Hosseinlou, H., 2019. Deformational phases introducing in the Gheris shear zone, northwestern Khoy. *Journal of Tectonics* 3, 68-80. <https://doi.org/10.22077/JT.2020.1435>.
- Haji Hosseinlou, H., 2020. Badalabad Shear Zone Structures Study at North Khoy. *Kharazmi journal of earth sciences* 6, 83-108. <https://dx.doi.org/10.52547/gnf.6.1.83>.
- Haji Hosseinlou, H., Padidar, R., 2015. Shear Structures and Micro-Structures Analysis Along Aboulfazl Thrust, NE Khoy. *Advanced Applied Geology* 5, 60-76. <https://doi.org/10.22055/aag.2015.11900>.
- Hewson, R.D., Cudahy, T., Huntington, J., Geologic and alteration mapping at Mt Fitton, South Australia, using ASTER satellite-borne data. In: *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)*, 2001. IEEE, pp 724-726. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.976615>.
- Hunt, G.R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* 42, 501-513. <https://doi.org/10.1190/1.1440721>.
- Johnson, P.R., Kattan, F.H., Al-Saleh, A.M., 2004. Neoproterozoic ophiolites in the Arabian Shield: Field relations and structure. *Developments in Precambrian Geology* 13, 129-162. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(04\)13004-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(04)13004-1).
- Jousselin, D., Nicolas, A., Boudier, F., Reisberg, L., Henri, M., Nicolle, M.J.T., 2021. Formation of the Moho transition zone in the Oman ophiolite, and comparison with sub-Moho melt lenses at fast spreading ridges. *Tectonophysics* 821, 229148. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229148>.
- Khalatbari-Jafari, M., Juteau, T., Bellon, H., Emami, H., 2003. Discovery of two ophiolite complexes of different ages in the Khoy area (NW Iran). *Comptes Rendus Geoscience* 335, 917-929. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00123-8).
- Khalatbari-Jafari, M., Juteau, T., Bellon, H., Whitechurch, H., Cotton, J., Emami, H., 2004. New geological, geochronological and geochemical investigations on the Khoy ophiolites and related formations, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 23, 507-535. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.07.005>.
- Mehdikhani, B., Imamalipour, A., 2021. ASTER-based remote sensing image analysis for prospection criteria of podiform chromite at the khoy ophiolite (NW Iran). *Minerals* 11, 960. <https://doi.org/10.3390/min11090960>.
- Moghadam, H.S., Stern, R.J., 2015. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia:(II) Mesozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Sciences* 100, 31-59. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.12.016>.
- Mohajjel, M., Fergusson, C., Sahandi, M., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00035-4).
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of Structural Geology* 22, 1125-1139. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7).

- Mohorovičić, A., 1910. Godisnje izvjesce zagrebackog meteoroloskog opservatorija za godinu. Jahrb Meteorol Obs Zagreb 9, 1-63.
- Niromand, M., Behyari, M., Rahimsouri, Y., 2021. Strain geometry and structural analysis of the Oshnavieh ophiolite (NW Iran): A new segment of the Neo-Tethys puzzle. Iranian Journal of Earth Sciences 13, 266-278. <https://doi.org/10.30495/ijes.2021.685394>.
- Pessagno, E., Ghazi, A.M., Kariminia, M., Duncan, R., Hassanipak, A., 2005. Tectonostratigraphy of the Khoy complex, northwestern Iran. Stratigraphy 2, 49-63.
- Rajendran, S., Al-Khirbash, S., Pracejus, B., Nasir, S., Al-Abri, A.H., Kusky, T.M., Ghulam, A., 2012. ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman Mountains: Exploration strategy. Ore geology reviews 44, 121-135. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.010>.
- Rajendran, S., Nasir, S., 2019. Mapping of hydrothermal alteration in the upper mantle-lower crust transition zone of the Tayin Massif, Sultanate of Oman using remote sensing technique. Journal of African Earth Sciences 150, 722-743. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.10.001>.
- Sarem, M.N., Abedini, M.V., Dabiri, R., Ansari, M.R., 2021. Geochemistry and petrogenesis of basic Paleogene volcanic rocks in Alamut region, Alborz mountain, north of Iran. Earth Sciences Research Journal 25, 237-245. <https://doi.org/10.15446/esri.v25n2.74025>.
- Tangestani, M.H., Jaffari, L., Vincent, R.K., Sridhar, B.M., 2011. Spectral characterization and ASTER-based lithological mapping of an ophiolite complex: A case study from Neyriz ophiolite, SW Iran. Remote Sensing of Environment 115, 2243-2254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.023>.