

Research Article

Petrology of the Maku-Poldasht young lavas; Attitude to the olivine and bubbles size distribution

Monir Modjarrad*

Geology department, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

Keywords: *Basalt, olivine, Crystal size distribution (CSD), Bubble size distribution (BSD), Maku-Poldasht*

1- Introduction

Maku-Poldasht region is a part of the Alps-Himalaya belt (Stampfli and Borel, 2002) with several Oligo-Miocene to Quaternary volcanoes are erupting in it from east of Turkey to the west of Iran. On this occasion, due to the existence of olivine phenocrystals and numerous bubbles in the basalts, care has been taken on their size distribution, too. Crystal size distribution (CSD) as a quantitative method at the rocks petro-fabric, studies measurement of grain size and shape (Higgins, 2006). The applied method (CSD) in the inspect of rocks in Iran is not very old (especially on olivine crystal), but some rare cases could be mentioned about metamorphic rocks (eg.; Modjarrad, 2020; Modjarrad, 2022a) or on the volcanic rocks (eg. Modjarrad, 2022b; Modjarrad, 2019).

2- Material and methods

We select 10 various samples of Maku-Poldasht rocks for XRF and ICP-MS analyses to access major oxide and trace elements in Ireland ALS Mineral laboratory. With the aim of CSD studies on the rocks 3 samples with abundant olivine crystals and for BSD 4 full of bubbles samples are nominated. After a full scan of thin section preparation with microvisioner technique, olivine crystal and bubbles sketches are extracted and image processing and measurements are operated on them. Then CSD and BSD curves are illustrated from gathered data.

3- Results and discussions

The Maku-Poldasht samples consist of plagioclase, olivine and clinopyroxene phenocrystals in hyaline matrix. On the basis of several geochemical diagrams, studied samples are basalt to andesi-basalt, calc-alkaline with differentiated REE pattern. The spidergram of the rocks show magma contamination with crustal materials. In terms of tectonic setting the basalts is belong to a within plate setting and are generated from garnet free lithospheric mantle and while crossing the thickened crust has interaction with crust. Despite of the $-\Delta Nb$ amounts of the Maku-Poldasht basalts, the rocks have within plate affinity and are comparable with Colombia River flood basalts and are originated from Turkey Ararat volcano. The CSD studies on the basalts olivine crystals display that the intercept value of curves (J/G) are 4-5 and, the slope of the regression line ($-1/Gt$) is about -3.5 to -5. The BSD on vesicles indicate that nucleation and growth rates were equal at the studied basalts or growth was more rapid than nucleation in some cases. It means that degassing from lava had high speed. Also greater bubbles are in low number, but little vesicles have large population densities.

4- Conclusion

The Maku-Poldasht studied samples are calc-alkaline basalt with negative REE pattern slope. They formed at the within plate tectonic setting, have mantle lithospheric source and effected in crustal contamination

* Corresponding author: m.modjarrad@urmia.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2021.38997.2258

Received 2021-10-26

Accepted 2021-12-23

processes. Olivine CSD patterns show the 4-5 times nucleation ratios to growth rates and considering the standard growth velocity, durability of 60-90 years in magma chamber due to crystals enlargement. But about bubbles BSD curves extracted data show that the nucleation and growth had equal speeds or growth was quicker than it. It explained that degassing was rapid from lava. It means that degassing from lava had high speed. Also greater bubbles because of Ostwald ripening are in low number, but little vesicles have large population densities. It seems that after Neo-Tethys closure and enrichment of mantle wedge by the subducted oceanic slab, metasomatically, and uplifting of NW Iran crust, the tensional regime and faulting caused to pressure loss and arising the magma to the earth surface at wide spread.

References

- Higgins M.D., 2006. Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology. Cambridge university press, 265p <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535574>
- Modjarrad, M., 2022a. Crystal Size Distribution of garnet and geochemistry of the Hal Hal Chaldoran garnet amphibolites-Northwest corner of Iran. *Advanced Applied Geology (in Persian)*. 12(3), 537-556 <https://doi.10.22055/AAG.2021.37891.2237>
- Modjarrad, M., 2022b. Geochemistry and crystal shape, size and spatial distribution in arc-related gabbro, Urmia, NW Iran. *Acta Geochim* <https://doi: 10.1007/s11631-022-00557-8>
- Modjarrad, M., 2020. Effect of whole rock chemistry on the crystal size distribution of garnet in metapelites, comparison of Shahindezh schist with Dorbeh hornfelses. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 28, 297-310 <https://dx.doi.org/10.29252/ijcm.28.2.297>
- Modjarrad, M., 2019. Crystal size distribution studies on the leucite, pyroxene and olivine at the eastern Urmia Lake volcanic rocks- magma mixing possibility and residence time at the chamber. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 27, 55-68 <https://doi.10.29252/ijcm.27.1.55>
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters* 196, 17-33 [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00588-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X)

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Modjarrad, M., 2023. Petrology of the Maku-Poldasht young lavas; Attitude to the olivine and bubbles size distribution. *Adv. Appl. Geol.* 12(4), 981-1000

DOI: 10.22055/AAG.2021.38997.2258

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_17727.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

پترولوژی گدازه‌های جوان ماکو-پلدشت: با نگاهی به توزیع اندازه بلورهای الیوین و حفرات

منیر مجرد

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

m.modjarrad@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲

چکیده

گدازه‌های سیاه جوانی به سن کمتر از یک میلیون سال، با منشأ گرفتن از آتشفشان آرات، دشت وسیع ماکو-پلدشت را در آذربایجان غربی با دبی دیاکلازی، آآ و پاهوو پوشانیده‌اند. ترکیب این واحد با کانی‌های پلاژیوکلاز، الیوین‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و کمی کلینوپیروکسن، از نوع بازالتی تا آندزی-بازالتی بوده و ماهیت کالکوالکالن دارند. این سنگ‌ها از نوع بازالت‌های درون‌صفحه‌ای می‌باشند. همچنین فاکتور ΔNb بیانگر تعلق این بازالت‌ها به انواع طغیانی درون صفحه قاره‌ای است. بررسی منحنی توزیع اندازه بلورهای الیوین موجود در این بازالت‌ها نشان داد که نرخ هسته‌بندی به رشد برای الیوین‌ها ۴ تا ۵ برابر بوده است. شیب خط که با نسبت $1/Gt$ معادل است، برای الیوین‌های بازالت‌های ماکو-پلدشت از ۳- تا ۵- بوده که با در نظر داشتن سرعت رشد بلور در شرایط استاندارد، بیانگر اقامت ۶۰ تا ۹۰ ساله برای ماگما در لانه زیرین جهت رشد بلورهای الیوین می‌باشد. با توجه به الگوی توزیع اندازه حباب برای حفرات بازالت‌های منطقه، معلوم شد که نرخ هسته‌بندی به رشد حباب‌ها اغلب معادل بوده یا در برخی موارد نرخ رشد بر وقوع هسته‌ها تفوق داشته است. نکته مهم اینکه در واحد زمان، رشد حباب‌های گاز ۳ تا ۵ برابر رشد بلور الیوین بوده است که با ترکیب بازیگدازه‌های مورد مطالعه، چنین حجم گاززدایی قابل پیش‌بینی است.

واژه‌های کلیدی: بازالت، الیوین، توزیع اندازه بلور، توزیع اندازه حباب، ماکو-پلدشت

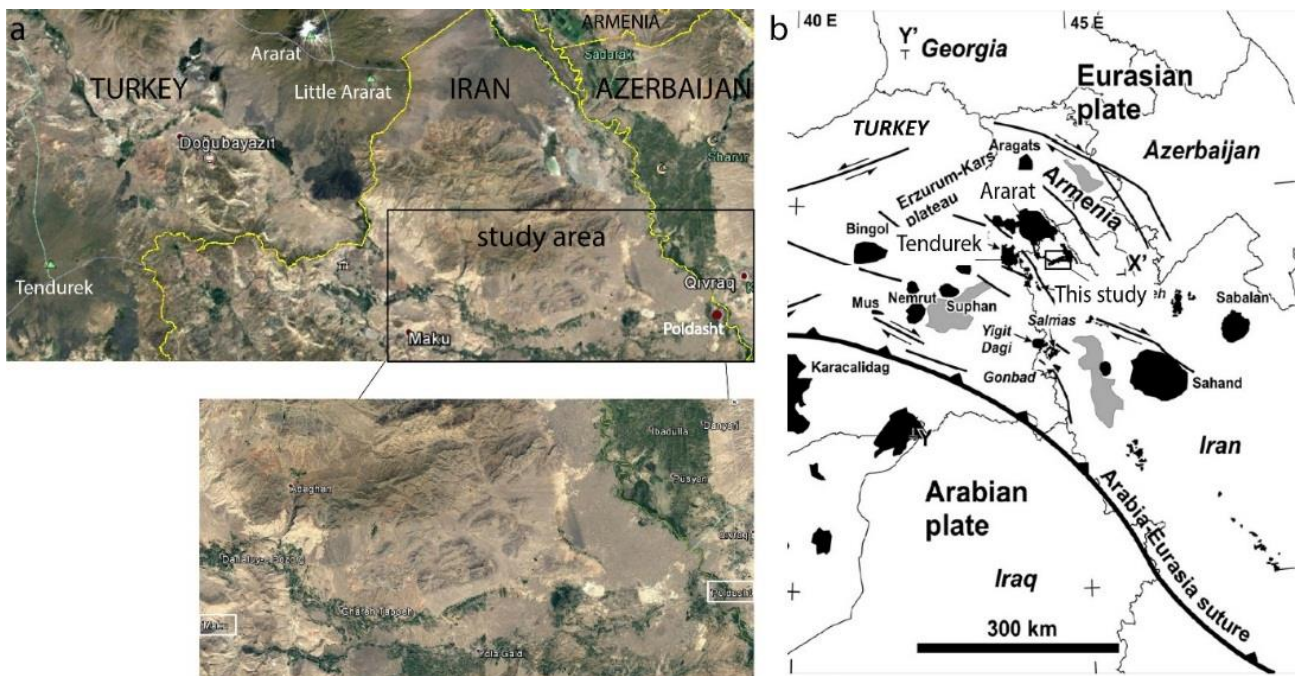
۱-مقدمه

مراکز آتشفشانی به سن الیگوسن تا کواترنری در شمال محل برخورد صفحات اوراسیا و عربی (شکل ۱b) وجود دارد که از ۱۰ میلیون سال قبل، در شرق آناتولی (Keskin et al., 1998) و در پلیوسن کواترنری در ایران رخ داده‌اند (Ahmadzadeh et al., 2010). این آتشفشان‌ها تا عهد حاضر نیز فعال بوده (Keskin et al., 2012) و در ایران نیز گدازه‌های ناشی از آن تا کمتر از یک میلیون سال قبل، در همین منطقه ماکو شناسایی شده‌اند (Kheirkhah, 2013). همچنین گدازه‌های این ناحیه در پیوستگی با خروجی‌های شرق ترکیه مورد ارزیابی قرار گرفته (Kheirkhah et al., 2009) و از نوع همزمان با برخورد تعیین شده است که با سن برخورد دو صفحه اوراسیا و عربی که دانشمندان آن را اواخر کرتاسه تا حداکثر اوائل سنوزوئیک می‌دانند، همخوانی ندارد. اینکه آیا گدازه‌های محدوده ماکو - پلدشت از نوع طغیانی است یا فقط علائمی از آن بدلیل آرایش وسیع پوسته‌ای را در خود ثبت کرده بحث اصلی این نوشتار است. در این مجال با توجه به وجود حفرات درشت و نیز

منطقه ماکو-پلدشت بخشی از کمربند آلپ- هیمالیا (Okay and Tuysuz, 1999; Stampfli and Borel, 2002) است که در آن آتشفشان‌های متعددی از شرق ترکیه تا غرب ایران از اولیگومیوسن تا کواترنری رخ داده‌اند و بسیاری از این مراکز آتشفشانی سن پلیو-کواترنری دارند (Ahmadzadeh et al., 2010). فلات ایران- ترکی که در برگیرنده‌ی گستره‌ی پهناوری از سنگ‌های آتشفشانی از شرق ترکیه تا غرب ایران است، بخشی از این کمربند کوهزایی است که در شمال غرب ایران به دلیل گسلش امتداد لغز، دچار دگرشکلی شده است (Copley and Jackson, 2006; Azad et al., 2011). این منطقه در بخش میانی کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا و در زیر پهنه‌ی ایران مرکزی و محدوده‌ی البرز- آذربایجان قرار گرفته است (شکل ۱). بالازدگی فلات در بخش شمال غربی ایران قابل ملاحظه بوده که می‌تواند حاصل ضخیم‌شدگی لیتوسفر به دلیل صعود استنوسفر گوشته‌ای باشد (Shabanian et al., 2012).

خروجی (Modjarrad, 2022a, b,c; Modjarrad, 2015; Modjarrad and Sheykhbaglou, 2016b; Modjarrad, 2019) و یا سنگ‌های آذرین این روش می‌تواند روشی نوین برای بررسی فرایندهای اتاقت ماگمایی در اختیار ما بگذارد. درباره حباب‌های ناشی از گاززدایی بر روی سنگهای آتشفشانی ایران بجز یک مورد کار ترجمه‌ای، هیچ مستندی وجود ندارد و این اولین بار است که با استفاده از تکنیک جدید میکروویژنر الگوی پراکنش حفرات در بازالت بررسی می‌شود.

فنوکریست‌های الیوین و نیز حفرات درشت در بازالت‌های ماکو-پلدشت به نحوه توزیع آنها نیز دقت شده است. مطالعه توزیع اندازه بلورها (Crystal Size Distribution) (به اختصار CSD) به عنوان روش کمی در مطالعات پتروفابریک سنگ‌ها به اندازه‌گیری دانه‌ها و بررسی شکل و تعداد بلورها می‌پردازد (Higgins, 2006). روش کاربردی (CSD) در مطالعه‌ی سنگ‌ها در ایران، از قدمت چندانی برخوردار نیست (بخصوص روی بلور الیوین) ولی می‌توان به مطالعات معدودی درباره سنگهای دگرگونی (Moazzen and Modjarrad, 2005; Modjarrad and Sheykhbaglou, 2016a; Modjarrad,



شکل ۱- (a) عکس ماهواره‌ای از ماکو-پلدشت به همراه موقعیت آتشفشان آرات و تندورک در ترکیه و (b) موقعیت منطقه و آتشفشان‌های مهم اطراف نسبت به محل زمین‌درز نئوتتیس.

Fig. 1. (a) The satellite photo of the Maku - Poldasht and location of the Ararat and Tandurak in the Turkey and (b) The locality of the studied area and neighboring important volcanos relative to the Neo-Tethys suture.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

مناطق از شرق ماکو-پلدشت به طول جغرافیایی $32^{\circ} 44'$ تا $59^{\circ} 44'$ و عرض جغرافیایی $15^{\circ} 39'$ تا $29^{\circ} 39'$ واقع در استان آذربایجان غربی برای مطالعه انتخاب شده‌اند (شکل ۲). مجموعه خروجی ماکو-پلدشت در فاصله حدود ۵ کیلومتری شرق شهرستان ماکو واقع شده و در نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ ماکو (Sahandi, 2003) قرار دارد. این منطقه با توجه به تقسیمات

واحدهای ساختاری ایران بخشی از زون البرز-آذربایجان می-باشد (Nabavi, 1976).

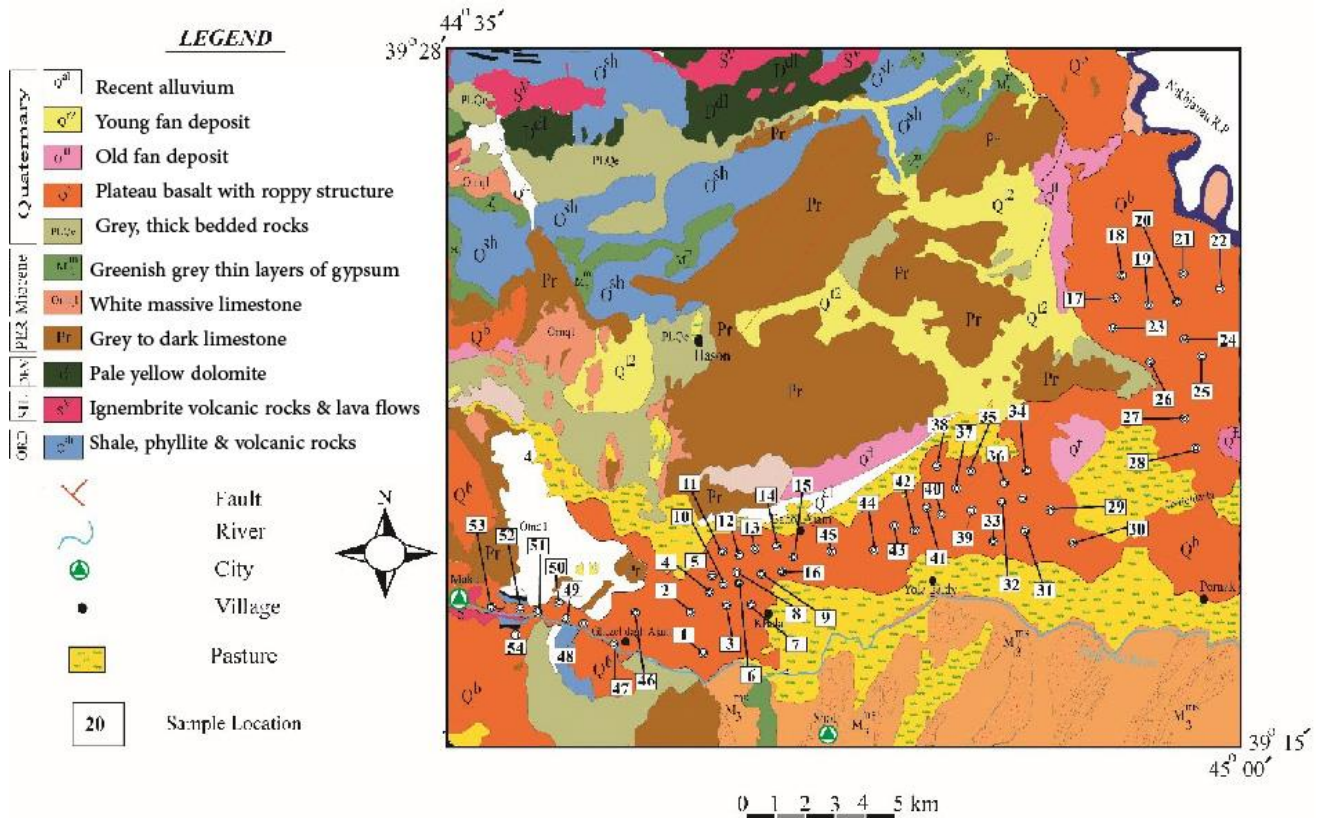
این محصولات خروجی به صورت دگرشیب روی مواد مارنی و ماسه سنگ‌های سازند قم و کنگلومرای پلیوسین قرار گرفته‌اند (شکل ۲). مهمترین بخش این گدازه‌ها وارد بستر رودخانه ساری سو شده و به دشت بازرگان رسیده است، که بعد از پوشانیدن قسمت عمده‌ای از این دشت، مسیر خود را عوض

مشخصات ظاهری آنها مانند ابعاد، توزیع فضای، تعداد و شکل می‌تواند منعکس کننده شرایط فیزیکی حین صعود و فوران ماگما باشد. گرچه تکنیک‌های متعددی برای ارزیابی حفرات در گدازه‌ها وجود دارد لیکن هنوز روش استاندارد جهت جمع آوری، تحلیل و تفسیر نمونه‌های حفره‌دار وجود ندارد. ولی این نکته مشخص است که می‌بایست نمونه‌برداری دقیقی از افق‌های سطحی گدازه اخذ شده و از روش‌های پردازش تصویری نیز بهره گرفت. از مطالعات بافتی حفرات (Vesicle Size Distribution) با عنوان VSD و یا (Bubble Size Distribution) یاد شده و از آن برای تخمین محتوای سیالات موجود در ماگما (قبل از فوران) استفاده می‌شود (Jones et al., 2020).

کرده و از راه دره غرب شهرستان ماکو وارد مسیر رودخانه زنگمار شده و از طریق بستر این رودخانه وارد دشت پلدشت گردیده است.

این سنگ‌ها از مراکز آتشفشانی، شکستگی‌های ژرف و گسل‌های امتداد لغز در حوضه‌های فراکشنی برون ریزی داشته‌اند. سنگ‌های آتشفشانی بازیک منطقه ماکو متأثر از توپوگرافی منطقه با ساخت‌های طنابی، آآ و تومولوس، به صورت دگرشیب روی واحد مارنی و ماسه سنگ‌های سازند قم و همچنین کنگلومرای پلیوسن قرار گرفته‌اند. تعیین سن بروش آرگون-آرگون سنی معادل ۰/۴-۰/۸ میلیون سال را برای بازالت‌های این ناحیه نشان می‌دهد (Kheirkhah, 2013).

حفرات در سنگ‌های آتشفشانی شواهدی از فرایند گاززدایی ماگما محسوب می‌شوند (Shea et al., 2010). به همین دلیل



شکل ۲- ورقه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماکو (Sahandi, 2003) به همراه موقعیت نمونه‌برداری در ناحیه ماکو-پلدشت.
Fig. 2. Geological sheet of Maku 1:100000 sheet (Sahandi, 2003) and sample locations at the area.

میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از آن ۱۰ نمونه از متنوع‌ترین نمونه‌ها از نظر کانی‌شناسی و بافتی که توزیع جغرافیایی مناسبی از منطقه داشتند، جهت انجام تجزیه بوسیله دستگاه XRF (برای دستیابی به اکسید عناصر

۳- روش مطالعه

از بین ۵۷ نمونه سنگی از بازالت‌های ماکو-پلدشت (شکل ۲) موقعیت نمونه برداری‌ها را ثبت کرده است، تعداد ۲۰ نمونه تازه و غیردگرسان جهت تهیه مقطع نازک انتخاب و توسط

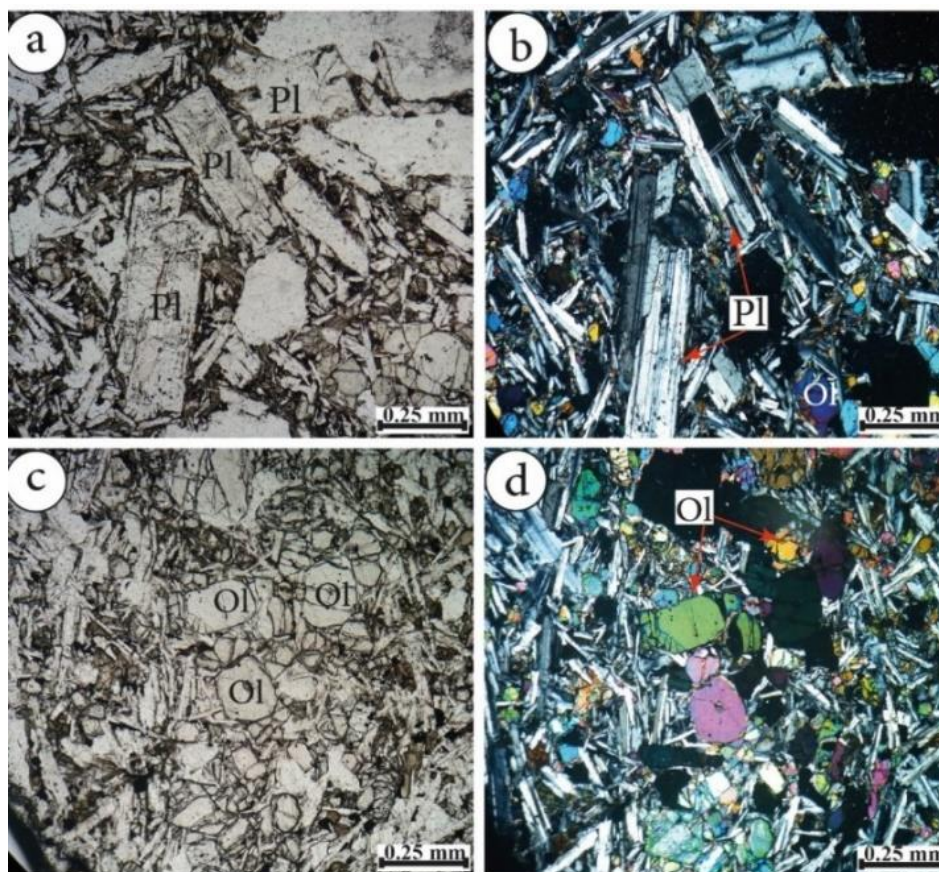
۴-۱ سنگ نگاری

کانی‌های اصلی سنگهای مورد مطالعه شامل بلورهای خود شکل تا نیمه شکل دار پلاژیوکلاز، الیوین و اندکی کلینوپیروکسن هستند که در یک زمینه شیشه‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۳). شواهد هوازدگی در این سنگها دیده نمی‌شود.

اندازه‌ی اغلب این کانی‌ها در مقاطع مورد بررسی کمتر از ۱ میلی‌متر می‌باشد. البته بلورهای پلاژیوکلاز درشت‌تر هستند و وجود تحلیل‌رفتگی، منطقه‌بندی عادی و همچنین بافت غربالی در برخی از نمونه‌ها از جمله خصوصیات این کانی در سنگ‌های مورد مطالعه است. گاهی بلورهای پیروکسن به صورت ادخال در بلورهای پلاژیوکلاز مشاهده می‌شوند. بافت غالب مشاهده شده در این سنگ‌ها بافت پورفیری یا گلومروپورفیری، اینترگرانولار، افیتیک، پلاژیوکلازهای غربالی، پوئی‌کلیتیک و گاهی میکرولیتی حفره‌دار است.

اصلی) و ICP-MS (برای اندازه‌گیری عناصر جزئی و نادر خاکی) به شرکت ALS Mineral در کشور ایرلند ارسال شد (جدول ۱ نتایج را نشان می‌دهد). با هدف مطالعه نحوه توزیع بلورهای الیوین در بازالت‌های ماکو-پلدشت، تعداد ۳ نمونه که بیشترین حجم الیوین را داشتند و برای مطالعه اندازه حباب‌ها ۴ نمونه شاخص انتخاب شد. پس از تهیه تصویر کلی مقطع میکروسکوپی با تکنیک میکروویژنر، تصویر بلورهای الیوین و ابعاد حفرات استخراج و پردازش تصویری و اندازه‌گیری توسط نرم‌افزارهای متعدد از قبیل Asap, Digimizer, photoshop روی آنها صورت گرفت. سپس داده‌های مربوط به طول، عرض، مساحت، گردشگی و ... بعنوان ورودی به نرم افزار CSD Corrections وارد شده و منحنی های CSD و نیز BSD ترسیم شد.

۴-نتایج



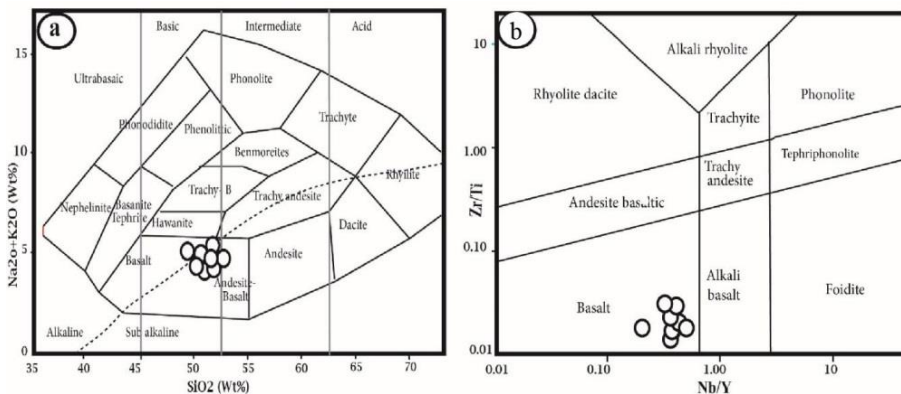
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از بازالت‌های ماکو-پلدشت شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، الیوین و کلینوپیروکسن در زمینه‌ی شیشه‌ای و حفره‌دار. (a, c) در حالت PPL و (b, d) در حالت XPL گرفته شده است. علائم اختصاری کانی‌ها از Kretz (1983) است. علامت Ol برای الیوین و Pl برای پلاژیوکلاز بکار رفته است.

Fig. 3. Photomicrographs of the Maku-Poldasht basalts consist of plagioclase, olivine and clinopyroxene phenocrysts at the hyaline and vesicular matrix. (a, c) in PPL and (b, d) in XPL are taken. The minerals abbreviations are Ol for olivine and Pl for plagioclase (after Kretz, 1983)..

۴-۲- ژئوشیمی

بازالت قرار گرفته‌اند (شکل ۴a). در این نمودار همچنین مرز بین سنگ‌های آکالین و ساب آکالین تفکیک شده که نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده ساب-آکالین قرار می‌گیرند. در نمودار نسبت Nb/Y در برابر Zr/Ti نمونه‌ها در محدوده‌ی بازالت قرار گرفته‌اند (شکل ۴b).

در گدازه‌های ماکو-پلدشت فراوانی سیلیس از ۴۹/۴ تا ۵۲/۵ درصد است (جدول ۱). تغییرات درصد Al_2O_3 در بازه ۱۷/۵-۱۴/۵۷ است (جدول ۱). در نمودار طبقه بندی (Cox et al., 1979) نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی بازالت و آندزی



شکل ۴- نمودارهای طبقه‌بندی سنگ‌های منطقه بر اساس (a) اکسید عناصر اصلی از Cox et al. (1979) و (b) نسبت‌های عناصر جزئی از Pearce (1996).

Fig. 4. The classification diagrams of the area rocks (a) on the basis of major oxide elements after Cox et al., (1979) and (b) and trace elements ratios after Pearce (1996).

فرایند ذوب بخشی است. وجود یک الگوی مسطح در بخش MREEها در سنگ‌های منطقه (شکل ۶a) ناشی از عدم وجود فازهای جمع‌کننده‌ی این عناصر (نظیر آمفیبول) در ماگمای بازالتی است. این روند مشابه الگوی سایر بازالت‌های درون صفحه‌ای است که تصویر مقایسه بدلیل محدودیت صفحات حذف شد.

درباره نمودار عنکبوتی (شکل ۶b) با استفاده از عناصر جزئی (جدول ۱)، نادر خاکی و اصلی، در حالت کلی عناصر LILE و عناصر LREE فراوانی بیشتری نسبت به HFSE و HREE دارند. Rb, Ba بیشتر توسط کانی‌های پتاسیم دار جذب می‌شوند. غنی‌شدگی شدید از باریم در نمودارهای عنکبوتی مربوط به آرایش پوسته‌ای و آلودگی ماگما در طی انتقال به سطح و حضور کانی‌هایی نظیر پلاژیوکلاز می‌باشد. استرانسیوم جانشین کلسیم در پلاژیوکلاز می‌شود پس آنومالی مثبت آن توسط حضور این کانی در فرآیند تفریق قابل توجه است. باریم از نظر شعاع یونی تنها عنصر اصلی قابل مقایسه با پتاسیم است، بنابراین در بیوتیت و فلدسپار پتاسیم وارد می‌گردد.

تهی‌شدگی قابل توجه از HREE نشانگر باقی ماندن گارنت در فاز تفاله و عدم مشارکت آن در فرایند تولید مذاب است. همچنین کانی‌های نگهدارنده و پایدار در لیکیدوس محل ذوب در گوشته در مناطق فرورانشی، مانند روتیل، آپاتیت و تیتانیت می‌توانند باعث

با استفاده از نمودار SiO_2 در مقابل K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976) نمونه‌های منطقه مذکور در محدوده کالک آکالین با پتاسیم متوسط و یک نمونه هم در محدوده‌ی با پتاسیم کم قرار می‌گیرند (شکل ۵a). با استفاده از نمودار عناصر Th و Co نمونه‌های مورد مطالعه همگی در محدوده‌ی کالک آکالین پیاده شده‌اند (شکل ۵b). در نمودار Ta/Yb در مقابل Ce/Yb نیز نمونه‌های منطقه از نوع کالک آکالین ارزیابی می‌شوند (شکل ۵c).

در این مطالعه میزان عناصر نادر خاکی سنگ‌های منطقه (جدول ۱) نسبت به کندریت به‌هنگار شده و الگوی آن ترسیم شده است (شکل ۶a). سنگ‌های منطقه‌ی مورد مطالعه غنی‌شدگی از LREE و تهی‌شدگی از HREE نشان می‌دهند. میانگین نسبت La/Yb در سنگ‌های بازالتی ماکو-پلدشت برابر با ۸ می‌باشد که این ویژگی به همراه نبود آنومالی منفی عنصر Eu، بیانگر ویژگی‌های بازالت‌های درون صفحه‌ای است (Yang et al., 2009). غنی‌شدگی LREE در این سنگ‌ها ممکن است به دلیل باقی ماندن گارنت در منشأ (MacDonald et al., 2009) و آرایش با مواد پوسته‌ای (Srivastava and Singh, 2004) باشد.

عدم وجود آنومالی مثبت و یا منفی واضحی از عنصر Eu بیانگر عدم مداخله‌ی کانی‌های در برگیرنده‌ی این عنصر (پلاژیوکلاز) در

ناهنجاری‌های منفی عناصر HFSE نظیر Ti و عناصر دارای محلول (White, 2005).

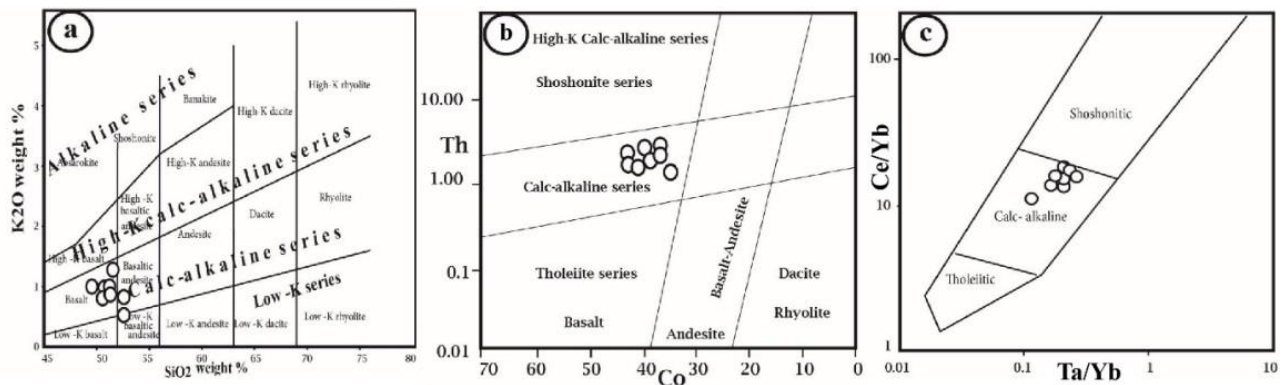
جامد وسیع با آن مثل Ta, Nb شوند (Woodhead et al., 1993).

جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز سنگ کل بازالت‌های ماکو-پلدشت. اکسید عناصر اصلی بروش XRF و عناصر جزئی بروش ICP-MS اندازه‌گیری شده است.

Table 1. Whole rock analysis results of the Maku-Poldasht basalts. The major oxide elements with XRF and trace elements with ICP-MS method are measured.

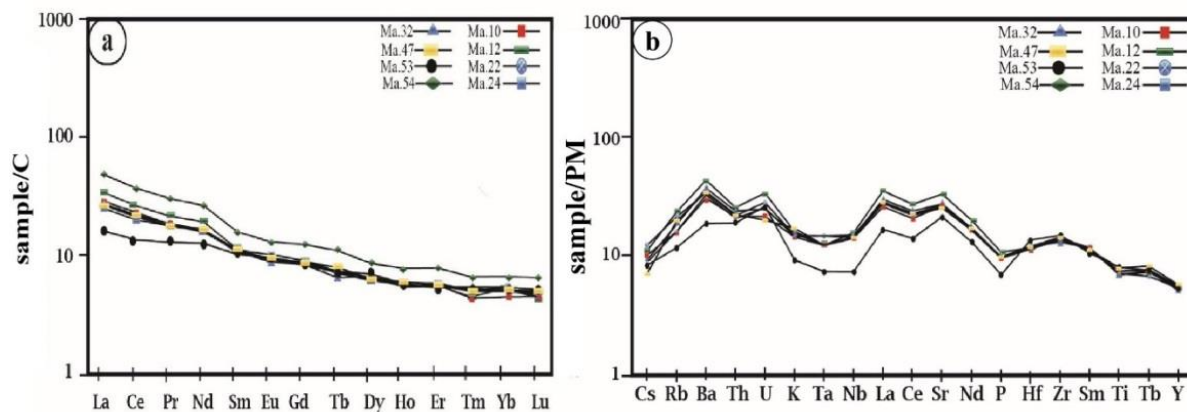
	Ma.10	Ma.12	Ma.22	Ma.24	Ma.32	Ma.47	Ma.53	Ma.54	Ma.48	Ma.49
SiO ₂	51.3	50.7	51.5	52.2	50.7	52.5	49.4	51.7	50.7	51.5
Al ₂ O ₃	16.1	15.95	16.25	16.5	15.9	17.5	17.05	14.75	15.9	16.25
Fe ₂ O ₃	9.57	9.37	9.44	9.55	9.37	9.15	10.1	10.75	9.37	9.44
CaO	9.06	8.79	8.9	8.72	9.01	8.18	8.78	8.51	9.01	8.9
MgO	7.35	6.72	7.33	6.87	6.98	5.19	7.32	5.81	6.98	7.33
Na ₂ O	3.66	3.7	3.67	3.88	3.64	4.19	4.04	3.87	3.64	3.67
K ₂ O	0.92	0.88	0.89	0.83	0.84	0.53	0.98	1.28	0.84	0.89
Cr ₂ O ₃	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03
TiO ₂	1.47	1.56	1.48	1.58	1.51	1.7	1.68	2.03	1.51	1.48
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.16	0.17	0.15	0.15
P ₂ O ₅	0.45	0.4	0.41	0.4	0.41	0.29	0.41	0.61	0.41	0.41
SrO	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
BaO	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.04	0.02	0.03
LOI	0.78	0.67	0.13	-0.08	0.61	-0.01	0.15	0.76	0.61	0.13
Total	100.94	98.99	100.27	100.7	99.23	99.43	100.19	100.36	99.23	100.27
La	24.9	20.2	21.1	18.3	19.5	11.8	20	35.6	19.5	21.1
Ce	49.8	40.8	43.7	37.7	40.1	25.6	41.8	70.1	40.1	43.7
Pr	6.16	5.32	5.25	5.1	5.11	3.7	5.3	8.7	5.11	5.25
Nd	27.1	23.2	23.2	22.3	22.4	17.8	23.4	37.2	22.4	23.2
Sm	5.18	4.86	5.14	5.06	4.98	4.67	4.95	7.29	4.98	5.14
Eu	1.57	1.59	1.6	1.76	1.52	1.65	1.64	2.26	1.52	1.6
Gd	5.41	5.15	5.1	5.55	5.14	5.3	5.39	7.6	5.14	5.1
Tb	0.78	0.82	0.8	0.81	0.72	0.81	0.88	1.22	0.72	0.8
Dy	4.66	4.92	4.7	4.61	5.02	5.29	4.77	6.49	5.02	4.7
Ho	1.01	0.91	0.93	0.98	0.96	0.96	1	1.3	0.96	0.93
Er	2.73	2.72	2.77	2.88	2.62	2.64	2.81	3.85	2.62	2.77
Tm	0.34	0.38	0.33	0.38	0.4	0.41	0.39	0.5	0.4	0.33
Yb	2.6	2.64	2.2	2.45	2.46	2.65	2.52	3.27	2.46	2.2
Lu	0.33	0.34	0.34	0.36	0.37	0.39	0.38	0.49	0.37	0.34
Ba	304	237	260	213	228	130.5	243	397	228	260
Cr	230	190	190	180	190	40	180	130	190	190
Cs	0.25	0.28	0.21	0.23	0.2	0.19	0.16	0.24	0.2	0.21
Ga	18.3	16.5	16.2	16.3	17	17.5	16.7	17.7	17	16.2
Hf	3.6	3.6	3.7	3.5	3.5	4.2	3.7	4.8	3.5	3.7
Rb	14.8	13.5	11.6	10.1	10.2	7.4	12.4	17.1	10.2	11.6
Sr	700	569	575	557	534	448	535	605	534	575
Ta	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.3	0.5	0.8	0.6	0.5
Th	2.14	1.83	2	1.79	1.74	1.58	1.87	2.99	1.74	2
U	0.71	0.59	0.52	0.45	0.53	0.55	0.42	0.83	0.53	0.52
V	185	184	174	169	179	160	185	248	179	174
Y	24.4	25.1	23	24.3	24.2	23.9	25.6	33.2	24.2	23
Zr	156	160	146	160	153	166	160	219	153	146
Co	42	41	40	36	41	35	40	40	41	40
Cu	51	49	48	44	47	37	49	67	47	48
Li	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Ni	126	109	122	112	117	56	110	81	117	122
Nb	11.1	10.6	10.3	10.0	10.2	5.2	10.3	15.8	10.2	10.3
Sc	21	21	20	20	21	18	21	26	21	20
Zn	81	81	82	80	83	81	86	104	83	82
Rb/Sr	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
Rb/Ba	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
La _n /Sm _n	3.02	2.61	2.58	2.27	2.46	1.59	2.54314	3.07	2.46	2.58
Sm _n /Yb _n	2.13	1.97	2.50	2.21	2.17	1.89	2.10	2.39	2.17	2.50
Eu/Eu*	1.41	1.32	1.03	1.02	1.13	0.84	1.20	1.28	1.13	1.03
Ce/Ce*	1.51	1.49	2.43	2.15	1.91	2.25	1.74	1.86	1.91	2.43
Th/Yb	0.823	0.69	0.9	0.73	0.7	0.6	0.74	0.91	0.7	0.9
Nb/Y	0.45	0.42	0.45	0.41	0.42	0.21	0.4	0.47	0.42	0.45
Zr/Y	6.4	6.3	6.35	6.6	6.3	6.9	6.25	6.7	6.3	6.35
ΔNb	-0.13	-0.17	-0.13	-0.21	-0.16	-0.53	-0.17	-0.16	-0.16	-0.13

- $\Delta Nb = 1.74 + \log(Nb/Y) - 1.92 \log(Zr/Y)$ after Fitton et al. (1997)



شکل ۵- تعیین سری ماگمایی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه (a) نمودار SiO₂ در مقابل K₂O از (Peccerillo and Taylor, 1976)، نمودار (b) نمودار Co در مقابل Th از (Hastie et al., 2007) و (c) نمودار Ta/Yb در مقابل Ce/Yb از (Pearce, 1982). همه نمودارها سرشت کالکوالکان را برای بازالت‌های ماکو-پلدشت نشان می‌دهند.

Fig. 5. Determination of magmatic series for the studied rocks (a) SiO₂ vs. K₂O diagram (Peccerillo and Taylor, 1976), (b) Co vs. Th diagram (Hastie et al., 2007) and (c) Ta/Yb vs. Ce/Yb (Pearce, 1982). All of them show the calc-alkaline affinity for the Maku-Poldasht basalts.



شکل ۶- (a) نمودار الگوی REE به هنجار شده بازالت‌های ماکو-پلدشت نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) و (b) نمودار عنکبوتی (McDonough et al., 1992).

Fig. 6. (a) The chondrite normalized (Sun and McDonough, 1989) REE pattern of the Maku-Poldasht basalts and (b) The spider diagram of the same rocks (the normalization values are after McDonough et al., 1992).

نتیجه را نشان داد ولی برای عدم تکرار موضوع در متن گنجانده نشد.

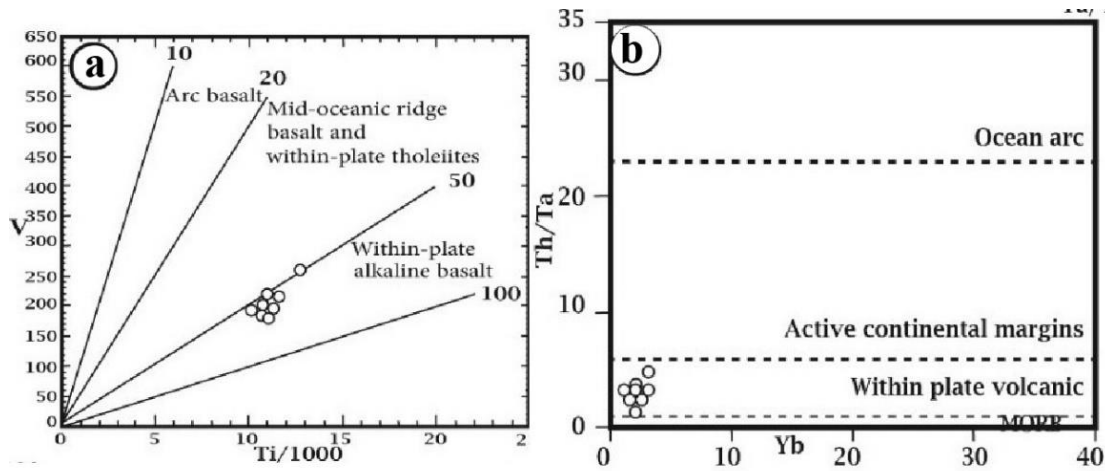
۴-۴ تعیین منبع مذاب

منبع فاقد گارنت برای ماگمای مولد بازالت‌های ماکو-پلدشت توسط نمودار Ce/Sm در برابر Sm/Yb (از Çoban, 2007) نیز تأیید می‌شود (شکل ۸a). بطور کلی طبق شواهد نسبت‌های عناصر جزئی (مانند Nb/La در برابر La/Yb) به نظر می‌رسد منبع ماگما نه یک گوشته استوسفری بلکه از نوع لیتوسفری و کم عمق تر بوده است (شکل ۸b).

۵- بحث

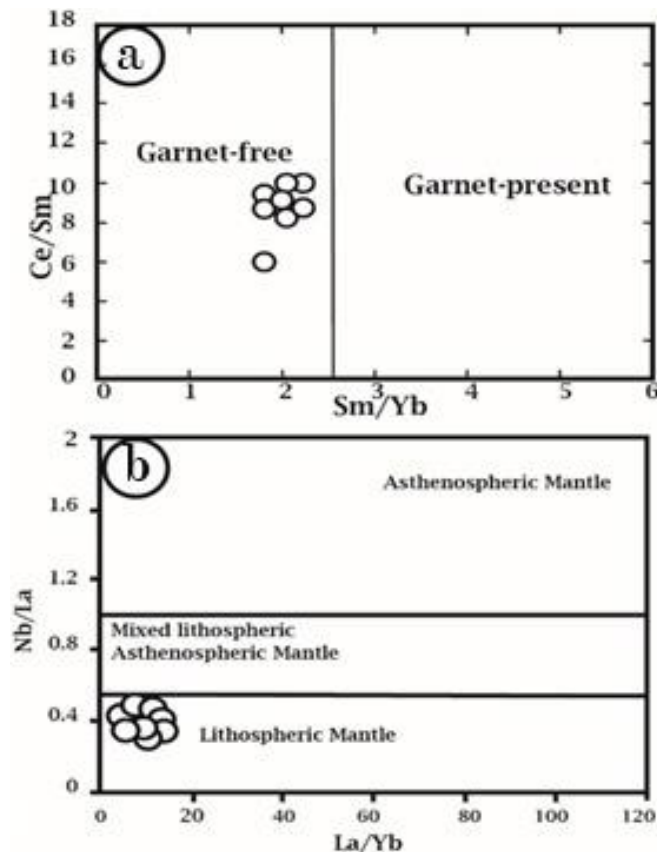
۴-۳ تعیین محیط تکتونیکی

از نسبت V به Ti به عنوان ابزاری در جهت سنجش میزان فعالیت اکسیژن ماگما و تفریق بلورین نمودار دو متغیره‌ای طراحی شده (Shervais, 1982) که در آن بازالت‌ها براساس نسبت Ti/V در محدوده‌های مختلف قرار می‌گیرند. در این نمودار نمونه‌های منطقه در محدوده‌ی بازالت‌های درون صفحه-ای قرار گرفته‌اند (شکل ۹a). همچنین در نمودار Th/Ta در مقابل Yb (Schandle and Gorton, 2002) نیز ارتباط بازالت‌های ماکو-پلدشت با موقعیت درون صفحه‌ای به خوبی نمایان است (شکل ۹b). چندین نمودار کلاسیک دیگر نیز همین



شکل ۷- نمودارهای تعیین محیط تکتونیکی بازالت‌های منطقه. (a) نمودار V در مقابل Ti/1000 (Shervais, 1982) و (b) نمودار Th/Ta در مقابل Yb (Schandle and Gorton, 2002).

Fig. 7. The tectonic setting discrimination diagrams for the area basalts. (a) V vs. Ti/1000 (Shervais, 1982) and (b) Th/Ta vs. Yb (Schandle and Gorton, 2002).

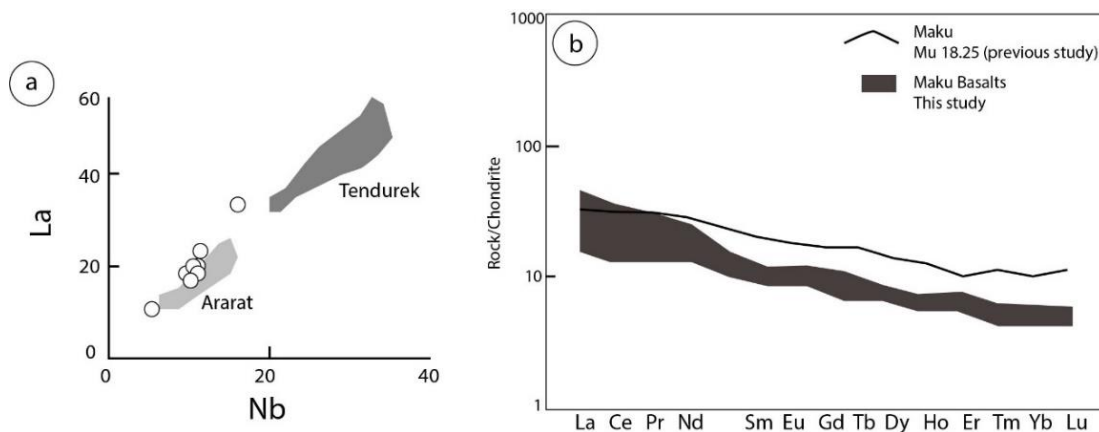


شکل ۸- نمودارهای تعیین عمق منبع. (a) از Çoban (2007) و (b) از Abdel-Rahman and El-Kibbi (2001).

Fig. 8. Determination of source depth diagrams. (a) after Çoban (2007) and (b) after Abdol Rahman and El-Kibbi (2001).

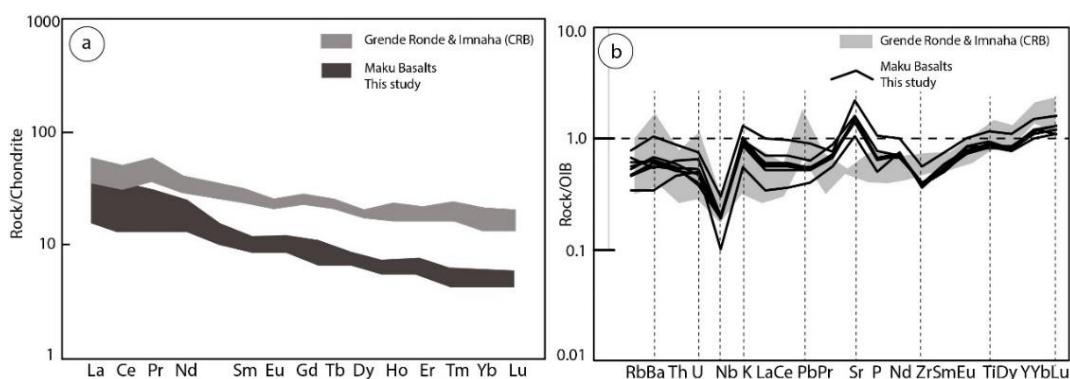
با هدف تعیین اینکه آیا بازالت‌های طغیانی ماکو-پلدشت حاصل فعالیت‌های آتشفشانی آرارات بوده است یا از دهانه تندورک خارج شده، از نمودار La در برابر Nb استفاده شد (شکل ۹a)، که در آن بوضوح تعلق این بازالت‌ها به آتشفشانی آرارات روشن می‌شود. برای اثبات اینکه بازالت‌های منطقه ماکو-پلدشت از نوع درون صفحه‌ای هستند، الگوی عناصر نادر خاکی و نمودار عنکبوتی آن با یکی از انواع بازالت‌های درون صفحه‌ای قاره‌ای بسیار کار شده، بازالت‌های رود کلمبیا (CRB) مقایسه شد (شکل ۱۰). دو منطقه گرنده رونده و ایمنها از بازالت‌های رود کلمبیا از نظر نسبت‌های عناصر نادر خاکی و مقادیر (Sluggett, 2003) بسیار مشابه با بازالت‌های این نوشتار می‌باشند. پس احتمال تعلق بازالت‌های ماکو-پلدشت به گروه بازالت‌های طغیانی قاره‌ای بالاست. فاکتور مهمی با نام ΔNb توسط دانشمندان معرفی شده (Fitton et al., 1997) که یک مشخصه اساسی برای منبع است زیرا نسبت به آثار درجات مختلف ذوب گوشته، تهی‌شدگی منبع در پی خروج مذاب، آلیش پوسته‌ای ماگما یا دگرسانی تأخیری حساس بوده و با استفاده از مقادیر عناصر نئوبوم، ایتیریم و زیرکونیوم می‌توان به آن دست یافت:

$$\Delta Nb = 1.74 + \text{Log}(Nb/Y) - 1.92 \text{Log}(Zr/Y) \text{ after Fitton et al. (1997)}$$



شکل ۹- (a) نمودار La در برابر Nb که در آن موقعیت نمونه‌های آرارات و تندورک پیاده شده (Kheirkhah et al., 2009) و نیز دایره‌های توخالی نمونه‌های مطالعه حاضر را نشان می‌دهد و (b) الگوی عناصر نادر خاکی بازالت‌های حاضر با یک نمونه قبلاً مطالعه شده (Kheirkhah, 2013) که با آرارات تشابه دارد، مقایسه شده است.

Fig. 9. (a) La vs. Nb diagram in which Ararat, Tendurak (Kheirkhah et al., 2009) and this study volcanic samples as white circles are plotted and (b) The REE patterns of this study compared with the previous study sample (Kheirkhah, 2013) that is similar to the Ararat.



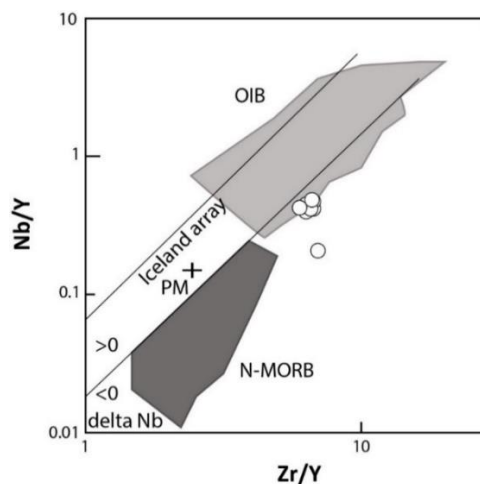
شکل ۱۰- مقایسه الگوی (a) عناصر نادر خاکی و (b) عنکبوتی نمونه‌های منطقه با نمونه‌های دو ناحیه گرنده رونده و ایمنها از بازالت‌های طغیانی رود کلمبیا (Hooper and Hawkesworth, 1993).

Fig. 10. The comparison of (a) the REE pattern and (b) the spidergram of the studied samples with the Grende Ronde and Imnaha from Colombia River basalts (Hooper and Hawkesworth, 1993).

اطراف آن بوده است.

نسبت‌های ایزوتوپی نئودیمیم در مقابل استرانسیمیم یک نمونه قبلاً کار شده همین منطقه با دو ناحیه گرنده رونده و ایمنها از بازالت‌های رود کلمبیا، کاملاً مشابه است (نسبت استرانسیمیم 0.704 تا 0.705 و نسبت نئودیمیم کمتر از 0.513). بنابراین سنگهای مذکور بر خلاف آنچه که در مطالعات پیشین (Kheirkhah et al., 2009) اشاره شده نمی‌توانسته‌اند همزمان با برخورد دو ورقه اوراسیایی و عربی و در قوس ماگمایی حاصل شده باشند. بلکه پس از برخورد و ضخیم‌شدگی قابل توجه پوسته در این ناحیه و حاکمیت رژیم‌های کششی ناشی از بالازدگی پس از برخوردی (Barbarin, 1999) از محل گسل خوردگی‌ها به سطح راه یافته‌اند.

این فاکتور برای تک تک نمونه‌های منطقه ماکو-پلدشت محاسبه شده و در جدول ۱ آمده است. مقادیر کمتر از یک آن (منفی) علامت منشأ است برای مثال مورب از نوع عادی. البته باید توجه داشت که این فاکتور برای متوسط پوسته قاره‌ای نیز منفی است (Fitton, 2007). بنابراین آرایش یک ماگمای درون صفحه‌ای با پوسته (که در مقدمه گفته شد در این ناحیه بسیار ضخیم شده) می‌توانسته مسئول منفی شدن این فاکتور در سنگهای منطقه شود (جدول ۱). همچنین از نمودار مقادیر Nb/Y در برابر Zr/Y (Fitton, 2007) برای اثبات درون صفحه‌ای بودن بازالت‌های ناحیه بهره گرفته شد (شکل ۱۱). در این نمودار با اینکه از نظر فاکتور ΔNb سنگهای منطقه اندکی منفی بوده و در آرایه ایسلندی قرار نگرفته ولی در محدوده



شکل ۱۱- نمودار مقادیر Nb/Y در برابر Zr/Y (Fitton, 2007) که بازالت‌های درون صفحه‌ای از نوع مورب با در نظر گرفتن مقادیر دلتای نئوبیوم تفکیک می‌کند. در این نمودار معلوم می‌شود بازالت‌های منطقه از نوع درون صفحه‌ای است.

Fig. 11. The Nb/Y vs. Zr/Y diagram after Fitton (2007) which is discriminate the MORB from WPB with respect to ΔNb . It is clear that the basalts are within plate basalts.

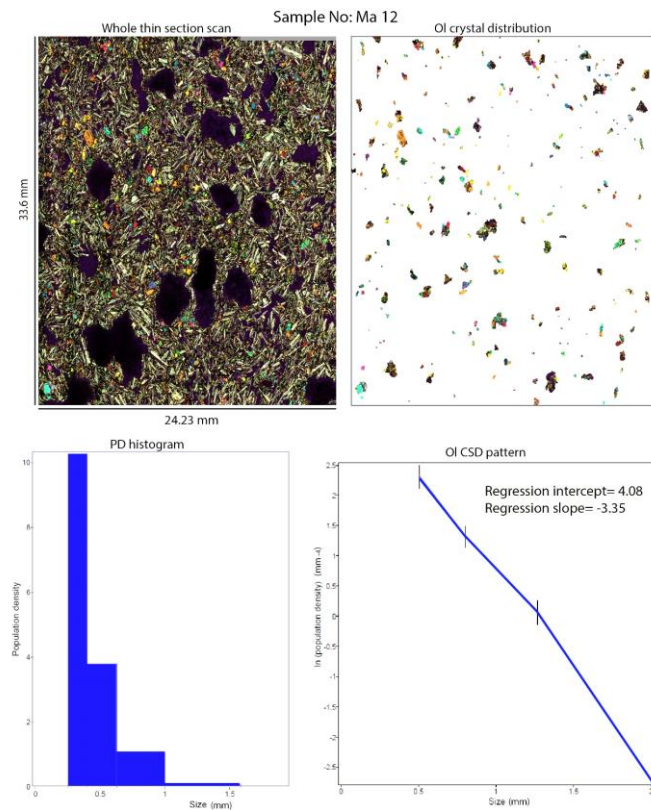
تجمعی بلور است. چگالی تجمعی شامل تعداد بلورهای یک کانی در واحد حجم در یک سری فواصل اندازه (بازه) تعریف شده است. واحد اندازه‌گیری برای اندازه‌ی بلورها mm و برای چگالی تجمعی بلورها mm^{-4} می‌باشد.

در تفسیر این الگو پیچش یا انحناء در نمودارهای CSD به فرایندهایی از قبیل تجمع و از بین رفتن بلور، تراکم، اختلاط جمعیت‌های بلوری و هسته‌بندی نهایی بلور توسط بازپخت یا بلوغ بافتی استوالد (Ostwald ripening) نسبت داده می‌شود. نوع مستقیم یا بخش‌های کم انحنای CSD، می‌تواند رگرسیون-دار شود و شیب و محل تقاطع آن تعیین شود.

۶- توزیع اندازه بلورهای الیوین در بازالت‌ها

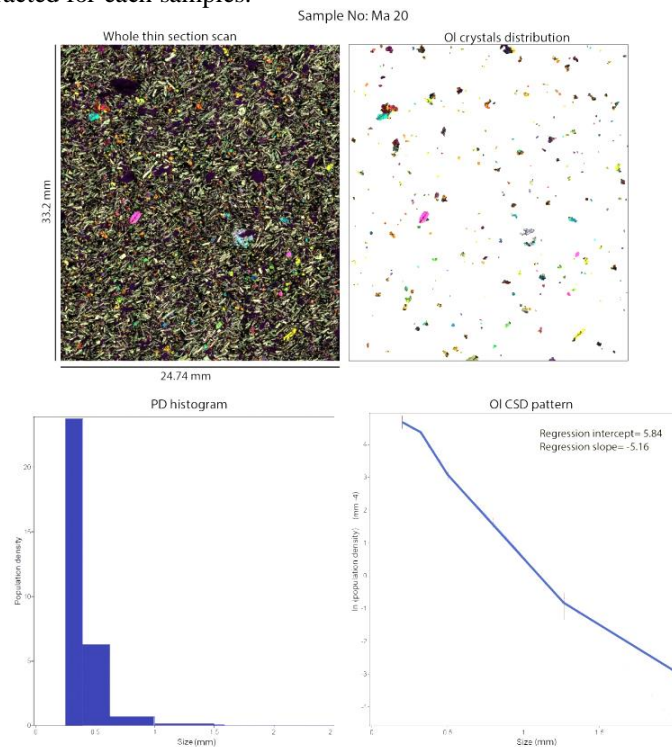
در این مقاله منحنی‌های توزیع بلورهای الیوین موجود در بازالت‌های معرف ناحیه شرقی (Ma20)، مرکزی (Ma12) و غربی (Ma54) که بیشترین حجم الیوین را داشته‌اند، ترسیم شد. الگوی CSD الیوین در این نمونه‌ها بصورت خطی است (شکل ۱۲) که نشانگر تک‌نسلی بودن آنها و عدم وقوع اختلاط ماگمایی است.

در یک نمودار CSD مقادیر $\ln(n)$ در مقابل L رسم می‌شود، که در آن L برابر با بزرگترین بعد بلور و n برابر با چگالی

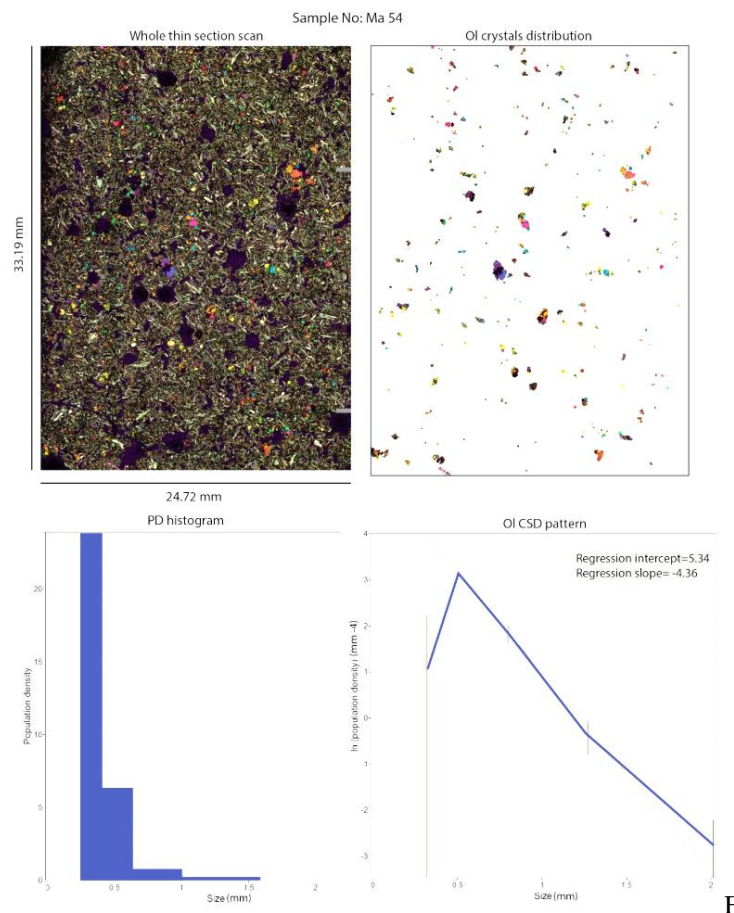


شکل ۱۲- تصویر مقطع میکروسکوپی مجازی اسکن شده، طرحواره انتخابی از الیوین‌ها، نمودار هیستوگرامی از ابعاد الیوین‌ها و در آخر الگوی CSD مستخرج برای هر نمونه.

Fig. 12. Total picture of virtual scanned thin section, whole sketches from olivine crystals, histogram graphs and at last CSD curves of crystals, extracted for each samples.



شکل ۱۲ . ادامه.
Fig. 12. Continued



شکل ۱۲- ادامه.

Fig. 12. Continued.

هسته‌بندی به رشد بلور محاسبه شد (جدول ۲). میانگین زمان لازم برای تبلور بلورهای الیوین با در نظر گرفتن متوسط سرعت رشد $G = 10^{-10}$ ، حدود ۶۰ تا ۹۰ سال بوده است (جدول ۳). این طول زمانی می‌تواند نشان‌دهنده مدت اقامت ماگما قبل از خروج از لانه ماگمایی باشد. نرخ هسته‌بندی (J) نسبت به رشد ۴ تا ۵ برابر سریع‌تر بوده است. این مطلب نمایانگر سرعت بالای اتلاف دما در اثر جریان گدازه بر روی سطح زمین می‌باشد (جدول ۳).

۷- توزیع اندازه حفرات در بازالت‌های ماکو-پلدشت

مطالعات آماری روی حفرات گدازه‌ها (VSD) یا حباب‌ها (BSD) شامل پارامترهای قابل اندازه‌گیری، می‌تواند اطلاعات مهمی را درباره دینامیک و رئولوژی جریان گدازه بدست دهد (Cashman et al., 1994). تفسیر الگوی BSD نیازمند درک درستی از فرایندهای حباب‌سازی در مجرای تغذیه‌کننده ماگما و نیز فرایندهای پس از فوران در طی انتقال و جایگیری است. بررسی‌ها روی حفرات موجود در بازالت‌های ماکو-پلدشت نشانگر کاهش تعداد با افزایش قطر حباب می‌باشد. بدلیل

تقاطع روی محور تراکم جمعیت برابر $\ln(n)$ و شیب برابر با $(-1/Gt)$ است. G برابر با نرخ رشد بلور و t برابر با زمان اقامت بلور است. نرخ هسته‌بندی از رابطه $J = n_0 G$ به دست می‌آید که G برابر با نرخ رشد و n_0 برابر با چگالی هسته‌بندی است. بنابراین دو فاکتور عرض از مبدأ خط وایزشی و نیز شیب آن اهمیت فوق‌العاده دارد. مقادیر نسبت بین محورهای طولی: متوسط: کوتاه برای کانی‌های مختلف متفاوت است و این میزان برای بلورهای الیوین ۱/۲۵ : ۱/۲۵ : ۱ می‌باشد (Higgins, 2006).

با استفاده از تکنیک نوین میکروویژنیونر تصویر کامل مقطع نازک اسکن شده و از مقاطع مجازی تهیه شده، بلورهای الیوین را توسط کار نرم‌افزاری استخراج نموده و اشکال حاصل را وارد نرم افزار Digimizer کرده و داده‌های به دست آمده را وارد نرم‌افزار CSD Corrections نموده و در نهایت نمودارهای CSD برای الیوین ترسیم شد (شکل ۱۲). با استفاده از نمودارهای CSD و اطلاعات خط وایزشی که از آن به دست آمده است و با در اختیار داشتن مقادیر G مقادیر t و نسبت

روی سبک فوران اثر گذار است. در این نوشتار با توجه به سرشار از حفره بودن بازالت‌های ماکو-پلدشت (شکل ۱۳)، داده‌های پتروفیزیکی از قبیل توزیع اندازه و تعداد حفرات و نسبت نرخ هسته‌بندی به رشد حباب در این گدازه‌ها در ۴ نمونه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۴).

گرانروی کم و انتشارپذیری بالای سیالات در ماگمای بازالتی، گاززدایی در آن قابل ملاحظه است (Colombier et al., 2021). میزان گاز، زمان‌بندی خروج گدازه و رژیم گاززدایی تابعی از سبک ولکانیسم بازالتی است. انتقال از گاززدایی در سیستم بسته به گاززدایی در سیستم باز در فشار کم به شدت

جدول ۲- نتایج توزیع تعداد بلورهای الیوین در بازه‌های تعریف شده ابعاد طولی در بازالت‌های ماکو-پلدشت که اساس ترسیم الگوی CSD بوده‌اند.

Table 2. The results of olivine crystals distribution at the determined size intervals for the Maku-Poldasht basalts which are the basis of the CSD curves illustration.

Sample No.	Crystal size intervals (mm)					
	0.251	0.398	0.631	1.000	1.58	2.51
Ma 12	0	14	54	42	27	4
Ma 20	75	94	59	33	7	2
Ma 54	0	26	56	33	9	2

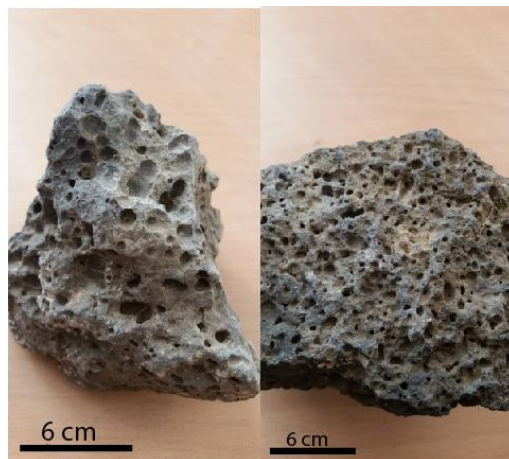
جدول ۳- نتایج حاصل از پردازش تصویر شامل گردشگی و مساحت بلورهای الیوین و اطلاعات شیب و عرض از مبدأ مربوط به خط وایازشی CSD به همراه محاسبه طول زمان تقریبی رشد بلور یا مدت ماندگاری در لانه ماگمایی.

Table 3. The results of image processing including roundness and area of olivine crystals are presented. Some other data about the slope and intercept of the regression best fit line of CSD curve are added. The calculated time length of crystals growth or residence time at the magma chamber, are measured at the last column.

Sample No.	Total area of crystal (mm ²) on the thin section	Average roundness of crystal	Slope of regression (-1/Gt) of CSD curve	Intercept of regression (mm ⁻⁴)=J/G	Ol crystal growth time duration or residence time (per year) at the chamber (on the basis of estimated growth rate 10 ⁻¹⁰ (cm/s))
Ma 12	39.5	0.4	-3.35	4.08	94
Ma 20	26.72	0.5	-5.16	5.84	61
Ma 54	21.5	0.5	-4.36	5.34	73

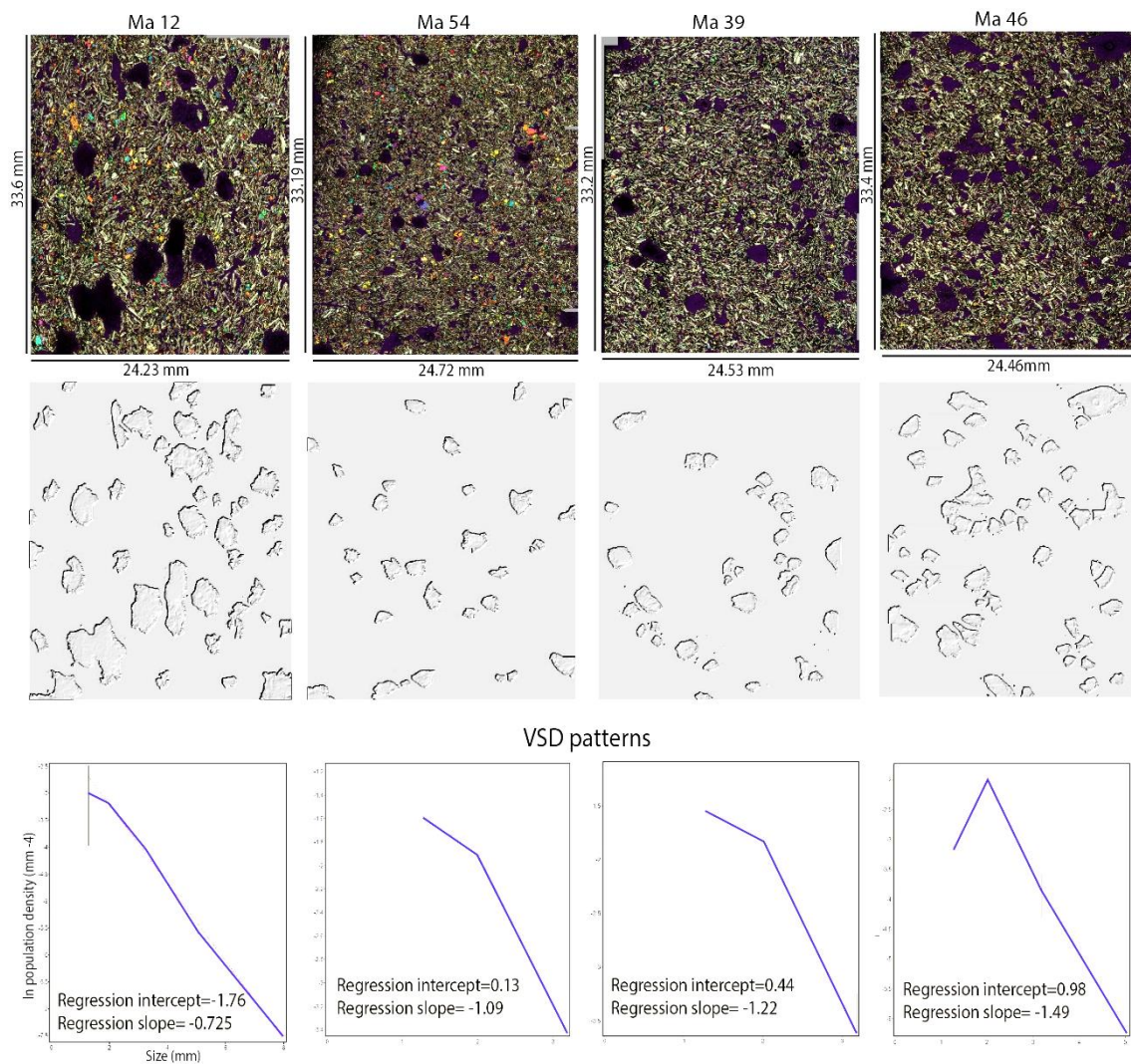
بر این اساس شیب خط وایازشی BSD برابر ۱- بوده که با $-1/Gt$ معادل بوده و Gt برابر یک بوده است (شکل ۱۴). در حالیکه این فاکتور برای الیوین‌ها ۳- تا ۵- می‌باشد. پس Gt برای الیوین‌ها کسری از یک (یک سوم تا یک پنجم) بوده است. یعنی در واحد زمان رشد حباب‌های گاز ۳ تا ۵ برابر رشد الیوین-ها سرعت داشته است.

عرض از مبدأ خط وایازشی از منفی یک تا مثبت یک در تغییر است که نشانه معادل بودن تقریب سرعت هسته‌بندی حباب‌ها و سرعت بزرگ شدن آنها و در برخی موارد تفوق سرعت رشد بر تشکیل حباب جدید می‌باشد (شکل ۱۵). پدیده جوش-خوردگی استوالد هم باعث بهم پیوستن حفرات ریزتر و تولید حباب بزرگتر شده و از تراکم جمعیت آماری حفرات ریز کاسته است (شکل ۱۶).

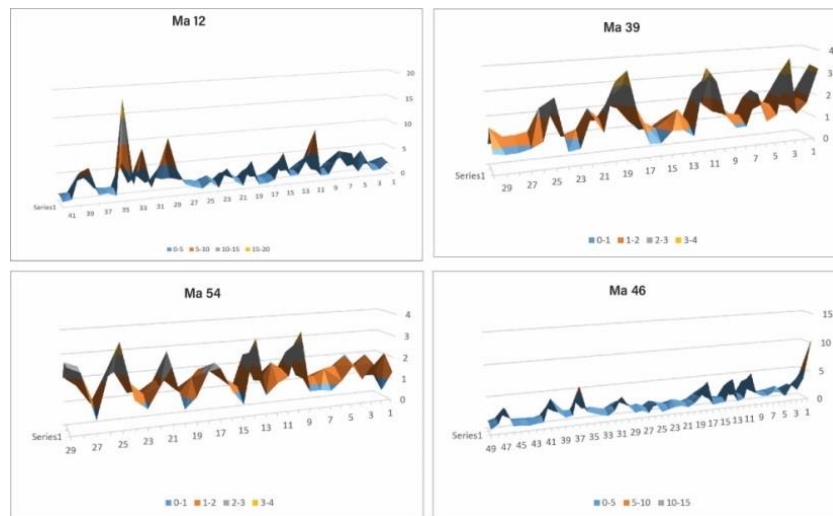


شکل ۱۳- عکس نمونه‌های مزوسکوپی بازالت‌های منطقه که مملو از حباب‌های ناشی از گاززدایی است.

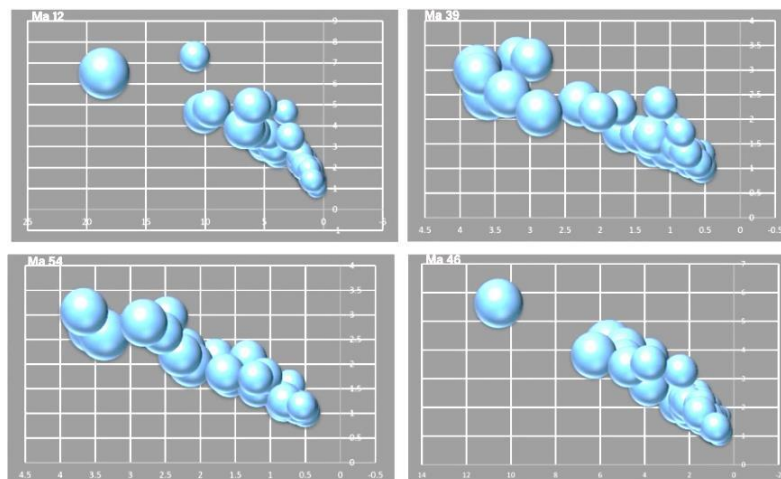
Fig. 13. The mezoscopic photos of the studied basalts that have plenty of bubbles which are formed at degassing.



شکل ۱۴- تصویر مقطع میکروسکوپی اسکن شده، طرحواره انتخابی از حباب‌ها و در آخر هر ردیف الگوی VSD حباب‌ها برای هر نمونه.
Fig. 14. The virtual scanned thin section, sketches for bubbled extracted and VSD curves for each sample bubbles.



شکل ۱۵- نمودارهای سه بعدی حاصل از طول، عرض و مساحت حباب‌ها بر مبنای مساحت حباب‌ها.
Fig. 15. 3D graphs illustrated from length, width and area vs. area of bubbles.



شکل ۱۶- نمودارهای مربوط به بزرگای مساحت (حجم) هر حباب در بازه قطر حفره. این نمودار بخوبی مبین افزایش حجم حباب‌ها در بازه قطر زیاد و نیز کم تراکمی حباب در بخش‌های واجد حباب کم است.

Fig. 16. Binary diagrams for the area of each bubble (volume) at the vesicle diameter intervals. The graphs indicate that with increasing bubble volume at high diameter interval and low bubble accumulation in low bubble parts.

۸- نتیجه گیری

مذکور از نظر محیط تکتونیکی متعلق به بازالت‌های درون صفحه‌ای و حاصل آتشفشانی آارات و بسیار جوان (به سن ۰/۸-۰/۴ میلیون سال) می‌باشند. بازالت‌های ناحیه ماکو- پلدشت از نظر الگوی عناصر نادر خاکی (کمیت و روند) مشابهت بالایی با بازالت‌های درون صفحه‌ای در دیگر نقاط جهان نشان می‌دهند، از قبیل بازالت‌های طغیانی رود کلمبیا (دو منطقه گرنده رونده و ایمنها). نمودار عنکبوتی به‌هنجارشده نسبت به OIB برای این نمونه‌ها بسیار نزدیک به افق یک و مشابه سایر بازالت‌های طغیانی حجم دنیا است. همچنین از نظر فاکتور ΔNb با اینکه مقادیر اندکی منفی است ولی در کل از آرایه ایسلندی و نوع

بازالت‌های منطقه ماکو- پلدشت تا با ماهیت کالک‌آلکان دارای الگوی عناصر نادر خاکی تفریق‌یافته هستند. غنی‌شدگی LREE در این سنگ‌ها ممکن است به دلیل باقی ماندن گارنت در منشأ یا آلیش با مواد پوسته‌ای و یا ترکیب از این موارد باشد. عدم وجود آنومالی مثبت و یا منفی واضحی از عنصر Eu بیانگر عدم مداخله‌ی کانی در برگیرنده‌ی این عنصر (پلاژیوکلاز) در فرایند ذوب‌بخشی است. در نمودارهای عنکبوتی به‌هنجارشده به گوشته‌ی اولیه، عناصر LILE و عناصر LREE نسبت به عناصر HFSE و HREE فراوانی بیشتری دارند. بازالت‌های

وایازشی که با نسبت $1/Gt$ معادل است برای الیوین موجود در بازالت‌های منطقه از ۳- تا ۵- بوده که با در نظر داشتن سرعت رشد بلور در شرایط استاندارد، چیزی حدود ۶۰ تا ۹۰ سال طول کشیده تا الیوین در آشیانه ماگمایی به چنین ابعادی برسد. با بررسی الگوی BSD برای حفرات بازالت‌های ماکو-پلدشت معلوم شد که نرخ هسته‌بندی به رشد حباب‌ها اغلب معادل بوده یا در برخی موارد سرعت رشد بر پیدایش هسته‌های جدید برتری داشته است. یعنی گاززدایی از این گدازه‌ها بسیار سریع صورت گرفته است که با توجه به ترکیب و گرانروی اندک دور از انتظار نبوده است. همچنین تراکم جمعیتی حباب‌های ریز بیشتر و حباب‌های حجیم ظاهراً با به هم پیوستن حباب‌های ریزتر حاصل شده و این از حفرات بزرگ متعدد کاسته است.

تنوره حرارتی تبعیت نموده و مقدار منفی آن بدلیل تأثیرگذاری پوسته قاره ستمبر این ناحیه در حین گذر ماگما از آن تا رسیدن به سطح زمین رخ داده است. این تنوره حرارتی طی فرایند پس برخوردی نئوتتیس و تأثیرات متاسوماتیکی تختال فرورونده در گوه‌گوشته‌ای تولید شده و در دورتر از محل زمین درز اصلی (به سمت داخل صفحه اوراسیایی) بیرون زده است. بنظر می‌رسد پس از بسته شدن نئوتتیس و غنی‌شدگی گوه‌گوشته‌ای بصورت متاسوماتیکی در اثر ورود تختال اقیانوسی به آن، با بالآمدگی و ضخیم‌شدگی پوسته ایران در شمال‌غرب، گسل‌های متعدد باعث افت فشار و راهیابی این ماگما به سطح زمین در ابعاد وسیع شده است.

بررسی الگوی CSD الیوین موجود در این بازالت‌ها نشان داد که عرض از مبدأ برابر با ۴ تا ۵ بوده که به معنی J/G حدود ۴ تا ۵ برابری برای الیوین‌ها می‌باشد. همچنین شیب خط

مراجع

- Abdel-Rahman, A., El-Kibbi, M., 2001. Anorogenic magmatism: chemical evolution of the Mount El-Sibai A-type complex (Egypt), and implications for the origin of within-plate felsic magmas. *Geological Magazine* 138(1), 67-85 <http://doi:10.1017/S0016756801005052>
- Ahmadzadeh, G., Jahangiri, A., Lentz, D., Mojtahedi, M., 2010. Petrogenesis of Plio-Quaternary post-collisional ultrapotassic volcanism in NW of Marand, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 39, 37-50 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.02.008>
- Azad, S.S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M.R., Shahpasand Zadeh, M., Ritz, J. F., 2011. The Zanzan fault system: Morphological and tectonic evidences of a new active fault network in the NW of Iran, *Tectonophysics* 506, 73-85 <http://doi:10.1016/j.tecto.2011.04.012>
- Barbarin, A., 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos* 46, 625-646 [http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1)
- Cashman, K.V., Mangan, M.T., Newman, S., 1994. Surface degassing and modifications to vesicle size distributions in active basalt flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 61(1), 45-68 [http://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)00015-8](http://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00015-8)
- Colombier, M., Bruce, V., Houghton, B.F., Caceres, F., Scheu, B., Kueppers, U., Thivet, S., Gurioli, L., Montan, C., Soldati, A., Di Muro, A., Dongwell, D.B., 2021. Degassing and gas percolation in basaltic magmas. *Earth and Planetary Science Letters* 573, 117-134 <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117134>
- Copley, A., Jackson, J., 2006. Active tectonics of the Turkish-Iranian Plateau. *Tectonics* 25, TC6006 <https://doi.org/10.1029/2005TC001906>
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankurst, R.J., 1979. The interpretation of Igneous rocks, London, Unwin – Hyman Ltd., p.450 <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1>
- Fitton J.G., 2007. The OIB paradox. Article in Special Paper of the Geological Society of America 430, 387-412 [http://doi.10.1130/2007.2430\(20\)](http://doi.10.1130/2007.2430(20))
- Fitton, J.G., Saunders, A.D., Norry, M.J., Hardarson, B.S., Taylor, R.N., 1997. Thermal and chemical structure of the Iceland plume. *Earth and Planetary Science Letters* 153, 197-208 [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00170-2)
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology* 48(12), 2341-2357 <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/egm062>
- Higgins M.D., 2006. Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology. Cambridge university press, p.265 <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535574>

- Hooper, P.R., Hawkesworth, C.J., 1993. Isotopic and geochemical constraints on the origin and evolution of the Columbia River Basalt. *Journal of Petrology* 34 (1), 203-246 <https://doi.org/10.1093/petrology/34.6.1203>
- Jones, M.R., Soule, S., Klein, F., 2020. Quantitative vesicle analyses and total CO₂ reconstruction in mid-ocean ridge basalts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* <http://doi.:10.1016/j.jvolgeores.2020.107109>.
- Keskin, M., Chugaev, A.V., Lebedev, V.A., Sharkov, E.V., Oyan, V., Kavak, O., 2012. Geochronology and origin of mantle sources for Late Cenozoic intraplate volcanism in the frontal part of the Arabian Plate in the Karacadağ Neovolcanic Area of Turkey. Part 1. The results of isotope – geochronologic studies. *Journal of Volcanology and Seismology* 6, 31-42 <https://doi.org/10.1134/S0742046312060048>
- Keskin, M., Pearce, J.A., Mitchell, J.G., 1998. Volcano-stratigraphy and geochemistry of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, northeastern Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 85, 355-404 [https://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00063-8](https://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00063-8)
- Kheirkhah, M., 2013. New investigation on the petrogenesis and dating of basic Quaternary lavas in the NW Iran. *Iranian Earth Sciences (in Persian)* 88, 205-218 <https://doi.org/10.22071/gsj.2013.53694>
- Kheirkhah, M., Allen, M.B., Emami, M.H., 2009. Quaternary syn-collision magmatism from the Iran/Turkey borderlands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 182, 1-12 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.026>
- Kretz R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American mineralogist* 68, 277-279
- MacDonald, R., Belkin, H.E., Wall, F., Bagiński, B., 2009. Compositional variation in the chevkinite group: new data from igneous and metamorphic rocks. *Mineralogical Magazine* 73, 777-796 <http://doi.10.1180/0026461026660078>
- McDonough, W.F., Sun, S.S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E., Hofmann, A.W., 1992. Potassium, rubidium, cesium in the Earth and Moon and the evolution of the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56, 1001-1012 [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Moazzen, M., Modjarrad, M., 2005. Contact metamorphism and crystal size distribution studies in the Shivar aureole, NW Iran. *Geological Journal* 40, 499-517 <https://doi.org/10.1002/gj.1025>
- Modjarrad, M., 2022a. Crystal Size Distribution of garnet and geochemistry of the Hal Hal Chaldoran garnet amphibolites-Northwest corner of Iran. *Advanced Applied Geology (in Persian)* 12(3), 537-556 <https://doi.10.22055/AAG.2021.37891.2237>
- Modjarrad, M., 2022b. Geochemistry and crystal shape, size and spatial distribution in arc-related gabbro, Urmia, NW Iran. *Acta Geochimica* <https://doi:10.1007/s11631-022-00557-8>
- Modjarrad, M., 2022c. The importance of quantitative measurements of the texture of metamorphic rocks. *Petrology (in Persian)* 12(48), 121-140 <https://doi.org/10.22108/ijp.2022.132883.1271>
- Modjarrad, M., 2015. Crystal size distribution of amphiboles from Bezow dacites, Urmia, Iran. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie- Abhandlungen* 276, 101-110
- Modjarrad, M., Sheykhabglou, S., 2016a. Crystal Size Distribution of kyanite and staurolite from Hamza Qassim and Khazai Bala Metapelites-southeast Shahin-Dezh; confirmation to regional metamorphism conditions at the area. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 24, 99-108 <http://doi.20.1001.1.17263689.1395.24.1.8.0>
- Modjarrad, M., Sheykhabglou, S., 2016b. Crystal size distribution of amphibole and plagioclase from Zambil adakitic dacites, Urmia-Iran: Evidence for magma mixing and textural coarsening. *Acta Geodynamic Geomaterials* 181, 89-101
- Modjarrad, M., 2019. Crystal size distribution studies on the leucite, pyroxene and olivine at the eastern Urmia Lake volcanic rocks- magma mixing possibility and residence time at the chamber. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 27, 55-68 <https://doi.10.29252/ijcm.27.1.55>
- Modjarrad, M., 2020. Effect of whole rock chemistry on the crystal size distribution of garnet in metapelites, comparison of Shahindezh schist with Dorbeh hornfelses. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 28, 297-310 <https://dx.doi.org/10.29252/ijcm.28.2.297>
- Nabavi, M., 1976. Introduction to the geology of Iran. *Iranian geological Survey (in Persian)*, p.109
- Okay, A.I., Tüysüz, O., 1999. Tethyan sutures of northern Turkey, in Durand, B., Jolivet, L., Horváth F., and Séranne, M., eds., *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen: Geological Society of London Special Publication* 156, 475-515 <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.05.010>

- Pearce, J., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In book: *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, Publisher: John Wiley and Sons, Editors: R.S. Thorpe, 525-548.
- Pearce, J.A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79-113
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58(1), 63-81
- Sahandi, M.R., 2003. The Maku 1:100000 Geological Sheet. Geological Survey of Iran, number 4968
- Schandl E.S., Gorton M.P., 2002. Application of high field strength elements to discrimination tectonic setting in VMS environments. *Economic Geology* 79, 629-642 <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.629>
- Shabaniyan, E., Acocella, V., Gioncada, A., Ghasemi, H., Bellier, O., 2012. Structural control on volcanism in intraplate post collisional settings: Late Cenozoic to Quaternary examples of Iran and Eastern Turkey. *Tectonics* 31, TC3013 <https://doi.org/10.1029/2011TC003042>
- Shea, T., Houghton, B.F., Gurioli, L., Cashman, K.V., 2010. Textural studies of vesicles in volcanic rocks: An integrated methodology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 190, 271-289
- Shervais, J.W., 1982. Ti-V plots and petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Sciences Letters* 23, 319-351
- Sluggett, C.L., 2003. Quaternary alkaline and calc-alkaline basalts in southern British Columbia: Mixed signals from mantle sources above the southern edge of the Juan de Fuca – Pacific slab window. Master of Science Thesis, University of British Columbia, p.164
- Srivastava, R.K., Singh, R.K., 2004. Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the Central Indian Craton: evidence for mantle metasomatism. *Journal of Asian Earth Sciences* 23, 373-389 [https://doi.org/10.1016/A1367-9120\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/A1367-9120(03)00150-0)
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters* 196, 17-33 [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00588-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X)
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society of London, Special Publication 42(3), 313-345
- White, W.M., 2005. *Geochemistry*. Wiley-Blackwell, UK, p.701 ISBN: 978-1-119-43805-2
- Woodhead, J.D., Eggins, S., Gamble, J., 1993. High field strength and transition element systematics in island arc and back-arc basin basalts: evidence for multi-phase melt extraction and a depleted mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters* 114, 491-504
- Yang, W., Teng, F.Z., Zhang, H.F., 2009. Chondritic magnesium isotopic composition of the terrestrial mantle: A case study of peridotite xenoliths from the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters* 288, 475-482