

## Relationship between deformation structure and partial melting in pelitic migmatites of Hamaden region, Sanandaj-Sirjan Zone

Seyedeh Razieh Jafari , Leili Izadi Kian 

<sup>1</sup> Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Payam Noor University, Tehran, Iran, [sr.jafari2000@pnu.ac.ir](mailto:sr.jafari2000@pnu.ac.ir)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran, [l.izadi@basu.ac.ir](mailto:l.izadi@basu.ac.ir)

### ARTICLE INFO

Received: 22 February 2024

Accepted: 27 May 2024

#### Keywords

Boudin

Fold

Metamorphism

Synmigmatite

Diatexite

Metatexite

Rheology



 10.22108/jjp.2024.140789.1323

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

The present paper describes some field characteristics of deformation in a high-strain and high temperature zone in migmatitic rocks, with several kilometers wide occurring in Hamedan and Toyserkan regions, NW of the Sanandaj- Sirjan Zone. A number of workers believe deformation and metamorphism are closely related. We tried to establish relationships between deformation evidence and rheological contrasts in different parts of migmatites during the migmatization process. In recent years, several studies have been carried out regarding the deformation and tectonic events of the various rocks of Hamedan region. However, this work is the first attempt to establish the relationship between deformation structure and partial melting in the migmatitic rocks of the study region. The obtained data can be used to interpret probable relationship between deformation and metamorphism and to determine the role of rheology of the various rocks in the region.

#### Regional Geology

The Sanandaj-Sirjan Zone (SSZ) comprises a metamorphic belt of low- to high-grade regional and contact metamorphic rocks intruded by mafic, intermediate and felsic plutonic bodies. Plutonic rocks of the Alvand complex in the Hamedan region, belonging to middle Jurassic (Shahbazi et al., 2010; Mahmoudi et al., 2011; Chiu et al., 2013), consisting of gabbro-diorite-tonalite association, granite-granodiorite porphyroid, and hololeucocratic granitoids (Sepahi et al., 2019).

 Corresponding Author

**To cite this article:** Jafari, S.R., Izadi Kian, L. (2024) Relationship between deformation structure and partial melting in pelitic migmatites of Hamaden region, Sanandaj-Sirjan Zone. *Petrological Journal*, 15(1), 117-138.

Major metamorphic rocks events in the SSZ occurred 160-170 Ma (e.g., Sepahi et al., 2019). The metamorphic rocks of the area with different composition and metamorphic grade, are mainly pelites with small bodies of psammites, quartzites, metabasites, calc-pelites and calc-silicates. During partial melting, some minerals such as cordierite, aluminosilicate (andalusite, sillimanite) and garnet porphyroblasts, in spite of floated, partly remained stable and when the partial melt reached its critical moving threshold, they were re-distributed in the viscous mush (Sepahi et al., 2009).

#### Analytical methods

Description of rock units, structural analyses, accurate measurements of parameters (i.e. lineation, boudins, folds, veins) were carried out during field observation. 44 thin sections parallel to lineation and perpendicular to foliation were prepared at the section preparation laboratory of Bu-Ali Sina University, and then their petrography and microstructures were examined and analyzed. The samples are taken from metatexite dominated migmatites as well as diatexite. Mineral abbreviations are taken from Whitney and Evans (2010).

#### Petrography

Following pelites the most abundant rocks of the area, slate, phyllite, pelitic schist/migmatite and hornfels are common rocks of the region under study. The migmatite rocks evolved from the hornfels (metatexite) and schists (diatexite) of the region. The mesosome of schistic migmatites with similar mineralogy with that of the schists, crosscut by abundant granitic pegmatites, aplites, as well as quartz veins. This zone is associated with partial melting and development of granitic leucosomes in migmatites. Plagioclase-bearing leucosomes are predominant, but some contain K-feldspar as well. Melanosomes are less developed and resemble the mesosomes in their mineralogy and texture, except for greater amounts of mafic minerals (i.e. biotite), and smaller amounts of felsic minerals. Partial melting fronts were initiated around various porphyroblasts, especially  $Al_2SiO_5$  minerals and cordierite, and migrated to other parts of the rocks. During diatexis, garnet and aluminosilicate

(andalusite, sillimanite) porphyroblasts remained partly stable but floated and were re-distributed in the viscous mush when the partial melt reached its critical moving threshold.

#### Discussion and Conclusion

The essential processes of migmatites formation, are partial melting, metamorphic differentiation and injection of granitic magma. Leucosome layers appear following the peak of metamorphism and partial melting process. In the course of anatexis, with increasing melt fraction, migmatite strength progressively decreases. The boudinage of high temperature metamorphic rocks is significantly controlled by the evolving rheological contrasts between the leucosome (melt) and mesosome of migmatites. The deformation observed in migmatites, occurred on a large scale in the form of folded leucosome and Boudinage, and on a microscale in the form of intracrystalline (undulose extinction, deformation twinning) and intercrystalline deformation (grain boundary migration, protrusion...). Therefore, the folded and boudinated leucosome represent the activity of tectonic forces in the conditions of the peak transformation of the region. The simultaneous adaptation of tectonic processes with the peak of metamorphism created synmigmatites and probably occurred in the catazone segment. While the performance of tectonic processes after cooling and creating post-tectonic fabrics, possibly happened in the mesozone to epizone. Syn to post-tectonic structures have recorded the relationship between the different phases of the involved melt and deformation in the solid state in the area. Synmigmatites can be seen in different parts of Hamedan, such as Simin, Toyserkan, Cheshme Ghasaban and Morad-Beik valley. Deformation occurred following the melt crystallization in the investigated migmatites. According to the structures of boudin, folds and veins, which played an important role in development of dynamic state of migmatites, the rheological evolution of Hamedan migmatites (Simin and Toyserkan regions) can be divided into three stages: (1) deformation during melting, (2) solid state deformation immediately after crystallization, and (3) subsequent solid-state deformation.

## ارتباط فابریک‌های دگرریختی و ذوب‌بخشی در میگماتیت‌های پلیتی منطقه همدان، پهنه سنندج-سیرجان

سیده‌راضیه جعفری<sup>۱</sup>، لیلی ایزدی‌کیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، [sr.jafari2000@pnu.ac.ir](mailto:sr.jafari2000@pnu.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، [l.izadi@basu.ac.ir](mailto:l.izadi@basu.ac.ir)

### چکیده

در شمال‌باختری پهنه سنندج-سیرجان و در مناطق همدان و توپسرکان، رخنمون‌هایی از سنگ‌های میگماتیتهای حضور دارد. در پیدایش میگماتیت‌های منطقه، به‌ترتیب اهمیت فرایندهای ذوب‌بخشی، تفریق دگرگونی و تزریق نقش داشته‌اند. میگماتیت‌ها دگرریختی را در بزرگ مقیاس به‌صورت لوکوسوم‌های چین‌خورده و بودین‌شده و در ریزمقیاس به‌صورت دگرریختی درون‌بلوری (خاموشی موجی، ماکل دگرریختی) و میان‌بلوری (مهاجرت مرز دانه، برآمدگی ...) نشان می‌دهند. پیدایش لایه‌های لوکوسوم در سنگ، پس از اوج دگرگونی و فرایند ذوب‌بخشی رخ می‌دهد. از این‌رو، لوکوسوم‌های چین‌خورده و بودین‌شده نشان‌دهنده فعالیت نیروهای زمین‌ساختی در شرایط اوج دگرگونی منطقه هستند. همزمانی فرایندهای زمین‌ساختی با اوج دگرگونی، چه‌بسا میگماتیت‌های همزمان با زمین‌ساخت را در محدوده رخساره آمفیبولیت بالایی تا گرانولیت زیرین پدید آورده است؛ اگرچه عملکرد فرایندهای زمین‌ساختی پس از سردشدن و پیدایش فابریک‌های پس از زمین‌ساخت، شاید در محدوده رخساره آمفیبولیت زیرین تا رخساره شیت‌سبز روی داده باشند. میگماتیت‌های همزمان با زمین‌ساخت در بخش‌های مختلفی از همدان، مانند سیمین، توپسرکان، چشمه‌قصابان و دره‌مرادبیگ دیده می‌شوند. این میگماتیت‌ها پس از تبلور نیز دچار دگرریختی‌های حاکم بر منطقه شده‌اند. با توجه به ساختارهایی مانند انواع بودین‌ها، چین‌های میگماتیتهای، میگماتیت چین‌خورده و رگه‌ها، که نقش مهمی در پیدایش حالت دینامیکی میگماتیت‌ها داشته‌اند، تکامل رئولوژیک میگماتیت‌های منطقه همدان را می‌توان به سه مرحله دسته‌بندی کرد: (۱) دگرریختی به کمک ذوب، (۲) دگرریختی حالت جامد بلافاصله پس از تبلور و (۳) دگرریختی حالت جامد بعدی.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

### کلیدواژه‌ها

بودین

چین

دگرریختی

رئولوژی

میگماتیت

همدان

توپسرکان



doi: 10.22108/ijp.2024.140789.1323

✉ نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: جعفری، س.ر.، ایزدی‌کیان، ل. (۱۴۰۳). ارتباط فابریک‌های دگرریختی و ذوب‌بخشی در میگماتیت‌های پلیتی منطقه همدان، پهنه سنندج سیرجان. پتروژئولوژی، ۱۵(۱)، ۱۱۷-۱۳۸.



## مقدمه

وجود مذاب در زمینه سنگ تأثیر بسزایی بر رئولوژی آن و به طور کلی ساختار پوسته زمین دارد. هنگامی که ذوب بخشی آغاز می شود، بخش مذاب می تواند به سوی سطوح کم ژرفای پوسته جریان یابد یا در ناحیه ای که از آن خاستگاه گرفته، به جای بماند. یک سنگ نیمه مذاب در نهایت می تواند جامد شود و به سطح زمین آید و میگماتیت را بسازد (Fedrizzi et al., 2023). از این رو، میگماتیت نوعی سنگ است که همزمان ویژگی های بخشی از سنگ که ذوب نشده است (به حالت جامد بجا مانده است) و هم بخشی از سنگ که دچار ذوب بخشی شده است (به حالت مذاب درآمده و سپس سرد شده است) را با هم و در یک رخنمون نشان می دهد. تغییرات رئولوژی و چگالی سنگ که به علت فرایند ذوب بخشی روی می دهد، در تکامل پوسته نقش بنیادین دارد (Vielzeuf et al., 1990). در کل، رفتار سنگ با درجه ذوب بخشی تغییر می کند، ایستایی یا پویایی مذاب (از جامد به جامانده) در ریخت شناسی پدید آمده نقش مهمی دارد. چین ها، رگه ها و بودین ها و نسل های مختلف دگرریختی در حالت پویای مذاب در میگماتیت زایی پدید می آیند (Goswami et al., 2021).

رده بندی میگماتیت ها به متاتکسیت ها<sup>۱</sup> و دیاتکسیت ها<sup>۲</sup> (بر پایه درجه ذوب) تابعی از تفریق مذاب<sup>۳</sup> و خواص دانه های جامد (در سنگ دارای ذوب بخشی) است (Sawyer, 2008). یک ناحیه تدریجی یا انتقالی میان میگماتیت متاتکسیت و دیاتکسیت دیده می شود که بسته به تفریق مذاب شاید از ۰/۱۶ تا ۰/۶ (مقدار ذوب) گسترش یابد. متاتکسیت ها میگماتیت هایی هستند که ساختارهای منسجم و پیش از ذوب بخشی را در پالئوسوم<sup>۴</sup> و بجامانده<sup>۵</sup> حفظ می کنند. پالئوسوم بخشی است که دچار

ذوب بخشی نشده است و نئوسوم<sup>۶</sup> شامل قطعاتی است که به تازگی در پی ذوب بخشی سنگ اولیه<sup>۷</sup> پدید آمده یا بازسازی شده اند و به طور کلی به لوکوسوم و ملانوسوم دسته بندی می شوند. دیاتکسیت ها زیر سلطه نئوسوم های فراگیر هستند و انسجام ساختاری خود را از دست داده اند (Sawyer, 2008).

پژوهشگران بسیاری به بررسی میگماتیت های پهنه سندنج- سیرجان در مناطقی مانند شهربابک (Fazlnia, 2010)، تکاب (Shafaii Moghadam et al., 2016)، گلپایگان (Hashemi et al., 2019)، بروجرد (Jafari et al., 2020)، نیریز (Fazlnia et al., 2023) و ... پرداخته اند. در منطقه همدان نیز تا کنون بررسی های گسترده ای درباره تنوع ساختاری، کانی شناسی و پیدایش<sup>۸</sup> روی میگماتیت ها انجام شده است (Sepahi, 1999; Baharifar, 2004; Jafari, 2007; Sepahi et al., 2012, 2018; Zare Shooli et al., 2020; Saki et al., 2012, 2021). در بررسی های پیشین ذوب بخشی عامل اصلی میگماتیت زایی منطقه همدان دانسته شده است و میگماتیت های منطقه از نوع کم فشار-دما بالا شناخته شده اند (Sepahi et al., 2009). ایزدی کیان و همکاران (Izadi Kian et al., 2013) زمان رشد پورفیروبلاست ها و ارتباط آن با دگرریختی را بررسی کرده اند. سن دگرگونی سنگ های میگماتیتهی همدان را ۱۶۷ میلیون سال پیش و سن دگرگونی میگماتیت های توپسرکان را ۱۶۰ تا ۱۷۰ میلیون سال پیش می دانند (Sepahi et al., 2019). با اینکه پژوهش های بسیاری در زمینه میگماتیت های همدان انجام شده است، وابستگی میان دگرریختی و ذوب بخشی به خوبی بررسی نشده است. در این پژوهش با بررسی ساختارها و فابریک های همزمان با مرحله ذوب<sup>۹</sup>، پس از تبلور<sup>۱۰</sup> و حالت جامد<sup>۱۱</sup> به این موضوع پرداخته می شود.

<sup>6</sup> Neosome

<sup>7</sup> Protolith

<sup>8</sup> Genesis

<sup>9</sup> Melt stage

<sup>10</sup> After crystallization

<sup>11</sup> Solid state

<sup>1</sup> Metatexite

<sup>2</sup> Diatexite

<sup>3</sup> Melt fraction

<sup>4</sup> Paleosome

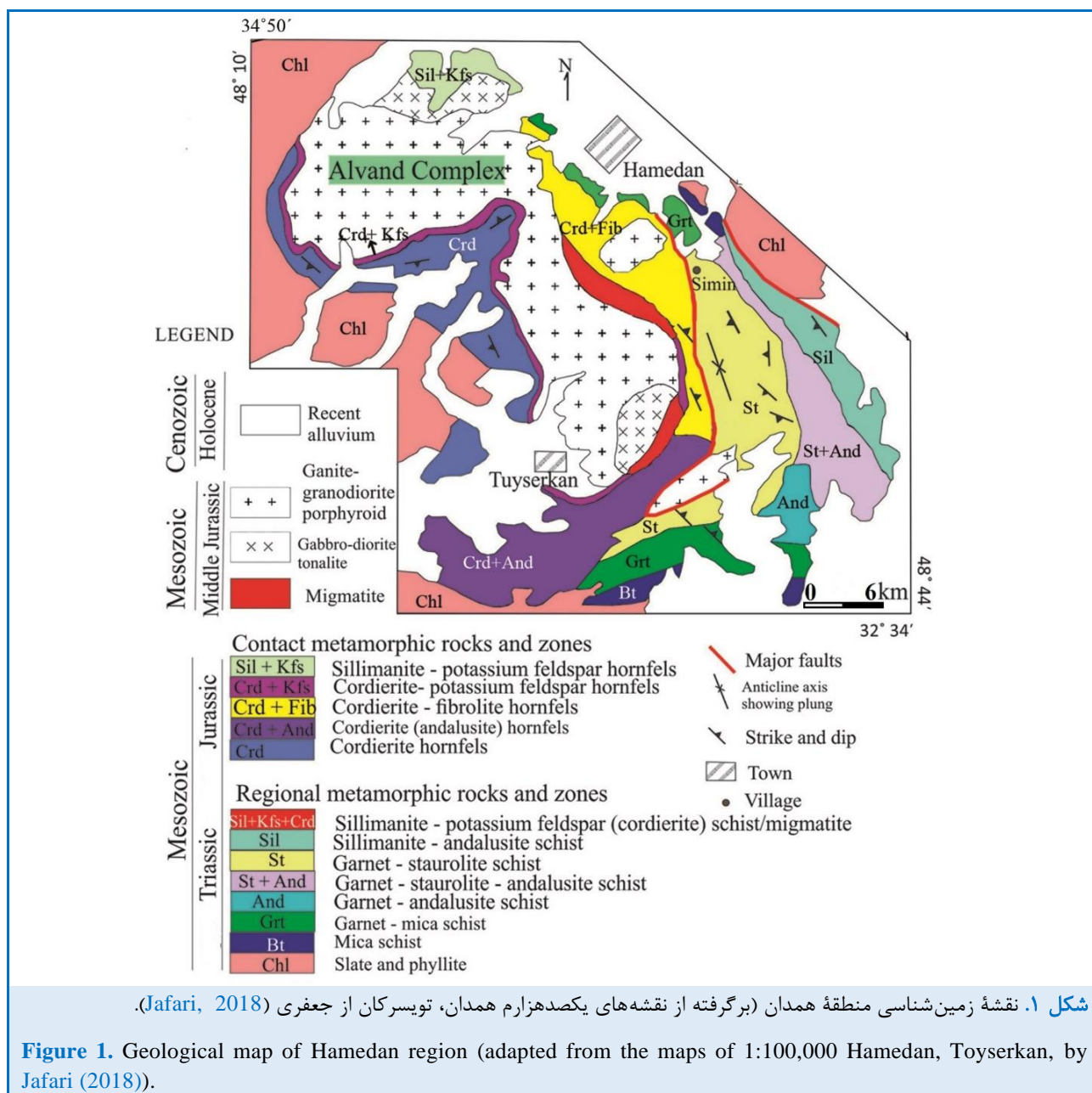
<sup>5</sup> Residuum

## زمین‌شناسی منطقه

پهنه سنندج- سیرجان بخشی از کوهزاد زاگرس است (Alavi, 2004; Agard et al., 2005; Mohajjel et al., 2003) و در گستره‌ای به درازای ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای نزدیک به ۲۰۰ کیلومتر گسترده شده است. برخی پژوهشگران مانند علوی (Alavi, 2004) پهنه سنندج- سیرجان را بخشی از زاگرس فلس مانند می‌دانند. محجل و همکاران (Mohajjel et al., 2003) منطقه همدان را در زیرپهنه با دگرریختی پیچیده دسته‌بندی می‌کنند.

## سنگ‌نگاری منطقه

سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان گوناگون هستند و از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای تا سنگ‌های دگرگونی همبری و میگماتیت تغییر می‌کنند. میگماتیت‌ها در مناطقی مانند چشمه‌قصابان (Saki et al., 2020, 2021)، دره مرادبیگ (Jafari, 2020)، سیمین همدان (Sepahi, 1999; Baharifar, 2004; Jafari, 2007)، سرابی توپسرکان و دره عمر توپسرکان (Jafari, 2018) رخمون دارند (شکل ۱).

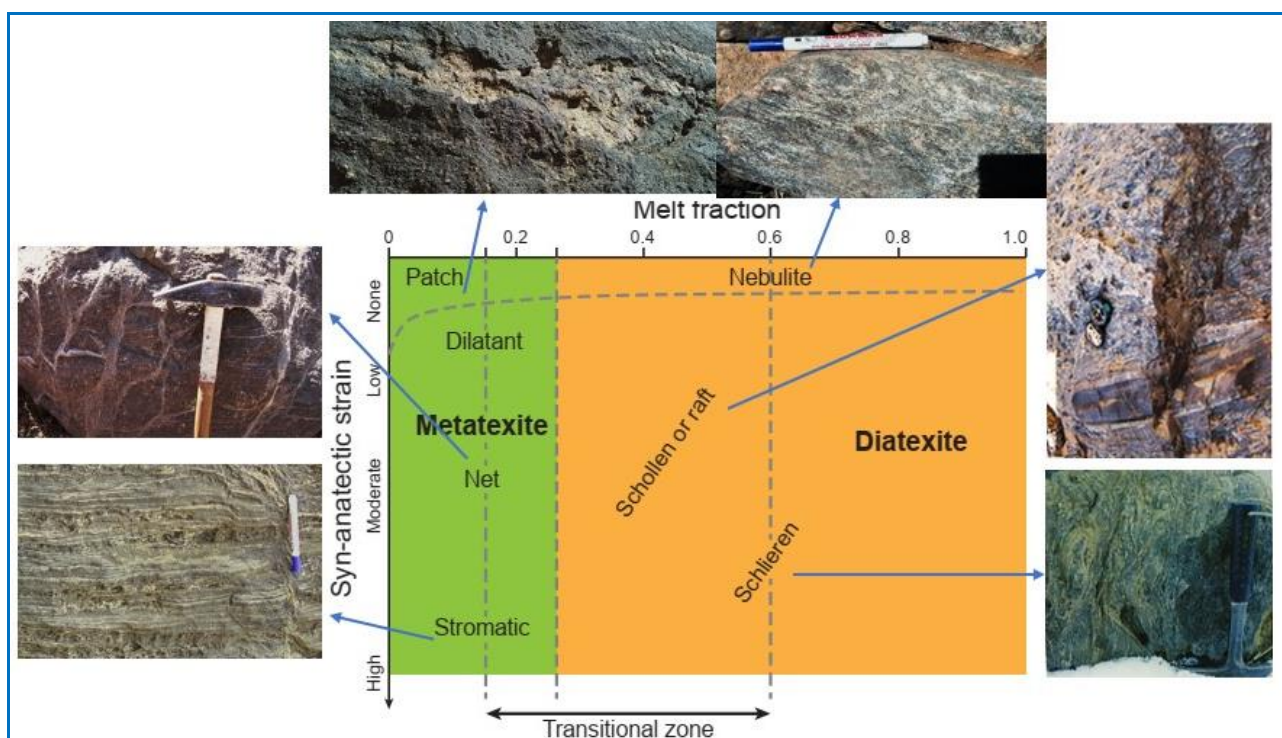


شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه همدان (برگرفته از نقشه‌های یکصد هزارم همدان، توپسرکان از جعفری (Jafari, 2018)).

**Figure 1.** Geological map of Hamedan region (adapted from the maps of 1:100,000 Hamedan, Tuyserkhan, by Jafari (2018)).

منطقه سیمین همدان بیشتر از منطقه تويسرکان است و از تنوع ساختی و کانی‌شناسی بیشتری دارند (Jafari, 2018). مهم‌ترین ساخت‌های میگماتیت‌های منطقه همدان شامل انواع استروماتیک، سورئتیک، فلبتیک، نبولیتیک، دیکتیونیتیک، تیگماتیک، شولن و شلیرن هستند (Jafari, 2018) (شکل ۲). در منطقه تويسرکان مهم‌ترین فابریک‌ها فابریک‌های نبولیتیک، شبکه‌ای، استروماتیک، شلیرن و دیاتکسیت اصلی هستند (Jafari, 2022).

میگماتیت‌های منطقه چشمه‌قصابان از نوع مافیک هستند و در پی ذوب‌بخشی هورنبلند گابرو و گسترش کم لوکوسوم ترونجمیتی، در حد متاتکسیت دگرگون شده‌اند (Saki et al., 2020, 2021). میگماتیت‌های مناطق دره مرادیگ و سیمین از نوع پلیتی هستند و در همبری با گرانیت پورفیروئید دیده می‌شوند. میگماتیت‌های منطقه تويسرکان نیز از نوع پلیتی و در همبری با گابروها هستند. همه میگماتیت‌های یادشده از متاتکسیت تا دیاتکسیت متغیر هستند. حجم میگماتیت‌ها در



شکل ۲. رده‌بندی سنگ‌های میگماتیتهی (اصلاح شده از سایر (Sawyer, 2008) و ساختارهای مختلف میگماتیت‌ها در مناطق همدان و تويسرکان.

Figure 2. Classification of migmatitic rocks (modified from Sawyer, 2008) and different structures of migmatite in Hamadan and Toyserkan region.

میگماتیت‌ها بافت سنگ‌های آذرین (گرانولار نیمه‌شکل‌دار تا گرانولار نیمه‌شکل‌دار، پرتیت و میرمکیت) را نشان می‌دهد (Jafari, 2007, 2018) و ترکیب سنگ‌شناسی آن از ترونجمیتی تا آلکالی‌فلدسپار گرانیتی تغییر می‌کند. میگماتیت‌های آلومینوسیلیکات‌دار بیشتر لوکوسوم ترونجمیتی دارند و در میگماتیت‌های کردیریت‌دار لوکوسوم ترونجمیتی تا آلکالی‌فلدسپار گرانیتی غالب است (Jafari, 2022).

چگونگی پیدایش میگماتیت‌های یادشده متنوع است و به ترتیب اهمیت فرایندهای ذوب‌بخشی، تفریق دگرگونی و تزریق در میگماتیت‌زایی این سنگ‌ها نقش داشته‌اند (Jafari, 2022). دگرگونی تا رخساره آمفیبولیت بالایی و گاه گذر از رخساره آمفیبولیت به گرانولیت (Jafari, 2007, 2018) و حتی تا آغاز رخساره گرانولیت (Jafari, 2018) پیش رفته است و درجه ذوب‌بخشی میگماتیت‌ها از متاتکسیت تا دیاتکسیت تغییر می‌کند. لوکوسوم

## سنگ‌نگاری

بافت لوکوسوم میگماتیت‌ها همانند بافت سنگ‌های آذرین است و بافت‌های نیمه‌شکل‌دار گرانولار و بی‌شکل گرانولار در این بخش دیده می‌شوند. در بخش لوکوسوم کانی‌های کوارتز، ارتوکلاز و پلاژیوکلاز یافت می‌شوند. لوکوسوم در میگماتیت‌های سرشار از آلومینوسیلیکات از نوع ترونجمیتی و در انواع سرشار از کردیریت از نوع آلکالی‌فلدسپار گرانیته است. ملانوسم گسترش کمی در این سنگ‌ها دارد؛ اما اگر حضور داشته باشد، بافت لپیدوبلاستیک و پورفیرولپیدوبلاستیک نشان می‌دهد. در بخش ملانوسم بیوتیت (بیوتیت‌های نسل اول) و گاهی گارنت حضور دارند. پالئوسوم بافت پورفیرولپیدوبلاستیک تا لپیدوپورفیروبلاستیک دارد. در بخش پالئوسوم مجموعه کانی‌های شاخص سنگ‌های

متابلیتی مانند آلومینوسیلیکات‌ها (آندالوزیت، سیلیمانیت، کیانیت، فیبرولیت)، گارنت (آلماندین)، بیوتیت (سیدروفیلیت)، کردیریت (آهن‌دار)، استارولیت، پلاژیوکلاز (آندزین)، اسپینل (هرسینیت)، تورمالین و زیرکن دیده می‌شوند. بیوتیت هم در پالئوسوم و هم در ملانوسوم حضور دارد. پیدایش بیوتیت‌های نسل اول را می‌توان به دگرگونی ناحیه‌ای پیش‌رونده و فرایند میگماتیت‌زایی نسبت داد؛ اما بیوتیت‌های نسل دوم در اثر دگرگونی پس‌رونده‌ای که پس از میگماتیت‌زایی روی داده است پدید آمده‌اند. بیوتیت‌های نسل اول فریوبیوتیت و بیوتیت‌های نسل دوم مگنزیوبیوتیت هستند (Sepahi et al., 2018). داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی برخی کانی‌های پالئوسوم در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱. داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی برخی کانی‌های پالئوسوم در میگماتیت‌های منطقه همدان (Sepahi et al., 2018).

**Table 1.** Electron microprobe data of some minerals of paleosome in the migmatites of the Hamadan region (Sepahi et al., 2018).

Mineral Type	First generation biotite		Second generation biotite		Muscovite		Garnet				plagioclase	
Rock Type	Fibrolite garnet migmatite		Staurolite garnet migmatite				Fibrolite garnet cordierite migmatite				Staurolite garnet migmatite	
Sample No.	j sim12_2-100	j sim12_2-101	Rj22-100	Rj22-Ms15	Rj22-Ms15	Rj300-Ms3	j sim12-2-Gt1-56	j sim12-2-Gt1-56	Rj-22Grt12	Rj-22Grt12	RJ 22 Pl1	RJ 22 Pl2
							core	rim	core	rim		
SiO <sub>2</sub>	35.28	35.92	36.59	36.15	47.090	47.190	27.09	37.33	36.89	37.52	60.02	59.21
TiO <sub>2</sub>	2.92	2.56	1.53	1.44	0.36	0.21	0	0.01	0.03	0.01	0	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.91	18.66	19.48	20.07	37.100	37.290	32.2	21.63	21.29	21.86	25.57	26.55
FeO	20.83	20.95	18.48	19.08	0.870	0.770	32.58	32.55	33.77	32.5	0.02	0.04
MnO	0.07	0.11	0.05	0.05	0.000	0.000	2.72	3.74	2.57	4.93	0	0
MgO	8.16	8.11	9.99	11.53	0.670	0.400	4.22	3.92	2.6	2.81	0.03	0.31
CaO	0	0	0.03	0.16	0.040	0.000	0.66	0.84	1.99	1.24	7.29	7.29
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.1	0.23	0.31	1.390	1.190	0.06	0	0	0	7.79	7.3
K <sub>2</sub> O	10.28	9.03	9.86	7.93	10.000	8.960	0.01	0.01	0.02	0	0.06	0.05
Total	96.54	95.44	96.24	96.72	97.520	96.010	99.55	100.04	99.2	100.89	100.78	100.76
Oxygen	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	8	8
Si	5.365	5.479	5.482	5.350	6.101	6.153	2.200	2.985	2.992	2.990	2.657	2.620
Ti	0.334	0.294	0.172	0.160	0.035	0.021	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000
Al	3.389	3.354	3.439	3.500	5.665	5.731	3.083	2.039	2.035	2.053	1.334	1.385
Fe <sup>+2</sup>	2.649	5.479	2.315	2.361	0.094	0.084	2.213	2.177	2.291	2.166	0.001	0.001
Mn	0.009	0.294	0.006	0.006	0.000	0.000	0.187	0.253	0.177	0.333	0.000	0.000
Mg	1.850	3.354	2.231	2.544	0.129	0.078	0.511	0.467	0.314	0.334	0.002	0.020
Ca	0	0	0.005	0.025	0.006	0.000	0.057	0.072	0.173	0.106	0.346	0.346
Na	0.0265	0.0296	0.067	0.089	0.349	0.301	0.009	0.000	0.000	0.000	0.669	0.626
K	1.994	1.7567	1.884	1.497	1.653	1.490	0.001	0.001	0.002	0.000	0.003	0.003
Total	15.617	15.444	15.602	15.533	14.032	13.857	8.263	7.995	7.988	7.983	5.011	5.002

### روش انجام پژوهش

در این پژوهش نخست بازدید و بررسی‌های میدانی برای توصیف واحدهای سنگی، تحلیل ساختاری، اندازه‌گیری دقیق پارامترهایی مانند برگوارگی و خطوارگی و نمونه‌برداری جهت‌دار انجام شد. سپس مقاطع نازک به شمار ۴۴ مقطع موازی خطوارگی و عمود بر برگوارگی در آزمایشگاه تهیه مقطع دانشگاه بوعلی‌سینا، تهیه شد. سپس سنگ‌نگاری و ریزساختارهای آن بررسی و تجزیه و تحلیل شد. نام اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

### ساختارهای میگماتیت‌ها

به باور جانسون و هادسون (Johnson et al., 2003)، میگماتیت‌ها به‌علت درشت‌بودن کانی‌ها بیشتر فابریک‌های دگرریختی را در مقیاس رخنمون نشان می‌دهند. از میان سه بخش لوکوسم، پالئوسوم و ملانوسم در میگماتیت‌ها، تنها لوکوسم‌ها به استقرار در بخش‌های با کرنش پایین، مانند بودین‌ها و نواحی کششی پهنه‌های برشی، گرایش دارند (Johnson et al., 2003). این وضعیت (دانه‌درشت‌بودن و تجمع لوکوسوم در بخش‌های با کرنش پایین) در میگماتیت‌های پلیتی مناطق هم‌مدان و تویسرکان نیز دیده می‌شود. ساختارهای میگماتیت‌ها در این پژوهش به سه گروه دسته‌بندی شده‌اند: ساختارهای مرحله ذوب<sup>۱۲</sup>، ساختارهای پس از تبلور<sup>۱۳</sup> و ساختارهای حالت جامد<sup>۱۴</sup>. اما سایر (Sawyer, 2008) در کتاب کار با میگماتیت‌ها اصول متفاوت‌تری برای توصیف ساختارهای میگماتیتی به کار برده است که پایه آنها ریخت‌شناسی مرتبه نخست و دوم میگماتیت‌هاست. در مرتبه نخست میگماتیت‌ها در

دو دسته متاتکسیت و دیاتکسیت جای می‌گیرند. در مرتبه دوم ساختارهای متاتکسیت و دیاتکسیتی جداگانه بررسی می‌شوند. با توجه به (Sawyer, 2008) و رده‌بندی ریخت‌شناسی مرتبه نخست و دوم، برخی ساختارها در منطقه هم‌مدان، در متاتکسیت‌ها فراوان هستند و برخی در دیاتکسیت‌ها گسترش یافته‌اند. ساختارهای هر مرحله (متاتکسیت و دیاتکسیت) شامل انواع خاصی از چین‌ها، رگه‌ها و بودین‌هاست که در ادامه به معرفی آنها پرداخته می‌شود.

### چین‌ها

چین‌های میگماتیت‌ها را می‌توان به دو گروه رده‌بندی کرد:

۱- چین‌های میگماتیتی<sup>۱۵</sup>؛

۲- میگماتیت چین‌خورده<sup>۱۶</sup> (Goswami et al., 2021).

درون برخی متاتکسیت‌ها، لایه‌های مقاوم پیدایش چین‌خوردگی خمشی<sup>۱۷</sup> با ماهیت چین موازی را به دنبال داشته است که به‌علت کوتاه‌شدگی موازی لایه‌بندی پدید آمده‌اند (شکل ۳-۳A). ذوب پیش‌رونده رخداد یک انتقال به چین‌خوردگی جریان‌ی را در پی دارد و این چین‌ها بیشتر چین‌های مشابه با لولای پهن و یال‌های باریک هستند (شکل ۳-۳B). وجود لوکوسوم بیشتر در لولاهای چین در مقایسه با یال‌ها نشان‌دهنده انتقال مذاب از یال‌ها به سوی لولاست (Collins and Sawyer, 1996). در صورت وجود تناوب لایه‌های ضخیم و نازک، لایه‌های نازک، چین‌های با طول موج کوتاه را زودتر نشان می‌دهند و لایه‌های ضخیم با طول موج‌های بزرگ‌تر پس از لایه نازک (با تاخیر زمانی) آغاز به چین‌خوردن

<sup>15</sup> Migmatitic fold

<sup>16</sup> Folded migmatite

<sup>17</sup> Buckle folding

<sup>12</sup> Melting stage

<sup>13</sup> After crystallization

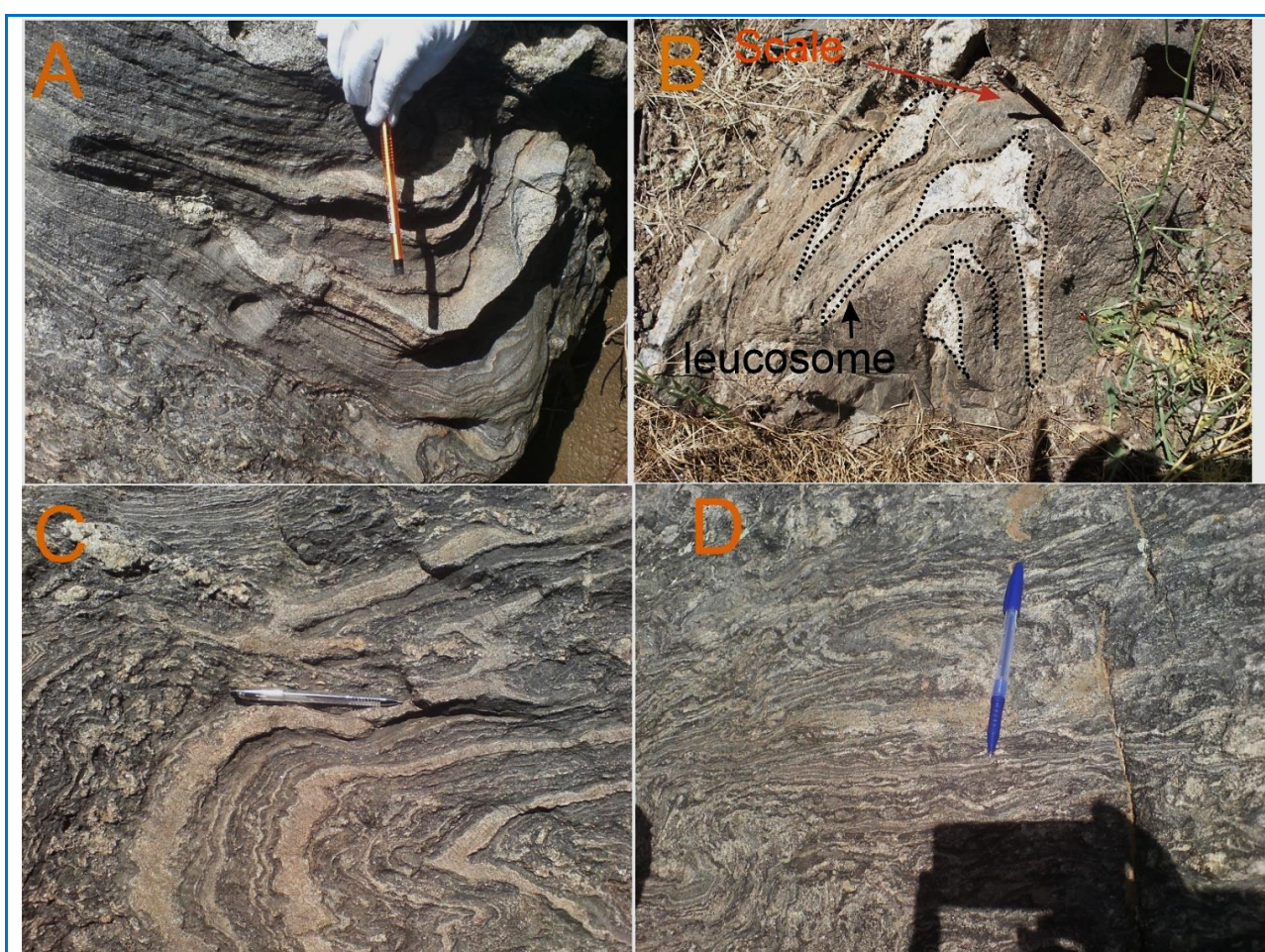
<sup>14</sup> Solid state



دگرریختی یال‌ها دیده می‌شوند (شکل ۴-۱A). در برخی بخش‌ها، لوکوسوم‌ها به‌همراه پالئوسوم در چین‌خوردگی فعال شرکت کرده‌اند و همزمانی چین‌خوردگی و میگماتیت‌زایی را نشان می‌دهند (شکل ۴-۱B). همچنین، چین‌های برشی فراوانی از جنس متادیوریت (شکل ۴-۱C) و لوکوسوم (شکل ۴-۱D) وجود دارد که نشان‌دهنده دگرریختی میگماتیت‌ها پس از سردشدن و دگرریختی آنها در حالت جامد است.

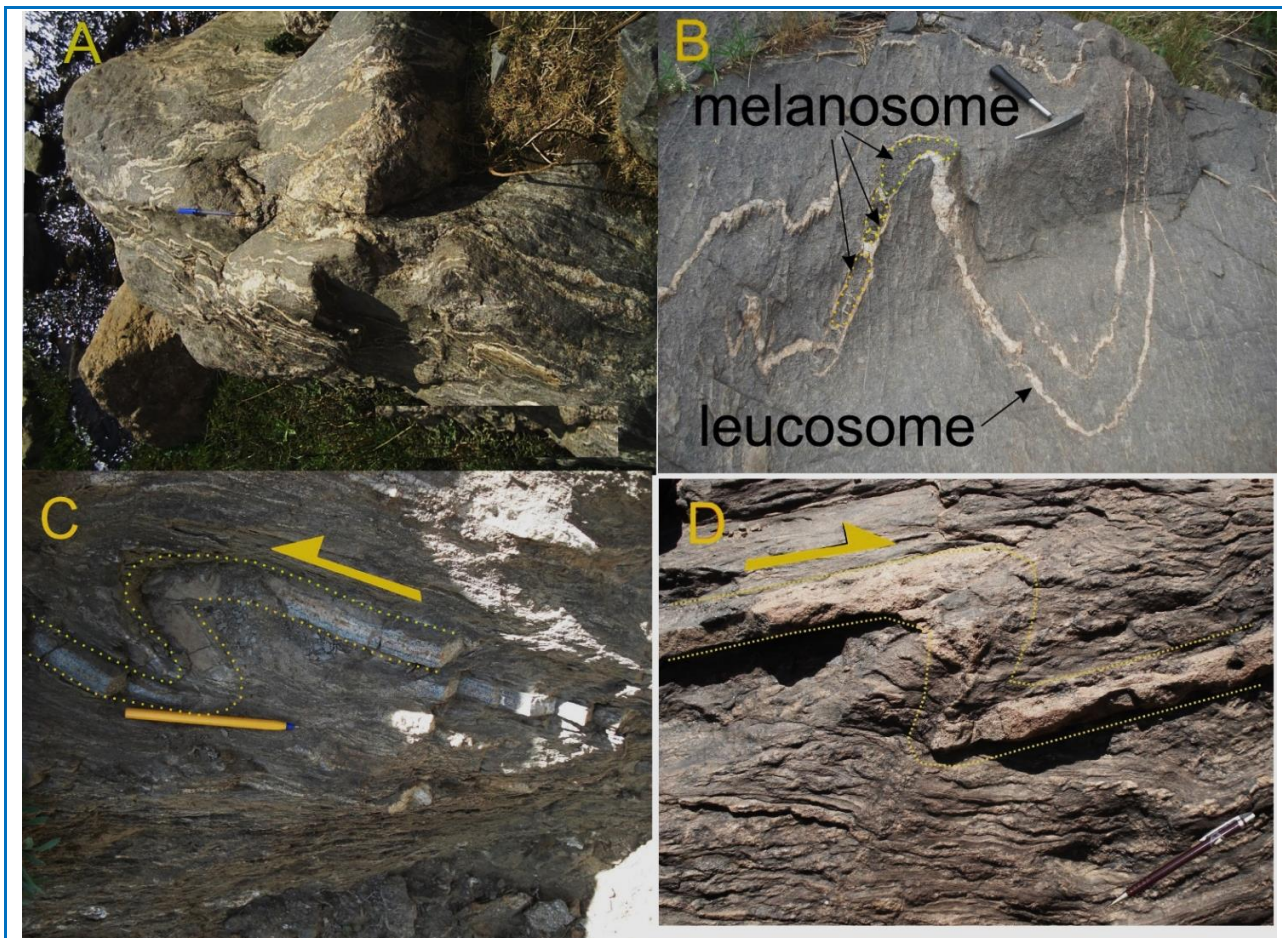
می‌کنند (شکل ۳-۱C). از این‌رو، فاز انتقال با وجود چین‌خوردگی‌های جریان فعال و غیرفعال شناخته می‌شود (Sawyer, 2008). در دیاتکسیت‌ها، چین‌ها بیشتر از نوع ناهماهنگ یا پیچیده دیده می‌شود (شکل ۳-۱D).

در میگماتیت‌های منطقه همدان چین‌های خمشی که از چین‌خوردن لوکوسوم‌ها پدید آمده‌اند و در یال‌های آن شکل‌های Z و S شکل ناشی از



شکل ۳. ۱A) چین موازی که مراحل اولیه میگماتیتی شدن در متاتکسیت را نشان می‌دهد. اختلاف مقاومت لایه‌ها بالا است. این چین در پی مراحل بعدی یال‌های جدا شده است (منطقه سیمین)؛ ۱B) چین مشابه همزمان با میگماتیتی شدن که لولای ضخیم و یال‌های نازک از جنس لوکوسوم دارد (منطقه دره مرادبیک)؛ ۱C) تناوب لایه‌های نازک و ضخیم لوکوسوم‌ها که لایه‌های نازک چین‌های با طول موج کوتاه‌تری را پدید آورده‌اند (منطقه سیمین)؛ ۱D) چین‌های ناهماهنگ در دیاتکسیت‌های منطقه (منطقه سیمین).

**Figure 3.** A) Parallel fold showing early stages of migmatitization in metatexite. The difference in the layers' resistance is high. This fold is separated from its limbs during the later stages (Simin area); B) A similar fold at the syn-migmatitization, which has thick hinges and thin limbs of leucosomes (Moradbeik Valley region); C) Alternation of thin and thick layers of leucosomes, which have created thin folds layers with shorter wavelengths (Simin area); D) Disharmonic folding in diatexite of the region (Simin region).



**شکل ۴. A)** چین همزمان با میگماتیت از نوع چین‌های خمشی با لایه نازک و ضخیم (منطقه سیمین)؛ **B)** ملانوسوم (نقطه‌چین‌های زرد) و لوکوسوم همزمان داخل پالئوسوم چین خورده‌اند (منطقه دره مرادبیک)؛ **C)** چین برشی در رگه با ترکیب متادیوریتی در متاتکسیت (منطقه سیمین)؛ **D)** چین برشی از لایه‌های لوکوسوم (منطقه سیمین).

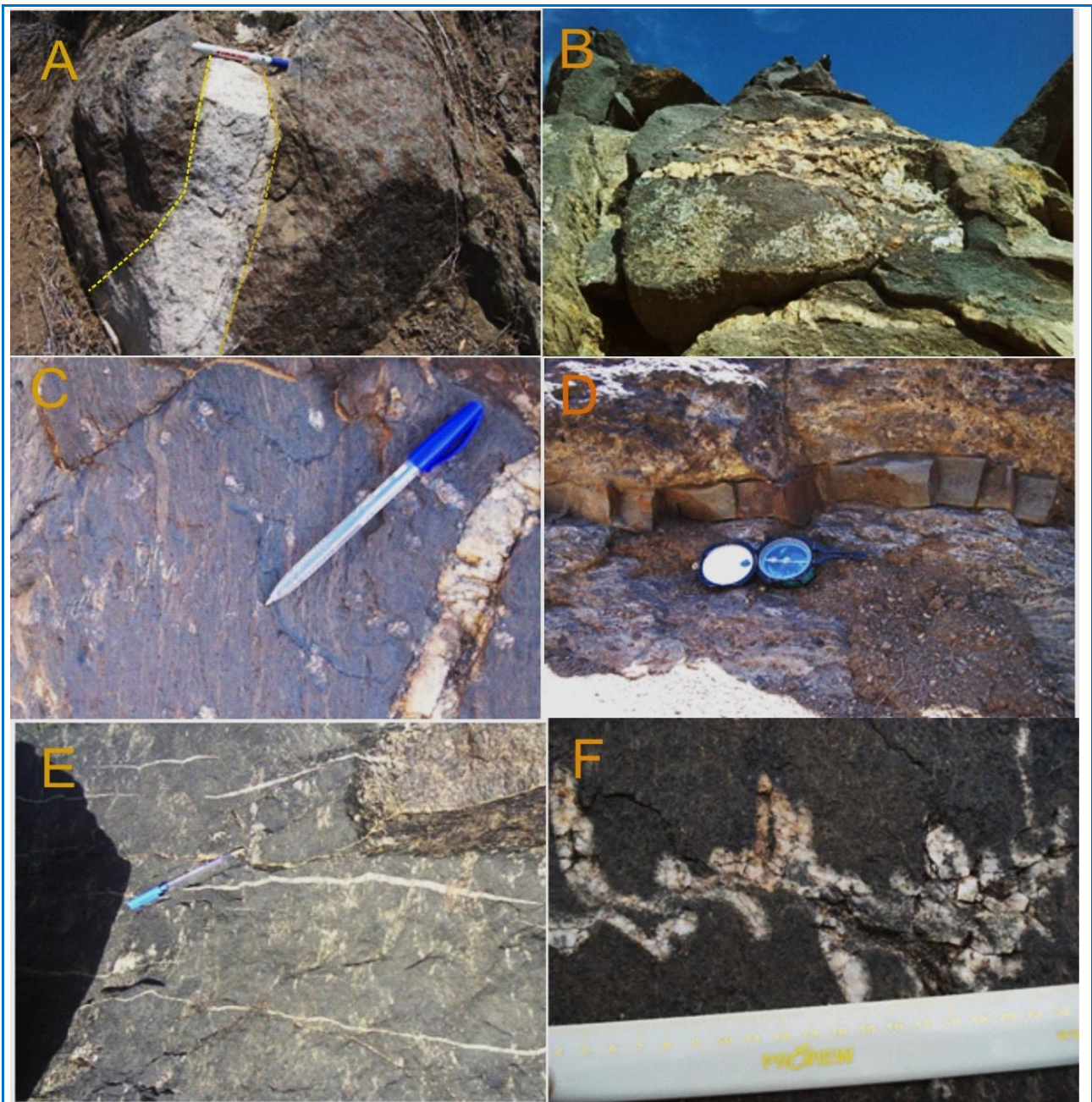
**Figure 4. A)** Migmatitic fold of the type of flexural folds with thin and thick layers (Simin area); **B)** Melanosome (yellow dotted line) and leucosome are folded inside the paleosome at the same time (Moradbeik Valley area); **C)** Shear folds in the vein with metadiorite composition in metatexite (Simin area); **D)** Shear folds of leucosome layers (Simin area).

با ترکیب گرانیتی) از نسل‌های مختلف در منطقه بسیار رایج هستند و رگه‌های جوان‌تر که پس از رشد میگماتیت پدید می‌آیند، بیشتر روی رگه‌های قدیمی‌تر چین خورده که زمینه میگماتیتی دارند، تشکیل شده‌اند (شکل ۵-E). چین‌های رودهای<sup>۱۸</sup> تیگماتیک با ریخت‌شناسی نامنظم بیشتر در میگماتیت‌ها دیده می‌شوند که در آن ترکیب سازنده رگه در زمینه‌ای با مقاومت بیشتر از سنگ میزبان میگماتیت فراگرفته شده است (شکل ۵-F).

## رگه‌ها

رگه‌های آپلیتی، پگماتیتی، کوارتزی و حتی دیوریتی در منطقه به فراوانی دیده می‌شوند (شکل‌های ۵-A تا ۵-D). محتوای کانی‌شناسی رگه‌های آپلیتی و پگماتیتی همانند هم است و اندازه دانه‌های آنها با هم متفاوت است و از نوع ساده تا نواری تغییر می‌کنند. رگه‌های آپلیتی بیشتر بافت دانه‌شکری دارند؛ اما بافت پگماتیت‌ها بیشتر نیمه‌شکل‌دار گرانولار است. کانی‌های اصلی آنها شامل کوارتز و آلکالی‌فلدسپار هستند و کانی‌های فرعی مانند تورمالین، گارنت و مسکوویت نیز گاه در آنها یافت می‌شوند. رگه‌های لوکوکراتیک (بیشتر

<sup>18</sup> Ptygmatic



شکل ۵. A) رخمونی از یک رگه آپلیتی در منطقه؛ B) رگه‌های پگماتیتهی که در میگماتیت متاتکستی نفوذ کرده‌اند؛ C) نفوذ رگه‌های کوارتزی در میگماتیت‌های آلومینوسیلیکات‌دار که به اندازه متاتکسیت دگرگون شده‌اند؛ D) نفوذ رگه‌های دیوریتی در میگماتیت‌های آلومینوسیلیکات‌دار که به اندازه دیاتکسیت دگرگون شده‌اند؛ E) رگه‌های همزمان با میگماتیت و رگه‌های جوان‌تر که رگه‌های پیشین را قطع کرده‌اند؛ F) چین روده‌ای.

**Figure 5.** A) An outcrop of an aplitic vein in the area; B) Pegmatite veins intruded into the metatextitic migmatite; C) Quartz veins intruded the aluminosilicate migmatites that have been altered to the extent of metatexite; D) Intrusion of diorite veins in aluminosilicate migmatites that have been metamorphosed to diatexite; E) Syn-migmatite veins and younger veins that cut previous veins; F) Ptygmatic fold.

درصد حجمی مذاب مقاومت سنگ در بخش پالئوسوم کمی کاهش می‌یابد. در این مرحله اختلاف مقاومت لایه‌ها

بودین‌ها

در مراحل آغازین ذوب‌بخشی (متاتکسیت) با افزایش

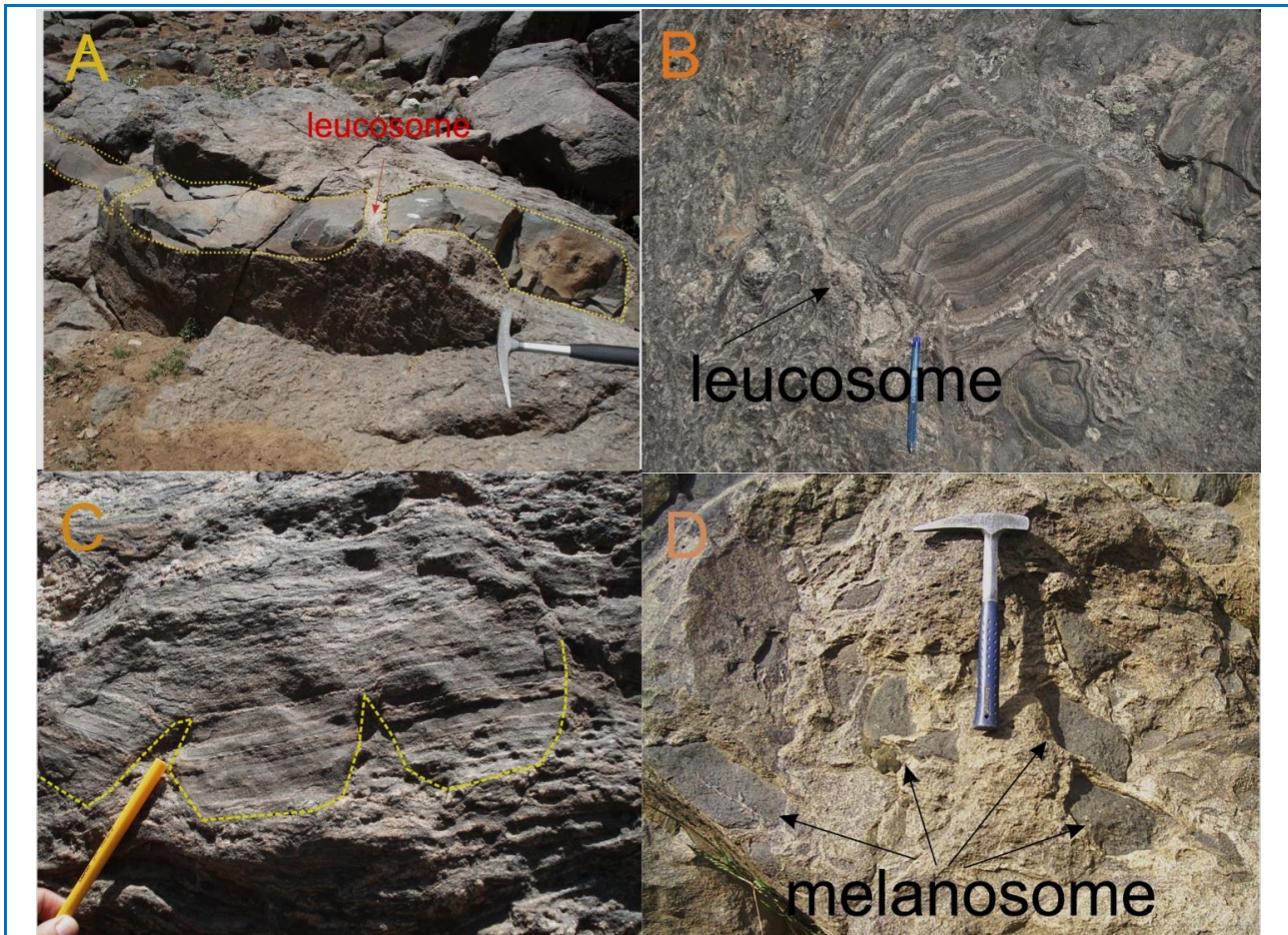
پدید می‌آیند (شکل ۶-۶B). با افزایش درصد حجمی مذاب (بیشتر از ۳۰ درصد) کاهش مرحله دوم مقاومت سنگ رخ می‌دهد و اختلاف مقاومت بسیار بالاست. میزبان نامقاوم شامل مذاب لوکوسوم و لایه‌های نامقاوم بلوک‌های ملانوسوم (شکل ۶-۶C) یا بجامانده<sup>۲۱</sup> (شکل ۶-۶D) است. ضخامت لایه‌ها cm-m و فاصله لایه‌ها dm-m است.

بالاست و لایه‌های نامقاوم شامل تکه‌ها و حوضچه‌های<sup>۱۹</sup> لوکوسوم درجا هستند (Li et al., 2023). میزبان مقاوم (بخش پالئوسوم که لوکوسوم در آن نفوذ کرده است) شامل پالئوسوم، ملانوسوم یا دایک مافیک (شکل ۶-۶A) است و ضخامت لایه‌ها از میلی‌متر تا سانتی‌متر تغییر می‌کند. در این مرحله بودین‌های نوع برگواره که با مذاب پر شده‌اند<sup>۲۰</sup>

<sup>21</sup> Residuum

<sup>19</sup> pool

<sup>20</sup> Melt filled foliation boudins



شکل ۶. A) دایک مافیک میکرودیوریتی بودین شده در میگماتیت که انتهای قطعات بودین‌ها حالت پر مانند و نامنظم دارد و در میان قطعات لوکوسوم تجمع یافته است و همزمانی بودین‌شدگی را با میگماتیته شدن نشان می‌دهد (منطقه سیمین)؛ B) در میگماتیت متاتکسیتی بودین‌های نوع برگواره که با مذاب لوکوسومی پر شده است (منطقه دره مرادیبک)؛ C) بودین‌شدگی در پالئوسوم با کشیدگی بیشتر در بخش پایین (میگماتیت متاتکسیت، منطقه سیمین)؛ D) بودین‌های ملانوسوم در زمینه لوکوسوم میگماتیت دیاتکسیت (منطقه سیمین). برگرفته از سپاهی و همکاران (Sepahi et al., 2009).

**Figure 6.** A) Boudinaged mafic microdiorite dyke in migmatite, where the ends of the boudin fragments have a feather-like and irregular shape and are accumulated among the leucosome fragments, showing the simultaneity of boudinage and migmatitization (Simin region); B) Melt filled foliation boudins in metatexitic migmatite (Moradbeik Valley region); C) Boudins in the mesosome in metatexite migmatite in which the extension was greater at lower part (Simin region); D) Melanosome boudins in the leucosome in diatexite migmatite (Simin region; Sepahi et al., 2009).

لوکوسوم افزایش یابد یعنی به مرحله دیاتکسیت برسد، بودین‌های نوع بادکردگی-نازک‌شدگی (شکل B-۷)، بلسوکی و مخروطی پدید می‌آیند. حضور بودین‌های چندلایه‌ای<sup>۲۳</sup> در منطقه همدان (شکل C-۷) نشان‌دهنده اختلاف مقاومت بالای لوکوسوم با سنگ میزبان در هنگام افزایش حجم لوکوسوم است. در میگماتیت‌های دیاتکسیت اختلاف مقاومت لایه‌ها کم می‌شود و پورفیروکلاست‌های درشت از لوکوسوم<sup>۲۴</sup> پدید می‌آیند (شکل D-۷).

پس از تبلور در میگماتیت‌های متاتکسیت اگر اختلاف مقاومت لایه‌ها بسیار کم باشد و حجم مذاب از ۱۰ درصد کمتر باشد بودین‌های برگواره که با رگه پرشده‌اند، پدید می‌آیند. در این مرحله پالئوسوم‌هایی که لوکوسوم‌های درجا دارند به‌صورت لایه‌های مقاوم رفتار می‌کنند. اگر اختلاف مقاومت بالا باشد و حجم مذاب برابر با ۱۰ تا ۳۰ درصد باشد لوکوسوم‌های تکه‌ای یا وصله‌دار به‌صورت لایه‌های مقاوم رفتار می‌کنند و بودین‌های عدسی‌شکل<sup>۲۲</sup> را پدید می‌آورند (شکل A-۷) (Li et al., 2023). اگر درصد حجمی

<sup>23</sup> Multiple layer boudin

<sup>24</sup> felsic mega porphyroclast

<sup>22</sup> Object boudin



شکل ۷. A) بودین‌های نامتقارن از جنس لوکوسوم در میگماتیت متاتکسیت؛ B) بودیناژ بادکردگی نازک‌شده<sup>۲۵</sup> موازی لایه‌بندی در متاتکسیت؛ C) بودین‌های چندلایه‌ای در بخش متاتکسیت؛ D) پورفیروکلاست درشت فلسیک با حرکت برشی راست‌بر (همه عکس‌ها مربوط به منطقه سیمین هستند).

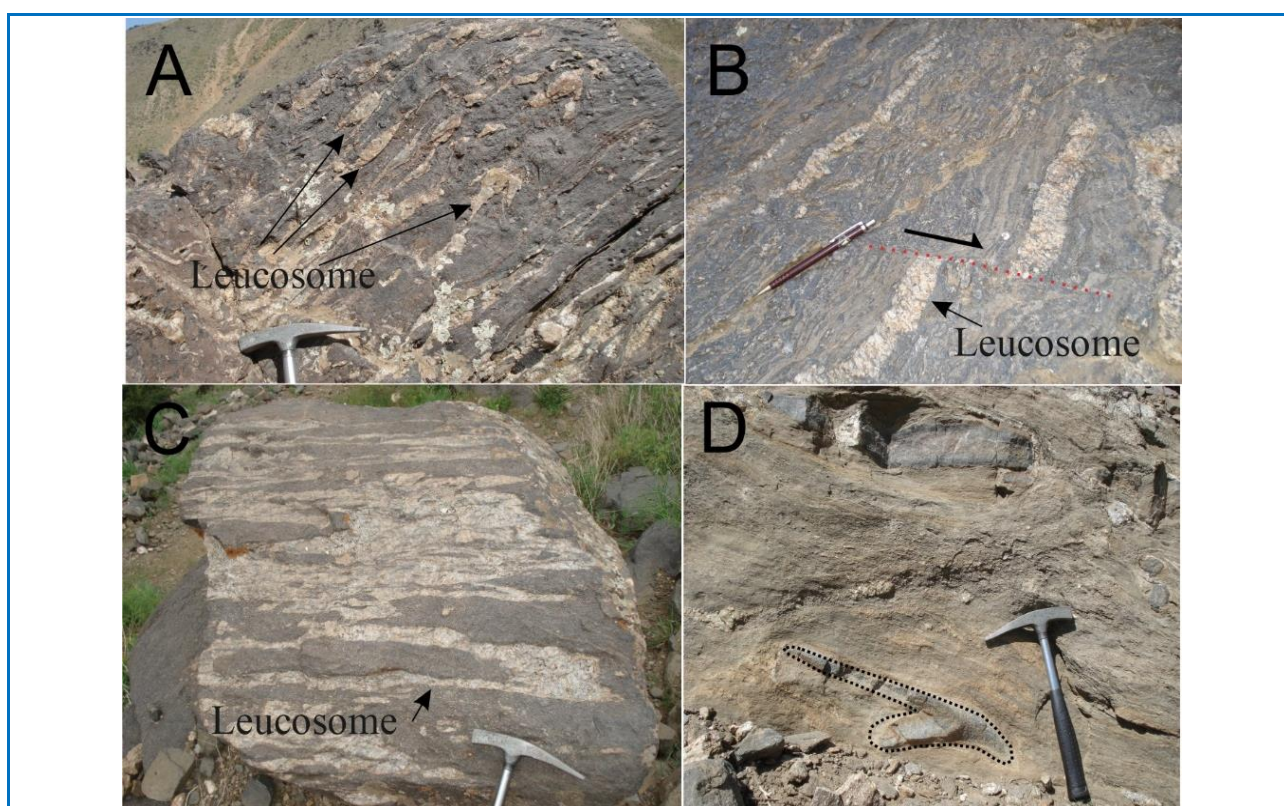
**Figure 7. A)** Asymmetric boudins of leucosum in the metatexite migmatite; **B)** Pinch and swell boudinage parallel to metatexite layering; **C)** Multi-layered boudins in the metatexite part; **D)** Felsic Megaporphyroclast with dextral shear sense (All photos are from the Simin area).

<sup>25</sup> pinch and swell

سنگ جامد به عنوان تابعی از متغیرهای سازنده و محیطی، مانند کانی‌شناسی، محتوای سیال و شیمی، اندازه دانه کانی‌ها، تفریق مذاب، دما، فشار و شرایط تنش تفریقی متفاوت است (Bürgmann and Dresen, 2008). در میگماتیت استروماتیکی منطقه همدان لوکوسوم‌های موازی با برگوارگی اولیه وجود دارند که در آغاز، کشیدگی اولیه موازی با لایه را تجربه کرده‌اند و به بودین‌های مخروطی دگرریخت شده‌اند و پس از آن، در مرحله پس‌هنگام کوتاه‌شدن این بودین‌ها چین خورده‌اند (شکل A-۸).

در منطقه شواهدی وجود دارد که پس از تبلور و سرد شدن میگماتیت‌ها، دوباره شرایط دگرریختی شکل‌پذیر حاکم شده است و دگرریختی حالت جامد میگماتیت‌ها را به دنبال داشته است. از شواهد دگرریختی حالت جامد در میگماتیت‌ها می‌توان بودین‌های چین‌خورده<sup>۲۶</sup> (شکل ۸-۸-۸) (A)، باندهای برشی (شکل ۸-۸-۸) (B)، چین‌های نیامی (شکل ۸-۸-۸) (C) و چین‌های بی‌ریشه (شکل ۸-۸-۸) (D) را نام برد. در این مرحله رگه کوارتزی مقاومت بسیار بالایی دارد. رئولوژی

<sup>26</sup> folded boudin



شکل ۸. A) لوکوسوم‌هایی که نخست بودین شده و سپس در دگرریختی پسین چین خورده‌اند (منطقه سیمین)؛ B) بودین نوع باند برشی از لوکوسوم‌ها در میگماتیت (منطقه سیمین)؛ C) چین غلافی با ترکیب لوکوسوم (منطقه دره مرادبیک)؛ D) چین بی‌ریشه در دگرریختی حالت جامد (منطقه سیمین).

**Figure 8. A)** Leucosome that were initially boudinaged and subsequently folded during later deformation (Simin region); **B)** Shear-band boudinage of leucosomes in migmatite (Simin region); **C)** Sheath fold with leucosome composition (Moradbeik Valley region); **D)** Rootless fold in solid-state deformation (Simin region).

### ریز ساختارهای میگماتیت‌ها

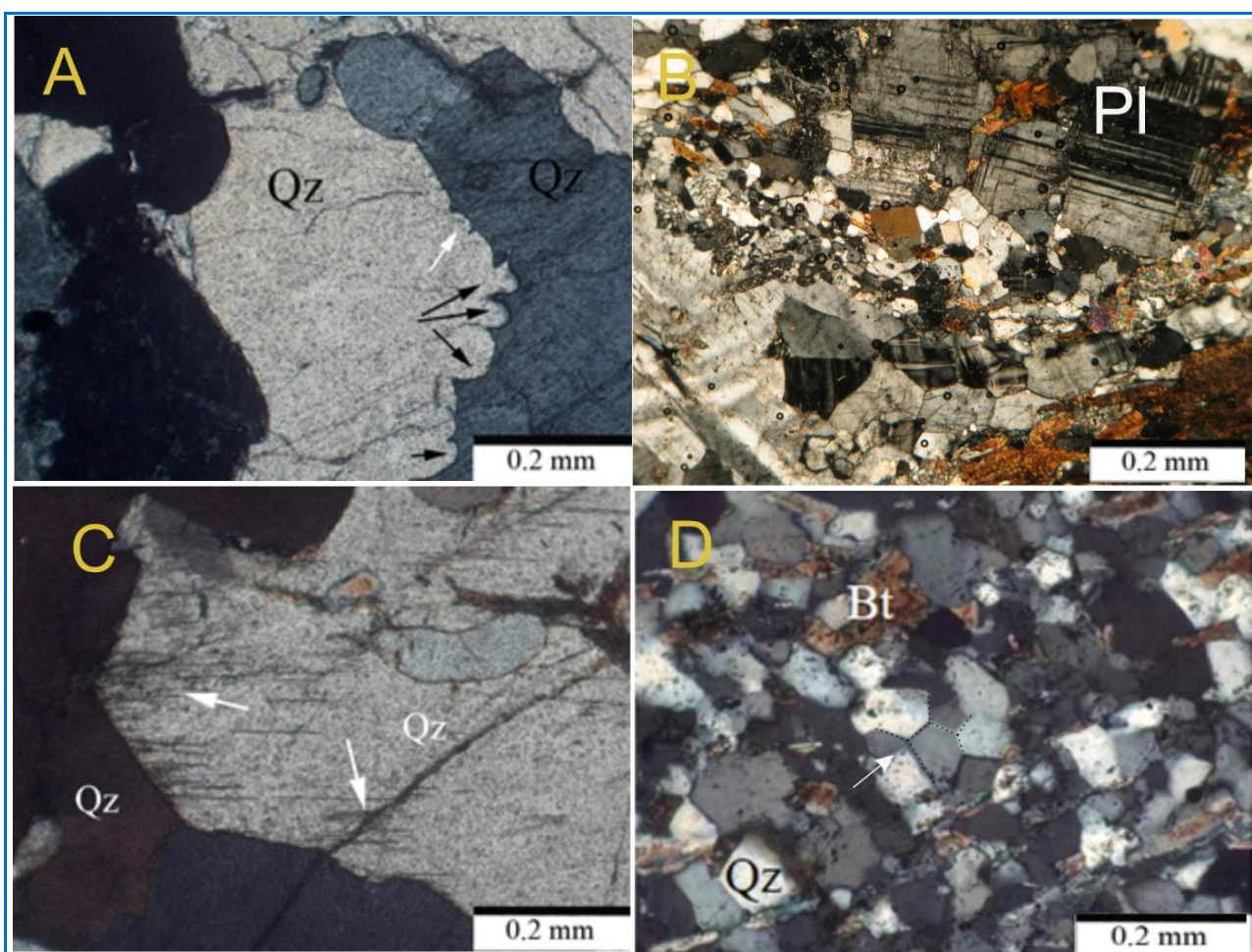
برای بررسی ریزساختارهای میگماتیت‌ها بخش‌های لوکوسوم، ملانوسوم و پالئوسوم بررسی شد. مهاجرت مرز

دانه‌ها از نوع برآمدگی<sup>۲۷</sup>، ماکل دگرریختی در پلاژیوکلاز و تیغه‌های دگرریختی کوارتز در لوکوسوم‌های منطقه به‌فراوانی دیده می‌شود که دگرریختی حالت جامد را در لوکوسوم‌ها

<sup>27</sup> Bulging

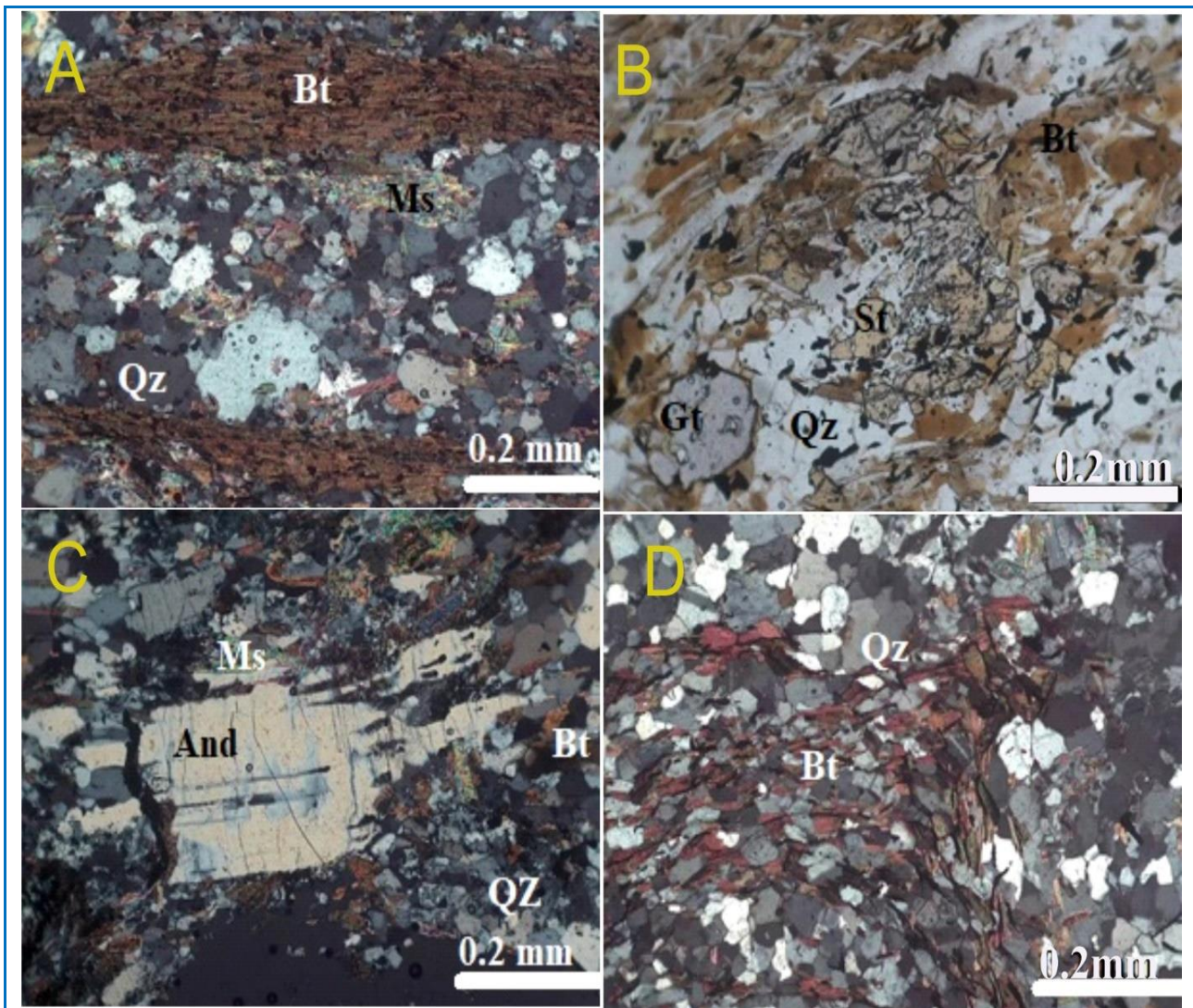
همدان را از دو نسل دانسته‌اند. بیوتیت‌های نسل نخست فراوانی بیشتر و جهت‌یابی دارند (Sepahi et al., 2018). گاه گارنت، استارولیت و به مقدار کمتر پلاژیوکلاز و کوارتز نیز در ملانوسوم تمرکز دارد. پلاژیوکلازها ماکل پلی‌سینتتیک و ماکل دگرریختی دارند. گارنت‌های ملانوسوم نیز خردشدگی نشان می‌دهند و پس از زمین‌ساخت پدید آمده‌اند (شکل ۹).

نشان می‌دهد. مرزهای ۱۲۰ درجه کوارتز که سازوکار باز تبلور و کاهش مساحت مرز دانه پس از پایان دگرریختی را نشان می‌دهد نیز در لوکوسوم‌ها دیده می‌شود که پس از تبلور میگماتیت‌ها پدید آمده است (شکل ۹). بخش ملانوسوم از بیوتیت‌های جهت‌دار ساخته شده است (شکل ۱۰). از دیدگاه چگونگی پیدایش، سپاهی و همکاران (Sepahi et al., 2018) بیوتیت‌های درون میگماتیت‌های



شکل ۹. تصویر میکروسکوپی از (A) باز تبلور با برآمدگی (BLG) در لوکوسوم میگماتیت‌های منطقه سیمین؛ (B) ماکل دگرریختی در پلاژیوکلاز (کوارتزها نیز خاموشی موجی دارند و دگرریختی درون بلوری نشان می‌دهد)؛ (C) تیغه‌های دگرریختی در کوارتز درون لوکوسوم جهت‌یابی دارد و دگرریختی آن به صورت خزش است؛ (D) کاهش مساحت مرز دانه (GBAR) در تجمعات بلورهای کوارتز درون لوکوسوم.

**Figure 9.** Photomicrographs of **A**) Bulging recrystallization (BLG) in the leucosome of migmatites of the Simin area; **B**) Deformation twinning plagioclase (Quartzes also have a undulose extinction and internal crystalline deformation); **C**) Deformation lamellae in quartz in the leucosome that have prefer orientation and show creep deformation; **D**) Grain boundary area Reduction (GBAR) in the accumulations of quartz crystals in the leucosome.



شکل ۱۰. A) لایه‌های غنی از بیوتیت (ملانوسوم) در کنار لایه‌های فقیر از بیوتیت و غنی از کوارتز (لوکوسوم) و جهت‌یابی ترجیحی؛ B) کانی‌های گارنت، استارولیت پس از زمین‌ساخت و بیوتیت‌های نسل نخست در بخش ملانوسوم میگماتیت متمرکز شده‌اند؛ C) دگرریختی آندالوزیت در بخش پالئوسوم با حاشیه زبانه‌ای شکل. در سمت چپ بلورهای کوارتز در جهت کشش رشد کرده‌اند؛ D) چین‌خوردگی بیوتیت‌های نسل نخست در لایه ملانوسوم که همزمانی دگرریختی و میگماتیته شدن را نشان می‌دهد.

**Figure 10.** Photomicrographs of **A)** Biotite-rich layers (melanosomes) in the vicinity of biotite-poor and quartz-rich layers (leucosomes) and preferred orientation; **B)** Garnet minerals, post-tectonic staurolite and first-generation biotites in the melanosome in migmatite; **C)** Deformation of andalusite in the mesosome part with a tongue-shaped margin. On the left side, quartz crystals have grown in the tension direction; **D)** Folding of biotites of the first generation and small amount of muscovite in the melanosome layer, which shows syn-deformation migmatitization.

(تا ۱ متر در ۱ متر)، پراکنده و بی‌برگوارگی دیده می‌شود. اینها در مراحل نخستین ذوب‌بخشی در میزبان خود پدید می‌آیند (Slagstad et al., 2005). با پیشرفت بیشتر در ذوب‌بخشی، نئوسوم با ادغام به صورت

#### بحث

از متداول‌ترین ساختارهای موجود در منطقه مورد بررسی، متاتکسیت‌های نوع لکه‌ای<sup>۲۸</sup> است که به صورت تکه‌های نیمه‌گرد تا بیضی‌شکل از نئوسوم‌های کوچک

<sup>28</sup> Patch type



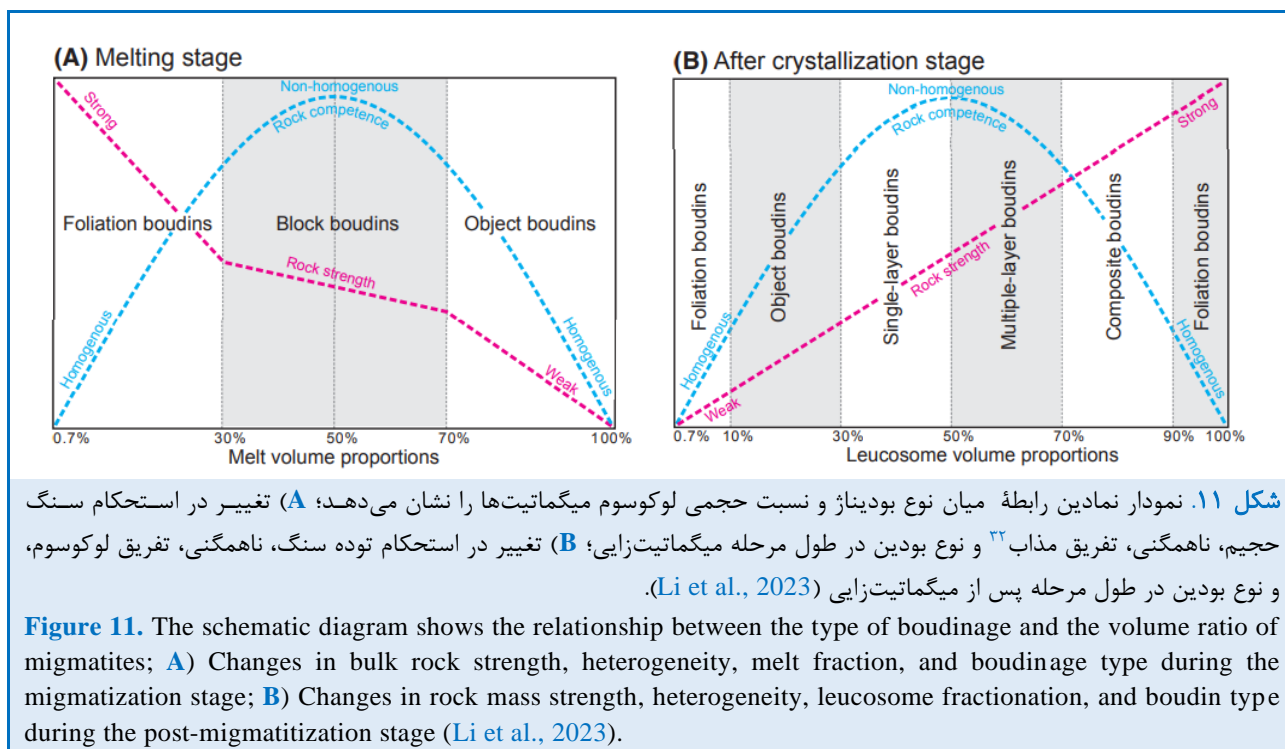
ساختارها در رخنمون‌هایی دیده می‌شوند که لایه‌بندی‌هایی با اختلاف مقاومت لایه دیده می‌شود و بازتابی از نقش رئولوژی لایه هستند (Cavalcante et al., 2016). در اینباره، لوکوسوم‌ها بیشتر در مکان‌های ساختاری کم تنش/کششی (مانند شکستگی‌ها، لولاهای چین خورده، سایه‌های فشار و/یا فضاهای میان بودین‌ها) دیده می‌شوند. ناسازگاری‌های کرنش در سراسر لایه‌ها چه بسا علت اصلی توسعه میگماتیت‌هاست (Cavalcante et al., 2016). ترکیب سنگ‌ها در ناحیه دگرریختی میگماتیت بسیار ناهمگن است و تفریق مذاب، نسبت لوکوسوم و اندازه دانه همگی در زمینه‌های مختلف سنگ‌شناسی متفاوت است (Li et al., 2023). رئولوژی و رفتار دگرریختی سنگ‌ها در منطقه مورد بررسی در درجه نخست به ترکیب کانی‌شناسی سنگ مربوط می‌شود که آن هم به نوبه خود تا اندازه بسیار از سنگ مادر سرچشمه گرفته است (شکل ۱۱-۱۱A).

وصله‌های بزرگ رشد می‌کند. اصطلاح تکه‌های نبولیتیکی<sup>۲۹</sup> نیز در مکان‌هایی که وصله‌های بزرگ نئوسوم مرزهای پراکنده را نشان می‌دهند شناسایی می‌شود. لوکوسوم و ملانوسوم در میگماتیت‌های وصله‌دار و نبولیتی معمولاً یکنواختی گسترده‌ای را در توزیع حفظ می‌کنند. به طور کلی، چنین میگماتیت وصله‌ای نشان‌دهنده درجه کمتری از اختلالات ساختاری در هنگام ذوب‌بخشی است (Slagstad et al., 2005). با این حال، کرنش سین‌آناتکتیک<sup>۳۰</sup> درباره میگماتیت‌های نبولیتیکی کمی بیشتر است (Sawyer, 2008). با افزایش بیشتر کرنش سین‌آناتکتیک، نوع وصله‌ای می‌تواند با انواع دیگر جایگزین شود؛ زیرا مذاب می‌تواند به ساختارهای کششی حرکت کند (White et al., 2004). میگماتیت‌های با ساختار اتساعی<sup>۳۱</sup> با توجه به یک مکان ساختاری ترجیحی خاص نئوسوم شناسایی می‌شوند. این

<sup>29</sup> Nebulitic patch

<sup>30</sup> syn-anatectic

<sup>31</sup> Dilation-structured migmatites



<sup>32</sup> melt fraction

و شمال خاوری گسترده شده است. این پهنه برشی به صورت باندهای برشی در منطقه دیده می‌شود و موجب دگرریختی لوکوسوم میگماتیت‌ها و نیز بودین‌شدن بلورهای آندالوزیت شده است (Izadi Kian et al., 2013). سپاهی و همکاران (Sepahi et al., 2018) دست کم سه بار گرم‌شدگی در دگرگونی‌های همبری و ناحیه‌ای را، برای منطقه همدان یادآور شده‌اند. ایزدی کیان و همکاران (Izadi Kian et al., 2013) نیز دست کم سه مرحله دگرریختی در این منطقه را معرفی کرده‌اند که با توجه به طرح تداخلی چین‌ها در این منطقه، چین‌خوردگی هم‌محور در هر سه مرحله روی داده است. برخی کانی‌های آلومینوسیلیکات (آندالوزیت) که هنگام دگرگونی‌های ناحیه‌ای و همبری پدید آمده‌اند، با تنش‌های کششی بودین‌شده و فاصله بودین‌ها با کوارتزهای پلی کریستالین پر شده است. آندالوزیت‌های دگرگونی ناحیه‌ای جهت‌دار هستند و امتداد غالب آنها رو به جنوب‌خاوری است (Izadi Kian et al., 2013).



شکل ۱۲. توسعه متفاوت درجات ذوب، ساختارهای میگماتیته و در ظاهر سنگ در لایه‌های مختلف در پی اختلاف در ترکیب لایه‌بندی سنگ مادر (منطقه سیمین).

**Figure 12.** Different development of melting degrees, migmatite structures, and the rock in different layers due to the different composition of layering in the protolith (Simin region).

#### برداشت

تجزیه و تحلیل صحرایی و هندسی ساختارهای مختلف در

در طول ذوب، تفریق مذاب به‌طور چشمگیری استحکام سنگ را کنترل می‌کند. به‌طور کلی، توزیع ناهمگن مذاب پیدایش تغییرات فضایی و تغییرات لحظه‌ای در اختلاف مقاومت میان لایه‌های ملانوسوم و لوکوسوم را به‌دنبال دارد. افزون‌بر تأثیر توزیع مذاب، درجه پیشرفت دگرگونی در میگماتیت نیز با تکامل و توزیع ترکیب کانی‌شناسی در مرحله ذوب‌بخشی کنترل می‌شود (Cavalcante et al., 2016). برای نمونه درجه ذوب‌بخشی و توزیع لوکوسوم در میگماتیت‌های کردیریت‌دار بیشتر از میگماتیت‌های آلومینوسیلیکات‌دار است (شکل ۱۱-B).

در هنگام ذوب‌بخشی، مذاب در امتداد صفحات برگوارگی حرکت می‌کند و در هنگام ذوب به مناطق برشی همسن مهاجرت می‌کند. از دست‌دادن مذاب باعث تقویت سنگدانه‌های حجیم به‌جامانده می‌شود. در چنین شرایطی، دایک‌ها و رگه‌های مافیک به‌علت با ترکیب کانی مافیک‌تر و دمای ذوب بالاتر، مقاومت بیشتری نسبت به به‌جامانده<sup>۳۳</sup> دارند و بدون تغییر خاصی به‌صورت رگه یا لایه مستقل در میگماتیت به‌جای می‌مانند (Li et al., 2023). بودیناژ میگماتیت‌های بودین‌شده نشان می‌دهد لوکوسوم در مرحله دگرریختی حالت جامد که به‌دنبال تبلور کامل پدید می‌آید، مقاومت بیشتری نسبت به ملانوسوم دارد (Li et al., 2023). بودیناژ میگماتیت‌های منطقه مورد بررسی به‌طور چشمگیری توسط اختلاف مقاومت میان لوکوسوم و پالنوسوم کنترل می‌شود (شکل ۱۲).

منطقه همدان با توجه به جای‌گرفتن در پهنه کمان قاره‌ای (Sepahi, 2008; Ahmadi-Khalaji et al., 2007; Sepahi et al., 2019) از رخداد‌های دگرگونی و دگرریختی مرز قاره‌ای متعدد متأثر شده است و یکی از پهنه‌های زمین‌شناسی پیچیده و ناآرام پهنه زمین‌ساختی سندانج-سیرجان است. رخنمون‌های میگماتیته در یک پهنه برشی بزرگ مقیاس (Jafari et al., 2008) با برگوارگی میلیونیتی و با شیب متوسط رو به شمال‌باختری

<sup>33</sup> Residum

پالئوسوم و لوکوسوم بسیار وابسته هستند.

رگه‌ها و دایک‌های مافیک بیشتر به صورت سالم در منطقه به جای مانده‌اند و گاه دچار چین‌خوردگی یا بودین‌شدگی شده‌اند؛ اما به علت محتوای کانی‌شناسی مافیک‌تر و دمای ذوب بالاتر، مقاومت بیشتری دارند و از تغییرات ناشی از ذوب در امان بوده‌اند.

چین‌خوردگی سین-آناکتیک یا چین‌خوردگی در هنگام پیدایش میگماتیت (چین‌های میگماتی) و نیز چین‌خوردگی پس از پیدایش سنگ میگماتیت (میگماتیت چین‌خورده) در منطقه حضور دارد. چین‌های میگماتی همزمان با ذوب‌بخشی از نوع چین مشابه با ترکیب لوکوسوم پدید آمده‌اند که در آنها، ضخامت لوکوسوم در بخش لولای چین بسیار بیشتر از یال‌های آن بوده است؛ اما پیدایش میگماتیت چین‌خورده در مرحله سوم (دگرریختی حالت جامد) رخ داده است.

در مرحله ذوب، استحکام سنگ در پی ذوب به شدت ضعیف می‌شود. استحکام سنگ به آرامی با افزایش تفریق مذاب کاهش می‌یابد، اما در مرحله دگرریختی حالت جامد، وجود لوکوسوم‌ها و نفوذ آپلیت‌ها تقویت مقاومت میگماتیت‌های منطقه را به دنبال داشته است.

منطقه، سبب می‌شود تا روابط میان رئولوژی، اختلاف مقاومت و دگرریختی در هنگام میگماتیت‌زایی شناخته شود. میگماتیت‌های منطقه دگرریختی را در سه مرحله همزمان با ذوب‌بخشی، در حالت جامد پس از تبلور و نیز دگرریختی حالت جامد بعدی تجربه کرده‌اند:

در مرحله همزمان با ذوب‌بخشی در منطقه همدان، بودین‌های نوع برگواره که با مذاب پرشدگی دارند، بودین‌های پالئوسوم و بودین‌های ملانوسوم پدید آمده‌اند.

در مرحله دگرریختی حالت جامد بلافاصله پس از تبلور بودین نوع بادکردگی - نازک‌شدگی و بودین‌های چند لایه‌ای پدید آمده‌اند و همچنین، پورفیروکلاست‌های درشت با ترکیب لوکوسوم در این مرحله در حضور نیروهای زمین‌ساختی پدیدار شده‌اند.

در مرحله دگرریختی حالت جامد پس از تبلور کامل میگماتیت‌های منطقه ساختارهایی مانند بودین‌های چین‌خورده، چین‌های بی‌ریشه، بودین‌های نوع باند برشی از جنس لوکوسوم، چین‌های نیامی با ترکیب لوکوسوم پدید آمده‌اند.

بودین‌شدگی سنگ‌های میگماتی منطقه، به اختلاف مقاومت مکانیکی، درصد ذوب‌بخشی و رفتار رئولوژیک لایه‌های

## References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., and Mouthereau, F. (2005) Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3), 401-419. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>
- Ahmadi Khalaji, A., Esmaeily, D., Valizadeh, M., and Rahimpour-Bonab, H. (2007) Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 859-877. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2006.06.005>
- Alavi, M. (2004) Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust-belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304, 1-20. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Baharifar, A. (2004) Petrology of metamorphic rocks in the Hamedan area, 218 p. Ph.D. thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Bürgmann, R., and Dresen, G. (2008) Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 531-567. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124326>
- Cavalcante, G.C.G., Viegas, G., Archanjo, C.J., and da Silva, M.E. (2016) The influence of partial melting and melt migration on the rheology of the continental crust. *Journal of Geodynamics*,

- 101, 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.06.002>
- Chiu, H-Y., Chung, S-L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M. and Iizuka, Y. (2013) Zircon U–Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos* 162: 70-87. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.006>
- Collins, W.J., and Sawyer, E.W. (1996) Pervasive magma transfer through the lower-middle crust during non-coaxial compressional deformation: An alternative to diking. *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 565–579. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.1996.00442.x>.
- Fazlnia, A. (2010) Geochemical modeling of partial melting on the Tall-e-Pahlevani migmatitic xenoliths, Shahr-e-Babak. *Petrological Journal*, 1(1), 11-26.
- Fazlnia, A., Miri, M., and Saki, A. (2023) Determining the conditions and factors affected partial melting in the Chah-Bazargan migmatitic xenoliths (NE Neyriz) using thermodynamic phase diagrams. *Researches in Earth Sciences*, 14(1), 18-31. <https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103056>
- Fedrizzi, G., Piazzolo, S., Koehn, D., and Pegler, S. (2023) The use of leucosome patterns in migmatites to decipher rates of melt production, melt percolation and external deformation: Insights from numerical modelling. *European Geosciences Union General Assembly*, EGU23-16256. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-16256>
- Goswami, S., Bhattacharjee, P., Swain, S., Sarbajna, C., Muralidharan, R., Choudhury, D.K., Pande, D., and Sinha, D.K. (2021) Migmatite rheology of crustal catazone: an example from the SSE part of T. Sundupalle granite-greenstone terrain, Eastern Dharwar Craton, India. *Geology Journal*, 56, 4, 10. <https://doi.org/10.1002/gj.4159>
- Hashemi, M., Davoudian, D.A., Shabanian, B.N., and Azizi, H. (2019) Petrographical study of paragneises in Northeast of Golpayegan: migmatization and evidences of retrograde metamorphism. *The Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 27(1), 179-190. <https://doi.org/10.29252/ijcm.27.1.179>
- Izadi Kian, L., Mohajjel Kafshdouz, M., Alavi, S., Sepahi Garoo, A., and Hoseini Dust, S. (2013) Timing of porphyroblasts growth and their relation to deformation stages in metamorphic rocks of the Hamedan area. *Petrological Journal*, 4(13), 1-18 (in Persian).
- Jafari, S.R. (2007) Petrology of Migmatites and Plutonic Rocks of South Simin Area, Hamadan, 153 p. MSc thesis, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran (in Persian).
- Jafari, S.R. (2018) Petrology of High-grade metamorphic rocks of the Hamadan and the adjacent areas in the Sanandaj-Sirjan Zone, 192 p. Ph.D. thesis, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran (in Persian).
- Jafari, S.R. (2022) Study of structure and morphology of zircons in pelitic migmatites in Hamedan, Touyserkan and Boroujerd regions, Sanandaj-Sirjan zone. *Petrological Journal*, 12(48), 51-76 (in Persian with English Abstract). <https://doi.10.22108/IJP.2022.131054.1255>
- Jafari, S.R., Izadi-Kian, L., Sepahi, A.A., Mohajjel, M., and Aliyani, F. (2008) Evidence of shear zone and its introduction in the Simin migmatites (Southeast of Hamedan). *The 26<sup>th</sup> symposium of Geological Survey of Iran* (in Persian).
- Jafari, S.R., Sepahi, A., and Osanai, Y. (2020) LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology on migmatites from the Boroujerd region, Sanandaj-Sirjan zone, Zagros Orogen, Iran: provenance analysis and metamorphic age. *Geopersia*, 10(2), 367-380. <https://doi.org/10.22059/geope.2020.288587.648501>
- Johnson, T.E., Hudson, N.F.C., Droop, G.T.R. (2003) Evidence for a genetic- granite-migmatite link in the Dalradian of NE Scotland. *Journal of the Geological Society London*, 160, 447-457. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-069>
- Li, Z., Zeng, Z., and Liu Y. (2023) Boudinage and the rheology of syntectonic migmatites in the high-

- strain Taili deformation zone, NE China. *Geosphere*, 19(1), 75–99. <https://doi.org/10.1130/GES02523.1>
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B. and Mohajjel, M. (2011) U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 41: 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.03.006>
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., and Sahandi, M.R. (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)
- Saki, A., Lucci, F., Miri M., and White, J. C. (2021) Trondhjemite leucosomes generated by partial melting of a hornblende-gabbro (Alvand plutonic complex, Hamedan, NW Iran). *International Geology Review*, 63, 1–34. <https://orcid.org/0000-0001-5107-6847>
- Saki, A., Miri, M., and Oberhansli, R. (2020) High temperature Low pressure metamorphism during subduction of Neotethys beneath the Iranian plate: Evidence for mafic migmatite formation in the Alvand complex (western Iran). *Mineralogy and Petrology*, 6, 539–557. <https://doi.org/10.1007/s00710-020-00721-z>
- Sawyer, E.W. (2008) Working with migmatite, Mineralogical Association of Canada Short Course., Quebec City, Quebec, 38, 1–168.
- Sepahi A.A., Jafari, S. R., Osanai, Y., Shahbazi, H., and Moazzen, M. (2019) Age, petrologic significance and provenance analysis of the Hamedan low-pressure migmatites; Sanandaj–Sirjan zone, West Iran. *International Geology Review* 61(12), 1446–1461. <http://www.doi.org/10.1080/00206814.2018.1517392>
- Sepahi, A. (1999) Petrology of the Alvand plutonic complex with special reference on granitoids, 326 p. Ph.D. thesis, Tarbiat-Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Sepahi, A.A. (2008) Typology and petrogenesis of granitic rocks in the Sanandaj–Sirjan metamorphic belt, Iran: With emphasis on the Alvand plutonic complex. *Neues Jahrbuch Für Geologie Und Paläontologie-Abhandlungen*, 247, 295–312. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2008/0247-0295>
- Sepahi, A.A., Borzoei, K., and Salami, S. (2012). The study of minerals chemistry, thermobarometry and tectonic setting of plutonic rocks from Sarabi Tueyserkan area (Hamedan province). *Petrological Journal*, 3, 11, 39–58 (in Persian).
- Sepahi, A.A., Jafari, S. R., and Mani-Kashani, S. (2009). Low pressure migmatites from the Sanandaj–Sirjan metamorphic belt in the Hamedan region (Iran). *Geologica Carpathica*, 60, 107–119. <https://doi.org/10.2478/v10096-009-0007-2>
- Sepahi, A.A., Jafari, S. R., Moazzen, M., and Shahbazi, H. (2018) Study of mineral chemistry, thermobarometry and petrogenesis of migmatitic rocks of Hamedan area. *Petrological Journal*, 99, 3, 164–190 (in Persian). <https://doi.org/10.22108/IJP.2017.103130.1026>
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Stern, R., Ghorbani, G., and Bakhshizad, F. (2016) Zircon U–Pb ages and Hf–O isotopic composition of migmatites from the Zanzan–Takab complex, NW Iran: Constraints on partial melting of metasediments. *Lithos*, 240–243, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.004>
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A., Shang, C. and Abedini, M.V. (2010) Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): New evidence for Jurassic magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences* 39: 668–683. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.04.014>
- Slagstad, T., Jamieson, R. A., and Culshaw, N. G. (2005) Formation, crystallization, and migration of melt in the mid-orogenic crust: Muskoka Domain Migmatites, Grenville Province, Ontario. *Journal of Petrology*, 46, 5, 893–919. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi004>

- Vielzeuf, D., Clemens, J. D., Pin, C., and Moinet, E. (1990) Granites, granulites and crustal differentiation. In D. Vielzeuf and P. Vidal (Eds.) *Granulites and crustal evolution*, 59–85p. Dordrecht, Kluwer.
- White, R.W., Powell, R., and Halpin, J.A. (2004) Spatially-focussed melt formation in aluminous metapelites from Broken Hill, Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 22, 825–845. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00553.x>
- Whitney D.L., and Evans B.V. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 1, 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zare Shooli, M., Ahmadi Khalaji, A., Zhang, H., and Saki, A. (2020) The genetic link between migmatites and granites in Tuyserkhan area (Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, western Iran): constraints by mineralogy, geochemistry and thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, 89, 37-59. <https://doi.org/10.2451/2020PM875>