

Investigation on tourmaline occurrence in the metamorphic complex in the north of Golpayegan, Sanandaj-Sirjan Zone

Solomon Ahmadi-Bonakdar ¹, Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh ^{2✉}, Akramosadat Mirlohi ³

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, ahmadi.solomon@gmail.com

² Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, tabataba@sci.ui.ac.ir, tabatabalimp@gmail.com

³ Ph.D., Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, akrammirlohi@gmail.com

ARTICLE INFO

Received: 23 June 2022

Accepted: 15 January 2022

Keywords

Tourmaline

Schist

Marble

Granite

Golpayegan

Sanandaj-Sirjan



 20.1001.1.22285210.1401.13.4.4.8

 10.22108/ijp.2023.134165.1283

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The occurrence of tourmaline in the metamorphic complex of the north of Golpayegan is observed within the granitoid mass and schists in contact with granitoid and marbles.

Speaking of abundance, tourmaline is less frequently a minor mineral found in granites and granitic pegmatites as well as in low- to high-grade metamorphic rocks (Krmíček et al., 2020). The minerals of the tourmaline group can adjust their composition to adapt to varied settings, and therefore show a remarkable stability range in terms of pressure, temperature, fluid composition, and host rock composition (Van Hinsberg et al., 2011). Since tourmaline displays a negligible intra-crystalline diffusion, it can record the physical and chemical conditions of its setting and preserve this information in geological chronicles. Therefore, tourmaline accurately presents the composition of fluids and the melts from which it crystallized (Marks et al., 2013). Although tourmaline is common in many rocks, it is not common in metamorphosed carbonates (Krmíček et al., 2020).

A petrographical and geochemical investigation of tourmalines in the north of Golpayegan was undertaken to know the formation mechanism of this mineral and to determine the differences between tourmalines crystallized at the contact, in granitoid and tourmaline in marbles.

Regional Geology

The Golpayegan Metamorphic Complex is located in the Sanandaj-Sirjan Zone and the occurrence of

tourmaline in this complex is observed in two locations. The first location is on the west side of Ochestan farm where tourmaline is found in three forms:

- 1) In the granitoid mass (Gt); 2) In the amphibole

✉ Corresponding Author

To cite this article: Ahmadi-Bonakdar, S., Tabatabaei Manesh, S. M. and Mirlohi, A. (2023) Investigation on tourmaline occurrence in the metamorphic complex in the north of Golpayegan, Sanandaj-Sirjan Zone. *Petrological Journal*, 13 (4), 87-106.

schists (At) in contact with the granitoid mass, and 3) In the mica schists (Mt) in contact with the granitoid mass. The second area is in the north of Esfajerd where tourmaline occurs inside the marbles (Ct).

Methodology

With the completion of field reconnaissance and preparation of thin sections, a petrographic study was fulfilled to determine the texture and mineralogy of the minerals, and then, some samples were selected for electron microprobe analysis.

Petrography

The tourmaline in granitoid mass (Gt), appears as idiomorphic and coarse-grained without any inclusions. Micaschists (Mt) in contact with the granitoid mass are sieve-shaped or spongy. Inside the amphibole schists (At) in contact with the granitoid mass, it is idiomorphic without any inclusions.

Tourmaline in marbles (Ct) is fine-grained and blue, which can be observed around biotites with corrosion marks, indicating its reaction with fluid.

Tourmaline chemistry

The tourmalines in Ochestan granite-pegmatite (Gt) are of alkali tourmaline variety with schorl composition, enriched in aluminum, and points to the replacement of Al in the Y (R2) position. The substitution type of these tourmalines is $\square\text{Al}(\text{NaFe}^{+2})_{-1}$ owing to the high amount of Fe versus Mg,

The tourmalines in amphibole schist (At) are alkali tourmaline with schorl-dravite composition and the tourmalines in mica schist (Mt) are alkali tourmaline with dravite composition, and both types are characterized by insignificant amounts of aluminum. This demonstrates the replacement of Al in the position of Y (R2) has not occurred. Due to the change in Mg and Fe content, the At-type tourmalines benefit from both $\square\text{Al}(\text{NaFe}^{+2})_{-1}$ and $\square\text{Al}(\text{NaMg})_{-1}$ substitution varieties. However, the substitutions of Mt-type tourmalines are mainly $\square\text{Al}(\text{NaMg})_{-1}$ due to the high content of Mg versus Fe. Indeed, $\text{Fe}^{+3}\text{Al}_{-1}$ substitution can be observed in both types of tourmaline.

Tourmalines in marble (Ct) are of the alkaline type of dravite composition and rich in aluminum, which indicates the replacement of Al in the Y (R2) position. Their substitution is $\square\text{Al}(\text{NaMg})_{-1}$ due to the high content of Mg versus Fe.

Discussion

The composition of tourmaline in Gt is of schorl type ($\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}= 0.89-0.91$) and has an aluminum replacement in the Y position. The composition of tourmaline in Mt type is of dravite type ($\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}= 0.45-0.47$) and the composition of tourmaline in At type is of schorl-dravite type ($\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}= 0.49-0.51$), which, replacement of aluminum in the Y position does not occur in both types of tourmaline in schists. Consequently, hydrothermal tourmalines have less aluminum (i.e. At and Mt-type tourmalines), and tourmalines in the granite-pegmatite mass have much more aluminum (i.e. Gt-type tourmalines). Based on the values of Fe# ($\text{FeO}/\text{FeO}+\text{MgO}$), it is possible to determine the formation site of tourmalines. If the amount of Fe# in tourmaline is >0.8 , it indicates the closed magmatic system, lack of fluids interference, and their contamination with Al-rich sediments. Meanwhile, if the ratio is <0.6 , it means that boron is metasomatic with sediments rich in Al and also is of an extrinsic origin.

The Gt tourmaline samples in the range of Li-poor granitoids and related pegmatites and aplites related to them, the At and Mt tourmaline samples placed in the range of Ca-poor metapelites, metapsammities and quartz-tourmaline rocks not coexisting with an Al-saturating phase.

The tourmalines in the marbles of the north Esfajerd (Ct) are of dravite type with the ratio of $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}= 0.42-0.45$. In these tourmalines, both aluminum replacement in the Y position and $\square\text{Al}(\text{NaMg})_{-1}$ substitution can be observed, which manifests the non-magmatic origin of these types of tourmalines. The Ct-type tourmalines in the range of metapelites and metapsammities coexist with an Al-saturating phase.

The postmagmatic/residual-hydrothermal fluids related to alkali syenite magma of the north Esfajerd along with the fluids from the progressive metamorphism in micaschists, have developed these tourmalines in marble.

The discrepancy in the results of two types of thermometers (thermometry based on the amount of Ti in biotite and Mg-Fe exchange between tourmaline and biotite minerals) in meta-carbonates, highlights that at temperatures $>566^\circ\text{C}$ biotite, and lower temperatures, Ct-type tourmaline is composed of biotites.

Acknowledgment

The authors are sincerely grateful to the Geology Department of Isfahan University for all their support.

بررسی چگونگی رخداد تورمالین در مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان، پهنه سنندج-سیرجان

سلیمان احمدی بنکدار^۱، سیدمحسن طباطبایی منش^۲✉، اکرم السادات میرلوحی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، ahmadi.solomon@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، tabataba@sci.ui.ac.ir, tabatabalimp@gmail.com

^۳ دکتری، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، akrammirlohi@gmail.com

چکیده

رخداد تورمالین در دو منطقه در شمال گلپایگان دیده می‌شود. در منطقه نخست در باختر مزرعه اوچستان، تورمالین درون توده متبلور به صورت نیمه شکل دار (Gt)، در همبری آمفیبول شیبست به صورت شکل دار (At) و در همبری میکاشیست به صورت اسفنجی (Mt) دیده می‌شود. در منطقه دوم، در شمال روستای اسفاجرد، تورمالین درون مرمر (Ct) است. تورمالین‌های نوع Gt با ترکیب شورل Fe# بالای ۰/۹۳ دارند و خاستگاه آنها ماگمایی است. این تورمالین‌ها با گرانتیوئیدهای فقیر از Li سازگار هستند. هر دو دسته تورمالین‌های نوع Mt و تورمالین‌های نوع At به ترتیب با ترکیب دراویت و شورل-دراویت، خاستگاه گرمایی و سازگار با سنگ‌های متاسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca دارند. تورمالین‌های نوع Ct ترکیب دراویت دارند و با Fe# کمتر از ۰/۶ با متاسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca سازگاری دارند و با یک فاز اشباع از Al همزیست هستند. حضور تورمالین نوع Ct در کنار بیوتیت‌هایی با آثار خوردگی و حضور کانی‌های ثانویه در سنگ و همچنین، تفاوت در دماسنجی، نشان‌دهنده پیدایش تورمالین در دمای کمتر در اثر واکنش سیال‌های بوردار با بیوتیت است. در پیدایش این تورمالین‌ها سیال‌های ناشی از دگرگونی پیشرونده میکاشیست‌ها و سیال‌های تأخیری-گرمایی برخاسته از ماگمای آکالی سینیت نقش داشته‌اند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۰/۲۵

کلیدواژه‌ها

تورمالین

شیبست

مرمر

گرانیت

گلپایگان

سنندج-سیرجان



20.1001.1.22285210.1401.13.4.4.8

10.22108/ijp.2023.134165.1283

مقدمه

فرمول ساختاری تورمالین به صورت زیر است:

$XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$ (Hawthorne and Henry, 1999);

X= Na, Ca, Vacant;

Y= Li, Fe⁺², Mg, Mn, Al, Cr⁺³, Fe⁺³, V⁺³, Ti⁺³;

Z= Mg, Al, Fe⁺³, V⁺³, Cr⁺³

T= Si, Al, B;

V= OH, O;

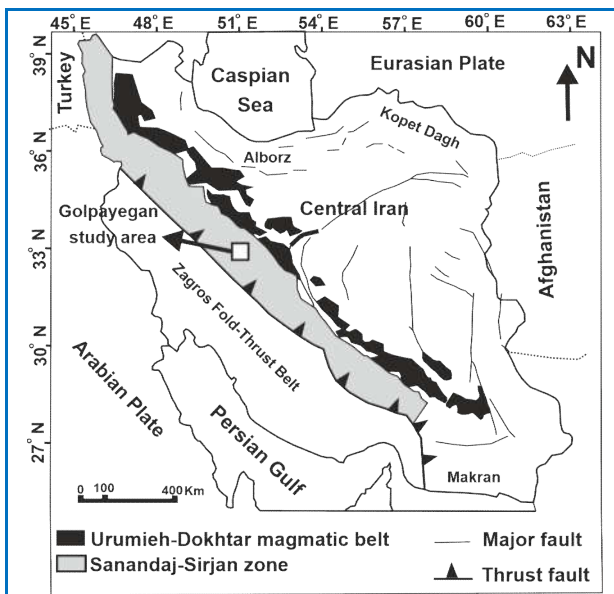
W= OH, F, O

تورمالین مهم‌ترین کانی آبدار دارای عنصر بور

است که در دما و فشار گسترده‌ای پایدار است و از

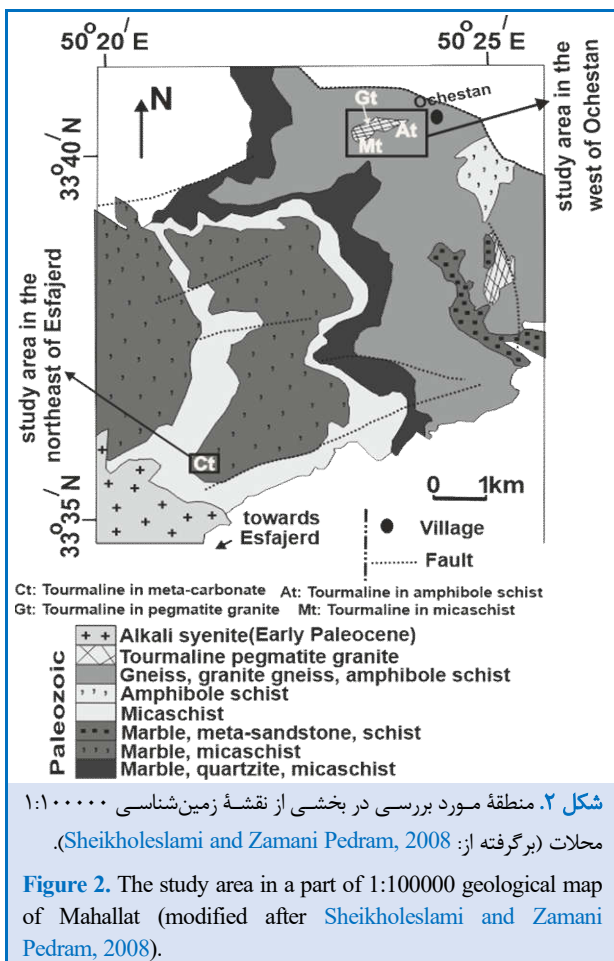
✉ نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: احمدی بنکدار، س.، طباطبایی منش، س. م.، میرلوحی، ا. س. (۱۴۰۱) بررسی چگونگی رخداد تورمالین در مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان، پهنه سنندج-سیرجان. پترولوژی، ۱۳ (۴)، ۸۷-۱۰۶.



شکل ۱. نقشه ساده زمین‌شناسی ایران و جایگاه سنگ‌های مورد بررسی در پهنه سنندج-سیرجان (Fergusson et al., 2016).

Figure 1. The simplified geological map of Iran and the location of studied rocks in the Sanandaj-Sirjan zone (Fergusson et al., 2016).



شکل ۲. منطقه مورد بررسی در بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات (برگرفته از: Sheikholeslami and Zamani Pedram, 2008).

Figure 2. The study area in a part of 1:100000 geological map of Mahallat (modified after Sheikholeslami and Zamani Pedram, 2008).

سیال‌هایی با ترکیب گوناگون و به‌طور معمول به‌صورت فاز فرعی در سنگ‌هایی با ترکیب بسیار متفاوت، از رسوبی، گرمابی، دگرگونی تا ماگمایی، متبلور می‌شود (Shaw et al., 1988; Henry and Dutrow, 1996; Henry et al., 1999; Marschall et al., 2009; Dutrow and Henry, 2011). فراوانی کانی تورمالین در گرانیت‌ها و پگماتیت‌های گرانیتی کم تا فرعی به‌شمار می‌رود. همچنین، در سنگ‌های دگرگونی با درجه کم تا بالا نیز پدید می‌آید (Krmíček et al., 2020). کانی‌های گروه تورمالین می‌توانند ترکیب خود را برای سازگاری با محیط‌های مختلف تنظیم کنند و از این‌رو، محدوده پایداری بزرگی از نظر فشار، دما، ترکیب سیال و ترکیب سنگ میزبان نشان می‌دهند (Van Hinsberg et al., 2011). از آنجایی‌که تورمالین انتشار درون‌بلوری ناچیزی نشان می‌دهد می‌تواند شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط خود را ثبت کند و این اطلاعات را در دوره‌های زمانی زمین‌شناسی حفظ کند. از این‌رو، تورمالین ترکیب سیال‌ها و مذاب‌هایی که از آن متبلور شده است را به‌طور دقیق و مشخص ارائه می‌کند (Marks et al., 2013). با اینکه تورمالین در بسیاری از سنگ‌ها معمول است، اما در کربنات‌های دگرگون شده معمول نیست (Krmíček et al., 2020).

در پهنه سنندج-سیرجان (شکل ۱) و در شمال گلپایگان، تورمالین در دو منطقه دیده می‌شود (شکل ۲). در منطقه نخست در باختر مزرعه اوچستان، لکوگرانیت‌های پگماتیتی با ساختارهای همساز یا ناهم‌ساز در سنگ میزبان گسترش یافته‌اند. ویژگی شاخص این لکوگرانیت‌های پگماتیتی، حضور تورمالین سیاه به‌عنوان فراوان‌ترین کانی فرومینیزین است. بیشتر این توده‌ها در همراهی با میکاشیست‌ها هستند و شیخ‌الاسلامی و زمانی‌پدram (Sheikholeslami and Zamani Pedram, 2008) سن آنها را پالئوزویک دانسته‌اند.

پیدایش این کانی و مشخص کردن تفاوت‌های میان تورمالین‌های متبلور شده در همبری و گرانیتوید و همچنین، تورمالین درون مرمرها انجام شده است.

زمین‌شناسی منطقه

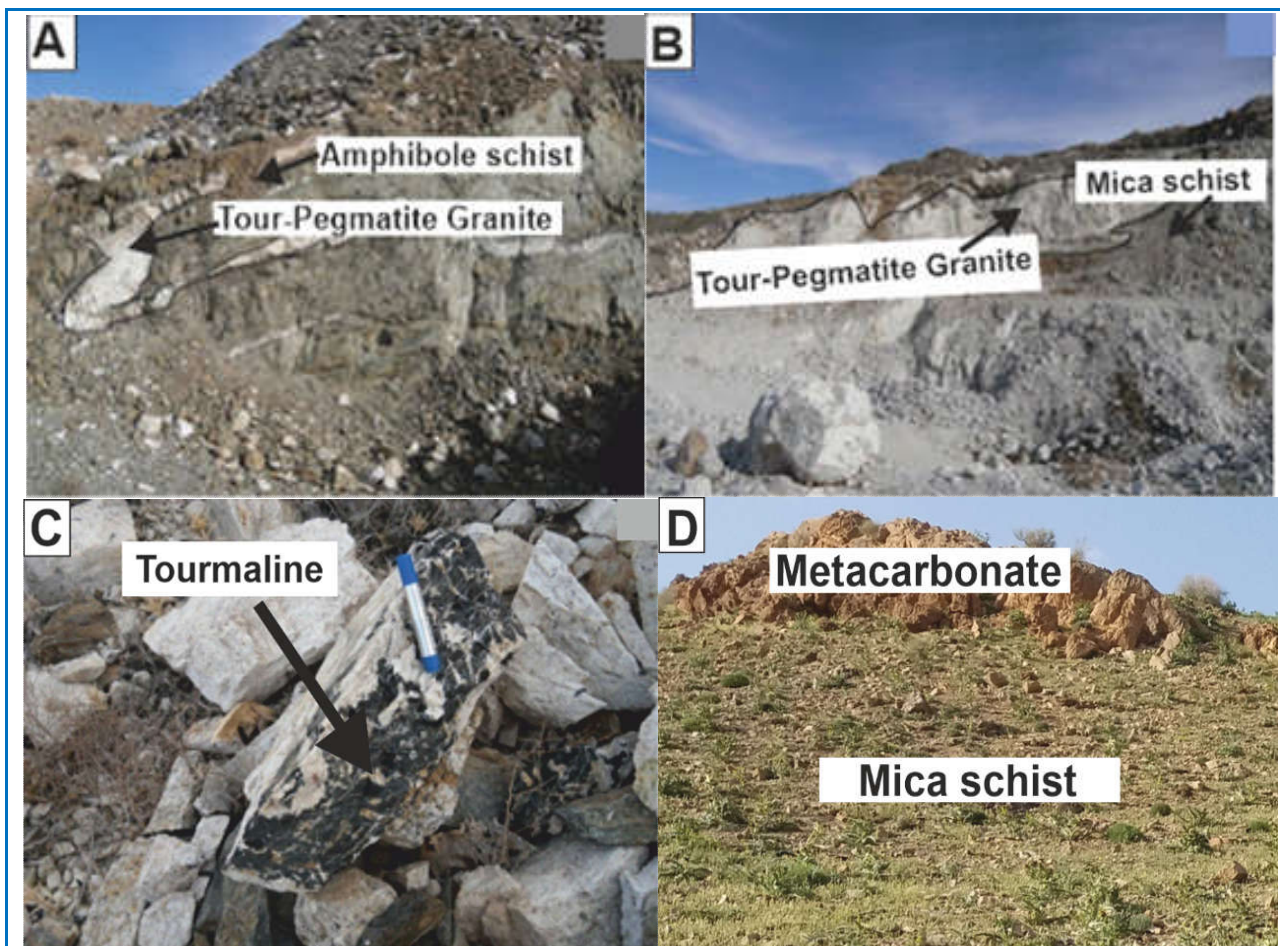
مجموعه دگرگونی شمال گلپایگان در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان (شکل ۱) جای دارد. پهنه سنندج-سیرجان از شمال باختری (سنندج) تا جنوب‌خاوری (سیرجان) با پهنای ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر، موازی کمربند رانش چین‌خورده زاگرس، ۱۵۰۰ کیلومتر امتداد دارد (Tillman et al., 1981). این پهنه شامل واحدهای دگرگونی، آذرین و رسوبی است که در آن چند مرحله دگرریختی و دگرگونی در حد رخساره‌های شیست سبز تا آمفیبولیت رخ داده است. مهم‌ترین رویداد دگرگونی که پهنه سنندج-سیرجان را تحت‌تأثیر قرار داده است به فازهای زمین‌ساختی مرتبط با باز و بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس در مزوزوییک مربوط است (Mohajjel and Fergusson, 2000; Mohajjel et al., 2003; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Fergusson et al., 2016). برپایه بررسی‌های کریمی و همکاران (Karimi et al., 2012) و همچنین، موسوی و همکاران (Moosavi et al., 2014)، منطقه شمال گلپایگان یک ناحیه با دگرریختی چند مرحله‌ای است.

نخستین بررسی‌های زمین‌شناسی در منطقه شمال گلپایگان را تیله و همکاران (Thiele et al., 1968) انجام داده‌اند. در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات، دگرگونی‌های این ناحیه در حد رخساره آمفیبولیت و سنگ خاستگاه آنها شیل‌های پالئوزوییک دانسته شده است (شکل ۲) (Sheikholeslami and Zamani Pedram, 2008). سنگ‌های دگرگونی شمال گلپایگان از دیدگاه سنگ‌شناسی شامل اسلیت، فیلیت، شیست (میکاشیست، گارنت شیست، آمفیبول شیست)، میلونیت‌گرانیت، گنایس، آمفیبولیت، گرانیت-

واحدهای سنگی درون این منطقه که در پیمایش صحرایی دیده شدند شامل توده گرانیت-پگماتی و شیست‌های گوناگون هستند (شکل ۲). توده گرانیت-پگماتی اوچستان با سه نوع سنگ میزبان خود شامل اسکارن، میکاشیست و آمفیبول شیست، همبری مستقیم دارد. رخداد تورمالین در گرانیت-پگماتیت (Gt) (نمونه‌های برداشت‌شده در مختصات $33^{\circ}39'51''$ تا $50^{\circ}22'29/5''$) و همچنین، در همبری توده با میکاشیست (Mt) (نمونه‌های برداشت‌شده در $33^{\circ}38'44/58''$ تا $50^{\circ}21'44/45''$) دیده می‌شود. همچنین، آمفیبول شیست‌ها (At) (نمونه‌های برداشت‌شده در مختصات $33^{\circ}39'31/80''$ تا $50^{\circ}22'56/4''$) بیشتر میزبان رگه‌های فلسیک و شیرابه‌های پایانی هستند و در همبری آنها تورمالین‌های شکل‌دار پدید آمده‌اند. در همبری توده گرانیت-پگماتی با اسکارن هیچ تورمالینی دیده نمی‌شود. در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات (شکل ۲)، میکاشیست در اطراف توده گرانیت-پگماتیت اوچستان گزارش نشده است؛ اما در پیمایش صحرایی، میکاشیست در اطراف توده گرانیتی-پگماتی دیده می‌شود. در بررسی‌های موحدی (Movahedi, 2009) و میرلوحی (Mirlohi, 2015) وجود میکاشیست در اطراف توده گرانیتی-پگماتی اوچستان گزارش شده است. شکل‌های ۳- A تا C تصویرهای صحرایی از منطقه اوچستان را نشان می‌دهند. در منطقه دوم در شمال‌خاوری روستای اسفاجرد، تورمالین درون مرمر (Ct) (نمونه‌های برداشت‌شده در مختصات $33^{\circ}35'2/59''$ تا $50^{\circ}22'2/04''$) یافت می‌شود. مرمرها در منطقه شمال‌خاوری اسفاجرد در نزدیکی میکاشیست‌ها و با فاصله بیشتری از آلکالی‌سینیت (به سن پالئوسن) جای دارند (شکل‌های ۲ و ۳-D). بررسی تورمالین‌ها از دیدگاه سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی در منطقه شمال گلپایگان برای شناخت ساز و کار

می‌دهند (Zamani Sheikholeslami and Pedram, 2008).

پگماتیت، مرمر، کوارتزیت، اسکارن و هورنفلس هستند و درجات دگرگونی متفاوتی را نشان



شکل ۳. تصویرهایی از رخنمون‌های مختلف پیدایش تورمالین. (A) همبندی گرانیت-پگماتیت با آمفیبول شیست‌های تورمالین‌دار (At); (B) همبندی گرانیت-پگماتیت با میکاشیست‌های تورمالین‌دار (Mt); (C) تورمالین درون گرانیت-پگماتیت اوچستان (Gt); (D) تصویری از چگونگی ارتباط میان مرمرهای تورمالین‌دار (Ct) با میکاشیست‌های اطراف آن در شمال‌خاوری اسفاجرد (Tour: تورمالین).

Figure 3. Different outcrops of tourmaline formation. **A)** Contact between granite-pegmatite and tourmaline-bearing amphibole-schists (At); **B)** Contact between granite-pegmatite (Mt) and tourmaline-bearing micaschists; **C)** Tourmaline in the Ochestan granite-pegmatite (Gt); **D)** An image illustrating how tourmaline-bearing marbles (Ct) are connected with the surrounding micaschists in the northeast of Esfajard (Tour: Tourmaline).

مرطوب و شکسته شدن مسکوویت و فلدسپار رخ داده است که این فرایند به دنبال دگرریختی، برخاست مجموعه و عملکرد نیروهای کششی در پهنه برشی (فاز لارامید) روی داده است (Mirlohi, 2015).

در شمال گلپایگان، سنگ‌های دگرگونی کربناته به سه شکل مرمر، کالک‌سیلیکات و اسکارن گزارش شده‌اند (Izadi, 2011; Eslami, 2011). مرمر در منطقه شمال‌خاوری اسفاجرد در نزدیکی میکاشیست‌ها رخنمون

در این پژوهش، تورمالین‌های بررسی شده در منطقه اوچستان، در سنگ‌های گرانیتوئید، میکاشیست و آمفیبول شیست و در منطقه شمال اسفاجرد در سنگ مرمر دیده می‌شوند.

در منطقه اوچستان، گرانیتوئید تورمالین‌دار در گرانیت-پگماتیت‌هایی با ماهیت پرآلومینوس، کالک‌آلکان و از نوع S یافت می‌شود که در پی ذوب‌بخشی متاپلیت‌ها پدید آمده‌اند (Mirlohi, 2015). پیدایش مذاب پگماتیتی در پی ذوب

جدول ۱. داده‌های ریزکاو الکترونی تورمالین درون گرانیت- پگماتیت اوچستان (Gt)، به‌همراه فرمول ساختاری به‌دست‌آمده برپایه ۲۴/۵ اکسیژن.

Table 1. Electron microprobe data of tourmaline in the Ochestan granite-pegmatite (Gt), and the calculated structural formula based on 24.5 oxygen.

Point No.	7t1	7t2	10t1	10t2	10t3
SiO ₂	35.47	36.1	35.17	35.31	34.91
Al ₂ O ₃	29.88	30.29	33.45	33.05	30.83
FeO	18.05	17.4	13.51	13.76	13.97
MgO	0.99	1.08	0.87	0.88	0.87
CaO	0.2	0.21	0.35	0.37	0.33
Na ₂ O	2.15	1.95	1.68	1.71	1.74
TiO ₂	0.57	0.56	0.84	0.8	0.78
K ₂ O	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0
MnO	0.55	0.51	0.99	0.76	0.79
ZnO	0	0	0	0	0
Total	87.89	88.14	86.88	86.67	84.24
Si	6.04	6.08	5.89	5.93	6.06
Al	5.99	6.02	6.61	6.55	6.31
Fe	2.57	2.45	1.89	1.93	2.03
Mg	0.25	0.27	0.22	0.22	0.22
Ca	0.04	0.04	0.06	0.07	0.06
Na	0.71	0.64	0.54	0.56	0.58
Ti	0.07	0.07	0.11	0.10	0.10
K	0.006	0.009	0.004	0.006	0.004
Cr	0	0	0	0	0
Mn	0.08	0.07	0.14	0.11	0.12
Zn	0	0	0	0	0
Al- T	0	0	0.11	0.07	0
Al- Z	6	6	6	6	6
Al- Y	0	0.02	0.50	0.48	0.30
Y	3	2.92	2.92	2.91	2.84
Li	0	0.07	0.08	0.09	0.16
X	0.72	0.65	0.55	0.56	0.59
X _{vac}	0.28	0.35	0.45	0.44	0.41
Fe#	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94
Name	Schorl	Schorl	Schorl	Schorl	Schorl

دارد. در حقیقت، این میکاشیست‌ها بیوتیت مسکوویت گارنت شیست هستند. در فاصله دورتر از مرم‌های بررسی شده، توده آلکالی‌سینیت رخمون دارد که نفوذ آن در منطقه شمال اسفاجرد پیدایش هورنفلس و شیست‌های لکه‌دار را به‌دنبال داشته است.

روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های صحرائی و تهیه مقاطع نازک، بررسی سنگ‌نگاری به کمک میکروسکوپ پلاریزان الیمپوس مدل BH-2 برای شناخت بافت، کانی‌شناسی انجام شد و نمونه‌های مناسب برای انجام تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها برگزیده شدند.

ترکیب شیمیایی تورمالین‌ها در گرانیت- پگماتیت اوچستان و سنگ‌های دگرگونی اطراف گرانیت- پگماتیت، در دانشگاه گرانا در کشور اسپانیا و با دستگاه تجزیه ریزکاو الکترونی مدل Cameca Sx-50 اندازه‌گیری شد. در هنگام انجام این تجزیه نقطه‌ای، ولتاژ شتاب‌دهنده دستگاه ۲۰ کیلوولت و شدت جریان ۲۰ nA بوده است. ترکیب شیمیایی تورمالین‌ها و بیوتیت‌ها در دیگر سنگ‌ها در دانشگاه دولتی مسکو در کشور روسیه و با دستگاه تجزیه ریزکاو الکترونی مدل JEOL JXA-8800 اندازه‌گیری شد. در هنگام انجام این تجزیه نقطه‌ای، ولتاژ شتاب‌دهنده دستگاه ۲۰ کیلوولت و شدت جریان ۱۲ nA بوده است. داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها در جدول‌های ۱ تا ۵ آورده شده‌اند.

از آنجایی که تجزیه ریزکاو الکترونی، توانایی تجزیه برخی عنصرهای مهم در تورمالین مانند بور و لیتیم را ندارد، برای به‌دست‌آوردن فراوانی این عنصرها در فرمول ساختاری تورمالین‌ها روش‌های استوکیومتری به‌کار برده شد. در این پژوهش مقدار عنصر بور در فرمول ساختاری تورمالین به‌صورت $B=3$ در نظر گرفته شد (Hawthorne, 1996) و مقدار عنصر لیتیم نیز به کمک رابطه $Li=3-\sum Y$ برآورد شد (Henry and Dutrow, 1996).

نام اختصاری کانی‌ها بر گرفته از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) است.

جدول ۳. داده‌های ریزکاو الکترونی تورمالین در میکاشیست‌های اطراف گرانیت-پگماتیت اوچستان (Mt)، به همراه فرمول ساختاری به دست آمده بر پایه ۲۴/۵ اکسیژن.

Table 3. Electron microprobe data of tourmaline in the mica-schists around Ochestan granite-pegmatite (Mt) and the structural formula calculated based on 24.5 oxygen.

Point No.	P2	P4	P5	P7	P8	P9
SiO ₂	35.8	35.62	35.57	35.22	35.57	35
Al ₂ O ₃	28.71	27.51	27.82	27.03	27.16	26.45
FeO	10.97	11.34	11.02	11.86	11.04	12.21
MgO	6.68	7.31	7.22	7.31	7.28	7.43
CaO	1.04	1.22	1.39	1.44	1.39	1.83
Na ₂ O	2.14	2.2	2.12	2.07	2.11	1.9
TiO ₂	0.73	0.83	0.89	0.82	1.33	1.15
K ₂ O	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08
Cr ₂ O ₃	0.04	0.01	0.04	0	0.01	0.03
MnO	0.16	0.17	0.21	0.17	0.16	0.18
ZnO	0	0.05	0.02	0.01	0.03	0.04
Total	86.33	86.33	86.37	86	86.16	86.3
Si	6.01	6.01	5.99	5.99	6.01	5.96
Al	5.68	5.47	5.52	5.42	5.41	5.31
Fe	1.54	1.60	1.55	1.69	1.56	1.74
Mg	1.67	1.84	1.81	1.85	1.83	1.89
Ca	0.19	0.22	0.25	0.26	0.25	0.33
Na	0.69	0.72	0.69	0.68	0.69	0.63
Ti	0.09	0.10	0.11	0.10	0.17	0.15
K	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Cr	0.005	0.001	0.005	0	0.001	0.004
Mn	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
Zn	0	0.006	0.002	0.001	0.004	0.005
Al-T	0	0	0.009	0.007	0	0.04
Al-Z	5.68	5.47	5.51	5.41	5.41	5.27
Al-Y	0	0	0	0	0	0
Y	3	3	3	3	3	3
Li	0	0	0	0	0	0
X	0.88	0.98	0.95	1	0.94	1
X _{vac}	0.12	0.02	0.04	0	0.06	0
Fe#	0.62	0.61	0.60	0.62	0.60	0.62
Name	Dravite	Dravite	Dravite	Dravite	Dravite	Dravite

جدول ۲. داده‌های ریزکاو الکترونی تورمالین در آمفیبول-شیست‌های اطراف گرانیت-پگماتیت اوچستان (At)، به همراه فرمول ساختاری به دست آمده بر پایه ۲۴/۵ اکسیژن.

Table 2. Electron microprobe data of tourmaline in the amphibole-schists around Ochestan granite-pegmatite (At) and the structural formula calculated based on 24.5 oxygen.

Point No.	P12	P13	P14	P15	P16	P17
SiO ₂	35.36	35.59	35.64	35.57	35.66	35.49
Al ₂ O ₃	28.07	28.24	28.48	28.41	28.47	28.49
FeO	11.63	11.34	11.36	11.57	11.46	11.56
MgO	6.47	6.67	6.52	6.39	6.45	6.29
CaO	0.86	0.84	0.79	0.85	0.81	0.83
Na ₂ O	2.3	2.31	2.35	2.33	2.3	2.3
TiO ₂	1.1	1	1	1.02	0.96	0.99
K ₂ O	0.07	0.08	0.06	0.07	0.07	0.07
Cr ₂ O ₃	0.03	0.2	0.01	0.04	0.04	0.01
MnO	0.26	0.16	0.27	0.26	0.21	0.17
ZnO	0	0	0.07	0.04	0	0.01
Total	86.15	86.43	86.55	86.55	86.43	86.21
Si	5.98	5.98	5.98	5.98	5.99	5.99
Al	5.59	5.59	5.63	5.63	5.64	5.66
Fe	1.64	1.59	1.59	1.63	1.61	1.63
Mg	1.63	1.67	1.63	1.60	1.62	1.58
Ca	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15
Na	0.75	0.75	0.76	0.76	0.75	0.75
Ti	0.14	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12
K	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr	0.004	0.03	0.03	0.005	0.005	0.001
Mn	0.04	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02
Zn	0	0	0.008	0.005	0	0.001
Al-T	0.02	0.02	0.02	0.01	0.002	0.01
Al-Z	5.58	5.57	5.61	5.62	5.64	5.65
Al-Y	0	0	0	0	0	0
Y	3	3	3	3	3	3
Li	0	0	0	0	0	0
X	0.92	0.93	0.91	0.92	0.91	0.91
X _{vac}	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09
Fe#	0.64	0.63	0.63	0.64	0.64	0.65
Name	Schorl	Dravite	Dravite	Schorl	Dravite	Schorl

جدول ۵. داده‌های ریزکاو الکترونی بیوتیت در مرم‌های تورمالین‌دار شمال اسفاجرد، به‌همراه فرمول ساختاری به دست آمده بر پایه ۲۲ اکسیژن.

Table 5. Electron microprobe data of biotite in tourmaline-bearing marbles of North Esfajard and the obtained structural formula based on 22 oxygen.

Point No.	Btd1	Btd2	Btd3	Btd4	Btd5
SiO ₂	37.79	37.68	37.74	37.47	37.74
Al ₂ O ₃	18.39	18.69	18.52	18.46	18.92
FeO	15.03	14.56	14.62	14.81	14.92
MgO	13.76	13.69	13.69	13.53	13.28
CaO	0.1	0.12	0.09	0.14	0.18
K ₂ O	9.95	9.83	9.99	9.81	9.9
Na ₂ O	0.1	0.1	0.11	0.08	0.09
TiO ₂	1.59	1.42	1.33	1.64	1.48
MnO	0	0	0	0.09	0.12
ZnO	0.14	0	0.13	0.14	0.08
Total	97.05	96.08	96.22	96.17	96.71
Si	6.04	6.04	6.57	6.02	6.03
Al	3.46	3.53	3.50	3.50	3.56
Fe	2.008	1.95	1.96	1.99	1.99
Mg	3.28	3.27	3.27	3.24	3.16
Ca	0.017	0.02	0.01	0.02	0.03
K	2.03	2.01	2.04	2.01	2.02
Na	0.31	0.03	0.03	0.02	0.03
Ti	0.19	0.17	0.16	0.20	0.17
Mn	0	0	0	0.01	0.02
Zn	0.02	0	0.15	0.02	0.01

کانی‌های تورمالین، کوارتز، فلدسپار، بیوتیت و مسکوویت در این سنگ‌هاست که بافت لپیدوبلاستیک را نیز به‌خوبی نشان می‌دهند. تورمالین‌های نوع Mt غربالی یا اسفنجی شکل هستند (شکل ۴- B) که نشان‌دهنده کمبود سیال و نبود شرایط لازم برای رشد کامل بلور است. همچنین، این ویژگی نشان‌دهنده خاستگاه گرمابی آنها است (Trumbull and Chaussidon, 1999). آمفیبول‌شایسته‌های این ناحیه متشکل از تورمالین، آلکالی‌فلدسپار، آمفیبول و کوارتز است. تورمالین‌های نوع At شکل‌دار و بدون میانبار هستند (شکل ۴- C).

جدول ۴. داده‌های ریزکاو الکترونی تورمالین در کربنات‌های دگرگون شده حاوی تورمالین در شمال‌خاوری اسفاجرد (Ct)، به‌همراه فرمول ساختاری به‌دست‌آمده بر پایه ۲۴/۵ اکسیژن.

Table 4. Electron microprobe data of tourmaline in the meta-carbonates containing tourmaline in the northeast of Esfajard (Ct) and the structural formula calculated based on 24.5 oxygen.

Point No.	T1	T2	T3	T4	T5
SiO ₂	36.76	36.28	36.43	36.52	36.41
Al ₂ O ₃	34.68	34.81	34.74	34.72	34.29
FeO	7.86	7.58	7.92	7.21	7.86
MgO	5.76	5.87	5.45	5.36	5.28
CaO	0.72	0.84	0.58	0.36	0.58
Na ₂ O	2.18	2.21	2.17	2.24	2.14
TiO ₂	0.43	0.35	0.47	0.51	0.37
Total	88.4	87.94	87.76	86.92	86.93
Si	5.87	5.82	5.85	5.89	5.90
Al	6.52	6.58	6.58	6.61	6.55
Fe	1.05	1.02	1.06	0.97	1.06
Mg	1.37	1.40	1.30	1.29	1.27
Ca	0.12	0.14	0.10	0.06	0.10
Na	0.67	0.69	0.68	0.70	0.67
Ti	0.05	0.04	0.06	0.06	0.04
Al- T	0.13	0.18	0.15	0.10	0.10
Al- Z	6	6	6	6	6
Al- Y	0.39	0.40	0.43	0.50	0.45
Y	2.86	2.86	2.86	2.83	2.84
Li	0.14	0.14	0.14	0.17	0.16
X	0.80	0.83	0.78	0.76	0.77
X _{vac}	0.20	0.17	0.22	0.24	0.23
Fe#	0.57	0.56	0.59	0.57	0.59
Name	Dravite	Dravite	Dravite	Dravite	Dravite

سنگ‌نگاری

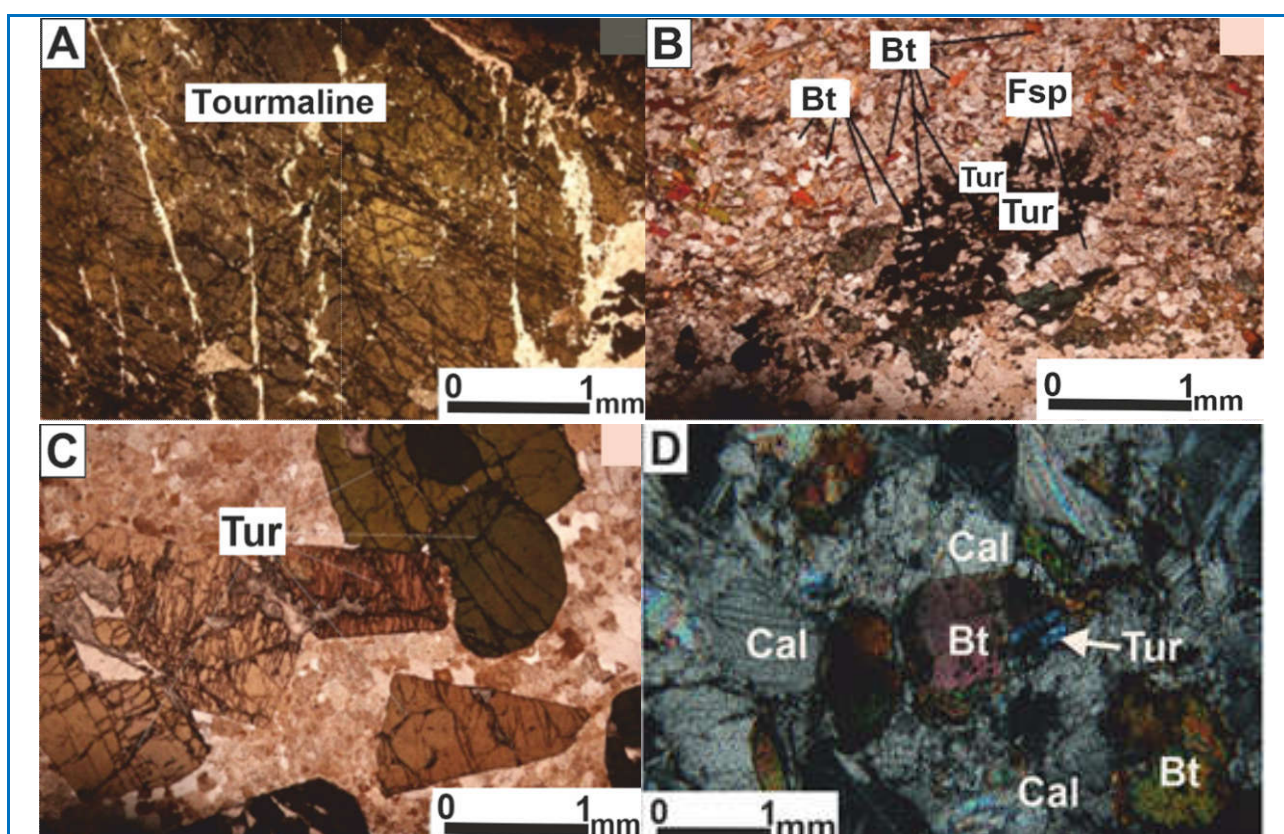
۱- تورمالین در منطقه اوچستان

تورمالین در این منطقه در سنگ‌های گرانیت-پگماتیت (Gt)، میکاشیست‌ها (Mt) و همچنین، آمفیبول‌شایسته‌ها (At) دیده می‌شود. در بررسی‌های میکروسکوپی، گرانیت-پگماتیت اوچستان کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، تورمالین، بیوتیت و مسکوویت دارد. تورمالین‌های نوع Gt شکل‌دار، درشت‌بلور و بدون میانبار هستند (شکل ۴- A). سنگ‌نگاری میکاشیست‌های اطراف گرانیت-پگماتیت اوچستان نشان‌دهنده وجود

بیوتیت در اندازه‌های متوسط تا ریز بلور دیده می‌شود. در جاهایی که تورمالین وجود دارد، بیوتیت دچار خوردگی شده است و در برابر آن، بیوتیت‌های سالم و بدون خوردگی در جایی که تورمالین نیست، دیده می‌شوند (شکل ۴-د). در این سنگ‌ها اپیدوت و سرسیت فراوان هستند که نشان از واکنش سیال‌ها با مرمرها دارد.

۲- تورمالین در شمال‌خاوری اسفاجرد

مرمر در این ناحیه تورمالین، بیوتیت، اپیدوت، سرسیت، کلسیت و دولومیت دارد. در این سنگ‌ها، تورمالین‌ها به صورت ریز دانه و آبی رنگ هستند و در اطراف بیوتیت‌های آثار خوردگی دارند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده واکنش آنها با سیال است (شکل ۴-د).



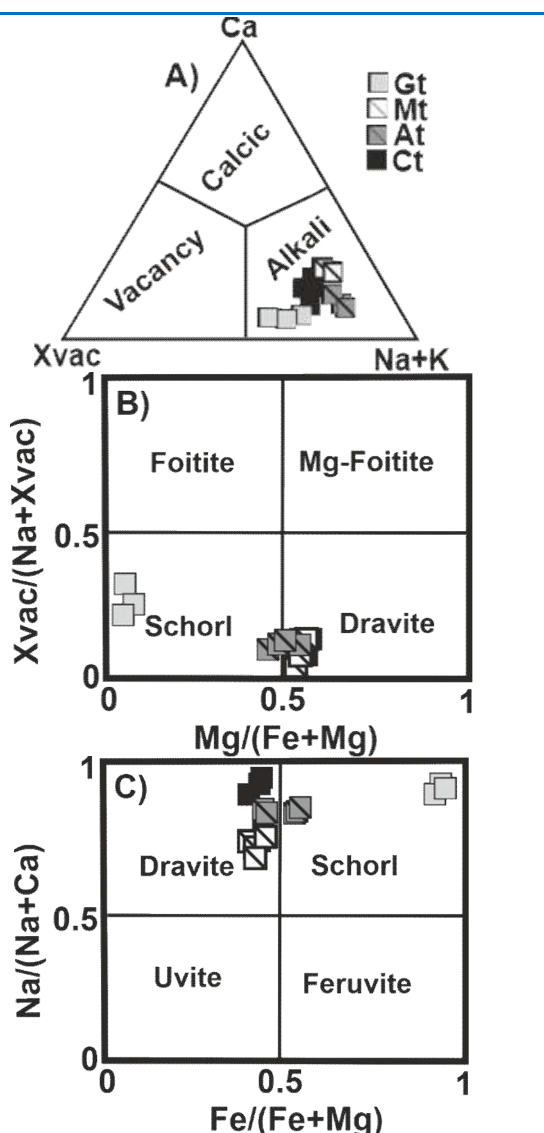
شکل ۴. تصاویرهای میکروسکوپی از نمونه‌های بررسی شده. (A) تصویری (در PPL) از نمونه‌های تورمالین در گرانیت-پگماتیت؛ (B) تورمالین‌های اسفنجی درون میکاشیست (Mt) (در XPL)؛ (C) تورمالین‌های شکل‌دار در آمفیبول‌شیست (At) (در PPL)؛ (D) وجود تورمالین (Ct) در اطراف بیوتیت درون مرمرهای شمال‌خاوری اسفاجرد (در XPL).

Figure 4. Microscopic imagery of studied samples. **A)** A tourmaline sample in granite-pegmatite (in PPL); **B)** Spongy tourmalines in mica-schist (Mt) (in XPL); **C)** Idiomorphic tourmalines in amphibole-schist (At) (in PPL); **D)** Presence of tourmaline (Ct) around biotite in the northeast marbles of Sfajard (in XPL).

نشان‌دهنده جانشین شدن Al در جایگاه $Y (R_2)$ است (London and Manning, 1995). تورمالین‌های نوع Gt به علت بالابودن میزان Al و جانشین شدن Al در جایگاه Y، بیشتر در اطراف خط نقص قلیایی جای می‌گیرند (شکل ۶-ع) و به علت بالابودن میزان Fe نسبت به Mg، نوع

شیمی تورمالین

منطقه اوچستان: تورمالین‌های درون گرانیت-پگماتیت اوچستان (Gt) از نوع آلکالی‌تورمالین با ترکیب شورل است (شکل ۵) که از آلومینیم غنی است (شکل ۶-ا). این تورمالین‌ها در زیر خط $\sum(Fe+Mg) = 3$ جای گرفته‌اند (شکل ۶-ب) که



شکل ۵. ترکیب شیمیایی تورمالین‌ها در منطقه مورد بررسی. (A) نمودار سه‌تایی X_{vac} -Ca-Na+K (Hawthorne and Henry, 1999) زیرگروه تورمالین‌ها بر پایه قرارگیری در جایگاه X؛ (B) نمودار $Mg/(Fe+Mg)$ در برابر $X_{vac}/(Na+X_{vac})$ (Hawthorne and Henry, 1999) زیرگروه تورمالین بر پایه جایگاه X و Y؛ (C) نمودار $Na/(Na+Ca)$ در برابر $Fe/(Fe+Mg)$ (Hawthorne and Henry, 1999) زیرگروه تورمالین بر پایه جایگاه X و Y. تورمالین در گرانیت (Gt)، تورمالین در میکاشیست (Mt)، تورمالین در آمفیبول‌شیست (At)، تورمالین در کربنات‌های دگرگون‌شده (Ct).

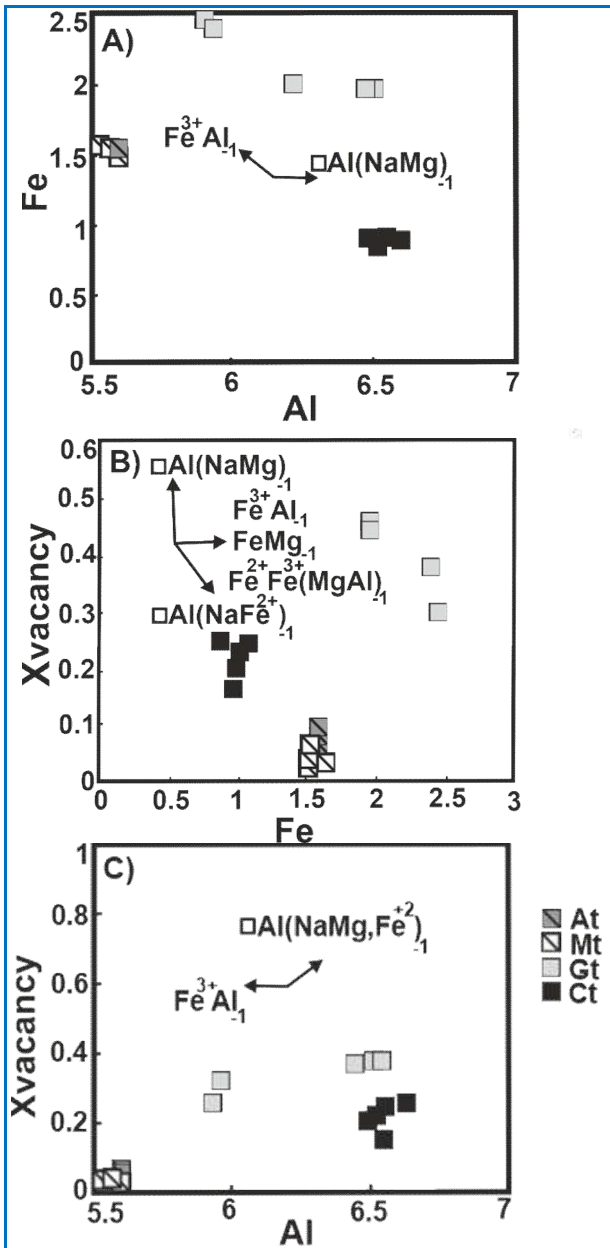
Figure 5. Chemical composition of tourmalines in the studied area. A) X_{vac} -Ca-Na+K ternary diagram (Hawthorne and Henry, 1999). Tourmaline subsets based on placement in X position; B) $Mg/(Fe+Mg)$ versus $X_{vac}/(Na+X_{vac})$ diagram (Hawthorne and Henry, 1999). Tourmaline subset based on X and Y positions; C) $Na/(Na+Ca)$ versus $Fe/(Fe+Mg)$ plot (Hawthorne and Henry, 1999). Tourmaline subset based on X and Y positions. Tourmaline in the granite (Gt), tourmaline in the micaschist (Mt), tourmaline in the amphibole-schist (At), tourmaline in the meta-carbonates (Ct).

جانشینی آنها $Al(NaFe^{+2})$ است (شکل ۷).

تورمالین‌های درون آمفیبول‌شیست (At) از نوع آلکالی تورمالین با ترکیب شورل- دراویت و تورمالین‌های درون میکاشیست (Mt) از نوع آلکالی تورمالین با ترکیب دراویت هستند (شکل ۵) که هر دو نوع تورمالین آلومینیم کمی دارند (شکل ۶- A) و در بالای خط $\sum(Fe+Mg)=3$ جای می‌گیرند (شکل ۶- B). این ویژگی نشان‌دهنده نبود جانشینی Al در جایگاه Y (R_2) است (London and Manning, 1995). تورمالین‌های نوع At و Mt در خارج از خط‌های نقص پروتونی و نقص قلیایی جای می‌گیرند (شکل ۶- C). تورمالین‌های نوع At به‌علت تغییر در میزان Mg و هم از نوع جانشینی $Al(NaFe^{+2})$ و هم از نوع جانشینی $Al(NaMg)$ بهره‌مند هستند. در برابر آنها، تورمالین‌های نوع Mt به‌علت بالابودن میزان Mg نسبت به Fe، جانشینی آنها بیشتر از نوع $Al(NaMg)$ است. البته جانشینی $Fe^{+3}Al$ در هر دو نوع تورمالین دیده می‌شود (شکل ۷).

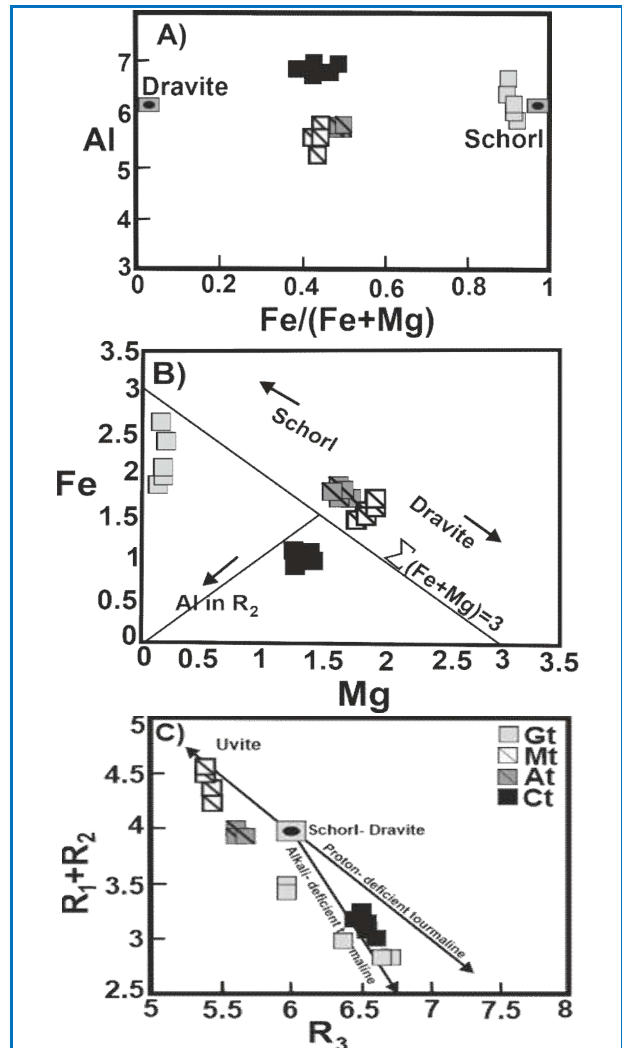
منطقه شمال خاوری اسفاجرد: در این ناحیه

تورمالین‌ها در سنگ مرمر (Ct) جای دارند و ترکیب آنها آلکالی و از نوع دراویت (شکل ۵) و غنی از آلومینیم است (شکل ۶- A) که در زیر خط $\sum(Fe+Mg)=3$ جای گرفته‌اند (شکل ۶- B) و نشان‌دهنده جانشینی Al در جایگاه Y (R_2) است (London and Manning, 1995). تورمالین نوع Ct به‌علت بالابودن میزان Al و جانشین شدن Al در جایگاه Y، میان خط‌های نقص پروتونی و نقص قلیایی جای می‌گیرند (شکل ۶- C). همچنین، به‌علت بالابودن میزان Mg نسبت به Fe، جانشینی آنها از نوع $Al(NaMg)$ است (شکل ۷).



شکل ۷. نمودارهای جانشینی تورمالین در نمونه‌های سنگی مورد بررسی. (A) نمودار Al در برابر Fe (Hazarika et al., 2015). (B) نمودار Fe در برابر Xvacancy (Hazarika et al., 2015). (C) نمودار Al در برابر Xvacancy (Hazarika et al., 2015). نماد □ در نمودارها، نشان‌دهنده فضای خالی (vacancy) در جایگاه B است. تورمالین در گرانیت (Gt)، تورمالین در میکاشیست (Mt)، تورمالین در آمفیبول‌شیست (At)، تورمالین در کربنات‌های دگرگون‌شده (Ct).

Figure 7. Diagrams for tourmaline replacement in studied rock samples. **A)** Fe versus Al plot (Hazarika et al., 2015); **B)** Fe versus Xvacancy plot (Hazarika et al., 2015); **C)** Al versus Xvacancy plot (Hazarika et al., 2015). The symbol □ in the diagrams indicates vacancy in position B. Tourmaline in the granite (Gt), tourmaline in the micaschist (Mt), tourmaline in the amphibole-schist (At), tourmaline in the meta-carbonates (Ct).



شکل ۶. نمودار نسبت Fe/(Fe+Mg) در برابر Al (Trumbull and Chaussidon, 1999) و مقایسه ترکیب تورمالین‌های منطقه گلپایگان با ترکیب ایده‌آل شورل-دراویت؛ (B) نمودار Mg در برابر Fe برای نمونه‌های تورمالین (London and Manning, 1995); (C) نمودار R₃ در برابر R₁+R₂ برای نمایش ساز و کارهای جانشینی معمول در تورمالین (Trumbull and Chaussidon, 1999). R₁=Ca+Na, R₂=Fe+Mg+Mn و R₃=total Al+1.33Ti. تورمالین در گرانیت (Gt)، تورمالین در میکاشیست (Mt)، تورمالین در آمفیبول‌شیست (At)، تورمالین در کربنات‌های دگرگون‌شده (Ct).

Figure 6. **A)** Fe/(Fe+Mg) ratio versus Al diagram (Trumbull and Chaussidon, 1999) and comparison of tourmaline compositions in the Golpayegan region with ideal schorl-dravite composition; **B)** Mg versus Fe diagram for tourmaline samples (London and Manning, 1995); **C)** R₃ versus R₁+R₂ diagram illustrating usual replacement mechanisms in the tourmaline (Trumbull and Chaussidon, 1999). R₁= Ca+Na, R₂= Fe+Mg+Mn and R₃= total Al+1.33Ti. Tourmaline in the granite (Gt), tourmaline in the micaschist (Mt), tourmaline in the amphibole-schist (At), tourmaline in the meta-carbonates (Ct).

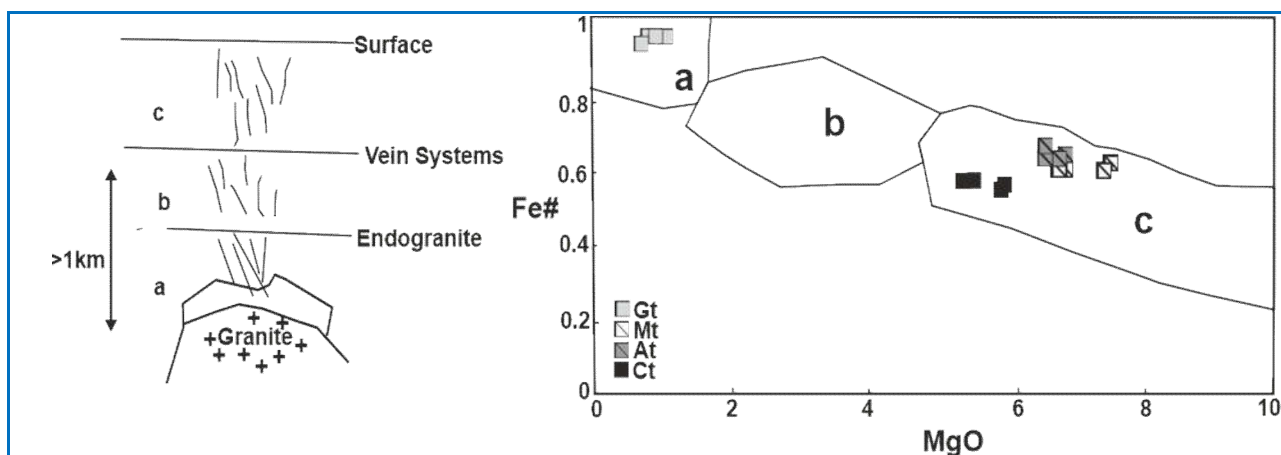
بحث

۱- منطقه اوچستان

ترکیب تورمالین در Gt از نوع شورل ($Fe/Fe+Mg$) = ۰/۸۹/۹۱-۰/۰) (شکل های ۵-B و ۵-C) هستند و در جایگاه Y جانشینی آلومینیم دارند (شکل ۶-B؛ جدول ۱). ترکیب تورمالین در نوع Mt از نوع دراویت ($Fe/Fe+Mg$) = ۰/۴۷-۰/۴۵) (شکل های ۵-B و ۵-C) و ترکیب تورمالین در نوع At از نوع شورل- دراویت ($Fe/Fe+Mg$) = ۰/۵۱-۰/۴۹) (شکل های ۵-B و ۵-C) است که در هر دو نوع تورمالین درون شیست‌ها، جانشینی آلومینیم در جایگاه Y روی نمی‌دهد (جدول های ۲ و ۳). در نتیجه تورمالین‌های گرمایی آلومینیم کمتر (یعنی تورمالین‌های نوع At و Mt) و تورمالین‌های درون توده گرانیتی - پگماتیسی آلومینیم بیشتری (یعنی تورمالین نوع Gt) دارند (Trumbull and Chaussidon, 1999). در شکل ۶-C، شماری از نمونه‌های تورمالینی درون گرانیت- پگماتیت (Gt) میان دو خط نقص پروتونی و نقص قلیایی جای می‌گیرند که نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی آنهاست. نمونه‌های تورمالینی درون شیست‌های اطراف گرانیت- پگماتیت (Mt و At)، بیرون از دو خط نقص پروتونی و نقص قلیایی و به سمت جانشینی اوویت جای می‌گیرند که

نشان‌دهنده خاستگاه گرمایی آنهاست. به باور لندن و میننگ (London and Manning, 1995)، تورمالین‌های گرمایی در مقایسه با تورمالین‌های ماگمایی، کاستی کمتری در جایگاه X دارند. برپایه داده‌های جدول های ۱، ۲ و ۳، کاستی در جایگاه X در تورمالین‌های نوع At و نوع Mt نزدیک به ۰/۰۲-۰/۱۲ و در تورمالین‌های نوع Gt نزدیک به ۰/۴۵-۰/۲۸ است.

برپایه مقدار $Fe\#$ ($FeO/FeO+MgO$) می‌توان جایگاه پیدایش تورمالین‌ها را شناسایی کرد. چنانچه مقدار $Fe\#$ در تورمالین از ۰/۸ بیشتر باشد نشان‌دهنده بسته‌بودن سیستم ماگمایی، نبود دخالت شاره‌ها و آرایش آنها با تنش‌های غنی از Al است؛ اما چنانچه این نسبت از ۰/۶ کمتر باشد گویای دگرنهادی بور با تنش‌های غنی از Al و برخاستن بور از خاستگاهی خارجی است (Pirajno and Smithies, 1992). در شکل ۸، تورمالین‌های درون گرانیت- پگماتیت (Gt) ($Fe\#$ =۰/۹۳-۰/۹۴) در بخش a جای می‌گیرند که نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی آنهاست؛ اما تورمالین‌های At ($Fe\#$ =۰/۶۲-۰/۶۴) و تورمالین‌های Mt ($Fe\#$ =۰/۶۲-۰/۶۴) در بخش c یعنی دور از توده ماگمایی هستند که به خاستگاه گرمایی آنها اشاره دارد.



شکل ۸. نمودار MgO در برابر $Fe\#$ (Pirajno and Smithies, 1992) و جایگاه تورمالین در منطقه بررسی شده. تورمالین‌های Gt در بخش a و هر دو دسته تورمالین‌های شیست‌ها (Mt و At) و تورمالین‌های درون مرمرها (Ct) در بخش c جای گرفته‌اند. تورمالین در گرانیت (Gt)، تورمالین در میکاشیست (Mt)، تورمالین در آمفیبول شیست (At)، تورمالین در کربنات‌های دگرگون شده (Ct).

Figure 8. MgO versus $Fe\#$ plot (Pirajno and Smithies, 1992) and location of tourmalines in the study area. Gt tourmalines fall in part a and both types of tourmalines of schists (Mt and At) and tourmalines inside marbles (Ct) fall in part c. Tourmaline in the granite (Gt), tourmaline in the micaschist (Mt), tourmaline in the amphibole-schist (At), tourmaline in the meta-carbonates (Ct).

میزبان باشد (Henry and Dutrow, 2012).

نسبت $FeO/(FeO+MgO)$ در تورمالین‌های Ct از ۰/۶ (۰/۵۶ - ۰/۵۹) کمتر است که حمل بور با رسوب‌های سرشار از آلومینیم و بور از خاستگاهی خارجی را نشان می‌دهد (Pirajno and smithies, 1992). ایلیت و مسکوویت در متاپلیت‌ها، بیشترین میزان بور را در خود دارند (Sperlich et al., 1996). بر همین پایه، دگرگونی پیش‌رونده تحرک بیشتر بور درون کانی مسکوویت و خروج سیال‌های حاصل از شکسته‌شدن فاز آبدار به بیرون از سنگ را به دنبال دارد (Bast et al., 2014). تورمالین‌های نوع Ct درون مرمر دیده شده‌اند و میکاشیست‌ها در اطراف آنها جای دارند (شکل ۳-۳ D). سنگ‌های میکاشیست اطراف مرمرهای شمال‌خاوری اسفاجرد (Ct) در واقع گارنت، استارولیت میکاشیست هستند که گارنت، مسکوویت، بیوتیت، کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و استارولیت دارند. این سنگ‌ها دچار چهار فاز دگرگونی و سه فاز دگرریختی شده‌اند (Karimi et al., 2012). از این رو، می‌توان گفت در پی دگرگونی پیش‌رونده، بور خارج‌شده از مسکوویت درون میکاشیست‌ها وارد سیال شده است و نفوذ این سیال‌ها در مرمرهای اطراف، در پیدایش تورمالین مؤثر بوده است. نفوذ سینیت‌های شمال اسفاجرد، رخداد دگرگونی همبری در سنگ‌های اطراف را به دنبال داشته است (Sharifi, 1997). پس سیال‌های تأخیری حاصل از ماگمای سینیتی که در فاصله دورتر از مرمرها هستند (شکل‌های ۲ و ۸)، در پیدایش تورمالین‌های نوع Ct مؤثر بوده‌اند. از این رو، می‌توان گفت سیال‌های تأخیری- گرمایی حاصل از ماگمای سینیتی شمال اسفاجرد به همراه سیال‌های حاصل از دگرگونی پیش‌رونده در میکاشیست‌ها، سبب پیدایش تورمالین در مرمرهای شمال‌خاوری اسفاجرد شده‌اند.

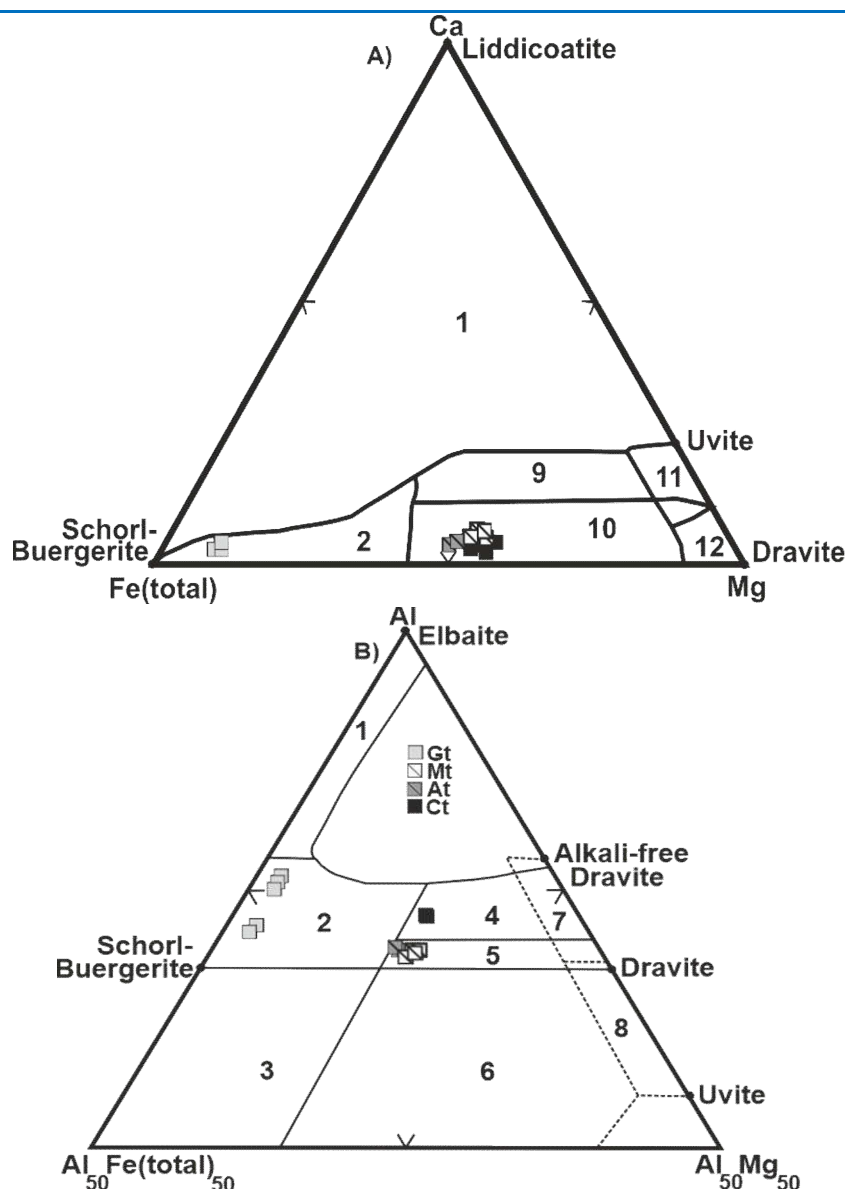
برپایه شکل ۹، نمونه‌های تورمالین Gt در محدوده گرانیتوئیدهای فقیر از لیتیم و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های مرتبط با آنها و نمونه‌های تورمالین At و Mt در محدوده سنگ‌های کوارتز- تورمالین و متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های تهی از Ca و ناهمزیست با یک فاز اشباع از Al جای می‌گیرند.

۲- منطقه شمال‌خاوری اسفاجرد:

تورمالین‌های درون مرمرهای شمال اسفاجرد (Ct) از نوع دراویت با نسبت $Fe/Fe+Mg$ برابر با ۰/۴۲-۰/۴۵ (شکل‌های ۵-B و ۵-C)، میزان آلومینیم بالا و جانشینی آلومینیم در جایگاه Y هستند (شکل ۶-B؛ جدول ۴).

جانشینی آلومینیم در جایگاه Y به همراه جانشینی $Al(NaMg)$ نشان‌دهنده خاستگاه غیرماگمایی آنهاست (Henry and Dutrow, 1990). همچنین، جانشینی $Al(NaMg)$ از جانشینی‌های مهم در دگرگونی‌هاست (Krmíček et al., 2020). در تورمالین‌های نوع Ct هم جانشینی آلومینیم در جایگاه Y (شکل ۶-B؛ جدول ۴) و هم جانشینی $Al(NaMg)$ (شکل ۷) دیده می‌شود که نشان از خاستگاه غیرماگمایی این نوع تورمالین‌ها دارد. جانشینی $Al(NaMg)$ ۱ (مانند تورمالین‌های نوع Ct) نشان‌دهنده نسبت کم Fe^{+3}/Fe^{+2} است (Hazarika et al., 2016).

برپایه شکل ۹-B، تورمالین نوع Ct در محدوده متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های همزیست با یک فاز اشباع از Al جای می‌گیرند. به باور ون‌هینسبرگ و همکاران (Van Hinsberg et al., 2011)، تورمالین در کربنات‌ها از سیال‌ها یا از مذاب‌هایی که با این سنگ‌ها واکنش داده‌اند پدید می‌آیند. یکی از نیازهای بنیادی برای پیدایش تورمالین دسترسی به عنصر بور است که امکان رشد تورمالین در سنگ‌ها را فراهم می‌کند. خاستگاه بور می‌تواند از بیرون از سنگ میزبان یا درون سنگ



شکل ۹. ترکیب شیمیایی تورمالین. **(A)** نمودار سه تایی Ca-Fe-Mg (Henry and Guidotti, 1985). **(B)** نمودار سه تایی Al-Fe-Mg (Henry and Guidotti, 1985). تورمالین در گرانیت (Gt)، تورمالین در میکاشیست (Mt)، تورمالین در آمفیبول شیست (At)، تورمالین در کربنات‌های دگرگون‌شده (Ct) (۱: گرانیتوئیدهای غنی از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های مرتبط با آنها؛ ۲: گرانیتوئیدهای فقیر از Li و پگماتیت‌ها و آپلیت‌های مرتبط با آنها؛ ۳: سنگ‌های کوارتز-تورمالین سرشار از Fe^{+3} ؛ ۴: متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های همزیست با فازهای اشباع از آلومینیم؛ ۵: متاپلیت‌ها و متاپسامیت‌های ناهمزیست با فازهای اشباع از آلومینیم؛ ۶: سنگ‌های کالک‌سیلیکاته، متاپلیت‌ها و سنگ‌های کوارتز-تورمالین سرشار از Fe^{+3} ؛ ۷: الترامافیک‌های دگرگون‌شده با کلسیم کم و تهنشست‌های دگرگون‌شده سرشار از وانادیم و کروم؛ ۸: متاکربنات‌ها و متاپیروکسنیت‌ها؛ ۹: سنگ‌های کالک‌سیلیکاته و متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های غنی از کلسیم؛ ۱۰: سنگ‌های کوارتز-تورمالین و متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از کلسیم؛ ۱۱: متاکربنات‌ها؛ ۱۲: متالترامافیک‌ها).

Figure 9. Chemical composition of tourmaline. **A)** Ternary diagram of Ca-Fe-Mg (Henry and Guidotti, 1985); **B)** Al - Fe - Mg ternary diagram (Henry and Guidotti, 1985). Tourmaline in the granite (Gt), tourmaline in the micaschist (Mt), tourmaline in the amphibole-schist (At), tourmaline in the meta-carbonates (Ct) (1: Li- rich granitoids and related pegmatites and aplites; 2: Li- poor granitoids and related pegmatites and aplites; 3: Quartz- tourmaline rocks rich in Fe^{+3} ; 4: Metapelites and metapsamites coexisting with aluminum-saturated phase; 5: Metapelites and metapsamites not coexisting with aluminum saturated phase; 6: Calc- silicate rocks, metapelites, and quartz- tourmaline rocks rich in Fe^{+3} ; 7: Metamorphosed ultramafics with low calcium and metamorphosed sediments rich in vanadium and chromium; 8: Meta- carbonates and meta- pyroxenites; 9: Calc- silicate rocks and calcium-rich metapsamites and metaplites; 10: Quartz-tourmaline rocks and metapsamites and metaplites poor in calcium; 11: Metacarbonatites; 12: Metaultramafics).

دما برپایه مقدار تیتانیوم در کانی بیوتیت برپایه فرمول

زیر به دست می‌آید:

$$T = \{[\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3]/b\}^{0.333} \text{ (Henry et al., 2005)}$$

در فرمول بالا مقدار a برابر با $۲/۳۵۹۴$ ، مقدار b برابر با $۱۰^{-۹} \times ۴/۶۴۸۲$ و مقدار c برابر با $۱/۷۲۸$ است. کاربرد این دماسنج برای مقادیرهای $۰/۰۴ - ۰/۶$ ، $T(°C) = ۴۸۰ - ۸۰۰$ و $X_{Mg} = ۰/۲۷۵ - ۱/۰$ معتبر است. دماهای به دست آمده از فرمول یادشده برای بیوتیت‌های درون مرمه‌های شمال اسفاجرد، در جدول ۶ آورده شده‌اند.

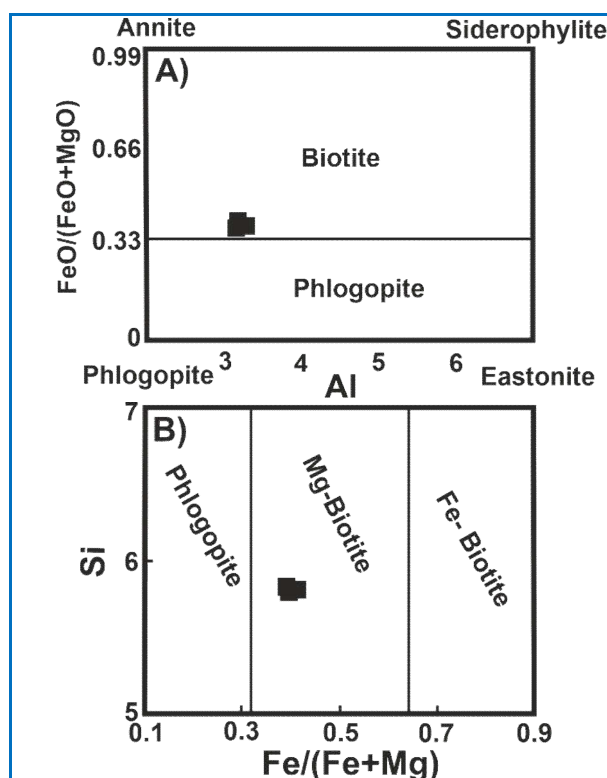
جدول ۶. دماهای به دست آمده از دماسنجی برپایه تیتانیوم بیوتیت‌های (Henry et al., 2005) درون مرمه‌های شمال خاوری اسفاجرد و دماسنجی برپایه تبادل آهن و منیزیم میان تورمالین و بیوتیت در مرمه‌ها (Colopietro and Friberg, 1987). K_D : ضریب توزیع.

Table 6. Thermometric results in the marbles of northeast Esfajord. Thermometry based on titanium-biotites in marbles (Henry et al., 2005) and thermometry based on exchange of Fe and Mg between tourmaline and biotite in marbles (Colopietro and Friberg, 1987). K_D is distribution coefficient.

(Henry et al., 2005)					
Ti in Biotite	0.191	0.171	0.160	0.198	0.177
T (°C)	601.05	581.60	567.33	607.97	584.04
(Colopietro and Friberg, 1987)					
K_D	0.800	0.823	0.734	0.813	0.754
T (°C)	431.13	435.67	417.92	433.74	421.98

تبادل Mg-Fe تورمالین با بیوتیت به دما وابسته نیست (van Hinsberg and Schumacher, 2009). محاسبات تعادل برای مجموعه کانی‌ها نشان می‌دهد تورمالین از نظر ترکیب در تعادل با همه فازهای هم‌زیست است؛ از این رو، برای همه این فازها می‌توان دماسنج مربوطه را تعریف کرد. روابط میان K_D در برابر T دامنه گسترده‌ای دارند که البته علت آن به تجزیه منطقه‌بندی ترکیبی یا نبود تعادل میان کانی‌ها مربوط نیست؛ بلکه برپایه بررسی‌های تجربی علت آن توزیع عنصرها در جایگاه‌های اکتاهدرالی Y و Z تورمالین است (van Hinsberg and Schumacher, 2009).

فراوانی کانی بیوتیت در اطراف تورمالین‌های نوع Ct (شکل ۴-D؛ جدول ۵)، نشان‌دهنده فراهم آمدن آهن و منیزیم مورد نیاز برای پیدایش تورمالین از بیوتیت است (Deer et al., 1992). برپایه شکل ۱۰، بیوتیت‌ها در سنگ‌های شمال خاوری اسفاجرد، از نوع بیوتیت منیزیم‌دار هستند و نسبت $FeO/(FeO+MgO)$ آنها برابر با $۰/۳۷۰ - ۰/۳۸۶$ است.



شکل ۱۰. رده‌بندی شیمیایی میکاهای بررسی شده در مرمه‌های شمال خاوری اسفاجرد. (A) نمودار Al در برابر $FeO/(FeO+MgO)$ (Nachit et al., 2005). خط جداکننده محدوده‌های فلوگوپیت و بیوتیت را دیر و همکاران (Deer et al., 1992) به نمودار افزوده‌اند. (B) نمودار $Fe/(Fe+Mg)$ در برابر Si (Foster, 1960).

Figure 10. Chemical classification of investigated micas in the marbles of northeast Esfajord. (A) Al versus $FeO/(FeO+MgO)$ plot (Nachit et al., 2005). Line separating phlogopite and biotite ranges was added by Deer et al. (1992); (B) $Fe/(Fe+Mg)$ versus Si plot (Foster, 1960).

برای بررسی تقدم و تأخر پیدایش کانی‌های بیوتیت و تورمالین در مرمه‌های شمال خاوری اسفاجرد از دماسنجی برپایه مقدار تیتانیوم در کانی بیوتیت و دماسنجی برپایه تبادل Mg-Fe بهره گرفته شد.

ماگمایی، ترکیب شورل با درصد آهن بالا نشان می‌دهند. تورمالین‌های درون همبری توده گرانیت-پگماتیت با دیواره‌هایی از جنس‌های گوناگون ریخت‌شناسی متفاوتی دارند. در همبری با میکاشیست (نوع Mt)، تورمالین‌ها ترکیب دراویتی دارند و بافت اسفنجی نشان می‌دهند؛ اما در همبری با آمفیبول‌شیست (نوع At)، تورمالین‌ها شورل-دراویت شکل‌دار و بدون میانبره‌های فراوان هستند. شواهد زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده خاستگاه گرمایی برای هر دو دسته تورمالین درون شیست‌ها هستند. این خاستگاه نسبتاً مشترک نشان می‌دهد تفاوت ریختی تورمالین‌ها بیشتر بازتابی از شرایط فیزیکی محیط است. نبود سیال مورد نیاز و زمان کوتاه پیدایش تورمالین‌های غربالی (اسفنجی) را در همبری با میکاشیست (نوع Mt) پدید آورده است. از سوی دیگر، می‌توان گفت نفوذ رگه‌های گرانیت-پگماتیت در آمفیبول‌شیست‌ها (نوع At)، شرایط بهتری برای تبلور تورمالین فراهم آورده است و فرصت بیشتری را برای رشد کانی‌های نوظهور پدید آورده است. از این رو، از آنجایی که این نفوذ در مراحل پایانی روی داده است و سیال بیشتری نیز فراهم بوده است، این دسته از تورمالین‌ها شکل‌دار و بدون میانبره هستند. برای پیدایش تورمالین حضور عنصرهای بور، آلومینیم، آهن و منیزیم نیاز است، از این رو، بور و دیگر عنصرهای مورد نیاز برای پیدایش تورمالین‌های نوع Gt خاستگاه ماگمایی دارند. در برابر آن، خاستگاه این عنصرها در تورمالین‌های نوع At و Mt در ارتباط با واکنش‌های مربوط به فرایندهای ماگمایی گرانیتوئید اوچستان در مراحل تأخیری-گرمایی با سنگ‌های شیستی اطراف گرانیتوئید اوچستان است.

۲) تورمالین‌های منطقه شمال خاوری اسفاجرد درون مررها (نوع Ct) پدید آمده‌اند و از نوع دراویت و با آلومینیم بالا هستند. این تورمالین‌ها بر پایه جای گرفتن در محدوده سنگ‌های متاپسامیت‌ها و متاپلیت‌های فقیر از Ca و همزیست با یک فاز

در این پژوهش، دماها بر پایه تبادل Mg-Fe میان کانی‌های تورمالین و بیوتیت در مرمرهای منطقه شمال خاوری اسفاجرد از فرمول زیر به دست آورده شدند (جدول ۶):

$$\ln K_D = -3150/T (K) + 4/52 \quad (\text{Colopietro and Friberg, 1987});$$

$$K_D = (\text{Mg/Fe})_{\text{Tour}} / (\text{Mg/Fe})_{\text{Bt}}$$

در این فرمول K_D ضریب توزیع است. بر همین اساس، در مرمرهای شمال خاوری اسفاجرد، دماسنجی بر پایه مقدار تیتانیم در کانی بیوتیت، دمایی نزدیک به ۵۶۶-۶۰۷/۹ درجه سانتیگراد را به دست می‌دهد (جدول ۶). در برابر آن، بر پایه دماسنجی تبادل Mg-Fe میان کانی‌های تورمالین و بیوتیت، دمایی نزدیک به ۴۱۷-۴۳۵/۶ درجه سانتیگراد برآورد شد (جدول ۶). تفاوت در مقادیرهای به دست آمده از این دو نوع دماسنج نشان می‌دهد در مرمرها در دمای بالاتر از ۵۶۶ درجه سانتیگراد، نخست بیوتیت پدید آمده است و سپس در دمای کمتر، تورمالین از بیوتیت پدید آمده است. در مرمرهای شمال اسفاجرد، وجود کانی‌هایی مانند اپیدوت و سرسیت و وجود تورمالین در جاهایی که بیوتیت دچار خردگی شده‌اند (شکل ۴-D) نشان می‌دهد بور از خاستگاه خارجی و همراه با سیال‌های گرمایی خارجی آزاد به سنگ افزوده شده است و این موضوع با توجه به تفاوت در نتایج دو دماسنجی همخوانی دارد؛ به گونه‌ای که نخست بیوتیت در دمای بالاتر پدید آمده است و در دمای کمتر، این بیوتیت‌ها در اثر سیال‌های بوردار ناپایدار شده‌اند و آهن و منیزیم مورد نیاز برای پیدایش تورمالین‌ها را فراهم کرده‌اند.

برداشت

۱) توده گرانیت-پگماتیت اوچستان در میان شیست‌های پلیتی این ناحیه رخنمون دارند و تحت تأثیر فرایندهای ماگمایی کانی تورمالین در خود توده و همچنین، فرایندهای گرمایی در همبری آن متبلور شده است. بیشتر تورمالین‌های درون توده (نوع Gt) درشت دانه و بدون میانبره هستند و افزون‌بر خاستگاه

همچنین، تفاوت در دماهای به‌دست‌آمده از دو روش دماسنجی (دماسنجی برپایه مقدار تیتانیم در کانی بیوتیت و دماسنجی تبادل Mg-Fe میان کانی‌های تورمالین و بیوتیت) نشان می‌دهد بیوتیت به‌صورت اولیه در دمای بالاتر از ۵۶۶ درجه سانتیگراد پدید آمده است و سپس در دمایی بسیار کمتر تحت تأثیر سیال‌های بوردار ناپایدار شده است و آهن و منیزیم مورد نیاز برای پیدایش تورمالین را فراهم آورده است.

اشباع از Al، و رخداد جانشینی $\square\text{Al}(\text{NaMg})_1$ و جانشینی آلومینیم در جایگاه Y خاستگاه دگرگونی دارند. در پی دگرگونی پیشرونده، خروج سیال از سنگ‌های میکاشیستی اطراف مررها به‌همراه سیال‌های تأخیری- گرمایی حاصل از ماگمای سینیتی شمال اسفاجرد و هجوم آنها به مررها، پیدایش تورمالین در این سنگ‌ها در منطقه شمال‌خاوری اسفاجرد را به‌دنبال داشته است. وجود تورمالین همراه با بیوتیت‌هایی با خوردگی و

References

- Bast, R., Scherer, E. E., Mezger, K., Austrheim, H., Ludwig, T., Marschall, H. R., Putnis, A. and Löwen, K. (2014) Boron isotopes in tourmaline as a tracer of metasomatic processes in the Bamble sector of Southern Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 168, 1069.
- Colopietro, M. R. and Friberg, I. M. (1987) Tourmaline- biotite as a potential geothermometer for metapelites, Black Hills, South Dakota. *Abstracts with programs, Geological Society of America*, 19 (7), 624.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1992) *An introduction to the Rock-forming minerals*. 17th edition, Longman Ltd., London, UK.
- Dutrow, B. L. and Henry, D. J. (2011) Tourmaline: A geologic DVD. *Elements*, 7(5), 301–306.
- Eslami, Z. (2011) *Petrology and petrography of skarns in the Ochestan (SouthMahallat, Markazi province)*. M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Fergusson, C L., Nutman, P., Mohajjel, M. and Bennett, V. C. (2016) The Sanandaj–Sirjan Zone in the Neo- Tethyan suture, western Iran: Zircon U–Pb evidence of late Palaeozoic rifting of northern Gondwana and mid- Jurassic orogenesis. *Gondwana Research*, 40, 43- 57.
- Foster, M. D. (1960) Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *United States Geological Survey, Professional Paper*, 354-B, 11- 46.
- Hassanzadeh, J. and Wernicke, B. P. (2016) The Neotethyan Sanandaj- Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin- arc transitions. *Tectonics*, 35, 586- 621.
- Hawthorne, F. C. (1996) Structural mechanisms for light element variations in tourmaline. *The Canadian Mineralogist*, 34 (1), 123–132.
- Hawthorne, F. C. and Henry, D. J. (1999) Classification of the minerals of the tourmaline group. *European Journal of Mineralogy*, 11, 201- 215.
- Hazarika, P., Mishra, B. and Pruseth, K. L. (2015) Diverse tourmaline compositions from orogenic gold deposits in the Hutti–Maski greenstone belt, India: implications for sources of ore-forming fluids. *Econ. Society of Economic Geologists*, 110, 337–353.
- Hazarika, P., Mishra, B. and Pruseth, K. L. (2016) Scheelite, apatite, calcite and tourmaline compositions from the late Archean Hutti orogenic gold deposit: Implications for analogous two stage ore fluids. *Ore Geology Reviews*, 72, 989–1003.
- Henry, D. J. and Dutrow, B. L. (1990) Ca substitution in Li-poor aluminous tourmaline. *The Canadian Mineralogist*, 28, 111–124.
- Henry, D. J. and Dutrow, B. L. (1996) *Metamorphic tourmaline and its petrologic applications*,

- In: Boron: Mineralogy, petrology, and geochemistry (Eds. Grew, E. S. and Anovitz, L. M.) 33, 503-557. Reviews in Mineralogy and Geochemistry.
- Henry, D. J. and Guidotti, C. V. (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite- grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, 70, 1- 15.
- Henry, D. J. and Dutrow, B. L. (2012) Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic conditions: Its petrologic applicability. *Lithos*, 154, 16–32.
- Henry, D. J., Guidotti, C. V. and Thomson, J. A. (2005) The Ti- saturation surface for low- to-medium pressure metapelitic biotite: Implications for Geothermometry and Ti-substitution Mechanisms. *American Mineralogist*, 90, 316- 328.
- Henry, D. J., Kirkland, B. L. and Kirkland, D. W. (1999) Sector-zoned tourmaline from the cap rock of a salt dome. *European Journal of Mineralogy*, 11(2), 263- 280.
- Izadi, F. (2011) Petrology and Geochemistry of calc-silicates and metabasites in the Northeast of Golpayegan. M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Karimi, S., Tabatabaei Manesh, S. M., Safaei, H. and Sharifi, M. (2012) Metamorphism and Deformation of Golpayegan Metapeitic Rocks Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Petrology*, 20 (7), 658–675.
- Krmíček, L., Novak, M., Trumbull, R. B., Cempírek, J. and Houzar, S. (2020) Boron isotopic variations in tourmaline from metacarbonates and associated calc-silicate rocks from the Bohemian Massif: Constraints on boron recycling in the Variscan orogen. *Geoscience Frontiers*, 12(1), 219-230.
- London, D. and Manning, D. A. C. (1995) Chemical variation and significance of tourmaline from Southwest England. *Economic Geology*, 90, 495– 519.
- Marks, M. A. W., Marschall, H. R., Schühle, P., Guth, A., Wenzel, T., Jacob, D. E., Barth, M. and Markl, G. (2013) Trace element systematics of tourmaline in pegmatitic and hydrothermal systems from the Variscan Schwarzwald (Germany): The importance of major element composition, sector zoning, and fluid or melt composition. *Chemical Geology*, 344, 73–90.
- Marschall, H. R., Korsakov, A. V., Luvizotto, G. L., Nasdala, L. and Ludwig, T. (2009) On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks. *Journal of the Geological Society*, 166, 811- 823.
- Mirlohi, A. (2015) (Petrogenesis leucogranites in the northeast of Golpayegan (Aderba-Ochestan, Sanandaj- Sirjan zone). Ph.D. thesis, University) of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Mohajjel, M., Fergusson, C. and Sahandi, M. R. (2003) Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. *Asian Earth Sciences*, 21, 397– 412.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C. L. (2000) Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj - Sirjan Zone, western Iran. *Structural Geology*, 22, 1125- 1139.
- Moosavi, E., Mohajjel, M. and Rashidnejad–Omran, N. (2014) Systematic changes in orientation of linear mylonitic fabrics: An example of strain partitioning during transpressional deformation in north Golpaygan, Sanandaj–Sirjan zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94, 55- 67.
- Movahedi, M. (2009) Petrography and Petrology of granitoids in the Ochestan (South Mahallat, Markazi province). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Nachit, H., Ibhi, A., Abia, E. H. and Ohoud, M. B. (2005) Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites, and neoformed biotites. *Comptes Rendus*

- Geoscience, 337, 1415- 1420.
- Pirajno, F. and Smithies, R. H. (1992) The FeO/ (FeO+MgO) ratio of tourmaline: a useful indicator of spatial variations in granite- related hydrothermal mineral deposits. *Journal of Geochemical Explorations*, 42, 371- 381.
- Sharifi, M. (1997) Geology and petrology of metamorphic and igneous rocks northeast of Golpayegan. M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Shaw, D. M., Truscott, M. G., Gray, E. A. and Middleton, T. A. (1988) Boron and lithium in high-grade rocks and minerals from the Wawa- Kapuskasing region, Ontario. *The Canadian Journal of Earth Sciences*, 25(9), 1485–1502.
- Sheikholeslami, M. R. and Zamani Pedram. M. (2008) Explanatory text of Mahallat. Geological Quadrangle Map 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Sperlich, R., Giere, R. and Frey, M. (1996) Evolution of compositional polarity and zoning in tourmaline during prograde metamorphism of sedimentary rocks in the Swiss Central Alps. *American Mineralogist*, 81, 1222- 1236.
- Thiele, O., Alavi- Naini, M., Assefi, R., Hushmand- Zadeh, A., Seyed- Emami, K. and Zahedi, M. (1968) Explanatory text of Golpaygan. Geological Quadrangle Map 1:250,000, No. E7, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Tillman, J. E., Poosti, A., Rossello, S. and Eckert, A. (1981) Structural evolution of Sanandaj- Sirjan Ranges near Esfahan, Iran. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 65, 674- 687.
- Trumbull, R. B. and Chaussidon, M. (1999) Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from the Sinceni granite- pegmatite system in Swaziland. *Chemical Geology*, 153, 125- 137.
- Van Hinsberg, V. J., Henry, D. J. and Marschall, H. R. (2011) Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *The Canadian Mineralogist*, 49, 1–16.
- van Hinsberg, V. J., and Schumacher, J. C. (2009) The geothermobarometric potential of tourmaline, based on experimental and natural data. *American Mineralogist*, 94(5-6), 761- 770.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185- 187.