

Research Article

Evolution of ore-forming fluids in Dashkasan gold deposit, NE Qorveh, West of Iran, based on tourmaline chemical composition and fluid inclusion data

Mohammad Moradi¹, Zahra Alaminia² 
Ebrahim Tale Fazel³ , Mahin Mansouri Esfahani⁴ 

¹ M.Sc., Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, mmoradi487@yahoo.com

² Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, z.alaminia@sci.ui.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu- Ali Sina University, Hamedan, Iran, tale.fazel@gmail.com

⁴ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, mmansouri_2001@yahoo.com

ARTICLE INFO

Received: 17 January 2022

Accepted: 31 May 2022

Keywords

Mineral Geochemistry

Fluid Inclusion

Tourmaline

Gold Deposit

Dashkasan



 20.1001.1.22285210.1402.14.2.1.8
 10.22108/ijp.2022.132378.1265

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Tourmaline is a borosilicate mineral with general formula of $XY_3Z_6[T_6O_{18}](BO_3)_3V_3W$. Experimental studies demonstrate a wide range of stability for tourmaline-supergroup minerals to record different geological processes. They occur in metamorphic, granitic pegmatites, and clastic sedimentary rocks and are associated with hydrothermal activities (Dutrow and Henry, 2011; Slack and Trumbull, 2011). Textural and compositional features of tourmaline can be used as an indicator of environment in which it crystallized. Tourmaline from porphyry deposits generally show a. frequently crystal zoning, b. development from Fe-rich to Mg-rich, and c. total Mg content is ~2 apfu in copper deposits and 1-2 apfu in Au deposits (Baksheev et al., 2012). It is believed that the world-class Dashkasan gold deposit records the transformation of porphyry to low-sulfide epithermal (Richards et al., 2006). The Dashkasan gold deposit located in the Kurdistan Province can be a significant region for better understanding the origin and the evolution of ore-forming fluids using chemistry of tourmaline. For the present study, we also tried to apply fluid inclusions data on quartz-tourmaline-pyrite veins from the Dashkasan deposit.

Materials and Methods

Polished-thin sections of various tourmalines of the Dashkasan deposit were examined using a Cameca

SX100 Electron Probe Micro Analysis (EPMA) at the Iran Mineral Processing Research Center, Karaj. Fluid inclusion studies were performed on quartz crystals of

 Corresponding Author

To cite this article: Moradi, M., Alaminia, Z., Tale Fazel, E., Mansouri Esfahani, M. (2023) Evolution of the ore-forming fluids in the Dashkasan gold deposit, NE Qorveh, West of Iran, based on tourmaline chemical composition and fluid inclusion data. *Petrological Journal*, 14(2), 31-58.

quartz-tourmaline-pyrite veins. The microthermometric parameters of fluid inclusions were measured by Linkam-THMS-600 stage at the University of Isfahan.

Results and Discussion

The Dashkasan gold deposit with 52 Mt of oxidized ore and average grades of 1.77 g/t Au is hosted by the Middle-Miocene porphyritic dacite/rhyodacite and dacitic breccia rocks. The main minerals are quartz, K-feldspar, hornblende and biotite mainly altered. This deposit is characterized by the transition from the porphyry to the epidermal system with the presence of tourmaline minerals in phyllic and silicification alteration associated with gold veins. As petrographic examination shows tourmaline occurs as disseminated, vein/veinlet, and breccia textures in three types: Tur-1 occurred as needle shape in dacitic rocks associated with phyllic alteration; Tur-2 crystallized as radial shape mainly coexisting with silicification; and Tur-3 with elongated shape is present in dacitic breccia with phyllic alteration.

Mineral Chemistry

The geochemical composition of three types tourmalines points to the nature and the evolution of ore-forming fluids. Electron microprobe analyses of the studied tourmalines indicate that the Tur-1 and Tur-3 are dravite, and the Tur-2 is dravite to schorl in composition and they belong to alkaline group. The third type, unlike the other two, is characterized by poor zoning and higher values of Na, K, Fe, Mg and lower values of Ca. On Fe_{tot} -Ca-Mg ternary diagram, they plotted in the Ca-poor metapelites, metapsammites, and quartz-tourmaline rocks host. Magmatic genesis inferred from the higher $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ ratio for Tur-1 and Tur-2, while this ratio in the Tur-3 is different and shifted towards hydrothermal source.

Microthermometric Study

Richards et al. (2006) present the fluid inclusion assemblages from quartz-tourmaline veins in sericitized wall rocks in the Dashkasan deposit consisting of hypersaline and rare vapor-rich inclusion. They have homogenization temperatures of 246° to 360 °C, yielding salinities of 34.4 to 46.1 wt% NaCl equiv. (Richards et al., 2006). Fluids inclusions studies on quartz-tourmaline-pyrite veins related to transition between stage-1 and stage-2 of mineralization in the Dashkasan shows a salinity values from 15.9 to 16.8

wt% NaCl equiv. and homogenization temperature values between 185° to 254 °C.

Conclusions

On the basis of optical and scanning electron microscopy, three tourmaline types (Turs -1, -2 and -3) in the Dashkasan deposit, can be distinguished. Despite the lack of zoning in Tur-1 and Tur-2, the third type displays the poor zoning. The first and the third-types of tourmalines are dravite (Mg-rich), whereas the second-type is dravite to schorl in composition. Magmatic genesis is reflected by higher $\Sigma(\text{Fe}+\text{Mg})$ and $\text{FeO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ ratios for the first two types. While these ratios in the Tur-3 is different and shifted toward hydrothermal source. To sum up, the occurrence of quartz-tourmaline-pyrite veins in the Dashkasan deposit is due to the existence of a fault system under the physicochemical performance of the ore-mineralized fluid by a sudden depressurization and probably gradual mixing with shallow water.

Acknowledgments

We thank Dr. Gholizadeh and Dr. Shabaniyan for their assistance with experiments for EPMA. This study was financially supported by the University of Isfahan.



تحول سیال‌های کانه‌ساز در کانسار طلای داشکسن، شمال‌خاوری قروه، باختر ایران، برپایه ترکیب شیمیایی تورمالین و داده‌های سیال‌های درگیر

محمد مرادی^۱، زهرا اعلمی‌نیا^۲

ابراهیم طالع‌فاضل^۳ ، مهین منصوری‌اصفهانی^۴

^۱ کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، mmoradi487@yahoo.com

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، alaminia_geo@yahoo.com

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران، e.talefazel@basu.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، mansoori@iut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

کانسار طلای داشکسن با ذخیره اکسیدی ۵۲ میلیون تن و میانگین عیار ۱/۷۷ گرم بر تن طلا، در میزبان داسیت/یوداسیت پورفیری و برش‌های داسیتی میوسن میانی، در باختر ایران تشکیل شده است. کوارتز، فلدسپار، هورنبلند و بیوتیت از کانی‌های اصلی آن هستند و در بیشتر بخش‌ها دگرسان شده‌اند. این کانسار با گذار از سامانه پورفیری به اپی‌ترمال با حضور تورمالین در دگرسانی‌های فیلیک و سیلیسی، همراه با رگه‌های طلا دار شناخته می‌شود. تورمالین در کانسار داشکسن با بافت‌های افشان، رگه/رگچه و برشی رخ داده است و در بررسی‌های سنگ‌نگاری به شکل‌های سوزنی (نوع اول)، شعاعی (نوع دوم) و تیغه‌ای کشیده (نوع سوم) دیده می‌شود. ترکیب شیمیایی سه نوع تورمالین روی نمودارهای مختلف نشان می‌دهد تورمالین‌ها می‌توانند نماینده ماهیت و تحولات سیال کانه‌ساز باشند. برپایه تجزیه‌های ریزکاو الکترونی، تورمالین‌های نوع اول و سوم ترکیب دراویت و نوع دوم دراویت مایل به شورول دارند و هر سه نوع در گروه قلیایی دسته‌بندی می‌شوند. تورمالین‌های نوع سوم برخلاف تورمالین‌های دو نوع دیگر، منطقه‌بندی وضعی نشان می‌دهند و مقدارهای بالاتری از عناصرهای K، Na، Fe و Mg و مقدار کمتری از Ca دارند. روی نمودار سه‌تایی Fe₁₀₀-Ca-Mg در جایگاه متاپسامیت و متاپلیت‌های فقیر از کلسیم و سنگ‌های کوارتز-تورمالینی جای می‌گیرند. نسبت بالاتر Fe/(Fe+Mg) در انواع یک و دو نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی-گرمایی آنهاست؛ اما این نسبت در تورمالین‌های نوع سوم متفاوت است و به شرایط گرمایی گرایش دارد. بررسی‌های سیال‌های درگیر روی رگه‌های کوارتز-تورمالین-پیریت، گویای شوری از ۱۵/۹ تا ۱۶/۸ درصدوزنی معادل نمک طعام و دمای همگن‌شدن از ۱۸۵ تا ۲۵۴ درجه سانتیگراد است. شواهد این پژوهش نشان می‌دهد رگه کوارتز-تورمالین-پیریت در کانسار داشکسن مؤثر از وجود سامانه‌ای گسلی و در پی تغییرات فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز در شرایط فشارزدایی و احتمالاً ترکیب با آب‌های جوی کم ژرفا پدید آمده است.

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۷
تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۱۰

کلیدواژه‌ها

شیمی کانی
سیال‌های درگیر
تورمالین
کانسار طلا
داشکسن



20.1001.1.22285210.1402.14.2.1.8

10.22108/ijp.2022.132378.1265

نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: مرادی، م.، اعلمی‌نیا، ز.، طالع‌فاضل، ا.، منصوری‌اصفهانی، م. (۱۴۰۲) تحول سیال‌های کانه‌ساز در کانسار طلای داشکسن، شمال‌خاوری قروه، باختر ایران، برپایه ترکیب شیمیایی تورمالین و داده‌های سیال‌های درگیر. پترولوژی، ۱۴(۲)، ۳۱-۵۸.



مقدمه

تورمالین به علت پایداری در بازه گسترده‌ای از دما با بیشینه ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد و فشار با بیشینه ۴ تا ۶ گیگاپاسکال (Krosse, 1995; Ota et al., 2008; van Hinsberg et al., 2011) در محیط‌های گوناگون زمین‌شناسی دیده می‌شود. با توجه به واکنش‌های جانمایی متفاوت، تنوع ترکیب شیمیایی و ماهیت ساختاری منحصر به فرد تورمالین سبب شده است که این کانی به عنوان شاخص سنگ‌شناسی و فلزایی اهمیت یابد (Slack et al., 1984). شیمی این کانی سیلیکاته بردار پیچیده و فرمول پایه آن $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$ است (Hawthorne and Henry, 1999) (جدول ۱). در این میان، سه عضو پایانی اصلی با نام‌های شورل غنی از آهن، دراویت غنی از منیزیم و البایت غنی از لیتیم وجود دارد (Henry et al., 2011). بیشتر تورمالین‌ها در سنگ‌های آذرین فلسیک و اسیدی غنی از سدیم با مقدار متوسطی از آهن و منیزیم و از

نوع دراویت و شورل هستند. تورمالین‌های درون سنگ‌های دگرگونه و دگرنهاد معمولاً منطقه‌بندی نوسانی و ترکیب هیبریدی دارند که نشان‌دهنده سنگ میزبان و فاز سیال بردار آنهاست (Van Hinsberg et al., 2011)؛ اما تورمالین‌های ماگمایی به علت پیدایش در سیستمی بسته معمولاً بافتی یکنواخت و بدون منطقه‌بندی دارند (London and Manning, 1995). بیشتر رگه‌های تورمالین با انواع فرایندهای گرمایی همراه هستند. این فرایندها شامل انواع رگه‌های مرتبط با سنگ‌های گرانیتیویدی، گرایزن، جانمایی، اسکارن، تنوره‌های برشی و ذخیره‌های مس-مولیبدن-طلای پورفیری که خاستگاه عنصرهای اقتصادی W, Au, Mo, Cu و فلزات پایه هستند (Raith et al., 2004). از این رو، شناسایی تورمالین‌های گوناگون اطلاعات ارزشمندی درباره خاستگاه، ماهیت و تکامل سیال گرمایی کانه‌ساز ارائه می‌دهد (Slack and Trumbull, 2011).

جدول ۱. برخی گونه‌های تورمالین برای شناسایی ویژگی‌های سیال (Dutrow and Henry, 2018).

Table 1. Some tourmaline species for determining fluid characteristics (Dutrow and Henry, 2018).

Species	(X)	(Y3)	(Z6)	T ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(V) ₃	(W)
Alkali group							
Schorl	Na	Fe ²⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
Dravite	Na	Mg ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
Oxy- dravite	Na	Al ₂ Mg	Al ₅ Mg	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
Elbaite	Na	Li _{1.5} Al _{1.5}	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
Povondraite	Na	Fe ³⁺	Fe ³⁺ ₃	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
Calcic group							
Liddicoatite	Ca	Li ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
X- site vacant group							
Magnesio- foitite	□*	Mg ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH

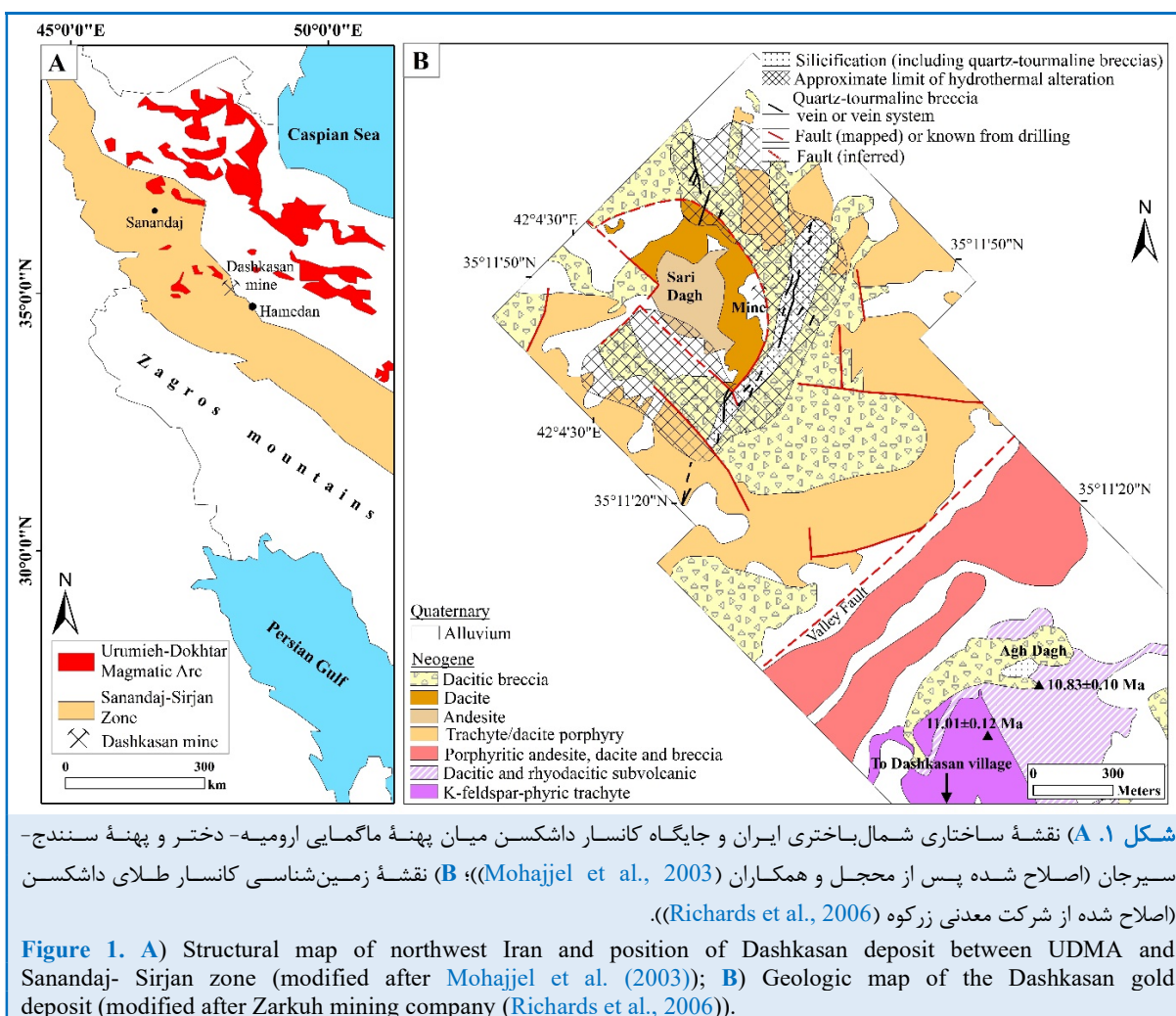
* X- site vacancy (□)

ژنتیکی نزدیکی داشته باشند (Sillitoe, 2010; Waters et al., 2011). از کانسارهای پورفیری-اپی ترمال در جهان

کانسارهای پورفیری با سامانه‌های اپی ترمال که در نزدیکی یا بخش بالای ذخایر پورفیری جای گرفته‌اند می‌توانند ارتباط

(ساری‌گونی) (Richards et al., 2006) و مس-طلای چوران (Zarasvandi et al., 2021) را نام برد. کانسار طلای داشکسن در شمال‌باختر ایران، شمال‌خاوری شهرستان قروه در استان کردستان، در فاصله پهنه‌های ساختاری ارومیه-دختر و سهندج-سیرجان جای دارد (شکل ۱-ا).

می‌توان کانسارهای مس-طلا-مولیبدن جیانگچی شرق چین (Mao et al., 2011)، پلی‌متال آکواریکای آرژانتین (Franchini et al., 2011)، مس-طلای التران آنتین (Maydagán et al., 2013)، طلای کوپلر ترکیه (Imer et al., 2016)، و در ایران کانسارهای طلای داشکسن



فیلیک و سیلیسی سامانه پورفیری و همراه با رگه‌های طلادار سامانه اپی‌ترمال یافت می‌شود. این کانسار به‌علت ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌زایی همواره مورد توجه زمین‌شناسان بوده است و تا کنون بررسی‌های گوناگونی روی آن انجام شده است. از میان این بررسی‌ها می‌توان بررسی کانی‌شناسی و خاستگاه ذخیره (Rastad et al., 2000)، تیپ کانه‌زایی و سن‌سنجی (Richards et al., 2006)، دورسنجی

پهنه طلادار با درازای میانگین ۱۲۰۰ متر و پهنای میانگین ۳۵۰ متر با راستای شمال‌خاوری- جنوب‌باختری (N33E)، ذخیره اکسیدی بالغ بر ۵۲ میلیون تن با عیار میانگین ۱/۷۷ گرم بر تن طلاست (Richards et al., 2006). کانسار طلای داشکسن گذری از سامانه پورفیری به گرمابی است (Richards et al., 2006; Alaminia et al., 2018) و در آن کانی تورمالین به‌فراوانی در دگرسانی‌های

الکترونی (EPMA¹) مدل SX100 ساخت شرکت Cameca فرانسه، ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵kv و شدت جریان ۲۰ nA در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران (کرج) انجام شد. در آزمایشگاه، پیش از تابش الکترونی، مقاطع با لایه نازکی از کربن به ضخامت تقریبی ۵۰ آنگستروم پوشش داده شدند. قطر پرتوی تابشی بین ۲ تا ۵ میکرون و آستانه آشکارسازی دستگاه برای عنصرهای مختلف از ۱۰۰ پی‌پی‌ام کمتر بود. داده‌های به‌دست‌آمده از این تجزیه با نرم‌افزار Cameca PAP تصحیح شدند. محاسبه فرمول ساختاری کانی تورمالین بر پایه ۳۱ آنیون (O, OH) با Wintourclass به روش استوکیومتری انجام شده است. بر پایه روش پیشنهادی یاوز و همکاران (Yavuz et al., 2014)، میزان بور ۳ اتم در هر واحد فرمولی فرض شد.

همچنین، شمار ۴ مقطع دوبر صیقل با ضخامت متوسط ۱۳۰ میکرون، برای بررسی میان‌بارهای سیال در کانی کوارتز همراه با رگه‌های کوارتز-تورمالین-پیریت، تهیه شد. میان‌بارهای سیال با دستگاه لینکام مدل THM600 دارای کنترل‌کننده حرارتی TMS92 و سردکننده LNP در آزمایشگاه سیال‌های درگیر دانشگاه اصفهان بررسی شدند. بازه دمایی ۱۷۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد و دقت دستگاه ± 0.1 درجه سانتیگراد است.

نام اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

زمین‌شناسی کانسار

از دید برخی زمین‌شناسان کانسار طلای داشکسن در پهنه دگرگونی-ماگمایی سنندج-سیرجان (Rastad et al., 2000; Maanijou et al., 2013) و به باور ریچاردز و همکاران (Richards et al., 2006) و ریچاردز (Richards, 2015) در پهنه ماگمایی ارومیه-دختر جای گرفته است. محدوده بررسی‌شده در فاصله میان سه روستای داشکسن، نی‌بند و بهارلو جای دارد. آهک‌های تریاس، اسلیت، فیلیت، کوارتزیت و دولومیت‌های ژوراسیک کهن‌ترین واحدهای سنگی هستند که برونزدهای محدودی از آنها در میان مناطق نی‌بند و بهارلو دیده می‌شوند

(Felegari, 2014; Maanijou et al., 2014)، زمین‌شیمی سنگ کل (Granian et al., 2016) و تعیین خاستگاه و بررسی کانسنگ‌های سولفیدی و اکسیدی (Moradi, 2018; Moradi et al., 2019) را نام برد.

در ایران پژوهش‌های بسیاری روی کانی تورمالین با طیف‌های مختلف سنگی انجام شده است (Esmacily et al., 2009; Karimpour and Stern, 2010; Mirsepahvand et al., 2012; Mansouri Esfahani and Khalili, 2014; Rasekh et al., 2016; Ahmadi Khalaji et al., 2016; Moazzen et al., 2017; Mansouri Esfahani and Bakhshi, 2018; Zall et al., 2019; Jamshidibadr et al., 2021)، اما تا کنون

بررسی‌های دقیقی روی ویژگی‌های تورمالین‌ها در کانسارهای پورفیری-اپی‌ترمال انجام نشده است. در این پژوهش تلاش شد ویژگی‌های کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی تورمالین‌های مرتبط با کانسار پورفیری-اپی‌ترمال داشکسن، با به‌کارگیری تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و فناوری ریزکاو الکترونی، بررسی و مقایسه شود. پس از انجام نسل‌بندی رگه‌های مختلف کانه‌دار، از بررسی‌های سیال‌های درگیر کوارتز رگه‌های تورمالین‌دار، برای تعیین شرایط (فشار-دما-ترکیب) سیال کانه‌ساز طلا استفاده شد.

روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های صحرایی و انتخاب محل‌های مناسب، شمار ۱۵ نمونه سنگی برای بررسی‌های میکروسکوپی و بررسی شیمی تورمالین و خاستگاه آن برداشت شد. مقاطع با میکروسکوپ نوری دمنظوره Olympus مدل BX60F5 بررسی شدند. سه نوع کانی تورمالین در بررسی‌های سنگ‌نگاری مقاطع نازک-صیقلی شناسایی شدند. شمار ۲۵ نقطه از تورمالین‌های مرتبط با دگرسانی‌های سامانه پورفیری و شمار ۱۱ نقطه از تورمالین‌های رگه‌های برشی مرتبط با سامانه گرمایی، روی شش نمونه مقطع نازک-صیقلی انتخاب و نشانه‌گذاری شدند. بررسی شیمی تورمالین‌ها با فناوری تجزیه ریزکاو

¹ Electron Probe Micro Analyzer

و برپایه بررسی‌های میکروسکوپی، به دو صورت جانیشینی کانی‌های اولیه سنگ و نهشت در فضاهای خالی و شکستگی‌ها رخ داده است. پهنه‌های فیلیک (مجموعهٔ سریسیت-کوارتز-پیریت)، سیلیسی (مجموعهٔ کوارتز±پیریت) و تورمالینی (مجموعهٔ تورمالین±کوارتز) مهم‌ترین دگرسانی‌هایی هستند که تورمالین در آنها یافت می‌شود. کوارتز فراوان‌ترین کانی دگرسانی در سنگ دیواره است که در زمینه و یا به‌صورت رگچه دیده می‌شود و گاه تا بیش از ۵۰ درصد حجمی کانسنگ طلا را دربر گرفته است. سریسیت‌ها نیز فراوان هستند و به سه صورت ریزبلور در زمینه، درشت بلور و شعاعی یافت می‌شوند (Moradi et al., 2019). دگرسانی‌های فیلیک و سیلیسی در واحد داسیت/ریداسیت پورفیری و دگرسانی‌های فیلیک و تورمالینی با گسترش کمتر در واحد برشی رخ داده‌اند. درون قطعات داسیتی برش گرمایی، کانی‌های سریسیت، کوارتز، پیریت‌های دوده‌ای و مواد آلی (Richards et al., 2006) که بیشتر به صورت پراکنده هستند دیده می‌شوند. دگرسانی پروپلیتیک (مجموعهٔ کلریت ± اپیدوت ± کلسیت) در واحد آندزیتی کمترین شدت دگرسانی را نشان می‌دهد. پهنهٔ آرژیلیک رخنمون‌های فراوان و پراکنده‌ای دارد. بررسی پراش پرتوی ایکس نشان‌دهندهٔ حضور کانی‌های ایلیت، کاتولینیت، مونت‌موریونیت، مسکوویت (از نوع سریسیت)، آلونیت، ژئولیت (هیولاندیت، لامونیت)، کوارتز، ژاروسیت، و گوتیت در این پهنه است (Rastad et al., 2000; Maanijou et al., 2014; Moradi, 2018). همراهی لامونیت و هیولاندیت با رس‌ها، بیشتر در سامانه‌های زمین‌گرمایی دما بالا دیده می‌شود؛ اما حضور اکسیدهای آهن پیامد تأثیر دگرسانی برونزاد دانسته می‌شود (Richards et al., 2006).

در معدن داشکسن، ذرات نامرئی طلا به‌صورت محلول جامد در شبکه سولفید (پیریت‌های آرسنیک‌دار ریزدانه و کمتر آرسنوپیریت) و به‌ندرت دانه‌های مری طلا در کوارتز حفره‌دار تأخیری در همراهی با کانی‌های آنتیموان و آرسنیک‌دار دیده می‌شوند (Richards et al., 2006). برپایهٔ شواهد صحرایی و میکروسکوپی، کانی‌سازی سولفیدی و طلا با دماسنجی‌های افشان (۲۰ درصد حجم ذخیره)، برشی (۳۰ درصد حجم ذخیره)، و رگه-رگچه‌ای یا فضا پرکن (۵۰ درصد حجم ذخیره)،

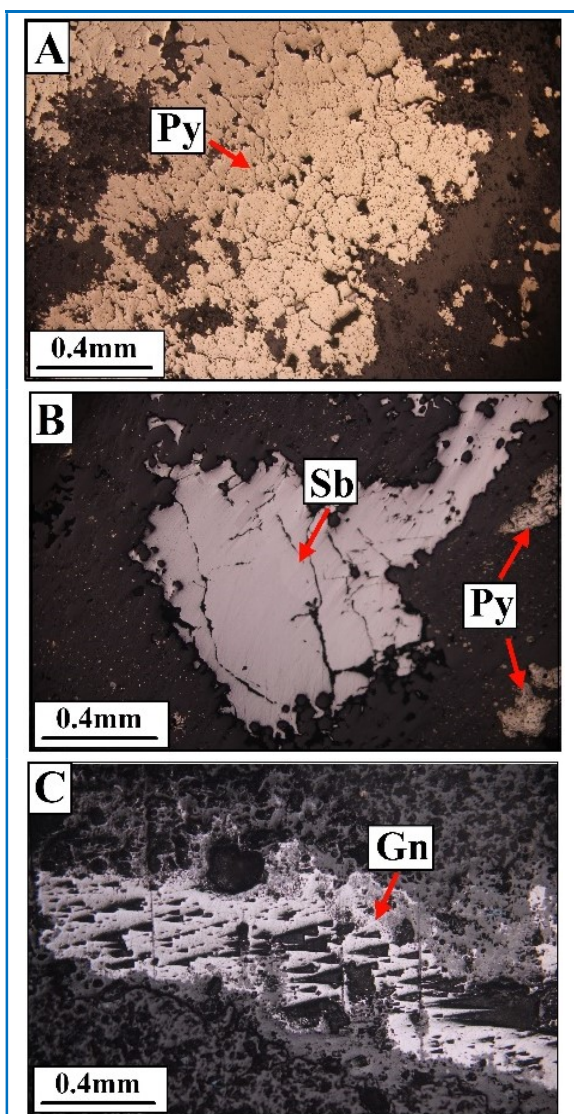
(Rastad et al., 2000; Khan Nazer et al., 2015). کوه‌های گنبدی ساری‌داغ و آق‌داغ دو مخروط آتشفشانی با ترکیب داسیت-آندزیت و سن میوسن میانی هستند که مورفولوژی اصلی منطقه را شکل داده‌اند. کانسار طلای داشکسن در گنبد ساری‌داغ (ساری‌گونای) جای گرفته است و برپایهٔ بازدید صحرایی، گسترده‌ترین واحدهای سنگی در منطقهٔ معدنی به‌ترتیب شامل داسیت/ریداسیت‌های پورفیری با سن ۱۱ میلیون سال پیش که از شمال‌خاوری تا مرکز پیشکار استخراجی را دربر گرفته‌اند، برش‌های گرمایی که بیشتر در بخش‌های جنوب و جنوب‌خاوری دیده می‌شوند و واحد آندزیت که بیشتر در بخش جنوب‌باختری دیده می‌شوند (Richards et al., 2006; Moradi et al., 2019) (شکل ۱-ب).

داسیت و ریداسیت که فراوان‌ترین واحدهای سنگی در محدودهٔ معدنی داشکسن هستند، سنگ میزبان اصلی طلا به‌شمار می‌روند. برپایهٔ ویژگی‌های میکروسکوپی، بافت پورفیری و کمتر گلومروپورفیری دارند و کانی‌های سازندهٔ این سنگ‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، سانیدین و کانی‌های فرعی آمفیبول و بیوتیت هستند. پهنهٔ برش گرمایی با جنس داسیت میزبان اصلی تورمالین‌ها به‌شمار می‌رود. این پهنه ابعادی نزدیک به ۵۰ در ۹۰ متر با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری دارد و قطعات خردشدهٔ آن کمتر از ۱ سانتیمتر تا نزدیک به ۲۵ سانتیمتر دیده می‌شود. سنگ‌های آندزیتی با رنگ تیره، بافت پورفیری و بیشتر از بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند سبز، بیوتیت و کمی کلینوپیروکسن، کوارتز، همراه با مقادیر ناچیزی آپاتیت، تیتانیت و زیرکن ساخته شده‌اند.

بررسی‌های پیشین گویای عملکرد دو گسل اصلی با روند NE-SW با مولفهٔ برشی راستگرد در منطقه است که شواهد آن با بررسی روند گسل‌ها و درزه‌ها (اغلب NE-SW) تایید شده است (Moradi et al., 2019). جابجایی دو گسل یادشده موجب پیدایش پهنهٔ برشی در منطقه شده است که میزبان کانه‌سازی طلا است (Moradi et al., 2019).

دگرسانی و کانه‌زایی

دگرسانی درونزاد در کانسار داشکسن گسترش بالایی دارد



شکل ۲. تصویرهای میکروسکوپی نور بازتابی از کانه‌های مختلف در کانسار داشکسن. **(A)** رگه کوارتز-تورمالین-پیریت که با رگچه کوارتز-پیریت دانه‌ریز (گوشه پایین راست) قطع شده است؛ **(B)** هم‌رشدی استیبنیت و پیریت با کوارتز در میزبان داسیت، **(C)** کانی گالن از اطراف با سروزیت جایگزین شده است.

Figure 2. Reflected- light photomicrographs of various ore mineral from the Dashkasan deposit. **(A)** Quartz- tourmaline- pyrite vein has been cut off by fine- grained pyrite- quartz veinlet (Bottom right corner); **(B)** Intergrowth of stibnite and pyrite with quartz in dacite host- rock, **(C)** Around of the galena mineral changed to the cerussite.

تورمالین

با توجه به ویژگی‌های صحرایی، تورمالین‌ها به سه

در میزبان سنگ‌های داسیت/ریوداسیت پورفیری پدید آمده است. کانه‌های پهنه‌طالدار به ترتیب فراوانی شامل استیبنیت (گاه تا ۶۰ درصد حجمی رگه)، آلگار و اورپیمنت (۱۰ درصد حجمی رگه)، پیریت (۵ تا ۲۰ درصد حجمی سنگ)، مارکاسیت (۲-۱ درصد حجمی)، گالن (۵ درصد حجمی)، آرسنوپیریت (۴-۱ درصد حجمی)، کالکوپیریت (۲-۱ درصد حجمی)، اسفالریت (کمتر از ۵/۰ درصد حجمی) و بورنیت (کمتر از ۵/۰ درصد حجمی) است. دگرسانی پیریت به اکسید و هیدروکسیدهای آهن تا ژرفای ۲۰ تا ۱۵۰ متر را می‌توان در گمانه‌های اکتشافی ردیابی کرد.

کانه‌زایی افشان: این کانه‌زایی بیشتر با حضور کانی‌های سولفیدی پیریت، کالکوپیریت و بورنیت با حجم کمتر از ۵ درصد نمونه در زمینه داسیت دگرسان شده دیده می‌شود و میانگین عیار طلای کمتر از ۲ ppm دارد.

کانه‌زایی برشی گرمابی: پس از کانه‌زایی افشان، مهم‌ترین بخش کانه‌دار و پرمعیار کانسار داشکسن، برش‌های گرمابی هستند. قطعات خردشده برش، از جنس سنگ دیواره و به شکل زاویه‌دار تا نیمه‌زاویه‌دار و با اندازه متغیر دیده می‌شوند. تورمالین که مهم‌ترین کانی باطله همراه کانه‌زایی طلا به‌شمار می‌رود در این بخش از کانسنگ حضور چشمگیری دارد؛ به‌گونه‌ای که گاه تا بیش از ۵۰ درصد حجمی سنگ را دربر می‌گیرد.

کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای یا شکافه پرکن: این کانه‌زایی فراوان‌ترین و پرمعیارترین بخش ذخیره است و در پنج گروه رگه پرسیب با روند غالب NNE-SSW دیده می‌شود که به ترتیب زمانی از قدیم به جدید شامل:

(۱) رگه کوارتز-تورمالین-پیریت (عیار طلا کمتر از ۱ گرم در تن) (شکل ۲-۲A)؛

(۲) رگه کوارتز-استیبنیت-پیریت (عیار طلا کمتر از ۳/۶ گرم در تن) (شکل ۲-۲B)؛

(۳) رگه کوارتز-پیریت شکل‌دار (عیار طلا ۰/۷ گرم در تن)؛

(۴) رگه کوارتز-پیریت دانه‌ریز (عیار طلا کمتر از ۰/۷ گرم در تن) (شکل ۲-۲A)؛

(۵) رگه کوارتز-گالن-اسفالریت (عیار طلا کمتر از ۶/۷ گرم در تن) است (شکل ۲-۲C؛ Richards et al., 2006; Moradi, 2018).

(۲) به‌صورت استوک‌ورک در میزبان داسیت تا آندزیت

پورفیری دگرسان (شکل ۳- B)؛

(۳) به‌صورت سیمان پرکننده قطعات داسیت برشی

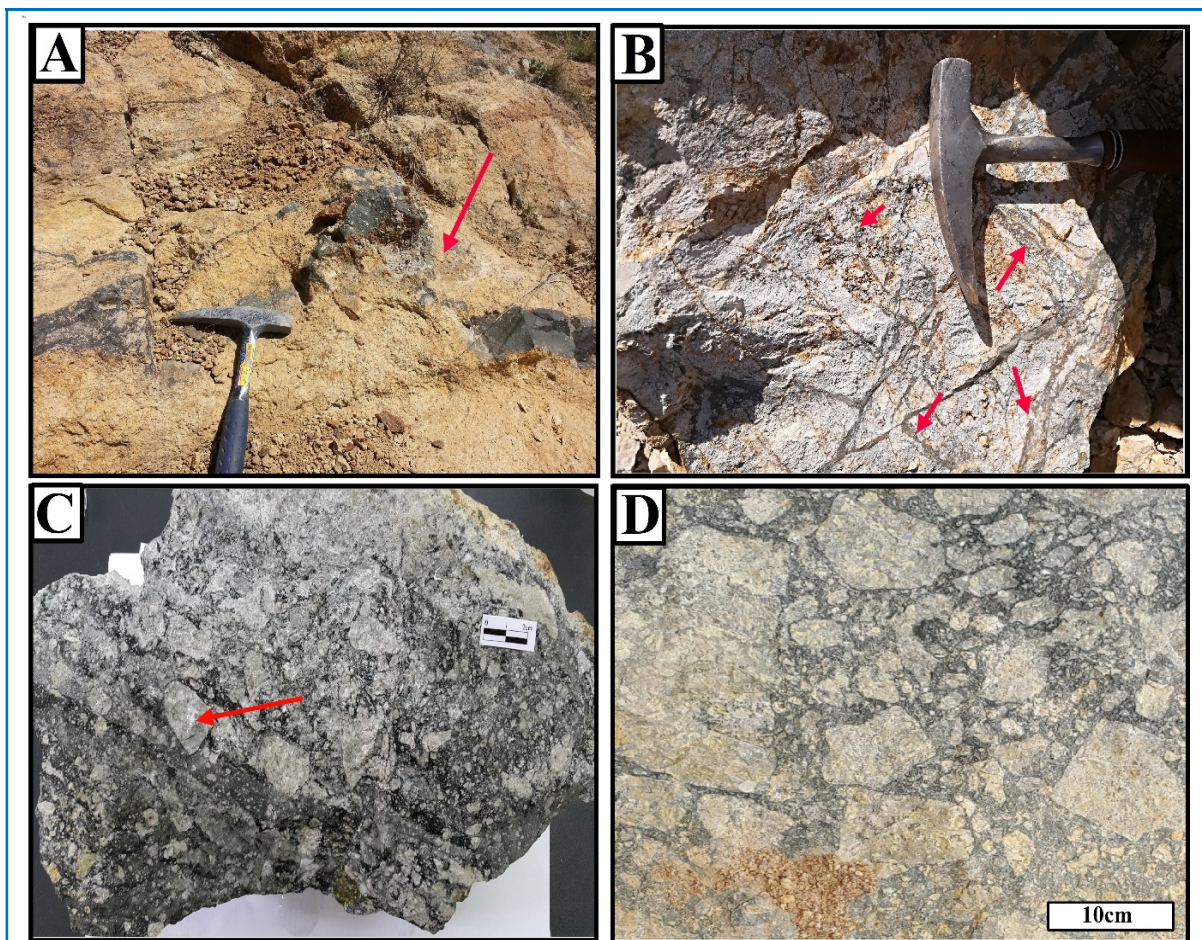
(شکل‌های ۳- C و ۳- D).

شکل مختلف دیده می‌شوند:

(۱) به‌صورت رگه‌های نزدیک به چند متر با ضخامت

متغیر ۱۰ تا ۵۰ سانتیمتر در میزبان داسیت

پورفیری (شکل ۳- A)؛



شکل ۳. تصویر نمونه دستی و صحرایی از ساخت‌های مختلف تورمالین در کانسار طلای داشکسن. **A** رگه تورمالین در میزبان داسیت پورفیری؛ **B** ساخت استوک‌ورک تورمالین در میزبان داسیت پورفیری دگرسان؛ **C** قطعات داسیت پورفیری در فرم برش با زمینه تورمالین؛ **D** تورمالین در زمینه دارای قطعات درشت و ریز داسیت پورفیری (ماتریکس پشتیبان) (رگه- رگچه‌های تورمالین در A و B، و قطعات داسیت در C، با پیکان سرخ‌رنگ نشان داده شده‌اند).

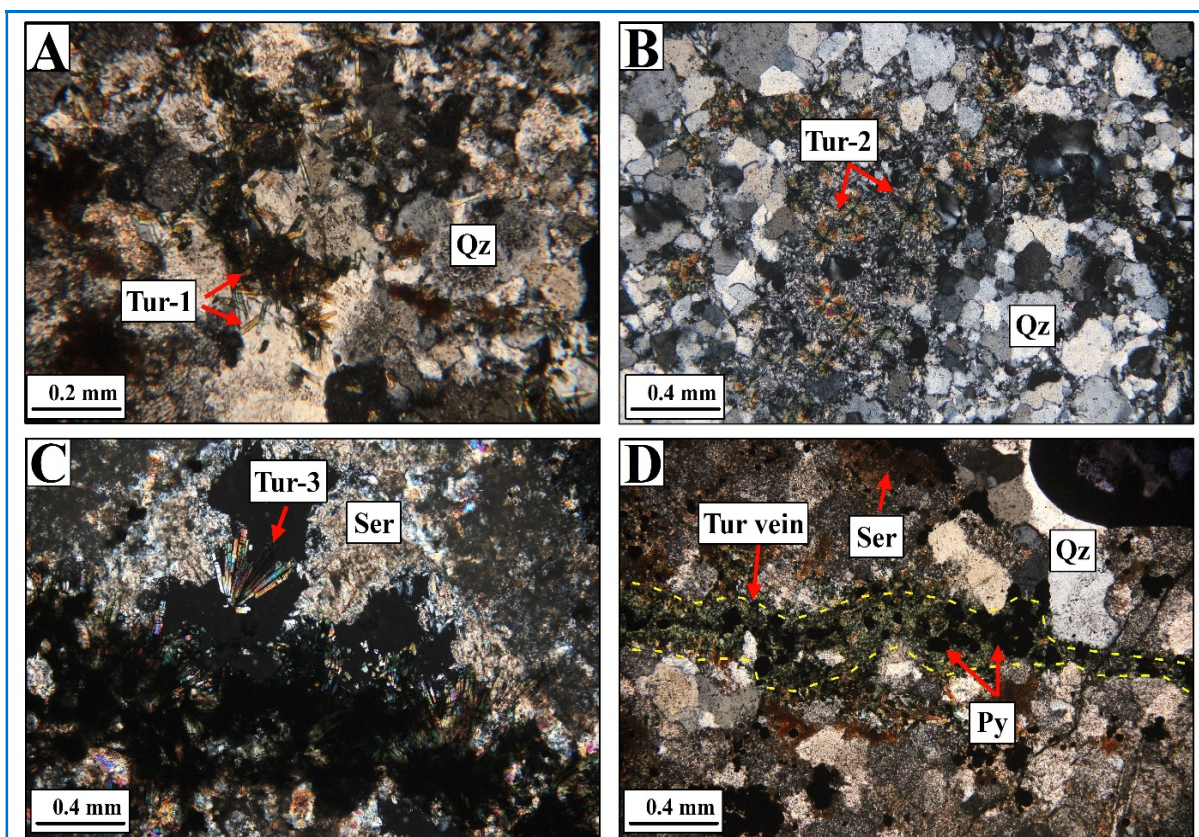
Figure 4. Photographs of hand-specimen and field samples of various tourmaline structures in the Dashkasan gold deposit. **A**) Tourmaline vein in the hosted by dacite porphyry; **B**) Tourmaline stockwork structure in the altered host dacite porphyry; **C**) Brecciated dacite porphyry clasts in the tourmaline groundmass; **D**) Tourmaline in the groundmass of coarse and fine dacite porphyry (matrix supported). The tourmaline vein/veinlets in A, B photos, and dacite clasts are marked with red arrows.

تورمالین‌های سوزنی نوع اول به‌صورت ریز تا متوسط بلور (کمتر از ۰/۱ تا ۰/۳ میلیمتر) و به‌صورت

برپایه بررسی‌های میکروسکوپی، سه نوع تورمالین در کانسار طلای داشکسن شناسایی شد.

دیده می‌شوند (شکل‌های ۴-B و ۵-B و ۵-E). تورمالین‌های تیغه‌ای در فرم دسته جارویی نوع سوم با ابعاد ۰/۲ تا ۰/۶ میلیمتر، با منطقه‌بندی ضعیف، در کانسنگ برش گرمایی شناسایی شدند (شکل ۵-F). نوع اخیر از تورمالین‌ها به صورت رگه-رگچه‌ای در میزبان دگرسانی فیلیک همراه کانی‌های کوارتز و پیریت دیده شد (شکل ۴-C و ۴-D).

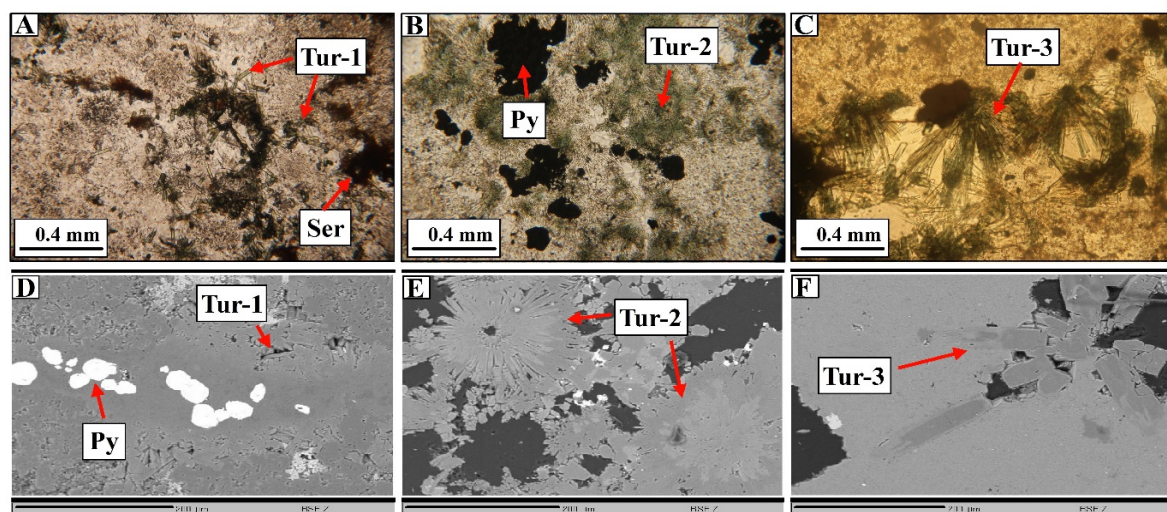
اجتماعات بلوری و پراکنده در دگرسانی فیلیک حضور دارند و کانی‌های همراه آن شامل کوارتز درشت بلور، سریسیت و پیریت هستند (شکل‌های ۴-A و ۵-A و ۵-D). تورمالین‌های شعاعی یا خورشیدی نوع دوم با ابعاد ۰/۲ تا ۰/۳ میلیمتر، همراه با کوارتزهای دانه متوسط و بیشتر به صورت بافت پرکننده و اغلب همراه با دگرسانی سیلیسی



شکل ۴. تصویرهای میکروسکوپی نور عبوری متقاطع (XPL^۲) از تورمالین‌های گوناگون در کانسار داشکسن. **(A)** تورمالین‌های سوزنی نوع اول در دگرسانی فیلیک؛ **(B)** تورمالین‌های شعاعی نوع دوم در دگرسانی سیلیسی؛ **(C)** تورمالین تیغه‌ای کشیده نوع سوم در رگه کوارتز-پیریت در میزبان داسیت دگرسان؛ **(D)** رگه تورمالین-پیریت در زمینه دگرسانی فیلیک.

Figure 4. Cross-polarized light (XPL) photomicrographs of various tourmaline types in the Dashkasan deposit. **A)** First-type of needle tourmalines in the phyllic alteration; **B)** Second-type of radial tourmalines in the silicification alteration; **C)** Third-type bladed tourmaline within a quartz-pyrite vein in the altered host dacite; **D)** Tourmaline-pyrite vein in the phyllic alteration groundmass.

² Cross Polarized Light



شکل ۵. تصویرهای میکروسکوپی در نوری عبوری (PPL^3) و الکترونی روبشی (BSE^4) از انواع مختلف تورمالین در کانسار طلای داشکسن. **A**, **D**) تورمالین سوزنی نوع اول؛ **B**, **E**) تورمالین شعاعی نوع دوم؛ **C**, **F**) منطقه‌بندی در تورمالین تیغه‌ای نوع سوم.

Figure 5. Polarized light (PPL) and back-scattered electron microscopy (BSE) images of different types of tourmaline in the Dashkasan gold deposit. **A**, **D**) First type of the needle tourmaline; **B**, **E**) Second type of the radial tourmaline; **C**, **F**) Zoning in the third type of the bladed tourmaline.

³ Plane Polarized Light

⁴ Back-scattered electrons

۰/۱۳ و ۲/۳۷ درصدوزنی (جدول ۴) است. میانگین $\Sigma(Fe+Mg)$ در تورمالین‌های نوع اول، دوم و سوم به‌ترتیب ۲/۷۴، ۲/۳۸ و ۲/۹۹ درصدوزنی است. میانگین نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ در تورمالین‌های نوع اول، دوم و سوم به‌ترتیب برابر با ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۲۳ و نیز میانگین $Na/(Na+Ca)$ به‌ترتیب برابر با ۰/۶۶، ۰/۶۱ و ۰/۹۷ است. مقایسهٔ نسبت‌های یادشده نشان می‌دهد تورمالین‌های نوع سوم که با کانه‌زایی طلا مرتبط هستند بیشترین مقدار نسبت $Na/(Na+Ca)$ و کمترین میزان نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ را نشان می‌دهند.

الف- شیمی کانی تورمالین

تنوع ترکیبی بالا در تورمالین‌ها به‌علت تغییرات عنصرهای Na و Ca و فضای خالی در سایت X و تغییرات عنصرهای Al و Mg ، Fe در سایت Y است (Yavuz et al., 2008). تورمالین‌های منطقهٔ داشکسن، عنصرهای اصلی SiO_2 ، CaO ، MgO ، FeO ، Al_2O_3 و Na_2O تغییرات گسترده‌ای نشان می‌دهند. میانگین این اکسیدها به‌ترتیب در تورمالین‌های نوع اول برابر با ۳۷/۷۳، ۳۲/۳۶، ۸/۳۵، ۶/۸۸، ۱/۴۴ و ۱/۵۴ درصدوزنی (جدول ۲)، در نوع دوم برابر با ۳۸/۲۳، ۳۰/۳۵، ۱۰/۱۲، ۶/۸۷ و ۱/۸۲ و ۱/۵۶ درصدوزنی (جدول ۳) و در نوع سوم برابر با ۴۰/۳۴، ۳۲/۶۴، ۴/۳۶، ۷/۹۲،

جدول ۲. داده‌های ریزکالو الکترونی مربوط به بلورهای تورمالین نوع اول از سامانهٔ پورفیری به‌همراه فرمول تجربی (apfu) برپایهٔ ۳۱ آنیون (O، OH) و آهن کل دوظرفیتی.

Table 2. Microprobe electron data of the first type tourmaline crystals of porphyry system with empirical formula (atoms per formula unit, apfu) based upon a 31 anion (O, OH) and total Fe^{+2} .

Point No.	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	Sp7	Sp8	Sp9	Sp10	Sp11	Sp12
SiO ₂	39.1	37.9	39.6	38.6	38.1	38.6	36.1	37.9	35.9	38.6	36.6	37.8
TiO ₂	0.42	0.51	0.39	0.61	0.53	1.00	0.39	0.49	0.40	0.59	0.32	0.61

جدول ۲. ادامه.

Table 2. Continued.

Point No.	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	Sp7	Sp8	Sp9	Sp10	Sp11	Sp12
Al ₂ O ₃	32.30	31.80	33.20	32.00	31.90	32.20	32.00	33.00	33.30	31.20	32.60	33.80
FeO	7.90	8.70	7.70	8.00	8.10	7.60	8.70	8.30	9.10	8.90	8.60	8.00
MnO	0.10	0.09	0.11	0.09	0.08	0.08	0.12	0.12	0.11	0.06	0.03	0.08
MgO	6.70	6.90	6.90	7.00	6.90	6.80	6.80	7.30	6.60	6.90	6.60	7.10
CaO	0.90	1.70	1.10	1.30	1.40	1.10	1.70	1.60	1.90	1.50	1.70	1.40
Na ₂ O	1.70	1.60	1.40	1.60	1.60	1.60	1.50	1.50	1.50	1.60	1.40	1.50
K ₂ O	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05	0.04	bdl	bdl	0.01	0.01	0.01	0.01
BaO	0.03	0.01	bdl	bdl	0.02	0.07	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01
B ₂ O ₃	11.41	10.91	11.20	10.71	10.90	10.99	10.79	11.07	10.81	10.94	10.50	11.10
Total	100.57	100.13	101.60	99.40	99.56	100.01	99.16	100.32	99.64	100.29	98.36	100.40
Si	6.16	6.03	6.13	6.10	6.07	6.10	5.88	5.95	5.76	6.13	5.81	5.91
Ti	0.05	0.06	0.05	0.07	0.06	0.12	0.05	0.06	0.05	0.07	0.04	0.07
Al	6.00	5.96	6.06	5.97	5.99	5.99	6.14	6.10	6.30	5.84	6.25	6.23
Fe ²⁺	1.04	1.16	1.00	1.06	1.08	1.00	1.19	1.09	1.22	1.18	1.21	1.05
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01
Mg	1.57	1.64	1.59	1.65	1.64	1.60	1.65	1.71	1.58	1.63	1.65	1.65
Ca	0.15	0.29	0.18	0.22	0.24	0.19	0.30	0.27	0.33	0.26	0.31	0.23
Na	0.52	0.49	0.42	0.49	0.49	0.49	0.47	0.46	0.47	0.49	0.46	0.46
K	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Al (T)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.05	0.24	0.00	0.19	0.09
Al (Z)	6.00	5.96	6.0	5.96	5.99	5.99	6.00	6.00	6.00	5.84	6.00	6.00
Al (Y)	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.07	0.00	0.06	0.13
Mg(Y)	1.57	1.60	1.59	1.61	1.62	1.59	1.65	1.71	1.58	1.47	1.65	1.65
Mg (Z)	0.00	0.04	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00
Mg/Mg+Fe	0.60	0.59	0.62	0.61	0.60	0.61	0.58	0.61	0.56	0.58	0.58	0.61
Xvacancy	0.32	0.22	0.40	0.28	0.26	0.31	0.23	0.27	0.20	0.25	0.23	0.31
Xvacancy+Na	0.84	0.71	0.82	0.77	0.75	0.80	0.70	0.73	0.67	0.74	0.69	0.76
R ₁	0.67	0.78	0.60	0.71	0.73	0.68	0.77	0.73	0.79	0.75	0.76	0.69
R ₂	2.63	2.81	2.60	2.72	2.73	2.62	2.85	2.81	2.82	2.82	2.86	2.71
R ₃	6.06	6.05	6.12	6.06	6.07	6.15	6.21	6.18	6.37	5.93	6.31	6.32
R ₁ +R ₂	3.30	3.59	3.21	3.43	3.46	3.29	3.62	3.54	3.61	3.57	3.63	3.40
Xvacancy/(Xvacancy+Na)	0.38	0.31	0.49	0.36	0.35	0.39	0.33	0.37	0.30	0.34	0.33	0.41
Mg*	2.58	2.75	2.56	2.65	2.66	2.50	2.81	2.76	2.77	2.75	2.82	2.64
Al*	6.10	6.09	6.15	6.10	6.11	6.23	6.24	6.22	6.40	5.98	6.33	6.37
Na*	0.53	0.50	0.42	0.50	0.50	0.50	0.47	0.46	0.50	0.50	0.46	0.46
Na*+Al*	6.63	6.58	6.57	6.60	6.62	6.73	6.71	6.68	6.87	6.47	6.80	6.83
Mg*+Ca	2.73	3.04	2.74	2.87	2.90	2.68	3.10	3.02	3.10	3.01	3.13	2.87
FeO/FeO + MgO	0.54	0.56	0.53	0.53	0.54	0.53	0.56	0.53	0.58	0.56	0.57	0.53
Fe/(Fe + Mg)	0.51	0.54	0.50	0.50	0.53	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.45	0.51
Fe/Mg	0.66	0.71	0.63	0.64	0.66	0.62	0.72	0.64	0.77	0.72	0.73	0.63
Na/(Na + Ca)	0.77	0.63	0.70	0.69	0.67	0.73	0.62	0.63	0.59	0.66	0.60	0.66
Fe + Mg	2.62	2.80	2.59	2.71	2.72	2.61	2.84	2.80	2.80	2.81	2.9	2.7

جدول ۳. داده‌های ریزکاو الکترونی مربوط به بلورهای تورمالین نوع دوم از سامانه پورفیری (برپایه درصدوزنی) به همراه فرمول تجربی (برپایه apfu) برپایه ۳۱ آنیون (OH, O) و آهن کل دو ظرفیتی.

Table 3. Microprobe electron data of the second type tourmaline crystals of porphyry system (at. %) with empirical formula (apfu) based upon a 31 anion (O, OH) and total Fe⁺².

Sample No.	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	Sp7	Sp8	Sp9	Sp10	Sp11	Sp12	Sp13
SiO ₂	38.3	38.1	38.1	37.9	37.9	37.7	38.8	38.1	37.4	38.9	37.9	39.2	38.70
TiO ₂	0.60	0.65	0.76	0.77	0.48	0.43	0.60	0.30	0.85	0.47	0.47	0.37	0.70
Al ₂ O ₃	29.7	30.2	31.0	30.2	27.8	29.8	31.3	31.9	30.5	31.0	31.5	31.8	27.9
FeO	12.00	9.70	9.30	11.2	14.00	11.90	8.70	7.90	10.50	9.20	9.30	7.50	10.30
MnO	0.07	0.06	0.05	0.08	0.07	0.07	0.02	0.06	0.09	0.06	0.07	0.06	0.18
MgO	6.10	7.40	6.70	6.60	6.60	6.30	6.80	6.80	6.40	6.90	7.00	7.20	8.56
CaO	2.00	1.90	1.90	2.00	1.70	1.90	1.80	1.60	2.10	1.80	2.10	1.40	1.51
Na ₂ O	1.47	1.78	1.35	1.36	1.58	1.70	1.46	1.67	1.30	1.41	1.47	1.64	2.07
K ₂ O	0.04	0.09	0.05	0.04	0.04	0.04	0.08	0.01	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05
BaO	0.02	0.01	0.06	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	bdl	0.02	0.02	bdl	bdl
B ₂ O ₃	10.84	10.89	10.87	10.87	10.69	10.77	10.97	10.87	10.78	10.97	10.94	11.02	10.85
Total	101.12	100.57	100.08	101.25	100.86	100.61	100.53	99.21	99.97	100.77	100.80	100.23	100.82
Si (apfu)	6.14	6.07	6.08	6.05	6.16	6.07	6.14	6.09	6.03	6.15	6.02	6.18	6.20
Ti	0.07	0.08	0.09	0.09	0.06	0.05	0.07	0.04	0.10	0.06	0.06	0.04	0.08
Al	5.61	5.67	5.84	5.69	5.32	5.66	5.84	6.01	5.79	5.78	5.10	5.91	5.27
Fe ²⁺	1.61	1.29	1.24	1.50	1.90	1.60	1.15	1.06	1.42	1.22	1.24	0.99	1.38
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Mg	1.46	1.76	1.60	1.57	1.60	1.51	1.61	1.62	1.54	1.63	1.66	1.70	2.04
Ca	0.34	0.32	0.33	0.34	0.30	0.33	0.31	0.28	0.36	0.31	0.36	0.24	0.26
Na	0.46	0.55	0.42	0.42	0.50	0.53	0.45	0.52	0.41	0.43	0.45	0.50	0.64
K	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Al (T)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al (Z)	5.61	5.67	5.84	5.69	5.32	5.66	5.84	6.00	5.79	5.78	5.90	5.91	5.27
Al (Y)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg(Y)	1.06	1.46	1.43	1.26	0.92	1.17	1.44	1.62	1.33	1.41	1.56	1.60	1.31
Mg (Z)	0.39	0.33	0.17	0.31	0.68	0.34	0.16	0.00	0.21	0.22	0.10	0.09	0.74
Mg/Mg+Fe	0.48	0.58	0.56	0.51	0.46	0.49	0.58	0.61	0.52	0.57	0.57	0.63	0.60
X- vacancy	0.19	0.11	0.15	0.23	0.2	0.13	0.23	0.21	0.22	0.25	0.18	0.25	0.8
X- vacancy+Na	0.65	0.66	0.57	0.65	0.70	0.66	0.68	0.73	0.63	0.68	0.63	0.75	1.44
R ₁	0.80	0.87	0.74	0.76	0.794	0.86	0.75	0.79	0.77	0.74	0.81	0.74	0.91
R ₂	3.07	3.06	2.84	3.08	3.51	3.13	2.76	2.68	2.97	2.85	2.90	2.69	3.45
R ₃	5.70	5.77	5.96	5.81	5.40	5.73	5.93	6.05	5.93	5.85	5.97	5.96	5.38
R ₁ +R ₂	3.87	3.93	3.59	3.84	4.30	3.98	3.51	3.47	3.73	3.59	3.71	3.43	4.35
Xvacancy/(Xvacancy+Na)	0.29	0.17	0.26	0.35	0.29	0.20	0.34	0.29	0.35	0.37	0.28	0.33	0.55
Mg*	3.00	2.98	2.75	2.99	3.45	3.04	2.69	2.65	2.86	2.80	2.85	2.64	2.36
Al*	5.75	5.83	6.01	5.87	5.44	5.76	5.98	6.08	6.00	5.89	6.01	5.99	6.43
Na*	0.47	0.57	0.43	0.43	0.51	0.54	0.46	0.52	0.42	0.44	0.46	0.51	0.65
Na*+Al*	6.22	6.39	6.45	6.30	5.95	6.30	6.45	6.60	6.42	6.33	6.47	6.50	6.09
Mg*+Ca	3.34	3.30	3.08	3.33	3.75	3.40	2.99	2.92	3.23	3.10	3.20	2.88	3.62
FeO/FeO + MgO	0.66	0.57	0.58	0.63	0.68	0.65	0.56	0.54	0.62	0.57	0.57	0.51	0.55
Fe/(Fe + Mg)	0.15	0.70	0.16	0.92	0.99	0.23	0.34	0.46	0.58	0.50	0.98	0.50	0.50
Fe/Mg	3.06	3.05	2.84	3.7	3.50	3.12	2.76	2.67	2.95	2.84	2.89	2.68	0.64
Na/(Na + Ca)	0.57	0.63	0.56	0.55	0.63	0.62	0.54	0.65	0.53	0.59	0.56	0.68	0.71
Fe + Mg	3.06	3.05	2.84	3.07	3.50	3.12	2.76	2.67	2.95	2.84	2.89	2.68	3.42

جدول ۴. داده‌های ریزکاوا الکترونی مربوط به بلورهای تورمالین نوع سوم از سامانه برشی گرمایی به همراه فرمول تجربی (برپایه apfu) برپایه ۳۱ آنیون (OH, O) و آهن کل دو ظرفیتی.

Table 4. Microprobe electron data of the third type tourmaline crystals of epithermal system with empirical formula (apfu) based upon a 31 anion (O, OH) and total Fe⁺².

Point No.	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	Sp7	Sp8	Sp10	Sp10	Sp11
SiO ₂	40.10	39.2	39.8	39.20	40.30	40.30	40.40	40.60	40.70	41.10	41.00
TiO ₂	0.47	0.98	0.32	0.63	1.10	0.37	0.77	0.67	0.47	0.31	0.29
Al ₂ O ₃	35.00	31.0	35.8	32.6	31.5	34.9	32.5	33.5	33.8	34.6	35.2
FeO	3.23	5.58	2.80	5.57	5.18	3.49	5.08	5.27	4.58	3.74	3.46
MnO	0.19	0.11	0.15	0.18	0.10	0.15	0.17	0.12	0.20	0.27	0.13
MgO	8.07	8.52	7.69	7.85	9.01	7.74	7.75	7.04	7.42	7.47	7.53
CaO	0.04	0.32	0.06	0.16	0.30	0.08	0.17	0.11	0.11	0.05	0.01
Na ₂ O	2.26	2.66	2.22	2.60	2.49	2.45	2.45	2.60	2.32	2.11	1.88
K ₂ O	0.03	0.11	0.03	0.05	0.05	0.03	0.06	0.08	0.03	0.02	0.03
BaO	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.05	0.01	0.01	bdl	0.02	0.03
B ₂ O ₃	11.35	11.01	11.32	11.08	11.25	11.35	11.21	11.30	11.30	11.38	11.40
Total	100.74	99.45	100.19	99.92	101.28	100.86	100.56	101.36	100.93	101.05	100.93
Si (apfu)	6.14	6.19	6.10	6.14	6.22	6.16	6.26	6.26	6.25	6.27	6.25
Ti	0.05	0.12	0.04	0.07	0.13	0.04	0.09	0.08	0.05	0.04	0.03
Al	6.31	5.77	6.47	6.01	5.73	6.29	5.93	5.94	6.12	6.22	6.32
Fe ²⁺	0.41	0.74	0.36	0.73	0.67	0.45	0.66	0.66	0.59	0.48	0.44
Mn	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02
Mg	1.84	2.00	1.76	1.83	2.08	1.77	1.79	1.80	1.70	1.70	1.71
Ca	0.01	0.05	0.01	0.03	0.05	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00
Na	0.67	0.81	0.66	0.79	0.75	0.73	0.74	0.76	0.69	0.62	0.56
K	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Al (T)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al (Z)	6.00	5.77	6.00	6.00	5.73	6.00	5.93	5.94	6.00	6.00	6.00
Al (Y)	0.31	0.00	0.47	0.01	0.00	0.29	0.00	0.00	0.12	0.22	0.32
Mg(Y)	1.84	1.77	1.76	1.83	1.80	1.77	1.72	1.70	1.70	1.70	1.71
Mg (Z)	0.00	0.24	0.00	0.00	0.28	0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00
Mg/Mg+Fe	0.82	0.73	0.83	0.72	0.76	0.80	0.73	0.73	0.74	0.78	0.79
X vacancy	0.31	0.11	0.32	0.17	0.19	0.25	0.21	0.20	0.28	0.36	0.44
Xvacancy+Na	0.98	0.92	0.98	0.96	0.94	0.98	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99
R ₁	0.68	0.89	0.68	0.83	0.81	0.75	0.78	0.79	0.72	0.64	0.56
R ₂	2.28	2.76	2.14	2.58	2.75	2.23	2.47	2.48	2.31	2.21	2.17
R ₃	6.39	5.92	6.52	6.11	5.90	6.34	6.05	6.04	6.19	6.27	6.36
R ₁ +R ₂	2.96	3.63	2.81	3.40	3.55	2.97	3.23	3.26	3.02	2.84	2.72
Xvacancy/(Xvacancy+Na)	0.32	0.12	0.33	0.18	0.20	0.26	0.22	0.21	0.29	0.37	0.44
Mg*	2.23	2.64	2.10	2.50	2.62	2.19	2.38	2.40	2.26	2.18	2.14
Al*	6.42	6.00	6.54	6.16	5.98	6.37	6.11	6.09	6.23	6.29	6.39
Na*	0.68	0.84	0.67	0.80	0.76	0.73	0.74	0.77	0.70	0.63	0.56
Na*+Al*	7.10	6.83	7.21	6.96	6.74	7.11	6.86	6.86	6.92	6.92	6.95
Mg*+Ca	2.23	2.69	2.11	2.54	2.67	2.20	2.41	2.42	2.28	2.18	2.14
FeO/FeO + MgO	0.29	0.40	0.27	0.42	0.37	0.31	0.40	0.40	0.38	0.33	0.31
Fe/(Fe + Mg)	0.47	0.40	0.48	0.44	0.47	0.44	0.44	0.46	0.53	0.44	0.52
Fe/Mg	0.22	0.38	0.20	0.40	0.32	0.25	0.37	0.37	0.35	0.28	0.26
Na/(Na + Ca)	0.99	0.94	0.99	0.97	0.94	0.98	0.96	0.98	0.97	0.99	0.99
Fe + Mg	2.25	2.74	2.12	2.56	2.74	2.21	2.45	2.47	2.29	2.18	2.15

bdl: below detection limit

R₁=Na+K+Ca

R₂=Mg+Fe⁺²+Mn+Fe⁺³+Cr+V+Ti+Al

R₃=Al+Fe⁺³+Mg+1.33Ti

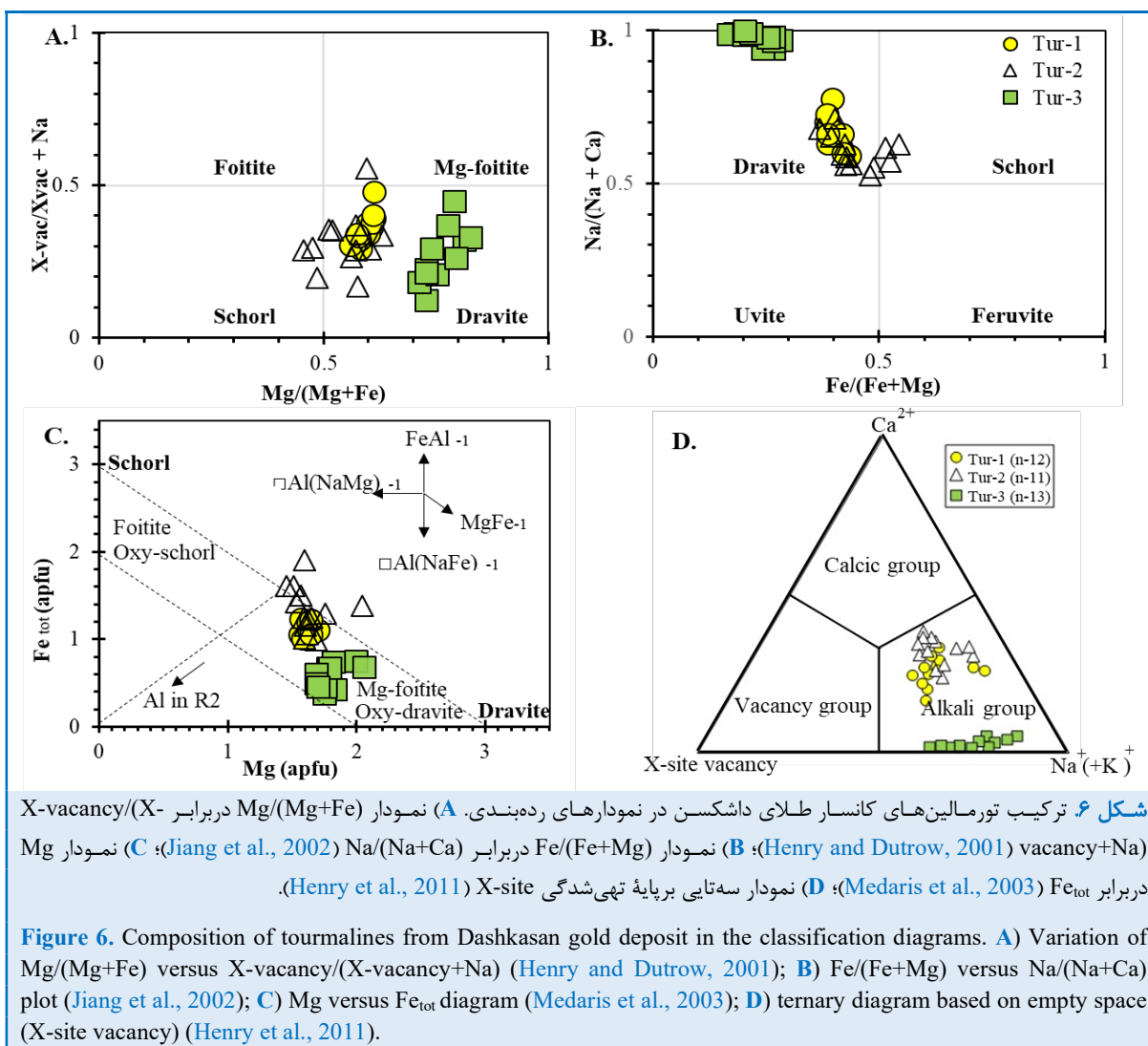
ب- تغییرات ترکیب شیمیایی در تورمالین‌ها

برای بررسی تغییرات ترکیبی در عنصرهای Fe, Mg, Na و Ca و شناسایی نوع تورمالین‌ها، نمودار دوتایی نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ در برابر $X-vacancy/(X-vacancy+Na)$ به کار برده شد (Henry and Dutrow, 2001). در این نمودار تورمالین‌های نوع اول و سوم در محدوده دراویت، و نوع دوم در قلمروی دراویت تا شورل جای گرفتند. همچنین، یک نمونه از نوع اخیر در محدوده فوییتیت منیزیم دار جانمایی شده است (شکل ۶- A). نمودار دوتایی نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ در برابر $Na/(Na+Ca)$ (Jiang et al., 2002) نیز ترکیب تورمالین‌ها را تأیید می‌کند (شکل ۶- B). در این نمودار، تورمالین‌های نوع اول و دوم در مقایسه با نمونه‌های تورمالینی نوع سوم میزان Fe بالاتری دارند.

در محاسبات داده‌های ریزکاو الکترونی، Fe_{tot} به صورت Fe^{2+} در نظر گرفته می‌شود؛ اما Fe^{3+} چه‌بسا در جایگاه‌های Z و Y تورمالین نیز وجود داشته باشد (Yavuz et al., 2008). برای بررسی وضعیت جانیشینی در جایگاه Y، نمودار تغییرات Fe_{tot} در برابر Mg (شکل ۶- C) به کار برده شد. در این نمودار، تورمالین با ترکیب شورل- دراویت روی خط $\Sigma(Fe+Mg)=3$ جای می‌گیرد و در زیر خط ۳ پدیده جانیشینی Al در مکان اکتاهدرال Y رخ می‌دهد، یا به گفته دیگر، میزان Al در R_2 افزایش می‌یابد. هرچه مقدار $\Sigma(Fe+Mg)$ کمتر باشد، جانیشینی Al در جایگاه Y بیشتر می‌شود (London and Manning, 1995). برپایه این نمودار، همه تورمالین‌های نوع اول و سوم داشکسن در زیر خط ترکیبی شورل- دراویت جای گرفتند و تورمالین‌های نوع دوم هم‌راستایی با بردار $MgFe_{-1}$ نشان می‌دهند. پراکندگی داده‌های تورمالین‌های نوع دوم نشان می‌دهند جایگزینی‌های $Al(NaFe)_{-1}$ و $Al(NaMg)_{-1}$ در نمونه‌های نوع دوم دیده می‌شوند (شکل ۶- C). آنچه از این نمودار بر می‌آید اینست که میزان جانیشینی Al در جایگاه Y

نمونه‌های نوع دوم که کمترین مقدار $\Sigma(Fe+Mg)$ را نسبت به دو نوع دیگر دارند، بیشتر است. این نکته خود گویای نقش آشکار Al در هنگام رشد گونه دوم تورمالین‌هاست. شاید بتوان گفت تورمالین‌های نوع اول و سوم با جانیشینی Al در جایگاه Y و حضور عنصرهای Na و Mg، ترکیب دراویت دارند؛ اما ترکیب تورمالین‌های نوع دوم با جانیشینی Mg بیشتر نسبت به میزان Fe، از دراویت به شورل گرایش پیدا کرده است. از این رو، با توجه به واکنش‌های جانیشینی، تورمالین‌های داشکسن روند تهی‌شدگی از آهن و غنی‌شدگی منیزیم نشان می‌دهند. نمودار سه‌تایی برپایه میزان K, Na, Ca و فضای خالی X-site vacancy، نشان‌دهنده رده‌بندی سه نوع تورمالین‌های قلیایی، کلسیک و تورمالین‌هایی با جایگاه X خالی، است (Hawthorne and Henry, 1999). برپایه آن، تورمالین‌های کانسار داشکسن در قلمروی تورمالین‌های قلیایی جای می‌گیرند (شکل ۶- D)؛ هرچند دو نوع اول و دوم اندکی به قطب گروه کلسیک گرایش دارند. این نکته نشان‌دهنده بالابودن مقدار سدیم و پتاسیم در مقایسه با میزان کلسیم موجود در جایگاه X برای تورمالین‌های نوع سوم است. بر خلاف تورمالین‌های نوع اول و دوم، تفاوت چشمگیری در مقدار کمبود در جایگاه X نمونه‌های تورمالین نوع سوم دیده می‌شود (شکل ۶- B).

در نمودار سه‌تایی $Mg-Ca-Fe_{tot}$ ، ترکیب و خاستگاه تورمالین‌های داشکسن از دیدگاه سنگ‌شناسی و غنی‌شدگی یا تهی‌شدگی از عنصرهای فرومنیزین بررسی شد (Henry and Guidotti, 1985). تصویرکردن داده‌ها روی این نمودار نشان می‌دهد تورمالین‌های بررسی‌شده، در میان دو قطب غنی از آهن و منیزیم و در گستره ترکیبی متاپسامیت و متاپلیت‌های فقیر از کلسیم و سنگ‌های کوارتز- تورمالین‌دار جای می‌گیرند (شکل ۷- A). در این میان، تورمالین‌های نوع سه، تمرکز بیشتری در نیمه وابسته به دراویت در نمودار سه‌تایی دارند.

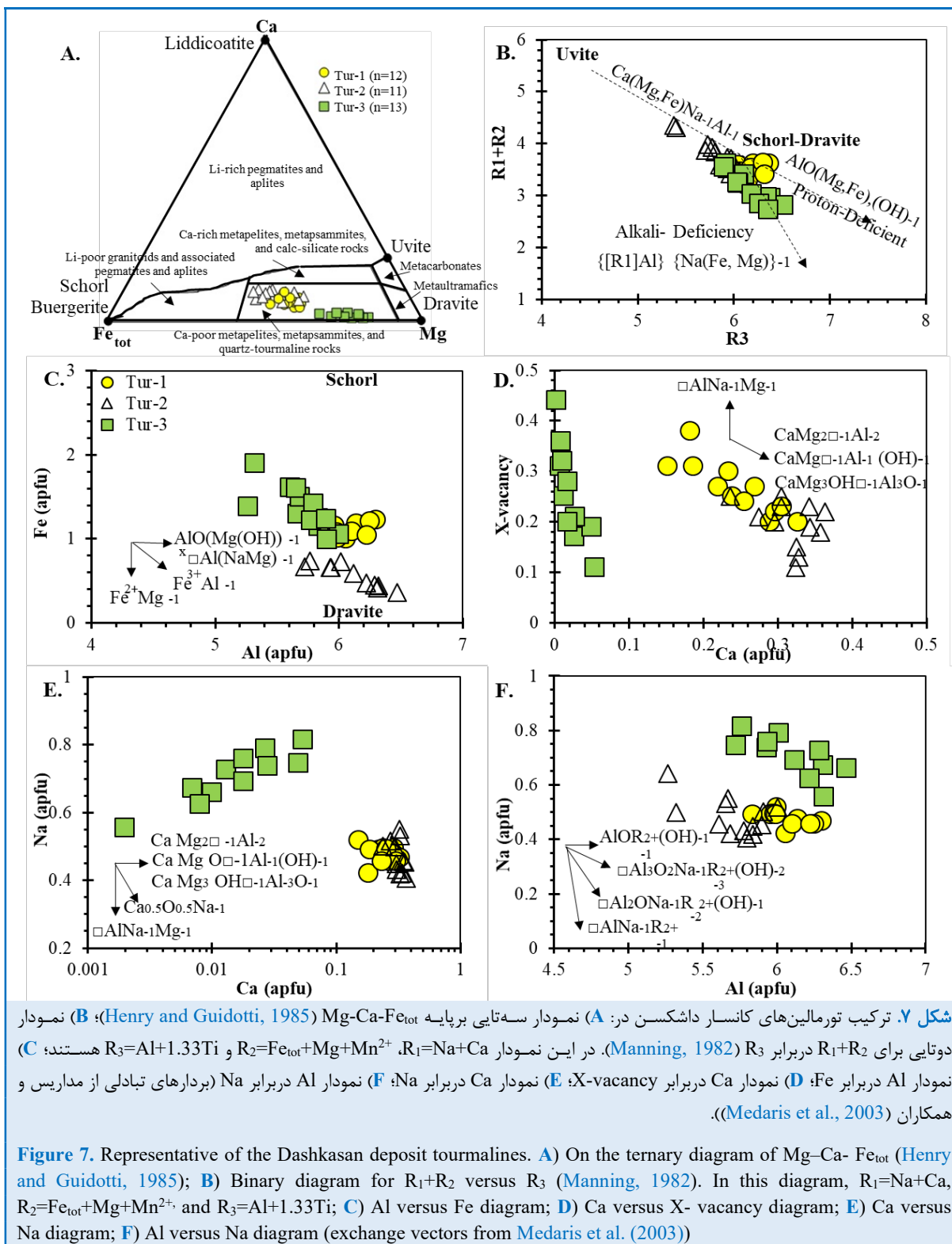


در ترکیب شیمیایی تورمالین، واکنش‌های تبدیلی میان ظرفیت‌های همانند یا متغیر (مانند جانشینی ${}^YFe^{2+} \leftrightarrow {}^YMg^{2+}$ در جایگاه Y) دیده می‌شود (شکل ۷). رسم نمونه‌های تورمالین داشکسن در نمودار Fe نسبت به Al ، یک برآزش خطی وارون را نشان می‌دهد و این آرایه بیشترین سازگاری را با جانشینی $Fe^{3+}Al_{-1}$ دارد (شکل ۷-۷C) و نشان‌دهنده درجه کم جانشینی و حضور Al است. در نمودار Ca در برابر $X\text{-vacancy}$ ، دو روند متفاوت دیده می‌شود. تورمالین‌های مربوط به سامانه پورفیری (نوع اول و دوم) جانشینی عنصرهای آلومینیم و منیزیم را با کلسیم نشان

به‌طور کلی، تورمالین‌ها می‌توانند سه روند مایل به سمت یووايت، یعنی جانشینی $Ca (Fe, Mg)$ $Al_{-1}(Na, Al)$ ، نقص آلکالی (تهی‌شدگی قلیایی)، یعنی گرایش به جانشینی $Al_{-1}(Na(Fe, Mg))$ و نقص پروتونی (پروتون‌زدایی)، یعنی گرایش به جانشینی $Al_{-1}(O(R_2)OH)$ را نشان دهند یا اینکه در فاصله میان این روندها جای گیرند (Manning, 1982). جایگاه تورمالین‌های داشکسن روی نمودار R_3 در برابر R_1+R_2 (شکل ۷-۷B) نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی تورمالین‌ها از شورل به سوی دراویت، تهی‌شدگی قلیایی‌ها افزایش می‌یابد و جانشینی Al با نقص آلکالی همراه است.

دارند و جانشینی Al ، Na و Mg را در موقعیت خالی X نشان می‌دهند (شکل ۷- D).

می‌دهند؛ اما تورمالین‌های نوع سوم که مربوط به پهنهٔ برش گرمایی هستند، کمترین میزان کلسیم را

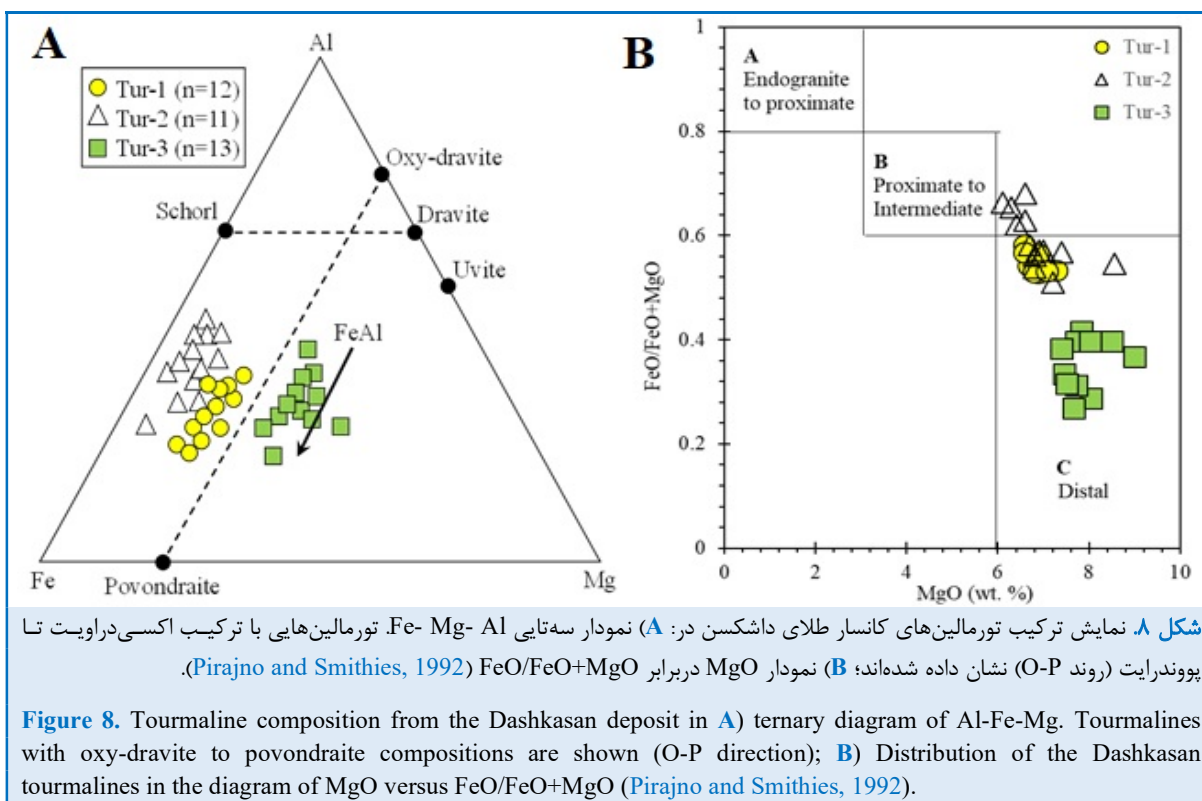


تورمالین‌های نوع اول و دوم است. همچنین، کم‌بودن مقدار Al در تورمالین‌های نوع سوم ویژگی گرمایی را نشان می‌دهد؛ اما کم‌تر بودن مقدار Fe^{+2} نسبت به Mg در هر سه نوع گویای نقش سیال‌های گرمایی در پیدایش تورمالین‌هاست (Cavarretta and Puxeddu, 1990). در نمودار سه‌تایی Al-Fe-Mg (Henry and Dutrow, 2012)، تورمالین‌های داشکسن از روند O-T (اکسی‌دراوایت- پروندرایت) پیروی می‌کنند (شکل ۸- A). چنین تورمالین‌هایی هم‌راستای بردار FeAl_2 هستند. جانشینی کاتیونی Fe^{3+} بجای Al نشان‌دهنده شرایط اکسیدی در زمان پیدایش این نوع تورمالین‌هاست (Henry and Dutrow, 2012). به باور دوترو و هنری (Dutrow and Henry, 2018)، تورمالین‌هایی که در مناطق برشی پدید می‌آیند افزایش نفوذپذیری، با نفوذ سیال‌های سدیم و بوردار همراه بوده است. مقدار بالای سدیم تورمالین‌های نوع سوم که در پهنه گسلی پدید آمده‌اند نیز آن را تایید می‌کند. نسبت بالای $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ در تورمالین‌ها (از ۰/۸ تا ۱) نشان‌دهنده بسته‌بودن سامانه ماگمایی، درون گرانیتوئید، نبود دخالت سیال خارجی و نبود آرایش آنها با رسوب‌های غنی از آلومینیم است. چنانچه این نسبت برابر با ۰/۶ تا ۰/۸ باشد نشان‌دهنده تورمالین‌هایی است که در نزدیکی توده نیمه‌ژرف آذرین هستند و اختلاط سیال ماگمایی و گرمایی را نشان می‌دهند. اگر این نسبت از ۰/۶ کمتر باشد نشان‌دهنده تورمالین‌های دور از توده نیمه‌ژرف است و گواهی بر خاستگاه خارجی بور و وجود سامانه گرمایی است (Pirajno and Smithies, 1992). این نسبت در تورمالین‌های نوع اول و دوم به‌طور میانگین، نزدیک به ۰/۶ است و نشان‌دهنده پیدایش این تورمالین‌ها هنگام رخداد اختلاط سیال ماگمایی و گرمایی است. در تورمالین‌های نوع سوم این نسبت برابر با ۰/۴ است و از این‌رو، نشانه دخالت حجم بالایی از آب‌های جوی هنگام پیدایش آنها در سامانه گرمایی است (شکل ۸- B).

در نمودار تغییرات کلسیم در برابر سدیم (شکل ۷- E)، تورمالین‌های نوع اول و دوم تا اندازه‌ای غنی‌شدگی سدیم و کلسیم ($0.36 - 0.15 \text{ apfu}$) نشان می‌دهند؛ اما تورمالین‌های نوع سوم کلسیم کمتری ($Ca < 0.1 \text{ apfu}$) دارند. روند افزایشی در تورمالین‌های نوع سوم نشان‌دهنده نبود جانشینی Ca و Na در این نمونه‌هاست (شکل ۷- E). توزیع نقاط تورمالین نوع سوم در نمودار Al در برابر Na نشان می‌دهد جانشینی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Na}-\text{R}_2+(\text{OH})_2$ مهم است و نشان‌دهنده پیدایش فضای تهی در جایگاه X است (شکل ۷- F)؛ اما جایگزینی‌ها در دو نوع دیگر متفاوت است. این بدان معناست که جانشینی‌ها در تورمالین‌های نوع اول به موازات بردار $\text{AlOR}_2+(\text{OH})_1$ و در تورمالین‌های نوع دوم با روند $\text{Al}_2\text{ONa}-\text{R}_2+(\text{OH})_1$ روی می‌دهند (شکل ۷- F).

ترکیب تورمالین‌های نوع اول در فاصله میان دو بردار تهی‌شدگی قلیایی و پروتون‌زدایی جای گرفته است که چه‌بسا گویای سرشت ماگمایی آنهاست؛ اما تورمالین‌های نوع دوم و سوم به‌سوی بخش بیرونی بردارها کشیده شده‌اند که این ویژگی از ویژگی‌های تورمالین‌های گرمایی است. تورمالین‌های داشکسن محتوای قلیایی بالایی دارند. برپایه جانشینی‌های کاتیونی، تورمالین‌های نوع سوم بر خلاف دو نوع اول و دوم که به تورمالین‌های کلسیکی گرایش دارند در جایگاه X آنها، مقدار سدیم و پتاسیم نسبت به مقدار کلسیم بیشتر است. چنین تورمالین‌های قلیایی عموماً در شرایط اسیدی و دمای کم پدید می‌آیند (Rosenberg and Foit, 1979; Collines, 2010).

نسبت $\Sigma(\text{Fe}/\text{Mg})$ در تورمالین‌های نوع اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۰/۶۸ و ۲/۸۲ است و میزان Al آنها در جایگاه اکتاهدری Y بالاست. نسبت $\Sigma(\text{Fe}/\text{Mg})$ نوع سوم به میزان ۰/۳۰ و مقدار Al در آنها کمتر است و کاستی کمتری در جایگاه X نشان می‌دهند. مقدار Mg و نسبت $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ در تورمالین نوع سوم کمتر از دو نوع دیگر است. ناهمخوانی میان Fe^{+2} و Mg نشان‌دهنده تأثیر شاره‌های ماگمایی در پیدایش



درگیر سه‌فازی، شمار آنها اندک بود و احتمال داشت ثانویه باشند، از بررسی ریزدماسنجی آنها چشم‌پوشی شد. برپایه سنگ‌نگاری و از دیدگاه اجتماع سیال‌های درگیر^۷، بیشتر سیال‌های درگیر دوفازی L+V همراه سیال‌های درگیر تک‌فازی مایع (L) و گاز (V) و به‌ندرت همراه سیال‌های درگیر سه‌فازی L+V+S دیده شدند. تصویرهایی از سیال‌های درگیر در شکل ۹ آورده شده‌اند.

ب- ریزدماسنجی

برای تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز، بررسی سیال‌های درگیر روی کانی‌های کوارتز همزاد با تورمالین در رگه‌های کوارتز-تورمالین-پیریت انجام شد. از این‌رو، بررسی روی پانزده سیال درگیر اولیه (P) با موقعیت منفرد و درون‌دانه‌ای که همگی از نوع دوفازی (L+V) بودند، متمرکز بوده است. همه سیال‌ها در زمان دماسنجی به فاز مایع همگن شدند

بررسی سیال‌های درگیر

الف- سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر

برای تعیین دما، سیال‌های درگیر در کانی کوارتز درون رگه‌های کوارتز-تورمالین-پیریت (نسل اول رگه‌ها) بررسی شدند. سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر اولیه نشان می‌دهد این میانبارها به‌صورت جداگانه^۵ و گاه خوشه‌ای^۶ به شکل‌های چندضلعی، سه‌گوش، بیضوی، کشیده، میله‌ای، نامنظم و بی‌شکل دیده می‌شوند و اندازه آنها از ۵ تا ۴۰ میکرون در تغییر است. هرچند سیال‌های درگیر با شکل منفی‌بلور در کوارتزهای همراه با تورمالین نیز به‌ندرت دیده می‌شوند. برپایه شمار فازهای موجود در دمای اتاق، چهار گروه سیال درگیر در کانی کوارتز شناسایی شدند که شامل سیال‌های درگیر دوفازی مایع+گاز (L+V)، سه‌فازی مایع+گاز+هالیت (L+V+S) و تک‌فازی مایع (L) و تک‌فازی گاز (V) هستند. از آنجایی که افزون‌بر پراکندگی سیال‌های

⁷ Fluid Inclusion Assemblage

⁵ Isolate

⁶ Cluster

است. دمای همگن شدن در این سیال‌های درگیر از ۱۸۵ تا ۲۵۴ درجه سانتیگراد (میانگین: ۲۲۵ درجه سانتیگراد) در تغییر است (شکل ۱۰- A). گفتنی است در شمار کمی از سیال‌های درگیر نوع L+V، فاز CO₂ تشخیص داده شد که در دمای نزدیک به ۵۸/۸- درجه سانتیگراد ذوب شد. از آنجایی که دی‌اکسید کربن خالص نقطه ذوب کمی (۵۶/۶- درجه سانتیگراد) دارد (Burruss, 1981)؛ این دمای ذوب در سیال‌های درگیر کانسار داشکسن احتمالاً نشان‌دهنده حضور ترکیب‌های گازی دیگر مانند CH₄، H₂S یا N₂ است.

(جدول ۵). دمای ذوب نخستین یخ یا دمای یوتکتیک (T_{fm}) برای این نوع سیال‌های درگیر از ۵۲/۶- تا ۵۳/۶- درجه سانتیگراد متغیر است. این مقادیر دمایی، با حضور نمک‌های H₂O-MgCl₂·CaCl₂ در ترکیب سیال گرمایی سازنده کانسار داشکسن همخوانی دارد (Van den Kerkhof and Hein, 2001). همچنین، مقدار دمای ذوب نهایی یخ (T_{mice}) در این سیال‌های درگیر از ۱۲- تا ۱۲/۹- درجه سانتیگراد متغیر است که با شوری از ۱۵/۹ تا ۱۶/۸ درصدوزنی (میانگین: ۱۶/۵) (معادل نمک طعام wt% NaCl_{eq}) معادل



شکل ۹. A، B) تصاویرهای میکروسکوپی از سیال‌های درگیر دوفازی (مایع+گاز)؛ C) سه فازی (مایع+گاز+جامد)، در میزبان بلورهای کوارتز در رگه کوارتز- تورمالین- پیریت کانسار داشکسن.

Figure 9. A, B) Microscopic photographs of two phases of fluids inclusions (liquid+ gas); C) Three phases (liquid+ gas+ solid) in the host of quartz crystals in the quartz-tourmaline-pyrite vein of the Dashkasan deposit.

جدول ۵. داده‌های ریزسنجی سیال‌های درگیر اولیه در کانی کوارتز از رگه‌های کوارتز- تورمالین- پیریت کانسار داشکسن.

Table 5. Microthermometric results of primary fluid inclusions in quartz mineral of quartz- tourmaline- pyrite veins from the Dashkasan deposit.

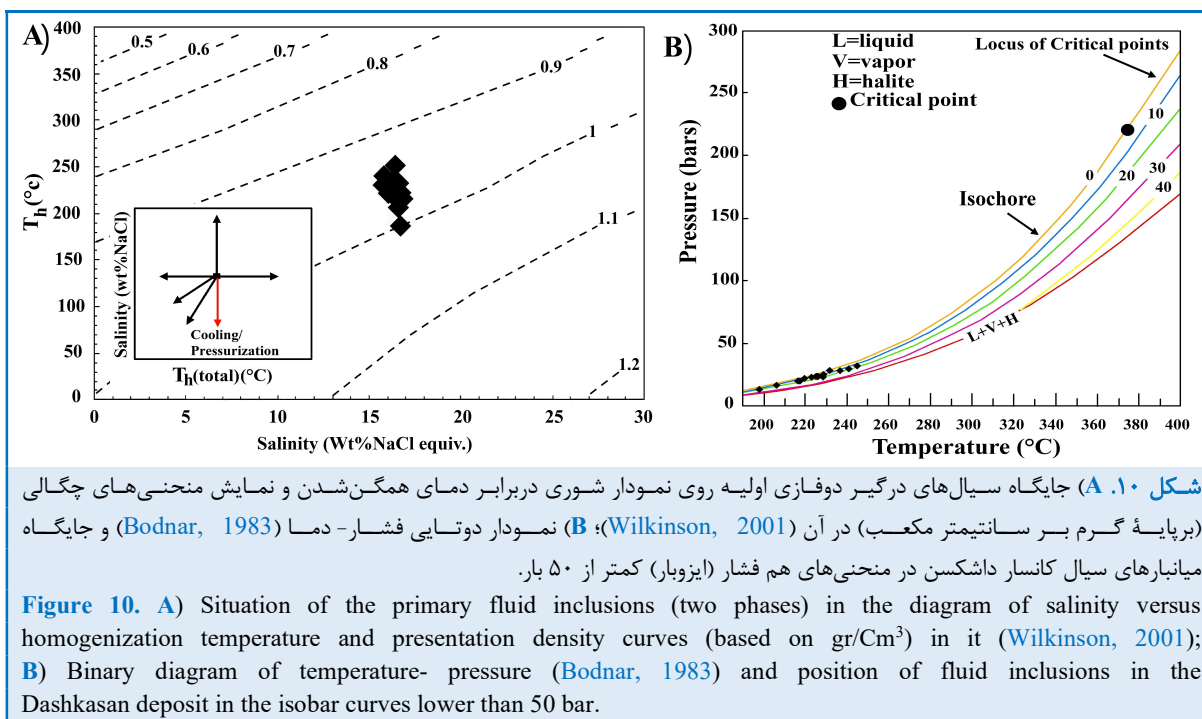
F.I type	T _{mice} (°C)	Te (°C)	Th (°C)	Salinity (wt.% NaCl eq.)	Density (g/cm ³)
L+V	- 12.3	- 53.6	238	16.24	0.95
L+V	- 12.4	- 52.7	225	16.33	0.96
L+V	- 12.1	- 52.9	242	16.05	0.95
L+V	- 12.7	- 53.4	250	16.61	0.94
L+V	- 12.5	- 53.0	218	16.42	0.97
L+V	- 12.4	- 53.6	226	16.33	0.96
L+V	- 12.0	- 53.5	230	15.95	0.95
L+V	- 12.5	- 53.4	225	16.42	0.96
L+V	- 12.8	- 53.3	218	16.40	0.97
L+V	- 12.9	- 53.4	189	16.79	1.00
L+V	- 12.8	- 52.9	208	16.70	0.98
L+V	- 12.7	- 52.6	230	16.61	0.96
L+V	- 12.6	- 53.1	221	16.51	0.97
L+V	- 12.2	- 53.0	224	16.14	0.96
L+V	- 12.0	- 53.4	235	15.95	0.95

است (White and Hedenquist, 1995; Hedenquist et al., 2000). اگر در سیال‌های درگیر جوشش رخ داده باشد نیازی به تصحیح فشار نیست و دمای همگن‌شدن با دمای پیدایش کانسار برابر است (Roedder and Bodnar, 1980). همراه‌بودن برش داسیتی با واحد داسیت پورفیری چه‌بسا نشان‌دهنده پیدایش برش گرمابی در ژرفای کم است. در کانسار طلای داشکسن وجود حجم بزرگی از کانسنگ برشی گرمابی و همچنین، همزادی سیال‌های درگیر غنی از بخار و غنی از مایع، از شواهد مهم رخداد جوشش هستند که برای اثبات آنها به شمار نقاط اندازه‌گیری بیشتری نیاز است. در این پژوهش، نمودار پیشنهادی بودنار (Bodnar, 1983) برای سنجش فشار برپایه مقادیر شوری و دمای همگن‌شدن نهایی به‌کار برده شد. برپایه نمودار دمای همگن‌شدن (برپایه °C) در برابر فشار (برپایه بار) و تصویرکردن مقدار سیال‌های درگیر روی آن، سیال کانه‌ساز از ۲۰ تا ۴۵ بار (معادل ژرفای کمتر از ۱ کیلومتر) پدید آمده است که این ویژگی با شرایط پیدایش کانسارهای اپی‌ترمال طلا سازگار است (شکل ۱۰- B).

پ- تعیین چگالی و تخمین شرایط فشار سیال

چگالی سیال‌های دوفازی موجود در کوارتز با برنامه فلینکور^۸ و همچنین، با به‌کارگیری نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدن (Bodnar, 1983) به‌دست آورده شد (شکل ۱۰- A). چگالی به‌دست‌آورده‌شده در سیال‌های درگیر از ۰/۹۴ تا ۱ گرم بر سانتیمتر مکعب، در تغییر است. به طور کلی، میانگین چگالی در سیال‌های درگیر برابر با ۰/۹۷ g/cm³ به‌دست آمد. کاهش دمای همگن‌شدن سیال‌های درگیر همزمان با ثابت‌ماندن مقدار شوری یک روند خطی نشان می‌دهد (شکل ۱۰- A). پدیده افزایش چگالی با کاهش دما تحت‌تأثیر پدیده جوشش سیالی با چگالی بیشتر را پدید می‌آورد. در نمودار دما در برابر شوری سیال‌های درگیر (Shepherd et al., 1985)، روند خطی به‌سوی کاهش دما چه‌بسا به سردشدن سیال با شوری ثابت در بازه زمانی کوتاه اشاره می‌کند (شکل ۱۰- A). همزیستی سیال‌های درگیر غنی از فاز مایع و غنی از گاز، حضور کلسدون، کوارتز ریز بلور، کلسیت تیغه‌ای، بافت کلوform و برشی‌شدن از نشانه‌های رخداد فرایند جوشش در سیال‌های درگیر

⁸ Flincor



خاستگاه و تحول سیال کانه‌ساز

دست کم چهار خاستگاه برای سیال‌های گرمایی کانه‌دار در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود:

- (۱) سیال‌های گرمایی خاستگاه‌گرفته از توده‌های آذرین درونی ژرف (Bodnar, 1995)؛
- (۲) سیال‌های گرمایی خاستگاه‌گرفته از آب‌های دریایی شور (Hanor, 1994)؛
- (۳) انحلال هالیت و سیال‌های به‌دام‌افتاده در افق‌های سنگ بستر منطقه (Fontes and Matray, 1993)؛
- (۴) سیال‌های گرمایی ناشی از آبدایی کانی‌ها هنگام رخداد واکنش‌های دگرگونی (Svensen et al., 1999; Markl et al., 1998).

رخداد فرایندهای اختلاط^۹ و کاهش دما در پی رقیق‌شدگی سطحی سیال^{۱۰}، کاهش ناگهانی فشار^{۱۱} و رخداد جوشش^{۱۲}، شرایط خوبی را برای ناپایداری کمپلکس‌های فلزی به‌ویژه بی‌سولفیدهای طلا و نقره و کلریدهای سرب، مس و اورانیم فراهم می‌کنند. با وجود این، ته‌نشینی عنصرهای فلزی مختلف به محتوای فلزی و غلظت کمپلکس‌های کلروری و سولفور در محیط بستگی دارد (Boiron et al., 2010). در نمودار دمای همگن‌شدن نهایی در برابر شوری (شکل ۱۰-A) و مقایسه آن با روندهای مختلف تحول سیال (مانند جوشش، اختلاط با آب‌های رقیق، فشارزدایی و مانند آن) پیشنهادی ویلکینسون (Wilkinson, 2001)، گمان می‌رود رگه‌های کوارتز-تورمالین-پیریت کانسار داشکسن در پی فشارزدایی ناگهانی محیط هنگام ورود سیال به فضایی ناپیوسته و کاهش دما با شوری ثابت پدید آمده‌اند (شکل ۱۰). پدیده فشارزدایی هنگامی روی می‌دهد که سیال گرمایی کانه‌دار در پی رخداد شکستگی/گسلش ناگهانی یا کاهش وزن طبقات بالایی، به یکباره از شرایط لیتواستاتیک (با گرادیان ۲۷ مگاپاسکال در کیلومتر) وارد شرایط هیدرواستاتیک (با

گرادیان ۱۰ مگاپاسکال در کیلومتر) شود (Driesner and Heinrich, 2007). در این شرایط بسیاری از سنگ‌های میزبان آتشفشانی در پی این کاهش ناگهانی فشار شکسته می‌شوند و به‌صورت قطعات برشی زاویه‌دار متشکل از داسیت و ریوداسیت در یک سیمان غنی از تورمالین، پیریت، کوارتز و کانی‌های سولفیدی دیگر، جای می‌گیرند. با توجه به این پدیده، رخداد فرایند فیزیکوشیمیایی فشارزدایی ناگهانی و رخداد کانه‌زایی در محیط برشی شکنا، دور از انتظار نیست (Moradi et al., 2019). همچنین، برپایه بررسی‌های بارنز (Barnes, 1997)، به دنبال عملکرد سیال گرمایی و تبادلات سیال-سنگ در تعادل با سنگ‌های آتشفشانی میزبان، مجموعه واکنش‌های شیمیایی زنجیره‌ای مانند آبکافت (افزوده‌شدن یون H^+) و آبپوشی (ترکیب با H_2O) در دما و شوری‌های متوسط تا کم رخ می‌دهند. این فرایند باعث دگرسانی کانی‌های اولیه سنگ آذرین مانند پتاسیم‌فلدسپار می‌شود و در پی آن، بخش بزرگی از کانی‌های رسی مانند کائولینیت پدید می‌آیند و مقادیر بالای کاتیون‌های فلزی در محیط آزاد می‌شوند. به‌دنبال آن، به‌علت وجود فضاهای شکستگی و مجراهای مناسب، این عنصرها به بخش‌های بالایی کانسار راه می‌یابند و تحت‌تأثیر فرایندهای فیزیکوشیمیایی تله-خاستگاه^{۱۳} (Barnes, 1997)، مانند فشارزدایی و ترکیب با آب‌های جوی کم دما، pH سیستم به‌طور ناگهانی تغییر می‌کنند و فلزات مختلف مانند طلا به‌تدریج نهشته می‌شوند. فراوانی کریستوبالیت و کوارتز در پهنه سیلیسی کوه آق‌داغ (در مغزه‌های حفاری)، به سیلیکای اپالی نسبت داده می‌شود که برخورد فعالیت‌های نیمه‌ژرف دما بالا با سطح آب دیرینه را نشان می‌دهد (Richards et al., 2006). در منطقه طلای داشکسن گمان می‌رود در مراحل پایانی کانه‌زایی، بخش‌هایی از ذخیره احتمالاً تحت‌تأثیر آب‌های جوی کم دما بوده است. روند سیال‌های درگیر بررسی‌شده در نمودار دوتایی شوری- دمای همگن‌شدن در شکل ۱۰-B که بادنار (Bodnar, 1983) پیشنهاد

⁹ fluid mixing

¹⁰ surface fluid dilution

¹¹ depressurization

¹² boiling

¹³ source- trapping

کرده است، این موضوع را تأیید می‌کند.

برداشت

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، شواهد صحرایی و سنگ‌نگاری تورمالین‌های بررسی‌شده داشکسن سه نوع هستند. ترکیب تورمالین‌های نوع اول و دوم که از سامانه پورفیری برداشت شده‌اند در اویت مایل به شورل است؛ اما تورمالین نوع سوم که از سامانه برش گرمایی گرفته شده‌اند ترکیب در اویت دارند. این تورمالین‌ها در سنگ میزبان داسیت پورفیری و برشی یافت می‌شوند. این بازه کمابیش گسترده تغییرات عنصرهای اصلی به تجزیه کانی‌هایی مانند بیوتیت، پلاژیوکلاز و آمفیبول نسبت داده می‌شود که در هنگام تبلور تورمالین نسبت آب/سنگ افزایش می‌یابد (Baksheev et al., 2016). همچنین، اجزای مورد نیاز کلسیم، منیزیم و آلومینیم از

کانی‌های سیلیکاته سنگ میزبان فراهم آورده می‌شوند و محلول‌های غنی از بور (B) سبب تبلور گسترده تورمالین می‌شوند. غنی‌بودن تورمالین‌های داشکسن از Mg به خاستگاه آنها از سنگ‌های دگرگونی متاپسامیت و متاپلیت‌های فقیر از کلسیم و سنگ‌های کوارتز-تورمالینی و ورود Mg از آنها به ساختار تورمالین نسبت داده می‌شود. سیال‌های سازنده تورمالین‌های قلیایی داشکسن، اسیدی و دمای کمی داشته‌اند. بررسی جانشینی‌های کاتیونی نشان می‌دهد تورمالین‌های نوع اول و دوم ویژگی دوگانه دارند و به شرایط ماگمایی-گرمایی نزدیک می‌شوند؛ اما تورمالین‌های نوع سوم به شرایط گرمایی وابسته هستند. این موضوع با محاسبه نسبت $FeO/(FeO+MgO)$ نیز تایید می‌شود.

جدول ۶. ویژگی‌های تورمالین‌ها در کانسار طلای داشکسن.

Table 6. Characteristics of tourmalines from the Dashkasan gold deposit.

Type	Host- Rock	Alteration	Style	Size (mm)	$\Sigma(Fe+Mg)$	$FeO/(FeO+MgO)$	Related To
Tourmaline- 1	dacite	phyllitic	needle	0.1- 0.3	0.6~	0.6~	porphyry
Tourmaline- 2	dacite, andesite	silicification	radial	0.2- 0.3	2.82~	0.6~	porphyry
Tourmaline- 3	dacite, breccia	phyllitic	bladed	0.2- 0.6	0.3~	0.4~	hydrothermal

بنابراین دو گروه تورمالین نوع اول و دوم شناسایی شده که از دگرسانی‌های فلیک و سیلیسی پدید آمده‌اند، ارتباط نزدیک‌تری با فرایندهای ماگمایی دارند. نوع سوم تورمالین که به صورت بافت پرکننده حفره‌ها همراه با رگه‌های کواتز دیده می‌شود، پس از فروکش کردن فعالیت‌های ماگمایی، در پی ورود شارهای گرمایی بور دار پدید آمده است. در تازه‌ترین پژوهش روی منطقه داشکسن، دلیل این تغییرات مرتبط با یک زمین‌لرزه یا انفجار بزرگ در دیواره دهانه اصلی آتشفشان دانسته شده است (Moradi et al., 2019).

سپاس‌گزاری

این پژوهش بخشی از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نگارنده نخست است. از آقای دکتر کاظم قلی‌زاده و خانم دکتر ناهید شبانیان به ترتیب برای همکاری در انجام

بررسی‌ها روی شیمی تورمالین نشان می‌دهند کانه‌زایی تورمالین در کانسار داشکسن تغییراتی از طیف ماگمایی-گرمایی به گرمایی دارد. بررسی سیال‌های درگیر نیز این نکته را تایید می‌کند. وجود کانی هالیت به عنوان فاز جامد چه‌بسا مشارکت سیالی ماگمایی-گرمایی در پیدایش رگه‌ها را نشان می‌دهد. بررسی ریزدماسنجی نیز نشان می‌دهد رگه‌های کوارتز-تورمالین-پیریت در کانسار داشکسن (دمای ۱۸۵ تا ۲۵۴ درجه سانتیگراد و متوسط شوری ۱۶/۵ درصدوزنی نمک طعام) در پی عملکرد فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز در شرایط فشارزدایی ناگهانی و احتمالاً اختلاط تدریجی با آب‌های جوی کم ژرفا پدید آمده‌اند. از این رو، یافته‌های این پژوهش با بررسی‌های پیشین (Richards et al., 2006; Alaminia et al., 2018; Moradi et al., 2019) سازگاری دارد.

تجزیه‌های کانی‌شناسی و محاسبات نرم‌افزاری
 مجله پتروولوژی که با حوصله و توجه فراوان به افزایش
 سپاس‌گزاری می‌شود. در پایان از داوران و سردبیر محترم
 کیفیت کار پژوهشی کمک کرده‌اند سپاس‌گزاری می‌شود.

References

- Ahmadi Khalaji, A., Tahmasbi, Z., Zal, F., and Shabani, Z. (2016) The behavior of major and trace elements of the tourmaline from the Mangavai and Ganjnameh pegmatitic rocks (Hamadan area). *Petrological Journal*, 7(27), 1- 24 (in Persian). doi: 10.22108/ijp.2016.21015
- Alaminia, Z., Moradi, M., and Tale Fazel, E. (2018) A review on the Dashkasan gold deposit, epithermal or porphyry? New constraints of EPM and H-O isotopic evidence. 10th symposium of Iranian Society of Economic Geology, Isfahan, Iran.
- Baksheev, I.A., Bryzgalov, I.A., Marushchenko, L.I., Damian, F, Damian, G., and Prokofiev, V.Y. (2016) Chemical composition of phlogopite, tourmaline, and illite from hydrothermal alterations of the Nistru deposit, baia mare, Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 11(2), 547- 564.
- Barnes, H.L. (1997) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley & Sons, New York.
- Bodnar, R.J. (1983) A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P- V- T- X properties of inclusion fluid. *Economic Geology*, 78(3), 535- 542. doi: 10.2113/gsecongeo.78.3.535
- Bodnar, R.J. (1995) Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. *Mineral*, 23, 139- 152. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103078
- Boiron, M.C., Cathelineau, M., and Richard, A. (2010) Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb–Zn–F–Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits. *Geofluids*, 10(1-2), 270-292. doi: 10.1111/j.1468-8123.2010.00289.x
- Burruss, R.C. (1981) Analysis of phase equilibria in C–O–H–S fluid inclusions. *Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook*, 209- 239.
- Cavarretta, G., and Puxeddu, M. (1990) Schorl-dravite-ferridravite tourmalines deposited by hydrothermal magmatic fluids during the early evolution of the Larderello geothermal field, Italy. *Economic Geology*, 85(6), 1236- 1251. doi: 10.2113/gsecongeo.85.6.1236
- Collines, A.C. (2010) Mineralogy and geochemistry of tourmaline in the contrasting hydrothermal system, Copiapo area, Northern Chile. Ph.D. Thesis, University of Arizona, United States.
- Driesner, T., and Heinrich, C.A. (2007) The system H₂O–NaCl. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature–pressure–composition space from 0 to 1000 °C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(20), 4880-4901. doi: 10.1016/j.gca.2006.01.033
- Dutrow, B.L., and Henry, D.J. (2018) Tourmaline compositions and textures: reflections of the fluid phase. *Journal of Geosciences*, 63(2), 99- 110.
- Esmaily, D., Mohamadi, H., and Haghnazar, M. (2009) Comparison of the chemical composition of tourmaline in tin and tungsten-bearing quartz- tourmaline veins (Shah- Kuh area, east of Iran and Nezamabad area, west of Iran). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 17, 343- 356 (in Persian).
- Felegari, H. (2014) Study of Alteration Related to Mineralization of Sari Gunay Epithermal Gold

- Reserve in Kurdistan Province Using Aster Satellite Data, Mineralogy and Geochemical Evidence. M.Sc. thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
- Fontes, J.C., and Matray, J.M. (1993) Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin. France: 1. Brines, associated with Triassic salts. *Chemical Geology*, 109(1-4), 149-175. doi: 10.1016/0009-2541(93)90068-T
- Franchini, M., Impiccini, A., Lentz, D., Ríos, F. J., O'Leary, S., Pons, J., and Schalamuk, A.I. (2011) Porphyry to epithermal transition in the Agua Rica polymetallic deposit, Catamarca, Argentina: An integrated petrologic analysis of ore and alteration parageneses. *Ore Geology Reviews*, 41(1), 49- 74. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.06.010
- Granian, H., Tabatabaei, S.H., Asadi Haroni, H., and Carranza, E.J.M. (2016) Application of discriminant analysis and support vector machine in mapping gold potential areas for further drilling in the Sari- Gunay gold deposit, NW Iran. *Journal of Mining Engineering. Natural Resources Research*, 25(2), 145- 159. doi: 10.1007/s11053-015-9271-2
- Hanor, J.S. (1994) Origin of saline fluids in sedimentary basins. Geological Society, London, Special Publication, 78(1), 151- 174. doi: 10.1144/GSL.SP.1994.078.01.13
- Hawthorne, F.C., and Henry, D.J. (1999) Classification of the minerals of the tourmaline group. *European Journal of Mineralogy*, 11(2), 201–215. doi: 10.1127/ejm/11/2/0201
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.R., and Gonzalez-Urien, E. (2000) Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(2), 245–277. doi: 10.5382/Rev.13.07
- Henry, D.J., Dutrow, B.L., and Mineralogist, C. (2011) Incorporation of fluorine in tourmaline: external environmental vs. internal crystallographic influences. *Canadian Mineralogist*, 49, 41- 56. doi: 10.3749/canmin.49.1.41
- Henry, D.J., and Dutrow, B.L. (2001) Compositional zoning and element partitioning in nickeloan tourmaline from a metamorphosed karstbauxite from Samos, Greece. *American Mineralogist* 86(10), 1130- 1142. doi: 10.2138/am-2001-1002
- Henry, D.J., and Dutrow, B.L. (2012) Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic conditions: Its petrologic applicability. *Lithos*, 154, 16- 32. doi: 10.1016/j.lithos.2012.08.013
- Henry, D.J., and Guidotti, C.V. (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite grade metapelites of NW- Marine. *American Mineralogist*, 70(1- 2) 1- 15.
- Imer, A., Richards, J.P., and Muehlenbachs, K. (2016) Hydrothermal evolution of the Çöpler porphyry-epithermal Au deposit, Erzincan Province, central eastern Turkey. *Economic Geology*, 111(7), 1619- 1658. doi: 10.2113/econgeo.111.7.1619
- Jamshidibadr, M., Moghadasi, J., Ghorbani, M., Sharifi, M., and Salehi, M. (2021) Geochemistry of Dorojen volcanic rocks (SW Ardestan) with the special use of mineral chemistry of propylitic alteration zones. *Petrological Journal*, 12(3), 43- 62 (in Persian). doi: 10.22108/ijp.2022.129274.1236
- Jiang, S.Y., Palmer, M.R., and Yeats, C.J. (2002) Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Archean Big Bell and Mount Gibson gold deposits, Murchison Province, Yilgarn craton, Western Australia. *Chemical Geology*, 188(3- 4), 229–247. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00107-9
- Karimpour, M.H., and Stern, C.R. (2010) Mineralogical and Chemical Composition of Tourmaline from Najmabad, Gheshlagh, Hired, and Maherabad-Khopik, and their relationship with types of mineralization, Eastern Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 18, 43-54 (in

- Persian).
- Khan Nazer, N.H., Jalali, A., Saidi, A., Helmi, F., Mohtat, T., Bahreh, M., Zohrab, E., Ghaemi, J., and Haddadan, M. (2015) Kuhin 1:100000 Geological map. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran.
- Krosse, S. (1995) Hochdrucksynthese, Stabilität und Eigenschaften der Borsilikate Dravit und Kornerupin sowie Darstellung und Stabilitätsverhalten eines neuen Mg-Al-Borats. Ph.D. thesis, Ruhr- University Bochum, Bochum, Germany.
- London, D., and Manning, D.A.C. (1995) Chemical Variation and Significance of tourmaline from southwest England. *Economic Geology*, 90(3), 495- 519. doi: 10.2113/gsecongeo.90.3.495
- Maanijou, M., Aliani, F., Miri, M., and Lentz, D.R. (2013) Geochemistry and petrology of igneous assemblage in the south of Qorveh area, west Iran. *Geochemistry*, 73(2), 181- 196. doi: 10.1016/j.chemer.2013.04.001
- Maanijou, M., poiandeh, N., sepahi, A.A., and Dadfar, S. (2014) Mapping of alteration zones of Dashkasan epithermal gold mine (Sari Gunay). *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 24(95), 95- 104 (in Persian).
- Manning, D.A.C. (1982) Chemical and morphological variation in tourmalines from the Hub Kapong batholith of Peninsular Thailand. *Mineralogical Magazine*, 45(337), 139- 147. doi: 10.1180/minmag.1982.045.337.16
- Mansouri Esfahani M., and Khalili, M. (2014) Mineralogy and mineral - chemistry of tourmaline and garnet from Molataleb village granitoid (North of Aligudarz) NW of Isfahan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 22(1), 139- 148 (in Persian).
- Mansouri Esfahani, M., and Bakhshi, M. (2018) Geochemistry and source of tourmaline from the Soheyle- Pakuh granitoid body (North of Nain). *Petrological Journal*, 9(2), 123- 138 (in Persian). doi: 10.22108/ijp.2017.104442.1032
- Mao, J., Zhang, J., Pirajno, F., Ishiyama, D., Su, H., Guo, C., and Chen, Y. (2011) Porphyry Cu–Au–Mo–epithermal Ag–Pb–Zn–distal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi Province, East China-a linked ore system. *Ore Geology Reviews*, 43(1), 203- 216. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.08.005
- Markl, G., Ferry, J., and Bucher, E.K. (1988) Formation of saline brines and salt in the lower crust by hydration reactions in partially retrogressed granulites from the Lofoten Islands. Norway. *American Journal of Science*, 298(9), 705–757. doi: 10.2475/ajs.298.9.705
- Maydagán, L., Franchini, M., Lentz, D., Pons, J., and McFarlane, C. (2013) Sulfide composition and isotopic signature of the Altar Cu- Au deposit, Argentina: Constraints on the evolution of the porphyry- epithermal system. *The Canadian Mineralogist*, 51(6), 813- 840. doi: 10.3749/canmin.51.6.813
- Medaris, L.G., Fournelle, J.H., and Henry, D.J. (2003) Tourmaline-bearing quartz veins in the Baraboo Quartzite, Wisconsin: Occurrence and significance of foitite and “oxy-foitite”. *Canadian Mineralogist*, 41, 749–758. doi: 10.2113/gscanmin.41.3.749
- Mirsepahvand F., Tahmasebi Z., Shahrokhi S. V., AhmadiKhalaji A., and Khalili M. (2012) Geochemistry and source determination of tourmalines in Boroujerd area. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 20(2), 281-292 (in Persian).
- Moazzen, M., Michaeli, R., Ahangari, M., and Altenberger, U. (2017) Characterizing tourmaline in metapelitic schists from the Gasht Area, North Iran, and boron source in metamorphic fluids.

- Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 28(3), 243- 253 (in Persian).
- Moradi, M. (2018) Investigation of mineralogy and geochemical distribution of gold in sulfide and oxide orebodies of the Dashkasan deposit (east of Qorveh). M.Sc. thesis, Isfahan University. Isfahan, Iran (in Persian).
- Moradi, M., Alaminia, Z., Tale Fazel, E., and Alipoor, R. (2019) Ore-forming fluid source and effective parameters in the gold deposition at the Dashkasan deposit (NE Qorveh): structure, microthermometry, and O-H stable isotopic evidence. *Iranian Journal of Geology*, 52, 19- 38 (in Persian). <http://geology.saminattech.ir/en/Article/9736>
- 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(4), 397- 412. doi: 10.1016/S1367-9120(02)00035-4
- Ota, T., Kobayashi, K., Katsura, T., and Nakamura, E. (2008) Tourmaline breakdown in a pelitic system: implications for boron cycling through subduction zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(1), 19- 32. doi: 10.1007/s00410-007-0228-2
- 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 Exploration*, 42(2-3), 371–381. doi: 10.1016/0375-6742(92)90033-5
- Raith, J.G., Riemer, N., and Meisel, T. (2004) Boron metasomatism and behavior of rare earth elements during formation of tourmaline rocks in the eastern Arunta Inlier, central Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(1), 91- 109. doi: 10.1007/s00410-003-0548-9
- Rasekh, P., Mirmohammadi, M., and Mansouri Esfahani, M. (2016) Origin and Chemical Characteristics of Tourmaline in Kahang Porphyry Copper Deposit, NE Isfahan, Central Province of Iran. *Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran*, 22- 24 (in Persian).
- Rastad, E., Niromand, S. A., Emami, M. H., and Rashid Nejad Omran, N. A. (2000) Origin Antimony, Arsenic and Gold Deposits in Dashkasan Volcanoplutonic Complex (East Qorveh, Kurdistan Province). *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 2(23), 37- 38 (in Persian).
- Richards, J.P. (2015) Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews*, 70, 323- 345. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.11.009
- Richards, J.P., Wilkinson, D., and Ullrich, T. (2006) Geology of the Sari Gunay Epithermal Deposit. *Economic Geology*, 101(8), 1455- 1496. doi: 10.2113/gsecongeo.101.8.1455
- Roedder, E., and Bodnar, R.J. (1980) Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 8(1), 263- 301. doi: 10.1146/annurev.ea.08.050180.001403
- Rosenberg, P.E., and Foit, F.F. (1979) Synthesis and characterization of alkali-free tourmaline. *American Mineralogist*, 64, 180- 186.
- Shepherd, T.J., Rankin, A. H., and Alderton, D. H. (1985) A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie and Son Press, London.
- Sillitoe, R.H. (2010) Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1), 3- 41. doi: 10.2113/gsecongeo.105.1.3
- Slack, J.F., and Trumbull, R.B. (2011) Tourmaline as a recorder of ore-forming processes. *Elements*, 7(5), 321- 326. doi: 10.2113/gselements.7.5.321
- Slack, J.F., Herriman, N., Barnes, R.G., and Plimer, I.R. (1984) Stratiform tourmalines in metamorphic

- terrane and their geologic significance. *Geology*, 12(12), 713- 716. doi: 10.1130/0091-7613(1984)12%3C713:STIMTA%3E2.0.CO;2
- Svensen, H., Jamtveit, B., Yardley, B., Engvik, A.K., Austrheim, H., and Broman, C. (1999) Lead and bromine enrichment in eclogite- facies fluids: extreme fractionation during lower-crustal hydration. *Geology*, 27(5), 467- 470. doi: 10.1130/0091-7613(1999)027%3C0467:LABEIE%3E2.3.CO;2
- Van den Kerkhof, A.M., and Hein, U.F. (2001) Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1- 4), 27- 47. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00037-2
- van Hinsberg, V.J., Henry, D.J., and Marschall, H.R. (2011b) Tourmaline: An ideal indicator of its host environment. *Canadian Mineralogist*, 49(1), 1- 16. doi: 10.3749/canmin.49.1.1
- Waters, P.J., Cooke, D.R., Gonzales, R.I., and Phillips, D. (2011) Porphyry and epithermal deposits and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Baguio district, Philippines. *Economic Geology*, 106(8), 1335- 1363. doi: 10.2113/econgeo.106.8.1335
- White, N.C., and Hedenquist, J.W. (1995) Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration. Published in SEG Newsletter, 23, 1- 13. doi: 10.5382/SEGnews.1995-23.fea
- Whitney, D., and Evans B. (2010) Abbreviation for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185- 187. doi: 10.2138/am.2010.3371
- Wilkinson, J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1- 4), 229- 272. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00047-5
- Yavuz, F., Karakaya, N., Yıldırım, D., Karakaya, M., and Kumral, M. (2014) A Windows program for calculation and classification of tourmaline- supergroup. *Computers & Geosciences*, 63, 70- 87. doi: 10.1016/j.cageo.2013.10.012
- Yavuz, F., Fuchs, Y., Karakaya, N., and Karakaya, M. (2008) Chemical composition of tourmaline from the Asarcik Pb- Zn- Cu±U deposit, Sebinkarahisar, Turkey. *Mineralogy and Petrology*, 94, 195- 208. doi: 10.1007/s00710-008-0016-3
- Zall, F., Tahmasbi, Z., Jiang, S.Y., Danyushevsky, L.V., and Harris, C. (2019) Elemental and B- O- H isotopic compositions of tourmaline and associated minerals in biotite- muscovite granite of Mashhad, NE Iran: Constraints on tourmaline genesis and element partitioning. *Lithos*, 324, 803- 820. doi: 10.1016/j.lithos.2018.12.012
- Zarasvandi, A., Tashi, M., Rezaei, M., Saki, A., and Mousivand, F. (2021) Geology and geochemistry of Chorán porphyry- epithermal Cu- Au deposit in the Dehej- Sarduveh subzone, Urumieh- Dokhtar magmatic arc. *Journal of Economic Geology*, doi: 10.22067/econg.2021.52017.87614 (in Persian).