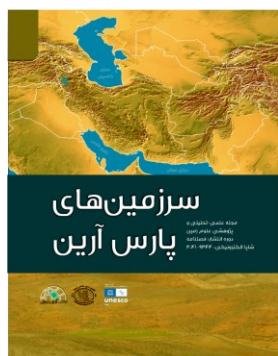


# فلوی مگنتیتی و ارتباط آن با سنگ‌های ماگمایی در منطقه شهرک، شمال شرق کردستان، ایران

نیلوفر نایبی<sup>۱</sup>✉، عرفان رحیمی<sup>۲</sup>

## چکیده

کانسار آهن شهرک در شمال غربی ایران، شمال شرقی استان کردستان، در ۶۰ کیلومتری شمال شهر بیجار و ۲۰ کیلومتری غرب بخش حسن‌آباد یاسوکنند قرار دارد. کانسار آهن شهرک به عنوان بخشی از ماگاتیسم سنوزوئیک مجموعه ارومیه دختر و در منطقه تکاب فرار گرفته است. واحدهای سنگی الیگومیوسن سنگ میزبان کانی‌سازی آهن می‌باشند. مهمترین و فراگیرترین حادثه در تکوین پوسته ایران زمین، حوادث ماگمایی سنوزوئیک بوده باشد که در فاز کوهزایی آپی روی داده است و طی آن رشته کوه‌های آلپ-همیالیا تحت تأثیر قرار گرفته در منطقه شهرک فعالیت‌های ماگمایی از ائوسن تا میوسن قابل پی‌گیری است. سنگ‌های ماگمایی منطقه معدنی شهرک شامل سنگ‌های آتشفشانی اسیدی، آندزیتی و نفوذی‌های کم عمق می‌باشند. بر مبنای مطالعات ژئوشیمیایی سنگ‌های ماگمایی منطقه در سری کالکوالکالین قرار می‌گیرند. محیط تکتونیکی این سنگ‌های ماگمایی مشابه محیط کوهزایی مرتبط با مناطق فرورانش می‌باشد. کانه اصلی این کانسار مگنتیت است هرچند به همراه کانی‌سازی اصلی مگنتیتی، کانی‌های فرعی مانند پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت و کانی‌های ثانویه اکسیدهای آهن مانند گوتیت و هماتیت نیز دیده می‌شود. اکسیدهای هماتیت و گوتیت اولیه نیستند و مقدار آن‌ها در کانسنگ خیلی کم است. ماده معدنی تقریباً در یک راستا به صورت عدسی‌های پراکنده عمدتاً بر روی سنگ‌های آهکی و ریولیتی مرز آکیتانین-بوردیگالین و/یا در بین سنگ‌های آندزیتی قرار گرفته است. شواهد کانی‌شناسی، صحرایی، ژئوشیمیایی و سنگ‌های فراگیر همه حکایت از یک خاستگاه ولکانوژنیک (آتشفشان‌زاد) دارد و می‌توان بخشی از کانی‌سازی کانسار را به صورت فلوی مگنتیتی تصور کرد. گدازه مگنتیتی که در حجم کم در مقایسه با حجم ماگمای ریولیتی به صورت فلوی مگنتیتی فوران نموده است، مانند یک گدازه عمل نموده است که آن را فلوی مگنتیتی نامگذاری نموده‌اند.

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱

انتشار برخط: ۱۴۰۲/۱۰/۴

## واژگان کلیدی

کانسار آهن، الیگومیوسن،  
سری کالکوالکالین،  
زون فرورانش، فلوی مگنتیتی

## ✉ وابستگی نویسنده

۱ دکتری زمین‌شناسی،

دانشگاه تهران

۲ مرکز پژوهشی زمین‌شناسی

آراین زمین

استناد: نایبی، نیلوفر، رحیمی، عرفان، (۱۴۰۲). فلوی مگنتیتی و ارتباط آن با سنگ‌های ماگمایی در منطقه

شهرک، شمال شرق کردستان، ایران، سرزمین‌های پارس آراین، سال اول، شماره دوم (۵۰-۳۵)

شناسه دیجیتال: 10.61186/jpat.2024.2.2

ناشر: مرکز پژوهشی زمین‌شناسی آراین زمین © نویسنده.



## مقدمه

ارزیابی مطلوب‌ترین مناطق برای اکتشاف مواد معدنی همواره نگرانی عمده زمین‌شناسان اکتشافی بوده است و در این میان کانسارهای آهن نیز اهمیت مضاعفی داشته‌اند. ذخایر آهن با توجه به اهمیت استراتژیک در صنعت یکی از اهداف اصلی اکتشاف معدنی در جهان می‌باشند. بنابراین، دانستن مدل‌های شکل‌گیری و روش‌های نوین اکتشافی آنها و درک روابط بین آنها مهم‌ترین اهمیت را برای کاوشگران معدنی دارد. در این میان مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر بویژه در منطقه تکاب با دارا بودن ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی از نظر مواد معدنی و بویژه آهن حائز اهمیت بالایی می‌باشد. با توجه به اهمیت مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر از لحاظ ژئودینامیکی و فلززایی لزوم بررسی‌های جامع پتروژنتیکی این منطقه شایان توجه است. کانسار آهن شهرک به عنوان بخشی از ماگاتیسم سنوزوئیک مجموعه ارومیه دختر و در منطقه تکاب فرار گرفته است. منطقه تکاب قرار با داشتن زمین‌شناسی خاص و انواع کانه‌زایی‌های آهن کاپرونا، ماگمایی، اسکارن و ... یکی از مناطق فعال از نظر متالوژنی آهن می‌باشد (Ghorbani, 2007; Salehi et al., 2020). مطالعات پیشین در منطقه اغلب در جهت تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی بوده و هنوز ابهامات فراوانی در درک تحولات زمین‌شناسی این ناحیه وجود دارد. تعیین و شناسایی کلیدهای اکتشافی جهت شناسایی ذخایر از طریق مطالعات شیمی سنگ کل، شیمی کانی، مطالعات ایزوتوپی و تعیین سن جایگیری - کانه‌زایی توده‌ها و مطالعات سیال درگیر در سال‌های اخیر در کشور و بویژه مجموعه ماگمایی ارومیه دختر مورد توجه بوده‌اند. در این پژوهش نیز به کمک داده‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، رفتار عناصر اصلی و خاکی کمیاب منطقه بررسی می‌شوند و با مطالعه سری ماگمایی، ترکیب و محیط تکنونیک ماگمای اولیه به مطالعه ترکیب ماگمای تشکیل دهنده کانسار آهن در منطقه شهرک و خاستگاه آن پرداخته شده است.

شروع فعالیت اصلی مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر در دوره ائوسن و در محدوده زمانی بین ۵۵ تا ۳۶ میلیون سال قبل می‌باشد که با یک ماگماتیسم بازی تا اسیدی گسترده در آناتولی ترکیه، قفقاز و ایران مشخص شده است و در ارتباط با تکامل فضایی، زمانی و منشا آنها بحث‌های مختلفی وجود دارد. به نظر می‌رسد طغیان ماگمایی در مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر و البرز تحت تاثیر فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران شکل گرفته است (Alavi, 1994; Berberian and Berberian, 1981; Berberian et al, 1982; Agard et al, 2007). اگرچه دوره تریاس برای زمان شروع فرورانش اقیانوس نئوتتیس پذیرفته شده است (Berberian and Berberian, 1981; Arvin, 2009; Berberian et al., 2009; Bagheri and Stampfli, 2008; Wilmsen et al., 2009; et al, 2007), زمان بسته شدن این اقیانوس از کرتاسه بالایی (Berberian, 1994; Alavi, 1994; and King, 1981), اواخر پالئوسن- اوایل ائوسن (Mazhari et al, 2009), ائوسن- الیگوسن (Agard et al, 2005; Vincent et al, 2005; Allen and Armstrong, 2008; Horton et al, 2008; Dargahi et al, 2010; Stocklin, 1968; Berberian and Berberian, 1981; Axen et al, 2001; McQuarrie et, 2003; Guest et al., 2006; Azizi, 2010; Okay et al, 2010; and Moinevaziri, 2009) گزارش شده است و همچنان مورد بحث است.

مطالعات پیشین نشان می‌دهد سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده در مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر به طور عمده از جریان گدازه، ای پیروکلاستیک (توف و ایگنمبریت) تشکیل شده است (Berberian and Berberian, 1981). سنگ‌های نفوذی این مجموعه ماگمایی یک محدوده وسیع ترکیبی نشان می‌دهند که ترکیب غالب گرانیتی است اما حجم کمتری سنگ‌های گرانودیوریت، کوارتز دیوریت و گابرو نیز دیده می‌شود (Ghorbani, 2006). از لحاظ سری ماگمایی در این منطقه سنگ‌هایی با گرایش‌های متفاوت تولیتی تا کالکوالکالن (Ahmad and Shahabpour, 2007; pusht-Kuhi, 1993), آکالن (Amidi et al, 1984; Moradian, 1997), شوشونیتی (Amidi, 1977; Aftabi, 2009; Torabi, 2009; and Atapour, 2000), و آداکیتی (Sherafat, 2008; Ghadami et al, 2008; Omrani et al, 2008; Jahangiri, 2007; Ghorbani and Bezenjani, 2011; et al, 2010) دیده می‌شوند. از نظر زمان برخورد در ارومیه- دختر و ارتباط آن با کانه‌زایی، نظریات متفاوتی در این مورد ارائه شده است که شامل آغاز برخورد نرم (soft collision) در الیگوسن آغازین (Moghadam et al., 2022a; b; McQuarrie and van Hinsbergen, 2013; Agard et al., 2011; Allen and Armstrong, 2008) (hard collision) در ۲۰ میلیون سال پیش (Moghadam et al., 2022a;b; Madanipour et al., 2017) و نیز نظریه ای در ارتباط با آغاز

برخورد سخت در ۱۵ میلیون سال پیش (Chiu et al., 2013; Pang et al., 2013; Raeisi et al., 2021; 2024; Babazadeh et al., 2022) است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به عنوان بخشی از ماگماتیسم سنوزوئیک ایران و در شمال غرب مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر، در نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ یاسوند (قجور) (Fonoudi and Sayareh, 2000) (شکل ۱) و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب (Alavi and Amidi, 1976) قرار گرفته است. شاید مهمترین و فراگیرترین حادثه در تکوین پوسته ایران زمین، حوادث ماگمایی سنوزوئیک باشد که در فاز کوهزایی آپی روی داده است و طی آن رشته کوه‌های آلپ- هیمالیا تحت تأثیر قرار گرفته و با شکل‌گیری فعلی کوه‌های ایران و همزمان یا کمی بعد از آن، قسمت اعظم ذخایر معدنی ایران تشکیل شده‌اند. به طور کلی دوران سنوزوئیک را باید دوران فعالیت ماگماتیسم ایران نامید که اثرات آن در سراسر ایران به جز زاگرس و کپه‌داغ دیده می‌شود. فعالیت‌های ماگمایی و به ویژه ولکانیسم ترشیاری در ایران، ترکیب سنگی متفاوت و همچنین گسترش و پراکندگی زیادی دارد که در این میان، مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر دارای اهمیت بسزایی است. مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر به عنوان مهمترین کمربند فلززایی ایران، در حقیقت بر کمربند جهانی فلززایی آلپ- هیمالیا منطبق است و یکی از سه کمربند موازی کوهزاد زاگرس است که با روند شمال غرب- جنوب شرق در امتداد نوار طولی به طول ۱۷۰۰ کیلومتر و با پهنای تقریبی ۱۵۰ کیلومتر به موازات زون دگرگون شده سندج- سیرجان از سه‌سند تا بزمان (شکل ۱) و در شرقی‌ترین بخش کمربند کوهزایی زاگرس قرار گرفته است (Alavi, 1994; 2004).

کانسار آهن شهرک یکی از کانسارهای آهن منطقه تکاب می‌باشد. کانسار آهن شهرک در منطقه تکاب و در اطراف کانسارهای فلزی بایچه‌باغ (Salehi et al., 2020; Karimi, 2001)، توزلا، (Salehi et al., 2020; Karimi, 2001; Maleki, 2004; Heidari et al., 2013, ; 2015)، زرشوران (Yousefi et al., 2018; Mousavi et al., 2018; Sharifi et al., 2016; Paar et al., 2009; Asadi et al., 2000; Ghorbani, 1996; Mehrabi, 1999; Ojaghi, 2007)، آق‌دره (Daliran, 2008; Ghorbani, 2007; Mousavi et al., 2018; Salehi et al., 2020)، آق‌قلعه‌سی (Shirkhani et al., 2009; Mohammadi Niaei, 2015)، آق‌دره بالا (Rahimsouri et al., 2012)، عربشاه (Heidari, 2013)، انگوران (Daliran et al., 2013) و کانسار حلب (Nafisi et al., 2021) قرار گرفته است.

در این کانسار توده‌های آهن به صورت عدسی شکل در محدوده قرار گرفته‌اند که نام هریک با توجه به روستای نزدیک به آن نام‌گذاری شده است. مانند شهرک ۳،۲،۱ یا کرکرای ۲،۱ و سراب ۲،۱. در منطقه معدنی واحدهای سنگی کرتاسه پسین تا کواترنری رخنمون یافته‌اند، از نقطه نظر گستردگی، واحدهای سنگی الیگوسن- میوسن از رخنمون بیشتری برخوردار هستند که سنگ میزبان کانی‌سازی آهن نیز تشخیص داده شده‌اند. توالی چینه‌شناسی منطقه از قدیم به جدید شامل (شکل ۲ تا ۴):

(۱) شیل‌های سیاه رنگ کرتاسه بالایی- پالتوسن با میان لایه‌های آندزیتی است که ارتباط ژنتیکی بین این واحدها و ماده معدنی تشخیص داده نشده است.

(۲) کنگلومرا، برش و توف ماسه‌ای آئوسن به سبزی حد اکثر ۱۰۰۰ متر رخنمون یافته در دره شهرک که می‌توان از آنها به عنوان هم‌ارز سازند کرج نام برد. این واحدهای سنگی نیز فاقد کانه زایی می‌باشند.

(۳) ماسه‌سنگ، توف ماسه‌ای و کنگلومرا به رنگ سفید که هم ارز توالی بالای سازند سرخ زیرین و قسمت پایین سازند قم است.

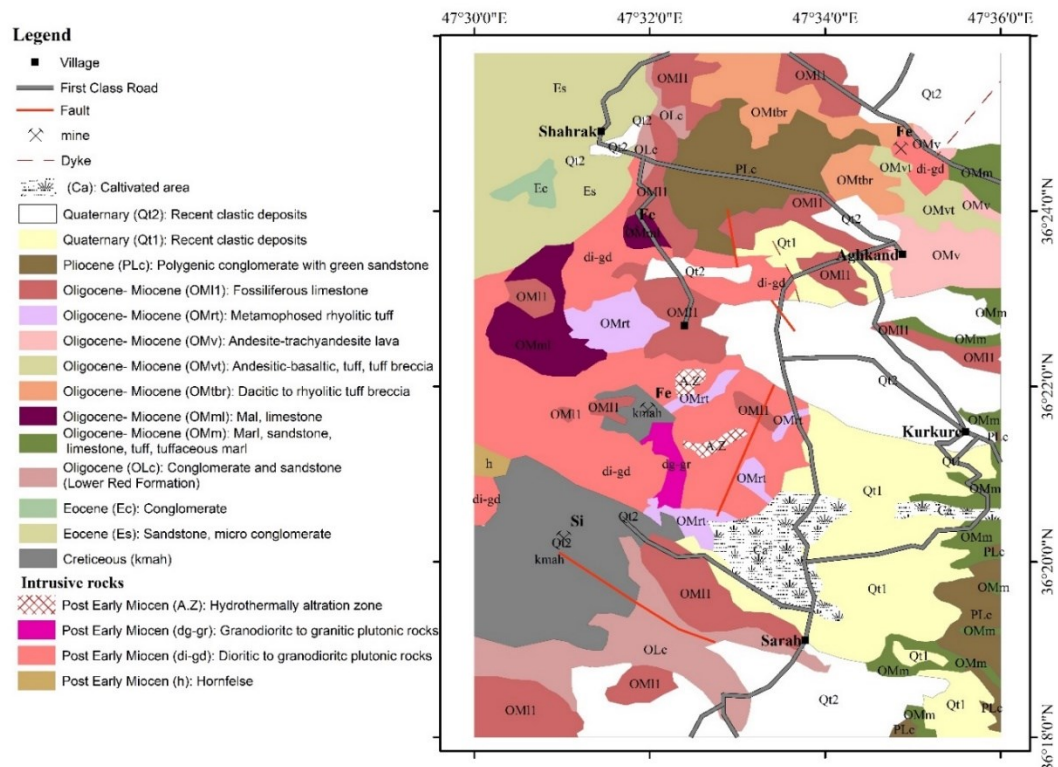
(۴) واحد الیگوسن بالایی ولکانیک و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی که شامل ریولیت، داسیت و توف شیشه‌ای ریولیتی است که اغلب در زیر آهک آکیتانین قرار دارد و هم‌ارز قسمت‌های پایینی سازند قم می‌باشند. اغلب روی این سنگ‌ها عدسی‌هایی از کانی‌سازی مگنتیت دیده می‌شود.

(۵) آهک کریستالین که در پاره‌ای نقاط دولومیتی نیز می‌باشد و فسیل‌های آن سن آکیتانین را نشان می‌دهند (مصطفوی، ۱۳۷۵). اغلب کانه زایی آهن در ارتباط با واحدهای ریولیتی و زیر آهک‌های این واحد و یا در بین لایه‌های آهکی می‌باشند.

(۶) آندزیت که به طور پراکنده در روی واحد آهکی و نیز به طور بخشی بر روی ریولیت‌ها و یا توف‌های اسیدی رخنمون یافته اند.

## روش مطالعه

در این پژوهش با انجام مطالعات صحرایی و شناسایی واحدهای سنگی، آثار تکتونیکی و گسل‌ها مطالعات مقطع نازک به تعداد ۷۰ نمونه انجام گردید. و با تشخیص کانسنگ موردنظر نمونه برداری انجام گردید و برای مطالعات کانه‌نگاری تعداد ۵۰ نمونه مقاطع صیقلی تهیه و مطالعه گردید. سپس از ۱۵ نمونه فاقد آلتراسیون آنالیز شیمیایی به روش ICP-MS توسط شرکت AIs-Chemex کانادا و ۶ نمونه به روش XRF در مرکز کانساران بینالود تهیه گردید و بر این اساس طبقه‌بندی سنگ‌ها، سری‌های ماگمایی و محیط تکتونیکی بررسی و معرفی شد. دقت آنالیز، براساس آنالیزهای تکراری، برای عناصر اصلی ۱٪ است درحالی که بیشتر عناصر جزئی دارای عدم اطمینان ۵٪ هستند. در نهایت برای ترسیم نمودارهای ژئوشیمیایی سنگ کل، از نرم افزارهای IG PET 2007 و Excel 2007 استفاده شده است.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

توده‌های نفوذی از نوع تونالیت، دیوریت تا میکروگابرو نیز در بین سنگ‌های آتشفشانی و گاه آهک قم نفوذ کرده است که کنتاکت آن‌ها با سنگ‌های آهکی اسکارنی بوده و رخساره درجه بالایی از کنتاکت مامورفیسزم قابل مشاهده است. محدوده شهرک در پایانه شرقی گسل قینرجه-چهارتاق قرار دارد. علاوه بر آن گسل‌های فرعی دیگری نیز وجود دارند که تاثیر اندکی بر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه داشته اند. این گسل‌ها را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی نمود:

(۱) گسل‌هایی با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق احتمالاً در ارتباط با فعالیت‌های پرکامبرین (صمیمی‌نمین و همکاران، ۱۳۷۳) که به صورت پلکانی می‌توان آنها را در خارج از منطقه مورد مطالعه نیز تعقیب کرد (شکل ۳).

(۲) گسل‌هایی با روند شمال خاوری-جنوب باختری که روند گسل‌های دسته اول عمود می‌باشند احتمالاً در ارتباط با فعالیت‌های مزوزوئیک بوده‌اند (قربانی، ۱۳۷۸) (شکل ۳).

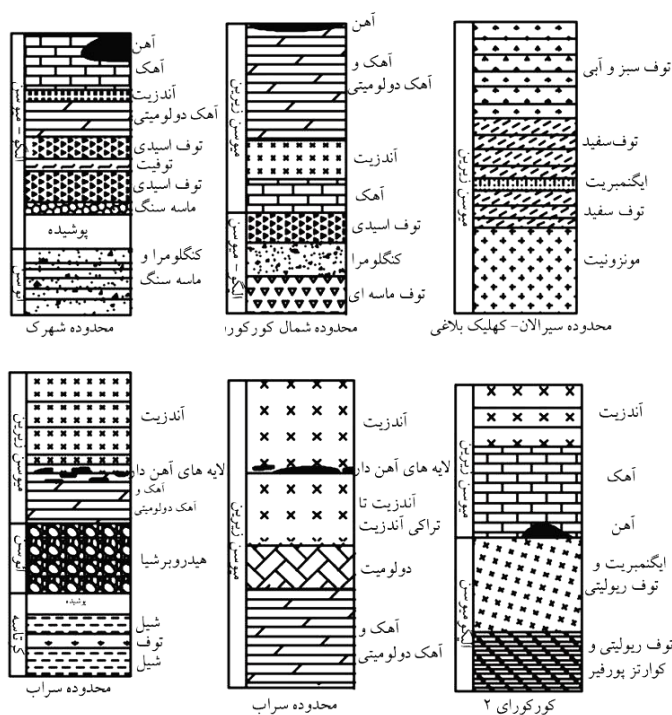
### ماگماتیسم منطقه شهرک

فعالیت‌های ماگمایی در منطقه شهرک از ائوسن آغاز و تا میوسن ادامه یافته است. در برخی از دوره‌های زمانی مانند الیگوسن پسین-میوسن پیشین فعالیت‌های ماگمایی تشدید گردیده است که در بین آنها رخنمون‌های ولکانیکی از شدت بیشتری در مقایسه با پلوتونیک‌ها برخوردار می‌باشند. فعالیت‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن در دره شهرک مانند آنچه در البرز و آذربایجان که سازند کرج را به وجود آورده است (با رخساره و لیتولوژی متفاوت)، در منطقه شهرک و به‌طور کلی منطقه تکاب قابل توجه نیست (قربانی، ۱۳۷۸). فعالیت‌های ماگمایی از الیگوسن پیشین تا کواترنری آغازین بسیار شدید است که به سه گروه قابل تقسیم هستند:

الف) ولکانیسم اسیدی که شروع آن گاه با توف‌های داسیتی، ریوداسیت، داسیت، ریولیت و گاه ایگنمبریت همراه بوده است که بیشتر در الیگوسن پسین رخ داده است.

ب) پلوتونیسم حدواسط تا اسیدی که به صورت توده‌های نفوذی کوچک دیوریتی، گرانیتی تا کوارتز پورفیری ظاهر شده است.

ج) ولکانیسم آندزیتی که زمان نسبتاً طولانی از الیگوسن تا آخر میوسن پیشین در منطقه قابل رویت است (شکل ۵-۱ب).

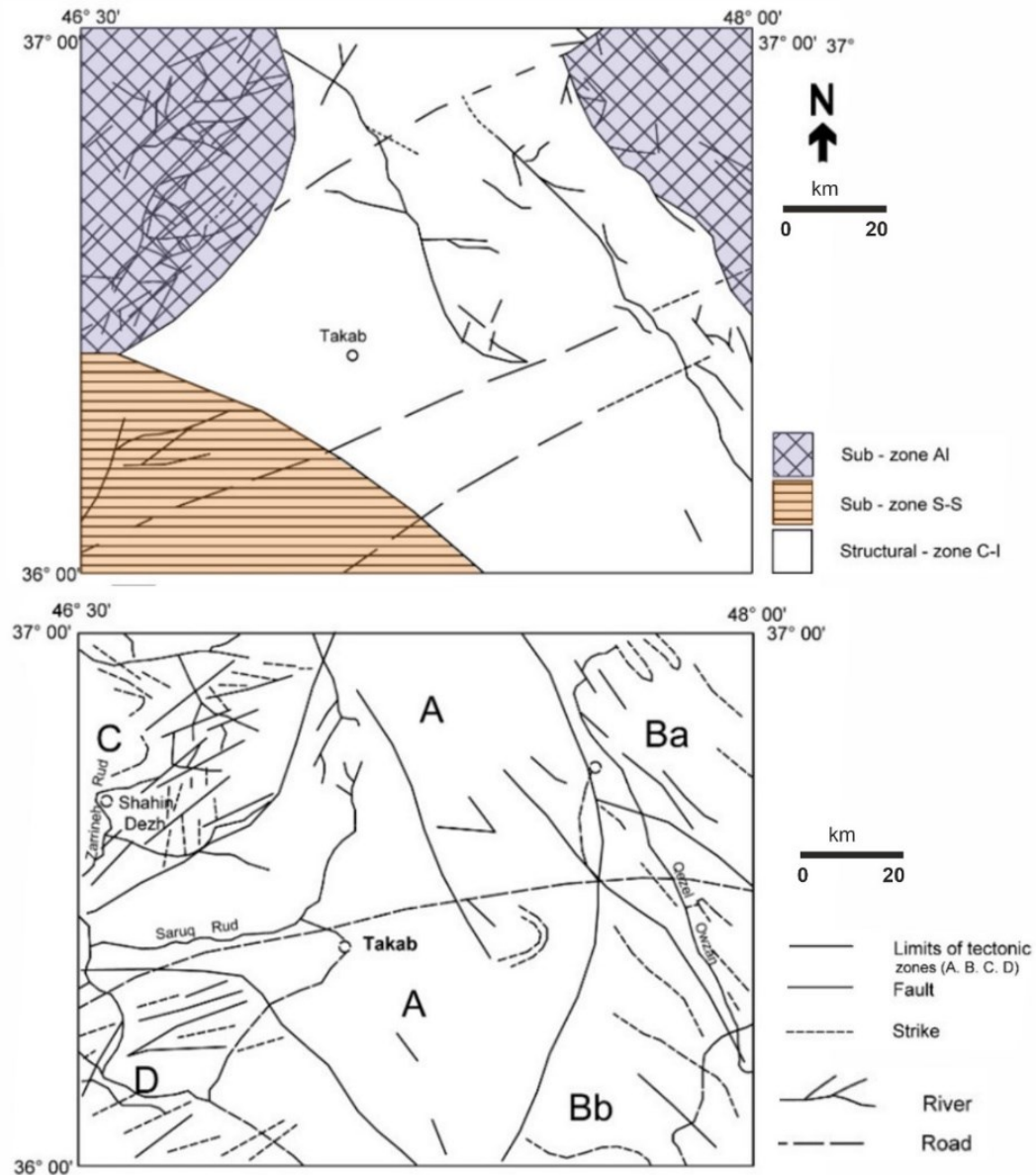


شکل ۲: ستون لیتواستراتیگرافی در چند محدوده کانه‌دار در ناحیه معدنی شهرک

### پتروگرافی سنگ‌های ماگمایی منطقه معدنی شهرک

ریولیت و ریوداسیت: بافت غالب در ریولیت‌ها بافت پورفیریک با خمیره میکروگرانولار-شیشه‌ای است که از هم‌رشدی کوارتز و فلدسپات‌آلکالن ایجاد می‌شود. در این سنگ‌ها حدود ۳۰ درصد حجم سنگ را فنوکریست و حدود ۷۰ درصد سنگ را خمیره تشکیل می‌دهد. فنوکریست‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات‌آلکالن و بیوتیت (کلریتی شده) می‌باشند و خمیره سنگ نیز از کوارتز، فلدسپات‌آلکالن و شیشه اسیدی تشکیل شده

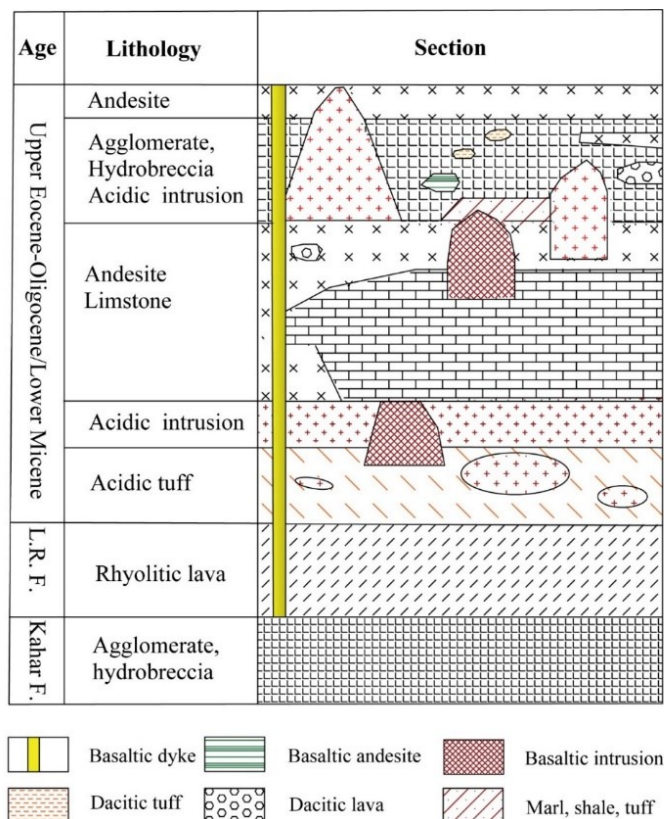
است. کانی‌های فرعی شامل کانی‌های اپاک از جمله اکسید آهن می‌باشند. فنوکریست‌های کوارتز (شکل ۵-۱-ج) دارای خلیج خوردگی و گردشده و در برخی نمونه‌ها همراه با مگنتیت هستند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و فلدسپات‌آلکان کاملاً به سریسیت و کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند و فقط قالبی از آن‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۳: زون‌های تکتونیکی منطقه تکاب (اقتباس از کتاب زمین‌شناسی اقتصادی ذخایر معدنی و طبیعی، ۱۳۸۶).

کریستال توف ریولیتی (توف اسیدی): بافت این سنگ‌ها ولکانوکلاستیک است. فنوکریست‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز (درصد حجمی کم)، فلدسپات‌آلکان بوده که در خمیره‌ای از کوارتز، فلدسپات‌آلکان، شیشه و کلسیت قرار می‌گیرند. توزیع فنوکریست‌ها در سنگ به صورت ناهمگن

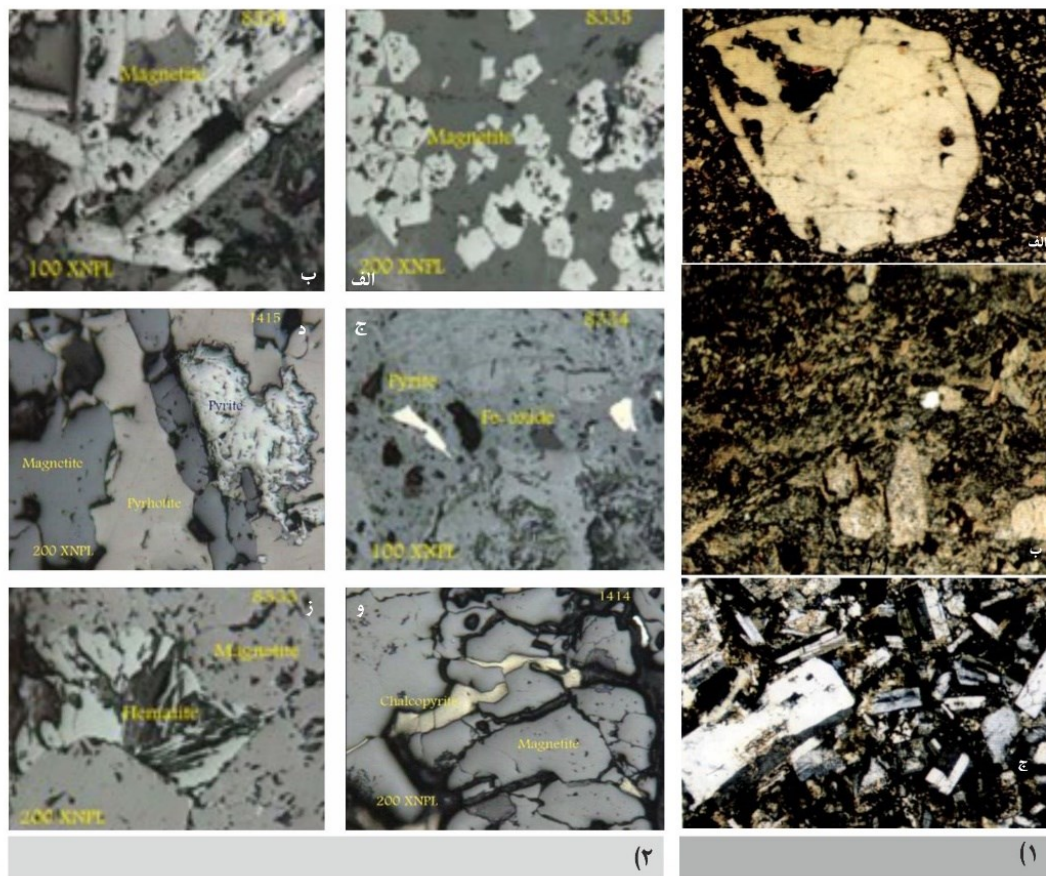
می‌باشد. فنوکریست‌های کوارتز عموماً بی‌شکل و گاهی زاویه‌دار و گوشه‌دار هستند. فنوکریست‌های فلدسپات‌آلکانل به کانی‌های رسی و سریسیتی دگرسان شده‌اند و معمولاً به صورت بی‌شکل دیده می‌شوند و غالباً فقط قالبی از آن‌ها باقی مانده است (شکل ۵-۱).  
 آندزیت‌ها: آندزیت‌ها دارای بافت پورفیریک با خمیره میکروولیتی - شیشه‌ای، پوئی کلیتیک و بافت گلوبروپورفیری هستند. حدود ۶۰ درصد سنگ را فنوکریست و ۴۰ درصد را خمیره تشکیل می‌دهد.



شکل ۴: ستون لیتواستراتیگرافی منطقه شهرک (اقتباس از کتاب زمین‌شناسی اقتصادی ذخایر معدنی و طبیعی ایران، ۱۳۸۶).

## کانه‌نگاری

مگنتیت: کانی فلزی اصلی در تمامی نمونه‌ها است. دارای اشکال اتومورف، ساب اتومورف) گاهی به صورت دانه‌هایی به شکل باریک و کشیده دیده می‌شود. مگنتیت حدود ۷۰-۱۵ درصد حجمی نمونه‌ها را تشکیل می‌دهند. بلورهای مگنتیت تحت فرآیند آلتراسیون سوپرژن در حال تبدیل به هماتیت هستند. این کریستال‌ها گاهی دارای بافت نیمه‌فشرده هستند و در حفرات برخی از این کریستال‌ها کانی پیروتیت به صورت انکلوزیون دیده می‌شود. پیروتیت و پیروتیت: پیروتیت به ترتیب در نمونه‌های مطالعه شده بین ۴۰-۸ و ۲۰-۲ درصد حجمی در تغییر است. پیروتیت‌ها دارای بافت Open space filling هستند. اغلب در این کانی آلتراسیون دیده نمی‌شود. گاهی در فضای بین کریستال‌های مگنتیت مشاهده می‌شود. کالکوپیریت: فراوانی این کانی در نمونه‌های مطالعه شده کمتر از ۱۰ درصد حجمی است و بافت آن پرکننده فضاهای خالی می‌باشد. این کریستال‌ها اغلب دارای شکل غیرهندسی نامشخص و به صورت اذخال‌های در متن کانی پیروتیت و گاه در فواصل بین کریستال‌های سایر کانی‌های فلزی تشکیل شده‌اند. اکسیدهای آبدار و ثانویه آهن: دارای فراوانی کمی هستند (شکل ۱۵). گاهی در فضاهای خالی سنگ میزبان و در فواصل بین بلورهای مگنتیت مستقر شده‌اند و گاهی نیز در قالب اتومورف و ساب‌اتومورف نوعی کانی مشاهده می‌شوند. گاهی از آلتراسیون شدید پیروتیت حاصل شده‌اند.



شکل ۵: بلورهای درشت مگنتیت و نمایی از اکسیدهای آهن، بلورهای کشیده مگنتیت، بلورهای اتومورف و ساب-اتومورف مگنتیت، فاز سولفیدی که متشکل از پیریت می‌باشد، کانی کالکوپیریت به صورت بین کانایی در بین کانی مگنتیت تشکیل شده، فراوانی کانی پیروتیت به همراه دیگر کانیهایی موجود و بلورهای کشیده هماتیت.

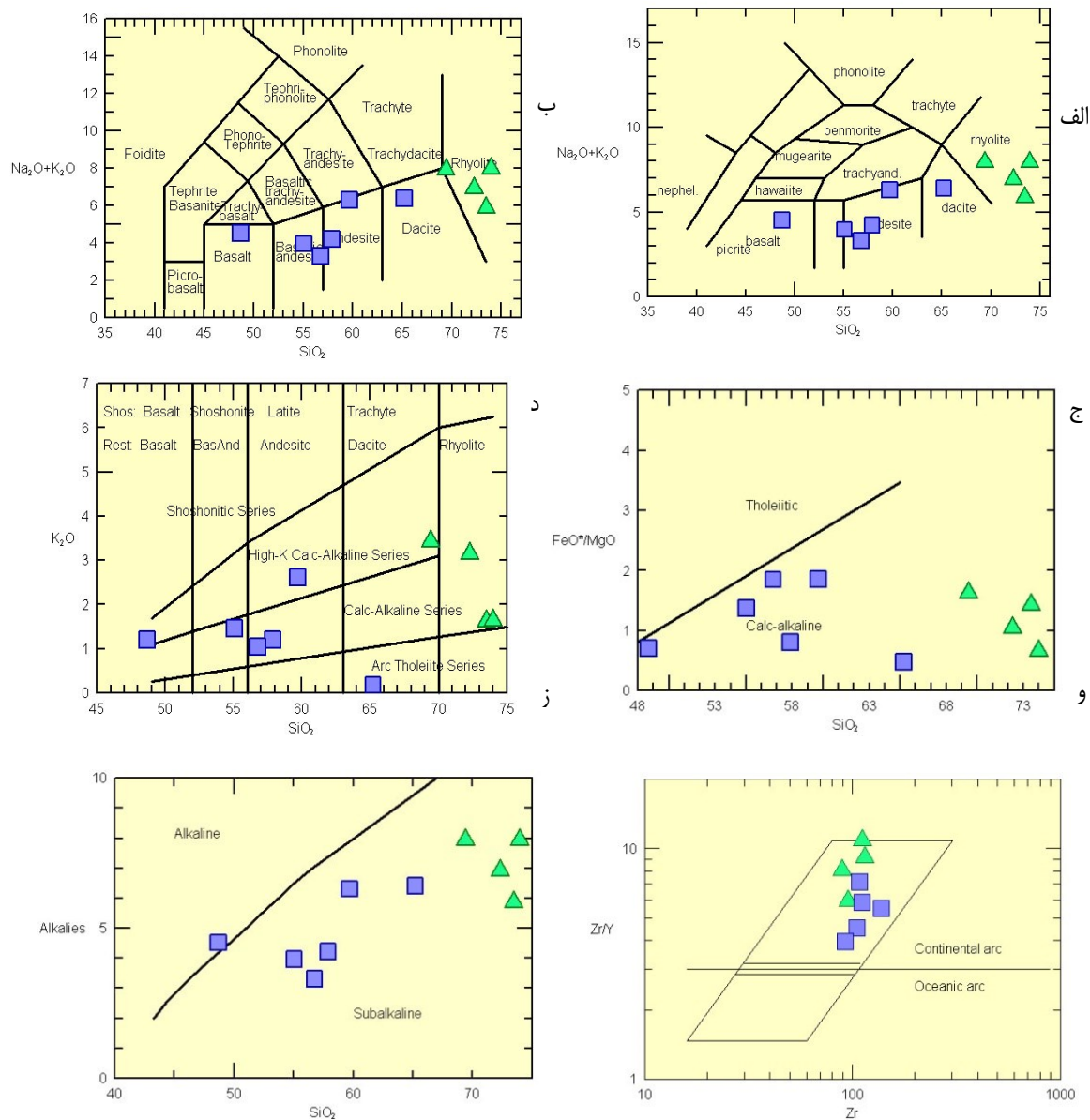
جدول ۱: نتایج تجزیه شیمیایی نمونه سنگ‌های منطقه مورد مطالعه

| Sample | SiO <sub>2</sub>              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | CaO  | MgO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO   |
|--------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------------------|------------------|------------------|-------|
| SH24   | 73.98                         | 15.45                          | 0.51                           | 0    | 0.43 | 0.696 | 6.31              | 1.64             | 0.28             | 0.009 |
| SH25   | 56.77                         | 14.08                          | 6.06                           | 4.28 | 8.88 | 2.953 | 2.26              | 104              | 0.7              | 0.114 |
| SH26   | 69.41                         | 13.39                          | 3.03                           | 1.29 | 2.25 | 1.677 | 4.52              | 3.42             | 0.24             | 0.033 |
| SH27   | 59.7                          | 16.3                           | 4.29                           | 2.26 | 4.55 | 2.075 | 3.7               | 2.61             | 0.53             | 0.054 |
| SH28   | 65.22                         | 16.16                          | 0.99                           | 0    | 6.33 | 1.874 | 6.22              | 0.18             | 0.47             | 0.021 |
| SH29   | 55.06                         | 13.99                          | 6.37                           | 4.19 | 6.78 | 4.193 | 2.5               | 1.46             | 0.68             | 0.125 |
| Sample | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Co                             | Cr                             | Cu   | Ga   | Hf    | La                | Nb               | Nd               | Ni    |
| SH24   | 0.055                         | 0                              | 34                             | 1    | 19   | 5     | 29                | 5                | 7                | 2     |
| SH25   | 0.106                         | 22                             | 14                             | 28   | 18   | 5     | 14                | 4                | 12               | 7     |
| SH26   | 0.075                         | 4                              | 2                              | 4    | 18   | 5     | 20                | 6                | 9                | 1     |
| SH27   | 0.174                         | 9                              | 3                              | 3    | 23   | 4     | 9                 | 15               | 29               | 1     |
| SH28   | 0.118                         | 13                             | 12                             | 15   | 15   | 4     | 6                 | 5                | 15               | 8     |
| SH29   | 0.116                         | 21                             | 47                             | 14   | 19   | 4     | 6                 | 1                | 12               | 2     |
| Sample | Pb                            | Rb                             | Sr                             | Th   | U    | V     | W                 | Y                | Zn               | Zr    |
| SH24   | 2                             | 40                             | 80                             | 9    | 4    | 48    | 14                | 11               | 2                | 89    |
| SH25   | 10                            | 29                             | 211                            | 2    | 2    | 169   | 0                 | 15               | 26               | 108   |
| SH26   | 5                             | 63                             | 150                            | 8    | 2    | 50    | 13                | 16               | 8                | 95    |
| SH27   | 8                             | 64                             | 265                            | 8    | 0    | 65    | 0                 | 25               | 18               | 138   |
| SH28   | 4                             | 5                              | 390                            | 6    | 1    | 96    | 523               | 4                | 18               | 120   |
| SH29   | 7                             | 47                             | 194                            | 4    | 3    | 159   | 4                 | 19               | 55               | 111   |



### رده‌بندی شیمیایی سنگ‌های منطقه شهرک

ترکیب سنگ‌شناسی نمونه‌های ولکانیکی مشابهت زیادی با نتایج حاصل از پتروگرافی دارند (جدول ۱ و شکل ۶)، این در حالی است که برخی از اختلاف مشاهده شده در رده‌بندی شیمیایی نمونه‌های منطقه را می‌توان به عوامل دگرسانی منطقه نسبت داد. نمونه‌های مورد مطالعه منطقه گروه کالک آلکان واقع شده‌اند (شکل ۶). در نمودار مثلی (Wood, 1980)  $Th-Zr/117-Nb/16$  و نمودار  $Ti/100-Zr-Y*3$  که نمودار محیط تکتونیکی سنگ‌های ماگمایی را نشان می‌دهد، سنگ‌های مورد مطالعه منطقه در محدوده ماگماتیسم مرتبط با قوس قرار می‌گیرند (شکل ۶). دیاگرام‌های بهنجار شده به گوشه اولیه و کندریت‌ها حاکی از غنی‌شدگی از LILE و LREE نسبت به HFSE و HREE دارد (شکل ۷).

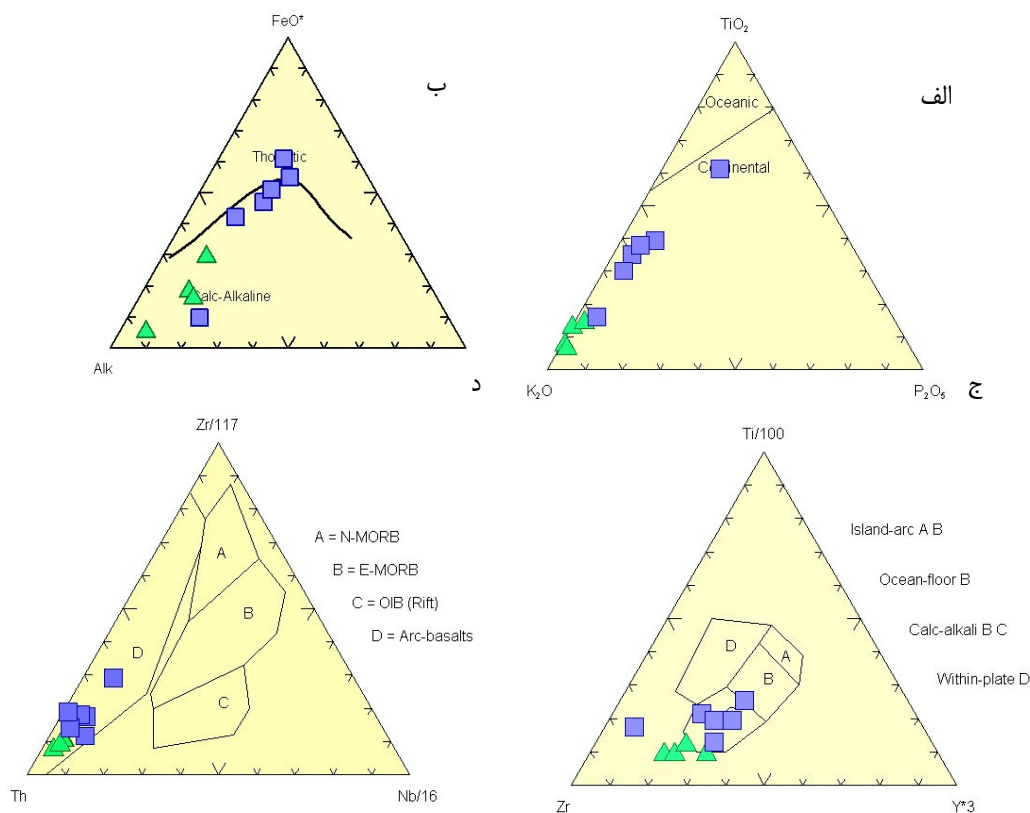


شکل ۶: نمودار  $Zr/117-Th-Nb/16$  (Wood, 1980)، آندزیت‌های شهرک ■، ریولیت و ریوداسیت‌های شهرک ▲، نمودار  $Ti/100-Zr-Y*3$ ، نمودار (Pearce & Can, 1973) آندزیت‌های شهرک ■، ریولیت و ریوداسیت‌های شهرک ▲

## بحث و بررسی

## ویژگی‌های فیزیکی و کانی‌شناسی کانسار شهرک

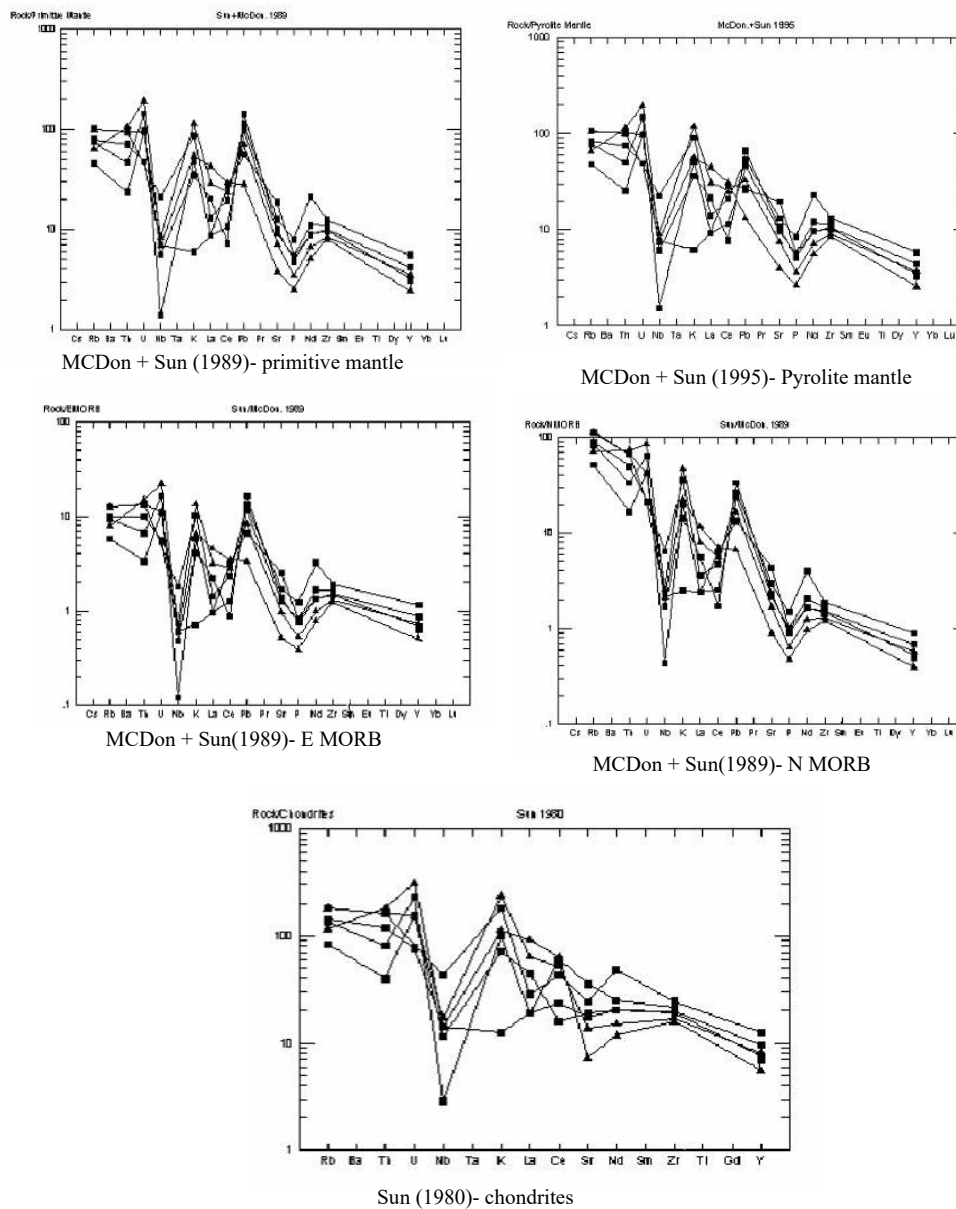
کانسنگ کانسار شهرک در هفت توده معدنی رخنمون دارد که همگی آن‌ها تقریباً در یک افق جای گرفته‌اند. همانطور که شکل ۱ نشان داده شده است اغلب آن‌ها واقع در بخش آهکی سازند قم می‌باشد و در مواردی که بخش آهکی سازند قم رخنمون ندارد، کانسنگ مستقیماً بر روی ریولیت‌ها و توف‌های ریولیتی و گاه بر روی نفوذی‌های کوچک واقع می‌شود. هر چند در اغلب موارد کنتاکت شارپ می‌باشد ولی به هرحال نزدیکی کنتاکت بر میزان کانی‌های پروپیلیتی بخصوص اپیدوت افزوده می‌شود که این مسئله در کمر پایین تمام توده‌های معدنی قابل مشاهده است.



شکل ۷: دیاگرام رده‌بندی شیمیایی Cox et al, 1979، آندزیت‌های شهرک ■، ریولیت و ریوداسیت‌های شهرک ▲ دیاگرام رده‌بندی بر اساس کانی‌های نورماتو، Strekayzen & Lumeter, 1979، آندزیت‌های شهرک ▲، ریولیت و ریوداسیت‌های شهرک ▲

سنگ میزبان به‌طور کلی سنگ‌های آهکی قم، ریولیت‌ها و در پاره‌ای از موارد آندزیت‌ها می‌باشند البته در جایی که لایه‌های آهن خوب برونزد ندارند، کمر بالا آندزیت می‌باشند. در محدوده کانسار شهرک‌ها (شهرک ۱:۳،۲) (در حاشیه کمربین کانسنگ) توده‌های نفوذی کوچک و کم‌ژرفا قابل مشاهده است، اما به‌طور کلی در تمام حفاری‌های اکتشافی، هم در جاهایی که آهک قم نازک بوده و گمانه‌ها از آنجا گذشته‌اند و هم در جاهایی که آهک قم وجود ندارد، گمانه‌ها در ژرفا به ریولیت، توف‌های اسیدی و نفوذی‌های کوچک کم‌ژرفا رسیده‌اند. در تمام توده کانی‌سازی شده در کانسار شهرک، کانی‌سازی اصلی از نوع مگنتیتی می‌باشد. هرچند به همراه کانی‌سازی اصلی مگنتیتی، کانی‌های فرعی مانند پیریت، کالکوپیریت، پروتیت و کانی‌های ثانویه اکسیدهای آهن مانند گوتیت و هماتیت نیز دیده می‌شود. اکسیدهای هماتیت و گوتیت اولیه نیستند و مقدار آن‌ها در کانسنگ خیلی کم است. کانی پیریت معمولاً در عمق بیشتر ظاهر می‌شود. با افزایش ژرفای کانی‌سازی بر مقدار آن افزوده می‌شود.

میزان پیریت بر پایه مغزه‌های حفاری در توده‌های شهرک متغیر است، به طوری که در محدوده کانسارهای سراب و شهرک ۳ کمترین میزان پیریت مشاهده می‌شود (البته ستبرای کانی‌سازی آهن این محدوده‌ها نیز کم می‌باشد. در واقع عوامل مؤثر بر فرسایش در مقایسه با توده‌های دیگر بیشتر عمل کرده است).



شکل ۸: نمودارهای عنکبوتی نمونه‌های منطقه معدنی شهرک

در کانسار شهرک ۲، بیشترین مقدار پیریت قابل مشاهده است، بخصوص در مغزه‌های حفاری با عمق ۳۰ متری افزایش مقدار پیریت شایان توجه بوده است. علت این امر این است که کانسار شهرک ۲ از یک طرف به دلیل مرتفع بودن و سرد بودن و از طرف دیگر تکتونیکی بودن کمتر در معرض عوامل فرسایش قرار گرفته است. در حقیقت توپوگرافی فعلی محدوده کانسار تا حدود زیادی در کنترل میزان سولفید (موجود در پیریت) مؤثر بوده است، به طوری که در جاهایی که توپوگرافی ملایم بوده، به دلیل اینکه عمل شستشو خوب انجام شده است، از میزان سولفید به مقدار

قابل توجهی کاسته شده است و از سوی دیگر هرچه کانسنگ تکتونیزه تر بوده، این عمل با درجه بیشتری مؤثر بوده است. زیرا آب‌های جوی خوب نتوانسته‌اند نفوذ نمایند و عمل شستشو را کامل کنند. به‌طور کلی هرچا کانی‌سازی دارای وسعت زیاد و ضخامت کم باشد، مقدار سولفید به دلیل شستشو کم می‌شود. در عمل فرسایش کانی مگنتیت کانی پایدار و کمتر دچار تجزیه قرار می‌گیرد و این در حالی است که سولفیدها مانند پیریت ناپایدار هستند و زودتر مورد تجزیه قرار می‌گیرند و این یک امر طبیعی است که در اغلب کانسارهای آهن ایران قابل مشاهده است. با توجه به مطالعات مقاطع صیقلی کانی‌های فلزی در نمونه‌های مطالعه شده در دو فاز اکسیدی شامل مگنتیت و اکسیدهای آبدار و ثانویه آهن مانند هماتیت و گوتیت و فاز سولفیدی شامل پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت تشکیل شده‌اند.

### خاستگاه

در ارتباط با خاستگاه این کانسار مواردی متعددی مطرح می‌گردد که از جمله:






(۱) کانی اصلی این کانسار مگنتیت است و کانی‌های فرعی مانند پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت نیز به طور فرعی همراه آن‌ها یافت می‌شود. (۲) سنگ‌های فراگیر ماده معدنی به جز واحد سنگ آهکی قم اغلب سنگ‌های آتشفشانی می‌باشند که غالب آنها از نوع ریولیت، توف‌های ریولیتی و توده‌های نفوذی کم ژرفا و حجم گسترده‌ای آندزیت می‌باشند. علی‌رغم حضور سنگ‌های آندزیتی نیز در محدوده‌های مجاور کانی‌سازی (در پیرامون محدوده کانی‌سازی حجم بسیار بیشتر در سنگ‌های اسیدی دارند)، ماده معدنی اغلب در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی و داسیتی می‌باشد. هرچند در خیلی از محدوده‌ها افق آهن‌دار کاملاً بر روی آهک و یا زیر آن قرار گرفته است و یا گاهی به‌ندرت حالت بین انگشتی دارد، اما کنتاکت با سنگ‌های آهک خیلی واضح است و تقریباً فاقد کانی‌سازی‌های اسکارن می‌باشد.

(۳) سنگ‌های آتشفشانی حجم غالب سنگ‌های ماگمایی منطقه را تشکیل می‌دهند، این سنگ‌ها همان‌طور که گفته شد به سری کالکوالکالن تعلق دارند و همگی به یک ماگما تعلق دارند که در نتیجه روند تفریق انواع سنگ‌های منطقه را تشکیل می‌دهند و در یک آشیانه ماگمایی متحول شده‌اند.

(۴) تقریباً تمام عدسی‌های آهن در یک افق می‌باشند و پاره‌ای عدسی‌ها مانند کرکرا ۱ و ۲ و چشمه به احتمال توسط فرآیندهای فرسایشی از هم جدا شده‌اند. همچنین تفکیک شهرک ۱ و ۳ خیلی نامشخص و غیر قابل تفکیک می‌باشد. در این راستا می‌توان حدس زد که حدود نیمی از ذخیره آهن شهرک فرسایش یافته باشد. بر مبنای مطالعات صحرایی، پتروگرافی و مینرالوگرافی توالی تشکیل کانه‌ها در محدوده معدنی مورد مطالعه به ترتیب شامل مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت و اکسیدهای آبدار آهن می‌باشند (شکل ۵-۲-د).

(۵) در برخی از نقاط منطقه شهرک ساختارهایی مشاهده می‌شود که حاکی از آن است که مذاب مگنتیتی به صورت پسودومورف جایگزین آهک‌های مرجانی در زمانی که سنگ‌های آهکی هنوز خوب دیاژنز نیافته‌اند، شده است (شکل ۶).

(۶) شواهد صحرایی حکایت از این دارد که محدوده کورکورا ۱ و ۲ و چشمه، ساختار کالدرایی دارند که بعداً توسط نفوذی‌های کوچک که در آن‌ها نفوذ کرده‌اند، شکل واقعی آن به هم ریخته است. شایان ذکر است بیشترین ذخیره آهن در همین محدوده است.

| کانه       | کانه‌های کانی‌سازی  |
|------------|---|
|            | انتها   |
| گوتیت      |  |
| هماتیت     |   |
| پیروتیت    |   |
| کالکوپیریت |    |
| پیریت      |    |
| مگنتیت     |    |

شکل ۹: توالی کانی‌سازی در کانسار شهرک

با توجه به آنچه گفته شد و با توجه به بررسی‌های صحرایی و مقایسه ویژگی‌های کلی زمین‌شناسی محدوده معدنی و شکل کانی‌سازی، کانسار شهرک را باید یک کانسار آتشفشان‌زاد دانست و می‌توان تصور کرد که بخشی از کانی‌سازی به‌صورت جریان‌گدازه مگنتیتی (فلوی مگنتیتی) به‌وجود آمده باشد.



شکل ۱۰: جایگزینی مذاب مگنتیتی در آهک مرجانی

در منطقه شهرک در زمان الیگوسن تا میوسن زیرین در نتیجه تفریق و تحول در یک مخزن ماگمایی بزرگ به وسعت چندین کیلومتر مکعب (با توجه به حجم سنگ‌های آتشفشانی) به دو ماگمای ریولیتی در بالا و آندزیتی در پایین تفکیک شده است. ماگمای ریولیتی تفریق شده به خاطر ماهیت تشکیل، از آب و اکسیژن فقیر بوده و درجه حرارت آن در مقایسه با ماگمای آندزیتی نسبتاً پایین است. بنابراین کانی‌های مصرف‌کننده آهن ماگمای اسیدی مانند بیوتیت و آمفیبول به علت حرارت کم و کمبود آب ماگما تشکیل نشده‌اند. در این شرایط یک مذاب مگنتیتی از مذاب‌های آندزیتی و ریولیتی تفکیک شده است. مذاب مگنتیتی را فورمال‌های دیگر مانند H<sub>2</sub>S و بخار آب همراهی می‌کرده‌اند و در نتیجه این مذاب مگنتیتی آنقدر سنگین نبوده است که در زیر دو مذاب دیگر قرار گیرد و بیشتر در روی آندزیت‌ها و حاشیه ریولیت تا بالای آن‌ها در آشیانه ماگمایی قرار گرفته است. بنابراین، پس از فوران ماگمای ریولیتی و قبل از فوران ماگمای آندزیتی، این گدازه نیز بیرون ریخته و عدسی‌های آهن را تشکیل داده است. گدازه مگنتیتی که در حجم کم در مقایسه با حجم ماگمای ریولیتی به صورت فلوی مگنتیتی فوران نموده است، مانند یک گدازه عمل نموده است که آن را فلوی مگنتیتی نامگذاری نموده‌ایم.

### نتیجه‌گیری

در منطقه معدنی شهرک واحدهای سنگی الیگوسن-میوسن از گسترش زیادی برخوردارند که سنگ میزبان کانی‌سازی آهن می‌باشند. فعالیت‌های ماگمایی در زمان الیگوسن بالا-میوسن زیرین در منطقه با برتری سنگ‌های آتشفشانی اسیدی در مقابل بازیک قابل تشخیص است. فعالیت‌های ماگمایی در زمان الیگوسن-میوسن در منطقه شهرک به سه شکل بوده است: ۱- ولکانیسم اسیدی ۲- پلوتونیسم متوسط تا اسیدی ۳- ولکانیسم آندزیتی. سنگ‌های ماگمایی منطقه شهرک به شکل زیر دسته‌بندی می‌شوند: (۱) سنگ‌های آتشفشانی اسیدی شامل ریولیت، ریوداسیت و توف‌های وابسته، (۲) سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و آندزیت-بازالتی، (۳) سنگ‌های نفوذی کم عمق شامل تونالیت، دیوریت و گرانودیوریت. تمامی واحدهای مورد مطالعه منطقه به سری ماگمایی به سری ماگمایی کالک آلکالن تعلق دارند و از نظر محیط تکتونیکی در محیط کوهزایی مناطق

فرورانش قرار می‌گیرند. در تمام توده کانی‌سازی شده در کانسار شهرک، کانی‌سازی اصلی از نوع مگنتیتی می‌باشد. هرچند همراه کانی‌سازی، کانی‌های فرعی مانند پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت و کانی‌های ثانوی اکسیدهای آهن مانند هماتیت، گوتیت نیز دیده می‌شوند.

با توجه به بررسی‌های صحرایی و مقایسه ویژگی‌های کلی زمین‌شناسی محدوده معدنی و شکل کانی‌سازی، کانسار شهرک را باید یک کانسار آتشفشان‌زاد دانست و می‌توان تصور کرد با توجه به شواهد بخشی از کانی‌سازی به صورت فلوی مگنتیتی بوده است. به عبارت دیگر، فرم و چگونگی رخنمون این کانسار ولکانوژنیک موید یک کانسار به صورت فلوی مگنتیتی می‌باشد. خاستگاه‌های ذکر شده برای کانسار نظیر اسکارنی و ولکانوژنیک نمی‌تواند تمام شواهد موجود در کانی‌سازی و شکل ماده معدنی را در کانسار توجیه کند. در مورد خاستگاه اسکارنی کانی‌سازی خاص و گسترده‌ای از نوع اسکارن در شهرک مشاهده نمی‌شود. بیشترین اکسید آهن در این کانسار مگنتیت است و همراه آن مقادیر محدودی هماتیت وجود دارد.

## منابع

- رحیم زاده، ف، الیگوسن میوسن پلیوسن، طرح تدوین کتاب، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۳، ۳۱۱ص  
 رولینسون، ه آر، کاربرد داده‌های زمین شیمیایی، ترجمه دکتر فرید مر و سروش مدبری، مرکز نشر دانشگاهی.  
 صمیمی نمین و همکاران، ۱۳۷۰، گزارش نقشه زمین شناسی کانسار شهرک آهن، شرکت آهن آجین.  
 علوی نائینی و همکاران، ۱۹۷۶، نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ تکاب، سازمان زمین شناسی کشور، ۱۹۷۶  
 علوی نائینی و همکاران، گزارش نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ تکاب، سازمان زمین شناسی، ۱۹۸۲  
 قربانی، م، ۱۳۷۸، بررسی پترولوژیکی سنگ‌های ماگمایی ترسیر- کوآرنز و متالوژنی منطقه تکاب، پایان‌نامه دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.  
 قربانی، م، زمین شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه‌های معدنی ایران، انتشارات آراین زمین، ۱۳۸۷، ۵۷۰ص  
 قربانی، م، زمین شناسی ذخایر معدنی و طبیعی ایران، انتشارات آراین زمین، ۱۳۸۶، ۵۱۵ص  
 مصطفوی، ۱۳۷۴، چینه‌شناسی و فسیل شناسی منطقه شهرک تکاب (خاور تکاب)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران.

## References

- Brown, L.L., McEnroe, S.A., Harrison, R.J., 2005, Rock Magnetic properties of samples from El Laco magnetite Flow, High Andes, Chile, with particular attention to high coercivity materials,
- Irvine, T.N and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, Earth Sci, 8, 523-770.
- Le Maitre et al, 1989, Classification and Nomenclature of Igneous rock and Glossary of terms.
- Le. Bas. M.J., Le. Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks on the total alkali- Silica diagram. Journal of petrology, 27(3), 745- 750.
- Middlemost. A.K., 1994, Toward a Comprehensive Classification of Igneous rocks and magma, Earth sci. Rev. 37, 215- 224
- Pearce, J., Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses, Earth Planet. Sci. Lett, 19, 290-300.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E., Birkett, T.C., 1977, The relationship between major element and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks, Earth planet. Sci. Lett, 36, 121-132.
- Rollinson, H.R., 1993, Using Geological Data: evolution...., Longman scientific & technical, pp 442.

- Streckeisen, A., Le Maiter, R.W., 1979, A chemical approximation to the modal QAPF classification of igneous rocks, *Neues Jahrb mineral, Abh*, 136, 169-206.
- Sun and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematic of Oceanic basalts, *Geol. Soc. London. Spec. Pub.* 42, pp. 313-345.
- Wood, D. A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary science Letters*. Volume 50. Issue 1, p 11-30.
- Alavi, M., 2004- Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American journal of Science*, 304: 1-20.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. & Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.
- Berberian, M. & King, G. C., 1981- Towards a paleogeography and tectonics evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265.
- Fonoudi, M and Sayareh, A.R., "Geology map of Yassoukand (Ghojor) 1:100000" Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (2000) (in Persian).
- Allen, M.B., Armstrong, H.A., 2008. Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 265 (1-2), 52-58.
- Babazadeh, S., Raeisi, D., D'Antonio, M., Zhao, M., Long, L.E., Cottle, J.M., Modabberi, S., 2022. Petrogenesis of Miocene igneous rocks in the Tafresh area (Central Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran): Insights into mantle sources and geodynamic processes. *Geol. J.* 57(7), 2884-2903.
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M., Lizuka, Y., 2013. Zircon U-Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos* 162-163, 162-187.
- Madanipour, S., Ehlers, T.A., Yassaghi, A., Enkelmann, E., 2017. Accelerated middle Miocene exhumation of the Talesh Mountains constrained by U-Th/He thermochronometry: evidence for the Arabia-Eurasia collision in the NW Iranian Plateau. *Tectonics* 36 (8), 1538-1561.
- McQuarrie, N., van Hinsbergen, D.J.J., 2013. Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: Age of collision versus magnitude of continental subduction. *Geology* 41 (3), 315-318.
- Moghadam, H.S., Griffin, W.L., Santos, J.F., Chen, R.X., Karsli, O., Lucci, F., Sepidbar, F., O'Reilly, S.Y., 2022a. Geochronology, geochemistry and petrology of the Oligocene magmatism in SE segment of the UDMB, Iran. *Lithos* 416-417, 106644.
- Moghadam, H.S., Li, Q.L., Griffin, W.L., Stern, R.J., Santos, J.F., Ducea, M.N., Ottley, C.J., Karsli, O., Sepidbar, F., O'Reilly, S.Y., 2022b. Temporal changes in subduction- to collision-related magmatism in the Neotethyan orogen: The Southeast Iran example. *Earth Sci. Rev.* 226, 103930.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Lin, Y.C., Lee, H.Y., Lo, C.H. Khatib, M.M., 2013. Iranian ultrapotassic volcanism at ~11 Ma signifies the initiation of post-collisional magmatism in the Arabia-Eurasia collision zone. *Terra Nova* 25, 405-413.

- Raeisi, D., Zhao, M., Babazadeh, S., Long, L.E., Hajsadeghi, S., Modabberi, S., 2021. Synthesis on productive, sub productive and barren intrusions in the Urumieh–Dokhtar magmatic arc, Iran, constrains on geochronology and geochemistry. *Ore Geol. Rev.* 132, 103997.
- Raeisi, D., Babazadeh, S., Long, L.E., Zhao, M., Cottle, J.M., Nayebi, N., Modabberi, S., 2024. Geochemical and isotopic signatures, and zircon U–Pb ages of the oldest known intrusive rocks associated with porphyry Cu deposits in the central Urumieh–Dokhtar magmatic arc, Iran. *J. Geochem. Explor.* 256, 107366.