

# مطالعه عوامل موثر بر کانه‌زایی معدن مس-طلای پورفیری- اپی‌ترمال سوناجیل، با استفاده از مطالعات سنجش از دور، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی

محمد معانی‌جو<sup>۱)</sup>، طیبه رضانی<sup>۲</sup> و سعید علیپور<sup>۳</sup>

۱. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲. دانشجوی دکتری گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۳. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، شرکت مهندسی مشاور پارس اولنگ، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۷

## چکیده

به منظور شناسایی عوامل موثر بر کانی‌سازی معدن مس-طلای پورفیری-اپی‌ترمال سوناجیل به بررسی سنجش از دور، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی پرداخته شد. بعد از حذف پوشش گیاهی توسط روش شاخص بهنجار شده پوشش گیاهی و اثرات بازتابش خورشیدی، خطای دستگاهی و اثرات توپوگرافی و آلبدو توسط روش لاگ بازماندی (LR)، روش‌های نسبت بانندی (BR)، ترکیب کاذب رنگی (FCC)، تحلیل مولفه اصلی (PCA) و فیلترینگ تطبیق یافته تنظیم اختلاط (MTMF) برای شناسایی زون‌های دگرسانی اصلی منطقه مورد مطالعه به کار رفت و دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک پیشرفته و پروپلیتیک آشکار شدند. دگرسانی‌های مذکور توسط مطالعات کانی‌شناسی تایید شدند. همچنین بررسی زمین‌شیمی نمونه کل توده پورفیری سوناجیل ترکیب میکرودیوریتی و شوشونیتی و پس از کوهزایی بودن معدن سوناجیل را مشخص کرد. در پایان، اختلاف تراکم گسلش، ترکیب ماگمای منشا و عمق کانه‌زایی از عوامل موثر بر کانه‌زایی معدن سوناجیل ذکر شد.

**واژه‌های کلیدی:** کانی‌سازی مس-طلا، نهشته‌های پورفیری-اپی‌ترمال، زمین‌شیمی، سنجش از دور، شمال غرب کشور.

## مقدمه

می‌شود. به عبارتی دیگر، کانی‌ها نشانه طیفی<sup>۲</sup> مشخصی در طیف‌های مرئی و فروسرخ نزدیک<sup>۳</sup> تا فروسرخ با طول موج کوتاه<sup>۴</sup> ( $2/5-0/4 \mu\text{m}$ ) و یا فروسرخ حرارتی<sup>۵</sup> ( $8-14 \mu\text{m}$ )

انعکاس طیفی باندهای مرئی و نزدیک مرئی به‌عنوان سریع‌ترین و ارزان‌ترین ابزار در تشخیص کانی‌شناسی نمونه‌ها و دستیابی به ترکیب شیمیایی آن‌هاست. موقعیت، شکل، عمق، پهنا و تقارن طیف عارضه‌هایی مانند کانی و سنگ به‌وسیله ساختار و ترکیب کانی جذب‌کننده تعیین

1. Log-Residual
2. Spectral Signature
3. Visible Near Infrared (VNIR)
4. Shortwave Infrared (SWIR)
5. Thermal Infrared (TIR)

\* نویسنده مرتبط: Maanijou@yahoo.com

شامل تناوبی از نهشته‌های ولکانیک و ولکانو-کلاستیک ائوسن می‌باشد که از قدیم به جدید شامل آندزیت پورفیری، تراکی‌آندزیت و سنگ‌های آذر آواری که توسط دایک‌های دیابازی قطع شده‌اند (پالئوسن، ائوسن زیرین)، تراکی‌آندزیت و پیروکسن‌آندزیت، میکرودیوریت، گرانودیوریت، گدازه‌های بازالتی و رسوبات کواترنری (شکل ۱) است.

توده سوناجیل پورفیری با ترکیب میکرودیوریتی، قدیمی‌ترین پالس نفوذ در طی ماگماتیسم ترشیری در منطقه است. این توده مرز مشخصی را با نهشته‌های ولکانیک و ولکانو-کلاستیک ائوسن در ضلع شمال شرقی-شمال غربی و جنوبی منطقه داشته و تزریق آن به‌درون این نهشته‌ها در توسعه دگرسانی و تغییر مشخصات تکتونیکی لایه‌ها موثر بوده است.

توده پورفیری سوناجیل دگرسانی‌های متنوعی از جمله پتاسیک، فلیک، پروپلیتیک و آرژیلیک را در سطح به‌نمایش گذاشته است. این توده یک استوک بیضوی با قطر بزرگ حدود ۵ کیلومتر و قطر کوچک ۲ تا ۲/۵ کیلومتر می‌باشد و قطر بزرگ آن در راستای شرقی-غربی قرار گرفته است.

دومین توده نفوذی در منطقه شامل تزریق توده گرانیتوئیدی اینچه به درون نهشته‌های ائوسن و توده پورفیری سوناجیل بوده است. توده مذکور که ترکیبی در حد کوآرتزومونونیت، سینودیوریت، گرانودیوریت، تا گابرویدیوریت دارد در شمال توده پورفیری سوناجیل مرز مشخصی با آن داشته و در محل تماس، دایک‌های زیادی از این توده منشعب شده و در جهات مختلفی به درون توده پورفیری سوناجیل و سنگ‌های ولکانیک و ولکانو-کلاستیک ائوسن تزریق شده‌اند. تنوع ترکیبی این توده به‌واسطه زون‌بندی ترکیبی آن می‌باشد و در حواشی بازیک توده، ترکیب آن گابروئی تا گابرویدیوریتی بوده و به‌سمت بخش مرکزی استوک ترکیب آن اسیدی‌تر می‌شود. آخرین فعالیت ماگمایی در محدوده مورد مطالعه مربوط به فعالیت آتشفشانی تراکی‌آندزیت بازالتی تا تراکی‌آندزیتی اکوز داغی است.

دارند. بنابراین، عامل تعیین‌کننده جذب، مستقیماً به کانی‌شناسی نمونه مربوط می‌شود. طیف‌سنج بازتابی و حرارتی فضا برد پیشرفته<sup>۱</sup> محصول مشترک ناسا و وزارت صنعت و تجارت اقتصادی ژاپن است. داده‌های سنجنده استر به علت اینکه طیف الکترومغناطیسی وسیعی از فرسوخ نزدیک تا فرو سرخ حرارتی را شامل می‌شود، در تشخیص کانی‌ها بخصوص در مطالعات دگرسانی به‌کار می‌رود (Di Tommaso and Rubinstein, 2007). در این زمینه مطالعات کانی‌شناسی و زمین‌شیمی در جهت تایید زمینی مطالعات سنجنش از دور به‌کار می‌رود.

در این پژوهش به بررسی دگرسانی و گسلش معدن سوناجیل و نیز کانی‌شناسی و زمین‌شیمی آن به‌منظور شناسایی عوامل موثر بر اقتصادی شدن آن پرداخته شده است. محدوده اکتشافی سوناجیل در شمال غرب کشور، استان آذربایجان شرقی و شهرستان هریس واقع شده است. فاصله آن از شهر هریس ۱۷ کیلومتر می‌باشد. کانی‌سازی بخش مرکزی و شمال شرقی معدن سوناجیل به‌صورت مس پورفیری و در بخش غربی و جنوب غربی به‌صورت اپی‌ترمال است. در طی اکتشاف ۴/۳ تن طلا در بخش اپی‌ترمال و دوست‌هزار تن مس در بخش رخنمون‌های پورفیری کشف شد (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۵).

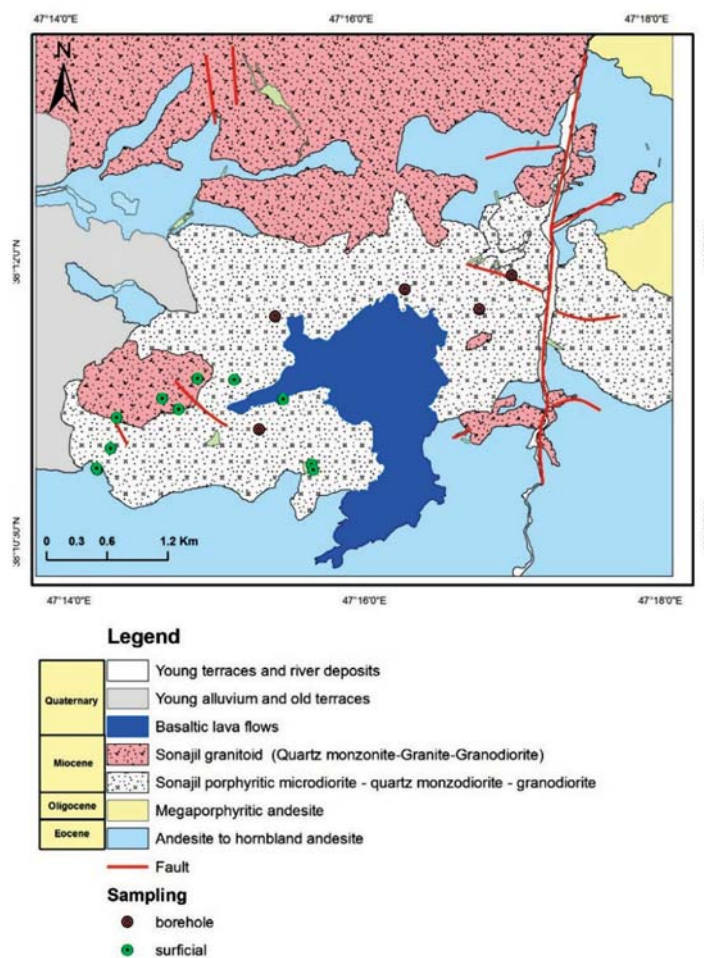
## روش مطالعه

در طی عملیات صحرایی، حدود ۲۰ نمونه سطحی و مغزه از واحدهای اصلی به‌خصوص توده میکرودیوریت سوناجیل جهت تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی برداشته شد. لیتولوژی و انواع دگرسانی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نور عبوری و انعکاسی مطالعه شدند. همچنین حدود پنج نمونه از سنگ‌های کمتر دگرسان شده برای آنالیز ICP-MS به آزمایشگاه اکمه کانادا فرستاده شدند. نتایج زمین‌شیمی حاصل با استفاده از نرم‌افزارهای GCDkit بررسی شدند.

## زمین‌شناسی

بررسی‌های صحرایی در محدوده کانسار سوناجیل نشان می‌دهد که سنگ‌های درونگیر توده پورفیری سوناجیل

1. Advanced Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی-دگرسانی منطقه سوناچیل همراه برش‌های عرضی و موقعیت محدوده مورد مطالعه در شمال غرب ایران (اقتباس از حسین‌زاده، ۱۳۸۷)

## پیش‌پردازش

نویز دستگامی، بازتابش و توپوگرافی را کاهش می‌دهد، بنابراین نتایج بیشتر نمایانگر عوارضی مانند خاک و لیتولوژی هستند و بیشتر با کتابخانه طیفی USGS قابل مقایسه‌اند (Dalton et al., 2004). در واقع این روش تصحیح مشابه IAR است، اما از روش‌های آماری استفاده می‌کند. در روش LR داده‌ها توسط بازمانده‌های لگاریتمی طیف ورودی نرمال می‌شود. بعد از این تصحیح، ماسک NDVI (شاخص بهنجارشده پوشش گیاهی) به کار برده شد. این شاخص با استفاده از فرمول ۱ به دست می‌آید:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (1)$$

در این فرمول NIR فرورسرخ نزدیک یا باند ۳ استر و red بر باند ۲ منطبق است (Rowan et al., 1977)

از ۱۴ باند استر، ۶ باند از SWIR و ۳ باند از VNIR، بیشتر برای نقشه‌برداری زون‌های دگرسانی به کار می‌روند (Phienweij and Singh, 2005; Mars and Rowan, 2006; Di Tommaso and Rubinstein, 2007; Weldemariam, 2009). داده‌های Level-1A استر محصول پردازش نشده هستند، درحالی‌که داده‌های Level-1B نتیجه تصحیح هندسی و رادیومتری داده‌های Level-1A هستند (Rowan et al., 1977). در مرحله پیش‌پردازش روش Log-Residual (LR) برای حذف بازتابش خورشیدی، خطای دستگامی و اثرات توپوگرافی و آلبدو از باندهای SWIR استر به کار رفت. این الگوریتم

## پردازش

یکی از کاربردهای سنجش از دور در تعیین زون‌های دگرسانی است. روش‌های مختلفی برای نقشه‌برداری دگرسانی به کار می‌روند (معانی جو و همکاران، ۱۳۹۵؛ آلیانی و همکاران، ۱۳۹۳). در این پژوهش از روش‌های ترکیب رنگی کاذب (FCC)، نسبت باندهای (BR) و تحلیل مولفه اصلی (PCA) استفاده شده است.

## ترکیب رنگی کاذب

بر طبق طیف کانی‌های کتابخانه USGS، انعکاس بیشتر کانی‌های Al-OH مانند مسکویت، کائولینیت، مونت‌موریونیت و ایلیت (کانی‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک) در باند ۴ SWIR است و انعکاس قابل توجه کانی‌های Mg-OH دار از قبیل اپیدوت و کلریت (کانی‌های زون پروپلیتیک) در باندهای ۴ و ۵ SWIR است (شکل ۲-الف). بنابراین تصویر RGB در باندهای ۴۶۸ SWIR، این دگرسانی را به خوبی نشان می‌دهد (Yetkin, 2003). در تصویر حاصل، زون‌های فیلیک و آرژیلیک صورتی تا قرمز و زون پروپلیتیک سبز (Pour and Hashim, 2012b) و سنگ‌های آتشفشانی دگرسان نشده آبی-خاکستری هستند (Zhang et al., 2007). این روش در کانسار طلای ساری گونی نتایج خوبی داده است (معانی جو و همکاران، ۱۳۹۴).

## نسبت باندهای

نسبت باندهای روشی کاربردی در تشخیص مجموعه کانی‌های انواع دگرسانی‌های مختلف با استفاده از حذف مقادیر ثابت تابشی و توسعه اختلافات طیفی است (Crippen et al., 1988; Phienwej and Singh, 2005; Weldemariam, 2009).

نینومیا (Ninomiya 2003) چهار شاخص را با استفاده از شش باند SWIR پیشنهاد داد. معادله ۵ شاخص کوارتز را با استفاده از ۴ باند TIR به دست می‌آورد (Bonham Jr, 1986; John et al., 2010).

$$OHI = (band\ 7/band\ 6) \times (band\ 4/band\ 6) \quad (2)$$

$$KLI = (band\ 4/band\ 5) \times (band\ 8/band\ 6) \quad (3)$$

$$ALI = (band\ 7/band\ 5) \times (band\ 7/band\ 8) \quad (4)$$

$$QI = (band\ 11/(band\ 10 + band\ 12)) \times (band\ 13/band\ 12) \quad (5)$$

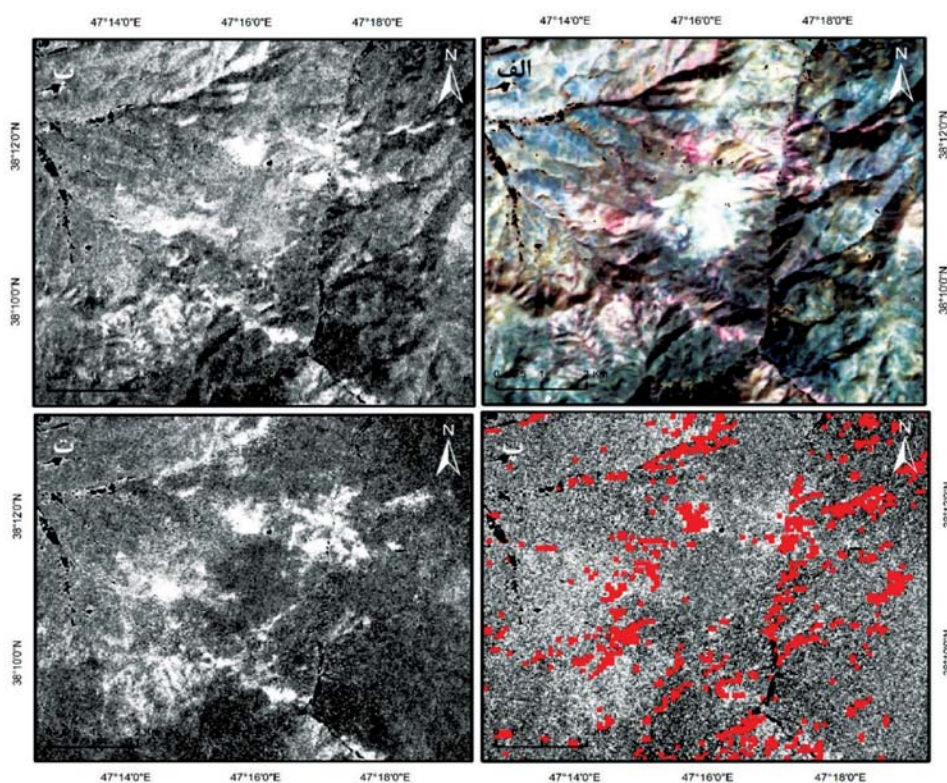
در این فرمول‌ها KLI، ALI، QI و OHI به ترتیب شاخص‌های کائولینیت، کوارتز، آلونیت و کانی‌های هیدروکسیل دار هستند که در مورد معدن سوناجیل به کار رفتند (شکل ۲).

## تحلیل مولفه اصلی

تبدیل مولفه اصلی یک روش چندمتغیره آماری است که متغیرهای خطی ناهمبسته را به ترکیب‌های خطی با واریانس کمتر (PC) تبدیل می‌کند (Mars and Rowan, 2006). مولفه‌های حاصل نشانه‌های طیفی مواد مختلف مانند کانی‌ها و پوشش گیاهی را بر سطح زمین نشان می‌دهد. روش PCA انتخابی، نتیجه اجرای روش PCA بر باندهایی است که براساس مشخصات جذبی و انعکاسی کانی‌های مورد نظر انتخاب شده‌اند.

این روش بر باندهای ۷۸۹ و ۴۵۷ داده‌های تصحیح شده استر انجام شد تا دگرسانی پروپلیتیک و آرژیلیک را نشان دهد. سنگ‌های غنی از رس معمولاً در بالا و مرکز یک سامانه مس پورفیری و همچنین در حاشیه آن ایجاد می‌شوند و به عنوان دگرسانی‌های آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته شناخته می‌شوند. رایج‌ترین کانی‌های آرژیلیک پیشرفته آلونیت، دیاسپور، توپاز، کروندوم، دومرتیریت، پیریت و زونیائیت است (Kim and Park, 2003). کانی‌های غنی از سیلیس دگرسانی آرژیلیک دو خصوصیت طیفی مشخص دارند: (۱) یک خصوصیت انعکاسی بارز در باند ۴ استر و (۲) یک جذب نزدیک طیف ۲/۳ μm (باند ۵)، درحالی‌که دیاسپور، کروندوم و دومرتیریت مشخصه طیفی جذب در باندهای آخر استر دارند (شکل ۴). بنابراین علامت‌های بردار ویژه<sup>۲</sup> PC2 و PC3 در PCA باندهای ۴۵۷ کروندوم، دیاسپور و دومرتیریت را نشان می‌دهد (جدول ۱).

1. . Dumortierite  
2. . Eigenvector



شکل ۲. الف) تصویر ترکیب رنگی کاذب ۴۶۸ و شاخص‌های (ب) OH، (پ) آلونیت منطبق بر پیکسل‌های قرمز نمایانگر شاخص کوارتز و (ت) کائولینیت، معدن سوناجیل

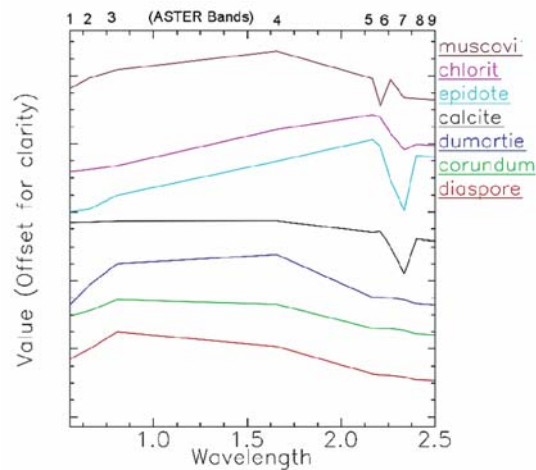
می‌شود. همان‌طور که گفته شد، منطقه شمال و شمال شرق با کانه‌زایی پورفیری و منطقه غرب و جنوب غرب با کانه‌زایی اپی‌ترمال مرتبط است.

جدول ۱. ماتریس بردارهای ویژه تحلیل مولفه اصلی بر باندهای ۴۵۶ استر منطقه سوناجیل. زون فیلیک در PC3 آشکار می‌شود

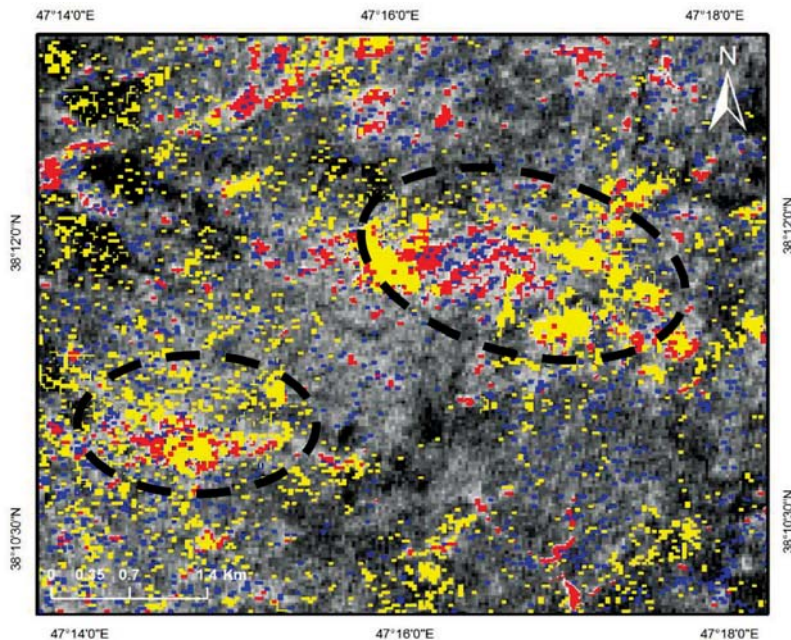
	PC1	PC2	PC3
Band 4	۰. ۶۱۳۱۱۷	۰. ۷۸۸۹۵۰	۰. ۰۴۰۵۶۱
Band 6	۰. ۵۵۹۷۹۶	-۰. ۳۹۷۶۵۹	-۰. ۷۲۶۹۷۸
Band 7	۰. ۵۵۷۴۲۰	-۰. ۴۶۸۴۲۸	۰. ۶۸۵۴۶۲
Band 4	۰. ۶۲۶۱۹۶	۰. ۷۷۵۰۹۹	-۰. ۰۸۴۲۶۴
Band 5	۰. ۵۳۱۵۶۹	-۰. ۵۰۳۴۹۷	-۰. ۶۸۱۱۲۱
Band 7	۰. ۵۷۰۳۶۳	-۰. ۳۸۱۷۲۳	۰. ۷۲۷۳۰۶
Band 7	-۰. ۵۸۵۲۱۱	-۰. ۴۸۶۴۷۰	-۰. ۶۴۸۷۴۹
Band 8	-۰. ۶۰۴۰۳۵	-۰. ۲۷۲۲۳۹	۰. ۷۴۹۰۱۸
Band 9	-۰. ۵۴۰۹۸۹	۰. ۸۳۰۲۰۱	-۰. ۱۳۴۵۲۷

همچنین کلسیت، کلریت و اپیدوت کانی‌های دگرسانی پروپلیتیک هستند که یک مشخصه جذب در  $2/35 \mu\text{m}$  یا باند ۸ دارند (جدول ۱ و شکل ۳) (Rowan et al., 1977; Hunt and Ashley, 1979; Spatz and Wilson, 1995; Dalton et al., 2004; Mars and Rowan, 2006; Rowan et al., 2006; Pour and Hashim, 2011) در نتیجه علامت منفی در باند ۸ PC3 در روش PCA سه باند ۷۸۹ نشان‌دهنده رخداد این کانی‌ها و دگرسانی پروپلیتیک است. در معدن سوناجیل دگرسانی‌های فیلیک (PC3)، آرزلیک پیشرفته (PC2) و پروپلیتیک (PC3) به ترتیب به وسیله باندهای ۴۶۷، ۴۵۷ و ۷۸۹ (جدول ۱) به دست آمد (شکل ۴). تصویر استخراج شده بر نتایج زمینی منطبق است.

تمرکز دگرسانی فیلیک و آرزلیک در شمال، شمال شرق و جنوب غرب و غرب توده بازالتی اکوزداغی به وضوح دیده



شکل ۳. مشخصه جذب کلسیت، کلریت و اپیدوت در  $2/35 \mu\text{m}$  (باند ۸) مسکویت در  $2/2 \mu\text{m}$  (باند ۵) و دومرتیت، کروندوم و دیاسپور در باندهای آخر استر



شکل ۴. تصویر حاصل تحلیل مولفه اصلی بر ۳ باند منطقه سوناجیل، PC3 باندهای ۴۶۷ با پیکسل‌های زرد، PC2 باندهای ۴۵۷ با پیکسل‌های قرمز و PC3 باندهای ۷۸۹ با رنگ آبی به ترتیب بیانگر زون‌های فیلیک، آرزلیک پیشرفته و پروپلیتیک هستند. تمرکز دگرسانی در دو محدوده کانه‌زایی اصلی شمال شرقی و غربی معدن به‌وضوح مشخص است

شاخص‌های طیفی عضو نهایی زمین<sup>۴</sup> را به‌دست آورده است و از روش اختلاط طیفی<sup>۵</sup>، قدرت ناشی از مدل پیکسل مخلوط و محدودیت مقادیر ناممکن<sup>۱</sup> را دریافت کرده است.

1. Mixture-Tuned Matched-Filtering
2. Linear Spectral Unmixing
3. Matched Filtering
4. Background end-member signatures
5. Spectral Mixture

### فیلترینگ تطبیق‌یافته تنظیم اختلاط (MTMF)

روش فیلترینگ تطبیق‌یافته تنظیم اختلاط (MTMF)، ترکیبی از دو روش آشکارسازی خطی عدم اختلاط طیف (LSU)<sup>۲</sup> و مدل آماری فیلترینگ تطبیق‌یافته (MF<sup>۳</sup>) است. این روش، از روش فیلترینگ تطبیق‌یافته، توانایی نقشه‌برداری از یک هدف معین بدون شناسایی دیگر

سوناجیل با استفاده از روش گرم-اشمیت<sup>۱</sup>، تصویر مولفه اصلی PC1 به منظور استخراج خطواره‌ها با استفاده از نرم‌افزار Geomatica به کار رفت. بعد از تصحیح و شکستن خطواره‌های حاصل و نیز رسم تراکم گسلش به وسیله نرم‌افزار ArcGIS، رز دیاگرام‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Rockwork رسم شد.

مقایسه خطواره‌ها و گسلش در این معدن، تراکم خطواره‌های منطقه سوناجیل را بسیار پایین نشان می‌دهد (شکل ۷). همچنین میانگین روند گسلش در معدن سوناجیل ۸۶/۶ درجه است، که این روند تقریباً مشابه روند گسلش معدن میرکوه علی‌میرزا است (Maghsoudi et al., 2014). این معدن در ۳۰ کیلومتری جنوب‌شرق معدن سوناجیل قرار دارد و هم‌سن معدن سوناجیل و میوه‌رود تشخیص داده شده است (Jamali and Mehrabi, 2014). این سه معدن مس-طلای پورفیری-ابی‌ترمال هستند و در زون کانه‌زایی مس-طلای پورفیری-کمریند آتشفشانی اهر-اربارن واقع شده‌اند.

میزان گسلش در بخش غربی که به محدوده طلادار ابی‌ترمال مربوط می‌شود بیشتر است و این می‌تواند در گردش سیالات این ناحیه تاثیر گذاشته باشد.

### مطالعه زمین‌شیمی

در نمودار وینچستر و فلویید (Winchester and Floyd, 1977) نمونه‌های معدن سوناجیل در ناحیه دیوریت تا سینودیوریت قرار گرفتند (شکل ۸-الف). بر اساس نمودار پیرس (Pearce, 1996)، توده پورفیری معدن سوناجیل در نتیجه رخدادهای پس از برخورد کوهزایی تشکیل شد (شکل ۸-ب). همچنین رسم داده‌های زمین‌شیمی در نمودار پیرس و همکاران، (Pearce et al., 1984) در سری شوشونیتی قرار گرفت (شکل ۸-پ).

در نتیجه این روش از روش‌های زیرپیکسلی دربرگیرنده هر دو روش فیلترینگ تطبیق‌یافته و اختلاط طیفی است (Pour and Hashim, 2012a).

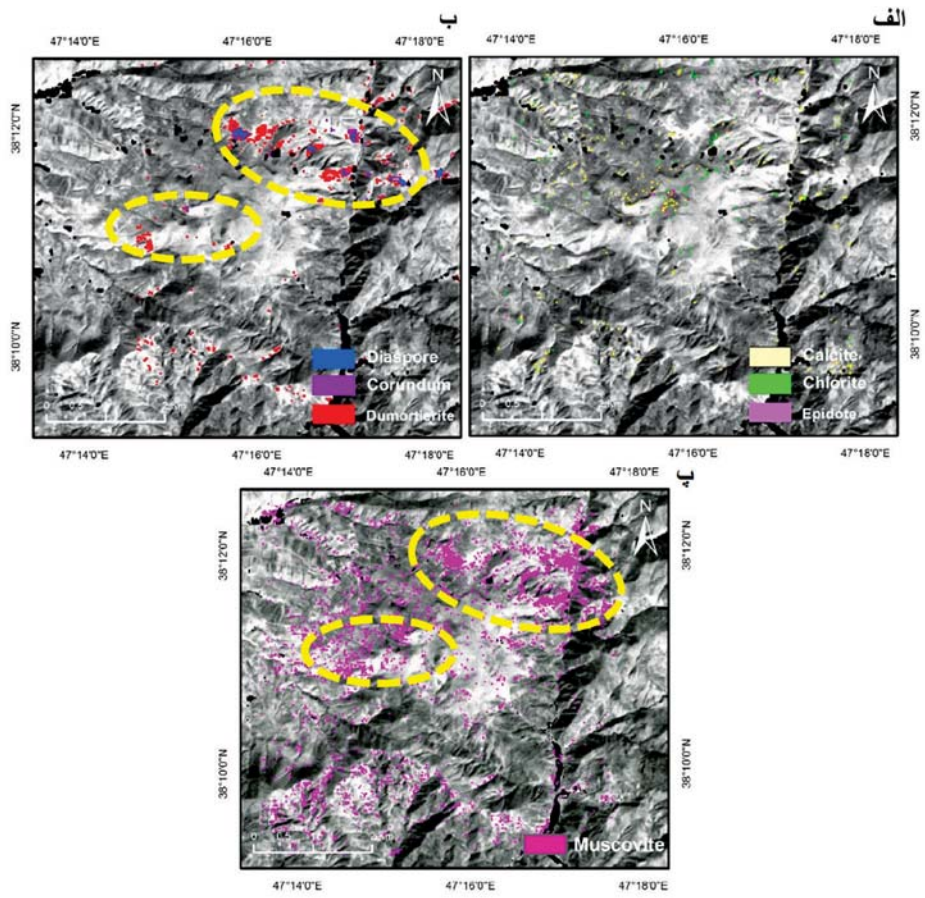
روش MTMF دارای دو تصویر خروجی است (شکل‌های ۵ و ۶). در این روش، مقادیر MF بالا و مقادیر ناممکن پایین بیشتر به هدف نزدیک هستند (شکل ۶). به کارگیری این روش در منطقه مورد مطالعه نیز مانند روش‌های پیشین دو محدوده اصلی دگرسانی فلیک و آرژیلیک و دگرسانی پراکنده پروپلیتیک را تایید کرد (شکل ۵).

### مطالعه خطواره‌ها و گسلش منطقه

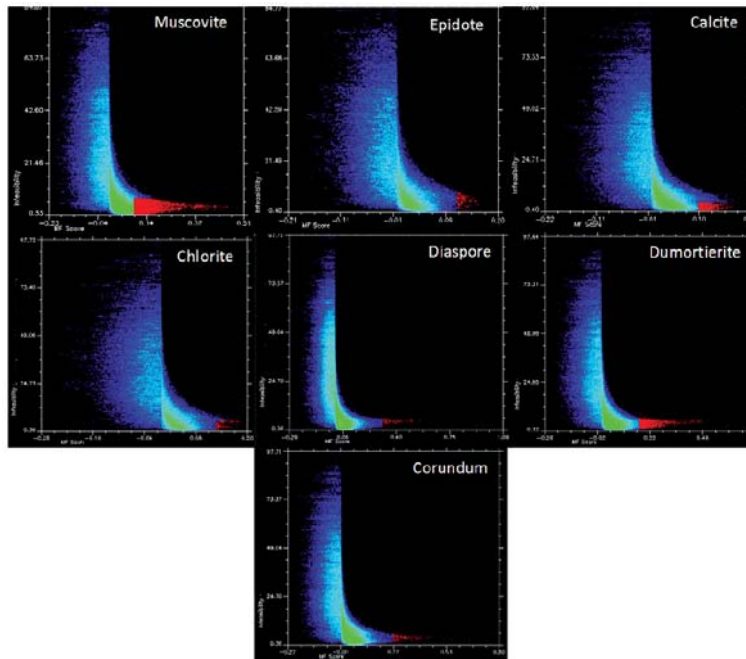
یکی دیگر از کاربردهای سنجش از دور، مطالعه گسلش و خطواره‌ها است. در کل، عارضه‌های خطی توسط حاشیه‌هایی با اختلاف روشنایی در تصویر ایجاد می‌شود که ممکن است به سختی قابل شناسایی باشد. این خطواره‌ها می‌تواند (۱) رود خطی‌شکل یا دره، (۲) گودال سطحی خطی‌شکل، (۳) تغییرات توناژ خاک، (۴) تغییرات ترازبندی در پوشش گیاهی، (۵) تغییرات ارتفاع یا نوع پوشش گیاهی، یا (۶) تغییرات ناگهانی در توپوگرافی باشد. تمام این تغییرات می‌تواند ناشی از تغییرات ساختاری مانند گسلش، مجموعه درزه‌ها، چین‌خوردگی یا شکستگی‌ها باشد (Canals et al., 1992). مطالعه این خطواره‌ها به طور موفقیت‌آمیزی در مطالعه سامانه‌های کانه‌ساز، اکتشافات معدنی و نفتی و مطالعات آب زیرزمینی کاربرد داشته است (Krauskopf, 1979; Huston and Large, 1989; Barnes 1997; Einaudi et al., 2003; Ogg et al., 2008; Pirajno, 2009; Reichenbacher et al., 2011; Kouzmanov and Pokrovski 2012; Zajzon et al., 2017; Fontboté et al., 2015).

با استفاده از فنون بارزسازی<sup>۲</sup> مانند نسبت بانندی، به کارگیری فیلترهای جهتی تشخیص حاشیه<sup>۳</sup> (Vaziri and Sobhani, 1977) و یا با کاربرد نرم‌افزارها و الگوریتم‌های رایانه‌ای (Jahangiri, 2007) می‌توان خطواره‌ها را استخراج کرد. در این مطالعه بعد از تصحیح تصویر OLIS منطقه

1. infeasibility  
2. Enhancement  
3. Directional edge-detection  
4. Gram-Schmidt

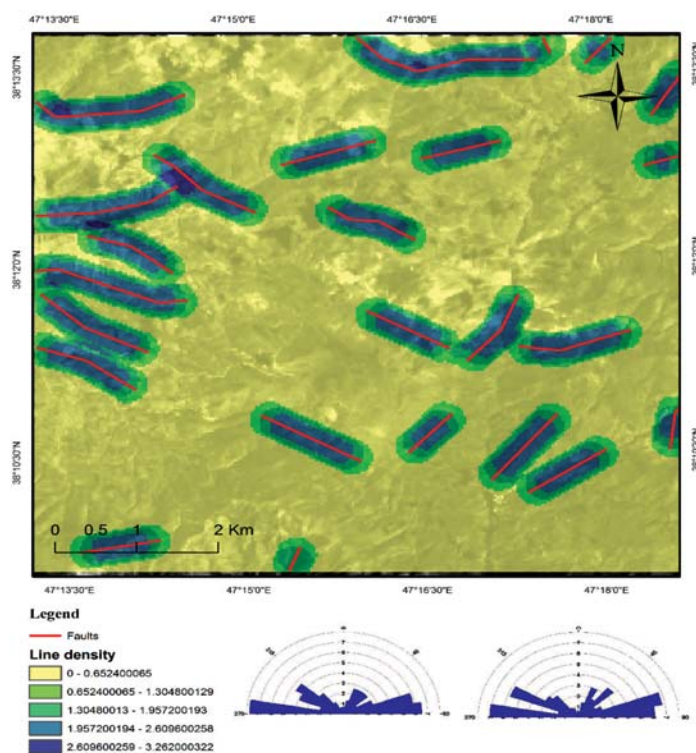


شکل ۵. نتایج روش MTMF مجموعه کانی‌های زون پروپلیتیک، الف)، آرژلیک پیشرفته، ب) و فیلیک، پ) بر روی باند ۴ استر. محدوده‌های اصلی کانه‌زایی معدن پورفیری-آبی‌ترمال سوناچیل تاییدکننده نتایج پیشین است

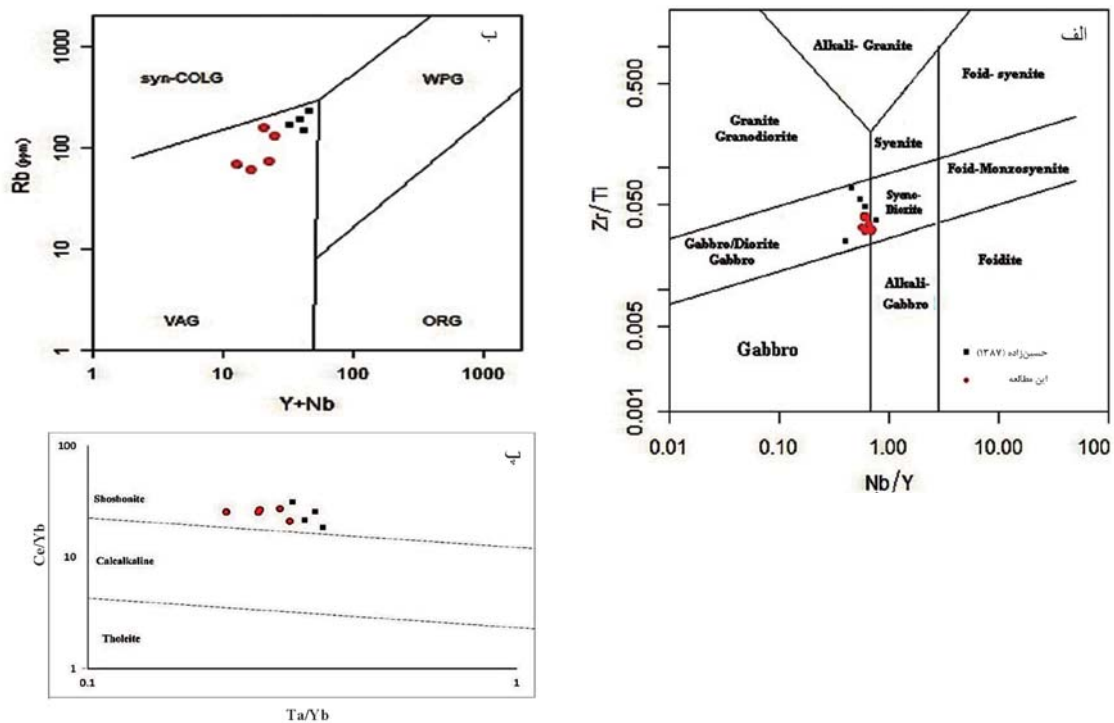


شکل ۶. نمودار پراکنش دوبرعده‌ای مقادیر MF و مقادیر ناممکن کانی‌های اصلی سه زون اصلی فیلیک، آرژلیک و پروپلیتیک





شکل ۷. تصویر تراکم خطواره‌های تصحیح شده (گسلش) معدن سوناجیل به همراه رزیدیاگرام‌های فراوانی (سمت راست) و طولی (سمت چپ)، تراکم گسلش در بخش غربی به‌خوبی دیده می‌شود



شکل ۸. موقعیت قرارگیری نمونه‌های معدن سوناجیل در نمودارهای الف) وینچستر و فلویید (Winchester and Floyd, 1977)، ب) پیرس (Pearce et al., 1984)، پ) پیرس و همکاران، (Pearce, 1996)

## مطالعه کانی‌شناسی

کانی‌شناسی هیپوژن در توده سوناجیل پورفیری به صورت افشان، رگه-رگچه‌ای سیلیسی و نیز به صورت رگه‌ای در حاشیه توده مشاهده می‌شود. بیشترین حجم کانی‌سازی هیپوژن در زون دگرسانی پتاسیک و به میزان کمتری در زون فیلیک رخ داده است. کانی‌های سولفیدی در این توده عبارتند از پیریت، کالکوپیریت، بورنیت (شکل ۱۰-الف). پیریت اغلب به شکل یوهدرال تا ساب هدرال تا انهدرال حضور داشته و توسط کالکوپیریت و بورنیت جانشین شده است. کالکوپیریت مهمترین کانی سولفیدی مس در توده سوناجیل پورفیری بوده و به صورت افشان در کنار محصولات دگرسانی و کانی‌های فرومنیزین و جانشینی به جای پیریت و همچنین داخل رگه-رگچه‌های سیلیسی دیده می‌شود. بورنیت نیز همانند سایر سولفیدها به شکل افشان و رگه-رگچه‌ای سیلیسی و نیز در رگه‌های سولفیدی حاشیه‌ای حضور داشته و جانشین کالکوپیریت شده است. هماتیت و گوئیت کانی‌های اکسیدی فراوان توده سوناجیل پورفیری بوده و همراه با محصولات دگرسانی زون‌های پتاسیک و کمتر با فیلیک مشاهده می‌شوند (شکل ۹).

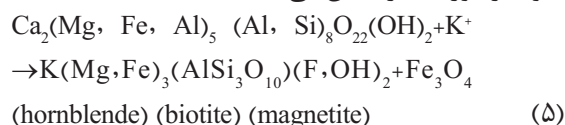
در طی فرآیند سوپرژن کانی‌های رسی از جمله ایلیت، کائولینیت، مونتورونیوت و کلریت، اکسیدهای آهن هماتیت، گوئیت، لیمونیت و جاروسیت پدیدار شده‌اند. زون‌های اکسیدی و سولفیدی سوپرژن از تاثیر سیالات جوی بر توده پورفیری سوناجیل حاصل شده‌اند. در توده پورفیری سوناجیل کالکوپیریت به‌طور بخشی توسط کالکوسیت و کوولیت سوپرژن جانشین شده‌اند. کالکوسیت و کوولیت کمتر به شکل افشان در سنگ دیده می‌شوند و اصولاً زون سوپرژن قابل توجه و غنی در این کانسار تشکیل نشده است. در برخی از مناطق زون سوپرژن به صورت محدود و کم ضخامت تشکیل شده است که با کانی‌سازی افشان و رگه‌ای کالکوسیت و کوولیت مشخص می‌شود (شکل ۱۰-الف).

در زون‌های اکسیدی سوپرژن (بالای سطح آب زیرزمینی) سولفیدهای اولیه به کربنات‌های مس (مالاکیت و آزوریت) تبدیل شده‌اند.

دو نوع بیوتیت در ذخیره سوناجیل دیده می‌شود:

(۱) بیوتیت اولیه، غنی از آهن و قهوه‌ای رنگ، (۲) بیوتیت

هیدروترمال ثانویه (شکل ۱۰-ت)، که عمدتاً قهوه‌ای کم‌رنگ تا سبزرنگ است و غنی از منیزیم (Hezarkhani, 2008). این نوع بیوتیت در محیط‌های پورفیری معمول هستند (Green and Pearson, 1985). واکنش ۵ تشکیل بیوتیت ثانویه از هورنبلند را نشان می‌دهد.



تورمالین از کانی‌هایی است که به‌ویژه در گرانیته اینچه دیده می‌شود (شکل ۱۰-پ). بافت اسفرولیتی و شعاعی آن‌ها نشان‌دهنده ته‌نشینی سریع از محلول بسیار غنی شده است (Canals et al., 1992). در ذخایر پورفیری، تورمالین می‌تواند در زون‌های آرژیلیک، پروپلیتیک، فیلیک و پتاسیک در جاهایی که ترجیحاً جایگزین کانی‌های فرومنیزین شده‌اند، دیده شود. زون آرژیلیک پیشرفته نیز علاوه بر کانی‌های تیپیک دیکیت، کائولینیت، پیروفیلیت، باریت، آلونیت و دیاسپور، می‌تواند دارای تورمالین، توپاز و کانی‌های سولفیدی باشد. در این دگرسانی، کانی‌هایی سولفیدی می‌تواند کوولیت، دیژنیت و انارژیت باشد که بیانگر نسبت بالای گوگرد به فلز است. منشا بر در گرانیته تورمالین‌دار می‌تواند ناشی از مذابی با منشا سنگ‌های متاسدیمتری غنی از تورمالین یا اکسولوشن بخش بخاری از مراحل تاخیری انجماد باشد (Pirajno, 2009).

بر اساس نظر سیلیتو (Sillitoe, 2010)، توالی رگچه‌ای در ذخایر مس پورفیری می‌تواند به سه گروه تقسیم شود:

- (۱) رگچه‌های کوارتزی اولیه بدون سولفید حاوی یک یا چند کانی مگنتیت (نوع M)، اکتینولیت، بیوتیت (اولیه) (EB)، فلدسپار پتاسیم و به‌طور خاصی فاقد هاله دگرسانی،
- (۲) رگچه‌های سولفیددار کوارتزدار دانه‌ای<sup>۱</sup> با هاله‌های دگرسانی نازک یا به‌راحتی قابل تشخیص (انواع A و B)،
- (۳) رگه‌ها و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی متبلور تاخیری با هاله دگرسانی فلدسپار غالب (نوع D).

معدن سوناجیل یک معدن Cu-Au پورفیری-اپی‌ترمال است و رگچه‌های نوع B در آن حضور ندارد و رگچه‌های نوع D فراوانی کمی دارند. دگرسانی آرژیلیک در معدن سوناجیل گسترش زیادی دارد.

1. Granular

Minerals	Hypogene					Supergene
	Fresh rocks (Diorite)	Potassic zone	Phyllic - Argillic zone	Argillic zone	Propylitic zone	
Biotite		██████████				
Albite	██████████					
Quartz	██████████	██████████				
Chlorite					██████████	
Chalcopyrite			██████████	██████████		
Pyrite	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	
Chalcocite						
Bornite						██████████
Covellite						██████████
Hematite		██████████				██████████
Magnetite		██████████				
Calcite			██████████	██████████	██████████	
Sericite		██████████	██████████	██████████	██████████	

شکل ۹. توالی پاراژنز معدن سوناجیل

جدول ۲. خصوصیات رگچه‌های زون‌های دگرسانی یک سامانه پورفیری (Sillitoe, 2010)

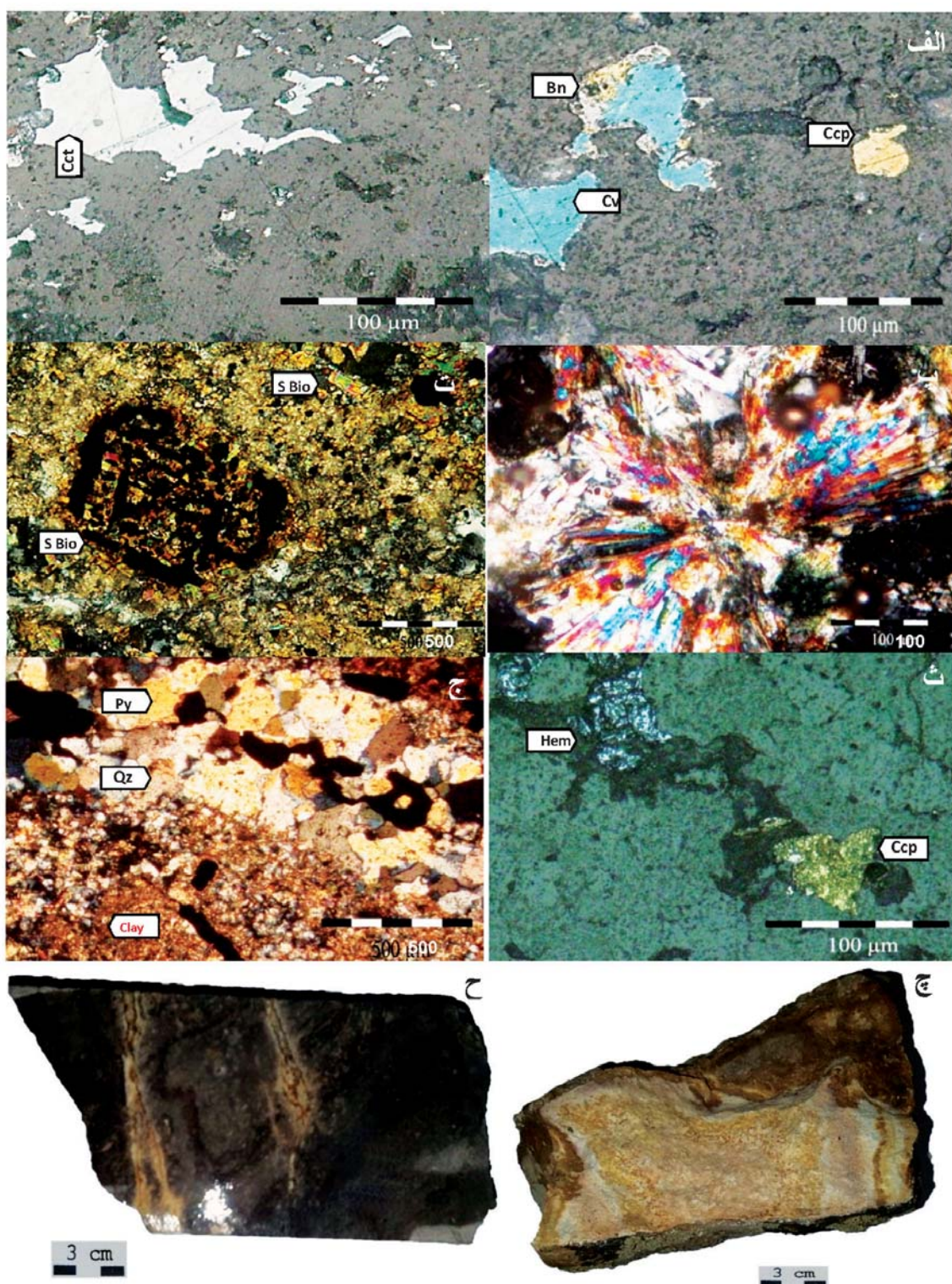
حاشیه رگچه‌ای	رگچه‌های همزمان	نوع دگرسانی
آلبیت-الیگوکلاز	مگنتیت ± اکتینولیت (نوع M)	سدیک-کلسیک
نوع EDM با سریسیت ± بیوتیت ± K-فلدسپار ±	بیوتیت (نوع K، EB-فلدسپار، کوارتز-بیوتیت-سریسیت-آندالوزیت-کالکوپیریت افشان ± برنیت؛ باقی	پتاسیک (K-سیلیکات)
کانی‌ها نیستند بجز K-فلدسپار در اطراف انواع	مگنتیت (نوع A)، کوارتز-مولیبدنیت ± پیریت ± کالکوپیریت (زمیندز مرکزی، نوع B) و A	پروپیلیتیک
کلریت، سریسیت/ایلپت	کلریت ± سریسیت ± سولفیدها	کلریت-سریسیت (سریسیت-رس-کلریت [SCC])
کوارتز-سریسیت	کوارتز-پیریت ± دیگر سولفیدها (نوع D)	سریسیتیک (فیلیک)
پیریت-انارژیت ± سولفیدهای Cu (دربرگیرنده کوارتز-آلونیت، کوارتز-پروفیلیت/دیکیت، کوارتز-کائولینیت	رگه‌ها)	آرژیلیک پیشرفته

جدول ۳. انواع رگچه‌های دارای کوارتز معدن سوناجیل و کانی‌شناسی آن‌ها

Veinlet type	Minerals	Dominant alteration
A1	Quartz + Pyrite ± Chalcocite ± Covellite ± Chalcopyrite	Potassic-Argillic
A2	Quartz + Magnetite ± Hematite	Potassic-Argillic
D	Quartz + Hematite	Phyllic-Argillic

انواع رگچه‌ها در معدن سوناجیل (جدول ۳) عبارتند از: همبستگی ویژه قوی بین شدت رگچه کوارتز و میزان فلز در بیشتر ذخایر مس پورفیری به‌ویژه در انواع غنی از طلا وجود دارد (Chen et al., 2004). در نتیجه، تنوع پایین رگچه‌های کوارتزی در معدن سوناجیل منعکس‌کننده میزان فلز پایین آن است.

A1 کوارتز + پیریت ± کالکوسیت ± کوولیت ± کالکوپیریت (شکل ۱۰-الف و ب).  
 A2 کوارتز + مگنتیت + هماتیت (شکل ۱۰-خ)،  
 D کوارتز + هماتیت (شکل ۱۰-ح)،



شکل ۱۰. الف) تصاویر نوری انعکاسی از کوولیت (Cov)، کالکوپیریت (Cpy) و بورنیت (Bor)، ب) کالکوسیت (Cct)، پ) تصویر نوری عبوری XPL از تورمالین در گرانیته اینچه و ت) بیوتیتی (Bio) شدن هورنبلند. رنگ‌پریدگی و سبزرنگ بودن این بیوتیت‌ها نشان‌دهنده منشأ گرمایی و منیزیم دار بودن آن‌هاست، معدن سوناجیل. ث) رگچه نوع A2، ج) رگچه نوع A1. مخفف‌ها از (Whitney and Evans, 2010)، چ) نمونه دستی از دگرسانی آرژلیک، ح) نمونه دستی از میکرودیوریت (سوناجیل پورفیری)

## نتایج و بحث

فیلیک اتفاق افتاده است. زون فیلیک محیط مناسبی جهت انتقال سیال کانه‌زا به یک محیط اپی‌ترمال را فراهم می‌کند. همچنین تراکم نسبتاً بیشتر گسلش در منطقه غربی معدن به سیالات کانه‌ساز اجازه عبور و تشکیل کانه‌زایی اپی‌ترمال داده است. گسترش دگرسانی آرژیلیک پیشرفته در منطقه نشان می‌دهد که اسیدیته سیال کانه‌زا بالا بوده و با افت دما به علت تبدیل  $SO_2$  به سولفید و سولفات بیشتر شده است (Giggenbach, 1992). از طرفی دیگر آندزیتی بودن سنگ میزبان نیز در سولفیدزایی سیال توسط آهن و در نتیجه مصرف کمپلکس سولفیددار و ته‌نشست پراکنده سولفیدها قبل از رسیدن به محیط مناسب موثر بوده است. همچنین تراکم پایین شکستگی به‌خصوص در بخش شرقی معدن سوناجیل (در مقایسه با معادن سونگون و کیقال)، می‌تواند به علت کم بودن سیالات کانه‌زا باشد که این ناشی از ترکیب تقریباً بازیکی ماگمای منشا آن است. کم بودن شکستگی‌ها منجر به چرخش محدودتر سیالات و کم توسعه شدن ذخیره سوپرژن نیز می‌شود. عمق زیاد (۴-۶ km) تشکیل معدن سوناجیل (رضانی، ۱۳۹۷؛ Hezarkhani, 2008) نیز می‌تواند از عوامل موثر دیگر در نیمه‌اقتصادی بودن این بخش ذکر کرد. عمق بیشتر کانه‌زایی کارایی استخراج مس را با کاهش ضریب تفکیک کلر بین ماگما و فاز آبگین، کاهش می‌دهد (Lukanin, 2016). علاوه بر این، شرایط فشار بالا منجر به مصرف مس در کانی‌های سیلیکاته می‌شود، زیرا انباشت آب تا مراحل آخر تبلور به تاخیر می‌افتد (Yang and Bodnar, 1994). در نتیجه عیار مس این ذخیره پایین است.

### نتیجه‌گیری

از مطالعه حاضر نتایج زیر به دست آمد:

۱. تعیین زون‌های دگرسانی فیلیک، آرژیلیک پیشرفته و پروپلیتیک، پراکندگی و عدم تمرکز و شدت زون فیلیک را نشان داد.
۲. نتایج کانی‌شناسی دگرسانی‌های حاصل را تایید کرد. تنوع کم رگچه‌های کوارتزی می‌تواند متأثر از شدت کم کانه‌زایی معدن در بخش شرقی معدن باشد.

هنریچ (Heinrich, 2005) چهار شرط را برای تشکیل

یک ذخیره اپی‌ترمال بارور معرفی کرده است:

۱. سرد شدن سیال در یک محیط فشار بالا (در نزدیکی مرز شکننده-شکل‌پذیر).
۲. مقدار ابتدایی بالای  $H_2S$  به  $Fe + Cu$ : به‌طور غیرمعمول، مقدار پایین  $Cl/OH$  در ماگما می‌تواند سیالاتی تک‌فازی با شوری پایین و مقدار ابتدایی  $FeCl_2 < H_2S$  ایجاد کند. در ماگماهای کالک‌آلکالن، جدایش مایع هایپرسالین از بخار در دمای بالا، تأثیر زیادی دارد زیرا آهن ترجیحاً وارد فاز مایع می‌شود و گونه‌های گوگردی وارد فاز بخار می‌شوند. در این شرایط، طلا به‌طور بهینه وارد فاز بخار می‌شود.
۳. خنثی‌سازی اسید توسط واکنش با سنگ دیواره در طول سرد شدن: در طول سرد شدن سیال ماگمایی با سنگ دیواره‌ای با ترکیب حدواسط، سولفیدزایی سیال با آهن با اثر خنثی‌کنندگی  $H^+$  فرآیند مخرب فلدسپار در طی دگرسانی رقابت می‌کند. در نتیجه بهترین مسیر تکامل شیمیایی برای انتقال موثر طلا، زون‌های گسترده پیریت-مسکویت ( $\pm$  کانی‌های رسی  $\pm$  سولفات  $\pm$  کربنات) است که از مصرف  $H_2S$  جلوگیری می‌کند. این شرایط در بخش بالایی ذخایر پورفیری فراهم می‌شود.
۴. درجه بالایی از عدم تعادل برای ته‌نشست طلا مورد نیاز است. عواملی مانند سولفیدزایی به‌وسیله سنگ آهن‌دار دیواره، اختلاط با آب زیرزمینی یا از دست دادن سولفید بخار چگالی پایین باعث عدم تعادل سیال و کاهش انحلال طلا می‌شود.

بر این اساس، معدن سوناجیل شرایط تشکیل یک معدن اپی‌ترمال اقتصادی را دارد، اما احتمالاً کالک‌آلکالن و فلسیک نبودن توده آذرین این ذخیره بر میزان کانه‌زایی آن تأثیر گذاشته است. در واقع، در صورت کالک‌آلکالن و فلسیک بودن این ذخیره، گونه‌های سولفیدی به‌طور بهینه‌تری به فاز بخاری منتقل می‌شدند. بخش اپی‌ترمال معدن سوناجیل در منطقه تمرکز زون

- Bonham Jr. H.F. 1986. Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits: a review. Proceedings of the Volcanism, hydrothermal systems and related mineralization: Hamilton, New Zealand, Proceedings International Volcanological Congress, Symposium.

- Canals, A., Cardellach, E., Rye, D.M. and Ayora, C., 1992. Origin of the Atrevida Vein (Catalonian coastal ranges, Spain); mineralogic, fluid inclusion, and stable isotope study. Economic Geology, 87, 142-153.

- Chen, Y.J., Pirajno, F. and Sui, Y-H., 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver-lead deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver-dominated deposits and related tectonic setting. Mineral Deposita, 39, 560-575.

- Crippen, R.E., Blom, R.G. and Heyada, J.R., 1988. Directed band ratioing for the retention of perceptually-independent topographic expression in chromaticity-enhanced imagery. Remote Sensing, 9, 749-765.

- Dalton, J.B., Bove, D.J., Mladinich, C.S. and Rockwell, B.W., 2004. Identification of spectrally similar materials using the USGS Tetracorder algorithm: the calcite-epidote-chlorite problem. Remote Sensing of Environment, 89, 455-466.

- Di Tommaso, I. and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. Ore Geology Reviews, 32, 275-290.

- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E., 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. Special Publication-Society of Economic Geologists, 10, 285-314.

- Fontboté, L., Kouzmanov, K., Chiaradia,

۳. بررسی زمین‌شیمی نمونه‌های سوناجیل نشان‌دهنده میکرودیوریتی بودن و شوشونیتی بودن و پس از کوهزایی بودن سنگ منشأ کانه‌زایی معدن است که به معدن پورفیری-ایی ترمال میرکوه علی میرزا شباهت دارد. در کل نتایج حاصل با توجه به مطالعات هنریچ (Heinrich, 2005) نشان می‌دهد، که ترکیب نسبتاً بازیک سنگ نفوذی و در نتیجه کاهش میزان سیالات و تراکم گسلش متغیر منطقه می‌تواند منجر به پراکندگی کانه‌زایی معدن سوناجیل شده باشد. همچنین عمق زیاد کانه‌زایی، می‌تواند بر میزان مس این ذخیره تاثیر گذاشته باشد. اما تراکم بیشتر گسلش در بخش غربی در کانه‌زایی طلائی اپی‌ترمال این بخش از معدن موثر بوده است.

## منابع

- آلیانی، ف. و دادفر، ث. و معانی جو، م.، ۱۳۹۳. آشکارسازی زون‌های دگرسانی کانسار آهن حاجی‌آباد، با استفاده از داده‌های (SWIR+VNIR) سنجنده Aster، فصلنامه علوم زمین شماره ۲۴، ۷۳-۸۰.

- حسین‌زاده، ق.، ۱۳۸۷. مطالعات زمین‌شناسی، شیمی، سیالات درگیر، کانی‌سازی، دگرسانی و ژنز کانسار مس پورفیری سوناجیل-شرق هریس (استان آذربایجان شرقی). رساله دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، ۲۱۸.

- سازمان نظام‌مهندسی معدن، ۱۳۹۵. گزارش پایانی اکتشاف محدوده سوناجیل در مقیاس ۱/۵۰۰۰.

- رضانی، ط.، ۱۳۹۷. مطالعه برخی سامانه‌های مس پورفیری بارور و نابارور کمر بند آتشفشانی اهر-ارسباران: با تاکید بر زمین‌شیمی سیال درگیر. رساله دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، ۲۰۰.

- معانی جو، م.، پوینده، ن.، سپاهی‌گرو، ع.ا.، دادفر، ث.، ۱۳۹۴. نقشه‌برداری مناطق دگرسانی معدن طلائی اپی‌ترمال داش کسن با استفاده از تلفیق تصاویر سنجنده ASTER و تجزیه XRD، مجله علوم زمین، ۹۵، ۹۵-۱۰۴.

- Barnes, H.L., 1997. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. John Wiley and Sons, 997.

- M. and Pokrovski, G.S., 2017. Sulfide minerals in hydrothermal deposits. *Elements*, 13, 97-103.
- Giggenbach, W. 1992. Seg distinguished lecture-magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. In: *Economic geology*. university of texas at el paso room 202 quinn hall, el paso, tx 79968.
  - Green, T. and Pearson, N., 1985. Experimental determination of REE partition coefficients between amphibole and basaltic to andesitic liquids at high pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 1465-1468.
  - Heinrich, C.A., 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study. *Mineral Deposita*, 39, 864-889.
  - Hezarkhani, A., 2008. Hydrothermal evolution of the Sonajil porphyry copper system, East Azarbaijan Province, Iran: The history of an un-economic deposit. *International Geology Review*, 50, 483-501.
  - Hunt, G.R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42, 501-513.
  - Hunt, G.R. and Ashley, R.P., 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74, 1613-1629.
  - Huston, D.L. and Large, R.R., 1989. A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 4, 171-200.
  - Jahangiri, A., 2007. Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30, 433-447.
  - Jamali, H. and Mehrabi, B., 2014. Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt. *Ore Geology Reviews*, 16, 155-170.
  - John, D., Ayuso, R., Barton, M., Blakely, R., Bodnar, R., Dilles, J., Gray, F., Graybeal, F., Mars, J. and McPhee, D., 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of *Mineral deposit models for resource assessment*. US Geological Survey Scientific Investigations Report. 169.
  - Kim, S. and Park, H.D., 2003. The relationship between physical and chemical weathering indices of granites around Seoul, Korea. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, 207-212.
  - Kouzmanov, K. and Pokrovski, G.S., 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems, 16, 573-618.
  - Krauskopf, K., 1979. *Introduction to Geochemistry*. 2nd edn McGraw-Hill. New York, 640.
  - Lukanin, O.A., 2016. Chlorine partitioning between melt and aqueous chloride fluid phase during granite magma degassing. Part II. Crystallization-induced degassing of melts. *Geochemistry International*, 54, 660-680.
  - Maghsoudi, A., Yazdi, M., Mehrpartou, M., Vosoughi, M. and Younesi, S., 2014. Porphyry Cu-Au mineralization in the Mirkuh Ali Mirza magmatic complex, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79, 932-941.
  - Mars, J.C. and Rowan, L.C., 2006. Regional mapping of phyllic-and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*, 2, 161-186.
  - Ninomiya, Y.A. 2003, stabilized vegeta-

- tion index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- Ogg, J.G., Ogg, G. and Gradstein, F.M., 2008. The Concise Geologic Time Scale. University Press.
  - Pearce, J.A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12, 79-114.
  - Pearce, J.A., Harris, N.B. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.
  - Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes associated with meteorite impacts. In: *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, 1273.
  - Pour, A.B. and Hashim, M., 2011. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42, 1309-1323.
  - Pour, A.B. and Hashim, M., 2012a. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44, 1-9.
  - Pour, A.B. and Hashim, M., 2012b. Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt, Iran. *Advances in Space Research*, 49, 753-769.
  - Reichenbacher, B., Alimohammadian, H., Sabouri, J., Haghfarshi, E., Faridi, M., Abbasi, S., Matzke-Karasz, R., Fellin, M.G., Carnevale, G. and Schiller, W., 2011. Late Miocene stratigraphy, palaeoecology and palaeogeography of the Tabriz basin (NW Iran, Eastern Paratethys). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 311, 1-18.
  - Rowan, L.C., Goetz, A.F. and Ashley, R.P., 1977. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images. *Geophysics*, 42, 522-535.
  - Rowan, L.C., Schmidt, R.G. and Mars, J.C., 2006. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 104, 74-87.
  - Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105: 3-41.
  - Spatz, D. and Wilson, R., 1995. Remote sensing characteristics of porphyry copper systems, western America Cordillera. *Arizona Geological Society Digest*, 20, 94-108.
  - Vaziri, H.M. and Sobhani, E.A., 1977. *Volcanology and volcanosedimentology of the Sahand region*. Tarbiat-e-Moalem University, 54.
  - Weldemariam, A., 2009. Mapping hydrothermally altered rocks and lineament analysis through digital enhancement of ASTER data case study: Kemashi area, Western Ethiopia. Master of Science Dissertation, Addis Ababa University, Addis Ababa.
  - Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
  - Winchester, J. and Floyd, P., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.



- Yang, K. and Bodnar, R.J., 1994. Magmatic-Hydrothermal evolution in the "Bottoms" of porphyry copper systems: Evidence from silicate melt and aqueous fluid inclusions in granitoid intrusions in the Gyeongsang Basin, South Korea. *International Geology Review*, 36, 608-628.
- Zajzon, N., Szentpéteri, K., Szakáll, S. and Kristály, F., 2015. The origin of the Avram Iancu U-Ni-Co-Bi-As mineralization, Băița (Bihor) metallogenic district, Bihor Mts., Romania. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 104, 1865-1887.
- Zhang, X., Pazner, M. and Duke, N., 2007. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 271-282.