



## تعیین مناطق کانی‌سازی با استفاده از پردازش داده‌های قطبش‌القایی و مقاومت ویژه الکتریکی در کانسار مس گرماب (خراسان جنوبی)

منصور عادل پور<sup>1\*</sup>، ایرج رساء<sup>2</sup>، فریبرز مسعودی<sup>2</sup> و مسعود حسینی<sup>3</sup>

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران

(2) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(3) شرکت مهندسی مشاور زرناب اکتشاف، تهران، ایران

دریافت: 1393/3/18. پذیرش: 1394/2/8

### چکیده

در این پژوهش، سعی شده است تا با تلفیق نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی سطحی و زمین‌فیزیک، ضمن تکمیل بررسی‌های یادشده، با استفاده از روش‌های جدید زمین‌فیزیک اکتشافی، موقعیت مکانی زون کانی‌سازی کانسار مس گرماب (شمال شرق قائن) تعیین شود. بعد از الکترومغناطیس، از متداولترین روش‌های زمین‌فیزیکی قابل استفاده در اکتشاف کانسارهای سولفیدی مس، روش‌های قطبش‌القایی و مقاومت ویژه الکتریکی است. در این پژوهش، از این روش در حوزه زمان استفاده شد و مؤلفه‌های ثابت زمانی ظاهری، وابسته بسامد ظاهری و بارپذیری حقیقی استخراج شد. پس از تفسیر نتایج، نواحی بی‌هنجاری در مناطق با بارپذیری متوسط و همچنین مقاومت ویژه الکتریکی کم تا متوسط شناسایی شد که این امر را می‌توان به حضور کانپهای سولفیدی در مناطق کانی‌سازی نسبت داد. همچنین، با استفاده از نتایج مؤلفه ثابت زمانی، میانگین دانه‌بندی دانه‌های فلزی در منبع تولیدکننده قطبش‌القایی دریافت شد. با توجه به این که نتایج خام اندازه‌گیرها، اطلاعات کمی دقیق و مطمئنی درباره عمق و هندسه توده‌های کانی‌سازی شده زیرسطحی در اختیار قرار نمی‌دهند؛ با استفاده از مقاطع حاصل از مؤلفه‌های قطبش‌القایی و مدل‌سازی معکوس هموار برای تعیین محلهای احتمالی، گسترش‌های جانبی و قائم کانی‌سازیهای زیر سطحی استفاده شد. بررسی‌های زمین‌فیزیک نشان می‌دهد، کانی‌سازی بیشتر به‌صورت محدوده‌های کوچک و پراکنده است.

واژه‌های کلیدی: قطبش‌القایی، مقاومت ویژه الکتریکی، مدل‌سازی معکوس، مس، قائن

### مقدمه

برخورد (Zarrinkoub et al., 2012)) دارای حجم گسترده‌ای از فعالیت ماگماتیسم با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متفاوت است (Karimpour et al., 2012). به‌دلیل وجود این فعالیتها که از ژوراسیک آغاز و در ترشیری به اوج خود رسیده است، بلوک لوت دارای توانایی بسیار مناسبی برای تشکیل کانی‌سازیهای مختلف است؛ که از این میان، می‌توان به کانسارهای زیر اشاره کرد: مس-طلائی پورفیری مانند ماهرآباد و خونیک (Malekzadeh Shafaroudi, 2009) و ده‌سلم (Arjmandzadeh, 2011)، طلائی اپی‌ترمال سولفید بالا مانند چاه‌شلغمی (Karimpour, 2005)، طلائی مرتبط با

کانسار مس گرماب، به وسعت تقریبی 31 کیلومتر مربع در پنجاه کیلومتری شمال شرق قائن، در استان خراسان جنوبی، در محدوده‌ای با طول جغرافیایی "01' 40' 59° شرقی تا "73' 45' 59° شرقی و عرض جغرافیایی "33' 55' 33° شمالی تا "46' 57' 33° شمالی قرار دارد. این منطقه در تقسیم‌بندی ساختاری ایران، بخشی از پهنه ایران مرکزی محسوب می‌شود و در بلوک لوت واقع شده است (Aghanabati, 2004). بلوک لوت، به‌دلیل داشتن موقعیتهای زمین‌ساختی مختلف در زمانهای گذشته (مانند فروورانش و محیط کششی پس از

کانی‌سازی دو پروفیل 2, DD-1 با آزیموت تقریبی 25 درجه و سه پروفیل 3,4,5-DD با آزیموت تقریبی 75 درجه طراحی شد.

#### زمین‌شناسی

منطقه مورد بررسی در نقشه زمین‌شناسی 1:250,000 قائن و قسمت شمالی نقشه 1:100,000 آبیژ، در بلوک لوت و بخش‌های باختری کوه‌های خاوری ایران واقع شده است. سنگ‌های قدیمی‌تر از سنوزوئیک در محدوده مورد بررسی دیده نشده است. واحدهای سنگی که در این محدوده رخنمون دارند، از قدیم به جدید به شرح زیر هستند:

قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، سنگ‌آهک کرم رنگ فسیل‌دار است. این واحد در بخش جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی محدوده رخنمون دارد. عمده‌ترین سنگ‌های منطقه، سنگ‌های آتشفشانی آندزیت و بازالت‌آندزیتی هستند. رخنمون‌های کوچکی از توف‌های سبزآلتره، ماسه‌سنگ قرمز و سیلتستون در قسمت مرکزی محدوده با روند شرقی - غربی وجود دارد. سنگ‌های آتشفشانی بازالت، آندزیت و تراکی‌آندزیت در شمال و شمال‌غربی محدوده رخنمون دارد. آهک‌ماسه‌ای خاکستری روشن رخنمون بسیار کوچکی با مرز گسله در جنوب‌غربی محدوده دارد. کنگلومرای کرم و قرمز تیره با جورشدگی ضعیف، در گوشه جنوب‌شرقی محدوده رخنمونی کوچک دارد. کنگلومرای سست و بدون جورشدگی در گوشه شمال‌غربی محدوده برون‌زد دارد (شکل 1).

بررسی گسل‌های اصلی و فرعی، حضور دو سیستم گسلی را در منطقه نشان می‌دهد: 1- شمال‌غرب - جنوب‌شرق و 2- شمال شرق - جنوب غرب (شکل 2). مهم‌ترین گسل ناحیه، گسل آبیژ (کریزان) است؛ که با امتداد کلی N340 و شیب نزدیک به قائم ( $85^{\circ}W$ ) از جنوب خاوری ورقه تا انتهای شمالی امتداد دارد. گسل مهم دیگر، گسل گرماب است؛ که با روند همسان با گسل آبیژ، واحدهای ائوسن را قطع کرده و در هم‌ریختگی‌های نسبتاً شدیدی را موجب شده است. این گسل و گسل‌های موازی آن، توسط یک دسته گسل عرضی با امتداد شمال‌شرقی - جنوب‌غربی قطع و جابه‌جا شده‌اند. به‌نظر می‌رسد که اصلی‌ترین بخش کانه‌دار منطقه گرماب، در محل تقاطع گسل‌ها قرار دارد.

توده‌های نفوذی احيایی مانند هیرد (Karimpour et al., 2007)، کانی‌سازی رگه‌ای پلی‌متال مانند شوراب (Lotfi, 1982) و کانسارهای IOCG مانند قلعه‌زری و کوه‌زر (Mazlomi et al., 2008)، در کانسار مس گرماب، کانی‌سازی در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی و مواد آذرآواری است. در این پژوهش سعی شده است؛ تا با استفاده از روش IP/RS و تفسیر آن همراه با بررسی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، آلتراسیون و کانی‌سازی در منطقه گرماب، اطلاعاتی در مورد بخش‌های پنهان و پراکندگی کانی‌سازی در عمق، مخصوصاً در بخش‌هایی که توسط آبرفت پوشیده شده است، ارائه شود. بر پایه اطلاعات زمین‌فیزیکی همراه با اطلاعات زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون و زمین‌شیمی می‌توان محل‌های مناسب برای حفاری را تعیین، و در صورت موفقیت میزان ذخیره کانسار را برآورد کرد.

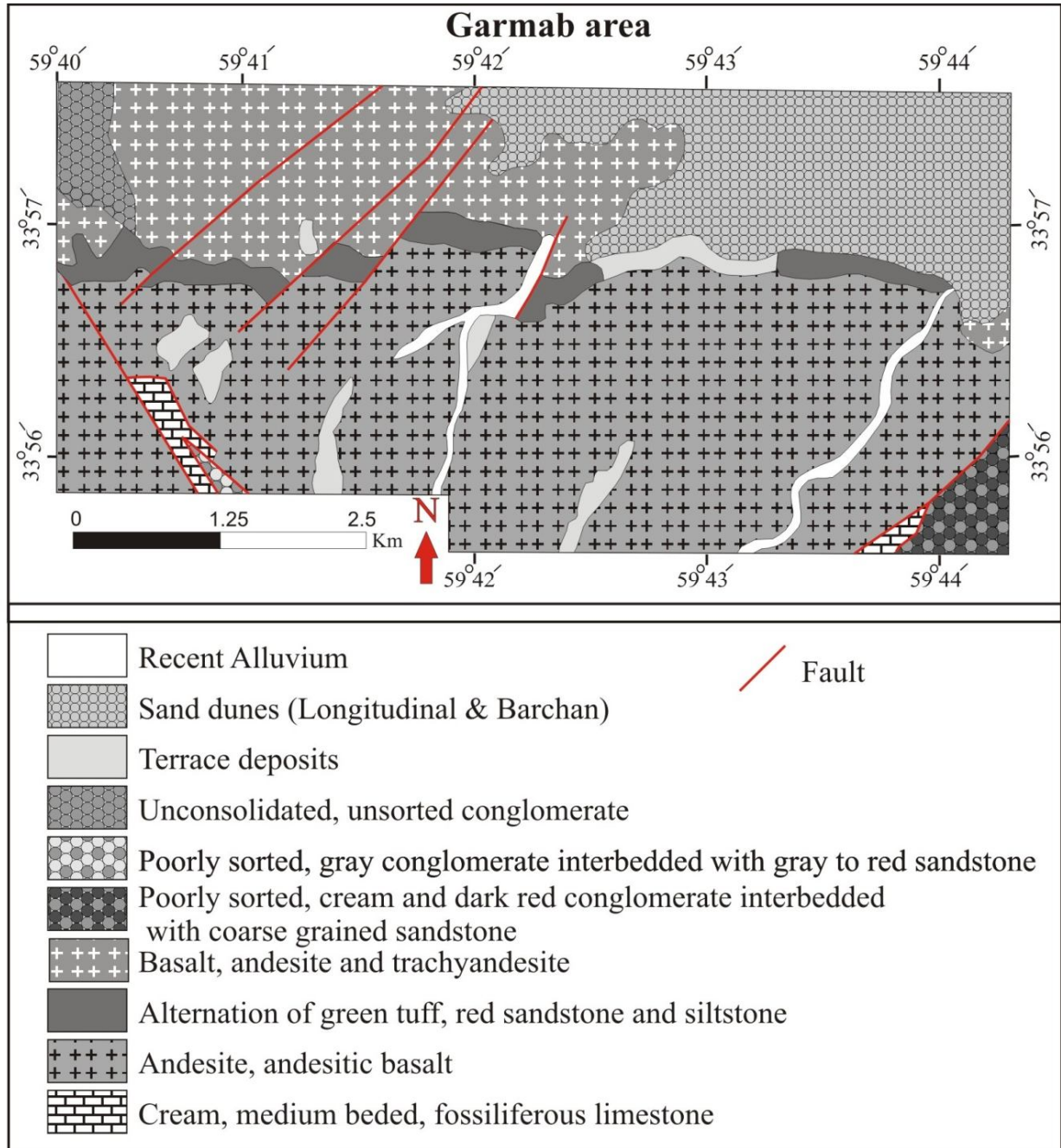
#### روش مطالعه

پس از بررسی‌های صحرایی، تعداد 32 مقطع نازک، برای بررسی سنگ‌شناسی، 21 مقطع صیقلی به منظور بررسی مینرالوگرافی انتخاب شد. تعداد 10 نمونه از سنگ‌های آتشفشانی با کمترین دگرسانی جهت بررسی‌های زمین‌شیمی انتخاب و پس از انجام عملیات خردایش و آسیاب، برای اندازه‌گیری عناصر اصلی به روش XRF به آزمایشگاه زرآزما ارسال شد. همچنین داده‌های زمین‌فیزیکی IP/RS برداشت شده از منطقه گرماب با نقشه‌های زمین‌شناسی و آلتراسیون انطباق داده شد و نتایج به‌دست آمده، مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفت. پس از بررسی‌های مقدماتی و مشاهدات صحرایی انجام شده در محدوده اکتشافی، عملیات زمین‌فیزیکی به روش قطبش القایی و مقاومت ویژه انجام شد. عملیات اندازه‌گیری در مورد تعداد حدود 420 نقطه انجام شد. معیار زمین‌شناسی برای تعیین این نقاط، رخنمون‌های سطحی بخش‌های کانه‌دار در محدوده بود؛ که بیشترین حجم کارهای قدیمی نیز در امتداد همین بخش‌ها صورت گرفته است. در بررسی‌های زمین‌فیزیکی به‌کارگرفته شده در محدوده گرماب از آرایه دوقطبی - دوقطبی استفاده شد. به‌منظور پوشش منطقه، تعداد 5 پروفیل دوقطبی - دوقطبی در فاصله جانبی تقریبی 60 متر از یکدیگر پیاده شد. با توجه به تغییر روند زون

سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی سنگهای آتشفشانی

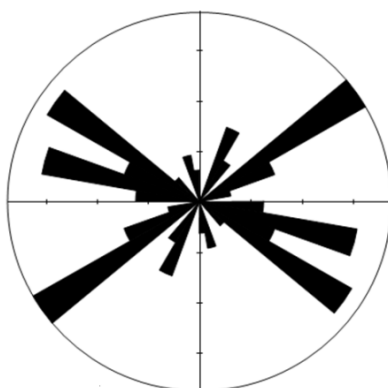
سنگهای آتشفشانی محدوده مورد بررسی دارای ترکیب حدواسط است و به‌صورت‌گدازه و آذرآواری در سطح زمین دیده می‌شوند. بررسیهای سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سنگهای آتشفشانی ترکیبی از آندزیت، تراکی‌آندزیت، آندزیت-بازالت، بازالت و سنگهای آذرآواری شامل آگلمورا و انواع

توفها، دارند (شکل 3). پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیوین مهمترین فنوکریست‌های این سنگها را تشکیل می‌دهند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، اغلب سالم و غیردگرسان هستند و در آنها بافت غربالی و ماکل آلبیت- کارلسباد دیده می‌شود.



شکل 1. نقشه زمین‌شناسی کانسار گرماب، بر روی ورقه 1:100,000 آبیز (Akrami et al., 2005)

Fig. 1. Geological map of Garmab deposit located within 1:100,000 sheet of Abiz,. Modified after Akrami et al. (2005)



شکل 2. نمودار گل‌سرخ‌ی رسم‌شده برای گسل‌های محدوده گرماب

Fig. 2. Rose diagrams of faults in Garmab area

کانی ثانویه موجود در حفره‌ها و رگه‌های موجود در سنگ، کلسیت است. از دیگر کانیهای ثانویه می‌توان به اکسیدهای آهن، کانیهای فیلسیلیکاته، کانیهای تیره، آلبیت، کانیهای رسی، زئولیت، ایدنگسیت، بولنژیت، کلریت و سرپانتین اشاره کرد.

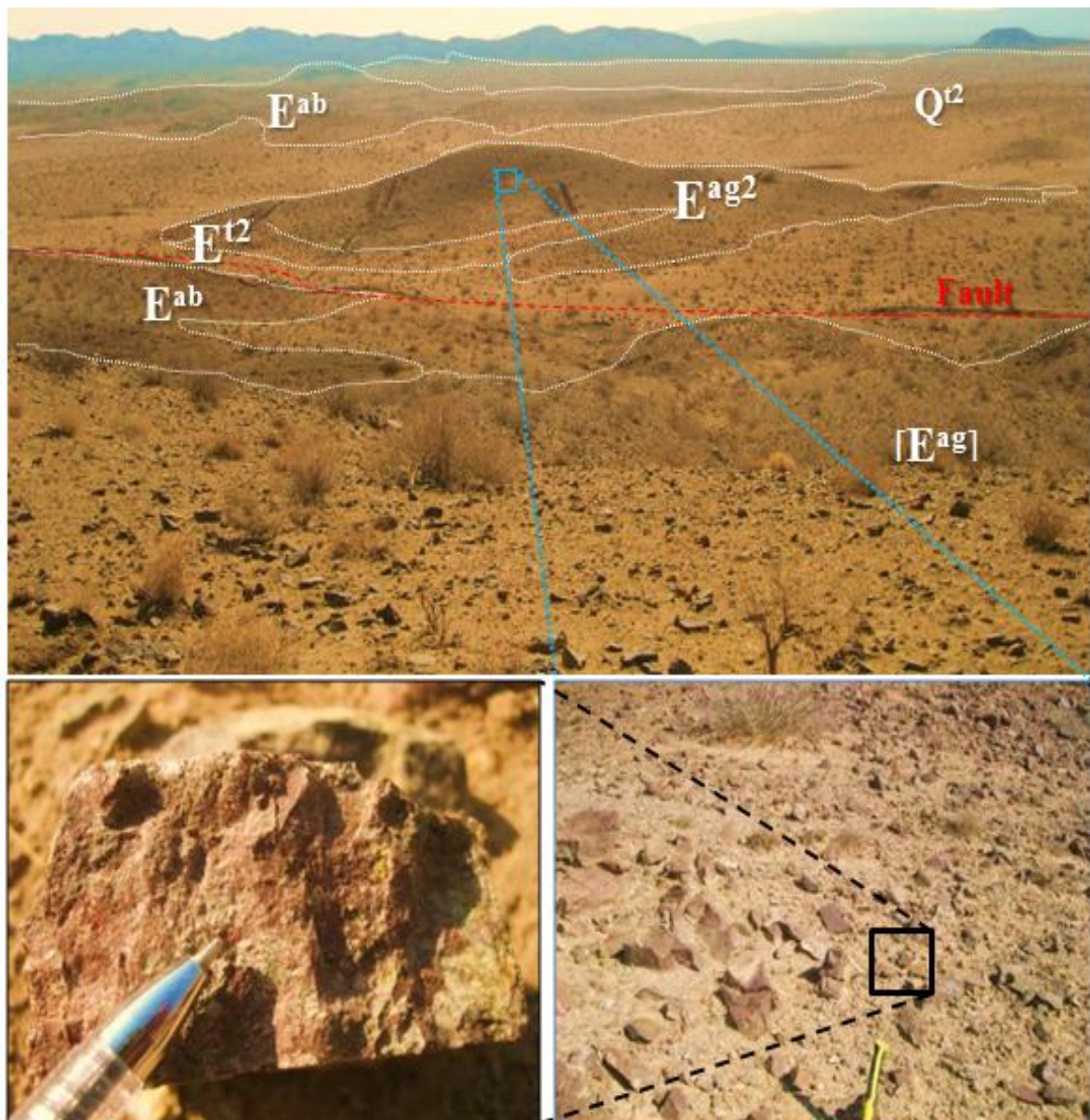
#### زمین‌شیمی‌گدازه‌ها

درصد  $\text{SiO}_2$  این سنگها بین 53/27 تا 61/16 درصد متغیر است. بر اساس ترکیب شیمیایی، سنگهای آتشفشانی مورد نظر در نمودار کوکس و همکاران (Cox et al., 1979) که بر مبنای درصد وزنی مجموع آلکان ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) در مقابل درصدوزنی سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) رسم شده است (شکل 5-A)، در محدوده آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت-بازالت قرار می‌گیرند. نمونه‌های آذرین محدوده مورد بررسی در نمودار کالک‌آلکان واقع می‌شوند (شکل 5-B). به‌طور کلی ماگماهای اولیه‌ای که در تعادل با کانی‌شناسی شاخص گوشته بالایی (الیون + ارتوپروکسن + گارنت + اسپینل) قرار دارند، باید دارای مقادیر  $\text{Mg}\#$  یا عدد منیزیمی بالا ( $>0/7$ ) Ni بالا ( $<1400-1500\text{ppm}$ )، Cr زیاد ( $<1000\text{ppm}$ ) و مقدار  $\text{SiO}_2$  کمتر از 50% باشند (Glenn, 2004). با وجود این، اگر ماگمای بازیک به جای ناشی شدن از یک گوشته عادی، از مناطق منشأ متاسوماتیزه ناشی شده باشند، دیگر این معیارها کاربرد نخواهند داشت (Wilson, 1989). ماگمای سازنده نمونه‌های مورد آنالیز با داشتن مقدار  $\text{Mg}\#$  میانگین 0/3، میزان گرم 23 و مقدار میانگین نیکل 33 جزو ماگماهای اولیه

این پلاژیوکلازها، به‌صورت میکرولیت‌های ریز و فنوکریست‌های درشت و خودشکل متبلور شده‌اند. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در سنگهای منطقه از نظر بافتی، به دو گروه قابل تقسیم‌اند، گروهی بافت غربالی دارند و گروهی بدون آن هستند. در پلاژیوکلازهای دارای بافت غربالی، یا در تمام قسمت‌های کانی، بافت غربالی به‌صورت فراگیر توزیع شده و یا فقط در قسمت‌های مرکزی بلور متمرکز شده است. بافت غربالی دانه‌درشت، در شرایط تحت اشباع از آب و نرخ کاهش فشار متوسط رخ می‌دهد (Tsuchiyama, 2001). وجود هم‌زمان پلاژیوکلازهای نرمال و پلاژیوکلازهای دارای بافت غربالی نمی‌تواند فقط به‌دلیل برداشته شدن فشار تشکیل شده باشد. به‌همین دلیل، آمیختن با یک ماگمای آبدار و داغ‌تر برای تشکیل بافت غربالی لازم است (Kuscu and Floyd, 2001). استوارت و پیرس (Stewart and Pearce, 2004) معتقدند؛ که ناپایداری بلورهای پلاژیوکلاز در حین حرکت سریع ماگما به سمت بالا، باعث پیدایش بافت غربالی در پلاژیوکلاز می‌شود. چرا که، بعضی از قسمت‌های پلاژیوکلاز به‌طور بخشی ذوب می‌شود و فرآورده‌های ناشی از ذوب پلاژیوکلاز در داخل پلاژیوکلاز شروع به تبلور می‌کنند. کانیهای مافیک، به دو صورت پیروکسن و الیون در نمونه‌ها حضور دارند و حدوداً 10% از فنوکریست‌های سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. پیروکسن کانی فرومنیزین اصلی این نمونه‌هاست؛ که به‌صورت فنوکریست‌های درشت و خودشکل در نمونه متبلور شده است. اغلب بلورهای الیون به کلریت و اکسیدهای آهن تجزیه شده‌اند. به‌طوری‌که در برخی نمونه‌ها، تنها قالب‌های کاذب الیون قابل تشخیص هستند. فراوان‌ترین

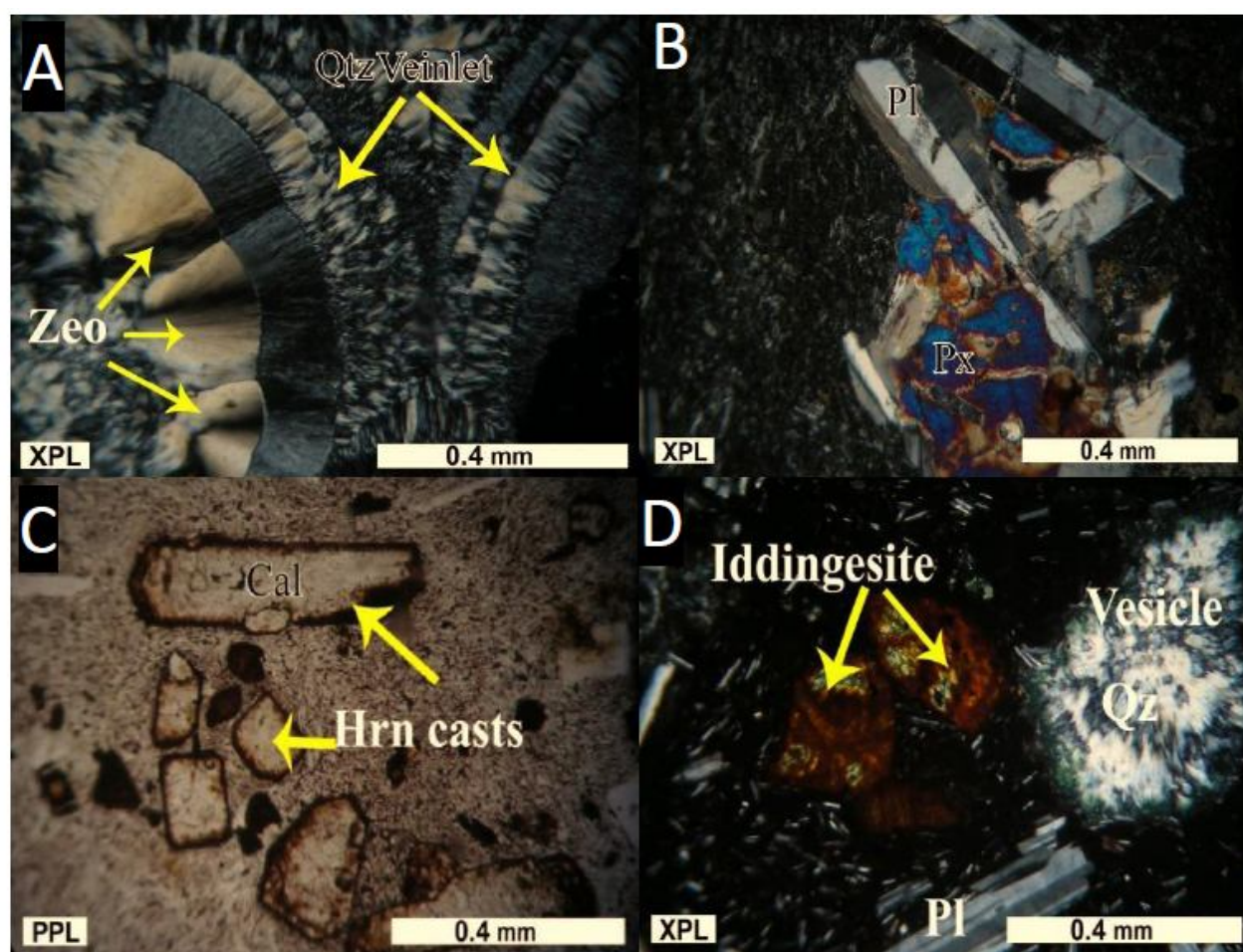
آندزیت آورده شده است. در شکل 4-C، فرآیند اوپاسیتی‌شدن در بلورهای منشوری آمفیبول دیده می‌شود؛ که توسط کلسیت پر شده‌اند. شکل 4-D، نمونه برداشت شده از واحد آندزیتی را نشان می‌دهد. در این نمونه تعدادی قالب کانیفرومینیزین وجود دارد؛ که به‌طور کامل به کلریت، سرپانتین، ایدنگزیت و اکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند.

در تعادل با گوشته بالایی قرار نمی‌گیرند و بنابراین، یا پس از تشکیل در گوشته عادی، متحمل تحولات ماگمایی شده‌اند و یا این‌که ماگماهایی هستند؛ که از گوشته متاسوماتیزه ناشی شده‌اند. در شکل 4-A، فضاهای خالی پر شده توسط کوارتز، به‌همراه کانی زئولیت از نمونه برداشت شده از رخنمون بازالتی نشان داده شده است. در شکل 4-B، هم‌رشدی درشت بلورهای پیروکسن و پلاژیوکلاز در زمینه میکروولیتی در نمونه



شکل 3. دورنما از رخنمون واحد سنگی آگلومرای قرمز رنگ ( $E^{ag}$ )، آندزیت-بازالت ( $E^{ab}$ )، توف ( $E^{t2}$ ) و رسوبات کواترنری جوان ( $Q^{t2}$ ) در محدوده گرماب

**Fig. 3.** Field photograph of the exposed red agglomerate ( $E^{ag}$ ), andesite-basalt ( $E^{ab}$ ), tuff ( $E^{t2}$ ) and young Quaternary sediments ( $Q^{t2}$ ) in Garmab area



شکل 4. A: کانی زئولیت و رگچه‌های سیلیسی به‌دست آمده از دگرسانی در نمونه بازالت؛ B: هم‌رشدی بلور پلاژیوکلاز و پیروکسن در نمونه آندزیت - بازالت؛ C: قالبهای به‌جا مانده از بلورهای هورنبلند؛ D: بلورهای ایدنگزیت به‌دست آمده از دگرسانی البوین، به‌همراه حفره‌های پر شده توسط سیلیس (Qz - کوارتز، Zeo - زئولیت، Cal - کلسیت، Hrn - هورنبلند)

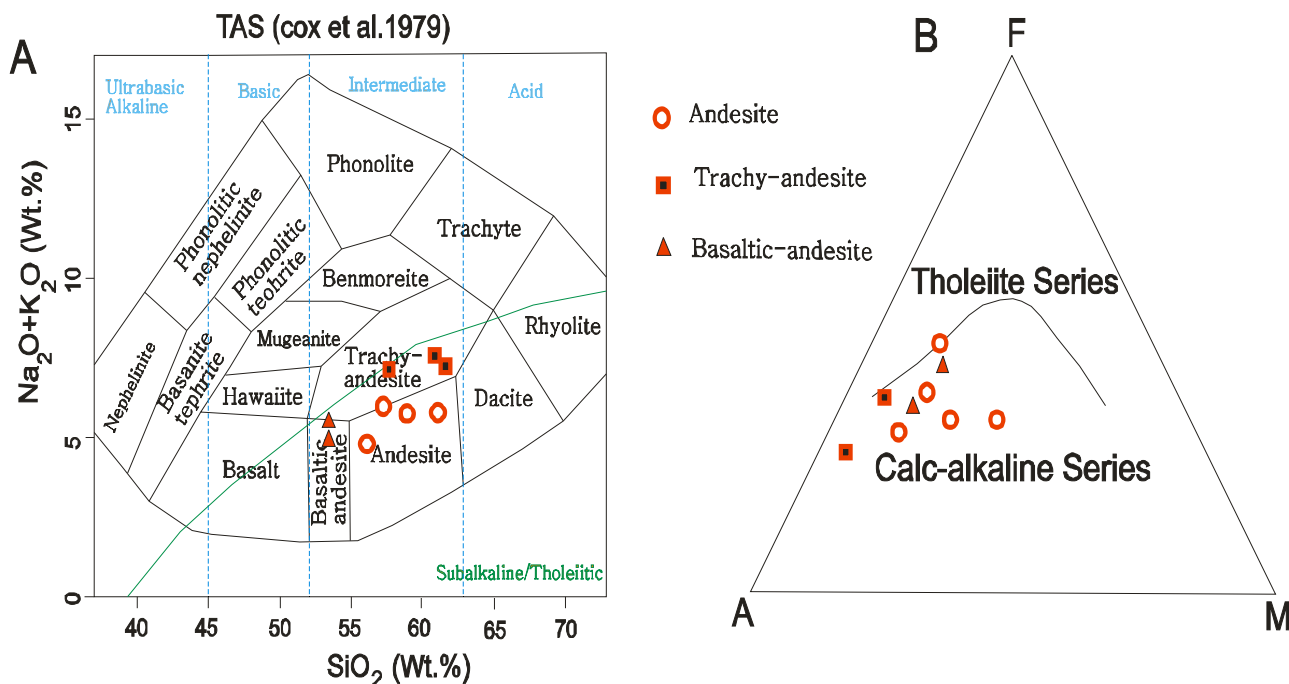
**Fig. 4.** A: Zeolite and quartz veinlet within altered basalt samples, B: Intergrowth between plagioclase and pyroxene in andesite-basalt samples, C: Remaining casts of hornblende crystals, D: Iddingsite crystals formed by alteration of olivine with open space filling silica (Qz-Quartz, Zeo-Zeolite, Cal-Calcite, Hrn-Hornblende)

کمان ماگمایی تشکیل شده‌اند (Muller and Groves, 1997) (شکل 6). برای تشخیص کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای، از کمان ماگمایی جزایر قوسی، از نمودار پیرس (Pearce, 1983) استفاده شده است. با توجه به شکل 7، به‌نظر می‌رسد؛ کمان ماگمایی سازنده سنگهای منطقه، ناشی از فرورانش یک پوسته اقیانوسی به زیر یک پوسته قاره‌ای بوده است. از نسبت عناصر کمیاب  $Zr/Y$  نیز می‌توان برای تشخیص رژیم زمین ساخت استفاده کرد (Pearce and Norry, 1979). به این صورت که اگر در گدازه‌ها نسبت  $Zr/Y > 3$  برقرار باشد، متعلق به کمانهای آتشفشانی قاره‌ای هستند و اگر در آنها نسبت  $Zr/Y < 3$  برقرار باشد، به کمانهای

ایالت ساختاری سیستان در ایران با روند کلی شمالی - جنوبی نشان‌دهنده زمین‌درز برخوردی قطعه لوت و افغان است (Tirrul et al, 1983). رژیم زمین‌ساخت فشارشی باعث جای‌گیری بخشهای لیتوسفر اقیانوسی بر روی حاشیه قاره‌ای در کرتاسه بالایی تا تشریری زیرین شده است (Khatib and Zarinkoub, 2009). سنگهای آتشفشانی منطقه مورد بررسی، در محدوده کمانهای ماگمایی ناشی از فرورانش قرار می‌گیرند. با توجه به ویژگیهای ژئوشیمیایی و همچنین، با در نظر گرفتن موقعیت زمانی و مکانی سنگهای آتشفشانی گرماب، به‌نظر می‌رسد؛ که این سنگها با سازوکار ناشی از فرورانش بلوک افغان به زیر بلوک لوت در ارتباط بوده و در یک محیط

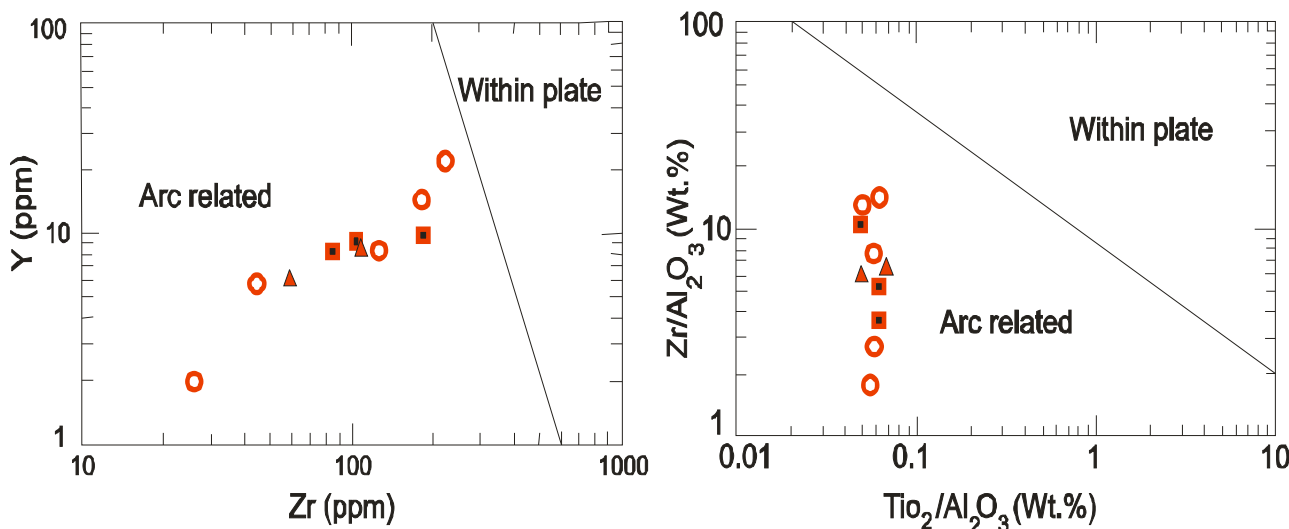
تکتونوماگمایی منطقه مورد بررسی را می‌توان جزو محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای به‌شمار آورد.

آتشفشانی اقیانوسی تعلق دارند. سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد بررسی دارای نسبت  $Zr/Y > 3$  هستند و در گروه قوس‌های آتشفشانی قاره‌ای قرار می‌گیرند. بنابراین، محیط



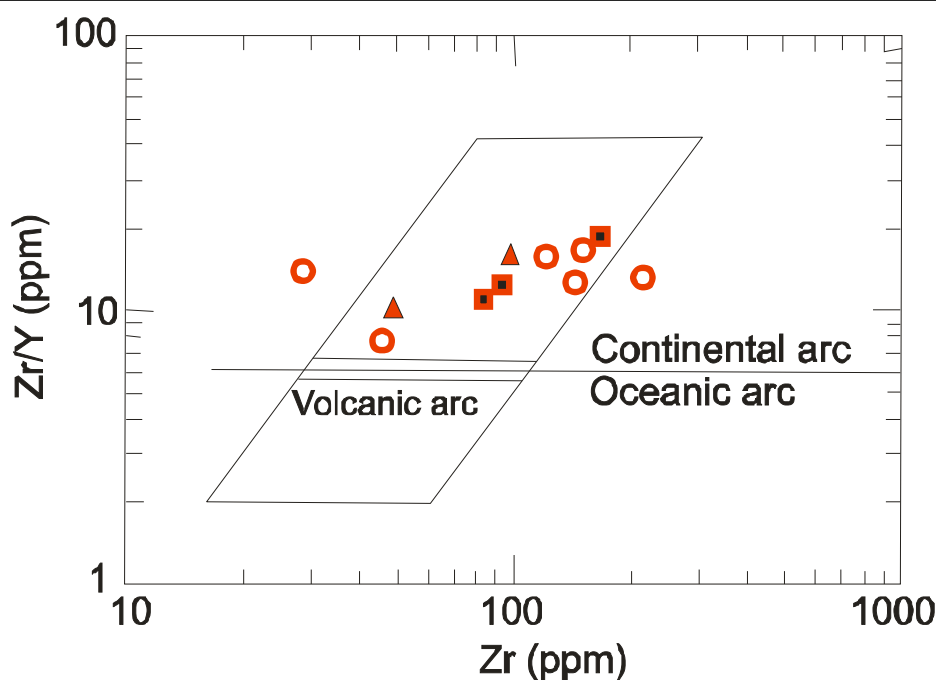
شکل 5. A: نمودار  $Na_2O + K_2O$  در مقابل  $SiO_2$ ، نمونه‌ها در محدوده آندزیت، آندزیت‌بازالت و تراکی آندزیت قرار گرفته‌اند (Cox et al., 1979)  
 B: نمودار AFM، برای تمایز دسته‌های تولییتی و کالک‌آلکالن (Irvine and Baragar, 1971)

Fig. 5. A: Diagram of  $Na_2O + K_2O$  vs.  $SiO_2$ , samples are located in Andesite, basaltic- andesite and trachyandesite (Cox et al., 1979), B: Triangular diagram plotting  $MgO$ ,  $FeO$  (total) and  $(Na_2O + K_2O)$  (AFM diagram), for differentiation of tholeiite series and Calc-alkaline series (Irvine and Baragar, 1971)



شکل 6. محیط زمین‌ساخت سنگ‌های آتشفشانی گرماب (Muller and Groves, 1997)

Fig. 6. Tectonic setting of volcanic rocks of Grmab (Muller and Groves, 1997)



شکل 7. محیط زمین‌ساخت سنگهای آتشفشانی گرماب، بر اساس تغییرات Zr در برابر Zr/Y (Pearce, 1983)

Fig. 7. Tectonic discrimination of the Garmab volcanic rocks, using Zr vs. Zr/Y (Pearce, 1983)

منطقه، غنی‌سازی برون‌زاد مرتبط با هوازدگی سطحی، عامل مهمی در کانه‌زایی به‌شمار نمی‌آید و تنها در بخش اکسیداسیون، کانیهای کربناته مس همچون ملاکیت و آزوریت تشکیل می‌شوند. عموماً زون کانه‌زا در بالاترین تراز گدازه‌های آتشفشانی قرار می‌گیرد؛ در نتیجه، ماده معدنی به‌صورت چینه‌کران است. چنین ویژگی در کانسارهای شمال شیلی نیز دیده می‌شود. به اعتقاد بوریگ (Boric et al, 2002) این ویژگی نشانگر اپی‌ژنتیک بودن این ذخایر است. در شکل 8- A، نمایی از کار شدادی در کانسار مس گرماب نشان داده شده است (دید به سمت شمال غرب)؛ در شکل 8- B، نمونه برداشت شده از واحد آندزیتی دارای کانی‌سازی مس، به‌صورت آزوریت و ملاکیت نشان داده شده است.

#### هم‌یافت کانسار مس گرماب

در تمامی مقاطع، کانه اصلی مس کالکوسیت است. کانی‌سازی عمدتاً در سنگهای آتشفشانی (آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت-بازالت) و سنگهای پیروکلاستک (آگلومرا و توف) جای گرفته است. به‌طور کلی، براساس بررسیهای میکروسکوپی و مشاهدات صحرایی، کانه‌سازی در گرماب، بیشتر به دو گونه رگه-رگه‌ای و افشان دیده می‌شود. در مقیاس صحرایی،

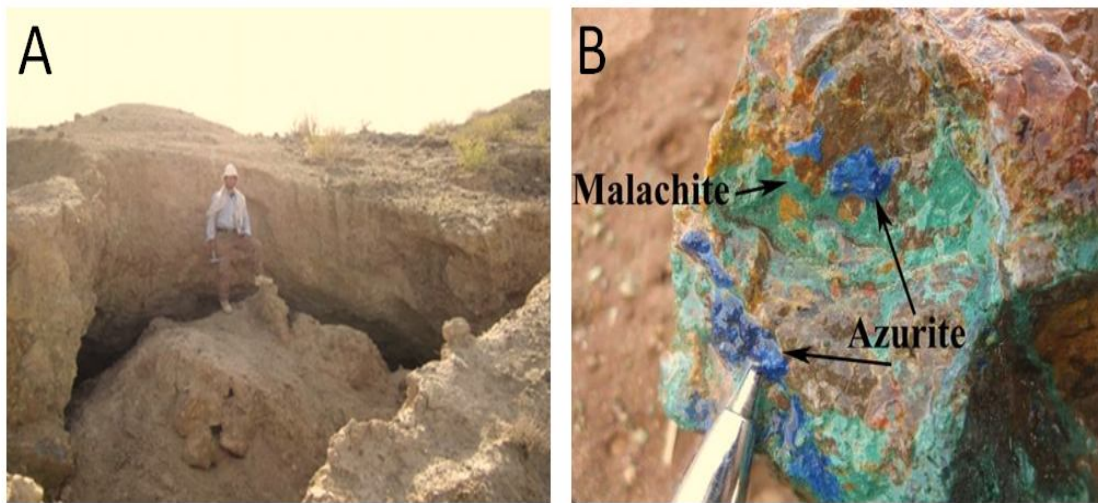
#### شیوه تشکیل کانسار مس گرماب

کانه‌زایی مس در کانسار مس گرماب، با میزبانی سنگهای آتشفشانی و مواد آذرآواری به سن پالئوسن-ائوسن زیرین صورت گرفته است. بافت قالب در این کانسار، بافت پورفیری، آمیگدالوئیدال و جریانی است. بر اساس بررسیهای صورت‌گرفته، کانه‌زایی مس پس از تشکیل سنگ میزبان خود، شکل گرفته است (Adelpour, 2012). ماگمایی غنی از مس، حین صعود از زون فروانش، به سطح زمین برخورد کرده و مجموعه‌ای از سنگهای آتشفشانی با ترکیب حدواسط تا بازیک، به‌صورت گدازه (آندزیت، تراکی آندزیت، آندزیت-بازالت، بازالت) و آذرآواری (آگلومرا و توف) در سطح زمین ایجاد کرده است؛ که میزبان کانه‌زایی مس است. پرمایه بودن گدازه از سیالات فرار و برخورد آن با سطح، بافت پورفیری و آمیگدالوئیدال را ایجاد کرده است. سنگهای آتشفشانی میزبان کانی‌سازی، دگرسانی گرمابی را تحمل کرده‌اند. شدت دگرسانی در سنگهای آتشفشانی میزبان کانی‌سازی و سنگهای آتشفشانی بدون کانی‌سازی، متفاوت است. بدین معنی، که با فاصله گرفتن از زون کانه‌دار، از شدت دگرسانی کاسته می‌شود. عملکردگسلها و شکستگیهای فراوان در سنگهای منطقه از عوامل مهم سهولت دگرسانی گرمابی در آنهاست. در این



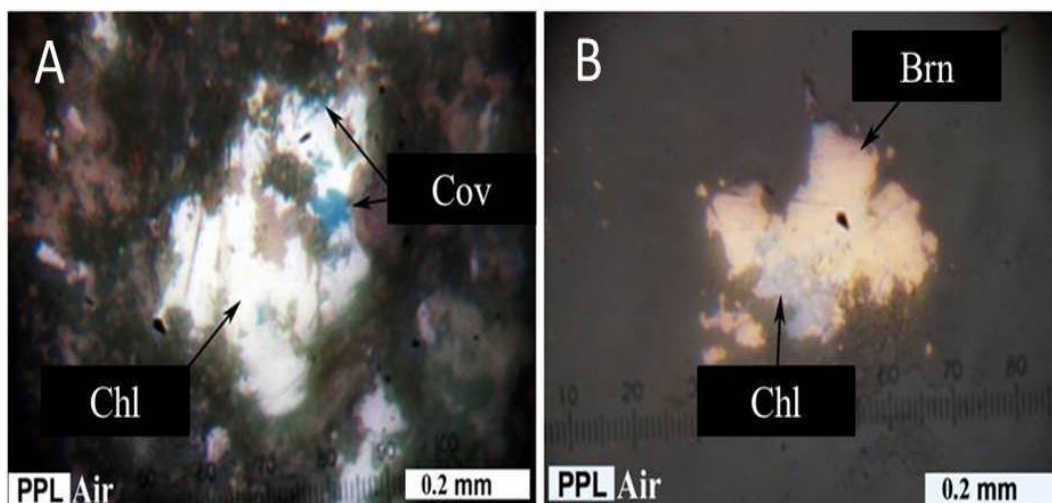
کانی‌سازی در این محدوده نیز شامل: پیریت ± کالکوپیریت ± بورنیت ± کالکوسیت ± دیژنیت ± کولیت ± کوپریت ± تنوریت ± مالاکیت ± آزوریت ± مگنتیت ± هماتیت است. در شکل 9-A، هم‌رشدی کالکوسیت با کولیت در نمونه برداشت شده از واحد آندزیت - بازالت حاوی کانی‌سازی مس، نشان داده شده است، در شکل 9-B هم‌رشدی کالکوسیت با بورنیت در نمونه برداشت شده از واحد آندزیتی، نشان داده شده است.

علاوه بر کانیهای کربناته مس (آزوریت و مالاکیت) که قابل شناسایی هستند، رگه‌های سولفیدی سیاه رنگی نیز دیده می‌شود. هنگامی که این رگه‌ها زیر میکروسکپ بررسی می‌شوند؛ مشخص می‌شود که کانی کالکوسیت از این رگه‌ها بیشترین سهم را به‌خود اختصاص داده است. بررسیهای میکروسکپی بر روی مقاطع تهیه شده در نواحی سولفیدی، نشانگر آن است که کانه‌زایی اولیه به‌صورت رگه-رگه‌چه، افشان و پرکننده فضاهای باز است. نوع پاراژنتیکی



شکل 8. A: نمایی از کار شدادی در کانسار مس گرماب، B: کانه‌زایی مس در کانسار مس گرماب

**Fig. 8.** A: Land view of the old work in the Garmab copper deposit, B: Copper mineralization in the Garmab copper deposit



شکل 9. A: هم‌رشدی کالکوسیت و کولیت؛ B: هم‌رشدی کالکوسیت و بورنیت (Chl: Chalocite, Cov: Covellite, Brn: Bornite)

**Fig. 9.** A: Intergrowth of chalcocite and covellite, B: Intergrowth of chalcocite and bornite (Chl: Chalocite, Cov: Covellite, Brn: Bornite)

## بررسیهای زمین‌فیزیکی

با در نظر گرفتن عوامل زمین‌شناختی، اطلاعات جمع‌آوری شده از گذشته و فرآیندهای اجرایی، 5 پروفیل به فاصله تقریبی 60 متر پیاده شد. مشخصات کلی شبکه برداشت به این صورت است: ابتدا موازی با بیرون‌زدگی ماده معدنی و یا به‌طور کلی، موازی با روند بی‌هنجاری ظاهری بر روی زمین، خطی به‌عنوان خط مبنا تعیین می‌شود. برداشتها عمود بر این خط و به‌عبارتی عمود بر روند عمومی زون کانی‌سازی انجام می‌شود. در این امتداد و با توجه به تغییر روند زون کانی‌سازی دو پروفیل DD-1,2 با آزمون تقریبی 25 درجه و 3 پروفیل DD-3,4,5 با آزمون تقریبی 75 درجه به اجرا در آمد (شکل 10) (به‌دلیل محدودیت، در ادامه تنها نتایج بررسیهای مربوط به پروفیل DD-1 ارائه می‌شود). آرایش دوقطبی-دوقطبی با فاصله دوقطبی بیست‌متری هشت گام انتخاب شد؛ چرا که در گامهای بالاتر از هشت، نسبت سیگنال به نوفه به‌شدت افت می‌کند و در عمل آنچه در برداشتهای با گامهای بالاتر ثبت می‌شود، میزان نوفه است (Luo and Zang, 1998) با انتخاب این مؤلفه‌ها، عمق بررسی به 80 تا 90 متر می‌رسد. اما از آن‌جا که نتایج خام در اندازه‌گیریهای زمین‌الکتریک، نمی‌توانند هیچ‌گونه اطلاعات کمی، درباره عمق یا توزیع مقاومت‌های ویژه الکتریکی در زیرزمین بیان کنند؛ بدین‌وسیله مدل‌سازی داده‌ها اجتناب‌ناپذیر است (Ward, 1990). در زمین‌فیزیک و علوم وابسته، برداشتها به‌صورت سامان‌مند و در شرایط کنترل شده، انجام می‌شود و نتایج این برداشتها، به‌صورت میزان عددی ارائه می‌شوند. این مشاهدات را داده‌های تجربی یا مشاهده‌ای می‌نامند. برای هر نوع نتیجه‌گیری از این داده‌ها، باید رابطه بین توزیع خواص فیزیکی سامانه مورد بررسی (زمین) و پاسخ زمین‌فیزیکی قابل مشاهده، معلوم شود. دستگاه معادلاتی که این رابطه را نشان می‌دهد، نظریه مستقیم (مدل‌سازی پیش‌رو) نامیده می‌شود. دریافت خواص فیزیکی سامانه مورد بررسی از روی داده‌های مشاهده‌ای، روندی معکوس است و ابزار کمی مورد نیاز برای رسیدن به آن، نظریه معکوس (مدل‌سازی معکوس) خواننده می‌شود (Luo and Zang, 1998). ورودی مدل‌سازی پیش‌رو، مؤلفه‌های مدل است که با انجام محاسبات بر روی این مؤلفه‌ها، پاسخ محاسبه شده یا معادل مصنوعی داده‌ها، به‌عنوان خروجی دریافت می‌شود. در روش مدل‌سازی پیش‌رو،

با استفاده از روشهای عددی تفاسیل محدود، تحلیل شبکه، اجرای محدود و معادله انتگرال، مدل‌ها تفسیر می‌شوند. از آن‌جا که روشهای مدل‌سازی پیش‌رو، کند و ضعیف هستند، برای کاهش خطر عملیات اکتشاف، مدل‌سازی‌های قدرتمند و سریع معکوس‌سازی، جای‌گاه ویژه‌ای در مسائل زمین‌فیزیکی یافته است. ورودی مدل‌سازی معکوس، داده‌های مشاهده‌ای است؛ که با انجام محاسبات مربوط به نظریه معکوس‌سازی بر روی آنها مؤلفه‌های مدل، به‌عنوان خروجی دریافت می‌شود (Luo and Zang, 1998).

## مدل‌سازی معکوس هموار

یکی از روشهای مناسب برای معکوس‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده، اعمال شرایط هموار است (Luo and Zang, 1998). این روش، راهی ساده و ارزان برای حل مسائل ناپایدار یا مسائل با داده‌های کم است و در عین حال، اگر محدودیت‌های اولیه یا مدل اولیه در دسترس نباشد، بهترین روش است (Yungul, 1996). در فرمول‌بندی مسائل معکوس‌سازی هموار، بهتر آن است که مؤلفه‌های مدل نسبت به مکان، تغییرات کمی به‌همراه داشته باشند (Luo and Zang, 1998). در این صورت می‌توان اختلاف بین مؤلفه‌های مجاور را کمینه کرد.

این روش بر اساس رابطه زیر استوار است:

$$(j^T j + uF)d = T_g^F$$

که در آن:  $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$  در جایی که:

$f_x$ : صافی نرم‌سازی افقی،  $f_z$ : صافی نرم‌سازی عمودی

F: آرایه هموارساز، J: آرایه ژاکوبین مشتق‌های جزئی

u: عامل کنترل نوسان، d: بردار انحراف مدل

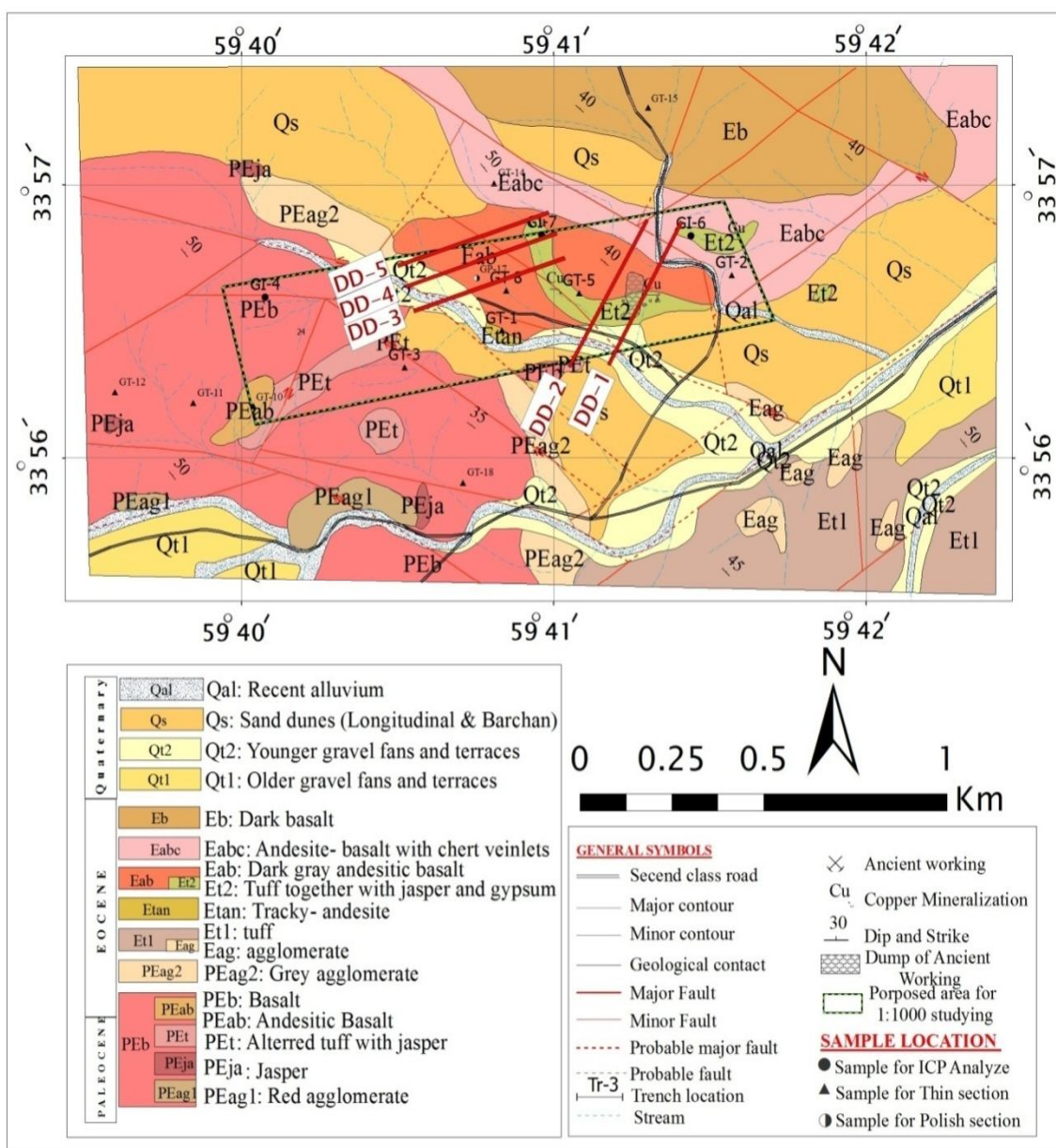
g: بردار اختلاف

برداری اختلاف g، شامل: اختلاف بین میزان مقاومت ویژه اندازه‌گیری و محاسبه شده است. مدل دوبعدی استفاده شده توسط نرم‌افزار RES2DINV، فضای زیرسطحی را به تعداد معینی بلوک مستطیلی تقسیم می‌کند. منظور از این عمل، تعیین مقدار مقاومت ویژه و قطبش‌القایی برای هر کدام از بلوک‌های مستطیلی است، به‌طوری‌که بتواند یک شبه‌مقطع

مقاومت ویژه ظاهری و قطبش‌القایی را که با اندازه‌گیری‌های واقعی منطبق است تولید کند. روش بهینه‌سازی در این نرم‌افزار، به‌طور کلی، سعی می‌کند که اختلاف بین میزان مقاومت ویژه ظاهری و قطبش اندازه‌گیری‌شده و محاسبه شده را به‌وسیله تغییر مقدار مقاومت و قطبش هر کدام از بلوک‌ها کاهش دهد؛ که سرانجام سنج‌های از این اختلاف توسط عامل R.M.S یا Root Mean

مقاومت ویژه ظاهری و قطبش‌القایی را که با اندازه‌گیری‌های واقعی منطبق است تولید کند.

روش بهینه‌سازی در این نرم‌افزار، به‌طور کلی، سعی می‌کند که اختلاف بین میزان مقاومت ویژه ظاهری و قطبش اندازه‌گیری‌شده و محاسبه شده را به‌وسیله تغییر مقدار مقاومت و قطبش هر کدام از بلوک‌ها کاهش دهد؛ که سرانجام سنج‌های از این اختلاف توسط عامل R.M.S یا Root Mean



شکل 10. نقشه زمین‌شناسی کانسار مس گرماب، در مقیاس 1:5,000 که در آن پروفیل‌های شماره 1 تا 5 نمایش داده شده است.

Fig. 10. Geological map of Garmab copper deposit (1:5000), showing profiles 1 to 5.

بارپذیری، ثابت زمانی و وابستگی بسامدی در حوزه بسامد و در حوزه زمان با روش‌های مختلف وارون‌سازی، قابل نتیجه‌گیری هستند. ثابت زمانی ظاهری می‌تواند مستقیماً در شناخت زنا‌های قابل پلاریزه با توجه به ساختمان آنها مورد استفاده قرار گیرد. کانسارهایی که در عمق بالا دفن شده‌اند و با روش‌های متداول IP بی‌هنجاری واضحی ندارند، با استفاده از ثابت زمانی قابل تشخیص هستند. وابستگی بسامدی ظاهری نیز در تشخیص تمرکز محلی زنا‌های معدنی و تشخیص نوع کانسار، کارا هستند (Hafizi and Asarzaghan, 2008). اندازه‌گیری قطبش‌القایی طیفی در دو حوزه بسامد و زمان انجام می‌شود. حوزه بسامدی نسبت به حوزه زمانی دارای این برتری است؛ که در آنها نسبت سیگنال به پارازیت بیشتر است و برتری اندازه‌گیری‌های حوزه زمانی نسبت به حوزه بسامدی، سرعت بیشتر اندازه‌گیری‌ها و صرفه‌جویی در زمان است (Robinson, 2005).

پلتون و همکاران (Pelton et al, 1978)، برای تفسیر پدیده قطبش‌القایی طیفی حوزه بسامد، رابطه 1 را که به مدل گُل - کُل معروف است، به کار گرفتند (Tombs, Johnson, 1984; 1981).

رابطه 1:

$$Z(i\omega) = Z(0) \left[ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^2} \right] \right]$$

$Z(i\omega)$  میدان مختلط بر حسب اهم،  $Z(0)$  مقاومت DC بر حسب اهم،  $m$  مقدار بارپذیری بدون بعد،  $\tau$  ثابت‌زمانی بر حسب ثانیه،  $\omega$  بسامد زاویه‌ای بر حسب عکس ثانیه،  $C$  وابسته بسامد بدون بعد و  $i = \sqrt{-1}$  است. با به‌هنجار سازی  $(i\omega)$  و  $Z(0)$  از راه اندازه‌گیری آرایه و محاسبه مقاومت از رابطه 2:

رابطه 2:  $K$  ضریب هندسی آرایه

$$P = K \frac{\Delta V}{I} = KZ$$

مقاومت مختلط مربوط به قطبش حجمی از رابطه 3 به دست خواهد آمد.

رابطه 3:

$$p(i\omega) = p(0) \left[ 1 - m \left[ \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^2} \right] \right]$$

ثابت زمانی قطبش حجمی، معمولاً کوچکتر از ثابت زمانی قطبش سطحی دانه‌های کانیهای رسناست. رفتارهای مختلف ثابت‌زمانی ( $\tau$ ) برای دانه‌های قطبش‌پذیر کانی‌سازی، پایه‌های

به‌طور کلی، روش اساسی در مدل‌سازی، توسط RES2DINV، انتخاب آن مدل، برای IP و RS است؛ که میزان خطای R.M.S مربوط به آن، در تکرارهای مختلف انجام شده توسط نرم‌افزار تغییر اساسی نکرده است، و این موضوع، معمولاً در سومین تا پنجمین تکرار اتفاق می‌افتد. نتیجه شبه مقطع داده‌های پروفیل DD-1، با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV در شکل 11 آمده است.

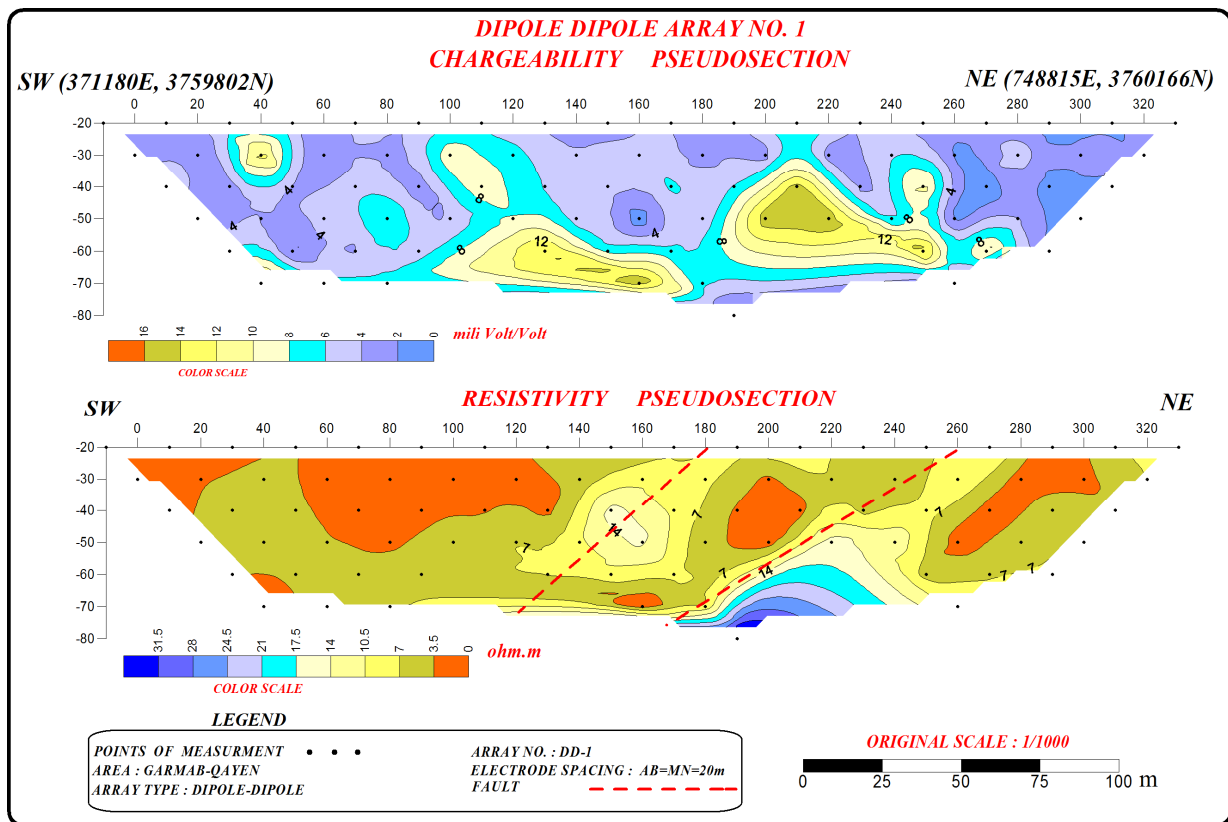
در مدل مقطع بارپذیری، یک آنومالی در حوالی نقطه با فاصله (748749E, 3760020N) تا (748757E, 3760038N) 220 متر از ابتدای پروفیل دیده می‌شود. این زون از عمق تقریبی 30 متر شروع شده و به تدریج با افزایش عمق، بر شدت آن افزوده می‌شود. زون مزبور، در اعماق تقریبی 60-70 متر شروع به بسته شدن می‌کند. علاوه بر این موقعیت، یک زون دیگر با شدت ضعیف تا متوسط نیز در بخش مرکزی شبه‌مقطع دیده می‌شود، که امتداد آن در حوالی نقطه با فاصله 100 به سطح می‌رسد. زون یادشده با افزایش عمق به سمت شمال شرق متمایل می‌شود و به تدریج بر شدت نسبی آن افزوده می‌شود. بر اساس شبه‌مقطع RS در بیشتر قسمت‌های شبه‌مقطع یک محدوده با مقاومت ویژه الکتریکی کم (به‌طور شاخص کمتر از 20 اهم‌متر) دیده می‌شود. در حوالی ایستگاه‌های 200-220، عملکرد یک گسل که امتداد آن در حوالی ایستگاه (748774E, 3760074N) 260 به سطح می‌رسد، باعث ایجاد و گسترش یک محدوده با مقاومت ویژه حدود 30 اهم‌متر، در این قسمت‌ها شده است. بر اساس شبه‌مقطع RS موقعیت یک گسل دیگر نیز در حوالی ایستگاه 180(748740E, 3760000N) دیده می‌شود.

### روش قطبش‌القایی طیفی

روش‌های الکتریکی مانند مقاومت‌سنجی و قطبش‌القایی، در اکتشاف کانسارهای فلزی با بافت افشان، اولویت خاصی دارند. از طرفی، جواب‌های قطبش‌القایی یکتا نیستند؛ بنابراین، استفاده از قطبش‌القایی طیفی برای رفع این مشکل ضروری است (Pelton et al, 1978). روش قطبش‌القایی طیفی (SIP) روش نسبتاً جدید در اکتشافات زمین‌فیزیکی است. این روش مقاومت مختلط ظاهری را در گستره وسیعی از بسامد اندازه‌گیری می‌کند؛ که برای مشخص شدن مؤلفه‌های طیفی و توزیع فضایی ساختارها استفاده می‌شود. سه مؤلفه اصلی

زمانی، باعث طیف گسترده مقاومت مختلط می‌شود و در نتیجه، وابسته بسامد ظاهری کم می‌شود. اگر وابسته بسامد قطبش سطحی (c(s)) نامیده شود، رابطه بین وابسته بسامد قطبش سطحی و حجمی، به صورت رابطه 4 است. یعنی وقتی دانه‌های کانی فلزی همگن هستند،  $c=C(s)$  است و وقتی دانه‌ها ناهمگن هستند،  $c < C(s)$  است (Horel and Kennard, 1970).

نظری مناسبی را برای تشخیص توده‌های قطبش‌پذیر بر اساس ساختار آنها با استفاده از یک ثابت‌زمانی فراهم می‌کند. نتایج بالا تنها برای یک دانه منفرد و برای سنگهای کانی‌سازی شده با دانه‌های هادی همگن معتبر است. اما سنگهای طبیعی دارای چندین عضو کانی‌سازی با دانه‌های کانی گوناگون و دارای ثابتهای زمانی مختلف هستند. بنابراین، حتی اگر رفتار الکتروشیمیایی دانه‌های کانی و محلول درون آنها برای همه عضوهای قطبش‌پذیر یکسان باشد، اختلاف میزان ثابتهای



شکل 11. شبه‌مقطع قطبش‌القایی و مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به آرایه پروفیل شماره یک (DD-1).

Fig. 11. Pseudosection for Induced polarization and Resistivity related to profile DD-1

(0 و 1) متغیر است (Apparao, 1997). (t) ثابت زمانی، تعیین‌کننده آهنگ افت ولتاژ باقی‌مانده، که مقدار آن با افزایش میانگین دانه‌بندی دانه‌های فلزی در منبع تولیدکننده قطبش‌القایی افزوده می‌شود. در حقیقت، این مؤلفه، بیشتر وابسته به مربع اندازه متوسط دانه‌بندی است. در عمل این مؤلفه دارای گستره تغییرات زیادی از چند میلی‌ثانیه تا چندین هزارثانیه است و مبنایی در تشخیص توده‌های

رابطه 4:

$$c \leq C^{(s)}$$

بر اساس رابطه 1، سه مؤلفه قطبش‌القایی طیفی حوزه زمان یا بسامد عبارتند از:  $m$ ،  $C$ ، و  $\tau$  که همگی وابسته به منبع قطبش‌القایی هستند. (m) بارپذیری، عبارت است از: حاصل تقسیم ولتاژ باقی‌مانده، بلافاصله پس از قطع جریان بر ولتاژ مشاهده شده، درست پیش از قطع جریان مقدار آن در فاصله

تولیدکننده قطبش‌القایی است. جدول 1، نشان‌دهنده گستره تغییرات وابسته بسامد برای سنگهای با کانی‌سازیهای مختلف است (Apparrao, 1997).

قطبش‌پذیر از دیگر ساختارهاست (Apparrao, 1997). (C) وابسته بسامد، کنترل‌کننده انحنای منحنی افت است و از نظر فیزیکی وابسته به میزان پراکندگی دانه‌های فلزی در منبع

جدول 1. گستره تغییرات بسامد برای سنگهای با کانی‌سازیهای مختلف (Apparrao, 1997)

Table 1. Range of frequency change in rocks with different mineralization (Apparrao, 1997)

Rock types	Range of C	Reason
Mineralized rocks	<0.4	Nonuniform ore grains
Disseminated ores	0.4-0.6	Homogeneous ore grains
Rocks containing low mineralization	0.2-0.6	Heterogeneous ore grains

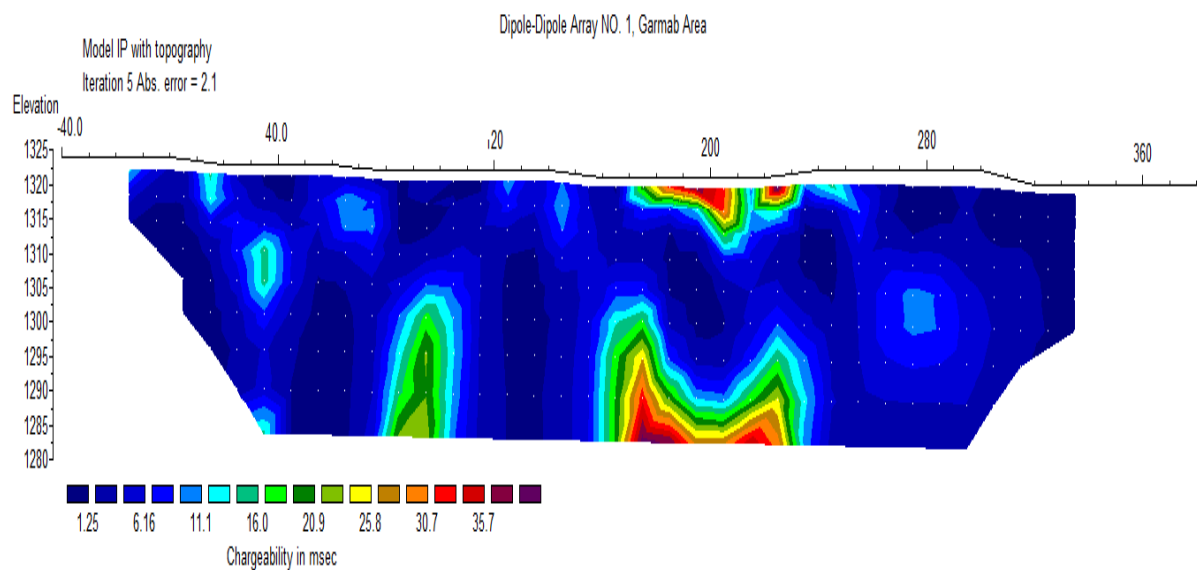
220 متری قرار دارد. البته در فاصله 90 متری مبدأ نیم‌رخ نیز، میزان بالای بارپذیری مشاهده می‌شود؛ که ریشه‌ای نیست و احتمالاً ناشی از پرشدگی زون گسله است. بر اساس مدل بارپذیری، موقعیت زون بی‌هنجار شمال‌شرقی این پروفیل نسبت به شبه‌مقطع، کمی به سمت شمال‌شرق متمایل شده است. بر این اساس، موقعیت این زون در حوالی ایستگاههای 220 تا 240 دیده می‌شود؛ که به‌صورت یک زون با شدت ضعیف تا متوسط بارپذیری است. با افزایش عمق، به‌طور نسبی بر شدت پاسخ IP در این زون افزوده می‌شود. بر اساس مدل IP، موقعیت زون بی‌هنجار حوالی ایستگاههای 100-120 به‌صورت یک محدوده با میزان پاسخ IP ضعیف دیده می‌شود (شکل 12). همانند شبه‌مقطع این زون، با افزایش نسبی عمق بر شدت این زون نیز تا حد کمی افزوده می‌شود. بر اساس مدل RS، موقعیت زون‌های بی‌هنجاری انطباق نسبی خوبی با مناطق با مقاومت ویژه حدود 30-40 اهم متر نشان می‌دهد. بر اساس این مدل نیز در تمامی قسمت‌های مقطع، شواهد مقاومت ویژه الکتریکی کم مشاهده می‌شود. مقایسه مقاطع قطبش‌القایی و مقاومت ویژه الکتریکی نشان می‌دهد؛ که آنومالی‌ها در قسمت‌های سطحی نزدیک به بخش‌هایی قرار دارند که افزایش مقاومت ویژه وجود دارد و بنابراین، قسمتی از افزایش بارپذیری در این عمق‌ها به‌دلیل افزایش اختلاف مقاومت ویژه کانی‌سازی با سنگ میزبان است. این آنومالی‌ها در قسمت‌های پایین سنگهای با مقاومت ویژه نسبتاً کم قرار گرفته‌اند؛ که از نظر عیار می‌توانند اهمیت بیشتری داشته باشند (شکل 13).

اندازه‌گیری قطبش‌القایی طیفی حوزه زمانی

تمب (Tombs, 1981) برای استفاده از روش قطبش‌القایی طیفی حوزه زمانی نشان داد؛ که پاسخ رسیده به‌گیرنده در زمان  $t$  پس از قطع جریان  $I_0$  بر اساس رابطه 5 است. رابطه 5:

$$V(t) = m I_0 R_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t}{\tau}\right)^{nc}}{\eta(nc+1)}$$

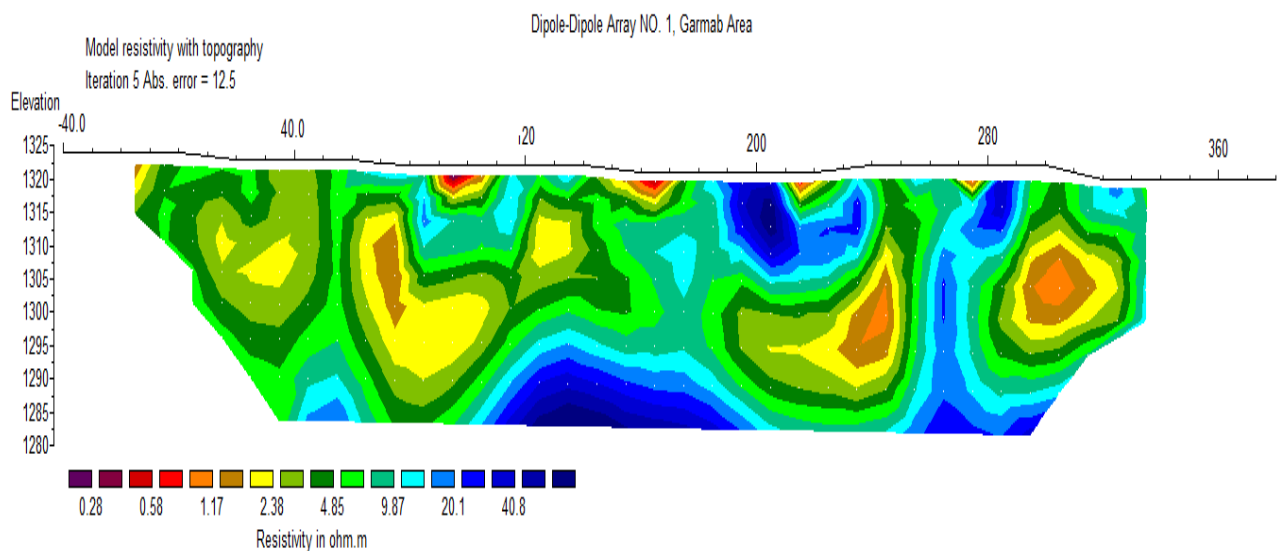
$Z_0 = R_0, c, m, \tau$  همان مؤلفه‌های به‌کار رفته در مدل کُل - کُل و  $\eta$  تابع گاماست. اکنون باید مؤلفه‌های  $c, m$  و  $\tau$  با اندازه‌گیری  $V(t)$  مشخص شوند. دو روش عمده برای تشخیص وجود دارد؛ که در این پژوهش تنها به ذکر آنها اکتفا می‌شود: روش ترسیم و روش عددی. ایراد روش ترسیمی، زمان‌بر بودن و استفاده از روش سعی و خطا برای تشخیص مؤلفه‌های مناسب است. برای استخراج مؤلفه‌های طیفی قطبش‌القایی حوزه زمان در منطقه مورد بررسی، برنامه رایانه‌ای نوشته شد و مؤلفه‌های مطلوب به‌دست آمد.  $\tau$  به‌طور معمول از 0/01 تا بیش از 100 ثانیه تغییر می‌کند. سولفیدهای پراکنده خوب‌ریز شده، ثابت زمانی کوچکی را نشان می‌دهند. میزان بزرگ ثابت زمانی بیشتر تمرکز با بافت و ساخت رگه‌ای و یکپارچه با ابعاد دانه‌بندی درشت را نشان می‌دهد. سنگهای کانی‌سازی‌شده غیرمترکم یا پراکنده، دارای میزان وابستگی بسامدی بزرگ هستند (0/4 تا 0/6)؛ زیرا دانه‌های کانی‌سازی‌شده معمولاً همگن‌تر هستند. سنگهای با درجه بالای کانی‌سازی، اغلب دارای دانه‌های کانی‌سازی‌شده غیرهمگن‌تری در داخل خود هستند و میزان وابسته بسامد پایین (0/2 تا 0/4) نشان می‌دهند. زون اصلی کانی‌سازی احتمالاً در فاصله‌های 180 تا



Horizontal scale is 30.60 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 1.20  
First electrode is located at -40.0 m.  
Last electrode is located at 380.0 m.

شکل 12. مقطع مدل‌سازی شده قطبش‌القایی برای پروفیل DD-1

Fig. 12. Modeled Section of IP for profile DD-1



Horizontal scale is 30.60 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 1.20  
First electrode is located at -40.0 m.  
Last electrode is located at 380.0 m.

شکل 13. مقطع مدل‌سازی شده مقاومت ویژه الکتریکی برای پروفیل DD-1

Fig. 13. Modeled Section of Rs for profile DD-1

## نتیجه‌گیری

از مجموع مقاطع مدل‌سازی معکوس داده‌های اندازه‌گیری شده صحرایی و همچنین، بررسی‌های طیفی داده‌های قطبش‌القایی، نتایج زیر به‌دست آمده است:

(1) با مقایسه مقاطع مشخص می‌شود که از بین روش‌های معکوس‌سازی، روش‌های هموار در مقایسه با روش‌های مؤلفه‌ای نسبت به نوفه حساسیت کمتری دارند.

(2) یکی از عوامل مؤثر و کنترل‌کننده توزیع مؤلفه‌های قطبش‌القایی طیفی، بافت و ساخت توده‌های کانی‌سازی شده است؛ که در این میان بافتهای افشان و رگه‌ای را می‌توان به‌خوبی و از طریق مؤلفه ثابت زمانی از هم تشخیص داد. همچنین، وابسته بسامد در تعیین توزیع دانه‌بندی و تشخیص نوفه‌های جفت‌شدگی القایی به خوبی قابل استفاده است.

(3) نظام کانی‌سازی در این محدوده از نوع رگه-رگه‌چه و افشان در سنگ‌های آتشفشانی است. وضعیت زمین ساخت فعال این محدوده یکی از عوامل مؤثر در شکل‌گیری و گسترش این نوع کانی‌سازی در سطح محدوده بوده است.

(4) موقعیت زون‌های بی‌هنجاری IP در بیشتر پروفیل‌ها انسجام و همبستگی بالایی را نشان نمی‌دهند. از این‌رو، نمی‌توان در این محدوده انتظار رخ‌داد کانی‌سازیهای بزرگ و گسترده را داشت. بر اساس نتایج بررسی‌های زمین‌فیزیکی به نظر می‌رسد، زون‌های کانی‌سازی، بیشتر به‌صورت محدوده‌های کوچک و پراکنده است.

(5) در شبه مقاطع و مقاطع RS به‌دلیل تأثیر شکستگی و تخلخل نسبتاً زیاد ناشی از هوازدگی در سنگ‌های آتشفشانی و همچنین، تأثیر احتمالی نقش سیالات بین دانه‌ای در کاهش مقاومت ویژه، میزان مقاومت ویژه الکتریکی تا حد زیادی کاهش پیدا کرده است.

(6) در مجموع و بر اساس انطباق شواهد سطح‌زمینی با شبه مقاطع و مقاطع قطبش‌القایی و مقاومت ویژه الکتریکی باید گفت؛ که زون‌های زیرزمینی دارای شارژپذیری متوسط و مقاومت ویژه الکتریکی کم، به‌صورت همراه، بیشترین توانایی اکتشافی را از نظر پی‌جویی سولفیدهای فلزی در این محدوده نشان می‌دهند.

(7) منحنی پاسخ IP در بیشتر قسمت‌ها دارای شدت متوسط تا ضعیف است. این موضوع حکایت از گسترش کم کانی‌سازی و عیار پایین زون‌های کانه‌دار دارد.

(8) در هنگام عملیات مدل‌سازی دوبعدی و در بررسی‌های اولیه، با استفاده از دو روش مدل‌سازی، به عملیات مدل‌سازی داده‌های چند پروفیل دوقطبی اقدام شد. سرانجام نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی با هر روشی مقایسه شد.

(9) در بیشتر بخش‌های کانی‌سازی شده با افزایش نسبی عمق از شدت خطوط پربندی زون‌های بی‌هنجار کاسته می‌شود، این موضوع حکایت از کاهش نسبی عیار کانی‌سازی سولفیدی با افزایش عمق دارد.

(10) در مجموع و براساس تلفیق نتایج زمین‌شناسی سطح‌زمینی و زمین‌فیزیک زیرزمینی در محدوده گرماب، باید گفت که انتظار وجود یک سیستم کانی‌سازی پرعیار سولفیدی در این محدوده دور از ذهن است. کانی‌سازی انجام شده، عموماً به‌صورت بخش‌های کوچک و کم‌عیار است و نمی‌توان انتظار داشت، افزایش قابل توجهی در میزان عیار این بخش‌های کوچک، دست‌کم تا پایان عمق مدل‌سازی به‌وجود آید.

## پیشنهادها

با توجه به نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های این پژوهش و نتایج دیگر پژوهش‌های انجام شده در دنیا پیشنهاد می‌شود:

(1) با توجه به مقاطع مربوط به مدل‌سازی‌های معکوس و مؤلفه‌های قطبش‌القایی طیفی حوزه زمان پیشنهاد می‌شود؛ یک گمانه اکتشافی به عمق تقریبی 60 متر بر روی نیم‌رخ DD-1 و در فاصله  $(X=748740E, Y=3760000N)$  180 متری مبدأ با شیب 20 درجه و به سمت شمال‌شرق حفر شود. بدیهی است؛ تنها با بررسی نتایج حاصل از حفاری یادشده، می‌توان در خصوص منابع ایجاد بی‌هنجاریهای قطبش‌القایی اطمینان حاصل کرد.

(2) پیشنهاد می‌شود از مدل‌سازی‌های سه‌بعدی که دقت عمل بیشتری نسبت به مدل‌سازی دوبعدی دارند؛ استفاده شود. برای رسیدن به این هدف، لازم است داده‌ها با تراکم بیشتری برداشت شوند و مورد بررسی قرار گیرند.

(3) پیشنهاد می‌شود که از هر دو متر مغزه حفاری، نمونه‌برداری شود و بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری و تجزیه‌شیمیایی بر روی نمونه‌ها صورت گیرد. به‌گونه‌ای که، بتوان از این نتایج، در شناسایی مستقیم منابع ایجادکننده بی‌هنجاریهای قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه الکتریکی استفاده کرد.



## قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه شرکت مهندسی مشاور زرناب اکتشاف و شرکت کانی کاوان سمنگان به‌منظور

فراهم‌آوردن امکانات مورد نیاز در اجرای این پژوهش سپاس‌گزاری می‌شود.

## References

- Adelpour, M., 2012. Economic geology of Garmab-Qaen copper deposit (South Khorasan). M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 237 pp.
- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological survey and mineral exploration, Iran, 345 pp (in Persian).
- Akrami, M.A., Chaichi, Z. and Haddadan, M., 2005. Geological map of Abiz, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Apparao, A., 1997. Developments in Geoelectrical Methods. August AiméBalkema, USA, 293 pp.
- Arjmandzadeh, R., 2011. Studies of mineralization, geochemistry and tectonic setting in the Dehsalam and Chahshlghmy mining indexes, Lut Block, East Iran. Ph.D. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 369 pp (in Persian with English abstract).
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N.S.F. and Zentilli, M., 2002. The Geology of the ElSoldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile. In: T.M. Porter (Editor), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits. A Global Perspective, Adelaide, pp. 163-184.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.G., 1979. The interpretation of igneous rocks. George, Allen and Unwin, London, 449 pp.
- Glenn, A.G., 2004. The influence of melt structure on trace element partitioning near the peridotite solidus. Contributions to Mineralogy and Petrology, 147(4): 511-527.
- Hafizi, M.K. and Asarzaghan, B., 2008. Application of spectral induced polarization (SIP) in the exploration of mineral resources and oil. First National Symposium on the Application of new technologies and new methods of Geosciences. Islamic Azad University, Mahallat branch. Iran (in Persian with English abstract).
- Horel, A.E. and Kennard, R.W., 1970. Ridge regression: Application to non orthogonal problems. Tachnometrics, 12 (1): 55-67.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the classification of the common volcanic rocks. Journal of Earth Sciences, 8 (2): 235-458.
- Johnson, I.M., 1984. Spectral Induced Polarization parameters as determined through Time-domain measurements. Geophysics, 49 (11): 1993-2003.
- Karimpour, M.H., 2005. Quartz-alunite and quartz pitted alteration zones (high sulfidation) of the upper zone of porphyry copper systems in Chah Shalghami area, South Khorasan. 13th Congress of Crystallography and Mineralogy, Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Farmer, L. and Stern, S., 2012. petrogenesis of granitoids, age assessment method zircon U-Pb, Sr- Nd isotope geochemistry and mineralization Tertiary important event in the Lut Block, East Iran. Journal of Economic Geology, 1(4): 1-27 (in Persian with English abstract).
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Heidarian shahri, M.R. and Askari, A., 2007. Mineralization, alteration and geochemistry of Hired gold-tin prospecting area, South Khorasan province. 14th Congress of Crystallography and Mineralogy, Birjand University, Birjand, Iran (in Persian with English abstract).
- Khatib, M.M. and Zarinkoub, M.H., 2009. Morphotectonic of emplacement of the andesiticring in Givshad, east of Iran. European Geosciences Union General Assembly, 11 (3): 53-59.
- Kuscu, G.G. and Floyd, P.A., 2001. Mineral compositional and textural evidence for magma mingling in the Saraykent volcanics. Lithos, 56 (2-3): 207-230.
- Lotfi, M., 1982. Geological and geochemical investigations on the volcanogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore- mineralizations in the Shurab-GaleChah and northwest of Khur (Lut, east of Iran). Unpublished Ph.D. thesis, der Naturwissenschaften der Universität Hamburg, 151 pp (in Persian with English abstract).

- Luo, Z.Z. and Zang, G., 1998. Theory and application of Spectral Induced Polarization. Society of Exploration Geophysicists, 6 (2) 1-171.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., 2009. Geology, mineralization, alteration, geochemistry, interpretation of geophysical data, microthermometry, isotope studies and determination of the origin of the mineralization of Mahrabad and khonik, South Khorasan province. Ph.D. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 600 pp.
- Mazlomi, A. R., Karimpour, M.H., Rassa, I., Rahimi, B. and Vosoughi Abedini, M., 2008. Kuh-E-Zar Gold Deposit in Torbat-e-Heydaryeh New Model of Gold Mineralization. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 3(16): 364-376 (in Persian with English abstract)
- Muller, D. and Groves, D.I., 1997. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, Shoshonites and gold- copper deposits. Ore Geological Review, 8(1): 383-406.
- Pearce, J.A., 1983. Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: C.J. Hawkesworth, and M.L. Nurry (Editors), Continental basalts and Mantle Xenoliths. Shiva, Nantwich, pp. 230-249.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implication of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology, 69(1): 33-47.
- Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof P.G., Sill, W.R. and Nelson, P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of Induced Polarization Coupling with multi frequency IP. Geophysics, 43(3): 588-609.
- Robinson, A. (translated by Heidarian shahri, M.R.), 2005. Principles of Exploration Geophysics. Mashhad University Press, Mashhad, 750 pp.
- Stewart, M.L. and Pearce, T.H., 2004. Sieve-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results. American Mineralogy, 89(3): 348-351.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. Geological Society of American, 94(1): 134-150.
- Tombs, J.M.C., 1981. The feasibility of Spectral Induced Polarization measurements in the Time-domain. GeosExploration, 19(2): 91-102.
- Tsuchiyama, A., 2001. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside – albite-anorthite and origin of dusty plagioclase in andesite. Contributions to Mineralogy and Petrology, 89(1): 1-16.
- Ward, S.H., 1990. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, 1(5): 147-189.
- Wilson, M., 1989. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. Unwin Hymen, London, 466 pp.
- Yungul, S.H., 1996. Electrical methods in geophysics exploration of deep sedimentary basins. Springer, Las Vegas, 208 pp.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y. and Lee, H.Y., 2012. Zircon U–Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. Lithos. 154(1): 392–405.



## Determination of Mineralization Zones Using Interpretation of IP and RS Data in The Garmab Copper Deposit (South Khorasan province)

Mansour Adelpour<sup>1\*</sup>, Iraj Rasa<sup>2</sup>, Fariborz Masoudi<sup>2</sup> and Masoud Hosseini<sup>3</sup>

1) Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2) Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3) Zarnab Exploration Consultant Engineering, Tehran, Iran

Submitted: June 8, 2014

Accepted: Apr. 28, 2015

**Keywords:** *Induced polarization (IP), Resistivity, Smooth inverse modeling, Copper, Qaen*

### Introduction

The Garmab copper deposit is located northeast of Qaen (South Khorasan province) in the 1:100,000 scale map of Abiz in the eastern tectonic zone of Iran. It is hosted by Late Paleocene-Eocene lava flows consisting mainly of andesite, trachyandesite, andesite-basalt and basalt lavas, as well as pyroclastic rocks, including tuffs and ignimbrites. The Lut Block has undergone intense magmatic activity with a variety of geochemical characteristics due to changing tectonic conditions (e.g., compression during subduction followed by tensional conditions; Karimpour et al., 2012; Zarrinkoub et al., 2012). The Lut Block has a great potential for the discovery of new mineral deposits, like the Mahrabad and Khonik porphyry copper-gold deposits (Malekzadeh shafarodi, 2009), the Dehsalam porphyry copper deposit (Arjmandzadeh, 2011), high sulfidation epithermal gold deposits such as Chah Shalghami (Karimpour, 2005) and IOCG deposits such as Kuh-E-Zar and Qaleh Zari (Mazlomi et al., 2008).

### Materials and methods

After field studies of the Garmab area, 32 thin sections and 21 polished sections were prepared for petrological and mineralogical studies. In addition, 10 least-altered and fractured samples of volcanic rocks were selected for geochemical studies. Major oxides were determined using XRF analyses at the Zarazma laboratory. Induced polarization and resistivity geophysical data were collected and correlated with geological and alteration maps. The geophysical data were collected from 420 individual points, using a

dipole-dipole arrangement along five profiles separated 60m apart. This covered the study area entirely. After a change in the mineralization trend was observed, additional profiles were designed, two on bearings of 25° and three on 75°.

### Results

The Garmab volcanic rocks exhibit typical geochemical characteristics of subduction zone magmas including strong enrichment in LILE and depletion in HFSE. Based on the discrimination plot of Irvine and Baragar (1971), all samples belong to the calc-alkaline series, and based on the TAS diagram of Cox et al., 1979, the volcanic ore host rocks of Garmab range from andesite to basaltic andesite to trachyandesite.

Hydrothermal alteration, associated with deposition of copper sulfide mineralization, occurs mostly along the fault zones. Mineralization also occurs disseminated and as veinlets, restricted to uppermost parts of the volcanic sequences. The deposit has the form of a layer of supergene enrichment characterized principally by chalcocite as the main ore mineral accompanied by digenite, covellite, bornite and chalcopyrite.

The location of the anomalies has been determined from their medium chargeability and low to medium resistivity values. This can be attributed to the presence of sulfide minerals in the mineralized zones. The average sulfide mineral grain size was determined using the results of time constant parameter. Since the results of raw data do not indicate accurate information about the depth and geometry of mineralization, smooth

\*Corresponding authors Email: man.adelpour@yahoo.com

inverse modeling was applied to determine probable zones and vertical and horizontal extension of mineralization. Geophysical studies show that zones of mineralization are small and scattered.

#### Acknowledgements

This research was made possible by the help of the Zarnab exploration consultant engineers and Kani Kavan Samangan.

#### References

- Arjmandzadeh, R., 2011. Studies of mineralization, geochemistry and tectonic setting in the Dehsalam and Chahshlghmy mining indexes, Lut Block, East Iran. Ph.D. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 369 pp (in Persian with English abstract).
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.G., 1979. The interpretation of igneous rocks. George, Allen and Unwin, London, 449 pp.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the classification of the common volcanic rocks. *Journal of Earth Sciences*, 8 (2): 235-458.
- Karimpour, M.H., 2005. Quartz-alunite and quartz pitted alteration zones (high sulfidation) of the upper zone of porphyry copper systems in Chah Shalghami area, South Khorasan. 13th Congress of Crystallography and Mineralogy, Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh shafarodi, A., Farmer, L. and Stern, S., 2012. Petrogenesis of granitoids, age assessment method zircon U-Pb, Sr- Nd isotope geochemistry and mineralization Tertiary important event in the Lut Block, East Iran. *Journal of Economic Geology*, 1(4): 1-27 (in Persian with English abstract).
- Malekzadeh shafarodi, A., 2009. Geology, mineralization, alteration, geochemistry, interpretation of geophysical data, microthermometry, isotope studies and determination of the origin of the mineralization of Mahrabad and khonik, South Khorasan province. Ph.D. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 600 pp.
- Mazlomi, A. R., Karimpour, M.H., Rassa, I., Rahimi, B. and Vosoughi Abedini, M., 2008. Kuh-E-Zar Gold Deposit in Torbat-e-Heydaryeh New Model of Gold Mineralization. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 3(16): 364-376 (in Persian with English abstract)
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y. and Lee, H.Y., 2012. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*. 154(1): 392-405.