



مدل سازی هندسی میان بارهای سیال به منظور پیش بینی ویژگی های ریزدماسنجی (مطالعه موردی: کانسار سرب و روی مهدی آباد)

امین حسین مرشدی^{*}، سیدحسین مجتهدزاده و امیرحسین کوهساری

بخش اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹

چکیده

امروزه، روش های گوناگونی برای اکتشاف کانسارها و نهشته های معدنی مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از روش های در حال گسترش برای اکتشاف کانسارها، منابع زمین گرمایی و مخازن نفت و گاز، استفاده از میان بارهای سیال است. بررسی های مختلفی از قبیل سنجش دما، فشار، شوری و ویژگی و فازهای سیال های مختلف در زمینه میان بارهای سیال قابل انجام است. در این پژوهش، با استفاده از مدل سازی هندسی میان بارهای سیال، ویژگی های ریزدماسنجی آنها بررسی شده و اطلاعات مربوط به میان بار سیال از طریق نمودارهای فشار، دما و شوری استخراج شده است. یکی از مؤلفه هایی که در مطالعه میان بارهای سیال مورد بررسی قرار می گیرد، شکل و هندسه میان بار سیال است که فعالیت انجام شده در این زمینه به تخمین درجه پرشدگی میان بارهای سیال در حالت سه بعدی منجر شده است و می توان به کمک آن، بدون فعالیت های زمان بر و هزینه بر گرمایش و سرمایش، اطلاعاتی مفید در زمینه دما، فشار، میزان شوری و عمق تشکیل به دست آورد. در این پژوهش، کانسار سرب و روی مهدی آباد به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. پس از تهیه مقاطع دوبر صیقل مناسب برای بررسی میان بارهای سیال و عکس برداری به صورت دوبعدی از مقاطع، با اندازه گیری مساحت کل، حباب و لکه میان بار سیال و با محاسبه بعد سوم میان بار سیال، درجه پرشدگی به صورت دوبعدی و سه بعدی محاسبه شد. سپس با انتخاب مدل مناسب سه بعدی میان بار سیال بسته به هندسه آن (که از نوع شش ضلعی هرمی و بیضی گون بود)، درجه پرشدگی حالت دوبعدی (سطحی) به حالت سه بعدی (حجمی) تبدیل شد که نتایج مدل محاسباتی با خروجی های مدل هندسی دارای همخوانی بالایی بوده و نسبت درجه پرشدگی دوبعدی به سه بعدی، در مدل محاسباتی و هندسی به ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۷۷ است. در کانسار سرب و روی مهدی آباد، مدل سازی سه بعدی هندسی نمونه هایی از میان بارهای سیال مشخص کرد که میان بارهای سیال با درجه پرشدگی فاز گازی تقریبی ۲۵٪ و چگالی بین ۰/۶۵ تا ۰/۸ گرم بر سانتی متر مکعب، دارای دمای یکنواختی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ (دمای میانه ۱۵۰) درجه سانتی گراد، فشار بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ اتمسفر، دمای سازندگی بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد، شوری بین ۱۰ تا ۱۵ درصد معادل نمک طعام و عمق تشکیل بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر است که سازگاری مناسبی با نوع کانسارهای مشابه سرب و روی مهدی آباد دارد.

واژه های کلیدی: میان بار سیال، مدل سازی سه بعدی هندسی، درجه پرشدگی، ویژگی های ریزدماسنجی، کانسار سرب و روی مهدی آباد

مقدمه

در چند دهه اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه میان‌بارهای سیال به‌عنوان ابزاری کاربردی در جهت اکتشاف و شناسایی کانی‌سازی‌های گرمایی، منابع زمین‌گرمایی و مخازن هیدروکربوری صورت گرفته است. هم‌زمان با رشد بلور، به‌دلیل وجود ناهمسان‌گردی در رشد آنها، فضایی در سطوح رشد بلور ایجاد شده است و یا در ضمن رشد، درزه‌هایی در بلور ایجاد می‌شود که محلول‌های گرمایی می‌توانند در آنها محبوس شوند (Roedder and Bodnar, 1997; Garofalo et al., 2014). با توجه به اینکه این سیالات به‌عنوان نمونه‌ای از محلول‌های گرمایی فعال در هنگام تشکیل بلور هستند، بررسی آنها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به‌شناخت پدیده‌های زمین‌شناسی گذشته کمک کند. از روش یادشده برای تعیین دما، فشار و شوری سیال‌های مخازن نفتی و منابع معدنی در زمان تشکیل استفاده می‌شود (Bodnar et al., 1985; Moon, 1991; Kelly et al., 2000; Hall et al., 2002; Dilley et al., 2004; Becker et al., 2010; Moncada et al., 2012; Adeli et al., 2015; Wilkinson, 2017). به‌طور معمول، بررسی میان‌بارهای سیال بر روی مقاطع دوبرصیقل با کنترل‌کننده حرارتی و با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام می‌شود که بررسی‌های ریزدماسنجی شامل دو بخش گرم کردن و سرد کردن است. در مرحله اول، دمای همگن شدن یا دمای کانه‌سازی تعیین می‌شود. در این مرحله، میان‌بار سیال آن‌قدر حرارت داده می‌شود تا همه فازهای آن به یک فاز اصلی همگن شود و به آن دمای همگن شدن گفته می‌شود. در آزمایش انجماد، میان‌بار سیال سرد می‌شود تا فاز مایع آن به فاز جامد تبدیل شود. پس از آن، دوباره نمونه گرم می‌شود تا جایی که آخرین بلور یخ ذوب شود. دمایی که در آن آخرین بلور یخ ذوب می‌شود، به دمای ذوب آخرین قطعه یخ معروف است و با استفاده از این دما، می‌توان به میزان شوری سیال پی‌برد (Roedder, 1984a; Shepherd et al., 1985).

با توجه به‌زمان‌بر و هزینه‌بر بودن روش‌های رایج بررسی میان‌بارهای سیال، می‌توان از هندسه و شکل میان‌بارهای سیال

استفاده و تغییرات مؤلفه‌های مختلف میان‌بارهای سیال را بررسی کرد. میان‌بارهای سیال بر اساس نحوه تشکیل و به‌تله افتادن، شکل قرارگیری، نوع فاز و مواد تشکیل‌دهنده دارای شکل‌ها و منطقه‌بندی‌های متفاوتی هستند (Roedder, 1984b; Kesler et al. 1986; Moncada et al., 2012; Steele-MacInnis et al., 2015). امروزه بررسی‌های گوناگونی در زمینه شکل‌های میان‌بارهای سیال انجام شده است (Anderson and Bodnar, 1993; Bakker and Larryn, 2006). یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌هایی که توسط شکل میان‌بارهای سیال قابل اندازه‌گیری و مشاهده است، درجه پرشدگی بوده که بسته به‌نوع کاربرد درجه پرشدگی، گاه برحسب مایع یا برحسب گاز بیان می‌شود. نسبت درجه پرشدگی برای هر فاز، به‌صورت نسبت حجم فاز مورد نظر به‌حجم کل میان‌بار سیال بیان می‌شود (Bakker, 2003; Bakker and Larryn, 2006; Stoller et al., 2007).

هدف این پژوهش، ارائه روشی سریع و کم‌هزینه برای بررسی مقدماتی مؤلفه‌های ریزدماسنجی میان‌بار سیال است. در راستای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نمونه‌های کانسار سرب و روی مهدی‌آباد مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، مدل‌سازی هندسی میان‌بارهای سیال کانسار سرب و روی مهدی‌آباد با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی سیلندری، مخروطی، ناقص، مکعب مستطیل، شش ضلعی هرمی (هگزاگونال پیرامید) و بیضی‌گون انجام شده و درجه پرشدگی حالت دوبعدی محاسبه و با توجه به‌نوع مدل هندسی و تعیین سطوح مختلف میان‌بار سیال، درجه پرشدگی درحالت سه‌بعدی تعیین شده است. از مساحت کل و لکه میان‌بار، ضخامت و درجه پرشدگی سه‌بعدی اعتبارسنجی می‌شود. در نهایت، مدل‌های سه‌بعدی بر اساس منحنی‌های استاندارد دوبعدی ترسیم شده است که محاسبه یک مؤلفه مجهول بر اساس دو مؤلفه معلوم امکان‌پذیر می‌شود. با استفاده چهار نمودار سه‌بعدی، مؤلفه‌های فشار، دما، میزان شوری، دمای یکنواختی و عمق تشکیل میان‌بار سیال محاسبه می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

کانسار سرب و روی مهدی آباد، در محدوده ایران مرکزی و در فاصله ۱۱۰ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان یزد قرار گرفته است. راه ارتباطی این روستا از جاده اصلی یزد- کرمان به فاصله ۸۰ کیلومتری یزد انشعاب یافته و نزدیک ترین آبادی به فاصله ۱۵ کیلومتری کانسار، روستای مهدی آباد بهادران است. تاکنون بیش از ۲۸۵ کانسار سرب و روی با سنگ میزبان کربناته^۱ در ایران شناسایی شده است (Rajabi et al., 2012) که کانسار سرب و روی مهدی آباد به عنوان یک نمونه برجسته کانی سازی سرب و روی در رده جهانی شناخته شده است (Ghasemi et al., 2009). در شکل ۱، توزیع کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته بر اساس سن سنگ میزبان در دو کمربند فلززایی ملایر- اصفهان (پهنه سنج- سیرجان) و یزد- انارک (پهنه ایران مرکزی) ارائه شده و موقعیت کانسار مهدی آباد بر روی نقشه ساختاری ایران نمایش داده شده است.

واحدهای سنگی موجود در منطقه به سه سازند سنگستان، نفت و آبکوه متعلق به دوره کرتاسه تعلق دارند که کانی سازی سرب و روی در سازند تفت و قاعده سازند آبکوه رخ داده است (Ghasemi, 2007). ساختمان منطقه به صورت ناودیدی باز بوده که محور آن به سمت جنوب میل داشته و قسمت غربی آن توسط یک گسل رشدی فعال (هم زمان با رسوب گذاری و پس از آن) موسوم به گسل تپه سیاه قطع شده است. کانی سازی به طور مشخص در شرق این گسل اتفاق افتاده است. بر اساس ساخت و بافت کانه و نیز مشخصات کانی شناسی، بخش های مختلفی در کانسار مهدی آباد قابل تشخیص است (Chapple, 2003). بررسی های اکتشافی در دو دهه اخیر، بیانگر یک ذخیره اقتصادی عظیم با ذخیره زمین شناسی ۲۱۸ میلیون تن با عیار متوسط ۷/۲ درصد روی و ۲/۳ درصد سرب است (Maghfouri et al., 2018). در ادامه بخش های مهم آن معرفی می شوند.

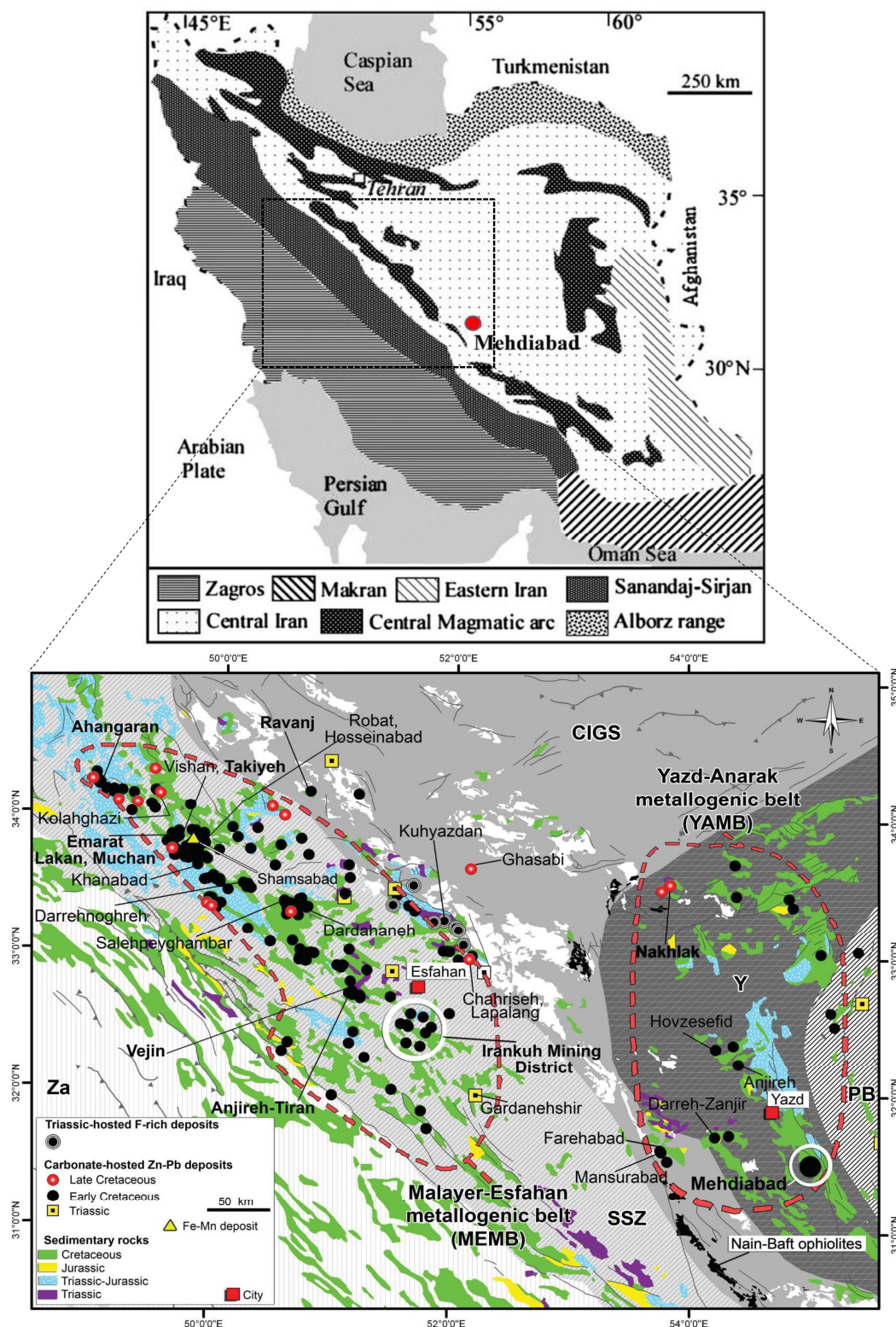
پهنه سولفیدی پوشیده در زیر دشت آبرفتی: دو بخش متفاوت در این قسمت قابل تشخیص است.

الف) سولفیدی شرقی: به طور عمده از اسفالریت و گالن ریزدانه تشکیل شده است و تقریباً بدون باریت و کانی های مس است و دارای ساختمان موازی لایه بندی بوده و در قسمت های زیرین سازند تفت تشکیل شده و دارای ضخامت بین ۲۰ تا ۴۰ متر است. **ب) پهنه سولفیدی غربی:** علاوه بر اسفالریت و گالن، مقدار قابل توجهی باریت و همچنین کمی کالکوپریت نیز در این قسمت دیده می شود که به صورت استوک و رک، رگه و رگچه ای در ضخامت بیش از ۱۰۰ متر در سازند تفت قابل مشاهده است. این کانی سازی تا گسل تپه سیاه ادامه داشته و در قسمت های سطحی تر تبدیل به زون اکسیده موسوم به گوسان تپه سیاه می شود. در نزدیکی گسل و در قسمت های عمیق تر به مقدار کانی کالکوپریت افزوده می شود؛ به طوری که رگچه هایی فقط شامل کالکوپریت و پیریت قابل مشاهده است.

پهنه اکسیده شرقی: به صورت لایه ای بالای سازند سنگستان و قاعده سازند تفت رخنمون داشته و با ضخامت متوسط حدود ۱۰ متر، بیش از ۲ کیلومتر ادامه دارد. این زون اغلب از کربنات ها و سیلیکات های روی و اکسیدهای مختلف آهن و منگنز تشکیل شده است و به نظر می رسد به طور جانبی به زون سولفیدی شرقی متصل باشد.

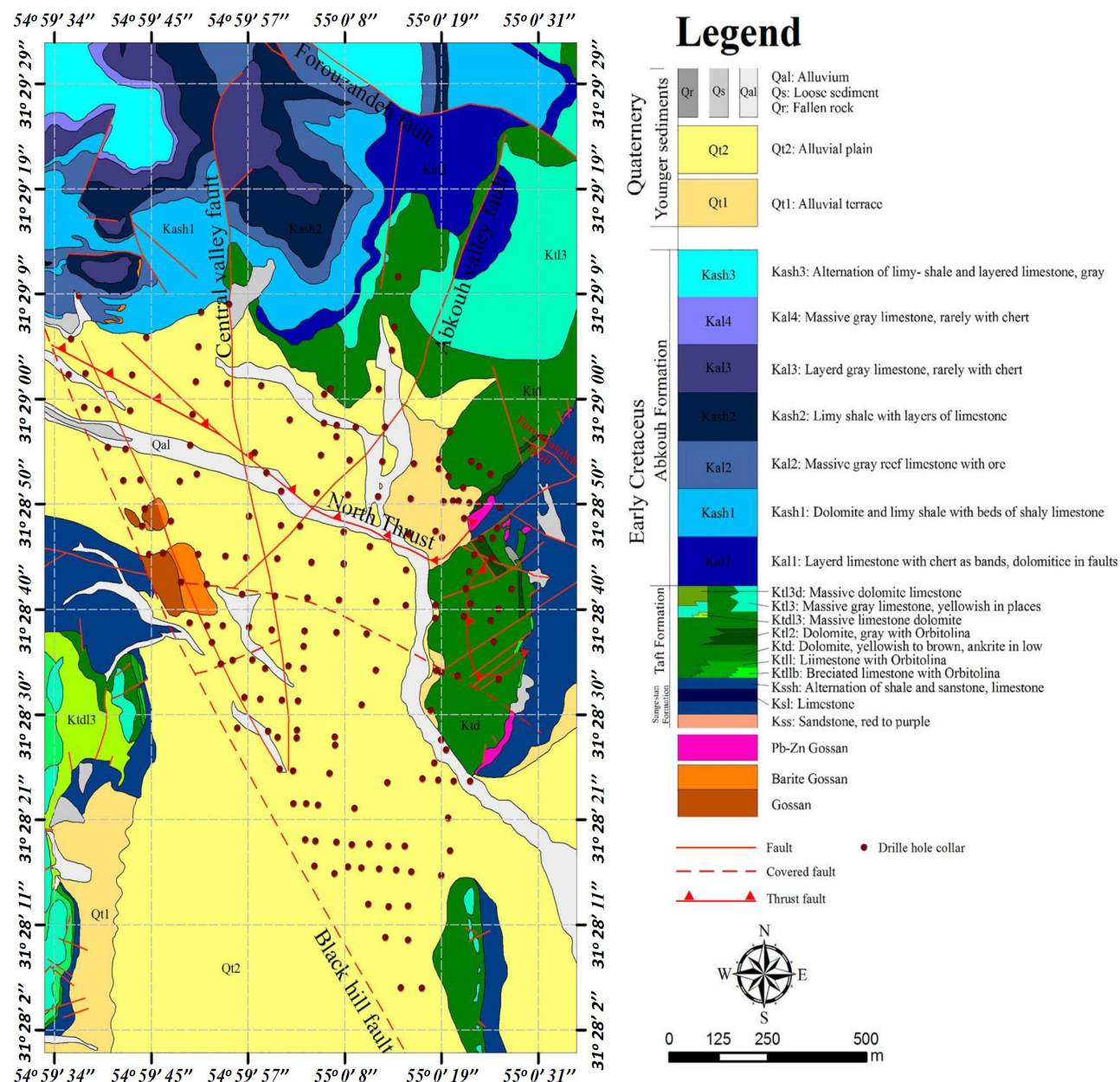
تپه های سیاه: رخنمون سطحی آنها به صورت سه تپه سیاه دیده می شود که به موازات گسل تپه سیاه کشیده شده و در عمق گسترش قابل توجهی دارد. به نظر می رسد که این قسمت، بخش گوسان بالایی پهنه سولفیدی غربی باشد.

بخش کالامین: این قسمت، به صورت سه عدسی اکسیده و به موازات لایه بندی است که در سازند آبکوه تشکیل شده است و در ارتفاعات شمالی معدن رخنمون دارد. این بخش، دارای عیار قابل توجهی از کانه کربناته و سیلیکاته روی به همراه اکسیدهای مختلف آهن است. آثاری از کانی سولفیدی اولیه در این بخش در قاعده عدسی اول قابل مشاهده است. در شکل ۲، نقشه زمین شناسی محدوده کانسار مهدی آباد و موقعیت گمانه های حفر شده نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت کانسار سرب و روی مهدی‌آباد بر روی نقشه ساختاری ایران و توزیع کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته بر روی کمر بند فلزایی یزد-انارک (Rajabi et al., 2012)

Fig. 1. The location of Mehdiabad Pb-Zn deposit on the structural map of Iran and the distribution of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Yazd-Anarak metallogenic belt (Rajabi et al., 2012)



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده مهدی آباد و موقعیت گمانه های حفر شده بر روی آن (Hosseini et al., 2017)

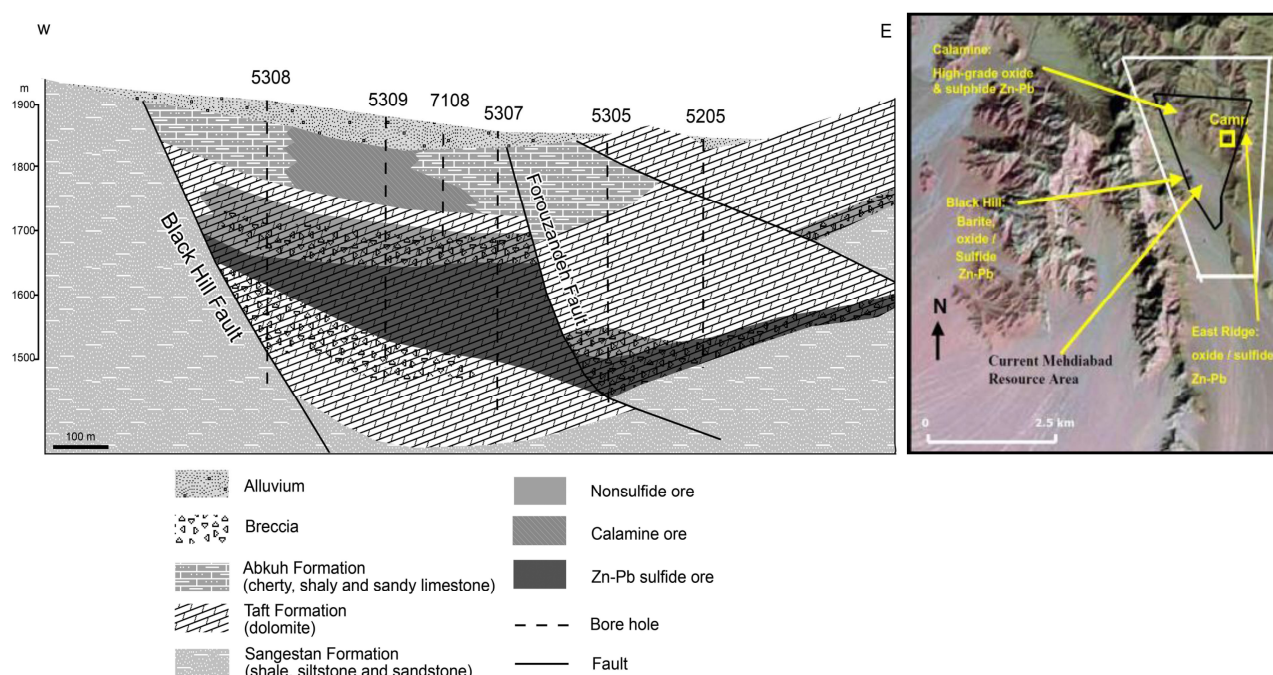
Fig. 2. The geologic map of the Mehdiabad area and drill-hole locations. (Hosseini et al., 2017)

است. کانی سازی احتمالاً در دوره ای طولانی، به دنبال ایجاد فازی کششی در حوضه رسوبی و ورود محلول های گرم تر به حوضه ادامه داشته و با ساختار لایه ای اغلب به این صورت و هم زمان با رسوب گذاری تشکیل شده اند. هم زمان با بسته شدن حوضه و هم زمان و کمی متعاقب مرحله دیاژنز، محلول های گرمابی، حاوی کانی های مس، اغلب در اطراف گسل تپه سیاه،

با وجود تفاوت در شکل و ماهیت کانی سازی در بخش های مختلف کانسار مهدی آباد، به نظر می رسد که بخش های مختلف این کانسار، دارای روند و توالی تشکیل به هم پیوسته است. با وجودی که در بررسی های اولیه این کانسار از نوع دره می سی سی پی ارزیابی شده بود؛ ولی بررسی های دقیق تر نشان می دهد که این کانسار احتمالاً از نوع سدکس و یا ایرلندی

روی مهدی‌آباد نشان‌دهنده این است که کانه‌زایی غیرسولفیدی بر روی منطقه کانه‌زایی سولفیدی قرار گرفته است و سنگ‌های رسوبی دربرگیرنده که برشی شده‌اند، محدوده سولفیدی را احاطه کرده‌اند (Rajabi et al., 2012).

به‌درون رگه و رگچه نفوذ کرده‌اند (Maghfouri et al., 2018). در این پژوهش، نمونه‌هایی از قسمت سولفیدی غربی کانسار مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳، بخش‌های مختلف کانه‌زایی سرب و روی مهدی‌آباد نمایش داده شده است و مقطعی از کانسنگ سرب و



شکل ۳. نمایش نحوه قرارگیری بخش‌های مختلف کانی‌سازی و مقطعی از کانسار سرب و روی مهدی‌آباد (Rajabi et al., 2012)

Fig. 3. The locations of the different mineralized zone and the schematic cross section of the Mehdiabad deposit (Rajabi et al., 2012)

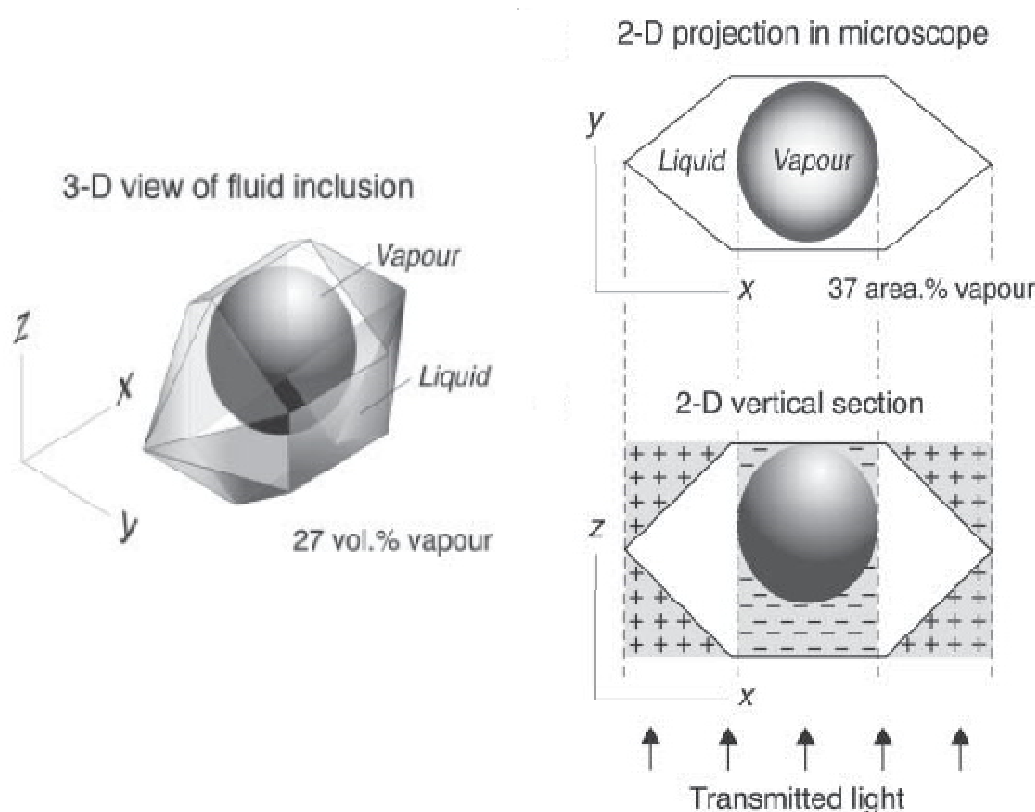
شوری، دمای یکنواختی و عمق تشکیل به‌دست آورد (Bakker, 2003; Garofalo et al., 2014; Zarasvandi et al., 2015; Tale Fazel et al., 2017). زمین‌شناسان، مدل‌های هندسی میان‌بار سیال را بر اساس شکل و میزان درجه پرشدگی ارائه داده‌اند (Bakker and Larryn, 2006; Stoller et al., 2007). مدل‌سازی سه‌بعدی نسبت به مدل‌سازی دوبعدی به‌طور قطع دارای دقت بالاتری است. با بررسی مقاطع تهیه‌شده از میان‌بار سیال در یک راستای مشخص می‌توان مدلی دوبعدی از میان‌بار سیال ارائه‌داد که دارای خطای بیشتری نسبت به مدل سه‌بعدی است. در صورت رفع این نقیصه

مدل‌سازی سه‌بعدی شکل میان‌بارهای سیال

در بررسی ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال، مؤلفه‌های فشار، دما، حجم، شوری و دیگر اطلاعات موردنیاز در مورد میان‌بارهای سیال قابل بررسی است که در بخش قبلی، روش‌های متعارف بررسی آن بیان شد (Andersen et al., 2001; Chi et al., 2002). از دیگر مؤلفه‌های مورد توجه در این زمینه، شکل و هندسه میان‌بارهای سیال است. در مرحله اول، با استفاده از شکل میان‌بار سیال می‌توان درجه پرشدگی میان‌بارهای سیال را محاسبه کرده و به‌دنبال آن، بدون انجام فعالیت‌های زمان‌بر و هزینه‌بر گرمایش و سرمایش، اطلاعات مفیدی در زمینه میزان

قسمت های اطراف حباب گاز به صورت یک دایره مشاهده می شود؛ در حالی که قسمتی از آن فضا، متعلق به مایع است که با علامت (-) در مقطع عمودی دوبعدی مشخص شده است. در قسمتی از فضای مرتبط با فضای مایع، حجم کاذبی از مایع قابل مشاهده است که باید تصحیح شود و با علامت (+) مشخص شده است (شکل ۴).

با مدل سازی به کمک مدل های دوبعدی حاصله از بررسی چند مقطع، می توان نتیجه را به کل میان بار سیال تعمیم داد. در شکل ۴، نمونه سه بعدی شش ضلعی هرمی نشان داده شده است که ۲۷ درصد از فضای آن توسط گاز پر شده است. بدین منظور باید علت خطا و تفاوت در این دو مدل (دوبعدی و سه بعدی) را مورد بررسی قرار داد. در هنگام عبور نور از مقطع، تمام



شکل ۴. مدل سازی سه بعدی میان بار سیال شامل دو فاز بخار و مایع و مقاطع دوبعدی در دو راستای مختلف (Bakker and Larryn, 2006)

Fig. 4. 3D model of fluid inclusion, including vapor and liquid phases and its 2D sections in two different directions (Bakker and Larryn, 2006)

ناقص، مکعب مستطیل، شش ضلعی هرمی و بیضی گون است (Bakker and Larryn, 2006) که در ادامه، به تفصیل بیان شده است.

مدل سیلندری میان بار سیال

مدل میان بار سیال با شکل سیلندر (کپسول) است و در سه مقطع

بنابراین درجه پرشدگی از گاز در میان بارهای سیال به شکل آن، محور تابش نور و نحوه مشاهده مقطع بستگی دارد. در این پژوهش، الگوریتمی به منظور مدل سازی هندسی سه بعدی ارائه شده که نخست به معرفی مدل های مختلف از میان بارهای سیال و بررسی درجه پرشدگی آنها در مدل دوبعدی و سه بعدی پرداخته شده است. این مدل ها عبارت از سیلندری، مخروطی

(۲)

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 20 \rightarrow F_A = -0.0268F_V^2 + 3.9043F_V \\ 20 \leq F_V \leq 70 \rightarrow F_A = 80 \\ 70 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = -0.026F_V^2 + 5.1324F_V - 154.5 \end{array} \right\} \rightarrow a$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 70 \rightarrow F_A = -0.0101F_V^2 + 1.8364F_V \\ 70 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = -0.0057F_V^2 + 1.5794F_V - 0.2429 \end{array} \right\} \rightarrow b$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 70 \rightarrow F_A = -0.0024F_V^2 + 1.09954F_V \\ 70 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = 0.0446F_V^2 - 6.547F_V + 307.72 \end{array} \right\} \rightarrow c$$

مدل مخروط ناقص میان‌بار سیال

مدل میان‌بار سیال با شکل مخروط ناقص دارای دو مقطع a و b است. در مقطع a ، تغییرات دو مدل حجمی و سطحی به سه منطقه تقسیم می‌شود: در منطقه اول، در برابر تغییرات زیاد مدل دوبعدی، درجه پرشدگی مقدار کمی در مدل سه‌بعدی تغییر می‌کند. در منطقه دوم در برابر درجه پرشدگی سطحی 80° درصد، میزان درجه پرشدگی حجمی بین 25° تا 80° درصد متغیر است و در منطقه سوم درجه پرشدگی به‌صورت صعودی افزایش می‌یابد. در مقطع b ، نسبت درجه پرشدگی در دو مدل دارای همخوانی نسبتاً بالایی است که به دو زون تقسیم می‌شود؛ به‌طوری‌که در مدل b شیب خط تقریباً 45° درجه است، یعنی میزان پرشدگی در مدل دوبعدی قابل تعمیم به مدل سه‌بعدی است (شکل ۵-C). بنابراین برای میان‌بارهای سیال با شکل مخروط ناقص، می‌توان یک تابع برای متغیرهای درجه پرشدگی دوبعدی F_A نسبت به درجه پرشدگی سه‌بعدی F_V تعریف کرد.

(۳)

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 35 \rightarrow F_A = -0.0384F_V^2 + 3.603F_V \\ 35 \leq F_V \leq 85 \rightarrow F_A = 80 \\ 85 < F_V < 100 \rightarrow F_A = 0.0357F_V^2 - 5.5011F_V + 262.62 \end{array} \right\} \rightarrow a$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 85 \rightarrow F_A = -0.006F_V^2 + 1.2662F_V \\ 85 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = -0.2915F_V^2 - 51.605F_V + 2340.1 \end{array} \right\} \rightarrow b$$

مدل شش‌ضلعی هرمی میان‌بار سیال

مدل میان‌بار سیال با شکل شش‌ضلعی هرمی در سه حالت a ، b و s قابل بررسی است. در مقطع a ، تغییرات دو مدل حجمی و

a ، b و s زیر میکروسکوپ قابل مشاهده است. تغییرات مدل سیلندری میان‌بار سیال در مقطع a ، به دو منطقه تقسیم می‌شود: در منطقه اول، در برابر تغییرات زیاد مدل دوبعدی، درجه پرشدگی سه‌بعدی تغییر اندکی را نشان می‌دهد و در منطقه دوم در برابر درجه پرشدگی سطحی 90° تا 100° درصد، میزان درجه پرشدگی حجمی بین 25° تا 100° درصد متغیر است (شکل ۵-A). بنابراین برای میان‌بارهای سیال با شکل سیلندری می‌توان یک تابع برای متغیرهای درجه پرشدگی دوبعدی F_A نسبت به درجه پرشدگی سه‌بعدی F_V تعریف کرد.

(۱)

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 25 \rightarrow F_A = -0.1082F_V^2 + 6.5124F_V \\ F_V = 25 \rightarrow F_A = 95 \\ 25 < F_V < 100 \rightarrow F_A = 98 \end{array} \right\} \rightarrow a$$

$$0 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = -0.02F_V^2 + 1.147F_V \rightarrow b$$

$$0 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = -0.0072F_V^2 + 1.6782F_V \rightarrow s$$

مدل مکعب مستطیل میان‌بار سیال

مدل میان‌بار سیال با شکل مکعب مستطیل در سه مقطع a ، b و s قابل مشاهده است. در مقطع a ، تغییرات دو مدل به سه منطقه تقسیم می‌شود: در منطقه اول، در برابر تغییرات زیاد درجه پرشدگی در مدل دوبعدی، درجه پرشدگی سه‌بعدی مقدار کمی تغییر می‌کند و در منطقه دوم، در برابر پرشدگی سطحی 80° درصد، میزان پرشدگی حجمی بین 25° تا 80° درصد تغییر می‌کند. در منطقه سوم، درجه پرشدگی به‌صورت صعودی افزایش می‌یابد. در مقاطع b و c نسبت پرشدگی در دو مدل دوبعدی و سه‌بعدی دارای همخوانی نسبتاً بالایی است که هر کدام به دو زون تقسیم می‌شود؛ به‌طوری‌که در مدل c ، شیب خط حالت دوبعدی به‌حالت سه‌بعدی تقریباً 45° درجه است، یعنی میزان پرشدگی در مدل دو بعدی قابل تعمیم به‌مدل سه‌بعدی است (شکل ۵-B). بنابراین برای میان‌بارهای سیال با شکل مکعب مستطیل می‌توان یک تابع برای متغیرهای درجه پرشدگی دوبعدی F_A نسبت به درجه پرشدگی سه‌بعدی F_V تعریف کرد.

است (Hossein Morshedy et al., 2008).

(۵)

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 20 \rightarrow F_A = -0.039F_V^2 + 3.7259F_V \\ 20 \leq F_V \leq 80 \rightarrow F_A = 60 \\ 80 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = 0.0731F_V^2 - 11.391F_V + 506.85 \end{array} \right\} \rightarrow a$$

$$F_A = -0.0033F_V^2 - 1.2437F_V \rightarrow b$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 80 \rightarrow F_A = -0.0046F_V^2 + 1.2F_V \\ 80 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = 0.0915F_V^2 - 15.496F_V + 730.15 \end{array} \right\} \rightarrow c$$

نمونه برداری از محیط های تشکیل دهنده میان بار

سیال

میان بارهای سیال در کانی های مختلفی یافت می شوند. از جمله مهم ترین آنها که برای مشاهده و بررسی مورد استفاده قرار می گیرند شامل کوارتز، فلوریت، نمک طعام، کلسیت، آپاتیت، دولومیت، اسفالریت، باریت، توپاز و کاستریت است (Roedder, 1984b; Bakker and Elburg 2006; Karimpour et al., 2017). در کانسار سرب و روی مهدی آباد، بلورها و رگه های کوارتز موارد مستعدی برای بررسی میان بارهای سیال است. همچنین می توان بلورهای شفاف اسفالریت را برای بررسی هرچه بهتر دمای میان بارهای سیال پیشنهاد داد. نمونه های گرفته شده برای انجام این پژوهش از بخش های عمیق گمانه با کد ۵۳۱۰ با عمق تقریبی ۴۵۰ متری و از بخش سولفیدی غربی و نزدیک گسل تپه سیاه برداشت شده است. با توجه به آنچه گفته شد، می توان انتظار داشت که محلول های گرمابی فعال در زمان تشکیل کانسار در این قسمت نسبت به زمان و بخش های دیگر دارای دمای بیشتری بوده اند. سپس از میان بارهای سیال مقاطع تهیه و از آنها در زیر میکروسکوپ با بزرگ نمایی ۴۰۰ عکس برداری شد.

بررسی های پتروگرافی میان بارهای سیال در کانسار مهدی آباد بر روی کانی های کوارتز، باریت، کلسیت و اسفالریت نشان می دهد که از لحاظ شکل ظاهری میان بارهای سیال را می توان به ترتیب فراوانی به صورت شکل های نامنظم، کشیده و کروی تقسیم بندی کرد. ابعاد میان بارهای سیال، بسیار کوچک تا

سطحی به سه منطقه تقسیم می شود: در منطقه اول، در برابر تغییرات زیاد درجه پرشدگی در مدل دوبعدی، مقدار اندکی در مدل سه بعدی تغییر ایجاد می شود. در منطقه دوم، در برابر پرشدگی سطحی ۹۰ درصد، میزان حجم پرشدگی بین ۲۵ تا ۸۰ درصد متغیر است و در منطقه سوم درجه پرشدگی به صورت صعودی افزایش می یابد. در مقاطع b و c، درجه پرشدگی در دو مدل دارای همخوانی نسبتاً بالایی است که به دو زون تقسیم می شود؛ به طوری که در مدل b شیب خط تقریباً برابر یک است، یعنی میزان پرشدگی در مدل دوبعدی قابل تعمیم حالت سه بعدی است. این شکل قابلیت تعمیم نسبت به دیگر شکل ها را دارد (شکل ۵-D). منطقه سه در هریک از مدل ها در واقعیت به ندرت یافت می شود.

(۴)

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 20 \rightarrow F_A = 4.1432F_V \\ 20 \leq F_V \leq 90 \rightarrow F_A = 90 \\ 90 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = 0.1022F_V^2 - 18.282F_V + 906.14 \end{array} \right\} \rightarrow a$$

$$F_A = -0.003F_V^2 - 1.2049F_V \rightarrow b$$

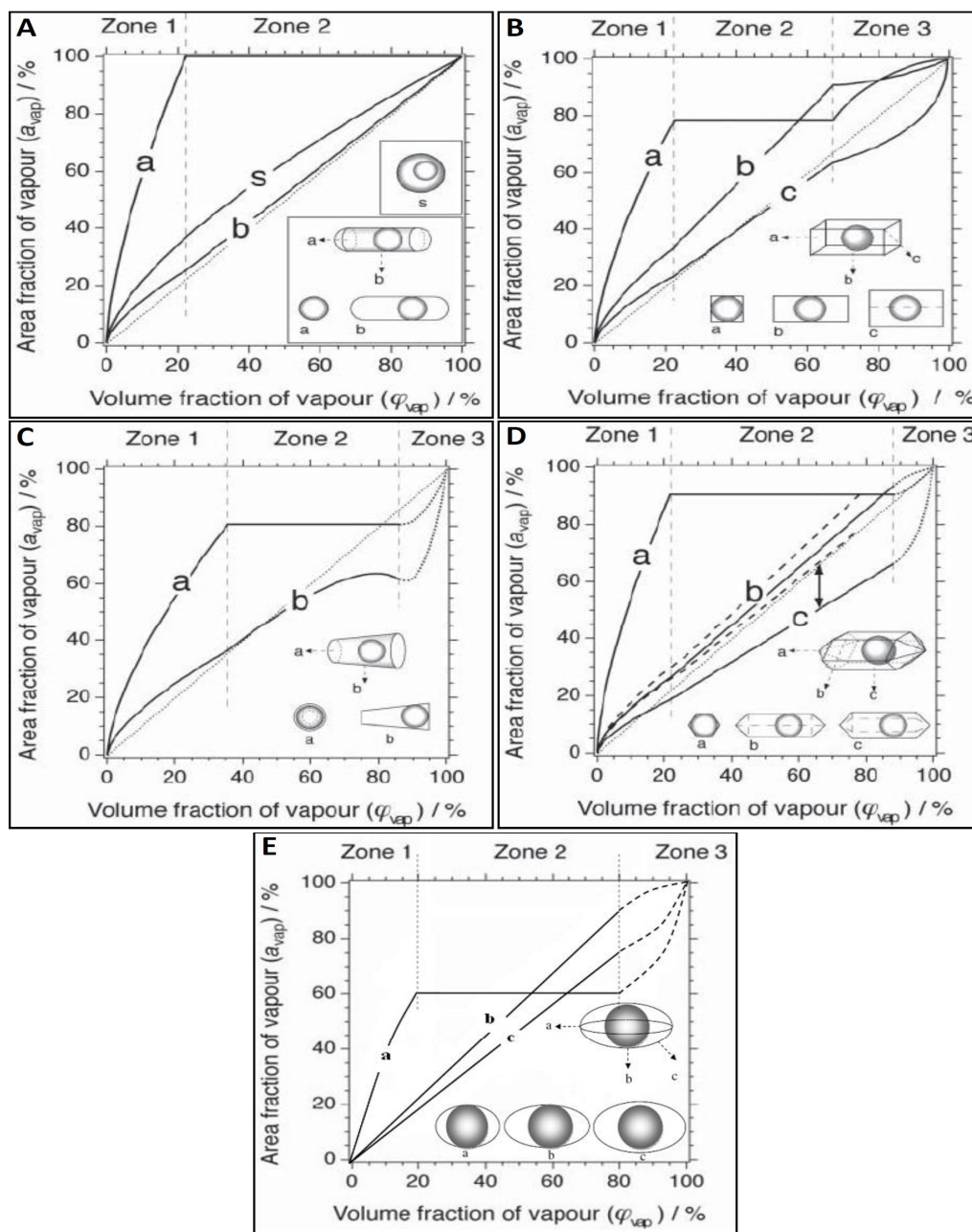
$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq F_V < 90 \rightarrow F_A = -0.0071F_V^2 + 1.3072F_V \\ 90 \leq F_V < 100 \rightarrow F_A = 0.2915F_V^2 - 51.605F_V + 2340.1 \end{array} \right\} \rightarrow c$$

مدل بیضی گون میان بار سیال

مدل میان بار سیال با شکل بیضی گون در سه حالت a، b و c قابل بررسی است که در شکل ۵-E نمایش داده شده است. در مقطع a، تغییرات دو مدل حجمی و سطحی به سه منطقه تقسیم می شود: در منطقه اول، در برابر تغییرات زیاد مدل دوبعدی درجه پرشدگی مقدار اندکی در مدل سه بعدی تغییر ایجاد می شود و در منطقه دوم در برابر درجه پرشدگی سطحی ۶۰ درصد، میزان حجم پرشدگی بین ۲۰ تا ۸۰ درصد متغیر است و در منطقه سوم درجه پرشدگی به صورت صعودی افزایش می یابد. در مقاطع b و c نسبت پرشدگی در دو مدل دارای همخوانی نسبتاً بالایی است که به دو زون تقسیم می شود؛ به طوری که در مدل b راستای خط تقریباً ۴۵ درجه است یعنی میزان پرشدگی در مدل دوبعدی قابل تعمیم به حالت سه بعدی

آب است. در بین فازهای یادشده، فاز میان‌بارهای سیال دو فاز مایع-گاز از فراوانی بیشتر و ابعاد بزرگ‌تری برخوردار هستند (Ebrahim-Mohseni, 2011).

کوچک و بین ۳ تا ۸ میکرون برآورد شده است. میان‌بارهای سیال در چهار نوع مشاهده شده‌اند، ۱- دو فاز مایع-گاز، ۲- دو فاز مایع-مایع، ۳- تک فاز مایع و ۴- تک فاز گاز قابل مشاهده هستند که فازهای مایع شامل کربن‌دی‌اکسید مایع و



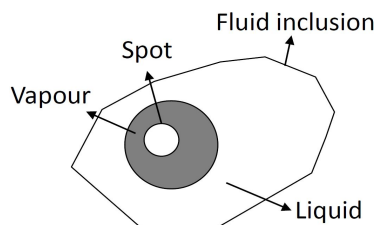
شکل ۵. نسبت درجه پرشدگی سطح و حجم میان‌بار سیال در مدل‌های A: سیلندری، B: مکعب مستطیلی، C: مخروط ناقص، D: شش‌ضلعی هرمی و E: بیضی‌گون (Bakker and Larryn, 2006; Hossein Morshedy et al., 2008)

Fig. 5. Volume and area fill fraction of fluid inclusion in the various models; A: cylinder, B: tetragonal prism, C: truncated cone, D: hexagonal, and E: ellipsoid (Bakker and Larryn, 2006; Hossein Morshedy et al., 2008)

روش مطالعه و مدل سازی شکل های هندسی

میان بارهای سیال

در بخش های قبلی، اساس رویکرد مدل سازی سه بعدی هندسی میان بارهای سیال مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد اصلی این مقاله، مدل سازی سه بعدی میان بارها بر اساس مقاطع و تصاویر دوبعدی قرار گرفته که در ادامه مراحل این الگوریتم توضیح داده شده است. پس از عکس برداری از مقاطع، تصاویر در محیط نرم افزار AutoCAD وارد شده است و مرزهای میان بارهای سیال اولیه و حباب داخل آن ترسیم می شود و در گام بعد محدودده تصویر لکه سفید در داخل حباب هوا تعیین می شود



شکل ۶. قسمت های مختلف میان بار سیال

Fig. 6. Different studied part of fluid inclusion in the various

گفته شد، در این پژوهش، سه مقطع از رگه های کوارتز و از قسمت عمیق بخش سولفیدی غربی کانسار مهدی آباد مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه نتیجه بررسی آنها جداگانه ذکر می شود. در بررسی مقطع اول، تعداد ۴ میان بار سیال با شکل های متفاوت قابل مشاهده است که همگی مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۸). در شکل ۸ و جدول ۱، هندسه و سطوح بخش های مختلف میان بارهای سیال نمایش داده شده است.

در مرحله بعد، با استفاده از تعیین سطح هر قسمت از میان بار سیال، درجه پرشدگی سطحی گاز (نسبت سطح گاز به سطح کل میان بار سیال) را محاسبه کرده و مساحت قسمت های مختلف (بر حسب میکرومتر مربع) و حجم (بر حسب میکرومتر مکعب) به دست آمد که نتایج تحلیل شکل ۸، در جدول ۱ نشان داده شده است. واضح است که مجموع درجه پرشدگی فاز گازی و مایع برابر ۱۰۰ درصد است.

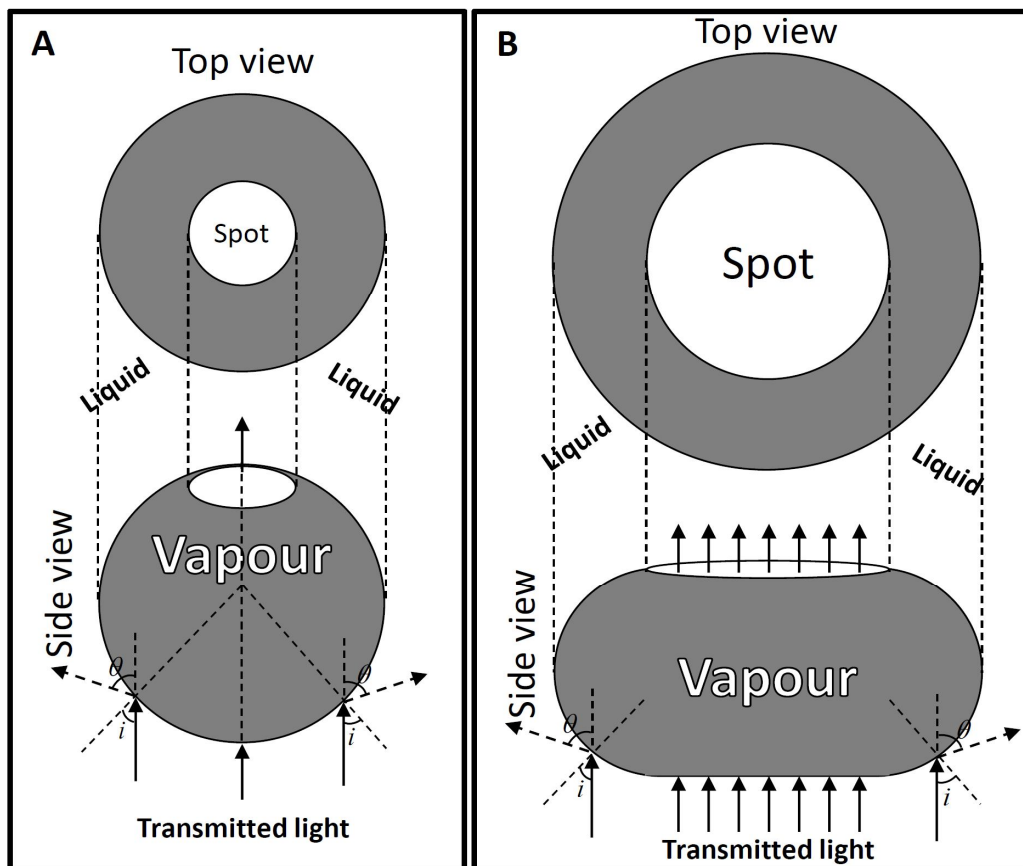
در بررسی حباب گاز، هرچه مساحت لکه بیشتر باشد، بعد سوم یا عمق حباب گاز کمتر است؛ زیرا میان بار سیال با عمق کم، نور بیشتری را از خود عبور می دهد. در مقابل، حباب گاز کروی شکل دارای عمق بیشتری است؛ زیرا دارای کمترین میزان مساحت لکه است که به صورت دو حالت مجزا در شکل ۷ قابل نمایش است. در شکل ۷-A و B، نحوه عبور نور از حباب های کروی و پهن و لکه های ایجاد شده، نشان داده شده است.

در نمونه مشابه از نظر قطر برابر، هرچه مساحت لکه بیشتر باشد، دارای عمق کمتری است و از رابطه زیر برای به دست آوردن عمق تقریبی (بعد سوم میان بار سیال) استفاده می شود:

(۶)

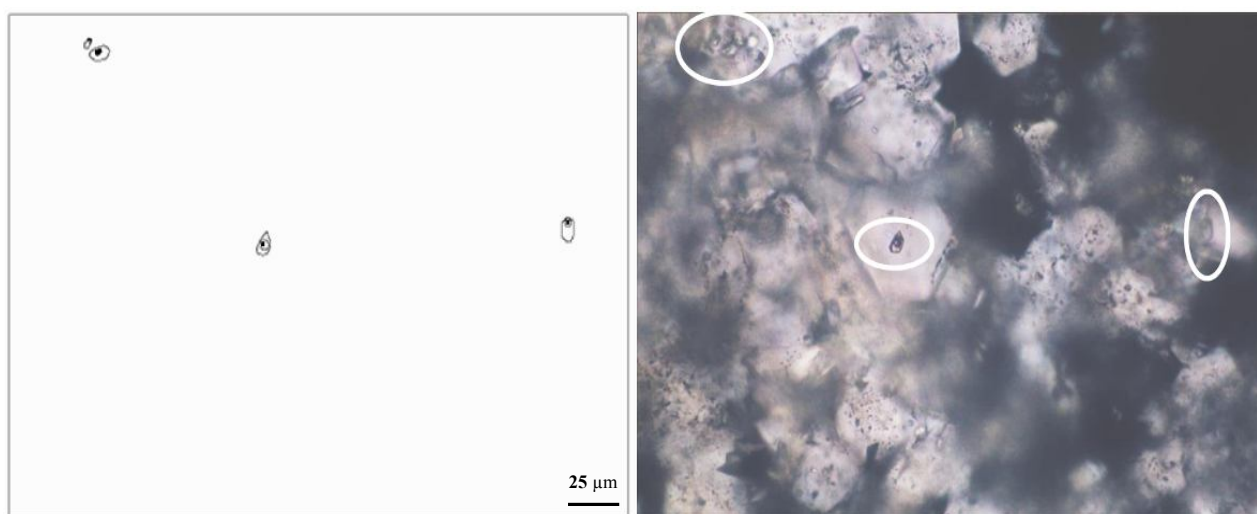
$$h \cong 2 \left(\frac{\sqrt{S_t} - \sqrt{S_{\text{stain}}}}{\sqrt{\pi}} \right)$$

در رابطه بالا S_t ، مساحت کل حباب گاز و S_{stain} ، مساحت لکه سفید است که در وسط حباب گاز قرار گرفته است. چنان که



شکل ۷. A: نمایش برخورد پرتو نور به حباب گاز کروی و B: نمایش برخورد پرتو نور به حباب گاز دارای پهن‌شدگی

Fig 7. A: Displaying a light beam incidence on a spherical gas bubble, and B: displaying a light beam incidence on a flat gas bubble



شکل ۸. تصویر مقطع میکروسکوپی (راست) و لایه ترسیمی (چپ) نمونه مقطع از میان‌بارهای سیال (بزرگ‌نمایی $\times 400$) مربوط به کنسار مهدی آباد

Fig. 8. Microscopic thin section image (right), and drawing layer of fluid inclusions (magnification $\times 400$) at Mehdiabad deposit

جدول ۱. اندازه گیری مساحت (بر حسب میکرومتر مربع) و درجه پرشدگی سطحی (%) قسمت های مختلف میان بار سیال در شکل ۸

Table 1. Measurement of area (μm^2) and surface filling degree (%) of different parts of the fluid inclusions in Fig. 8

Shape of fluid inclusion	Total area	Area of vapour	Area of spot	Degree of fill
	43.85	13.81	0.48	31.49
	48.72	8.24	0.63	16.91
	44.05	5.83	1.85	13.23
	9.42	1.43	0	15.28

میان بار سیال، حجم تقریبی حباب و میان بار سیال را به دست آورد و در نهایت درجه پرشدگی سه بعدی فاز گازی میان بار سیال محاسبه می شود (جدول ۲).

به منظور مدل سازی سه بعدی، باید با استفاده از مؤلفه های سطح لکه و سطح حباب، بعد سوم میان بار سیال را مطابق رابطه ۶ محاسبه کرد و با توجه به سطح حباب و میان بار سیال و ضخامت

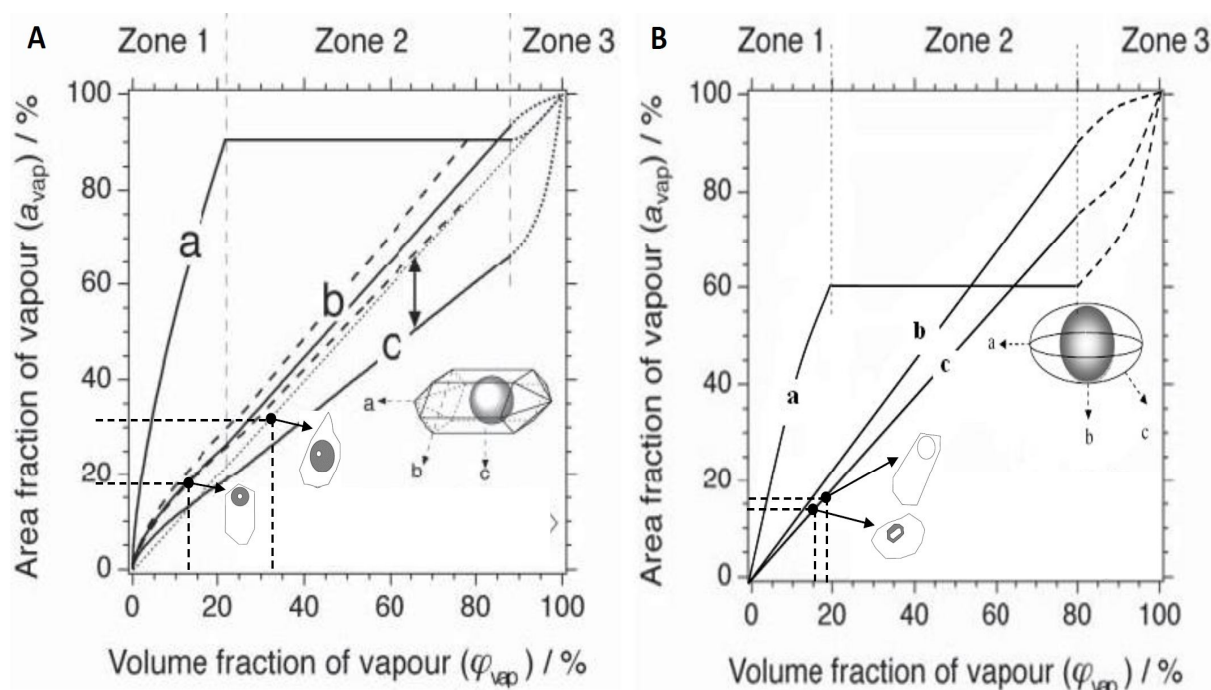
جدول ۲. مدل سازی سه بعدی حجم میان بارهای سیال (بر حسب میکرومتر مکعب) و درجه پرشدگی حجمی (%) بر اساس رویکرد محاسباتی

Table 2. 3D volume modeling of the fluid inclusion (μm^3) and volume filling degree (%) based on the computational approach

Shape of fluid inclusion	3 rd dimension	Volume of vapour	Total volume	Degree of fill
	1.93	35.49	84.53	41.98
	1.32	14.52	64.45	22.53
	0.67	5.22	29.57	17.65
	1.93	1.46	7.19	20.31

در این پژوهش، مدل‌سازی بر روی رابطه درجه پرشدگی در میان‌بارهای سیال در سطح و حجم، مورد بررسی قرار گرفته است که این سیالات از مدل میان‌بارهای سیال به شکل بیضی‌گون یا شش‌ضلعی هرمی پیروی می‌کنند. درجه پرشدگی حجمی (سه‌بعدی) با استفاده از مدل‌های هندسی میان‌بار سیال نیز قابل محاسبه است که با نتایج حاصل از رویکرد محاسباتی ارائه‌شده، مطابقت دارد که در جدول ۳ بیان شده است.

بر اساس مدل‌های سه‌بعدی پیشنهادی، دو نمونه از میان‌بارهای سیال در گروه میان‌بارهای سیال شش‌ضلعی هرمی و دو نمونه دیگر در مدل بیضی‌گون طبقه‌بندی شدند که نتایج درجه پرشدگی در حالت سطحی، بسته به هندسه مدل سه‌بعدی و نوع تصویر مقطع به درجه پرشدگی در حالت سه‌بعدی تبدیل شده است. در شکل ۹-A و B، نحوه تخمین درجه پرشدگی با توجه به مدل‌های هندسی شش‌ضلعی و هرمی نمایش داده شده است.



شکل ۹. نمایش میان‌بارهای سیال بر اساس مدل‌های هندسی در کانسار مهدی‌آباد، A: شش‌ضلعی هرمی و B: بیضی‌گون

Fig. 9. Display of the fluid inclusions based on geometric models at Mehdiabad deposit, A: hexagonal prism, and B: ellipsoid

در ادامه بررسی هندسی میان‌بارهای سیال، شکل میان‌بارها با مدل‌های ارائه‌شده، تطبیق داده شد. شکل ۱۱، میان‌بار سیال دارای مدل سیلندری (کپسولی) است که از سه قسمت استوانه، حباب گاز و لکه است که قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی را داراست. در شکل ۱۲، میان‌بار سیال دارای مدل کشیدگی و در حال تقسیم به دو قسمت است. این میان‌بار سیال دارای دو لکه طبق مدل سه‌بعدی کشیدگی است. در این حالت، بر اثر وارد شدن تنش

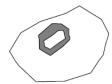
درجه پرشدگی سطحی و حجمی با استفاده از مدل‌سازی هندسی و محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت که رابطه بین مدل‌سازی هندسی و محاسباتی از روند خطی پیروی می‌کند. نسبت درجه پرشدگی سطحی به حجمی بر اساس شیب خط برازش داده شده، در مدل محاسباتی و هندسی به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۷۷ است که بیانگر همخوانی قابل توجه نتایج حاصل از این دو روش است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

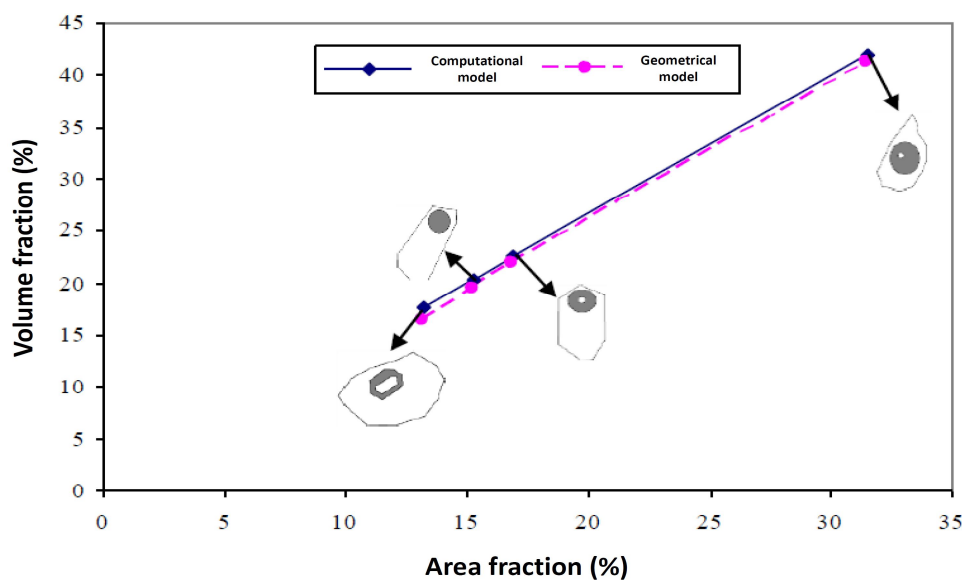
(Roedder, 1984a).

کششی به سنگ، حباب گاز به دو بخش تقسیم شده است. در نتیجه ارائه تفسیر در مورد دمای تشکیل آن پیچیده است

جدول ۳. مدل سازی سه بعدی میان بارهای سیال بر اساس رویکرد هندسی

Table 3. 3D modeling of the fluid inclusions based on the geometrical approach

Shape of fluid inclusion	Geometrical model	Projection	Area fraction (%)	Volume fraction (%)
	Hexagonal	c	31.49	41.17
	Hexagonal	c	16.91	21.75
	Ellipsoid	c	13.23	16.42
	Ellipsoid	c	15.28	19.38



شکل ۱۰. مقایسه نتایج درجه پرشدگی سه بعدی در رویکرد هندسی و محاسباتی در کانسار مهدی آباد

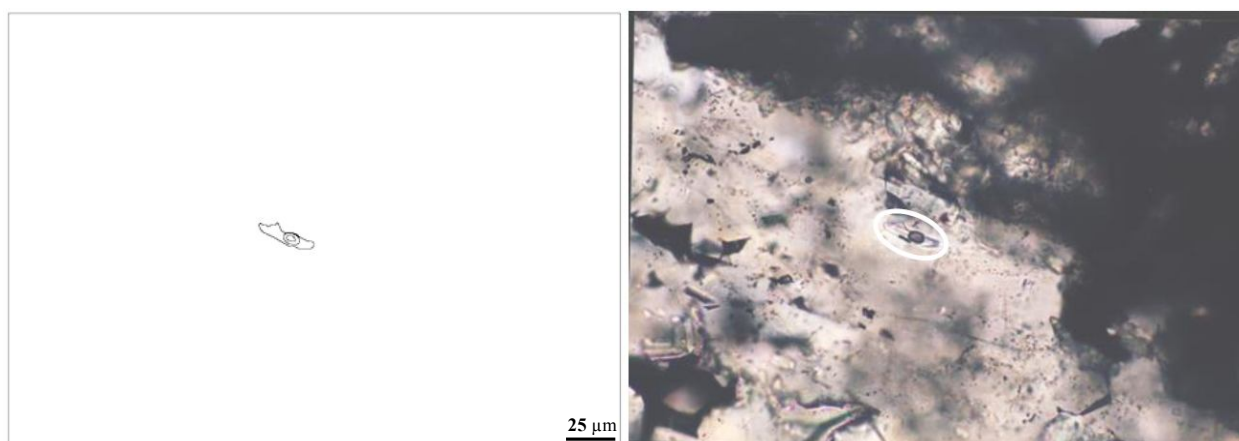
Fig. 10. Comparison of the results of 3D filling degree in the geometric and the computational approaches at Mehdiabad deposit

۲۵ درصد تعیین و محدوده تغییرات چگالی را مشخص کرد (Roedder, 1984a). با توجه به حالت دو فاز مایع-بخار

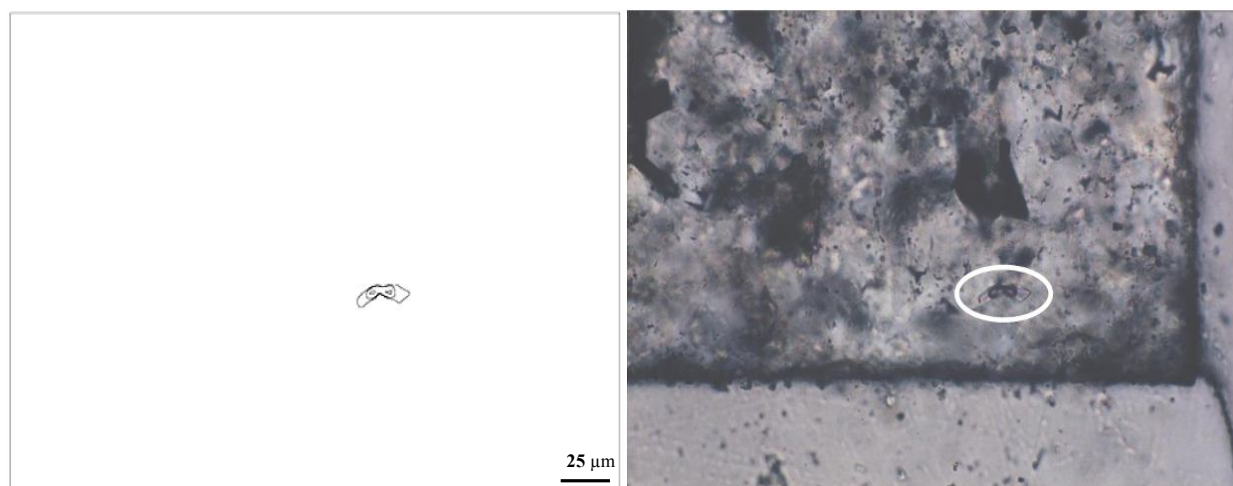
با استفاده از نمودارهای شکل ۱۳ می توان منطقه موردنظر دمایی-چگالی را با توجه به میانگین درجه پرشدگی سه بعدی

دانیسته، دمای یکنواختی میان‌بارهای سیال منطقه بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای میانه ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) تخمین زده می‌شود.

(L+V)، درجه پرشدگی تقریبی فاز گازی ۲۵ درصد، محدوده تغییرپذیری چگالی در دامنه ۰/۶۵ تا ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نمونه‌های موردنظر تعیین شد. با مقایسه منحنی دما-



شکل ۱۱. تصویر مقطع میکروسکوپی (راست) و لایه ترسیمی (چپ) میان‌بار سیال مدل سیلندری (بزرگ‌نمایی $\times 400$) مربوط به کانسار مهدی‌آباد
Fig. 11. Microscopic thin section image (right), and drawing layer of fluid inclusions with cylinder model (magnification $\times 400$) at Mehdiabad deposit



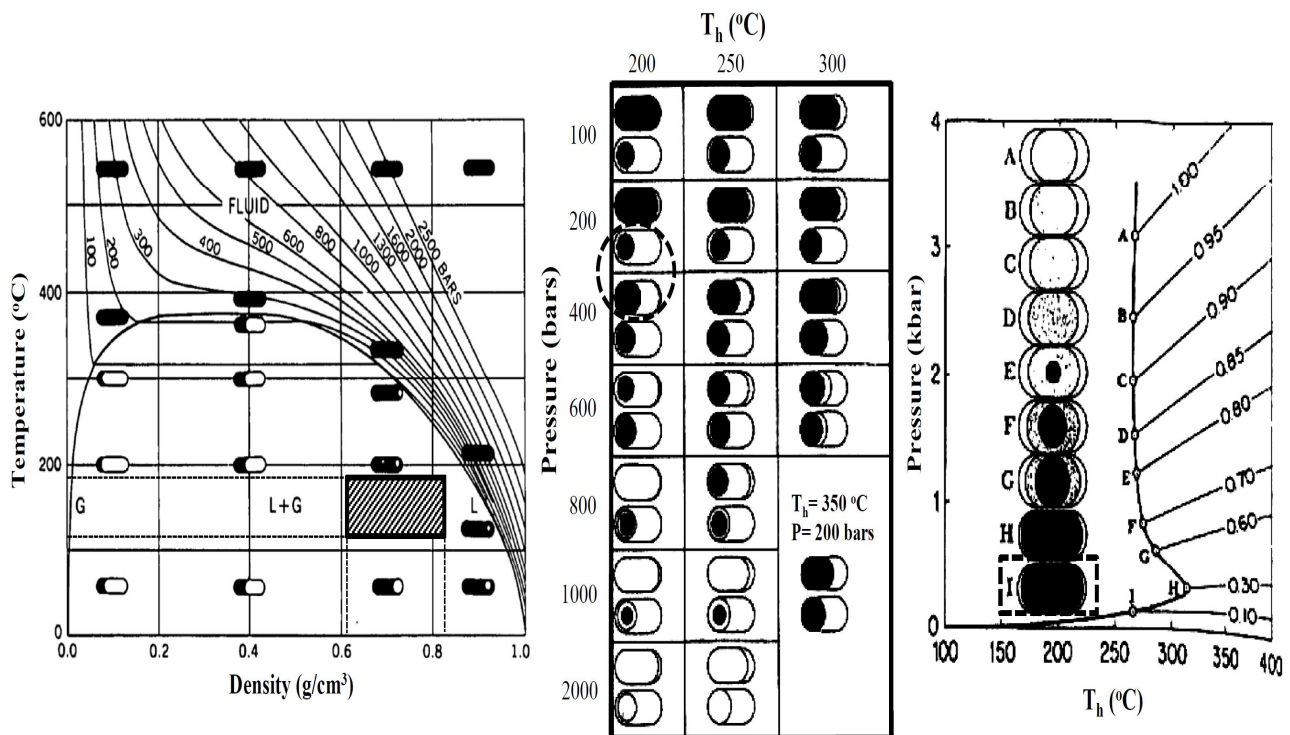
شکل ۱۲. تصویر مقطع میکروسکوپی (راست) و لایه ترسیمی (چپ) میان‌بار سیال دو قسمتی (بزرگ‌نمایی $\times 400$) مربوط به کانسار مهدی‌آباد
Fig. 12. Microscopic thin section image (right), and drawing layer of necking fluid inclusions with cylinder model (magnification $\times 400$) at Mehdiabad deposit

et al., 2017). در نمودارهای رایج تبدیلی سه متغیره، دو مؤلفه معلوم به صورت محورهای نمودار و مؤلفه مجهول به صورت خطوط هم مقدار نمایش داده می‌شود. در چند سال اخیر، استفاده از نمودارهای سه بعدی به علت بررسی تعداد متغیرهای بیشتر

در مطالعات میکروسکوپی می‌توان درجه پرشدگی سطحی را تعیین و میزان واقعی درجه پرشدگی سه بعدی را محاسبه کرد و با استفاده از رسم رگرسیون در محیط سه بعدی فشار، دما و درجه پرشدگی، فشار را نسبت به دو متغیر دیگر محاسبه کرد (Yuan

معمول ترین نمونه های آن شامل نمودارهای سه گانه فشار، حجم و دماست (Aplin et al., 1999; Teinturier et al., 2002).

به صورت هم زمان و دقت بالاتر افزایش یافته است. متغیرهای مورد بررسی در نمودارهای سه بعدی گوناگون است.



شکل ۱۳. رابطه دما با توجه به درجه پرشدگی شکل میان بار سیال، چگالی و فشار و محدوده های نمونه های مورد بررسی مربوط به کانسار مهدی آباد (Roedder, 1984a)

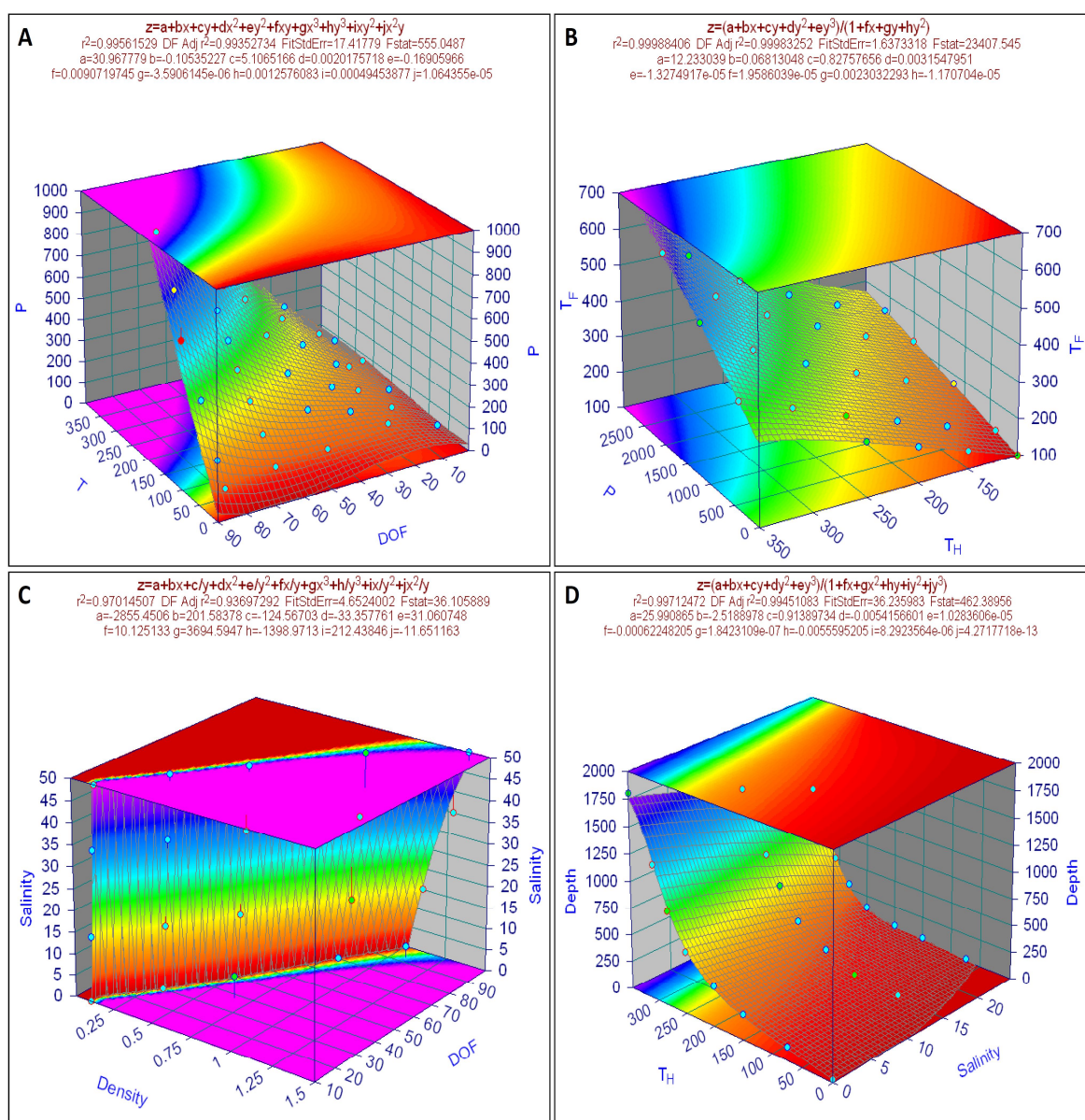
Fig. 13. Relation of temperature with the filling degree of the fluid inclusion, density, and pressure and the range of studied samples at Mehdiabad deposit (Roedder, 1984a)

۷۵ درصد) و دمای بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد، فشار بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ (فشار میانه ۴۵۰) اتمسفر تخمین زده می شود (شکل ۱۴-۱۴). بر اساس شکل ۱۴-۱۴، نمودار سه بعدی متغیر دمای سازند T_F بر حسب دمای یکنواختی T_H و فشار P ترسیم و معادله رگرسیون آن تعیین می شود. دمای سازند بر اساس دمای یکنواختی و فشار به دست آمده، برابر ۲۵۰ تا ۳۵۰ (دمای میانه ۳۰۰) درجه سانتی گراد به دست می آید. در شکل ۱۴-۱۴، تغییرات شوری بر حسب درجه پرشدگی مایع و چگالی نمایش داده شده است. در روش های آزمایشگاهی باید توجه داشت که رایج ترین روش برای محاسبه درصد شوری روش انجماد است. نمونه های مورد بررسی قرار گرفته شده، با توجه

در این پژوهش، از نمودارهای سه بعدی استفاده شده و معادله رویه سه بعدی به صورت مؤلفه مجهول بر حسب دو مؤلفه معلوم تعیین شده است. در شکل ۱۴، مؤلفه های مورد بررسی به صورت یک تابع سه بعدی در نظر گرفته شده و هریک از مدل های سه بعدی ابتدا بر اساس داده های موجود و نمودارهای استاندارد دوبعدی، به صورت تابع $Z=F(X,Y)$ محاسبه و ترسیم شده است که برای یک نمونه جدید، اگر مقدار دو متغیر X و Y تعیین شده باشد، می توان مقدار مؤلفه Z را بر اساس تابع F تخمین زد (Hosseini Morshedy et al., 2017). بر اساس نمودار سه بعدی دما، درجه پرشدگی و فشار در منطقه مورد بررسی، با توجه به درجه پرشدگی گاز ۲۵ درصد (درجه پرشدگی فاز مایع

میان‌بار سیال کانسار سرب و روی مهدی‌آباد، مدل‌سازی حاصل از روش ارائه‌شده در این مقاله را تأیید می‌کند که تقریباً مربوط به محدوده کانی‌سازی یکسان است (Ebrahim-Mohseni, 2011). در نهایت، بررسی خروجی‌های حاصل از مدل‌سازی، بیانگر سازگاری مناسب با بررسی‌های پیشین نوع کانسارهای مشابه سرب و روی مهدی‌آباد است (Emsbo, 2009).

به‌درجه پرشدگی و چگالی میان‌بار سیال، دارای شوری ۱۰ تا ۱۵ درصد معادل نمک طعام است. در نهایت، با در نظر گرفتن دمای یکنواختی و درصد شوری، می‌توان عمق تقریبی تشکیل را محاسبه کرد که عمق تشکیل ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر به دست می‌آید که در شکل ۱۴-D نمایش داده شده است. پژوهش‌های مرتبط با آزمایش‌های دماسنجی بر روی نمونه‌های



شکل ۱۴. مدل‌سازی سه‌بعدی میان‌بارهای سیال کانسار مهدی‌آباد، A: فشار، دما و درجه پرشدگی، B: دمای سازند، فشار و دمای همگن‌شدگی، C: درصد شوری، چگالی و درجه پرشدگی و D: عمق، دمای همگن‌شدگی و شوری

Fig. 14. 3D modeling of the fluid inclusions at Mehdiabad deposit, A: P-T-DOF, B: T_F-P-T_H, C: Salinity-Density-DOF, and D: Depth-T_H-Salinity

نتیجه گیری

بررسی میان بار سیال یکی از روش های مؤثر در زمینه شناخت و اکتشاف کانسارها و نهشته های معدنی محسوب می شود. در این پژوهش، روشی سریع و کم هزینه برای ارزیابی مقدماتی ویژگی های ریزدماسنجی میان بار سیال ارائه شده که توسط نمونه های کانسار سرب و روی مهدی آباد اعتبارسنجی شده است. بدین منظور، از مدل سازی هندسی و محاسبه درجه پرشدگی میان بارهای سیال برای تعیین ویژگی هایی اعم از دمای یکنواختی، فشار، چگالی، دمای سازندی، میزان شوری و عمق تشکیل استفاده شد. مدل های هندسی سه بعدی میان بارهای سیال به پنج نوع سیلندری، مخروط ناقص، مکعب مستطیل، شش ضلعی هرمی و بیضی گون تقسیم شد که اغلب نمونه های میان بار سیال منطقه مهدی آباد از مدل های شش ضلعی هرمی و بیضی گون پیروی می کند. نمونه ای هم به صورت مدل سیلندری مشاهده شد. با اندازه گیری مساحت کل، حباب و لکه میان بار سیال، بعد سوم

میان بارهای سیال و همچنین درجه پرشدگی در حالت دوبعدی و سه بعدی محاسبه شد. درجه پرشدگی حجمی محاسبه شده از دو رویکرد مدل های هندسی و محاسباتی از درجه انطباق بالایی برخوردار است؛ به طوری که نسبت درجه پرشدگی سطحی به حجمی در مدل محاسباتی و هندسی به ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۷۷ است. بررسی موردی میان بارهای سیال کانسار سرب و روی مهدی آباد به کمک مدل سازی سه بعدی شکل ها مشخص شد که میان بارهای سیال با درجه پرشدگی فاز گازی تقریبی ۲۵ درصد و چگالی بین ۰/۶۵ تا ۰/۸ گرم بر سانتی متر مکعب، دارای دمای یکنواختی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ (دمای میانه ۱۵۰) درجه سانتی گراد، فشار بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ اتمسفر، دمای سازندی بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ (دمای میانه ۳۰۰) درجه سانتی گراد، شوری بین ۱۰ تا ۱۵ درصد معادل نمک طعام و عمق تشکیل بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر است. خروجی های حاصل از مدل ارائه شده، سازگاری مناسبی با نوع کانسارهای مشابه سرب و روی مهدی آباد دارد.

References

- Adeli, Z., Rasa, I. and Darvishzadeh, A., 2015. Fluid inclusion study of the ore-quartz veins at Haftcheshmeh porphyry copper (Mo) deposit, Ahar-Arasbaran Magmatic Belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 502–511.
- Andersen, T., Frezzotti, M.L. and Burke, E.A.J., 2001. Fluid inclusions, Phase relationships - methods- applications [Special Issue]. *Lithos*, 55(1–4): 1–322.
- Anderson, A.J. and Bodnar, R.J., 1993. An adaptation of the spindle stage for geometric analysis of fluid inclusions. *American Mineralogist*, 78(1): 657–664.
- Aplin, A.C., Macleod, G., Larter, S.R., Pedersen, K.S., Sorensen, H. and Booth, T., 1999. Combined use of confocal laser scanning microscopy and PVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions. *Marine and Petroleum Geology*, 16(2): 97–110.
- Bakker, R.J., 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1–3): 3–23.
- Bakker, R.J. and Elburg, M.A., 2006. A magmatic-hydrothermal transition in Arkaroola (northern Flinders Ranges, South Australia): from diopside-titanite pegmatites to hematite-quartz growth. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(5): 541–569.
- Bakker, R.J. and Larryn, W.D., 2006. Estimation of volume fractions of liquid and vapor phases in fluid inclusions, and definition of inclusion shapes. *American Mineralogist*, 91(1): 635–657.
- Becker, S.P., Eichhubl, P., Laubach, S.E., Reed, R.M., Lander, R.H. and Bodnar, R.J., 2010. A 48 m.y. history of fracture opening, temperature and fluid pressure: cretaceous Travis Peak Formation, East Texas basin. *Bulletin of the Geological Society of America*, 122 (7–8): 1081–1093.
- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J. and Kuehn, C.A., 1985. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. *Reviews in Economic Geology*, 2(1): 73–97.
- Chapple, K., 2003. The Mehdiabad zinc deposit—

- a Tethyan giant. 7th Biennial SGA Meeting, National Technical University of Athens, Athens, Greece.
- Chi, G., Dubé, B. and Williamson, K., 2002. Preliminary fluid-inclusion microthermic study of fluid evolution and temperature-pressure conditions in the Goldcorp High-Grade zone, Red Lake mine, Ontario. Geological Survey of Canada, Ottawa, Current Research 2002-C27, 12 pp.
- Dilley, L.M., Norman, D.I. and Berard, B., 2004. Fluid inclusion stratigraphy: new method for geothermal reservoir assessment preliminary results. 29th Workshop of Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, California, USA.
- Ebrahim-Mohseni, M., 2011. Study of genesis of Mehdiabad deposit using fluid inclusion and stable isotope. M.Sc. thesis, Damghan University, Damghan, Iran, 166 pp. (in Persian with English abstract)
- Emsbo, P., 2009. Geologic criteria for the assessment of sedimentary exhalative (sedex) Zn-Pb-Ag deposits. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2009-1209, 21 pp.
- Garofalo, P.S., Fricker, M.B., Günther, D., Bersani, D. and Lottici, P.P., 2014. Physical-chemical properties and metal budget of Au-transporting hydrothermal fluids in orogenic deposits. Geological Society, London, Special Publications, 402(1): 71-102.
- Ghasemi, M., 2007. Genesis of Mehdiabad Pb-Zn deposit and comparing with other Pb-Zn deposits. M.Sc. Thesis, Research Institute for Earth Science, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 238 pp. (in Persian with English abstract)
- Ghasemi, M., Momenzadeh, M., Yaghubpur, A. and Mirshokraei, A.A., 2009. Mineralogy studies of Mehdiabad zinc-lead deposit- Yazd, Central Iran. Geosciences Scientific Quarterly Journal, 16(73): 89-98. (in Persian with English abstract)
- Hall, D.L., Sterner, S.M., Shentwu, W. and Bigge, M.A., 2002. Applying fluid inclusions to petroleum exploration and production. American Association of Petroleum Geologists, Search and Discovery, article#40042, www.searchanddiscovery.com/documents/don_hall/images/hall3.pdf.
- Hossein Morshedy, A., Kohsary, A.H. and Shakery Varzaneh, M.R., 2017. Modeling the geochemical distribution of rare earth elements (REEs) using multivariate statistics in the eastern part of Marvast placer, the Yazd province. Journal of Economic Geology, 9(1): 249-263. (in Persian with English abstract)
- Hossein Morshedy, A., Mojtahedzadeh, H. and Kohsary, A.H., 2008. Measuring microthermic parameters of fluid inclusion with studying their geometries and models, case study: Mehdiabad Pb-Zn deposit. 15th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Hosseini, S.A., Asghari, O. and Emery, X., 2017. Multivariate simulation of block-support grades at Mehdiabad deposit, Iran. Applied Earth Science, 126(3): 146-157.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esmaeili Sevieri, A., Shabani, S., Allaz, J.A. and Stern, C.R., 2017. Geology, mineralization, mineral chemistry, and ore-fluid conditions of Irankuh Pb-Zn mining district, south of Isfahan. Journal of Economic Geology, 9(2): 267-294. (in Persian with English abstract)
- Kelly, J., Parnell, J. and Chen, H.H., 2000. Application of fluid inclusions to studies of fractured sandstone reservoirs. Journal of Geochemical Exploration, 69-70(1): 705-709.
- Kesler, S.E., Haynnes, P.S., Creech, M.Z. and Gorman, J.A., 1986. Application of fluid inclusion and rock-gas analysis in mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration, 25(1-2): 201-215.
- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M.R., Rajabi, A. and Choulet, F., 2018. A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran. Geoscience Frontiers, 9(1): 249-272.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D. and Bodnar, R.J., 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. Journal of Geochemical Exploration, 114(1): 20-35.
- Moon, K.J., 1991. Application of fluid inclusions in mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration, 42(1): 205-221.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012.

- Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.
- Roedder, E., 1984a. Fluid inclusion; Review in mineralogy. Volume 12, Mineralogical Society of America, BookCrafters, Colorado, USA, 644 pp.
- Roedder, E., 1984b. The fluids in salt. *Mineralogical Society of America*, 69(1): 413–439.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J. 1997. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits, In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley & Sons, New York, pp. 657–698.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, London, 239 pp.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2015. Synthetic fluid inclusions XX. Critical PTx properties of H₂O-FeCl₂ fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 148(1): 50–61.
- Stoller, P., Krüger, Y., Rička, J. and Frenz, M., 2007. Femtosecond lasers in fluid inclusion analysis: Three-dimensional imaging and determination of inclusion volume in quartz using second harmonic generation microscopy. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(3–4): 359–368.
- Tale Fazel, E., Mehrabi, B., Zamanian, H. and Hayatlgheybi, M., 2017. Pressure-temperature condition and hydrothermal-magmatic fluid evolution of the Cu-Mo Senj deposit, Central Alborz: fluid inclusion evidence. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 431–455.
- Teinturier, S., Pironon, J. and Walgenwitz, F., 2002. Fluid inclusions and PVTX modelling: examples from the Garn Formation in well 6507/2-2, Haltenbanken, Mid-Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 19(6):755–765.
- Wilkinson, J.J., 2017. Metastable freezing: A new method for the estimation of salinity in aqueous fluid inclusions. *Economic Geology*, 112(1): 185–193.
- Yuan, X., Mayanovic, R.A., Zheng, H. and Sun, Q., 2017. Determination of pressure in aqueo-carbonic fluid inclusions at high temperatures from measured Raman frequency shifts of CO₂. *American Mineralogist*, 102(2): 404–411.
- Zarasvandi, A., Asadi, F., Pourkaseb, H., Ahmadnejad, F. and Zamanian, H., 2015. Hydrothermal Fluid evolution in the Dalli porphyry Cu-Au Deposit: Fluid Inclusion microthermometry studies. *Journal of Economic Geology*, 7(2): 277–306. (in Persian with English abstract)



Geometrical modeling of fluid inclusion to predict the microthermometric properties: a case study at the Mehdiabad Pb-Zn deposit

Amin Hossein Morshedy*, Seyed Hossein Mojtahedzadeh and Amir Hossein Kouhsari

Mining Exploration Department, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Submitted: Aug. 02, 2017

Accepted: Jan. 09, 2018

Keywords: *Fluid inclusion, 3D geometrical modeling, Degree of fill, Microthermometric parameters, Mehdiabad Pb-Zn deposit*

Introduction

Fluid inclusions are small, usually microscopic, volumes of pore fluid, which are crystallographically trapped in rocks during diagenesis or fracture healing processes. Nowadays, various techniques are used for resource exploration. Application of a fluid inclusion is one of these methods that has been developed for mineral, geothermal, and petroleum reservoir exploration. The study of fluid inclusions represents our most reliable source of information on the temperature, pressure, and fluid composition data of the ore fluid, and it is one of the most important tools for research into the economic geology and genesis of ore deposits (Moon, 1991). To achieve these goals, transparent and polished slabs of rock material are prepared and optically studied with a petrographic microscope. Samples are viewed under transmitted plane-polarized white light as well as under reflected ultraviolet or blue-violet illumination. During the fluid inclusion petrography, the volume fractions of phases are routinely estimated at room temperature to deduce whether assemblages of cogenetic inclusions were originally trapped from a one-phase or a multi-phase pore fluid. In the present research study, the microthermometric properties of the fluid inclusion data through pressure, temperature, and salinity diagrams were computed by geometrical modeling of fluid inclusion (Bakker and Larryn, 2006). The proposed method provides a quick and low cost technique to preliminarily investigate the microthermometric parameters of the fluid inclusion.

To evaluate the proposed geometrical model, the Mehdiabad Pb-Zn deposit is selected as the case study. The Mehdiabad Pb-Zn deposit is located at the Yazd-Anarak metallogenic belt, 110 km southeast of Yazd, in the Central Iran structural zone. The host rocks of the deposit consist of lower Cretaceous silty limestone and dolomite. The main occurrences are the Calamine mine (CM), the Black-Hill ore (BHO), the East Ridge (ER) and the Central Valley Orebody (CVOB). The ore body consists of a primary sulfide ore and a supergene non-sulfide ore, the latter one having been mined at CM (Ghasemi, 2007; Rajabi et al., 2012).

Materials and methods

The shape and geometry of fluid inclusion are one of the most important parameters, which were applied to estimate 3D degree of filling and find the useful information about temperature, pressure, salinity and depth of trapping without using time-consuming and costly heating-cooling operation. Inclusions in normal thick-sections are rotated stepwise and their projected areas and area-fractions are plotted against rotation angle. The outputs are systematically related to inclusion orientation, inclusion shape, and filling degree. The dependency on orientation is minimized when area fractions are measured at the position where the inclusions project their largest total areas. The shape factor is employed to present a new objective classification of inclusion projections, based on the extracted parameters from digital image processing (Bakker and Larryn, 2006).

*Corresponding authors Email: morshedy@yazd.ac.ir

In this research, Mehdiabad Pb-Zn deposit has been chosen to evaluate the proposed method. Based on the fluid inclusion petrography, four fluid inclusion types are observed: 1) L+V; 2) L+L; 3) L; and 4) V; L+V phase is the most popular. After preparing 2D image of sections, 2D and 3D degree of fills were calculated by measuring the areas of total, bubble, and spot of fluid inclusion and computing the third dimension (Z) of fluid inclusion. Four geometrical models of volume fractions are defined, including cylinder, tetragonal prism, truncated cone, hexagon, and ellipsoid (Bakker and Larryn, 2006; Hossein Morshedy et al., 2008). In this case study, 3D proper models of the fluid inclusions are selected, depending on its geometry (hexagonal or ellipsoid). Then 2D degrees of filling (area fraction) is converted to 3D degrees of filling (volume fraction). The geometrical modeling results are well matched with computational outputs.

Results and discussion

In this research, the ratios of area to volume fractions in geometrical and computational modelling were calculated 0.75 and 0.77, respectively. In the Mehdiabad Pb-Zn deposit, the main geometrical shapes of fluid inclusions were followed up the hexagonal prism with hexagonal pyramids and ellipsoid models. 3D geometrical modeling of fluid inclusion showed vapor fraction, 25% and density, 0.7 g/cm^3 , which the microthermometric and other parameters were obtained homogenization temperature nearly 100-200 °C (average of 150 °C), pressure between 400-500 ATM, formation temperature about 250-

350 °C, salinity within a range of 10 to 15 wt.% NaCl equiv. and depth of mineralization 150-200 m. This finally achieved results have a high similarity with the typical carbonate-hosted Pb-Zn deposit.

References

- Bakker, R.J. and Larryn, W.D., 2006. Estimation of volume fractions of liquid and vapor phases in fluid inclusions, and definition of inclusion shapes. *American Mineralogist*, 91(1): 635–657.
- Ghasemi, M., 2007. Genesis of Mehdiabad Pb–Zn deposit and comparing with other Pb–Zn deposits. M.Sc. Thesis, Research Institute for Earth Science, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 238 pp. (in Persian with English abstract)
- Hossein Morshedy, A., Mojtahedzadeh, H. and Kohsary, A.H., 2008. Measuring microthermic parameters of fluid inclusion with studying their geometries and models, case study: Mehdiabad Pb–Zn deposit. 15th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- Moon, K.J., 1991. Application of fluid inclusions in mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 42(1): 205–221.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.