

تحولات توزیع اندازه حباب‌ها در منطقه آتشفشانی کواترنری قروه- بیجار، خاور کردستان

بهمن رحیمزاده*

استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

چکیده

مخروط‌های اسکوری از بارزترین بخش‌های آتشفشان‌های کواترنری خاور کردستان هستند. در بررسی سنگ‌نگاری این واحدها کانی‌های اصلی به ترتیب فراوانی شامل الیون، پیروکسن، پلاژیوکلاز و بیوتیت با بافت غالب حباب‌دار و شیشه‌ای است. در این مطالعه فرایند تشکیل و رشد حباب‌ها در طی فوران واحدهای اسکوری آتشفشان‌های منطقه با استفاده از روش توزیع اندازه حباب‌ها و با استفاده از محاسبه فراوانی، سهم حجمی، مدل‌سازی سه‌بعدی، هسته‌بندی و رشد حباب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ۸ نمونه انتخابی از مخروط‌های مختلف تعداد ۳۶۲۳ حباب ترسیم و شمارش شدند که سهم حجمی حباب‌ها از ۴۰ تا ۸۵ درصد متفاوت است. با استفاده از تصویر دوبعدی حباب‌ها شکل سه‌بعدی آنها بازسازی و با هم مقایسه شده‌اند. بیشترین جمعیت حباب‌ها در ۴ نمونه دارای شکل کروی یا نزدیک به کروی و برای چهار نمونه دیگر بیضوری است. کشیده‌ترین بیضوی در بین تمامی حباب‌ها نسبت قطرهای ۱:۳/۲:۸ (S:I:L) دارد که تقریباً یک بیضوی پهن است. راستای قطر L همان راستای عمود بر سطح است که کمترین فشار به ماگما وارد می‌شود و حباب قادر به رشد چند برابری در آن راستا شده است. وجود ۲ تا ۵ قله در نمودار توزیع فراوانی اندازه حباب‌ها، نشان‌دهنده رخداد‌های هسته‌زایی مجزاست که توزیع پلی‌مدال، نمایی و توانی را برای حباب‌های موجود در اسکوری‌های خاور کردستان پیشنهاد می‌کند. به ترتیب از نسل اول تا نسل آخر نمونه‌ها چگالی هسته‌بندی افزایش و رشد حباب‌ها کاهش می‌یابد. تکرار رخداد تشکیل حباب‌ها در مقیاس ماکروسکوپی تا میکروسکوپی و SEM، همچنین مدل هسته‌بندی و رشد آنها پدیده فراکتال را پیشنهاد می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: توزیع اندازه حباب، هسته‌بندی حباب، اسکوری، قروه، بیجار، کردستان.

*نویسنده مسئول: بهمن رحیمزاده

E-mail: b.rahimzade59@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

تحولات آتشفشانی به ویژه گازها در سیستم آتشفشان تا امروز برای بشر به‌صورت مستقیم قابل مشاهده نبوده است. فشار و حرارت بالا در فرایند شکل‌گیری و فوران آتشفشان، انسان را مجبور کرده است که برای مطالعه از روش‌های غیر مستقیم مانند بازسازی در شرایط آزمایشگاهی و یا مطالعه مواد آتشفشانی سرد شده استفاده کند. فرایند هسته‌زایی و رشد حباب‌ها را می‌توان از منشأهای ثانویه مانند مطالعات تجربی و بررسی بافت‌های مواد آذرآواری استنباط کرد. در سه دهه اخیر جزئیات تجزیه ساختاری سنگ‌های آتشفشانی مانند پومیس، اسکوری و گدازه باعث شده است تا ابزارهای مناسب جهت بررسی پارامترهای فوران به دست آید. یکی از پارامترهای بافتی اندازه‌گیری شده، توزیع اندازه حفرات (VSD; Vesicle Size Distribution) در سنگ‌های جامد است که برای توزیع اندازه حباب‌ها (BSD; Bubble Size Distribution) در طول فرایند مایع بودن ماگما مورد استفاده قرار گرفته است (Blower et al., 2002). تشکیل بافت‌های حباب‌دار نتیجه فوق اشباع بودن گاز در ماگماست که اطلاعات مورفولوژیکی زیادی از جمله تشکیل، رشد حباب، روند خروج گاز و در نهایت فشارهای حاکم بر آشیانه ماگمایی را در خود حفظ و ضبط کرده‌اند (رحیمزاده و همکاران، ۱۳۹۳). بسته به تغییر در خواص فیزیکی مانند ویسکوزیته، کشش سطحی، انتشار مواد فرار، وضعیت فیزیکی (فشار و دما) و رفتار جنبشی ماگما، حباب‌ها دارای اشکال، حجم و اندازه‌های متفاوت هستند (McBirney and Murase, 1970; Heiken, 1972; Heiken and Wohletz, 1985; Whitham and Sparks, 1986; Sparks and Brazier, 1987). با استفاده از صفات ریخت‌شناسی و مطالعه بافت مواد آذرآواری می‌توان به روند فوران پی برد. بررسی کمی فرایند فوران در سنگ حباب‌دار نیازمند درک شرایط حاکم بر حباب‌دار شدن مذاب در طول صعود ماگما و همچنین درک درستی از فرایند فوران در بحث نظری و تجربی است (Gonnermann and Manga, 2007).

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه محاسبات کمی و تفسیر حباب‌ها برای پی بردن به نوع آتشفشان با استفاده از روش‌های ریاضی و آماری انجام

شده است (Giachetti et al., 2010; Blower et al., 2002; Rust et al., 2002; Gonnermann and Manga, 2007). در روش توزیع اندازه حباب (BSD) از میزان، اندازه و شکل حباب‌های موجود در بافت سنگ‌ها استفاده می‌شود (Higgins, 2006; Blower, 2001). بررسی هسته‌بندی، توزیع، رشد و اندازه حباب‌ها می‌تواند در پی بردن به مقدار گاز ماگما مؤثر باشد (Gaonac'h et al., 1996). این آتشفشان‌ها به لحاظ وجود فوران‌های انفجاری و تشکیل افق‌های اسکوری متنوع، قابل بررسی هستند و به واسطه سن بسیار کم ۰/۵ تا ۱/۳ میلیون سال (Boccaletti et al., 1977) خصوصیات شیمیایی و بافتی واحدهای اسکوری به خوبی در آنها حفظ شده است. در این مطالعه اسکوری‌های کواترنری خاور کردستان، با هدف پی بردن به چگونگی کاهش فشار، تشکیل حباب‌ها، حجم و شکل آنها مورد بررسی آماری قرار گرفته‌اند.

۲- زمین‌شناسی و ریخت‌شناسی

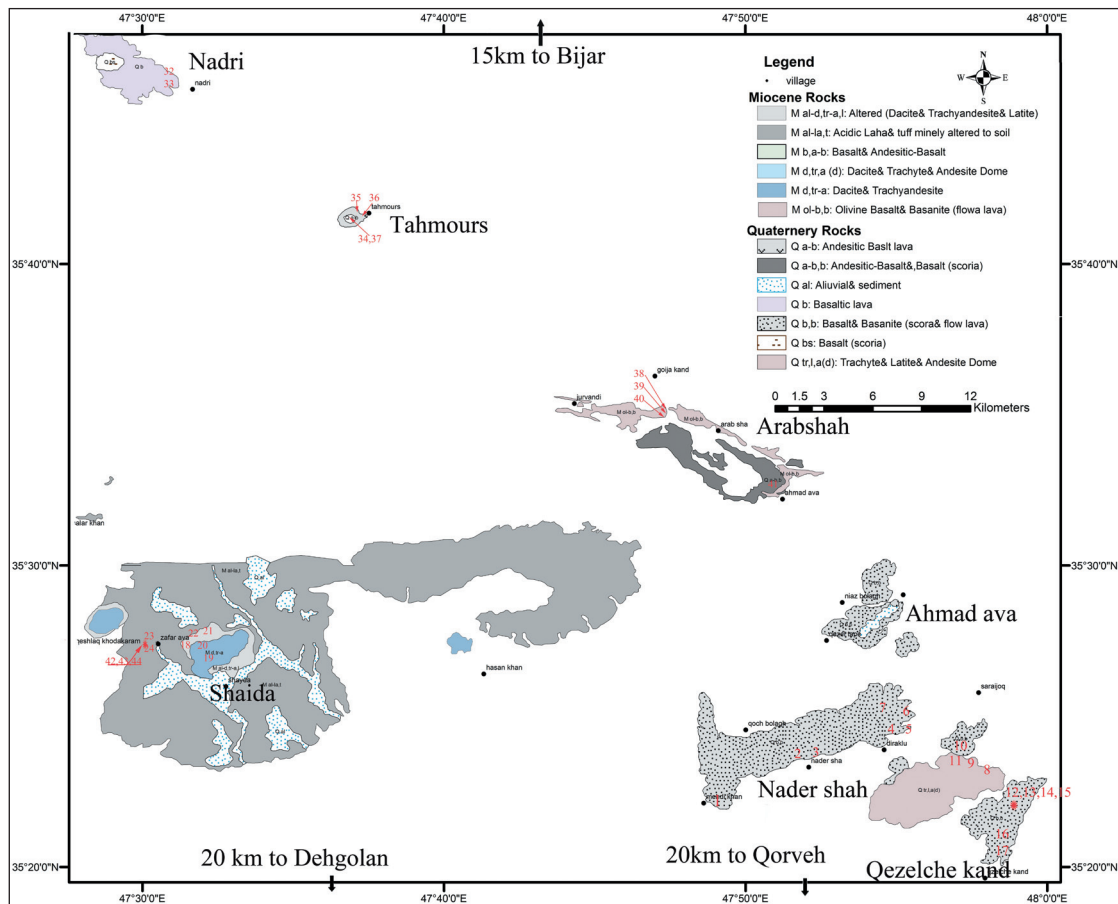
منطقه مورد مطالعه در مرز بخش شمالی زون سنندج- سیرجان با زون ایران مرکزی واقع شده است. مجموعه آتشفشان‌های جوان خاور کردستان به دو بخش میوسن و کواترنری قابل تقسیم است که بخش میوسن شامل داسیت و آندزیت‌های کالک‌آلکالن در شمال دهگلان است (معین وزیری، ۱۳۷۵؛ Boccaletti et al., 1977). بخش کواترنری در محور قروه-بیجار واقع شده و شامل بیش از ده آتشفشان مجزاست که هدف اصلی این مطالعه هستند (شکل ۱). این مجموعه اخیر دو قطب ترکیبی دارد که ترکیب قطب غالب، بازائیتی-تفریتی آلکالن است و بخش کوچک‌تر، ترکیب حدواسط-اسیدی کالک‌آلکالن (تراکیت و لایت) دارد (معین وزیری، ۱۳۷۵؛ ملکوتیان و همکاران، ۱۳۸۶؛ Allen et al., 2013; Azizi et al., 2014; Boccaletti et al., 1977). بخش اسیدی فاقد بافت حباب‌دار و غالباً به‌صورت گدازه بوده در حالی که در آتشفشان‌های بازیک بیشتر فوران‌ها به‌صورت اسکوری و کمتر گدازه‌ای است. در دو مورد آتشفشان نادرشاه و عربشاه یک فاز گدازه‌ای بزرگ نیز دیده می‌شود. واحدهای گدازه‌ای به شدت روان‌رو هستند. به‌طوری که در آتشفشان نادرشاه افق مورد بحث حدود ۱۳ کیلومتر جاری شده است. در حالی که ضخامت

کشیده و جهت‌دار دیده می‌شود. خصوصیات ریخت‌شناسی حباب‌ها در نمونه دستی، میکروسکوپی و SEM به صورت یکسان تکرار شده است (شکل‌های ۲ و ۳). چنانکه مشاهده می‌شود حباب‌ها در ۳ مقیاس تصویری ارائه شده با یک فرم واحد، ولی در اندازه‌های متفاوت تکرار می‌شوند و پدیده فراکتالی بودن رشد حباب‌ها را نشان می‌دهد.

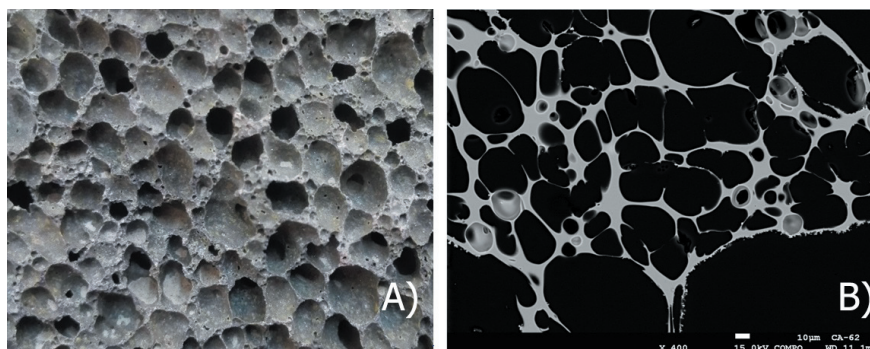
ریخت‌شناسی بسیار شاخص این آتشفشان‌ها و تنوع مواد آذرآواری شامل خاکستر، لاپیلی، لاهار، بمب‌های متنوع و قطعات در اندازه‌های متفاوت یک زمین‌سایت کمیاب را به وجود آورده است. هنوز آثار خروج گازهای فومرولی در زمستان‌ها به واسطه ذوب برف در محل خروج گاز، قابل مشاهده است. هر چند معدنکاری در سال‌های اخیر به شدت چهره آتشفشان‌ها را مخدوش کرده؛ با این وصف دسترسی به عمق واحدها را هم ممکن کرده است.

این واحد ۱۰ تا ۱۵ متر است. افق‌های گدازه‌ای کوچک‌تر نیز محصور در افق‌های اسکوری دیده می‌شوند.

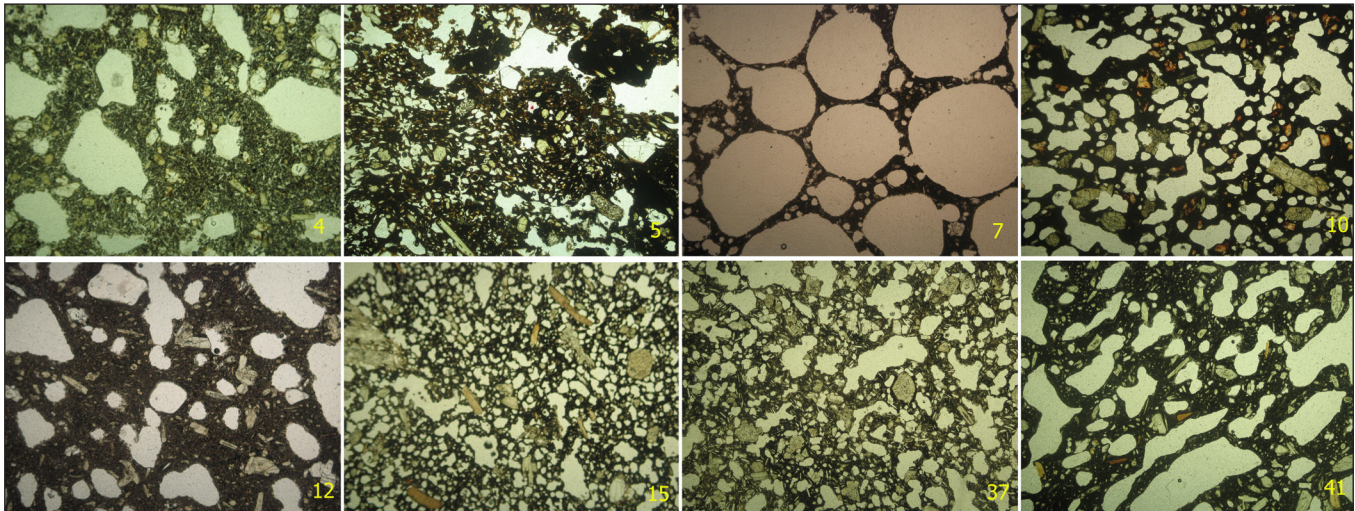
شکل دهانه آتشفشان‌ها و پرتابه‌های فوران‌ها تا حدود زیادی حفظ شده است. این آتشفشان‌ها چینه‌ای هستند. به طوری که تا حدود زیادی مراحل مختلف فوران قابل تفکیک است. واحد اسکوری بیشتر حول دهانه فرو افتاده است. با این وصف در مواردی قطعات اسکوری حتی بیش از یک کیلومتر نیز از محل دهانه پرتاب شده‌اند. مرتفع‌ترین مخروط اسکوری در شمال روستای قزلچه کند با ارتفاع ۲۰۰ متر از زمین‌های اطراف دیده می‌شود. واحدهای اسکوری گاهی سرشار از بیگانه‌سنگ‌های متنوع با جنس‌های مافیک، گرانیتویدی، گنیسی و رسوبی هستند (شیخ‌ذکریایی و همکاران، ۱۳۹۳). در بررسی نمونه‌های دستی اسکوری‌ها، اشکال حباب به صورت کروی کامل (شکل ۲)، بیضی کوتاه، بیضی کشیده و گاهی حباب‌های بی‌شکل



شکل ۱- تصویر واحدهای آتشفشانی خاور کردستان، محور قروه بیجار (اقتباس از فنودی و صدیقی، ۱۳۸۴ و حسینی و همکاران، ۱۳۷۹). محل نمونه‌برداری‌ها با شماره نمونه مشخص شده است.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپی و SEM از اسکوری شماره ۷ خاور کردستان. (A) تصویر میکروسکوپی حباب‌ها (طول تصویر ۶ سانتی‌متر)؛ (B) تصویر SEM.



شکل ۳- تصویر سنگ نگاری نمونه‌های انتخابی جهت آنالیز توزیع اندازه حباب‌ها. به‌طور کلی همه نمونه‌ها دارای کانی‌های الیوین و کلینوپیروکسن هستند. در مواردی نیز کانی پلاژیوکلاز و بیوتیت دیده می‌شود (نمونه‌های ۴، ۵، ۱۰، ۱۲ و ۳۷ دارای الیوین و کلینوپیروکسن با خمیره شیشه‌ای و گاهی دارای میکروولیت پلاژیوکلاز هستند). نمونه ۷ دارای الیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز با خمیره شیشه‌ای، نمونه ۱۵ دارای الیوین، کلینوپیروکسن، بیوتیت و پلاژیوکلاز با خمیره شیشه‌ای هستند. بافت آمیگدالوئیدال - شیشه‌ای بافت غالب همه نمونه‌هاست. ایدینگزیتی شدن الیوین در برخی از نمونه‌ها دیده می‌شود. اندازه همه بلورها بیشتر ریز و زیر دو میلی‌متر و طول تصاویر ۶/۶ میلی‌متر است.

۳- روش مطالعه

افقی‌های گدازه‌ای بازیک فاقد حباب نیستند. با این وصف این مطالعه روی واحدهای اسکوری متمرکز شده است. پس از بررسی نمونه‌های متعدد، از ۸ آتشفشان دارای مخروط اسکوری ۴۴ نمونه انتخاب و تهیه مقطع انجام شد. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری، برای انجام آنالیز کمی توزیع اندازه حباب از نمونه‌های هر مخروط نمونه میانگین انتخاب و عکس‌برداری میکروسکوپی و یک نمونه تصویر SEM تهیه شد (شکل‌های ۲ و ۳). از هر مقطع به منظور در اختیار داشتن جامعه آماری مناسب از حباب‌ها یک یا چند تصویر میکروسکوپی - دیجیتال با عدسی شیئی ۲/۵ تهیه شد. عکس‌های هر نمونه در کنار هم چیده شد تا یک عکس واحد به دست بیاید؛ آن‌گاه با استفاده از نرم‌افزار Illustrator حباب‌ها رسم شدند.

با استفاده از نرم‌افزار Image J تعداد کل حباب‌ها و تعداد در هر بازه شمارش و دسته‌بندی شد. سپس با توجه به اطلاعات به دست آمده از فراوانی و اندازه حباب‌ها، نمودار $\ln(\text{population density})$ در مقابل اندازه حباب بر اساس روش ارائه شده توسط Marsh (1988) رسم شد. واحد اندازه‌گیری شده برای حباب‌ها mm و برای مقیاس چگالی تجمعی mm^{-4} است. فاکتور گردشدگی یک برای تمام تبدیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. عکس‌های دوبعدی تهیه شده در نرم‌افزار Image J پردازش می‌شود. این نرم‌افزار تعداد و اندازه حباب‌ها را شمارش می‌کند و مساحت کل محدوده عکس، که حباب‌ها در آن وجود دارد را اندازه می‌گیرد. سرانجام در نرم‌افزار CSD correlations با توجه به شکل دوبعدی، تصویر سه‌بعدی حباب‌ها بازسازی و نمودار لگاریتمی رسم شده است. هر چند نرم‌افزار CSD بیشتر برای بلورها به کار می‌رود ولی از آنجایی که هسته‌بندی و رشد حباب‌ها نیز شبیه بلورها و شکل حباب‌ها مانند بلورها معلول شرایط حاکم بر ماگما و نحوه سرد شدن و فوران آن است لذا این روش برای حباب‌ها نیز قابل استفاده است. با این حال هدف از این مقاله، استفاده از توزیع اندازه حباب‌ها (BSDs) در سنگ‌های حباب‌دار و برآورد فرایند فوران است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار CSDslice نسبت میانگین قطرهای حباب‌ها (S:I:L) برآورد شد. از ۵ منحنی و نسبت‌های مرتبط با آنها بهترین منحنی به عنوان منحنی پیشنهادی اسکوره‌های آتشفشان‌های کواترنری کردستان در هر مخروط انتخاب شد.

۴- بحث

مدل‌های تئوری و مکانیزم‌های متفاوتی برای انواع مختلف توزیع حباب پیشنهاد شده است که (Blower et al. (2002) با جمع‌بندی و تلفیق مدل‌های پراکنده قبلی مکانیزم واحدی را پیشنهاد داده‌اند؛ در صورت عدم به هم پیوستن حباب‌ها، فرم‌های یونی‌مدال، پلی‌مدال، توزیع نمایی (Exponential) و قانون توانی (Power Law) BSD به‌طور رایج، و دو توزیع نمایی و توانی در بعضی فوران‌ها تشکیل می‌شوند. همچنین این محققین ابراز داشته‌اند که توسعه فرم‌های توزیع حباب از یونی‌مدال به قانون توانی به‌صورت خطی و با افزایش تعداد رخداد‌های مجزای هسته‌بندی است.

۴-۱. توزیع اندازه حباب پلی‌مدال

در روش توزیع اندازه حباب‌ها با استفاده از نرم‌افزار Image J جمعیت حباب‌ها شمارش و در دو بعد اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، با توجه به تصاویر دوبعدی حباب‌ها، تصاویر سه‌بعدی آنها بازسازی می‌شود. برای این منظور کل حباب‌ها محاسبه و وسعت منطقه‌ای که حباب‌ها در آن شمارش شده‌اند نیز اندازه‌گیری شد (جدول ۱). در مجموع تعداد ۳۵۶۰ حباب ترسیم و شمارش شدند که کمترین تعداد حباب در نمونه ۴ تا ۳۵ حباب و بیشترین تعداد در نمونه شمار ۷ با ۱۰۵۶ حباب شمارش و اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

برای هر نمونه بسته به اختلاف اندازه حباب‌ها، بازه‌هایی تعریف و تعداد حباب‌های موجود در آن بازه شمارش شد (جدول ۳). اندازه‌گیری تعداد حباب‌ها در هر نمونه نشان‌دهنده وجود ۲ تا ۵ نسل در نمونه‌های متفاوت است (شکل ۴). نمونه‌های مورد بررسی به لحاظ فرم، فراوانی و تعداد نسل حباب با هم متفاوت هستند. با این وجود در بازه‌های مشخصی دارای روند افزایشی و کاهش معنی‌داری هستند. تعداد حباب در بازه‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۶۳، ۰/۰۰۶۳، ۰/۰۶۳ و ۰/۶۳ افزایش در بازه‌های ۰/۰۰۰۶، ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۰۴، ۰/۰۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۳۹۸ و ۱ به شدت کاهش می‌یابد (شکل ۵). این قله‌ها و قعرها در شکل ۵ به خوبی نسل‌های هم‌ارز را در نمونه‌های متفاوت نشان می‌دهد.

در بازه‌های خاصی از برخی نمونه‌ها نبود حباب دیده می‌شود ولی در برخی نمونه‌های دیگر در همین بازه، حباب‌های اندکی شناسایی شده است. توزیع‌های شامل یک یا چند قله و قعر جدا از هم، به وسیله بعضی محققان گزارش شده است

۲ قله را نشان می‌دهد که یکی را به حین فوران و دیگری را به مرحله بعدی و به هم پیوستگی حباب‌ها نسبت می‌دهند. با این وجود به نظر می‌رسد اگر جامعه آماری مورد بررسی افزایش یابد در بازه‌های عدم وجود حباب نیز مواردی شناسایی خواهد شد. به عنوان مثال در بازه ۰/۳۹۸ و ۰/۱۵۸ از نمونه‌های خاور کردستان در چند نمونه عدم شناسایی حباب را نشان می‌دهد، ولی در سایر نمونه‌ها در همین بازه حباب شناسایی شده است. لیکن این بازه‌ها در همه نمونه‌ها قعر را نشان می‌دهند و حباب با اندازه‌های مذکور در حداقل شرایط تشکیل قرار گرفته است (شکل‌های ۴ و ۵).

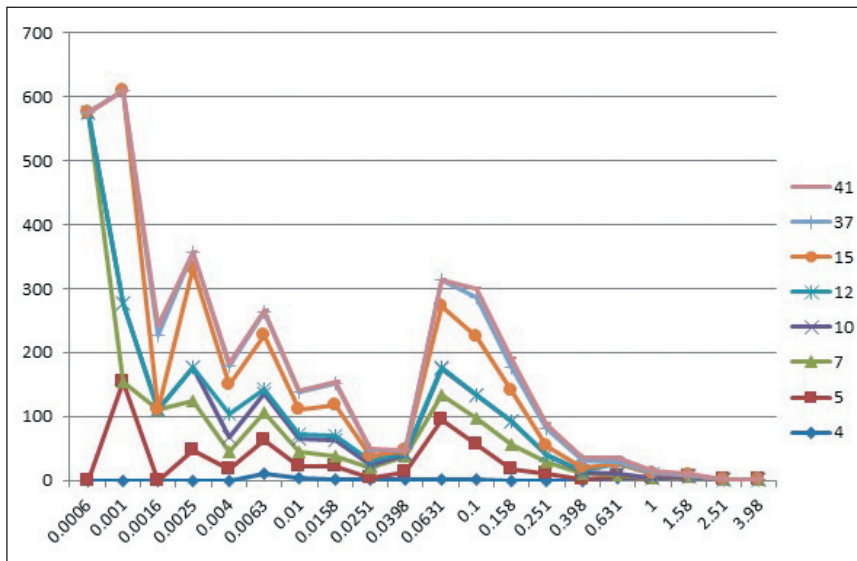
(Sparks and Brazier, 1987; Whitham and Sparks, 1986; Orsi et al., 1992) که معمولاً قله‌های مختلف را به حوادث جدا مرتبط می‌دانند. به عنوان مثال BSD ارائه شده توسط Sparks and Brazier (1987) ۳ قله جداگانه را نشان می‌دهد. محققان بزرگ‌ترین قله‌ها را به هسته‌بندی در آشیانه ماگمایی و قبل از فوران و قله با حباب‌های در اندازه متوسط را به حین فوران نسبت می‌دهند. ولی قله‌های ریز به نظر Whitham and Sparks (1986) جداکننده یک جمعیت حباب محسوب نمی‌شوند بلکه به سبب دیافراگم بین حبابها هستند. به عنوان مثال داده‌های Orsi et al. (1992)

جدول ۱- مناطق اندازه‌گیری شده در هر مقطع.

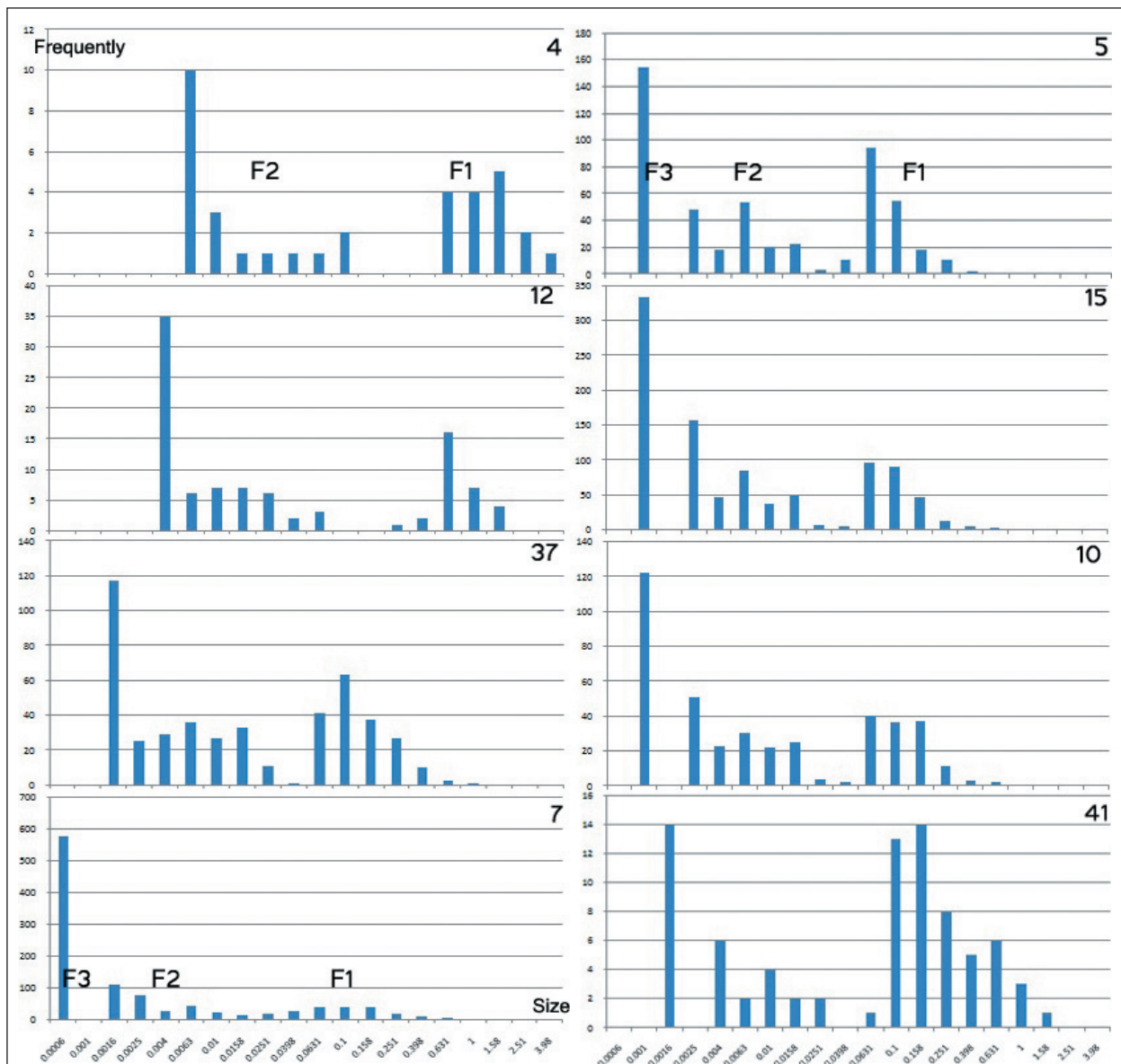
s.n	Area (mm ²)	mean	Major	Minor
4	80.622	174.495	11.699	8.774
5	3.499	177.124	2.437	1.828
7	37.791	155.235	7.312	6.581
10	2.982	132.451	2.25	1.687
12	55.987	165.222	9.749	7.312
15	3.499	138.952	2.437	1.828
37	5.039	144.537	2.925	2.194
41	7.873	148.906	3.656	2.742

جدول ۲- فراوانی حباب‌های اندازه گرفته شده در هر بازه و جمع کل حباب‌ها.

S.N	4	5	7	10	12	15	37	41
0.0006	0	0	575	0	0	0	0	0
0.001	0	154	0	122	0	333	0	0
0.0016	0	0	111	0	0	0	117	14
0.0025	0	48	77	51	0	156	25	0
0.004	0	18	27	23	35	46	29	6
0.0063	10	53	43	30	6	85	36	2
0.01	3	20	21	22	7	37	27	4
0.0158	1	22	15	25	7	48	33	2
0.0251	1	3	16	4	6	7	11	2
0.0398	1	11	26	2	2	5	1	0
0.0631	1	94	39	40	3	95	41	1
0.1	2	55	40	36	0	91	63	13
0.158	0	18	38	37	0	47	37	14
0.251	0	11	17	11	1	13	27	8
0.398	0	2	8	3	2	5	10	5
0.631	4	1	3	2	16	1	2	6
1	4	0	0	0	7	0	1	3
1.58	5	0	0	0	4	0	0	1
2.51	2	0	0	0	0	0	0	0
3.98	1	0	0	0	0	0	0	0
Sum	35	510	1056	408	96	969	460	89



شکل ۴- نمودار فراوانی نسبت به اندازه حباب‌ها در ۸ نمونه از آتشفشان‌های کواترنری خاور کردستان. وجود ۲ تا ۵ نسل در این نمودار به خوبی قابل تفکیک است.



شکل ۵- نمودار فراوانی حباب‌ها در بازه‌های متفاوت. در نمونه ۴، ۲ نسل حباب، در نمونه ۱۲، ۳ نسل، در نمونه‌های ۵، ۷ و ۳۷، ۴ نسل و در سایر نمونه‌ها، ۵ نسل حباب قابل تفکیک است.

با توجه به اندازه‌های متفاوت حباب‌ها در هر نسل می‌توان گفت که هر نسل تحت فشارهای متفاوت و در نتیجه در اعماق متفاوتی متولد شده است و رشدی متناسب با میزان گاز موجود در ماگما داشته‌اند. آخرین نسل در نمونه‌ها یعنی ریزترین حباب‌ها، در بازه‌ای بسیار کوتاه (۰/۰۰۱) از لحاظ اندازه ولی با فراوانی بسیار بالاتر نسبت به سایر بازه‌ها دیده می‌شوند (شکل ۵). این رویداد مبین چگالی هسته‌بندی با سرعت زیاد ولی رشد بسیار کم است که می‌تواند در نتیجه سرد شدن سریع یا کاهش فشار ناگهانی حاکم بر ماگما به میزان کم باشد. نسل اول میزان هسته‌بندی کم و زمان رشد بیشتری داشته‌اند؛ به این معنی که کاهش فشار و دما تدریجی بوده است.

نسل‌های میانی در مراحل پایانی استراحت ماگما در آشیانه و به ویژه در دودکش آتشفشان تشکیل شده‌اند؛ لذا سرعت هسته‌بندی و نرخ رشد متوسط داشته‌اند. این نسل‌ها برای رشد به نسبت نسل اول دو عامل محدود کننده داشته‌اند: اول وجود حباب‌های نسل اول که بخش عمده فضا را اشغال کرده‌اند و دوم افزایش نرخ کاهش فشار و دما در ماگما. زمان تشکیل رشد حباب‌های نسل آخر مبهم‌تر بوده و ممکن است در دو شرایط متفاوت تشکیل شده باشند: فرض اول این است که ممکن است در مراحل اولیه تشکیل ماگما تشکیل شوند ولی محل هسته‌بندی آنها به صورت تصادفی بین چند حباب نزدیک به هم بوده باشد و به علت نبود فضا قادر به رشد نبوده و لذا کوچک مانده‌اند (Sparks and Brazier, 1987) که در این صورت ممکن است در هر زمان از طول دوره صعود و سرد شدن ماگما هسته‌بندی کرده باشند. فرض دوم این است که در لحظه خروج ماگما از دودکش به جو که فشار یک باره افت می‌کند، نسل آخر حباب‌ها با نرخ بالا هسته‌بندی کرده باشند. در این شرایط سرد شدن یک باره مانع از رشد حباب می‌شود.

نسل‌های میانی در مراحل پایانی استراحت ماگما در آشیانه و به ویژه در دودکش آتشفشان تشکیل شده‌اند؛ لذا سرعت هسته‌بندی و نرخ رشد متوسط داشته‌اند. این نسل‌ها برای رشد به نسبت نسل اول دو عامل محدود کننده داشته‌اند: اول وجود حباب‌های نسل اول که بخش عمده فضا را اشغال کرده‌اند و دوم افزایش نرخ کاهش فشار و دما در ماگما. زمان تشکیل رشد حباب‌های نسل آخر مبهم‌تر بوده و ممکن است در دو شرایط متفاوت تشکیل شده باشند: فرض اول این است که ممکن است در مراحل اولیه تشکیل ماگما تشکیل شوند ولی محل هسته‌بندی آنها به صورت تصادفی بین چند حباب نزدیک به هم بوده باشد و به علت نبود فضا قادر به رشد نبوده و لذا کوچک مانده‌اند (Sparks and Brazier, 1987) که در این صورت ممکن است در هر زمان از طول دوره صعود و سرد شدن ماگما هسته‌بندی کرده باشند. فرض دوم این است که در لحظه خروج ماگما از دودکش به جو که فشار یک باره افت می‌کند، نسل آخر حباب‌ها با نرخ بالا هسته‌بندی کرده باشند. در این شرایط سرد شدن یک باره مانع از رشد حباب می‌شود.

۴-۲. توزیع نمایی اندازه حباب‌ها

در این تئوری فرض بر این است که سیستم در حالت پایدار است و BSD با زمان تغییر نمی‌کند (Marsh, 1988). بر اساس فراوانی و اندازه حباب‌ها نمودارهای $\ln(\text{population density})$ در مقابل $\ln(\text{Bubble size})$ ، لگاریتم نرمال، هیستوگرام و فراکتالی $\ln(\text{Grains} < \text{Size}) / \ln(\text{Size})$ ترسیم می‌شود. رابطه مستقیم لگاریتمی، مربوط به تبلور پیوسته و یکنواخت است که توسط سرعت رشد کم و بیش ثابت ایجاد می‌شود و اندازه حباب‌ها نیز تأثیری در آن ندارد. قانون بقا برای تعادل رشد حباب‌ها چه در درون و چه در خارج یک گروه معین که حاصل آن تولید یک توزیع نمایی است با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$N_0 = \exp(-R/Gt) N(R) \alpha \quad (1)$$

که در آن N_0 چگالی هسته‌بندی، t زمان مورد نیاز برای رشد حباب و برای

چگالی هسته‌بندی برای نمونه‌های مورد مطالعه بررسی در جدول ۳ آورده شده است که نمونه ۳۷ بیشترین و نمونه ۷ کمترین چگالی هسته‌بندی را دارند. توزیع اندازه حباب‌ها به صورت یک خط راست در سیستم لگاریتمی ظاهر می‌شود. بر اساس تئوری بیان شده، منحنی توزیع اندازه حباب‌ها (BSD) برای هر سه جهت در نمونه مورد نظر رسم شد (شکل ۶).

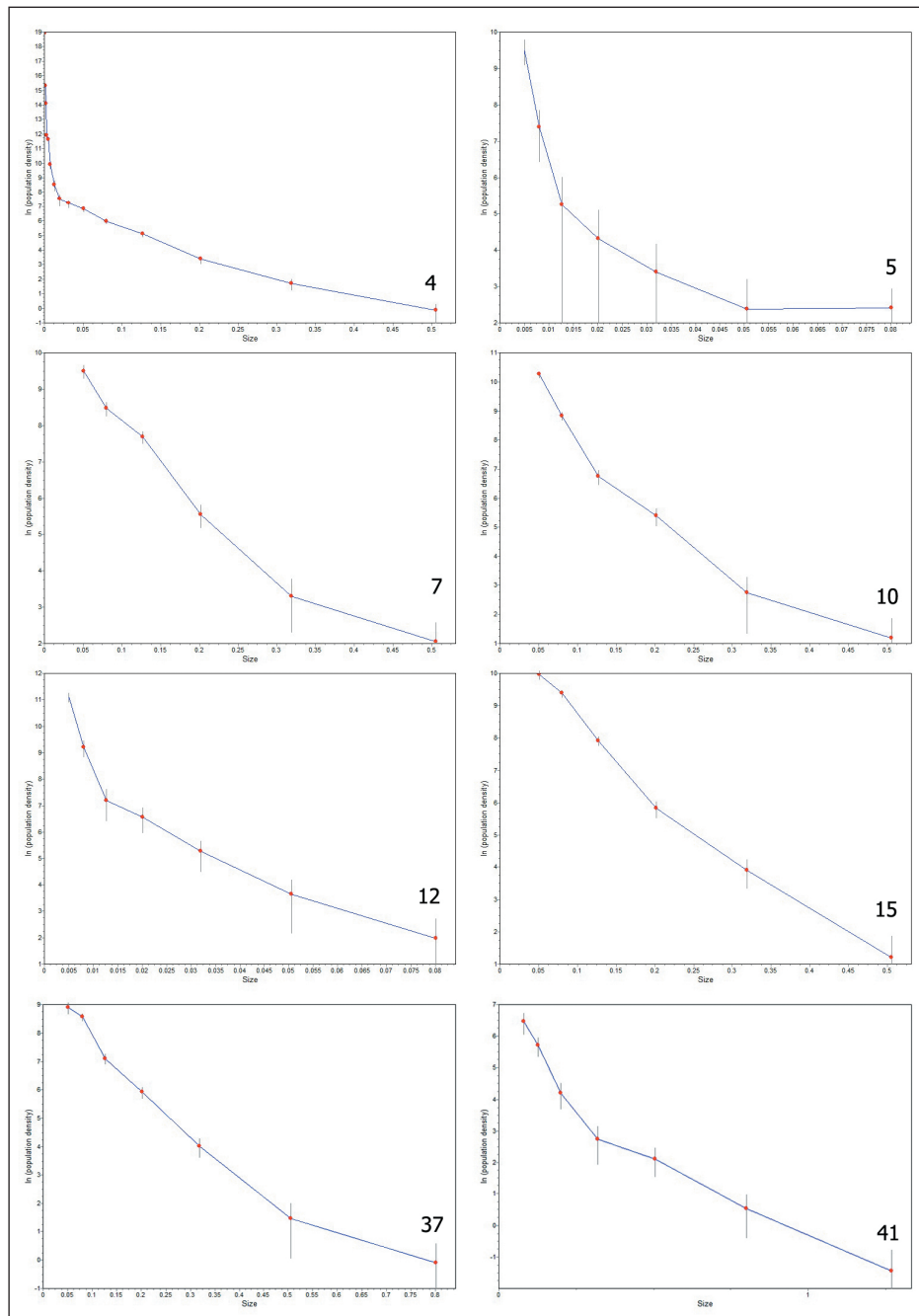
از طریق اندازه‌گیری ابعاد حباب، چگالی هسته‌بندی و شیب خط به دست می‌آید. اگر نمودار فراوانی لگاریتمی حباب‌ها (بر حسب mm^{-4}) در برابر اندازه حباب‌ها (بر حسب mm) رسم شود، یک رابطه لگاریتمی خطی - توزیعی با افزایش اندازه حباب به دست می‌آید (شکل ۶). نقطه تقاطع خط با محور چگالی تجمعی، چگالی هسته‌بندی اولیه (n^0) را نشان می‌دهد. شیب خط (M) را می‌توان از منفی کسر پارامتر Gt (سرعت رشد \times زمان رشد) به دست آورد، که نشانگر روند اندازه حباب‌ها در نمودار توزیع اندازه حباب است (جدول ۲).

$$M = -1/Gt \quad (2)$$

شیب خط M را می‌توان از منفی کسر پارامتر Gt (سرعت رشد \times زمان رشد) به دست آورد.

جدول ۳- شیب خط و محل تقاطع توزیع اندازه حباب‌ها محاسبه شده در نمودار خطی BSD در نمونه‌های مورد مطالعه.

شیب خط	چگالی هسته‌بندی $\text{CM}^{-3} \text{S}^{-1}$	محل‌های تقاطع بر اکندگی اندازه بلور (n^0)	نمونه
-7.93	6.2×10^2	7.60	4
-13.7	5.4×10^4	11.76	5
-91.8	2.1×10^2	17.3	7
-20.4	8.1×10^4	24.8	10
-11.8	5.5×10^2	9.56	12
-28.1	3.1×10^5	11.71	15
-18.9	2.4×10^5	9.86	37
-8.85	5.3×10^2	6.68	41



شکل ۶- نمودارهای لگاریتمی چگالی تجمعی (ln population density) در مقابل اندازه حباب‌ها در اسکویری‌های خاور کردستان.

۴-۳. سهم حجمی حباب‌ها

سهم حجمی حباب‌ها میزان حجم اشغال شده به وسیله مجموع حباب‌ها در سنگ است که در واحد اسکویری با استفاده از محاسبات ریاضی برای هر کدام از نمونه‌ها محاسبه شده است (فرمول ۳) (Morgan and Jerram, 2006):

$$V_i = \sigma \int_0^{\infty} n_i(L) L^3 \quad (3)$$

که می‌تواند به صورت زیر کامل شود:

$$V_i = 6\sigma n_{i0} C_i^4 \quad (4)$$

که در آن C_i ثابت یک طول مشخص، n_{i0} چگالی هسته‌بندی نهایی و σ فاکتور شکلی برابر با نسبتی از حجم حباب‌هاست که طول L دارند. سهم حجمی از یک فاز مشخص از معادله ۴ قابل محاسبه است. حباب‌ها با حجم‌های مختلف درصدی از کل سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. همانطور که مشخص است در نمونه ۷ حباب‌ها رشد کامل و بلوغ یافته‌ای دارند و غالباً توانسته‌اند فضای موجود یعنی حدود ۸۴

درصد کل فضا را به خوبی اشغال کنند؛ در صورتی که در نمونه‌های دیگر حدود شصت درصد و کمتر را اشغال کرده‌اند (جدول ۴). این محاسبه مشخص می‌کند که میزان سهم حجمی حباب‌ها وابسته به میزان رشد و بلوغ یافتگی حباب‌هاست نه تعداد حباب. رشد و بلوغ حباب‌ها مستلزم وجود زمان کافی در هنگام کاهش فشار و دما در آشیانه ماگمایی است.

۴-۴. توسعه رشد حباب‌ها و مدل فراکتالی

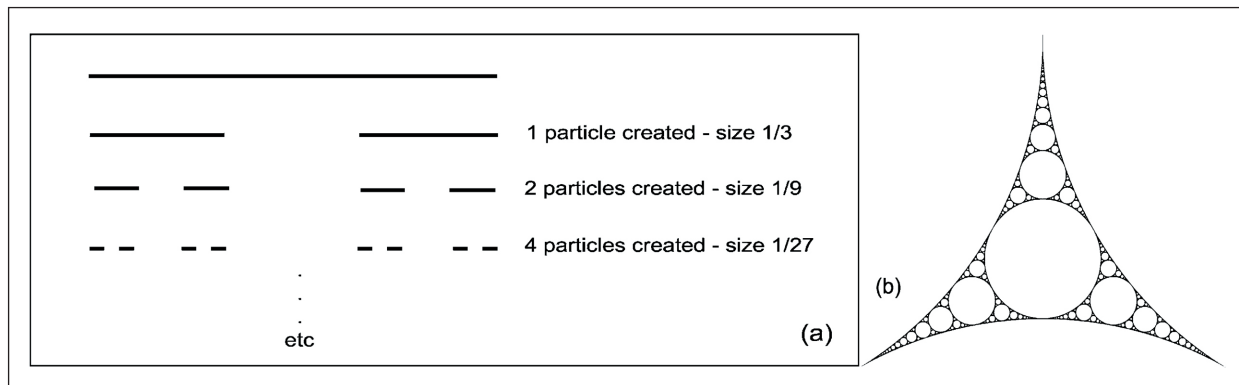
همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، مدل رشد حباب‌ها در نمونه دستی با نمونه میکروسکوپی و SEM یک روند عمومی را دنبال می‌کند که این خود شاهدهی از پدیده فراکتال است. در بررسی یک مثال آزمایشگاهی پدیده فراکتالی، شرایط هسته‌بندی و رشد به خوبی مشاهده و مدل پردازی شده است. طبق مدل Blower et al. (2002) حباب‌ها در نسل اول به صورت تصادفی هسته‌بندی می‌کنند. به این معنی که ممکن است هسته‌ها در هر محلی از ماگما به صورت کاملاً بی نظم

نسل سوم به بعد نیز همانند نسل دوم هسته‌بندی و رشد خواهند کرد. طبق این مدل پتانسیل رشد از نسل اول به آخر کوچک و کوچک تر خواهد شد (شکل ۷). تغییرات ذکر شده بیانگر مدل فراکتالی در پروسه تشکیل حباب‌هاست که می‌توان با روابط ریاضی به خوبی آن را بیان کرد (Blower et al., 2002). به طوری که مشاهده می‌شود نسل‌های متأخر ۳ برابر کوچک‌تر از نسل‌های قبل خود هستند ولی ۲ برابر تعداد دارند. در بین نمونه‌های مطالعه شده نمونه ۷ یک مثال واقعی برای این مدل است که به خوبی این مدل پیشنهادی را اثبات می‌کند (شکل‌های ۲ و ۳-C).

هسته‌بندی کنند که ممکن است برخی بسیار نزدیک به هم و برخی دیگر دور از هم باشند. با این وجود رشد این حباب‌ها کاملاً منظم و تحت تأثیر میزان فضای خالی اطراف و گاز اشباع موجود در آن است. به‌طور مثال اگر یک حباب در وسط ۳ حباب نزدیک به هم هسته‌بندی کند پتانسیل رشد نخواهد داشت ولی در صورت داشتن فضا در یک یا چند بعد رشد خواهد کرد که طبیعتاً افزایش اندازه حباب در جهت فضای خالی خواهد بود. نسل دوم هسته‌بندی تصادفی نخواهد بود و ناچار به تبعیت از نسل اول است. نسل دوم در فضاهای تصرف نشده توسط نسل اول؛ و

جدول ۴- مقایسه تعداد بلورها و میزان سهم حجمی بر حسب درصد.

S.N	4	5	7	10	12	15	37	41
تعداد حباب‌ها	89	460	969	96	408	1056	510	35
سهم حجمی حباب‌ها	40.5	48.3	84.2	57.4	54.8	59.6	49.2	63.2



شکل ۷- پدیده فراکتال به صورت روابط ریاضی و تصویر برای رشد حباب‌ها در مدل (Blower et al. (2002). (a) کاهش توانی اندازه با افزایش نسل‌های هسته‌بندی؛ (b) تصویر شماتیک از هسته‌بندی و رشد حباب‌ها طبق روابط a.

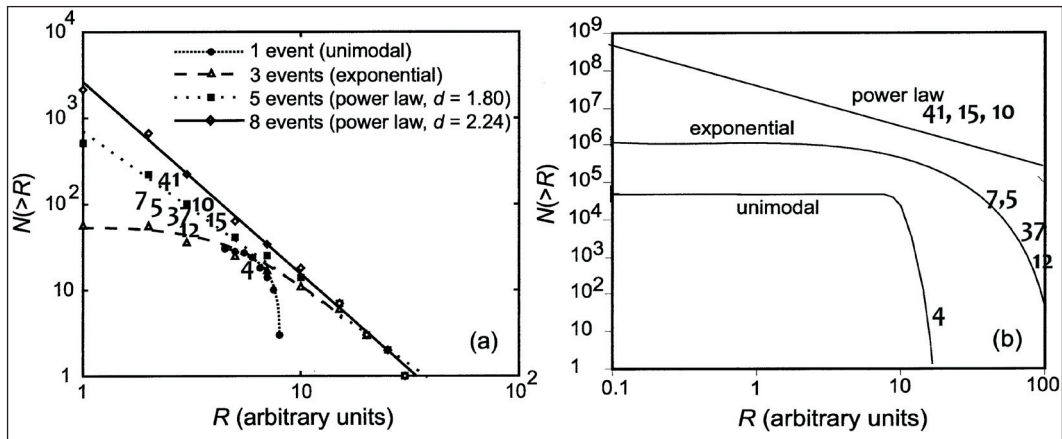
می‌شود (۷۰۳ محاسبه شکل پیش فرض در نرم‌افزار وجود دارد). در نتیجه این مقایسه حباب‌های مشابه دسته‌بندی و در ۵ دسته نهایی در نمودار CSDslice رسم شدند. نسبت طول قطرهای هر ۵ دسته نیز به صورت منفک محاسبه (جدول ۵) و بهترین فرم پیشنهادی برای هر نمونه ارائه شد. همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود بیشترین جمعیت حباب‌ها غالباً دارای نسبت ۱:۱:۱ و یا نزدیک به آن هستند. این موضوع به نسل آخر حباب‌ها مربوط می‌شود که تعداد زیاد و اندازه کوچک دارند. این نسبت نیز گویای فشار تقریباً یکسان حاکم بر رشد این نسل از حباب‌هاست که می‌تواند دلیلی بر تشکیل آنها در حین فوران و در فضای آزاد باشد. با استفاده از نرم‌افزار Matlab و با نسبت قطرهای به دست آمده شکل حباب‌های پیشینه در هر نمونه بازسازی شد (شکل ۹). نمونه ۷ با وجود اینکه در تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی بسیار نزدیک به کره است لیکن حباب‌ها کاملاً کروی نیستند و در جوهی دارای کشیدگی نسبی هستند. طبق مطالعات Boccaletti et al. (1977) فوران اسکوری‌های خاور کردستان در مدت زمان ۱/۳ تا ۰/۵ میلیون سال قبل رخ داده است. با توجه به حفظ شدن ریخت مخروط‌های آتشفشانی، خروج اسکوری‌ها از دهانه آتشفشانی غالباً قائم و گاه با زاویه کم (حداکثر ۱۰ درجه) بوده است. شکل دهانه آتشفشان‌ها بیشتر دایره‌ای است که این مسئله در شکل حباب‌ها تا حدودی مشخص است. از آنجایی که آتشفشان‌های خاور کردستان غالباً بازیک و فوق بازیک آلکالن هستند، به نظر می‌رسد که از اعماق زیاد نشأت گرفته باشند از طرفی نبود درشت‌بلور در خیلی از اسکوری‌ها مبین نبود آشیانه‌های بین راهی و نزدیک به سطح است. نسل اول حباب‌ها که در آشیانه ماگمایی و نسل آخر که بعد از فوران در جو شکل گرفته‌اند، شکل نزدیک به کروی دارند؛ چون فشار در دو محیط یاد شده تقریباً یکسان است.

۴-۵. نتایج مدل عددی

بر اساس این مدل شکل توزیع اندازه حباب‌ها به تعداد رخداد هسته‌بندی بستگی دارد که در طول رشد رخ می‌دهد. اگر فقط یک رخداد هسته‌بندی وجود داشته باشد نتیجه BSD یونی مدال است. اگر ۲ یا ۳ رخداد باشد تغییرات پلی مدال است. بیش از سه مرحله رخداد هسته‌زایی، BSD نمایی پدیدار می‌شود (شکل ۸-A) (Marsh, 1988). BSD نمایی با افزایش تعداد رخداد‌های هسته‌بندی به توزیع قانون توانی توسعه پیدا می‌کند. بعد از حدود ۵ رخداد هسته‌زایی توزیع به‌طور پایدار توانی است و دیگر با افزایش تغییری نخواهد کرد (شکل ۸-B) (Blower et al., 2002). در مدل نمونه‌های خاور کردستان از ۲ تا ۵ رخداد هسته‌زایی قابل مشاهده است که طبق این مدل، نمونه ۴ توزیع یونی مدال، نمونه ۱۲ توزیع پلی مدال، نمونه‌های ۵، ۷ و ۳۷ توزیع نمایی و سایر نمونه‌ها توزیع توانی دارند. لازم به ذکر است که رخداد‌های هسته‌زایی در اسکوری‌های خاور کردستان ممکن است بیشتر از تعداد شمارش شده در این مطالعه باشد. به دلیل عدم امکانات کافی در بررسی و شمارش نسل‌های کوچک‌تر از حد شناسایی میکروسکپ پلاریزان شناسایی نشدند. همچنین حباب‌های بزرگ‌تر از اندازه مقطع نازک هم از گردونه محاسبه خارج هستند. بدیهی است اگر بررسی‌ها جامع‌تر باشد تعداد رخداد‌های هسته‌زایی افزایش خواهد یافت.

۴-۶. مدل‌سازی سه‌بعدی حباب‌ها

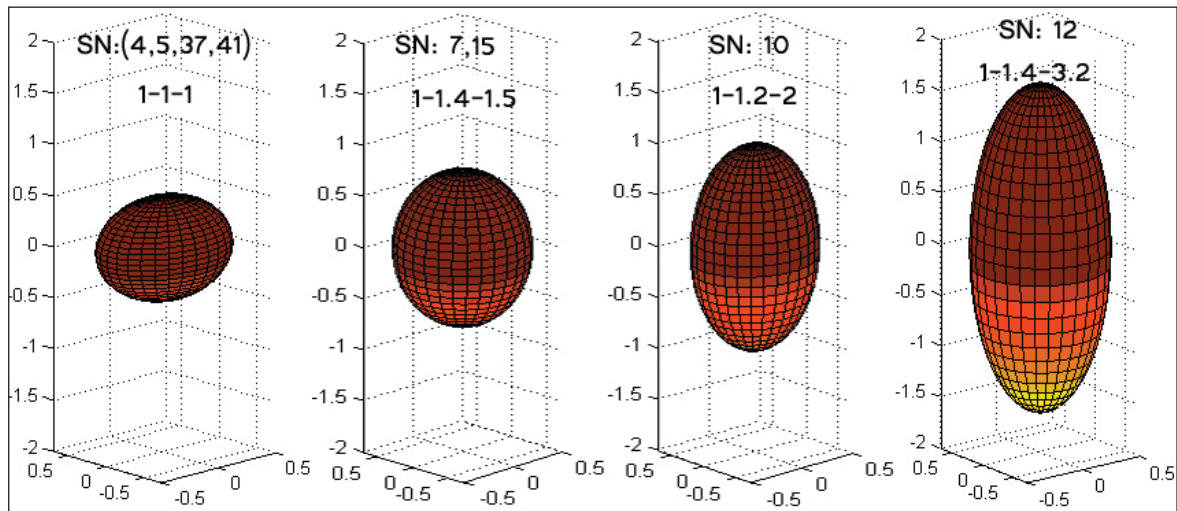
در این مرحله با استفاده از داده‌های خام برگرفته از نرم‌افزار Image J و استفاده از نرم‌افزار CSDslice نسبت طول قطر حباب‌ها (S:I:L) قابل برآورد است (Morgan and Jerram, 2006). در این روش توزیع نسبت طول بزرگ: متوسط: کوچک (S:I:L) حباب‌ها محاسبه و با اشکال پیش فرض موجود در نرم‌افزار مقایسه



شکل ۸- نمودار اجمالی توزیع های پیشرونده حباب با افزایش تعداد رخداد های هسته بندی (Blower et al., 2002).

جدول ۵- نتایج انتخاب نهایی نسبت قطر های حباب ها در نمونه های خاور کردستان.

S. N	4	5	7	10	12	15	37	41
قطر بیضی های مناسب	1-3.2-8	1-1.1-2.8	1-1.4-1.6	1-1.15-2	1-1.5-3.4	1-1.2-2	1-1.1-3.6	1-1-3
	1-3.2-8	1-1.1-2.8	1-1.4-1.6	1-1.15-2	1-1.5-3.4	1-1.2-2	1-1.1-3.6	1-1-3
	1-3.6-8	1-1.15-2.7	1-1.4-2	1-1.15-4.5	1-1.7-9	1-1.4-4	1-1.4-3.8	1-1-1.15
	1-3.4-7	1-1.25-2.7	1-1.5-2	1-1.1-4.5	1-1.7-10	1-1.15-1.9	1-1.3-4.5	1-1-1.15
بیشترین جمعیت	1-1-1	1-1-1	1-1.4-1.5	1-1.2-2	1-1.4-3.2	1-1.15-2	1-1-1	1-1.15-1.15



شکل ۹- تصویر شماتیک بازسازی شده بیشترین جمعیت حباب های موجود در اسکوری های خاور کردستان با استفاده از نرم افزار Matlab بر اساس میانگین قطر هر سه وجه.

۵- نتیجه گیری

حباب ها در واحدهای مختلف آتشفشان های کواترنری خاور کردستان، با وجود شباهت بافت ظاهری، از نظر زمان هسته بندی و رشد تفاوت قابل ملاحظه ای دارند. در ۸ نمونه از این آتشفشان ها، از ۲ تا ۵ نسل حباب شناسایی و شمارش شد. در همه نمونه ها نسل اول چگالی هسته بندی کم و رشد زیاد نسبت به نسل های میانی دارد و نسل های میانی نیز نسبت به نسل آخر دارای هسته بندی پایین و رشد بالا هستند. نسل آخر در نمونه ها دارای هسته بندی وسیع و رشد کم است. نسل های اول و میانی از لحاظ شکل و اندازه تابعی از فشار حاکم بر ماگما در آتشفشان ماگمایی و دودکش هستند. در حالی که نسل سوم بیشتر

نسل های میانی که اشکال بیضی دارند در دودکش آتشفشان تشکیل شده و رشد کرده اند. با توجه به طولانی بودن مسیر دودکش، خیلی از حباب ها فرصت هسته بندی و رشد مناسب داشته اند. فشار در مسیر دودکش در ۳ جهت فضایی متفاوت است. در دهانه های شکافی و صفحه ای طبیعتاً فشار در ۲ بعد کمتر است و حباب ها صفحه ای رشد می کنند (نسل های میانی نمونه ۴). لیکن در دهانه های مدور و حفره ای فشار در ابعاد X و Y فضایی تقریباً یکسان ولی در راستای خروج (محور Z) کمتر است (نمونه های ۱۰ و ۱۲). لذا حباب ها بسته به میزان تفاوت فشار به صورت بیضی کوتاه یا کشیده شکل می گیرند.

آشپانه، دودکش و سطح زمین به صورت فاز جداگانه‌ای هسته‌بندی و رشد کرده‌اند. با توجه به اینکه حباب‌ها در سطوح بالایی آشپانه ماگمایی شروع به شکل‌گیری می‌کنند، می‌توان از روی حباب‌های نسل اول تا حدودی شکل آشپانه ماگمایی را بازسازی کرد.

در خارج دودکش تشکیل می‌شود که فشار یکسان و نرخ کاهش دمای بالا باعث نرخ هسته‌بندی بالا و رشد خیلی کم شده است. فراوانی حباب‌ها در مدل‌های مختلف اسکوری خاور کردستان تابعی از میزان اشباعیت ماگما از گازها در آشپانه است که در سطوح بالای

کتابنگاری

- حسینی، م.، موسوی، ف.، کریمی نلا، م. و سهیلی، م.، ۱۳۷۹- نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بیجار، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- رحیم زاده، ب.، مسعودی، ف. و رنجبر، ش.، ۱۳۹۳- مطالعه ویژگی‌ها و شکل‌گیری حباب‌ها در طی فوران واحد اسکوری آتشفشان دماوند. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۹۲، صفحه ۱۱ تا ۲۲.
- شیخ‌ذکریایی، س. ج.، اشجع اردلان، ا. و طریبی، س.، ۱۳۹۳- پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی بازیک کوه قرینه، شمال خاور قروه باختر ایران. فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست، سال هشتم، شماره ۲۷، تابستان. ص ۶۳.
- فدودی، م. و صدیقی، ا.، ۱۳۸۴- نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بیجار، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- معین‌وزیری، ح.، ۱۳۷۵- دیباچه‌ای بر ماگماتیسیم ایران، انتشارات دانشگاه تربیت معلم (خوارزمی)، ۳۷۴ ص.
- ملکوتیان، س.، وثوقی عابدینی، م.، قربانی، م. و حق‌نظر، ش.، ۱۳۸۶- شواهد ایزوتوپی از پوسته قاره‌ای در سنگ‌های بازیک کواترنری محور قروه- تکاب، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Allen, M. B., Kheirkhah, M., Neill, I., Emami, M. H. and McLeod C. L., 2013- Generation of arc and within-plate chemical signatures in collision zone magmatism: quaternary lavas from Kurdistan Province, Iran *J. Petrol.*, 54, pp. 887-911.
- Azizi, H., Asahara, Y. and Tsuboi, M., 2014- Quaternary high-Nb basalt: existence of young oceanic crust under the sanadaj-Sirjan zone, NW Iran. *International Geology Review*, 56:2, 167-186,
- Blower, J. D., 2001- Degassing Processes in Volcanic Eruptions. Ph.D. Thesis, University of Bristol.
- Blower, J. D., Keating, J. P., Mader, H. M. and Phillips, J. C., 2002- The evolution of bubble size distributions in volcanic eruptions, vol. 120, pp.1-23.
- Boccaletti, M., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Motamed, A., Pasquare, G., Radicati, di Brozolo, F. and Amin Sobhani, E., 1977- Neogene and Quaternary volcanism of the Bijar Area (Western Iran), *Bull. Volcanol.*, Vol. 40, pp. 121-132.
- Burnard, P., 1999- Eruption dynamics of 'popping rock' from vesicle morphologies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 92, 247- 258.
- Cashman, K. V. and Mangan, M. T., 1994- Physical aspects of magmatic degassing. 2. Constraints on vesiculation processes from textural studies of eruptive products. In *Volatiles in Magmas, of Reviews in Mineralogy*, vol. 30, pp. 447-78.
- Gaonac'h, H., Stix, J. and Lovejoy, S., 1996- Scaling elects on vesicle shape, size and heterogeneity of lavas from Mount Etna. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 74, 131-153.
- Giachetti, T., Druitt, T. H., Burgisser, A., Arbaret, L. and Galven, C., 2010- Bubble nucleation, growth and coalescence during the 1997 Volcanoes explosions of Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 193, 215-231.
- Gonnermann, H. M. and Manga, M., 2007- The Fluid Mechanics inside a Volcano. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 39:321-356. Downloaded from arjournals.annualreviews.org by University of California - Berkeley on 12/21/06. For personal use only.
- Heiken, G. and Wohletz, K., 1985- Volcanic Ash. University of California Press. 246 pp.
- Heiken, G., 1972- Morphology and petrography of volcanic ashes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83:1961-1988.
- Higgins, M. D., 2006- Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press. 277pp.
- Klug, C. and Cashman, K. V., 1994- Vesiculation of May 18, 1980, Mount St. Helens magma. *Geology* 22, 468-472.
- Mangan, M. T. and Cashman, K. V., 1996- The structure of basaltic scoria, reticulate, and inferences for vesiculation, foam formation, and fragmentation in lava fountains. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 73, 1-18.
- Mangan, M. T., Cashman, K. V. and Newman, S., 1993- Vesiculation of basaltic magma during eruption. *Geology* 21, 157- 160.
- Marsh, B. D., 1988- Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization I. Theory. *Contrib. Mineral. Petrol.* 99, 277-291.
- McBirney, A. R. and Murase, T., 1970- Factors governing the formation of pyroclastic rocks. *Bull. Volcanol.* 34:372-84.
- Morgan, D. J. and Jerram, D. A., 2006- On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 154,1-7.
- Orsi, G., Gallo, G., Heiken, H., Wohletz, K., Yu, E. and Bonani, G., 1992- A comprehensive study of pumice formation and dispersal: The Cretatio Tephra of Ischia Italy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 53, 329-354.
- Proussevitch, A. A. and Sahagian, D. L., 1996- Dynamics of coupled dilution and decompressive bubble growth in magmatic systems. *J. Geophys. Res.* 101, 17447-17455.
- Rust, A. C., Manga, M. and Cashman, K. V., 2002- Determining low type, shear rate and shear stress in magmas from bubble shapes and orientations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 122 (2003) 111-132.
- Sarda, P. and Graham, D., 1990- Mid-ocean ridge popping rocks: implications for degassing at ridge crests. *Earth Planet. Sci. Lett.* 97, 268-289.
- Sparks, R. S. J. and Brazier, S., 1987- New evidence for degassing processes during explosive eruptions. *Nature* 295, 218-220. URASE.
- Sparks, R. S. J., 1978- The dynamics of bubble formation and growth in magmas: A review and analysis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 3, 1-37.
- Whitham, A. G. and Sparks, R. S. J., 1986- Pumice. *Bull. Volcanol.* 48, 209-223.

The evolution of bubble size distributions (BSD) in Qorveh-Bijar Quaternary volcanism, East of Kurdistan

B. Rahimzadeh^{1*}

¹Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2017 June 10

Accepted: 2017 October 24

Abstract

Scoria cones are one of the main parts of East of Kurdistan volcanoes. Olivine, Pyroxene, Plagioclase and Biotite are main phenocrystals with Amygdaloidal-glassy matrix. This paper was studied processes of bubbles nucleation and grow during the eruption of scoria's unite using the Bubble Size Distribution (BSD) method including study of population density, bubbles volume, 3D modeling, nucleation and bubble growth. For selected sample from different cone, in total was measured 3623 bubbles and drawn that bubbles volumes calculated from 40 to 85 percent. Using the 2D bubbles shape renovated 3D bubbles schematic shape and compared together. Most population for four samples bubbles shapes are near to sphere and for other four samples are ellipsoid. Longest ellipsoid bubbles shape has 1:3.2:8 diagonals ratio that it's flat ellipsoid. The longest diameter (L) is perpendicular to the surface and parallel to lower pressure dictated on magma and bubbles could be growth more than other sides. Presence of 2-5 peaks in frequency distribution versus bubble size diagram, suggesting unimodal, polymodal, exponential and power low events for bubbles generation in the east of Kurdistan Scoria's. Nucleation density increased from first to lasts generation but bubbles growth reduced. Recur of bubble forming in macroscopic samples, microscopy, SEM and nucleation and grow model suggested fractal model.

Keywords: Bubble size distribution (BSD), Bubble nucleation, Scoria, Qorveh, Bijar, Kurdistan

For Persian Version see pages 255 to 264

*Corresponding author: B. Rahimzadeh; E-mail: b.rahimzade59@gmail.com