

تعیین سن مورفومتری مخروط سیندر خاتون‌باغ، شمال خاوری مهاباد، استان آذربایجان غربی

مرتضی خلعت‌بری جعفری^{۱*}، نفیسه صالحی سیاوشانی^۲ و محمد فریدی^۳

۱. دانشیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
۳. کارشناس ارشد سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت منطقه شمال باختری، مرکز تبریز

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۲

چکیده

مخروط سیندر رخنمون یافته در جنوب روستای خاتون‌باغ، شمال خاوری مهاباد، استان آذربایجان غربی، از پایین به بالا شامل سه بخش است. بخش زیرین دربردارنده لایه‌های سرشار از اسکوری، خاکستر، تفر، بخش میانی شامل لایه‌های اسکوری حاوی بمب و بخش بالایی از لایه‌های مملو از بمب آتشفشانی با میزان کمتری اسکوری است. ترکیب غالب این فراورده‌های آتشفشانی، الیوین‌بازالت است. در تعیین سن مورفومتری مخروط سیندر خاتون‌باغ، داده‌های مورفومتری موردنیاز با کمک نقشه‌های توپوگرافی و محاسبات مدل رقومی ارتفاعی (DEM) به دست آمده‌اند. پارامترهای اصلی مخروط، مانند ارتفاع، قطر قاعده و دهانه کراتر، برای محاسبه نسبت H_{co}/W_{co} و زاویه شیب میانگین اندازه‌گیری شدند. با توجه به پارامترهای اصلی، مخروط سیندر مورد مطالعه در قاعده شکل بیضوی و در دهانه کراتر خود شکل فرابیضوی داشته و می‌توان آن را در نوع مخروط نعل اسبی دسته‌بندی نمود. با مقایسه پارامترهای اصلی محاسبه شده با پارامترهای مخروط‌های سیندر در سایر مناطق دنیا، می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد این مخروط به میانگین جهانی آن بسیار نزدیک است. از آنجایی که با افزایش سن مخروط، ارتفاع، نسبت ارتفاع به قطر و زاویه شیب مخروط در اثر فرسایش کاهش می‌یابد لذا از نسبت H_{co}/W_{co} می‌توان جهت تعیین سن مورفومتری مخروط‌ها استفاده نمود. با مقایسه نسبت H_{co}/W_{co} مخروط خاتون‌باغ با نسبت‌های پیشنهادی (Porker (1972) و داده‌های سن‌سنجی Wood (1980b) و Sucipta et al. (2006)، می‌توان سن نسبی ۰/۷ تا ۲ میلیون سال را برای مخروط خاتون‌باغ تخمین زد که با سن چینه‌شناسی مستند در نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: تعیین سن، طبقه‌بندی مورفولوژی، کواترنری، مخروط سیندر، مورفومتری.

مقدمه

استرومبولی شدید است که با فوران مواد فرار ماگمایی همراه است. در اغلب موارد، فعالیت آتشفشانی که منجر به تشکیل

مخروط سیندر^۱ یا مخروط اسکوری^۲ از متداول‌ترین نوع ساختارهای آتشفشانی هستند. تشکیل مخروط اسکوری اغلب حاصل فوران‌های آتشفشانی نوع استرومبولی و

1. Cinder cone
2. Scoria cone

* نویسنده مرتبط: khalat1965@live.com, khalat1965@gmail.com

جهت انجام چنین مطالعاتی، با استفاده از اندازه‌گیری بر روی نقشه‌های توپوگرافی و یا تصاویر هوایی به دست آمده و این قابلیت را دارا هستند که مورفولوژی مخروط‌های سیندر را با دقت بالایی تعیین نمایند. مخروط‌های آتشفشانی در ایران از نظر مورفولوژی به تعداد محدودی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (برای مثال آتشفشان سهند توسط اصغری و همکاران، ۱۳۹۳). اما بررسی مورفولوژی ساختارهای آتشفشانی و تعیین سن آن‌ها بدون استفاده از روش‌های ایزوتوپی از مطالعات جدید در ایران است که در این مقاله بدان پرداخته شده است. در مطالعات مورفومتری مخروط سیندر خاتون باغ، داده‌ها بر اساس مطالعات صحرایی، تصاویر و عکس‌های هوایی پردازش شدند. با بررسی داده‌های به دست آمده از مخروط خاتون باغ و مقایسه با دیگر مخروط‌های سیندر در سایر نقاط دنیا، سن تقریبی مخروط سیندر خاتون باغ محاسبه شده است.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه بخشی از برگه ۱:۲۵۰,۰۰۰ مهاباد است که در استان آذربایجان باختری واقع شده است (Eftekharneshad, 1973). این منطقه را می‌توان بخشی از فلات ایران-ترکیه در نظر گرفت که در محل برخورد صفحه‌های عربی-اوراسیا واقع شده و در بردارنده حجم زیادی از سنگ‌های ماگمایی سنوزوییک است (Allen et al., 2013, شکل ۱). در تقسیم‌بندی زون‌های ساختاری ایران، این ناحیه در کمربند سندانج-سیرجان (Stocklin, 1968) و در واحد خوی-مهاباد (Eftekharneshad, 1975 و نبوی، ۱۳۵۵) قرار دارد. کهن‌ترین واحد سنگی منطقه، پی سنگ دگرگونی از جنس فیلیت، شیسست، گنایس و آمفیبولیت منسوب به پرکامبرین است. در داخل این مجموعه دگرگونی، ریولیت مهاباد با یک روند شمالی-جنوبی گسترش یافته و بیشتر منطقه را تحت پوشش قرار داده است. واحدهای رسوبی مربوط به پالئوزوییک و مزوزوییک به صورت ناپیوستگی بر روی سازندهای قدیمی‌تر واقع شده‌اند. در دوره میوسن، سنگ‌آهک و مارن معادل سازند قم با یک ناپیوستگی زاویه‌دار بر روی واحدهای ژوراسیک-کرتاسه نهشته شده‌اند

مخروط اسکوری می‌شود، با اثر متقابل ماگما/آب آغاز می‌گردد که حاصل آن تشکیل یک حلقه تفرای اولیه است (مانند منطقه آتشفشانی آیفل در آلمان، Schminke, 2004). چنین نهشته‌هایی، فراتوماگمایی و جورنشده بوده و از پیروکلاست‌های جوان تشکیل شده‌اند. به دنبال فاز فراتوماگماتیک اولیه، فعالیت نوع استرومبولی یا هاوایی روی می‌دهد که دلیل آن کاهش بخار آب در حجره ماگمایی است (Lorenz and Kurszlaukis, 2007). فعالیت ماگمایی بعدی که از صعود پیوسته ماگما حاصل می‌شود و همراه با از دست دادن گاز است، می‌تواند یک مخروط اسکوری ایجاد کند.

مخروط‌های اسکوری یا مخروط‌های خاکستر، حاصل جمع شدن خاکستر، لاپیلی و بلوک هستند که پیرامون یک مجرای مرکزی و در اثر فعالیت آتشفشانی انفجاری ضعیف ته‌نشست نموده‌اند. آن‌ها معمولاً کمتر از ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر ارتفاع و دو کیلومتر قطر دارند و سن آن‌ها از چند تا ده‌ها سال متفاوت است. مخروط‌های کوچک معمولاً ترکیب بازالتی داشته و دارای طرفین صاف با شیب حدود ۳۳ درجه هستند. این مخروط‌های کوچک به‌طور معمول نامتقارن بوده و در امتداد یک شکاف شکل می‌گیرند. گاهی نیز ممکن است در امتداد باد در زمان فوران خود کشیده شوند. کراتر مرکزی کاسه‌مانند آن‌ها به تدریج توسط مواد پرتابی و گدازه پر شده و در سطح خود صاف می‌شود (Winter, 2001). از نظر جایگاه تکتونیکی، مخروط‌های سیندر در مناطق کافتی، بلوک‌های بالآمده، مناطق فرورانش و جزایر اقیانوسی رخنمون یافته‌اند.

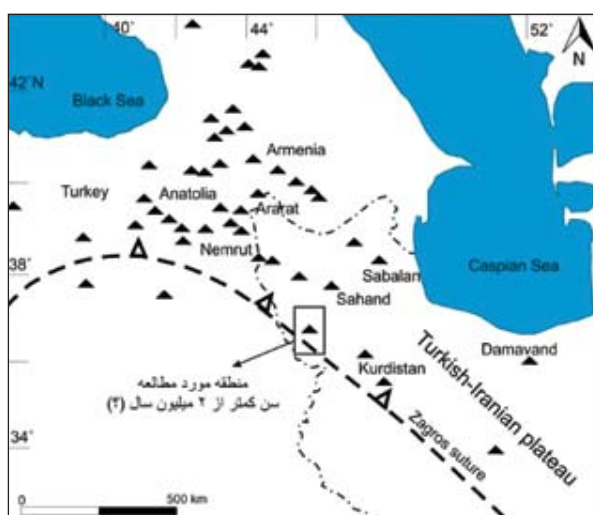
اهداف و روش مطالعه

برداشت‌های اولیه در روی زمین نشان داد که مخروط سیندر خاتون باغ دارای ویژگی‌های مشابه با مخروط‌های کوچک شرح داده شده در بخش مقدمه مقاله است. مطالعات ژئومورفولوژی بر روی مخروط‌های سیندر در سال‌های اخیر رواج یافته و پارامترهای استاندارد متعددی برای این نوع از مطالعات تعریف شده‌اند (Porter, 1972; Wood, 1980; Doniz et al., 2008). داده‌های مورد نیاز

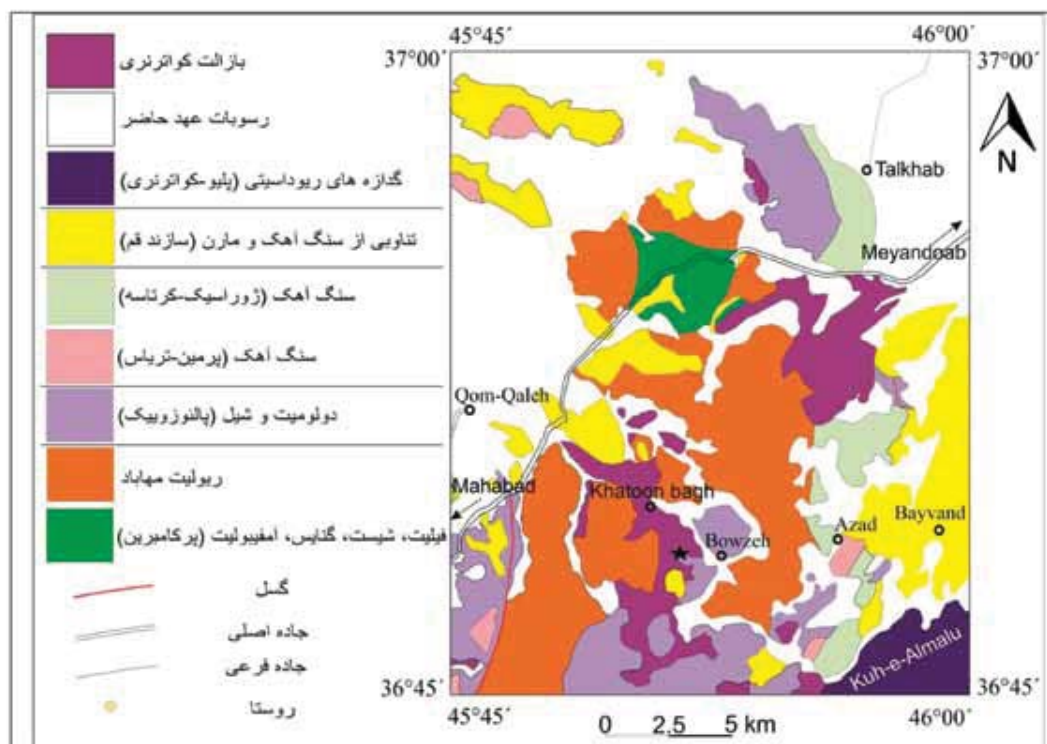
مرتضی خلعت‌بری جعفری و همکاران

ریخته‌اند و مخروط سیندر خاتون‌باغ نیز در همین دوره تشکیل شده است (شکل ۲). به نظر می‌رسد که ماگماتیسم مافیک سنوزویک در منطقه از ذوب‌بخشی لیتوسفر گوشته‌ای در میدان پایداری گارنت نشأت گرفته است (Kheirkhah et al., 2013).

(Eftekharneshad, 1973). سنگ‌های آتشفشانی منسوب به پلیو-کواترنری با ترکیب کلی ریوداسیتی در جنوب خاوری منطقه، برآمدگی آتشفشانی کوه آمالوداغ را تشکیل داده‌اند. آخرین فرآورده‌های آتشفشانی کواترنری، گدازه‌های بازالتی است که در شمال و جنوب کوه آمالوداغ بیرون



شکل ۱. توزیع مراکز آتشفشانی سنوزویک در فلات ایران-ترکیه و موقعیت محدوده مورد مطالعه که با اصلاحاتی محدود از Neil et al. (2013) اقتباس شده است

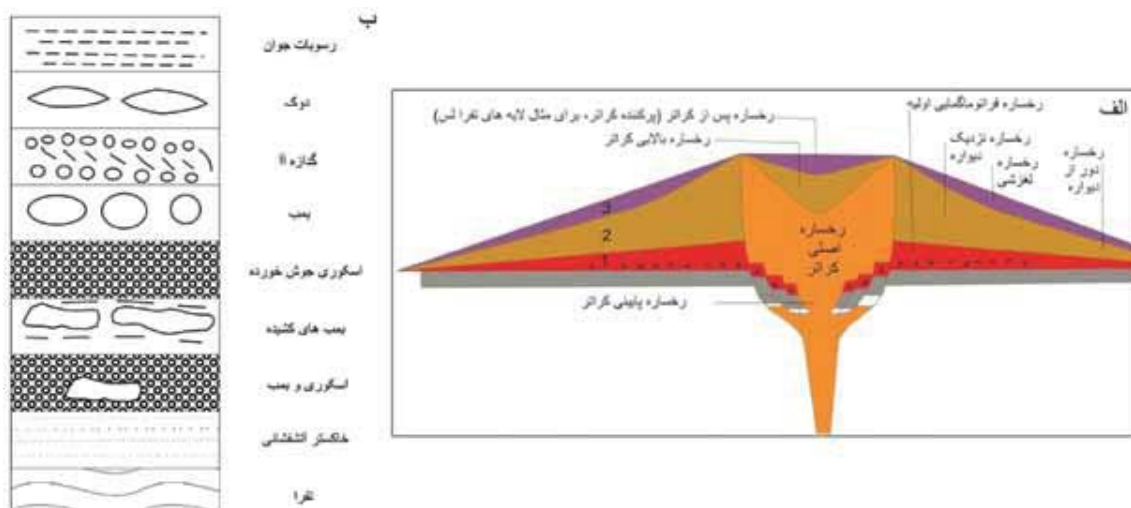


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ساده منطقه که محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد (Eftekharneshad, 1973). مخروط سیندر خاتون‌باغ با علامت ستاره مشخص شده است

مطالعات صحرائی

نشده است. در محل دهانه مخروط گدازه‌های بازالتی آرخنمون دارند (شکل ۴-ب). همچنین در محل دهانه دوک‌های پرتابی مشاهده می‌شوند که سطح زیرشان حالت تاپاله گاوی^۱ یافته‌اند (شکل ۴-پ). این شواهد نشان می‌دهد که فوران گدازه‌ها در مراحل شکل استرومبولی داشته و حالت پرتابی یافته‌اند. لایه‌های مخروط سیندر را برحسب اندازه اجزای تشکیل دهنده می‌توان دسته‌بندی نمود (شکل ۵-الف و ب) که به ترتیب از پایین به بالا شامل لایه‌های سرشار از اسکوری (واحد ۱ شکل ۵-الف)، خاکستر (واحد ۲ شکل ۵-الف)، تفرا (واحد ۳ شکل ۵-الف) و سپس در وسط، اسکوری حاوی بمب بوده و در بالا بر میزان بمب افزوده شده و از میزان اسکوری کاسته شده است (شکل ۳-ب).

گدازه‌های بازالتی کواترنری منطقه مورد مطالعه به صورت روانه‌ای و یا مخروطی شکل تظاهر یافته‌اند (شکل ۳ الف). ترکیب این سنگ‌ها به طور عمده الیوین بازالت بوده و در مخروط‌ها تمایل آلکالی یافته‌اند. مخروط سیندر مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۵۱° ۴۵ شمالی و عرض جغرافیایی ۴۸° ۳۶ خاوری واقع شده است. بر اساس مطالعات سن نسبی گدازه‌های اطراف این مخروط در روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ مهاباد (Eftekhar-Nezhad, 1973) و گدازه‌های جوان منطقه مهاباد توسط Neil et al., (2013a)، کواترنری تعیین شده است اما تاکنون تعیین سن به روش مورفومتری بر روی مخروط خاتون باغ انجام



شکل ۳. الف) مقطع عرضی شماتیک یک مخروط سیندر کواترنری عادی در آیفل آلمان. (۱) فاز ماآر یا حلقه توفی فراتوماگمایی اولیه، (۲) فاز اصلی فعالیت و (۳) مرحله پایانی (Schmincke, 2004). ب) ستون چینه‌شناسی شماتیک مخروط سیندر خاتون باغ

رشد واقعی مخروط سیندر در طی فاز اصلی فعالیت آتشفشانی است که از اسکوری جوش خورده در داخل شروع شده و به اسکوری سست و جوش نخورده در دیواره خارجی ختم می‌شود. این نهشته‌های اولیه در طی مرحله پایانی شروع به لغزش به سمت پایین دامنه می‌نمایند (Schmincke, 2004).

به‌طور کلی مخروط‌های سیندر توالی چینه‌ای مشابهی را از خود نشان می‌دهند (Schmincke, 2004). مقطع عرضی یک مخروط سیندر کواترنری عادی در آیفل آلمان در شکل ۳-الف نشان داده شده است. ریزش بخش پایینی کراتر به‌طور کلی در طی مرحله اولیه فوران انجام می‌شود که فاز ماآر یا حلقه توفی فراتوماگمایی اولیه نامیده می‌شود.



شکل ۴. الف) دهانه به شکل مخروط سیندر و یا مخروط اسکوری، ب) گدازه آآ در بخش بالایی مخروط سیندر خاتون باغ، پ) دوک با آثار تاپاله‌گاوی در سطح زیر آن در دهانه مخروط سیندر

ارتفاع (H_{co} حداکثر) و حداقل ارتفاع (H_{co} حداقل) در روی نقشه‌های توپوگرافی در نظر گرفته می‌شود (Porter, 1972). W_{co} میانگین قطر حداکثر و حداقل مخروط است (شکل ۶). قطر یا عرض کراتر (W_{cr}) با توجه به میانگین قطر حداقل و حداکثر کراتر اندازه‌گیری می‌شود. زاویه شیب میانگین (Save) با توجه به سه پارامتر اصلی ذکر شده در بالا محاسبه می‌شود. این مقدار از روابط زیر به دست می‌آید (Hasenaka and Carmichael, 1985):

$$S_{ave} = \tan^{-1} [2H_{co} / (W_{co} - W_{cr})]$$

$$S_{ave} = \tan^{-1} [2H_{co} / W_{co}]$$

عمق کراتر طی فوران و پس از آن به شدت تغییر می‌یابد و مقدار آن اغلب کمتر از فواصل بین مرزها در نقشه‌های مورد استفاده جهت اندازه‌گیری است. بنابراین از عمق کراتر به عنوان یک پارامتر توصیفی استفاده نمی‌شود. برای بررسی مورفولوژی مخروط‌های سیندر معمولاً از مخروط‌هایی

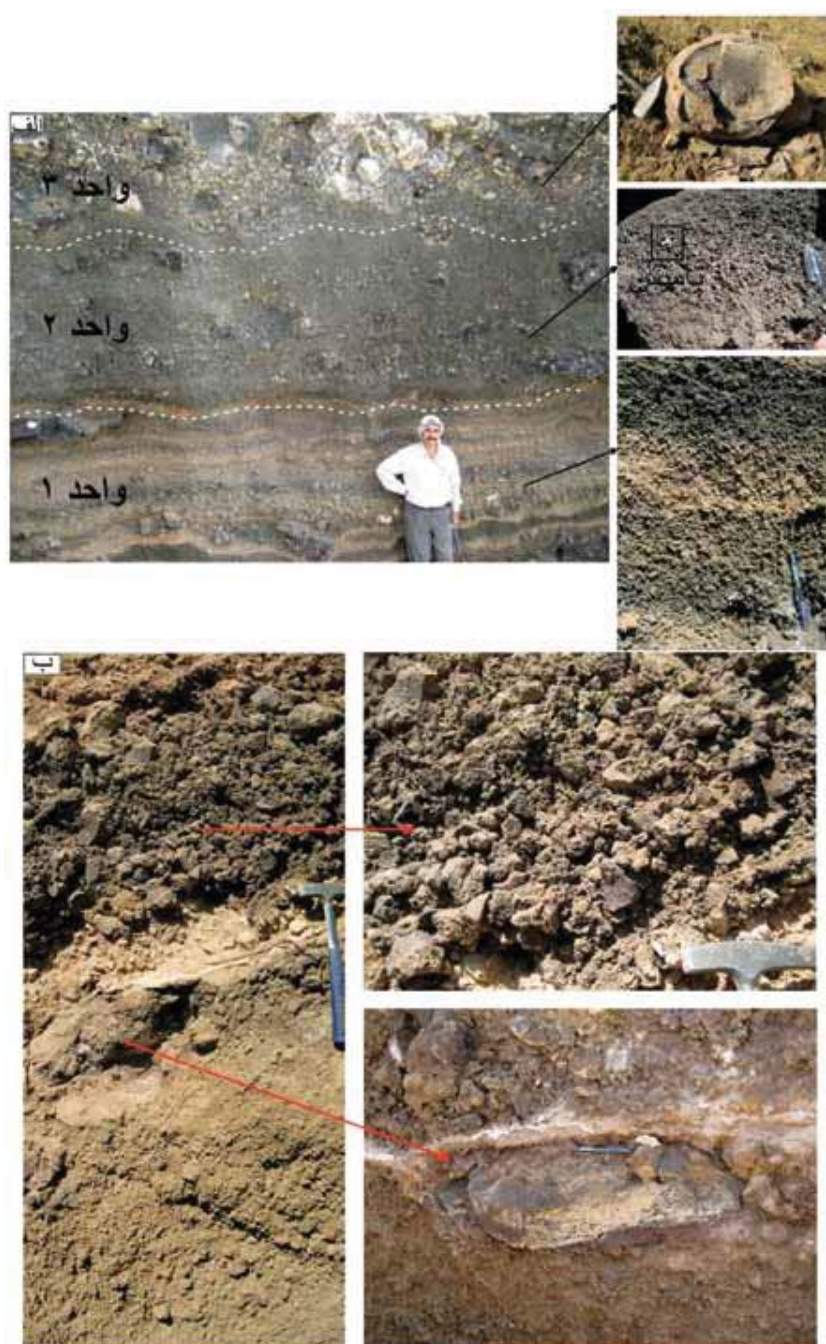
از آن‌جا که لایه‌های مختلف دارای مقادیر متفاوتی از فرآورده‌های آتشفشانی پیروکلاستیک هستند، لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که دوره‌های شدت و ضعف فعالیت‌های آتشفشانی در تشکیل مخروط سیندر خاتون باغ نقش داشته‌اند. در مقاطع میکروسکوپی، بافت سنگ‌های تشکیل‌دهنده مخروط سیندر خاتون باغ پورفیریک با خمیره‌ی حفره‌دار است. فنوکریست‌های آن‌ها از نوع الیوین و اغلب سالم هستند. خمیره سنگ دربردارنده شیشه آتشفشانی و بلورهای ریز کانی‌های فرومنیزین از جمله الیوین و اوزیت است. مقدار بسیار کمی میکروولیت‌های پلاژیوکلاز نیز در آن‌ها دیده می‌شود.

تعیین پارامترهای مورفومتری مخروط سیندر

در یک مخروط با شکل فرضی دوزنقه کامل، H_{co} به‌عنوان میانه حسابی اختلاف بین ارتفاع قاعده و حداکثر

توپوگرافی اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده‌اند. این مخروط دارای ارتفاعی بیش از ۵۰ متر است، لذا می‌توان به‌سادگی آن را در روی سطح زمین و یا با بررسی تصاویر ماهواره‌ای تشخیص داد (شکل‌های ۳-الف و ۷).

استفاده می‌شود که جوان باشند و یال‌های آن‌ها کمتر فرسایش یافته و حالت مدور آن‌ها حفظ شده باشد (Wood, 1980b). پارامترهای مورفومتری مخروط سیندر خاتون باغ که با استفاده از تصاویر DEM و نقشه‌های

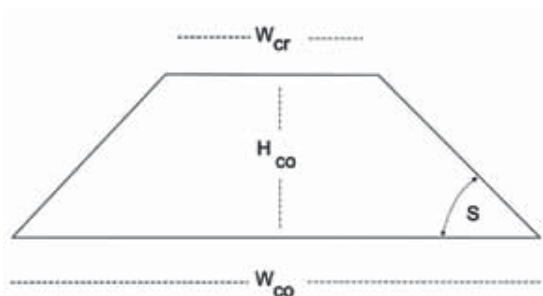


شکل ۵. الف) نمایی از دیواره مخروط سیندر خاتون باغ. واحدهای تشکیل‌دهنده دیواره مخروط به ترتیب از پایین به بالا شامل: واحد ۱- اسکوری به رنگ تیره همراه با میان لایه‌هایی از خاکستر به رنگ روشن، واحد ۲- اسکوری تماماً شیشه‌ای و تکه‌هایی از پامیس به رنگ سفید در داخل آن، واحد ۳- بمب با حاشیه حفره‌دار و در بخش مرکزی بمب متراکم است. حالت پوسته پوسته شدگی نیز مشاهده می‌شود. ب) نمایی دیگر از دیواره مخروط سیندر که در پایین از بمب‌های با شکل کشیده و در بالا از اسکوری تشکیل شده است

مرتضی خلعت‌بری جعفری و همکاران

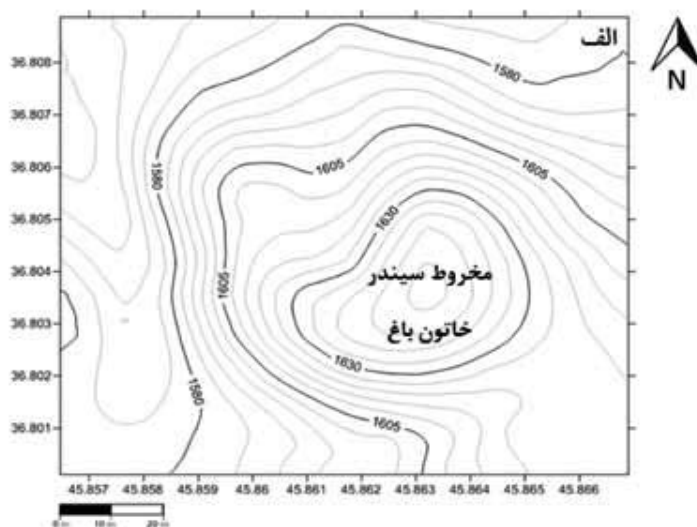
جدول ۱. پارامترهای مورفومتری مخروط سیندر خاتون باغ

W_{cr}/W_{co}	H_{co}/W_{co}	S (زاویه شیب میانگین برحسب درجه)	H_{co} (ارتفاع میانگین مخروط برحسب کیلومتر)	W_{cr} (قطر دهانه برحسب کیلومتر)	W_{co} (قطر قاعده مخروط برحسب کیلومتر)	مقطع
۰/۲۲	۰/۱۱	۱۲/۵	۰/۰۵۲	۰/۱	۰/۴۵	۱
۰/۴	۰/۰۶	۱۲/۵	۰/۰۵۲	۰/۳۰۶	۰/۷۵	۲
۰/۳۳	۰/۰۸	۱۲/۵	۰/۰۵۲	۰/۲	۰/۶	میانگین



برای محاسبه پارامترهای اصلی بر روی نقشه ارتفاعی خاتون باغ، دو مقطع یکی در امتداد بیشترین و دیگری در امتداد کمترین قطر کراتر و قاعده مخروط بررسی شد (شکل ۸). از آنجایی که مخروط موردنظر در تمام جهات ابعاد یکسانی ندارد لذا برای پارامترهای اصلی یک مقدار میانگین در نظر گرفته شد تا کلیه محاسبات بعدی بر مبنای این اعداد انجام شوند.

شکل ۶. نمودار شماتیک نشان‌دهنده مقادیر اندازه‌گیری برای مخروط سیندر: W_{cr} = قطر کراتر، W_{co} = قطر قاعده مخروط، H_{co} = ارتفاع مخروط و S = زاویه شیب میانگین مخروط

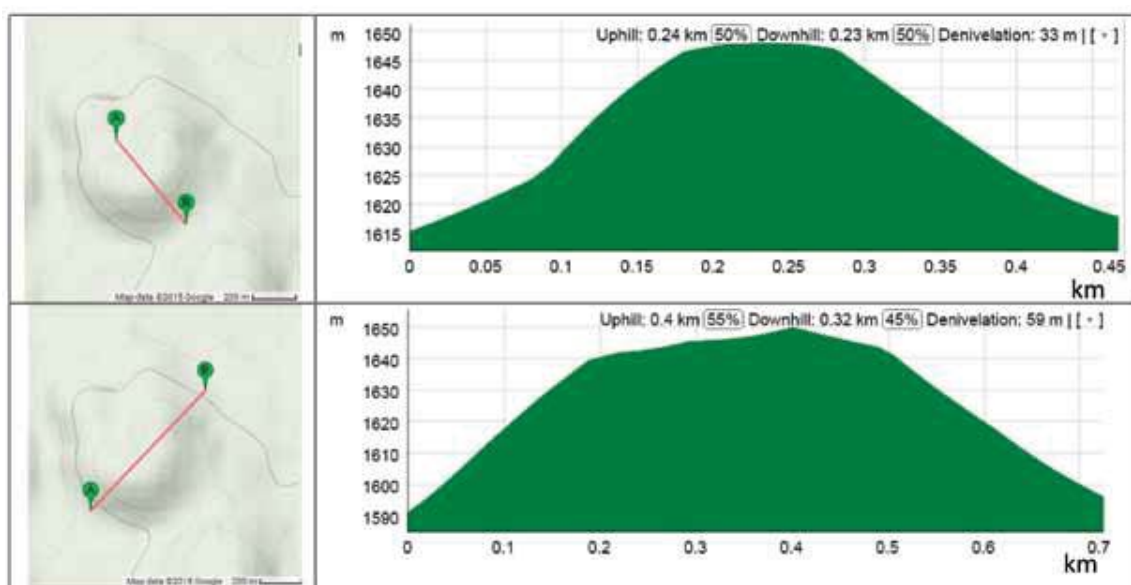


شکل ۷. موقعیت مخروط سیندر خاتون باغ بر روی (الف) نقشه توپوگرافی ۱:۵۰,۰۰۰ و (ب) تصویر ماهواره‌ای

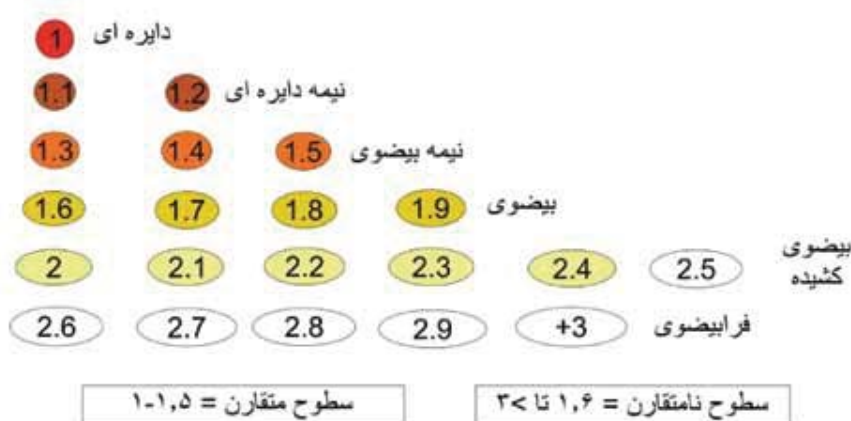
تحلیل مورفولوژی

نسبت قطر حداکثر به حداقل برای کراتر و کف مخروط به ترتیب ۳/۰۶ و ۱/۸۷ محاسبه شده است. بنابراین از نظر شکل هندسی، کراتر مخروط شکل فرابیضوی و کف آن حالت بیضوی دارد. همچنین با توجه به شکل ظاهری دهانه (علی‌رغم تصور اولیه نسبت به مدور بودن آن)، مخروط حالت نعل اسبی از خود نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

از آنجایی که مخروط‌های سیندر به علت نوع فوران و فرسایش معمولاً شکل مدور کامل ندارند، Dóniz-Páez (۲۰۱۵) مخروط‌های سیندر را براساس نسبت قطر حداکثر به حداقل برای کراتر و کف مخروط به انواع دایره‌ای، نیمه دایره‌ای، نیمه بیضوی، بیضوی، بیضوی کشیده و فرابیضوی تقسیم‌بندی می‌نماید (شکل ۹). بر اساس داده‌های جدول ۱،



شکل ۸. مقطع عرضی ارتفاعی بر روی نقشه‌های ارتفاعی مخروط سیندر خاتون باغ، در امتداد کمترین کشیدگی در شکل بالا و در امتداد بیشترین کشیدگی در شکل پایین



شکل ۹. تقسیم‌بندی سطح مخروط‌ها بر اساس نسبت قطر حداکثر به حداقل (Dóniz-Páez (2015)

مرتضی خلعت‌بری جعفری و همکاران

روی داده‌های به دست آمده از مخروط‌های موناکیا Porter (1972) روابط زیر را برای قطر قاعده، قطر کراتر و ارتفاع مخروط به دست آورد:

برای ۳۰ مخروط مورد مطالعه:

$$H_{co} = 0.18W_{co}$$

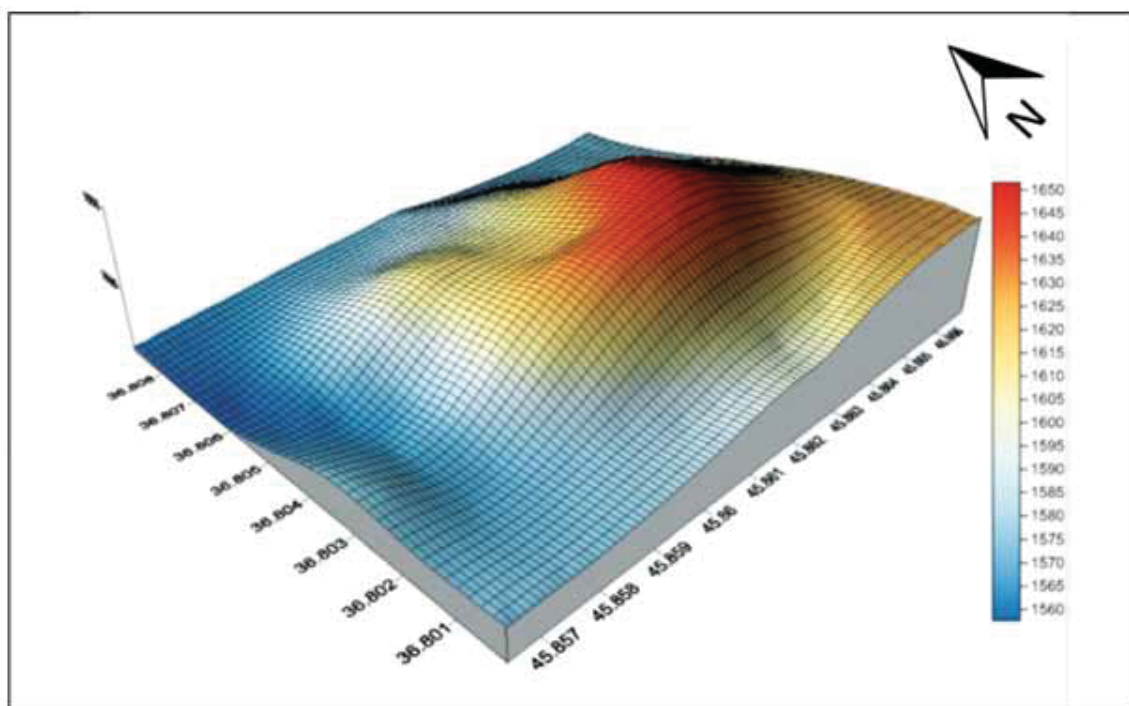
برای ۶۲ مخروط مورد مطالعه:

$$W_{cr} = 0.40W_{co}$$

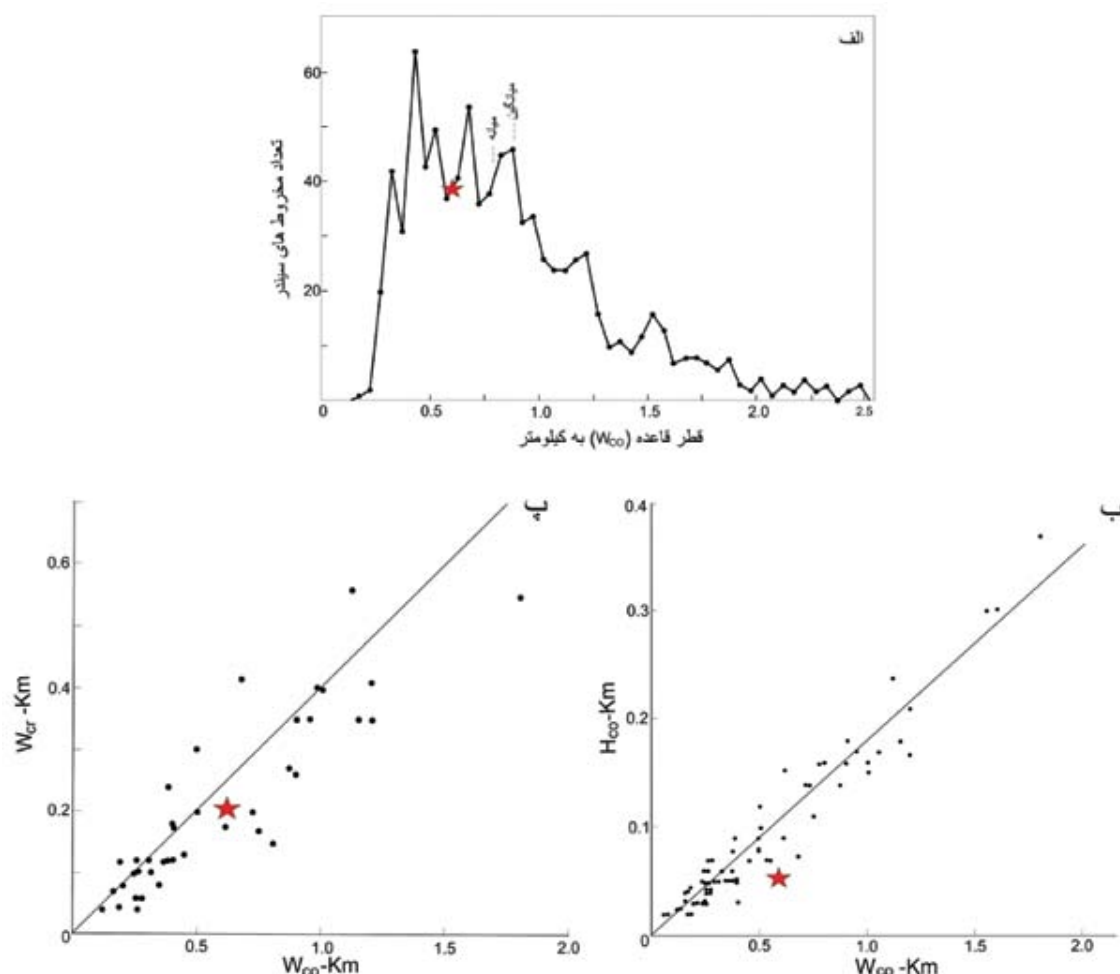
طبق نظر Porter (1972)، این روابط سیستماتیک نشان‌دهنده زاویه تعادل و سکون اسکوری‌هایی است که مخروط‌ها را تشکیل می‌دهند. Wood (1980a) با جمع‌آوری داده‌های مخروط‌های مرتبط با جایگاه‌های تکتونیکی مختلف که ترکیب شیمیایی و اندازه ذرات گوناگون داشتند، صحت معادلات Porter (1972) را تایید کرد. در نتیجه این روابط به‌عنوان روابط کلی برای توصیف مخروط‌های سیندر کره زمین در مطالعات در نظر گرفته می‌شوند. در شکل ۱۱-ب و پ داده‌های Wood (1980a) مربوط به قطر قاعده و قطر کراتر تعدادی مخروط از نقاط مختلف دنیا و مخروط خاتون‌باغ جهت مقایسه نشان داده شده است.

Wood (1980a) توزیع قطر کف (W_{co}) را برای ۹۱۰ مخروط سیندر از نقاط مختلف جهان مانند میدان آتشفشانی سان فرانسیسکو، آریزونا؛ موناکیا، هاوایی؛ جزیره نوویواک، آلاسکا؛ کلیمانجارو، تانزانیا؛ اتنا، ایتالیا و پاریکوتین، مکزیک را رسم نمود (شکل ۱۱-الف). طبق اعداد به دست آمده، قطر کف مخروط‌ها دامنه‌ای از ۰/۲۵ تا حدود ۲/۵ کیلومتر دارد، با میانگین ۰/۹ و میانه آماری ۰/۸ کیلومتر. تعدادی مخروط پراکنده نیز یافت شده‌اند که در کل کمتر از ۰/۱۵ کیلومتر قطر دارند. به‌طور کلی این آتشفشان‌های کوچک معمولاً از نظر ساختاری و ترکیب شبیه هستند، بنابراین می‌توان از نظر مورفولوژی آن‌ها را با هم مقایسه نمود. با رسم مقدار میانگین قطر قاعده سیندر خاتون‌باغ یعنی مقدار ۰/۶ بر روی نمودار Wood (1980a)، می‌توان مشاهده نمود که این قطر به مقدار میانگین جهانی بسیار نزدیک است (شکل ۱۱-الف). بنابراین مخروط خاتون‌باغ از نظر ابعاد مشابه با دیگر مخروط‌های سیندر معمولی در دیگر نقاط جهان است.

با بررسی مورفومتری مخروط‌ها و انجام عملیات آماری بر



شکل ۱۰. تصویر سه بعدی مخروط سیندر خاتون‌باغ که بر اساس داده‌های نقشه‌های DEM رسم شده و حالت نعل اسبی دهانه در این تصویر مشخص است



شکل ۱۱. الف) توزیع قطر قاعده ۹۱۰ مخروط سیندر از نقاط مختلف جهان. ب و پ) ابعاد مخروط مربوط به ۸۳ مخروط سیندر نسبتاً جوان از نواحی مختلف جهان. مخروط سیندر خاتون باغ با علامت ستاره نشان داده شده است (Wood, 1980a)

در نتیجه عمل فرسایش و افزایش سن مخروط اسکوری، ارتفاع مخروط کاهش یافته و طبیعتاً از نسبت ارتفاع به قطر مخروط (H_{co}/W_{co}) و زاویه شیب دامنه‌ها کاسته می‌شود. از چنین اصلی می‌توان جهت سن‌سنجی نسبی مخروط‌ها با استفاده از روش‌های تخمینی مقایسه‌ای استفاده نمود (Wood, 1980b Sucipta et al., 2006). با افزایش سن، نسبت H_{co}/W_{co} کاهش می‌یابد چراکه فرسایش با حمل مواد آذراواری به منطقه پیرامون قاعده مخروط ارتفاع آن را کم می‌کند (Sucipta et al., 2006).

Moore and Wolfe (1976) اطلاعات مربوط به ۳۸ مخروط سیندر مربوط به بخش شرقی میدان آتشفشانی سان فرانسیسکو و Sucipta et al., (2006) اطلاعات مربوط به ۷۸

شبیه‌سازی‌های زیادی تاکنون بر روی نسبت‌های مورفومتری موثر بر تحلیل‌ها انجام شده‌اند و همه گواه این مطلب هستند که چنین نسبت‌هایی در مخروط‌هایی که هنوز شکل هندسی خود را تا حدودی حفظ کرده‌اند، از قوانین مشابهی پیروی می‌نمایند (Kervyn et al., 2012). مشاهدات صحرایی همراه تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که به‌طور کلی نسبت‌های مورفومتری مخروط‌های سیندر به ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده، شرایط زمانی فوران، جایگاه محلی و دقت روش مورد استفاده برای تخمین ارتفاع مخروط بستگی دارند.

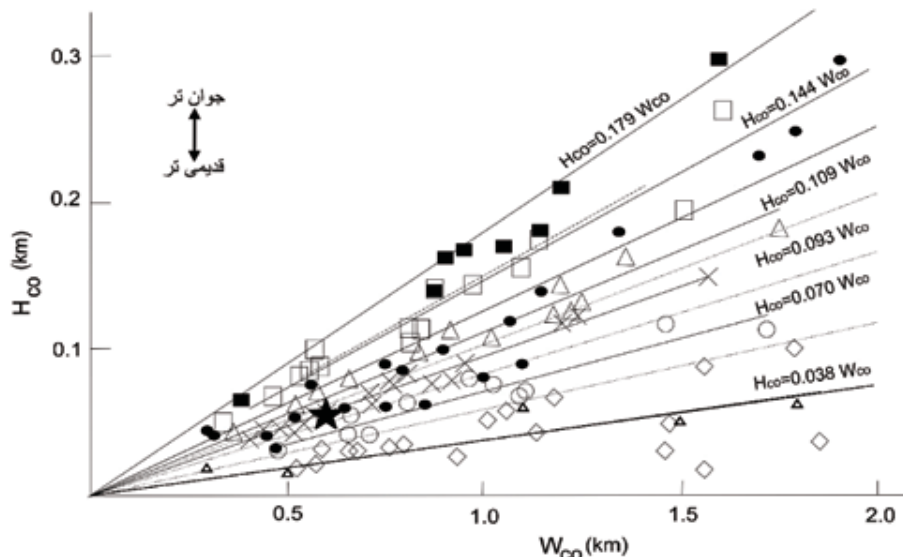
تکامل ابعادی مخروط‌های سیندر را می‌توان با مدت زمانی که در معرض فرسایش قرار گرفته‌اند انطباق داد.

صفحه‌های عربی-اوراسیا واقع شده و دربردارنده حجم زیادی از سنگ‌های ماگمایی سنوزوییک است. از جمله نواحی نزدیک به منطقه مورد مطالعه با شباهت از نظر تشکیل و سن که بر روی آن‌ها تعیین سن ایزوتوپی انجام شده است می‌توان به سلماس و ماکو در شمال باختری ایران (خیرخواه، ۱۳۹۲) و مراکز آتشفشانی آارات و تندورک در خاور ترکیه (Pearce et al., 1990; Yilmaz et al., 1998) اشاره نمود. دامنه سنی گدازه‌های بازالتی مناطق مذکور، از ۱/۸۷ تا ۰/۴ میلیون سال برآورد شده است. به نظر می‌رسد که این مقادیر با دامنه سنی به دست آمده در این مقاله یعنی روش مورفومتری مربوط به سیندر خاتون‌باغ (از ۰/۷ تا ۲ میلیون سال) همخوانی دارد.

جدول ۲. رابطه سن نسبی مخروط‌های سیندر با نسبت H_{co}/W_{co} مربوط به میدان آتشفشانی سان فرانسیسکو (Wood, 1980b)

سن نسبی	ضریب رگرسیون (r)	تعداد مخروط‌های مورد محاسبه	معادله خط برازش
<1۰۰۰۰۰ سال	۰/۹۸	۹	$H_{co} = 0.179 W_{co}$
۰/۷-۰/۲ میلیون سال	۰/۹۷	۲۴	$H_{co} = 0.125 W_{co}$
۳-۰/۸ میلیون سال	۰/۹۰	۵	$H_{co} = 0.038 W_{co}$

مخروط سیندر از کمپلکس باجاوا، اندونزی را درروی نمودار ارتفاع مخروط در برابر قطر قاعده پیاده نمودند (شکل ۱۲). این مخروط‌ها قبلاً به روش‌های چینه‌شناسی تعیین سن شده‌اند. هر دسته از این مخروط‌ها دارای خط برازشی هستند که در شکل ۱۲ محاسبه و رسم شده است. واضح است که در مخروط‌های با سن مشخص، نسبت ارتفاع مخروط به قطر قاعده (H_{co}/W_{co}) مقادیر مشخصی دارند. سن مطابق با این نسبت‌ها و همچنین خط برازش آن‌ها طبق محاسبات Wood (1980b)، در جدول ۲ مشاهده می‌شوند. تقسیم‌بندی این‌چنین در مخروط‌ها این شانس را می‌دهد که بتوان به‌طور نسبی سن مخروط‌ها را بر اساس مورفولوژی محاسبه نمود. از آنجایی که نسبت H_{co}/W_{co} برای مخروط سیندر خاتون‌باغ برابر ۰/۰۸ به‌دست‌آمده است، بنابراین با توجه به خطوط برازش شکل ۱۲ و بر اساس سن‌های از قبل مشخص، می‌توان سن تقریبی ۰/۷ تا ۲ میلیون سال (پلیستوسن-کواترنری) را برای مخروط سیندر خاتون‌باغ محاسبه نمود که با سن نسبی چینه‌شناسی تعیین شده در روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ مه‌آباد (Eftekhamezhad, 1973) مطابقت دارد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، این منطقه بخشی از فلات کوهزایی ایران-ترکیه را تشکیل می‌دهد که در محل برخورد



شکل ۱۲. نمودار ارتفاع مخروط (H_{co}) در برابر قطر قاعده مخروط (W_{co}) برای ۷۸ مخروط سیندر از کمپلکس باجاوا، اندونزی (نقاط تو خالی) (Sucipta et al., 2006) و ۳۸ مخروط مربوط به میدان آتشفشانی سان فرانسیسکو (نقاط توپر) (Moore and Wolfe, 1976) به همراه مخروط سیندر خاتون‌باغ که با علامت ستاره نشان داده شده است. همه این داده‌ها به روش‌های چینه‌شناسی قبلاً تعیین سن شده‌اند. خطوط، نشان‌دهنده برازش کمترین مربعات برای هر گروه و خط‌چین‌ها، به‌عنوان مرز جداکننده گروه سنی مورفومتری فرض می‌شوند

1. Fit Line

نتیجه‌گیری

مخروط سیندر خاتون باغ در شمال خاوری مهاباد از سه بخش عمده تشکیل شده است که به ترتیب از پایین به بالا شامل: لایه‌های سرشار از اسکوری، خاکستر، تفرآ، بخش میانی اسکوری حاوی بمب که به سمت بالا بر مقدار بمب افزوده شده و از مقدار اسکوری آن کاسته شده است.

از نظر شکل هندسی، کراتر مخروط سیندر خاتون باغ فرابيضوی و کف آن بيضوی شکل است. همچنین با توجه به شکل ظاهری دهانه (علی‌رغم تصور اولیه نسبت به مدور بودن آن)، مخروط شکل نعل اسبی از خود نشان می‌دهد.

با رسم داده‌های قطری مربوط به مخروط سیندر خاتون باغ بر روی نمودار Wood (1980a) می‌توان گفت که قطر سیندر خاتون باغ به مقادیر میانگین جهانی نزدیک است. بنابراین مخروط مورد مطالعه از نظر ابعاد مشابه با دیگر مخروط‌های سیندر معمولی در دیگر نقاط جهان است. از آنجایی که مخروط‌های با سن مشخص، دارای نسبت ارتفاع مخروط به قطر قاعده ($H_{\text{co}}/W_{\text{co}}$) با مقادیر مشخصی هستند، لذا با توجه به روابط Porter (1972) و داده‌های سن سنجی مربوط به Wood (1980b) و Sucieta et al., (2006) می‌توان سن تقریبی ۰/۷ تا ۲ میلیون سال (پلیستوسن-کواترنری) را برای مخروط سیندر خاتون باغ محاسبه نمود. با توجه به نهشته شدن فرآورده‌های آتشفشانی مخروط سیندر خاتون باغ بر روی نهشته‌های رسوبی عهد حاضر، طبیعتاً سن حدود ۰/۷ میلیون سال با واقعیت‌های روی زمین تطبیق بیشتری دارد.

سپاسگزاری

از پژوهشکده علوم زمین به دلیل فراهم نمودن امکانات لازم جهت انجام این پژوهش صمیمانه تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- 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. *Journal of Petrology*, 1-25.
- Dóniz, J., Romero, C., Coello, E., Guillén, C., Sánchez, N., García-Cacho L., and García, A., 2008. Morphological and statistical characterisation of recent mafic volcanism on Tenerife (Canary Islands, Spain). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 173, 185-195.
- Dóniz-Páez, J., 2015. Volcanic geomorphological classification of the cinder cones of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Geomorphology* 228, 432-447.
- Eftekhari-Nezhad, J., 1973. Geological Map of Mahabad. Geological Survey of Iran Press.
- Eftekhari-Nezhad, J., 1975- Brief history and structural development of Azarbaijan. Geological Survey of Iran. International Report.
- Fornaciai, A., Favalli, M., Karátson, D., Tarquini, S. and Boschi, E., 2012. Morphometry of scoria cones, and their relation to geodynamic setting: A DEM-based analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 217-218, 56-72.
- Hasenaka, T. and Carmichael, I.S.E., 1985. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, Central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 25, 105-124.
- بلواسی، م.، ۱۳۹۳. مورفولوژی و مورفومتری انواع دهانه‌های آتشفشانی در مخروط آتشفشانی سه‌هند. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۱، ۶۴-۵۱.
- خیرخواه، م.، ۱۳۹۲. پژوهشی نوین بر پتروژنز و

- Kervyn, M., Ernst, G.G., Carracedo, J. and Jacobs, C. P., 2012. Geomorphometric variability of "monogenetic" volcanic cones: Evidence from Mauna Kea, Lanzarote and experimental cones, *Geomorphology* 136, 59-75.
- Kheirkhah, M., Neill, I., Allen, M.B. and Ajdari, K., 2013. Small-volume melts of lithospheric mantle during continental collision: Late Cenozoic lavas of Mahabad, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 74, 37-49.
- Lorenz, V. and Kurszlaukis, S., 2007. Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159, 4-32.
- Moore, R.B. and Wolfe, E.W., 1976. Geologic map of the eastern San Francisco volcanic field, Arizona. U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map, I-953.
- Neill, I., Kh. Meliksetian, Kh., Allen, M.B., Navarsardyan, G. and Karapetyan, S., 2013. Pliocene-Quaternary volcanic rocks of NW Armenia: Magmatism and lithospheric dynamics within an active orogenic plateau. *Lithos* 180-181, 200-215.
- Pearce, J. A., Bender, J. F., De Long, S. E., Kidd, W. S. F., Low, P. J., Gunner, Y., Saroglu, F., Yilmaz, Y., Moor bath, S. and Mitchell, J. G., 1990. Genesis of collision volcanism in eastern Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44, 189-229.
- Porter, S.C., 1972. Distribution, morphology and size frequency of cinder cones on Mauna Kea Volcano, Hawaii. *Geological Society of American Bulletin.*, 84, 382-403.
- Schmincke, H.-U., 2004. *Volcanism*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 324.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: A review, *American Association Petroleum Geological Bulletin*. 52, 1229-1258.
- Sucipta, E., Takashima, I. and Muraoka, H., 2006. Morphometric age and petrological characteristics of volcanic rocks from the Bajawa Cinder Cone Complex, Flores, Indonesia. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 101, 48-68.
- Winter, J.D., 2001. *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. Prenticehall incorporation upper Saddle River, New Jersey.
- Wood, C.A., 1980a. Morphometric evolution of cinder cones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 7: 387-413
- Wood, C.A., 1980b. Monogenetic volcanoes of the terrestrial planets. *Proceeding 10th Lunar Planetary Science Conference.*, 2815-2840.
- Yilmaz, Y., Guner, Y. and Saroglu, F., 1998. Geology of the quaternary volcanic centers of the east Anatolia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 173-210.