

Volcanological and geochemical features of the products of Sabalan's Last Eruption (NW Iran)

**Reza Fahim Guilany, Seyed Jamal Sheikhzakariaee *, Ali Darvishzadeh
and Mansour Vosoughi Abedini**

Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Sabalan volcano is located in the northwest part of Iran, 25km south of Meshkinshahr in the west Alborz-Azerbaijan structural zone. The eastern and the northern slopes of Sabalan are predominantly covered with significant amounts of white-gray pyroclastic deposits indicating a very intense explosive activity at the last stage of this huge volcano activity. After conducting field studies and analyzing the results obtained using the mathematical calculations, a Plinian eruption was detected, and the extrapolated volume of the latest pyroclastic fall eruption was estimated 3.24 km³, and the eruption of Sabalan rated a VEI of 5. Also, due to the shape of the isopach curve, the role of wind is significant in dispersing these deposits from the west to the east. The overall geochemical features of the Sabalan's ignimbrite including the rhyodacitic nature with calc-alkaline signatures as well as the high ratios of Ba/Nb>28 and Ba/Ta>450 are consistent with subduction related zone.

Key words: pyroclastic, Plinian, volcanic explosivity index, ignimbrite, Sabalan volcano, west Alborz

* sheikhzakariaee@srbiau.ac.ir

ویژگی‌های آتشفشان‌شناسی و زمین‌شیمیایی محصولات آخرین فوران سبلان (شمال‌باختری ایران)

رضا فهیم‌گیلانی، سیدجمال شیخ‌ذکریایی*، علی درویش‌زاده و منصور وثوقی‌عابدینی
گروه علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

چکیده

آتشفشان سبلان در شمال‌باختری ایران و در ۲۵ کیلومتری جنوب مشکین‌شهر در پهنه ساختاری البرز خاوری- آذربایجان جای دارد. سنگ‌های سازنده سبلان و دامنه‌های خاوری و شمالی آن با حجم چشمگیری از نهشته‌های آذرآواری سفید- خاکستری رنگ پوشیده شده‌اند. این نکته نشانه فعالیت انفجاری بسیار شدید در مرحله پایانی فعالیت این کوه بزرگ است. پس از انجام بررسی‌های صحرایی و نتایجی که از آن به دست آمد، برپایه محاسبه‌های ریاضی، نوع فوران از نوع پلینی، حجم آخرین نهشته‌های آذرآواری ریزشی سبلان ۳/۲۴ کیلومتر مکعب و اندیس انفجار ۵ برآورد شدند. همچنین، برپایه شکل منحنی ایزوپک، نقش باد در پراکندگی این نهشته‌ها از باختر به خاور بوده است. افزون‌براین، برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی، سرشت کالک‌آلکالن ایگنیمبریت‌های سبلان ریوداسیتی و نسبت بالای $Ba/Nb > 28$ و $Ba/Ta > 450$ آنها نشان‌دهنده وابستگی این سنگ‌ها به پهنه‌های فرورانش هستند.

واژه‌های کلیدی: آذرآواری، پلینی، اندیس انفجار، ایگنیمبریت، آتشفشان سبلان، البرز باختری

مقدمه

جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. رده‌بندی آنها و کاربرد گسترده‌ای که در شناخت چگونگی فعالیت‌های آتشفشانی از آنها به دست می‌آید، اهمیت بررسی آنها را دو چندان کرده است. در مباحث دینامیک آتشفشان‌ها، از معادله‌ها و الگوهای شناخته‌شده و آزموده‌شده روی فوران‌های آتشفشانی بهره گرفته

تا سال‌های پیاپی، سنگ‌های آذرآواری (pyroclastic) بخش ناچیزی از گدازه‌ها به شمار رفته‌اند و غالباً به این سنگ‌ها چندان پرداخته نشده است؛ اما از آنجایی که گسترش بسیاری نسبت به گدازه‌ها دارند، در سنگ‌شناسی آذرین

* sheikhzakariaee@srbiau.ac.ir

Copyright©2019, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

(شکل، اندازه، تخلخل) و چگونگی پراکندگی آنها شدت انفجار آتشفشان و میزان صعود مواد پدیدآمده از انفجار به هوا را به دست می آورند (Darvishzadeh, 2004). بررسی دینامیک آتشفشان از دیدگاه‌های بسیاری اهمیت دارد. با دانستن شمار فازهای فورانی پیشین آتشفشان و زمان پس‌دهی انرژی آتشفشان‌الگویی برای رفتار آینده آن به دست آورده می‌شود. بررسی شکل نهشته‌های آذرآواری و دانستن چگونگی گسترش آنها (مانند: منحنی‌های ایزوپک و ایزوپلت) سرمایه‌گذاری برای بهره‌برداری نهشته‌های پومیسی (پوک‌معدنی) را بهینه می‌کند. از آنجایی که درباره آتشفشان سبلان یا دیگر آتشفشان‌های ایران تا کنون چنین کاری انجام نشده است، با بررسی آذرآواری‌ها چه‌بسا تاریخچه فعالیت این آتشفشان بزرگ بازسازی می‌شود. هدف از انجام این پژوهش به دست آوردن حجم مواد بیرون‌ریخته، شدت و نوع فوران انفجاری و همچنین، سنگ‌زایی نهشته‌های آذرآواری سبلان در واپسین فعالیت انفجاری آن است.

جایگاه زمین‌شناسی

سبلان استراتوولکان بزرگی است که در شمال‌باختری ایران در ۲۵ کیلومتری جنوب مشکین‌شهر (شکل ۱) و در یک پهنه گسلی فعال جای دارد. سنگ‌های آتشفشانی سبلان با سرشت کالک‌آلکان دربردارنده تناوبی از گدازه‌های آندزیتی، تراکی‌آندزیتی و داسیتی با سن پلیوسن-کواترنری هستند (Didon and Gemain, 1976; Mousavi, 2013; Shahbazi Shiran and Shafaii Moghadam, 2014; Ghalamghash et al., 2016; Fahim Guilany, 2016). گسل‌های اصلی منطقه در دو گروه شمالی-جنوبی و خاوری-باختری

می‌شود. نخستین بار Walker (۱۹۷۳) با الک‌کردن نهشته‌های آذرآواری گونه‌های فوران‌های آتشفشانی را شناسایی کرد. Suzuki (۱۹۸۱) نمودار لگاریتم ضخامت در برابر لگاریتم بخش فراگرفته‌شده در میان منحنی‌های ایزوپک را برای به دست آوردن حجم نهشته‌ها به کار برد. این نمودار همواره خطای بسیاری نسبت به مقدار واقعی داشته است. تازه‌ترین و معتبرترین الگوی دینامیکی آتشفشان‌ها الگوی پیشنهادی Pyle (۱۹۸۹) است که در این پژوهش از آن بهره گرفته شده است.

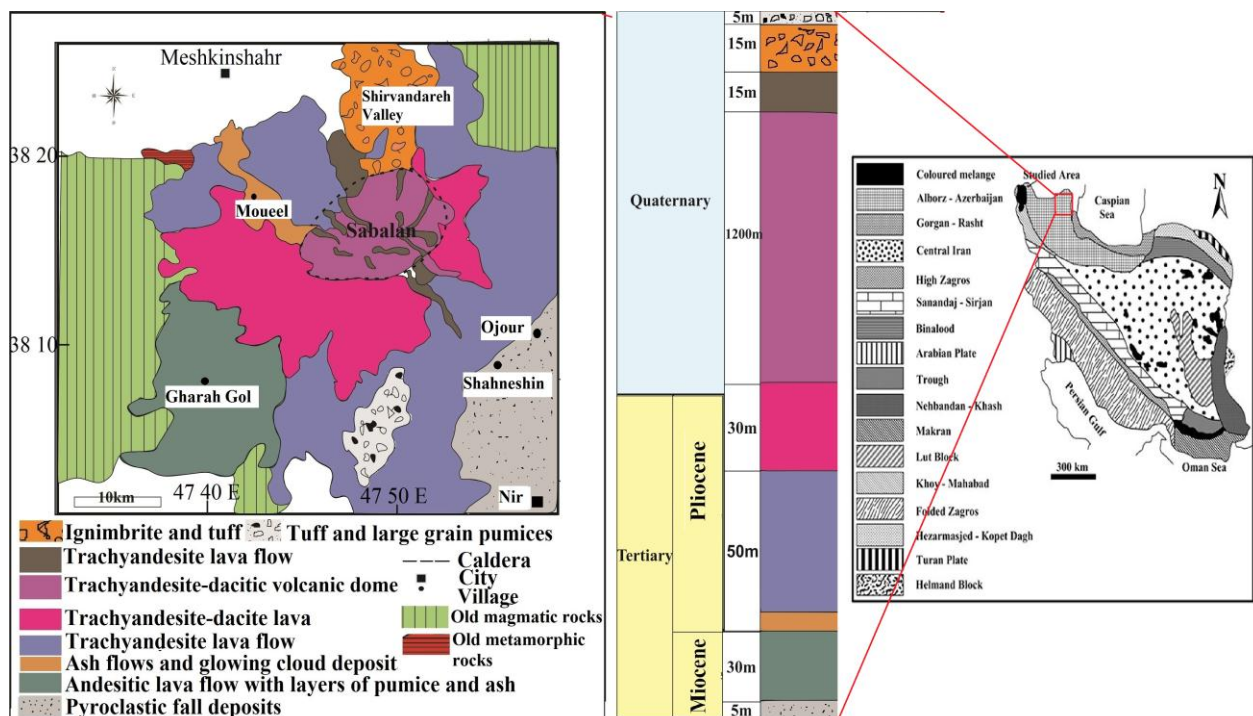
آتشفشان سبلان در شمال‌باختری ایران و در یک منطقه گسترده از برخورد و دگرختی قاره میان صفحه‌های آفریقایی-عربی و اوراسیا جای دارد. این منطقه یک رژیم زمین‌ساختی فشارشی را از آغاز مزوزوییک تا عهد حاضر تجربه کرده است؛ در جایی که فشرده‌سازی پیامد فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر خردقاره ایران و برخورد بعدی میان صفحه‌های عربی و اوراسیا در راستای زاگرس بوده است (Sengör and Kidd, 1979; Dewey et al., 1986; Dilek et al., 2009; Ghalamghash et al., 2016).

پژوهشگران بسیاری تا به امروز در پایان‌نامه‌ها و نوشته‌های گوناگون (Didon and Gemain, 1976; Alberti et al., 1980; Mousavi, 2013; Shahbazi Shiran and Shafaii Moghadam, 2014) به بررسی سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی سبلان پرداخته‌اند؛ اما تا کنون از حجم بزرگ آذرآواری‌ها، تنوع و دسته‌بندی آنها توضیحی آورده نشده است. بی‌گمان در همه فعالیت‌های آتشفشانی، فوران‌های انفجاری که به صورت سنگ‌های آذرآواری به سطح زمین می‌رسند، سهم بسیار مهمی دارند؛ زیرا برپایه ویژگی‌های فیزیکی

دسته‌بندی می‌شوند. این گسل‌ها در پیدایش هورست نقش داشته‌اند و همچنین، پیامد آنها جابجایی در مناطقی بوده است که از دیدگاه زمین‌ساختی آرام بوده‌اند (Didon and Gemain, 1976). افزون‌بر گسل‌های یادشده، گسل‌های محلی، هورست سبلان را به قطعه‌های کوچک‌تری بخش کرده‌اند و در پیدایش کالدرهای این آتشفشان و دره‌های گسلی نقش داشته‌اند.

داده‌های به‌دست‌آمده از سن‌سنجی مطلق گدازه‌های سبلان نشان می‌دهند فعالیت آتشفشانی سبلان بلندمدت بوده است و سنگ‌های آتشفشانی قاعده سبلان از نوع آندزیت به سن میوسن پایانی و سن $1.0/4 \pm 0/5$ میلیون سال پیش (Alberti et al., 1980; Mousavi, 2013) و داسیت‌های پایانی به سن ۱۱۰۰۰۰ سال پیش (Ghalamghash et al., 2012).

در واقع نمونه‌های اولیه سبلان از نوع حد واسط (آندزیتی) بوده‌اند و در پایان به داسیت‌های ایگنیمبریتی تغییر سرشت داده است (Fahim Guilany, 2016). افزون‌بر گدازه‌های گوناگونی که در فعالیت بلندمدت این آتشفشان بزرگ بیرون ریخته‌اند، این آتشفشان به تناوب بیش از ۷ بار فعالیت انفجاری بسیار شدید داشته است (Fahim Guilany, 2016) که در هنگام آن نهشته‌های آذرآواری ریزشی گوناگون، ابر سوزان (Fahim Guilany et al., 2016)، نهشته‌های موجی و ایگنیمبریت پدید آمده‌اند و حجمی نزدیک به ۶۰ کیلومتر مکعب از گدازه و نهشته‌های آذرآواری را برجای گذاشته است (Didon and Gemain, 1976). این حجم بزرگ از نهشته‌های آتشفشانی از ویژگی‌های آتشفشان‌های پهنه‌فرورانش است (Pirmohammadi Alishah et al., 2012).



شکل ۱- جایگاه جغرافیایی آتشفشان سبلان و نقشه زمین‌شناسی منطقه (Mousavi, 2013) با تغییر

روش انجام پژوهش

بهترین روش برای توصیف و رده‌بندی فوران‌هایی که پیامد آنها پیدایش نهشته‌های ریزشی است، بررسی‌های صحرایی برپایه انتشار و پراکندگی قطعات آواری و اندازه‌دانه‌هاست. از این‌رو، ستبر و بزرگی نهشته ریزشی آخرین فوران آتشفشانی سبلان که از قاعده کلی فوران‌های ریزشی پیروی می‌کند به طور دقیق اندازه‌گیری شد. سپس از داده‌های به‌دست‌آمده به ترتیب منحنی‌های ایزوپیک و ایزوپلت با نرم‌افزار CorelDrawX7 رسم شدند. همچنین، برای محاسبه حجم نهشته‌ها الگوی نازک‌شدگی نمایی (exponential) برپایه داده‌هایی که از نقشه ایزوپیک به‌دست آمدند به‌کار برده شد. در پایان، نوع فوران و جهت انتشار باد در پراکندگی این نهشته‌ها شناسایی شد. سپس از ایگنیمبریت‌ها مقطع نازک ساخته شد و پس از بررسی آنها، شمار ۸ نمونه با دگرسانی کمتر در آزمایشگاه زرآزمای تهران به روش ICP-OES برای عناصر اصلی و ICP-MS برای عنصرهای فرعی و کمیاب خاکی تجزیه شیمیایی شدند (آستانه آشکارسازی دستگاه برای عنصرهای اصلی برابر با ۰/۰۵٪ و برای عنصرهای کمیاب برابر با ۰/۰۲ ppm - ۱ بوده است). داده‌های به‌دست‌آمده با نرم‌افزارهای GCDKit و IgPet 2007 تحلیل شدند.

ویژگی‌های صحرایی

نتایج به‌دست‌آمده از برداشت‌های صحرایی در اطراف آتشفشان سبلان در آخرین فعالیت انفجاری آن به‌صورت (الف) نهشته‌های آذرآواری ریزشی و (ب) ایگنیمبریت بوده است که ویژگی‌های هر کدام به‌صورت جداگانه آورده می‌شود.

الف- آذرآواری‌های ریزشی سبلان:

در پی فعالیت انفجاری شدید آتشفشانی، حجم چشمگیری از گدازه‌های درون آشیانه ماگمایی تا کیلومترها به هوا پرتاب می‌شوند و ستون انفجاری را پدید می‌آورند که از روی ارتفاع آن شدت و نوع فوران انفجاری شناسایی می‌شوند. پس از صعود، این مواد آذرآواری به‌صورت قطعات جدا از هم مانند ریزش برف روی زمین روی هم انباشته می‌شوند و ضخامتی از خاکستر و پومیس برجای می‌ماند. هر اندازه از نقطه خروج دورتر شویم ستبرای آنها کمتر و اندازه دانه‌ها کوچک‌تر می‌شود و سرانجام به خاکستر تبدیل می‌شوند.

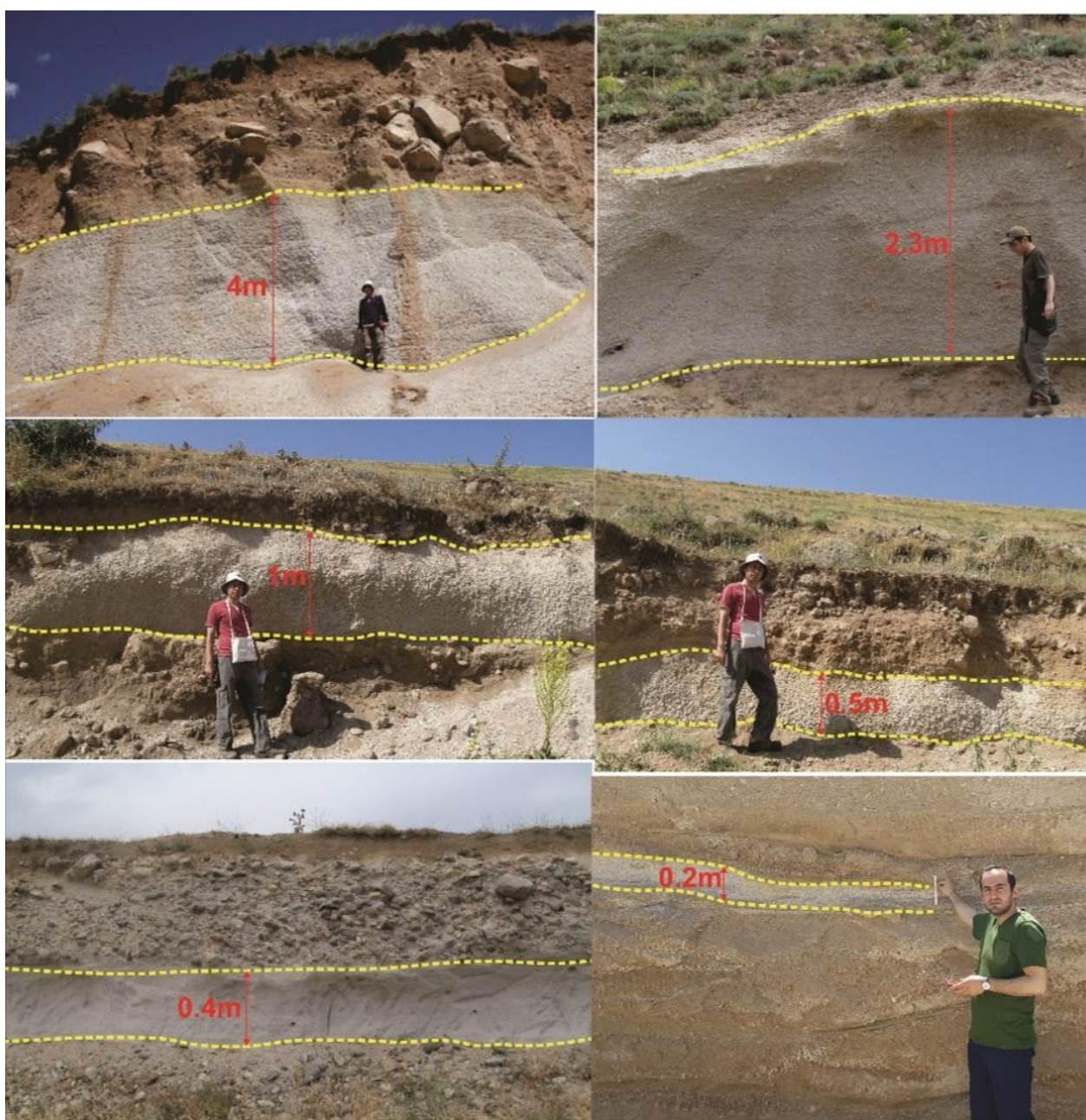
نهشته‌های آذرآواری ریزشی سبلان اساساً از جنس پومیس و خاکستر هستند (شکل ۲) و از قله سبلان تا فاصله دور طی روندی باختری-خاوری (جهت وزش باد غالب در منطقه) دیده می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که با دور شدن از آتشفشان، اندازه قطعات و ضخامت لایه‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۲). اگرچه به‌علت مدت زمان طولانی که از فوران این ریزشی‌ها گذشته است نشانه‌های آنها یا در زیر گدازه‌های بعدی پنهان شده‌اند، یا در پی عوامل طبیعی از میان رفته‌اند یا معدنکاران آنها را برداشت کرده‌اند؛ اما در این پژوهش با پیمایش‌های صحرایی در این محل، ۳۶ نقطه از رخنمون‌های این ریزشی‌ها بررسی شدند و برپایه آنها منحنی‌های ایزوپیک رسم شدند (شکل ۳).

محاسبه حجم تفرای ریزشی سبلان: برآورد میزان حجم کلی تفرای کار دشواری است؛ از این‌رو، برای محاسبه دقیق‌تر از الگوی نازک‌شدگی نمایی با استفاده از داده‌هایی که از نقشه ایزوپیک به‌دست

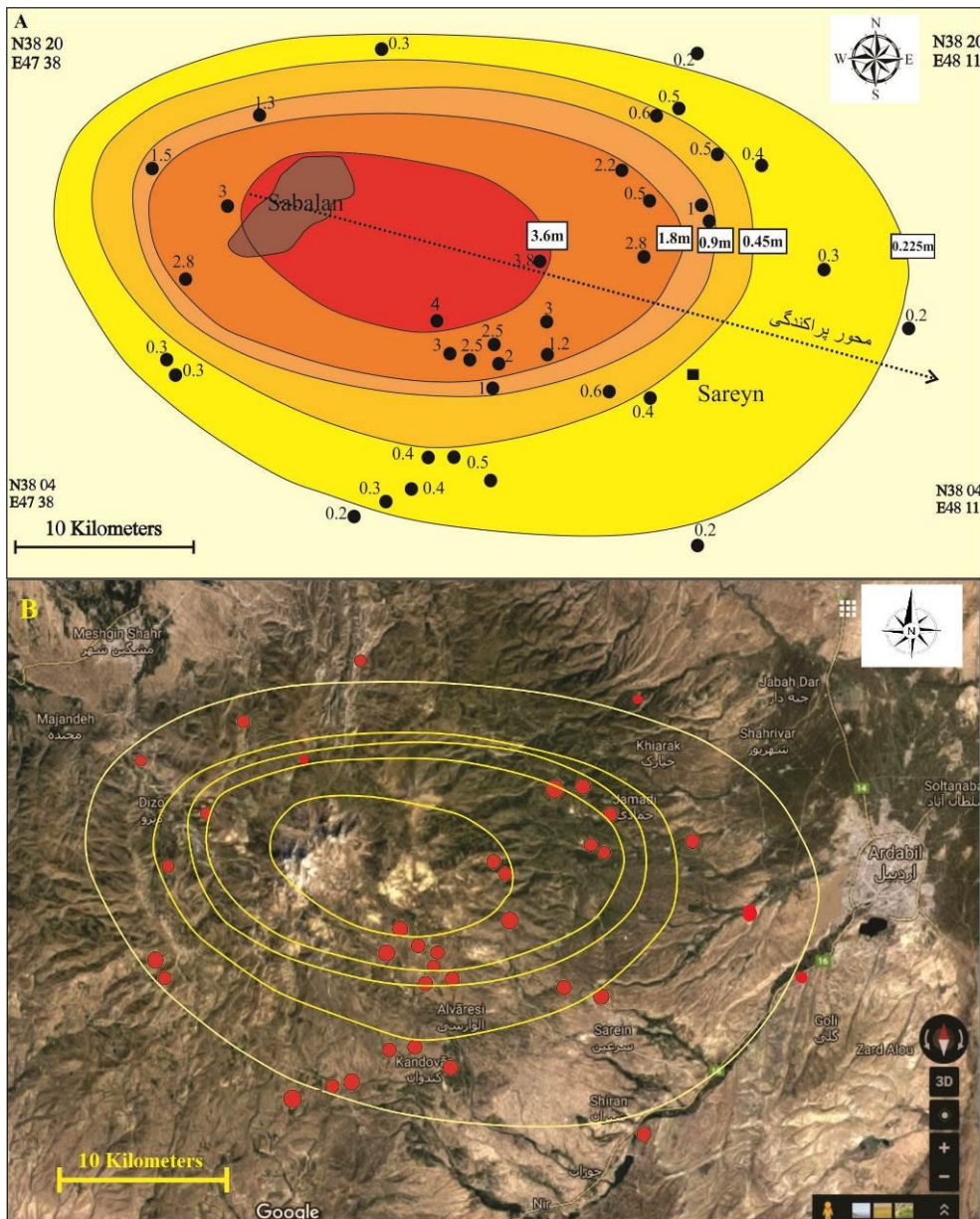
$$\ln(T) = \ln(T_0) - kA \quad \text{و} \quad T = T_0 \exp(-K \cdot A^{1/2})$$

این معادله نشان‌دهنده معادله‌ای خطی در دستگاه $\ln(T)$ در برابر ریشه دوم مساحت درون هر ایزوپک است. K نشانه شیب منفی خط و T_0 بیشترین ستبرای برون‌یابی شده در نقطه $A=0$ هستند (Pyle, 1989).

آمده‌اند بهره گرفته شد. محاسبه حجم، برپایه قانون نازک‌شدگی نمایی کمی پیچیده است. به گفته Pyle (۱۹۸۹، ۱۹۹۵) و Fierstein و Nathanson (۱۹۹۲)، ستبرای نهشته‌های ریزشی با دورشدن از خاستگاه به‌گونه نمایی و برپایه این رابطه کاهش می‌یابد:



شکل ۲- نمایی از نهشته‌های ریزشی سبلان که با دورشدن از دهانه آتشفشان، ستبرا و بزرگی آن کمتر می‌شوند

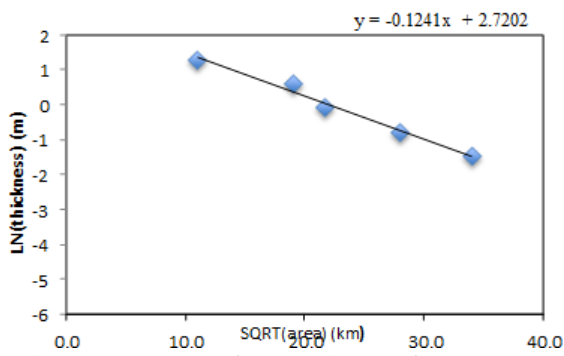


شکل ۳- (A) منحنی‌های ایزوپیک آخرین نهشته‌های ریزشی سیلان (دایره‌های سیاه محل بیرون‌زدگی و شماره‌ها نماینده ستبرای لایه‌ها برپایه متر هستند)؛ (B) جایگاه نقاط برداشت‌شده و منحنی‌های ایزوپیک روی نقشه ماهواره‌ای

جدول ۱- اطلاعات داده‌شده و محاسبه‌شده از مساحت محصور در منحنی‌های ایزوپیک و ضخامت آنها

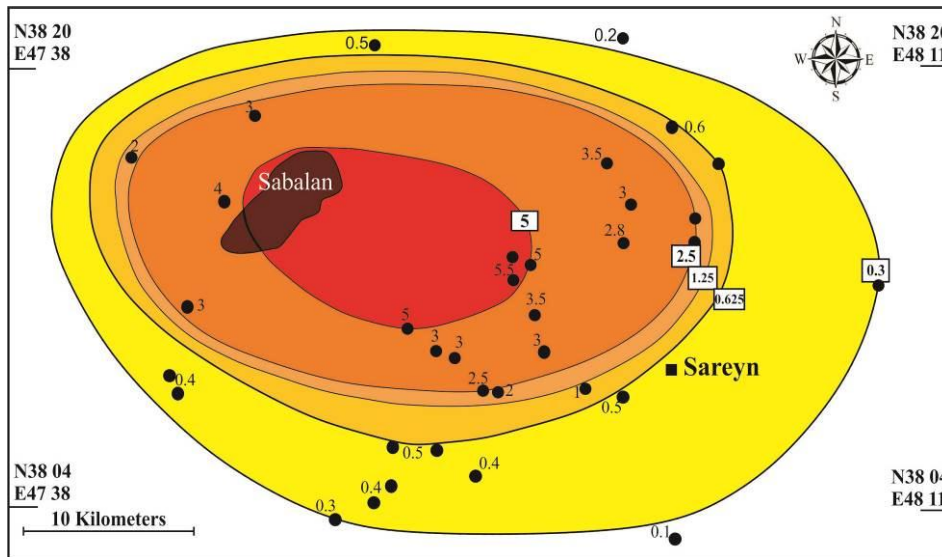
Calculated Data		Given Data	
ln(thickness) M	Squared area inside isopach (Km)	Thickness (m)	Area inside the isopach (Km ²)
1.28	11.04	3.6	122
0.59	19.1	1.8	364.81
-0.10	21.7	0.9	470.89
-0.80	28.01	0.45	785
-1.49	34.07	0.225	1161

در جدول ۱، مساحت محصور در منحنی‌های ایزوپیک و ضخامت آنها نشان داده شده‌اند. نمودار (ضخامت) ln در برابر ریشه دوم مساحت منحنی‌های ایزوپیک برای نهشته‌های ریزشی سیلان در شکل ۴ نشان داده شده است. از روی شکل ۴ شیب خط به‌دست آورده می‌شود. این مقدار برابر با ۰/۱۲۴۱- است.



شکل ۴- نمودار (ضخامت) \ln در برابر ریشه دوم مساحت منحنی‌های ایزوپک برای نهشته‌های ریزشی پس از کالدر (برپایه کارهای Pyle (۱۹۸۹)، Bonadonna و Houghton (۲۰۰۵) و Connor و Connor (۲۰۰۶))

همچنین، جایی که خط نمودار ضخامت را قطع می‌کند در واقع $\ln(T_0)$ است. در اینجا از روی شکل ۵ و با به‌کارگیری نرم‌افزار Excel 2016، ۲/۷۲ به‌دست آمد. برای به‌دست آوردن T_0 (ضخامت بیشینه نهشته‌های ریزشی در نزدیک دهانه) باید $\exp(\ln T_0)$ را به‌دست آورد. این مقدار برای نهشته‌های ریزشی یادشده برابر با $۱۵/۱۸۰۳$ متر به‌دست آمد.



شکل ۵- نقشه ایزوپلت آخرین نهشته‌های ریزشی سبلان (دایره‌های سیاه: بیرون زدگی؛ شماره‌ها: ابعاد بزرگ‌ترین دانه ریزشی برپایه سانتیمتر)

به‌صورت زیر است:

$$V=13.08 \cdot T_0(b_i)^2 / \alpha$$

در این معادله، T_0 نشان‌دهنده بیشینه ضخامت بیرون‌یابی‌شده در نقطه $A=0$ ، b_i فاصله ضخامت میانه و α ضریبی متناسب با دوری از مرکزیت الیپسویید ایزوپک از دهانه است و برابر است با:

$$\alpha^2 = (1 - e^2) = Y^2 / X^2$$

همچنین، e دوری از مرکزیت الیپسویید ایزوپک‌هاست و X و Y به ترتیب قطر کوچک و بزرگ الیپسویید ایزوپک‌ها هستند:

$$V=13.08 \cdot 0.01518(3.13)^2 / 0.60 = 3.24$$

برپایه کارهای Pyle (۱۹۸۹، ۱۹۹۵)، Bonadonna و Houghton (۲۰۰۵) و Connor و Connor (۲۰۰۶) برای به‌دست آوردن b_i (فاصله ضخامت میانه)، معادله $b_i = \ln(2) / (k \cdot \sqrt{\pi})$ به‌کار برده می‌شود:

$$b_i = 0.69 / (0.1241 \cdot (\sqrt{\pi})) = 3.13$$

برای به‌دست آوردن مقدار حجم نهشته‌های ریزشی روش‌های فراوانی پیشنهاد شده است؛ اما روش جدیدتری که Pyle (۱۹۸۹، ۱۹۹۵) و Houghton و همکاران (۲۰۰۰) پیشنهاد کرده‌اند دقیق‌تر از به روش‌های دیگر است و معادله آن

تغییرات اندازه قطعات نهشته‌های ریزشی سبلان: در بررسی روند تغییرات بزرگی قطعات نهشته‌های ریزشی آتشفشانی، مهم‌ترین کار رسم نقشه ایزوپلت (هم‌اندازه) برای بیشینه ابعاد قطعات است. بیشینه ابعاد قطعات به صورت میانگین سه عدد از بزرگ‌ترین قطر دانه‌ها در نظر گرفته می‌شود (Sparks et al., ۱۹۸۱) و معیاری برای رسم نقشه ایزوپلت دانسته می‌شود. در شکل ۵، ایزوپلت بیشینه قطر قطعات آخرین نهشته‌های ریزشی سبلان آورده شده است. در جدول ۳، مساحت محصور در منحنی‌های ایزوپلت و ابعاد دانه‌های آن نشان داده شده است.

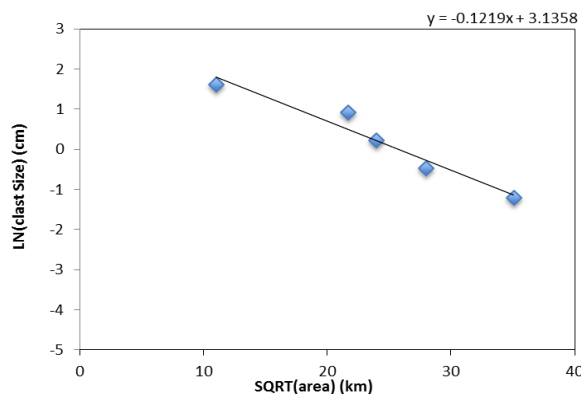
برپایه شکل ۴ و معادله‌های بالا، مقدارهای جدول ۲ به دست می‌آیند. بنابراین حجم کل تفرهای نهشته‌های ریزشی در آخرین فوران انفجاری آن ۳/۲۴ کیلومتر مکعب به دست می‌آید.

جدول ۲- داده‌های مربوط به شکل ۵ برای به دست آوردن حجم تفرا

K	منفی شیب خط	0.1241
$\ln T_0$	جایی که خط، نمودار ضخامت را قطع کند	2.72
T_0 (m)	$=\exp(\ln T_0)$	15.18m
T_0 (Km)	$=\exp(\ln T_0)/1000$	0.01518km
b_t	$=\ln(2)/(k*\sqrt{\pi})$	3.13km
A	$=T_2/T_1$	0.60
V	$=13.08*T_0(b_t)^2/\alpha$	Km^3 3.24

جدول ۳- مساحت محصور در منحنی‌های ایزوپلت و ابعاد دانه‌های آن

اطلاعات داده شده		اطلاعات محاسبه شده	
مساحت محصور درون ایزوپلت (km^2)	اندازه قطعات (cm)	ریشه دوم مساحت محصور درون ایزوپلت (km)	Ln اندازه قطعات (cm)
121	5	11	1.61
470.89	2.5	21.7	0.92
576.48	1.25	24.01	0.23
784	0.625	28	-0.47
1232.01	0.3	35.1	-1.20



شکل ۶- نمودار (اندازه قطعات) Ln در برابر ریشه دوم مساحت منحنی‌های ایزوپلت برای آخرین نهشته‌های ریزشی سبلان

شاخص انفجار آتشفشان: شاخص انفجار آتشفشان برپایه حجم تفرای پدیدآمده در هنگام فوران آتشفشان به دست آورده می‌شود. Newhall

کوچک شدن اندازه قطعات نهشته‌های ریزشی آتشفشانی با دور شدن از دهانه، از قوانین نمایی پیروی می‌کند (Thorarinson, 1954). روند خطی نمودار شکل ۶ نیز نشان دهنده کاهش ابعاد قطعات برپایه قانون‌های نمایی است. b_c یا فاصله میان‌بیشینه قطر قطعات پارامتر بسیار مهمی است که از نمودار شکل ۶ به دست می‌آید. برپایه گفته Pyle (۱۹۸۹)، این پارامتر از رابطه $b_c = \ln 2 / k * \sqrt{\pi}$ به دست می‌آید. K نیز معرف منفی شیب نمودار است و مقدار آن برابر با ۰/۱۲۱۹ است. از این رو:

$$b_c = \ln 2 / 0.1219 * \sqrt{\pi} = 3.19.$$

فعالیت کمابیش کم‌خطر آتشفشان (بی انفجار) و درجه هشت، فوران انفجاری بزرگ و سهمناکی است که پرتابه ریزشی آن در همه نقاط زمین دیده می‌شود (مانند: انفجار ۱۸۸۳ کوه کراکانو در جاوه).

Self (۱۹۸۲) شاخص انفجاری آتشفشان (Volcanic Explosivity Index) (جدول ۴) را مشخص کرده‌اند و برپایه جدول ۴، درجات انفجاری از صفر تا هشت متغیر است. درجه صفر نشان‌دهنده

جدول ۴- درجه‌بندی شدت فوران آتشفشانی برگرفته از Self و Newhall (۱۹۸۲)

رده‌بندی	مقدار مواد خارج شده	ارتفاع ستون فوران	تشریح	VEI
هاوایی	$< 10^4$ متر مکعب	> 100 متر	بدون انفجار	۰
هاوایی/ استرومبولی	$10^4 - 10^6$ متر مکعب	$100 - 1000$ متر	ضعیف	۱
استرومبولی/ ولکانو	$10^6 - 10^7$ متر مکعب	۱ - ۵ کیلومتر	معتدل	۲
ولکانو/ پله	$10^7 - 10^8$ متر مکعب	۳ - ۱۵ کیلومتر	متوسط	۳
پله/ پلینی	$10^8 - 10^9$ متر مکعب	۱۰ - ۲۵ کیلومتر	بزرگ	۴
پلینی	$10^9 - 10^{10}$ متر مکعب	> 25 کیلومتر	خیلی بزرگ	۵
پلینی/ الترا پلینی	$10^{10} - 10^{11}$ متر مکعب	> 25 کیلومتر	-	۶
پلینی/ الترا پلینی	$10^{11} - 10^{12}$ متر مکعب	> 25 کیلومتر	-	۷
ترا پلینی	$> 10^{12}$ متر مکعب	> 25 کیلومتر	-	۸

فروافتادن نهایی بیشتری دارند (جدول ۵). اکنون با به‌کاربردن اندازه تفرها و پراکندگی آنها مساحت درون منحنی‌های ایزوپلت (جدول ۳) و بلندای ستون فوران به‌دست آورده می‌شود (شکل ۷). همان‌گونه که دیده می‌شود بلندای ستون فوران روی نمودار Carey و Sparks (۱۹۸۶) برابر با ۲۲- ۲۷ کیلومتر به‌دست آمد. این مقدار نشان‌دهنده یک ستون فوران پلینی با قدرت انفجار بسیار بزرگ است که درستی روش یادشده را نشان می‌دهد.

جدول ۵- نتایج سرعت فروافتادن ذرات برپایه اندازه ذرات و پراکندگی آن در منحنی‌های ایزوپلت

اندازه قطعات تفرا (cm)	$V=C_d\sqrt{dga/\beta}$
5	$V=1.054\sqrt{0.05*9.8*0.1/0.001225}=7.77$
2.5	$V=1.054\sqrt{0.025*9.8*0.1/0.001225}=5.49$
1.25	$V=1.054\sqrt{0.0125*9.8*0.1/0.001225}=3.88$
0.625	$V=1.054\sqrt{0.00625*9.8*0.1/0.001225}=2.74$

از آنجایی که حجم تفرای به‌دست‌آمده برای نهشته‌های ریزشی سرعین برابر با ۳/۲۴ کیلومتر مکعب به‌دست آمده است ($3/24 \times 10^9$ متر مکعب)، شاخص انفجار آن برابر با ۵ (شدت انفجار خیلی بزرگ) است. از این‌رو، فورانی از نوع پلینی با ستون فورانی به بلندای بیشتر از ۲۵ کیلومتر داشته است.

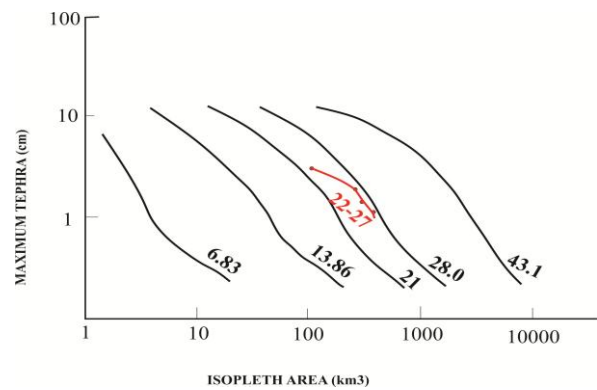
این شاخص را می‌توان از راه سرعت فروافتادن (سقوط ذرات) یا قانون استوک نیز بررسی کرد:

$$V=C_d\sqrt{dga/\beta}$$

که در آن C_d برابر با ضریب مقاومت هوا (۱/۰۵۴)، d برابر با قطر ذره، g نشان‌دهنده شتاب ثقل، α برابر با چگالی ذره و β برابر با چگالی اتمسفر هستند.

نتایج سرعت فروافتادن ذره‌ها در سبلان در جدول ۵ آورده شده‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود مواد درشت‌تر (با چگالی یکسان)، سرعت

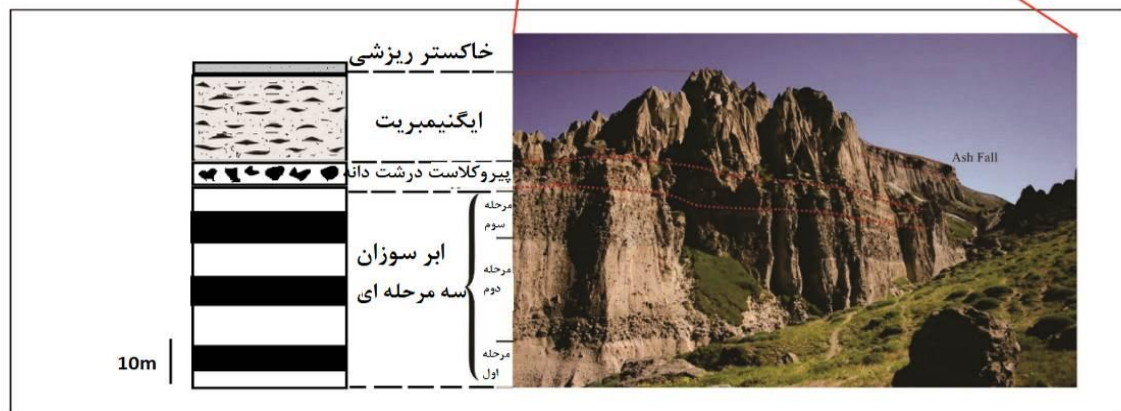
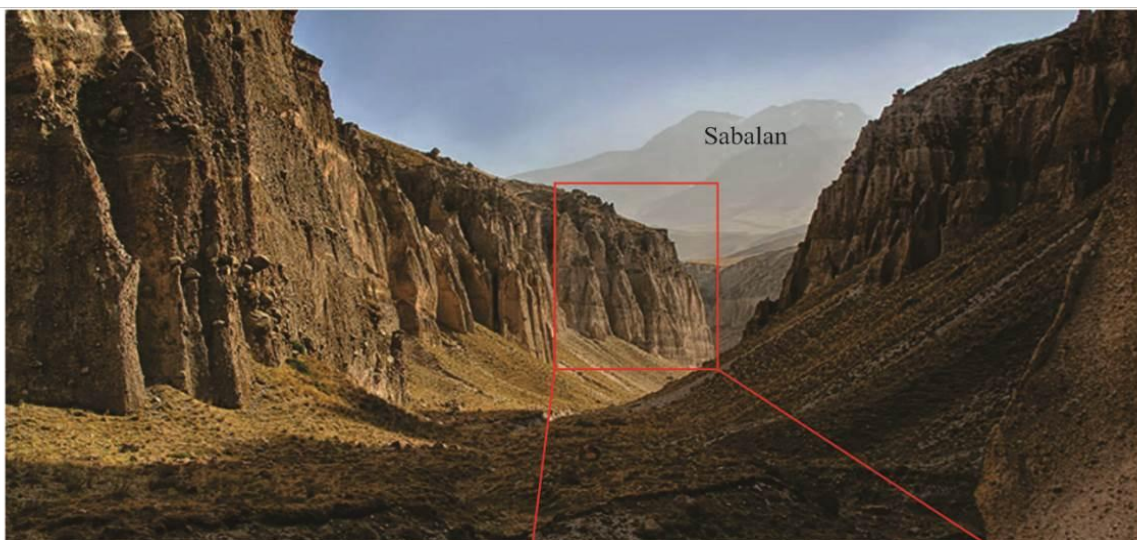
انواع نهشته‌های برجای مانده از آتشفشان سبلان به نام ایگنیمبریت نیز دست یافته شد. ایگنیمبریت بررسی شده درون دره‌ای به نام شیروان دره، در ۲۰ کیلومتری جنوب‌خاوری مشکین‌شهر و میان شهر لاهرود و آتشفشان سبلان جای دارد. درازای تقریبی این دره نزدیک به ۳۰ کیلومتر و میانگین پهنای آن برابر با ۲/۵ کیلومتر است؛ اما از آنجایی که ژرفای آن از نهشته‌های آذرآواری گوناگون انباشته شده است، قابل ارزیابی نیست. به ترتیب سنی، ابر سوزان سه مرحله‌ای، آذرآواری‌های دانه‌درشت، ایگنیمبریت و خاکسترهای ریزشی از نهشته‌های پرکننده این دره به‌شمار می‌روند (Fahim Guilany *et al.*, ۲۰۱۶) (شکل ۸).



شکل ۷- نمودار اندازه ذرات در برابر مساحت محصور در منحنی‌های ایزوپلت (Carey and Sparks, 1986) (شماره‌های روی منحنی ارتفاع ستون فوران برپایه کیلومتر هستند)

ب- ایگنیمبریت‌ها:

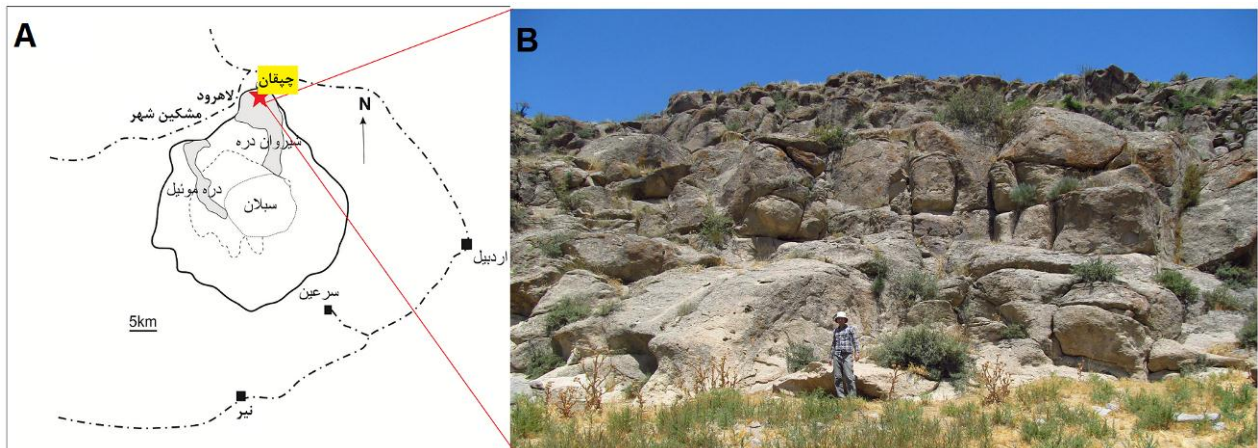
در کاوش‌های صحرائی انجام‌شده، به گونه دیگری از



شکل ۸- طرح نمادین از مواد سازند شیروان دره

به ۳۰ متر است؛ اما در بلندترین نقطه آن تا ۵۰ متر هم می‌رسد. با توجه به چگونگی پیدایش ایگنیمبریت‌ها، گمان می‌رود با فروریزش ستون فوران و حرکت آن در راستای شیروان‌دره، حجم بزرگی از پومیس و خاکستر و قطعات سنگی در راستای شمال به جنوب جابجا شده و ایگنیمبریت شیروان‌دره را پدید آورده است.

بیرون‌زدگی این لایه ایگنیمبریتی راستای کمابیش شمالی- جنوبی دارد و با یک شیب ملایم و کمابیش افقی، با گسترش طولی نزدیک به ۳۵ کیلومتر و پهنای نزدیک به ۰/۵ کیلومتر از شیروان‌دره تا روستای چپقان امتداد می‌یابد. دنباله آن در زیر رسوب‌های عهد حاضر پنهان شده است (شکل ۹).



شکل ۹- (A) بیرون‌زدگی ایگنیمبریت‌ها در روستای چپقان؛ (B) حد نهایی بیرون‌زدگی ایگنیمبریت در روستای چپقان

فراوان‌ترین کانی‌های دیده‌شده در این ایگنیمبریت‌ها هستند. پلاژیوکلاز به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و با اندازه‌های متوسط تا ریزبلور (میانگین اندازه: $980 \mu\text{m}$ ؛ شکل ۱۱- A) هستند. برخی از آنها به علت حالت انفجاری فوران دچار شکستگی شده‌اند و در زمینه سنگ‌های یادشده دیده می‌شوند (شکل ۱۱- B). بیوتیت به صورت پولکی و تیغه‌ای با میانگین اندازه برابر با ۱ تا ۲ میلی‌متر در زمینه سنگ پراکنده است (شکل ۱۱- C). این بیوتیت‌ها از دیدگاه ریخت‌شناسی نیمه‌شکل‌دار و تاب‌دار هستند (شکل ۱۱- C) و گاه حاشیه کاملاً سوخته دارند. آمفیبول به صورت شکل‌دار تا بی‌شکل با میانگین اندازه برابر با $850 \mu\text{m}$ و با فراوانی کمابیش متوسط دیده می‌شود (شکل ۱۱- D). ترکش‌های شیشه (Shard) (شکل ۱۱- F) نیز به علت گرمای بسیار به حالت نیمه‌مذاب به هم جوش خورده‌اند و نوارهای قهوه‌ای تیره‌ای درازی را پدید آورده‌اند. این

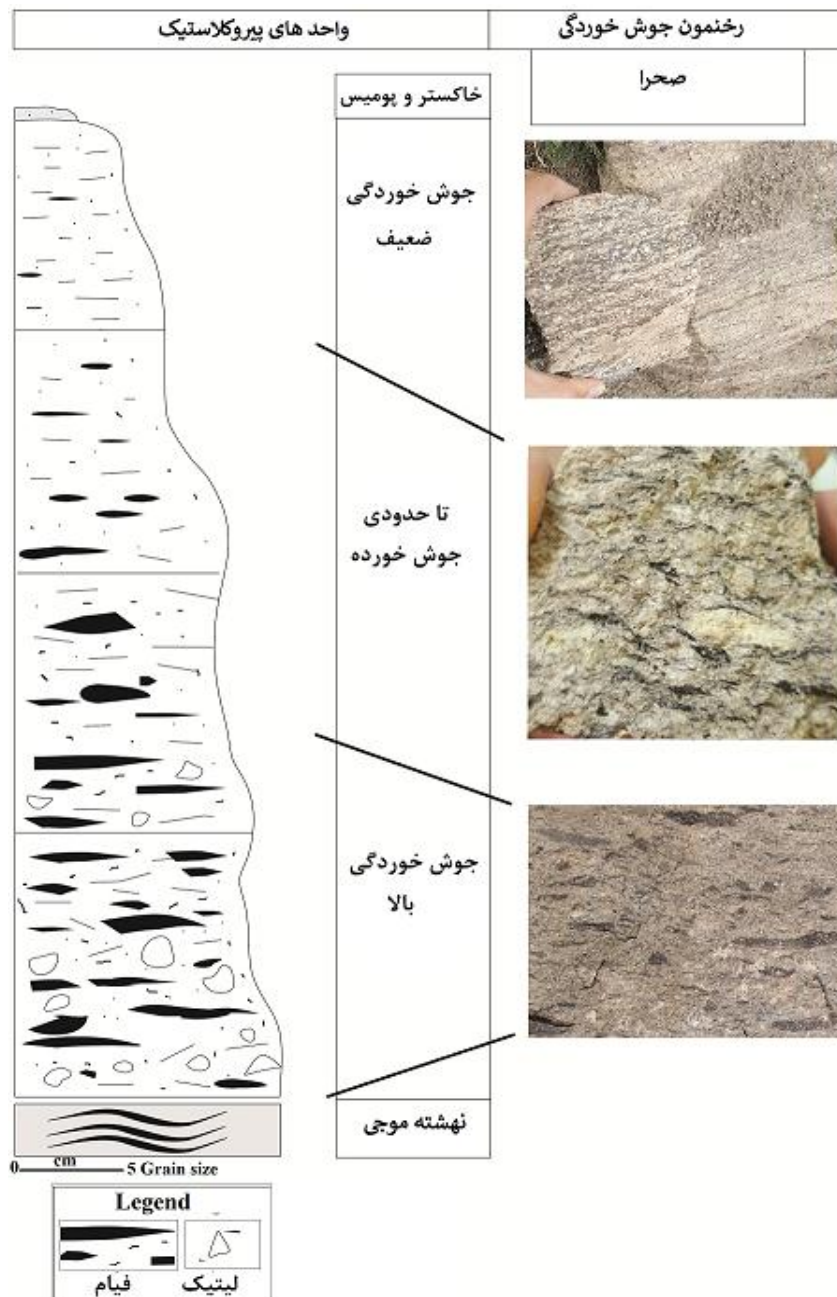
همان‌گونه که در یک پهنه ایگنیمبریتی باید انتظار داشت، در سبلان سه بخش یک نهشته ایگنیمبریتی دیده می‌شوند (شکل ۱۰):
 - بخش موجی در قاعده که ستبرای چندانی ندارد و به سختی شناسایی می‌شود؛
 - بخش میانی که ایگنیمبریت جوش‌خورده‌ای به ستبرای نزدیک به ۲۶ متر است و قطعات لیتیک در قاعده این بخش و فیام در بخش میانی به خوبی شناسایی می‌شوند (شکل ۱۰)؛
 - بخش بالایی که به ستبرای نزدیک به ۶ متر است و استحکام بالایی ندارد. این بخش را تنها از روی جنس و جهت‌یافتگی قطعات به بخش بالایی این پهنه ایگنیمبریتی نسبت می‌دهند (شکل ۱۰).

سنگ‌نگاری

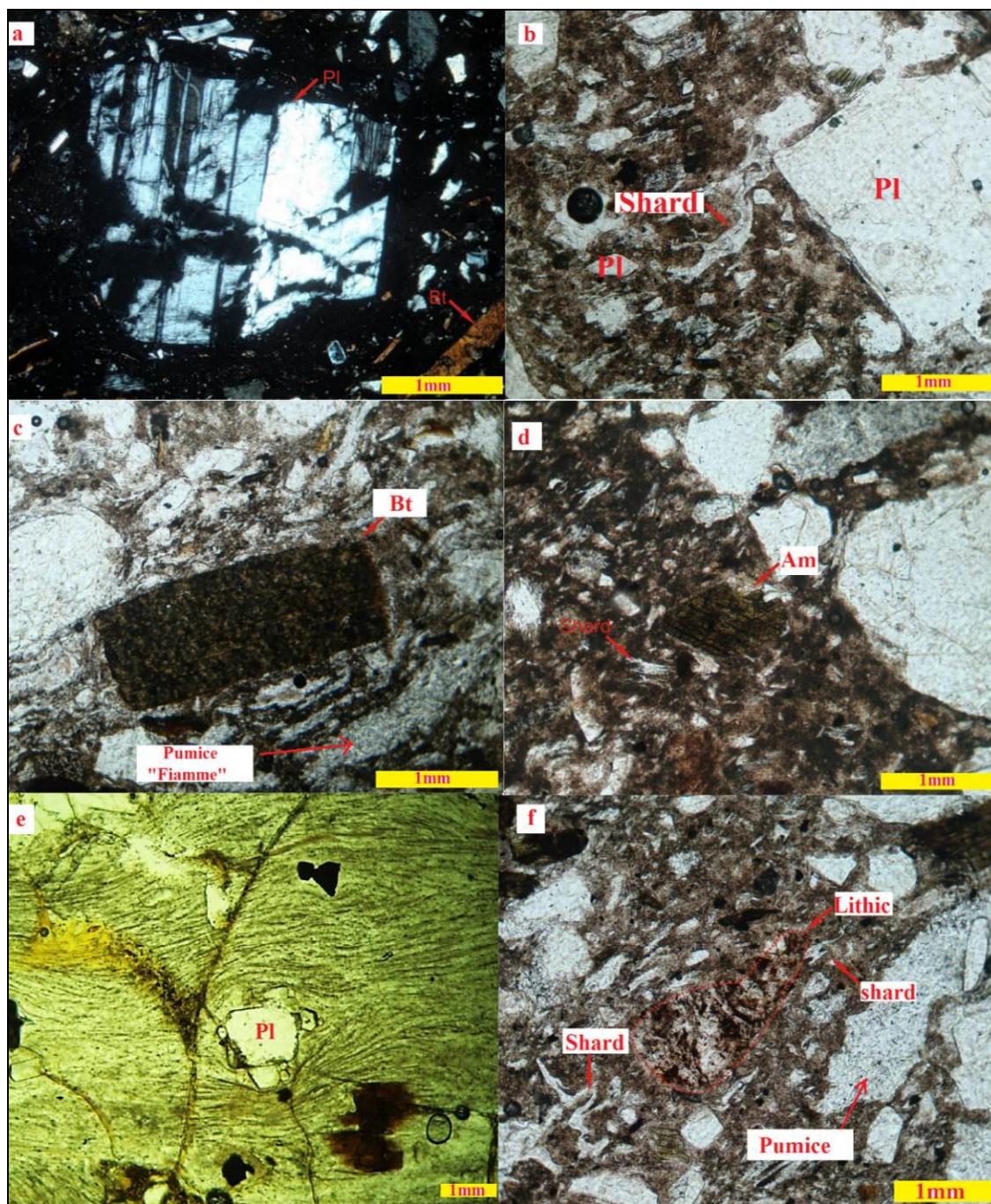
پلاژیوکلاز، بیوتیت و آمفیبول و پیروکسن از

و روشن بسیار نازکی دیده می‌شود که به طرز جالبی بلورها را دور می‌زنند (شکل ۱۱- E). فیام‌های درون خمیره نیز در راستای جریان دراز شده‌اند. همان‌گونه که در تصویرهای میکروسکوپی دیده می‌شود، ایگنیمبریت‌های منطقه بافت اتاکسیتیک روشنی از خود نشان می‌دهند (شکل ۱۱- E).

نوارها بلورها را دور زده و بافت جریان‌ی اتاکسیتی را پدید آورده‌اند (شکل ۱۱- E). در پی فشردگی وزن لایه‌های بالایی، ترکش‌های شیشه‌ای و پومیس‌های در حال حرکت طویل‌شدگی پیدا می‌کنند. رنگ خمیره قهوه‌ای روشن است و دربردارنده پومیس‌های کشیده و شاردهای شیشه‌ای است. حالت جریان‌یافتگی در آنها به صورت نوارهای تیره



شکل ۱۰- ستون چینه‌شناسی نمادین از ایگنیمبریت سبلان



شکل ۱۱- تصویرهای میکروسکوپی از ایگنیمبریت‌های سبلان. A، B) بلورهای پلاژیوکلاز در ایگنیمبریت‌های چپقان. به شارد‌های شیشه‌ای و زمینه قهوه‌ای رنگ توجه شود؛ C) نمایی از بیوتیت کاملاً سوخته که جهت جریان شیشه را پیروی می‌کند؛ D) نمایی از آمفیبول شکل‌دار و ترکش‌های آتشفشانی؛ E) بافت اتاکسیتی، تناوب لایه‌های تیره و روشن شیشه زمینه یک سنگ که یک فنوکلاست پلاژیوکلاز را دور زده‌اند؛ F) نمایی از لیتیک زاویه‌دار (نام اختصاری کانی‌ها: Pl= پلاژیوکلاز؛ Bt= بیوتیت؛ Am= آمفیبول)

سبلان در جدول ۶ آورده شده‌اند. اساساً ایگنیمبریت‌ها ترکیب سیلیسی دارند و عموماً مقدار SiO_2 در آنها از ۶۵ درصدوزنی بیشتر است.

زمین‌شیمی

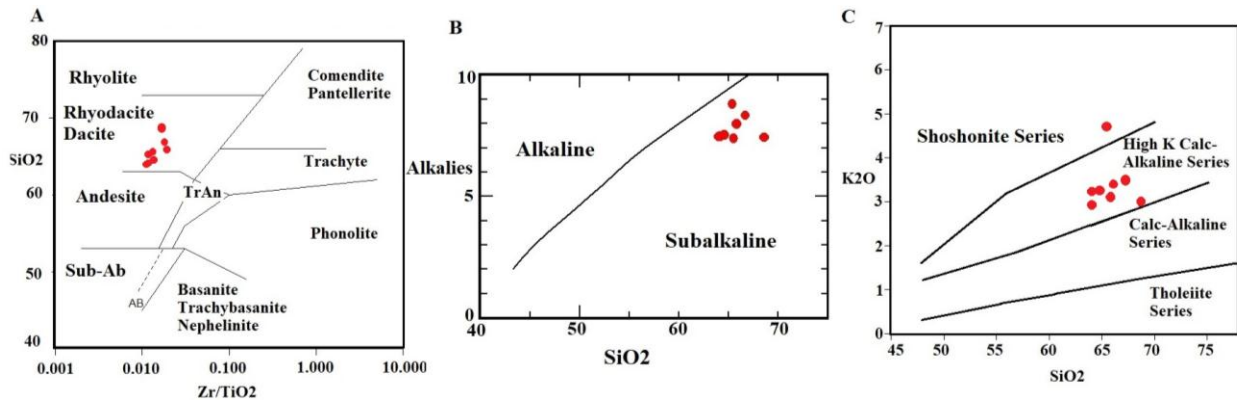
داده‌های تجزیه زمین‌شیمیایی از بخش‌های گوناگون ایگنیمبریت و همچنین، پومیس و خاکسترهای ریزشی

جدول ۶- داده‌های تجزیه شیمیایی سه بخش ایگنیمبریت‌های سبلان (اکسیدها برپایه درصدوزنی، عناصرها برپایه ppm)

Sample Type	Highly Welded	Highly Welded	Intermediate	Intermediate	Intermediate	Poorly Welded	Fall Upper Pumice	Upper Pumice Fall
Sample No.	Ch1- a	Ch1- b	Ch2	Sh1- a	Sh1- b	Sh2	P1	P2
SiO ₂	64.18	64.63	65.54	65.87	65.4	66.74	68.64	64.06
Al ₂ O ₃	15.91	15.83	16.09	15.77	15	15.61	15.45	15.68
Fe ₂ O ₃	3.24	3.19	3.32	3.05	3.69	3.03	3.06	3.48
CaO	4.15	4.2	2.94	3.82	2.62	2.75	2.53	4.23
MgO	1.34	1.32	1.26	1.29	1.09	1.16	1.13	1.39
Na ₂ O	4.23	4.3	4.29	4.59	4.11	4.84	4.5	4.51
K ₂ O	3.24	3.23	3.1	3.38	4.68	3.49	2.93	2.95
TiO ₂	0.5	0.5	0.48	0.51	0.7	0.48	0.5	0.56
MnO	0.07	0.07	0.06	0.06	0.09	0.06	0.06	0.06
P ₂ O ₅	0.32	0.3	0.3	0.32	0.25	0.32	0.3	0.32
LOI	2.33	2.3	2.39	1.17	1.32	0.05		
Ba	684	710	647	719	721	678	705	651
Co	6.4	6.5	6.6	7.1	7.3	6.5	6.4	6.6
Cs	3.6	3.5	3.5	2.6	2.7	2.7	2.6	3.3
Cu	49	48	47	18	21	25	27	41
Dy	2.24	2.12	2.38	1.99	1.95	1.96	2.1	2.23
Er	1.17	1.15	1.13	0.96	0.96	0.93	0.96	1.15
Eu	1.09	1.03	1.04	1	0.99	0.94	0.95	1
Gd	2.87	2.9	3.05	2.6	2.7	2.55	2.88	2.7
Hf	1.95	1.98	2.01	2.33	2.4	2.17	2.22	2.01
Lu	0.16	0.15	0.17	0.1	0.11	0.13	0.1	0.1
Ni	13	14	14	33	26	17	18	22
Pr	6.69	6.7	6.79	6.43	6.3	6.17	6.23	6.6
Rb	78	78	77	62	61	53	60	71
Sn	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	1.2	0.8	0.7
Sr	738.6	742.1	728.2	849.5	818	796.7	782	773
Tb	0.43	0.44	0.46	0.4	0.41	0.36	0.4	0.43
Th	16.54	16.5	16.6	14.31	15.2	14.47	15.8	16.3
Tm	0.17	0.18	0.19	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17
U	5.2	5.1	5.3	5.2	5.1	5.1	5.2	5.1
V	58	59	59	52	53	51	56	57
W	2.1	2	2.1	1.6	1.7	1.5	1.8	1.9
Y	10.8	10.6	10.9	9.6	9.3	9	9.5	10.1
Yb	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8
Zn	37	41	45	57	53	48	51	49
Zr	61	66	64	98	86	85	81	66
Ag	<0.1	<0.0	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ce	74	73	74	75	71	70	70	72
Mo	2.9	3	3.3	3	2.9	4.2	3.8	3.3
Nb	18	19	20.2	15.3	16.1	15.9	17	16
Nd	23.8	24	24.4	22.3	21.8	21.8	22.4	21.6
Sm	3.96	3.88	3.83	3.52	3.43	3.29	3.3	3.6
Tl	0.45	0.44	0.5	0.26	0.28	0.22	0.26	0.3
La	47	45	47	47	44	43	45	45
Ta	1.27	1.22	1.26	1.07	1.1	1.14	1.2	1.1
K	28652	28345	28280	32003	29635	26639	28223	29323
P	1169	1161	1142	1205	1967	1163	1152	1148

می‌شود، ایگنیمبریت‌های سبلان در محدوده ریبوداسیت- داسیت جای می‌گیرند (شکل ۱۲- A). همچنین، برای شناسایی سری ماگمایی، نمودار SiO_2 در برابر مجموع آلکالی‌ها (شکل ۱۲- B) به کار برده شد. همان‌گونه که دیده می‌شود، نمونه‌ها در محدوده ساب‌آلکان جای می‌گیرند. همچنین، در نمودار سیلیس در برابر K_2O ، سرشت کالک‌آلکان با پتاسیم بالا از خود نشان می‌دهند (شکل ۱۲- C).

همانند همه سنگ‌های فلسیک، شیمی ایگنیمبریت‌ها نیز به برآیند کانی‌شناسی فنوکریست‌ها و به‌ویژه به میزان مقدار سدیم، پتاسیم، کلسیم و مقدار کمتری از آهن و منیزیم درون آنها وابسته است. برپایه رده‌بندی اتحادیه جهانی علوم‌زمین (IUGS)، ایگنیمبریت‌ها بیشتر ریولیتی و گاه داسیتی و به‌ندرت آندزیتی هستند (Le Bas *et al.*, 1986). همان‌گونه که در نمودار رده‌بندی Winchester و Floyd (۱۹۷۷) دیده



شکل ۱۲- داده‌های تجزیه شیمیایی ایگنیمبریت‌ها روی نمودارهای: (A) نمودار رده‌بندی Winchester و Floyd (۱۹۷۷)؛ (B) نمودار رده‌بندی سری‌های ماگمایی (Irvine and Baragar, 1971)؛ (C) نمودار SiO_2 در برابر K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976)

برتری دارد. در الگوی Walker (۱۹۷۳) فرض می‌شود که $F\%$ انعکاسی از خردشدگی کلی ماگماست؛ اما در عمل، مقدار $F\%$ بسیار تحت‌تأثیر فرایندهای ته‌نشست قرار می‌گیرد و ویژگی‌های نخستین ماگما را نشان نمی‌دهد. بررسی‌ها نشان داده‌اند فوران‌هایی هستند که درجه خردشدگی آنها بالاست و مواد ریز به بخش‌های دورتر منتقل شده‌اند. از این‌رو، کاربرد الگوی Pyle (۱۹۸۹) برپایه پارامترهای b_c و b_t پیشنهاد می‌شود. به‌همین‌رو، در این نوشتار الگوی دوم بررسی شد. همان‌گونه که در نمودار b_t در برابر b_c/b_t (شکل ۱۳) نشان داده شده است، مقدار b_t برای آخرین نهشته‌های ریزی سبلان (جدول ۲) برابر است با $3/15$ و مقدار b_c آن برابر با $3/19$ به‌دست آمد. بنابراین: $b_c/b_t = 1/0.1$

بحث

آتشفشان‌ها بیشتر در نوع فوران متفاوت هستند. در واقع چه‌بسا ویژگی‌های فورانی یک آتشفشان از یک فوران تا فوران بعدی نیز متفاوت باشد. دو الگو برای شناخت نوع فوران‌های آتشفشانی پیشنهاد شده است: الگوی Walker (۱۹۷۳): با به‌کاربردن دو پارامتر F (درصد خردشدگی) و D (فاکتور پراکندگی)؛ الگوی Pyle (۱۹۸۹): با به‌کاربردن پارامتر فاصله ضخامت میانه (b_t) و فاصله قطر میانه (b_c).

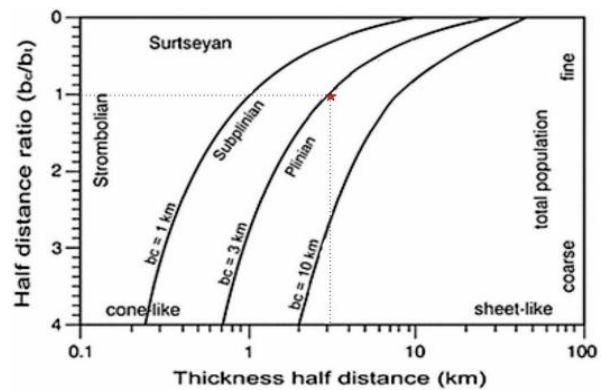
از دید بسیاری از پژوهشگران (Pyle, 1989; Francis, 1993; Bonadonna and Houghton, 2005; Connor and Connor, 2006)، کاربرد الگوی دوم گسترده‌تر و آسان‌تر از الگوی Walker (۱۹۷۳) است و کاربرد آن

ریزش می‌کنند، زمین را می‌پوشانند و یک نهشته ریزشی آذرآواری را پدید می‌آورند.

(۲) به‌سوی راس فوران پلینی، مؤلفه‌های مختلفی (مانند: افزایش سرعت جریان توده، پهن‌تر شدن مجرا) باعث می‌شود که ستون فوران نسبت به هوای اطراف چگال‌تر شود و جریان همرفتی نتواند قطعات آواری را به حالت شناور نگه دارد؛ ازاین رو به زمین فرو می‌افتد. این فرایند را فروپاشی ستون فوران می‌نامند. با فروافتادن این ستون فوران، نهشته‌های جریان آذرآواری (ایگنیمبریت) پدید می‌آیند.

اگرچه همه پژوهشگران پیدایش ایگنیمبریت‌ها از فروریزش یک ستون فوران پلینی را پذیرفته‌اند، اما Sparks و همکاران (۱۹۷۳) دربارهٔ چگونگی پیدایش مذاب‌های ایگنیمبریتی از حالت دیگری یاد می‌کند که در آن، ماگمای با گازهای فراوان، بدون انفجار به صورت کف از دهانه آتشفشان بیرون می‌ریزد و به پیروی از شیب توپوگرافی جریان می‌یابد. در این حالت وجود گازها سیال بودن و قابلیت تحرک آنها را افزایش می‌دهد. پس از انجماد، سنگ حالت نواری پیدا می‌کند و ایگنیمبریت را پدید می‌آورد. البته پیدایش ایگنیمبریت‌های سبلان از این راه نبوده است، بلکه آنها در پی فروریزش ستون فوران پلینی پدید آمده‌اند؛ زیرا در مقطع شکل ۹ در بخش زیرین واحد ایگنیمبریتی، لایه‌های لیتیک توفی هستند که انفجار شدید و پیدایش ستون فوران را نشان می‌دهند. پس از فروریزش، قطعات ریزشی، جوش خورده‌اند و در امتداد شیب جریان یافته‌اند و پهنهٔ ایگنیمبریتی در منطقه را پدید آورده‌اند.

برپایهٔ داده‌های زمین‌شیمی پومیس‌های



شکل ۱۳- نمودار b_t در برابر b_e/b_t (Pyle, 1989) (نوع فوران با نماد ستاره نشان داده شده است)

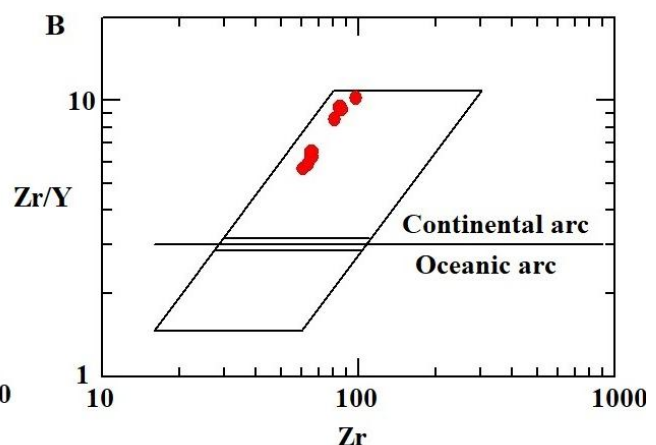
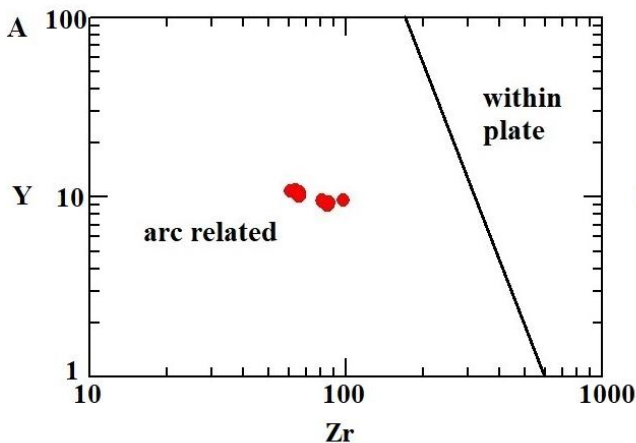
چنانچه پیشتر گفته شد، برپایهٔ محاسبه‌های ریاضی، آخرین فعالیت انفجاری سبلان به صورت یک فوران پلینی با شاخص انفجار بزرگ بوده است. در این حالت، نخست یک ستون فوران پدید می‌آید که تا ارتفاع بسیاری (از ۱۵ تا ۴۰ کیلومتر) گسترش می‌یابد و به صورت یک چتر متوقف می‌شود. سپس به صورت جانبی گسترش می‌یابد و پومیس و خاکستر فراوان‌ترین مواد تفرایی ریزش‌کننده آن هستند. این نوع فوران که قدرت انفجاری شدیدی دارد، ویژگی‌های ماگماهای تکامل‌یافته (داسیت، ریولیت، فنولیت) است و بیشترین میزان مواد فرار را دارد. اما ارتباط میان نهشته‌های ریزشی پدیدآمده از فوران پلینی و نهشته‌های جریان ایگنیمبریتی در سبلان چیست؟ به گفتهٔ Gill و Thirlwall (۲۰۰۳)، پس از پیدایش یک ستون فوران، دو حالت برای ته‌نشست ذرات جامد از یک ستون فوران پلینی روی می‌دهد:

(۱) در مراحل نخست فوران، ستون فوران - که داغ، شناور و سبک است و با فشار ممتد گاز به سوی بالا پرتاب می‌شود - به بیشترین ارتفاعش می‌رسد. کلاست‌های پومیس به صورت منفرد از ستون و چتر به سوی پایین

وابسته به پهنه‌های فرورانش جای گرفته‌اند (شکل ۱۴- A). برای شناسایی کمان ماگمایی مرز فعال قاره‌ای از کمان ماگمایی جزیره‌های کمانی، نمودار پیشنهادی Pearce (۱۹۸۳) به کار برده شد. برپایه شکل ۱۴- B، گمان می‌رود کمان ماگمایی سازنده سنگ‌های منطقه پیامد فرورانش پوسته‌ای اقیانوسی به زیر پوسته‌ای قاره‌ای بوده است. از این رو، برپایه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و همچنین، با در نظر گرفتن موقعیت زمانی و مکانی آتشفشان سبلان، گمان می‌رود این سنگ‌ها با ماگماتیسیم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ورقه ایران در ارتباط هستند و در یک محیط کمان ماگمایی پدید آمده‌اند.

ریزشی (نمونه‌های P1 و P2) و ایگنیمبریت‌ها، ترکیب شیمیایی آنها بسیار به هم نزدیک است و در هر دوی آنها سدیم از پتاسیم بیشتر است و درصد وزنی SiO_2 کمابیش با هم برابر است. از این نکته می‌توان دریافت که از دیدگاه خاستگاه، ایگنیمبریت‌ها از فروریزش همان ستون فوران ریزشی‌ها خاستگاه گرفته‌اند.

از عوامل مؤثر در تفسیر سنگ‌زایی سنگ‌ها، تعیین محیط زمین‌ساختی آنهاست. برای این کار، نمودارهای متمایزکننده‌ای به کار برده می‌شوند که بیشترشان برپایه عنصرهای فرعی و کمیاب هستند. برپایه نمودار متمایزکننده زمین‌ساختی Zr در برابر Y، نمونه‌های بررسی شده در محدوده کمان‌های ماگمایی



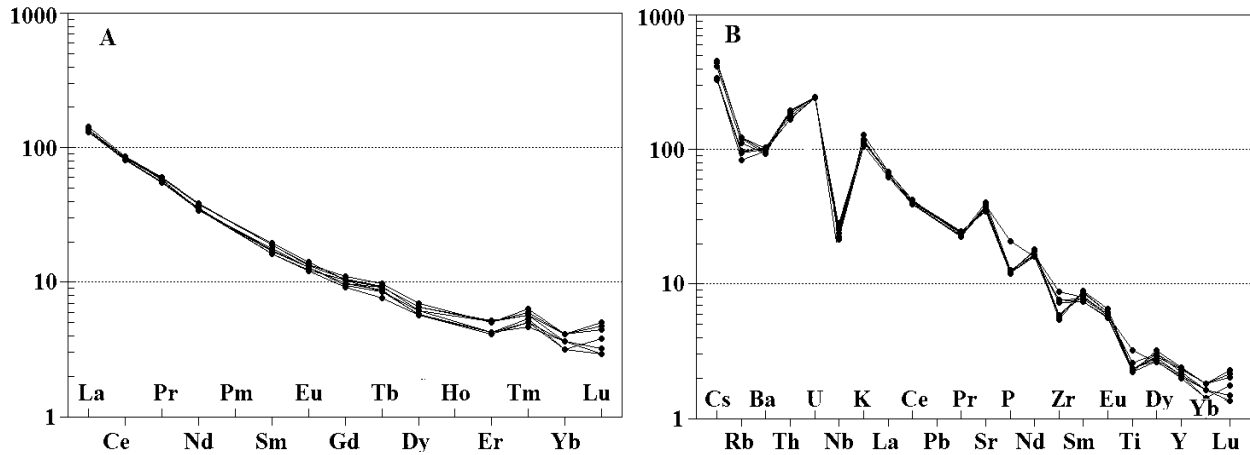
شکل ۱۴- A) نمودار Zr در برابر Y برپایه pmm (Muller and Groves, 1977); B) نمودار Zr در برابر Zr/Y (Pearce, 1983)

می‌خورد. غنی‌شدگی از عنصرهای LREE نسبت به عنصرهای HREE و مقدار کم Zr, TiO_2 و Nb، وابستگی این سنگ‌ها به سری‌های کالک‌آلکان را نشان می‌دهند (Machado *et al.*, 2005). در شکل ۱۵- B، ترکیب شیمیایی ایگنیمبریت‌ها به ترکیب NMORB (Sun and McDonough, 1989) بهنجار شده است. این

در شکل ۱۵- A، فراوانی عنصرهای خاکی کمیاب نمونه‌ها به ترکیب کندریت بهنجار (Nakamura, 1977) شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، الگوهای یکنواختی از غنی‌شدگی نمونه‌ها از عنصرهای خاکی کمیاب سبک (از La تا Sm) در مقایسه با عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) به چشم

از ویژگی‌های ماگماهای کمانی وابسته به پهنه‌های فرورانش هستند.

نمودار، الگوهای جالبی با خواص منفی Nb، P و Ti و پیک‌های مثبت K و Pb را نشان می‌دهد که



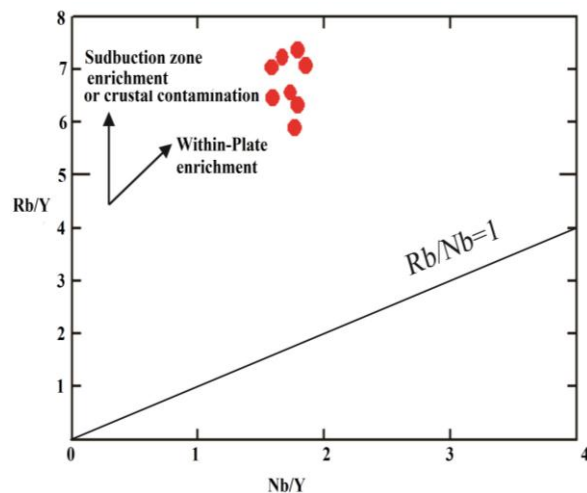
شکل ۱۵- نمودارهای پهنجارشده عنصرهای خاکی کمیاب ایگنیمبریت‌ها به: (A) ترکیب کندریت (Nakamura, 1977)؛ (B) ترکیب N-MORB (Sun and McDonough, 1989)

بالای خط $Rb/Y=1$ جای می‌گیرند. این نمودار نشان‌دهنده محیط‌های درون‌صفحه‌ای و فرورانشی غنی شده و یا آلودگی پوسته‌ای است. نمونه‌ها بیشتر با روند پهنه فرورانشی غنی شده یا آلودگی پوسته‌ای همخوانی دارند. نمودار Nb/Y برابر Th/Y نیز به شناسایی آلودگی خاستگاه و آلودگی پوسته کمک می‌کند (شکل ۱۲). ماگمایی که با مؤلفه‌های فرورانشی یا پوسته‌ای آلوده شده‌اند، Th/Y بالاتری نسبت به Nb/Y دارند (Pearce, 1983).

در شکل ۱۷-A، ایگنیمبریت‌های سبلان در بالای خط $Th/Nb=1$ جای گرفته‌اند و مقدار Th/Y آنها بالاست. این نکته نشان می‌دهد ماگما تحت تأثیر سیال‌های مرتبط با فرورانش یا آلودگی پوسته بوده است.

در سنگ‌های آتشفشانی وابسته به فرورانش، نسبت Ba/Nb بیشتر از ۲۸ و $Ba/Ta > 450$ است (Fitton et al., 1988). این نسبت‌ها برای

برای شناسایی روند غنی‌شدگی عنصری نمونه‌ها در ارتباط با محیط‌های زمین‌ساختی، نمودار Nb/Y برابر Rb/Y به کار برده شد (Pearce, 1983) (شکل ۱۶).

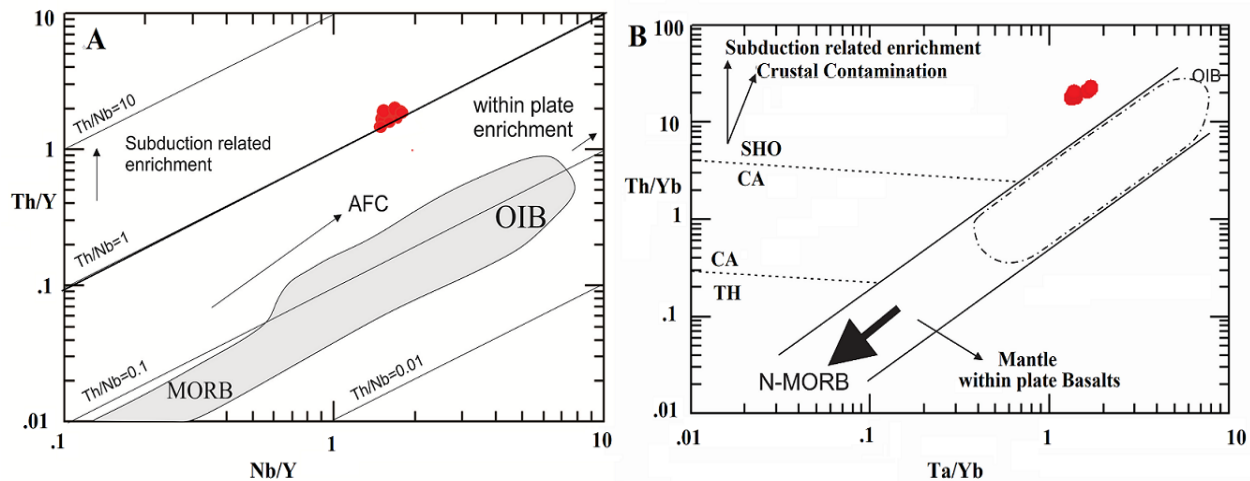


شکل ۱۶- جایگاه نمونه‌های بررسی‌شده در نمودار Nb/Y در برابر Rb/Y از Pearce (۱۹۸۳)

در این نمودار، سنگ‌های بررسی‌شده در

نشان دهنده اینست که خاستگاه با عوامل فرورانش یا اجزای پوسته آلوده شده است (Pearce, 1983; Wilson, 1989).

ایگنیمبریت‌های سبلان به ترتیب برابر با ۳۲ تا ۴۷ و ۵۱۳ تا ۶۷۲ هستند. همچنین، نسبت بالاتر Th/Yb به Ta/Yb (شکل ۱۷-B) نیز



شکل ۱۷- (A) نمودار Nb/Y در برابر Th/Y (Pearce, 1983)؛ (B) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb

داده‌های گوناگون زمین‌شیمیایی، نشان دهنده روند غنی‌شدگی این سنگ‌ها در همخوانی با پهنه فرورانش غنی‌شده و آلودگی پوسته‌ای هستند. همچنین، ترکیب شیمیایی ایگنیمبریت‌های سبلان با ترکیب نهشته‌های ریزشی‌های آخرین فعالیت انفجاری آن بسیار به هم نزدیک است و در هر دوی آنها سدیم بیشتر از پتاسیم است و درصدوزنی SiO_2 کمابیش با هم برابر است. برپایه این نکته، ایگنیمبریت‌ها از دیدگاه خاستگاه، از فروریزش همان ستون فوران ریزشی‌ها خاستگاه گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری

برپایه محاسبه‌های ریاضی در این مرحله، فوران از نوع پلینی با ستون انفجاری نزدیک به ۲۵ کیلومتر بوده است و حجمی نزدیک به ۳/۵ کیلومترمکعب از نهشته‌های آذراواری ریزشی از خود برجای گذاشته است. با توجه به پراکندگی این نهشته‌ها جهت باد در هنگام فوران از باختر به خاور بوده است. همچنین، شدت انفجار از نوع درجه پنجم یعنی بسیار بزرگ بوده است. ایگنیمبریت‌ها از نوع داسیتی تا ریوداسیتی با سرشت کالک‌آلکان هستند و ویژگی‌های ماگماهای کمانی وابسته به پهنه‌های فرورانش را نشان می‌دهند. همچنین،

منابع

Alberti, A. A., Comin-Charamonti, P., Sinigoi, S., Nicoletti, T. M. and Petrucciani, C. (1980) Neogen and Quaternary volcanism in Eastern Azerbaijan (Iran): Some K-Ar age determination and geodynamic implications. *Rendiconti della Societa Italiana di Mineralogiae Petrologia* 69: 216-225.

- Bonadonna, C. and Houghton, B. (2005) Total grain size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology* 67: 441-456.
- Carey, S. N. and Sparks, R. S. J. (1986) Quantitative models of the fall-out and dispersal of tephra from volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology* 48: 109-125.
- Connor, L. J. and Connor, C. B. (2006) Inversion is the key to dispersion: understanding eruption dynamics by inverting tephra fallout. In: *Statistics in Volcanology* (Ed. Mader H. M., Coles, S. G., Connor, C. B. and Connor, L. J.) Special Publications of IAVCEI, 1. 231-242. Geological Society, London, UK.
- Darvishzadeh, A. (2004) *Volcanoes and Volcanic Facies*. Tehran University Publication, Tehran, Iran (in Persian).
- Dewey, J. F., Hempton, M. R., Kidd, W. S. F., Saroglu, F. and Şengör, A. M. C. (1986) Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of Eastern Anatolia — a young collision zone. In: *Collision Tectonics* (Eds. Coward, M. and Ries, A.). Special Publication, 19: 3-36. Geological Society, London, UK.
- Didon, J. and Gemain, Y. M. (1976) Le Sabalan, Volcan Plio-quaternaire de l'Azerbaïdjan oriental (Iran); étude géologique et pétrographique de l'édifice et de son environnement régional. These de 3eme Cycle, University, Grenoble, France.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N. A. and Altunkaynak, S. (2009) Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: Collision induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review* 143: 536-578.
- Fahim Guilany, R. (2016) The pyroclastic deposits of Sabalan volcano. Ph. D. thesis, Geology Department, Research and Science Branch, Islamic Azad University, Tehran (in Persian).
- Fahim Guilany, R., Darvishzadeh, A. and Sheikhzakariaee, S. J. (2016) The Nuee Ardentes of Sabalan volcano in Iran. *Open Journal of Geology* 6: 1553-1566.
- Fierstein, J. and Nathanson, M. (1992) Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bulletin of Volcanology* 54: 156-167.
- Fitton, J. G., James, D., Kempton, P. D., Ormerod, D. S. and Leeman, W. P. (1988) The role of the lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States. *Journal of Petrology, Special Lithosphere Issue* 331-349.
- Francis, P. (1993) *Volcanoes: A planetary perspective*. New York, Clarendon Press.
- Ghahamghash, J., Mousavi, S. Z., Hassanzadeh, J. and Schmitt, A. K. (2016) Geology, zircon geochronology and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 327: 192-207.
- Gill, R. and Thirlwall, M. (2012) Tenerife, Canary Islands. London. Geologists Association Guide No. 49.
- Houghton, B. F., Wilson, C. J. N., Pyle, D. M. (2000) Pyroclastic fall deposits. In: *Encyclopaedia of Volcanoes* (Ed. Sigurdsson, H.) 555-570. Academic Press, San Diego, CA.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745-750.

- Machado, A., Lima, E. F., Chemale, J. F., Morta, D., Oteiza, O., Almeida, D. P. M., Figueiredo, A. M. G., Alexandre, F. M. and Urrutia, J. L. (2005) Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland arc, Antarctica. *Journal of South America Earth Sciences* 18: 407-425.
- Mousavi, G. (2013) The volcanology and petrology of Sabalan volcano, North West of Iran. Ph. D. Thesis, Geology Department, Research and Science Branch, Islamic Azad University. Tehran (in Persian).
- Muller, D. and Groves, D. L. (1997) Potassic igneous rock and associated gold-copper mineralization (Eds. Bhattacharji, S., Friedman, G. M., Neugebauerand, H. J. and Seilacher, A.). *Lecture Notes in Earth Sciences* 56.
- Nakamura, N. (1977) Determination of REE, Ba, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 38: 757-775.
- Newhall, C. G. and Self, S. (1982) The Volcanic Explosivity Index (VEI) An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87: 1231-1238.
- Pearce, J. A. (1983) Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: continental basalts and mantle xenoliths (Eds. Hawkesworth, C. J. and Nurry, M. L.), Shiva, Nantwich 230-249.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.
- Pirmohammadi Alishah, F., Ameri, A., Jahangiri, A., Mojtahedi, A., Keskin, M. (2012) Petrology and geochemistry of volcanic rocks from the south of Tabriz (Sahand volcano). *Iranian Journal of Petrology* 9(1): 37-56 (in Persian).
- Pyle, D. M. (1989) The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology* 51(1): 1-15.
- Pyle, D. M. (1995) Mass and energy budgets of explosive volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*. 5: 563-566.
- Şengör, A. M. C., Kidd, W. S. F. (1979) Post-collision tectonics of the Turkish and Iranian plateau and companions with Tibet. *Tectonophysics* 55(3): 261-376.
- Shahbazi Shiran, H. and Shafaii Moghadam, H. (2014) Geochemistry and petrogenesis of the Sabalan Plio-Quaternary volcanic rocks: Implication for post-collisional magmatism. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 22(2): 27-68 (in Persian).
- Sparks, R. S. J., Self, S. and Walker, G. P. L. (1973) Products of ignimbrite eruptions. *Geology* 11: 115-18.
- Sparks, R. S. J., Wilson, L. and Sigurdsson, H. (1981) The pyroclastic deposits of the 1875 eruption of Askja, Iceland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 299: 241-273.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London, Special Publication* 42(3): 313-345.
- Suzuki, T. (1981) Thickness, Isopach area curve of tephra. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan* 26: 9-23 (in Japanese)
- Thorarinsson, S. (1954) The tephra fall from Hekla on March 29 1947. The eruption of Hekla 1947-1948 II/3: 1-68.

-
- Walker, G. P. L. (1973) Explosive volcanic eruptions - a new classification scheme. *Geologische Rundschau* 62: 431-446.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis: A global tectonic approach*. Unwin Hyman, London, UK.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A., (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation product using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.