

Research Article

## Tephra, Lava flow and Nuee Ardente Hazard Assessment and Zoning of Bazman Volcano, SE Iran

Ahmad Khaiatzadeh<sup>1</sup>, Ahmad Abbasnejad<sup>1</sup>, Hojjatollah Ranjbar<sup>2</sup>, Hamid Ahmadipour<sup>1</sup>, Behnam Abbasnejad<sup>1\*</sup>

1-Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman

2- Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

**Keywords:** *Bazman volcano, Lava flow hazard, Tephra hazard, Nuee ardente hazard*

### 1- Introduction

Although Iranians have not been engaged in any volcanic activity in historic times, this does not mean the lack of this threat in the country. According to Khaiatzadeh and Abbasnejad, 2017, Bazman dormant volcano ranks second in the likelihood of future eruption among the Iranian stratovolcanoes. Hazard assessment is of utmost importance for dormant volcanoes because local people have no experience with their behavior and threats. One of the primary outcomes of assessment is the preparation of hazard zoning maps which are helpful for remedies and hazard management.

Bazman volcano is located 115 Km northwest of Iranshahr town in SE Iran. This volcanic cone is 3490 m high from the mean sea level and contains a 500-diameter breached crater. Such indicators as belonging to the volcanic arc of the active Makran Subduction Zone, extruding fresh lava flows in Quaternary, presence of thermal springs, as well as having a slightly- eroded cone all attest to the point that it is a dormant volcano and may erupt in the future. Its future eruption is anticipated on a 3 to 5 VEI scale, equivalent to the volcano to sub-Plinian eruptions. Geologically, this volcano has been studied by Shiaian et al. (2015), Biabangard et al. (2020), and Habibi Mood (2021).

According to the previous eruptions and the behavior of stratovolcanoes in general, Bazman can impose such threats as tephra, nuee ardente, and lava flow, which are the topics of this study. This volcano's cone comprises volcanic breccia, ignimbrite, pumice, tuff, and andesitic and basaltic flows (Ghorbani. 2003), indicating its previous eruption products and types.

### 2- Materials and Methods

As explained, the future activity of this volcano is anticipated to be along with lava flow, tephra, and nuee ardente threats. Thus, these three threats were assessed in this study. For assessment, digital elevation data (DEM= 30 m) were employed to prepare a three-dimensional picture of the volcano using ENVI software. In addition, hill shade views of the 3D picture were prepared for constructing hazard zoning maps. By varying the direction and angle of sunlight, the most suitable hill-shade 3D picture was prepared and clarified using Sharpen filter. The resulting picture was used for the construction of hazard zoning maps. Additionally, land use data were obtained from ETM+ Landsat pictures and topographic maps of the area.

VORIS software is based on an advection-diffusion process (Connor et al., 2001; Mastin et al., 2009; Felpeto et al., 2007) was employed to prepare the tephra (ash) hazard map. Using this software, the atmosphere is divided vertically into several horizontal layers, each having a specific wind velocity and

\* Corresponding author: abbasnejad35@yahoo.com

DOI: <https://doi.org/10.22055/AAG.2022.40960.2299>

Received: 2022-06-01

Accepted: 2023-07-23

direction. Ash particles follow these parameters in each layer containing them. The process continues until these particles settle on the ground (Mortazavi et al., 2009). This study took the necessary wind data for 4000, 9000, 16000, 20000, and 35000 m heights from NCER/NCAR center.

Lava flow routes were determined using a simulation model based on the assumption that topography plays the primary role in the route of flows. Accordingly, lavas flow from one point (pixel) to the nearby point whenever their differences are positive. The maximum travel of flows was considered to be 5 Km. It was assumed that lavas extruded from the summit of the volcano.

The potential extent of pyroclastic density currents (nuee ardentes in this study) was determined using the model proposed by Malin and Sheridan (1982). According to this model, the intersection of the energy cone, originating at the eruption point with the ground surface, defines the distal point of flows. The energy cone is an angle ( $\alpha c$ ) defined by  $\text{Arctan}$  in which HC is the height of the eruption (starting) point, and L is a type of friction parameter (Felpeto, 2009; Khaiatzadeh et al., 2016).

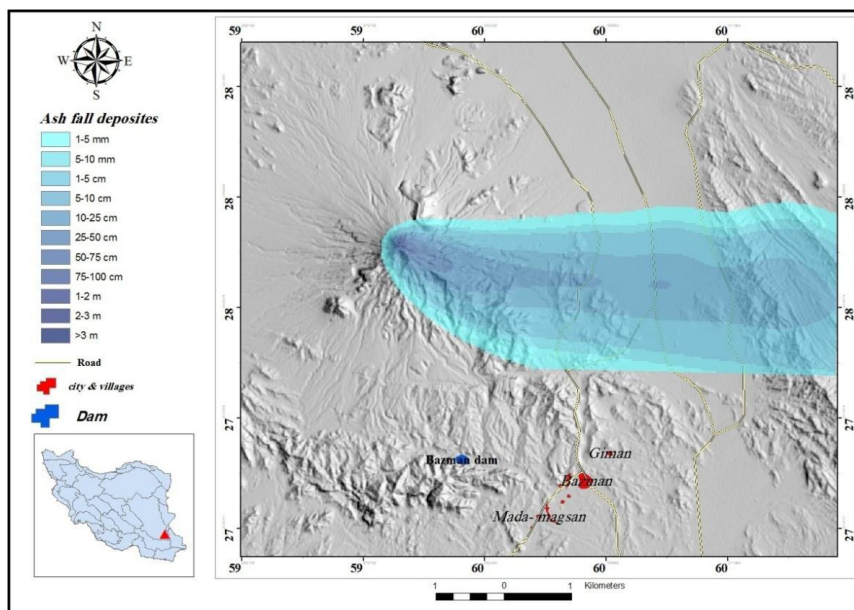


Fig. 1. Ashfall hazard zoning map of Bazman volcano

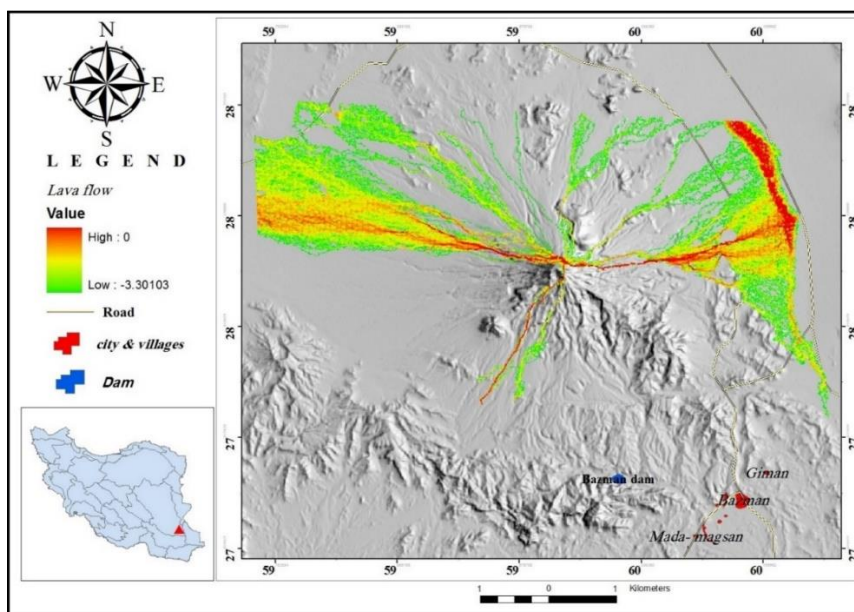


Fig. 2. Lava flow hazard zoning map of Bazman volcano

### 3- Results and discussion

The ashfall hazard zone map resulting from the probable eruption of Bazman (Fig. 1) reveals that the ashes will move, spread, and settle down eastwards due to prevailing western winds in this latitude. Therefore, the maximum ash thickness from an assumed 5 Km<sup>3</sup> ash assumed eruption would be about 3 m. Fortunately, no central town or city lies in its plume. However, some tens of kilometers of the main road (Bam-Chahbahar) would be affected by fallen or suspended ashes.

The lava flow map (Fig. 2) indicates that lavas may flow towards the east, west, and north. The map indicates that the flows may reach the main road at some points, but andesitic flows are less likely to travel such a relatively long distance. This road may be threatened by flows from parasitic points located near the road or from the extrusion of low-viscosity basaltic flows. Although the nuee ardents may spread to surrounding areas (Fig. 3), they do not threaten any urban area.

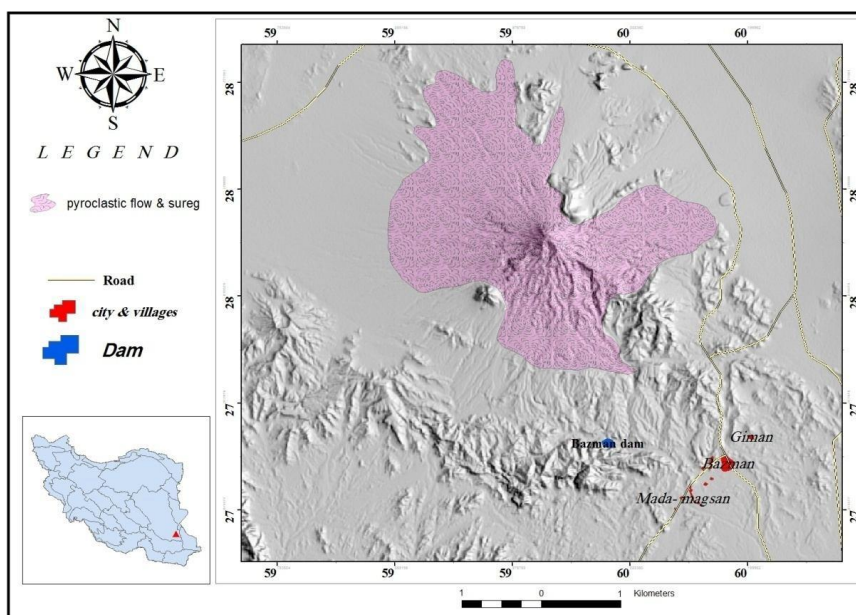


Fig. 3. Nuee ardente hazard zoning map of Bazman volcano

### 4- Conclusion

According to a recent study, the Bazman stratovolcano is part of an active volcanic arc called the Makran Subduction Zone. Although dormant, it will likely erupt with a volcanic intensity (VEI) of 3 to 5. This eruption could cause volcanic ash, lava flow, and nuee ardent hazards.

Maps have been created to show the potential dangers in the area. They indicate that the ash will likely spread to the east, while lava flows and nuee ardentes may spread north, east, and west. Fortunately, Bazman town - the main settlement - is located 25 km south of the volcano and appears safe. However, the Bam-Iranshahr main road and several subsidiary roads are at risk. Although ashes may reach remote villages, the impact is expected to be insignificant.

### References

- Biabangard, H., Ahmadi Khalaji, A., Tahmasbi, Z., Sharifi Nejad, A., 2020. Geochemistry and Thermobarometry of Bazman volcanic rocks, an example of active continental margin volcano. *Quaternary Journal of Iran* 6(6), 229-256.
- Connor, C.B., Hill, B.E., Winfrey, B., Franklin, N.M., Femina, P.C.L., 2001. Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Natural Hazards Review* 2(1), 33-42.
- Felpeo, A., 2009. VORIS, a GIS based tool for volcanic hazard assessment, User Guide. Observatorio Geofísico Central, IGN. p. 40.

- Felpeto, A., Marti, J., Ortiz, R., 2007. Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 166, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.07.008>
- Ghorbani, M., 2003. Principles of volcanology and a review on volcanism in Iran, (in Persian), Arianzamin press, p. 362.
- Habibi Mood. S., Jami, M., Saeedi, M., Kakha, G., Jami, H.A., 2021. Analysis of relative study of active tectonics using tectonic morphotectonic indices in the southeastern basins of Bazman volcanic zone, *Journal of Natural Environmental Hazards* 10(28), 107-130. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.33715.1643>
- Khaiatzadeh, A., Abbasnejad A., 2017. Application of EN-SAW and ANP multi-criteria decision making methods in geology: reactivation hazard assessment and ranking of Iranian stratovolcanoes as a case study, *Geosciences* 26(102), 137-146. <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.44133>
- Khaiatzadeh, A., Abbasnejad, A., Ranjbar, H., 2016. Tephra, Lava Flow and Nuée Ardente Hazard Zoning of Taftan Volcano, SE Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 5(2), 17-30. <https://doi.org/10.22067/geo.v5i2.42555>
- Malin, M.C., Sheridan, M.F., 1982. Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science* 217, 637-640.
- Mastin, L.G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., Durant, A., Ewert, J.W., Neri, A., Rose, W.I., Schneider, D., Siebert, L., Stunder, B., Swanson, G., Tupoer, A., Volentik, A., Waythomas, C.F., 2009. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions". *Journal of volcanology and Geothermal Research* 186. 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008>
- Mortazavi, M., Sparks, R.S.J., Amigo, A., 2009. Evidence for recent rarge magnitude explosive eruptions at Damavand volcano, Iran with implications for volcanic hazards. *Journal of Sciences* 20(3), 253-264.
- Shiaian, K., Ghalamghash, J., Vosoughi, A.M., Masoudi, F., 2015. Geology, Geochemistry and Petrogenesis of BazmanVolcano, SE of Iran (in Persian), *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 24 (95), 99-110. <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.42387>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Khaiatzadeh, A., Abbasnejad, A., Ranjbar, H., Ahmadipour, H., Abbasnejad, B., 2023. Tephra, Lava flow and Nuee Ardente Hazard Assessment and Zoning of Bazman Volcano, SE Iran. *Adv. Appl. Geol.* 13(2), 455-468.

DOI: <https://doi.org/10.22055/AAG.2022.40960.2299>

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_17954.html](https://aag.scu.ac.ir/article_17954.html)

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## ارزیابی و پهنه‌بندی خطر تفرا، گدازه و ابرهای سوزان ناشی از فوران احتمالی آتشفشان بزمان

احمد خیاط زاده

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

احمد عباس نژاد \*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

حجت الله رنجبر

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

حمید احمدی پور

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

بهنام عباس نژاد

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

aabbas@uk.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

### چکیده

استراتوولکان بزمان به ارتفاع حدود ۳۵۰۰ متر در ۱۱۵ کیلومتری شمال غرب ایران شهر (غرب استان سیستان و بلوچستان) قرار دارد و یکی از آتشفشان‌های تشکیل دهنده قوس آتشفشانی زون فرورانشی مکران است. براساس شواهد مربوط به فوران‌های قبلی، فوران‌های احتمالی آتی آن می‌تواند با خروج گدازه، خاکستر و تولید ابر سوزان همراه باشند. شواهدی نظیر میزان حفظ (عدم فرسایش شدید)، وجود چشمه‌های آبگرم، وجود زبانه‌های گدازه نسبتاً تازه و ادامه فرورانش صفحه اقیانوسی عمان مؤید این نکته می‌باشند که بزمان می‌تواند در آینده فعال شود. فوران احتمالی آن از نوع ولکانو تا نیمه پلینی و با شدت (VEI) در حد ۳ تا ۵ برآورد می‌شود. به منظور پهنه‌بندی خطرهای احتمالی مرتبط با بزمان از مدل‌های ارتفاعی رقومی (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای و نرم افزارهای Arc GIS، ENVI، و VORIS استفاده گردید. برای تهیه نقشه گسترش خاکسترهای آن مدل فرارفت- انتشار و برای تهیه نقشه پراکنش ابر سوزان از مدل Malin و Sheridan (۱۹۸۲) استفاده شد. در ارتباط با گسترش خاکسترهای آن، اطلاعات جوی مورد نیاز از داده‌های پایگاه NCEP/NCAR مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، مدل شبیه سازی جریان برای تهیه نقشه گسترش جریان گدازه به کار گرفته شد. براساس این مطالعه، خاکسترهای این آتشفشان تحت تأثیر جریان بادهای غربی مرتفع حاکم بر منطقه به سمت شرق آن حرکت می‌کنند، ولی گدازه‌های خروجی از آن به سمت شمال، غرب و شرق آن پخش می‌شوند. امکان انتشار ابرهای سوزان در بسیاری از سطوح اطراف این آتشفشان وجود دارد. این مطالعه نشان داد شهر بزمان که در تقسیمات اداری یک بخش محسوب می‌شود با جمعیت حدود ۶۰۰۰ نفر که در ۲۵ کیلومتری جنوب این آتشفشان واقع شده در معرض هیچ تهدیدی قرار ندارد. البته، امکان بروز مشکلاتی در بخش‌هایی از جاده مهم مواصلاتی بم- ایران شهر توسط خاکسترها و احتمالاً گدازه‌ها مطرح است. خاکسترها می‌توانند به چند روستای کوچک در دور دست شرق آتشفشان برسند، ولی به علت بعد مسافت مشکل مهمی ایجاد نمی‌کنند. نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده برای این آتشفشان برای اقدامات مدیریتی خطر آن و نیز هماهنگی بین کاربری‌های جدید از زمین با میزان تهدید می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آتشفشان بزمان، خطر گدازه، خطر تفرا، خطر ابر سوزان

### ۱- مقدمه

Abbasnejad (۲۰۱۷)، آتشفشان بزمان از نظر احتمال فوران در رتبه دوم بعد از آتشفشان دماوند در میان استراتوولکان‌های ایران (دماوند، سهند، سبلان، تفتان، بزمان، مساحیم و بیدخوان) قرار دارد.

اگرچه در دوره تاریخی شاهد فوران هیچ آتشفشانی در ایران نبوده‌ایم، ولی این به هیچ عنوان به معنی فقدان این تهدید در ایران نمی‌باشد. براساس مطالعات Khaiatzadeh و

حفظ مخروط جدید آتشفشان، تازه بودن گدازه‌ها، وجود خاکستر در نزدیکی دهانه، وجود چشمه آبگرم نزدیک دهانه، دیده شدن فعالیت‌های فومرولی در بعضی اوقات و ادامه عملکرد زون فرورانشی مکران، همگی مؤید نیمه فعال بودن آتشفشان بزمان می‌باشند. از اینرو احتمال فوران آن در آینده وجود دارد. در چنین شرایطی لازم است نقشه‌های پهنه‌بندی خطرهای ناشی از فوران احتمالی آن تهیه شوند تا برای مدیریت خطر مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

آتشفشان بزمان که در فاصله ۱۱۵ کیلومتری شمال غرب ایرانشهر قرار دارد استراتوولکانی است که گدازه‌های آن از چندین دهانه خارج شده‌اند. مخروط اصلی آن حدود ۳۴۹۰ متر ارتفاع دارد و جریان‌های نسبتاً بزرگ گدازه از دامنه شرقی آن خارج شده‌اند. البته، این قله مخروط جدیدی است که از تجمع گدازه و تفرا تشکیل شده و دهانه‌ای به قطر ۵۰۰ متر دارد. مطالعات Darvishzadeh (۲۰۰۴) و Salkhi (۱۹۹۷) آن را جدیدترین آتشفشان ایران معرفی کرده‌اند، ولی در این رابطه داده سن سنجی ارائه نکرده‌اند. بزمان، همراه با تفتان و تعداد دیگری دهانه خروجی در ایران و پاکستان، مجموعاً، قوس آتشفشانی زون فرورانشی مکران را تشکیل می‌دهند (Farhoudi and Karig, 1977, Platt et al., 1985, Kopp et al., 2000, Penny et al., 2017). فعال بودن زون فرورانشی مکران احتمال فوران بزمان در آینده را تقویت می‌کند.

اگرچه در مقایسه با تفتان، دماوند و سبلان که مهمترین آتشفشان‌های نیمه فعال ایران می‌باشند مطالعات کمتری روی آتشفشان بزمان صورت گرفته است، ولی در این رابطه می‌توان به مطالعات Rahimzadeh (۱۹۹۶)، Salkhi (۱۹۹۷)، Sahandi و Padashi (۲۰۰۳)، Shiaian و همکاران (۲۰۱۵)، Ahmadi و همکاران (۲۰۱۷)، Shiaian و Dabiri (۲۰۱۹) و Biabangard و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد. هدف مطالعات آن‌ها شناخت این آتشفشان بوده و به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر آن پرداخته‌اند. چینه شناسی و جریان‌های مختلف این آتشفشان توسط Rahimzadeh (۱۹۹۶) توضیح داده شده‌اند. آتشفشان بزمان در شمال شهر بزمان قرار دارد و مشرف به آن است. جاده بم- ایرانشهر در محدوده‌ای به طول حدود ۵۰ کیلومتر از مجاورت این مخروط آتشفشانی عبور می‌کند. البته، بهترین مسیر برای مطالعه آن جاده‌های کوهستانی منشعب از

آتشفشان‌ها به شکل‌های مختلفی نظیر جریان گدازه، ریزش تفرا (خاکستر)، تشکیل ابر سوزان، لاهار و تغییرات آب و هوایی می‌توانند موجب تلفات جانی، خسارات مالی و آسیب‌های زیست محیطی شوند. این تهدیدها توسط افراد مختلف؛ از جمله Loughlin و همکاران (۲۰۱۵)، Papale و Shroder (۲۰۱۴)، Latter (۲۰۱۲)، Kusky (۲۰۰۸)، Tilling (۱۹۸۹) و Blong (۱۹۸۴) مطالعه شده‌اند.

ارزیابی خطر فوران آتشفشان‌ها، شدت فوران و نوع تهدیدهای آن‌ها برای برنامه ریزی جهت مقابله با این خطر و انجام اقداماتی نظیر کاربری مناسب از زمین، پیش بینی و هشدار، تعیین حریم، انجام اقدامات اضطراری در هنگام فوران، مقاوم سازی و امثال آن بسیار ضروری می‌باشند. نتیجه ارزیابی باید شامل نوع و شدت احتمالی فوران، نوع تهدیدها، پهنه‌بندی خطر برای هر نوع تهدید و پیشنهادات اجرایی برای مقابله با تهدیدها باشند. موارد فوق در مورد آتشفشان بزمان هم صدق می‌کنند. در این رابطه، به ویژه بر تهیه نقشه پهنه‌بندی انواع تهدیدهای هر آتشفشان بسیار تأکید می‌شود، زیرا این نقشه‌ها اساس انجام هرگونه اقدام مدیریتی برای کاهش ریسک ناشی از تهدید می‌باشند.

از نظر فعالیت، آتشفشان‌ها را به سه گروه فعال، نیمه فعال (dormant) و غیرفعال تقسیم بندی می‌کنند. معمولاً آتشفشانی را فعال در نظر می‌گیرند که بشر ناظر بر فوران آن بوده است. آتشفشان‌های کم فرسایشی که در دوره تاریخی فوران نداشته‌اند، به عبارت دیگر بشر ناظر بر فوران آن‌ها نبوده است را خاموش یا نیمه فعال در نظر می‌گیرند که براساس مطالعات Khaiatzadeh و Abbasnejad (۲۰۱۷) می‌توان بزمان را در این گروه قرار داد. میزان تهدید آتشفشان‌های نیمه فعال می‌تواند بیش از انواع فعال باشد، زیرا اولاً چون بشر ناظر بر فوران آن‌ها نبوده تهدید آن‌ها را جدی نمی‌گیرد و ممکن است حریم خطر آنها را رعایت نکند. در ثانی، به علت عدم فعالیت در زمان طولانی، معمولاً فوران آن‌ها شدید بوده و می‌تواند غافلگیر کننده باشد. ناگفته نماند که ویژگی‌های مهم آتشفشان‌ها توسط نویسندگان مختلف، از جمله Darvishzadeh (۱۹۸۱) و Ghorbani و Bardintzeff (۲۰۰۴)، McBirny (۲۰۰۰)، Wilson و Parfitt (۲۰۰۸)، Schmincke (۲۰۱۲)، Nicholson (۲۰۲۰)، Cas و همکاران (۲۰۲۲)، Simmons و Jenkins (۲۰۲۲) توضیح داده شده‌اند.

بازالتی است. بازالت‌های بزمان ترکیب کانی شناسی ثابتی شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز کلسیک، اوژیت، الیوین و خمیره‌ای از پلاژیوکلاز و فلدسپار دارا می‌باشند. این بازالت‌ها غنی از آلومین بوده و به دسته بازیک سری کالک آلکانل تعلق دارند. در گدازه‌های آندزیتی آن پلاژیوکلاز، ارتوپیروکسن، فلدسپات آلکانل و کمی کوارتز و اکسیدهای آهن دیده می‌شوند (Ghorbani, 2003).

Shiaian و همکاران (۲۰۱۵)، براساس میزان غنی شدگی عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) نسبت به عناصر با قدرت میدان بالا (HFSE) و بی‌هنجاری منفی Nb و Ti در گدازه‌های این آتشفشان نتیجه گرفته‌اند که بزمان در یک موقعیت فرورانشی و از ذوب بخشی گوشته متاسوماتیسم شده به وجود آمده است.

Biabangard و همکاران (۲۰۲۰) براساس غنی شدگی نسبی سنگ‌های این آتشفشان از عناصر LILE نسبت به عناصر HFSE، بی‌هنجاری منفی در Ti و P، الگوی توزیع عناصر خاکی عادی سازی شده این سنگ‌ها نسبت به کندریت که غنی شدگی نسبی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) همراه با بی‌هنجاری منفی Eu نشان می‌دهند، و نیز، براساس نمودارهای تکتونو ماگمایی، سنگ‌های این آتشفشان را وابسته به مناطق کوهزائی حاشیه فعال قاره دانسته‌اند و معتقدند که احتمالاً محصول فرورانش پوسته اقیانوسی هند به زیر صفحه ایران می‌باشد. همچنین Shiaian و Dabiri (۲۰۱۹) شیمی کانی‌های مافیک و دما - فشارسنجی سنگ‌های کواترنری آن را انجام داده و معتقدند ماگمای تشکیل دهنده بازالت‌های آن در محدوده تولیت و کالک آلکانل قرار می‌گیرند.

براساس مطالعات Ahmadi و همکاران (۲۰۱۷)، ویژگی‌های ژئوشیمیایی و بافتی درشت بلورهای پلاژیوکلاز در آندزیت و بازالت‌های این آتشفشان شواهدی از برهمکنش ماگمای بازالتی و ماگمای آندزیتی در مخزن ماگمایی را نشان می‌دهند. از آنجا که این استراتوولکان شبیه به دماوند و تفتان است، لذا، مشابه با فوران احتمالی آتی دماوند (Mortazavi et al., 2009) و تفتان (Khaiatzadeh and Abbasnejad, 2017) شدت انفجار آن در مقیاس VEI در حد ۳ تا ۵ (معادل فوران تیپ ولکانو تا ساب پلینی) پیش بینی می‌شود. خطرهای آتشفشانی ناشی از فوران احتمالی آن شامل جریان گدازه، ابر

شهر بزمان می‌باشند که در جنوب آن قرار دارند. آتشفشان بزمان در نقشه زمین شناسی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ بزمان قرار دارد که توسط Padashi و Sahandi (۲۰۰۳) تهیه شده‌اند. Rahimzadeh (۱۹۹۶) نیز این آتشفشان را از منظر سنگ شناختی مورد مطالعه قرار داده است.

رسوبات تخریبی و کربناتی کربنیفر و پرمین قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در منطقه بزمان می‌باشند که توسط توده گرانیته بزمان که سن آن کرتاسه است قطع گردیده‌اند. البته، در شمال شرقی منطقه بزمان واحدهای رسوبی تخریبی ائوسن و میوسن که دچار چین خوردگی و گسلس شده‌اند هم به چشم می‌خورند. همچنین، در دامنه‌های جنوبی آن (به سمت شهر بزمان) سنگ‌های آتشفشانی به سن نئوژن و کواترنری قرار دارند. نقشه زمین شناسی محدوده این آتشفشان توسط Shiaian و همکاران (۲۰۱۵) و Habibi Mood و همکاران (۲۰۲۱) ارائه شده است.

سنگ‌های آتشفشانی از دهانه اصلی و یا دهانه‌های جانبی این آتشفشان خارج شده‌اند. دهانه‌های جانبی بیشتر در شمال و شمال خاوری آن قرار دارند. مواد حاصل از فوران در دهانه اصلی، محدوده‌ای به وسعت بیش از ۳۰۰ کیلومتر مربع را پوشانده‌اند. این مواد از قدیم به جدید شامل توف و برش‌های آتشفشانی و گدازه‌های آندزیتی می‌باشند. این مجموعه در دهانه‌های خاوری و جنوبی رأس قله توسط یک واحد پامیسی پوشیده شده‌اند (Shiaian et al., 2015).

جوانترین افق‌های آتشفشانی بزمان گدازه‌هایی هستند که از دهانه‌های فرعی خارج شده‌اند که یکی از بزرگترین آن‌ها به عنوان «بزمان بچه» در شمال خاوری آتشفشان قرار دارد. این گدازه‌ها مسافتی حدود ۱ کیلومتر را طی کرده‌اند که حاکی از غلظت نسبتاً بالای آن‌ها است. اطلاعات بیشتر در مورد ژئوشیمی و سنگ نگاری مواد خروجی آن توسط Shiaian و همکاران (۲۰۱۵) ارائه گردیده‌اند.

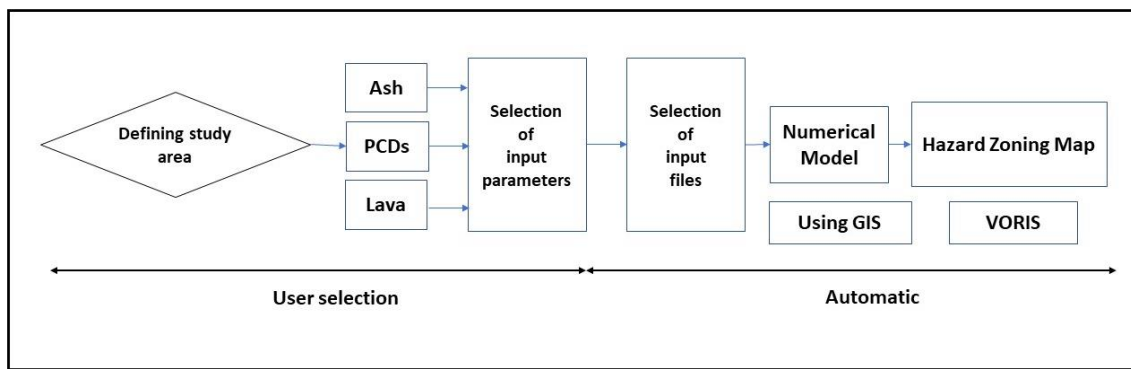
آتشفشان بزمان در انتهای جنوب شرقی زون ارومیه-دختر قرار دارد. این محدوده از آن را گاهی زون جبال بارز هم می‌نامند. در آن، نهشته‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی عمدتاً گرانودیوریتی و بعضاً رسوبات تخریبی به چشم می‌خورند که سن آن‌ها بطور عمده الیگو-میوسن است. البته، کوه بزمان بطور عمده محصول انباشت محصولات فورانی این آتشفشان شامل برش، ایگنمبریت، توف‌های پامیسی و گدازه‌های آندزیتی و

نقشه پهنه‌بندی را تشکیل دادند. همچنین، تصویر توپوگرافیک سایه دار (Hill Shade) از نقشه DEM آن تهیه گردید تا در پهنه‌بندی خطر از آن نیز استفاده شود. بدین ترتیب که با انتخاب زاویه و جهت تابش آفتاب، مناسب‌ترین تصویر سایه دار توپوگرافیک جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی در محیط Arc Map ایجاد شد. مراحل اقدام در شکل ۱ نشان داده شده اند. علاوه بر این، از تصاویر لندست  $ETM^+$  و نقشه‌های توپوگرافی برای شناسایی و تعیین موقعیت عناصر تحت خطر (مناطق مسکونی و جاده‌ها) استفاده گردید.

سوزان و تفرامی باشند. باتوجه به خشکی منطقه و فقدان پوشش برف یا دریاچه کراتری، احتمال ایجاد لاهار در طی فوران آن، یا پس از فوران، ناچیز است.

### ۳- مواد و روش‌ها

باتوجه به امکان بروز خطرهای از نوع گدازه، ابر سوزان و خاکستر، در این پژوهش تنها این سه نوع تهدید مورد ارزیابی و پهنه‌بندی قرار می‌گیرند. برای ارزیابی این تهدیدها، داده‌های ارتفاعی رقومی (DEM) ۳۰ متر منطقه تهیه و تصاویر سه بعدی آتشفشان توسط نرم افزار ENVI تهیه گردیدند که اساس تهیه



شکل ۱- مراحل کار جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فعالیت های آتشفشانی.

Fig. 1. Preparation stages of volcanic activity hazard zoning

را پوشش می‌دهد به دست آورد (Khaiatzadeh et al., 2016). این پایگاه اطلاعات جوی را از سال ۱۹۴۸ به طور مداوم منتشر می‌سازد. داده‌های ارائه شده توسط آن به تفکیک در محدوده‌های ۲/۵ درجه طول و عرض جغرافیایی و در ۱۷ نقطه ارتفاعی (سطوح همفشار ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰، ۶۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۷۵، ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ هکتوپاسکال) منتشر می‌شوند که تا ارتفاع ۳۰ کیلومتر (داخل استراتوسفر) را پوشش می‌دهند (Khaiatzadeh et al., 2016). در این مطالعه، اطلاعات جوی مرتبط با ارتفاعات مناسب برای پهنه‌بندی خطر خاکستر به شرح جدول ۱ از مرکز فوق دریافت گردیدند. همچنین، حجم احتمالی مواد فورانی مشابه با تفتان (Khaiatzadeh et al., 2016) در حد ۰/۵ کیلومتر مکعب و اندازه ذرات خاکستر مشابه با موارد به کار گرفته شده توسط Mortazavi و همکاران (۲۰۰۹) برای دماوند و Khaiatzadeh و همکاران (۲۰۱۶) برای تفتان در حد  $M_d=3/0$  و  $M_d=4/5$  میکرون در نظر گرفته شدند.

### ۳-۱- روش تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر خاکستر آتشفشانی (تفرا)

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر خاکستر از نرم افزار VORIS استفاده شد که اساس آن استفاده از مدل فرارفت-انتشار (Advection-Diffusion) است. در این مدل که برای پهنه‌بندی و هشدار خطر خاکستر آتشفشان معمولاً به کار می‌رود (Connor et al., 2001) معادلات انتشار، حمل و نشست خاکستر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Mastin et al, 2009). در نرم افزار VORIS به نحوی که در ادامه توضیح داده می‌شود، مقادیر مناسب وارد شده و با اجرای آن نقشه هم ضخامت خاکستر تهیه می‌گردد (Felpeto et al, 2007). اساس کار آن در نظر گرفتن مقدار و جهت نیروهای موثر بر حرکت ذرات خاکستر در لایه‌های مختلف جو زمین است (Mortazavi et al., 2009). بنابراین، نیاز به اطلاعات کافی در مورد جریان هوا در طبقات مختلف جو زمین دارد. این نوع اطلاعات را می‌توان از پایگاه NCEP/NCAR که سرتاسر جهان



جدول ۱ - سرعت و جهت وزش باد در سطوح مختلف جو در منطقه بزمان (برگرفته از NCER/NCAR)

Table 1. Velocity and direction of wind at various elevations in the Bazman area (based on NCER/NCAR data)

Wind velocity (m/s)	Wind direction (de)	Pressure (mb)	Height (Km)	
10.5	300	700	3490	1
21	275	300	9000	2
17	265	100	16000	3
1.5	220	50	20000	4
3.5	90	20	25000	5

مدل ارتفاعی رقومی برای هر مسیر ۳ متر و احتمال حرکت گدازه از ۵۰۰۰ مسیر در اطراف دهانه در نظر گرفته شد.

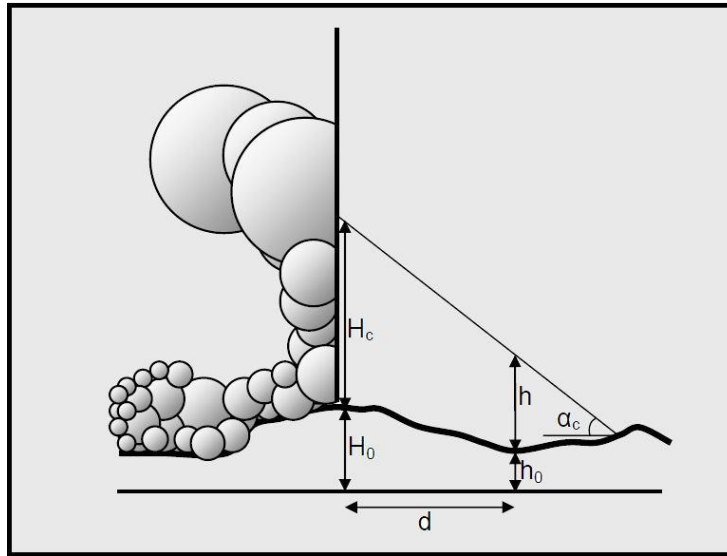
### ۳-۳- روش تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ابرهای سوزان (پیروکلاستیک‌های جریانی)

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ابرهای سوزان که امکان تشکیل آن‌ها در فوران‌های احتمالی آینده بزمان وجود دارد، مشابه با روش به کار گرفته شده توسط Khaiatzadeh و همکاران (۲۰۱۶) از مدل ارائه شده توسط مالین و شریدان (Malin and Sheridan, 1982)، استفاده گردید. اساس این مدل مشخص ساختن ارتفاع نقطه شروع جریان ابر سوزان ( $H_c$ ) و نسبت آن با مسافت جریان ( $d$ ) است که یک پارامتر اصطکاکی است که در آن زاویه میل جریان ( $\alpha_c$ ) نیز نیاز است که از طریق نسبت  $Arctan \frac{H_c}{d}$  به دست می‌آید (شکل ۲) و در آن، محل تلاقی خط مورد نظر با سطح زمین محدوده حرکتی را مشخص می‌سازد (Malin and Sheridan, 1982). اطلاعات بیشتر در مورد این مدل توسط Felpeto (۲۰۰۹) ارائه گردیده‌است.

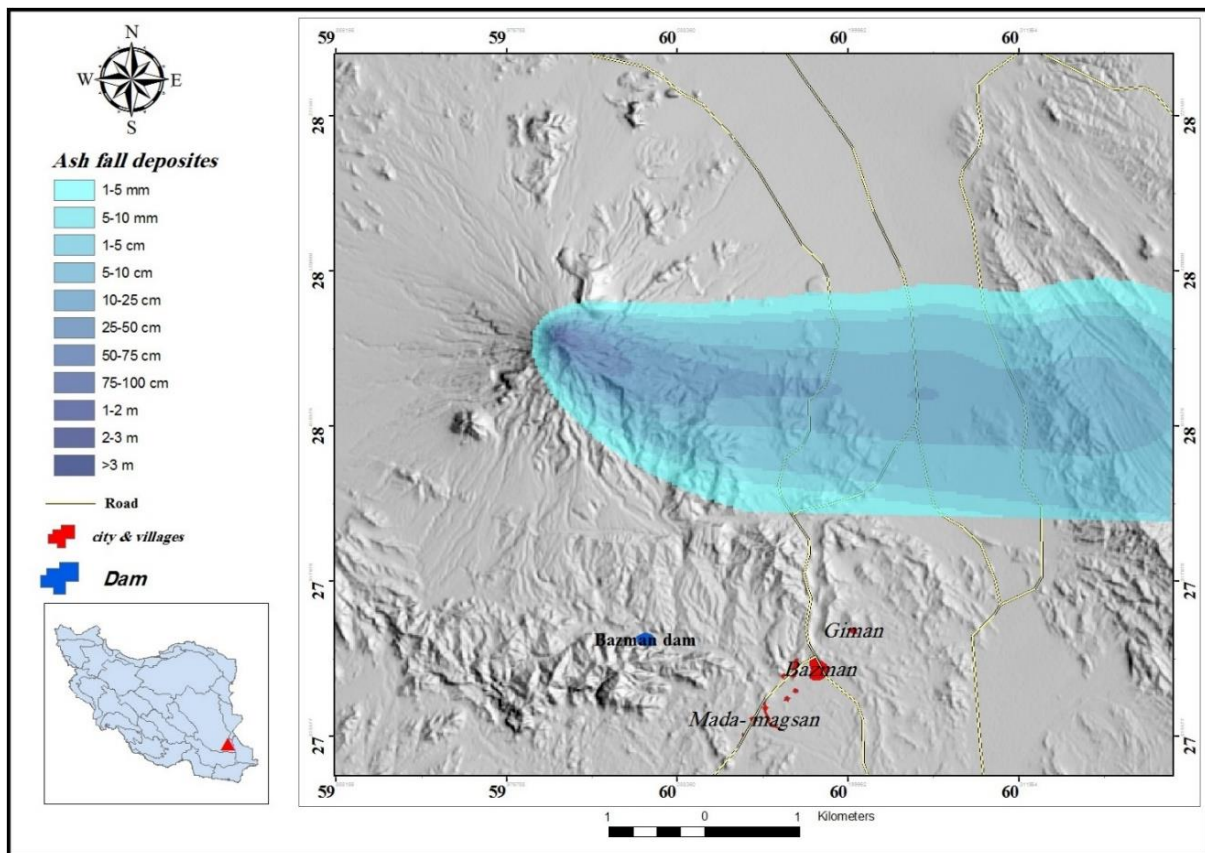
برای اجرای این مدل در آتشفشان بزمان از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) استفاده شد و نقطه شروع جریان دهانه آتشفشان فرض گردید. در مرحله بعد، با وارد کردن پارامترهای مورد نیاز در پنجره شبیه‌سازی این مدل و اجرای فرمان RUN لایه اطلاعاتی به دست آمد که با استفاده از نرم افزار Arc GIS به نقشه گسترش ابرهای سوزان تبدیل شد. قابل ذکر است که مشابه با روش Khaiatzadeh و همکاران (۲۰۱۶) ارتفاع سقوط ابر سوزان ۲۰۰ متر و زاویه معادل سقوط که زاویه بین ارتفاع سقوط و شیب توپوگرافی است ۶ درجه در نظر گرفته شدند.

### ۳-۲- روش تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر گدازه

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر گدازه از مدل شبیه ساز جریان گدازه استفاده گردید. این یک مدل احتمالاتی و بر مبنای این فرض است که توپوگرافی نقش اصلی را در مسیر گدازه دارد. در آن، برای تعیین مسیر گدازه دو فرض صورت می‌گیرد: فرض اول این است که گدازه در صورتی از یک سلول (پیکسل) وارد سلول (پیکسل) دیگر می‌شود که تفاضل مقدار آن‌ها مثبت باشد و فرض دوم این است که مقدار گدازه ورودی از یک سلول به سلول دیگر تابع مقدار تفاضل مثبت بین آن دو است. در این مدل، ابتدا نقطه‌ای (معمولاً در دهانه آتشفشان) به عنوان مبداء حرکت گدازه انتخاب می‌شود و مدل با توجه به داده‌های رقومی منطقه و استفاده از میانگین‌های الگوریتم مونت کارلو مسیر حرکت گدازه را به دست می‌دهد (Khaiatzadeh et al., 2016). البته، حداکثر مسافت جریان گدازه معمولاً براساس یک پارامتر ثابت کنترل می‌شود (Felpeto et al, 2007). در آن، این امکان وجود دارد که براساس نوع آتشفشان و ارزیابی پژوهشگر، بین فوران از یک نقطه یا از یک محدوده یکی را انتخاب نماید (Khaiatzadeh et al., 2016). اگر فوران از یک نقطه انتخاب شود لازم است مختصات نقطه شروع فوران به صورت دستی با کلیک بر روی پیکسل مربوطه در مدل DEM محل مشخص گردد. خروجی این مدل محدوده جریان گدازه به صورت یک داده رستری است که اساس تهیه نقشه پهنه‌بندی را تشکیل می‌دهد. در این مطالعه، براساس مساحت جریان گدازه در فوران‌های قبلی و آتشفشان‌های مشابه، حداکثر مسافت طی شده توسط گدازه ۵ کیلومتر انتخاب گردید. ارتفاع روانه گدازه برای بی اثر کردن موانع موجود در مسیر و یا خطای



شکل ۲- روش اندازه گیری زاویه میل جریان. (Felpeto, 2009)  
 Fig. 2. Method of flow angle measurement (Felpeto, 2009)



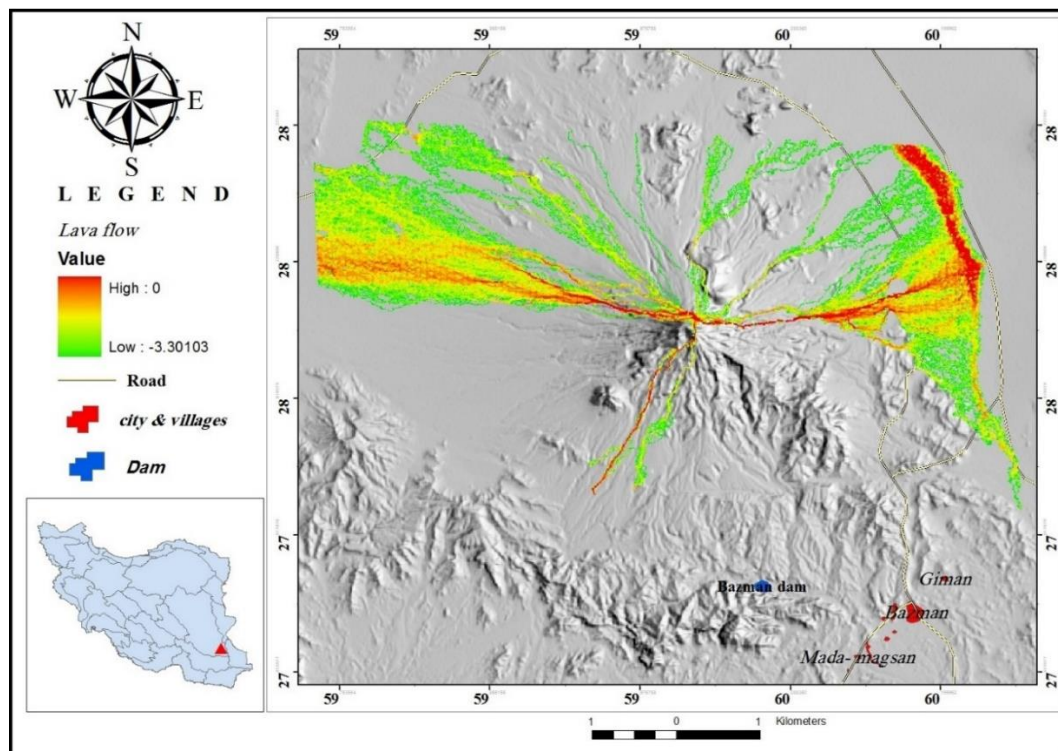
شکل ۳- نقشه پهنه بندی خطر خاکسترهای ناشی از فوران احتمالی آتشفشان بزمان.  
 Fig. 3. Hazard zoning map of ashfall generated by possible eruption of Bazman volcano

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- خطر تفرا

نقشه پهنه‌بندی خطر خاکسترهای ناشی از فوران احتمالی این آتشفشان که اساس تهیه آن در مبحث قبل (مواد و روش‌ها) توضیح داده شد در شکل ۳ ارائه شده است. باتوجه به آن، به علت حرکت هوا در جو بالا از غرب به شرق که متأثر از عرض جغرافیائی این منطقه است، خاکسترهای ناشی از فوران احتمالی مشابه با فوران احتمالی تفتان (، Khaiatzadeh et al., 2016) به سمت شرق حرکت کرده و به تدریج به سطح زمین فرود می‌آیند. حداکثر ضخامت خاکستر در محدوده شرقی نزدیک به مخروط حدود 3 متر است که به سمت حواشی این محل و با دور شدن از آتشفشان ضخامت آن کاهش می‌یابد.

خوشبختانه شهر یا روستای مهمی تحت خطر جدی این خاکسترها قرار ندارد و تنها قسمتی از جاده بم-ایران شهر در محدوده خطر واقع شده است. مفهوم آن این است که ممکن است در اثر فوران احتمالی این آتشفشان، خاکسترها مشکلاتی از نوع ناکافی بودن دید برای خودروهای عبوری از این محدوده از جاده ایجاد کنند. در ضمن، تعدادی روستا در فاصله زیاد از شرق این آتشفشان در پلوم خاکستر آن قرار می‌گیرند که مقدار خاکستر در آنجا کم بوده و بعید است مشکل عمده‌ای ایجاد شود. همچنین، ایستگاه‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ خط لوله انتقال گاز ۳۶ اینچ زاهدان که در شرق این آتشفشان (نزدیک جاده بم -ایران شهر) قرار دارند نیز در محدوده خاکسترها قرار می‌گیرند.



شکل ۴- نقشه احتمال قرار گرفتن در معرض گدازه.

Fig. 4. Hazard zoning map of lava generated by possible eruption of Bazman volcano

##### ۴-۲- خطر گدازه

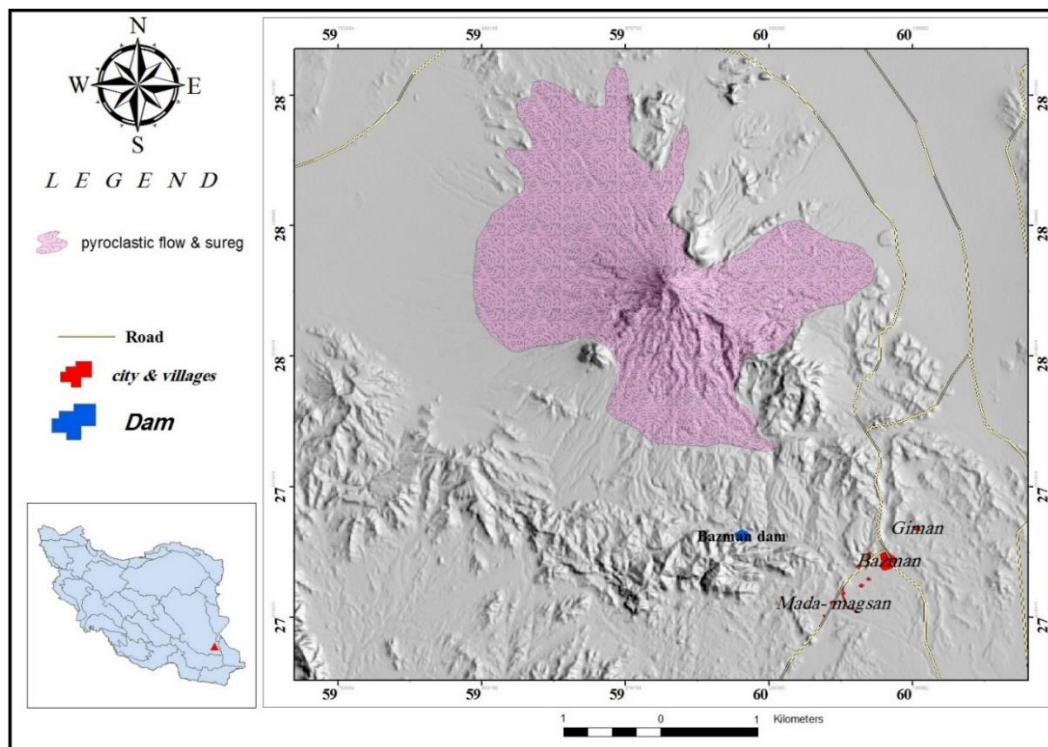
نقشه پهنه‌بندی خطر گدازه‌های آتشفشان بزمان در شکل ۴ ارائه شده است. براساس آن، گدازه‌ها تحت تأثیر توپوگرافی این آتشفشان بطور عمده در شرق، شمال و غرب آن پخش می‌شوند و شهر بزمان که مهم‌ترین آبادی نزدیک آن است به

دلیل قرارگیری در جنوب آتشفشان در معرض این تهدید قرار ندارد. البته، خروج حجم زیادی گدازه از محدوده‌های فوق یا مخروط‌های کوچک حاشیه‌ی آن امکان مسدود کردن جاده‌های خاکی غرب آتشفشان و جاده آسفالته بم-بزمان را افزایش می‌دهد.

### ۳-۴- خطر ابر سوزان

نقشه پهنه‌بندی خطر ابر سوزان ناشی از فوران احتمالی آتشفشان بزمان در شکل ۵ ارائه شده است. این نقشه حاکی از این است که ابرهای سوزان در بسیاری از سطوح اطراف مخروط می‌توانند منتشر شوند ولی مسافت طی شده توسط آن‌ها براساس فرضیات درج شده در مدل به حدی نیست که به

آبادی‌های منطقه آسیب وارد سازند. با این حال، بهتر است مطالعات دقیق‌تر از نظر خطر ورود آن‌ها به شهر بزمان صورت گیرند. البته، توجه به نقشه پهنه‌بندی تهیه شده در این مطالعه برای احداث جاده‌های دسترسی به نزدیکی قله جهت گردشگران و هر گونه کاربری جدید در منطقه می‌تواند مفید باشد



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی خطر ابر سوزان ناشی از فوران احتمالی آتشفشان بزمان.

Fig. 5. Hazard zoning map of Nuee ardente generated by possible eruption of Bazman volcano

### ۵- نتیجه گیری

براساس این مطالعه، آتشفشان بزمان یک استراتوولکان خاموش (dormant) با استعداد زیاد فوران در آینده است. فوران احتمالی آن با شدت (VEI) در حد ۳ تا ۵ و از نوع ولکانو تا نیمه پلینی پیش‌بینی می‌شود. خاکسترها، گدازه‌ها و ابرهای سوزان از جمله تهدیدهای مهم ناشی از فوران احتمالی آن می‌باشند. نقشه‌های پهنه‌بندی این سه نوع تهدید حاکی از این می‌باشند که فوران آن هیچ آبادی مهمی را تهدید نمی‌کند، ولی خاکسترهای آن می‌توانند در شرق آتشفشان به بعضی روستاها برسند. در عین حال، در صورت خروج گدازه به مقدار زیاد یا از

بعضی دهانه‌های فرعی حاشیه‌ای امکان مسدود شدن جاده بم-ایران شهر منتفی نیست. همچنین، لازم است در پروژه‌های توسعه‌ای و عمرانی در اطراف مخروط این آتشفشان به نقشه‌های پهنه‌بندی حاصله توجه شود. در عین حال، تصور می‌شود پیش از فوران احتمالی آن زمین لرزه‌های خفیف تا متوسط متعددی در زیر دهانه رخ دهند. پس باید هرگونه افزایش لرزه خیزی در محدوده این آتشفشان مورد توجه قرار گیرد، در عین حال که در هنگام فوران امکان مسدود شدن جاده مواصلاتی مهم بم-ایران شهر که تا چابهار ادامه می‌یابد، و یا کاهش دید ناشی از تراکم خاکستر در بخش‌هایی از این جاده، مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- Ahmadi, A., Firouzkouhi, Z., Farimani, A. M., Lentz, D.R., 2017. Geochemical and textural characteristics of plagioclase as evidence for open-system processes: Case study from Bazman volcano (SE Iran). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 25, 367-380.
- Bardintzeff, J.M., McBirney, A., 2000. *Volcanology*, Jones & Bartlett Publishers; 2nd edition. p. 299.
- Biabangard, H., Ahmadi Khalaji, A., Tahmasbi, Z., Sharifi Nejad, A., 2020. Geochemistry and Thermobarometry of Bazman volcanic rocks, An example of active continental margin volcano. *Quaternary Journal of Iran* 6(6), 229-256.
- Blong, R. J., 1984. *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. San Diego, CA, Academic Press. p. 289.
- Cas, R., Giordano G. Wright, J.V., 2022. *Volcanology: processes, deposits, geology and resources*, Springer, pp. 1752. ISBN: 9783319666129.
- Connor, C. B., Hill, B.E., Winfrey, B., Franklin, N. M., Femina, P.C.L., 2001. Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Natural Hazards Review* 2(1), 33-42.
- Darvishzadeh, A., 1981. *Principles of volcanology* (in Persian), Tehran university publications, p. 342.
- Darvishzadeh, A., 2004. *Volcanoes and volcanic facies* (in Persian), university of Tehran press, p. 587.
- Farhoudi, G., Karig, D.E., 1977. Makran of Iran and Pakistan as an active arc system. *Geology* 5(11), 664-668.
- Felpeto, A., 2009. VORIS, a GIS based tool for volcanic hazard assessment, User Guide. Observatorio Geofísico Central, IGN. p. 40.
- Felpeto, A., Marti, J., Ortiz, R., 2007. Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 166, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.07.008>
- Ghorbani, M., 2003. *Principles of volcanology and a review on volcanism in Iran*, (in Persian), Arianzamin press, p. 362.
- Habibi Mood. S., Jami, M., Saeedi, M., Kakha, G., Jami, H.A., 2021. Analysis of relative study of active tectonics using tectonic morphotectonic indices in the southeastern basins of Bazman volcanic zone, *Journal of Natural Environmental Hazards* 10(28), 107-130. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.33715.1643>
- Jenkins, C., 2022. *Volcanology: Geological and Applied Aspects*, States Academic Press, p. 245.
- Khaiatzadeh, A., Abbasnejad A., 2017. Application of EN-SAW and ANP multi-criteria decision making methods in geology: reactivation hazard assessment and ranking of Iranian stratovolcanoes as a case study, *Geosciences* 26, 137-146. <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.44133>
- Khaiatzadeh, A., Abbasnejad, A., Ranjbar, H., 2016. Tephra, Lava Flow and Nuée Ardente Hazard Zoning of Taftan Volcano, SE Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 5(2), 17-30. <https://doi.org/10.22067/geo.v5i2.42555>
- Kopp, C., Fruehn, J., Flueh, E. R., Reichert, C., Kukowski, N., Bialas, J., Klaeschen, D., 2000. Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data. *Tectonophysics* 329(1-4), 171-191.
- Kusky, T.M., 2008. *Volcanoes: Eruptions and Other Volcanic Hazards*. Infobase Publishing.
- Latter, J.H., 2012. *Volcanic Hazards: Assessment and Monitoring*. Germany: Springer Berlin Heidelberg. p. 625.
- Loughlin, S.C., Sparks, R.S.J., Sparks, S., Brown, S.K., Jenkins, S.F., Vye-Brown, C., (Eds.), 2015. *Global volcanic hazards and risk*. Cambridge University Press.
- Malin, M.C., Sheridan, M.F., 1982. Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science* 217, 637-640.
- Mastin, L.G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., Durant, A., et al., 2009. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions". *Journal of volcanology and Geothermal Research* 186, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008>
- Mortazavi, M., Sparks, R.S.J., Amigo, A., 2009. Evidence for recent large magnitude explosive eruptions at Damavand volcano, Iran with implications for volcanic hazards. *Journal of Sciences*, 20(3), 253-264.
- Nicolson, E., *Volcanology*. 2020. United States: SYRAWOOD Publishing House. p. 224.
- Papale, P., Shroder F., 2014. *Volcanic Hazards, Risks and Disasters*. Netherlands: Elsevier Science. p. 532.

- Parfitt, E.A., Wilson, L., 2008. *Fundamental of physical volcanology*. blackwell publishing Ltd. p. 230.
- Penney, C., Tavakoli, F., Saadat, A., Nankali, H.R., Sedighi, M., Khorrani, F., Priestley, K., 2017. Megathrust and accretionary wedge properties and behaviour in the Makran subduction zone. *Geophysical Journal International* 209(3), 1800-1830. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx126>
- Platt, J.P., Leggett, J.K., Young, J., Raza, H., Alam, S., 1985. Large-scale sediment underplating in the Makran accretionary prism, southwest Pakistan. *Geology* 13(7), 507-511.
- Rahimzadeh, D., 1996. A report on Bazman volcanic area (in Persian), Geological survey of Iran.
- Sahandi, M., Padashi, M., 2003. Geological quaderangle of Bazman (scale 1:100,000), Geological Survey of Iran.
- Salkhi, R., 1997. Volcanology and petrology of Quaternary volcanoes of Gehghan-e Bala region-NW of Bazman. M. Sc. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
- Schmincke, H.U., 2012. *Volcanism*. Springer. p. 324.
- Shiaian, K., Ghalamghash, J., Vosoughi, A.M., Masoudi, F., 2015. Geology, Geochemistry and Petrogenesis of Bazman Volcano, SE of Iran (in Persian), *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 24 (95), 99-110. <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.42387>
- Shiaian, K., Dabiri, R., 2019. Chemistry of mafic minerals and thermobarometry of Bazman Quaternary volcanic rocks (in Persian). *Quaternary Journal of Iran* 5, 205-220.
- Simmons B., 2022. *Understanding volcanology*. Callisto Reference. p. 235.
- Tilling, R.I., 1989. Volcanic hazards and their mitigation: progress and problems. *Reviews of Geophysics* 27(2), 237-269.