

ارزیابی و پهنه‌بندی خطرهای مرتبط با فوران احتمالی آتشفشان سبلان

احمد عباس نژاد^{۱*}، احمد خیاطزاده^۲، حجت‌اله رنجبر^۳، حمید احمدی‌پور^۴ و بهنام عباس‌نژاد^۵

۱. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۳. استاد گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۴. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۵. پژوهشگر پسادکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۴

چکیده

استراتولوکان سبلان یکی از آتشفشان‌های نیمه فعال ایران است و احتمال فوران آن در آینده منتفی نیست، زیرا که دارای چشمه‌های آبگرم فراوان و مورفولوژی سرپا (با فرسایش کم) است و از آخرین فوران آن، در مقیاس زمین‌شناسی، زمان اندکی طی شده است. براساس رژیم فوران این نوع آتشفشان‌ها، و نیز، فوران‌های قبلی حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، فوران احتمالی این آتشفشان می‌تواند با تهدیدهای خاکستر (تفرا)، گدازه، پیروکلاستیک‌های جریانی و لاهار همراه باشد. شدت فوران احتمالی آن در مقیاس VEI در حد سه تا پنج پیش‌بینی می‌شود. در صورتی که این آتشفشان نشانه‌های شروع فوران را بروز دهد باید براساس نقشه‌های پهنه‌بندی مربوط به خطرهایی که می‌تواند ایجاد کند اقدامات اضطراری صورت گیرد. بنابراین، تهیه این نقشه‌ها برای اقدامات اضطراری ضروری است. در این مطالعه، از مدل ارتفاعی رقومی آتشفشان، تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI و VORIS و داده‌های جوی پایگاه NCEP/NCAR استفاده شد. برای تهیه نقشه خطر پیروکلاستیک‌های جریانی از مدل مالین و شریدان (Malin and Sheridan, 1982) استفاده شد. در تهیه نقشه گسترش و موقعیت جریان‌های گدازه مدل شبیه‌سازی جریان گدازه مورد استفاده قرار گرفت، و بالاخره، برای تعیین مسیرهای احتمالی و موقعیت جریان‌های لاهاری از تلفیق مدل ارتفاعی رقومی آتشفشان و تصاویر ماهواره‌ای موزائیک شده، آبراهه‌های اصلی شناسایی و بافرگذاری شدند. براساس این مطالعه، خاکستر آتشفشان به سمت شرق حرکت کرده و شهر اردبیل و آبادی‌های دیگری را مورد تهدید قرار خواهد داد. لاهارهای آن هم کاربری‌های متعددی در اطراف مخروط را تهدید می‌کنند و امکان ورود به شهرهای مشکین‌شهر و اردبیل را هم دارند. جریان‌های گدازه اکثر جان‌پناه‌ها، تأسیسات استفاده از آبگرم و پیست اسکی آلوارس را تهدید خواهند کرد. همچنین، مشکین‌شهر، روستای موئیل، پیست‌های اسکی و جان‌پناه‌ها در معرض پیروکلاستیک‌های جریانی (ابر سوزان) قرار خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: آتشفشان سبلان، خطر لاهار، خطر گدازه، خطر ابر سوزان، خطر خاکستر آتشفشانی.

مقدمه

داشته‌اند (Charlton, 2018). جزئیات این نقشه‌ها متأثر از نوع و شرایط آتشفشان، نوع داده‌های مورد استفاده و هدف از تهیه آن‌ها بوده است (Thompson et al., 2017). در هر حال، اسامی بعضی از نقشه‌های پهنه‌بندی این نوع خطر در کشورهای مختلف با ذکر منبع و مشخصات نقشه توسط ناکاسوجی و ساتاکه (Nakasuji and Satake, 2004) اعلام شده است.

این نقشه‌ها ابزار مهمی برای مرادده ریسک آتشفشانی بین دانشمندان، مسئولان و توده مردم می‌باشند (Haynes et al., 2008) و نقش مهمی در پاسخ اضطراری و کاهش خطر آتشفشان‌ها دارند (Xu et al., 2022). در شرایط بحرانی، می‌توان آن‌ها را از طریق اینترنت به سرعت و به‌طور وسیع انتشار داد تا در اختیار نیازمندان و افراد ساکن در اطراف آتشفشان قرار گیرند (Thompson et al., 2017). انواع مختلفی از نقشه پهنه‌بندی خطر آتشفشان وجود داشته و قابل تهیه است که توسط کالدر و همکاران (Calder et al., 2015) معرفی شده‌اند. هینس و همکاران (Haynes et al., 2008) نقشه‌های پهنه‌بندی خطر آتشفشان بوکورون (Boqueron) در کشور سان‌سالوادور را براساس سه وضعیت فرضی مختلف (فوران خفیف، متوسط و شدید) تهیه کرده‌اند. به‌عنوان نوعی از نقشه تک‌خطی می‌توان به نقشه خطر گدازه آتشفشان اتنا (Negro et al., 2013) اشاره کرد. همچنین، نری و همکاران (Neri et al., 2013) با استفاده از تکنیک درخت حوادث، نقشه پهنه‌بندی خطر آتشفشان کانلاتون^۲ فیلیپین را تهیه کرده‌اند. همچنین، حتی نقشه پهنه‌بندی خطر قطعات بزرگ پرتابی از دهانه آتشفشان هم تهیه شده است (Alatorre-Ibargueng et al., 2016).

کاپرا و همکاران (Capra et al., 2008) اقدام به پهنه‌بندی خطر آتشفشان نوادو د تولوکا^۴ واقع در ۷۰ کیلومتری غرب مکزیکوسیتی براساس معیارهای زمین‌شناسی و شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از

پهنه‌بندی مهم‌ترین و اساسی‌ترین اقدام برای کاهش ریسک خطرهای زمین‌شناختی است، زیرا براساس آن وجود یا فقدان خطر و محدوده‌های با درجه‌های مختلف خطر مشخص می‌شوند. مقایسه یا همپوشانی این نقشه‌ها با کاربری زمین موقعیت و نوع عناصر در معرض ریسک را مشخص می‌کند. در واقع، این نقشه‌ها پیش‌نیاز اصلی برای هرگونه اقدامی در مورد خطرهای می‌باشند. این نکته در مورد آتشفشان‌ها هم صدق می‌کند. آن‌ها به شکل‌های مختلفی می‌توانند باعث خسارات جانی و مالی شوند و در منابع مختلف از جمله (Walker (1982), Blong (1984), Tilling (1989), McGuire (1998), Latter (2013), Loughlin et al., (2015) معرفی شده‌اند. در هر حال، ازجمله مهم‌ترین تهدیدهای ناشی از آن‌ها می‌توان به خطر خاکستر و گازهای آتشفشانی، خطر ابر سوزان، ورود گدازه، خطر لاهار و خطر تغییرات آب و هوایی اشاره کرد. براساس بررسی‌های خیاطزاده و عباس‌نژاد (۱۳۹۵) می‌توان آتشفشان‌های دماوند، سبلان، بزمان و تفتان را خاموش یا نیمه‌فعال^۱ فرض کرد، امکان فعال شدن آن‌ها در هر لحظه وجود دارد. در صورت فعال شدن ناگهانی، نیاز به داشتن اطلاعات در مورد محدوده‌های گسترش انواع تهدیدهای آتشفشانی جهت انجام اقدامات مدیریتی است و باید با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی انجام شوند.

ناکاسوجی و ساتاکه (Nakasuji and Satake, 2004) نقشه پهنه‌بندی خطر آتشفشان را نقشه‌ای تعریف کرده‌اند که موقعیت محدوده‌هایی که در اثر فعالیت آتشفشان آسیب می‌بینند را مشخص سازد. تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر آتشفشان‌های فعال یا بالقوه فعال گام مهمی به سمت کاهش ریسک ناشی از آن‌ها است (Tilling, 2005). از آنجا که در دوران تاریخی در ایران هیچ فوران آتشفشانی رخ نداده است، در مقایسه با دیگر خطرهای (زلزله و سیل)، توجه کافی به این نوع تهدید نشده است (خیاطزاده و همکاران، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲). در ۱۵۰ سال گذشته صدها نقشه پهنه‌بندی خطر متعلق به آتشفشان‌ها و پهنه‌های آتشفشانی مختلف دنیا تهیه و ارائه شده است که نقش مهمی در مرادده^۲ این خطر

1. Dormant
2. Communication
3. Kanlaon
4. Nevado de Toluca

پیش‌تر نقشه‌های پهنه‌بندی خطر آتشفشان تفتان (خیاط‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵)، بزمان (خیاط‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱) و دماوند (خیاط‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱) تهیه شده‌اند. بنابراین، هنوز چنین نقشه‌هایی برای آتشفشان سبلان تهیه نشده‌اند. اگرچه مطالعات متعددی روی آتشفشان سبلان صورت گرفته است، اما هدف آن‌ها شناخت آن از جنبه آتشفشان‌شناسی است و جنبه‌های خطری آن مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. نبود نقشه پهنه‌بندی در هنگام بروز نشانه‌های فعال شدن و در حین فوران می‌تواند خسارات و تلفات ناشی از فوران را به‌شدت افزایش دهد.

منطقه مورد مطالعه

استراتوتولکان سبلان در ۴۰ کیلومتری باختر اردبیل و در جنوب مشکین‌شهر قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع آن از سطح دریا ۴۸۲۰ متر است و محدوده‌ای به وسعت حدود ۱۲۰۰ کیلومترمربع را اشغال کرده است. این آتشفشان دارای سه قله است که بلندترین آن‌ها سبلان سلطان نام دارد. یکی دیگر از قله‌ها که هرم داغ نام دارد دهانه‌ای به قطر ۲۰۰ متر دارد و از بمب، لاپیلی و بلوک پر شده است. این آتشفشان به‌طور معمول از آذر ماه به طور کامل توسط برف پوشیده می‌شود.

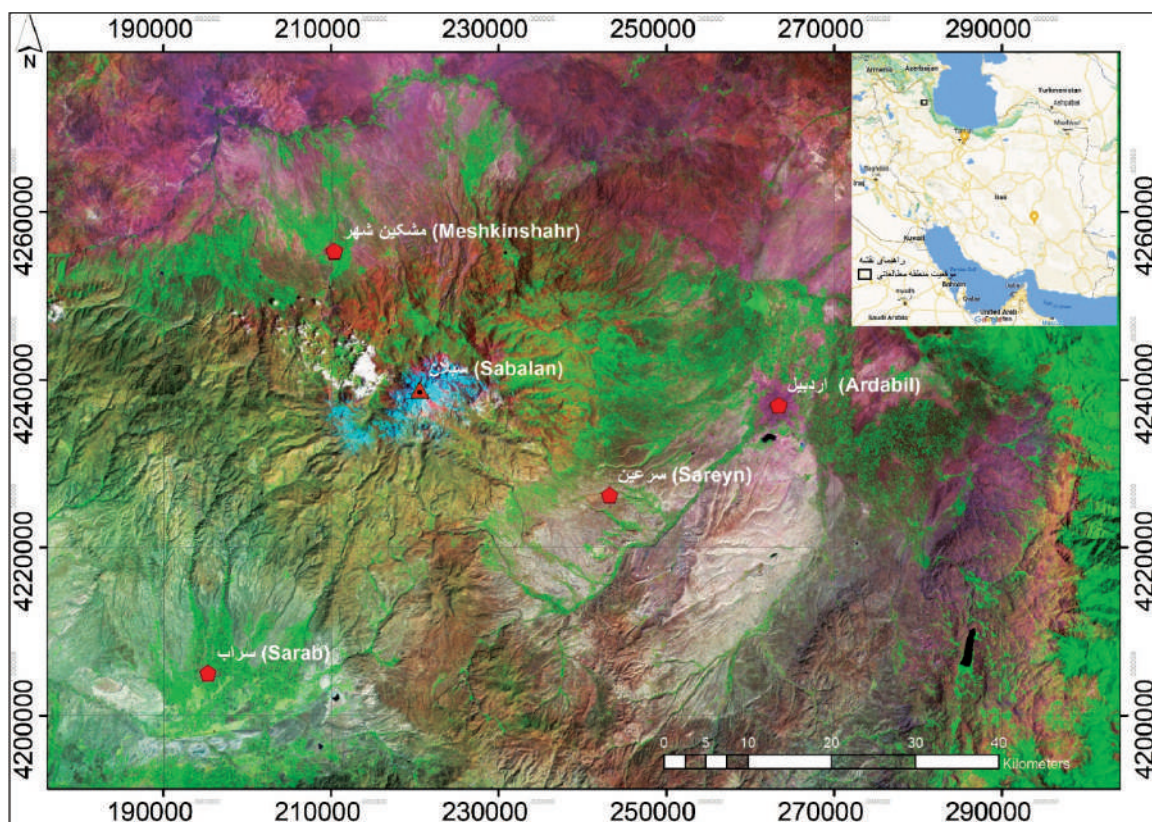
آتشفشان سبلان روی یک واحد کوهستانی با امتداد خاور-باختر و متشکل از گدازه‌های ائوسن و توده‌های نفوذی قرار دارد (باباخانی، ۱۳۸۷) و دارای یک کالدرای بزرگ با قطر حدود ۱۲ کیلومتر است. این کالدرای توسط فوران‌های بعدی تا حدی پر شده است (شکل ۲). پیدایش این کالدرای ناشی از فرونشست زمین دانسته‌اند. آتشفشان سبلان توسط افراد مختلفی از جمله دیدون و ژمین (Didon and Gemain, 1976)، امامی (Emami, 1994)، قلمقاش و همکاران (Ghalamghash et al., 2016)، موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2014)، امامی (۱۳۷۹)، فتح الهی و همکاران (۱۳۹۲)، باباخانی (۱۳۸۷)، فتح الهی و همکاران (۱۳۸۹)، فتح الهی و خیرخواه (۱۳۹۴) و قلمقاش و همکاران (۱۳۹۸) مورد مطالعه قرار گرفته است.

نرم‌افزارهای LAHARL، TTTAN2D، D3WOLF و HAZMAP کرده‌اند. اگرچه این آتشفشان از ۳۳۰۰۰ سال قبل فورانی نداشته، ولی مشابه با سبلان به لحاظ قرارگیری در یک کمربند فعال و با توجه به فوران‌های گذشته، خطرناک تشخیص داده شده است. براساس این مطالعه، جریان‌های آواری آن می‌توانند تا ۱۵ کیلومتر از دهانه دور شده و خسارت وارد سازند. خاکستر ناشی از فوران نوع پلینی آن تا ۷۰ کیلومتر از محل فوران توانائی وارد ساختن خسارت را دارد. بدین ترتیب، مکزیکوسیتی هم در معرض تهدید آن قرار دارد. لاهارهای آن هم در سال‌های متمادی پس از فوران می‌توانند تولید شوند و امکان خسارت به روستاهای موجود در دره‌های اطراف آتشفشان را خواهند داشت.

سالواتیچی و همکاران (Salvatici et al., 2016) با استفاده از مدل سازی رقومی اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر جریان‌های آذرآواری در آتشفشان استرومبولی ایتالیا کرده‌اند. همچنین، تاربانگ و همکاران (Tarigan et al., 2017) نقشه پهنه‌بندی خطر آتشفشان سینابونگ را با استفاده از پهنه‌بندی تهیه کرده‌اند. چورل و همکاران (Chevrel et al., 2021) نقشه پهنه‌بندی خطر آتشفشان سپری جزیره رونیون فرانسه را تهیه کرده‌اند. آن‌ها به مواردی نظیر موقعیت نقطه خروج، زمان تکرار فوران، طول جریان و مسیر جریان توجه داشته‌اند.

واگنر و همکاران (Wagner et al., 2015) تعداد ۱۹ نقشه پهنه‌بندی متعلق به آتشفشان‌های مختلف دنیا را جمع‌آوری کرده و از نظر نحوه تهیه، نوع خطر و نحوه ارائه مورد مقایسه قرار داده‌اند. ناکاسوجی و ساتاکه (Nakasujji and Satake, 2004) مراحل تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی را توضیح داده‌اند. تهیه نقشه با استفاده از GIS امکان اصلاح و تغییر آن در هر زمان را فراهم می‌کند. در عین حال که با استفاده از GIS می‌توان نقشه هم‌زمان با فوران را نیز به‌سرعت تهیه کرد و برای کمک به مدیران و افراد درگیر از طریق اینترنت منتشر ساخت.

همان‌گونه که ذکر شد، براساس مطالعات خیاط‌زاده و عباس نژاد (۱۳۹۵)، سبلان همراه با تفتان، دماوند و بزمان از جمله آتشفشان‌های ایرانی مستعد به فوران در آینده است.



شکل ۱. موقعیت آتشفشان سبلان و مهم‌ترین شهرهای اطراف آن

سن سنجی زیرکن به روش U-Pb زمان فوران سنگ‌های آتشفشانی قدیمی آن را ۴/۵ تا ۱/۳ میلیون سال قبل و سن جوان‌ترین سنگ‌های خروجی از آن را ۴۸۰۰۰ تا ۱۸۸۰۰۰ سال قبل به دست آورده است، ولی براساس داده‌های منتشر نشده حسن‌زاده و همکاران (به نقل از فتح الهی و خیرخواه (۱۳۹۴))، جدیدترین فوران سبلان حدود ۷۵۰۰۰ سال قبل رخ داده است.

در این آتشفشان سه سری فعالیت شناسایی شده است که عبارتند از: (۱) سری زیرین، پیش از پیدایش مخروط تشکیل شده و شامل گدازه‌های لاتیتی-آندزیتی میوسن است، (۲) سری میانی، مخروط اصلی را ساخته و در طی آن ابتدا گدازه‌های لاتیتی-آندزیتی خارج شده و در پایان جای خود را به داسیت داده‌اند و (۳) سری فوقانی، پس از پیدایش کالدرای تشکیل شده، ترکیب عمده آن آندزیتی-داسیتی است و سن آن پلیوکواترن است.

در جدول ۱ واحدهای زمین‌شناختی تشکیل‌دهنده سبلان به ترتیب سن معرفی شده‌اند. این واحدها حاکی از

سنگ‌شناسی بعضی از واحدهای ائوسنی که این آتشفشان روی آنها قرار گرفته توسط زمانی و همکاران (۱۳۹۴)، مبشر گرمی و همکاران (۱۳۹۷) و یادگاری و همکاران (۱۴۰۲) مورد مطالعه قرار گرفته است.

اولین فعالیت‌های فورانی این آتشفشان از ائوسن شروع شده‌اند، ولی شکل واقعی آن محصول فعالیت در پلیوسن است. البته، در کواترن هم فعالیت داشته است. بنابراین، در طی یک دوره زمانی به نسبت طولانی شکل گرفته است. فتح الهی و خیرخواه (۱۳۹۴) آن را به‌عنوان عضو جوانی از مجموعه آتشفشانی سنوزوئیک متعلق به کمان ماگمایی البرز ذکر کرده‌اند و معتقدند جوان‌ترین کالدرای آتشفشانی در شرق فلات ایرانی-ترکی است. براساس مطالعات فتح الهی و خیرخواه (۱۳۹۴)، ماگماهای اولیه آن به حاشیه فعال قاره‌ای متأثر از فرورانش اقیانوس تتیس زیر صفحه ایران مرکزی تعلق دارند. باباخانی (۱۳۸۷) فعالیت آتشفشانی آن را هم ارز کواترن پیشین در نظر گرفته است. قلمقاش و همکاران (Ghalamghash et al., 2016) با استفاده از

این می‌باشند که سبلان در فعالیت‌های خود لاهار، گدازه و ابر سوزان (ایگنیمبریت) هم تولید کرده است. بدیهی است در فوران‌های این استراتوولکان خاکستر هم تولید شده و به‌طور عمده در محل‌های دور از مخروط نهشته شده‌اند.

جدول ۱. واحدهای زمین‌شناسی تشکیل‌دهنده آتشفشان سبلان (با اقتباس از نقشه زمین‌شناسی مشکین‌شهر، 1994 (Amini)

دوره فعالیت	جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده واحدهای مربوطه
فرسایشی	شامل: لاهار و پادگانه‌های آبرفتی قدیمی‌تر که خود شامل واریزه‌ها و مورن‌های یخچالی‌اند
مرحله چهارم	شامل: گدازه‌های آندزیتی-داسیتی و درنهایت گدازه‌های تراکیتی-تراکی آندزیتی
مرحله سوم	شامل: لاهار و آگلومرا، ایگنیمبریت‌های داسیتی، روانه‌های خاکستر داسیتی-ریوداسیتی و گدازه‌ها و گنبد‌های ریولیتی-تراکیتی
مرحله دوم	شامل: گدازه و گنبد‌های داسیتی-ریوداسیتی در بلندی‌های سبلان
مرحله اول	شامل: جریان‌های گدازه آندزیتی، جریان‌های گدازه تراکی آندزیتی و گدازه‌های آندزیتی پرفیری و داسیت پرفیری

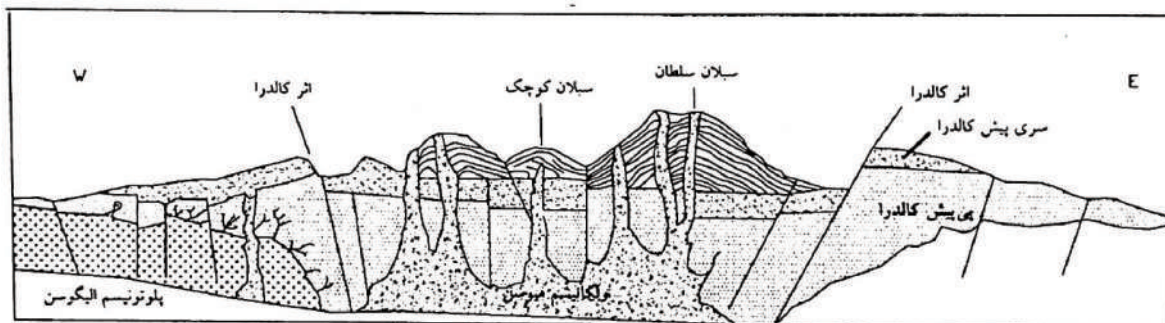
به‌صورت تشکیل دو مخروط مرکب کوچک و سه جریان گدازه بوده است (امامی، ۱۳۷۹). ناگفته نماند، درحالی‌که گدازه‌های این آتشفشان به‌طور عمده ترکیب آندزیتی تا داسیتی دارند، ایگنیمبریت‌های آن ترکیب اسیدی‌تر (ریولیتی تا داسیتی) نشان می‌دهند (باباخانی، ۱۳۸۷؛ امامی، ۱۳۷۹ و قلمقاش و همکاران، ۱۳۹۸).

فتح‌الهی و خیرخواه (۱۳۹۴) مواد خروجی آن را محصول تبلور تفریقی ماگمای والد بازالتی با خصوصیات کالک آلکن پتاسیم بالا ذکر کرده‌اند و پوسته لیتوسفری غنی شده را منشاء آن دانسته‌اند. این مواد به کمان آتشفشانی حاشیه قاره‌ای تعلق دارند، ولی در پوسته بالایی دچار آلودگی شده‌اند. قلمقاش و همکاران (۱۳۹۸) منشاء آن را ذوب بخشی پوسته قاره‌ای پایینی با ترکیب آمفیبولیت گارنت دار دانسته‌اند.

دیدون و ژمین (Didon and Gemain, 1976) پنج فاز فورانی در گدازه‌های آن شناسایی کرده‌اند که سه مورد از آن‌ها غالب است و واحدهای عمده را تشکیل داده‌اند. این سه مورد عبارتند از: آندزیت‌های زیرین، تراکی آندزیت‌ها و گدازه‌های داسیتی انتهائی.

براساس مطالعات باباخانی (۱۳۸۷) و امامی (۱۳۷۹) فروریزی این آتشفشان و تشکیل کالدرای آن همراه با فعالیت اصلی انفجاری است. در اثر آن، جریان‌های آذرآواری، خاکستر، ابر سوزان، برش‌های تیپ پله، روان‌های ایگنیمبریتی و بمب‌های آتشفشانی تولید شده‌اند.

پس از تشکیل کالدرای کوتاه گدازه خارج شده و گنبد‌های آتشفشانی را شکل داده‌اند (شکل ۲). آن‌ها بخش‌های مرکزی مرتفع این آتشفشان را اشغال کرده و ترکیبی آندزیتی تا داسیتی دارند. آخرین فعالیت سبلان



شکل ۲. برش زمین‌شناختی از آتشفشان سبلان (باباخانی و همکاران، ۱۳۶۷-به نقل از قربانی، ۱۳۸۲)

خروج در استراتوولکان‌ها دهانه فعلی در نظر گرفته می‌شود (Nakasuji and Satake, 2004). بنابراین، در این مطالعه هم نقطه خروج در دهانه فعلی آتشفشان در نظر گرفته شد. یک جنبه دیگر این مطالعه اندازه فوران و مشخصات فوران است و مشابه با سایر استراتوولکان‌های ایران (خیاطزاده و همکاران، ۱۴۰۱ و ۱۳۹۵) عمل شد.

نحوه تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر خاکستر

برای تهیه نقشه گسترش خاکسترهای ناشی از فوران احتمالی این آتشفشان از مدل فرارفت-انتشار (Mastin et al., 2009) استفاده شد. این مدل اغلب برای هشدار خطر خاکستر و مقابله با آن استفاده می‌شود (Connor et al., 2001). برای استفاده از این مدل باید پارامترهای تأثیرگذارنده مختلفی؛ نظیر ارتفاع ستون فوران، مقدار مواد فورانی، مدت زمان فوران، اندازه ذرات و سرعت و جهت وزش باد در ارتفاعات مختلف معرفی شوند. از نرم‌افزار VORIS که براساس مدل فوق طراحی شده، استفاده شد. این نرم‌افزار می‌تواند نقشه ضخامت و گسترش خاکستر ناشی از فوران فرضی را نشان دهد. (Felpeto, 2007) اطلاعات جوی مورد نیاز از پایگاه NCEP/NCAR که سرتاسر جهان را پوشش می‌دهد کسب شدند. در این پایگاه، آمار مربوط به سرعت و جهت باد در محدوده‌های ۲/۵ در ۲/۵ درجه طول و عرض جغرافیایی از سال ۱۹۴۸ ارائه می‌شوند. براساس آن، مقادیر سرعت و جهت وزش باد در ارتفاعات مختلف منطقه سبلان در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در ضمن، به تبعیت از مرتضوی و همکاران (Mortazavi et al., 2009) و خیاطزاده و همکاران (۱۳۹۵) حجم فوران ۰/۵ کیلومتر مکعب و اندازه ذرات $M_d=3/0$ و $M_d=4/5$ میکرون در نظر گرفته شدند.

در بعضی از حواشی سبلان (به‌طور مثال، نزدیک اردبیل، مشکین‌شهر، سراب و نیر) جریان‌های لاهاری به سن احتمالی پلیستوسن تولید شده‌اند و در سطح مخروط هم به چشم می‌خورند. ضخامت آن‌ها ۱۰ تا ۳۰۰ متر است. ژئومورفولوژی این آتشفشان توسط اسفندیاری و خیام (۱۳۸۶)، بیاتی خطیبی (۱۳۸۶)، دلال اوغلی (۱۳۸۲) و (۱۳۸۳) و دلال اوغلی و رجبی (۱۳۹۴) مورد مطالعه قرار گرفته است.

بالا بودن دمای ژئوترمال در محدوده این آتشفشان خود مؤید پتانسیل بالای فوران احتمالی آن در آینده می‌باشد. مطالعات زمین‌گرمایی این آتشفشان توسط افراد مختلف از جمله رحیمی (۱۳۷۵)، (Fotouhi 1995)، Abdolahzadeh Bina (2009) Ghaedrahmati et al., (2013) انجام شده است.

روش مطالعه

اطلاعات زمین‌شناختی مورد نیاز برای شناخت سبلان و نوع فوران‌ها و مواد خروجی آن از منابع متعدد صورت گرفته روی آن کسب شدند. این اطلاعات برای ارزیابی پتانسیل فوران آتی و نوع خطرهای قابل ایجاد مورد استفاده قرار گرفتند. از تصاویر DEM ۳۰ متر به‌عنوان اطلاعات ارتفاعی رقومی استفاده شد و تصاویر رقومی موزائیک تصویری آن تهیه شدند. تصاویر سه بعدی آتشفشان با استفاده از نرم‌افزار ENVI و با داشتن اطلاعات ارتفاعی رقومی به دست آمدند. این تصاویر سه بعدی مبنای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی قرار گرفتند. همچنین، تصاویر لندست ETM⁺ برای شناسایی کاربری زمین و عناصر تحت خطر مورد استفاده قرار گرفتند. در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی موقعیت نقطه خروج مواد بسیار اهمیت دارد. در این رابطه، همواره نقطه

جدول ۲. سرعت و جهت وزش باد در سطوح مختلف جو در پهنه سبلان (برگرفته از داده‌های مرکز NCER/NCAR)

ارتفاع (Km)	فشار (mb)	جهت وزش باد (deg)	سرعت وزش باد (m/s)
۱	۵۰۰	۲۵۵	۱۱
۲	۳۰۰	۲۶۰	۲۱
۳	۱۰۰	۲۶۰	۱۸
۴	۵۰	۲۵۱	۶/۷۵
۵	۲۰	۲۵۰	۶/۲۵

با سطح زمین (Felpeto et al., 2007) برابر است. این مدل به خوبی توسط فلیپتو (Felpeto, 2009) توضیح داده شده است. در عمل، برای اجرای آن مدل ارتفاعی رقومی این آتشفشان مورد استفاده قرار گرفت و با توجه به موقعیت دهانه، مختصات نقطه شروع مشخص شد. پس از آن، مقادیر پارامترهای مورد نیاز در پنجره شبیه‌سازی آن به صورت دستی وارد شدند. با فرمان اجرا^۱، محاسبات انجام شده و لایه اطلاعاتی جدیدی به دست آمد و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS به نقشه پهنه‌بندی پیروکلاستیک‌های جریان تبدیل شد. در ضمن، در این مطالعه ارتفاع سقوط ابر جریانی ۲۰۰ متر و زاویه معادل سقوط (زاویه بین ارتفاع سقوط و شیب توپوگرافی) شش درجه در نظر گرفته شدند.

نحوه تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر لاهار

برای تهیه این نقشه، با استفاده از تصویر سه بعدی تهیه شده از تلفیق مدل ارتفاعی رقومی آتشفشان و تصویرهای ماهواره‌ای موزائیک شده آن، آبراهه‌های اصلی مشخص و بافرگذاری شدند. آن‌ها به عنوان معابر اصلی حرکت لاهار عمل می‌کنند. به عنوان محدوده خطر لاهار، بافر ۵۰۰ متر برای آبراهه‌های اصلی در نظر گرفته شد و نقشه مسیرهای احتمالی جریان‌های لاهاری به دست آمد. ناگفته نماند، در این روش مسیر لاهار مشخص می‌شود، ولی مسافت طی شده تابع شرایط زمان و مکان فوران است.

بحث

احتمال فعالیت

سبلان در دوره تاریخی فاقد هرگونه فوران بوده است. چشمه‌های آب‌گرم متعدد اطراف این مخروط آتشفشانی که توسط شاه بیک (۱۳۷۲) و کمالی نژاد و عباس نژاد (۱۳۹۸) مطالعه و معرفی شده‌اند؛ گزارش خروج گازهای گوگردی در برهه‌های زمانی کوتاه توسط افراد محلی؛ فعالیت شدید تکنونیک پهنه (رحیمی و همکاران، ۱۳۷۵) و نیز، به نسبت سریا بودن آن و فعالیتش در دوران چهارم زمین‌شناسی، همگی مؤید نیمه فعال بودن آن و احتمال فوران مجدد

نحوه تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر گدازه

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر گدازه از مدل شبیه‌سازی جریان گدازه استفاده شد. اساس آن این فرض است که توپوگرافی نقش اصلی را در تعیین مسیر گدازه ایفا می‌کند. در این مدل دو فرض منطقی به کار گرفته می‌شود. اول اینکه گدازه در صورتی از یک نقطه (پیکسل) به نقطه دیگر وارد می‌شود که تفاضل مقدار ارتفاع آن‌ها مثبت باشد. براساس فرض دوم مقدار ورود آن از یک نقطه (پیکسل) به دیگری تابع مقدار عددی تفاضلات مثبت است. در این مدل، با انتخاب یک نقطه به عنوان مبداء، مسیرهای حرکت با استفاده از میانگین‌های الگوریتم مونت کارلو^۱ مشخص می‌شوند. مقادیر ارتفاع براساس مدل ارتفاعی رقومی^۲ محل تعیین می‌شوند. حداکثر طول جریان گدازه در هر مسیر توسط یک پارامتر ثابت برای همه محاسبات کنترل می‌شود (Felpeto et al., 2007). البته، با وارد کردن مقادیر انتخابی برای هر پارامتر، پارامترهای کلی (مانند حداکثر طول جریان، تصحیح ارتفاعی و تعداد از سرگیری محاسبات) باید برای هر نقطه خروجی فرضی گدازه به صورت عدد وارد شوند. مختصات نقطه شروع فوران به صورت دستی با کلیک روی نقطه مورد نظر مشخص می‌شوند. در این مطالعه، حداکثر طول جریان ۵ کیلومتر در نظر گرفته شد. همچنین، ارتفاع روانه برای بی‌اثر کردن موانع موجود در مسیر و یا خطای مدل ارتفاعی رقومی سه متر فرض شد. در ضمن، به عنوان شروع حرکت گدازه ۵۰۰۰ نقطه در اطراف دهانه انتخاب شدند.

نحوه تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر

پیروکلاستیک‌های جریانی

در این مطالعه، برای تعیین حداکثر مسافت گسترش پیروکلاستیک‌های جریانی از مدل ارائه شده توسط مالین و شریدان (Malin and Sheridan, 1982) استفاده شد. اساس این مدل در نظر گرفتن ارتفاع نقطه شروع جریان (H_c) و نسبت آن با طول مسافت جریان (L) به عنوان یک پارامتر اصطکاکی است و در آن به زاویه میل جریان (α_c) نیاز است. این زاویه از طریق نسبت $\text{Arctan} \frac{H_c}{L}$ تعیین می‌شود. پس، در آن، محدوده حرکت با محل تلاقی جریان

1. Mont Carlo Method

2. DEM

3. Run

مسیرهای کوهنوردی و جاده‌های ماشین‌رو در معرض خطر قرار دارند. در حاشیه مخروط شهرها و روستاهای متعددی (نظیر اردبیل، مشکین‌شهر، سراب، موئیل، آقبلاغ، شایق، الوارسی، کمال‌آباد، قره کانلو، خیارک و سرعین) و نیز جاده‌های مواصلاتی، باغ‌ها و مزارع، ساختمان‌های صنعتی، مرکز استفاده از انرژی ژئوترمال، حوضچه پرورش ماهی و موارد دیگر وجود دارند، و می‌توانند در اثر فعالیت احتمالی این آتشفشان کمابیش آسیب ببینند.

محدوده‌های تحت خطر تفرا (خاکستر)

نقشه گسترش خاکسترهای آتشفشانی ناشی از فوران احتمالی سبلان در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این نقشه، تحت تأثیر بادهای غالب مرتفع در این عرض جغرافیایی که غربی-شرقی می‌باشند خاکسترها به سمت شرق تا اندکی متمایل به سمت شمال شرق حرکت کرده و در نهایت در سطح زمین نهشته می‌شوند. شهر اردبیل و روستاهای شرق مخروط در محدوده گسترش پلوم آن قرار داشته و می‌توانند دچار مشکل شوند. براساس فرضیات انجام شده برای تعیین پلوم خاکستر، بستگی به فاصله و موقعیت محل، ضخامت خاکستر می‌تواند در مواردی به حدود سه متر هم برسد. در اثر خاکستر، مشکلاتی از نظر تنفس، دید در هنگام رانندگی، عبور هواپیماها، آلودگی منابع آب و آسیب به محصولات کشاورزی عارض می‌شوند. در جدول ۳ اثرات ناشی از ضخامت‌های مختلف خاکستر آتشفشانی درج شده است.

جدول ۳. اثرات ضخامت‌های مختلف خاکستر (Michaud-Dubuy et al., 2021 - با تغییرات)

اثرات	ضخامت خاکستر	ردیف
توقف فعالیت فرودگاه، ایجاد مشکلات برای شبکه‌های تأمین	در حد میلی‌متر	۱
آسیب به فرودگاه، آسیب به پوشش گیاهی، ایجاد مشکلات برای شبکه‌های تأمین (جاده و غیره)	در حد سانتیمتر	۲
غیرقابل عبور شدن جاده‌ها، ریزش سقف خانه‌های چوبی	حدود ۲۰ سانتیمتر	۳
تخریب کامل زیرساخت‌ها	بیش از ۱ متر	۴

سبلان در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به این نقشه، گدازه‌ها در مجاری حفر شده در شمال و جنوب مخروط حرکت کرده و تنها جریان شمالی می‌تواند به مشکین‌شهر

آن می‌باشند. براساس مطالعات خیاطزاده و عباس‌نژاد (۱۳۹۵)، این آتشفشان در میان استراتوولکان‌های ایران دارای پتانسیل فوران در آینده است.

اندازه فوران احتمالی

با توجه به اینکه سبلان یک استراتوولکان است و در چند ده تا چند صد هزار سال گذشته فاقد فوران بوده است، پیش‌بینی می‌شود شروع فوران احتمالی آن با انفجار به نسبت شدید در حد VEI برابر سه تا پنج همراه باشد. بنابراین، معادل انفجارهای در حد ولکانی تا نیمه پلینی قابل تصور است. در این فوران، احتمال ورود خاکستر به استراتوسفر زمین هم وجود دارد.

نوع خطرهای احتمالی

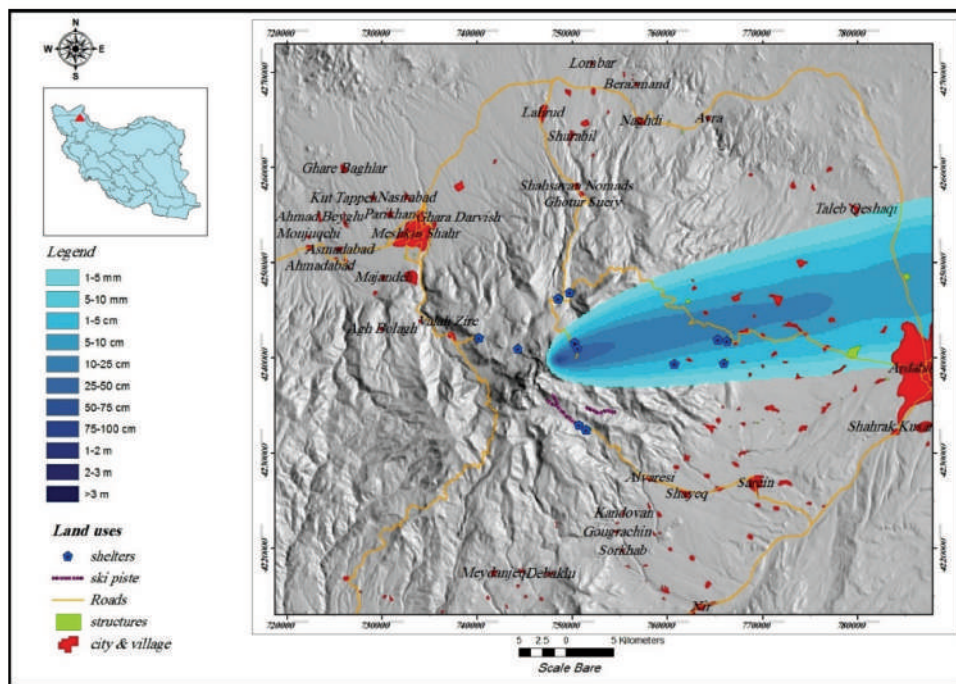
همان‌گونه که ذکر شد، سبلان در گذشته با ایجاد فعالیت‌های از نوع خروج گدازه، تولید ابر سوزان، فوران خاکستر و ایجاد لاهار همراه بوده است. توجه به استراتوولکان بودن آن و نیز، نوع تهدیدهایی که در گذشته داشته حاکمی از این است که خطرهای فوق (گدازه، لاهار، ابر سوزان و خاکستر) در فوران‌های بعدی آن باید جدی گرفته شوند.

عناصر تحت خطر

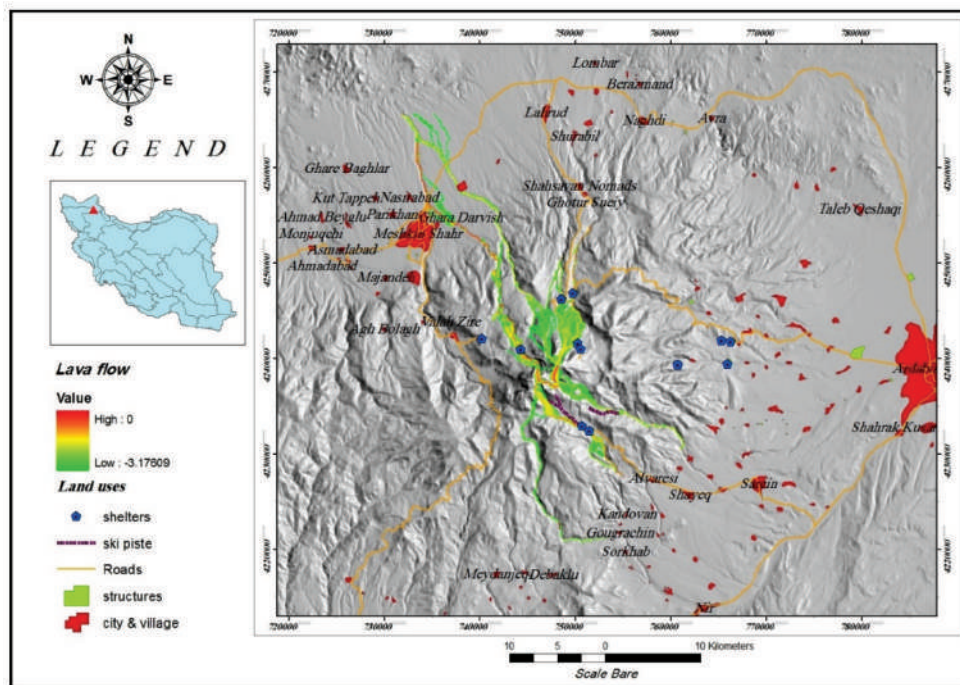
در محدوده مخروط این آتشفشان و اطراف آن کاربری‌های متعددی وجود دارند که می‌توانند از فعالیت این آتشفشان متأثر شوند. در سطح مخروط، جان‌پناه‌ها و اقامتگاه‌های کوهنوردی، تأسیسات استفاده از آبگرم، پیست اسکی،

محدوده‌های تحت خطر جریان گدازه

براساس فرضیات و روش ارائه شده در مبحث «مواد و روش‌ها»، نقشه پهنه‌بندی خطر گدازه ناشی از فوران احتمالی



شکل ۳. نقشه گسترش خاکسترهای آتشفشانی در اثر فوران احتمالی سبلان



شکل ۴. نقشه گسترش گدازه‌های خروجی از دهانه اصلی آتشفشان سبلان

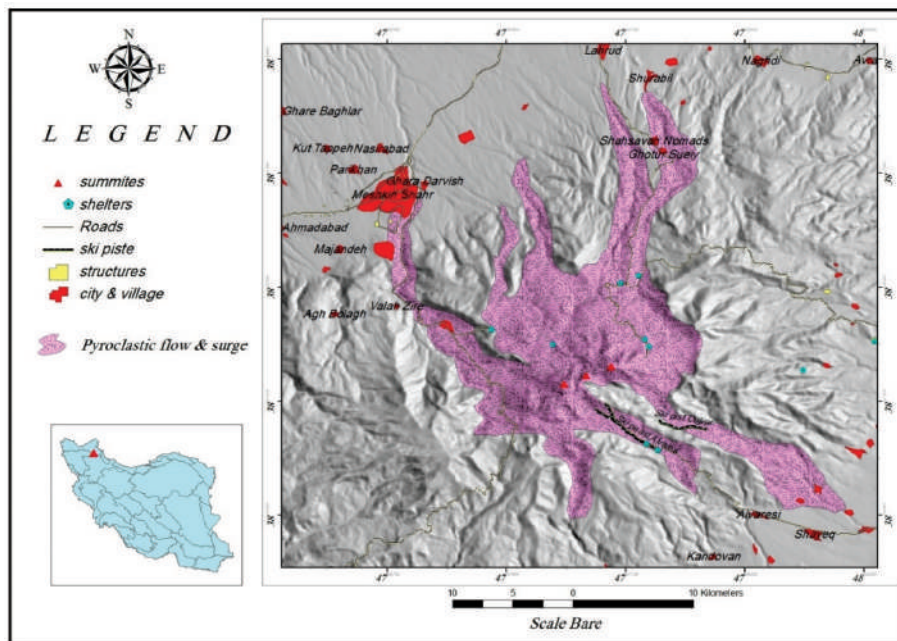
محدوده‌های تحت خطر پیروکلاستیک‌های جریان‌ی
نقشه گسترش ابر سوزان و سرج در شکل ۵ نشان داده
شده است. پیش‌تر (در مبحث مواد و روش‌ها) فرضیه‌های
مرتبط با تهیه این نقشه توضیح داده شدند. براساس این

نزدیک شود. براساس این نقشه، اکثر جان‌پناه‌ها، تأسیسات
استفاده از آب‌گرم و پیست اسکی آوارس در مسیر گدازه‌های
احتمالی قرار خواهند داشت، ولی احتمال رسیدن گدازه‌ها
به شهرها و روستاهای اطراف مخروط کم است.

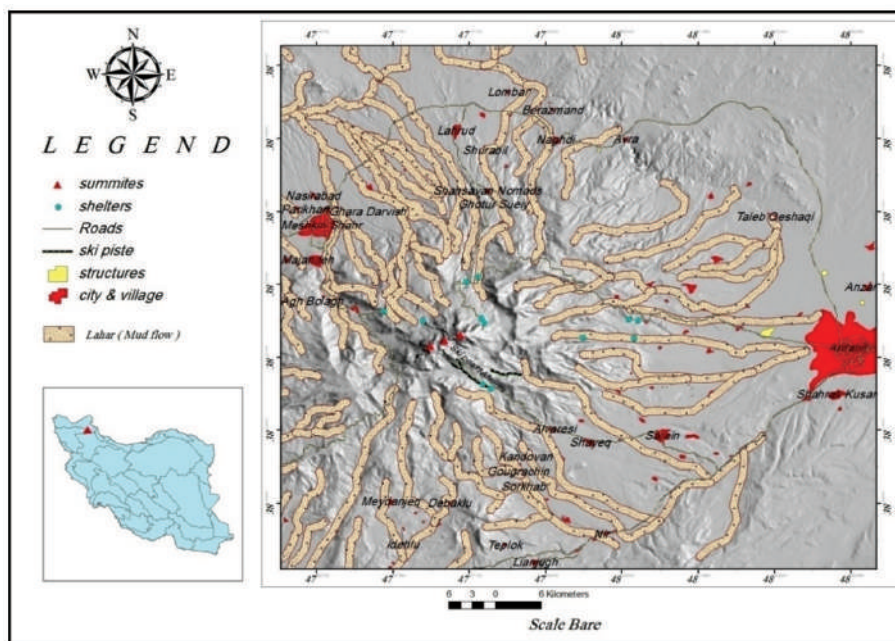
محدوده‌های تحت خطر لاهار

نقشه مسیره‌های احتمالی و گسترش لاهار در شکل ۶ نشان داده شده است. این نقشه مسیره‌های احتمالی لاهار را نشان می‌دهد، ولی مسافت طی شده توسط آن‌ها متأثر از حجم آب موجود در مخروط (ناشی از ذوب یخ و برف و بارش باران) است و در ایام مختلف سال می‌تواند تفاوت زیادی

نقشه، مشکین‌شهر، روستای موئیل، محل‌های استقرار عشایر شاهسون و قطورسوئی (در شمال مخروط) و هر دو پیست اسکی اوج و آوارس، روستای آوارس در جنوب، اکثر جان‌پناه‌ها و آب‌گرم قطورسوئی در معرض تهدید قرار دارند. به عقیده قلمقاش و همکاران (۱۳۹۸) آتشفشان سبلان استعداد فوران‌های دمای بالا، سریع و پر گسترش ابر سوزان را دارد.



شکل ۵. نقشه گسترش پیروکلاستیک‌های جریان (نوبی آردنت) در اثر فوران احتمالی سبلان



شکل ۶. نقشه مسیر لاهارهای ایجاد شده از فوران فرضی سبلان

در این مطالعه، نقشه‌های پهنه‌بندی براساس محتمل‌ترین وضعیت برای هر یک از خطرهای تهیه شده‌اند، ولی بهتر است در مطالعات بعدی نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از خطرهای برای وضعیت‌های احتمالی مختلف هم تهیه شوند. البته، از آنجا که راهی برای صحت‌سنجی این نوع نقشه‌ها وجود ندارد، شاید بهتر باشد انواعی از نقشه با روش‌ها و تکنیک‌های مختلف تهیه شوند. در این حالت، وضعیت‌های مورد تأیید نقشه‌های متعدد، قابل قبول‌تر و صحیح‌تر فرض می‌شوند.

منابع

- اسفندیاری درآباد، ف. و خیام، م.، ۱۳۸۶. تحلیلی بر اثرات ژئومورفیک بر فرفاب در دامنه شرقی سبلان، پژوهش‌های جغرافیایی، ۶، ۸۳-۹۷.
- امامی، م.، ۱۳۷۹. ماگماتیسیم در ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۸.
- باباخانی، ع.، ۱۳۸۷. کوه آتشفشان سبلان، گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور، مرکز تبریز، ۱۲۲.
- بیاتی خطیبی، م.، ۱۳۸۶. تحلیل و بررسی نقش عوامل توپوگرافی و دینامیک رودخانه‌ای بر اندازه مخروط واریزه‌ای؛ مطالعه موردی: دامنه شمال غربی سبلان (شمال غرب ایران)، پژوهش‌های جغرافیایی، ۶، ۱۵۷-۱۷۵.
- خیاط‌زاده، ا. و عباس‌نژاد، ا.، ۱۳۹۵. کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری EN-SAW و ANP در مطالعات زمین‌شناسی: ارزیابی و اولویت‌بندی خطر فعال شدن استراتوولکان‌های ایران به‌عنوان مطالعه موردی، فصلنامه علوم زمین، ۲۶(۱۰۲)، ۱۳۷-۱۴۶.
- خیاط‌زاده، ا.، عباس‌نژاد، ا. و رنجبر، ح.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی خطر تفرا، گدازه و ابرهای سوزان احتمالی آتشفشان تفتان، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۵(۱۸)، ۱۷-۳۰.
- خیاط‌زاده، ا.، عباس‌نژاد، ا.، رنجبر، ح.، احمدی پور، ح. و عباس‌نژاد، ب.، ۱۴۰۲. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر تفرا، گدازه و ابرهای سوزان ناشی از فوران احتمالی آتشفشان بزمان. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۳(۲)، ۴۵۵-۴۶۸.
- خیاط‌زاده، ا.، عباس‌نژاد، ا.، رنجبر، ح.، احمدی‌پور، ح. و عباس‌نژاد، ب.، ۱۴۰۲. پهنه‌بندی خطر

داشته باشد. بنابراین، ابعاد لاهارها تابع اوقات فوران در سال هم هست، به‌طوری‌که در زمستان به علت تراکم بیشتر برف لاهارهای بیشتری می‌توانند تولید شوند و تا مسافت طولانی‌تری پیش می‌روند.

در مجموع، لاهارها بعضی از سکونت‌گاه‌ها، اماکن تفریحی و زمین‌های کشاورزی اطراف مخروط را تهدید می‌کنند. همچون لاهارهای ناشی از فوران‌های قبلی که تا مشکین‌شهر و اردبیل پیش رفته‌اند، احتمال پیشروی آن‌ها تا این شهرها هم وجود دارد.

نتیجه‌گیری

براساس آنچه در مورد شرایط آتشفشان سبلان توضیح داده شد، احتمال فوران آن در آینده مطرح است. در این صورت، ممکن است فوران با شدت سه تا پنج در مقیاس VEI صورت گیرد. در اثر آن، تهدیدهای ناشی از خاکستر، گدازه، جریان‌های آذرآواری و لاهار امکان بروز دارند. این تهدیدها می‌توانند به کاربری‌های سطح مخروط و حاشیه آن آسیب برسانند (به‌ویژه لاهارها و پیروکلاستیک‌های جریان‌ی). خاکسترهای این آتشفشان تحت تأثیر جریان بادهای غالب مرتفع به سمت شرق منتشر شده و رسوب می‌کنند. آن‌ها می‌توانند مشکلاتی برای شهر اردبیل و روستاهای اطراف ایجاد کنند.

با توجه به نبود قطعیت کافی در مورد فوران این آتشفشان، مهم‌ترین راهکار مدیریتی در شرایط فعلی توجه به لرزه‌خیزی پهنه (به‌ویژه محدوده زیر مخروط آتشفشان) است. در صورتی که میزان لرزه‌خیزی نسبت به وضعیت زمینه‌ای افزایش معنی‌داری نشان دهد بهتر است با نصب سریع لرزه‌نگارها و استفاده از سایر پیش‌نشانگرهای آتشفشان، فعالیت آن تحت پایش قرار گیرد. در این صورت، توجه به زمین‌لرزه‌های با امواج هارمونیک و دوام زیاد که معرف حرکت ماگما می‌باشند اهمیت زیادی دارد. آهنگ کاهش عمق آن‌ها می‌تواند سرعت بالا آمدن ماگما و زمان احتمالی فوران را تا حدی مشخص سازد. در چنین شرایطی، باید براساس نقشه‌های پهنه‌بندی اقدام به تخلیه اهالی ساکن در اطراف آتشفشان و اخطار به افراد دورتر کرد.

- چشمه‌های آبگرم و معدنی ایران (ویژگی‌های شیمیائی، درمانی و گردشگری)، انتشارات سنجش و دانش، ۴۳۵.
- مبشر گرمی، م.، احمدزاده، غ. و آقازاده، ا.، ۱۳۹۷،
برآورد ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و محیط نکتونیک
تشکیل توده‌های بازیک جنوب شهرستان گرمی (استان
اردبیل) بر اساس شیمی بلورهای آمفیبول و پلاژیوکلاز،
فصلنامه زمین‌شناسی ایران، (۱۲) ۴۸، ۸۱-۹۸.
- یادگاری، ن.، علوی، غ. و مؤید، م.، ۱۴۰۲، بررسی
زمین‌ساخت، داده‌های گسلی و ارتباط آن‌ها با کانه‌زایی و
دگرسانی در گستره اسبخان هریس (استان آذربایجان شرقی-
شمال غرب ایران)، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، (۱۷) ۶۵،
۳۳-۴۷.
- Abdollahzadeh Bina, F., 2009. Geothermal
resource assessment of the NW-Sabalán Field,
Iran, Through well testing, Geothermal training
programe, United Nations University (UNU), 6,
15-44.
- Alatorre-Ibargüengoitia, M.A., Morales-
Iglesias, H., Ramos-Hernández, S.G., Jon-Sel-
vas, J. and Jiménez-Aguilar, J.M., 2016. Hazard
zoning for volcanic ballistic impacts at El Chichón
Volcano (Mexico). *Natural Hazards*, 81(3), 1733-
1744.
- Amini, B., 1994. Geological map of
Meshkinshahr, Geological Survey of Iran.
- Blong, R. J., 1984. Volcanic hazards: a
sourcebook on the effects of eruptions, Elsevier.
- Calder, E., Wagner, K. and Ogburn, S.,
2015. Volcanic hazard maps. *Global volcanic haz-
ards and risk*, 335-342.
- Capra, L., Norini, G., Gropelli, G.,
Macías, J.L. and Arce, J.L., 2008. Volcanic haz-
ard zonation of the Nevado de Toluca volcano,
México. *Journal of Volcanology and Geothermal
Research*, 176(4), 469-484.
- Charlton, D., 2018. New approaches to
volcanic hazard mapping at Campi Flegrei, South-
ern Italy (Doctoral dissertation, UCL (University
College London)).
- Chevrel, M.O., Favalli, M., Villeneuve,
تفرا، گدازه، ابر سوزان و لاهار ناشی از فوران احتمالی
آتشفشان دماوند. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۲(۴)،
۳۵۵-۳۶۶.
- دلال اوغلی، ع. و رجبی، م.، ۱۳۹۴، بررسی
اختلافات ساختاری و فرسایشی در مخروط‌های
استراتوولکانوسهند و سبلان، اولین همایش ملی علوم
زمین و توسعه شهری.
- دلال اوغلی، ع.، ۱۳۸۲. بررسی مورفولوژی و نحوه
فعالیت یخچال‌های سنگی دامنه شمالی کوه سبلان،
پژوهش‌های جغرافیائی، ۴۵، ۱-۱۲.
- رحیمی، ع.، ۱۳۷۵. زمین‌شناسی میدان زمین
گرمائی شمال غرب سبلان (جنوب مشکین‌شهر) و
ژئوشیمی دگرسانی و ته نشست‌های گرمایی منطقه،
پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، ۲۸۴.
- زمانی، ر.، امامی، م.، وثوقی عابدینی، م. و کریم
زاده ثمرین، ع.، ۱۳۹۴. مطالعه شیمی بلور و منطقه بندی
کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی آلکالن
شمال غرب مشکین‌شهر، ایران، فصلنامه زمین‌شناسی
ایران، (۳۳) ۹، ۳۱-۴۴.
- شاه بیک، ا.، ۱۳۷۲. آب‌های معدنی و گرم ایران،
سازمان زمین‌شناسی کشور، ۲۱۲.
- فتح الهی، م. و خیرخواه، م.، ۱۳۹۴. منشاء و
جایگاه نکتونو ماگمائی سنگ‌های آتشفشانی کواترنری
سبلان، فصلنامه کواترنری ایران، جلد ۱، ۲، ۱۲۵-۱۳۶.
- فتح الهی، م.، امامی، م. و خیرخواه، م.، ۱۳۹۲.
پتروگرافی و پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی ماگماتیسیم
نهایی سبلان، فصلنامه زمین‌شناسی محیط‌زیست (۷) ۲۳،
۵۱-۶۸.
- فتح الهی، م.، امامی، م. و خیرخواه، م.، ۱۳۸۹.
تاثیر فرایند اختلاط ماگمائی و آرایش پوسته‌ای در پیدایش
سنگ‌های آتشفشانی سبلان، بیست و نهمین گردهمایی
علوم زمین.
- قربانی، م.، ۱۳۸۲. آتشفشان شناسی با نگرشی بر
آتشفشان‌های ایران، نشر آراین زمین، ۳۶۲.
- قلمقاش، ج.، کتابی، ز.، اصفهانی، ا. و موسوی،
ز.، ۱۳۹۸. مقایسه زمین‌شناسی، پتروگرافی، زمین‌شیمی
و منشاء ایگنیمبریت در آتشفشان‌های سبلان و سهند،
زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، (۱۳۱) ۹، ۱۷-۲۴.
- کمالی نژاد، م. و عباس‌نژاد، ا.، ۱۳۹۸. مطالعه

- N., Harris, A.J., Fornaciai, A., Richter, N., Derrien, A., Boissier, P., Di Muro, A. and Peltier, A., 2021. Lava flow hazard map of Piton de la Fournaise volcano. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(8), 2355-2377.
- Connor, C. B., Hill, B. E., Winfred, B., Franklin, N. W. and La Femina, P. C., 2001. Estimation of volcanic hazards from tephra fallout, *Natural Hazards Review*, 2, 33-42.
 - Didon, J. and Gemain, Y. A., 1976. La Sabalan, volcan plio-Quaternaire de l, Azerbaijan oriental Iran, Etude Geologique et Scientifique et Medical de Grenoble, France.
 - Emami, M., 1994. Geological Map of Iran, Meshkinshahr quadrangle (1: 100000), Geological Survey of Iran.
 - Felpeto, A., 2009. VORIS, a GIS based tool for volcanic hazard assessment, User Guide, Observatorio Geofisico Central, IGN.
 - Felpeto, A., Marti, J. and Ortiz, R., 2007. Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment, *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 166, 106-116.
 - Fotouhi, M., 1995. Geothermal development in Sabalan, Iran, in: proceedings of world geothermal congress, Italy, 191-196.
 - Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathi-anpour, N., Lee, S. K. and Porkhial, S., 2013. 3D inversion of MT data from Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran, *Journal of Applied Geophysics*, 93, 12-24.
 - Ghalamghash, J., Mousavi, S. Z., Hassanzadeh, J. and Schmitt, A. K., 2016. Geology, zircon geology, and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 192-207.
 - Haynes, K., Barclay, J. and Pidgeon, N., 2008. The issue of trust and its influence on risk communication during a volcanic crisis. *Bulletin of Volcanology*, 70, 605-621.
 - Latter, J. H. (ED.), 2013. Volcanic hazards: assessment and monitoring, Springer Science and Business Media.
 - Loughlin, S. C., Sparks, R. S. J., Sparks, S., Brown, S. O K., Jenkins, S. F. and Vye-Brown, C., (Eds). 2015. Global volcanic Hazards and risk, Cambridge University Press.
 - Malin, M. C. and Sheridan, M. F., 1982. Computer-assisted mapping of pyroclastic surges, *Science*, 217 (4560), 637-640.
 - Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S. and Dean, K. et al., 2009. A multidisiplinary 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.
 - Mc Guire, W. J., 1998. volcanic hazards and their mitigation, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 15 (1), 79-95.
 - Michaud-Dubuy, A., Carazzo, G. and Kaminski, E., 2021. Volcanic hazard assessment for tephra fallout in Martinique. *Journal of Applied Volcanology*, 10(1), 1-20.
 - Mousavi, S. Z., Darvishzadeh, A., Ghalamghash, G. and Vosoughi Abedini, M., 2014. Volcanology and geochronology of Sabalan volcano, the hieghest stratovolcano in Azerbaijan region, NW Iran, *Nautilus*, 128, 85-98.
 - Nakasuji, A. and Satake, j., 2004. Volcanic Hazard Map An Introduction and Overseas Cases. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 44(6), 341-348.
 - Negro, C.D., Cappello, A., Neri, M., Bilotta, G., Hérault, A. and Ganci, G., 2013. Lava flow hazards at Mount Etna: constraints imposed by eruptive history and numerical simulations. *Scientific Reports*, 3(1), 1-8.
 - Neri, M., Le Cozannet, G., Thierry, P., Bignami, C. and Ruch, J., 2013. A method for multi-hazard mapping in poorly known volcanic

- areas: an example from Kanlaon (Philippines). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(8), 1929-1943.
- Salvatici, T., Di Roberto, A., Di Traglia, F., Bisson, M., Morelli, S., Fidolini, F., Bertagnini, A., Pompilio, M., Hungr, O. and Casagli, N., 2016. From hot rocks to glowing avalanches: Numerical modelling of gravity-induced pyroclastic density currents and hazard maps at the Stromboli volcano (Italy). *Geomorphology*, 273, 93-106.
 - Tarigan, A.P.M., Suwardhi, D., Fajri, M.N. and Fahmi, F., 2017. March. Mapping a volcano hazard area of Mount Sinabung using drone: preliminary results. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 180(1), 012277.
 - Thompson, M. A., Lindsay, J. M. and Leonard, G. S., 2018. More than meets the eye: volcanic hazard map design and visual communication. *Observing the volcano world: volcano crisis communication*, 621-640.
 - Tilling, R. J., 1984. *Volcanic hazards: a sourcebook on the effects of eruptions*, Elsevier.
 - Wagner, K., Ogburn, S.E. and Calder, E.S., 2015. *Volcanic Hazard Map Survey*.
 - Walker, G. P., 1982. Volcanic hazards, *Interdisciplinary Science Reviews*, 7 (2), 148-157.
 - Xu, J., Wa, Y., Wa X., Pan, B., Ya, H., Zh. B. and Ya W., 2022. Review on the development of volcanic hazard zonation in china. *Geology and Resources*, 1;31(3).