

پهنه‌بندی خطر تفرآ، گدازه و ابرهای سوزان ناشی از فوران احتمالی آتشفشان تفتان

احمد خیاط زاده^۱ - کارشناس ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - ایران

احمد عباس نژاد - دانشیار ژئومورفولوژی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - ایران

حجت‌الله رنجبر - استاد - گرایش دورسنجی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۱۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۳/۳۱

چکیده

آتشفشان تفتان با ارتفاع حدود ۴۰۰۰ متر در ۴۵ کیلومتری شمال شهر خاش در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. این استراتوولکان یکی از آتشفشان‌های متعدد تشکیل‌دهنده قوس آتشفشانی زون فرورانشی مکران است که در آن پوسته اقیانوسی دریای عمان به سمت شمال دچار فرورانش می‌شود. مطالعات قبلی انجام شده در مورد آن حاکی از خروج گدازه، فوران خاکستر و تولید جریان‌های پیروکلاستیکی (ابر سوزان) در گذشته بوده است. با توجه به مورفولوژی نه‌چندان فرسوده این آتشفشان، وجود چشمه‌های آبگرم و سولفاتار و نیز انجام فرآیند فرورانش در حال حاضر، احتمال فوران مجدد این آتشفشان وجود دارد که در این صورت ممکن است فوران از نوع استرومبولی، ولکانو تا ساب‌پلینی باشد. لذا به‌منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر تفرآ، گدازه و ابرهای سوزان این آتشفشان از مدل‌های ارتفاعی رقومی (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای ArcGIS، ENVI و VORIS استفاده گردید. همچنین برای تهیه نقشه خاکستر مدل فرارفت انتشار و برای تهیه نقشه خطر پیروکلاستیک‌های جریان‌ی مدل مالین و شریدان (۱۹۸۲) به کار گرفته شدند. اطلاعات جوی مورد نیاز از داده‌های پایگاه مرکز NCEP/NCAR اخذ گردیدند. در نهایت، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر تهیه گردیدند. بر اساس این مطالعه، خاکسترهای ناشی از فوران به سمت شرق آتشفشان حرکت کرده و تعدادی از روستاهای این محدوده را تهدید خواهند کرد ولی گدازه‌های خروجی به سمت شمال و جنوب جریان می‌یابند و به روستاهای تمین، سنگان، گوشه و تمندان می‌توانند برسند. در صورت فوران از نوع ابر سوزان، آن‌ها در بعضی سطوح حاشیه‌ای شمال، شرق و جنوب آتشفشان پخش خواهند شد و روستاهای این محدوده‌ها را تهدید خواهند کرد. در مجموع نقشه‌های تهیه‌شده محدوده‌های تحت خطرهای آتشفشانی را مشخص می‌سازند و برای اقدامات مدیریتی نظیر تغییر کاربری زمین، پیش‌بینی و هشدار، آمادگی برای مقابله و امداد و نجات می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی خطر، تفرآ، ابر سوزان، گدازه، آتشفشان تفتان.

۱. مقدمه

پدیده‌های آتشفشانی، تبادل ماده و انرژی را در هر سه حوزه کلی سیاره زمین به نمایش می‌گذارند. این سه حوزه شامل خشکی، اقیانوس و جو می‌باشند (کری، ۲۰۰۵: ۳). بی‌شک هیچ‌یک از مظاهر طبیعت، شگفت‌آور و هیجان‌انگیزتر از یک فوران آتشفشان نخواهند بود. پدیده‌ای که ترس و تحسین انسان را برانگیخته و حس جستجو و کنکاش را به شدت در انسان تحریک می‌کند (هال^۱، ۱۸۹۲: ۲۵). امروزه حدود ۱۵۰۰ آتشفشان فعال در سراسر دنیا وجود دارد که سالانه به‌طور میانگین ۵۰ فوران ثبت می‌گردد. از این تعداد بیش از ۴۰۰ آتشفشان طی قرن اخیر فوران کرده‌اند (کلر و دیویچیو^۲، ۲۰۱۲: ۳۶) که تنها یک سوم از آن‌ها دارای فوران‌های تاریخی ثبت شده بوده‌اند (تیلینگ^۳، ۲۰۰۵: ۱۸) بنابراین بررسی احتمال وقوع و میزان تهدید انسان در برابر پدیده آتشفشان بسیار حائز اهمیت است. طبق آخرین آمار، ۱۰ درصد از جمعیت جهان در مجاورت آتشفشان‌های فعال و نیمه‌فعال سکونت دارند که با توجه به نرخ رشد جمعیت در قرن بیستم، خطر آتشفشان، جمعیتی بالغ بر ۵۰۰ میلیون نفر را تهدید می‌کند (همان: ۱۱۵). با توجه به وجود استراتوولکان‌های پلیوکواترنر در ایران و احتمال فعالیت مجدد آن‌ها، شناسایی نوع تهدیدهای احتمالی، مشخص کردن میزان فعالیت هر آتشفشان و مکان‌های مورد تهدید (پهنه‌بندی خطر آتشفشان) بسیار ضروری می‌باشد که پهنه‌بندی خطرات اولیه آتشفشانی برای یکی از آتشفشان‌های نیمه‌فعال ایران هدف این پژوهش قرار گرفته است. پیشینه مطالعاتی این پژوهش در ایران بسیار اندک است و تنها می‌توان به پیش‌بینی قدرت انفجار و نقشه پهنه‌بندی خطر تفرا در فوران احتمالی آتشفشان دماوند که توسط مرتضوی و همکاران (۲۰۰۹) و مرتضوی و اسپارکس (۲۰۱۰) انجام شده است اشاره کرد.

تاکنون مطالعات متعددی روی آتشفشان تفتان صورت گرفته که معمولاً هدف آن‌ها شناخت بهتر این آتشفشان بوده و بنابراین به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر پرداخته‌اند. مهم‌ترین این مطالعات توسط گانسر (۱۹۵۳، ۱۹۶۲ و ۱۹۶۶)، زرعیان و همکاران (۱۳۴۹)، اشتوکلین (۱۹۶۸)، گانسر (۱۹۷۱)، ژيرو و کنراد (۱۹۷۶)، معین وزیری و امین سبحانی (۱۳۵۷)، درویش زاده (۱۳۶۰)، غضبان (۲۰۰۴)، گانسر (۲۰۰۸)، بیابانگرد (۱۳۸۵)، بیابانگرد و مرادیان (۲۰۰۸) و بیابانگرد و مرادیان (۱۳۸۸) صورت گرفته‌اند.

با توجه به شواهد صحرائی و محاسبه ضریب همبستگی فازهای مختلف آتشفشانی توسط بیابانگرد (۱۳۸۷)، تفتان دارای فوران‌های متفاوت استرومبولی تا ولکانو و در برخی موارد پلینی بوده است. در مجموع، اگرچه بشر در طی زمان تاریخی ناظر بر فوران آن نبوده، ولی با توجه به فعالیت شدید فومرولی‌ها، سولفاتارها و چشمه‌های آبگرم و سن آخرین فوران و عدم فرسایش شدید این آتشفشان، و نیز، با توجه به اینکه هم اکنون نیز فرآیند فرورانش صفحه

1 Hall

2 Keller & DeVecchio

3 Tilling

اقیانوسی عمان که عامل ایجاد این آتشفشان است ادامه دارد، می‌توان نتیجه گرفت که احتمال فوران مجدد آن وجود دارد و بدین لحاظ لازم است نوع تهدیدهای ناشی از آن و مناطق تحت تهدید مورد شناسایی و ارزیابی واقع شوند. برآورد می‌شود که در صورت فعالیت جدید آن، فوران در حد ولکانو تا ساب پلینی با شدت ۳ تا ۵ در مقیاس VEI صورت گیرد. با در نظر گرفتن نوع فوران‌های قبلی و مشخصات پترولوژیکی این آتشفشان، احتمال فعالیت از نوع جریان گدازه، پیروکلاستیک‌های جریانی (نوئی‌آردنت) و خاکستر (تفرا) در این آتشفشان وجود دارد که لازم است پهنه‌بندی برای آن‌ها صورت گیرد. در ضمن لازم به ذکر است که با توجه به کم باران بودن منطقه و ریزش کم برف در سطح مخروط و فقدان دریاچه کراتری، احتمال ایجاد لاهار در ابعاد آسیب رساننده کم است.

۲. منطقه مورد مطالعه

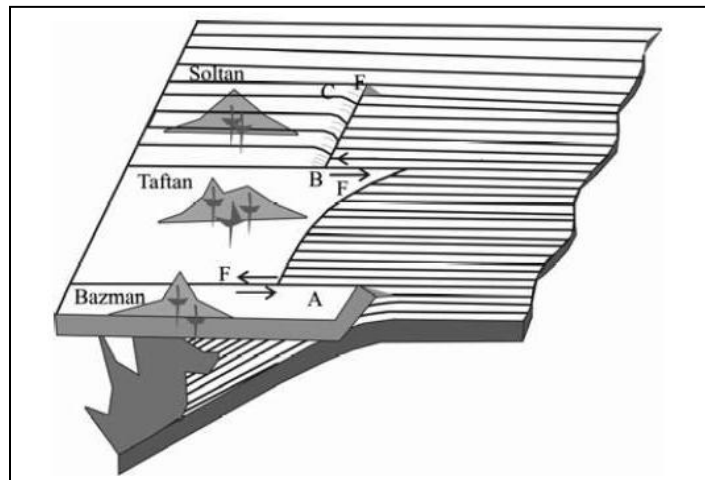
آتشفشان تفتان (شکل ۱) با ارتفاع حدود ۴۰۰۰ متر از سطح دریا در طول جغرافیایی، ۸، ۶۱° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶، ۲۸° شمالی (مربوط به قله آن) در فاصله حدود ۴۵ کیلومتری شمال شهر خاش در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است (بهرامی و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۲).

این استراتوولکان یکی از آتشفشان‌های متعدد کمربندی است که به عنوان قوس آتشفشانی ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی عمان (شکل ۲)، که خود از بقایای تئیس می‌باشد، معرفی شده است (فرهودی و کرینگ، ۱۹۷۷). تفتان در داخل زون فلیشی خاور ایران شکل گرفته است. در شکل شماره (۳) تصویر سه بعدی آن با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ۳۰ متر منطقه و تلفیق آن با تصویر بانده ۷-۴-۱ لندست (جهت بارزسازی بهتر تصویر) ارائه شده است.

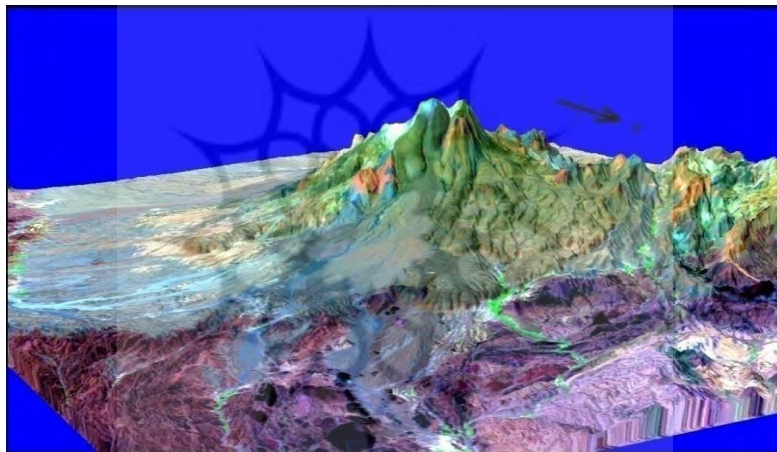


شکل ۱ نمایی از دو مخروط نرکوه و مادر کوه آتشفشان تفتان

(محل خروج گاز بر روی مادر کوه حتی از فاصله‌های دور نیز قابل رؤیت است)



شکل ۲ تصویر شماتیک زون فرورانشی پوسته عمان به زیر پوسته قاره‌ای ایران (Biabangard & Moradian, 2008)



شکل ۳ تصویر توپوگرافیک آتشفشان تفتان (DEM = 30 m + ETM⁺ = 7-4-1 Bands)

مخروط آتشفشانی تفتان به‌طور عمده از پیروکلاستیک‌ها و جریان‌های گدازه تشکیل شده است (بیابانگرد و مرادیان، ۲۰۰۸). فعالیت آن در خارج از آب و در محدوده زمانی پلیوسن تا پلیستوسن ادامه داشته است. فعالیت‌های اولیه بیشتر از نوع فعالیت انفجاری و فعالیت‌های پایانی بیشتر از نوع خروج گدازه بوده‌اند. بر اساس شواهد موجود، موقعیت دقیق دهانه یا دهانه‌های خروجی طی فعالیت این آتشفشان ثابت نبوده است. به‌طوری که اولین فعالیت در ۲۰ کیلومتری شمال غربی قله فعلی قرار داشته و در طی زمان، مراکز فعالیت به سمت شرق تغییر مکان داده‌اند. یکی از این مراکز در لیجوار و دیگری در نزدیکی قله فعلی قرار دارند. در ارتفاع ۳۹۴۰ متری جنوب شرق قله تفتان، گدازه‌های تازه به چشم می‌خورند و فعالیت نسبتاً شدید فومرولی حاوی گازهای گوگردی در نزدیکی قله آن صورت می‌گیرد (بیابانگرد، ۱۳۸۵: ۹۴-۱۰۰).

برش‌های داسیتی و آگلومرا مهم‌ترین محصولات فعالیت انفجاری تفتان بوده‌اند. آخرین فعالیت‌های نوع انفجاری آن در نزدیکی قله و در محل فعلی قله قرار گرفته‌اند. در اثر آن‌ها ابرهای سوزان به سمت دامنه جنوبی کوه جریان یافته‌اند

(ایگنبریت های شمال ترشاب) و خاکسترها بخش های مهمی از دشت های اطراف را پوشانده اند. فعالیت های گدازه ای این آتشفشان در کواترنر از نوع آندزیتی بوده اند. این گدازه ها دهانه حاصل از آخرین انفجار را پر کرده اند. معین وزیری و امین سبحانی (۱۳۵۷) ساختار تفتان از عمق به سطح را مشتمل بر ۱) پیروکلاستیک ها و گدازه های داسیتی، ۲) توف و ایگنبریت و ۳) گدازه های آندزیتی همراه با بمب های قشرانی ذکر کرده اند. بر اساس مطالعات بیابانگرد و مرادیان (۱۳۸۸) ایگنبریت ها در تفتان از گسترش قابل ملاحظه ای برخوردارند. برش ها، لاهارها و آگلومراها نیز در مخروط این آتشفشان به چشم می خورند. توف ها نیز به ویژه در حوالی تمندان و سنگان شناسایی شده اند (بیابانگرد، ۱۳۸۵: ۶۸).

تفتان در حال حاضر دارای فعالیت سولفاتاری و فومرولی است که خود را با خروج بخار آب، گوگرد و اسید سولفوریک در محدوده قله آتشفشان نشان می دهند. بخار گوگرد به محض خروج از مجاری سوبلیمه شده و به صورت بلورهای زرد رنگ نهشته می شود. همچنین علاوه بر گوگرد، در اطراف دهانه پودر سفید رنگی سطح زمین را پوشانده است که به آن بیناشتو^۱ گفته شده است. بیناشتو از سولفات های آلومینیوم و کلسیم همراه با اوپال و کربنات کلسیم تشکیل شده است (معین وزیری و امین سبحانی، ۱۳۵۷: ۱۱).

مطالعات پتروژنزی سنگ های تفتان توسط معین وزیری و امین سبحانی (۱۳۵۷) مؤید نظر گانسر است که بر اساس آن ماگمای اصلی دیوریت کوارتزار بوده است. این ماگما از ذوب بخشی پوسته حاصل شده و در اثر تبلور بخشی کانی ها و تفکیک ثقلی آن ها در حجره های ماگمایی نزدیک به سطح به دو بخش اسیدی تر (داسیت) و خنثی (آندزیت) تفریق پیدا کرده اند.

در محدوده تفتان چشمه های آبگرم متعددی نیز وجود دارند که توسط شاه بیگ (۱۳۶۹) و بیابانگرد و همکاران (۱۳۸۸) شناسایی و مطالعه شده اند. مهم ترین این چشمه های آبگرم عبارتند از: بندگلو، تنگ بلبلوئیه، جانپناه، دره گل، باغ بلوچ، سهیکی، خاورولان، آبریز، درودی، بیدستر و نمارپوسه.

سن سنجی های انجام شده توسط بیابانگرد (۱۳۸۵) با روش های پتاسیم- آرگون و روبیدیوم- استرانسیوم حاکی از این است که سن جدیدترین روانه های آن در حدود ۰/۰۲ ع ۶/۹۵ هزار سال است. بر این اساس، آخرین فعالیت این آتشفشان مربوط به کواترنر می باشد. این سن سنجی ها نشان داده اند که فاصله زمانی فوران ها از قدیم به جدید افزایش یافته است.

۳. مواد و روش ها

در این مطالعه اطلاعات زمین شناختی از آتشفشان تفتان به طور عمده از منابعی که قبلاً این آتشفشان را مطالعه کرده اند، به ویژه بیابانگرد (۱۳۸۵) و معین وزیری و امین سبحانی (۱۳۵۷) کسب گردید. از تصاویر DEM ۳۰ متر به

عنوان اطلاعات ارتفاعی رقومی استفاده شد و با کنار هم قرار دادن تصاویر رقومی موزاییک تصویری محل به دست آمد.

به منظور ارزیابی خطرهای آتشفشانی مدل ارتفاعی رقومی (DEM) مورد استفاده قرار گرفت و تصاویر سه بعدی آن توسط نرم افزار ENVI تهیه گردیدند. این نرم افزار امکان چرخش سه بعدی و همچنین بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی تصویر را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. از این تصاویر سه بعدی برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر استفاده شد. یکی از اقدامات دیگر ساخت تصویر توپوگرافیک سایه دار (Hill Shade) از نقشه DEM بود که در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی و ارائه دید بهتری از توپوگرافی آتشفشان مفید واقع شد. بدین منظور نیز از نرم افزار ENVI استفاده گردید و با انتخاب زاویه و جهت تابش آفتاب، مناسب‌ترین تصویر سایه دار توپوگرافیک انتخاب و پس از استفاده از فیلتر Sharpen جهت شفافیت بهتر در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر مستقیماً به محیط Arc Map وارد گردید.

در این پژوهش از تصاویر لندست (ETM⁺) برای استخراج اطلاعات لازم جهت تهیه لایه‌های مورد نیاز در تعیین عناصر تحت خطر استفاده گردید. این لایه‌ها شامل موقعیت مناطق مسکونی، جاده‌ها و غیره بوده‌اند.

مدل‌های عددی مورد استفاده جهت ارزیابی خطر خاکسترهای آتشفشانی به دو گروه عمده ردیابی کننده ذره و فرارفت- انتشار تقسیم‌بندی می‌شوند. این مدل‌ها از پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع ستون فوران (H)، مقدار مواد فورانی (M)، مدت زمان فوران (D)، اندازه ذرات، سرعت و جهت وزش باد در سطوح مختلف جو، دمای هوا و دیگر پارامترهای متناسب با هدف مدل‌سازی استفاده می‌کنند (ماستین و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۵). مدل‌های ردیابی کننده ذرات از نوع مدل‌های لاگرنژی می‌باشند که می‌توانند بر اساس متغیرهای باد و عدد رینولدز ذرات انتشاری، موقعیت ابر خاکستر را در هر زمان در هوا پیش‌بینی کنند و به همین دلیل معمولاً برای اهداف مدیریت حمل و نقل هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی مدل‌های فرارفت- انتشار^۳ معادلات انتشار، حمل و نشست خاکستر در سطح زمین را نسبت به منبع ذره به کار می‌گیرند. لذا اغلب برای مقاصد حفاظتی نظیر هشدار و برنامه‌ریزی اقدامات کاهش خطر به کار می‌روند (کونور و همکاران، ۲۰۰۱). در این مطالعه از نرم افزار VORIS استفاده شد که بر مبنای مدل اخیر طراحی شده است. در آن با وارد کردن مقادیر مناسب و اجرای نرم‌افزار، خروجی سیستم به صورت نقشه نشان دهنده محدوده هم‌ضخامت خاکستر نمایش داده می‌شود (فلپتو و همکاران، ۲۰۰۷).

عوامل مؤثر بر حرکت تفر، سقوط ذرات توسط حرکات افقی باد، جریان‌های آشفته و سرعت نهشت عمودی می‌باشند که بر اساس عدد رینولدز ذرات تغییر می‌کنند. جو زمین به لایه‌های افقی تقسیم می‌شود که هر کدام

1 Mastin et al

2 Particle Tracking Models

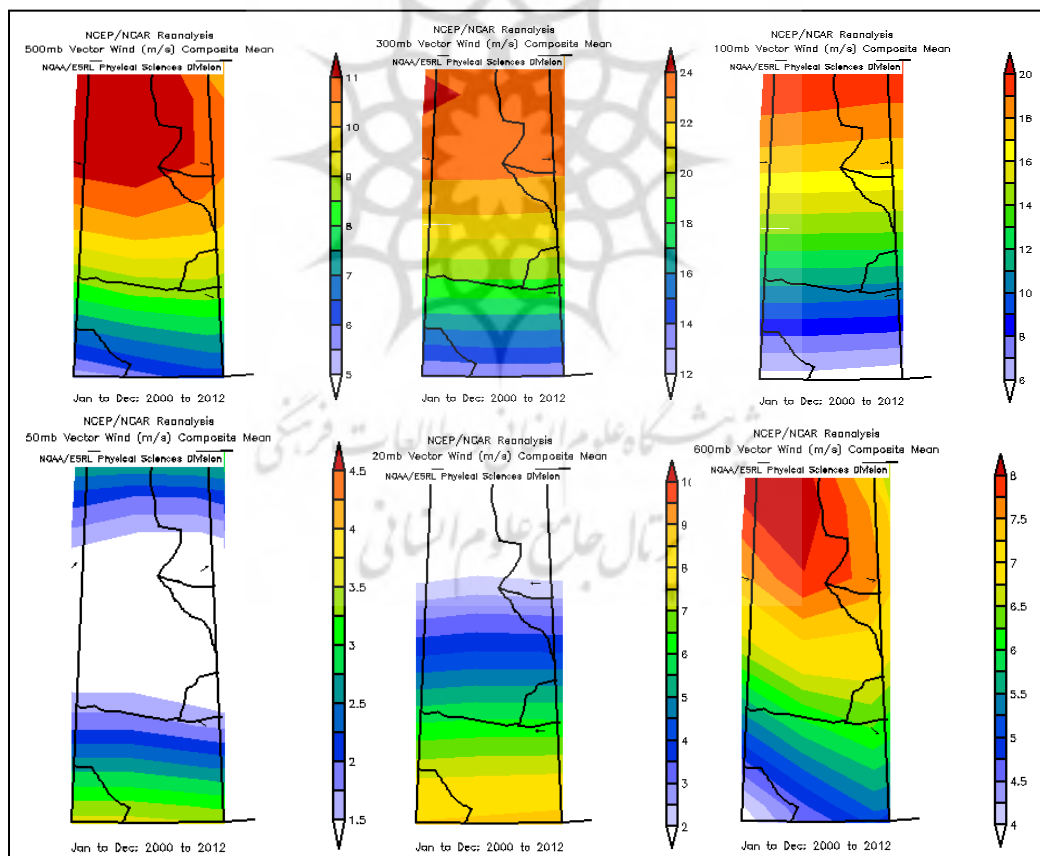
3 Advection- Diffusion Models

4 Connor et al

5 Felpeto

دارای سرعت و جهت باد مختص به خود می‌باشند. ذرات منتقل شده توسط باد خصوصیات هر یک از این لایه‌ها را به خود گرفته و هنگامی که به لایه‌های پایین‌تر سقوط می‌کنند تحت تأثیر خصوصیات لایه جدید قرار می‌گیرند. این فرآیند ادامه می‌یابد تا ذرات به سطح زمین برسند (مرتضوی و همکاران، ۲۰۰۹).

ایستگاه‌های هواشناسی و سینوپتیک منبع اصلی دریافت اطلاعات جوی می‌باشند که به علت کمبود ایستگاه‌های ارائه دهنده اطلاعات سطوح مختلف جو در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات مورد نیاز از پایگاه مرکز NCEP/NCAR که سرتاسر جهان را پوشش می‌دهد استفاده گردید. این پایگاه آمار خود را از سال ۱۹۴۸ تاکنون به‌طور مداوم ارائه می‌دهد. تفکیک فضایی این داده‌ها در صفحه افقی $2/5 \times 2/5$ طول و عرض جغرافیایی و در راستای قائم شامل ۱۷ سطح هم فشار (۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰، ۶۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰، ۷۵، ۴۰، ۵۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ هکتوپاسکال) می‌باشد که تا ارتفاع حدود ۳۰ کیلومتر را پوشش می‌دهند. با توجه به ارتفاع آتشفشان تفتان و ارتفاع ستون فوران احتمالی (حداکثر ۲۵ کیلومتر) سطوح هم فشار مناسب برای انتخاب متغیرهای بادی مناسب انتخاب گردیدند (شکل ۴).



شکل ۴ نمونه‌ای از نمودارهای تهیه شده برای سرعت و جهت وزش باد با استفاده از نرم‌افزار Grads در سامانه جهانی

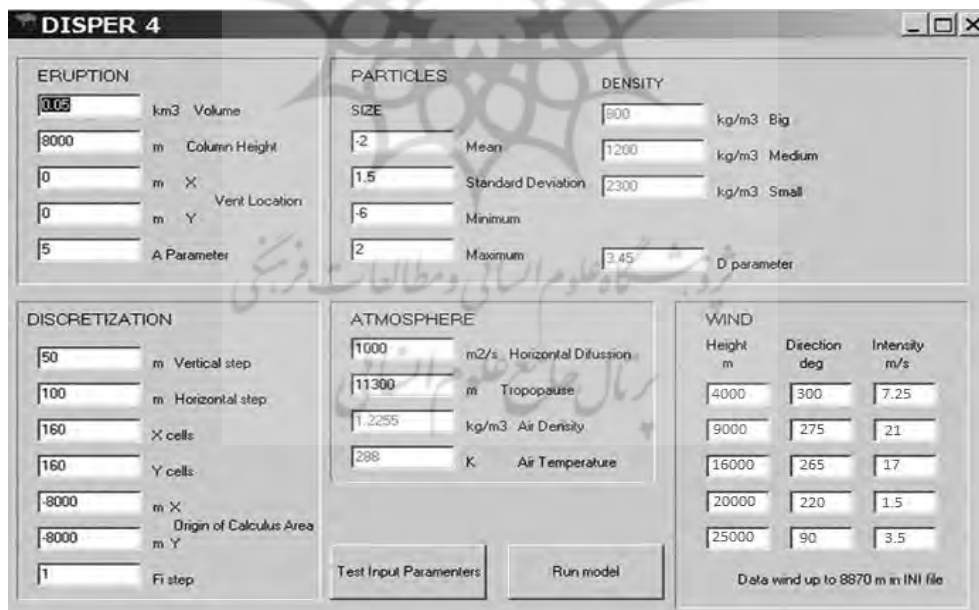
Reanalyzes Project برای منطقه تفتان

در اینجا ارتفاع پروازهای معمول (۳۰۰۰۰ پا)، ارتفاع تروپوپوز و ارتفاع ستون فوران ۶، ۹، ۱۶، ۲۰ و ۲۵ کیلومتر انتخاب گردیدند (جدول ۱).

جدول ۱ میانگین سرعت و جهت وزش باد در سطوح مختلف جو در منطقه تفتان در سالهای ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ (برگرفته از داده‌های مرکز NCER/NCAR)

ارتفاع (Km)	فشار (mb)	جهت وزش باد (deg)	سرعت وزش باد (m/s)	
۴۰۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۷/۲۵	۱
۹۰۰۰	۳۰۰	۲۷۵	۲۱	۲
۱۶۰۰۰	۱۰۰	۲۶۵	۱۷	۳
۲۰۰۰۰	۵۰	۲۲۰	۱/۵	۴
۲۵۰۰۰	۲۰	۹۰	۳/۵	۵

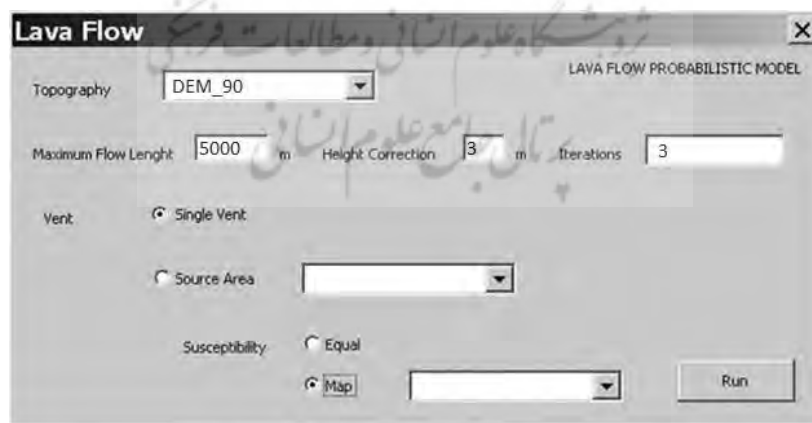
در ضمن، با توجه به اندازه احتمالی فوران تفتان، حجم ۰/۵ کیلومتر مکعب از مواد فورانی در نظر گرفته شد. میانگین اندازه ذرات خاکستر مشابه با موارد به کار برده شده توسط مرتضوی و همکاران (۲۰۰۹) برای دماوند ($Md= ۴/۵$ و $Md= ۳/۰$ میکرون) در نظر گرفته شدند که معمولاً در آتشفشان‌های مشابه تفتان به کار می‌روند (شکل ۵).



شکل ۵ ورود اطلاعات باد برگرفته از مرکز NCER/NCAR برای ۵ سطح ارتفاعی در مدل انتشار

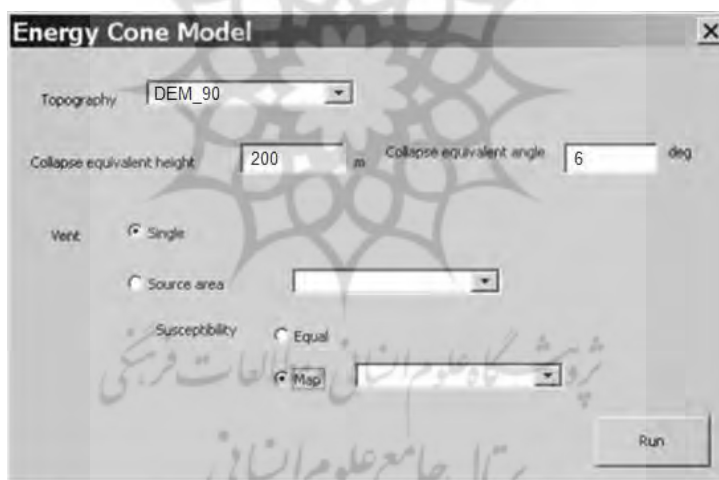
خاکستر آتشفشانی نرم‌افزار VORIS

مدل شبیه ساز جریان گدازه، مدلی است احتمالاتی که اساس آن این فرض است که توپوگرافی نقش اصلی را در تعیین مسیر گدازه بازی می‌کند. این مدل در محاسبات خود برای تعیین مسیر جریان گدازه دو منطق را به کار می‌گیرد. منطق اول این است که گدازه در صورتی می‌تواند از یک سلول (پیکسل) به یکی از پیکسل‌های مجاور خود وارد شود که تفاضل دو مقدار پیکسل مثبت باشد و دوم آنکه مقدار گدازه‌ای که از هر سلول به سلول مجاور وارد می‌شود بستگی به مقدار عددی تفاضلات مثبت خواهد داشت. بنابراین، با انتخاب یک نقطه انتخابی که به عنوان مبدأ احتمالی حرکت گدازه در نظر گرفته می‌شود، مسیرهای حرکت با استفاده از میانگین‌های الگوریتم مونت کارلو مشخص می‌گردند. در اینجا توپوگرافی مورد بحث متشکل از مقادیر پیکسلی مدل ارتفاعی رقومی (DEM) می‌باشد که با مقادیر متناظر آن‌ها بر روی زمین مطابقت دارد. حداکثر طول جریان گدازه در هر مسیر توسط یک پارامتر ثابت برای همه محاسبات کنترل می‌شود (فلیپتو و همکاران^۱، ۲۰۰۷: ۱۱۰). خاطر نشان می‌سازد که با وارد کردن مقادیر انتخابی برای هر پارامتر (شکل ۶) پارامترهای کلی مانند حداکثر طول جریان، تصحیح ارتفاع و تعداد از سرگیری محاسبات برای هر دهانه فورانی باید به صورت عدد توسط کاربر وارد شوند. همچنین برای کاربر این امکان وجود دارد که بر اساس نوع آتشفشان و ارزیابی‌های خود، بین فوران از یک نقطه و فوران از یک محدوده، یکی را انتخاب کند. در حالت اول، مختصات نقطه شروع فوران (پیکسل انتخابی) به صورت دستی و با کلیک بر روی پیکسل مورد نظر در DEM آن محل وارد می‌شوند. خروجی محاسبات، پیش بینی جریان گدازه به صورت یک داده رستری است که قابل استفاده در تهیه و ترسیم نقشه پهنه‌بندی خطر گدازه خواهد بود. لازم به ذکر است که در ترسیم نقشه پهنه‌بندی با استفاده از مدل فوق، حداکثر مسافت طی شده در هر مسیر احتمالی ۵ کیلومتر در نظر گرفته شد. رسیدن جریان گدازه به محل‌های دورتر بسیار بعید است، در عین حال که به علت سرعت کند جریان گدازه، برای مناطق دورتر (در صورت وجود این خطر) زمان کافی جهت انجام اقدامات ضروری وجود خواهد داشت.



شکل ۶ نمایش پنجره پارامترهای ورودی مدل جریان گدازه برای وضعیتی که فوران از یک دهانه انتخاب شده

در این مطالعه، برای تعیین حداکثر پتانسیل گسترش پیروکلاستیک های جریانی از مدل ارائه شده توسط مالین و شریدان (۱۹۸۲) استفاده گردید. اساس آن در نظر گرفتن ارتفاع نقطه شروع جریان (H_c) و نسبت آن با طول مسافت جریان (L) می باشد که یک پارامتر اصطکاکی است که در آن به زاویه میل جریان (α) نیز نیاز است که از طریق نسبت $\text{Arctan} \frac{H_c}{L}$ تعیین می گردد. محل تلاقی جریان با سطح زمین محدوده حرکتی جریان را به دست می دهد (فلپتو، ۲۰۰۹: ۳۱). در اینجا از توضیح بیشتر این مدل خودداری می شود و علاقمندان جهت کسب اطلاعات بیشتر می توانند به فلپتو (۲۰۰۹) مراجعه نمایند. در هر حال، جهت اجرای مدل برای آتشفشان تفتان مدل ارتفاعی رقومی (DEM) مورد استفاده قرار گرفت و با توجه به موقعیت دهانه آتشفشان، مختصات نقطه شروع این نوع جریان ها نیز مشخص گردید. در مرحله بعد، مقادیر پارامترهای مورد نیاز در پنجره شبیه سازی این مدل (شکل ۷) به صورت دستی وارد شدند. پس از اجرای فرمان RUN و پایان محاسبات، لایه جدیدی به دست آمد که با استفاده از نرم افزار Arc GIS به نقشه پهنه بندی خطر پیروکلاستیک های جریانی (ابره های سوزان) تبدیل شد. در این مطالعه ارتفاع سقوط ابر جریانی (ابر سوزان) ۲۰۰ متر و زاویه معادل سقوط که زاویه تشکیل شده بین ارتفاع سقوط و شیب توپوگرافی است ۶ درجه در نظر گرفته شدند.



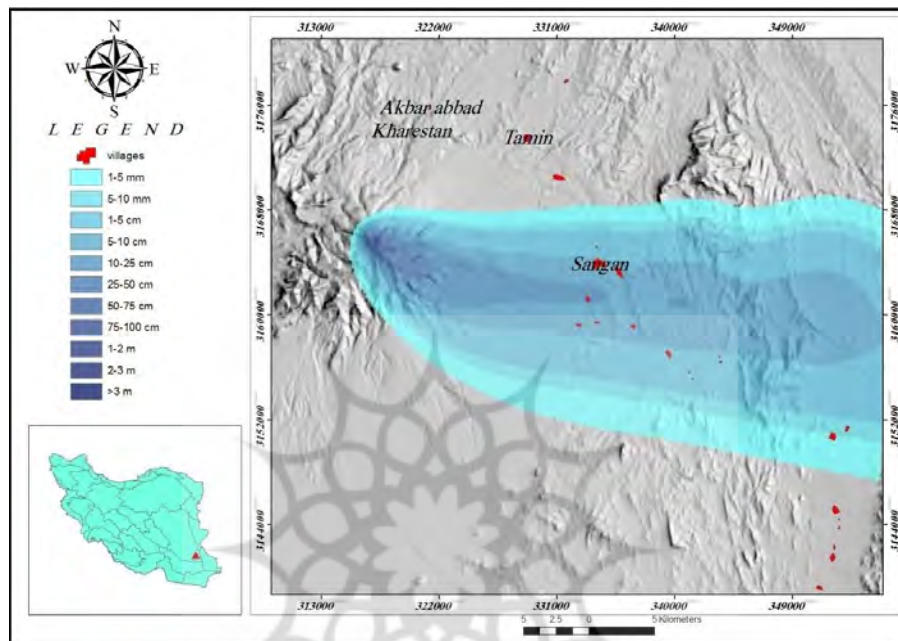
شکل ۷ پنجره پارامترهای ورودی مدل جریان های پیروکلاستیک برای وضعیتی که فوران از یک دهانه انتخاب شده

پهنه بندی خطر

الف) خطر تفرا (خاکستر آتشفشانی)

همانگونه که ذکر شد خطر تولید و پخش خاکستر در اثر فوران احتمالی تفتان وجود دارد. پخش خاکستر در منطقه به طور عمده متأثر از شرایط جوی منطقه است. بدین لحاظ سرعت و جهت وزش باد برای ۵ سطح ژئوپتانسیل جوی مختلف از پایگاه مرکز NCER/NCAR اخذ گردید (جدول ۱) و با استفاده از نرم افزار

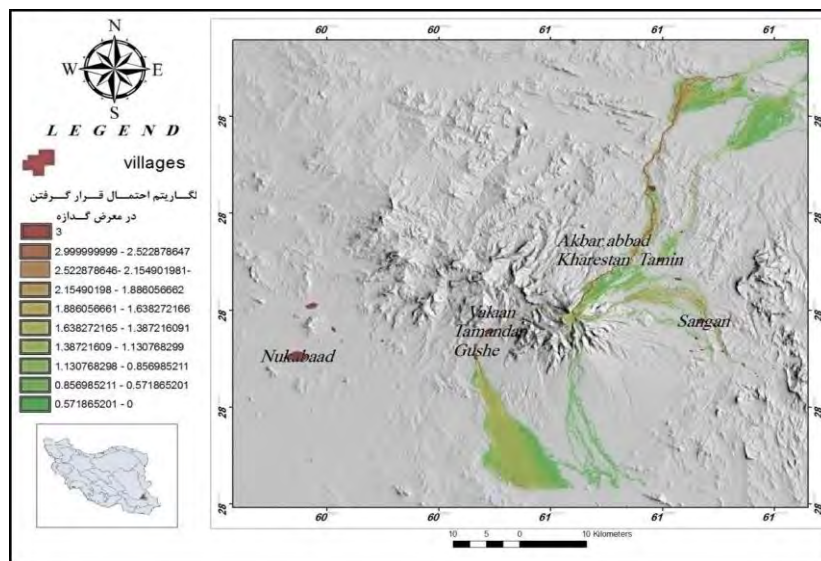
VORIS محدوده پخش خاکستر آن در منطقه به دست آمد (شکل ۸). بر اساس این شکل، به علت تسلط بادهای غربی در منطقه، خاکستر در جهت غرب به شرق حرکت کرده و پلوم آن در شرق آتشفشان شکل می‌گیرد. خوشبختانه در محدوده نشست زیاد خاکستر هیچگونه شهر یا روستایی وجود ندارد ولی روستای سنگان و دیگر روستاهای شرق دامنه در محدوده ضخامت‌های نهشت کمتر از ۱۰ سانتی‌متر قرار می‌گیرند.



شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی خطر خاکستر در فوران احتمالی آتشفشان تفتان و روستاهای تحت خطر این پدیده

ب) خطر جریان گدازه

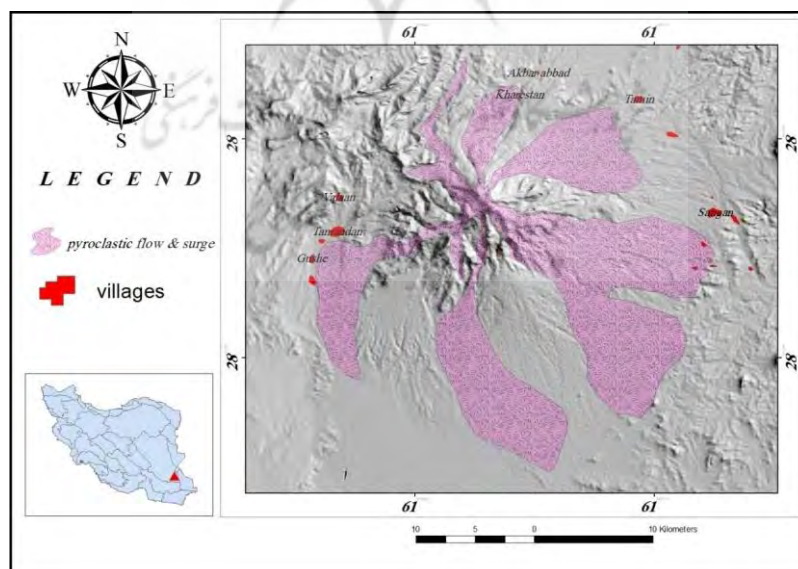
از آنجا که احتمال خروج گدازه در اثر فوران احتمالی تفتان وجود دارد، لازم است مناطق مستعد برای پخش گدازه در اطراف این آتشفشان مشخص شوند. روش تهیه این نوع نقشه قبلاً توضیح داده شد. در اینجا خاطر نشان می‌سازد که فرض شد خروج گدازه از دهانه اصلی صورت خواهد گرفت. گرچه این محل می‌تواند محتمل‌ترین محل خروج گدازه باشد ولی ممکن است در عمل این گونه نشود (حداکثر مسافت طی شده برای هر مسیر احتمالی ۵۰۰۰ متر، ارتفاع روانه گدازه برای بی اثر کردن سدهای طبیعی و یا خطای مدل ارتفاعی رقومی استفاده شده برای هر مسیر جریان ۳ متر و احتمال حرکت گدازه از مسیرهای متنوع، ۵۰۰۰ مسیر در نظر گرفته شد). در شکل (۹) محدوده‌های احتمالی پخش گدازه در اطراف تفتان نشان داده شده‌اند. با توجه به آن، روستاهای بخش خارستان، از جمله تمین در شمال شرق تفتان، سنگان در جنوب تفتان و تمندان و گوشه در غرب آن در معرض خطر بالایی قرار دارند. جریان احتمالی شمال شرقی در دشت‌های شمال شرق متوقف خواهد شد ولی جریان‌های جنوبی و جنوب شرقی پس از گذر از روستاهای تمندان و گوشه در دشت‌های جنوبی (شمال خاش) باز می‌ایستند.



شکل ۹ نقشه پهنه‌بندی جریان گدازه در فوران احتمالی آتشفشان تفتان و روستاهای تحت خطر این پدیده

ج) خطر پیروکلاستیک‌های جریانی

با توجه به سابقه تفتان و نیز نوع فوران‌های احتمالی آن، خطر ایجاد پیروکلاستیک‌های جریانی (ابر سوزان) وجود دارد. لذا نقشه مناطق مستعد به این خطر نیز تهیه گردید (شکل ۱۰). قبلاً (در مبحث مواد و روش‌ها) فرضیات و نحوه تهیه این نوع نقشه ذکر گردیدند. بر اساس شکل (۱۰) این جریان‌ها می‌توانند در سطوحی در شمال، شرق و جنوب آتشفشان انتشار یابند و روستاهای جنوب سنگان (شرق تفتان) و منطقه خارستان (شمال تفتان) را تهدید کنند.



شکل ۱۰ نقشه پهنه‌بندی پیروکلاستیک‌های جریانی در فوران احتمالی آتشفشان تفتان و روستاهای تحت خطر

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس این مطالعه، استراتولوکان تفتان یک آتشفشان نیمه‌فعال است که امکان فعال شدن آن وجود دارد. این آتشفشان در گذشته با فعالیت از نوع خروج گدازه، فوران خاکستر و ابر سوزان همراه بوده است؛ بنابراین در فوران احتمالی آتی خود می‌تواند با این نوع تهدیدها همراه باشد. شدت فوران احتمالی آن (بر حسب VEI) در حد ۳ تا ۵ و معادل با انواع استرومبولی، ولکانو تا ساب پلینی ارزیابی می‌شود. گدازه‌ها و پیروکلاستیک‌های جریانی می‌توانند بعضی از روستاهای اطراف مخروط را تهدید کنند. خاکسترها به سمت شرق حرکت کرده و بعضی از روستاهای شرق این آتشفشان را تا حدی تهدید می‌کنند. ولی گدازه‌های خروجی به سمت شمال و جنوب جریان می‌یابند و به روستاهای تمین، سنگان، گوشه و تمندان می‌توانند برسند. در صورت فوران از نوع ابر سوزان، آن‌ها در بعضی سطوح حاشیه‌ای شمال، شرق و جنوب آتشفشان پخش خواهند شد و در صورتی که این جریان‌ها حجم بالایی داشته باشند می‌توانند روستاهای این محدوده‌ها را تهدید خواهند کرد. لذا نظر به اینکه قبل از فوران، حرکت و جابجایی ماگما در زیر زمین معمولاً با زلزله‌های خفیف همراه است پیشنهاد می‌شود یک ایستگاه لرزه‌نگاری در نزدیکی این آتشفشان راه اندازی شود تا از آن برای پیش بینی فوران احتمالی استفاده گردد. نوع فوران و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر ارائه شده در این پژوهش محل‌های در معرض خطر را نشان می‌دهند که می‌توان به موقع اقدام به تخلیه اهالی ساکن در این مناطق نمود.

کتابنامه

- بهرامی، شهرام؛ یمانی، مجتبی؛ علوی‌پناه، سیدکاظم؛ ۱۳۸۷. تحلیل مورفولوژی شبکه زهکشی در مخروط آتشفشانی تفتان، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۵، صفحات ۶۱-۷۲.
- بیابانگرد، حبیب‌الله؛ ۱۳۸۵. پتروگرافی، ژئوشیمی، ژئوکرونولوژی و نحوه فعالیت آتشفشان تفتان واقع در کمربند مکران ستان سیستان و بلوچستان، رساله دکتری، گرایش پترولوژی، استاد راهنما: عباس مرادیان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۲۶ صفحه.
- بیابانگرد، حبیب‌الله؛ مرادیان، عباس؛ ۱۳۸۸. بررسی سنگ‌شناختی و ژئوشیمیایی کانی‌های اصلی سازنده سنگ‌های آتشفشانی تفتان، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال هفدهم، شماره ۲، صفحات ۱۸۷ تا ۲۰۲.
- بیابانگرد، حبیب‌الله؛ مرادیان، عباس؛ ۱۳۸۸. چینه‌شناسی آتشفشانی و مراحل مختلف فوران آتشفشان تفتان، مجله علوم زمین، سال هجدهم، شماره ۷۲، صفحه ۷۳ تا ۸۲.
- بیابانگرد، حبیب‌الله؛ مرادیان، عباس؛ بوالی، م. ع.؛ ۱۳۸۵. هیدروژئوشیمی چشمه‌های معدنی تفتان، علوم زمین، شماره ۲۷، صفحات ۱۸-۲۹.
- بیابانگرد، حبیب‌الله؛ مرادیان، عباس؛ بوالی، ی.؛ ۱۳۸۸. بررسی هیدروژئوشیمی چشمه‌های معدنی آتشفشان تفتان و ارتباط آن‌ها با توده‌های سنگی سخت منطقه. مجله علوم زمین، سال نوزدهم، شماره ۷۳. صفحات ۹۹ تا ۱۰۸.

- شاهبیک، اسماعیل؛ ۱۳۷۲. زمین‌شناسی ایران، آب‌های معدنی و گرم ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور. تهران. ۴۰۲ صفحه.
- معین‌وزیری، حسین؛ و امین‌سبحانی، ابراهیم؛ ۱۳۵۷. آتشفشان تفتان، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۴۲ صفحه.
- Biabangard, H., & Moradian, A. (2008). *Geology and geochemical evaluation of Taftan volcano, Sistan and Baluchistan province, Southeast of Iran*. Chinese Journal of Geochemistry, 27, 356- 369.
- Carey, S. N. (2005). Understanding the physical behavior of volcanoes. In Marti, J., & Ernest, G. G. J. (Eds.), *Volcanoes and the environment* (pp. 1-54). Cambridge: Cambridge University Press.
- Connor, C. B., Hill, B. E., Winfred, B., Franklin, N. W., & LaFemina, P. C. (2001). *Estimation of volcanic hazards from tephra fallout*. Natural Hazards Review 2, 33° 42.
- Farhoudi, G., & Karig, D.G. (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 press.
- Felpeto, A., Marti, J., & Ortiz, R. (2007). *Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 166, 106-116.
- Hull, E., (1892). *Volcanoes, Past and Present* (1st ed.). Walter Scott press.
- Keller, E. A., & DeVecchio, D. E. (2012). *Natural hazards, earth processes as hazards, disasters and catastrophes* (3rd ed.). Pearson Education Inc.
- 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.... (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.
- Mortazavi, M. & Sparks, R. S. j., (2010). *Using wind data to prediction the risk of volcanic eruption, an example of Damavand volcano, Iran*. The 1st International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University - Mashhad Branch, Iran, 26-28.
- 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.
- Tilling, R. I. (2005). *Volcano Hazards*, In Marti, J., & Ernst, G. G. J., (Eds.) *Volcano and the Environment* (pp. 471), Cambridge: Cambridge University Press.