

کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری EN-SAW و ANP در مطالعات زمین‌شناسی: ارزیابی و اولویت‌بندی خطر فعال شدن استراتوولکان‌های ایران به عنوان مطالعه موردی

احمد خیاطزاده^{۱*} و احمد عباس‌نژاد^۲

^۱ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

چکیده

در چند دهه اخیر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بسیار پیشرفت و در علوم مختلف کاربرد پیدا کرده است و استفاده از آنها در مباحث مختلف زمین‌شناسی، به‌ویژه در ارزیابی خطرهای زمین‌شناختی که معمولاً چندمعیاره هستند، می‌تواند بسیار مفید باشد. پژوهش‌هایی که کاربرد این روش‌ها را در زمین‌شناسی در عمل نشان دهند کمک به فراگیر شدن استفاده از آنها در موضوعات مختلف زمین‌شناسی خواهند کرد. از آنجا که رویدادهای چند قرن گذشته نشان از آن دارد که استراتوولکان‌ها بیش از دیگر انواع آتشفشان‌ها می‌توانند فاجعه‌آمیز باشند؛ بنابراین در این مطالعه، به عنوان یک مطالعه موردی، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره آن‌تروپی وزن‌دهی ساده (EN-SAW) و تحلیل شبکه (ANP) برای ارزیابی و رتبه‌بندی خطر فوران استراتوولکان‌های ایران (دماوند، سهند، سیلان، تفتان، بزمان، مساحیم و بیدخوان) مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا معیارهای مؤثر در ارزیابی خطر با نظر کارشناسان انتخاب شده‌اند که عبارتند از سن آخرین فعالیت آتشفشانی، بود یا نبود وضعیت زمین‌ساختی به وجود آورنده، وضعیت فعالیت‌های پس از فوران مانند چشمه‌های آب گرم و میزان فرسایش آتشفشان. سپس آنها با نظر کارشناسان امتیازدهی شدند و در پایان با روش‌های EN-SAW و ANP و با استفاده از نرم‌افزار Super Decision امتیاز خطر فعال شدن این آتشفشان‌ها مشخص شد و بر پایه رقم حاصل، رتبه‌بندی شدند. در هر دو روش، آتشفشان دماوند در رتبه اول از دید احتمال فعالیت دوباره قرار گرفت. از این رو توصیه می‌شود که بیش از دیگر آتشفشان‌های ایران مورد توجه قرار گیرد؛ مطالعات تکمیلی ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و غیره روی آن انجام، نقشه پهنه‌بندی خطر آن تهیه و (به عنوان نوعی پیش) یک پایگاه لرزه‌نگاری در محدوده آن تأسیس شود. بر پایه روش‌های یاد شده، آتشفشان‌های بزمان، تفتان و سیلان با امتیازهای نزدیک به هم در رتبه بعدی قرار می‌گیرند. بهتر است آنها نیز نیمه‌فعال در نظر گرفته شوند و از دید مدیریت خطر در اولویت بعدی قرار گیرند. وضعیت سهند با توجه به امتیاز آن مشکوک است ولی آتشفشان‌های بیدخوان (بردسیر کرمان) و مساحیم (شمال شهر بابک کرمان) امتیاز کمی کسب کرده‌اند که بر پایه آن غیر فعال در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین خطرناک نیستند.

کلیدواژه‌ها: خطر آتشفشان، ماتریس تصمیم، آن‌تروپی شانون، وزن‌دهی ساده، تحلیل شبکه، سوپر دسیژن، دماوند.

* نویسنده مسئول: احمد خیاطزاده

E-mail: a.khaiatzadeh@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

با استفاده از تحلیل شبکه و GIS توسط (Nekhay et al., 2009) و راه‌اندازی سامانه پیش‌بینی و پایش هوشمند خطر زمین‌لغزه با استفاده از ANP توسط (Wu et al., 2014) اشاره کرد (Tacnet et al., 2012).

بنابراین از روش‌های بالا می‌توان در مطالعات زمین‌شناختی به ویژه ارزیابی خطر، مانند خطر فوران دوباره آتشفشان‌ها استفاده کرد. خطر آتشفشان به مجموعه رویدادهایی گفته می‌شود که در محدوده آتشفشان و تحت تأثیر مستقیم و غیر مستقیم فعالیت آن رخ می‌دهند و می‌توانند به جامعه و اموال انسان آسیب وارد سازند (Quesada et al., 2007). طی قرن اخیر از حدود ۱۵۰۰ آتشفشان فعالی که در سراسر دنیا وجود دارد تنها ۴۰۰ آتشفشان فوران کرده‌اند (Keller and DeVecchio, 2012) که تنها یک سوم از آنها دارای فوران‌های تاریخی ثبت شده بوده‌اند (Tilling, 2005). با دانستن رفتارها و فعالیت‌های گذشته یک آتشفشان و با فرض این مطلب که این رفتارها راهنمایی برای رفتارهای آینده آن هستند، می‌توان پتانسیل خطر احتمالی ناشی از فوران آبی را مشخص و حتی مناطق تحت خطر را ارزیابی کرد (Alberico et al., 2007).

خطرهای آتشفشانی را می‌توان به دو گروه اصلی مستقیم (آذرآواری‌های ریزشی، آذرآواری‌های جریانی، جریان گدازه و لاهار) (Tilling, and 2005) و غیرمستقیم (زمین‌لرزه‌ها و حرکات زمین، سونامی، لاهارهای ثانویه، رسوب‌گذاری و فرسایش پس از فعالیت آتشفشان، اثرات جوی، تغییرات آب‌وهوایی، شیوع بیماری‌ها و قطعی و مختل شدن حمل و نقل هوایی در اثر رویارویی با خاکستر) (Tilling, 2005; Thouret, 2010) تقسیم کرد. یکی از خطرهای مهم آذرآواری‌های ریزشی است. ذرات تفراف، بسته به اندازه‌شان، به انواع خاکستر، لاپیلی، بمب و بلوک تقسیم می‌شوند. خاکسترهای آتشفشانی هم از دید مسافتی که پخش می‌شوند و هم

انسان در مسیر زندگی خود همواره با مشکلات و مسائل مختلفی روبه‌رو می‌شود که ناگزیر است برای حل یا گذر از آنها تصمیمی بگیرد. امروزه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (Multiple Attribute Decision Making) با نشانه اختصاری MADM بسیار رواج یافته است که تصمیم‌گیری در آنها مستلزم در نظر گرفتن معیارها و ضوابط کمی و کیفی مختلف است (عطائی، ۱۳۸۹). در حل مسائلی که با عدم قطعیت همراه هستند از آن‌تروپی شانون (Shanon Entropy) برای وزن‌دهی به معیارها و سپس از یک روش رتبه‌بندی مانند وزن‌دهی ساده (Sample Additive Weighting) برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده می‌شود. به عنوان پیشینه استفاده از این روش در مطالعات زمین‌شناختی می‌توان به پردازش روش چند گونه‌ای برای بررسی عدم قطعیت در ارزیابی ریسک (Baudrite et al., 2005)، در نظر گرفتن عدم قطعیت در ارزیابی ریسک بلایای طبیعی با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره و ادغام اطلاعات، کاربرد روابط جدید عدم قطعیت و روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره در مدیریت ریسک بهمین (Tacnet et al., 2010) و مدیریت بلایای طبیعی همراه با عدم قطعیت (Tacnet et al., 2012) اشاره کرد. از دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره که در مطالعات زمین‌شناختی استفاده شده است، روش تحلیل شبکه (Analytical Network Process) است که نه تنها روابط میان معیارها و زیر معیارها با گزیننده را مورد ارزیابی قرار می‌دهد بلکه ارتباط میان معیارها و زیر معیارهای محیط تصمیم را نیز در نظر می‌گیرد و در واقع ارتباط داخلی میان عناصر را ممکن می‌سازد (عطائی، ۱۳۸۹). به عنوان پیشینه کاربرد این روش در مطالعات زمین‌شناختی می‌توان به کاربرد تحلیل شبکه در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزه توسط (Neaupane and Piantanakulchai, 2006)، ارزیابی ریسک فرسایش خاک

خواهند شد، ادامه خواهد یافت. از این رو هدف اصلی این مطالعه، شناسایی معیارهای مؤثر در فوران دوباره آتشفشان‌های چینه‌ای نیمه‌فعال و وزن‌دهی به آنها با روش‌های AMDM است. در مرحله بعد تعیین می‌شود که کدام یک از آتشفشان‌ها بر پایه رتبه‌بندی، در رأس مطالعات بعدی خطر قرار خواهند گرفت.

از این رو پرسش‌های زیر به عنوان چالش‌های پیش روی این پژوهش مطرح هستند: الف) آیا می‌توان انتظار فعالیت‌های آتشفشانی را با توجه به نوع ساختارهای آتشفشانی موجود در ایران داشت؟

ب) اگر چنین است، فوران‌های خطرآفرین آتشفشانی از کدام آتشفشان‌های ایران (گزینه‌ها) مورد انتظار است؟

ج) معیارهای اساسی در ارزیابی پتانسیل خطر آتشفشان‌های چینه‌ای ایران کدامند؟

د) سهم هر کدام از این معیارها در ارزیابی‌ها چقدر است؟

ه) روش یا روش‌های مناسب در ارزیابی معیارها و گزینه‌های شناسایی شده کدامند؟ (و) رتبه‌بندی پتانسیل احتمال فعالیت دوباره آتشفشان‌ها بر پایه امتیازات به دست آمده چگونه خواهد بود؟

۳- چارچوب نظری پژوهش

در تصمیم‌گیری گروهی پس از شناسایی و تعریف مسئله و جستجو برای راه حل‌های احتمالی که می‌تواند به صورت فردی و یا گروهی انجام شود، از قضاوت خبرگان استفاده می‌شود (محمدمرادی و اخترکاو، ۱۳۸۸). در این پژوهش از دید کارشناسان طی دو مرحله (روش دلفی) استفاده شده است. پس از توافق بر سر معیارهای مؤثر، با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری، درجه اهمیت معیارها تعیین شد. سپس باید یک یا چند مدل تصمیم‌گیری انتخاب و بر پایه آنها تصمیم‌گیری انجام می‌شد. یک مسئله تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM) را می‌توان در یک ماتریس تصمیم خلاصه کرد (اصغرپور، ۱۳۸۳). معیارها ممکن است کمی باشند که بتوان آنها را در قالب اعداد بیان کرد. در این صورت روش‌های ریاضی گوناگونی برای حل آنان وجود دارد که مقیاس‌های دوقطبی و فاصله‌ای - رتبه‌ای معمول‌ترین این روش‌ها هستند. محیط تصمیم‌گیری ممکن است قطعی باشد یا از عدم قطعیت برخوردار باشد که در صورت عدم قطعیت از راهکارهای فازی یا احتمالاتی استفاده می‌شود. در آخرین مرحله و پس از به اجرا گذاشتن، تصمیم مناسب گرفته می‌شود و باید نتایج تصمیم مورد ارزیابی قرار گیرند (عطائی، ۱۳۸۹).

در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از دو روش تصمیم‌گیری و وزن‌دهی متفاوت، پتانسیل خطر آتشفشان‌های ایران ارزیابی شود تا از راه مقایسه، نتایج مطلوب‌تری حاصل شود.

۴- شرح روش‌ها

۴-۱. شناسایی گزینه‌ها

در این مطالعه، ابتدا با توجه به اطلاعات موجود، از جمله کتب و مقالات و همچنین نقشه DEM منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی، آتشفشان‌های چینه‌ای دماوند، سبلان، سهند، تفتان، بزمان، مساحیم و بیدخوان به عنوان گزینه‌های سلسله مراتب شناسایی شدند. آتشفشان چینه‌ای آرات که در نزدیکی مرز ایران در خاک ترکیه قرار دارد در صورت فوران می‌تواند در ایران مشکلاتی به وجود آورد؛ ولی به دلیل اینکه مخروط این آتشفشان در خاک ایران قرار ندارد در حوزه این پژوهش قرار نگرفت. سپس، همه اطلاعات مربوط به هر یک از این آتشفشان‌ها (جدول ۲) از کتاب‌ها، مقاله‌ها، گزارش‌ها، پایان‌نامه‌ها و نقشه‌های زمین‌شناسی گردآوری و همزمان عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای آنها تهیه و تفسیر شد (شکل ۱).

۴-۲. شناسایی معیارها

در مرحله بعد، با توجه به شرایط زمین‌شناسی ایران و ویژگی‌ها و اطلاعات مربوط به این آتشفشان‌های چینه‌ای، معیارهایی به عنوان پیش فرض برای ارزیابی میزان خطر (احتمال فوران) مد نظر قرار گرفتند.

از دید مقدار تولید مهم هستند. در یک فوران، ممکن است خاکسترها، منطقه‌ای به گسترش صدها تا هزاران کیلومتر مربع را بپوشانند و از راه تخریب ساختمان‌ها، انباشته شدن در سطح خیابان‌ها و جاده‌ها، آسیب به گیاهان، گل آلود کردن منابع آب، بروز مشکلات تنفسی، آسیب به موتور هواپیماها و خودروها، ایجاد مه‌دود آتشفشانی (VOG)، ورود گازهای مضر به محیط و حتی (در صورت شدید بودن فوران) ایجاد تغییرات آب‌وهوایی مشکلات بسیاری را به وجود آورند. ممکن است خاکسترهای آتشفشانی پیش از پخش شدن در هوا و ریزش تدریجی، به صورت آذرآواری‌های جریانی در سطح زمین حرکت کنند و آسیب وارد سازند. آذرآواری‌های جریانی قابل تقسیم به انواع با چگالی بالا (Pyroclastic Density Currents)، با نشانه اختصاری PDC و سرچ آتشفشانی (Volcanic Surge) هستند. این جریان‌ها، در عین حال بستگی به مشخصاتشان، جریان پامیس، جریان خاکستر و ابر سوزان نیز نامیده شده‌اند. ممکن است دمای آنها به ۳۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت حرکتشان به ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت برسد (Keller and Devechio, 2012)؛ بنابراین یکی از مرگبارترین پدیده‌های آتشفشانی هستند که سبب خفگی، دفن، سوختن، و ایجاد ضربه و شوک می‌شوند. جریان‌های گدازه به دلیل سرعت پایین، کمتر زندگی انسان را تهدید می‌کنند؛ ولی می‌توانند با سرعت ۱۵ تا ۳۰ کیلومتر در ساعت مساحتی بیش از ۲۰ کیلومتر مربع را در کمتر از یک ساعت بپوشانند. مسافت طی شده توسط هر جریان گاهی به بیش از ۵۰ کیلومتر می‌رسد. آنها در صورت ورود به شهرها، روستاها، جنگل‌ها و جاده‌ها خسارتی به بار می‌آورند (Parfitt and Wilson, 2008).
لاهار نوع دیگری از خطرهای آتشفشانی است که شامل مخلوطی از ذرات آتشفشانی (به ویژه خاکستر) با آب است. این جریان‌های سیلابی می‌توانند همزمان با فوران یا مدت‌ها پس از آن ایجاد شوند و بستگی به شرایط، ممکن است از نوع سرد یا گرم باشند. سرعت آنها ممکن است تا ۱۴۰ کیلومتر در ساعت هم برسد (Tilling, 2005). لاهارها به علت سرعت بالا، قابلیت طی مسافت‌های زیاد و توانایی پوشاندن مناطق گسترده از جمله خطرهای مهم آتشفشانی به شمار می‌روند. نمونه‌های بسیاری از آن، به ویژه در آتشفشان‌های اندونزی دیده شده است و آتشفشان‌های دماوند، سهند و سبلان در ایران نیز آن را در گذشته تولید کرده‌اند.

فعالیت‌های ماگمایی - آتشفشانی در ایران را می‌توان از پراکامبرین تا کواترنری ردیابی کرد؛ اگر چه انقطاع‌های بسیار دوره‌های فعالیت آتشفشانی را از هم جدا کرده‌اند (قربانی، ۱۳۸۲). فعالیت آتشفشانی در ایران در طی تشریحی شدیدتر بوده و گستره پهنای آن از کشور، از جمله ایران مرکزی، بخش‌هایی از لوت و جنوب البرز را شامل می‌شود. اوج این فعالیت‌های آتشفشانی در ائوسن بوده است (آقائباتی، ۱۳۸۳). فعالیت‌های آتشفشانی تشریحی ایران قابل تقسیم به پهنه‌های ایران مرکزی (به ویژه ارومیه - دختر)، البرز، آذربایجان و ایران خاوری و لوت هستند. در بسیاری از موارد آتشفشان‌های کواترنری ادامه فعالیت‌های آتشفشانی تشریحی این پهنه‌ها هستند (ولی با کاهش شدت و گسترش).

گفتنی است که فعالیت‌های آتشفشانی پلیوکواترنری ایران به شکل زبانه‌های پراکنده گدازه بازالتی (برای نمونه در باختر کشور)، دام‌های اسیدی (مانند آتشفشان‌های آج در نزدیکی انار کرمان)، مآرهای فوق‌بازی (آتشفشان‌های قلعه حسنعلی راین)، مخروط‌های کوچک مواد پرتابی (برای نمونه در ۳۰ کیلومتری شمال گندم‌بریان در باختر لوت) و آتشفشان چینه‌ای (استراتوولکان) صورت گرفته‌اند و ممکن است در آینده نیز این نوع فعالیت‌ها دیده شود.

۲- هدف پژوهش

فعالیت‌های احتمالی آتشفشان‌های چینه‌ای ایران می‌توانند خطر آفرین و تهدید کننده باشند؛ زیرا هم شدت و هم ابعاد فعالیت آنها زیاد است و می‌توانند اثرات و عواقب مهم‌تری به همراه داشته باشند. به باور امامی (۱۳۶۸) شروع فعالیت‌ها با توجه به مسدود بودن مجاری آتشفشان از نوع اولتراولکانین (Ultravulcanian) بوده است و احتمالاً با فعالیت‌های دیگر از نوع پلینین (Plinian) که موجب تخریب ساختمان

آتشفشانی از بین می‌رود (جدول ۳)، (Davidson and De Silva, 2000). با توجه به تفاوت هر یک از آتشفشان‌ها در نوع و حجم مواد فورانی میزان فرسایش آتشفشان‌ها بسته به درصد مواد آذرآواری، خاکستر، گدازه‌های آتشفشانی، دوره‌های مختلف فعالیت آنها، ریخت‌شناسی تشکیل، شیب و استعداد فرسایش‌پذیری آنها با یکدیگر متفاوت خواهد بود. الگوی کلی شبکه زهکشی در مخروط‌های آتشفشانی، شعاعی است؛ اما در آتشفشان‌هایی که مدت زیادی از فعالیت آنها گذشته است و اکنون در حال خاموشی یا نیمه‌فعال هستند، آبراه‌ها تکامل می‌یابد و الگوی شعاعی تغییر پیدا می‌کند و به الگوی درختی تبدیل می‌شود (بهرامی و همکاران، ۱۳۸۷).

پس از توقف فوران‌ها در یک آتشفشان چینه‌ای، الگوی فرسایشی بدین گونه است که ابتدا نهشته‌های آذرآواری رأس مخروط آتشفشان به سرعت و طی روزها و یا در چند سال اول تخریب و از مخروط جدا می‌شوند (بر پایه مشاهدات انجام شده پس از فوران‌های آتشفشان سنت هلن در ۱۹۸۰ و آتشفشان پیناتوبو در سال ۱۹۹۱). ولی به تدریج از سرعت فرسایش به دلیل باقی ماندن مواد سخت و گدازه‌ای کاسته می‌شود (Davidson and De Silva, 2000). نرخ فرسایش در ۲ سال اول در حدود ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر و در ۵ سال اول پس از فوران در حدود ۱ تا ۵ میلی‌متر در سال است؛ این ارقام برای حجم مواد خروجی در آتشفشان‌های چینه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که با اندازه فورانی متوسط میان $1/1 \times 10^5$ تا $2/7 \times 10^5$ مترمکعب بر کیلومتر مربع هستند (Thouret, 2010)؛ اما به‌طور کلی فرایند فرسایش در آتشفشان‌های چینه‌ای تابع اقلیم و شرایط آب‌وهوایی منطقه و همچنین ترکیب ساختمانی آنهاست (Davidson and De Silva, 2000).

۴-۳. وزن‌دهی با روش آنتروپی و تصمیم‌گیری با استفاده از روش SAW

هر تصمیم‌گیری ارتباط نزدیکی با کیفیت اطلاعات اولیه دارد. عدم قطعیت بیشتر به عنوان یک واژه بیان می‌شود؛ اما همه اطلاعات ناقصی را شامل می‌شود که دارای عدم ثبات، عدم دقت، ناکامل بودن و عدم اطمینان باشند. تاکنون نظریه‌های بسیاری برای نشان دادن انواع مختلف عدم اطمینان و تناقضات اطلاعاتی ارائه شده‌اند که می‌توان به رتبه‌بندی فازی و نظریات احتمالاتی اشاره کرد (Tacnet et al., 2012). بحث مربوط به پتانسیل خطر آتشفشان‌ها همواره همراه با عدم قطعیت‌هایی است و به این دلیل برای وزن‌دهی معیارها از نظریه آنتروپی استفاده می‌شود. این روش احتمالاتی در سال ۱۹۷۴ توسط Weaver و Shannon ارائه شده است. آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص اهمیت بیشتری دارد (عطائی، ۱۳۸۹). مراحل روش آنتروپی به شرح زیر است (اصغرپور، ۱۳۸۳؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۰).

ابتدا ارزشی با نماد E محاسبه می‌شود (رابطه ۲):

$$E = -k \sum_{i=0}^n (P_i * \ln P_i) \quad \text{رابطه (۲)}$$

به طوری که k یک ثابت مثبت است و به منظور تأمین $E \geq 0$ از توزیع احتمال P_i بر پایه سازوکار آماری استفاده می‌شود و مقدار آن، در صورت تساوی P_i ‌ها با یکدیگر، بیشینه مقدار ممکن خواهد بود:

$$-k \sum_{i=1}^n P_i * \ln P_i = -k \{(\ln 1/n)(n/n)\} = -k \ln 1/n \quad \text{رابطه (۳)}$$

یک ماتریس تصمیم‌گیری از نوع مدل MADM دارای اطلاعاتی است که آنتروپی می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی آن به کار رود. یک ماتریس تصمیم‌گیری به صورت جدول ۵ در نظر گرفته می‌شود.

در آن ماتریس A_j ‌ها گزینه‌هایی هستند که قرار است رتبه‌بندی شوند. X_j شاخص‌هایی هستند که گزینه‌ها بر پایه آنها ارزیابی می‌شود. E_j ارزش هر شاخص متناسب با هر یک از این گزینه‌هاست. محتوای اطلاعاتی از این ماتریس ابتدا به صورت (P_{ij}) زیر است.

$$P_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}; \forall j \quad \text{رابطه (۴)}$$

به ازای هر مشخصه P_{ij} از مجموعه E_j خواهیم داشت:

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m [P_{ij} * \ln P_{ij}]; \forall j \quad \text{رابطه (۵)}$$

به طوری که $K = 1/\ln m$ است.

در تعیین معیارها از دید صاحب‌نظران با استفاده از تلفیق قضاوت‌های فردی (AIJ: Aggregation of Individual Judgments) استفاده شده است. در این روش هر یک از افراد تصمیم‌گیرنده مقدار دلخواه خود را برای هر عضو ماتریس اعلام می‌کند و سپس با استفاده از ماتریس‌های منفرد، ماتریس تصمیم‌گیری گروهی تشکیل می‌شود (عطائی، ۱۳۸۹). درایه‌های این ماتریس با استفاده از میانگین هندسی وزن‌دار درایه‌های ماتریس‌های منفرد به دست می‌آید؛ زیرا میانگین هندسی بهترین روش برای تلفیق قضاوت‌هاست. اگر $a_{ij}^{(k)}$ مؤلفه مربوط به شخص kام برای مقیاس عامل i نسبت به z باشد، شاخص‌های پایانی طبق رابطه ۱ به دست می‌آید (Aczel and Saaty, 1983).

$$\text{رابطه (۱)} \quad \left(\prod_{k=1}^n a_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a_{ij}^{(k)}}$$

در پایان، چهار معیار شامل (۱) سن آخرین فوران، (۲) وجود و شدت فعالیت‌های پس از فوران (چشمه‌های آبگرم و سولفات‌ها)، (۳) بود یا نبود شرایط زمین‌ساختی ایجادکننده آتشفشان و (۴) وضعیت (شدت) فرسایش مخروط آتشفشان انتخاب شد که پس از دریافت ماتریس تصمیم‌گیری منبع از نظرات خبرگان و کارشناسان، میانگین هندسی نظرات آنها طبق ماتریس ۱ به دست آمد.

– **دوره فعالیت (طول عمر) در آتشفشان‌های چینه‌ای:** برداشت کلی از نتایج به دست آمده از سن‌سنجی‌های انجام شده در آتشفشان‌های چینه‌ای نشان‌دهنده عمر طولانی این آتشفشان‌هاست. به تازگی در پی تلفیق مطالعات سن‌سنجی و چینه‌شناسی انجام شده روی طول عمر آتشفشان‌های مونت آدامز در آمریکا، تاتارا-سن پدرو در شیلی و تونگارپرو در زلاندونو نتایجی حاصل شده است که به این پرسش‌های اساسی که دوره‌های زمانی فورانی در آتشفشان‌های چینه‌ای چه مدت طول می‌کشد؟ و یا دوره آرامش یک آتشفشان چینه‌ای چقدر خواهد بود؟ تا حدودی پاسخ می‌دهد (جدول ۱). با توجه به جدول ۲ نتیجه می‌شود که آتشفشان‌های مرکب می‌توانند سریع رشد کنند و تا حدود ۵۰۰ هزار سال فعال باقی بمانند؛ برای نمونه آتشفشان مونت آدامز پس از ۵۲۰ هزار سال فعالیت خود را از سر گرفت و طی سه دوره فعالیت، مخروط کنونی آن تشکیل شده است (Davidson and De Silva, 2000). از سوی دیگر این آتشفشان‌ها دارای دوره بازگشت‌های متفاوتی هستند که ممکن است میان ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ سال به طول انجامد. گاه پیش می‌آید که یک آتشفشان چینه‌ای دوره فعالیت خود را طی می‌کند و منقرض می‌شود و دوباره در کنار آن آتشفشان چینه‌ای جدیدی فعالیت خود را شروع می‌کند. این شرایط سبب تشکیل یک مجموعه آتشفشانی (Volcanic Complex) می‌شود. در این صورت یک مجموعه آتشفشانی می‌تواند تا میلیون‌ها سال به بقای خود ادامه دهد. برای نمونه جزیره مارتینیک که از ۶ آتشفشان مجزا و به هم پیوسته تشکیل شده است، از ۲۰ میلیون سال پیش تاکنون فعال به شمار می‌رود (Cas and Wright, 1987).

– **حضور فعالیت‌های سولفاتاری و وجود چشمه‌های آبگرم:** یک معیار مهم برای یک آتشفشان فعال، وجود فعالیت‌های سولفاتاری و حضور چشمه‌های آبگرم معدنی با خواص آتشفشانی است. اگر چه این فعالیت تا حدود زیادی بستگی به ساختمان ریشه آتشفشان (حجم و شکل مخزن ماگمایی) و چرخه آب زیرزمینی دارد؛ ولی احتمال رخداد فوران آتی یک آتشفشان را بالا می‌برد (Crandell et al., 1985).

– **بود یا نبود شرایط زمین‌ساختی به وجود آورنده:** یکی از مهم‌ترین معیارهای قابل توجه در ارزیابی پتانسیل فعالیت دوباره یک آتشفشان نیمه‌فعال، شناخت خواصگاه زمین‌ساختی آتشفشان و برآورد درستی از حضور این شرایط است. برای نمونه منشأ کمربندهای آتشفشان چینه‌ای باختر آمریکا در اثر فرورانش صفحه اقیانوسی آرام به زیر صفحه قاره‌ای آمریکاست و این فرورانش کماکان ادامه دارد و تا مادامی که این روند ادامه داشته باشد، ماگمای مورد نیاز برای فعالیت‌های بعدی این آتشفشان‌های چینه‌ای فراهم خواهد شد (Tilling, 2005).

– **میزان فرسایش و تخریب ساختمان آتشفشانی:** فوران‌های آتشفشانی بی‌درپی در زمان کمی سبب تشکیل ساختمان یک آتشفشان چینه‌ای می‌شود و فرایندهای فرسایشی طی سالیان، به تدریج ساختمان ایجاد شده را تخریب می‌کند و در پایان مخروط

۵- نتیجه‌گیری

آتشفشان‌های چینه‌ای شناخته شده ایران عبارتند از دماوند، سهند، سیلان، تفتان، بزمان، مساحیم و بیدخوان که به دلیل نبود پیشینه تاریخی فوران، نیمه‌فعال تا غیرفعال به شمار می‌روند. مرز مشخصی میان آتشفشان‌های فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال وجود ندارد و تاکنون تنها با در نظر گرفتن برخی متغیرهای مؤثر در دوره فعالیت آتشفشان‌های چینه‌ای مانند: (۱) سن آخرین فوران آتشفشانی، (۲) میزان فعالیت‌های پس از فعالیت‌های آتشفشانی مانند خروج سولفات‌ها و گازهای آتشفشانی از دهانه آتشفشان و چشمه‌های آبگرم، (۳) وجود شرایط زمین‌ساختی به وجود آورنده آتشفشان و (۴) میزان فرسایش مخروط آتشفشان به‌طور نسبی یک آتشفشان را فعال، نیمه‌فعال و یا غیرفعال قلمداد کرده‌اند. به همین دلیل استفاده از روش‌های اجماع فکری و تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مقایسه نتایج آنها می‌تواند در راستای شناسایی پتانسیل خطر این آتشفشان‌ها و رتبه‌بندی آنها برای مطالعات خطر آتی بسیار مفید باشد. بدیهی است انتخاب درست روش‌های تصمیم‌گیری و استفاده از نرم‌افزارهای به روز می‌تواند کارایی و دقت نتایج را افزایش دهد.

براساس نتایج حاصل از هر دو روش EN-SAW و ANP، آتشفشان دماوند با امتیاز بالا و اختلاف بالا نسبت به دیگر آتشفشان‌های چینه‌ای ایران در رتبه اول ارزیابی اولیه پتانسیل خطر قرار دارد و آتشفشان‌های بزمان، تفتان و سیلان به ترتیب و با اختلاف کمی نسبت به یکدیگر در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند و بهتر است نیمه‌فعال به شمار روند. وضعیت سهند با توجه به امتیاز آن مشکوک است و نمی‌توان با قطعیت آن را یک آتشفشان نیمه‌فعال یا خاموش در نظر گرفت. ولی امتیاز پایین آتشفشان‌های بیدخوان و مساحیم این آتشفشان‌های چینه‌ای را در رتبه‌های پایانی قرار می‌دهد و اختلاف زیاد امتیازی این آتشفشان‌ها نسبت به دیگران می‌تواند تأیید کننده غیرفعال تلقی کردن آنها باشد.

از سوی دیگر این مقاله نمونه‌ای از مواردی است که روش‌های تعریف شده در مدیریت، اقتصاد و غیره چگونه می‌توانند در زمین‌شناسی نیز مورد استفاده قرار بگیرند.

همچنین با توجه به نوع روش‌های سن‌سنجی متفاوتی که توسط پژوهشگران برای هر کدام از این آتشفشان‌ها انجام شده است، نگارندگان خود به این موضوع آگاهند که این مطلب قطعاً موجب یک دست نبودن اطلاعات اولیه شده و روی محاسبات و نتایج پایانی تصمیم‌گیری تأثیر داشته است. بنابراین برای ارزیابی‌های دقیق‌تر آتی پیشنهاد می‌شود که در قالب یک طرح جامع و با استفاده از یک روش واحد، سن آخرین فعالیت آتشفشان‌ها برآورد شود.

از آنجا که تهدید این آتشفشان‌ها آن قدر جدی و آنی نیست که از روش‌های پایش دقیق و پر هزینه استفاده شود، توصیه می‌شود تا جایی که امکان دارد با نصب ایستگاه لرزه‌نگاری در نزدیکی آنها هم لرزه‌خیزی پایه آنها مشخص شود و هم در صورتی که فعال شوند، از راه افزایش به روز زمین‌لرزه‌ها بتوان خطر را پیش‌بینی کرد. همچنین لزوم بررسی‌های ژئوشیمیایی گازها، فورول‌ها و آب‌های گرم، مطالعات ژئوفیزیکی و نقشه‌برداری و یا مطالعات سنجش از دور مراقبتی به‌صورت ادواری در آتشفشان‌های چینه‌ای با احتمال رخداد دوباره فوران احساس می‌شود. دومین کاری که توصیه می‌شود انجام شود، تهیه نقشه پهنه‌بندی برای هر کدام از تهدیدهاست تا در صورت پیش‌بینی فوران بتوان با مراجعه به این نقشه‌ها، برنامه اخطار، آماده‌باش و تخلیه اهالی تحت خطر را به خوبی اجرا کرد. سومین اقدام پیشنهادی، داشتن برنامه کلی اقدام در شرایط اضطراری پیش‌بینی یا فوران آنهاست.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از کمک‌های بزرگوارانی که در راستای شناسایی و ارزش‌گذاری معیارها در این پژوهش همراه بوده‌اند از جمله سرکار خانم‌ها دکتر سارا درگاهی، دکتر سمیه ذهاب ناظوری و جناب آقایان دکتر حمید احمدی‌پور و دکتر شهرام خلیلی مبرهن سپاسگزاری می‌کنند.

میزان عدم اطمینان یا درجه انحراف (dj) از اطلاعات ایجاد شده به ازای شاخص زام به این قرار است:

$$d_i = (1 - E_j); \forall j \quad \text{رابطه (۶)}$$

و سرانجام برای اوزان (W_j) از شاخص‌های موجود خواهیم داشت:

$$W_j = dj / \sum_{j=1}^n dj; \forall j \quad \text{رابطه (۷)}$$

چنانچه DM از پیش دارای یک قضاوت ذهنی (λ_i) به عنوان اهمیت نسبی برای شاخص زام باشد، آنگاه می‌توان W_j به دست آمده از راه آنتروپی را به‌صورت زیر تعدیل کرد (اصغرپور، ۱۳۸۳؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۰).

$$W'_{ij} = \lambda_j * W_j / \sum_{i=1}^n \lambda_j * W_j; \forall j \quad \text{رابطه (۸)}$$

بنابراین پس از تشکیل ماتریس تصمیم منبعث از دید خبرگان و کارشناسان (جدول ۶) با استفاده از روش آنتروپی، وزن معیارها تعیین و رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی ساده (Sample Additive Weighting) (SAW) انجام شد که به اختصار EN-SAW نامیده شده است.

در ادامه با استفاده از یکی از روش‌های تصمیم‌گیری و بر پایه وزن معیارهای به دست آمده از روش آنتروپی، گزینه‌های برتر شناسایی شدند (جدول ۷).

در این راستا ساده‌ترین روش، استفاده از رابطه ۹ است که توسط (Hwang and Yoon, 1981) به عنوان روش ترکیب خطی وزن‌دار نامیده می‌شود و امتیاز هر معیار (A^*) را به دست می‌دهد (جدول ۱۰):

$$\sum_{j=1}^m W_j r_{ij} A^* = \{A_i | \max\} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه r ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس شده غیر وزن‌دار است که با استفاده از رابطه ۱۰ تشکیل می‌شود.

$$r_{ij} = x_{ij} / \max \{x_{ij}\} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

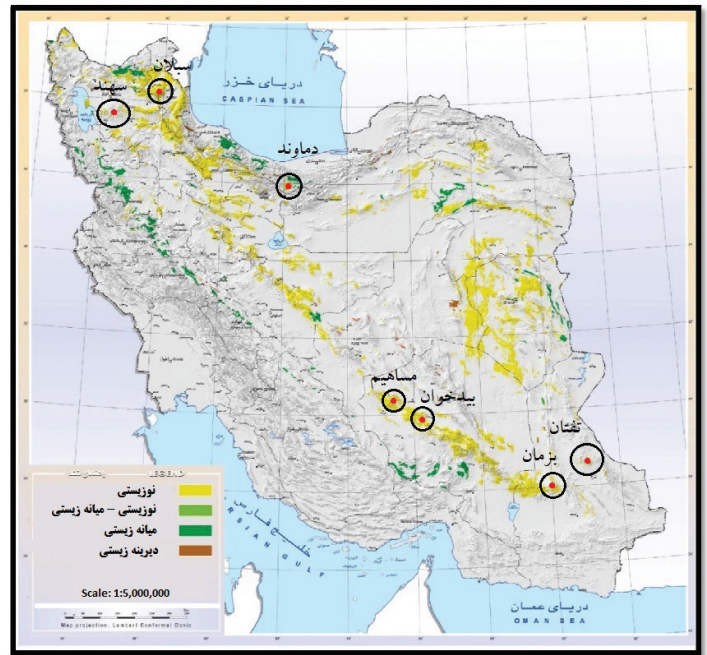
پس از ضرب وزن هر معیار در درایه‌های ماتریس غیر وزن‌دار، ماتریس بی‌مقیاس شده وزن‌دار به دست آمد که نتیجه حاصل از این دو ماتریس در جدول ۹ به نمایش در آمده است.

۴-۴. وزن‌دهی و تصمیم‌گیری با استفاده از روش ANP

از میان روش‌های ارزیابی چندمعیاره، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (Analytic Hierarchy Process (AHP)) بیشتر مورد توجه قرار گرفته است؛ اما یکی از محدودیت‌های جدی AHP این است که وابستگی‌های متقابل میان عناصر تصمیم، یعنی وابستگی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها را در نظر نمی‌گیرد و ارتباط میان عناصر تصمیم را سلسله‌مراتبی و یک سویه فرض می‌کند. بنابراین باید در استفاده از AHP محتاط بود زیرا همه مسائل و مشکلات تصمیم‌گیری لزوماً سلسله‌مراتبی نیستند (زبردست، ۱۳۸۹). به همین دلیل Saaty روش تحلیل شبکه را برای سازمان‌دهی معیارهای متفاوت و ارزیابی اهمیت و برتری آنها نسبت به گزینه‌ها ارائه کرد. این مدل با فراهم کردن ساختار مناسب، اصل همبستگی را که در آن عناصر هر سطح تنها به عناصر سطح بالاتر وابسته باشند، از بین برد و امکانی را برای تصمیم‌گیران ایجاد کرد تا از راه ساخت شبکه به جای سلسله مراتب بتوان ارتباط داخلی میان عناصر را نیز بررسی کرد (عطائی، ۱۳۸۹).

به این منظور از نرم‌افزار سوپر دیسیژن (Super Decision) استفاده شد. این نرم‌افزار از مدل‌های ساده و پیچیده فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) به خوبی پشتیبانی می‌کند. به راحتی می‌توان پرسشنامه‌ها و اطلاعات گردآوری شده از خبرگان را در نرم‌افزار وارد کرد تا به سرعت محاسبات مربوط روی آنها انجام شود و در کمترین زمان سوپرماتریس ناموزون، موزون و پایانی محاسبه و نمایش داده شود. در شکل ۲ مراحل انجام گرفته برای ارزیابی پتانسیل خطر آتشفشان‌های چینه‌ای ایران در نرم‌افزار سوپر دیسیژن نمایش داده شده است. پس از انجام مقایسه‌های دودویی برای هر یک از معیارها و ذخیره‌سازی اوزان محاسبه شده، سوپر ماتریس اولیه تهیه شد و در پایان، پس از ماندار کردن سوپرماتریس وزن‌دار و عادی کردن گزینه‌ها بر حسب هر خوشه، می‌توان در مورد هر کدام از گزینه‌ها قضاوت کرد (شکل ۳).

شکل ۱ - موقعیت استراتوولکان‌های ایران روی نقشه سایه دار DEM ایران (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور).



- ۱ گام • تعریف ساحتار شبکه
- ۲ گام • تبیین ساحتار سوپر ماتریکس اولیه
- ۳ گام • انجام مقایسه های زوجی اولیه
- ۴ گام • تشکیل سوپر ماتریکس اولیه
- ۵ گام • تشکیل سوپر ماتریکس
- ۶ گام • تشکیل توزیع ماندار سوپر ماتریس وزن دار
- ۷ گام • نرمال کردن گزینه‌ها بر حسب هر محوشه
- ۸ گام • قضاوت در مورد هر گزینه

شکل ۲ - مراحل مدل تصمیم گیری با استفاده از تحلیل شبکه (ANP).

شکل ۳ - سه مرحله پایانی انجام تصمیم گیری در نرم افزار Super decision.

New synthesis for: Super Decisions Main Window:...

Here are the overall synthesized priorities for the alternatives. You synthesized from the network Super Decisions Main Window: iranian volcanoes.mod

Name	Graphic	Ideals	Normals	Raw
بزمان		0.599071	0.188259	0.188259
بیدخوان		0.107216	0.033693	0.033693
تفتان		0.594575	0.186846	0.186846
دماوند		1.000000	0.314252	0.314252
سیلان		0.496993	0.156181	0.156181
سهند		0.264711	0.083186	0.083186
مساحیم		0.119594	0.037583	0.037583

Okay Copy Values

جدول ۱- ارتباط میان زمان و حجم مواد فورانی به دست آمده از آتشفشان (Davidson and De Silva, 2000)

آتشفشان	حجم مواد (Km ³)	آغاز فعالیت (Ka)	دوره‌های فعالیت (Ka)	بیشینه نرخ فوران (Km ³ /Ka)	متوسط نرخ فوران (Km ³ /Ka)
Mount Adams (USA)	۲۰۰	۹۴۰	۵۲۰-۴۹۰ ۴۲۵-۴۶۰ ۱۰-۴۰	۱/۶-۵	۰/۵-۱/۰
Tatara-San Pedro (Chile)	۵۵	۹۳۰	۱۸۳-۸۳ ۹۰-۱۹	۰/۲-۰/۳	۰/۰۶
Tongariro (Newsealand)	۵۰	۲۵-۲۷۵	۰-۲/۵ ۶۵-۱۱۰ ۷۰-۱۱۵ ۱۲۰-۱۹۰ ۲۰۰-۲۱۰ ۹۰-۲۵۰	۰/۸۸ ۰/۲۷±۰/۱۱ ۰/۸۱±۰/۰۵ ۰/۸۹±۰/۰۲ ۱±۰/۰۲ ۰/۳۳±۰/۰۷ ۰/۴۳±۰/۰۲	۰/۸۷-۰/۲

جدول ۳- مراحل فرسایشی یک استراتوکان (Davidson and De Silva, 2000)

مرحله	اثرات زمین‌ریخت‌شناسی مشخص‌کننده
۱	جوان و تازه بودن مخروط، بیشتر به رنگ تیره، گدازه‌های دست نخورده، کراتر قلّه‌ای مشخص و مخروط از برف پوشیده نشده است
۲	تشکیل آبراه‌های کوچک روی دامنه‌ها، گدازه‌ها هنوز دیده می‌شود و کراتر قلّه‌ای وجود دارد؛ اما در حال فرسایش است، مخروط کم‌کاران پوشیده بوده و رنگ تیره از بین رفته است و مورن‌های یخچالی روی دامنه حضور دارند.
۳	جریان‌های گدازه منقرض به روشنی دیده می‌شوند. کراتر قلّه‌ای فرسایش یافته، آبراه‌ها به خوبی شکل گرفته و ساختمان سطحی به تدریج از بین رفته است و گیاهان خودرو به چشم می‌خورند.
۴	جریان‌های گدازه دیده نمی‌شوند، آبراه‌ها بسیار ژرف و گیاهان بزرگ تر مستقر شده‌اند؛ کمی از مخروط اولیه باقی مانده و دره‌های یخچالی شکل L در مناطق یخچالی پدیدار شده‌اند.
۵	مخروط به سختی قابل تشخیص، توپوگرافی کم ارتفاع و تنها نشانه وجود آتشفشان تقارن عوارض است.

جدول ۲- مشخصات استراتوکان‌های پلویکراتری ایران به عنوان گزینه‌های مورد بررسی.

آتشفشان	موقعیت جغرافیایی	ارتفاع (متر)	وسعت (km ²)	مراحل فعالیت	سنگ‌شناسی
۱ دماوند	بخش مرکزی البرز	۵۶۷۰	۴۰۰	۴ مرحله	تندابی از گدازه (تراکی، تراکی آندزیتی، تراکی بازالت و الیزین بازالت) و مواد آذرآواری (پومیس، توف و لاهار) (امامی، ۱۳۷۹).
۲ سیلان	خاور آذربایجان	۴۸۱۴	۱۲۰۰	۳ مرحله	۱) فاز گدازه‌های سیلان قدیم، که شامل ۵ مرحله ماگمازایی جداگانه است. ۲) فاز فرویشنی کالدرا و فعالیت انفجاری که با انباشت حدود ۱۰۰ متر تهشته آذرآواری در دامنه شمالی همراه بوده است. ۳) فاز تشکیل گداه‌ها و جریان‌های گدازه سیلان جدید که با تشکیل روانه‌های تراکی آندزیت تا داسیت و شکل‌گیری بلندترین بخش آتشفشان همراه بوده است (آقابابا، ۱۳۸۳).
۳ سهنند	جنوب آذربایجان	۳۷۰۷	۵۰۰	۳ مرحله	۱) مرحله آتشفشان‌های کهن به سن میوسن پسین و از جنس گدازه ۲) مرحله انتشار پامیس‌های داسیتی به سن اواخر میوسن. ۳) مرحله فعالیت آتشفشانی جدید (پلویکراتری) که در طی آن گدازه‌های اسیدی خارج شده و مخروط‌های جدید، انفجاری تشکیل شده‌اند (معین‌دزیری و امین‌سیحانی، ۱۳۵۶).
۴ ققنان	خاور بلوچستان	۳۹۴۰	۱۵۰۰	۳ مرحله	بر پایه مطالعات پایاگر در (۱۳۷۵) ققنان از پایین به بالا از ۱) آذرآواری‌ها و گدازه‌های داسیتی، توف و ایگنیریت و ۲) گدازه‌های آندزیتی همراه با بامب‌های قشرانی تشکیل شده است.
۵ بزمان	باختر بلوچستان	۳۴۹۰	۳۱۵	۳ مرحله	شامل الف: تئروزن که قدیم به جدید ۱) لایلی توف تا توف‌برش‌های صورتی، ۲) توف‌برش به رنگ صورتی، قهوه‌ای و خاکستری و ۳) گدازه‌های آندزیتی و ب: کواترنری که از قدیم به جدید شامل ۱) توف و برش‌های آتشفشانی، ۲) گدازه آندزیتی پورفیری صورتی - خاکستری و ۳) گدازه آندزیتی تیره خاکستری تا سبز (شیحان و همکاران، ۱۳۹۴)
۶ مساحیم	جنوب بردسیر کرمان	۳۵۰۰	۶۲۵	۳ مرحله	مرحله اول با یک فوران فزونی‌گاماتیک همراه است که سبب ایجاد مواد آذرآواری از نوع سرخ و برش‌های گدازه‌ای زبرین که در دیواره کالدرا رخنمون دارند شده است. در مرحله دوم در طی فوران فزونی‌گاماتیک مواد آذرآواری جریان‌های گدازه، توده‌های نفوذی و کالدرای آن به وجود آمده‌اند و در مرحله سوم درون کالدرای آن مخروط‌های کوچک و نوک تیزی دیده می‌شوند که گاه تا ۲۰۰ متر از کف کالدرا بلندتر هستند (احمدی‌پور، ۱۳۲۲).
۷ پیدخوان	شمال شهرپایک کرمان	۳۸۰۰	۴۰۰	۳ مرحله	اولین فوران آن پیش از میوسن بیانی (سراوالین) و به صورت فزونی‌گاماتیک با تشکیل سرخ‌های آذرآواری آغاز شده است. پس از مدتی توقف، فاز بعدی فعالیت آن در ۱۲۸۸±۳۸۱۲ میلیون سال پیش با فوران‌های سترگ پلویک آغاز شده است و محصولات آن مقادیر زیادی مواد آذرآواری ریزشی و جریان‌های گدازه بوده‌اند. این فوران‌ها تا ۱۰۸۱۲±۱۷۶۶ میلیون سال پیش ادامه داشته‌اند. در سومین مرحله آن ۶۹۹±۱۰۱۷۵ میلیون سال پیش) دایک‌های حلقوی و شعاعی و کمی پس از آن توده نفوذی کوچکی (از نوع پلاگ) در آن به وجود آمده است (خلیلی مبرهن، ۱۳۹۰).

جدول ۴- وضعیت هر آتشفشان در معیارهای مورد ارزیابی.

آتشفشان	سن آخرین فوران (Ka)	شرايط زمین‌ساختی به وجود آورنده	فعالیت‌های پس از فوران	میزان فرسودگی مخروط آتشفشان
۱	دهاوند	۷۳ (حسن زاده و همکاران، ۱۳۸۰)	مهم‌ترین تظاهرات فعلی دریاوند شامل فورمول‌های پیرامون دهانه و چشمه‌های آبگرم نزدیک فاصه آن است (شاه‌بیگ، ۱۳۷۲).	فرسایش یخچالی در بالا است، فرسایش پیر یخچالی کمی پایین‌تر و فرسایش آبی در میان‌دست و پایین‌دست (فقهی و همکاران، ۱۳۸۸).
۲	سیلان	۷۵ (فتح‌اللهی و خیرخواه، ۱۳۹۴) طبق نظر حسن زاده	در اثر فورانش صفحه اقیانوسی تنیس به زیر صفحه ایران مرکزی (سنارزاده و همکاران، ۱۳۸۰) و بر پایه مطالعات (Rahimi et al., 2009) که طی آن ۹۵ زمین‌لرزه محلی با اندازه ۷/۸ تا ۶/۱ ارزیابی شده، این منطقه از دید زمین‌ساختی فعال ارزیابی شده است.	بر پایه تصویر ماهواره‌ای، فرسایش آبی و یخچالی در جدیدترین سطح این آتشفشان عمل کرده‌اند؛ ولی در میان این اشکال، سطح اولیه غیر فرسوده نیز به خوبی قابل شناسایی هستند (اسفندیاری درآباد و خاتم، ۱۳۸۶).
۳	سهند	۱۴۰ < (Jahangiri, 2007)	بر پایه مطالعات شاه‌بیگ (۱۳۷۲) چشمه‌های آبگرمی در حوضی آن به ویژه در لبقون، آذرشهر، کندوان، صحنه‌شیر و کریم وجود دارند.	آتشفشان سهند تحت کلدو کاو آب‌های جاری، یخچالی و پیر یخچالی قرار گرفته و فرسایش قابل ملاحظه‌ای را پشت سر گذاشته است (Asghari Moghadam & Allah Najib, 2006).
۴	تفتان	۱۰۰ (بیابانگرد، ۱۳۷۵)	تفتان فعالیت شدید فورولی دارد (بیابانگرد و همکاران، ۱۳۷۸) و چشمه‌های آب گرم آن توسط بومری (۱۳۸۴)، بیابانگرد (۱۳۷۵) و شاه‌بیگ (۱۳۷۲) مطالعه شده‌اند.	به طور کلی از دید فرسایش در وضعیتی مشابه مخروط سیلان به سر می‌برد.
۵	برهان	۱۰-۲۰ (درویش زاده، ۱۳۷۳)	در محدوده پیرامون آن چشمه‌های آبگرم بسیاری وجود دارد (شاه‌بیگ، ۱۳۷۲).	مخروط برهان فرسایش کثیری نسبت به تفتان دچار شده و شیب دامنه‌های آن تندتر است.
۶	مساجم	۷۸۰۰ (احمدی پور، ۱۳۷۲)	بدون فعالیت‌های فورارولی و چشمه‌های آبگرم است.	مساجم دچار فرسایش قابل ملاحظه‌ای شده است و دره‌های ژرف و پلایه‌ها در آن شکل گرفته‌اند که به عنوان بقایای سطح اولیه در نظر گرفته می‌شوند (Hassanzadeh, 1993).
۷	پیدخوان	۱۰۱۷۰±۶۹۰ (جلیلی، ۱۳۹۰)	در حاشیه شمال خاوری آن، سه دهانه در چشمه آبگرم وجود دارد ولی آنها در ارتباط با گسل فعال لانزار شکل گرفته‌اند (عباس نژاد، ۱۳۸۵).	دارای کالدرای فرسایشی گسترده‌ای است که در بخش‌های خاور و جنوبی آن بقایای سطوح اولیه این آتشفشان دیده می‌شود (ذهاب‌ناظوری، ۱۳۹۲).

جدول ۵- ماتریس تصمیم‌گیری.

X_1	X_2	X_3	معیارها	گزینه‌ها
X_{11}	X_{12}	X_{11}	A_1	A_1
T_{21}	T_{22}	T_{21}	A_2	A_2
T_{31}	T_{32}	T_{31}	A_m	A_m

جدول ۶- ماتریس تصمیم‌گیری منبعث از دید خبرگان و کارشناسان که در آن معیارهای کیفی به‌صورت کمی در آمده و سپس از میانگین‌گیری ماتریس شده‌اند.

امتیاز وضعیت	امتیاز وضعیت زمین‌ساختی	امتیاز سواناها و آبگرم	سن آخرین فوران (Ka)	معیارها
۷/۶	۶/۴	۷/۶	۷۳	دهاوند
۴/۸	۲/۶	۳/۲	۱۴۰	سهند
۵/۶	۸/۲	۵/۴	۵۸	سیلان
۶/۸	۹	۷/۲	۵۰	تفتان
۷/۲	۹	۵/۴	۳۱	برهان
۲/۸	۱	۱	۱۰۰۰۰	پیدخوان
۳/۴	۱	۱	۷۸۰۰	مساجم

جدول ۷- ماتریس مقادیر P_{ij}

معیارها گزینه‌ها	سن آخرین فوران (هزار سال)	سولفاتارها و آبگرم	وضعیت زمین ساختی	وضعیت فرسایشی
دماوند	۰/۰۰۵۷	۰/۲۴۶	۰/۱۷۲	۰/۱۹۸
سهند	۰/۰۱۰	۰/۱۰۳	۰/۰۶۹	۰/۱۲۵
سیلان	۰/۰۰۴۴	۰/۱۷۵	۰/۲۲۰	۰/۱۴۶
تفتان	۰/۰۰۳۸	۰/۲۳۳	۰/۲۴۱	۰/۱۷۸
یزمان	۰/۰۰۲۳	۰/۱۷۵	۰/۲۴۱	۰/۱۸۸
بیدخوان	۰/۷۶۴	۰/۰۳۲	۰/۰۲۶	۰/۰۷۳
مساحیم	۰/۲۱۳	۰/۰۳۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸۹

 جدول ۸- محاسبه آنتروپی (E_j)، عدم اطمینان (d_j)، وزن هر شاخص (W_j) و رتبه‌بندی اهمیت هر شاخص در ارزیابی پتانسیل خطر آتشفشان‌های چینه‌ای ایران.

معیارها	سن آخرین فوران (هزار سال)	سولفاتارها و آبگرم	وضعیت زمین ساختی	وضعیت فرسایشی
E_j	۰/۲۳۳	۰/۸۹۵	۰/۸۶۹	۰/۹۶۹
d_j	۰/۷۶۷	۰/۱۰۵	۰/۱۳۱	۰/۰۳۱
W_j	۰/۷۴۱	۰/۱۰۱	۰/۱۲۶	۰/۰۲۹
رتبه	۱	۳	۲	۴

جدول ۹- ماتریس‌های تصمیم‌ی مقیاس شده غیر وزن‌دار و وزن‌دار.

معیارها گزینه‌ها	سن آخرین فوران (K_a)		سولفاتارها و آبگرم		وضعیت زمین ساختی		وضعیت فرسایشی	
	وزن دار	غیر وزن دار	وزن دار	غیر وزن دار	وزن دار	غیر وزن دار	وزن دار	غیر وزن دار
دماوند	۱۰۰۶	۱۳۶۰	۰/۱۰۱	۱	۰/۰۸۹	۰/۷۱	۱	۰/۰۲۹
سهند	۵۲/۹۲	۷۱/۴۲	۰/۰۴۲	۰/۴۲	۰/۰۳۵	۰/۲۸	۰/۶۳	۰/۰۱۸
سیلان	۱۲۷/۷۵	۱۷۲/۴۱	۰/۰۷۱	۰/۷۱	۰/۱۱۴	۰/۹۱	۰/۷۳	۰/۰۲۱
تفتان	۱۰۹/۸۱	۱۴۸/۲	۰/۰۹۴	۰/۹۴	۰/۱۲۶	۱	۰/۸۹	۰/۰۲۵
یزمان	۱۸۳/۰۱	۲۴۶/۹۹	۰/۰۷۱	۰/۷۱	۰/۱۲۶	۱	۰/۹۴	۰/۰۲۷
بیدخوان	۰/۷۴۱	۱	۰/۰۱۳	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۱۱	۰/۳۶	۰/۰۱۰
مساحیم	۲/۶۴	۳/۵۷	۰/۰۱۳	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۱۱	۰/۴۴	۰/۰۱۲

جدول ۱۰- امتیاز و رتبه هر گزینه حاصل از رابطه ۹.

گزینه	دماوند	سهند	سیلان	تفتان	یزمان	بیدخوان	مساحیم
امتیاز	۱۰۰۶/۲	۵۳/۰۱	۱۲۷/۹	۱۱۰/۰۵	۱۸۳/۲	۰/۷	۲/۶
رتبه	۱	۵	۳	۴	۲	۷	۶

کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۶ ص.
- احمدی پور، ح.، ۱۳۷۲- بررسی دینامیسم فعالیت های آتشفشانی کوه مزاحم (شهر بابک)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۶۶ ص.
- اسفندیاری درآباد، ف. و خیام، م.، ۱۳۸۶- تحلیلی بر اثرات ژئومورفیک برفساب در دامنه شرقی سیلان، پژوهش های جغرافیایی، شماره ۶۰، صص. ۴۹ تا ۶۰.
- اصغری پور، م. ج.، ۱۳۸۳- تصمیم گیری چند معیاره، تهران، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران، ۳۹۸ ص.
- امامی، م. ه.، ۱۳۶۸- آتشفشان دماوند و بررسی احتمال فوران مجدد آن، گزارش سازمان زمین شناسی کشور، ۹۹ ص.
- امامی، م. ه.، ۱۳۷۱- بررسی احتمال فوران مجدد آتشفشان دماوند (فاز اول: بررسی پتروژنز و نحوه فعالیت آتشفشان)، مؤسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، پروژه تحقیقاتی شماره ۱۱۱، ۲۰۲ ص.
- امامی، م. ه.، ۱۳۷۹- ماگماتیسم در ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰ ص.
- بومری، م.، ۱۳۸۴- بررسی منابع انرژی زمین گرمایی و کانی سازی آتشفشان تفتان با استفاده از ایزوتوپ های پایدار آب، مجله جغرافیا و توسعه، صص. ۲۵ تا ۴۰.
- بهرامی، ش.، یمانی، م. و علوی پناه، ک.، ۱۳۸۷- تحلیل مورفولوژی شبکه زهکنی در مخروط آتشفشانی تفتان، مجله پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۵، صص. ۶۱ تا ۷۲.
- بیابانگرد، ح.، ۱۳۸۵- پتروگرافی، ژئوشیمی، ژئوکرونولوژی و نحوه فعالیت آتشفشان تفتان واقع در کمر بند مکران استان سیستان و بلوچستان، رساله دکترا، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۲۶ ص.
- بیابانگرد، ح.، مرادیان، ع. و بوالی، ی.، ۱۳۸۸- بررسی هیروژئوشیمی چشمه های معدنی آتشفشان تفتان و ارتباط آنها با توده های سنگی سخت منطقه. مجله علوم زمین، سال نوزدهم، شماره ۷۳، صص. ۹۹ تا ۱۰۸.
- پیرمحمدی، ف.، عامری، ع.، جهانگیری، ا.، مجتهدی، م.، هاوان چن، ج. و کسکین، م.، ۱۳۹۰- کانی شناسی، سنگ شناسی و سنگ زایی مجموعه آتشفشانی سهند، شمال غرب ایران، مجله بلورشنی و کانی شناسی ایران، سال ۱۹، شماره ۱، صص. ۸۳ تا ۱۰۲.
- حسن زاده، ج.، پند آموز، ع.، سون جان، د.، استو کلی، د. و باشکوه، ب.، ۱۳۸۰- آتشفشان دماوند: نگاهی به تاریخ تکوین آن بر پایه داده های ژئوشیمی و سن سنجی جدید، مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تهران، صص. ۴۴ تا ۴۹.
- خلیلی مبرهن، ش.، ۱۳۹۰- آتشفشان شناسی، ژئوشیمی و پتروژنز آتشفشان بیدخوان واقع در جنوب بردسیر، استان کرمان. رساله دکترای سنگ شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۶۵ ص.
- درویش زاده، ع.، ۱۳۸۳- آتشفشان ها و رخساره های آتشفشانی، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۸۷ ص.
- ذهاب ناظوری، س.، ۱۳۹۲- بررسی تطبیقی مورفوتکتونیک و مورفودینامیک لندفرم های مخروط های بیدخوان و مساحیم در کواترنری، رساله دکترای جغرافیا، گرایش ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، ۲۸۵ ص.
- زبردست، ا.، ۱۳۸۹- کاربرد فرایند تحلیل شبکه ای (ANP) در برنامه ریزی شهری و منطقه ای، نشریه هنرهای زیبا، شماره ۴۱، صص. ۷۹ تا ۹۰.
- سارزاده قدیمی، ی.، قیطانچی، م. ر. و محمدی، ا.، ۱۳۸۰- فعالیت لرزه ای قابل توجه در ناحیه سرعین واقع در جنوب غربی آتشفشان سیلان، مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تهران، صص. ۵۱۱ تا ۵۱۴.
- شاه بیگ، ا.، ۱۳۷۲- زمین شناسی ایران، آب های معدنی و گرم ایران. سازمان زمین شناسی کشور. تهران، ۴۰۲ ص.
- شریفی، ر.، میرآبادی، ا. و ارفع، ا.، ۱۳۹۰- بررسی و انتخاب سیستم سیگنالینگ مناسب به روش آنتروپی- پرومی برای راه آهن چابهار- زاهدان، مهندسی حمل و نقل، سال دوم، شماره چهارم، صص. ۳۳۵ تا ۳۴۶.
- شعبان، ک.، قلمقاش، ج.، وثوقی عابدینی، م. و مسعودی، ف.، ۱۳۹۴- زمین شناسی، ژئوشیمی، و پتروژنز آتشفشان بزمان: جنوب خاوری ایران. فصلنامه علوم زمین، سال ۲۴، شماره ۹۵، صص. ۹۹ تا ۱۱۰.
- عباس نژاد، ا.، ۱۳۸۵- گزارش طرح بررسی اثرات سیلاب فروردین ماه ۱۳۸۲ منطقه بردسیر و ارزیابی نقش عوامل انسانی در میزان خسارات، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده علوم، ۶۷ ص.
- عطائی، م.، ۱۳۸۹- تصمیم گیری چند معیاره، انتشارات دانشگاه شاهرود، ۳۳۳ ص.
- فتح الهی، م. و خیرخواه، م.، ۱۳۹۴- منشأ و جایگاه تکتونوماگمایی سنگ های آتشفشانی کواترنری سیلان. فصلنامه کواترنری ایران، دوره ۱، شماره ۲، صص. ۱۲۵ تا ۱۳۶.
- قربانی، م.، ۱۳۸۲- آتشفشان شناسی با نگرشی بر آتشفشان های ایران. نشر آریز زمین، ۳۵۶ ص.
- محمدمرادی، ا. و اختر کاوان، م.، ۱۳۸۸- روش شناسی مدل های تصمیم گیری چند معیاره، فصلنامه آرمان شهر، شماره ۲، صص. ۱۱۳ تا ۱۲۵.
- معین وزیری، ح. و امین سبحانی، ا.، ۱۳۵۷- آتشفشان تفتان، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۴۲ ص.
- معین وزیری، ح. و امین سبحانی، ا.، ۱۳۵۶- آتشفشان سهند از نظر ولکانولوژی و ولکانوسدیمانولوژی، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۶۰ ص.
- مقیمی، ا.، بدری فر، م. و زراعی نژاد، م.، ۱۳۸۸- مورفودینامیک توده آتشفشانی دماوند و مدیریت محیط با استفاده از GIS و RS، مجله علوم زمین، شماره ۷۲، صص. ۶۳ تا ۷۲.
- نوری جگر کندی، ت. و محمدی اسکونی، م.، ۱۳۸۹- استفاده از نسبت های باندی برای تشخیص منابع ژئوترمال با استفاده از داده های ASTER در منطقه سیلان، اولین کنفرانس سالانه انرژی های پاک، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان، صص. ۱ تا ۱۲.

References

- Aczel, J. and Saaty, T. L., 1983- Procedures for synthesizing ratio judgments, *Journal of Mathematical Psychology* 27: 93-102.
- Alberico, I., Lirer, L., Petrosino, P. And Scandone, R., 2007- Volcanic hazard and risk assessment from pyroclastic flows at Ischia island (southern Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 171: 118-136.
- Asghari moghadam, A. and Allaf-Najib, M., 2006- Hydrogeologic characteristics of the alluvial tuff aquifer of northern Sahand slopes, Tabriz, Iran. *Hydrogeology journal* 14: 1319-1326.
- Baudrite, C., Guyonnet, D. and Dubois, D., 2005 – Postprocessing the hybrid method for addressing uncertainty in risk assessment, *Journal of Environmental Engineering* 131 (12): 1750-1754.
- Cas, R. A. F. and Wright, J. V., 1987- *Volcanic Successions*. Publisher: Chapman and Hall; New edition, 544 pages.
- Crandell, D. R., Booth, B., Kusumadinata, K., Shimozuru, D., Walker, G. P. L. and Westercamp, D., 1985- *Source-Book for Volcanic Hazard Zonation*. UNESCO. 97 pages.

- Davidson, J. and De Silva, S., 2000- Composite Volcanoes. In: Sigurdsson, H. (Eds.), Encyclopedia of volcanoes. San Diego, cal, Academic press: 663- 681.
- Farhoudi, G. and Karig, D. E., 1977- Makran of Iran and Pakistan as an active arc system. *Geology* 5 (11): 664-668.
- Hassanzadeh, J., 1993- Metalogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr-e-Babak area Kerman province). University of California, Los angeles: 408 .
- Hwang, C. L. and Yoon, K., 1981- Multiple Attribute Decision Making: methods and applications : a state-of-the-art survey. Springer-Verlag: 259 .
- Jahangiri, A., 2007- The study of Sahand strata-volcanoes pyroclastic sequence in NW Iran (E.Azerbaijan Province). *Geophysical Research Abstracts* 9 (00300): 25-32.
- Keller, E. A. and DeVecchio, D. E., 2012- Natural Hazards, earth processes as hazards, disasters and catastrophes, third edition, by pearson Education Inc :554 .
- Nekhay, O., Arriaza, M. and Boerboom, L. G. J., 2009- Evaluation of soil erosion risk using analytic network process and GIS: a case study from Spanish mountain olive plantations, *Journal of environmental management*, 90 (10): 3091–3104.
- Parfitt, E. A. and Wilson, L., 2008- Fundamental of physical volcanology.blackwell publishing Ltd: pages.
- Quesada, J. F. A. and Del Pozza, M. and Blanco, J. L., 2007- volcanic hazard zonation of the Nevado de Toluca volcano, central Mexico.*Nat Hazards* 41: 159-180.
- Rahimi, H., Hamzehloo, H. and Kamalian, N., 2009- Estimation of coda and shear wave attenuation in the volcanic area in SE sabalan mountain, NW Iran. *Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences* 58(2): 244-268.
- Tacnet, J. M., Hubert, M. B., Dezert, J. and Richard, D., 2010- Applying new uncertainty related theories and multicriteria decision analysis methods to snow avalanche risk management, *International Snow Science Workshop Squaw Valley, USA (ISSW 2010)*.
- Tacnet, J. M., Hubert, M. B., Dezert, J. and Richard, D., 2012- decision support tools for natural hazards management under uncertainty, new approaches based on multicriteria decision analysis and evidential reasoning, *12th congress interpraevent Grenoble, France: 597-608*.
- Thouret, J. C., 2010- Volcanic hazards and risk: a geomorphological perspective. In: Ayala, I.S., and Goudie, A., (Eds.), *Geomorphological Hazards And Disaster Prevention*. Cambridge university press, Cambridge: 13-32.
- Tilling, R. I., 2005- *Volcano Hazards, from Marti, J., Ernst, G.J., Volcano And The Environment*. Cambridge University Press: 471.
- Wu, X., Ren, F. and Niu, R., 2014- Landslide susceptibility assessment using object mapping units, decision tree, and support vector machine models in the Three Gorges of China, *Environmental Earth Sciences* 71: 4725–4738.

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

A. Khaiatzadeh^{1*} and A. Abbasnejad²

¹M. Sc., Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

²Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 2014 November 18

Accepted: 2016 August 21

Abstract

Multi-Criteria Decision Making methods have progressed extensively in the past decades and have been applied in various disciplines. Application of them in different fields of geology, especially in assessment of geological hazards which are usually multi-criteria in character, can be very helpful. Studies such as the present study will widen their uses in various fields of geology. Volcanic eruptions in the past centuries attest that stratovolcanoes are more hazardous than other volcanoes and their activity may be disastrous. Hence, in this study, multi-criteria decision making methods of EN-SAW and ANP have been applied to assess and rank the reactivation hazard of Iranian stratovolcanoes (Damavand, Taftan, Bazman, Sahand, Sabalan, Bidkhan and Mesahim) as a case study. So, firstly, the criteria useful in their hazard assessment were selected which include the age of the latest eruption, the presence or absence of tectonic regime creating the volcano, the status of post volcanic activities (e.g. hot springs) and the extent of erosion. Afterwards, they were scored by several experts and lastly, by applying EN-SAW and ANP methods and using Super Decision software, the reactivation hazard scores of these volcanoes were determined and they were ranked. In both these methods, the Damavand volcano ranked first. So, its reactivation potential is higher than other ones and must given the first priority, its threats must be evaluated, its hazard zoning maps should be prepared and (as a kind of monitoring) a seismic station can be established. According to the applied methods, Bazman, Taftan and Sablan volcanoes acquired nearly the same scores. So, ranking after Damavand and it is recommended that they be considered as semi-active (dormant) volcanoes. The condition for Sahand volcano is not clear. However, Bidkhan (in Bardsir town of Kerman) and Masahim (North of Shahrebabak town) both acquired very low scores. So, they are considered as inactive and are not hazardous.

Keywords: Volcanic hazard, Decision matrix, Shannon entropy, SAW, ANP, Super decision, Damavand.

For Persian Version see pages 137 to 146

*Corresponding author: A. Khaiatzadeh; E-mail: a.khaiatzadeh@gmail.com