

ارزیابی خطرپذیری رخداد سیل در حوضهٔ تجن با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی

امیر حسین محمدپور^۱، علیرضا وفائی نژاد^{۲*}

۱. کارشناس ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکدهٔ مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشکدهٔ مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۱/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۵/۰۵)

چکیده

در پژوهش حاضر سعی شده است تا ارزیابی مناسبی از وضعیت سیل‌خیزی و خطرپذیری سیل برای حوضهٔ تجن ارائه شود. به این منظور، با تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل و تحلیل حساسیت سیل‌خیزی برای حوضه، مناطق مستعد شناسایی و میزان خطرپذیری برای حوضه سنجش شده است. به این منظور، از مدل تلفیقی مبتنی بر تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی (F-AHP) به منظور اولویت‌بندی، شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد سیل (شامل عوامل زمین‌شناسی، اقلیمی و انسانی و...) و همچنین، تعیین میزان تأثیر هر یک از شاخص‌های ارزیابی سیل (شامل سرعت جریان، عمق جریان، متوسط بارش، تبخیر، شیب، الگوی زهکشی، دشت سیلابی، شبکهٔ راه‌ها و پوشش زمین) بهره گرفته شده است. این اطلاعات بعد از ارزیابی محاسباتی فازی در MATLAB به محیط GIS انتقال یافته و نقشه‌های شاخص فازی‌سازی شده/ غیرفازی‌سازی شده منطقه تهیه شده است. هدف از این کار، افزایش دقت و همچنین به‌کارگیری تلفیقی مدل فازی است. این نقشه‌ها برای شناسایی مناطق حساس سیل (نقشهٔ خطرپذیری) و پهنه‌بندی مخاطره (در ۵ گروه پرخطر تا کم‌خطر) به کار برده شده است. با توجه به نتایج حاصل از سنجش خطرپذیری در حوضهٔ تجن مشخص شده است که مهم‌ترین تمرکز مناطق حساس سیل در محدودهٔ رودخانهٔ اصلی نسبت به سایر بخش‌ها و در محدودهٔ دلتای رودخانه در مصب است. همچنین، با توجه به الگوی زهکشی منطقه به‌خصوص در بخش شرقی حوضه، مشخص شده است که این مناطق نیز از حساسیت زیاد سیل‌خیزی برخوردار بوده که با توجه به ساختار زهکشی‌ها می‌توان بیان کرد که تأثیر رخداد به صورت فعالیت‌های زمین‌شناسی است.

کلیدواژگان: ارزیابی خطر سیل، تحلیل سلسله‌مراتبی، حوضهٔ تجن، سیستم اطلاعات مکانی، منطق فازی.

مقدمه

سیل را می‌توان به عنوان فراوان‌ترین رخداد از گروه پدیده‌های مخاطرات طبیعی معرفی کرد [۱] که به لحاظ آماری بیشترین خسارت‌های جانی و مالی را در سرتاسر دنیا به همراه داشته [۲] و بنا بر گزارش‌های ارائه‌شده، خسارت‌های ناشی از رخداد سیل، حدود ۴۰ درصد آسیب‌ها و خسارت‌های مربوط به تمامی بلایای طبیعی است [۳] که علت مرگ‌ومیر بیش از ۵۳ هزار انسان در دهه اخیر بوده است [۴]. بنابراین، با در نظر گرفتن فراوانی رخداد سیل و امکان دوره بازگشت پیوسته آن؛ باید در مدیریت بحران و برنامه‌ریزی‌های سلامت اجتماعی و توسعه پایدار در نظر گرفته شود.

تحلیل حساسیت و خطرپذیری سیل به عنوان یکی از رویکردهای مهم و کارآمد مطرح در زمینه ارزیابی خطر سیل است که امروزه به عنوان یک نقطه عطف در مدیریت بحران، مدیریت منابع آب و تحلیل مخاطرات طبیعی مطرح شده است [۵ و ۶]. سیل در ایران پیوسته رخ داده و سبب آسیب‌رسانی و خسارت‌ها در استان‌های مختلف شده است که می‌تواند در ابعاد و مقیاس‌های گوناگون طبقه‌بندی شود. برای مثال، یکی از رخداد‌های جدید سیل مربوط به سیل استان سیستان و بلوچستان در دی‌ماه ۱۳۹۸ است که با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در شبکه‌های اجتماعی ۴۰ درصد جمعیت و ۷۰ درصد روستاهای مسیر خود را تحت تأثیر قرار داده است [۷]. با توجه به چنین مسائلی، ضرورت به‌کارگیری رویکردهایی که امکان ارزیابی، تحلیل خطرپذیری سیل، ارزیابی ریسک و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی و حساسیت رخداد سیل را داشته باشد؛ بسیار پراهمیت هستند. این رویکردها امکان شناسایی مناطق حساس را دارند و در مدیریت بحران بسیار کارآمد عمل می‌کنند [۸].

مهم‌ترین چالش برای مدیریت بحران، تحلیل حساسیت و ارزیابی خطرپذیری برای مخاطرات طبیعی مانند زلزله، زمین‌لغزش، سیل، آتشفشان، جریان گِل، فرونشست، کارست و... است [۹-۱۱]. به عنوان یک نگرش جهانی که توسط سازمان ملل/دپارتمان خدمات بشردوستانه ارائه شده است؛ خطرپذیری به عنوان یک عامل آسیب‌رسان مبتنی بر مخاطرات طبیعی که امکان محاسبه ریاضیاتی و اندازه‌گیری کمی یا کیفی توسط رویکردهای مختلف قطعی یا احتمالاتی را دارد، تعریف

شده است [۱۲] که امکان به‌کارگیری نتایج آن در ارزیابی‌های مدیریتی مانند مدیریت بحران و توسعه پایدار وجود دارد. بر این اساس، روش‌های به‌کارگرفته‌شده باید انعطاف‌پذیری کافی برای تلفیق با داده‌های آنالیز مکانی، بررسی میدانی و عملیات صحرائی، اطلاعات سنجش از دور، سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، ارزیابی‌های آماری و احتمالی و... را داشته باشند؛ که بتوانند دقیق‌تری تهیه کنند و ارائه دهند [۱۳].

رویکردهای مختلفی توسط محققان برای ارزیابی حساسیت مخاطرات و بلایای طبیعی توسعه داده شده و به کار گرفته می‌شوند که در این میان، ارزیابی خطر و حساسیت سیل و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطرپذیری سیل یکی از دستاوردهای مهم هستند. تحلیل حساسیت به خطر سیل^۱ در سطوح مختلف مدیریت بحران به طور چشم‌گیری کارآمد بوده و امکان اتخاذ تصمیم‌های مبتنی بر ارزیابی تحلیل چندوظیفه‌ای را فراهم کرده است [۱۵-۱۸]. در این میان، به‌کارگیری رویکردهای تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ (AHP) و سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره^۳ (MCDM) کاربردها و موفقیت‌های زیادی را به خود اختصاص داده‌اند [۱۹].

به طور کلی، AHP رویکردی مبتنی بر تکنیک ساختاری و تحلیل ریاضیاتی است که به منظور ساماندهی و تحلیل ماتریس‌های تصمیم پیچیده به کار برده می‌شود. هدف از پیاده‌سازی این رویکرد سلسله‌مراتبی و فرایندی دست یافتن به تصمیم متناسب و بهینه است که توسط ساعتی در دهه ۱۹۷۰ برای نخستین بار ارائه شد [۲۰]. این رویکرد بر پایه سیستم خبرگی و قضاوت نیروی خبره پیاده‌سازی شده است و کاربرد ویژه‌ای در تصمیم‌گیری گروهی مبتنی بر MCDM برای پوشش گسترده‌ای از موقعیت‌های تصمیم‌گیری دارد [۲۱-۲۳].

پیشینه تحقیق

تحلیل حساسیت به سیل به عنوان یکی از رویکردهای ارزیابی کاربردی در ارزیابی خطرپذیری سیل به شمار می‌آید که به طور گسترده در تحلیل‌های مدیریت بحران و مخاطرات طبیعی استفاده می‌شود. گوها و همکاران (۲۰۰۴) بیان داشتند که طی دوره‌ای ۳۰ ساله، ۲۱۶۲ سیل بزرگ و

1. Flood Risk Susceptibility
2. Analytic Hierarchy Process
3. Multiple-criteria decision-making

پرخطر، خطر متوسط و کم‌خطر طبقه‌بندی کرد [۳۱]. حمامی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از رویکرد تلفیقی AHP-MCDM و GIS توانستند نقشه‌های تحلیل حساسیت و پهنه‌بندی خطرپذیری سیل را برای کشور تونس فراهم کنند. آنها ابتدا با شناسایی پارامترهای مؤثر بر رخداد سیل اقدام به طبقه‌بندی و تعیین میزان تأثیر پارامترها کرده و سپس، نقشه‌های ارزیابی خطر سیل را از روی این عوامل تهیه کردند [۳۲]. سوسوژی و همکاران (۲۰۱۹) طی مطالعه‌ای از توانایی رویکرد AHP-MCDM و امکان تبدیل آنها در GIS برای تهیه نقشه‌های سیل‌خیزی در منطقهٔ جنوبی و حوضهٔ خشک در این منطقه استفاده کردند.

روش کار (مواد و روش‌ها)

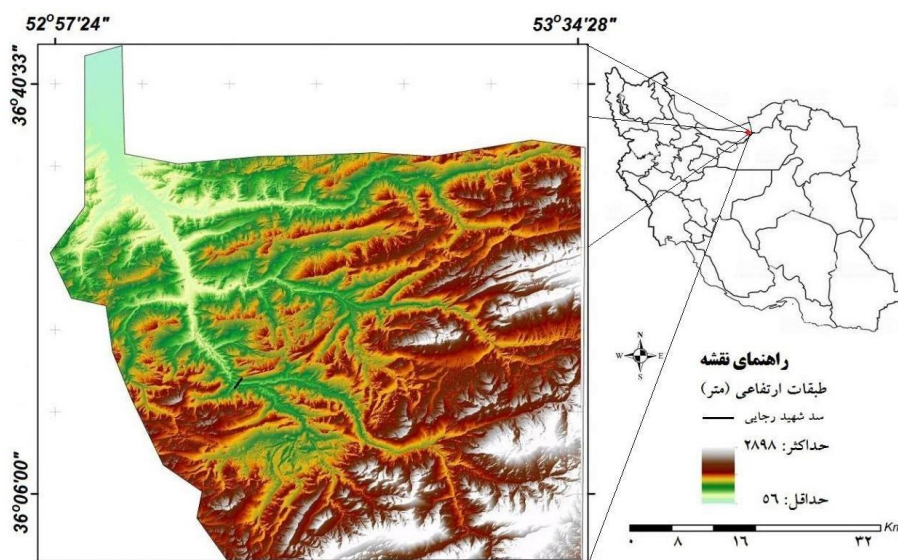
در مطالعه حاضر سعی شده است با به‌کارگیری این مزایا، میزان خطرپذیری برای رخداد سیل در حوضهٔ تجن را تحلیل کند. به این منظور، از روش تلفیقی AHP-MCDM با منطق فازی بهره گرفته شده است. بر این اساس، نتایج ارزیابی به صورت لایه‌های دیجیتالی درآمده و در محیط GIS تلفیق شده است که می‌تواند در پهنه‌بندی و شناسایی مناطق حساس برای سیل‌خیزی به کار برده شود. بنابراین، مطالعه حاضر به صورت توصیفی-پیمایشی پیاده‌سازی شده است. به این منظور، مراحل ارزیابی به ترتیب در گام‌های مطالعه کتابخانه‌ای (که برای شناسایی و طبقه‌بندی عوامل مؤثر در رخداد سیل‌ها از روی مقالات، پایان‌نامه‌ها، گزارش‌ها و... تهیه شده است)، ارزیابی‌های میدانی (که به منظور سنجش میزان تأثیرگذاری-تأثیرپذیری عوامل مؤثر در رخداد سیل در منطقه بررسی شده، پیاده‌سازی شده است) و مدل‌سازی‌های کامپیوتری قابل دسته‌بندی است. در ارزیابی میدانی از سیستم خبرگی برای شناسایی عوامل و با استفاده از رویکرد پرسشنامه‌ای بهره گرفته شده است که در آن از ۵۰ نیروی متخصص و استاد دانشگاه فعال در زمینه مدیریت بحران، زمین‌شناسی، مدیریت منابع و مهندسی آب استفاده شده است. نتایج ارزیابی در دو مرحله اجرای مدل‌ها و صحت‌سنجی داده‌ها توسط نیروی خبره بررسی شده است. به‌کارگیری رویکرد F-AHP به دلیل پوشش عدم قطعیت‌های ارزیابی معمولاً نتایج بسیار مناسب‌تر و با دقت بیشتری را ارائه می‌دهد. اما با این حال، برای کاهش خطای محاسبات اطلاعات توسط مدل فازی در نرم‌افزار MATLAB

درخور توجه در سطح جهان رخ داده است که ۳۴ درصد کل رخدادهای مربوط به مخاطرات طبیعی در دنیا را شامل می‌شود. این رخدادهای خسارت‌هایی حدود ۲/۶ میلیارد دلار را بر کشورهای مختلف وارد کرده‌اند. این مسئله سبب شده که جایگاه سیل‌خیزی و تحلیل خطرهای ناشی از سیل به صورت درخور توجهی در دهه‌های اخیر افزایش یابد [۲۴] و [۲۵]. فرناندز و لوتز (۲۰۱۰) با به‌کارگیری GIS و امکان ترکیب نتایج با داده‌های مربوط به رویکرد AHP-MCDM میزان خطرپذیری سیل برای مناطق شهری در ایالت توچمان در ویتنام را ارزیابی کردند [۲۶]. کین و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از معیارهای محرک مانند شرایط زمین‌شناسی، شرایط توپوگرافی، بارش، فراوانی سیلاب و پوشش گیاهی به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در رخداد سیل برای منطقهٔ فیولینگ در چین، نقشه‌های خطرپذیری و پهنه‌بندی سیل را برای منطقه تهیه کردند [۲۷]. اسماعیل و همکاران (۲۰۱۳) نقشهٔ آسیب‌پذیری سیل در بخشی از رودخانهٔ کادانا تهیه کردند. محققان یادشده با شناسایی عوامل مؤثر و همچنین طبقه‌بندی اطلاعات مربوط به مناطق مستعد رخداد سیل، نقشهٔ پهنه‌بندی سیل را در سه گروه خطرپذیری زیاد، متوسط و پایین استخراج کرده و اقدام به تحلیل حساسیت سیل‌خیزی کردند [۲۸]. آرمناکیس و نیروباما (۲۰۱۴) خطر سیل‌خیزی در شهر تورنتوی کانادا را بر اساس معیارهای جمعیت، توسعه اقتصادی، ویژگی‌های مورفولوژیکی و روند بارش ارزیابی کردند و بر حسب آسیب‌پذیری جمعیت و تنوع مورفولوژیکی اراضی با استفاده از GIS نقشهٔ فضایی خطر سیل را ارائه دادند [۲۹]. دمیر و کیسی (۲۰۱۶) با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و شبیه‌سازی جریان سیل با دورهٔ بازگشت‌های مختلف و با بهره‌گیری از مدل HEC-RAS نقشهٔ خطر سیل را برای رودخانهٔ مرت ترکیه تهیه کردند و از GIS برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی در منطقه بهره گرفتند [۳۰]. داس (۲۰۱۸) طی مطالعه‌ای، وضعیت سیل‌خیزی را در حوضهٔ آبریز ویتارنا در هندوستان ارزیابی کرد. داس با به‌کارگیری رویکرد تلفیقی AHP-MCDM و GIS نقشهٔ پهنه‌بندی خطر سیل و نیز تحلیل حساسیت سیل‌خیزی را تهیه کرد. ایشان با در نظر گرفتن معیارهای اقلیمی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیک و انسانی شرایط خطر سیل را در حوضهٔ آبریز به سه حالت مناطق

منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز تجن در استان مازندران و در شمال ایران واقع شده است. این حوضه آبریز حدود ۴ هزار کیلومتر مربع را شامل شده است که در بخش جنوبی دریای خزر و بخش شمالی رشته کوه‌های تیزآباد قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه بررسی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

پیاده‌سازی شده و سپس، نتایج حاصل با مشخص کردن ضرایب تأثیر فازی در محیط GIS انتقال یافته است. این مسئله سبب کاهش خطاهای محاسباتی به خصوص خطاهای داده‌های ورودی که معمولاً با انتقال مستقیم داده‌ها به محیط GIS ممکن است همراه باشد، بسیار کارآمد است و سبب بهبود درخور توجهی در دقت محاسبات می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه بررسی شده

به لحاظ زمین‌شناسی حوضه آبریز تجن عموماً با سازندهای کواترنری تا عهد حاضر پوشیده شده که بخش‌های شمالی حوضه را در بر می‌گیرند. برون‌زدهای سنگی مربوط به سازندهای مختلف در بخش جنوبی این منطقه گسترش یافته است. این سازندها گستره گوناگونی را شامل شده و از سن دونین تا نئوژن را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، در بخشی از مناطق سازندهای پالئوژنی مانند بازالت-اندزیت‌ها نیز برون‌زد دارند. ساختار اصلی تکتونیکی منطقه از ساختار تکتونیک رشته‌کوه البرز-کپه‌داغ پیروی می‌کند که از تکتونیک صفحه‌ای حاصل از برخورد دو صفحه زمین‌ساختی اوراسیا و ایران مرکزی به وجود آمده است. حرکت صفحه تکتونیک عربی به سمت صفحه اوراسیا و ایران مرکزی سبب ایجاد سیستم تکتونیک فشارشی (اعمال نیروهای تکتونیک به صورت فشارنده) در منطقه شده است. ساختار کلی سیستم گسله و زمین‌ساختی در منطقه به صورت شمال شرقی- جنوب غربی است که در برخی نقاط با ساختارهای شمالی-

به لحاظ توپوگرافی مرتفع‌ترین نقطه حوضه تجن در بخش جنوب شرقی به ارتفاع ۳۶۷۰ متر و پست‌ترین نقطه در منطقه بررسی شده در بخش شمالی با عمق ۲۶- متر از سطح دریای آزاد است که به عنوان سرانسیب دریای خزر شناخته می‌شود. همچنین، منطقه برخی مناطق محافظت‌شده زیست‌محیطی شامل دودانگه، چاردانگه و پارک ملی بولا دارد که نشان‌دهنده حساسیت زیاد این مناطق به لحاظ حفاظت زیستی است [۳۳].

بر پایه اطلاعات ارائه شده توسط سازمان هواشناسی کشور برای منطقه مازندران، به لحاظ اقلیمی، جزء مناطق معتدل و مرطوب است که متوسط تغییرات بارش آن به صورت ۸۳۴ میلی‌متر در سال است که در دی‌ماه با بارش ۱۶۶۸ میلی‌متر بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر، تغییرات دمایی سالیانه در محدوده بررسی شده ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد است که بیشترین دما مربوط به مردادماه با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد و کمترین آن به دی‌ماه با دمای ۴- درجه سانتی‌گراد مرتبط هستند [۳۴].

توسط منطق فازی، غیرفازی‌سازی^۳ و طبقه‌بندی نتایج می‌شود. روش AHP با شناسایی میزان وابستگی و یا استقلال معیارها/زیرمعیارهای سعی در حل مسائل کمی و کیفی کرده که از عملکرد خوبی برخوردار است. همچنین، منطق فازی با موفقیت در دسته‌بندی گزینه‌ها و ارائهٔ محدودیت‌های متغیرها برای مجموعه‌های فازی بر اساس توابع عضویت به منظور دستیابی به کلاس‌بندی دقیق‌تر؛ استفاده شده است. رویکرد تلفیقی منطق فازی و AHP که به نام روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (F-AHP) است، به طور درخور توجهی در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاری و تحلیل‌های فرایندی مبتنی بر ارزیابی شهودی سلسله‌مراتبی با عدم قطعیت‌های فراوان کاربرد دارد. مهم‌ترین مزیت به‌کارگیری روش F-AHP، ساختار سادهٔ این روش در تهیهٔ ماتریس‌های پیچیدهٔ تصمیم‌زن‌دهی شده است [۳۵].

در مطالعهٔ حاضر با استفاده از این مزیت، با رویکرد F-AHP ماتریس‌های مناسب برای ارزیابی خطر سیل خیزی در حوضهٔ آبریز تجن تهیه شده است. به‌کارگیری این مدل‌ها برای تصمیم‌گیری بهینهٔ چندمعیاری بر پایهٔ F-AHP توسط ورودی‌های فازی مثالی صورت گرفته که شرایط تخصیص پارامتری آن در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۲ فلوچارت فرایندی مربوط به رویکرد F-AHP است که در مطالعهٔ حاضر استفاده شده است.

یافته‌ها

قبل از پیاده‌سازی مدل جامع برای تحلیل خطر سیل خیزی باید چارچوبی را برای ایجاد ارتباط بین نتایج فازی و محیط GIS تهیه کرد. به این منظور، تمامی معیارها و زیرمعیارهایی که توسط مدل F-AHP طراحی و وزن‌دهی شده‌اند، توسط منطق فازی طبقه‌بندی شدند. جدول ۲ لیستی از پارامترهای وزن‌دهی شده برای معیارهای محرک شامل پارامترهای جغرافیایی، زمین‌شناسی، محیطی، اقلیمی و انسانی به همراه زیرمعیارهای ارزیابی ارائه داده است.

جنوبی جایگزین شده است. این ساختارها عموماً مربوط به درزه‌های آزادی و شبکه‌های برشی گسله‌ها هستند [۳۳].

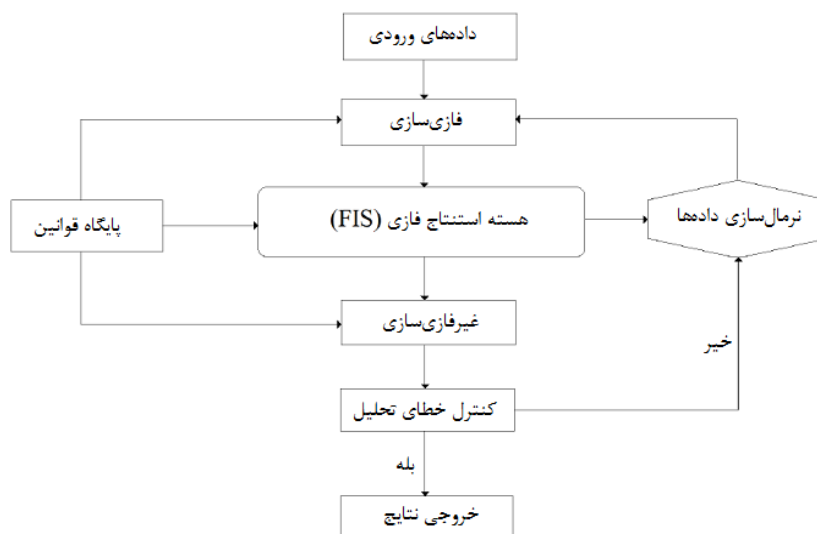
چارچوب طراحی و پیاده‌سازی

در مطالعهٔ حاضر سعی شده است ارزیابی مناسبی از شرایط سیل‌خیزی برای حوضهٔ آبریز تجن ارائه شود. به این منظور، عوامل مؤثر و محرک در رخداد سیل برای منطقهٔ بررسی‌شده، شناسایی شده و در تحلیل به کار رفته است. به این منظور، با رویکرد سیستم خبره و مطالعهٔ میدانی (پرسشنامه‌ای) از بین متخصصان تحلیل خطر سیلاب، جغرافیا، زمین‌شناسی و اساتید دانشگاه که حدود ۵۰ نفر بودند، به روش توصیفی-پیمایشی بهره‌گرفته شده است. علاوه بر این، به منظور کاهش عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی و همچنین یکنواخت‌سازی اطلاعات، از دستورالعمل‌ها و استانداردهای مدیریت بحران، مطالعات میدانی (مکانی)، اطلاعات تاریخی، مطالعات پژوهش‌های انجام‌شدهٔ مرتبط؛ بهره‌گرفته شده است [۳]. بعد از شناسایی و تعریف محتمل‌ترین عوامل محرک^۱ که می‌توان آنها را در گروه‌های اصلی شامل عوامل جغرافیایی، زمین‌شناسی، محیطی، اقلیمی و انسانی طبقه‌بندی کرد؛ مدل‌های ارزیابی خطر سیل خیزی و ریسک خطر سیل تهیه شده است. مدل‌های ارزیابی خطر سیل به عنوان مبنای اصلی سنجش سیل‌خیزی و تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل به کار برده می‌شوند و می‌کوشند تا ارتباطی بین عوامل محرک و وضعیت حساسیت خطرپذیری (کلاس‌بندی خطر) ارائه کنند. در تحقیق حاضر، مدل تهیه‌شده شامل رویکردی تلفیقی و هماهنگ مبتنی بر منطق فازی که توسط پرفسور لطفی‌زاده ارائه شده و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) می‌شود که دستاوردهای درخور توجهی در ارزیابی خطر و تحلیل حساسیت مخاطرات زمین‌شناسی و بلایای طبیعی به‌خصوص تحلیل سیل خیزی دارند [۳۵].

به طور کلی، در چنین مدل تلفیقی، فرایند ارزیابی در چند مرحله طبقه‌بندی شده که شامل تهیه و شناسایی معیارهای اصلی بر اساس عوامل محرک مؤثر، فازی‌سازی^۲ مجموعه‌های اصلی عوامل، وزن‌دهی و پردازش اطلاعات

جدول ۱. معیارهای اهمیت فازی برای ورودی‌های تحلیل توسط مقیاس مثلثی

مقیاس شهودی	مقیاس فازی	مقیاس متقابل	توصیف
برابر یا معادل	{۱،۱،۱}	{۱،۱،۱}	گزینه‌ها به صورت مستقل هستند
دارای ارجحیت	{۱/۵، ۱، ۰/۵}	{۲، ۱، ۰/۶}	گزینه ۱ نسبت به ۲ دارای اهمیت معنادار و ارجح است
غالبیت نسبی	{۲، ۱/۵، ۱}	{۱، ۰/۶، ۰/۵}	گزینه ۱ نسبت به ۲ اهمیت نسبی و غالبیت دارد
غالبیت درخور توجه	{۱/۵، ۲، ۲/۵}	{۰/۳، ۰/۴، ۰/۵}	گزینه ۱ نسبت به ۲ اهمیت و غالبیت دارد
ارجحیت درخور توجه	{۳، ۲/۵، ۲}	{۰/۴، ۰/۳، ۰/۲}	گزینه ۱ نسبت به ۲ اهمیت و ارجحیت درخور توجهی دارد
به شدت ارجح و توصیه شده	{۳/۵، ۳، ۲/۵}	{۰/۳، ۰/۲، ۰/۱}	گزینه ۱ نسبت به ۲ کاملاً ارجحیت دارد



شکل ۲. فلوچارت فرایندی به کاررفته در مطالعه حاضر

جدول ۲. لیست معیارها و زیرمعیارهای وزن‌دهی شده توسط رویکرد F-AHP

معیار	ضریب فازی	ضریب نرمالیزه	زیرمعیار	ضریب فازی	ضریب نرمالیزه
			جنبه شیب	۰/۲۵۰	۰/۲۴۳
شرایط جغرافیایی			تغییرات توپوگرافی	۰/۲۳۴	۰/۲۲۰
	۰/۳۱۲	۰/۳۰۹	انحنای شیب	۰/۳۳۱	۰/۳۷۱
			واترشید حوضه	۰/۱۸۵	۰/۲۱۱
شرایط زمین‌شناسی			شرایط هیدروژئولوژی	۰/۲۱۱	۰/۳۰۲
			سرعت جریان	۰/۱۸۷	۰/۲۱۰
	۰/۲۴۷	۰/۲۵۵	عمق جریان	۰/۱۵۲	۰/۱۷۷
			الگوی ذهکشی	۰/۱۶۳	۰/۱۵۵
			سازندهای سست	۰/۱۷۶	۰/۱۴۳
			هوازدگی	۰/۱۱۱	۰/۱۳۵
			پوشش گیاهی	۰/۴۵۱	۰/۴۴۳
شرایط محیطی	۰/۲۲۹	۰/۲۱۰	پوشش زمین	۰/۵۴۹	۰/۶۱۱
			بارش	۰/۶۸۰	۰/۶۰۰
شرایط اقلیمی	۰/۱۱۰	۰/۱۱۷	تبخیر	۰/۳۲۰	۰/۴۰۰
			فاصله تا جاده‌ها و راه‌ها	۰/۵۸۱	۰/۵۶۳
شرایط انسانی	۰/۱۰۲	۰/۱۰۹	فاصله تا مناطق شهری	۰/۴۱۹	۰/۵۰۱

جدول ۳. وضعیت طبقه‌بندی و کلاس‌بندی برای ارزیابی خطر سیل خیزی در حوضهٔ بررسی‌شده

شاخص ارزیابی خطر سیل	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
سرعت جریان (m/s)	<۰/۰۵	۰/۱۵ - ۰/۰۵	۰/۲۵ - ۰/۱۵	۰/۳۵ - ۰/۲۵	<۰/۳۵
عمق جریان (m)	<۰/۵	۱/۵ - ۰/۵	۲/۵ - ۱/۵	۳/۵ - ۲/۵	<۳/۵
متوسط بارش (mm)	۲۰۰ - ۰	۴۰۰ - ۲۰۰	۶۰۰ - ۴۰۰	۸۰۰ - ۶۰۰	<۸۰۰
تبخیر (mm)	۱۰۰ - ۰	۱۵۰ - ۱۰۰	۲۰۰ - ۱۵۰	۲۵۰ - ۲۰۰	<۲۵۰
جنبهٔ شیب (درصد)	۲۵ - ۰	۴۵ - ۲۵	۶۰ - ۴۵	۷۵ - ۶۰	<۷۵
انحنای شیب (درجه)	۲۰ - ۰	۴۰ - ۲۰	۶۰ - ۴۰	۸۰ - ۶۰	<۸۰
الگوی ذهکشی	۱۰ - ۰	۲۰ - ۱۰	۳۰ - ۲۰	۴۰ - ۳۰	<۴۰
دشت سیلابی (درصد)	۲۵ - ۰	۴۵ - ۲۵	۶۰ - ۴۵	۷۵ - ۶۰	<۷۵
شبکهٔ راه‌ها (درصد)	۲۵ - ۰	۴۵ - ۲۵	۶۰ - ۴۵	۷۵ - ۶۰	<۷۵
پوشش زمین (درصد)	۲۵ - ۰	۴۵ - ۲۵	۶۰ - ۴۵	۷۵ - ۶۰	<۷۵

می‌یابند. بعد از شناسایی عوامل و وزن‌دهی آنها بر پایهٔ ضرایب فازی محاسبه‌شده، نقشه‌های شاخص‌های فازی‌سازی و غیرفازی‌سازی شده برای حوضهٔ آبریز تجن تهیه شده و به صورت لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزار ArcGIS وارد می‌شود. این شاخص‌ها به منظور برآورد خطر سیل و پهنه‌بندی سیل‌خیزی به کار گرفته شده و نقشهٔ سنجش حساسیت خطرپذیری سیل توسط آنها تهیه می‌شود. این لایه‌های اطلاعاتی ابتدا فازی‌سازی شده و سپس غیرفازی‌سازی می‌شوند. شکل ۳ نقشهٔ شاخص غیرفازی‌سازی شده را برای منطقهٔ تجن ارائه داده است. با استفاده از این نقشه، نقشهٔ سیل‌خیزی و پهنه‌بندی خطر سیل برای منطقهٔ بررسی‌شده تهیه شده که در شکل ۴ نشان داده شده است. از نتایج پهنه‌بندی سیل‌خیزی در حوضهٔ آبریز تجن، مشخص می‌شود که مهم‌ترین تمرکز مناطق حساس سیل در محدودهٔ رودخانهٔ اصلی نسبت به سایر بخش‌ها و در محدودهٔ دلتای رودخانه در بخش دهانهٔ دریای خزر است. همچنین، بخش‌های زهکشی در شرق حوضه، مناطقی را با حساسیت زیاد سیل‌خیزی نشان می‌دهد که می‌تواند تابع تغییرات زمین‌شناسی محدودهٔ بررسی‌شده باشد. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی منطقهٔ بررسی‌شده به لحاظ سیل‌خیزی چنین برداشت می‌شود که بخش محدودهٔ ساحلی آن که عموماً دربرگیرندهٔ مناطق مختلف شهری و زیرساخت‌های اصلی منطقه است، در بخش پرخطر طبقه‌بندی شده است. بنابراین، این نگرانی همواره برای شهرهای موجود در منطقه وجود دارد که با ایجاد شرایط مناسب پتانسیل رخداد سیل در این بخش‌ها

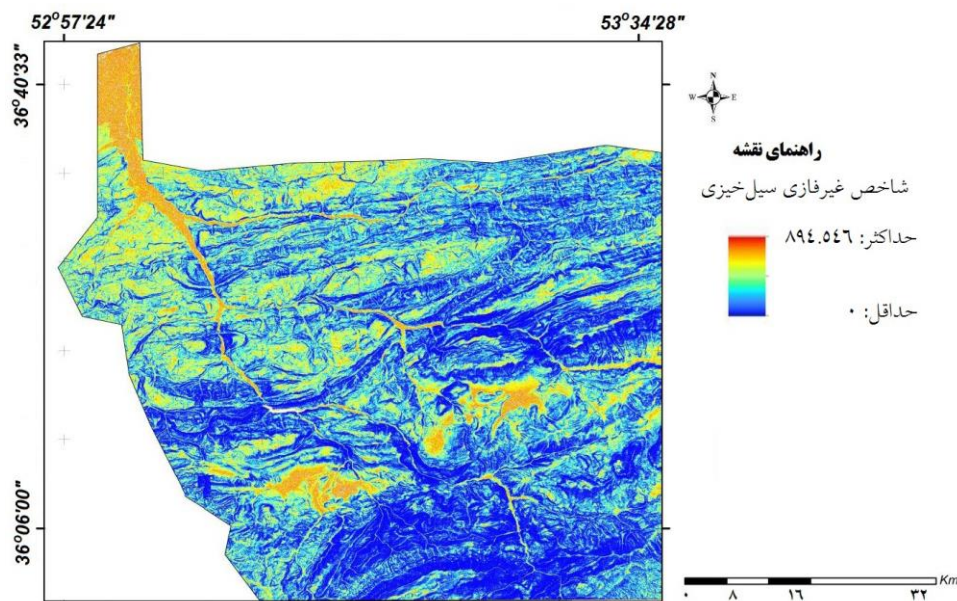
بعد از آماده‌سازی و وزن‌دهی، مدل ارزیابی توسط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد [۴۲]. هدف از پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار MATLAB، ارائهٔ نتایج بهینه با پوشش مناسب روی عدم قطعیت‌های موجود در محاسبات است. به‌کارگیری تلفیقی نتایج در تهیهٔ مدل‌های شاخص و نقشه‌های شاخص فازی/غیرفازی، امکان ارائهٔ نتایج با صحت بیشتری را فراهم آورده است. در نهایت، نتایج در ۵ گروه دارای خطر «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» طبقه‌بندی شده که به منظور تهیهٔ نقشه‌های حساسیت به کار گرفته شده است (جدول ۳).

این نتایج با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS [۳۶] به صورت نقشه‌های فازی درآمد و به منظور تحلیل خطرپذیری و تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی خطر به کار گرفته شده‌اند. نقشه‌هایی که از روی داده‌های تحلیل‌شده توسط مدل F-AHP تهیه شده‌اند؛ به صورت «نقشه‌های شاخص فازی» بوده که نیازمند غیرفازی‌سازی است. به این منظور، نرم‌افزار ArcGIS امکان غیرفازی‌سازی را برای نسخه‌های بالای ۱۰،۴ ارائه کرده که در این ارزیابی نیز از این نسخهٔ نرم‌افزاری استفاده شده است. نتیجهٔ غیرفازی‌سازی نقشه‌های شاخص به عنوان «نقشهٔ غیرفازی‌سازی‌شده» است که در تحلیل خطرپذیری و سیل‌خیزی به کار برده می‌شود. امکان استفاده از نقشه‌های شاخص فازی به صورت مستقیم در تحلیل سیل‌خیزی وجود ندارد. این نقشه‌ها بعد از غیرفازی‌سازی امکان به‌کارگیری در تحلیل مخاطرات را

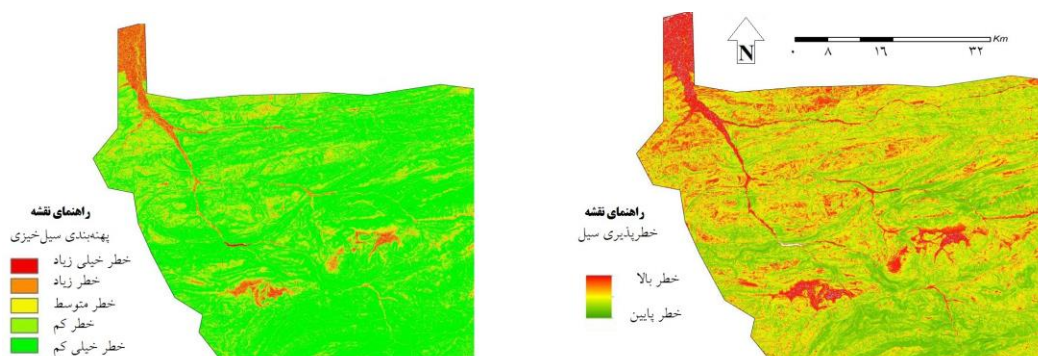
1. Fuzzified Index Maps
2. Defuzzified Index Map

صورت ارزیابی پایایی مدل بوده که بر پایه تحلیل رگرسیونی صورت گرفته از جامعه نمونه به صورت جداگانه مشخص شده که اطلاعات ارزیابی شده ضریب همبستگی ۰/۹۱ دارند. زیاد بودن ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه (مرحله اول پرسشنامه) و مرحله دوم (مرحله پرسشنامه از جامعه نمونه) که به فاصله ۳ هفته کاری ارائه شده، نشان‌دهنده پایایی داده‌ها و صحت انجام ارزیابی است.

بیشتر از سایر نقاط باشد و نسبت به این مسئله باید چاره‌جویی مناسب اندیشیده شود. همان طور که در بخش «روش کار» بیان شد، داده‌ها در نتایج تحلیل حساسیت سیل خیزی حوضه تجن توسط نیروی خبره و سیستم خبرگی مشتمل بر ۱۰ نفر از ۵۰ نیروی متخصص کارشناسان فنی و استاد دانشگاه دوباره آزموده شده و نتایج صحت‌سنجی شده است. نتایج در مرحله صحت‌سنجی به



شکل ۳. نقشه شاخص غیرفازی‌سازی شده حوضه تجن



شکل ۴. نقشه خطرپذیری و پهنه‌بندی سیل در حوضه آبریز تجن

کشورها است که می‌تواند هزینه‌های اقتصادی و مالی درخور توجهی را به همراه داشته باشد. رخداد سیل همواره تحت تأثیر عوامل محرکه مختلفی است که می‌تواند در گروه‌های اصلی شامل عوامل جغرافیایی، زمین‌شناختی، محیطی، اقلیمی و فاکتورهای انسانی طبقه‌بندی شود. از سوی دیگر، این عوامل تحت شرایط قابل محاسبه و مشخصی مانند دوره

بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل خطرپذیری سیل، یکی از مسائل مهم در مدیریت مجامع است که جنبه‌های مختلف اقتصادی، طبیعی، اجتماعی و سیاسی کشورها را در بر می‌گیرد. رخداد سیل معمولاً همراه با خسارت‌های فاجعه‌آمیز به اموال و انسان‌ها در شهرهای مختلف یا تخریب جاده‌ها و شریان‌های عمومی

کارآمد است و سبب بهبود درخور توجهی در دقت محاسبات می‌شود. سپس، نقشه‌های شاخص فازی‌سازی شده تهیه و به نقشهٔ شاخص غیرفازی‌سازی شده تبدیل شد. این نقشه‌ها منجر به تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل برای حوضهٔ تجن شده که با توجه به نتایج، مشخص شد که مهم‌ترین تمرکز مناطق حساس سیل در محدودهٔ رودخانهٔ اصلی نسبت به سایر بخش‌ها و در محدودهٔ دلتای رودخانه در بخش دهانهٔ دریای خزر است. همچنین، بخش‌های زهکشی در شرق حوضه مناطقی را با حساسیت زیاد سیل‌خیزی نمایش داد. با نگرشی در این بخش می‌توان ارتباط زهکش‌ها را با خطواره‌های تکتونیکی پیگیری کرد.

منابع

- [1]. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies World disaster report. Oxford: Oxford University Press, 1998; 152 p.
- [2]. Zhang JQ, Zhou CH, Xu KQ. Flood disaster monitoring and evaluation in China. *Environ Hazards*. 2002; 4: 33-43.
- [3]. Xie T, Zhou JZ, Song LX. Dynamic evaluation and implementation of flood loss based on GIS grid data. *Commun Comput Inf Sci*. 2011; 228: 558-565.
- [4]. Alderman K, Turner LR, Tong SL. Floods and human health: a systematic review. *Environ Int*. 2012; 47: 37-47.
- [5]. Azarafza M, Ghazifard A, Akgün H, Asghari-Kalajahi E. Landslide susceptibility assessment of South Pars Special Zone, southwest Iran. *Environ Earth Sci*. 2018; 77(24): 805.
- [6]. Wang YM, Li ZW, Tang ZH. A GIS-based spatial multicriteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resour Manag*. 2011; 25: 3465-3484.
- [7]. ISNA. The news of geo-hazard occurrence in Iran. Tehran: Iranian Students News Agency. 2020; (In Persian).
- [8]. Zou Q, Zhou J, Zhou C, Song L, Guo J. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2013; 27: 525-546.
- [9]. Yang X, Ding J, Hou H. Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis. *Nat Hazards*. 2013; 68: 657-674.

بازگشت و استعداد حوضه‌ها برای رخداد سیل قابل ارزیابی هستند. روش‌های گوناگونی برای ارزیابی و سنجش خطر سیل‌خیزی توسط محققان ارائه شده که می‌تواند میزان تأثیرپذیری و احتمال رخداد سیل را در مناطق مختلف برآورد کند. از مهم‌ترین و اساسی‌ترین این روش‌ها، شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد و حساس به لحاظ رخداد سیل است که به تحلیل حساسیت سیل‌خیزی معروف است. در تحلیل حساسیت سیل‌خیزی، رویکردهای تحلیل سلسله‌مراتبی و ارزیابی فرایندی به‌خصوص روش AHP-MCDM موفقیت مناسبی را در ارزیابی به دست آورده‌اند که غالباً به عنوان مبنای این ارزیابی‌ها در نظر گرفته می‌شوند. انعطاف‌پذیری تحلیل سلسله‌مراتبی و امکان ترکیب آن با منطق فازی سبب شده تا میزان عدم قطعیت‌های موجود در تحلیل‌ها به صورت درخور توجهی کاهش یابد و بر دقت آن افزوده شود. این رویکرد تلفیقی به نام F-AHP شناخته شده که امکان ارزیابی معیارها و متغیرهای گوناگون را در ماتریس‌های تصمیم فراهم کرده است.

مطالعهٔ حاضر با استفاده از این رویکرد تلفیقی اقدام به سنجش و ارزیابی خطرپذیری سیل در حوضهٔ آبریز تجن کرده است. به این منظور، مطالعه‌ای جامع به صورت توصیفی-پیمایشی که طی چندین مرحله شامل مطالعات کتابخانه‌ای، ارزیابی‌های میدانی و مدل‌سازی کامپیوتری استفاده شده که از ۵۰ نیروی متخصص و خبره برای سنجش اطلاعات بهره گرفته شده است. بعد از جمع‌آوری اطلاعات ورودی و شناسایی عوامل محرک و کلاس‌بندی آنها ماتریس‌های تصمیم مبتنی بر رویکرد AHP-MCDM که توسط ارزیابی فرایندی آماده‌سازی شده است؛ نرم‌افزار MATLAB به عنوان زبان برنامه‌نویسی فازی برای پیاده‌سازی فرایند فازی (فازی‌سازی، تصمیم‌گیری، غیرفازی‌سازی) اطلاعات ورودی استفاده شده است. نتایج این پیاده‌سازی که توسط ماژول منطق فازی صورت گرفته است، برای تهیهٔ نقشه‌های خطرپذیری و پهنه‌بندی خطر سیل حوضهٔ تجن استفاده شده است. بعد از فازی‌سازی مدل در محیط نرم‌افزار MATLAB، اطلاعات به صورت لایه‌های داده‌ای قابل شناسایی برای GIS تبدیل شدند. هدف از به‌کارگیری نرم‌افزار برای تحلیل اولیهٔ اطلاعات، کاهش خطاهای محاسباتی به‌خصوص خطاهای داده‌های ورودی که معمولاً با انتقال مستقیم داده‌ها به محیط GIS ممکن است همراه باشد، بسیار

- [10]. Chen PA, Chang LC, Chang FJ. Reinforced Recurrent Neural Networks for Multi-Step-Ahead Flood Forecasts. *J Hydrol.* 2013; 497: 71-79.
- [11]. United Nations, Department of Humanitarian Affairs, UNDHA. Mitigating natural disasters: phenomena, effects and options—a manual for policy makers and planners. New York: United Nations, 1991; 96 p.
- [12]. United Nations, Department of Humanitarian Affairs, UNDHA. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management, DNA/93/36. Geneva: United Nations, 1992; 96 p.
- [13]. Vojtek M, Vojteková J. Flood Susceptibility Mapping on a National Scale in Slovakia Using the Analytical Hierarchy Process. *Water.* 2019; 11(2): 364.
- [14]. Vafaeinejad A, Yousefzade J, Yousefi H, Mohammadi Varzane N. Using GIS and Linear Programming to Manage Water Distribution in Irrigation Networks (Case Study: Downstream Lands of Aq-chay Dam). *Iran J EcoHydrol.* 2014; 1(2): 123-132 (In Persian).
- [15]. Mohamadi Varzaneh N, Vafaeinejad A. Water Allocation in Irrigation Networks by using of Decision Support System Based on the Geospatial Information System (GIS) and Particle Swarm Optimization (PSO). *Iran JEcoHydrol.* 2015; 2(1): 39-49 (In Persian).
- [16]. Vafaeinejad A. Cropping Pattern Optimization by Using of TOPSIS and Genetic Algorithm Based on the Capabilities of GIS. *Iran JEcoHydrol.* 2016; 3(1): 69-82 (In Persian).
- [17]. Mahmoudi Jam S, Ghoreyshi Najaf Abadi SH, Vafaeinejad A, Moridi A, Khazaei S. Potential Evaluation of Underground Water Resource with the Hybrid Approach to Particle Swarm Optimization Algorithm and Geospatial Information Systems (Case Study: Mehran, Ilam). *Iran J EcoHydrol.* 2018; 4(4): 1199-1213 (In Persian).
- [18]. Goodarzi Z, Vafaeinejad A. Using Shuffled Frog-Leaping Algorithm (SFLA) And Geospatial Information System (GIS) To Help Optimally Operation Of The Dam Reservoir (Case Study: Dorudzan Dam Reservoir). *Iran J EcoHydrol.* 2020; 6(4): 983-991 (In Persian).
- [19]. Nguyen MD, Mukand SB, Huynh TL. Evaluation of flood risk parameters in the Day River Flood Diversion Area, Red River Delta, Vietnam. *Nat Hazards.* 2011; 51(1): 169-194.
- [20]. Saaty T, Vargas LLG. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process (2nd ed.). New York: Springer, 2012; 348 p.
- [21]. Saaty TL. Fundamentals of decision making and priority theory (2nd ed.). Pittsburgh: RWS Publications 2010; 477 p.
- [22]. Chang L, Amin MZM, Yang S, Chang F. Building ANN-Based Regional Multi-Step-Ahead Flood Inundation Forecast Models. *Water.* 2018; 2018(10): 1283.
- [23]. Covino T. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks. *Geomorphol.* 2017; 277: 133-144.
- [24]. Guha DS, Hargitt D, Hoyois P. Thirty years of natural disasters 1974-2003: the numbers. Belgium: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2004; 293 p.
- [25]. Ahmed F, Srinivasa A, Rao K. Prioritization of Sub-watersheds based on Morphometric Analysis using Remote Sensing and Geographic Information System Techniques. *Int J Remote Sens GIS.* 2015; 4(2): 51-65.
- [26]. Fernández D, Lutz M. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol.* 2010; 111: 90-98.
- [27]. Qin Q, Tang H, Chen H. Zoning of highway flood-triggering environment for highway in fuling district, Chongqing. *J Int Soc Optical Eng.* 2011; 8205(820530): 1-8.
- [28]. Ismáil M, Saanyol IO. Application of remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) in flood vulnerability mapping: case study of river Kaduna. *Int J Geomat Geosci.* 2013; 3(3): 618-627.
- [29]. Armenakis C, Nirupama N. Flood risk mapping for the city of Toronto, *Procedia-Econom Finan.* 2014; 18: 320-326.
- [30]. Demir V, Kisi O. Flood Hazard Mapping by Using Geographic Information System and Hydraulic Model: Mert River, Samsun, Turkey. *Adv Meteorology.* 2016; 2016(4891015): 1-19.
- [31]. Das S. Geographic information system and AHP-based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Arab J Geosci.* 2018; 11: 576.
- [32]. Hammami S, Zouhri L, Souissi D, Souei A, Zghibi A, Marzougui A, Dlala M. Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the

- flood susceptibility mapping (Tunisia). Arab J Geosci. 2019; 12: 653.
- [33]. Aghanabati A. Geology of Iran. Tehran: Geological Survey of Iran press, 2007; 708 p (In Persian).
- [34]. Iran Meteorological Organization. Climatological data from Sari station. The Iran Meteorological Organization. 2019; <http://www.irimo.ir/>. Accessed 5 Oct 2019
- [35]. Dadios EP. Fuzzy logic—algorithms, techniques and implementations. London: InTech press, 2012; 301 p.
- [36]. ESRI. ArcGIS software version 10.4, international supplier of geographic information system software, web GIS and geodatabase management applications. 2017; <https://www.esri.com/>. Accessed 1 May 2017