

مخرب سیل خواهد بود. این مطالعه به دنبال تحلیل مکانی آسیب پذیری حوزه آبخیز زرينه رود نسبت به رخداد سیل است. بنابراین با در نظر گرفتن توابع آسیب پذیری شامل در معرض خطر قرارگیری، حساسیت و تاب آوری، درجه آسیب پذیری این حوزه آبخیز نسبت به مخاطره سیلاب، مورد بررسی قرار گرفت و پهنه های آسیب پذیر شناسایی شدند.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوزه آبخیز زرينه رود واقع در استان های آذربایجان غربی و کردستان است. جهت شناسایی پهنه ها و مناطق آسیب پذیر نسبت به سیلاب در این آبخیز، ابتدا داده ها و اطلاعات اثرگذار بر آسیب پذیری سیلاب در منطقه مورد مطالعه جمع آوری شدند. سپس لایه رستری هر یک از عوامل در سه بخش در معرض خطر قرارگیری (شامل فاکتورهای میانگین بارش سالانه، فراوانی بارش های سنگین، حداکثر بارش روزانه، فاصله از آبراهه و فراوانی سیلاب)، حساسیت (شامل درصد خانوارهای کشاورز و دامدار، فاصله از مناطق صنعتی و معادن، فاصله از جاده، کاربری اراضی، تراکم جمعیت و فاصله از مناطق مسکونی) و تاب آوری (شامل تعداد شرکت های تعاونی روستایی، تعداد مراکز بهداشتی و درمانی و تعداد راه های مواصلاتی) استخراج شد. در ادامه اهمیت متغیرها بر اساس روش فرآیند تحلیل شبکه ای و با در نظر گرفتن ارتباطات درونی بین متغیرها بررسی شد. در ادامه ارزش گذاری پیکسلی داده ها بر اساس تحلیل ارتباط هر یک از فاکتورها با آسیب پذیری سیلاب و با استفاده از توابع ارزش فازی انجام شد. نهایتاً با اعمال اهمیت متغیرهای حاصل از روش فرآیند تحلیل شبکه ای بر لایه های فازی شده از طریق رابطه آسیب پذیری (شامل توابع در معرض خطر قرارگیری، حساسیت و تاب آوری) نقشه آسیب پذیری برای حوزه آبخیز مورد مطالعه تهیه و تحلیل شد.

نتایج و بحث

بررسی اهمیت متغیرها بر اساس روش فرآیند تحلیل شبکه ای برای هر یک از توابع آسیب پذیری نشان داد که از بین متغیرهای استفاده شده جهت استخراج نقشه در معرض خطر قرارگیری، دو متغیر فاصله از آبراهه و فراوانی وقوع سیلاب به ترتیب با وزن های برابر با ۰/۳۴۳ و ۰/۳۳۷ بیشترین اهمیت را بخود اختصاص داده اند؛ از بین متغیرهای در نظر گرفته شده جهت استخراج نقشه حساسیت، عوامل تراکم جمعیت، فاصله از مناطق مسکونی و درصد خانوارهای کشاورز و دامدار بیشترین وزن را دارا بودند (به ترتیب با وزن های ۰/۳۶۱، ۰/۲۳۵

تحلیل مکانی آسیب پذیری حوزه آبخیز زرينه رود نسبت به وقوع سیل

بهرام چوبین^{*}، فرزانه ساجدی حسینی^۱، امید رحمتی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۱

<https://doi.org/10.22034/18.67.6>

چکیده مبسوط

مقدمه

یکی از گام های مهم در چارچوب برنامه های حفاظتی حوزه های آبخیز و مدیریت پایدار منابع طبیعی، شناسایی مناطق آسیب پذیر است که به عنوان پایه محکمی برای اقدامات مورد نیاز جهت مدیریت زیست محیطی در نظر گرفته می شود. ارزیابی آسیب پذیری، استانداردهای لازم برای اولویت های اجرایی را فراهم می کند و کمک می کند تا مناطق حساس و آسیب پذیر برای مدیریت پایدار منابع طبیعی شناسایی و اولویت بندی شود. در میان مخاطرات طبیعی در سطح حوزه آبخیز، سیلاب یکی از پرتکرارترین و مخرب ترین نوع مخاطره است که هرساله خسارات جانی و مالی زیادی را به همراه دارد. کشور ایران نیز به دلیل قرار داشتن در بوم سازگان وسیعی از مناطق خشک و نیمه خشک، همواره در معرض تأثیرات مخرب سیل بوده و آسیب پذیری آن توسط تغییرات آب و هوایی و فعالیت های ناپایدار انسانی تشدید می شود. پیش بینی می شود به دلیل تغییرات آب و هوایی، شهرنشینی سریع برنامه ریزی نشده و گسترش سطوح غیرقابل نفوذ، تغییر در الگوی کاربری های اراضی و مدیریت ضعیف حوزه های آبخیز، سیلاب ها در آینده با شدت بیشتری اتفاق بیافتند. از این رو، مطالعه و شناسایی مناطق آسیب پذیر به عنوان یکی از متغیرهای مهم در مدیریت ریسک سیلاب، بخشی از اقدامات غیرسازه ای برای جلوگیری و کاهش اثرات

۱- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران. رایانامه: b.choubin@areeo.ac.ir

۲- دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران.

و ۱۷۸/۰)؛ بررسی تاب‌آوری نیز حاکی از آن بود که اهمیت عامل تعداد مراکز بهداشتی و درمانی بیشتر از سایر متغیرها بوده است (حدود ۶۵/۵٪). نتایج نقشه در معرض خطر قرارگیری نشان داد که مناطق واقع در خروجی حوزه آبخیز بیشتر در معرض خطر سیلاب واقع هستند؛ در صورتیکه، بخش‌هایی نزدیک خروجی و بخش‌هایی در شمال شرق حوزه آبخیز حساسیت بالاتری را نسبت به سیلاب نشان می‌دهند؛ این در حالی است که، بیشترین تاب‌آوری در نواحی مرکزی حوزه آبخیز واقع شده است ولی بخش‌هایی در شمال و جنوب حوزه آبخیز کمترین تاب‌آوری را نسبت به سیلاب دارا هستند. با تلفیق نقشه‌های در معرض خطر قرارگیری، حساسیت و تاب‌آوری مشخص شد که آسیب‌پذیرترین مناطق حوزه آبخیز (با کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد) عمدتاً در بخش‌های خروجی حوزه آبخیز واقع شده‌اند که حدود ۲/۰۶٪ از حوزه آبخیز را شامل می‌شوند.

نتیجه‌گیری

بررسی نقشه آسیب‌پذیری سیلاب نشان داد که مناطق جنوبی حوزه آبخیز زرينه‌رود که در نزدیک خروجی حوزه آبخیز واقع شده‌اند بیشترین میزان آسیب‌پذیری را دارا هستند. علت این موضوع این است که این نواحی در معرض خطر زیاد سیلاب هستند، حساسیت زیاد و تاب‌آوری کم تا متوسطی را دارا هستند که با تلفیق این موارد نسبت به سایر بخش‌های حوزه آبخیز آسیب‌پذیری زیادتری را نشان می‌دهند. یکی از مزیت‌های این پژوهش را می‌توان به استفاده از توابع ارزش فازی جهت ارزش‌گذاری پیکسلی داده‌ها به‌جای طبقه‌بندی آن‌ها دانست. ارائه مقادیر پیوسته بر اساس فازی، تغییرپذیری ارزش متغیرها را حفظ می‌کند که نسبت به روش‌های دیگر مانند کلاسه‌بندی ورودی‌ها، واقعی‌تر است. همچنین فازی می‌تواند بر ابهام غلبه کند و عدم قطعیت را کاهش دهد. اصلی‌ترین محدودیت این پژوهش را می‌توان به نبود آمار و اطلاعات کافی در بحث تاب‌آوری نسبت به سیلاب عنوان کرد که اجتناب‌ناپذیر است. آمار معیارهای مهمی همچون تعداد سیستم‌های هشدار سیل، تعداد مراکز نجات، تجربیات گذشته در مورد خطر سیلاب، بیمه سیل، آمار سیل‌بندها، پناهگاه‌ها و خدمات اضطراری که در منابع به عنوان فاکتورهای مهم ذکر شده بودند، در دسترس نبود. بنابراین لازم است در مطالعات آتی در صورت دسترسی این فاکتورها نیز در نظر گرفته شود. بطور کلی می‌توان اذعان داشت که اولویت‌بندی اجرای سیاست‌های مدیریتی با تاکید بر نگاه پیشگیرانه و مبتنی بر ریسک می‌تواند در ارتباط با خروجی‌های این مطالعه سمت و سویی دقیق‌تر گرفته و حفاظت و احیاء مناطق آسیب‌پذیر را دربر داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: تاب‌آوری، توابع ارزش فازی، حساسیت، در معرض قرارگیری، فرآیند تحلیل شبکه‌ای

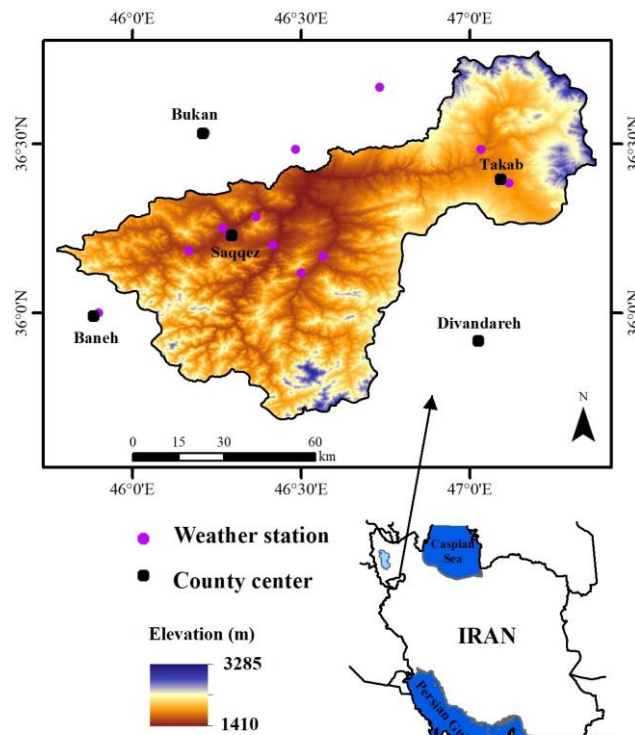
مقدمه

سیلاب یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی در سطح حوزه‌های آبخیز در دنیا است که بر اساس آمار موجود از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۷،

۳۴ درصد از بلایای طبیعی را بخود اختصاص داده است. بر اساس این دوره آماری، تعداد مرگ و میر حدود ۱۲۵۴ نفر و خسارات اقتصادی-اجتماعی به اندازه ۲/۵ میلیارد دلار در هر سال بوده است [۳۰]. کشور ایران نیز به دلیل قرار داشتن در بوم‌سازگان وسیعی از مناطق خشک و نیمه خشک در معرض تأثیرات مخرب سیل واقع است و آسیب‌پذیری آن توسط تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های ناپایدار انسانی تشدید می‌شود [۱]. موقعیت جغرافیایی منحصر به فرد کشور و شرایط آب و هوایی آن که منجر به رخداد رویدادهای بارشی شدید می‌شود آن را در معرض سیل‌های ناگهانی ویرانگر قرار داده و منجر به خسارات جانی و گسترده به اموال و زیرساخت‌ها می‌شود [۳۱، ۳۶]. پیش‌بینی می‌شود به دلیل تغییرات آب و هوایی، شهرنشینی سریع برنامه‌ریزی نشده و گسترش سطوح غیرقابل نفوذ، تغییر در الگوی کاربری‌های اراضی و مدیریت ضعیف حوزه‌های آبخیز، سیلاب‌ها در آینده با شدت بیشتری اتفاق بیافتند [۲۵]. از این‌رو، مطالعه و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر بخشی از اقدامات غیرسازه‌ای برای جلوگیری و کاهش اثرات مخرب سیل است و ارزیابی آن کمک می‌کند تا استانداردهای لازم برای اولویت‌های اجرایی فراهم شود [۲۵].

از جمله اولین مطالعات موجود در زمینه آسیب‌پذیری سیلاب مربوط به استفاده از داده‌های سرشماری برای تخمین آسیب‌پذیری اجتماعی بوده است. برای مثال ترنر و همکاران [۳۴] از یک شاخص اجتماعی بر اساس داده‌های جمعیت‌شناختی موجود به بررسی آسیب‌پذیری پرداختند. با گذشت زمان این روش، با گنجانیدن متغیرهای بیشتر و تأثیرگذارتر بر آسیب‌پذیری و با اختصاص دادن وزن‌های متفاوت به شاخص‌ها (بسته به تأثیر آن‌ها بر آسیب‌پذیری)، توسعه و بهبود یافته است [۲]. مطالعات پیشین جنبه‌های مختلفی از آسیب‌پذیری را بررسی کرده‌اند. برخی مطالعات به جنبه‌های آسیب‌پذیری محیط‌زیستی سیلاب پرداخته‌اند [۶، ۱۱]. در برخی مطالعات جنبه‌های اجتماعی آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب بررسی شده است [۵، ۳۵]؛ برخی نیز به جنبه‌های اقتصادی پرداخته‌اند [۱۶]. با این حال، برای مدیریت جامع ریسک در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های آسیب‌پذیری امری ضروری است.

در حال حاضر، اکثر مطالعات آسیب‌پذیری سیلاب، در سطوح شهری انجام شده و بر اساس زمینه‌های پژوهشی فردی و ترجیحات شخصی ایجاد شده است. عمده روش‌ها مبتنی بر نظرات متخصصان، پرسش‌نامه، قضاوت‌های شخصی و سایر رویکردهای ذهنی بوده است [۱۲]. به عنوان مثال، برخی از محققان داده‌ها را از طریق نظرسنجی و مصاحبه، همراه با ادبیات تحقیقاتی مرتبط، جمع‌آوری کرده تا به طور جامع شاخص‌های آسیب‌پذیری سیل و سیستم‌های ارزیابی را مطالعه کنند [۱۲، ۲۴]. برخی از کارشناسان بر اساس تجربیات افراد محلی و همراه با تشخیص کارشناسی، شاخص‌های ارزیابی آسیب‌پذیری سیل را توسعه داده‌اند [۱۲، ۲۰]. برخی نیز تلاش کرده‌اند آسیب‌پذیری سیل را با ترکیب داده‌هایی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز زرینه رود
Fig 1. Geographical location of Zarrinehrood Watershed

و تاب آوری است. بنابراین، با در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی و با بهره‌گیری از توابع مختلف آسیب‌پذیری ذکر شده، درجه آسیب‌پذیری حوزه آبخیز زرینه‌رود مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز زرینه‌رود با مساحت حدود ۷۰۰۷ کیلومترمربع است که در محدوده طول‌های جغرافیایی $46^{\circ} 29' 29''$ تا $47^{\circ} 22' 39''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ} 12' 12''$ تا $36^{\circ} 46' 12''$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). حدود ۳۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی و مابقی آن (۷۰ درصد) در استان کردستان واقع شده است. سرشاخه‌های رودخانه زرینه‌رود در قسمت غربی حوزه آبخیز از کوه‌های چهل‌چشمه سقز و در قسمت شرقی حوزه آبخیز نیز از کوه‌های تکاب و تخت سلیمان سرچشمه گرفته و پس از بهم‌پیوستن تشکیل زرینه‌رود را می‌دهد. بیشترین ارتفاع حوزه آبخیز ۳۲۸۵ متر بوده که در بخش‌های شرقی و جنوبی واقع شده و کمترین ارتفاع ۱۴۱۰ متر بوده که متعلق به خروجی حوزه آبخیز است. اقلیم منطقه، سرد و خشک بوده و متوسط بارش سالیانه حدود ۳۵۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر از شرق به غرب متغیر است. بر اساس آمار ثبت شده توسط ادارات آب منطقه‌ای استان‌های کردستان و آذربایجان غربی، فراوانی سیلاب با دوره بازگشت‌های

مانند بارندگی، توپوگرافی و باندهای طیفی مختلف سنجش از دوری ارزیابی کنند [۴]. با این حال، هیچ اجماع واحدی در جامعه علمی در مورد چارچوب نظام‌مند و انتخاب معیارها برای آسیب‌پذیری سیل وجود ندارد [۱۳]. اما، چیزی که آشکار است، این است که روش‌های مطالعه آسیب‌پذیری سیلاب عمدتاً مبتنی بر قضاوت کارشناسی و رویکردهای تصمیم‌گیری چندگانه همچون فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۱، تاپسیس^۲، فرآیند تحلیل شبکه‌ای^۳ و دیمتیل^۴ است که همواره با عدم قطعیت همراه بوده است [۱۲، ۱۷، ۲۰، ۲۲، ۲۳]. در این راستا، برخی مطالعات برای کاهش تأثیر قضاوت ذهنی کارشناسان، استفاده از اعداد فازی و ترکیب آن با قضاوت‌های کارشناسی را پیشنهاد داده‌اند [۳، ۱۷، ۲۲، ۳۳، ۳۷].

علی‌رغم این واقعیت که محققان پیشین تحقیقات ارزشمندی در زمینه آسیب‌پذیری انجام داده‌اند، در این زمینه هنوز کاستی‌هایی وجود دارد. اکثر مطالعات پیشین در بررسی آسیب‌پذیری سیلاب به توابع آسیب‌پذیری توجهی نکرده‌اند و صرفاً با همپوشانی چندین لایه مختلف آسیب‌پذیری مطالعه شده است. از این‌رو، محاسبه آسیب‌پذیری در این پژوهش مبتنی بر در نظر گرفتن توابع آسیب‌پذیری شامل فاکتورهای در معرض خطر قراگیری، حساسیت

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)
2. Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS)
3. Analytic Network Process (ANP)
4. Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)

بزرگتر از دو سال در دوره مشترک آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸ بین ۴۸ تا ۱۹۱ مورد برای ایستگاه‌های مختلف حوضه متغیر بوده است که حاکی از سیل‌خیزی بالای این آبخیز است.

آسیب‌پذیری سیلاب و توابع آن

در توصیف سازمان ملل، آسیب‌پذیری عبارت است از: درجه‌ای از آسیب به اشیاء در معرض خطر با مقدار مشخص که در مقیاس صفر (بدون آسیب) تا یک (آسیب کامل) بیان می‌شود [۱۴]. آسیب‌پذیری^۱ تابعی از در معرض خطر قرارگیری^۲، حساسیت^۳ (که در برخی منابع از آن به عنوان مقاومت^۴ نیز یاد کرده‌اند) و تاب‌آوری^۵ است [۲۱، ۲۹]. در معرض خطر قرارگیری به افراد و محیط اطراف آن‌ها و هر عنصر موجود در پهنه مستعد سیل اشاره دارد که در معرض اثرات سیل و تلفات احتمالی است [۲۶]. حساسیت اشاره به شکنندگی جامعه یا بوم‌سازگان دارد [۸]. در واقع حساسیت نشان‌دهنده ظرفیت یک فرد یا گروهی از مردم در برابر تأثیر یک خطر است. اگر حساسیت زیاد باشد، حتی یک تنش کوچک می‌تواند منجر به اختلال در سیستم شود [۲۹]. تاب‌آوری به انعطاف‌پذیری در برابر خطرات طبیعی، کنار آمدن یا سازگاری با خطر را گویند. تاب‌آوری درجه‌ای از آمادگی برنامه‌ریزی شده است که با توجه به تمهیدات از پیش طراحی شده در پاسخ به خطر احساس شده، انجام می‌شود [۲۹]. در این مطالعه با در نظر گرفتن توابع ذکر شده، آسیب‌پذیری از رابطه ۱ محاسبه شد [۲۱]:

$$V = E + S - R \quad (1)$$

که در آن V نشان‌دهنده آسیب‌پذیری سیلاب، E بیان‌کننده در معرض خطر قرارگیری، S بیانگر حساسیت و R نیز نشان‌دهنده تاب‌آوری هستند.

جمع‌آوری و آماده‌سازی آمار و اطلاعات

آمار مورد استفاده جهت مطالعه آسیب‌پذیری سیلاب به تفکیک توابع آن شامل در معرض خطر قرارگیری، حساسیت و تاب‌آوری به‌شرح زیر است:

- داده‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه در معرض خطر قرارگیری

فراوانی بارش‌های سنگین: در این مطالعه، فراوانی بارش‌های سنگین بیشتر از ۱۰ میلی‌متر در طول دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۹۸ برای هر ایستگاه هواشناسی محاسبه و نقشه فراوانی بارش‌های سنگین از طریق روش درونیابی کریجینگ^۶ (به‌عنوان روشی که کمترین

خطا را از بین سایر روش‌ها داشت) تهیه شد. این شاخص بارش جزو شاخص‌های حدی است که توسط بخش تحقیقات اقلیمی هواشناسی کانادا تحت عنوان بارش سنگین (۱۰ میلی‌متر و بیشتر) ارائه شده است [۳۹].

میانگین بارش سالانه: نقشه میانگین دراز مدت بارش سالیانه (برای یک دوره ۲۰ ساله از ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸) با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی حوزه آبخیز از طریق روش درونیابی کریجینگ تهیه شد. این شاخص نیز توسط بخش تحقیقات اقلیمی هواشناسی کانادا ارائه شده است [۳۹].

حداکثر بارش روزانه: منظور از حداکثر بارش روزانه، حداکثر بارش روزانه رخ داده در طول دوره آماری (۱۳۷۹-۱۳۹۸) است که در بحث آسیب‌پذیری سیلاب می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. بر این اساس، حداکثر بارش روزانه رخ داده در طول دوره آماری برای هر ایستگاه هواشناسی محاسبه و نقشه آن از طریق روش درونیابی کریجینگ تهیه شد. این شاخص نیز توسط بخش تحقیقات اقلیمی هواشناسی کانادا به‌عنوان یکی از شاخص‌های حدی ارائه شده است [۳۹].

فاصله از آبراهه: نقشه فاصله از آبراهه از طریق دستور Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد.

فراوانی سیلاب: این شاخص بیانگر این موضوع است که کدام حوضه سیلاب بیشتری را تجربه کرده است. برای استخراج نقشه این معیار، حوزه آبخیز بالادست هر ایستگاه هیدرومتری توسط افزونه ArcSWAT در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد، سپس با استفاده از آمار سیلاب (دریافت شده از ادارات آب منطقه‌ای استان‌های کردستان و آذربایجان غربی) فراوانی سیلاب در دوره ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ برای هر زیرحوضه آبخیز استخراج و تبدیل به نقشه شد.

- داده‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه حساسیت

درصد خانوارهای کشاورز و دامدار: جوامع و مشاغل که منابع درآمد آن‌ها وابسته و متأثر از رودخانه است، آسیب‌پذیرتر از سایر مشاغل غیرمرتبط با رودخانه هستند [۱۷، ۲۴]. در این مطالعه درصد خانوارهای هر شهرستان با مشاغل پرورش دام سبک و سنگین، کشت گلخانه‌ای، باغداری و زراعت بر اساس داده‌های مرکز آمار کشور (طی آخرین سرشماری کشاورزی ۹۴-۱۳۹۳) در نظر گرفته شد.

فاصله از مناطق صنعتی و معادن: جهت استخراج موقعیت مناطق صنعتی و معادن حوزه آبخیز از سامانه صبا (<https://infosaba.com>) استفاده شد. ابتدا لیست صنایع و معادن از سایت مذکور استخراج و سپس اطلاعات مختصات جغرافیایی از طریق جست‌وجوهای اینترنتی و گوگل ارث تهیه شد. سرانجام، با استفاده از دستور Euclidean distance نقشه فاصله از مراکز صنعتی و معادن در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

فاصله از جاده: نقشه فاصله از جاده از طریق دستور Euclidean

1. Vulnerability
2. Exposure
3. Susceptibility
4. Resistance
5. Resilience
6. Kriging

distance در نرم افزار ArcGIS تهیه شد.

کاربری اراضی: جهت استخراج کاربری اراضی از تصویر سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۲ (ماه می) استفاده شد. تعداد ۲۰۰ نمونه تعلیمی از هر کاربری اراضی توسط گوگل ارث ثبت و نقشه کاربری اراضی با استفاده از روش برآورد درست‌نمایی بیشینه^۱ در نرم‌افزار ENVI 5.6 با صحت حدود ۹۱٪ استخراج شد. کاربری‌های این آبخیز شامل اراضی مرتعی، مسکونی، کشاورزی، پهنه آبی، باغ، جنگل و بایر هستند که اراضی مرتعی و کشاورزی به ترتیب بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند.

تراکم جمعیت: محاسبه تراکم جمعیت طبق روش ارائه شده توسط ضابطه شماره ۸۲۱ سازمان برنامه و بودجه کشور با عنوان «راهنمای تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب» انجام شده است. بر این اساس، جمعیت هر دهستان بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ بر میانگین کل جمعیت دهستان‌های حوزه آبخیز تقسیم شد. شاخص حاصله بیانگر تراکم جمعیت در هر محدوده و میزان آسیب‌پذیری جمعیت در برابر سیل است. مقادیر شاخص بین ۱-۰، ۲-۱، ۳-۲، ۴-۳ و بزرگتر از ۴ نمایانگر تراکم جمعیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد است.

فاصله از مناطق مسکونی: نقشه فاصله از مناطق مسکونی بر اساس کاربری مناطق مسکونی و از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. هرچه فاصله سیل‌گیری به مناطق مسکونی نزدیکتر باشد، حساسیت بیشتری را نشان می‌دهد [۱۷، ۳۷].

تراکم دام: در سطح هر شهرستان مجموع تعداد دام‌های سبک و سنگین (شامل گاو، بز و گوسفند) با استفاده از داده‌های مرکز آمار کشور (طی آخرین سرشماری کشاورزی ۹۴-۱۳۹۳) استخراج و بر اساس نسبت تعداد در واحد سطح (هکتار) تراکم دام محاسبه شد. مناطقی که تراکم دام بالاتری دارند طبیعتاً نسبت به سیلاب حساس‌تر هستند [۱۷].

– داده‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه تاب‌آوری

تعداد شرکت‌های تعاونی روستایی: در بحث سیلاب، تعاونی‌های در تهیه و تدارک کالاهای مصرفی و مواد غذایی، تأمین نهاده‌ها و ماشین آلات و بحث ترویج و آموزش بسیار حائز اهمیت هستند [۳۷]. تعداد شرکت‌های تعاونی روستایی در محدوده هر دهستان از مرکز آمار ایران دریافت و نقشه آن استخراج شده است.

تعداد مراکز بهداشتی و درمانی: با افزایش تعداد مراکز بهداشتی و درمانی، دسترسی مردم به مراکز و همچنین ارائه خدمات بهداشتی بهتر و سریع‌تر انجام خواهد شد [۳۷]. منظور از مراکز بهداشتی و درمانی شامل مرکز بهداشتی-درمانی، بیمارستان‌ها، خانه بهداشت و داروخانه‌ها در محدوده هر دهستان است. تعداد مراکز بهداشتی و درمانی در محدوده هر دهستان نسبت به هر هزار نفر از مرکز آمار ایران دریافت و نقشه آن استخراج شده است.

1. Maximum likelihood estimation

تعداد راه‌های مواصلاتی: تعداد و تراکم راه‌های مواصلاتی اثرگذار بر تخلیه و فرار از مناطق خطر، خدمات‌رسانی و ... است [۱۲، ۱۷]. در این مطالعه آمار تعداد راه‌های موجود در سطح دهستان شامل جاده‌های آسفalte، شوسه (شن‌ریزی شده)، خاکی و مالرو از مرکز آمار ایران دریافت و نقشه آن استخراج شده است.

بررسی اهمیت لایه‌های مورد استفاده

اهمیت هر یک از فاکتورهای مورد استفاده (به تفکیک توابع آسیب‌پذیری ذکر شده در مراحل قبل) با استفاده از پرسشنامه و نظر دانشجویان، کارشناسان و اساتید رشته علوم و مهندسی آبخیزداری (۳۰ پرسشنامه) و بر اساس روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) تعیین و وزن‌دهی شد. روش ANP، مسئله را با استفاده از یک سیستم با رویکرد بازخورد بررسی می‌کند. بدین مفهوم که یک سیستم با بازخورد را می‌توان با شبکه‌ای از روابط درونی و بیرونی یک یا دوطرفه که در آن گره‌ها نشانگر سطوح هستند، نشان داد. عناصر موجود در یک گره (یا سطح) ممکن است همه یا بخشی از گره‌ها (یا سطوح) را تحت تأثیر قرار دهند [۳۲]. برای اجرای روش ANP از نرم افزار Super Decision استفاده شد.

هم‌مقیاس کردن و ارزش‌گذاری پیکسلی لایه‌ها توسط توابع ارزش فازی

هر کدام از فاکتورهای مورد استفاده خود دارای واحد و ارزش‌های منحصر به فرد و متفاوتی هستند. از این رو لازم است برای رفع این مشکل و یکسان‌سازی مقیاس اندازه‌گیری و تعیین سطح تأثیر پیکسل‌ها یا طبقات فاکتورها در بحث آسیب‌پذیری، از روشی مناسب استفاده کرد. یکی از این روش‌ها منطق فازی است. طبق این تئوری یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. در منطق فازی با استفاده از توابع مختلف فازی می‌توان داده‌ها و فاکتورها را بنا به عملکردشان در دامنه بین صفر تا یک قرار داد و در نتیجه سطح تأثیر هر یک از پیکسل‌ها یا طبقات معیارها را در بحث آسیب‌پذیری سیلاب نشان داد [۱۷]. در این پژوهش با تحلیل ارتباط هر یک از فاکتورها با آسیب‌پذیری سیلاب (رابطه خطی یا غیرخطی، افزایشی یا کاهش و ...)، تابع عضویت مناسب تعیین شد. بر این اساس، علاوه بر این که مقیاس تمامی داده‌ها مشابه می‌شود، هر نقشه نیز به تنهایی گویای هدف (آسیب‌پذیری) بوده است [۱۷]. لازم به توضیح است که اندازه پیکسلی تمامی لایه‌های رستری ۳۰ متر بوده است.

همپوشانی و شناسایی پهنه‌های آسیب‌پذیر

در ادامه برای تعیین مناطق آسیب‌پذیر، از وزن‌های حاصل شده برای هر لایه (از طریق روش ANP) و لایه‌های فازی شده استفاده شد. همپوشانی لایه‌ها از طریق نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و نهایتاً آسیب‌پذیری با استفاده از رابطه ۱ بدست آمد.

نتایج

نتایج تعیین اهمیت متغیرهای آسیب پذیری

بررسی اهمیت متغیرها با استفاده از روش ANP و نظر کارشناسان به طور جداگانه برای هر یک از توابع آسیب پذیری انجام شد. بر اساس نتایج حاصل شده، از بین عوامل در معرض خطر قرارگیری، دو متغیر فاصله از آبراهه و فراوانی وقوع سیلاب به ترتیب با وزنهای برابر با ۰/۳۴۳ و ۰/۳۳۷ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده اند. دو متغیر فراوانی بارشهای سنگین و حداکثر بارش روزانه نیز دارای اهمیت متوسط با وزنهای ۰/۱۵۸ و ۰/۱۱۹ بوده است. متغیر میانگین بارش سالانه اهمیت بسیار ناچیزی را به خود اختصاص داده است (جدول ۱). در این قسمت مقدار ناسازگاری پرسشنامه میانگین برابر با ۰/۰۸۰ بود که کمتر از ۰/۱ بوده و قابل قبول است [۳۲].

از بین متغیرهای حساسیت، عوامل تراکم جمعیت، فاصله از مناطق مسکونی و درصد خانوارهای کشاورز و دامدار بیشترین وزن را دارا هستند (به ترتیب با وزنهای ۰/۳۶۱، ۰/۲۳۵ و ۰/۱۷۸). اهمیت سایر متغیرهای هر یک کمتر از ۰/۱۰ تشخیص داده شده است (جدول ۲). مقدار ناسازگاری پرسشنامه میانگین جهت ارزیابی متغیرهای حساسیت برابر با ۰/۰۵۸ بود که کمتر از ۰/۱ بوده و قابل قبول است [۳۲].

بررسی تاب آوری حاکی از آن است که به ترتیب اهمیت عوامل تعداد مراکز بهداشتی و درمانی، تعداد راههای مواصلاتی و تعداد شرکت های خدمات روستایی برابر با ۰/۶۵۵، ۰/۲۵۰ و ۰/۰۹۵ است (جدول ۳). مقدار ناسازگاری پرسشنامه میانگین جهت ارزیابی متغیرهای تاب آوری برابر با ۰/۰۱۸ بوده که کمتر از ۰/۱ بوده و قابل قبول است [۳۲].

جدول ۱- اهمیت متغیرهای در ارزیابی در معرض خطر قرارگیری

متغیر	وزن
Variable	Weight
فاصله از آبراهه	0.343
Distance from stream	
فراوانی سیلاب	0.337
Flood frequency	
فراوانی بارشهای سنگین	0.158
Frequency of heavy rainfalls	
حداکثر بارش روزانه	0.119
Maximum daily precipitation	
میانگین بارش سالیانه	0.042
Mean annual precipitation	

جدول ۲- اهمیت متغیرهای در ارزیابی حساسیت

Table 2. Importance of variables in susceptibility analysis

متغیر	وزن
Variable	Weight
تراکم جمعیت	0.361
Population density	
فاصله از مناطق مسکونی	0.235
Distance from residential areas	
درصد خانوارهای کشاورز و دامدار	0.178
Percentage of farmer and rancher households	
فاصله از جاده	0.071
Distance from road	
فاصله از مراکز صنعتی و معدنی	0.063
Distance from industrial and mining centers	
تراکم دام	0.060
Livestock density	
کاربری اراضی	0.032
Land use	

جدول ۳- اهمیت متغیرهای در ارزیابی تاب آوری

Table 3. Importance of variables in resilience assessment

متغیر	وزن
Variable	Weight
تعداد مراکز بهداشتی و درمانی	0.655
Number of health centers	
تعداد راههای مواصلاتی	0.250
Number of transportation ways	
تعداد شرکت های خدمات روستایی	0.095
Number of rural service companies	

نتایج تعیین ارزش پیکسلی لایه ها

پس از استخراج اهمیت معیارها، هر یک از لایه ها بر اساس ارتباط با توابع آسیب پذیری فازی شدند. در جدول ۴ توابع عضویت فازی استفاده شده جهت ارزش گذاری لایه ها ارائه شده است. همانطور که مشخص است هر لایه بر اساس ارتباط آن با آسیب پذیری از یک تابع عضویت تبعیت می کند. برای مثال، با افزایش فاصله از آبراهه، مقدار در معرض خطر قرارگیری کاهش پیدا می کند، بنابراین ارتباط خطی کاهشی بین فاصله از آبراهه و تابع در معرض خطر قرارگیری وجود دارد؛ و یا هر چقدر تراکم جمعیت بیشتر باشد انتظار می رود حساسیت نیز بیشتر شود، بنابراین تابع ارتباط این دو لایه بصورت خطی افزایشی است؛ و یا در مورد تاب آوری، هر چه تعداد مراکز بهداشتی بیشتر باشد، تاب آوری نیز بیشتر است، بنابراین تابع خطی

افزایشی گویای این ارتباط است (جدول ۴). در مورد نقشه کاربری اراضی، ارزش هر کاربری منطبق با وزن‌های فازی اختصاص داده شده توسط مطالعه حسینی و همکاران [۱۷] تعیین شد؛ بر این اساس، طبقات مختلف کاربری اراضی شامل زمین بایر (۰/۲)، مرتع (۰/۴)، جنگل (۰/۴)، آب (۰/۴)، باغ (۰/۷)، کشاورزی (۰/۸) و منطقه مسکونی (۱) فازی شده و نقشه کاربری اراضی فازی حاصل شد. در شکل‌های ۲ تا ۴ متغیرهای فازی شده مورد استفاده جهت استخراج نقشه‌های در معرض خطر قرارگیری، حساسیت و تاب‌آوری ارائه شده است.

نتایج شناسایی پهنه‌های آسیب‌پذیر

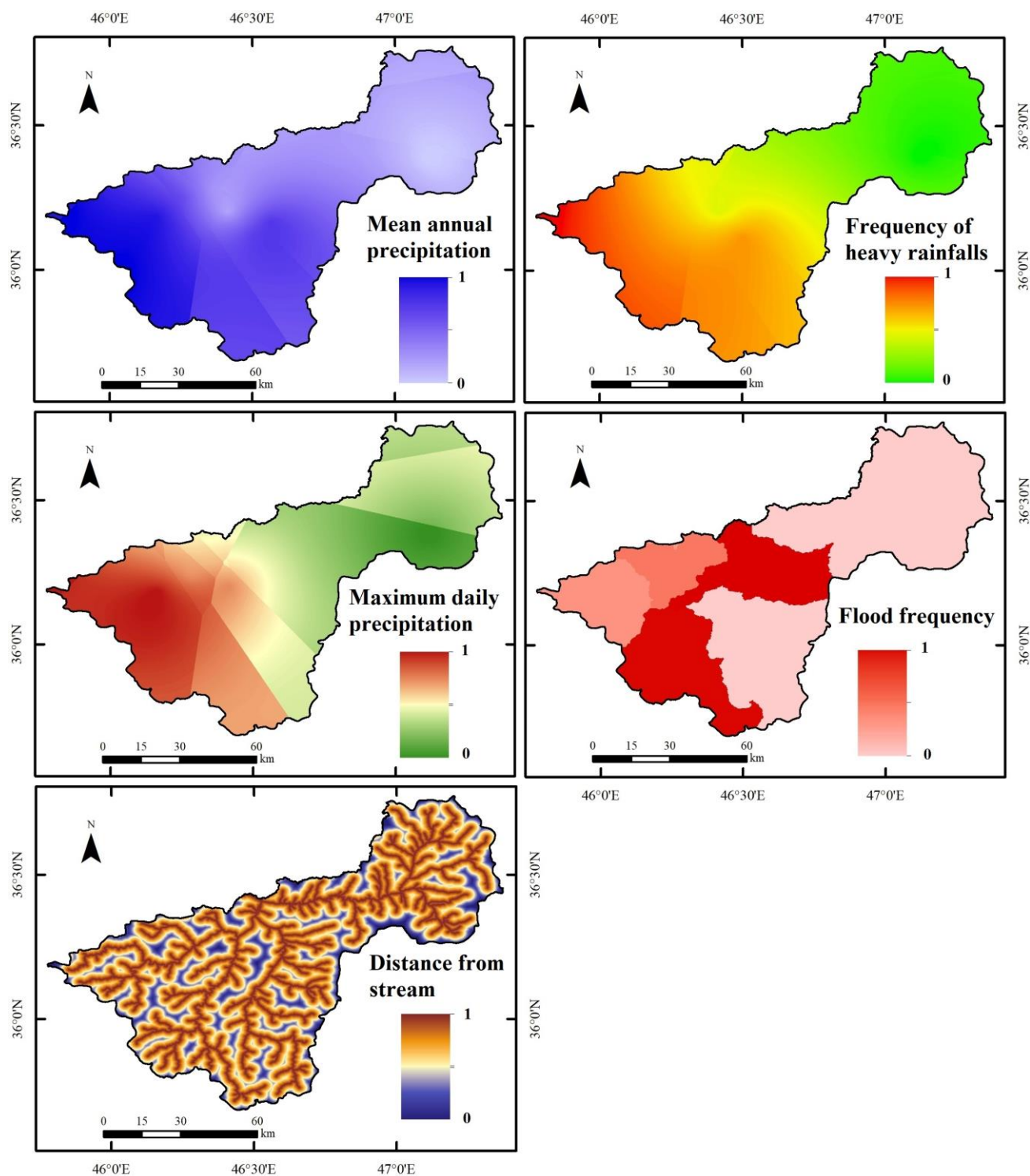
پس از ارزش‌گذاری فازی لایه‌ها و اعمال وزن‌های استخراج شده از روش ANP برای هریک از متغیرها، همپوشانی لایه‌ها انجام و نقشه توابع آسیب‌پذیری استخراج شد (شکل ۵). بر اساس نقشه در معرض خطر قرارگیری، مناطق واقع در خروجی حوزه آبخیز زرينه‌رود بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس نقشه حساسیت، بخش‌هایی نزدیک خروجی و بخش‌هایی در شمال شرق حوزه آبخیز حساسیت بالاتری را نسبت به سیلاب نشان می‌دهند. بر اساس نقشه تاب‌آوری، بیشترین تاب‌آوری در نواحی مرکزی حوزه

آبخیز واقع شده است ولی بخش‌هایی در شمال و جنوب حوزه آبخیز کمترین تاب‌آوری را دارا هستند (شکل ۵). نهایتاً با تلفیق نقشه‌های در معرض خطر قرارگیری، حساسیت و تاب‌آوری نقشه آسیب‌پذیری استخراج شد. نقشه فازی (طبقه‌بندی نشده) آسیب‌پذیری در شکل ۵ ارائه شده است. این نقشه با فواصل ارزشی یکسان به پنج کلاس شامل آسیب‌پذیری خیلی کم (۰/۲-۰)، آسیب‌پذیری کم (۰/۴-۰/۲)، آسیب‌پذیری متوسط (۰/۶-۰/۴)، آسیب‌پذیری زیاد (۰/۸-۰/۶) و آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۱-۰/۸) طبقه‌بندی شد (شکل ۶). بر این اساس، آسیب‌پذیرترین مناطق با کلاس خیلی زیاد عمدتاً در بخش‌های خروجی حوزه آبخیز واقع شده‌اند که حدود ۲/۰۶٪ از حوزه آبخیز را شامل می‌شود. کلاس‌های آسیب‌پذیری متوسط و زیاد به ترتیب حدود ۳۹/۹۱٪ و ۳۴/۸۴٪ از سطح حوزه آبخیز را به خود اختصاص داده‌اند. کلاس‌های خیلی کم و کم به ترتیب حدود ۲/۱۰٪ و ۲۱/۰۹٪ از حوزه آبخیز را دربر می‌گیرند و عمدتاً در بخش‌های مرکزی واقع شده‌اند. در مجموع حدود ۳۶/۹۰٪ از سطح حوزه آبخیز در کلاس‌های آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد واقع شده است (شکل ۶).

جدول ۴- توابع عضویت فازی استفاده شده جهت ارزش‌گذاری پیکسلی لایه‌ها

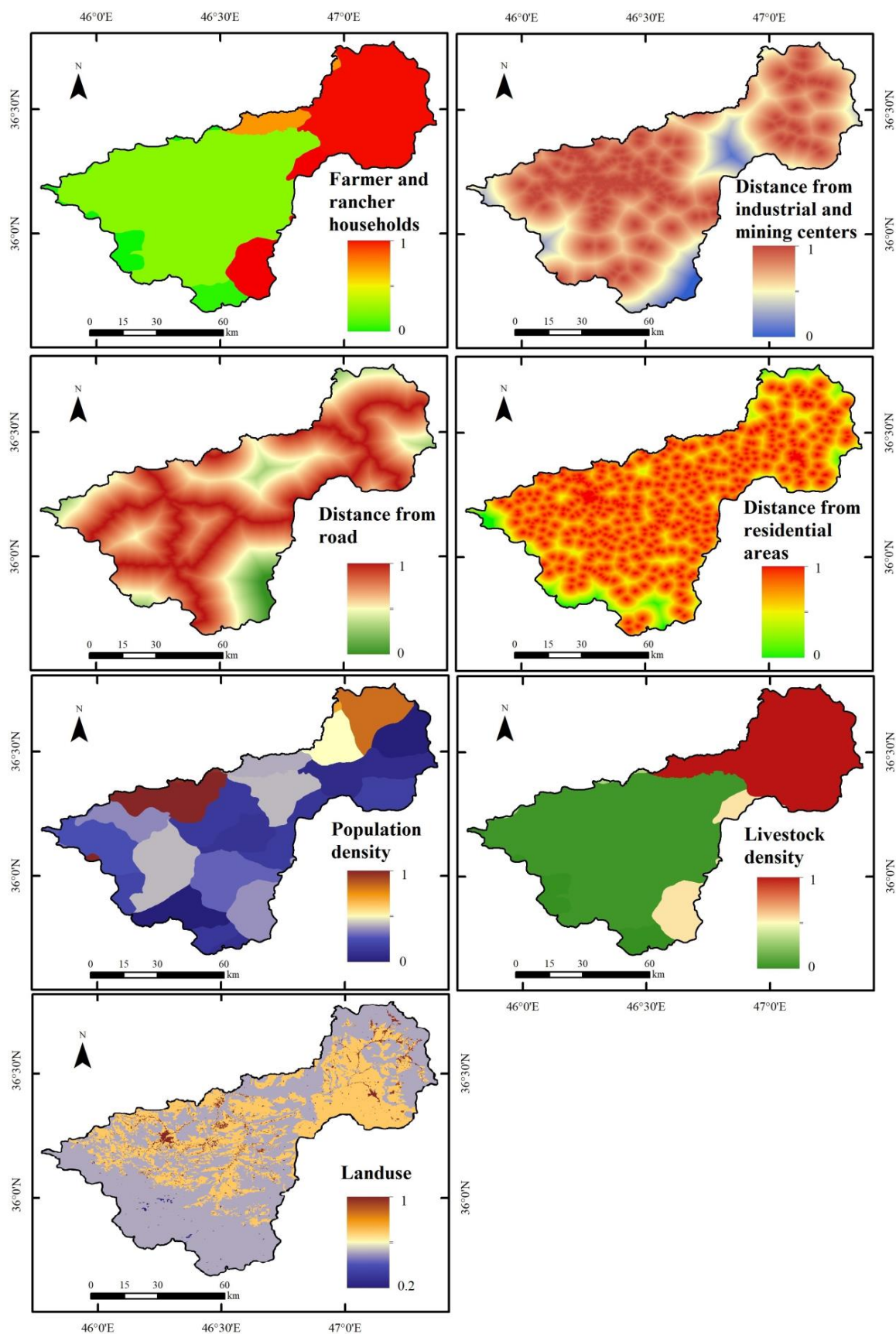
Table 4. Fuzzy membership functions used to fuzzify layers

تابع عضویت Membership function	فاکتور Factor	توابع آسیب‌پذیری Vulnerability functions
Linear-decreasing خطی کاهشی	Distance from stream	فاصله از آبراهه
Linear-increasing خطی افزایشی	Flood frequency	فراوانی سیلاب
Linear-increasing خطی افزایشی	Frequency of heavy rainfalls	فراوانی بارش‌های سنگین
Linear-increasing خطی افزایشی	Maximum daily precipitation	حداکثر بارش روزانه
Linear-increasing خطی افزایشی	Mean annual precipitation	میانگین بارش سالیانه
Linear-increasing خطی افزایشی	Population density	تراکم جمعیت
Linear-decreasing خطی کاهشی	Distance from residential areas	فاصله از مناطق مسکونی
Linear-increasing خطی افزایشی	Percentage of farmer and rancher households	درصد خانوارهای کشاورز و دامدار
Linear-decreasing خطی کاهشی	Distance from road	فاصله از جاده
Linear-decreasing خطی کاهشی	Distance from industrial and mining centers	فاصله از مراکز صنعتی و معدنی
Linear-increasing خطی افزایشی	Livestock density	تراکم دام
User-defined نظر کارشناس	Land use	کاربری اراضی
Linear-increasing خطی افزایشی	Number of health centers	تعداد مراکز بهداشتی و درمانی
Linear-increasing خطی افزایشی	Number of transportation routes	تعداد راه‌های مواصلاتی
Linear-increasing خطی افزایشی	Number of rural service companies	تعداد شرکت‌های خدمات روستایی



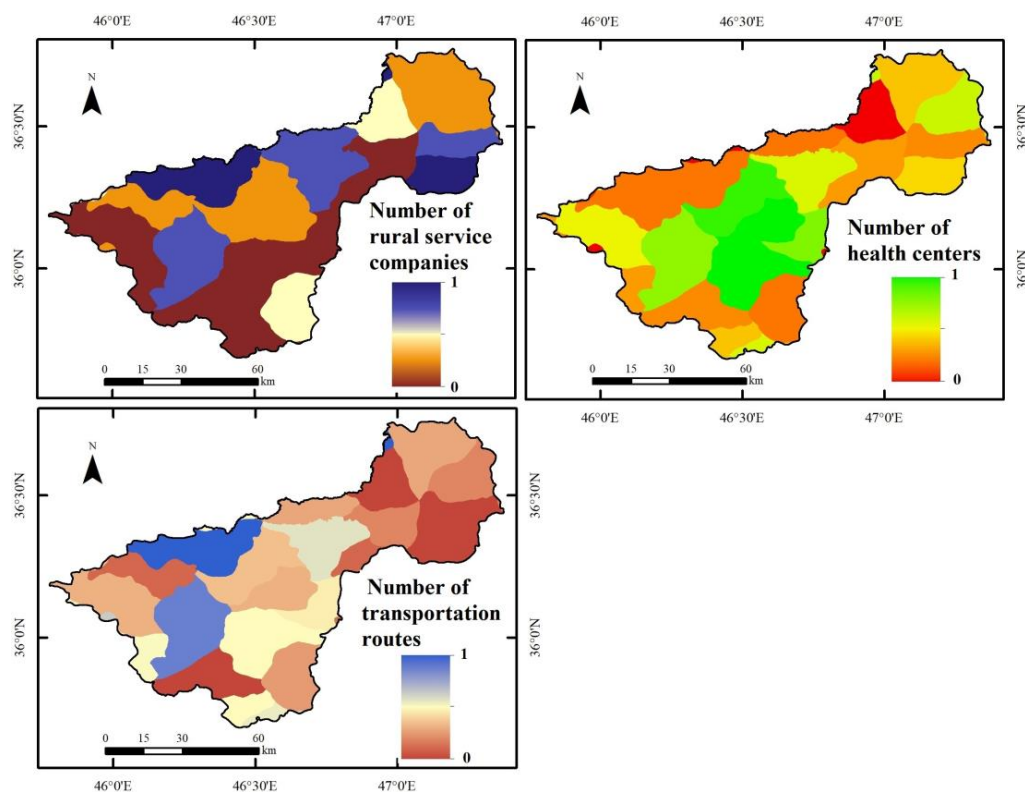
شکل ۲- متغیرهای فازی شده مورد استفاده جهت استخراج نقشه در معرض خطر قرارگیری

Fig 2. Fuzzy variables used to extract the exposure map

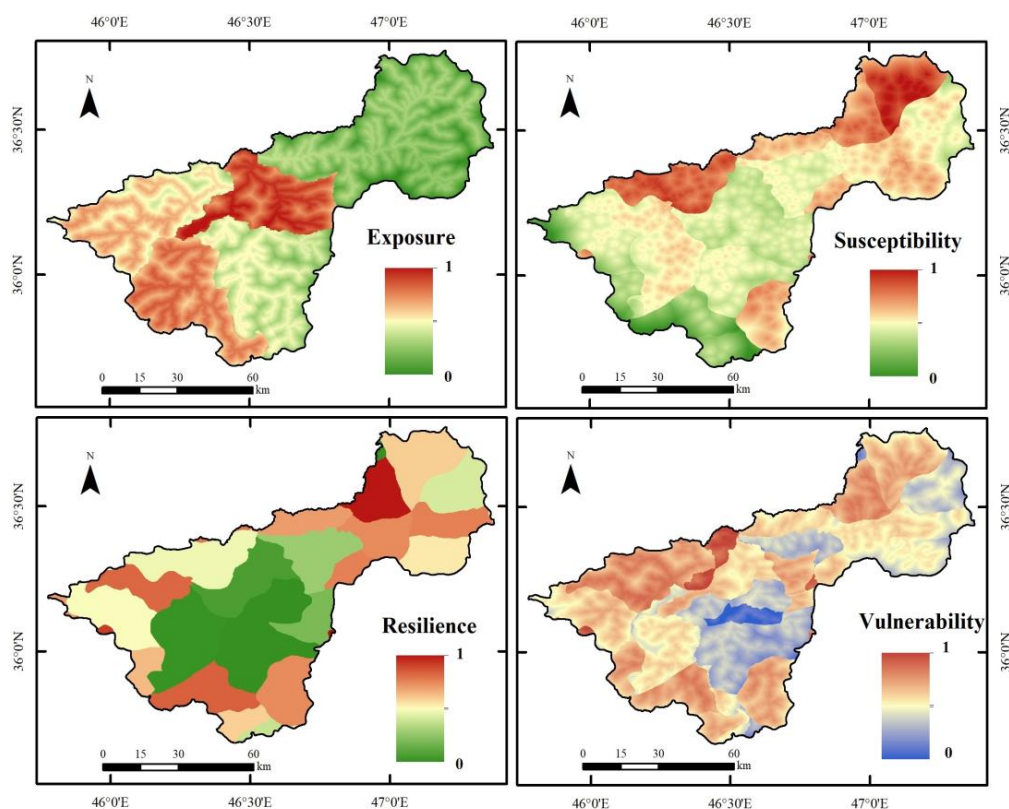


شکل ۳- متغیرهای فازی شده مورد استفاده جهت استخراج نقشه حساسیت

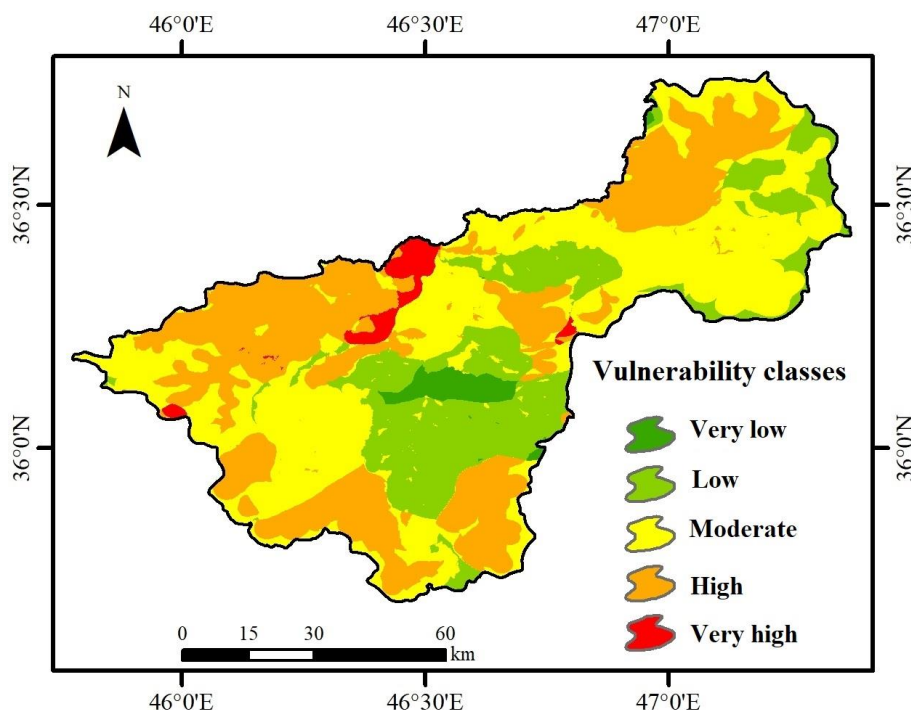
Fig 3. Fuzzy variables used to extract the susceptibility map



شکل ۴- متغیرهای فازی شده مورد استفاده جهت استخراج نقشه تاب‌آوری
Fig 4. Fuzzy variables used to extract the resilience map



شکل ۵- نقشه‌های فازی در معرض خطر قرارگیری، حساسیت، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری
Fig 5. Fuzzy maps of exposure, susceptibility, resilience, and vulnerability



شکل ۶- نقشه آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب در حوزه آبخیز زرینه‌رود

Fig 6. Flood vulnerability map in Zarrinehrood Watershed

زیاد و تاب‌آوری کم تا متوسطی را دارا هستند که با تلفیق این موارد نسبت به سایر بخش‌های حوزه آبخیز آسیب‌پذیری زیادتری را نشان می‌دهند. همچنین، این موضوع که خروجی آبخیز زرینه‌رود در معرض خطر زیاد سیلاب واقع است با شرایط توپوگرافی نیز سنخیت دارد. بطوریکه انتظار می‌رود در مناطق خروجی آبخیز که پست‌تر، کم‌شیب‌تر و محل جمع شدن و پیوستن شریان‌های طبیعی است، در معرض خطر قرارگیری نیز بیشتر باشد. با توجه به اینکه متغیرهای توپوگرافی هیچ کدام در این مطالعه مورد استفاده نگرفته‌اند و در نقشه‌های خروجی حاصل دخیل نبوده‌اند، نتایج به‌خوبی با شرایط توپوگرافی نیز قابل توجیه است.

یکی از مزیت‌های این پژوهش را می‌توان به استفاده از توابع ارزش فازی جهت ارزش‌گذاری پیکسلی داده‌ها به‌جای طبقه‌بندی آن‌ها دانست. ارائه مقادیر پیوسته بر اساس روش فازی، تغییرپذیری ارزش متغیرها را حفظ می‌کند که نسبت به روش‌های دیگر مانند کلاسه‌بندی ورودی‌ها، واقعی‌تر است [۱۷]. همچنین روش فازی می‌تواند بر ابهام غلبه کرده و عدم قطعیت را کاهش دهد [۳۳، ۳۴]. با طبقه‌بندی لایه‌هایی که حالت عددی و پیوسته داشته، علاوه بر الزام در تعیین وزن کلاس‌ها با نظرات کارشناسی و سلیقه‌ای، میزان تغییرپذیری داده‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند [۳، ۳۳]. به‌طوری‌که هر لایه با ارزش‌های زیاد تبدیل به تنها چند ارزش می‌شود. بنابراین، در این مطالعه مطابق با پیشنهاد مطالعات پیشین [۳، ۳۳]، از کلاسه‌بندی کردن لایه‌ها اجتناب شد و ارزش پیکسلی لایه‌ها با بهره‌گیری از توابع عضویت فازی تعیین شد.

بحث و نتیجه‌گیری

نقشه آسیب‌پذیری می‌تواند بازتاب مناسبی از وضعیت اجتماعی و اقتصادی مناطق مختلف حوزه آبخیز نسبت به سیلاب باشد. بررسی اهمیت متغیرها نشان داد که از بین عوامل در معرض خطر قرارگیری، دو متغیر فاصله از آبراهه و فراوانی وقوع سیلاب بیشترین اهمیت را بخود اختصاص دادند. از بین عوامل حساسیت، متغیرهای تراکم جمعیت، فاصله از مناطق مسکونی و درصد خانوارهای کشاورز و دامدار بیشترین وزن را دارا بودند. همچنین، بررسی تاب‌آوری حاکی از آن بود که به‌ترتیب عوامل تعداد مراکز بهداشتی و درمانی، تعداد راه‌های مواصلاتی و تعداد شرکت‌های خدمات روستایی پر اهمیت بودند. گرچه مطالعات پیشین در زمینه آسیب‌پذیری سیلاب، فاکتورهای مؤثر را کمتر به تفکیک توابع در معرض خطر قرارگیری، حساسیت و تاب‌آوری بررسی کرده‌اند، با این حال اهمیت فاکتورهای تراکم جمعیت و فاصله از آبراهه در بحث آسیب‌پذیری سیلاب توسط مطالعات پیشین مثل کالداس و همکاران [۷]، مروکسیروسوک و همکاران [۲۴]، فدحیل و همکاران [۱۵] و اوما و همکاران [۲۷] تأیید شده است. به‌طوری‌که در مناطقی که تراکم جمعیت زیادتر و فاصله کمتری از آبراهه دارد، طبق نظر کارشناسان، تحت تأثیر عواقب سیلاب قرار گرفته و آسیب بیشتری خواهند دید.

بررسی نقشه آسیب‌پذیری سیلاب نشان داد که مناطق جنوبی حوزه آبخیز زرینه‌رود که در نزدیک خروجی حوزه آبخیز واقع شده‌اند بیشترین میزان آسیب‌پذیری را دارا هستند. علت این موضوع این است که این نواحی در معرض خطر زیاد سیلاب بوده، حساسیت

تأمین اعتبار شده است. علاوه بر این، از حمایت‌های پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی نیز تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

بهرام چوبین: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
فرزانه ساجدی حسینی: مدیریت داده‌ها، راهنمایی، کنترل نتایج، بصری‌سازی.
امید رحمتی: مفهوم‌سازی، آنالیزهای آماری، بررسی نتایج، بازبینی متن مقاله

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. and Yang, H. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water resources research*, 45(10), 1-16.
2. Ajtai, I., Ștefănie, H., Maloș, C., Botezan, C., Radovici, A., Bizău-Cârstea, M. and Baci, C. 2023. Mapping social vulnerability to floods. A comprehensive framework using a vulnerability index approach and PCA analysis. *Ecological Indicators*, 154, 110838.
3. Azareh, A., Rafiei Sardooi, E., Choubin, B., Barkhori, S., Shahdadi, A., Adamowski, J. and Shamsirband, S. 2021. Incorporating multi-criteria decision-making and fuzzy-value functions for flood susceptibility assessment. *Geocarto International*, 36(20), 2345-2365.
4. Basu, T., Mondal, B.K., Abdelrahman, K., Fnais, M.S. and Praharaj, S. 2023. Assessing Urban Flood Hazard Vulnerability Using Multi-Criteria Decision Making and Geospatial Techniques in Nabadwip Municipality, West Bengal in India. *Atmosphere*, 14(4), 669.
5. Brown, J.D. and Damery, S.L. 2002. Managing flood risk in the UK: towards an integration of social and technical perspectives. *Transactions of the institute of British Geographers*, 27(4), 412-426.
6. Cai, Y.P., Huang, G.H., Tan, Q. and Chen, B. 2011.

یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند تحلیل شبکه‌ای، ارزیابی اعتبار و سازگاری مقایسه‌های زوجی است. این موضوع به درک بهتر رابطه بین اجزای شبکه و ایجاد اولویت‌بندی کمک می‌کند [۲۸]. هماهنگی مقایسات باعث خطا و عدم اطمینان برای به دست آوردن نتایج منطقی و واقعی می‌شود [۹]. از آنجا که هیچ داده و روشی برای اعتبارسنجی در مطالعات آسیب‌پذیری تا کنون وجود ندارد، در این مطالعه سعی شد با کسب اعتبار و سازگاری مقایسه‌های زوجی از طریق نرخ ناسازگاری نتایج قابل اطمینان‌تری حاصل شود [۱۷]. در کنار استفاده از رویکرد ارائه شده در این پژوهش، روش‌ها و الگوریتم‌های جدید و بهینه‌ای شامل الگوریتم‌های Condorcet، امتیازدهی Borda، چانه‌زنی Fallback مبتنی بر نظریه بازی و نیز روش بهترین-بدترین وجود دارد که می‌توانند در مطالعات آتی مد نظر قرار گیرند.

اصلی‌ترین محدودیت این پژوهش را می‌توان به نبود آمار و اطلاعات کافی در بحث تاب‌آوری نسبت به سیلاب عنوان کرد که اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه آمار معیارهای مهمی همچون تعداد سامانه‌های هشدار سیل، تعداد مراکز نجات، تجربیات گذشته در مورد خطر سیلاب، بیمه سیل، آمار سیل‌بندها، پناهگاه‌ها و خدمات اضطراری که در منابع به عنوان فاکتورهای مهم ذکر شده بودند [۳۸، ۱۰]، در دسترس نبود. بنابراین لازم است در مطالعات آتی در صورت دسترسی این فاکتورها نیز در نظر گرفته شود.

سیاست‌گذاری و ایجاد چارچوب‌های قانونی و نهادی برای مشارکت عمومی در سطح ملی در مدیریت و برنامه‌ریزی مخاطرات طبیعی مثل سیلاب؛ ایجاد تشکلهای مردم نهاد و حمایتی برای به اشتراک‌گذاری اطلاعات، دانش و افزایش احتمال واکنش مؤثر در مواقع اضطراری؛ آموزش عمومی برای افزایش سطح آگاهی جامعه از مناطق آسیب‌پذیر و افزایش برنامه‌های اجتماعی برای ارتقاء ظرفیت مقابله افراد با سیلاب پیشنهاد می‌شود [۱۹، ۱۸]. برای مثال، بیمه سیلاب باعث تقسیم هزینه‌ها و خسارات وارده بر کل جامعه است، بنابراین هر چقدر تعداد خانوارهای بیمه شده بیشتر باشد انتظار می‌رود تاب‌آوری منطقه نسبت به سیلاب بیشتر باشد.

بطور کلی می‌توان اذعان داشت که اولویت‌بندی اجرای سیاست‌های مدیریتی می‌تواند در ارتباط با خروجی‌های این مطالعه سمت و سویی دقیق‌تر گرفته و حفاظت و احیاء مناطق آسیب‌پذیر را در بر داشته باشد. این‌گونه نقشه‌های یکپارچه تهیه‌شده برای سیلاب با استفاده از طبقه‌بندی‌های دقیق شناخت بهتری از شرایط منطقه فراهم کرده و برنامه‌ریزی و اجرای عملیات مدیریتی در این مناطق با تأکید بر نگاه پیشگیرانه و مبتنی بر ریسک را تسهیل می‌کند.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از نتایج یک پروژه تحقیقاتی مصوب در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (کد: ۳۳۶-۰۰۰۱۷-۲۹-۳۶-۲۴) است که توسط بنیاد ملی علم ایران (شماره طرح: ۹۹۰۱۷۴۱۴)

flooding. *Natural hazards*, 71, 463-491.

17. Hosseini, F.S., Sigaroodi, S.K., Salajegheh, A., Moghaddamnia, A. and Choubin, B. 2021. Towards a flood vulnerability assessment of watershed using integration of decision-making trial and evaluation laboratory, analytical network process, and fuzzy theories. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 62487-62498.

18. Infield, E.M.H., Abunnasr, Y. and Ryan, R.L. 2019. *Planning for Climate Change*. Routledge, New York, 485 p.

19. Joakim, E. and Doberstein, B. 2013. Policy Recommendations for reducing vulnerability to disasters in Canada: perspectives from practitioners in Waterloo Region, Ontario. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 4(4), 274-291.

20. Khan, A., Gong, Z., Shah, A.A. and Haq, M. 2023. A multi-criteria decision-making approach to vulnerability assessment of rural flooding in Khyber Pakhtunkhwa Province, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(19), 56786-56801.

21. Kumar, D. and Bhattacharjya, R.K. 2020. Estimation of integrated flood vulnerability index for the hilly region of Uttarakhand, India. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(4), 04020051.

22. Lee, G., Jun, K.S. and Chung, E.S. 2014. Robust spatial flood vulnerability assessment for Han River using fuzzy TOPSIS with α -cut level set. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 644-654.

23. Mourato, S., Fernandez, P., Pereira, L.G. and Moreira, M. 2023. Assessing vulnerability in flood prone areas using analytic hierarchy process—group decision making and geographic information system: a case study in Portugal. *Applied Sciences*, 13(8), 4915.

24. Mruksirisuk, P., Thanvisitthapon, N., Pholkern, K., Garshasbi, D. and Saguansap, P. 2023. Flood vulnerability assessment of Thailand's flood-prone Pathum Thani province and vulnerability mitigation strategies. *Journal of Environmental Management*, 347, 119276.

25. Nasiri, H., Mohd Yusof, M.J. and Mohammad Ali, T.A. 2016. An overview to flood vulnerability assessment methods. *Sustainable Water Resources Management*, 2, 331-336.

26. Nations, U. 2009. UNISDR terminology on disaster risk reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Report, 1-13.

27. Ouma, Y.O. and Tateishi, R. 2014. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS:

Identification of optimal strategies for improving eco-resilience to floods in ecologically vulnerable regions of a wetland. *Ecological Modelling*, 222(2), 360-369.

7. Caldas, A.M., Pissarra, T.C.T., Costa, R.C.A., Neto, F.C.R., Zanata, M., Parahyba, R.D.B.V., Sanches Fernandes, L.F. and Pacheco, F.A.L. 2018. Flood vulnerability, environmental land use conflicts, and conservation of soil and water: A study in the Batatais SP municipality, Brazil. *Water*, 10(10), 1357.

8. Cardona, O.D., Van Aalst, M.K., Birkmann, J., Fordham, M., Mc Gregor, G., Rosa, P., Pulwarty, R.S., Schipper, E.L.F., Sinh, B.T., Décamps, H. and Keim, M. 2012. Determinants of risk: exposure and vulnerability. In *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 65-108). Cambridge University Press.

9. Davvodi, A. 2009. On inconsistency of a pairwise comparison matrix. *International Journal of Industrial Mathematics*, 1(4), 343-350.

10. de Albuquerque, N.L.B., da Silva, L.B.L., Alencar, M.H. and de Almeida, A.T. 2024. A multicriteria decision model to improve emergency preparedness: locating-allocating urban shelters against floods. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 111, 104695.

11. De Lange, H.J., Sala, S., Vighi, M. and Faber, J.H. 2010. Ecological vulnerability in risk assessment—A review and perspectives. *Science of the total environment*, 408(18), 3871-3879.

12. Duan, C., Zheng, X., Li, R. and Wu, Z. 2024. Urban flood vulnerability Knowledge-Graph based on remote sensing and textual bimodal data fusion. *Journal of Hydrology*, 633, 131010.

13. Endendijk, T., Botzen, W.W., de Moel, H., Aerts, J.C., Slager, K. and Kok, M. 2023. Flood vulnerability models and household flood damage mitigation measures: An econometric analysis of survey data. *Water Resources Research*, 59(8), e2022WR034192.

14. ESCAP, U. 1984. Proceedings of the seminars on flood vulnerability analysis and on the principles of floodplain management for flood loss prevention. *Water Resources Series*, 58.

15. Fadhil, M., Ristya, Y., Oktaviani, N. and Kusratmoko, E. 2020. Flood vulnerability mapping using the spatial multi-criteria evaluation (SMCE) method in the Minraleng Watershed, Maros Regency, South Sulawesi. In *E3S Web of Conferences*, 153, 01004. EDP Sciences.

16. Felsenstein, D. and Lichter, M. 2014. Social and economic vulnerability of coastal communities to sea-level rise and extreme

34. Samanlioglu, F. and Ayağ, Z. 2016. Fuzzy ANP-based PROMETHEE II approach for evaluation of machine tool alternatives. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(4), 2223-2235.
35. Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L. and Polsky, C. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8074-8079.
36. Vaghefi, S.A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H. and Abbaspour, K.C. 2019. The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464.
37. Xue, P., Huang, S., Xie, K., Sun, Y. and Fei, L. 2024. Identification of the critical factors in flood vulnerability assessment based on an improved DEMATEL method under uncertain environments. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 100, 104217.
38. Yiannakoulis, N., Darlington, J.C., Elshorbagy, A. and Raja, B. 2018. Meta-analysis based predictions of flood insurance and flood vulnerability patterns in Calgary, Alberta. *Applied geography*, 96, 41-50.
39. Zhang, X. and Yang, F. 2004. RClimDex (1.0) user manual. Climate Research Branch Environment Canada, 22, 13-14.
- methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), 1515-1545.
28. Ozdemir, M.S. 2005. Validity and inconsistency in the analytic hierarchy process. *Applied Mathematics and Computation*, 161(3), 707-720.
29. Pelling, M. 2012. *The vulnerability of cities: natural disasters and social resilience*. Routledge, London, 224 p.
30. Petit-Boix, A., Sevigné-Itoiz, E., Rojas-Gutierrez, L.A., Barbassa, A.P., Josa, A., Rieradevall, J. and Gabarrell, X. 2017. Floods and consequential life cycle assessment: Integrating flood damage into the environmental assessment of stormwater Best Management Practices. *Journal of cleaner production*, 162, 601-608.
31. Petrucci, O. 2022. Factors leading to the occurrence of flood fatalities: a systematic review of research papers published between 2010 and 2020. *Natural hazards and earth system sciences*, 22(1), 71-83.
32. Saaty, T.L. 1996. *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process*. Pittsburgh: RWS publications, Pennsylvania, 370 p.
33. Sajedi-Hosseini, F., Choubin, B., Solaimani, K., Cerdà, A. and Kavian, A. 2018. Spatial prediction of soil erosion susceptibility using a fuzzy analytical network process: Application of the fuzzy decision making trial and evaluation laboratory approach. *Land degradation & development*, 29(9), 3092-3103.

Spatial Analysis of Vulnerability in Zarrinehrood Watershed to Flood Occurrence

Bahram Choubin^{1*}, Farzaneh Sajedi Hosseini², Omid Rahmati³

Received: 23-08-2024 Accepted: 02-10-2024

Extended Abstract

Introduction

One of the important steps in the framework of watershed conservation programs and sustainable management of natural resources is the identification of vulnerable areas. This step serves as a solid foundation for the measures needed for environmental management. Vulnerability assessment provides necessary standards for implementation priorities and helps identify and prioritize sensitive and vulnerable areas for sustainable management of natural resources. Among natural hazards at the watershed level, floods are one of the most frequent and destructive types of hazards that cause many human and financial losses. Due to being situated in a vast ecosystem of arid and semi-arid regions, Iran is frequently exposed to the destructive effects of floods. The country's vulnerability to these events is exacerbated by climate change and unsustainable human activities. It is predicted that due to climate changes, rapid unplanned urbanization, expansion of impervious surfaces, changes in land-use patterns, and poor management of watersheds, floods will occur more intensely in the future. Therefore, the study and identification of vulnerable areas, as one of the important variables in flood risk management, is a key part of non-structural measures to prevent and reduce the destructive effects of floods. This research seeks to analyze the spatial vulnerability of the Zarrinehrood Watershed to flood events. By considering vulnerability functions, including exposure, susceptibility, and resilience, the degree of vulnerability of this watershed to flood was investigated, and vulnerable areas were identified.

Materials and Methods

The focus of this research is the Zarrinehrood watershed, located in the provinces of West Azarbaijan and Kurdistan, Iran. To identify flood-prone areas in this region, we first collected relevant data and information on factors contributing to flood vulnerability in the study area. Then, the grid layers of factors were prepared in three sectors including exposure (i.e., factors such as average annual rainfall, frequency of heavy rainfall, maximum daily rainfall, distance from waterways, and frequency of floods), susceptibility (i.e., factors like the percentage of farmer and rancher households, distance from industrial areas and mines, distance from roads, land use, population density, and distance from residential areas), and resilience (i.e., factors such as the number of rural cooperative companies, the number of health and treatment centers, and the number of transportation routes). Next, the importance of the variables was evaluated using the method of Analytic Network Process (ANP), taking into account

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran. Email: b.choubin@areeo.ac.ir

2. Ph.D. in Watershed Management Sciences & Engineering, Reclamation of Arid and Mountainous Regions Department, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran.

the internal connections between the variables. The pixel value of the data was then determined by analyzing the relationship of each factor with flood vulnerability and employing fuzzy value functions. Finally, the vulnerability map was prepared and analyzed for the study area by applying the variable weights to the normalized layers.

Results

Examining the importance of variables using the ANP method for each vulnerability function revealed that among the variables used to extract the exposure map, the two variables 'distance from the waterway' and 'frequency of floods' were assigned the highest importance with weights equal to 0.343 and 0.337, respectively. For the susceptibility map, the factors 'population density,' 'distance from residential areas,' and 'percentage of farming and ranching households' held the highest weights (0.361, 0.235, and 0.178, respectively). The resilience study indicated that the 'number of health and treatment centers' held the greatest importance among the variables, with a weight of approximately 65.5%. The exposure map showed that areas located at the watershed outlet were at a higher exposure. Areas near the outlet and in the basin's northeast region exhibited higher susceptibility to floods. Meanwhile, the central areas of the basin showed the highest resilience to floods, while the northern and southern parts had the least resilience. By combining the exposure, susceptibility, and resilience maps, it was found that the most vulnerable areas of the watershed (with a very high vulnerability class) were mainly located at the watershed's outlet, covering about 2.06% of the watershed. These zones exhibit a combination of high exposure to flood hazards, increased susceptibility, and low resilience, which may hinder their ability to recover from flooding events.

Conclusion

Assessing the flood vulnerability map revealed that the southern areas of the Zarrinehrood Watershed, located near the watershed outlet, exhibit the highest vulnerability levels. This can be attributed to the combination of high flood exposure, high susceptibility, and low to moderate resilience in these areas. One of the advantages of this research can be attributed to the use of fuzzy value functions for data pixel valuation instead of classification. The provision of continuous values based on fuzzy functions preserves the data variability, offering a more realistic approach compared to methods such as input classification. Additionally, fuzzy values can help overcome ambiguity and reduce uncertainty. The main limitation of this research lies in the insufficient statistics and information available on flood resilience. Important criteria, such as the number of flood warning systems, rescue centers, past experiences with flood hazard, flood insurance, statistics of flood dams, shelters, and emergency services, were identified as significant factors in previous studies but were not accessible. Therefore, future studies should consider incorporating these factors if they become available. In general, it can be acknowledged that prioritizing the implementation of management policies with an emphasis on preventive and risk-based approach can take a more precise direction in relation to the results of this study and include the protection and restoration of vulnerable areas.

Keywords: Resilience, Fuzzy Value Functions, Susceptibility, Exposure, Analytic Network Process

Acknowledgement



The content of this article is derived from a research project (No. 24-017-29-36-000336) approved by the Agricultural Research, Education and Extension Organization, which was financed by the Iran National Science Foundation (project number: 99017414). In addition, the support of the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute and West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center is also gratefully acknowledged.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Bahram Choubin: Conceptualization, Formal analysis, Software, Writing - original draft preparation.

Farzaneh Sajedi Hosseini: Data curation, Supervision, Validation, Visualization.

Omid Rahmati: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Manuscript editing.