

ارزیابی خطر سیل خیزی در حوضه آبخیز رودخانه زشک شانديز با استفاده از مدل‌سازی بر مبنای سنجش‌ازدور و روش تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی

حمیرا شامکوئیان^۱، کامران داوری^{۲*} و محمد فرشته‌پور^۳

چکیده

در این تحقیق، به منظور ارزیابی خطر سیل‌خیزی حوضه آبخیز زشک شانديز در استان خراسان رضوی، از مدل تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی استفاده شد که دربرگیرنده مراحل مختلف، نظیر امتیازدهی زوجی معیارها و زیرمعیارها براساس نظرات کارشناسی، فازی‌سازی امتیازات، اختصاص وزن‌های فازی و تلفیق نهایی عوامل است. بدین‌منظور، ۱۵ شاخص مورفومتریک در فرایند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. در نتیجه این تحقیق، از بین عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی، آبراه‌ها به‌عنوان بستر اصلی رخداد‌های سیل، عامل بارش به‌عنوان کلیدی‌ترین محرکه اقلیمی سیل و متغیرهای هیدرولوژیک، آدافیک و بوتانیک حاکم بر حوضه آبخیز نظیر جریان تجمعی، شماره منحنی و شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی، به‌ترتیب با وزن‌های فازی‌شده ۰/۰۷۲، ۰/۰۷۱، ۰/۰۷، ۰/۰۶۸ و ۰/۰۶۷، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل در محدوده مطالعاتی شناسایی شدند. نتایج پهنه‌بندی پتانسیل مکانی سیل‌خیزی در محدوده مطالعاتی حاکی از آن است که حدود ۲۷/۵ درصد (۱۸۷۳ هکتار) از سطح حوضه در کلاس‌های خطر سیل‌خیزی زیاد و خیلی‌زیاد قرار گرفته‌اند. توزیع مکانی کلاس‌های خطر بالای سیل‌خیزی در بالادست و پایین‌دست بیانگر لزوم اجرای توأم اقدامات مدیریتی نرم در بالادست (بیولوژیک و بیومکانیکی) و سخت (مکانیکی) در پایین‌دست حوضه است. همچنین، آموزش ساکنان درباره مفاهیم خطر و ریسک سیل در همه مناطق اعم از کلاس‌های خطر خیلی‌کم تا خیلی‌زیاد پیشنهاد می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در حوضه‌های وسیع با داده‌های محدود، استفاده از مدل‌های تلفیقی کارشناسی-قاعده‌محور نسبت به مدل‌های داده‌کاوی داده‌محور (لرزش) میدانی نقطه‌ای یا پهنه‌ای) ارجحیت بالاتری دارند. در تحقیق حاضر، روش فازی با تبدیل نظرات کارشناسی در مقیاس‌های ۰ تا ۱ در ارائه بهتر نظرات و هم‌سوسازی با واقعیت طبیعی منطقه نقش مؤثری داشت.

واژه‌های کلیدی: خطر سیل‌خیزی، ریسک سیل‌خیزی، شاخص مورفومتریک، مدل‌سازی تلفیقی سیل.

ارجاع: داوری ک. شامکوئیان ح. و فرشته‌پور م. ۱۴۰۱. ارزیابی خطر سیل‌خیزی در حوضه آبخیز رودخانه زشک شانديز با استفاده از مدل‌سازی بر مبنای سنجش‌ازدور و روش تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی. ۴۷: ۱۱-۲۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13882.2401>

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- پسادکتری در دانشگاه آنتاریو غربی کانادا.

* نویسنده مسئول: m.shahrokhnia@areeo.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

مقدمه

لامرد استان فارس با دخیل کردن دو مجموعه معیار طبیعی (فاصله از آبراهه، زمین شناسی و شیب) و انسانی (شبکه معابر، پل های شهری، کاربری های مسکونی، کشاورزی و جنگلی و قابلیت اراضی) بهره بردند. براساس نتایج تحقیق ایشان، نزدیک به نیمی از محدوده مطالعاتی در وضعیت هشدار قرار داشته و شرایط سیل خیزی مهیا است. در تحقیقات خارجی نیز، اکمچی اوقلو و همکاران (۲۰۲۱) با بهره گیری از روش تلفیقی فازی-تحلیل سلسله مراتبی (FAHP) و در نظر گرفتن عوامل مؤثر شامل زیرساخت های آسیب پذیر، تراکم جمعیت، جمعیت آسیب پذیر، سطح آموزش، سطح درآمد، مسیرهای حمل و نقل، تعداد خانوار، کاربری اراضی، شبکه پمپاژ آب، شیب، شماره منحنی (مناطق نفوذناپذیر)، دوره بازگشت رگبارها و تعداد روزهای بارانی در سال، به ارزیابی ریسک سیل خیزی شهر استانبول پرداختند. براساس بزرگی رخدادهای دو دهه اخیر، دقت مدل قابل قبول ارزیابی شده است. کارایی مناسب مدل FAHP در تحقیقات بویوکوزخان و فیضی اوقلو (۲۰۰۴)، یانگ و همکاران (۲۰۱۳)، تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) و دارکو و همکاران (۲۰۱۹) نیز مبتنی بر مقایسه با واقعیت زمینی الگوی پراکنش و مستندات خسارات سیل گزارش شده است با مرور منابع فوق، مشخص شد که شکاف تحقیقاتی شامل عدم استفاده از روش تلفیقی فازی-تحلیل سلسله مراتبی به عنوان یک روش مناسب مدیریتی برای سناریوسازی در حوضه مطالعاتی و در نظر گرفتن مجموعه محدودی از عوامل برای مدل سازی پتانسیل سیل خیزی بوده که انجام تحقیق حاضر را الزامی می سازد. در این تحقیق سعی بر آن است که علاوه بر استفاده از روش تلفیقی FAHP، عوامل مؤثر بر سیل خیزی نیز غنی شود. با تکیه بر موارد فوق، اهداف تحقیق حاضر مشتمل بر تهیه عوامل مؤثر بر سیل خیزی حوضه (متناسب با موجودیت داده)، تهیه پرسشنامه های مقایسات زوجی درون عاملی و بین عاملی، استخراج وزن عوامل مبتنی بر تحلیل سلسله مراتبی، فازی سازی وزن های مستخرج و پهنه بندی سیل خیزی در حوضه آبخیز زشک شاندریز استان خراسان رضوی تعریف شد.

هرساله بلایای طبیعی مانند سیلاب باعث تلفات فراوان جانی و مالی در سراسر جهان می شود که سیلاب به دلیل وسعت زمانی و مکانی آن، مخرب ترین آن ها شناخته شده است (تیرنی و همکاران، ۲۰۰۲). یکی از جنبه های مهم و قابل توجه در برنامه ریزی توسعه، تأکید و توجه به آسیب پذیری کشور و مهم تر از همه، آسیب پذیری عناصر در معرض خطر در مقابل مخاطرات طبیعی است؛ بنابراین شناسایی مناطق حساس به وقوع سیل و شناخت عوامل مؤثر بر آن به منظور انجام اقدامات لازم، برای کاهش خسارات ضروری است (بابک و همکاران، ۲۰۱۲). امروزه با وجود توسعه مدل های پیشرفته، مدل سازی فرایندهای دخیل در ایجاد سیل با سرعت و دقت بالا انجام می گیرد؛ البته بخش اعظم این مدل ها نیازمند داده های ورودی دقیق و بسیار بوده که اغلب با تعیین پارامترهای متعدد اجرا می شوند. از سوی دیگر، روش های یادگیری ماشین نیز جایگاه ویژه ای نزد محققان یافته است، اما به دلیل ذات جعبه سیاه بودن و عدم اطلاع کاربر از معادلات ریاضی به کاررفته در بطن مدل و نحوه فرموله کردن روابط درهم تنیده و پیچیده عوامل طبیعی با واقعه هدف (سیل)، ابهامات متعددی مشاهده می شود. در زمینه مدل سازی پتانسیل مکان سیل خیزی، مجموعه وسیعی از مدل های آماری (دومتغیره و چندمتغیره)، مدل های کمی و نیمه کمی مبتنی بر نظر کارشناسی، مدل های قاعده محور فازی^۱ و روش های احتمالاتی داده محور^۲ از جمله مدل های داده کاوی یادگیری ماشین/عمیق توسعه داده شده اند. مدل های احتمالاتی داده محور عمدتاً بر پایه شواهد حضور و عدم حضور پدیده در طبیعت استوار هستند که معمولاً در قالب داده های نقطه ای یا پهنه ای فراخوانی شده و بعضاً خروجی های قابل قبولی ارائه می کنند؛ بنابراین در این تحقیق، ارزیابی پتانسیل مکانی سیل خیزی حوضه زشک شاندریز با تکیه بر روش تلفیقی تحلیل سلسله مراتبی-فازی (FAHP) بدون نیاز به شواهد میدانی انجام شد. تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده که به شرح ذیل ارائه می شود:

غلامی و احمدی (۱۳۹۸) از دو روش AHP و Fuzzy به طور جداگانه برای ارزیابی پتانسیل سیل خیزی در شهر

مواد و روش‌ها

نمودار جریان‌ی تحقیق حاضر در شکل ۱ ارائه شده است که در بخش‌های بعدی به تفصیل به آن‌ها پرداخته می‌شود. طبق این شکل، از ۱۵ شاخص مورفومتریک که در ادامه به آن اشاره می‌شود، در فرایند مدل‌سازی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه زشک شان‌دیز با روش تلفیقی فازی-سیل‌خیزی

تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. این مدل‌سازی شامل مراحل مختلف امتیازدهی زوجی معیارها و زیرمعیارها براساس نظرات کارشناسی، فازی‌سازی امتیازات، اختصاص وزن‌های فازی و تلفیق نهایی عوامل است.

ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه زشک شان‌دیز، استان خراسان رضوی



شکل ۱- نمودار جریان‌ی تحقیق

منطقه مورد مطالعه

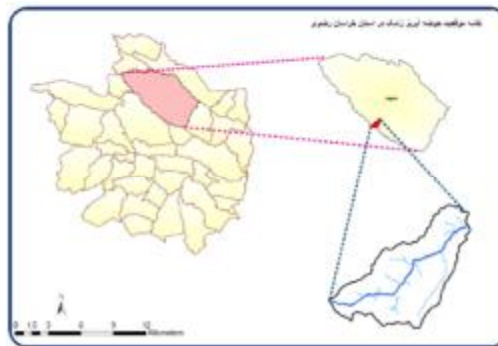
منطقه مورد مطالعه مطابق با شکل ۲ حوضه آبخیز رودخانه زشک با طول تقریبی ۱۷ کیلومتر در بالادست شهر شان‌دیز و جنوب‌غربی دشت مشهد واقع شده است. کاربری اراضی این حوضه شامل مراتع نیمه‌تراکم، کم‌تراکم و زراعت آبی و باغات است. بیشترین ارتفاع این حوضه ۲۵۴۰ متر در نزدیکی روستای زشک و کمترین ارتفاع آن ۱۲۵۰ متر در خروجی دشت و در نزدیکی بندگستان است. متوسط دمای سالانه این حوضه براساس ایستگاه هواشناسی سرآسیاب ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد است و حداقل دمای آن در فصل زمستان به ۱۶- درجه سانتی‌گراد و حداکثر دمای آن در فصل تابستان به ۴۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. متوسط بارندگی در این حوضه با توجه به آمار ۳۰ ساله ایستگاه فوق ۳۱۱ میلی‌متر در سال است. رودخانه زشک-شان‌دیز که مهم‌ترین رودخانه این حوضه است، از ارتفاعات بینالود،

کوه‌های زنبورگاه، سیاه‌خانی، تیغ سیاه و کوه‌چمن سرچشمه می‌گیرد و پس از پیوستن به شاخه‌های فرعی کنگ، زشک بزرگ و کوچک به سمت پایین‌دست حوضه حرکت کرده و در پایین‌دست روستای سرآسیاب با پیوستن چند شاخه فرعی به آن وارد بند گستان می‌شود و طغیان‌های این رودخانه پس از عبور از بند گستان وارد دشت مشهد می‌شود. به‌طورکلی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیل و آبگرفتگی اراضی مجاور رودخانه زشک می‌توان به تصرف بستر و کاهش ظرفیت آبگذری آن اشاره کرد که با توجه به جذابیت‌های گردشگری منطقه مکرراً مشاهده می‌شود. در این رودخانه سیلاب‌های متعددی با ایجاد خسارت به ابنیه و راه‌های مواصلاتی رخ داده است که از آن جمله می‌توان به سیل ۸ شهریور ماه سال ۱۳۸۷، ۱۷ فروردین ماه سال ۱۳۹۱ و ۷ اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۱ اشاره کرد (شامکوئیان و میرقاسمی، ۱۳۹۴).

شدند. شاخص NDVI بیانگر وضعیت پوشش گیاهی منطقه است؛ به طوری که مقادیر منفی به پهنه های آبی و یخی، مقادیر نزدیک به صفر مناطق فاقد پوشش و بایر و مقادیر بالا به مناطق با پوشش متراکم اشاره دارند. نقشه کاربری اراضی از تصاویر اپتیک سنتینل ۲ با تکیه بر روش های کلاسه بندی نظارت شده و الگوریتم Maximum Likelihood در محیط ArcGIS 10.8 با تعیین نمونه های تعلیمی از کاربری های مختلف تهیه و نقشه آرشو شده در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی به روزرسانی و تدقیق شد. نقشه بافت خاک و بارش متوسط سالانه منطقه از آرشو اطلاعات اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی تهیه شد. به منظور فراهم آوردن بستر مقایسه های زوجی درون عاملی، لایه عوامل کمی پیوسته (نظیر ارتفاع از سطح دریا و شیب) مانند سایر عوامل کیفی گسسته (نظیر جهت شیب) به طبقات همگن طبقه بندی شدند. استراتژی طبقه بندی عوامل کمی و تعداد کلاس های طبقه بندی همانند تحقیقات متعدد مرتبط با این مسئله مبتنی بر نظر کارشناسی بوده، اگرچه از شکل توزیع پیکسل های هر لایه نیز بهره برده شده است. به عبارت دیگر، برای طبقه بندی لایه های پیوسته دارای توزیع پیکسل های نرمال و زنگوله ای شکل (نظیر لایه ارتفاع) عمدتاً از تکنیک کلاسه بندی فواصل یکسان یا چارک استفاده می شود. در حالی که روش نقاط عطف منحنی تجمعی فراوانی پیکسل ها (Natural Break) بیشتر در صورت مشاهده چولگی مثبت یا منفی در توزیع پیکسل های یک لایه کمی پیوسته به کار می رود.

تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر تجزیه مسائل پیچیده به سلسله مراتب استوار است که در رأس آن هدف کلی قرار دارد. در مرحله بعدی معیارها و زیرمعیارها قرار می گیرند و در پایین ترین رده، سلسله مراتب گزینه ها قرار دارند. بعد از تجزیه مسئله به سلسله مراتب، عناصر سطوح مختلف به صورت دوتایی با هم مقایسه می شوند (ساتی، ۲۰۰۰). سپس براساس میزان ارجحیت دو معیار، ارزش گذاری صورت می گیرد (علیجانی و همکاران، ۱۳۸۴). تحلیل سلسله مراتبی ۴ مرحله دارد: ۱- ایجاد درخت سلسله مراتبی: انتخاب معیارها و عوامل مؤثر بر هدف. ۲-



شکل ۲- نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز زشک

تولید عوامل مؤثر بر سیل خیزی

براساس مرور منابع گسترده، بازدیدهای گسترده میدانی و بررسی شرایط و عوامل مؤثر بر وقوع سیل های حوضه مورد مطالعه و همچنین در نظر گرفتن قابلیت دسترسی به داده های عوامل، ۱۵ عامل مؤثر از مجموعه عوامل اقلیمی، زمین شناختی، توپوگرافی، توپو-هیدرولوژیکی و انسان ساخت انتخاب شد که شامل ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، جریان تجمعی، شماره منحنی (تلفیق واحدهای همگن کاربری اراضی و بافت خاک)، شاخص ارتفاع از سطح دریا، شاخص زهکش HAND^۱، بارش متوسط سالانه، انحنای طولی دامنه، انحنای عرضی دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی TWI^۲، شاخص طول شیب LS^۳، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده NDVI^۴، موقعیت نسبی شیب RSP^۵، شاخص توان جریان SPI^۶ و شاخص زبری دامنه TRI^۷ هستند. نقشه این عوامل در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS 10.8) و نقشه مدل رقمی ارتفاعی DEM^۸ با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر، از تصاویر ماهواره راداری ALOS PALSAR تهیه شد. نقشه آبراهه از روی نقشه توپوگرافی تهیه شده و سپس با استفاده از الگوریتم Euclidean Distance در محیط ArcGIS 10.8، نقشه فاصله ای تهیه شد. عوامل درجه شیب، جهت شیب، انحنای طولی و عرضی دامنه، شاخص TWI، شاخص HAND، شاخص RSP، شاخص SPI و شاخص TRI از لایه DEM منطقه در محیط ArcGIS 10.8 و SAGA-GIS استخراج و تهیه

1- Height Above the Nearest Drainage (HAND)

2- Topographic Wetness Index (TWI)

3- Slope Length (LS)

4- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

5- Relative Slope Position (RSP)

6- Stream Power Index (SPI)

7- Topographic Ruggedness Index (TRI)

8- Digital Elevation Model (DEM)

معیارها و گزینه‌ها (در صورت وجود) در ماتریس‌های مقایسه زوجی و (۷) محاسبه بردار وزن نهایی است.

مدل تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی (FAHP)

مدل ترکیبی Fuzzy-AHP به مفهوم فازی کردن روش AHP به صورت غیرمستقیم و بدون استفاده از مجموعه‌های فازی است. در واقع در این روش با استفاده از عبارات‌های زبانی، مفهوم فازی بودن، در تعیین ماتریس‌های مقایسه زوجی دخالت داده می‌شود؛ اما محققان با تعمیم روش AHP، روش‌هایی پیشنهاد کرده‌اند که در آن‌ها از اعداد فازی برای بیان ارجحیت گزینه‌ها استفاده می‌شود. در این میان می‌توان به روش‌های لارھون، پدریچ و باکلی اشاره کرد. اعداد فازی مثلثی به صورت (l, m, u) ارائه می‌شوند که پارامترهای l ، m و u به ترتیب کوچک‌ترین مقدار ممکن مورد انتظار، مقدار محتمل‌تر مورد انتظار و بیشترین مقدار ممکن مورد انتظار هستند. روش مقایسات زوجی برای هر سطح با توجه به هدف انتخاب بهترین گزینه با استفاده از مقیاس نه‌تایی انجام می‌شود؛ بنابراین به‌کارگیری AHP سانی دارای کمبودهایی است که عبارت‌اند از: (۱) روش AHP اساساً در تصمیم‌گیری‌های فرایندمحور و غیرفازی استفاده شده است؛ (۲) مقیاس خیلی نامتعادل قضاوت را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ (۳) عدم اطمینان‌های موجود در قضاوت‌های فردی را در نظر نمی‌گیرد؛ (۴) رتبه‌بندی این روش تقریباً غیردقیق است؛ و (۵) قضاوت‌های ذهنی، انتخاب و عملکرد تصمیم‌گیران تأثیرات بسیار زیادی در نتایج AHP دارد؛ بنابراین AHP متعارف و کلاسیک، در دستیابی دقیق نیازمندی‌های تصمیم‌گیران ناکافی و ناکارآمد به نظر می‌رسد. به‌منظور مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان‌ها، تئوری مجموعه‌های فازی می‌بایست با مقایسات زوجی - به‌عنوان توسعه تکنیک AHP- ترکیب شود. روش AHP فازی چانگ، شکل تعمیم‌یافته‌ای از روش AHP کلاسیک است. در این روش برای مقایسه زوجی گزینه‌ها از اعداد فازی و برای به‌دست‌آوردن وزن‌ها و ارجحیت‌ها از روش میانگین‌گیری هندسی استفاده می‌شود؛ زیرا این روش به‌سادگی به حالت فازی قابل تعمیم است و جواب یگانه‌ای برای ماتریس مقایسه‌های زوجی تعیین می‌کند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل تحلیل توسعه چانگ (۱۹۹۶)، از اعداد فازی مثلثی (l, m, u) برای

مقایسه زوجی؛ مقایسات زوجی توسط گروه کارشناس خبره و نرم‌افزار Expert-Choice 11 انجام می‌شود. در این مرحله با توجه به عوامل مؤثر، ماتریس وزن برای مقایسه، تشکیل و عوامل مؤثر دوبه‌دو با هم مقایسه می‌شوند. تمام مقایسه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی به صورت زوجی انجام می‌پذیرد. در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت شفاهی استفاده می‌کنند. این قضاوت‌ها در سال ۲۰۰۰ توسط ساتی براساس میزان ارجحیت به مقدار کمی بین ۱ الی ۹ تبدیل شده است. ۳- نرمال‌سازی و تعیین اولویت‌ها: یعنی گزینه‌های مختلف بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نظر هر معیار با هم مقایسه شده و سپس توسط میانگین وزنی، نرمال می‌شوند. بدین‌صورت اولویت هر گزینه به‌دست می‌آید. ۴- محاسبه وزن یا میزان اثربخشی هر یک از عوامل: شامل روش‌های حداقل مربعات، روش حداقل مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه و روش تقریبی شامل جمع سطرها، جمع ستون‌ها و روش میانگین هندسی است. نرم‌افزار Expert-Choice از روش بردار ویژه که در حال حاضر دقیق‌ترین روش است، استفاده می‌کند. با وجود مزایای قابل‌توجه روش تحلیل سلسله‌مراتبی، نقایصی نیز بدان مترتب است. از آن جمله، تصمیم‌گیرندگان اغلب به‌دلیل طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری معیارها بیان کنند، به همین دلیل در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را به‌جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند. بدین‌ترتیب برای مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان‌ها، تئوری مجموعه‌های فازی که اولین بار توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح شده بود؛ مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور استفاده از مزایای هر دو تکنیک فازی و AHP و نیز غلبه بر نقاط ضعف آن‌ها، ون لارھوون و پدریکز (۱۹۸۳) اولین بار اصول منطق فازی را در تحلیل سلسله‌مراتبی به‌کار بردند. این روش دامنه‌ای از مقادیر را برای بیان عدم قطعیت تصمیم‌گیرندگان به‌کار می‌گیرد. چانگ (۱۹۹۶) روش فازی-تحلیل سلسله‌مراتبی (FAHP) را ارائه کرد. خلاصه این روش شامل (۱) رسم نمودار سلسله‌مراتبی، (۲) مرحله تعریف اعداد فازی به‌منظور انجام مقایسه‌های زوجی، تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با به‌کارگیری اعداد فازی، (۴) محاسبه اعداد فازی مثلثی برای سطرهای ماتریس، (۵) محاسبه درجه بزرگی اعداد فازی مثلثی نسبت به همدیگر، (۶) محاسبه وزن

$$V(S_i > S_k) = \begin{cases} 0 & m_i \geq m_k \\ 1 & l_k \geq u_i \\ \frac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

نهایتاً، با استفاده از معادله (۳)، وزن‌های خام محاسبه و با تقسیم هر وزن خام بر مجموع اوزان خام، وزن نرمال حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} V(S > S_1, S_2, \dots, S_k) \\ &= (V(S > S_1), (S > S_2), \dots, (S > S_k)) \\ &= \min(V(S > S_1), (S > S_2), \dots, (S > S_k)) \\ &= \min V(S > S_i) \quad i = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (3)$$

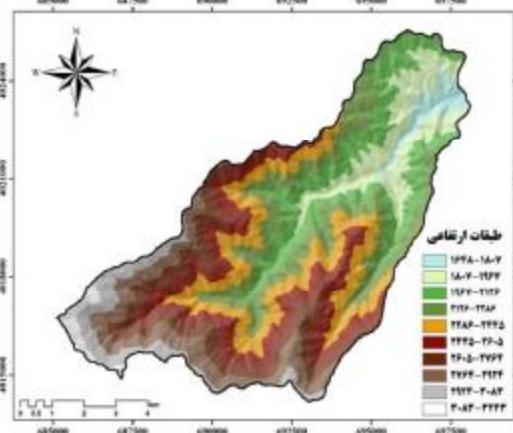
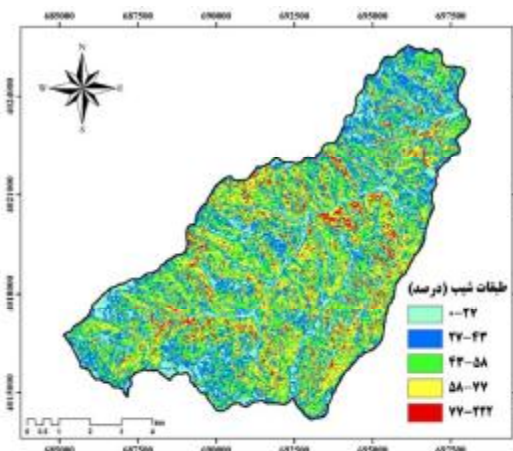
نتایج و بحث

براساس توضیحات ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، ۱۵ عامل توپوگرافی، توپویدرولوژیک، اقلیمی و پوشش گیاهی به‌عنوان مؤثرترین عوامل در سیل‌خیزی حوضه زشک انتخاب و در محیط ArcGIS تهیه و طبقه‌بندی شدند. در شکل ۳ نقشه طبقات ارتفاعی و شیب به‌صورت نمونه ارائه شده است.

ایجاد مقیاس مقایسه زوجی استفاده می‌شود و یک ماتریس مقایسه زوجی برای هر سطح در سلسله‌مراتب ساخته می‌شود. سپس، زیرمجموعه‌های هر سطر در ماتریس محاسبه می‌شود تا عضو یک مجموعه جدید شوند. مقادیر کلی فازی مثلثی (ui, mi, li) برای معیار Mi با محاسبه $li/\sum li$ ، $mi/\sum mi$ و $ui/\sum ui$ به‌دست می‌آید. توابع عضویت که به معنی میانگین وزن متناظر گزینه‌ها در ماتریس مربوطه است، با استفاده از این مقادیر برای هر معیار محاسبه می‌شود. درنهایت این مقادیر، نرمال شده و وزن نهایی اهمیت هر یک از معیارها به‌دست می‌آید. برای محاسبه وزن با روش چانگ، ابتدا مقادیر وزن فازی S_i (Si) برای هر سطر ماتریس مقایسه زوجی فازی از معادله (۱) به‌دست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \times \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right] \quad (1)$$

که در آن gi مجموعه هدف و M_{gi}^j اعداد فازی مثلثی هستند. در مرحله بعدی، میزان بزرگی (درجه اهمیت) هر S_i بر S_k از معادله (۲) محاسبه می‌شود.



شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه زشک شانديز (طبقات ارتفاعی و شیب)

کارشناس خبره، به‌دلیل تعدد نظرات در هر سلول از ماتریس‌های ارائه شده، از مقادیر طیف فازی تعلق‌گرفته به ۹ طیف کلامی ساتی میانگین‌گیری شد. این مقادیر فازی در سه طیف (Lower) L، (Modal) M و (Upper) U تعریف شدند. از مینیمم مقادیر برای تعیین حد پایین اعداد فازی استفاده شد. همچنین، از اعداد میانی فازی میانگین‌گیری هندسی و برای حد بالا از اعداد ماکزیمم استفاده شد. در جدول ۱ میانگین مقادیر طیف‌های فازی

پس از تهیه نقشه عوامل و طبقه‌بندی آن‌ها، ماتریس مقایسات زوجی بین‌عاملی و درون‌عاملی تهیه و در اختیار کارشناس خبره از سازمان‌های تحقیقاتی و اجرایی مشرف بر مسائل سیل و آشنا با حوضه مورد مطالعه قرار گرفت. امتیازات مقایسات زوجی، شامل طیف ۹ تایی ساتی بوده که کارشناسان مربوطه از ارجحیت برابر (عدد ۱) تا ارجحیت خیلی زیاد (عدد ۹)، عدد مناسب را برای مقایسه خود برگزیدند. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها توسط ۱۲

مثلی مقایسات زوجی برای عامل NDVI به‌عنوان مثال ارائه شده است. براساس مقادیر میانگین طیف‌های فازی، وزن نهایی عوامل و کلاس‌های هر عامل به‌دست آمد که در جداول ۲ و ۳ به صورت نمونه ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین مقادیر طیف‌های فازی مثلی مقایسات زوجی نسبت به عامل NDVI

پوشش متراکم	پوشش کم تا متوسط	پوشش ناچیز	فاقد پوشش	مقایسه زوجی طبقات
(۶، ۷/۶۱۲، ۹)	(۳، ۴/۳۰۸، ۶)	(۱، ۲/۲۸۹، ۴)	(۱، ۱، ۱)	فاقد پوشش
(۴، ۵، ۶)	(۲، ۳، ۴)	(۱، ۱، ۱)		پوشش ناچیز
(۲، ۳، ۴)	(۱، ۱، ۱)			پوشش کم تا متوسط
(۱، ۱، ۱)				پوشش متراکم

جدول ۲- وزن نهایی عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه زشک مبتنی بر روش FAHP

ردیف	رتبه	نام معیار	وزن معیار
۱	۳	شماره منحنی	۰/۰۷
۲	۴	جریان تجمعی	۰/۰۶۸
۳	۵	شاخص NDVI	۰/۰۶۷
۴	۶	شیب	۰/۰۶۶

جدول ۳- وزن نهایی کلاس‌های عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه زشک مبتنی بر روش FAHP

عامل	کلاس	وزن معیار	عامل	کلاس	وزن معیار
	۰-۴۵/۰۶	۰/۳۱۳		۰-۲۷	۰/۷۴۳
	۴۵/۰۶-۱۰۰/۷۷	۰/۲۵۳		۲۷-۴۳	۰/۲۵۷
	۱۰۰/۷۷-۱۵۴/۶۱	۰/۲۱۴	درصد شیب	۴۳-۵۸	.
	۱۵۴/۶۱-۲۰۶/۱۵	۰/۱۴۵		۵۸-۷۷	.
فاصله از آبراهه	۲۰۶/۱۵-۲۵۷/۶۹	۰/۰۷۵		۷۷-۲۲۲	.
	۲۵۷/۶۹-۳۱۰/۴۹	.		۱۶۴۸-۱۸۰۷	۰/۳۱۸
	۳۱۰/۴۹-۳۶۵/۹۳	.	ارتفاع از سطح دریا	۱۸۰۷-۱۹۶۷	۰/۲۵۷
	۳۶۵/۹۳-۴۲۷/۹۳	.		۱۹۶۷-۲۱۲۶	۰/۲۱۵

هر عامل، نتیجه می‌شود که مناطق حاشیه آبراهه بیشترین وزن را از آن خود کرده که ناشی از اهمیت بالای دشت‌های سیلابی در سیل‌خیزی بالای منطقه مورد مطالعه بوده و قاعدتاً آب‌بند و زیرساخت‌های مستقر در این عرصه‌ها، خسارات بالایی از سیل را متحمل خواهند شد. مقادیر بالای بارش، بیشترین وزن را از آن خود کرده که بیانگر نقش تداوم بارش به‌عنوان اصلی‌ترین عامل اقلیمی در وقوع سیل در محدوده مورد مطالعه است. مقادیر بالای شماره منحنی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند که خود از ترکیب دو عامل محرک خاک‌های با پتانسیل تولید رواناب بالا (گروه هیدرولوژیکی D) و کاربری‌های مصنوعی و طبیعی با پوشش کم ناشی می‌شود. افزایش جریان تجمعی با بیشترین وزن بیانگر نقش تحریکی

نتایج حاکی از آن است که عامل ارتفاع به‌عنوان یک لایه بینابینی و نماینده به تولید مجموعه وسیعی از شاخص‌های توپویدرولوژیک منجر شده، به‌طوری‌که این شاخص‌های مورفومتریک بعضاً دارای صفاتی بوده که در لایه مادر (ارتفاع) پنهان است. استفاده ترکیبی از این مجموعه شاخص مورفومتریک به درک بهتر مدل و ارتقای قابلیت تشخیص الگوی سیل‌خیزی در مدل نهایی کمک شایان توجهی کرد. بهره‌گیری از این شاخص‌های مورفومتریک، در کنار سایر عوامل زمینه‌ساز اصلی، نظیر عوامل مورفومتریک (ارتفاع، شیب و جهت)، خاکشناسی و زمین‌شناختی (بافت خاک، زمین‌شناسی) و زیست‌محیطی-انسان‌ساز (کاربری و پوشش اراضی) به تشکیل یک مدل کارا ختم شد. با بررسی وزن‌های طبقات

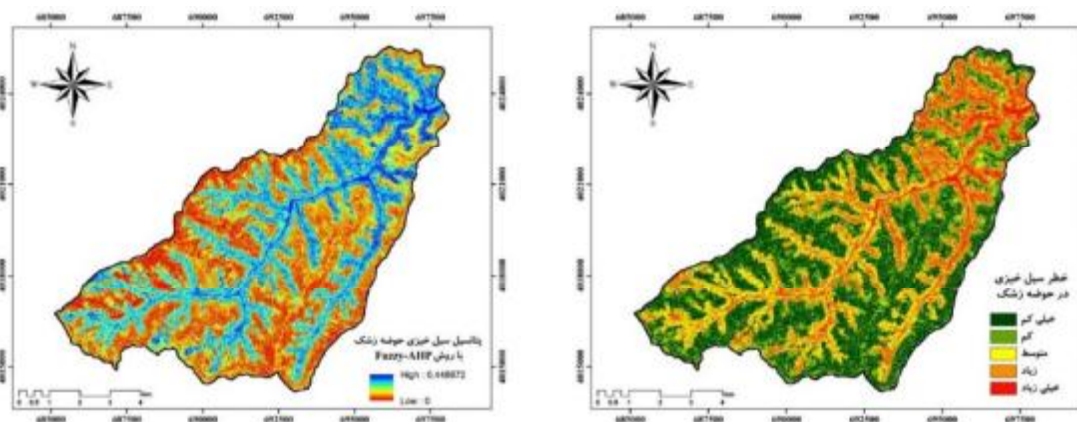
علاوه‌براین، نقشه مؤثر عوامل بنيادین، نظیر آبراهه‌ها به‌عنوان بستر اصلی رخدادهاي سيل، عامل بارش به‌عنوان کلیدی‌ترین محرکه اقلیمی سيل، متغیرهای هیدرولوژیک، ادافیک و بوتانیک حاکم بر حوضه آبخیز نظیر جریان تجمعی، شماره منحنی و شاخص NDVI در تحقیق حاضر به‌عنوان مهم‌ترین عوامل شناسایی‌شده حائز اهمیت است. همچنین، نقش کلیدی شاخص‌های مورفومتریک مشتق از مدل رقومی ارتفاع نظیر SPI، TRI و HAND بار دیگر بر تأثیر قابل‌ملاحظه این نوع از متغیرها بر دلالت غیرمستقیم بر پدیده‌های توپوهایدرولوژیک در فرایند مدل‌سازی صحه می‌گذارد. پس از اعمال وزن عوامل (جدول ۲) در وزن طبقات (جدول ۳)، نقشه نهایی پتانسیل سيل‌خیزی حوضه زشک شانديز در محیط ArcGIS تهیه و سپس با اعمال الگوریتم نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها (Natural Break) به پنج کلاس خطر خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد کلاسه‌بندی شد که در شکل ۴ ارائه شده است. مساحت طبقات خطر سيل‌خیزی نیز در جدول ۴ ارائه شده است. براساس جدول و شکل ۴، حدود ۲۷/۵ درصد (۱۸۷۳ هکتار) از سطح حوضه در کلاس‌های خطر سيل‌خیزی زیاد و خیلی‌زیاد قرار گرفته‌اند. روند نزولی مساحت از کلاس‌های کم‌خطر به پرخطر یکی دیگر از مضامین کاربردی‌بودن نقشه خروجی از الگوریتم محاسباتی FAHP است؛ به‌طوری‌که تخصیص عملیات مدیریتی به سطح کوچک‌تر امری قابل‌اجرا است. همچنین، این روند با طبیعت بلایای طبیعی نیز سازگارتر است؛ به‌طوری‌که مخاطرات طبیعی معمولاً در سطحی کوچک و با شدت بزرگ (و بالتبع خسارات بالا) متمرکز بوده و ممکن است بخش اعظم منطقه از گزند این بلاها در امان باشند. نکته حائز اهمیت در نقشه نهایی طبقات خطر سيل‌خیزی در حوضه زشک، تنوع گسترش مکانی پدیده، هم در بالادست و هم در پایین‌دست است (شکل ۵ و ۶).

با تکیه بر موارد فوق، مشخص می‌شود که مدیریت سيل در حوضه مطالعاتی نیازمند به‌کارگیری برنامه‌های مدیریتی و تسکینی با تنوع بالا است. به‌طوری‌که مناطق بالادست برای اجرای اقدامات بیومکانیکی آبخیزداری شامل افزایش سطح پوشش گیاهی و احداث بندهای گابیونی و سنگی ملاتی جزو مناطق مناسب با راندمان سيل‌گیری بالا هستند. حال آنکه تمرکز بالای ابنیه و حضور مردم در بخش خروجی حوضه، نیازمند دخالت

افزایش مشارکت فضایی در تجمع رواناب بوده که نتیجتاً به غرقاب مناطق تحت‌تأثیر منجر خواهد شد. مقادیر پایین شاخص NDVI به عرصه‌های فاقد پوشش یا پوشش تنک اشاره داشته و به‌سبب عدم‌نفوذ بارش در این عرصه‌ها، حجم رواناب افزایش یافته و بستر را برای شرایط سيل‌خیزی و غرقاب فراهم می‌کند که به‌درستی بالاترین وزن را از آن خود کرده است. طبقه مناطق اشباع در شاخص HAND به‌عنوان یک شاخص توپوهایدرولوژیک جدید بیشترین وزن را از آن خود کرده که حاکی از افزایش حجم رواناب در مناطق با مکانیسم تولید رواناب اشباع به‌دلیل کاهش نفوذپذیری و قرارگیری در مناطق هموار و مستعد تجمع بارش است. مقادیر بالا در شاخص TWI هم‌راستا با شاخص جریان تجمعی به افزایش مشارکت فضایی در تولید و تجمع رواناب اشاره داشته که بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. طبقات عوامل شیب، جهت، ارتفاع و انحنای طولی و عرضی دامنه هم‌راستا بوده و به وزن بالای مناطق هموار واقع در کف دره‌ها (شیب کم و ارتفاع پایین) اشاره دارد که به‌عنوان نخستین عرصه‌های تحت‌تأثیر سيل شناخته می‌شوند. علاوه‌براین، جهات دامنه رو به شمال و شرق به‌سبب دریافت بارش بیشتر، وزن بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند. وزن طبقات عامل موقعیت نسبی دامنه نیز با عامل فاصله از آبراهه هم‌راستا بوده و حاکی از خطر بالای سيل‌خیزی در مناطق حاشیه رودخانه است. مقادیر بالای عامل توان جریان نیز بیشترین وزن را به خود اختصاص داده که ناشی از نقش افزایش توان جریان در انتقال حجم بالای دبی جریان و بالتبع افزایش خطر سيل‌خیزی است. مقادیر بالای عامل TRI دارای بیشترین وزن بوده که ناشی از نقش زبری کم‌دامنه در افزایش سرعت انتقال جریان و بالتبع افزایش پتانسیل سيل‌خیزی است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که مناطق نزدیک به آبراهه، تمرکز بالای بارش سالانه در بخش خروجی حوضه و دامنه‌های شمالی، شمال‌شرقی، شمال‌غربی و شرق، شماره منحنی بالا، جریان تجمعی قابل‌ملاحظه، پوشش گیاهی ناچیز، نواحی هیدرولوژیک اشباع واقع در بافر رودخانه با مشارکت بالا در تولید رواناب، مناطق هموار کم‌ارتفاع، کوریدورهای رودخانه با توان بالای انتقال آب و درنهایت مناطق متجانس با زبری توپوگرافیک کم، بیشترین تأثیر را در سيل‌خیزی بالای حوضه دارند؛

از سوی دیگر، الگوی درجات خطر در آبراهه‌های اصلی حاصل از به‌هم‌پیوستن آبراهه‌های رتبه ۱ بعضاً بین خطر بالا و پایین تغییر کرده درحالی‌که با حرکت از سمت بالادست به سمت پایین‌دست و خروجی حوضه، آبراهه‌های با رتبه‌های بالاتر به‌صورت یکنواخت خطرات خیلی‌زیاد را نشان می‌دهند و انقطاع الگو مشاهده نمی‌شود که ناشی از تجمع جریان، افزایش سرعت و حجم در بخش خروجی حوضه است. الگوی توزیع خطر سیل‌خیزی در زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی در شکل ۸ نیز مؤید همین موضوع بوده، به‌طوری‌که زیرحوضه‌های خروجی خطر سیل‌خیزی بالاتری نسبت به حوضه‌های بالادست نشان می‌دهند. براساس دو شکل فوق، اختصاص برنامه‌های مدیریتی خطرمدار نرم-به-سخت ارائه شده در چارچوب‌های مدیریت بلایای طبیعی در بخش‌های مختلف دنیا (ساندرس و همکاران، ۲۰۱۳) امکان‌پذیر است. در جدول ۵ به‌عنوان نمونه، کلاس خطر سیل‌خیزی خیلی کم تا متوسط ارائه شده است.

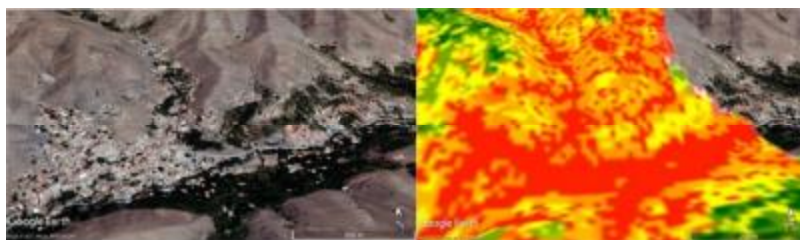
مستقیم مکانیکی به یکی از طرق کاهش عناصر متمرکز، کاهش آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر یا کاهش مستقیم خطر سیل (لایروبی رودخانه، احداث دایک حفاظتی) به‌منظور کاهش خسارات احتمالی است. در این حین، بایستی به اجرای عملیات مدیریتی نرم در سایر بخش‌های حوضه (کلاس‌های خطر خیلی کم تا متوسط) نظیر آموزش اقدامات لازم در قبل، حین و بعد از وقوع سیل، تفهیم معانی مدیریت ریسک و بحران، ظرفیت‌سازی، تحکیم و تقویت اعتماد جاری بین مردم و سازمان‌های مدیریتی، تهییج جوامع محلی برای افزایش مشارکت مردمی در مقابله با سیل توجه ویژه داشت. همچنین، تقسیم‌بندی و مدیریت خطرمدار سیل در دو قالب آبراهه و زیرحوضه در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است. شکل ۷ از روی هم‌گذاری نقشه خطر سیل‌خیزی و شبکه آبراهه‌های حوضه تولید شده است. براساس شکل ۷، آبراهه‌های درجه ۱ به‌دلیل پایین‌بودن توان جریان و سرعت و حجم قابل‌انتقال محدود سیل نسبت به آبراهه‌های اصلی با درجات بالاتر خطر سیل‌خیزی کمتری نیز دارند.



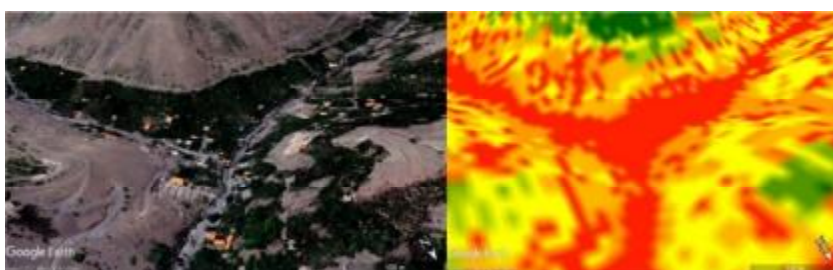
شکل ۴- نقشه‌های پتانسیل و طبقات خطر سیل‌خیزی حوضه زشک شاندریز حاصل از مدل FAHP چانگ

جدول ۴- مساحت و درصد مساحت طبقات خطر سیل‌خیزی در حوضه زشک شاندریز

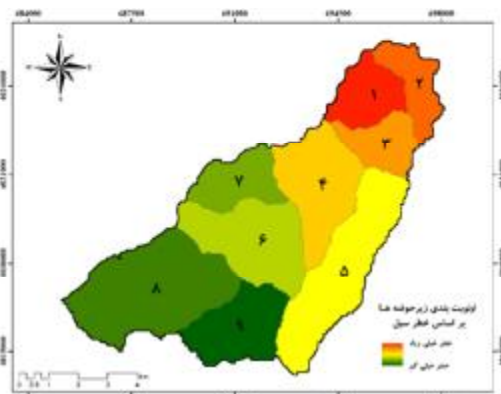
درصد مساحت	مساحت (هکتار)	کلاس‌های خطر سیل‌خیزی
۲۹/۸۳	۲۰۳۱/۴۷	خیلی کم
۲۲/۰۶	۱۵۰۲/۳۴	کم
۲۰/۶۲	۱۴۰۴/۳۴	متوسط
۱۸/۶۳	۱۲۶۸/۷۲	زیاد
۸/۸۶	۶۰۳/۶۱	خیلی زیاد
۱۰۰	۶۸۱۰/۴۸	کل



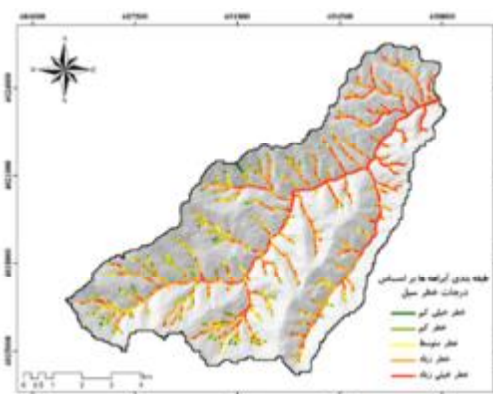
شکل ۵- تمرکز بالای کلاس های خطر زیاد و خیلی زیاد سیل خیزی در بخش خروجی حوضه زشک و تمرکز بالای اینیه



شکل ۶- تمرکز بالای کلاس های خطر زیاد و خیلی زیاد سیل خیزی در بالادست حوضه زشک با تمرکز کاربری های باغ کاری و مسکونی



شکل ۸- طبقه بندی خطرمدار سیل زیر حوضه های زشک



شکل ۷- طبقه بندی خطرمدار سیل شبکه آبراهه های حوضه

جدول ۵- تخصیص برنامه های مدیریتی به کلاس های مختلف خطر سیل خیزی

ردیف	کلاس خطر سیل خیزی	تُن رنگ غالب	رویکرد کلی	برنامه مدیریتی
۱	خیلی کم	سبز	قابل قبول	(۱) فاقد برنامه (BAU) (۲) آموزش ساکنان و ظرفیت سازی برای افزایش بردباری فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی مقابل خسارات سیل
۲	کم	سبز روشن	قابل قبول	(۱) آموزش ساکنان و ظرفیت سازی برای افزایش بردباری فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی مقابل خسارات سیل (۲) اجرای عملیات بیولوژیک
۳	متوسط	زرد	قابل تحمل	(۱) آموزش ساکنان و ظرفیت سازی برای افزایش بردباری فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی مقابل خسارات سیل (۲) اجرای عملیات بیومکانیکی (۳) وضع قوانین جدی در زمینه عدم تغییر کاربری

نتیجه‌گیری

شباهت بالای نتایج مدل به ماهیت خطر سیل به‌عنوان یک مخاطره طبیعی در منطقه است. روند توزیع مکانی کلاس‌های خطر سیل‌خیزی در سطح محدوده مطالعاتی نیز اشاره به لزوم اجرای اقدامات تلفیقی بیولوژیک و مکانیکی، هم در بالادست و هم در پایین‌دست منطقه دارد. نقشه پهنه‌بندی سیل‌خیزی تهیه‌شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک سند مطالعاتی در تخصیص اقدامات تسکینی به مناطق مختلف منطقه و همچنین اجرای تحقیقات آمایش سرزمین خطرمنابا استفاده می‌شود.

منابع

1. شامکوئیان ح. و میرقاسمی س. ح. 1394. سیل‌های خراسان رضوی (1334-1392). شرکت رایانه‌ای میلان‌افزار-مهر آفاق. 146 ص.
2. علیجانی ب. قهرودی م. و امیراحمدی ا. 1384. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های شمالی شاه جهان با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه اسطرخی شیروان). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، 84: 118-131.
3. غلامی م. و احمدی م. 1398. ریزپهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر لامرد با استفاده از GIS، AHP و منطق فازی. مجله مخاطرات طبیعی، 8(20): 101-114.
4. Bubeck P. Botzen W and Aerts J. 2012. A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. Risk Analysis. 32: 1481-1495.
5. Büyükközkkan G. and Feyzioğlu O. 2004. A fuzzy-logic-based decision-making approach for new product development. International journal of production economics, 90(1): 27-45.
6. Chang D. Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. European journal of operational research. 95(3): 649-655.
7. Darko A. Chan A. P. C. Ameyaw E. E. Owusu E. K. Pärn E. and Edwards D. J. 2019. Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. International journal of construction management, 19(5): 436-452.
8. Ekmekcioğlu Ö. Koc K. and Özger M. 2021. District based flood risk assessment in Istanbul using fuzzy analytical hierarchy process. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 35(3): 617-637.

مخاطرات طبیعی همه‌ساله خسارات فراوانی را در سراسر جهان و ایران به‌بار می‌آورد که زلزله، طوفان، خشکسالی، آتش‌سوزی و سیل، از جمله آن‌ها هستند. سیل، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین بحران اقلیمی است که همه‌ساله جان هزاران نفر را گرفته و خسارات قابل‌توجهی به جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و محیط‌زیست وارد می‌سازد. شواهد حاکی از آن است که خسارت ناشی از سیل به‌مراتب بیشتر از سایر مخاطرات طبیعی بوده که ناشی از تکرار بالای وقوع این پدیده است. امروزه استفاده از علوم جدید به‌ویژه سیستم اطلاعات جغرافیایی به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا ارزیابی سریعی از پتانسیل خطرات طبیعی از جمله سیل را در حداقل زمان ممکن داشته باشند؛ بنابراین سیستم اطلاعات جغرافیایی به شناسایی مناطق سیل‌خیز، تعیین گستره سیل، پهنه‌بندی مناطق سیل‌گیر به درجات مختلف خطر و برآورد خسارات وارده در سطح وسیع کمک شایان توجهی کرده است. در این پژوهش، پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبخیز رودخانه زشک شان‌دیز با استفاده از تکنیک تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی (FAHP) در سامانه اطلاعات جغرافیایی مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در حوضه‌های وسیع با داده‌های محدود، استفاده از مدل‌های تلفیقی کارشناسی-قاعده‌محور نسبت به مدل‌های داده‌کاوی داده‌محور (لزوم شواهد میدانی نقطه‌ای یا پهنه‌ای) ارجحیت بالاتری دارند. در تحقیق حاضر، روش فازی با تبدیل نظرات کارشناسی در مقیاس‌های 0 تا 1 در ارائه بهتر نظرات و هم‌سوسازی با واقعیت طبیعی منطقه نقش مؤثری داشت. همچنین، نقش امیدوارکننده شاخص‌های متعدد مورفومتریک مشتق از لایه مدل رقومی ارتفاع در نمایش خصوصیات پنهان توپویدرولوژیک مؤثر در سیل‌خیزی محدوده مطالعاتی حائز اهمیت است. با توجه به امکان تهیه رایگان باندهای ماهواره‌های راداری و اپتیک با بازه‌های زمانی موجود از پایگاه داده‌های بین‌المللی، امکان تهیه سری‌های زمانی از نقشه پهنه‌بندی سیلاب حوضه مطالعاتی نیز امکان‌پذیر است. به‌طور کلی، مشخص شد که سیل‌خیزی منطقه تابع شرایط مختلف توپوگرافیک، خاکشناسی، گیاه‌شناسی و اقلیمی بوده که این مهم در وزن‌های نهایی فازی‌شده عوامل مبرهن است. علاوه بر این، روند کلاسه‌بندی پهنه‌های سیل‌خیز بیانگر

9. Saaty T. L. 2000. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process (Vol. 6). RWS publications.
10. Saunders W. Beban J. G. and Kilvington M. 2013. Risk-based land use planning for natural hazard risk reduction (p. 97). Lower Hutt: GNS Science.
11. Tehrany M. S. Pradhan B. and Jebur M. N. 2015. Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. Stochastic environmental research and risk assessment. 29(4): 1149-1165.
12. Tierney K. J. Lindell M. K. and Perry R. W. 2002. Facing the unexpected: disaster preparedness and response in the United States. Disaster Prevention and Management: An International Journal. 11(3): 222-222.
13. Van Laarhoven P. J. and Pedrycz W. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. Fuzzy sets and Systems. 11(1-3): 229-241.
14. Yang X. L. Ding J. H. and Hou H. 2013. Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis. Natural hazards. 68(2): 657-674.