

تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز گمناب چای با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS

داود مختاری^{۱*}، محمدحسین رضائی مقدم^۱، توحید رحیم پور^۲، سمیه معزز^۲

۱. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۲. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۲/۳۱)

چکیده

مناطق کوهستانی شمال غرب کشور به دلیل توپوگرافی خاص خود و بارش تقریباً مناسب طی سال و به خصوص در فصل بهار، از جمله مناطق مستعد وقوع مخاطره سیل هستند. تحقیق حاضر با هدف تهیه نقشه پهنه بندی خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز گمناب چای واقع در استان آذربایجان شرقی انجام گرفته است. برای تهیه نقشه پهنه بندی خطر وقوع سیل از ۱۰ فاکتور مؤثر در وقوع این پدیده استفاده شده است که عبارت اند از: بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب، تراکم پوشش گیاهی، شاخص قدرت آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافیک، تراکم زهکشی، شاخص حمل رسوب، ضریب گراویلیوس. به منظور وزن دهی معیارها در تحقیق حاضر از روش تحلیل شبکه ای (ANP) و نرم افزار Super Decisions استفاده شد. نتایج نهایی به دست آمده از تحقیق حاضر نشان داد وزن معیارهای ۱۰ گانه یاد شده به ترتیب ۰/۲۷۱، ۰/۲۰۱، ۰/۱۵۰، ۰/۱۱۸، ۰/۰۸۱، ۰/۰۵۶، ۰/۰۴۳، ۰/۰۳۲، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱۸ است که معیارهای بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی و شیب بیشترین وزن را داشته اند. در نهایت، با تلفیق این لایه ها با توجه به وزنشان در محیط GIS، نقشه پهنه بندی به دست آمد. نتایج نشان داد ۲۱۰ کیلومتر مربع (۵۰ درصد) از مساحت منطقه در معرض خطر وقوع سیلاب قرار دارد. بنابراین، لزوم مدیریت آب های سطحی در منطقه به منظور جلوگیری از وقوع سیل و همچنین بهره برداری مناسب از آب های منطقه ضروری به نظر می رسد.

کلیدواژگان: حوضه آبریز گمناب چای، سیل، مدل ANP، Super Decisions.

مقدمه

سیلاب‌ها طی تاریخ رایج‌ترین، مرگ‌بارترین و پرهزینه‌ترین مخاطرات طبیعی بوده‌اند. خطر وقوع سیل طی زمان افزایش یافته است، به‌ویژه از زمانی که بسیاری از کشورها مجوز ساخت‌وساز در دشت‌های سیلابی را صادر کردند و حتی رشد تجاری و مسکونی در این مناطق را مورد حمایت قرار دادند [۱]. در ایران نیز همانند سایر مناطق سیل‌خیز دنیا در دهه‌های اخیر، شدت وقوع سیلاب‌ها و میزان خسارت‌های ناشی از آن به‌طور چشمگیری افزایش یافته است [۲]، به‌طوری که، روند افزایش سیل در پنج دهه گذشته نشان می‌دهد تعداد وقوع سیل در دهه ۱۳۸۰ نسبت به دهه ۱۳۴۰ حدود ۱۰ برابر شده و به‌بیان دیگر، ۹۰۰ درصد افزایش داشته است [۳]. اندازه و تکرار رویداد سیلاب در هر منطقه، به عوامل متعددی بستگی دارد. ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبریز مانند شکل حوضه، شیب، شبکه آبراه‌های و ناهمواری زمین، همراه با ویژگی‌های هیدرولوژیکی مانند بارش، ذخیره و تلفات برگابی و چالابی، تبخیر و تعرق و نفوذپذیری و اقدامات ناشی از فعالیت‌های بشری، در بروز و تشدید سیلاب یا کاهش و افزایش میزان خسارت‌های ناشی از آن دخالت دارند. شناخت این عوامل و دسته‌بندی آنها در هر منطقه، از اصول اولیه مهار سیلاب و کاهش خطرهای آن است [۴]. با توجه به رژیم بارشی کشور، همه‌ساله در فصل بهار و پاییز با بارش‌های رگباری می‌توان مواجه شد و نیز با مسئله ذوب برف‌های حاصل از بارش‌های زمستانه، سیل و پیامدهای ناگوار آن در مقیاس‌های متفاوت در مناطق مختلف کشور را مشاهده کرد. بنابراین، از طریق تجزیه و تحلیل دقیق این مناطق سیل‌خیز و مدیریت اصولی، می‌توان میزان وقوع سیلاب و نیز خطرهای آسیب‌های جانی و مالی حاصل از آن در مناطق مستعد سیلاب را کاهش داد [۵].

تحقیقات مختلفی در زمینه بررسی حساسیت خطر وقوع سیلاب در داخل و خارج از کشور انجام گرفته است که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: امیر احمدی و همکاران [۶] در پژوهشی به پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از ANP^۱ در حوضه اسلام‌آباد غرب پرداختند. در تحقیق یادشده از ۱۲ فاکتور برای تهیه نقشه خطر سیل استفاده شد. نتایج تحقیق یادشده نشان داد ۴۶ درصد از

منطقه در پهنه بسیار زیاد از نظر خطر وقوع سیل قرار دارد. همچنین، نتایج تحقیق یادشده نشان داد مدل ANP قابلیت زیادی در وزن‌دهی فاکتورها و تهیه نقشه خطر وقوع سیل دارد. خیری‌زاده و همکاران [۷] در پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز مردق‌چای با استفاده از مدل ANP به این نتیجه رسیدند که عامل شیب با میزان ۰/۳۰ و ارتفاع رواناب سطح حوضه با میزان ۰/۲۸ در رابطه با رخداد سیلاب، بیشترین میزان اهمیت و عوامل پوشش گیاهی و سنگ‌شناسی، به ترتیب با مقدار ۰/۰۶ و ۰/۰۷ کمترین میزان اهمیت را دارند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد ترکیب GIS و روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند ANP نتایج بهتری ارائه می‌دهد. عابدینی و فتحی [۸] در مطالعه‌ای به پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از فرایند تحلیل شبکه در حوضه آبخیز خیاوچای پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده نشان داد بیش از ۱۵ درصد حوضه تحت تأثیر وقوع سیلاب با پتانسیل بسیار زیاد قرار دارد که به طور عمده در پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند. تحلیل وزن نهایی به‌دست‌آمده از مدل نشان داد عامل شیب با مقدار ۰/۹۹ و عامل سنگ‌شناسی با مقدار ۰/۸۲۲ بیشترین میزان اهمیت و تأثیر را دارند و شاخص SPI با ۰/۲۲۶ و شاخص STI با ۰/۰۶۵ نسبت به عوامل دیگر اهمیت کمتری دارند. همچنین، نتایج تحقیق یادشده نشان داد مدل ANP دقت زیادی در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب دارد. عابدینی و بهشتی جاوید [۹] در پژوهشی وضعیت سیل‌خیزی و سیل‌گیری حوضه آبریز ليقون‌چای را با استفاده از مدل ترکیبی فرایند تحلیل شبکه و منطق فازی ارزیابی کردند. بر اساس مدل فرایند تحلیل شبکه برای سیل‌خیزی، معیارهای شیب (۰/۱۸۷)، جنس سازند (۰/۱۲۵) و برای سیل‌گیری نیز پارامترهای شیب (۰/۲۲۹)، انحنای پلان (۰/۲) بیشترین ضریب تأثیر را داشتند. همچنین، قسمت‌های جنوبی حوضه با قرارگیری در پهنه‌هایی با پتانسیل خیلی زیاد و زیاد، به عنوان سیل‌خیزترین بخش‌های حوضه معرفی شدند. نتایج تحقیق یادشده نشان داد ترکیب مدل ANP با منطق فازی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. دارابی و همکاران [۱۰] در مطالعه‌ای به تهیه نقشه ریسک سیل شهری با استفاده از مدل GARP و QUEST در شهر ساری پرداختند.

1. Analytic Network Process

حوضه آبریز گمناب‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی تهیه شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده تحقیق حاضر، حوضه آبریز گمناب‌چای است که از نظر موقعیت سیاسی در استان آذربایجان شرقی و در شمال غرب ایران قرار دارد. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی بین $38^{\circ}06'58''$ تا $38^{\circ}15'46''$ طول شرقی و $38^{\circ}28'38''$ تا $38^{\circ}28'02''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). حوضه آبریز گمناب‌چای با مساحت حدود ۴۲۰ کیلومترمربع یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه محسوب می‌شود. طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه مطالعه شده اقلیم نیمه‌خشک دارد و میانگین بارش سالانه آن حدود ۳۰۰ میلی‌متر (اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی) است که حداکثر مقدار آن در بهار و حدود ۱۰۰ میلی‌متر نیز در زمستان اتفاق می‌افتد [۱۳]. حداکثر ارتفاع منطقه ۲۷۷۴ متر در ارتفاعات شمالی منطقه و حداقل ارتفاع نیز در خروجی حوضه برابر ۱۳۴۲ متر از سطح دریاست. آب‌های سطحی منطقه توسط آبراهه‌های موجود در سطح حوضه به طرف خروجی حوضه زهکشی شده و پس از پیوستن به رودخانه آجی‌چای، در نهایت به دریاچه ارومیه تخلیه می‌شوند.

روش تحقیق

فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

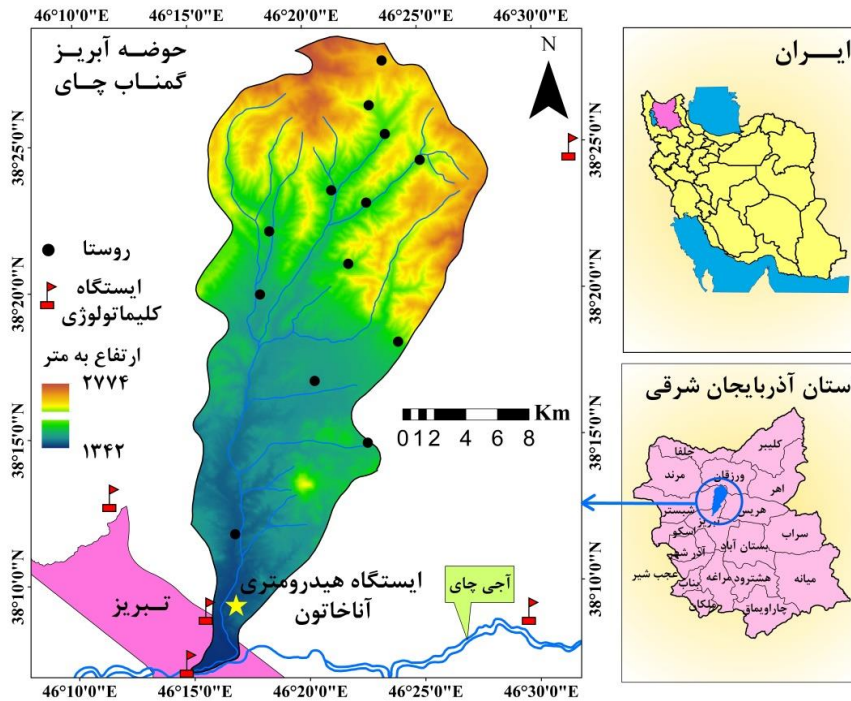
فرایند تحلیل شبکه‌ای یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط توماس ال ساعتی در سال ۱۹۸۰ توسعه یافته است. در این مدل معیارها به‌عنوان عناصر داخل دسته‌هایی به نام خوشه قرار می‌گیرند [۱۴]. این مدل شبکه‌ای از ارتباطات بین عناصر خوشه‌های مختلف وابستگی (وابستگی خارجی) و نیز ارتباطات بین عناصر داخل یک خوشه (ارتباطات داخلی) است. در حقیقت، مدل ANP روابط متقابل بین مؤلفه‌ها را نیز نشان می‌دهد [۱۵]. فرایند تحلیل شبکه‌ای را می‌توان در ۴ مرحله اجرا کرد. گام نخست، تعیین مسئله تصمیم‌گیری و ارائه آن در یک مدل شبکه‌ای است. در این مرحله، پس از تعیین مسئله

وزن‌دهی فاکتورهای مؤثر با استفاده از دانش تخصصی و FANP انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده نشان داد مدل GARP با $AUC-ROC=93/5\%$ و $KAPPA=0/86$ دقت بیشتری دارد. نقشه حساسیت هم با استفاده از مدل FANP تهیه شد که نتایج به‌دست‌آمده از آن نشان داد فاکتورهای تراکم جمعیت و کیفیت ساختمان‌ها و تراکم شهری فاکتورهای مهمی بوده‌اند و مناطق حساس به سیل در مرکز شهر قرار گرفته‌اند. ایشان ترکیب مدل ANP و فازی را در تهیه نقشه حساسیت خطر سیل به عنوان مدل مناسبی در تحقیق خود ارائه کردند. کنعانی سادات و همکاران [۱۱] در پژوهشی به مطالعه یک نگرش جدید در ارزیابی حساسیت سیل در مناطق با محدودیت داده و اندازه‌گیری نشده برپایه GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در کردستان پرداختند. پژوهش یادشده برای تعدادی حوضه با مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره براساس GIS (GHMCDM) و روش FUZZY-DEMATEL به منظور ایجاد یک رابطه شبکه‌ای بین معیارهای حساسیت سیل انجام شد. سپس، از روش ANP برای وزن‌دهی نهایی به خروجی‌های DEMATEL استفاده شد. طبق ارزیابی نقاط سیل‌زده، مدل FUZZY-ANP ارزش زیادی از حساسیت (۹۵/۵۹ درصد) را در مقایسه با AHP (۹۴/۱۲ درصد) نشان داد که این امر بیان‌کننده موفقیت بیشتر مدل ANP در پیش‌بینی نقاط سیل‌گیر است. نتایج صحت مدل هم نشان داد مدل ANP-DEMATEL بسیار دقیق بوده و برای بررسی حساسیت سیل مناطق است. همچنین، نتایج پژوهش یادشده نشان داد معیار TWI وزن زیادی دارد و بعد از آن، معیار CN و تراکم آبراهه در درجه بعدی هستند و معیار MFI کمترین وزن را دارد. دانو و همکاران [۱۲] با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS به تهیه نقشه حساسیت سیل خیزی در منطقه پریس واقع در مالزی پرداختند. نتایج تحقیق یادشده نشان داد ۳۸ درصد منطقه حساسیت خیلی زیادی نسبت به خطر سیل دارد. همچنین، پژوهشگران یادشده ANP را به عنوان مدلی مناسب در ترکیب با تکنیک GIS برای تهیه نقشه خطر سیل بیان کردند.

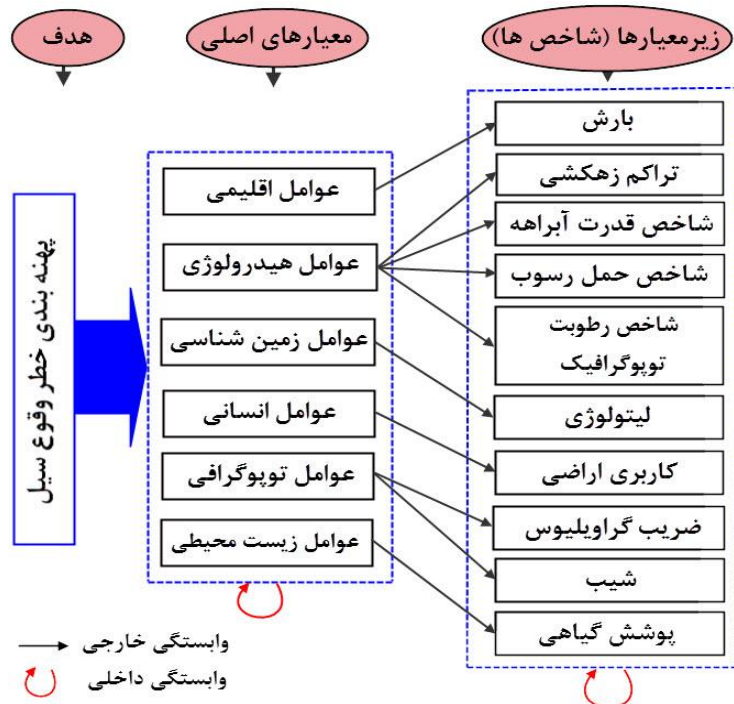
بنابراین، در تحقیق حاضر تلاش شده است با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS نقشه خطر وقوع سیلاب در

فکری، دلفی، گروه اسمی و یا روش‌های ریاضی مانند DEMATEL وجود دارد. در این شبکه وابستگی‌های خارجی به صورت پیکان و وابستگی‌های داخلی به صورت کمان نشان داده می‌شود [۱۶].

تصمیم‌گیری و عوامل مؤثر بر آن باید یک مدل شبکه‌ای تشکیل شود. این مدل شامل مسئله تصمیم‌گیری، خوشه‌ها، عناصر و وابستگی‌های داخلی و خارجی بین آنهاست. برای تهیه این ساختار شبکه‌ای روش‌های مختلفی مانند توفان



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده



شکل ۲. مدل شبکه‌ای برای پهنه‌بندی خطر وقوع سیل

قابل قبول و دارای پایداری خواهد بود که نسبت پایداری کمتر از ۰/۱ به دست آید [۱۷].

گام سوم، تشکیل سوپر ماتریس است. یک سوپر ماتریس روابط موجود در ساختار شبکه‌ای و نیز وزن‌های نسبی محاسبه‌شده در مرحله دوم را ارائه می‌دهد. در واقع، از اجتماع کلیه بردارهای اولویت محاسبه‌شده برای تک‌تک ماتریس‌های مقایسه زوجی در یک ماتریس، سوپر ماتریس به دست می‌آید (رابطه ۴) [۱۸].

$$\lim_{k \rightarrow \infty} w^k \quad (4)$$

گام چهارم: محاسبه وزن نهایی معیارهاست. این گام آخرین مرحله در مدل ANP است که در آن با تشکیل سوپر ماتریس حد بردار، وزن نهایی معیارها و غیرمعیارها به دست می‌آید [۱۸].

بحث و نتایج

در پژوهش حاضر به بررسی ۱۰ شاخص از عوامل مؤثر در وقوع سیل با توجه به استفاده از تجربیات کارشناسان و پژوهشگران در بررسی‌های صورت گرفته در پیشینه تحقیق پرداخته شده است که عبارت‌اند از: شیب، ضریب گراولیلوس، تراکم زهکشی، لیتولوژی، تراکم پوشش گیاهی، شاخص قدرت آبراهه، شاخص حمل رسوب، شاخص رطوبت توپوگرافیک، بارش و کاربری اراضی که در ادامه به تأثیر این عوامل بر وقوع سیل و چگونگی تهیه نقشه هر یک از این عوامل پرداخته شده است.

لایه شیب

با افزایش شیب عمومی سطح حوضه، فرصت لازم برای نفوذ، کاهش یافته و می‌توان گفت که با افزایش شیب حوضه، زمان تمرکز کاهش می‌یابد [۱۹]. شیب‌های زیاد، سبب ایجاد اوج‌های بالا در آب‌نمود می‌شوند [۲۰]. نقشه شیب حوضه مطالعه‌شده با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. در رابطه با سیل‌خیزی، عامل شیب با توجه به کنترلی که روی بسیاری از فرایندهای هیدرولوژیکی و در نتیجه، واکنش حوضه‌های آبریز نسبت به انواع بارش‌ها دارد، دارای اولویت و ارزش بیشتری است.

گام دوم، تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی و استخراج بردارهای اولویت است. در این مرحله عناصر تصمیم‌گیری در هر یک از خوشه‌ها، بر اساس میزان اهمیتشان در ارتباط با معیارهای کنترلی دوبه‌دو مقایسه می‌شوند. همانند مدل AHP^۱ برای بیان ارجحیت در ماتریس‌های مقایسه زوجی از اعداد ۱ تا ۹ و معکوس آنها استفاده می‌شود (جدول ۱). برای نمونه، عدد a_{ij} نشان‌دهنده ارجحیت مؤلفه سطر i به مؤلفه ستون j است $(a_{ij} = w_i/w_j)$. عدد ۱ به این معناست که دو مؤلفه اهمیت برابر دارند و عدد معکوس $(1/a_{ij})$ نشان‌دهنده اهمیت زیاد مؤلفه ستون j نسبت به مؤلفه سطر i است.

جدول ۱. مقادیر ترجیحات و قضاوت کارشناسی برای مقایسه زوجی

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر (Extremely preferred)
۷	اهمیت خیلی زیاد (Very strongly preferred)
۵	اهمیت یا مطلوبیت زیاد (Strongly preferred)
۳	کمی مطلوب‌تر یا کمی مهم‌تر (Moderately preferred)
۱	اهمیت یا مطلوبیت یکسان (Equally preferred)
۲-۴-۶-۸	اولویت بین فواصل

پس از نوشتن ارجحیت‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی، بردار اهمیت داخلی که بیانگر اهمیت نسبی عناصر یا خوشه‌هاست به دست می‌آید (رابطه ۱):

$$AW = \lambda_{max} \quad (1)$$

که در آن A ؛ ماتریس مقایسه دودویی معیارها، W ؛ بردار ویژه (ضریب اهمیت) و λ_{max} ؛ بزرگ‌ترین مقدار ویژه عددی است. تعیین صحت ماتریس‌های مقایسه زوجی با محاسبه نسبت سازگاری (CR) انجام می‌گیرد (روابط ۲ و ۳).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

که در آن CI ؛ شاخص سازگاری و n ؛ تعداد مؤلفه‌های مقایسه‌شده در ماتریس است.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

در رابطه یادشده CR ؛ نسبت پایداری یا میزان سازگاری و RI ؛ بیانگر شاخص تصادفی است که به تعداد عناصر مقایسه‌شده بستگی دارد. مقایسه دو به دو زمانی

ضریب گراویلیوس

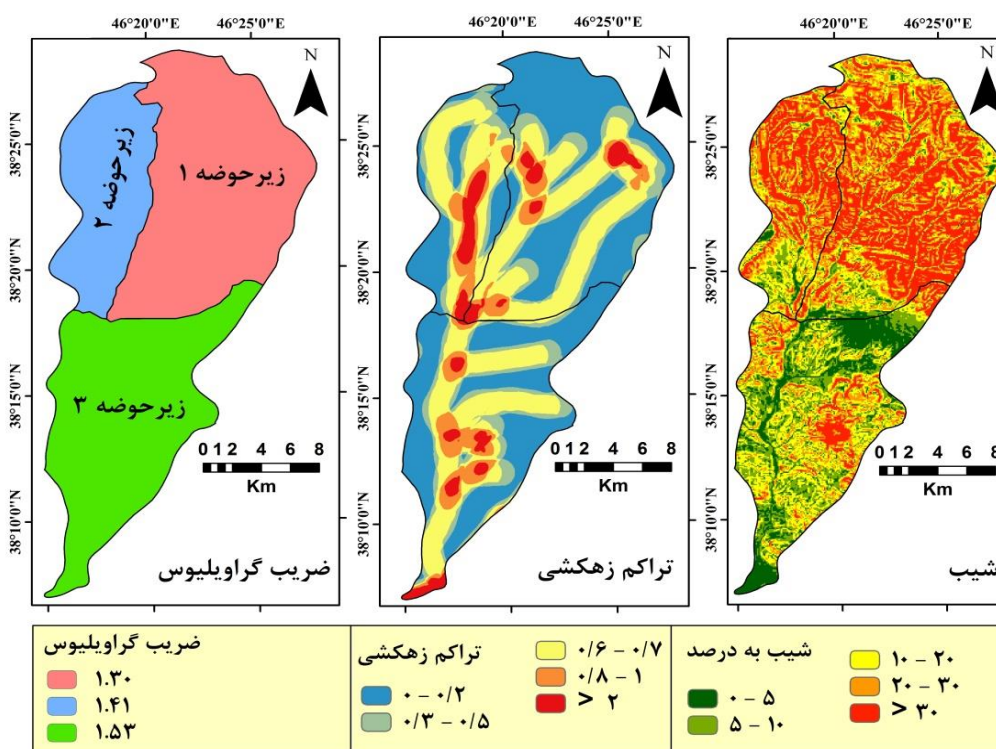
شکل حوضه، ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه (برای مثال، شکل هیدروگراف) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یک حوضه باریک طویل با داشتن نسبت انشعاب زیاد، پیکی پایین اما ثابت را به وجود می‌آورد، در حالی که حوضه‌های گرد با نسبت انشعاب پایین، یک هیدروگراف تیز را به وجود خواهند آورد [۲۱]. برای تعیین شکل حوضه، از ضریب فشردگی یا ضریب گراویلیوس استفاده شد (رابطه ۵).

$$Cc = 0.2812 \times P/A^{0.5} \quad (5)$$

که در آن P محیط حوضه آبریز و A مساحت حوضه آبریز است.

لایه تراکم زهکشی

میزان تراکم زهکشی، شاخص مهمی در تعیین شدت سیلاب‌ها، میزان بار رسوبی، بیلان آب در کل حوضه و به‌طور کلی، در چگونگی فعالیت فرایندهای رواناب‌های سطحی است [۲۰]. حوضه مطالعه‌شده بر اساس مقادیر تراکم زهکشی، به ۵ طبقه تقسیم شد. هر چه تراکم زهکشی، بیشتر باشد، تخلیه رواناب در سطح آن به‌سادگی انجام خواهد شد، در نتیجه زمان تمرکز کاهش یافته و میزان خطر وقوع سیل افزایش می‌یابد.



شکل ۳. نقشه‌های شیب، تراکم زهکشی و ضریب گراویلیوس

لایه تراکم پوشش گیاهی

مطالعات پژوهشگران مختلف نشان داده است که مقدار آب و بار رسوب، پیک‌های سیلاب و زمان وقوع آن‌ها، و سرعت انتقال پیک جریان به‌شدت توسط ماهیت و گسترش پوشش گیاهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲۱]. در پژوهش حاضر، برای تهیه نقشه پوشش گیاهی حوضه، از شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال‌شده^۱ (NDVI) استفاده شد. به این منظور، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI

لایه لیتولوژی

نوع سنگ و پوشش خاک، ظرفیت نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خاک یا سنگ قابل نفوذ، شرایط نفوذ آب به داخل زمین را فراهم می‌کند و تخلیه آن را به داخل آبراهه اصلی به تأخیر می‌اندازد؛ از این‌رو رواناب سطحی کاهش می‌یابد. حوضه‌های با سنگ بستر یا خاک به نسبت نفوذناپذیر، حجم زیادی از رواناب سطحی ایجاد می‌کنند [۲۱]. بنابراین، در بحث لیتولوژی با توجه به هدف مطالعه، میزان نفوذپذیری سازندها مد نظر است.

1. Normalized Difference Vegetation Index

شده است. در معادله یادشده اندازه‌گیری قدرت فرسایش جریان آب بر این استوار است که عمل تخلیه با وسعت حوضه متناسب باشد [۲۲]. این مدل به‌طور کلی فرسایش خالص را در نواحی‌ای که نیمرخ به‌صورت محدب مماسی بوده و در این منطقه شدت جریان زیاد است و منطقه حالت محدب دارد، را پیش‌بینی می‌کند. از طرفی، رسوب‌گذاری خالص در نواحی‌ای انجام شده که نیمرخ به‌صورت مقعر است و در این ناحیه شدت جریان کاهش می‌یابد.

$$SPI = AS \cdot \tan\beta \quad (7)$$

این پارامتر بر اساس مساحت حوضه (As) و گرادیان شیب ($\tan\beta$) که برای برآورد میزان قدرت نسبی آبراهه برای فرایند فرسایش را محاسبه می‌کند.

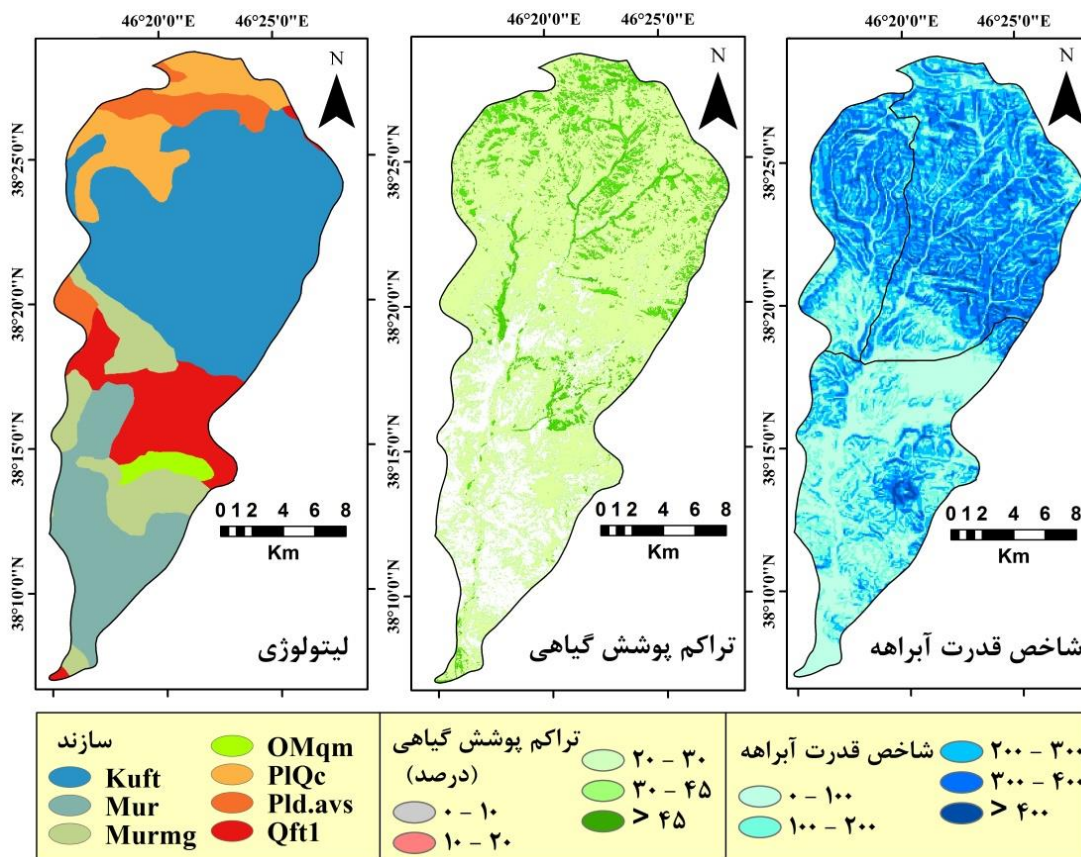
(مربوط به فصل بهار ۱۳۹۷ که بیشتر سیلاب‌های حوضه در این فصل رخ داده‌اند) در قالب نرم‌افزار ENVI استفاده شد (رابطه ۶).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (6)$$

که در آن NIR باند مادون قرمز و Red باند قرمز است. در رابطه با سیل‌خیزی، طبقه‌ای که کمترین میزان شاخص پوشش گیاهی را دارد، از بیشترین میزان اهمیت ارجحیت در مدل ANP برخوردار خواهد بود و در نتیجه، وزن بیشتری را کسب می‌کند، چراکه نبود پوشش گیاهی یا فقر شدید آن، سبب کاهش نفوذ و افزایش آبدوی و در نتیجه، کاهش زمان تمرکز می‌شود.

لایه شاخص قدرت آبراهه (SPI)

رابطه ۷ برای محاسبه شاخص قدرت رودخانه پیشنهاد



شکل ۴. نقشه‌های لیتولوژی، تراکم پوشش گیاهی و شاخص قدرت آبراهه

داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی موجود در اطراف منطقه مطالعه شده برای یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۸۷-۱۳۹۶) استفاده شده است. به منظور تعمیم داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌ها به داده‌های سطحی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و روش درون‌یابی IDW^۳ به دلیل دقت بیشتر و خطای کمتر (بررسی میزان دقت روش‌های درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS توسط نویسندگان) نسبت به سایر روش‌ها داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌ها درون‌یابی شده و در نهایت، نقشه بارش منطقه تهیه شده است.

لایه کاربری اراضی

در لایه کاربری طبقات بر اساس نوع کاربری‌ای که دارند، وزن‌دهی می‌شوند. در لایه کاربری منطقه کاربری‌هایی مانند مرتع، منطقه مسکونی، کشاورزی از نوع دیم و آبی و نیز زمین‌های لخت و بایر وجود دارد. با توجه به تأثیر هر یک از این کاربری‌ها بر قدرت و سرعت جریان، به هر کلاس وزنی تعلق می‌گیرد. برای مثال، می‌توان گفت که زمین‌هایی با کاربری مسکونی به دلیل آنکه بیشتر سطوح سنگی و آسفالت دارند و نیز سطح صاف و سخت آنها، سبب می‌شود که رواناب در این مناطق شدت جریان زیادی داشته باشند و به عکس، در زمین‌های مرتعی وضعیت پوشش گیاهی و لاشبرگ‌ها سبب تأخیر در تمرکز جریان و در نتیجه، کاهش سیل‌خیزی می‌شوند. این لایه بیشتر در تولید رواناب تأثیر دارد، به این صورت که با کاهش سرعت جریان سبب افزایش نفوذ می‌شود. در تحقیق حاضر برای تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعه شده از تصویر لندست ۸ سنجنده OLI مربوط به خرداد ۱۳۹۷ استفاده شده است. به همین منظور، ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم همچون تصحیح اتمسفری و رادیومتریکی روی تصویر اعمال شد. در مرحله بعد با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم حداکثر احتمال نقشه کاربری اراضی در ۷ کلاس شامل کاربری‌های باغ، بایر، کشاورزی آبی، مراتع، اراضی دیم، مناطق ساخته شده (شهر و روستا) و مناطق آبی تهیه شد (شکل ۶).

لایه شاخص حمل رسوب (STI)

در مطالعه حاضر از جمله شاخص‌های هیدرولوژیکی استفاده شده شاخص حمل رسوب است. این شاخص قدرت فرساینده‌گری جریان‌ها را روی زمین نشان می‌دهد. فرمول تجربی (رابطه ۸) که برای به دست آوردن این شاخص وجود دارد، شبیه معادله جهانی فرسایش خاک است. از این رو، می‌تواند در نشان دادن موقعیت مناطق با خطر فرسایش استفاده شود [۲۲].

$$STI = (A / 22.13)^{0.62} (\sin / 0.0896)^{1.3} \quad (8)$$

این پارامتر بر اساس مساحت حوضه و سینوس گرادیان شیب، قابلیت حمل رسوب در حوضه را کنترل می‌کند. بر همین اساس، ممکن است سیستم زهکشی را آشفته کند و دامنه‌های با گرادیان شیب کم به ایجاد زمین‌لغزش تمایل پیدا کنند [۲۳]. هانگ و همکاران در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که بیشتر مناطق دارای STI کمتر، در زمین‌های مسطح قرار داشته و در نتیجه، پتانسیل زیادی برای وقوع سیل دارند [۲۴].

لایه شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)

شاخص رطوبت توپوگرافیک (شاخص ترکیب توپوگرافیک CTI) یا رطوبت خاک که برای توصیف الگوی فضایی رطوبت خاک استفاده می‌شود، به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$TWI = LN(As / \tan \beta) \quad (9)$$

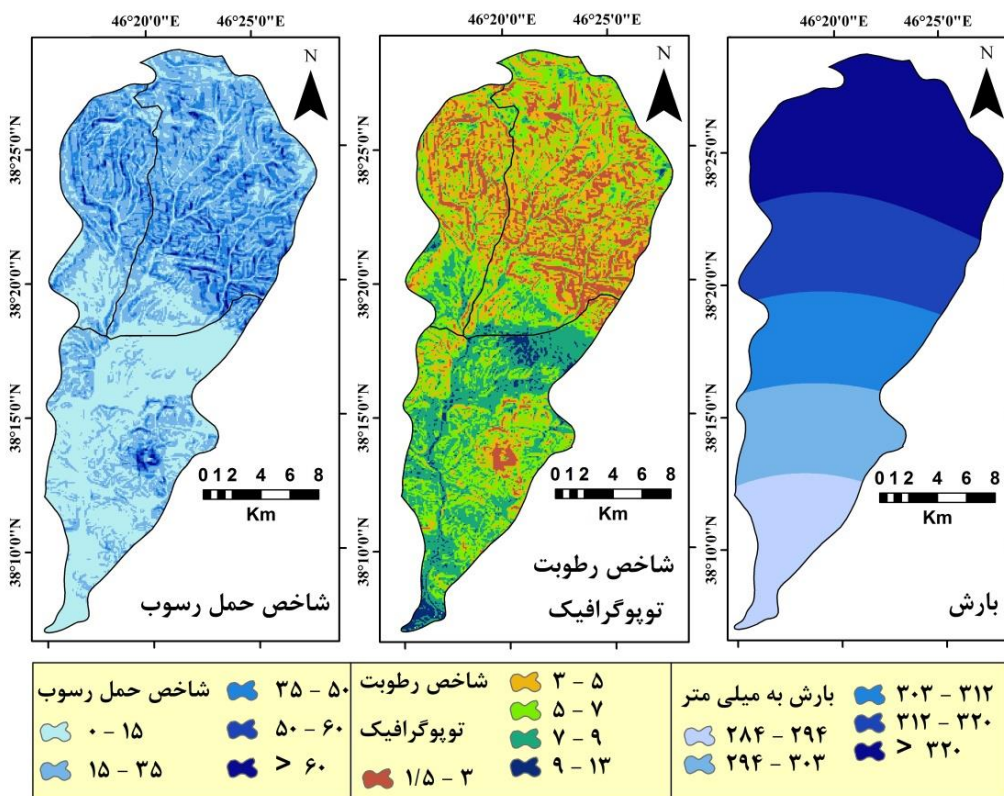
که در آن AS مساحت حوضه و $\tan \beta$ درجه شیب است. از شاخص رطوبت توپوگرافیک می‌توان برای ارزیابی الگوی فضایی رطوبت خاک و تغییرات رخ داده در بافت خاک به دلیل فرسایش استفاده کرد [۲۵]. این شاخص عموماً برای تعیین کنترل توپوگرافی روی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود [۲۶].

لایه بارش

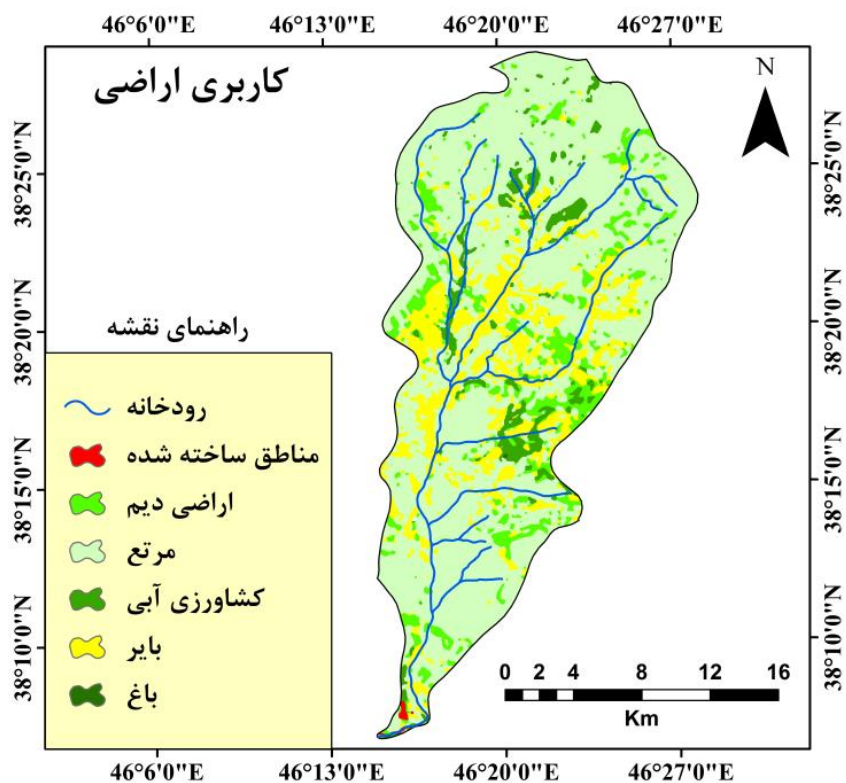
بارندگی سالانه از عوامل اقلیمی مؤثر و انکارناپذیر در بروز و ظهور هر رواناب در حوضه آبریز است و مقدار و شدت آن بر بروز سیلاب، زمان تمرکز، هیدروگراف سیل تأثیر دارد. در تحقیق حاضر به منظور تهیه نقشه بارش منطقه از

3. Inverse Distance Weighting

1. Sediment Transport Index
2. Topographic wetness index



شکل ۵. نقشه‌های بارش، شاخص رطوبت توپوگرافیک و شاخص حمل رسوب



شکل ۶. نقشه کاربری اراضی حوضه گمناب‌چای

جدول ۲. ماتریس دوبه‌دو، وزن معیارها و نسبت سازگاری

وزن نهایی	(۱۰) ضریب شکل	(۹) شاخص STI	(۸) تراکم زهکشی	(۷) شاخص TWI	(۶) شاخص SPI	(۵) پوشش گیاهی	(۴) شیب	(۳) کاربری اراضی	(۲) لیتولوژی	بارش	معیارها
۰/۲۷۱	۹	۷	۷	۶	۵	۵	۳	۲	۲	۱	(۱)
۰/۲۰۱	۷	۷	۶	۵	۵	۳	۲	۲	۱	۱/۲	(۲)
۰/۱۵۰	۶	۵	۵	۴	۴	۲	۲	۱	۱/۲	۱/۳	(۳)
۰/۱۱۸	۶	۵	۵	۳	۳	۲	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۵	(۴)
۰/۰۸۱	۴	۴	۳	۳	۲	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱/۵	(۵)
۰/۰۵۶	۴	۴	۲	۲	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۷	(۶)
۰/۰۴۳	۳	۳	۲	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۶	(۷)
۰/۰۳۲	۳	۲	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۱/۷	(۸)
۰/۰۲۵	۳	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۵	۱/۵	۱/۷	۱/۷	(۹)
۰/۰۱۸	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۶	۱/۶	۱/۷	۱/۹	(۱۰)

میزان سازگاری: ۰/۰۳

اطلاعاتی، حوضه آبریز گمناب‌چای از نظر پتانسیل وقوع سیل به پنج طبقه از خطر خیلی زیاد تا خیلی کم تقسیم شد. مساحت هر یک از طبقات پنج‌گانه در جدول ۳، ارائه شده است. بیشترین مساحت منطقه مطالعه شده از نظر خطر وقوع سیل مربوط به طبقه خطر زیاد با مساحت ۱۵۲ کیلومترمربع است.

طبق نقشه نهایی، ۲۱۰ کیلومترمربع از مساحت منطقه دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد، ۶۷ کیلومترمربع پتانسیل کم و خیلی کم و ۱۴۳ کیلومترمربع دارای پتانسیل متوسط است. مناطق با خطر زیاد بیشتر منطبق بر سطوح هموار در پای دامنه‌ها به علت شیب کمتر، پیرامون رودخانه اصلی منطقه و اراضی بایر است. به‌طور کلی، می‌توان گفت که مناطق پایین‌دست حوضه از آسیب‌پذیری بیشتری هنگام وقوع سیل دارند. کاربری اراضی در این مناطق بیشتر شامل مراتع است که متأسفانه بر اثر چرای بیش‌ازحد دام، پوشش گیاهی این مناطق یا تنک شده یا از بین رفته که این امر از یک طرف، زمان نفوذپذیری آب را کم می‌کند و از طرف دیگر، سرعت رواناب را افزایش می‌دهد که تأثیر زیادی بر شکل‌گیری سیل در این قسمت از منطقه مطالعه شده دارد. شیب این مناطق نیز نسبتاً کم است که این امر نیز سبب سیل‌گیری این مناطق می‌شود که با احیای پوشش گیاهی و محافظت از مراتع و انجام اقدامات آبخیزداری مناسب می‌توان زمان نفوذ آب به زمین را افزایش داده و در مقابل، سرعت جریان آب را نیز کاهش داد. این اقدامات تأثیر زیادی بر کنترل رواناب‌های

در فرایند تحلیل شبکه‌ای، لایه‌ای که بیشترین تأثیر را در تعیین هدف دارد، بیشترین وزن را به خود می‌گیرد. چون هدف تحقیق حاضر، پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در حوضه گمناب‌چای است، پارامترهای محرک و تأثیرگذار در شکل‌گیری این مخاطره به‌عنوان مهم‌ترین عوامل برای نیل به هدف نهایی در نظر گرفته شد. بنابراین، برای لایه‌های بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی و شیب با توجه به اهمیت آنها در شکل‌گیری رواناب‌ها و ایجاد سیل (با تکمیل پرسشنامه و طبق نظر کارشناسان)، بیشترین وزن در نظر گرفته شد. وزن‌دهی سایر عوامل نسبت به کاهش تأثیرشان در وقوع سیل کمتر می‌شود. ماتریس دوبه‌دو، وزن نهایی و میزان سازگاری معیارهای مؤثر در وقوع سیل در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود میزان سازگاری برابر با ۰/۰۳ محاسبه شده است که صحت مقایسات زوجی و تعیین وزن نهایی را تأیید می‌کند.

پس از مشخص شدن وزن نهایی هر یک از معیارها، طبق رابطه ۱۰ اقدام به تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در منطقه مطالعه شده شد.

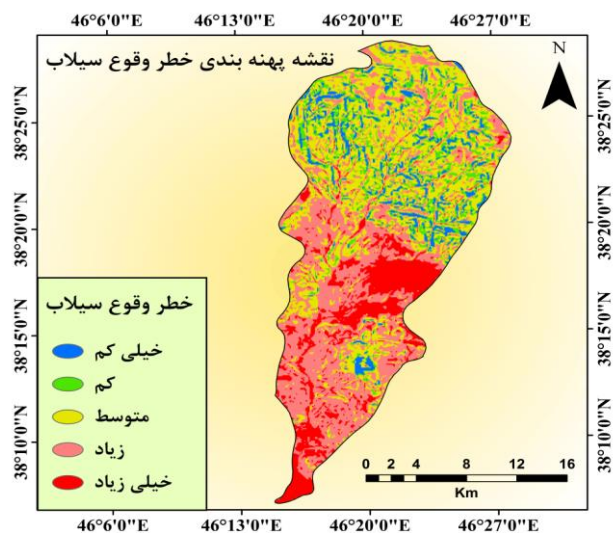
$$\begin{aligned}
 & \text{همپوشانی لایه‌ها} = (\text{بارش} \times 0/271) + (\text{لیتولوژی} \times 0/201) + (\text{کاربری اراضی} \times 0/150) + (\text{شیب} \times 0/118) \\
 & + (\text{پوشش گیاهی} \times 0/081) + (\text{شاخص SPI} \times 0/056) + (\text{شاخص TWI} \times 0/043) + (\text{تراکم زهکشی} \times 0/032) \\
 & + (\text{شاخص STI} \times 0/025) + (\text{ضریب شکل} \times 0/018)
 \end{aligned}
 \quad (10)$$

بر اساس عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب در قالب لایه‌های

مختاری و همکاران: تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز گمناب‌چای با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS ۵۰۷

بخش از منطقه پیش‌بینی می‌شود. جدول ۳ مساحت و درصد مساحت هر یک از طبقات را نشان می‌دهد. برای تعیین کلاس‌هایی که بیشترین تأثیر را در پتانسیل خطر وقوع سیلاب در منطقه دارند، نقشه نهایی با هر یک از معیارها مقایسه شد که نتایج آن به‌صورت جدول ارائه شده است (جدول ۴).

منطقه و درنهایت، کنترل سیلاب خواهند داشت. با توجه به اینکه قسمتی از کلان‌شهر تبریز به‌خصوص فرودگاه بین‌المللی تبریز نیز در پایین‌دست این حوضه قرار دارد، اقدامات مناسب برای جلوگیری از وقوع سیلاب در این حوضه بیش‌ازپیش احساس می‌شود. چون خسارت‌های احتمالی جانی و مالی (زیرساخت‌های فرودگاه) زیادی در صورت وقوع سیلاب در این



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در حوضه گمناب‌چای

جدول ۳. مساحت و درصد مساحت پهنه‌های در معرض خطر وقوع سیلاب

درصد مساحت	مساحت (کیلومتر مربع)	پهنه‌های خطر
۷	۲۸	خیلی کم
۹	۳۹	کم
۳۴	۱۴۳	متوسط
۳۶	۱۵۲	زیاد
۱۴	۵۸	خیلی زیاد

جدول ۴. بیشترین تأثیر کلاس‌های هر یک از معیارهای مؤثر بر پتانسیل خطر وقوع سیلاب در منطقه

معیارها	بیشترین تأثیر کلاس‌ها
بارش	سه کلاس ۲۸۴-۲۹۴، ۲۹۴-۳۰۳ و ۳۰۳-۳۱۲
لیتولوژی	کلاس‌های Mur (ماسه‌سنگ و کنگلومرا)، Murg (ژیپس)، Qft1 (نهشته‌های تراس‌های دره‌ای) پتانسیل زیادی برای وقوع سیلاب دارند.
کاربری اراضی	در مراتع و اراضی بایر و کلاس مناطق ساخته‌شده که در خروجی حوضه قرار دارند، خطر وقوع سیلاب زیاد است. در مراتع چرای دام می‌تواند سبب از بین رفتن پوشش گیاهی و مستعد شدن منطقه برای وقوع سیلاب شود. در اراضی بایر نیز به دلیل نبود پوشش گیاهی و لخت بودن اراضی، میزان نفوذپذیری خاک کم می‌شود و درنتیجه، در تشکیل رواناب و درنهایت، ایجاد سیلاب نقش اساسی دارد. در مناطق ساخته‌شده نیز به دلیل وجود پوشش آسفالت و بتن، خطر وقوع سیلاب بیشتر است.
شیب	در سه کلاس ۵-، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰ درصد خطر وقوع سیلاب به دلیل کاهش سرعت جریان و درنتیجه، آب‌گرفتگی مناطق، زیاد است.
پوشش گیاهی	سه کلاس ۰-، ۱۰-، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ درصد به دلیل داشتن کمترین تراکم پوشش گیاهی تأثیر زیادی بر وقوع سیلاب دارند.
شاخص SPI	کلاس‌های ۰-، ۱۰۰-، ۲۰۰-، ۲۰۰-۳۰۰ به دلیل قرارگیری در پایین‌دست حوضه آبریز خطر زیادی دارند.
شاخص TWI	سه کلاس ۷-، ۹-، ۹-۱۳ بیشترین خطر وقوع سیلاب پیش‌بینی می‌شود. در این مناطق به دلیل زیاد بودن شاخص رطوبت خاک ظرفیت نفوذپذیر کم بوده و درنتیجه، سرعت تشکیل رواناب و درنهایت ایجاد سیلاب بیشتر است.
تراکم زهکشی	در کلاس‌های ۰/۶-، ۰/۷-، ۱- و ۱-۲ به دلیل وجود آبراهه‌های زیاد خطر وقوع سیلاب بیشتر است.
شاخص STI	در دو کلاس ۰-۱۵ و ۱۵-۳۵ احتمال وقوع سیلاب بیشتر است. این کلاس‌ها در پایین‌دست حوضه آبریز قرار دارند. بنابراین، کلیه آب‌های سطحی حوضه در این مناطق متمرکز شده که سبب سیلاب‌گیری قسمت‌های بیشتری از منطقه می‌شوند.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر برای تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز گمناب‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی و با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS انجام شده است. برای نیل به هدف یادشده، ۱۰ عامل مؤثر بر وقوع این پدیده شامل بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب، تراکم پوشش گیاهی، شاخص قدرت آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافیک، تراکم زهکشی، شاخص حمل رسوب و ضریب گراویلیوس استفاده شده و وزن‌دهی این عوامل با روش تحلیل شبکه‌ای (ANP) و نرم‌افزار Super Decisions صورت گرفته است. نتایج وزن‌دهی عوامل استفاده‌شده نشان می‌دهد سه عامل بارش، لیتولوژی و کاربری اراضی به ترتیب با اوزان ۰/۲۷۱، ۰/۲۰۱ و ۰/۱۵۰ بیشترین تأثیر را در وقوع سیل دارند. با تهیه نقشه پهنه‌بندی و محاسبه مساحت طبقات هر یک از پهنه‌های خطر مشخص شد که ۵۸ کیلومترمربع (۱۴ درصد مساحت) در طبقه خیلی زیاد، ۱۵۲ کیلومترمربع (۳۶ درصد مساحت) در طبقه زیاد از نظر خطر وقوع سیل قرار دارد. ۵۰ درصد از مساحت منطقه مطالعه‌شده در پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد از نظر وقوع سیلاب قرار دارد که نشان‌دهنده آسیب‌پذیر بودن مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی منطقه است. این مناطق بیشتر مناطق مرکزی و پایین‌دست حوضه را شامل می‌شوند. از عوامل مؤثر در زیاد بودن میزان پتانسیل وقوع سیل در این قسمت از منطقه می‌توان به شیب کم، ارتفاع پایین، وجود اراضی بایر و مراتع اشاره کرد. مردم محلی منطقه با چرای بیش از حد دام‌های خود در این مراتع، سبب نابودی پوشش گیاهی شده و به روند رخداد سیل بعد از وقوع بارش‌های سیل‌آسا سرعت می‌بخشند. در بعضی از دامنه‌ها که اراضی دیم قرار دارند نیز کشاورزان با شخم زدن نامناسب زمین سبب کاهش زمان نفوذ آب به زمین شده و منجر به وقوع سیل می‌شوند. همچنین، شیب کم این مناطق نیز سبب می‌شود که از سرعت جریان کاسته شده و آب‌های سطحی منطقه در این بخش‌ها متمرکز شده که سبب آب‌گرفتگی و وارد آمدن خسارت به مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی می‌شود. بنابراین، با توجه به یافته‌های تحقیق که نشان می‌دهد ۵۰ درصد منطقه حساسیت زیادی برای وقوع مخاطره سیل دارند، بنابراین باید مدیران و برنامه‌ریزان منطقه به منظور جلوگیری از وقوع سیلاب‌های خطرناک و یا کاهش وقوع آنها تمهیدات لازم را در منطقه به کار گیرند.

منابع

- [1]. Kusky T. Floods: Hazards of Surface and Groundwater Systems. Facts on File publishing. 2008; New York.
- [2]. Management and Planning Organization. Office of Technical Affairs and Standards Development, River Flood Control Guide (Structural Methods), 2001; 242. [Persian].
- [3]. Abdi P. analysis the flooding potential in Zanjan roud with SCS method and Geographical information system. Watering and Drainage National committee. Technical workshop coexists with floods. 2005; [Persian].
- [4]. Razavi A. Principle of Water Resources Privacy. First Edition. University of Water and Power Industry Publications. Tehran. 2007. [Persian].
- [5]. Fenicia F, Kavetski D, Savenije H.H, Clark M.P, Schoups G, Pfister L, Freer J. Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence Hydrol. Process.2013; <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9726>.79-85.
- [6]. Amir Ahmadi A, Jahanfar A, Parsiani K. ANP model capability in flood risk zoning (Case Study, Islam Abad Gharb), 5th Iranian Conference on Water Resources Management. Tehran. 2013; pp 1-8. [Persian].
- [7]. Kheirizadeh M, Maleki J, Amonia H. Flood hazard potential zoning in Marduk Chai catchment using ANP model. Quantitative Geomorphology Research. 2013; NO3; pp 39-56. [Persian].
- [8]. Abedini M, Fathi M. Flood Risk Mapping and Evaluation by using the Analytic Network Process Case Study: Khiav Chai Catchment. Hydrogeomorphology. 2015; Volume 1, Issue 3, Page 81-97. [Persian].
- [9]. Abedini M, Beheshti Javid E. Flood Hazard Mapping of Lighvan Chai Watershed Using Network Analysis Process Model (ANP) and GIS. Geographic Space, Islamic Azad University of Ahar Branch. 2016; NO55: PP 293-312, [Persian].
- [10]. Darabi H, Choubin B, Rahmati O, Torabi Haghghi A, Pradhan B, Kløve B. Urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models: A comparative study of machine learning techniques, Journal of Hydrology. 2018; Volume 569, pp 142-154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.002>
- [11]. Kanani-Sadat Y, Arabsheibani R, Karimipour F, Nasser M. A New Approach to Flood Susceptibility Assessment in Data-Scarce and Ungauged Regions Based on GIS-based Hybrid Multi Criteria Decision-Making Method, Journal of Hydrology 2019; Volume 572, pp 17-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034>

- [12]. Dano U.L, Balogun A. L, Matori A.N, Wan Yusouf K, Abubakar I.R, Said Mohamed M.A, Aina, Y.A, Pradhan B. Flood Susceptibility Mapping Using GIS-Based Analytic Network Process: A Case Study of Perlis, Malaysia, *Water*. 2019; 11, 615. pp 1-28. Doi: 10.3390/w11030615
- [13]. Feizizadeh B, Blaschke T. Land suitability analysis for Tabriz County, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS, *Journal of Environmental Planning and Management*. 2013; Vol. 56, No. 1. pp 1-23. <http://dx.doi.org/10.1080/09640568.2011.646964>
- [14]. Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process*. New York. McGraw Hill; 1980; 287 pp.
- [15]. Saaty T.L, Vargas L.G. *Decision Making with the Analytic Network Process*, New York. Springer Science; 2006; 363 pp.
- [16]. Zabardast A. Application of Network Analysis Process in Urban and Regional Planning. *Journal of Fine Arts Architecture and Urban Development*. 2009; NO41. PP 79-90. [Persian].
- [17]. Neaupane K M, Piantanakulchai M. Analytic Network Process model for landslide hazard zonation. *Engineering Geology*. 2006; 85: PP. 281-294.
- [18]. Lami I.M, Abastante F. Decision making for urban solid waste treatment in the context of territorial conflict: Can the Analytic Network Process help?. *Land Use Policy*, 2014, 41, pp. 11-20.
- [19]. Najmaei M. *Engineering Hydrology*. Volume 2. Second print. Tehran: Elm o Sanaat University; 1990, [Persian].
- [20]. Zahedi M, Bayati Khatibi M. *Hydrology*. First Edition. Tehran: Samt Publications; 2007, [Persian].
- [21]. Garde R. J. *River Morphology*. New Delhi: Published by New Age International (P) Ltd; 2006.
- [22]. Moore I.D, Burch G.J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. *Water Resource*. 1986; 22: pp 1350-1360.
- [23]. Nefeslioglu H A, Duman TY, Duemaz S. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey), *Geomorphology*. 2008; 94: pp 401-418.
- [24]. Hong H, Tsangaratos P, Ilia I, Liu J, Zhu A, Chen W. Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China, *Science of the Total Environment*. 2018; 625, pp 575-588. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.256>.
- [25]. Schmidt F, Persson, A. Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. *Precision Agriculture*. 2003; 4: pp. 179-192.
- [26]. Sorensen R, Zinko U, Seibert J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2006; 2: pp. 1807-1834.