

پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه‌ی آبریز مردق‌چای با استفاده از مدل ANP

منصور خیری‌زاده آروق* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تبریز
جبرائیل ملکی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس
حمید عمونیا - کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۳/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۱۱/۱۲

چکیده

سیلاب، یکی از پدیده‌های پیچیده و مخرب طبیعی است که هر ساله خسارت‌های فراوانی را به‌دنبال دارد. منطقه‌ی شمال‌غرب کشور، به‌دلیل داشتن اقلیمی نیمه‌خشک و کوهستانی و در نتیجه تغییرپذیری بالای بارش، از جمله مناطقی است که در معرض سیلاب‌های مخرب قرار دارد. منطقه‌ی مورد مطالعه، حوضه‌ی آبریز مردق‌چای (موردو چای) در استان آذربایجان شرقی است. برای انجام این پژوهش از روش‌های توصیفی، میدانی و تحلیلی استفاده شد. متغیرهای مورد بررسی شامل شیب، شماره‌ی منحنی (CN)، ارتفاع رواناب، شکل، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی و پوشش گیاهی حوضه هستند. لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزارهای Arc GIS و ENVI تهیه شد. برای تعیین میزان اثر و وزن‌دهی به متغیرهای اصلی و طبقه‌های فرعی هر یک از متغیرها در رابطه با خطر وقوع سیلاب، از مدل ANP در قالب نرم‌افزار Super Decisions استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که عامل شیب با میزان $+0/30$ و ارتفاع رواناب سطح حوضه با میزان $+0/28$ در رابطه با رخداد سیلاب، از بیشترین میزان اهمیت و عوامل پوشش گیاهی (NDVI) و سنگ‌شناسی، به ترتیب با رقم $+0/06$ و $+0/07$ از کمترین میزان اهمیت برخوردار هستند. کمابیش در ۳۲ درصد از سطح حوضه، خطر وقوع سیلاب بسیار زیاد و زیاد است که بیشتر در قسمت‌هایی از پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند. این امر با وجود کاهش شیب، به‌دلیل برقراری ارتباطات درونی متغیرها و دخالت عواملی مانند شماره‌ی منحنی (CN) و ارتفاع رواناب بالا، فقر پوشش گیاهی و تراکم زهکشی نسبی بالا است که با توجه به استقرار نقاط سکونتگاهی در این محدوده، انجام اقداماتی برای کاهش خطر وقوع سیلاب در این قسمت از حوضه ضروری است.

کلیدواژه‌ها: سیلاب، پهنه‌بندی، GIS، مدل ANP، حوضه‌ی آبریز مردق‌چای.

مقدمه

سیل به صورت بسیار ساده جریانی است که نسبت به میانگین حجم آب در طول رودخانه بالاتر باشد (Wohl, 2000: 4). سیلاب‌ها در طول تاریخ رایج‌ترین، مرگ‌بارترین و پرهزینه‌ترین خطر در میان 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 (Kusky, 2008: 61). 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 (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۰: ۶-۷)، به طوری که، روند افزایش سیل در پنج دهه‌ی گذشته نشان می‌دهد که تعداد وقوع سیل در دهه‌ی ۸۰ نسبت به دهه‌ی ۴۰ کمابیش ۱۰ برابر شده است و به بیان دیگر ۹۰۰ درصد افزایش داشته است (عبدی، ۱۳۸۵: ۲۰۰).

اندازه و تکرار رویداد سیلاب در هر منطقه، بستگی به عوامل متعددی دارد. ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌ی آبریز مانند: شکل، شیب، شبکه‌ی 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 منطقه‌ای، از اصول اولیه‌ی مهار سیلاب و کاهش خطرات آن است (رضوی، ۱۳۸۷: ۷۵). بنابراین در کنترل و مبارزه با سیلاب، شناخت عوامل مؤثر بر آن اهمیت بسیار زیادی دارد. به‌گفته‌ی دیگر، پیش از هرگونه برنامه‌ریزی برای کنترل سیل، باید رفتار فرایندهای آن را شناخت (اسمیت^۱، به نقل از قنواتی، ۱۳۸۲: ۱۷۴-۱۸۲). نقشه‌های پهنه‌بندی سیل، اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با طبیعت سیلاب‌ها و آثار آن بر اراضی دشت سیلابی ارائه می‌دهند. در پهنه‌بندی سیل برای کنترل کاربری و توسعه‌ی اراضی، نواحی سیلاب دشت به قسمت‌هایی با خطرپذیری‌های متفاوت تقسیم می‌شوند (ولیزاده، ۱۳۸۶: ۱۵۳-۱۶۹).

هر یک از عوامل مؤثر بر رخداد سیلاب، سهم متفاوتی در میزان خطر وقوع آن در سطح حوضه‌های آبریز دارند، به طوری که می‌توان این عوامل را با توجه به میزان اهمیت هر یک، اولویت‌بندی کرد. در این پژوهش، برای به‌دست آوردن میزان اهمیت هر یک از این عوامل، از مدل ANP استفاده شده است. یکی از روش‌های پرکاربرد در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، فرایند تحلیل شبکه‌ای^۲ (ANP) است. این روش گسترش یافته‌ی شبکه‌ی^۳ AHP است. (مؤمنی و شریفی‌سلیم، ۱۳۹۰: ۸۹). به‌طور کلی ANP از ترکیب چهار گام اصلی به‌وجود می‌آید: ۱- پایه‌ریزی مدل و ساختار مسئله؛ ۲- ماتریس مقایسه‌های زوجی و بردارهای تقدم؛ ۳- تشکیل سوپرماتریس و ۴- انتخاب بهترین گزینه (نجفی، ۱۳۸۹: ۶۳-۷۶).

در زمینه‌ی پهنه‌بندی سیلاب می‌توان به کارهایی اشاره کرد که پژوهشگران مختلف با روش‌های گوناگون انجام

1. Smith

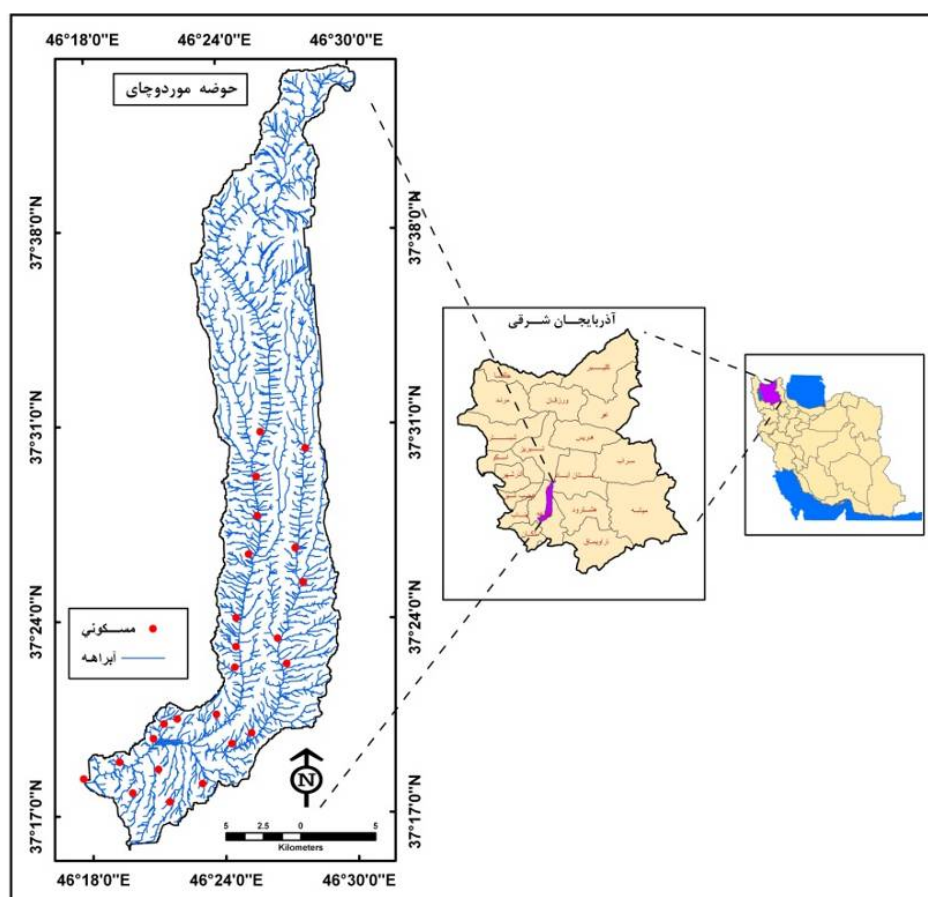
2. Analytical Network Process

3. Analytical Hierarchy Process

داده‌اند. از جمله آنها می‌توان، یانینا^۱ (۲۰۰۸)، لزی^۲ و همکاران (۲۰۰۹)، عنایتی (۱۳۸۲)، داورزنی (۱۳۸۳)، وهابی (۱۳۸۵)، ولیزاده کامران (۱۳۸۶)، اسلامی و ثقفیان (۱۳۸۷)، امیدوار و کیان‌فر (۱۳۸۹)، غریب و همکاران (۱۳۸۶)، شعبانلو و همکاران (۱۳۸۷) را نام برد.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه، حوضه‌ی آبریز مردق‌چای (موردوچای) با موقعیت جغرافیایی $۱۵^{\circ} ۳۷'$ تا $۴۳^{\circ} ۳۷'$ عرض شمالی و $۱۶^{\circ} ۴۶'$ تا $۳۰^{\circ} ۴۶'$ طول شرقی در استان آذربایجان شرقی، در محدوده‌ی شهرستان‌های مراغه و ملکان واقع شده است (شکل شماره‌ی ۱).



شکل ۱. موقعیت حوضه‌ی آبریز موردوچای در شمال غرب کشور

مساحت این حوضه تا قشلاق امیر که دارای ایستگاه‌های باران‌سنج و هیدرومتری است، در حدود ۳۵۳ کیلومتر مربع است. دو شعبه‌ی اصلی این رودخانه، یعنی موردوچای و مغانجق‌چای، پس از زهکشی قسمت‌هایی از دامنه‌ی جنوبی سه‌پند به‌هم پیوسته و بعد از گذر از شهرستان ملکان، به دریاچه‌ی ارومیه می‌ریزد. با توجه به موقعیت جغرافیایی، کوهستانی بودن و توده‌های تأثیرگذار بر منطقه، امکان وقوع سیلاب در این حوضه زیاد است، به‌طوری که

1. Yanina

2. Loczy

گزارش‌های تاریخی و بررسی عکس‌های هوایی، نشان از وقوع سیلاب‌های مخرب در این منطقه، به‌ویژه در محدوده‌ی شهرستان ملکان دارد. بیشتر سیل‌های رخ داده مربوط به فصل بهار است. در این فصل آب ذوب برف با رواناب ناشی از بارندگی همراه شده و در نتیجه رواناب افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. به‌گونه‌ای که ۲۸/۱۴ درصد از کل دبی موردوچای مربوط به اردیبهشت‌ماه و ۲۵/۰۳ درصد مربوط به فروردین‌ماه است. این منطقه یکی از قطب‌های مهم جمعیتی (به‌خصوص به‌شکل روستاهای پرجمعیت) و کشاورزی استان آذربایجان شرقی است و بنابراین با توجه به تراکم بالای جمعیتی، بررسی عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب و پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است.

روش پژوهش

برای انجام این پژوهش پس از مشخص کردن متغیرهای مورد بررسی، شامل شیب، شماره‌ی منحنی^۱ (CN)، ارتفاع رواناب، شکل، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی و پوشش گیاهی، نسبت به گردآوری داده‌ها اقدام شده است. این داده‌ها شامل نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌ی ارزیابی منابع و قابلیت اراضی استان آذربایجان شرقی، تصاویر ماهواره‌ای ETM+، داده‌های اقلیمی و... هستند. سپس لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزارهای ENVI و Arc GIS به‌همراه الحاقی‌های مربوطه تهیه شد. بدین‌گونه که لایه‌های شیب، شکل و تراکم زهکشی زیرحوضه‌ها با استفاده از تصاویر DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر و نقشه‌های توپوگرافی منطقه با بهره‌گیری از الحاقی ArcHydro و همچنین لایه‌ی شماره‌ی منحنی و ارتفاع رواناب با استفاده از الحاقی ArcCN-Runoff در محیط Arc GIS تهیه شد. برای تهیه‌ی لایه‌ی پوشش گیاهی، شاخص پوشش گیاهی NDVI مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌ها در زمینه‌ی مطالعات پوشش گیاهی است. برای این کار باند سه و چهار تصاویر ماهواره‌ای ETM+ مورد نیاز است. مقادیر این شاخص برای پوشش گیاهی متراکم به‌سوی عدد یک میل می‌کند ولی ابرها، برف و آب با مقادیر منفی مشخص می‌شوند. سنگ‌ها و خاک‌های بایر که واکنش‌های طیفی مشابه در دو باند مورد استفاده دارند با مقادیر نزدیک به صفر دیده می‌شوند (Allison, 1989) به نقل از باعقیده و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۶-۱.

برای به‌دست آوردن میزان اهمیت هر یک از این عوامل (معیارها) در رابطه با رخداد سیل و همچنین وزن‌دهی به متغیرهای اصلی و طبقه‌های فرعی متغیرها، از مدل ANP بهره برده شده است. برای حل یک مسئله با این روش، ابتدا باید شبکه‌ای از هدف، معیارها، زیرمعیارها، گزینه‌ها و روابط بین آنها شناسایی و رسم شود. در گام بعدی همه‌ی مقایسه‌های زوجی انجام گیرد. معیاری که مقایسه‌های زوجی نسبت به آن یا با توجه به آن انجام می‌شود، به معیار کنترلی معروف است. وزن معیارها و وزن گزینه‌ها، در سوپرماتریسی که سطرها به مقدار ثابتی میل کنند، به‌دست خواهد آمد (مؤمنی و شریفی سلیم، ۱۳۹۰: ۹۰-۹۳). در ANP اندازه‌گیری مقادیر نسبی به‌مانند AHP با مقایسه‌های زوجی و به‌کمک طیف ۱ تا ۹ انجام می‌شود (برای نمونه جدول شماره ۵). عدد ۱ نشان‌دهنده‌ی اهمیت یکسان بین دو

1. Curve Number

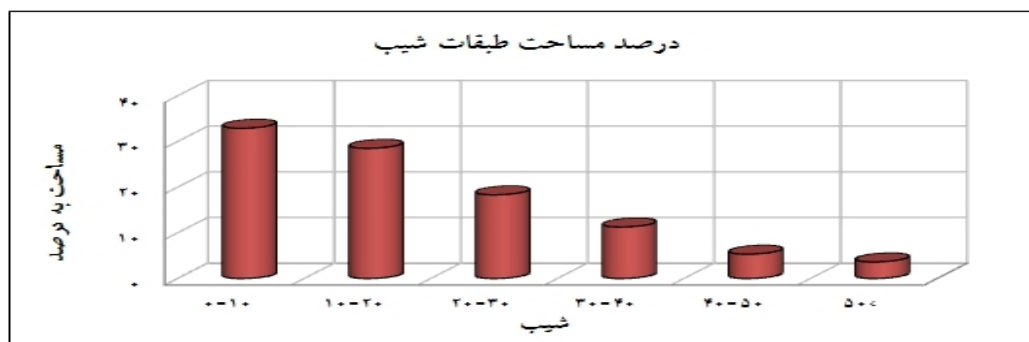
عامل و عدد ۹ نشان‌دهنده‌ی اهمیت شدید یک عامل نسبت به عامل دیگر است (کیانی و دیگران، ۱۳۸۹: ۲۴۹-۲۶۷). بدین منظور تعداد ۱۵ پرسش‌نامه برای به‌دست آوردن رابطه و میزان اثر این عوامل در رابطه با خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه‌ی آبریز تهیه شد و در اختیار کارشناسان ژئومورفولوژی قرار گرفت. پس از تحلیل پرسش‌نامه، برای محاسبه‌ی وزن‌های نهایی هر معیار و زیرمعیار (با توجه ارتباطات درونی) از نرم‌افزار Super Decisions استفاده شد. این نرم‌افزار را ساعتی^۱ و همکارش برای پشتیبانی از روش ANP ارائه کرده‌اند. این بسته‌ی نرم‌افزاری، توانایی ساخت مدل‌های تصمیم به‌همراه وابستگی‌ها و بازخورد و محاسبه‌ی سوپرماتریس را دارد (مؤمنی و شریفی سلیم، ۱۳۹۰: ۱۰۱). وزن‌های نهایی منتج از این نرم‌افزار، وارد جداول توصیفی لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزار Arc GIS شده و پس از آماده‌سازی با استفاده از مدل همپوشانی ریاضی^۲، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آماده شد.

یافته‌های پژوهش

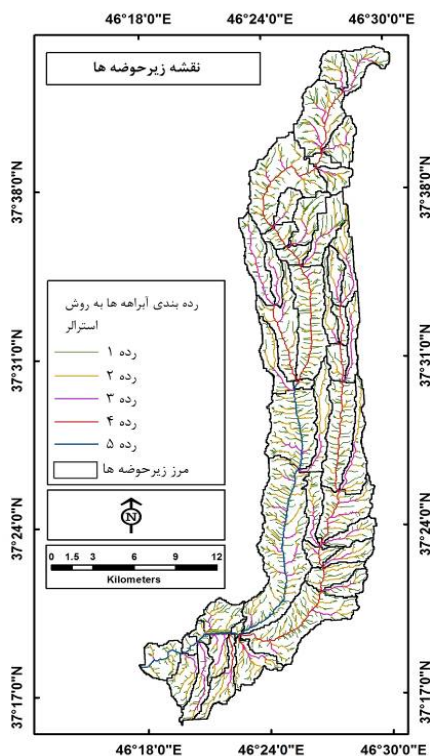
عوامل مؤثر بر وقوع یا تشدید خطر سیل

• عامل شیب

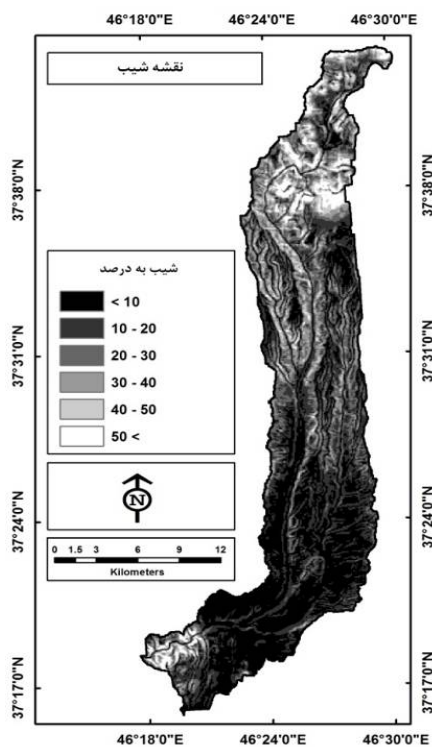
با افزایش شیب عمومی سطح حوضه، فرصت لازم برای نفوذ، کاهش یافته و می‌توان گفت که با افزایش شیب حوضه، زمان تمرکز کاهش می‌یابد (نجمایی، ۱۳۶۹: ۱۷). شیب‌های زیاد، باعث ایجاد اوج‌های بالا در آب‌نمود می‌شوند (زاهدی، ۱۳۸۷: ۱۵۷). نقشه‌ی شیب حوضه‌ی مورد مطالعه با استفاده از تصاویر DEM منطقه و بهره‌گیری از نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد (شکل شماره ۳). شکل شماره ۲، درصد مساحت هر یک از طبقه‌های شیب را نشان می‌دهد که با توجه به آن، طبقه‌ی شیب کمتر از ۱۰ درصد با مساحت ۳۲/۹ درصد بیشترین فراوانی را در سطح حوضه دارد. 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 بالاتری است. این مطلب در تحلیل پرسش‌نامه‌ها نیز به‌روشنی مشاهده می‌شود، به‌طوری که در مدل ANP از وزن بالاتری برخوردار است.



شکل ۲. نمودار درصد مساحت هر یک از طبقه‌های شیب حوضه‌ی موردوچای



۴. نقشه‌ی زیرحوضه‌ها و رده‌بندی آبراهه‌های حوضه



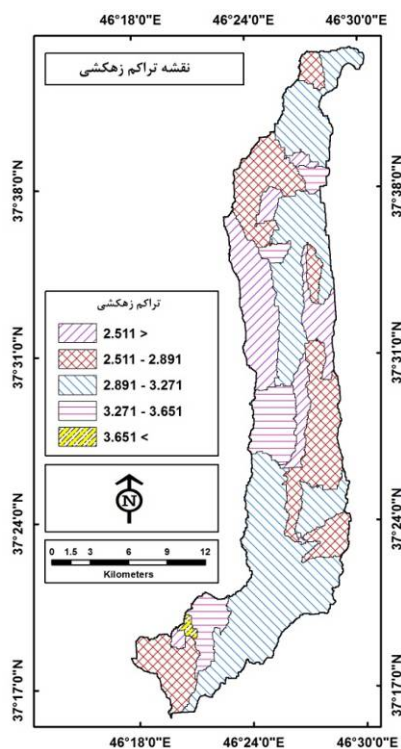
شکل ۳. نقشه‌ی شیب حوضه

• عامل شکل حوضه

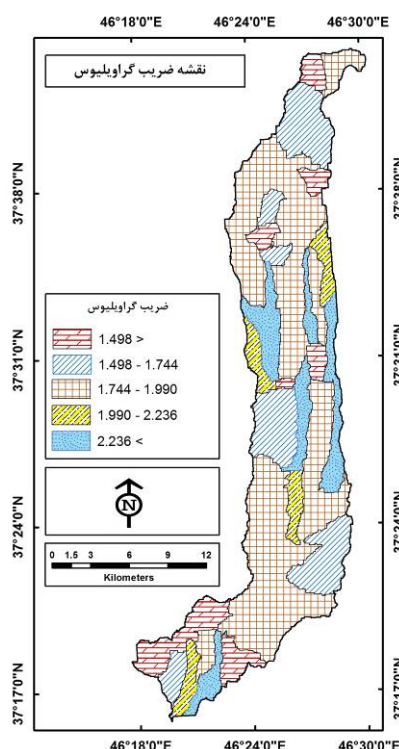
شکل حوضه، ویژگی‌های هیدروژئولوژیک حوضه (برای مثال شکل هیدروگراف) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یک حوضه‌ی باریک طولیل با داشتن نسبت انشعاب بالا، پیکی پایین اما ثابت را به‌وجود می‌آورد، در حالی که حوضه‌های گرد با نسبت انشعاب پایین، یک هیدروگراف تیز را به‌وجود خواهند آورد (Garde, 2006: 21). برای تعیین شکل حوضه، ضریب فشردگی یا ضریب گراویلیوس مورد استفاده قرار گرفت. برای دخالت‌دادن تأثیر شکل زیرحوضه‌ها در خطر وقوع سیلاب، ابتدا با استفاده از الحاقی ArcHydro، حوضه‌ی مورد مطالعه به چندین زیرحوضه (۴۹ زیرحوضه) تقسیم شد (شکل شماره ۴). پس از مشخص کردن زیرحوضه‌ها، ضریب گراویلیوس هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد. زیرحوضه‌ها با توجه به مقادیر ضریب گراویلیوس و با در نظر گرفتن دامنه‌ی تغییرات، به‌روش آماری به پنج طبقه با فاصله‌ی طبقاتی ۰/۲۴۶ تقسیم شدند (جدول شماره ۱). با توجه به مقادیر این طبقه‌ها، زیرحوضه‌هایی که در طبقه‌ی یکسان قرار دارند با یکدیگر ادغام شده و بدین ترتیب لایه‌ی جدید شکل تهیه می‌شود (شکل شماره ۵) که در واقع یک نوع پهنه‌بندی خطر وقوع سیل با در نظر گرفتن تنها یک عامل، یعنی شکل زیرحوضه‌ها است. روی این اصل که بین مقدار ضریب فشردگی و میزان سیل‌خیزی رابطه‌ی معکوس وجود دارد، طبقه‌های مورد نظر با توجه به هدف پژوهش اولویت‌بندی شدند. در نتیجه با توجه به تحلیل پرسش‌نامه‌ها، طبقه‌هایی که کمترین میزان ضریب فشردگی را دارند، یعنی طبقه‌هایی با مقدار کمتر از ۱/۷۴۴، دارای بیشترین میزان اهمیت در رابطه با خطر وقوع سیل هستند. در زیرحوضه‌های مذکور در مقایسه با سایر زیرحوضه‌ها، تخلیه‌ی رواناب به‌سرعت انجام می‌شود و زمان تمرکز کاهش می‌یابد که این خود می‌تواند باعث افزایش خطر وقوع سیل در این قسمت‌ها شود.

جدول ۱. ضریب گراویلیوس زیرحوضه‌ها و رابطه‌ی آن با خطر وقوع سیل در حوضه‌ی موردوچای

طبقات ضریب گراویلیوس	فراوانی زیرحوضه‌ها	درصد مساحت از کل حوضه	خطر وقوع سیل در رابطه با عامل شکل زیرحوضه‌ها
کمتر از ۱/۴۹۸	۱۰	۱۲/۵۲	بسیار زیاد
۱/۴۹۸ - ۱/۷۴۴	۱۱	۱۹/۰۸	زیاد
۱/۷۴۴ - ۱/۹۹۰	۱۸	۴۹/۲۱	متوسط
۱/۹۹۰ - ۲/۲۳۶	۴	۶/۸۳	کم
بیشتر از ۲/۲۳۶	۶	۱۲/۳۷	بسیار کم



شکل ۶. نقشه‌ی تراکم زهکشی حوضه



شکل ۵. نقشه‌ی ضریب گراویلیوس حوضه

• عامل تراکم زهکشی

میزان تراکم زهکشی، یک شاخص مهم در تعیین شدت سیلاب‌ها، میزان بار رسوبی، بیلان آب در کل حوضه و به‌طور کلی در چگونگی فعالیت فرایندهای رواناب‌های سطحی است (زاهدی، ۱۳۸۷: ۴۵). برای دخالت‌دادن نقش تراکم زهکشی زیرحوضه‌ها در خطر وقوع سیلاب، تراکم زهکشی برای هر یک از ۴۹ زیرحوضه محاسبه شد. زیرحوضه‌ها از نظر تراکم زهکشی، مقادیر بسیار متفاوتی از ۱/۷۷ تا بیش از ۳/۷۵ کیلومتر در کیلومتر مربع را نشان می‌دهند که این امر ممکن است نشان‌دهنده‌ی اختلاف زیاد زیرحوضه‌ها در رابطه با شیب، سنگ‌شناسی، مساحت و سایر مواردی باشد که در میزان تراکم زهکشی مؤثر است. حوضه‌ی مورد مطالعه بر اساس مقادیر تراکم زهکشی زیرحوضه‌ها، به پنج طبقه تقسیم شد (جدول شماره‌ی ۲ و شکل شماره‌ی ۶). این طبقه‌بندی نیز با استفاده از روش آماری انجام گرفت که فاصله‌ی

طبقه‌ها در آن با توجه به دامنه‌ی تغییرات مقادیر تراکم زهکشی زیرحوضه‌ها، ۰/۳۸ است. هر چه تراکم زهکشی زیرحوضه‌ای بالاتر باشد، تخلیه‌ی رواناب در سطح آن به‌سادگی انجام خواهد شد، در نتیجه زمان تمرکز کاهش یافته و میزان خطر وقوع سیل افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به هدف پژوهش، در مدل ANP زیرحوضه‌هایی که تراکم زهکشی بالاتر از ۳/۲۷ کیلومتر در کیلومتر مربع را دارند، از بالاترین میزان اثر و اهمیت برخوردار هستند و وزن بالاتری را کسب خواهند کرد.

جدول ۲. تراکم زهکشی زیرحوضه‌ها و رابطه‌ی آن با خطر وقوع سیل در حوضه‌ی موردپوچای

طبقات تراکم زهکشی	فراوانی زیرحوضه‌ها	درصد مساحت از کل حوضه	خطر وقوع سیل در رابطه با عامل تراکم زهکشی
کمتر از ۲/۵۱۱	۱۲	۱۶/۴۶	بسیار کم
۲/۵۱۱ – ۲/۸۹۱	۱۳	۲۶/۴۵	کم
۲/۸۹۱ – ۳/۲۷۱	۱۷	۴۶/۲۱	متوسط
۳/۲۷۱ – ۳/۶۵۱	۶	۱۰/۲۸	زیاد
بیشتر از ۳/۶۵۱	۱	۰/۶۳	بسیار زیاد

• عامل ارتفاع رواناب

در رابطه با خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه‌های آبریز، به‌دست آوردن ارتفاع رواناب ناشی از بارندگی با مقدار مشخص، از اهمیت فراوانی برخوردار است. در روش SCS (سازمان حفاظت خاک آمریکا) ارتفاع رواناب برای شرایط کلی از رابطه‌ی شماره‌ی ۱ به‌دست می‌آید (علیزاده، ۱۳۸۲: ۷۳۶):

$$Q_d = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)^2} \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

که در آن؛ Q_d : ارتفاع رواناب روی حوضه؛ P : مقدار بارش (cm)؛ S : حداکثر یا پتانسیل نگه‌داشت بارش روی زمین (cm) که مقدار آن بستگی به شماره‌ی منحنی CN داشته و مقدار آن در سیستم متریک از رابطه‌ی شماره‌ی ۲ به‌دست می‌آید.

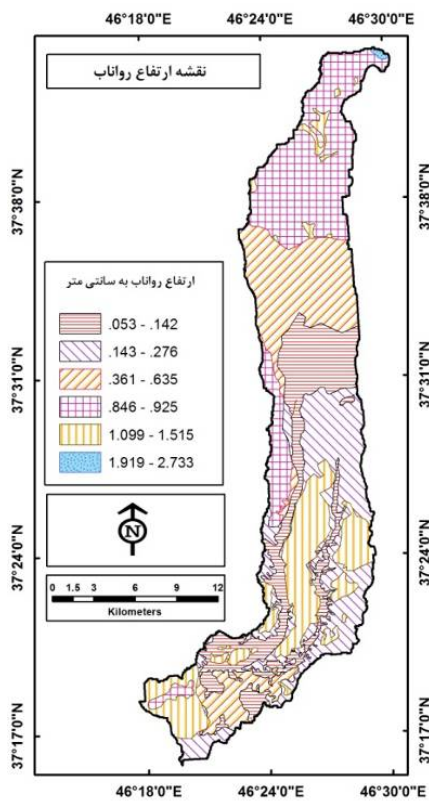
$$CN = \frac{2540}{25.4 + S} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

شماره‌ی منحنی (CN)، نشان‌دهنده‌ی چگونگی نفوذ بارش یا چگونگی تبدیل به رواناب سطحی است. شماره‌ی منحنی بالا به‌معنای رواناب بیشتر و نفوذ کمتر است، در حالی که شماره‌ی منحنی پایین، به‌معنای رواناب کمتر و نفوذ بیشتر است (Zhan & Huang, 2004: 1-5). برای تهیه‌ی لایه‌ی CN و ارتفاع رواناب قسمت‌های مختلف حوضه، از الحاقی ArcCN-Runoff در محیط نرم‌افزار Arc GIS استفاده شد. این ابزار را ژان و هوانگ^۱ (۲۰۰۴) برای تعیین ارتفاع و حجم رواناب بر اساس روش SCS ارائه کرده‌اند. بدین منظور دو لایه‌ی اطلاعاتی گروه‌های هیدرولوژیک خاک با استفاده از نقشه‌ی خاک حوضه و لایه‌ی کاربری اراضی حوضه با استفاده از تصویر ماهواره‌ای ETM+، به‌روش

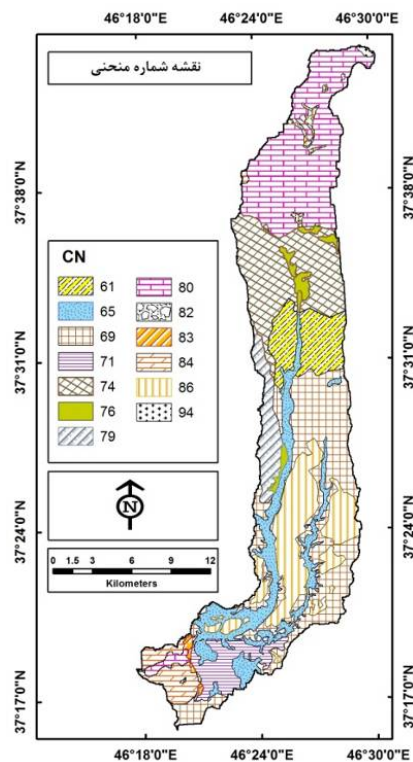
طبقه‌بندی نظارت‌شده تهیه شد. سپس با استفاده از این لایه‌ها و حداکثر بارش ۲۴ ساعته، نسبت به تهیه‌ی لایه‌ی CN (شکل شماره ۷) و ارتفاع رواناب (شکل شماره ۸) قسمت‌های مختلف حوضه اقدام شد. در این مورد حداکثر بارش ۲۴ ساعته برای حوضه‌ی موردچای، ۴۲ میلی‌متر در طول ۲۵ سال آماری (ایستگاه سینوپتیک مراغه) بوده است. در جدول شماره ۳، طبقه‌های ارتفاع رواناب برحسب سانتی‌متر با توجه به مقادیر CN و حداکثر بارش ۲۴ ساعته (۴۲ میلی‌متر) محاسبه شده است. آنچه در رابطه با خطر وقوع سیلاب اهمیت زیادی دارد، طبقه‌های با ارتفاع رواناب بیش از ۰/۸ سانتی‌متر است که در مدل ANP از وزن بالاتری برخوردار خواهند بود.

جدول ۳. ارتفاع رواناب قسمت‌های مختلف حوضه‌ی موردچای و رابطه‌ی آن با خطر وقوع سیل

طبقات ارتفاع رواناب به cm	درصد مساحت از حوضه	خطر وقوع سیلاب در رابطه با ارتفاع رواناب
۰/۱۴۲ - ۰/۰۵۳	۱۸/۳	بسیار کم
۰/۲۷۶ - ۰/۱۴۳	۲۰/۶	کم
۰/۶۳۵ - ۰/۳۶۱	۱۹/۵	متوسط
۰/۹۲۵ - ۰/۸۴۶	۲۳/۷	زیاد
۱/۵۱۵ - ۱/۰۹۹	۱۷/۴	بسیار زیاد
۲/۷۳۳ - ۱/۹۱۹	۰/۲۱	بسیار زیاد



شکل ۸. نقشه‌ی ارتفاع رواناب حوضه

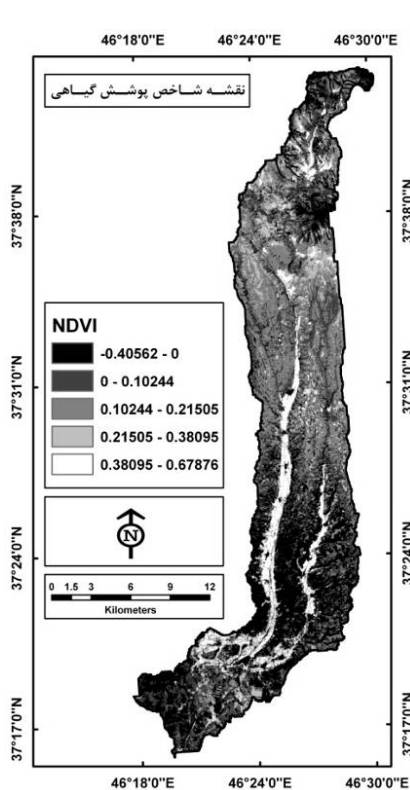


شکل ۷. نقشه‌ی CN حوضه

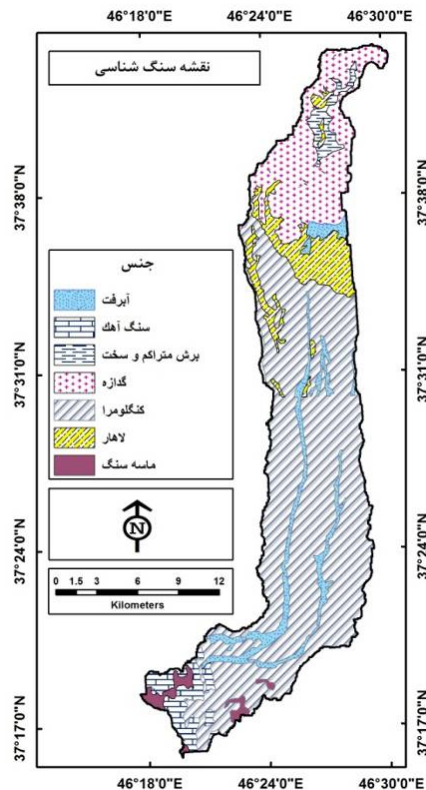
• سنگ شناسی

نوع سنگ و پوشش خاک، ظرفیت نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خاک یا سنگ قابل نفوذ، شرایط نفوذ آب به‌داخل

زمین را فراهم می‌کند و تخلیه‌ی آن را به‌داخل آبراهه‌ی اصلی به تأخیر می‌اندازد؛ از این رو رواناب سطحی کاهش می‌یابد. حوضه‌های با سنگ بستر یا خاک به‌نسبت غیر قابل نفوذ، حجم بالایی از رواناب سطحی ایجاد می‌کنند (Garde, 2006: 21). بنابراین در بحث سنگ‌شناسی با توجه به هدف مطالعه، میزان نفوذپذیری سازندها مدنظر است. بیشتر سازندهای حوضه‌ی موردچای، در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی سه‌سند و فرسایش پس از آن بوده است. در کل، سازندهای حوضه‌ی مورد مطالعه از نفوذپذیری کمی برخوردارند که این امر در رابطه با سیل‌خیزی حوضه، از اهمیت فراوانی برخوردار است؛ چراکه میزان نفوذ را به‌شدت کاهش داده و در مقابل آبدوی را افزایش می‌دهد. حدود ۶۱ درصد از سطح حوضه‌ی مورد مطالعه از کنگلومرا پوشیده شده است که یا خاستگاه آبرفتی دارد و در خشکی یا مناطق دریاچه‌ای رسوب‌گذاری کرده است یا از لاهاری تشکیل شده که بیشتر شامل قطعات پومیس گرد و گوشه‌دار و متخلخل همراه با کمی از قطعات ریزسنگ‌های ولکانیکی است. گدازه‌های آتشفشانی نیز درصد قابل توجهی از سطح حوضه را پوشانده است (حدود ۱۶ درصد) (شکل شماره ۹). در خصوص میزان اثر و اهمیت هر یک از سازندها در رابطه با خطر وقوع سیلاب در مدل ANP، سازندهای نفوذ ناپذیر یا با نفوذپذیری خیلی کم، از اهمیت یا اولویت بالاتری برخوردارند. در این زمینه با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی حوضه‌ی مورد مطالعه و گزارش‌های این نقشه‌ها، سنگ‌های آذرین کمابیش غیرقابل نفوذ یا کمترین میزان نفوذپذیری را دارند؛ در نتیجه در رابطه با تولید رواناب از بیشترین میزان اهمیت برخوردارند و در مقابل نهشته‌های آبرفتی (حدود ۷ درصد سطح حوضه) به‌دلیل نفوذپذیری بالا، کمترین میزان اهمیت را دارند.



شکل ۱. نقشه‌ی شاخص پوشش گیاهی حوضه



شکل ۹. نقشه‌ی سنگ‌شناسی حوضه

• شاخص 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، به شدت توسط ماهیت و گسترش پوشش گیاهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Garde, 2006: 23). در این پژوهش، برای تهیه‌ی نقشه‌ی پوشش گیاهی حوضه از شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده^۱ (NDVI) استفاده شد. بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای ETM+ ماهواره‌ی لندست (مربوط به فصل بهار که اکثر سیلاب‌های حوضه در این فصل رخ داده‌اند) در قالب نرم‌افزار ENVI استفاده شد. شاخص NDVI از رابطه‌ی شماره‌ی ۳ به دست می‌آید (ENVI User's Guide, 1999: 582):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

که در آن:

NIR: باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ سنجنده‌ی ETM+ ماهواره‌ی لندست ۷)

Red: باند قرمز (باند ۳ سنجنده‌ی ETM+ ماهواره‌ی لندست ۷) است.

مقادیر حاصل از شاخص NDVI بین ۱ و -۱ قرار می‌گیرد و هر چه پوشش گیاهی و درجه سرسبزی منطقه بیشتر باشد، مقدار این شاخص نیز به یک نزدیکتر می‌شود (یعقوب‌زاده و دیگران، ۱۳۸۸: ۳۱-۴۱).

مقادیر شاخص پوشش گیاهی حوضه‌ی مورد‌وچای بین ۰/۴۰- تا ۰/۶۷ است که بر اساس این مقادیر به پنج طبقه تقسیم شدند (شکل شماره‌ی ۱۰). با توجه به داده‌های جدول شماره‌ی ۴ ملاحظه می‌شود که در کل، حوضه‌ی مورد‌وچای از پوشش گیاهی ضعیفی برخوردار است، به طوری که تنها حدود ۶ درصد حوضه پوشش گیاهی به نسبت مطلوبی دارد که آن هم با توجه به تصاویر ماهواره‌ای، مربوط به باغات کشاورزی‌ای است که در اطراف آبراهه‌های اصلی ایجاد شده است، در حالی که بیش از ۵۴ درصد از سطح حوضه را زمین‌های عاری از پوشش گیاهی (به صورت سنگلاخ‌ها، صخره‌ها، سکونتگاه‌ها و ...) یا با پوشش گیاهی بسیار فقیر پوشانده است. زمین‌های عاری از پوشش گیاهی بیشتر در اطراف قله‌های آتشفشانی و به ویژه در پایین دست حوضه، همزمان با نزدیک شدن و به هم پیوستن دو شعبه‌ی اصلی مشاهده می‌شود. این امر گویای بسیاری از واقعیت‌های فیزیکی حوضه، از جمله نوع خاک و میزان نفوذپذیری سازندها است. قسمت‌های میانی حوضه بیشتر شامل مراتع خوب تا متوسط است.

در رابطه با سیل‌خیزی، طبقه‌ای که کمترین میزان شاخص پوشش گیاهی را دارد، از بیشترین میزان اهمیت یا ارجحیت در مدل ANP برخوردار خواهد بود و در نتیجه وزن بالاتری را کسب می‌کند، چراکه عدم وجود پوشش گیاهی یا فقر شدید آن، سبب کاهش نفوذ و افزایش آبدوی و در نتیجه کاهش زمان تمرکز می‌شود.

جدول ۴. مقادیر شاخص پوشش گیاهی NDVI حوضه‌ی موردوچای

طبقات شاخص پوشش گیاهی NDVI	درصد مساحت از کل حوضه	خطر وقوع سیل در رابطه با شاخص NDVI
-۰/۴۰۵ - ۰	۲۵/۷۹	بسیار زیاد
۰ - ۰/۱۰۲	۲۸/۹۱	زیاد
۰/۱۰۲ - ۰/۲۱۵	۲۸/۹۶	متوسط
۰/۲۱۵ - ۰/۳۸۰	۱۰/۲۶	کم
۰/۳۸۰ - ۰/۶۷۸	۶/۰۸	بسیار کم

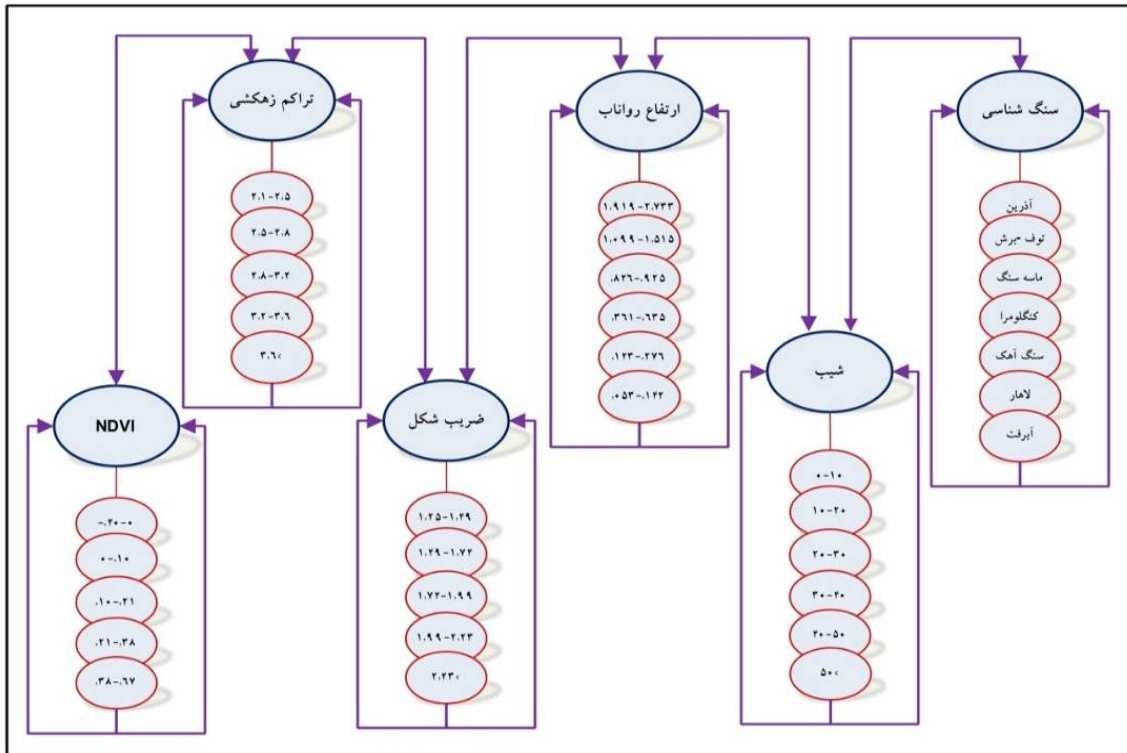
• تعیین درجه اهمیت متغیرهای مؤثر بر وقوع سیل

پس از به‌دست آوردن لایه‌های اطلاعاتی، برای وزن‌دهی از مدل ANP استفاده شد. بدین منظور پس از تشکیل ساختار (شکل شماره ۱۱) و ماتریس مقایسه‌ای شامل شش سطر و شش ستون، از طریق پرسش‌نامه و دیدگاه‌های کارشناسان ژئومورفولوژی، برای تعیین رابطه و میزان اهمیت هر یک از این معیارها و زیرمعیارها استفاده شد (برای نمونه جدول شماره ۵). برای تحلیل دیدگاه‌ها روش بردا^۱ مورد استفاده قرار گرفت. در روش بردا بر اساس قاعده‌ی اکثریت، روش‌های مختلف ترجیحی گزینه‌ها نسبت به یکدیگر ملاک عمل قرار داده می‌شود (پورطاهری، ۱۳۸۹: ۱۸۳). برای انجام محاسبات از نرم‌افزارهای SPSS و Super Decisions استفاده شد و پس از تشکیل سوپر ماتریس‌ها، وزن‌ها یا ارزش‌های هر معیار (جدول شماره ۶) و وزن‌های نسبی هر زیرمعیار (جدول شماره ۷) و ارتباطات درونی آنها نسبت به هدف پژوهش به‌دست آمد. وزن‌های نهایی برای هر یک از زیرمعیارها (با توجه به ارتباطات درونی) در محیط نرم‌افزار Super Decisions محاسبه و وارد جداول توصیفی هر یک از لایه‌های مربوطه در نرم‌افزار Arc GIS شد. سپس هر یک از این لایه‌ها با توجه به ارزش‌های جدید، بار دیگر طبقه‌بندی^۲ شدند. هر یک از این لایه‌ها را می‌توان به‌عنوان یک نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب، تنها بر اساس عامل مربوطه در نظر گرفت. پس از آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، با توجه به میزان اهمیت، از ابزار تحلیل گر فضایی^۳ برای همپوشانی ریاضی لایه‌ها استفاده شد. این امر با کمک رابطه‌ی شماره ۴ که وزن‌های آن از طریق مدل ANP به‌دست آمده (جدول شماره ۶)، برای همپوشانی لایه‌ها انجام گرفت و از این طریق لایه‌ی خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه‌ی آبریز به‌دست آمد.

$$\text{رابطه‌ی (۴)} \quad \text{لایه‌ی خطر وقوع سیلاب} = (۳۰۱ / \times [\text{شیب}]) + (۲۸۴ / \times [\text{ارتفاع رواناب}]) + (۲۱۰ / \times [\text{ضریب گراویلیوس}]) + (۱۳۲ / \times [\text{تراکم زهکشی}]) + (۰۷۳ / \times [\text{سنگ‌شناسی}]) + (۰۶۲ / \times [\text{پوشش گیاهی}])$$

در نهایت لایه‌ی به‌دست آمده با توجه به تعداد طبقه‌های مورد نظر بار دیگر طبقه‌بندی شد. در این مورد، لایه‌ی خطر وقوع سیلاب به پنج طبقه با عنوان خطر بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم تقسیم‌بندی شد (شکل شماره ۱۲).

1. Borda
2. Reclassify
3. Spatial Analyst



شکل ۱۱. معیارها و زیرمعیارهای پژوهش (بر اساس ساختار مدل ANP ساعتی، ۲۰۰۶)

جدول ۵. نمونه‌ای از مقایسات زوجی (معیار شیب با سایر معیارها)

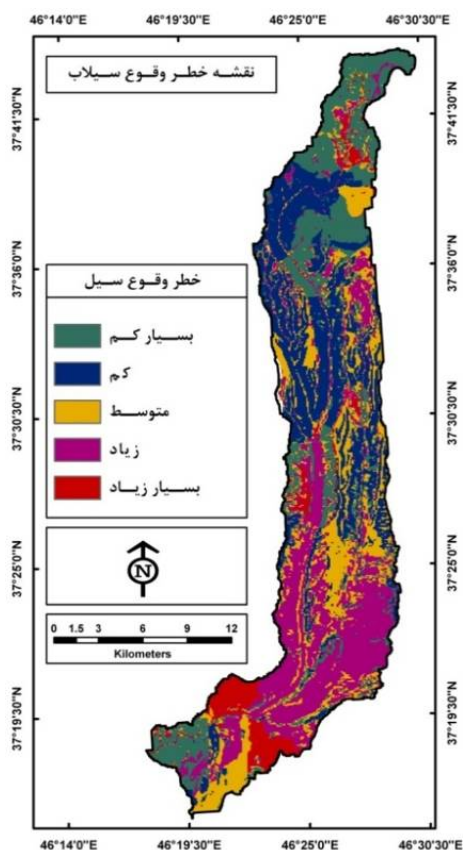
معیار	میزان اهمیت															معیار		
	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷		۸	۹
ارتفاع رواناب									۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب
شکل									۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب
تراکم									۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب
سنگ‌شناسی									۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب
NDVI									۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب

جدول ۶. وزن هر یک از متغیرهای مؤثر بر خطر وقوع سیلاب با استفاده از مدل ANP

معیار	شیب	ارتفاع رواناب	ضریب گراویلیوس	تراکم زهکشی	سنگ‌شناسی	NDVI
وزن در مدل ANP	۰/۳۰۱	۰/۲۸۴	۰/۲۱۰	۰/۱۳۲	۰/۰۷۳	۰/۰۶۲

جدول ۷. وزن نسبی هر یک از زیرمعیارهای مؤثر بر خطر وقوع سیلاب با استفاده از مدل ANP

زیرمعیار						معیار	
بیشتر از ۵۰	۴۰-۵۰	۳۰-۴۰	۲۰-۳۰	۱۰-۲۰	۰-۱۰	شیب	
۰/۳۰۹	۰/۲۷۱	۰/۱۳۴	۰/۱۲۳	۰/۰۹۱	۰/۰۷۲	وزن	
۱/۹۱-۲/۷۳	۱/۰۹-۱/۵۱	۱/۸۴-۱/۹۲	۱/۳۶-۱/۶۳	۱/۱۴-۱/۲۷	۱/۰۵-۱/۱۴	ارتفاع رواناب	
۰/۳۶۹	۰/۲۵۲	۰/۱۶۹	۰/۱۰۲	۰/۰۶۷	۰/۰۴۱	وزن	
بیشتر از ۲/۲۳	۱/۹۹-۲/۲۳	۱/۷۴-۱/۹۹	۱/۴۹-۱/۷۴	کمتر از ۱/۴۹		ضریب گراویلیوس	
۰/۰۵۰	۰/۰۸۹	۰/۱۶۵	۰/۲۸۶	۰/۴۱۰		وزن	
بیشتر از ۳/۶۵	۳/۲۷-۳/۶۵	۲/۸۹-۳/۲۷	۲/۵۱-۲/۸۹	کمتر از ۲/۵۱		تراکم زهکشی	
۰/۴۱۱	۰/۲۸۳	۰/۱۶۲	۰/۰۹۲	۰/۰۵۲		وزن	
ماسه سنگ	لاهار	کنگلومرا	آذرین	برش متراکم	سنگ آهک	آبرفت	سنگ شناسی
۰/۱۷۵	۰/۰۴۶	۰/۱۴۵	۰/۲۶۹	۰/۲۴۰	۰/۰۹۶	۰/۰۲۹	وزن
۱/۳۸-۱/۶۷	۱/۲۱-۱/۳۸	۱/۱۰-۱/۲۱	۰-۱/۱۰		-۱/۴۰-۰	NDVI	
۰/۰۶۱	۰/۱۱۸	۰/۱۷۸	۰/۲۴۹		۰/۳۹۴	وزن	



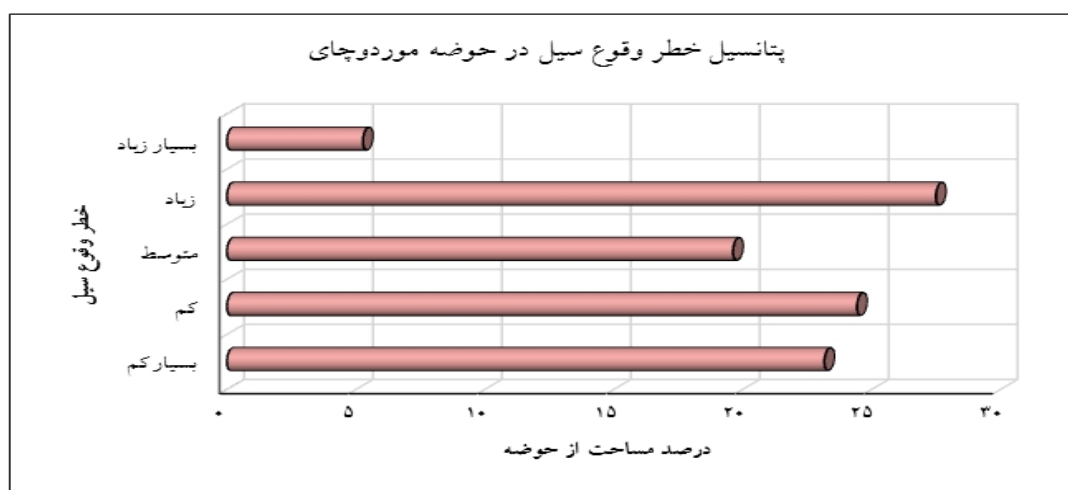
شکل ۱۲. نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب حوضه‌ی موردوچای

بحث و نتیجه‌گیری

پهنه‌بندی نهایی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه‌ی مورد مطالعه با توجه به ارتباطات درونی و بر اساس دخالت وزن‌ها یا ارزش‌های نهایی هر یک از متغیرهای اصلی و همچنین طبقات فرعی متغیرها انجام گرفت. تحلیل وزن‌های نهایی منتج از مدل ANP، نشان می‌دهد که در رابطه با خطر وقوع سیلاب، عامل شیب با مقدار $0/30$ و ارتفاع رواناب با مقدار $0/28$ با توجه به کنترل زیادی که بر میزان و چگونگی تخلیه‌ی رواناب از سطح حوضه دارند، از بیشترین میزان اهمیت و تأثیر برخوردار هستند و برعکس عامل سنگ‌شناسی با $0/07$ و عامل NDVI با $0/06$ نسبت به عوامل دیگر دارای اهمیت کمتری هستند. در واقع می‌توان گفت که خطر وقوع سیلاب در حوضه‌ی مورد مطالعه تا حد زیادی وابسته به شرایط فیزیکی حوضه است. حتی ارتفاع روانابی که یک بارش مشخص تولید می‌کند، تا حد زیادی متأثر از ویژگی‌های فیزیکی حوضه است. از این رو با اینکه کنترل عوامل اقلیمی منطقه، مانند شدت، مدت و نوع بارش، امکان‌پذیر نیست؛ ولی با انجام اقداماتی در محدوده‌ی حوضه‌ی آبریز (به‌ویژه در پهنه‌های با خطر بالای وقوع سیل) مانند کاهش شیب به‌صورت پلکانی در قسمت‌های مختلف حوضه، ساماندهی بستر آبراهه‌ی اصلی، آبخیزداری و مانند آن، می‌توان خطرات وقوع سیلاب را به حداقل رساند.

با توجه به شکل شماره‌ی ۱۳ که در آن پهنه‌های در معرض خطر وقوع سیل حوضه‌ی مورد‌چای بر حسب درصد از کل حوضه نمایش داده شده است، کمابیش ۵ درصد از سطح حوضه در خطر وقوع سیلاب بسیار زیاد و حدود ۲۷ درصد از سطح حوضه خطر وقوع سیلاب زیاد است که بیشتر در قسمت‌هایی از پایین‌دست حوضه واقع شده است. با توجه به نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر وقوع سیل حوضه (شکل شماره‌ی ۱۲)، می‌توان نتیجه گرفت که به‌استثنای قسمت‌هایی از بالادست حوضه، همزمان با نزدیک شدن و بهم پیوستن دو شعبه‌ی اصلی حوضه‌ی مورد مطالعه، یعنی مورد‌چای و مغانج‌چای، خطر وقوع سیلاب افزایش می‌یابد. این امر به دلیل دخالت مشترک تعدادی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رخداد سیلاب و همچنین برقراری ارتباطات درونی بین متغیرها است. در بیشتر این قسمت‌ها، شماره‌ی منحنی (CN) دارای مقادیر بالایی است، در نتیجه برای یک بارش با مقدار مشخص، ارتفاع رواناب در این قسمت از حوضه به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. همچنین در این محدوده، شاخص پوشش گیاهی NDVI (به‌استثنای اطراف شعبه‌های اصلی) همراه با قسمت‌هایی از اطراف قله‌های آتشفشانی بالادست حوضه، از کمترین میزان در سطح حوضه برخوردار هستند و حتی در قسمت‌های زیادی از این محدوده‌ها، این شاخص مقادیر منفی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی عدم وجود پوشش گیاهی در این قسمت از حوضه است. این عوامل در ترکیب با عوامل دیگری چون، تراکم زهکشی بالا و ضریب گراویلیوس نسبی پایین، باعث شده که در این قسمت از حوضه خطر وقوع سیلاب افزایش یابد. افزون‌بر این، در این محدوده از حوضه‌ی آبریز، دو شعبه‌ی اصلی به‌تدریج بهم نزدیک شده و درنهایت با تشکیل یک آبراهه‌ی واحد (مورد‌چای) میزان دبی (به‌خصوص در فصل بهار) یک‌باره افزایش پیدا می‌کند که در صورت محدودیت بستر اصلی در انتقال جریان آب، می‌تواند باعث وقوع سیل شود. رودخانه مورد‌چای به دلیل تشکیل مخروط‌افکنه و جلگه‌ی رسوبی حاصلخیز، سبب ایجاد و گسترش نقاط سکونتگاهی زیادی، به‌ویژه به‌شکل روستاهای پرجمعیت شده است، به‌طوری که الگوی استقرار فضایی سکونتگاه‌ها در این منطقه نشان می‌دهد، بسیاری از نقاط سکونتگاهی به شکل دانه‌های تسبیح در

مجاورت رودخانه‌ی اصلی و سرشاخه‌های آن قرار دارند. برای نمونه، بیش از ۶۹ درصد جمعیت شهرستان ملکان مربوط به روستاها است (آمار سال ۱۳۸۵) که بیشتر این آبادی‌ها در مجاورت دو رودخانه‌ی عمده‌ی منطقه، یعنی لیلان‌چای و به‌ویژه موردوچای مستقر شده‌اند و این در حالی است که خود شهر ملکان نیز در دو طرف رودخانه‌ی موردوچای توسعه یافته است. بنابراین با توجه به تراکم بالای جمعیتی و گسترش ساخت‌وساز در مجاورت این رودخانه که در موارد بسیاری منجر به تجاوز به حریم رودخانه نیز شده، خطرات ناشی از وقوع سیل نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه باید با اقدامات مناسب، چه سازه‌ای و چه غیرسازه‌ای، تا حد امکان مانع وقوع سیل شد یا دست‌کم خسارت‌های ناشی از آن را به حداقل رساند.



شکل ۱۳. نمودار پهنه‌های در معرض خطر وقوع سیل حوضه‌ی موردوچای

منابع

۱. اسلامی، ع. و تقفیان، ب. (۱۳۸۷). نقش عوامل مورفومتری و اقلیمی حوضه در تولید جریان‌های سیلابی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌های آبخیز ناحیه‌ی غربی خزر)، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۸، صص. ۱۵۷-۱۴۹.
۲. امیدوار، ک. و کیان‌فر، آ. (۱۳۸۹). پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌ی آبریز کنجانچم، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۲، صص. ۹۰-۷۳.
۳. باعقیده، م. و همکاران. (۱۳۹۰). بررسی امکان استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI در تحلیل خشکسالی‌های استان اصفهان، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال اول، شماره ۴، صص. ۱۶-۱.
۴. پایگاه اینترنتی مرکز آمار ایران به نشانی <http://www.amar.org.ir/>.
۵. پورطاهری، م. (۱۳۸۹). کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در جغرافیا، چاپ اول، انتشارات سمت، تهران.
۶. داورزنی، ز. (۱۳۸۳). پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی با تأکید بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیک، مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز داورزن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران.
۷. رضوی، ا. (۱۳۸۷). اصول تعیین حریم منابع آب، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.

۸. زاهدی، م. و بیاتی خطیبی، م. (۱۳۸۷). هیدرولوژی، چاپ اول، انتشارات سمت، تهران.
۹. سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح. (۱۳۷۶). نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، برگه‌های آشان و مغانجق.
۱۰. سازمان زمین‌شناسی کشور. (۱۳۷۴). نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، برگه‌های اسکو و مراغه به‌همراه گزارش‌ها.
۱۱. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها. (۱۳۸۰). راهنمای مهار سیلاب رودخانه (روش‌های سازه‌ای)، نشریه‌ی شماره‌ی ۲۴۲.
۱۲. شعبانلو، س. و همکاران. (۱۳۸۷). پهنه‌بندی سیلاب در شبکه‌ی رودخانه‌های استان گلستان با استفاده از GIS، سال دوم، شماره‌ی سوم، صص. ۲۲-۱۱.
۱۳. عبدی، پ. (۱۳۸۵). بررسی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌ی زنجان‌رود با روش SCS و سیستم اطلاعات جغرافیایی، کمیته‌ی ملی آبیاری و زهکشی، کارگاه فنی همزیستی با سیلاب.
۱۴. علیزاده، ا. (۱۳۸۳). اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ هفدهم، مؤسسه‌ی چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
۱۵. عنایتی، م. (۱۳۸۲). مقایسه‌ی ژئومورفولوژیکی حوضه‌های فشنند و بهجت‌آباد از نظر سیل‌خیزی با استفاده از GIS، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد دانشگاه تهران.
۱۶. غریب، م. و همکاران. (۱۳۸۶). پهنه‌بندی خطر و ارزیابی خسارت سیل (مطالعه‌ی موردی: محدوده‌ی رودخانه‌ی قره‌چای در حومه شهر رامیان)، نشریه‌ی دانشکده‌ی منابع طبیعی، دوره‌ی ۶۰، شماره‌ی ۳، صص. ۷۸۵-۷۹۷.
۱۷. قنواتی، ع. (۱۳۸۲). مدل ژئومورفولوژیکی سیلاب در حوضه‌ی گاماسیاب، تحقیقات جغرافیایی، شماره‌ی ۱۸، صص. ۱۸۲-۱۷۴.
۱۸. کیانی، ا. و همکاران. (۱۳۸۹). کاربرد مدل ANP در ارائه‌ی الگوهای مناسب ICT جهت بهینه‌سازی رابطه‌ی شهر و روستا: شهرستان الشتر، مدرس علوم انسانی - برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره‌ی چهاردهم، شماره‌ی ۲، صص. ۲۶۷-۲۴۹.
۱۹. مؤمنی، م. و شریفی سلیم، ع. (۱۳۹۰). مدل‌ها و نرم‌افزارهای تصمیم‌گیری چندشاخصه، چاپ اول، نشر مؤلفین، تهران.
۲۰. نجفی، ا. (۱۳۸۹). به‌کارگیری فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در تحلیل چالش‌های ساختاری و محیط اجرایی سازمان در مدیریت پروژه‌ها، نشریه‌ی بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، جلد ۲۱، شماره‌ی ۱، صص. ۶۳-۷۶.
۲۱. نجمایی، م. (۱۳۶۹). هیدرولوژی مهندسی، ج دوم، چاپ دوم، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
۲۲. ولیزاده کامران، خ. (۱۳۸۶). کاربرد GIS در پهنه‌بندی خطر سیلاب (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی رود ليقوان)، مجله‌ی فضای جغرافیایی، سال هفتم، شماره‌ی ۲۰، صص. ۱۶۹-۱۵۳.
۲۳. وهابی، ج. (۱۳۸۵). پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی (مطالعه‌ی موردی: طالقان‌رود)، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره‌ی ۷۱، صص. ۴۰-۳۳.
۲۴. یعقوب زاده، م. و همکاران. (۱۳۸۸). محاسبه‌ی شماره‌ی منحنی رواناب حوضه‌ی آبریز با استفاده از شیوه‌های GIS و RS (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز منصورآباد بیرجند)، مجله‌ی پژوهش آب ایران، شماره‌ی ۵، صص. ۴۰-۳۱.

25. ENVI User's Guide, 2000, Research Systems.
26. Garde, R. J., 2006, **River Morphology**, Published by New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi.
27. Kusky, T., 2008, **Floods: Hazards of Surface and Groundwater Systems**, Facts On File publishing, New York.
28. Loczy, D. et al., 2009, **Local Flood Hazards Assessed from Channel Morphometry along the Tisza River in Hungary**, *Geomorphology*, No. 113, PP. 200-209.
29. Saaty, T. and Vargas, L., 2006, **Decision Making With the Analytic Network Process**, Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks, Springer, New York.
30. Wohl, E. E., 2000, **Inland Flood Hazards** (Human, Riparian, and Aquatic Communities). Cambridge University Press, Cambridge.
31. Yanina, M. E. A., 2008, **Morphometric Analysis of Colanguil River Basin and Flash Flood Hazard, San Juan, Argentina**, *Environ Geol*, Vol. 55, PP. 107-111.
32. Zhan, X. & Huang, M. L., 2004, **ArcCN- Runoff: an ArcGIS Tool for Generating Curve Number and Runoff Maps**, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 19, No. 10, PP. 875-879.