

## بررسی حساسیت سیل‌خیزی حوضه‌های آبریز با استفاده از شاخص‌های هیدروژئومورفیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز الندچای، شمال غرب ایران)

محمدحسین رضائی مقدم\* - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
سید اسداله حجازی - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
خلیل ولیزاده کامران - دانشیار گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
توحید رحیم پور - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۴      تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

### چکیده

تحقیق حاضر تلاش کرده است تا نقش شاخص‌های هیدروژئومورفیک را در حساسیت سیل‌خیزی حوضه آبریز الندچای مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. برای این هدف ابتدا منطقه مورد مطالعه بر اساس خصوصیات توپوگرافی و زهکشی و با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر به ۱۵ زیر حوضه تقسیم شد. سپس اطلاعات هر یک از زیر حوضه‌ها بر اساس ۲۲ پارامتر هیدروژئومورفیک از سه جنبه خصوصیات شبکه زهکشی، ویژگی‌های شکلی و خصوصیات برجستگی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. در مرحله بعد جهت وزن دهی پارامترها از روش تصمیم‌گیری MACBETH استفاده شده و وزن دهی پارامترها در محیط نرم‌افزار M-MACBETH انجام شد. نتایج وزن دهی نشان داد که در بین پارامترهای شبکه زهکشی چهار پارامتر بافت زهکشی، نسبت بافت، تراکم زهکشی و نسبت انشعاب به ترتیب با ضرایب ۱۶/۹۶، ۱۳/۸۴، ۱۳/۴۹ و ۱۲/۴۶ درصد و سه پارامتر مساحت، ضریب فشردگی و نسبت مدور بودن به ترتیب با ضرایب ۲۹/۶۳، ۲۷/۷۸ و ۲۰/۳۷ درصد در بین پارامترهای شکلی و دو پارامتر برجستگی و شیب با ضرایب ۴۳/۷۵ و ۳۱/۲۵ درصد در بین پارامترهای برجستگی بیشترین اهمیت را داشته‌اند. اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی نیز نشان داد که از ۱۵ زیر حوضه تعداد ۳ زیر حوضه (زیر حوضه‌های ۱، ۲ و ۳) در طبقه خیلی زیاد، ۴ زیر حوضه (زیر حوضه‌های ۴، ۹، ۱۱ و ۱۵) در طبقه زیاد، زیر حوضه‌های ۷، ۱۲ و ۱۴ در طبقه متوسط، سه زیر حوضه ۵، ۸ و ۱۰ در طبقه کم و زیر حوضه‌های ۶ و ۱۳ در طبقه خیلی کم قرار دارند.

واژگان کلیدی: سیل‌خیزی، هیدروژئومورفیک، GIS MACBETH، حوضه آبریز الندچای

## مقدمه

در میان انواع مختلفی از بلایای طبیعی نظیر زمین‌لغزش‌ها، سونامی، زمین‌لرزه، فوران آتشفشانی و غیره، سیل به‌عنوان یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین پدیده‌ها در نظر گرفته می‌شود که تقریباً در سراسر جهان اتفاق می‌افتد (دوسی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ داس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸؛ ترمه<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). خصوصیات ژئومورفومتریکی حوضه آبریز در واکنش سریع به وقوع بارش شدید بسیار مهم هستند (کروتین و بورگا<sup>۴</sup>، ۲۰۰۳). سطوح نفوذناپذیر و بایر زمان تأخیر ناشی از انباشت رواناب سطحی و زمان تمرکز سیل را کاهش می‌دهند و اغلب موجب تولید دبی بالایی می‌شوند که زندگی انسان‌ها و سایر ساختمان‌ها را در معرض خطر قرار می‌دهند (بورگا و همکاران، ۲۰۰۷؛ دی‌گیتانو<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹). کاربرد روش تحلیل مورفومتریکی در مناطقی که با کمبود اطلاعات روبه‌رو هستند بسیار مفید است (ملتون<sup>۶</sup>، ۱۹۵۸). خصوصیات مورفومتریکی حوضه آبریز می‌تواند برای توصیف رفتار هیدرولوژیکی آن استفاده شود (انجیلیری<sup>۷</sup>، ۲۰۱۲). در روش تحلیل مورفومتریکی، خصوصیات فیزیوگرافیکی و مورفولوژیکی حوضه آبریز بر اساس مدل رقومی ارتفاعی (DEM) بررسی می‌شود (گرومان<sup>۸</sup>، ۲۰۰۴). اولویت‌بندی حوضه‌ها یک طبقه‌بندی از زیر حوضه‌ها بر اساس شرایط منابع موجود و شدت فرسایش و سیل است که در نهایت منجر به حفاظت و مدیریت عملیات آبخیزداری در زیر حوضه‌های حساس می‌شود (سورش<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). حوضه آبریز الندیچای واقع در شهرستان خوی (استان آذربایجان غربی) به دلیل زهکشی زیر حوضه‌های متعدد، گستردگی مساحت و شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافیکی خاص از حساسیت سیل‌خیزی بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین تحقیق حاضر با هدف اولویت‌بندی زیر حوضه‌های حوضه آبریز الندیچای از نظر حساسیت سیل‌خیزی با استفاده از شاخص‌های هیدروژئومورفیک و روش تصمیم‌گیری MACBETH<sup>۱۰</sup> و با بهره‌گیری از توانایی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام گرفته است. تحقیقات مختلفی با استفاده از خصوصیات ژئومورفومتریکی حوضه آبریز جهت اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی در خارج از کشور انجام گرفته است. ولی در داخل کشور کمتر به مسائل هیدروژئومورفیک حوضه‌ها و در نتیجه اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها پرداخته شده است. در ادامه به بعضی از تازه‌ترین تحقیقات در این زمینه اشاره می‌شود. رضائی مقدم و همکاران (۱۳۹۶)، در تحقیقی به تحلیل ژئومورفولوژیکی مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل سلسله مراتبی رزگن پرداختند. در این تحقیق رودخانه قره‌سو به طول تقریبی ۷۵ کیلومتر از پایین‌دست سد سبلان تا تلاقی رودخانه اهر چای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که اکثر مقاطع رودخانه قره‌سو در طبقه C و E مدل سلسله مراتبی رزگن قرار دارد. در طبقه C رودخانه دارای مجرای پهن‌تر و کم‌عمق‌تر بوده و همچنین پهنه سیلابی در این طبقه توسعه یافته و دره‌های آن عریض است. در طبقه E نیز دارای مجرای عمیق و باریک بوده ولی پهنه سیلابی آن عریض و توسعه یافته است. روستائی و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی با استفاده از مدل SCS-CN به پهنه‌بندی سیلاب در حوضه آبخیز نکارود پرداختند. در این تحقیق از لایه‌های زمین‌شناسی، شیب، کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که وجود پوشش جنگلی و گیاهی بر سیل‌خیزی حوضه تأثیر فراوانی داشته است. به‌طوری‌که در نواحی با پوشش جنگلی و گیاهی متراکم میزان رواناب کم بوده و در نتیجه پتانسیل

1 - Doocy

2 - Das

3 - Termeh

4 - Creutin and Borga

5 - DeGaetano

6 - Melton

7 - Angillieri

8 - Grohmann

9 - Suresh

10 - Measuring Attractiveness through a Categorical Based Evaluation Technique

سیل‌خیزی کاهش یافته و جزو مناطق با سیل‌خیزی کم تا متوسط می‌باشد. حلبیان و عسگری (۱۳۹۶)، به پهنه‌بندی شدت سیل‌خیزی در حوضه آبریز میشخاص واقع در ایلام با استفاده از روش تحلیل عاملی - خوشه‌ای پرداختند. در این تحقیق ابتدا حوضه آبریز میشخاص به ۱۲ زیر حوضه تقسیم شده و سپس برای هر زیر حوضه ۲۸ پارامتر ژئومتری، اقلیمی، نفوذپذیری و فیزیوگرافی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شد. نتایج تحقیق نشان داد که عامل شکل با مقدار ویژه ۷/۶۴ مهم‌ترین عامل در سیل‌خیزی منطقه است. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که ۴ زیرحوضه در عامل شکل، ۳ زیرحوضه در عامل شیب، ۲ زیرحوضه در عامل زهکشی و ۳ زیرحوضه در عامل رواناب از شدت سیل‌خیزی زیادی برخوردار هستند. قضاوی و همکاران (۱۳۹۸)، زیر حوضه‌های شهری را با استفاده از تکنیک PCA به عنوان یک روش جدید وزن دهی از نظر خطر سیلاب اولویت‌بندی کردند. در این تحقیق شهر ارومیه با توجه به شیب منطقه و وضعیت کانال‌های انتقال آب و محل اتصالات آن‌ها به ۲۲ زیر حوضه تقسیم شد. پارامترهای ارتفاع رواناب، نفوذناپذیری، ارتفاع زیر حوضه، شماره منحنی، طول آبراهه اصلی، فرم زیر حوضه، محیط و مساحت آن مورد استفاده قرار گرفتند. وزن پارامترها یک بار به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و یک بار هم بر اساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) تعیین شدند. نتایج تحقیق نشان داد که در اولویت زیر حوضه‌ها بر اساس دو روش وزن دهی تفاوت‌هایی وجود دارد. به طوری که از بین هفت زیر حوضه بحرانی، فقط ۴ زیر حوضه به‌طور مشترک حضور دارند که از این ۴ زیر حوضه نیز تنها دو زیر حوضه دارای رتبه یکسانی هستند. نتایج نهایی تحقیق نشان داد که روش PCA به دلیل ملاحظه اثر ویژگی‌های مکانی معیارها و حذف خطای موجود در روش‌های مبتنی بر نظرسنجی، از دقت بیشتری در وزن دهی معیارها برخوردار است. پراساد و پانی<sup>۱</sup> (۲۰۱۷)، در تحقیقی به تحلیل ژئو-هیدرولوژیکی و اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز رودخانه یوهی واقع در کشور هند پرداختند. در این تحقیق از خصوصیات مختلف مورفومتریک حوضه آبریز که در وقوع سیلاب نقش دارند استفاده شد. این محققین جهت اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر خطر وقوع سیل از مدل تحلیل مجموع وزنی (WSA) استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که ۱۲/۸۳ و ۱۶/۹۴ درصد از مساحت کل منطقه به ترتیب در خطر خیلی زیاد و زیاد از نظر وقوع سیل قرار دارند. ایشان به‌منظور بررسی رفتار هیدرولوژیکی زیر حوضه‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها از روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای سیندر نیز استفاده کردند. نتایج این بررسی نیز نشان داد زیر حوضه‌هایی که از نظر خطر وقوع سیل در طبقه خیلی زیاد و زیاد قرار دارند، کمترین زمان تأخیر و بالاترین دبی حداکثری را در هر واحد از حوضه آبریز دارا می‌باشند. بیشت<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، به پهنه‌بندی حساسیت خطر سیل با استفاده از پارامترهای مورفومتریک در حوضه آبریز هیماکال پرادش<sup>۳</sup> واقع در هندوستان پرداختند. در این تحقیق از تصاویر لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر ASTER همراه با داده‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت تخمین حساسیت خطر سیل در ۲۰ زیر حوضه استفاده شد. خصوصیات شبکه زهکشی، شیب و شاخص رطوبت توپوگرافی با استفاده از مجموعه پارامترهای مرتبط با خطر سیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که ۵۵۵ کیلومتر مربع از کل منطقه در اولویت خیلی بالا و حساسیت خیلی بالا از نظر وقوع سیل قرار دارد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که بیش از ۹۰ درصد کل منطقه از آسیب‌پذیری بالایی در برابر سیل قرار دارد.

### منطقه مورد مطالعه

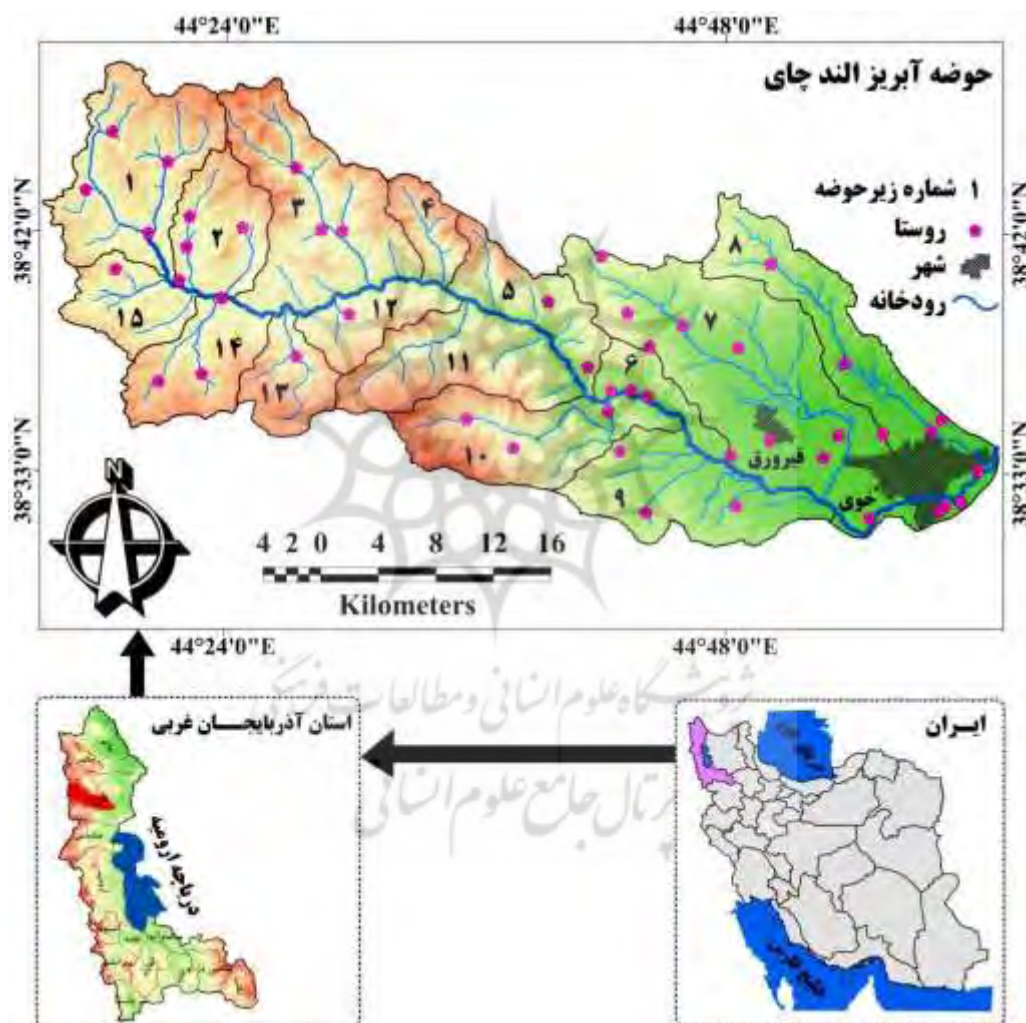
منطقه مورد مطالعه این تحقیق حوضه آبریز الوندچای است که در شمال غرب ایران و استان آذربایجان غربی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی بین مختصات  $38^{\circ} 30' 14''$  تا  $38^{\circ} 48' 22''$  عرض شمالی و  $13''$

1 - Prasad and Pani

2 - Bisht

3 - Himachal Pradesh

۱۵' ۴۴° تا ۲۰" ۰۱' ۰۲° طول شرقی قرار گرفته است. مساحت حوضه حدود ۱۱۴۷/۳۰ کیلومترمربع می‌باشد. تغییرات ارتفاعی حوضه از ۱۰۹۳ متر در بستر رودخانه الندچای در خروجی حوضه تا ۳۶۳۸ متر ارتفاع از سطح دریا در کوه اورین می‌باشد. رودخانه اصلی این حوضه، الندچای می‌باشد که یکی از رودخانه‌های مهم و پر آب شهرستان خوی می‌باشد. این حوضه یکی از زیر حوضه‌های حوضه آبریز رود ارس محسوب می‌شود که آب‌های سطحی آن پس از پیوستن به رودخانه بزرگ قطورچای به رود ارس می‌ریزد. حوضه آبریز الندچای از نظر آب و هوایی معمولاً دارای زمستان‌های سرد و برفی و تابستان‌های معتدل بوده که میانگین دمای سالانه آن بر اساس آمار بلند مدت ایستگاه سینوپتیک خوی (۲۰۱۰-۱۹۶۱)، ۱۲/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه نیز حدود ۲۹۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

### روش تحقیق

تحقیق حاضر از نوع تحقیقات تحلیلی و کاربردی می‌باشد که نتایج آن در مدیریت زیر حوضه‌هایی که از حساسیت بالایی نسبت به سیل‌خیزی برخوردارند حائز اهمیت می‌باشد. به منظور وزن دهی پارامترهای هیدروژئومورفیک مورد استفاده در تحقیق از روش وزن دهی MACBETH استفاده شده است که در ادامه به تشریح این مدل پرداخته شده است.

مدل MACBETH یک رویکرد تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره است که توسط بانا کاستا و همکاران در دهه ۱۹۹۰ ارائه شده است. مدل MACBETH مدلی تعاملی است که از قضاوت‌های طبقه‌بندی شده درباره روابط جبری بین پدیده‌ها استفاده می‌کند و مهم‌ترین امتیاز آن توانایی ایجاد مقیاس‌های عددی بر اساس مقایسه کیفی است که از تفاوت در جذابیت‌های گزینه‌ها به دست می‌آید (دتونی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶). این روش مبتنی بر مقایسات زوجی بوده و از مقیاس فاصله‌ای استفاده می‌کند. مراحل انجام این مدل به صورت زیر می‌باشد:

**گام اول:** تعیین معیارها و گزینه‌های ارزیابی و ایجاد درخت ارزش. مدل MACBETH مسئله را به صورت یک درخت یا یک سلسله مراتب ارائه می‌دهد.

**گام دوم:** قرار گرفتن گزینه‌ها و معیارها در ماتریس ارزیابی طبق اهمیت شان. در این مرحله ماتریس ارزیابی تشکیل شده و مقایسه زوجی معیارها و گزینه‌ها طبق مقیاس‌های معنایی و عددی جدول (۱) انجام می‌گیرد (کاراند و چاکرابورتی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۳).

جدول ۱: مقیاس معنایی مدل MACBETH و اهمیت‌شان

مقیاس معنایی	مقیاس عددی	میزان اهمیت
هیچ	۰	عدم تفاوت بین گزینه‌ها
بسیار ضعیف	۱	یک گزینه جذابیت خیلی ضعیفی نسبت به دیگری دارد.
ضعیف	۲	یک گزینه دارای جذابیت ضعیفی نسبت به دیگری است.
متوسط	۳	یک گزینه دارای جذابیت متوسطی نسبت به دیگری است.
قوی	۴	یک گزینه دارای جذابیت قوی نسبت به دیگری است.
بسیار قوی	۵	یک گزینه دارای جذابیت خیلی قوی نسبت به دیگری است.
بی‌نهایت	۶	یک گزینه نسبت به دیگری کاملاً جذاب‌تر است.

**گام سوم:** در این مرحله قضاوت‌های کارشناسی که از مقایسه زوجی حاصل شده است وارد مقیاس MACBETH شده و مدل برنامه‌ریزی خطی با استفاده از رابطه‌های زیر اجرا می‌شود. در این مدل  $V(X)$  امتیاز اختصاص داده شده به گزینه  $X$  می‌باشد.  $X^+$  نشان می‌دهد که حداقل به اندازه گزینه دیگر  $X$  جذاب است.  $X^-$  نیز نشان می‌دهد که به همان اندازه برای هر گزینه دیگری از  $X$  جذابیت دارد (بانا کاستا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۲؛ ایشی زاکا و سراج<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸).

$$\text{Min}[V(X^+) - V(X^-)] \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$V(X^-) = 0 \text{ (Arbitrary assignment)}$$

$$\forall (X, Y) \in C_0: V(X) - V(Y) = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\forall (X, Y) \in C_i \cup \dots \cup C_s \text{ with } i, s \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \text{ and } i \leq s: V(X) - V(Y) \geq i \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\forall (X, Y) \in C_i \cup \dots \cup C_s \text{ and } \forall (W, Z) \in C_{i'} \cup \dots \cup C_{s'} \text{ with } i, s, i', s' \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\text{With } i, s, i', s' \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$i \leq s, i' \leq s' \text{ and } i > s': V(X) - V(Y) \geq V(W) - V(Z) + i - s'$$

در صورتی که برنامه خطی اجرا نشود قضاوت‌ها ناسازگار خواهند بود. اگر اجرا شود نشان‌دهنده سازگاری قضاوت‌ها می‌باشد. در این موارد میانگین‌شان به عنوان مقیاس MACBETH در نظر گرفته می‌شود (بانا کاستا و همکاران، ۲۰۰۵).

<sup>1</sup> - Detoni

<sup>2</sup> - Karande and Chakraborty

<sup>3</sup> - Bana e Costa

<sup>4</sup> - Ishizakaa and Siraj

**گام چهارم:** تعیین امتیاز کلی گزینه‌ها با استفاده از روابط زیر:

$$V(A_i) = \sum_{j=1}^n W_j (V_j) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1, \quad W_j > 0 \quad \text{and} \quad \begin{cases} V_j(A_i^{\text{upper reference level}}) = 100 \\ V_j(A_i^{\text{lower reference level}}) = 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن  $W_j$  نشان‌دهنده وزن معیار  $j^{\text{th}}$  می‌باشد. در نهایت گزینه‌ها طبق مقادیر  $V(A_i)$  به ترتیب نزولی، رتبه‌بندی می‌شوند که در آن مرجع بالا ۱۰۰ و مرجع پایین صفر می‌باشد (بانا کاستا و همکاران، ۲۰۰۵؛ ایشی زاکا و چاکرابورتی، ۲۰۱۴).

### بحث و یافته‌ها

مورفومتری حوضه آبریز توصیف کاملی از ارتباط بین فرآیندهای مختلف بر روی سطح زمین و اجزای متنوع سیستم زمین از قبیل ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و زمین‌شناسی ارائه می‌دهد (ایفایی و انیولوراندا، ۲۰۱۲). در این تحقیق ۲۲ پارامتر هیدروژئومورفیک از سه جنبه خصوصیات شبکه زهکشی، هندسه حوضه و خصوصیات برجستگی حوضه آبریز به‌منظور بررسی نقش این پارامترها در حساسیت سیل‌خیزی حوضه آبریز آند چای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تحلیل پارامترهای هیدروژئومورفیک زیر حوضه‌ها در جداول ۲ تا ۴ ارائه شده است. در این تحقیق منطقه مورد مطالعه با استفاده از خصوصیات توپوگرافی و زهکشی به ۱۵ زیر حوضه تقسیم شده است.

### نقش پارامترهای شبکه زهکشی در حساسیت سیل‌خیزی

**رتبه آبراهه:** بزرگ‌ترین رتبه آبراهه با رتبه ۶ برای زیر حوضه‌های ۱، ۷ و ۸ نشان داده شده است. کم‌ترین رتبه آبراهه نیز برای زیر حوضه ۶ با رتبه ۲ به دست آمده است. زیر حوضه‌های با رتبه آبراهه بزرگ‌تر با دبی بیشتر و شدت و سرعت جریان بالاتری همراه هستند (کاستا، ۱۹۸۷). بنابراین زیر حوضه‌هایی که رتبه‌های بالاتری از آبراهه‌ها را نشان می‌دهند از حساسیت سیل‌خیزی بالایی برخوردار هستند.

**تعداد آبراهه:** تعداد آبراهه‌ها به‌طور مستقیم متناسب با اندازه حوضه آبریز و ابعاد کانال می‌باشد. تعداد آبراهه‌های بیشتر نشان‌دهنده کم‌تر بودن میزان تخلخل و نفوذپذیری حوضه است (کومار رای<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). در منطقه مورد مطالعه، زیر حوضه‌های ۳ و ۷ به ترتیب با ۳۱۶ و ۲۹۵ آبراهه بیشترین تعداد را داشته‌اند. در مقابل زیر حوضه ۶ با ۳۵ آبراهه کم‌ترین تعداد را نشان می‌دهد. زیر حوضه‌هایی که تعداد آبراهه بیشتری دارند نسبت به وقوع سیل پتانسیل بالایی را نشان می‌دهند.

**طول آبراهه:** طول آبراهه به‌عنوان فاصله از دهانه حوضه تا دورترین بخش از شبکه زهکشی تعریف می‌شود (هورتون<sup>۴</sup>، ۱۹۴۵). طول آبراهه مقداری از سیمای هیدرولوژیکی سنگ بستر و وسعت زهکشی است (کومار رای و همکاران، ۲۰۱۷). هر جا که تشکیلات سنگ بستر نفوذپذیر باشند، تعداد کمی از آبراهه‌های طویل شکل می‌گیرد، آبراهه‌های بیشتر با طول کمتر در مناطقی که کمتر نفوذپذیر هستند، توسعه می‌یابند (استوپاتی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). در منطقه مورد مطالعه، زیر حوضه ۶ با طول آبراهه ۳۵ کیلومتر کمترین مقدار و زیر حوضه ۷ با طول آبراهه ۳۲۱/۹ کیلومتر بیشترین مقدار را داشته است.

<sup>1</sup> - Ifabiyi and Eniolorunda

<sup>2</sup> - Costa

<sup>3</sup> - Kumar Rai

<sup>4</sup> - Horton

<sup>5</sup> - Sethupathi

**تناوب آبراهه:** تناوب آبراهه به لیتولوژی حوضه بستگی داشته و نشانه‌ای از بافت و شبکه زهکشی می‌باشد (هورتون، ۱۹۴۵). ردی و همکاران (۲۰۰۴)، به این نتیجه رسیده‌اند که مقادیر کم تناوب آبراهه نشان‌دهنده مواد زیرسطحی نفوذپذیر و برجستگی کم می‌باشد. مقادیر بالای تناوب آبراهه نشان‌دهنده رواناب بالا و تراکم زهکشی زیاد می‌باشد. زیر حوضه ۴ با مقدار ۲/۴۲۹ بالاترین تناوب آبراهه و زیر حوضه ۱۵ با مقدار ۱/۰۸۹ دارای کم‌ترین تناوب آبراهه می‌باشد.

**نسبت انشعاب:** نسبت انشعاب یک ویژگی مهم از حوضه زهکشی است که میزان دبی بعد از یک بارش سنگین ناگهانی را کنترل می‌کند (باگوات<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). نسبت انشعاب کم‌تر با خطر سیل‌گیری بالا مرتبط است. دلیل آن این است که احتمالاً آب به‌جای این که آزادانه پراکنده شود، در یک کانال جمع می‌شود (ابوزید<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). در منطقه مورد مطالعه مقادیر نسبت انشعاب بین ۲/۸۸ تا ۴/۸ متغیر بوده است که زیر حوضه‌های ۱ و ۱۱ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را داشته‌اند.

**طول جریان در روی زمین:** مقادیر کم طول جریان زمینی نشان‌دهنده رواناب سطحی سریع‌تر، توسعه بهتر شبکه زهکشی و شیب بالاتر می‌باشد (بیشت و همکاران، ۲۰۱۸). در منطقه مورد مطالعه کم‌ترین مقدار طول جریان زمینی مربوط به زیر حوضه ۱ با مقدار ۱/۰۴ و بیشترین مقدار نیز با ۱/۶ مربوط به زیر حوضه ۵ بوده است.

**تراکم زهکشی:** مقادیر بالاتر تراکم زهکشی نشان می‌دهد که نفوذپذیری منطقه کم بوده و در نتیجه پتانسیل تشکیل رواناب زیاد می‌باشد که حساسیت سیل‌خیزی بالا را نشان می‌دهد. در منطقه مورد مطالعه مقادیر تراکم زهکشی بین ۱/۲۵ تا ۱/۹۱ متغیر بوده است که زیر حوضه شماره ۵ کمترین تراکم زهکشی و زیر حوضه شماره ۱ بیشترین تراکم زهکشی را نشان می‌دهد.

**بافت زهکشی:** بافت زهکشی یکی از جنبه‌های مهم ژئومورفولوژی بوده و به معنای فاصله نسبی بین آبراهه‌ها می‌باشد (بیشت و همکاران، ۲۰۱۸). هر چه مقدار بافت زهکشی بیشتر باشد نشان‌دهنده ظرفیت نفوذپذیری کم و در نتیجه افزایش پتانسیل رواناب در حوضه آبریز می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه، زیر حوضه ۶ با ۱/۰۸ کمترین مقدار بافت زهکشی و زیر حوضه ۳ با ۴/۸۷ بیشترین مقدار بافت زهکشی را داشته‌اند.

**نسبت بافت:** کمترین مقدار نسبت بافت در منطقه مورد مطالعه مربوط به زیر حوضه ۶ با مقدار ۰/۸۶ و بیشترین مقدار نیز با ۳/۷۱ مربوط به زیر حوضه ۳ بوده است.

**شماره نفوذ:** شماره نفوذ نشان‌دهنده ظرفیت نفوذ و ویژگی رواناب حوضه آبریز است (استرالر، ۱۹۶۴). شماره نفوذ نقش مهمی در درک ویژگی نفوذپذیری حوضه آبریز ایفا می‌کند. هر چه شماره نفوذ بیشتر باشد، میزان نفوذپذیری کمتر بوده و در مقابل میزان رواناب بیشتر خواهد بود (کومار رای و همکاران، ۲۰۱۷). در منطقه مورد مطالعه کم‌ترین مقدار شماره نفوذ با ۱/۷۴ مربوط به زیر حوضه ۱۰ و بیشترین مقدار نیز با ۴/۵۱ مربوط به زیر حوضه‌های ۴ و ۳ می‌باشد. جهت محاسبه این شاخص از رابطه زیر استفاده می‌شود (فانیران<sup>۳</sup>، ۱۹۶۸):

$$If = Dd \times Fs \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن  $Dd$  تراکم زهکشی و  $Fs$  تناوب آبراهه می‌باشد. که جهت به دست آوردن مقدار  $FS$  از رابطه زیر استفاده می‌شود (هورتن، ۱۹۴۵):

$$Fs = Nu/A \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن  $Nu$  تعداد کل آبراهه‌های حوضه آبریز و  $A$  مساحت حوضه آبریز می‌باشد.

<sup>1</sup> - Bhagwat

<sup>2</sup> - Abuzied

<sup>3</sup> - Faniran

**ثابت نگه داشت کانال:** شوم در سال ۱۹۵۶، از تراکم زهکشی جهت تعریف ثابت نگه داشت کانال استفاده کرد. ثابت نگه داشت کانال نه تنها به نوع سنگ و نفوذپذیری، شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی و برجستگی بستگی دارد، بلکه همچنین وابسته به مدت زمان فرسایش و اقلیم تاریخی می‌باشد (چاندراشکار<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵). مقادیر کم ثابت نگه داشت کانال نشان‌دهنده وجود خاک‌های نا مقاوم، پوشش گیاهی پراکنده و زمین‌های کوهستانی است، در مقابل مقادیر بالای این فاکتور خاک‌های مقاوم، پوشش گیاهی خوب و زمین‌های نسبتاً جلگه‌ای را نشان می‌دهد (شولیتس<sup>۲</sup>، ۱۹۶۸). جهت محاسبه این شاخص از رابطه زیر استفاده می‌شود (شوم<sup>۳</sup>، ۱۹۵۶):

$$C = 1/Dd \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن  $Dd$  تراکم زهکشی می‌باشد. مقادیر این پارامتر برای زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه بین ۰/۵۲ تا ۰/۷۹ محاسبه شده است که کمترین مقدار مربوط به زیر حوضه‌های ۳ و ۱ و بیشترین مقدار نیز مربوط به زیر حوضه ۵ بوده است.

**ضریب رو:** این پارامتر نشان‌دهنده تراکم زهکشی و توسعه حوضه آبریز می‌باشد. این فاکتور امکان ارزیابی ظرفیت ذخیره شبکه زهکشی را فراهم می‌آورد (هورتون، ۱۹۴۵). هر چه مقدار ضریب رو بالاتر باشد میزان ذخیره‌سازی آب در دوره‌های سیلابی بیشتر بوده و اثرات فرسایش و سیل کمتر می‌شود و برعکس. مقدار ضریب رو در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۲۱ تا ۰/۳۴ متغیر بوده که زیر حوضه ۱۱ کم‌ترین مقدار رو و زیر حوضه ۱ بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای شبکه زهکشی محاسبه شده برای هر یک از زیر حوضه‌ها

$\rho$	C	If	RT	Dt	Dd	Lof	Rb	Fs	Lu	Nu	So	No
۰/۳۴	۰/۵۲	۴/۴۱	۲/۹۷	۴/۳۹	۱/۹۱	۱/۰۴	۲/۸۸	۲/۳۱۳	۲۰۷/۴	۲۵۱	۶	۱
۰/۲۷	۰/۵۳	۳/۸۶	۲/۵۸	۳/۴۶	۱/۸۶	۱/۰۷	۳/۷	۲/۰۸۰	۱۰۲/۲	۱۱۴	۴	۲
۰/۲۴	۰/۵۲	۴/۵۱	۳/۷۱	۴/۸۷	۱/۸۹	۱/۰۵	۴/۱	۲/۳۹۰	۲۳۳/۳	۲۹۵	۵	۳
۰/۲۷	۰/۵۳	۴/۵۱	۱/۶۸	۲/۶۱	۱/۸۶	۱/۰۷	۳/۷	۲/۴۲۹	۴۷/۵	۶۲	۴	۴
۰/۲۷	۰/۷۹	۱/۷۹	۱/۲۴	۱/۶۳	۱/۲۵	۱/۶	۳/۷	۱/۴۲۷	۶۲/۷	۷۲	۳	۵
۰/۲۵	۰/۷۵	۱/۷۵	۰/۸۶	۱/۰۸	۱/۳۲	۱/۵۱	۴	۱/۳۲۹	۳۵	۳۵	۲	۶
۰/۳۰	۰/۶۸	۲/۱۰	۲/۴۳	۳/۶۱	۱/۴۶	۱/۳۶	۳/۳	۱/۴۳۹	۳۲۱/۹	۳۱۶	۶	۷
۰/۳۳	۰/۵۹	۲/۸۸	۱/۸۵	۲/۵۳	۱/۶۸	۱/۱۹	۳/۰۴	۱/۷۱۶	۱۷۹/۵	۱۸۳	۶	۸
۰/۲۷	۰/۶۰	۲/۵۴	۱/۷۹	۲/۵۵	۱/۶۵	۱/۲۱	۳/۶	۱/۵۴۱	۱۴۴/۱	۱۳۴	۴	۹
۰/۲۳	۰/۶۸	۱/۷۴	۱/۵۲	۲	۱/۴۶	۱/۳۶	۴/۲	۱/۱۹۶	۱۲۸/۶	۱۰۵	۴	۱۰
۰/۲۱	۰/۶۶	۲/۴۷	۲/۰۶	۲/۹۱	۱/۵۰	۱/۳۳	۴/۸	۱/۶۵۲	۱۲۵/۰۸	۱۳۷	۴	۱۱
۰/۲۷	۰/۶۷	۲/۲۶	۱/۳۳	۱/۷۶	۱/۴۸	۱/۳۵	۳/۷	۱/۵۲۹	۵۵/۳	۵۷	۴	۱۲
۰/۳۲	۰/۶۷	۱/۸۷	۱/۱۲	۱/۶۴	۱/۴۸	۱/۳۵	۳/۱	۱/۲۶۹	۵۶/۲	۴۸	۴	۱۳
۰/۲۶	۰/۶۴	۱/۸۸	۱/۳۹	۱/۹۴	۱/۵۴	۱/۲۹	۳/۸	۱/۲۲۷	۸۹/۶	۷۱	۴	۱۴
۰/۲۶	۰/۵۸	۳/۵۷	۲/۰۲	۲/۹۱	۱/۷۱	۱/۱۶	۳/۹	۱/۰۸۹	۷۲/۲	۸۸	۴	۱۵

1 - Chandrashekar

2 - Shulits

3 - Schumm



No شماره زیر حوضه، So رتبه آبراهه، Nu تعداد آبراهه، Lu طول آبراهه، Fs تناوب آبراهه، Rb نسبت انشعاب، Lof طول جریان در روی زمین، Dd تراکم هکشی، Dt بافت زهکشی، Rt نسبت بافت، If شماره نفوذ، C ثابت نگه داشت کانال،  $\rho$  ضریب رو

### نقش پارامترهای شکلی حوضه آبریز در حساسیت سیل‌خیزی

**مساحت:** مساحت حوضه آبریز به‌عنوان یکی از جنبه‌های مهم در نظر گرفته می‌شود، زیرا مساحت بزرگ‌تر نشان‌دهنده تعداد آبراهه‌های بیشتر و در نتیجه رواناب بیشتری می‌باشد (بیشتر و همکاران، ۲۰۱۸) در منطقه مورد مطالعه، زیر حوضه ۴ با ۲۵/۵ کیلومتر مربع کمترین مساحت و زیر حوضه ۷ با ۲۱۹/۵ کیلومتر مربع بیشترین مساحت را داشته‌اند.

**ضریب فشردگی:** ضریب فشردگی عبارت است از نسبت محیط حوضه به محیط دایره فرضی که مساحت آن برابر مساحت حوضه می‌باشد. اگر مقدار ضریب فشردگی ۱ باشد نشان می‌دهد که حوضه دایره کامل است. مقدار بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهنده کشیدگی حوضه است. حوضه دایره‌ای از نظر زهکشی حساس‌تر است، زیرا کمترین زمان تمرکز را قبل از اینکه اوج جریان در حوضه اتفاق بیافتد، به دست خواهد آورد (نوکاراتنام<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). در منطقه مورد مطالعه، کمترین مقدار ضریب فشردگی با ۱/۲۴ مربوط به زیر حوضه ۲ و بیشترین مقدار نیز با ۱/۹۶ مربوط به زیر حوضه ۸ می‌باشد.

**نسبت مدور بودن:** هر چه مقادیر این پارامتر به یک نزدیک‌تر باشد حساسیت سیل‌خیزی حوضه بیشتر خواهد بود. مقادیر این پارامتر برای زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه از ۰/۲۵ تا ۰/۶۳ متغیر بوده است که زیر حوضه ۸ کمترین مقدار و زیر حوضه ۲ نیز بیشترین مقدار را داشته‌اند.

**نسبت کشیدگی:** طبق طبقه‌بندی استرالر (۱۹۶۴)، نسبت کشیدگی حوضه به ۵ طبقه تقسیم می‌شود: مقادیر بیشتر از ۰/۹ برای شکل دایره‌ای، بین ۰/۸-۰/۹ شکل بیضی، ۰/۷-۰/۸ برای کشیدگی کمتر، ۰/۷-۰/۵ برای حوضه کشیده و کمتر از ۰/۵ برای حوضه خیلی کشیده. مقادیر این پارامتر برای زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه بین ۰/۴۱ تا ۰/۹۹ متغیر بوده که زیر حوضه ۸ کمترین مقدار و زیر حوضه ۱۲ بیشترین مقدار را داشته‌اند.

**ضریب شکل:** این پارامتر شکل‌گیری سیل، درجه فرسایش و ظرفیت حمل بار رسوبی حوضه را نشان می‌دهد. مقادیر این فاکتور از صفر برای حوضه کشیده تا ۱ برای حوضه دایره‌ای کامل متغیر است. حوضه دایره‌ای از حساسیت بالایی نسبت به وقوع سیل برخوردار می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه، زیر حوضه ۸ با مقدار ۰/۱۳ و زیر حوضه ۱۲ با مقدار ۰/۷۸ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار ضریب شکل را داشته‌اند.

**شاخص شکل:** شاخص شکل حوضه نیز بیانگر این مطلب هست که هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، دبی اوج سیلاب کمتر خواهد بود و برعکس (پرساد و پانی، ۲۰۱۷). مقادیر این پارامتر نیز در منطقه مورد مطالعه بین ۱/۲۷ تا ۷/۴۰ متغیر بود است. کمترین مقدار این پارامتر مربوط به زیر حوضه ۱۲ و بیشترین مقدار نیز مربوط به زیر حوضه ۸ می‌باشد.

جدول ۳: مقادیر محاسبه شده پارامترهای شکلی زیر حوضه‌های ۱۵ گانه الندیچای

Sw	Ff	Er	Rc	Cc	A	No
۳/۲۵	۰/۳۰	۰/۶۲	۰/۴۱	۱/۵۳	۱۰۸/۴۹۷۹	۱
۲/۲۸	۰/۴۳	۰/۷۴	۰/۶۳	۱/۲۴	۵۴/۷۹۹۳	۲
۲/۵۶	۰/۳۸	۰/۷۰	۰/۴۲	۱/۵۲	۱۲۳/۳۸۰۳	۳
۲/۹۶	۰/۳۳	۰/۶۵	۰/۵۶	۱/۳۱	۲۵/۵۱۷۱	۴
۱/۳۴	۰/۷۴	۰/۹۷	۰/۳۲	۱/۷۴	۵۰/۰۷۹۹	۵
۲/۳	۰/۴۳	۰/۷۴	۰/۳۱	۱/۷۶	۲۶/۳۲۸۲	۶
۴/۶۰	۰/۲۱	۰/۵۲	۰/۳۶	۱/۶۵	۲۱۹/۵	۷
۷/۴۰	۰/۱۳	۰/۴۱	۰/۲۵	۱/۹۶	۱۰۶/۵۸۹۱	۸
۱/۳۹	۰/۷۱	۰/۹۵	۰/۳۹	۱/۵۷	۸۶/۹۵۳۰	۹
۴/۴۶	۰/۲۲	۰/۵۳	۰/۴۰	۱/۵۶	۸۷/۷۴۰۲	۱۰
۲	۰/۴۹	۰/۷۹	۰/۴۷	۱/۴۴	۸۲/۹۱۵۸	۱۱
۱/۲۷	۰/۷۸	۰/۹۹	۰/۴۵	۱/۴۷	۳۷/۲۶۱۴	۱۲
۳/۵۵	۰/۲۸	۰/۵۹	۰/۵۵	۱/۳۳	۳۷/۸۲۵۱	۱۳
۱/۴۶	۰/۶۸	۰/۹۳	۰/۵۴	۱/۳۴	۵۷/۸۳۳۵	۱۴
۱/۵۷	۰/۶۵	۰/۹۱	۰/۵۸	۱/۳۰	۴۲/۱۱۷۲	۱۵

No شماره زیر حوضه، A مساحت به کیلومتر مربع، Cc ضریب فشردگی، Rc نسبت

مدور بودن، Er نسبت کشیدگی، Ff ضریب شکل، Sw شاخص شکل

#### نقش پارامترهای برجستگی حوضه آبریز در حساسیت سیل خیزی

**برجستگی:** این پارامتر شیب آبراهه را کنترل می‌کند، در نتیجه بر مقدار حمل رسوب و الگوهای سیل تأثیر می‌گذارد (هدلی و شوم<sup>۱</sup>، ۱۹۶۱). بنابراین هر اندازه برجستگی حوضه بیشتر باشد شیب بیشتر بوده و حساسیت سیل خیزی افزایش می‌یابد. در منطقه مورد مطالعه کمترین میزان برجستگی با مقدار ۵۵۰ متر مربوط به زیر حوضه ۱۵ و بیشترین مقدار نیز با ۲۱۹۱ متر مربوط به زیر حوضه ۱۰ می‌باشد.

**نسبت برجستگی:** حوضه‌هایی با نسبت برجستگی بالاتر، زمان تأخیر کمتر، پیک بالا و سرعت جریان بیشتری را تجربه می‌کنند. از این رو از حساسیت بالایی برای سیل برخوردار هستند (ابوزید و همکاران، ۲۰۱۶). مقادیر این پارامتر برای زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه بین ۰/۰۳۸ تا ۰/۲۰۶ متغیر بوده که زیر حوضه ۷ کمترین و زیر حوضه ۵ بیشترین مقدار را دارند.

<sup>1</sup> - Hadely and Schumm

**عدد سختی یا زبری:** این پارامتر برای اندازه‌گیری پتانسیل سیل آبراهه‌ها استفاده می‌شود (پاتون و بیکر<sup>۱</sup>، ۱۹۷۶). کمترین مقدار این پارامتر برای زیر حوضه ۱۵ و بیشترین مقدار نیز برای زیر حوضه ۱۰ محاسبه شده است.

**شیب:** شیب حوضه یک فاکتور مورفومتریک از رابطه هیدرولوژیکی است که نشان‌دهنده شتاب جریان رواناب و زمان تمرکز آن می‌باشد (مزا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶). شیب‌های تند از رواناب سطحی بالاتر و میزان نفوذپذیری کمی برخوردار هستند (ورستاپین<sup>۳</sup>، ۱۹۸۳).

جدول ۴: مقادیر محاسبه شده پارامترهای برجستگی زیر حوضه‌های ۱۵ گانه الندچای

G	Rn	Rr	Bh	No	G	Rn	Rr	Bh	No
۷	۲/۱۲	۰/۱۱۷	۱۲۸۸	۹	۳/۰۹	۱/۸۵	۰/۰۵۱	۹۷۱	۱
۶/۶	۳/۱۹	۰/۱۱۰	۲۱۹۱	۱۰	۵/۳	۱/۸۵	۰/۰۸۹	۹۹۷	۲
۸/۳	۲/۶۸	۰/۱۳۸	۱۷۹۱	۱۱	۴/۵	۲/۵۴	۰/۰۷۵	۱۳۴۶	۳
۱۱/۰۴	۱/۸۸	۰/۱۸۴	۱۲۷۲	۱۲	۹/۷	۲/۶۲	۰/۱۶۲	۱۴۱۰	۴
۵/۶	۱/۶۰	۰/۰۹۳	۱۰۸۵	۱۳	۱۲/۳	۲/۱۱	۰/۲۰۶	۱۶۹۲	۵
۶/۳	۱/۴۹	۰/۱۰۵	۹۶۸	۱۴	۷/۲	۱/۲۴	۰/۱۲۱	۹۴۵	۶
۴/۱	۰/۹۴	۰/۰۶۸	۵۵۰	۱۵	۲/۳	۱/۷۶	۰/۰۳۸	۱۲۰۹	۷
					۲/۴	۱/۹۴	۰/۰۴۱	۱۱۵۷	۸

No شماره زیر حوضه، Bh برجستگی، Rr نسبت برجستگی، Rn عدد سختی یا زبری، G نسبت شیب

پس از تکمیل اطلاعات هیدروژئومورفیک هر یک از زیر حوضه‌ها و بررسی نقش این پارامترها در حساسیت سیل‌خیزی حوضه آبریز، تمامی ۲۲ پارامتر هیدروژئومورفیک جهت وزن دهی وارد نرم‌افزار M-MACBETH شدند. اولین مرحله در نرم‌افزار ایجاد درخت ارزش می‌باشد که این درخت ارزش بر اساس پارامترهای مورد استفاده در تحقیق در نرم‌افزار ایجاد شده است (شکل ۲).

با ایجاد درخت ارزش و مشخص کردن معیارها و زیرمعیارها، جهت انجام مقایسه زوجی طبق جدول ۱ عمل شده و جدول مقایسه زوجی بر اساس اهمیت هر یک از پارامترها تکمیل شد. شکل‌های ۳ تا ۶ ماتریس ارزیابی معیارهای اصلی و زیر معیارها را که در نرم‌افزار M-MACBETH تهیه شده نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> - Patton and Baker

<sup>2</sup> - Mesa

<sup>3</sup> - Verstappen



شکل ۲: ساخت درخت ارزش در نرم‌افزار M-MACBETH

	[ شبکه زهکشی ]	[ پارامترهای تنگی حوضه ]	[ پارامترهای برجستگی ]	[ all lower ]	Current scale	extreme
[ شبکه زهکشی ]	no	weak	moderate	positive	100.00	v. strong
[ پارامترهای تنگی حوضه ]		no	very weak	positive	50.00	strong
[ پارامترهای برجستگی ]			no	positive	25.01	moderate
[ all lower ]				no	0.00	weak
Consistent judgements						very weak
						no

شکل ۳: ماتریس ارزیابی معیارهای اصلی

	[ برجستگی ]	[ شیب ]	[ عدد سفتی یا زبری ]	[ نسبت برجستگی ]	[ all lower ]	Current scale	extreme
[ برجستگی ]	no	weak	moderate	strong	positive	100.00	v. strong
[ شیب ]		no	weak	moderate	positive	71.43	strong
[ عدد سفتی یا زبری ]			no	weak	positive	42.86	moderate
[ نسبت برجستگی ]				no	positive	14.29	weak
[ all lower ]					no	0.00	very weak
Consistent judgements						no	

شکل ۴: ماتریس ارزیابی پارامترهای برجستگی حوضه آبریز

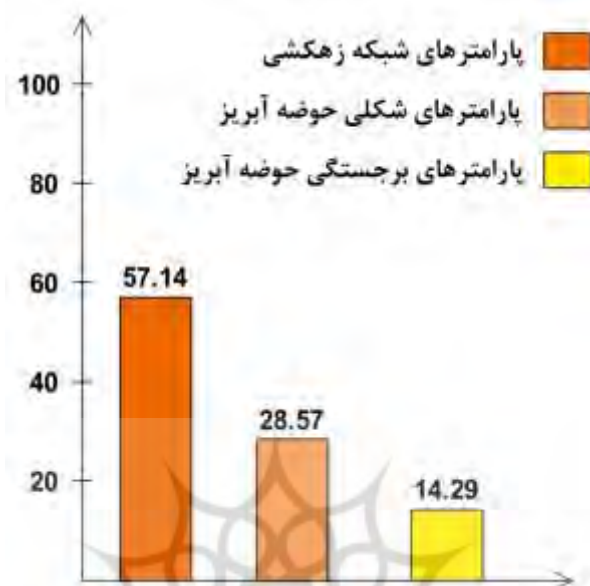
	[ مساحت ]	[ درصد شیب ]	[ نسبت مورب ]	[ نسبت کشتی ]	[ درصد شیب ]	[ شیب طولی ]	[ all lower ]	Current scale	extreme
[ مساحت ]	no	very weak	weak	weak	moderate	strong	positive	100.00	v. strong
[ درصد شیب ]		no	weak	weak	moderate	moderate	positive	93.76	strong
[ نسبت مورب ]			no	weak	weak	moderate	positive	68.75	moderate
[ نسبت کشتی ]				no	very weak	weak	positive	43.74	weak
[ شیب طولی ]					no	very weak	positive	25.01	very weak
[ شیب مورب ]						no	positive	6.24	no
[ all lower ]							no	0.00	
Consistent judgements									

شکل ۵: ماتریس ارزیابی پارامترهای شکلی حوضه آبریز

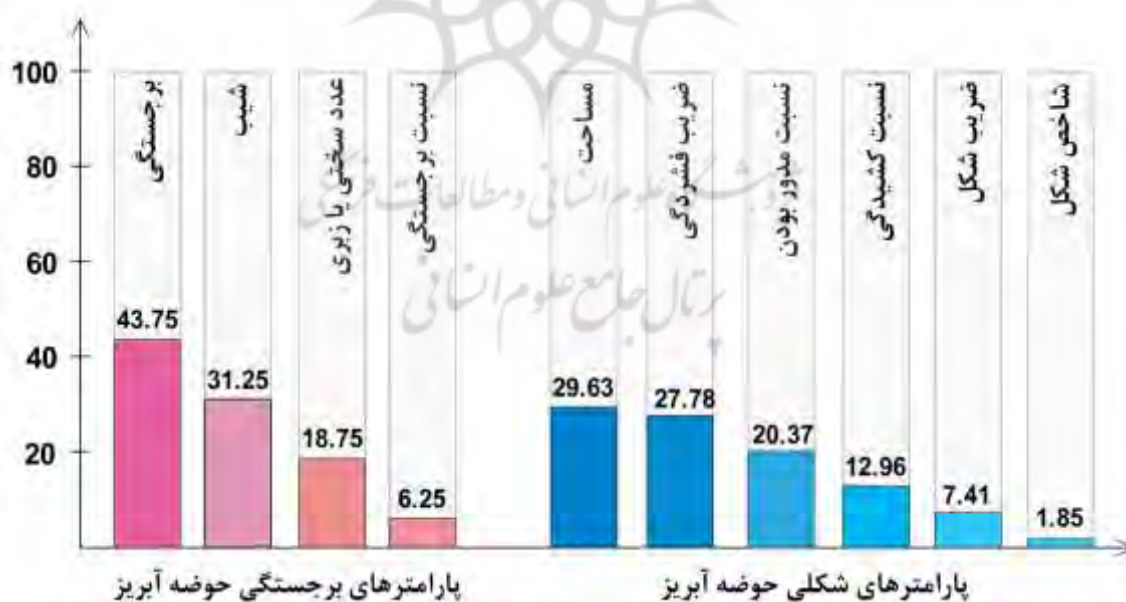
	[ خط آبراه ]	[ طول آبراه ]	[ طول حوضه زهکشی ]	[ شیب طولی ]	[ شیب مورب ]	[ خط زهکشی ]	[ حوضه زهکشی ]	[ all lower ]	Current scale	extreme
[ خط آبراه ]	moderate	strong	v. strong	extreme	extreme	extreme	extreme	positive	100.00	v. strong
[ طول آبراه ]	weak	weak	moderate	moderate	strong	v. strong	v. strong	positive	81.25	strong
[ طول حوضه زهکشی ]	weak	weak	weak	moderate	moderate	v. strong	v. strong	positive	79.59	moderate
[ شیب طولی ]	weak	weak	weak	weak	moderate	v. strong	v. strong	positive	73.45	weak
[ شیب مورب ]	very weak	weak	weak	weak	moderate	strong	strong	positive	71.43	very weak
[ خط زهکشی ]	very weak	very weak	very weak	weak	weak/mod	weak	weak	positive	46.97	no
[ حوضه زهکشی ]	no	very weak	very weak	very weak	very weak	weak	weak	positive	42.86	
[ خط حوضه زهکشی ]			no	very weak	very weak	very weak	weak	positive	32.68	
[ شیب طولی ]				no	very weak	very weak	very weak	positive	24.48	
[ شیب مورب ]					no	very weak	very weak	positive	18.41	
[ خط زهکشی ]						no	very weak	positive	14.34	
[ حوضه زهکشی ]							no	positive	2.06	
[ all lower ]								no	0.00	
Consistent judgements										

شکل ۶: ماتریس ارزیابی پارامترهای شبکه زهکشی حوضه آبریز

پس از ایجاد ماتریس‌های ارزیابی و انجام مقایسه‌های زوجی، وزن پارامترها با روش MACBETH محاسبه شد. شکل‌های ۷ تا ۹ وزن نهایی پارامترهای محاسبه شده را نشان می‌دهد.

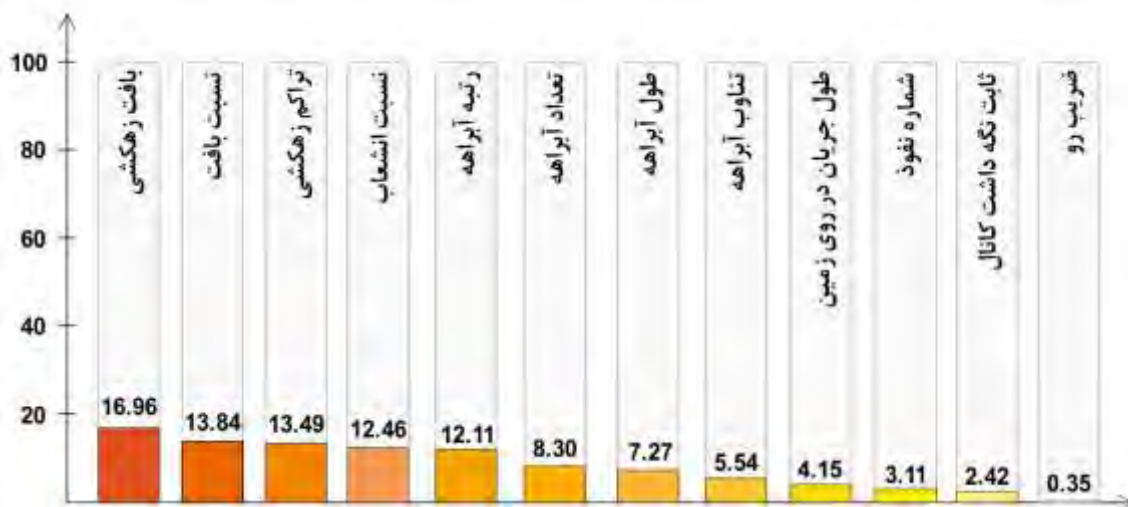


شکل ۷: وزن نهایی معیارهای اصلی



شکل ۸: وزن نهایی پارامترهای شکلی و برجستگی حوضه آبریز





شکل ۹: وزن نهایی پارامترهای شبکه زهکشی

نتایج وزن دهی سه معیار اصلی نشان داد که معیار خصوصیات شبکه زهکشی با ضریب ۵۷/۱۴ درصد بیشترین اهمیت را داشته است. وزن دهی زیرمعیارهای خصوصیات شبکه زهکشی حوضه آبریز نیز نشان می‌دهد که در بین ۱۲ پارامتر مورد بررسی، پارامترهای بافت زهکشی (۱۶/۹۶ درصد)، نسبت بافت (۱۳/۸۴ درصد)، تراکم زهکشی (۱۳/۴۹ درصد) و نسبت اشعاب (۱۲/۴۶ درصد) به ترتیب بیشترین اهمیت را داشته‌اند. در مقابل سه پارامتر ضریب رو، ثابت نگه داشت کانال و شماره نفوذ با ضرایب ۰/۳۵، ۲/۴۲ و ۳/۱۱ درصد کمترین اهمیت را داشته‌اند. در بین پارامترهای برجستگی حوضه آبریز نیز دو پارامتر برجستگی و شیب با ضرایب ۴۳/۷۵ و ۳۱/۲۵ درصد به ترتیب دارای بیشترین اهمیت بوده‌اند. پارامتر نسبت برجستگی نیز با ضریب ۶/۲۵ درصد کمترین وزن را در بین پارامترهای این گروه داشته است. وزن دهی پارامترهای شکلی نیز نشان داد که سه پارامتر مساحت، ضریب فشردگی و نسبت مدور بودن به ترتیب با ضرایب ۲۹/۶۳، ۲۷/۷۸ و ۲۰/۳۷ درصد بیشترین اهمیت را در میان سایر پارامترها داشته‌اند. دو پارامتر شاخص شکل و ضریب شکل نیز با ضرایب ۱/۸۵ و ۷/۱۴ درصد کم‌اهمیت‌ترین بوده‌اند. پس از تعیین وزن نهایی پارامترها، جهت اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها و تهیه نقشه حساسیت سیل‌خیزی، اطلاعات تکمیلی هر یک از زیر حوضه‌ها نسبت به وزن نهایی پارامترها رتبه‌بندی شدند (جدول ۵). رتبه‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی بر اساس وزن‌های نهایی به دست آمده از روش MACBETH نشان داد که زیر حوضه‌های ۱، ۲ و ۳ بیشترین رتبه را داشته و از حساسیت بالایی نسبت به سیل‌خیزی برخوردار هستند. این زیر حوضه‌ها ۲۸۶/۶۷ کیلومترمربع (۲۴/۹۸ درصد) از مساحت حوضه را شامل می‌شوند. زیر حوضه‌های ۴، ۹، ۱۱ و ۱۵ نیز در طبقه زیاد از نظر حساسیت سیل‌خیزی قرار دارند. در مقابل دو زیر حوضه ۶ و ۱۳ کمترین رتبه را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده حساسیت کم این زیر حوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی می‌باشد. شکل ۱۰ نقشه اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها را از نظر حساسیت سیل‌خیزی نشان می‌دهد.

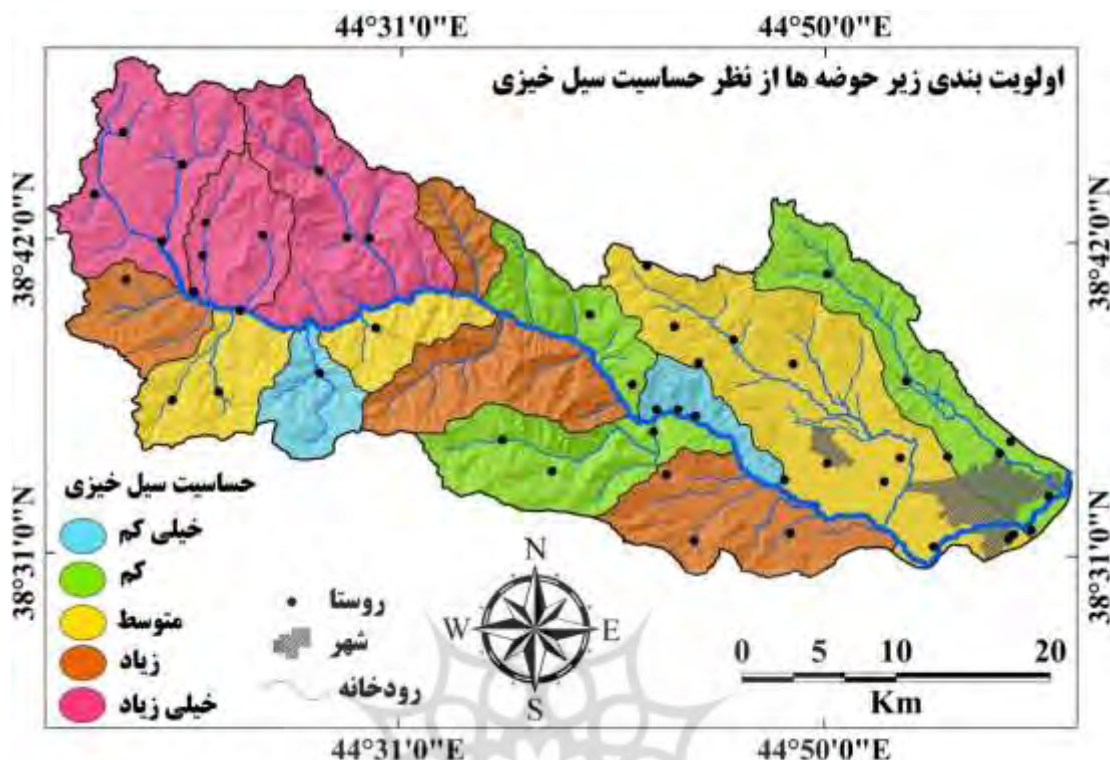
جدول ۵: رتبه‌بندی پارامترهای هیدروژئومورفیک برای زیر حوضه‌ها

رتبه‌بندی	زیر حوضه														
	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
So	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۵	۵	۱	۲	۳	۴	۳	۵
Nu	۲	۲	۱	۲	۳	۳	۳	۳	۵	۱	۲	۲	۴	۳	۴
Lu	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۵	۱	۲	۱	۴	۳	۴
Fs	۱	۲	۲	۳	۳	۱	۳	۳	۲	۲	۲	۵	۵	۴	۵
Rb	۳	۳	۴	۳	۱	۲	۳	۴	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۵
Lof	۴	۴	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۳	۲	۱	۵	۵	۵	۵
Dd	۴	۳	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۱	۱	۵	۵	۵	۵
Dt	۴	۲	۲	۲	۴	۲	۳	۳	۵	۱	۲	۳	۵	۴	۵
Rt	۵	۲	۱	۲	۴	۳	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۵	۵	۵
If	۴	۲	۲	۲	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۱	۵	۵	۴	۵
C	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۳	۲	۱	۵	۵	۵	۵
$\rho$	۴	۴	۲	۳	۵	۵	۳	۱	۳	۴	۳	۳	۴	۳	۱
A	۱	۲	۱	۱	۳	۳	۳	۴	۵	۱	۲	۱	۴	۲	۴
Cc	۵	۴	۴	۴	۴	۳	۳	۱	۳	۲	۲	۴	۳	۵	۳
Rc	۵	۴	۴	۳	۳	۲	۲	۱	۲	۱	۲	۵	۳	۵	۳
Er	۵	۵	۲	۵	۴	۲	۵	۱	۲	۳	۵	۲	۳	۳	۲
Ff	۴	۴	۲	۵	۳	۱	۵	۱	۱	۳	۵	۲	۲	۳	۲
Sw	۴	۵	۲	۵	۴	۲	۵	۱	۱	۳	۵	۳	۳	۳	۲
Bh	۱	۲	۲	۳	۵	۵	۳	۳	۳	۱	۴	۴	۴	۲	۲
Rr	۲	۳	۲	۵	۴	۳	۳	۱	۱	۳	۵	۴	۲	۲	۲
Rn	۵	۴	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۳	۵	۲	۲	۲	۳	۳
G	۲	۳	۲	۵	۴	۳	۳	۱	۱	۳	۵	۴	۲	۲	۱
جمع	۷۴	۶۸	۵۲	۶۹	۷۲	۵۶	۷۲	۵۷	۶۵	۴۵	۵۹	۷۴	۸۱	۷۷	۷۸



So رتبه آبراهه، Nu تعداد آبراهه، Lu طول آبراهه، Fs تناوب آبراهه، Rb نسبت انشعاب، Lof طول جریان در روی زمین، Dd تراکم هکشی، Dt بافت زهکشی، Rt نسبت بافت، If شماره نفوذ، C ثابت نگه داشت کانال،  $\rho$  ضریب رو، A مساحت به کیلومتر مربع، Cc ضریب فشردگی، Rc نسبت مدور بودن، Er نسبت کشیدگی، Ff ضریب شکل، Sw شاخص شکل، Bh برجستگی، Rr نسبت برجستگی، Rn عدد سختی یا زبری، G نسبت شیب





شکل ۱۰: نقشه اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل خیزی به روش MACBETH

### نتیجه‌گیری

سیلاب‌ها معمولاً به طور ناگهانی شروع می‌شوند و در مدت زمان اندکی خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر جای می‌گذارند. در این تحقیق تلاش شد تا نقش شاخص‌های هیدروژئومورفیک در حساسیت سیل خیزی زیر حوضه‌های حوضه آبریز الوندچای مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین ابتدا حوضه مورد مطالعه بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی و زهکشی به ۱۵ زیر حوضه تقسیم شد. سپس شاخص‌های هیدروژئومورفیک هر یک از زیر حوضه‌ها از سه جنبه پارامترهای شبکه زهکشی، پارامترهای شکلی حوضه آبریز و پارامترهای برجستگی مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله بعد جهت وزن دهی معیارهای اصلی و زیر معیارها از روش تصمیم‌گیری MACBETH استفاده شد. نتایج وزن دهی سه معیار اصلی نشان داد که معیار خصوصیات شبکه زهکشی با ضریب  $۵۷/۱۴$  درصد بیشترین اهمیت را نسبت به دو معیار دیگر داشته است. همچنین نتایج وزن دهی زیرمعیارهای هر یک از معیارهای اصلی نیز نشان داد که در بین زیرمعیارهای شبکه زهکشی چهار پارامتر بافت زهکشی ( $۱۶/۹۶$  درصد)، نسبت بافت ( $۱۳/۸۴$  درصد)، تراکم زهکشی ( $۱۳/۴۹$  درصد) و نسبت انشعاب ( $۱۲/۴۶$  درصد) به ترتیب بیشترین اهمیت را در بین ۱۲ پارامتر مورد بررسی در این معیار داشته‌اند. پارامترهای مساحت، ضریب فشردگی و نسبت مدور بودن به ترتیب با ضرایب  $۲۹/۶۳$ ،  $۲۷/۷۸$  و  $۲۰/۳۷$  درصد بیشترین اهمیت از نظر خصوصیات شکلی حوضه آبریز و دو پارامتر برجستگی و شیب با ضرایب  $۴۳/۷۵$  و  $۳۱/۲۵$  درصد نیز بیشترین اهمیت را در بین پارامترهای برجستگی حوضه آبریز داشته‌اند. پس از وزن دهی پارامترهای مورد استفاده در تحقیق به اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل خیزی پرداخته شد. نتایج اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها بر اساس پارامترهای هیدروژئومورفیک نشان داد که از بین ۱۵ زیر حوضه ۷ زیر حوضه (زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۹، ۱۱ و ۱۵) در طبقات زیاد و خیلی زیاد از نظر حساسیت سیل خیزی قرار دارند. این زیر حوضه‌ها مساحتی حدود  $۵۲۴/۱۸۰۶$  کیلومترمربع ( $۴۵/۶۸$  درصد مساحت) از کل منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شوند. بنابراین با توجه به نتایج تحقیق که نشان‌دهنده سیل خیز بودن منطقه مورد مطالعه می‌باشد، ضروری است که

اقدامات حفاظتی از قبیل طرح‌های آبخیزداری و احداث سیل بند در زیر حوضه‌هایی که از حساسیت بالایی برخوردارند به‌منظور جلوگیری از وقوع سیل یا کاهش خسارت‌های احتمالی در صورت وقوع سیل صورت بگیرد.

### منابع

- حلبیان، امیرحسین؛ عسگری، شمس‌الله، ۱۳۹۶، پهنه‌بندی شدت سیل‌خیزی در حوضه‌ی آبریز میشخاص به کمک تحلیل عاملی - خوشه‌ای، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۲: صص ۱۷۷-۱۵۳.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ نیکجو، محمدرضا؛ یاسی، مهدی؛ رحیمی، مسعود، ۱۳۹۶، تحلیل ژئومورفولوژیکی مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل سلسله مراتبی رزگن (پایین دست سد سیلان تا تلاقی رودخانه اهر چای)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره ۲، صص ۱۴-۱.
- روستائی، شهرام؛ موسوی، رمضان؛ علیزاده گرجی، غلامرضا، ۱۳۹۶، تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب حوضه آبخیز نکارود با استفاده از مدل SCS-CN و GIS/RS، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره ۱، صص ۱۱۸-۱۰۸.
- قضاوی، رضا؛ بابایی حصار، سحر؛ عرفانیان، مهدی، ۱۳۹۸، اولویت‌بندی زیرحوضه‌های شهری مستعد سیلاب با استفاده از تکنیک PCA به عنوان یک روش جدید وزن دهی، مجله مخاطرات محیط طبیعی، شماره ۲۰، صص ۱۰۰-۸۳.
- Abuzied, S., Yuan, M., Ibrahim, S., Kaiser, M., Saleem, T., 2016. Geospatial risk assessment of flash floods in Nuweiba area, Egypt, *Journal of Arid Environments*, 133: 54-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.06.004>.
- Angillieri, M. Y. E., 2012. Morphometric characterization of the Carrizal Basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina, *Quaternary International*, 253: 74-79.
- Bana e Costa, C. A., De Corte, J. M., Vansnick, J. C., 2005. On the Mathematical Foundations of MACBETH. *Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, New York: Springer, pp 409-437.
- Bana e Costa, C. A., De Corte, J. M., Vansnick, J. C., 2012. MACBETH. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 11(2): 359-387. <https://doi.org/10.1142/S0219622012400068>.
- Bhagwat, T.N., Shetty, A., Hegde, V.S., 2011. Spatial variation in drainage characteristics and geomorphic instantaneous unit hydrograph (GIUH); implications for watershed management—A case study of the Varada River basin, Northern Karnataka, *Catena*, 87: 52-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.007>.
- Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., Soni, S., 2018. Assessment of flash flood vulnerability zonation through Geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India, *Remote Sensing Applications: Society and Environmen*, 12: 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.09.001>.
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., Sangati, M., 2007. Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 lflash lfood in the eastern Italian Alps, *J Hydrometeoro* 8(5): 1049-1067.
- Chandrashekara, H., Lokesh, K.V., Sameena, M., Roopa, J., Ranganna, G., 2015. GIS-Based Morphometric Analysis of Two Reservoir Catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka, *INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING (ICWRCOE 2015)*, doi: 10.1016/j.aapro.2015.02.175.
- Costa, E., 1987. Hydraulics and basin morphometry of the largest lflash lfoods in th. . conterminous United States, *Journal of Hydrology*, 93(3-4): 313-338.
- Creutin, JD., Borga, M., 2003. Radar hydrology modifies the monitoring of lflash-lfood hazard, *Hydrol Process*, 17(7):1453-1456.

- Das, S., 2018. Geographic information system and AHP based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Arab. J. Geosci*, 11(19): 576. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3933-4>.
- DeGaetano, AT., 2009. Time-dependent changes in extreme-precipitation return-period amounts in the continental United States, *J Appl Meteorol Climatol*, 48(10): 2086–2099.
- Detoni, M., 1996. Application of multi criteria methodology for decision support in defining features construction projects, MSc Dissertation, Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, Brazil.
- Doocy, S., Daniels, A., Packer, C., Dick, A., Kirsch, T.D., 2013. The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980–2009 and systematic literature review. *PLoS Curr*. 5.
- Faniran, A., 1968. The index of drainage intensity – a provisional new drainage factor. *Australian Journal of Science*, 31: 328–330.
- Grohmann, C. H., 2004. Morphometric analysis in geographic information systems: Applications of free software GRASS and R Star, *Computer and Geoscience*, 30(10): 1055–1067.
- Hadely, R.F., Schumm, S.A., 1961. Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River basin, United States Geological Survey water-supply paper, 1531-B. Washington, DC: US Government Printing Office, 137–196.
- Horton, R. E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bulletin of the Geological Society of America*, 56(3): 275–370.
- Ifabiyi, I.P., Eniolorunda, N.B., 2012. Watershed characteristics and their implication for hydrologic response in the upper Sokoto basin, Nigeria, *Journal of Geography and Geology*. 4(2): 147.
- Ishizakaa, A., Siraj, S., 2018. Are multi-criteria decision-making tools useful? An experimental comparative study of three methods, *European Journal of Operational Research*, 264(2): 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.041>.
- Karande, P., Chakraborty, S., 2013. Using MACBETH method for supplier selection in manufacturing environment, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4: 259–272. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2013.01.002>.
- Karande, P., Chakraborty, S., 2014. A facility layout selection model using MACBETH method, *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, January 7–9, Bali, Indonesia.
- Kumar Rai, P., Narayan Mishra, V., Mohan, K., 2017. A study of morphometric evaluation of the Son basin, India using geospatial approach, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7: 9-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2017.05.001>.
- Mahmood, Sh., Rahman, A., 2019. Flash flood susceptibility modeling using geomorphometric and hydrological approaches in Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan, *Environmental Earth Sciences*, 78(43): 1-16, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8041-y>.
- Melton, M.A., 1958. Correlations structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents, *Journal of Geology*, 66: 442-460.
- Mesa, L.M., 2006. Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumam, Argentina), *Environ Geol*, 50(8): 1235–1242.
- Nookaratnam, K., Srivastava, Y.K., Venkateswarao, V., Amminedu, E., Murthy, K.S.R., 2005. Check dam positioning by prioritization of micro-watersheds using SYI model and

- morphometric analysis - remote sensing and GIS perspective. Jour. Indian Soc. Remote Sens, 33(1): 25–38.*
- Patton, P.C., Baker, V.R., 1976. *Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls, Water Resour Res, 12: 941–952.*
  - Prasad, R. N., Pani, P., 2017. *Geo-hydrological analysis and sub watershed prioritization for flash food risk using weighted sum model and Snyder's synthetic unit hydrograph, Modeling Earth Systems and Environment, 3(4): 1491–1502. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0354-4>.*
  - Schumm, S. A., 1956. *Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, 67(5): 597–646. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2).*
  - Shulits, S., 1968. *Quantitative formulation of stream and watershed morphology, Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, 3: 201–207.*
  - Strahler, A.N., 1964. *Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks, Handbook of applied hydrology.*
  - Suresh, M., Sudhakar, S., Tiwari, K. N., Chawdary, V. M., 2005. *Prioritization of watershed using morphometric parameters and assessment of surface water potential using RS, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 32: 1-11.*
  - Termeh, S.V.R., Kornejady, A., Pourghasemi, H.R., Keesstra, S., 2018. *Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. Sci. Total Environ, 615: 438–451.*
  - Verstappen, H., 1983. *The applied geomorphology, Enschede (The Netherlands): International Institute for Aerial Survey and Earth Science (ITC).*