

پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌ی آبخیز اخترآباد با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

آرش ملکیان - استادیار دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تهران
اصغر افتادگان خوزانی* - دانشجوی کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، گرایش اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران
غدیر عشور نژاد - کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۵/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۱۱/۱۷

چکیده

سیل یکی از انواع مخاطرات طبیعی است که همه‌ساله خسارات زیان‌باری را در سراسر جهان و از جمله ایران به‌وجود می‌آورد. برای جلوگیری از رخداد سیلاب، باید مناطقی را شناسایی کرد که دارای پتانسیل بالایی در ایجاد این پدیده هستند و برای کاهش خطرات احتمالی، از سرمنشأ تولید وارد عمل شد که همانا حوزه‌های آبخیز هستند. این پژوهش نیز در پی ارائه‌ی روشی برای پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز است. با توجه به اهداف پژوهش، نخست عوامل مؤثر در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی (سنگ‌شناسی، نفوذپذیری، تراکم شبکه‌ی زهکشی، زمان تمرکز، شیب، گروه هیدرولوژیک خاک، کاربری اراضی، بارش و فاصله از آبراهه) شناسایی و وزن هر کدام از معیارها، پس از تکمیل پرسش‌نامه‌ی مقایسه‌ی زوجی از سوی کارشناسان، به‌وسیله‌ی فرآیند سلسله‌مراتبی فازی مشخص شد. از عملگر جمع جبری فازی برای مدل‌سازی فضایی و پهنه‌بندی، بر اساس میزان عضویت فازی هر کدام از عوامل در حوزه‌ی آبخیز اخترآباد استفاده شد. همچنین برای طبقه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی، نقشه‌ی نهایی به‌دست‌آمده از منطقه، بر اساس انحراف معیار در هفت کلاس قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، پهنه‌های با خطر سیل‌خیزی زیاد در شمال و جنوب حوزه قرار دارند و مناطق با خطر کم، در آبراهه‌ها و قسمت‌های مرکزی حوزه واقع شده‌اند. نتایج تحلیل ناحیه‌ای که حاصل همپوشانی نقشه‌ی نهایی با نقشه‌های هر یک از عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی است، بیان می‌دارد که مناطق با پتانسیل سیل‌خیزی زیاد در پهنه‌هایی با شیب بیش از ۶۰ درصد و بارش بین ۴۰۰-۳۰۰ میلی‌متر قرار دارند. پوشش گیاهی مناسب، خاک تکامل‌یافته و تراوایی بیشتر، در قسمت مرکزی و پایین‌دست حوزه واقع شده است که شرایط سیل‌خیزی را کاهش داده‌اند.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی، سیل‌خیزی، منطق فازی، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، اخترآباد.

مقدمه

سیل یکی از انواع مخاطرات طبیعی است که همه‌ساله خسارت‌های فراوانی را در سراسر جهان و از جمله ایران به وجود می‌آورد. این پدیده رویدادی ناگهانی است که می‌تواند باعث ویرانی شهرها و روستاها شده و جان و مال ساکنان آنها را با خطر روبه‌رو کند. بیشتر مناطق ایران با قرارگیری مرکز پرفشار جنب حاره در ماه‌های متوالی، از ریزش‌های جوی محروم و در ماه‌های دیگر سال، ممکن است میزان قابل توجهی باران در مدت چند روز یا گاهی چند ساعت ریزش کرده و سیلاب‌های مخربی را به وجود آورد (امیدوار، ۱۳۹۰: ۱۸۱). بنابراین شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالا در تولید رواناب، می‌تواند کمک شایان توجهی به کاهش خسارات ناشی از این پدیده داشته باشد.

از مهم‌ترین مطالعاتی که در سطح جهان و ایران در زمینه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی و برآورد سیلاب انجام شده است، می‌توان به این موارد اشاره کرد. ویلت و شارد^۱ (۱۹۹۱)، برای بررسی امکان استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ (AHP) در پروژه‌های کنترل سیلاب رودخانه‌ی گزند^۳ و تار^۴ در اُکلاهامای آمریکا، مناطق مستعد سیلاب را شناسایی کردند. تودینی^۵ (۱۹۹۹)، برای دستیابی به نقشه‌ی پیش‌بینی و مدیریت خطر سیلاب از سیستم عملکردی تصمیم استفاده کرد. وانگ و همکاران^۶ (۲۰۰۲)، برای به‌دست آوردن نقشه‌ی وسعت سیلاب در سواحل سیلابی با استفاده از تصاویر TM^۷ لندست و داده‌های مدل رقومی ارتفاعی^۸ (DEM) در کارولینای شمالی، مناطق با پتانسیل سیل‌خیزی بالا را شناسایی کردند. هاریت و بتس^۹ (۲۰۰۲) و پاپنبرگر و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۵) با استفاده از روش HEC-RAS، مناطق مستعد هجوم سیلاب را به‌دست آوردند. ژانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۲) برای پهنه‌بندی مناطق در معرض سیلاب شدید در یاماگوچی^{۱۲} ژاپن، از روش AHP استفاده کردند. سانیا و لو^{۱۳} (۲۰۰۴) با به‌کارگیری روش‌های سنجش از دوری و GIS، نقشه‌ی مناطق مخاطره‌آمیز از لحاظ سیلاب را در نواحی موسمی آسیا تهیه کردند. لوی^{۱۴} (۲۰۰۵)، برای مدیریت خطر سیل از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره^{۱۵} (MCDM) و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم^{۱۶} (DSS) استفاده کرد و به این نتیجه رسید که MCDM و DSS می‌توانند در تشخیص مکان‌های مستعد سیلاب مفید

1. Willtt & Sharda
2. Analytic Hierarchy Process
3. Grand
4. Tar
5. Todini
6. Wang et al
7. Thematic Mapper
8. Digital Elevation Model
9. Horrit & Bates
10. Pappenberger et al
11. Zhang et al
12. Yamaguchi
13. Sanyal & Lu
14. Levy
15. Multi-Criteria Decision Making
16. Decision Support Systems

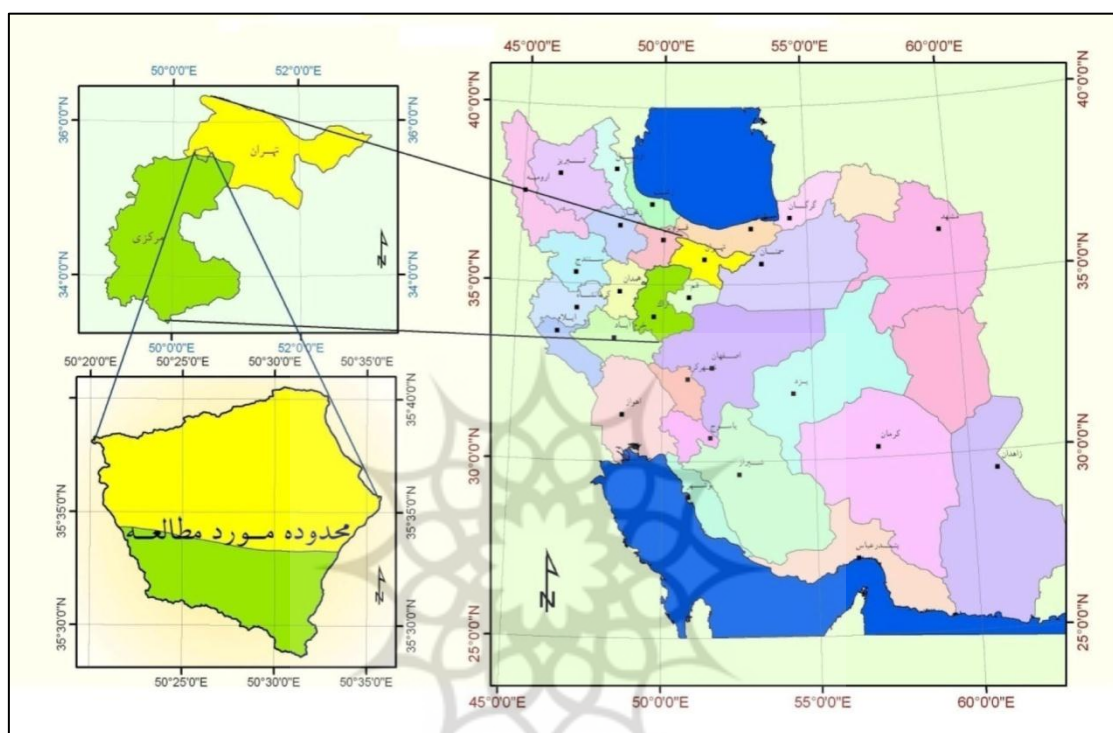
واقع شوند. سینها و همکاران^۱ (۲۰۰۸)، با استفاده از مدل AHP در رودخانه‌ی کوسی^۲، واقع در شرق هندوستان، به تهیه‌ی نقشه‌ی خطر سیلاب با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، توپوگرافی و تراکم جمعیت اقدام کردند. کوک و همکاران^۳ (۲۰۰۹)، با دو مدل HEC-RAS و FESWMS، ویژگی‌های توپوگرافی و ژئومتریکی رودخانه‌های استرودز^۴ در کارولینای شمالی و برزس^۵ در تگزاس آمریکا را مقایسه و تأثیر هر یک از این عوامل را در نقشه‌ی پهنه‌بندی سیلاب تعیین کردند. کین و همکاران^۶ (۲۰۱۱)، در بزرگراه‌های منطقه‌ی فیولینگ^۷ چین با توجه به معیارهای زمین‌شناسی، شدت بارش، فراوانی سیلاب، ژئومورفولوژی و پوشش گیاهی، به پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل AHP پرداختند. بختیاری کیا و همکاران (۲۰۱۱)، با روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی^۸ (ANN) و با در نظر گرفتن معیارهای بارش، شیب، ارتفاع، زمان تمرکز، خاک‌شناسی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی، به شبیه‌سازی شرایط سیلابی در حوزه‌ی رودخانه‌ی جوهور^۹ مالزی اقدام کردند. صفری (۱۳۸۰) و آرمان (۱۳۸۵) با به‌کارگیری مدل HEC-RAS اقدام به پهنه‌بندی سیلاب کردند. فرج‌زاده و نصرتی (۱۳۸۳) با استفاده از مدل رگرسیون چندمتغیره، به شناسایی عوامل مؤثر در سیل‌خیزی حوزه‌ی آبخیز گاوهرود در غرب ایران پرداخته و هر زیرحوزه را از نظر قابلیت تولید رواناب طبقه‌بندی کردند. امیدوار و همکاران (۱۳۸۹) با به‌کارگیری روش تحلیل عاملی و تحلیل خوشه‌ای، به پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در حوزه‌ی آبریز کُنجانچم اقدام کردند. قنواتی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل AHP و با به‌کارگیری لایه‌های اطلاعاتی مربوط به شاخص NDVI^{۱۰}، تراکم زهکش، فاصله از آبراهه، بارش، شیب، لندفرم، کاربری اراضی، لیتولوژی، انحنا، پروفیل و پلانیمتریک، حوزه‌ی فرحزاد تهران را به لحاظ سیل‌خیزی پهنه‌بندی کردند. در این پژوهش سعی شد، عوامل مؤثر در سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز شناسایی و با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^{۱۱}، پتانسیل سیل‌خیزی در حوزه‌ی آبخیز اخترآباد پهنه‌بندی شود. در این حوزه، پدیده‌ی سیل سالانه خسارات زیادی به مناطق مسکونی و کشاورزی وارد آورده که پهنه‌بندی آن به لحاظ پتانسیل تولید رواناب، می‌تواند در کاهش خسارات ناشی از این پدیده کمک شایان توجهی کند. همچنین پژوهش‌هایی از این دسته، می‌تواند مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و عمران در مقیاس منطقه‌ای، ناحیه‌ای و محلی به‌شمار روند.

محدوده‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه حوزه‌ی آبخیز اخترآباد با مختصات ۲۸' ۳۵° تا ۴۰' ۳۵° عرض شمالی و ۲۰' ۵۰° تا ۳۵' ۵۰°

1. Sinha et al
2. Kosi
3. Cook et al
4. Strouds
5. Brazos
6. Qin et al
7. Fuling
8. Artificial Neural Network
9. Johor
10. Normalized Difference Vegetation Index
11. Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzz AHP)

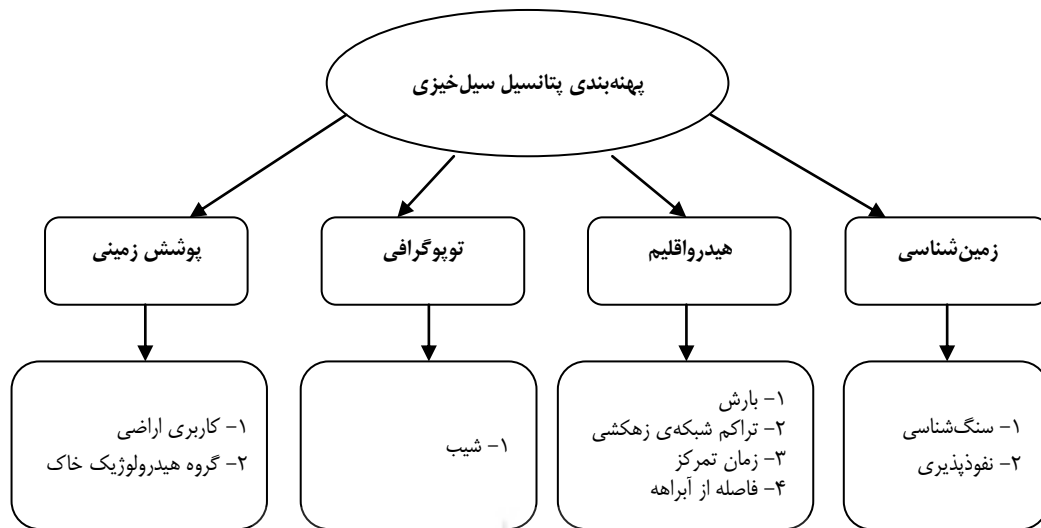
طول شرقی و با وسعت ۳۰۷۸۵/۲۸ هکتار در بخش جنوب غربی استان البرز و شمال استان مرکزی (در حدود ۶۹ درصد در استان البرز و ۳۱ درصد در استان مرکزی) قرار گرفته است. منطقه‌ی مورد نظر بر اساس تقسیم‌بندی سازمان توسعه‌ی منابع آب کشور (تماب)، داخل حوزه‌ی دریاچه‌ی نمک (با کد ۴۱) و در زیرحوزه با کد (۴۱۱۳) قرار دارد (شکل شماره ۱).



شکل ۱. موقعیت حوزه‌ی آبخیز اخترباد (بر اساس تقسیمات سیاسی سابق)

مواد و روش‌ها

با توجه به اهداف پژوهش، نخست عوامل مؤثر در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی، از طریق مطالعات کتابخانه‌ای (قنواتی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Zhang et al, 2002; Sinha et al, 2008) شناسایی و با نظر کارشناسان تکمیل شد و با توجه به معیارهای مشخص شده، داده‌های مکانی سطح منطقه جمع‌آوری شدند. شکل شماره ۲ ساختار سلسله‌مراتبی این عوامل را نشان می‌دهد. وزن هر کدام از معیارها، پس از تکمیل پرسش‌نامه‌ی مقایسه‌ی زوجی از سوی کارشناسان با روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مشخص و از عملگر جمع جبری فازی^۱ برای مدل‌سازی فضایی و پهنه‌بندی بر اساس میزان عضویت فازی هر کدام از عوامل، استفاده شد. در نهایت با پهنه‌بندی حوزه‌ی آبخیز اخترباد، از لحاظ پتانسیل سیل‌خیزی، مناطق در معرض خطر سیلاب شناسایی شدند. در این پژوهش، نرم‌افزار MATLAB، برای انجام محاسبات تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و نرم‌افزار ArcGIS 9.3، برای مدل‌سازی و تحلیل فضایی به کار گرفته شده است.



شکل ۲. فهرست معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

الف) عوامل مؤثر در سیل‌خیزی

۱- زمین‌شناسی

- **نفوذپذیری:** با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی، وضعیت تکتونیک، زمین‌ساخت و بازدیدهای میدانی، واحدهای سنگی حوزه‌ی مورد مطالعه، براساس نفوذپذیری به پنج طبقه شامل خیلی تراوا، تراوا، نسبتاً تراوا، کم تراوا و ناتراوا، تقسیم شده است (جدول شماره‌ی ۲).

جدول ۲. طبقات نفوذپذیری بر اساس واحد سنگ‌شناسی حوزه‌ی آبخیز اخترا‌آباد و میزان عضویت فازی آنها در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

میزان عضویت فازی	مساحت (هکتار)	واحد سنگی	نفوذپذیری
۰/۳	۲۱۴۶۶/۴۲	$Q^{2f} - Q^{t2}$	خیلی تراوا
۰/۴	۴۷/۹۲	Q^{t1}	تراوا
۰/۶	۳۱۴/۵۹	$E^{1b} - E^{2ig2}$	نسبتاً تراوا
۰/۷	۸۴۶۲/۸۱	$E^{1t1} - E^{mt} - E^{t2} - E^{2tb1} - E^{2pa2} - E^{2ta2} - E^{2pa} - E^{2ig3} - E^{2igd} - E^{2t3} - O^g - O^{ga}$	کم تراوا
۱	۴۹۳/۹۲	$E^{1ig} - E^{2ig1}$	ناتراوا

- **سنگ‌شناسی:** از عوامل مؤثر در ایجاد سیلاب، مقاومت سازندهای تشکیل‌دهنده‌ی سطح حوزه در مقابل فرسایش و گذردهی آب است که هر سازند از خود مقاومت متفاوتی را نشان می‌دهد. مقاومت سازندها، به نحوه‌ی تبلور، نوع

کانی‌های سازنده، میزان خلل و فرج و غیره بستگی دارد. در این پژوهش از پارامتر اول روش پسیاک^۱ (PSIAC) برای سنجش مقاومت سنگ‌های منطقه استفاده شد. در روش پسیاک بسته به حساسیت سنگ، نمره بین صفر تا ده در نظر گرفته می‌شود و سپس با توجه به مساحت گسترش آن، میانگین وزنی گرفته شده و نمره‌ی متوسط مربوط به این عامل تعیین می‌شود (احمدی، ۱۳۹۰: ۵۷۵). بر این اساس سنگ‌های موجود در حوزه، از لحاظ مقاومت در پنج گروه قرار گرفتند (جدول شماره ۱).

جدول ۱. ویژگی‌های سنگ‌شناسی حوزه‌ی آبخیز اخترا‌آباد و میزان عضویت فازی آنها در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

جنس سنگ	واحد سنگی	طبقه‌ی مقاومت	مساحت (هکتار)	میزان عضویت فازی
مخروط‌افکنه آبرفتی	Q^{2f}	خیلی کم	۹۸/۲۶	۰/۱
پادگانه‌ی آبرفتی کم‌ارتفاع	Q^{t2}	خیلی کم	۲۱۳۶۸/۱۶	۰/۲
پادگانه‌ی آبرفتی مرتفع و قدیمی	Q^{t1}	کم	۴۷/۹۲	۰/۳
کریستال توف داسیتی سفید	E^{2t3}	متوسط	۱۵/۱۲	۰/۵
ایگنمبریت داسیتی	E^{2igd}	زیاد	۸۵۱/۸۵	۰/۷
ایگنمبریت‌های ریولیتی تا کوارتز تراکتیتی و آندزیت	E^{2ig3}	زیاد	۷۵/۷۵	۰/۷
پیروکسن آندزیت پورفیری، بازالت، ماسه‌سنگ	E^{2pa}	متوسط	۱۵۷۲/۸۹	۰/۶
تراکی آندزیت، تراکتیت بازالت و کریستال و پیروکسن آندزیت	E^{2pa2}	متوسط	۵۰۲/۲	۰/۶
تراکی و آندزیت، آفانیتیک تا مگابرفیری و آندزیت	E^{2ta2}	متوسط	۵۳۶/۴۶	۰/۵
توف ریولیتی تا تراکتیتی، برش و ایگنمبریت تراکتیتی	E^{2ig2}	خیلی زیاد	۳۰۲/۱۲	۰/۷
ایگنمبریت و برش ریوداسیتی	E^{2ig1}	خیلی زیاد	۳۹۱/۹۳	۱
تراکی بازالت و آندزیت پیروکسن‌دار	E^{2tb1}	زیاد	۸۴/۲۷	۰/۸
کریستال توف، کریستال و لیتریک توف و توف	E^{1t1}	متوسط	۳۷۱۶/۱۹	۰/۶
ایگنمبریت ریولیتی تا داسیتی و داسیت	E^{1ig}	خیلی زیاد	۸۳/۲۴	۱
بازالت	E^{1b}	متوسط	۱۲/۴۷	۰/۶
توف‌های ریوداسیتی به رنگ سبز روشن و خاکستری با میان لایه‌ی گدازه‌ی آندزیتی	E^{mt}	متوسط	۱۸۷/۷۷	۰/۵
ریولیت و کریستال توف، توف ریولیتی	E^{1t2}	متوسط	۹۱۶/۱۳	۰/۶
کوارتز لاتیت	O^{qla}	خیلی زیاد	۱۴/۴۵	۱
گرانیت	O^s	زیاد	۶۵/۴۸	۰/۸

۲- عوامل هیدرواقلیم

- بارش: برای مطالعه‌ی بارش منطقه از ایستگاه‌های سینوپتیک کرج، ساوه، چیتگر، ۴ ایستگاه کلیماتولوژی، ۱۳ ایستگاه تبخیرسنجی و ۱۸ ایستگاه باران‌سنجی استفاده شد که همگی پیرامون حوزه‌ی مورد پژوهش قرار دارند. گرادیان متوسط بارندگی سالانه، بیانگر این است که با افزایش ارتفاع به مقدار ۱۰۰۰ متر، بارندگی ۱۲۲ میلی‌متر افزایش می‌یابد. بر این اساس متوسط بارندگی سالانه‌ی حوزه برابر ۲۳۹ میلی‌متر است.

• **تراکم شبکه‌ی زهکشی:** بر اساس رابطه‌ی شماره‌ی ۱، اگر مجموع طول تمام آبراهه‌ها و رودخانه‌های حوزه اندازه‌گیری و بر مساحت حوزه تقسیم شود، عدد به‌دست‌آمده را تراکم شبکه‌ی زهکشی می‌نامند و برحسب کیلومتر در هر کیلومتر مربع بیان می‌شود (مهدوی، ۱۳۷۱: ۱۷۲).

$$\mu = \frac{\sum L_i}{A} \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

در این رابطه، L_i : طول هر یک از آبراهه‌های حوزه (آبراهه‌ی دائم یا خشک‌رودها)، برحسب km؛ A: مساحت حوزه برحسب km^2 ؛ μ : تراکم شبکه‌ی زهکشی حوزه برحسب km/km^2 هستند. با استفاده از رابطه‌ی شماره‌ی ۱، تراکم شبکه‌ی زهکشی برای هر یک از زیرحوزه‌ها به‌دست‌آمد و با نظر کارشناس، زیرحوزه‌هایی که در بازه‌های مشخص شده در جدول شماره‌ی ۳ قرار می‌گرفتند، میزان عضویت فازی مربوط به هر بازه را به خود اختصاص دادند.

جدول ۳. طبقات تراکم شبکه‌ی زهکشی و میزان عضویت فازی آنها در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

میزان عضویت فازی	تراکم شبکه‌ی زهکشی (km/km^2)
۰/۲	۶/۵-۷/۵
۰/۳	۷/۵-۸/۵
۰/۴	۸/۵-۹/۵
۰/۵	۹/۵-۱۰/۵
۰/۶	۱۰/۵-۱۱/۵
۰/۷	۱۱/۵-۱۲/۵
۰/۸	۱۲/۵-۱۳/۵
۰/۹	۱۳/۵-۱۴/۵

• **زمان تمرکز^۱:** زمان تمرکز حداکثر زمانی است که طول می‌کشد تا آب از دورترین نقطه‌ی حوزه، مسیر هیدرولوژیکی خود را طی کرده و به نقطه‌ی خروج برسد. زمان تمرکز به وضعیت توپوگرافی منطقه، مساحت، شکل، طول آبراهه‌ی اصلی، شیب آبراهه، ناهمواری، زبری مسیر، نوع خاک، تراکم و تیپ پوشش گیاهی، مدیریت و نوع بهره‌برداری از اراضی و عوامل دیگر بستگی دارد و از سوی دیگر، شدت بارندگی و توزیع زمانی و مکانی آن نیز، می‌تواند مدت زمان تمرکز را افزایش یا کاهش دهد (علیزاده، ۱۳۸۵: ۴۸۵). روش‌های مختلفی برای محاسبه و برآورد زمان تمرکز پیشنهاد شده که در این پژوهش از روش کریپیچ (روشی مناسب برای حوزه‌های کوچک) استفاده شده است (رابطه‌ی شماره‌ی ۲).

$$T_c = 0.949 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

در این رابطه، T_c : زمان تمرکز بر حسب ساعت؛ L: طول مسیر آب در داخل حوزه بر حسب کیلومتر و H: حداکثر اختلاف ارتفاع اراضی با خروجی حوزه بر حسب متر است.

با توجه به رابطه‌ی شماره‌ی ۲، زمان تمرکز برای هر زیرحوزه مشخص و میزان عضویت فازی هر بازه با توجه به نظر کارشناس به‌دست آمد (جدول شماره‌ی ۴).

جدول ۴. بازه‌های زمان تمرکز و میزان عضویت فازی آنها در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

میزان عضویت فازی	زمان تمرکز (ساعت)
۰/۹	۰-۰/۵
۰/۷	۰/۵-۱
۰/۵	۱-۱/۵
۰/۴	۱/۵-۲
۰/۲	۲-۲/۵

• **فاصله از آبراهه:** آبراهه‌ها در حوزه، عمل تخلیه‌ی جریان‌های سطحی را انجام می‌دهند و با فاصله‌گرفتن از آن، خطر ایجاد سیلاب کاهش می‌یابد. برای استخراج آبراهه‌های حوزه، از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰ منطقه استفاده شد و سپس با تفسیر و بررسی اطلاعات موجود در تصاویر دورسنجی و عکس‌های هوایی، دقت‌سنجی و در پایان پس از بازدیدهای میدانی، نقشه‌ی مورد نظر استخراج و نهایی شد.

۳- توپوگرافی

• **شیب:** شیب حوزه به‌دلیل رابطه‌ی مستقیم و به‌نسبت پیچیده‌ای که با مقدار نفوذپذیری و جریان سطحی و نیز رطوبت خاک دارد، نقش زیادی در ایجاد جریان‌های شدید و سیلابی در حوزه‌ی آبخیز دارند (یمانی، ۱۳۸۴: ۴۹). جدول شماره‌ی ۵ طبقات شیب و میزان عضویت فازی آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۵. طبقات شیب و میزان عضویت فازی آنها در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

طبقات شیب (به درصد)	۰-۲	۲-۵	۵-۸	۸-۱۲	۱۲-۲۰	۲۰-۳۰	۳۰-۶۰	۶۰<
میزان عضویت فازی	۰/۱	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۹	۱

۴- پوشش زمینی

• **گروه هیدرولوژیک خاک:** خصوصیات خاک بر پیدایش رواناب اثرگذار است و در مطالعات مربوط به آن، باید در نظر گرفته شوند. خصوصیات خاک می‌تواند با یک عامل هیدرولوژیکی بیان شود که آن، حداقل سرعت نفوذپذیری در حالت مرطوب‌بودن طولانی‌مدت خاک است. در این مورد خصوصیات سطحی و داخلی افق‌های خاک نیز در نظر گرفته می‌شوند. تمام خاک‌ها از سوی سازمان حفاظت خاک آمریکا، براساس تولید رواناب به چهار گروه زیر تقسیم شده‌اند:

گروه A: خاک‌هایی با شدت نفوذپذیری بالا، حتی هنگامی که کاملاً مرطوب هستند. دارای زهکشی خوب بوده و آب‌گذری بالایی داشته و خاک‌های شنی و قلوه‌سنگی عمیق را شامل می‌شوند. تولید رواناب در این خاک‌ها ضعیف است.

گروه B: خاک‌هایی با شدت نفوذپذیری متوسط، حتی هنگامی که کاملاً مرطوب هستند. این خاک‌ها عمیق هستند. زهکشی متوسط تا خوب و بافت ریز تا متوسطی دارند. آب‌گذری آنها متوسط بوده و توانایی متوسطی از نظر تولید رواناب دارند.

گروه C: خاک‌هایی با شدت نفوذپذیری کم هنگامی که مرطوب هستند. اغلب دارای لایه‌ای هستند که مانع نفوذ آب به قسمت‌های پایین‌تر می‌شود و دارای بافت ریز تا نسبتاً ریز بوده و ضریب آب‌گذری کمی دارند. توانایی تولید رواناب آنها به نسبت زیاد است.

گروه D: خاک‌هایی با نفوذپذیری کم هنگامی که خیس هستند و به‌طور عمده شامل خاک‌های رسی، خاک‌هایی با یک سفره آب بالا و دائمی، خاک‌هایی با لایه‌های سخت رسی در سطح یا نزدیک آن که خاک‌های کم‌عمق روی تشکیلات، کمابیش غیرقابل نفوذ هستند. این خاک‌ها قابلیت خیلی کمی برای انتقال آب دارند و قسمت‌های سنگی حوزه‌ها و سطح آسفالت جاده‌ها نیز، شامل این گروه هستند. در این گروه توانایی تولید رواناب زیاد است (مهدوی، ۱۳۷۱: ۱۲۴). گروه‌های هیدرولوژیک خاک در حوزه‌ی اخترا‌آباد با توجه به بافت خاک و حداقل نفوذپذیری با توجه به جدول شماره ۶ طبقه‌بندی و میزان عضویت فازی هر گروه مشخص شد.

جدول ۶. طبقات گروه‌های هیدرولوژیک خاک و میزان عضویت فازی آنها در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

میزان عضویت فازی	مساحت (هکتار)	بافت خاک	نفوذپذیری Cm/hr	گروه هیدرولوژیک
۰/۳	۳۴۱۷/۷۶	سنگ‌ریزه / ماسه‌ی درشت دانه ماسه‌ی ریز دانه / ماسه ماسه تا ماسه‌ی لومی ماسه لومی	۱۱/۴۳-۷/۶۲	A
۰/۵	۲۴۳۷۷/۱۱	ماسه‌ی لومی تا لوم ماسه‌ای لوم ماسه‌ای لوم ماسه‌ای تا لوم لوم تا ماسه و گراول لوم / لوم تا رس لوم تا لوم سیلتی لوم تا رس لومی سیلتی / لوم رسی ماسه و گراول	۷/۶۲-۳/۸۱	B
۰/۸	۲۰۱۰/۴۵	رس لومی رس لومی تا رس لومی سیلتی سیلت لومی / رس لومی سیلتی سیلت لومی تا رس لومی سیلتی رس ماسه‌ای لومی رس لومی سیلتی تا رس سیلتی رس سیلتی / رس سیلتی تا رس	۳/۸۱-۱/۲۷	C
۰/۹	۹۸۰/۴۸	رس / تورب	۱/۲۷-۰/۵	D

• **کاربری اراضی:** در این مطالعه کاربری اراضی در سه دسته کاربری مسکونی، کشاورزی و مرتع، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه ۹۳/۵ درصد مساحت حوزه را مراتع تشکیل می‌دهند، با استفاده از روش چهار عاملی امتیازی، به طبقه‌بندی آن در نه رده اقدام شد (جدول شماره ۷).

جدول ۷. طبقه‌بندی مراتع به روش چهار عاملی امتیازی و میزان عضویت فازی آنها در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

میزان عضویت فازی	تاج پوشش		عامل خاک		ترکیب گیاهی				بینه و شادابی		سنگ و سنگریزه و رخنمون سنگی	جمع امتیازها	وضعیت مرتع	رده مرتع
	طبقه	امتیاز	طبقه	امتیاز	درصد ترکیب			امتیاز	طبقه	امتیاز	درصد			
					کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳							
۰/۷	۱۷	۴	۳	۱۱	-	۵/۸۲	۷۴/۰۹	۵	۲	۷	-	۱۹	ضعیف	۱
۰/۶	۹	۲	۳	۱۲	-	۱۱/۴	۵۸/۵۴	۶	۶	۲	۵۹	۲۲	ضعیف	۲
۰/۳	۳۴	۶	۲	۱۶	-	۲۴/۶	۵۷/۷۷	۸	۲	۷	-	۳۷	متوسط	۳
۰/۶	۲۵	۵	۳	۱۰	-	۱۲/۴۹	۵۶/۶۶	۴	۳	۵	۲۷	۲۴	ضعیف	۴
۰/۲	۲۰	۴	۴۶	۲۰	-	۱۲/۸۲	۶۶/۲	۱۰	۱۰	۲۵	-	۴۹	متوسط	۵
۰/۶	۱۰	۳	۳	۱۲	-	۷/۸	۵۱/۵۴	۵	۴	۲	۵۹	۲۲	ضعیف	۶
۰/۴	۱۱	۴	۲	۱۲	-	۳۴/۸	۲/۵۳	۱۰	۲	۷	-	۳۳	متوسط	۷
۰/۵	۱۲/۵	۳	۳	۱۲	-	۶	۶۱/۲	۱۰	۲	۳	-	۲۸	ضعیف	۸
۰/۵	۲۶/۸	۶	۳۱/۲	۱۸	-	۱۸/۸	۶۱/۷	۱۰	۶	۲/۵	-	۳۶/۵	متوسط	۹

در مطالعه‌ی کاربری اراضی، مناطق مسکونی و کشاورزی واقع در حوزه، به ترتیب میزبان عضویت فازی ۰/۹ و ۰/۳ دریافت کردند.

ب) فرایند سلسله‌مراتبی فازی

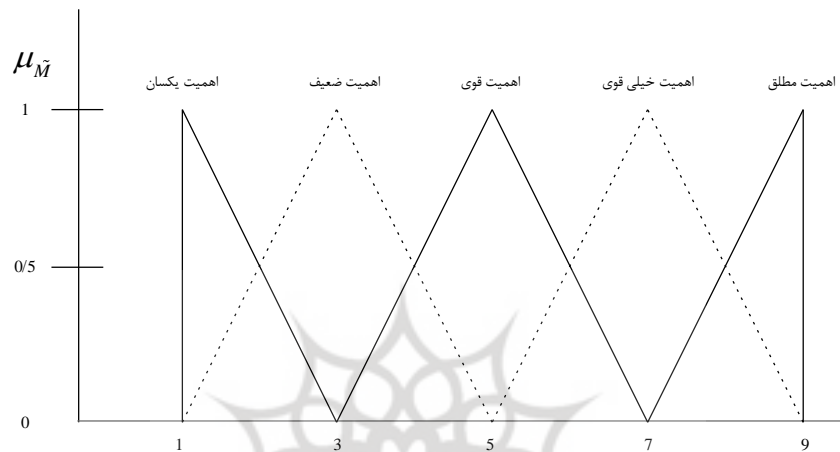
چانگ^۱ (۱۹۹۶) روش تحلیل توسعه‌ای سلسله‌مراتبی فازی را با ادغام فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مجموعه‌های فازی پیشنهاد کرده است. روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی روش به‌نسبت جدیدی است که از سوی لارهوون و پدريکز^۲ (۱۹۸۳) گسترش داده شد و AHP را برای حالتی بسط داد که به محیط‌های فازی و مبهم منجر می‌شد. روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی توانایی سروکار داشتن با عدم اطمینان و نسبی بودن در قضاوت‌های انسانی را دارد (خسرو انجم و همکاران، ۱۳۹۰: ۶۰). به‌گفته‌ی بهتر، استفاده از مجموعه‌های فازی، سازگاری بیشتری با توضیحات زبانی و گاه مبهم انسانی دارد و بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (به‌کارگیری اعداد فازی) به

1.Chang

2. Laarhoven & Pedrycz

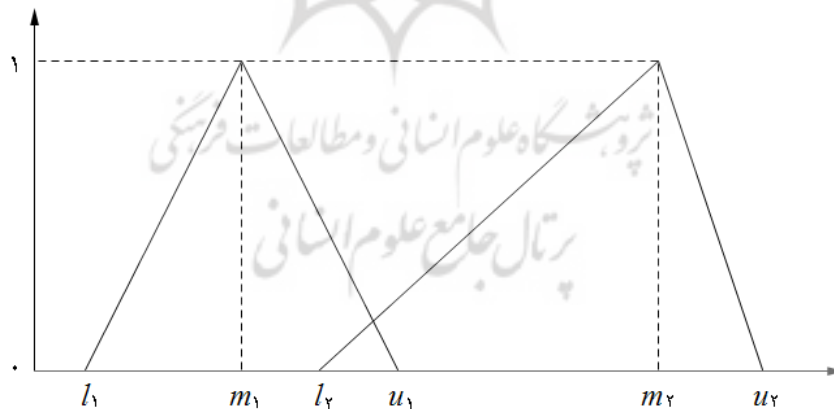
پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت. برای نمونه، در شکل شماره‌ی ۳ تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی نشان داده شده است (عطایی، ۱۳۸۹: ۱۰۵-۱۰۴).

از دیدگاه چانگ اعداد مورد استفاده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، اعداد مثلثی فازی هستند. مفاهیم و تعاریف روش تحلیل سلسله مراتبی فازی بر اساس روش تحلیل توسعه‌ای تشریح می‌شود (عالم تبریز و باقرزاده آذر، ۱۳۸۹: ۷۳-۷۱؛ مؤمنی، ۱۳۸۹: ۲۵۲-۲۵۰).



شکل ۳. تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی

دو عدد مثلثی $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ که در شکل شماره‌ی ۴ رسم شده‌اند را در نظر بگیرید.



شکل ۴. اعداد مثلثی M_1 و M_2

عملگرهای ریاضی آن به صورت روابط شماره‌ی ۳، ۴ و ۵ تعریف می‌شوند:

$$M_1 + M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

$$M_1 \times M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

$$M_1^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1} \right), M_r^{-1} = \left(\frac{1}{u_r}, \frac{1}{m_r}, \frac{1}{l_r} \right) \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

باید توجه داشت که حاصل ضرب دو عدد فازی مثلثی، یا معکوس یک عدد فازی مثلثی، دیگر یک عدد فازی مثلثی نیست. این روابط، تنها تقریبی از حاصل ضرب واقعی دو عدد فازی مثلثی و معکوس یک عدد فازی مثلثی را بیان می‌کنند. در روش تحلیل توسعه‌ای برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسات زوجی، مقدار S_k - که خود یک عدد مثلثی است - از رابطه‌ی شماره‌ی ۶ محاسبه می‌شود.

$$S_k = \sum_{j=1}^n M_{kj} \times \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1} \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

در این رابطه، k بیانگر شماره‌ی سطر و i و j به ترتیب نشان‌دهنده‌ی گزینه‌ها و شاخص‌ها هستند. در روش تحلیل توسعه‌ای، پس از محاسبه S_k ها، باید درجه‌ی بزرگی آنها را نسبت به هم به دست آورد. به طور کلی اگر M_1 و M_r دو عدد فازی مثلثی باشند، درجه‌ی بزرگی M_1 بر M_r ، که با $V(M_1 \geq M_r)$ نشان داده شده، به صورت رابطه‌ی شماره‌ی ۷ تعریف می‌شود.

$$\begin{cases} V(M_1 \geq M_r) = 1 & \text{if } m_1 \geq m_r \\ V(M_1 \geq M_r = \text{hgt}(M_1 \cap M_r)) & \text{other wise} \end{cases} \quad \text{رابطه‌ی (۷)}$$

$$\text{در این رابطه } \text{hgt}(M_1 \cap M_r) = \frac{u_1 - l_r}{(u_1 - l_r) + (m_r - m_1)} \text{ است.}$$

میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از k عدد فازی مثلثی دیگر نیز، از رابطه‌ی شماره‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$V(M_1 \geq M_r, \dots, M_K) = V(M_1 \geq M_r), \dots, V(M_1 \geq M_K) \quad \text{رابطه‌ی (۸)}$$

برای محاسبه‌ی وزن شاخص‌ها در ماتریس مقایسه‌ی زوجی، به صورت رابطه‌ی شماره‌ی ۹ عمل می‌شود:

$$W'(X_i) = \text{Min}\{V(S_i \geq S_k)\}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad k \neq i \quad \text{رابطه‌ی (۹)}$$

بنابراین، بردار وزن^۱ شاخص‌ها، به صورت رابطه‌ی شماره‌ی ۱۰ خواهد بود:

$$W'(X_i) = [W'(C_1), W'(C_r), \dots, W'(C_n)]^T \quad \text{رابطه‌ی (۱۰)}$$

که همان بردار ضرایب نابهنجار روش تحلیل سلسله مراتبی فازی است. به کمک رابطه‌ی شماره‌ی ۱۱، نتایج نابهنجار به دست آمده از رابطه‌ی شماره‌ی ۱۰، بهنجار^۲ می‌شوند. نتایج بهنجار شده‌ی حاصل از رابطه‌ی شماره‌ی ۱۱ را با W نشان می‌دهند.

1.Weight Vector

2.Normalized

$$W_i = \frac{w'_i}{\sum w'_i} \quad \text{رابطه‌ی (۱۱)}$$

یافته‌های تحقیق

گام اول: شناسایی عوامل مؤثر در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

نخستین مرحله در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی، شناسایی عوامل مؤثر در آن است. برای دستیابی به این عوامل، پس از مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی مطالعات انجام‌شده‌ی پیشین (قنوتی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Sinha et al, 2008؛ Zhang et al, 2002) و با نظر متخصصان تکمیل و شناسایی شدند. شکل شماره‌ی ۲ ساختار سلسله‌مراتبی از این عوامل را نشان می‌دهد.

گام دوم: تدوین فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تعیین وزن معیارها

به منظور استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، گام اول ارائه‌ی ساختار سلسله‌مراتبی است (شکل شماره‌ی ۲). در این بررسی، مقایسات تصمیم‌گیرنده با واژه‌های زبان‌شناسی توصیف شده‌اند که با اعداد فازی مثلثی بیان می‌شوند. مقایسه‌ی اهمیت شاخص و زیرشاخص‌ها با استفاده از پرسش‌نامه انجام شده است. پاسخ‌هایی که از پرسش‌نامه‌ها جمع‌آوری می‌شوند، ورودی مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی هستند. بنابراین، بر اساس روابطی که در خصوص این مدل بیان شد، وزن‌های عوامل مؤثر در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی تعیین و در جدول شماره‌ی ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. وزن‌های نهایی برای هر کدام از معیارها و زیرمعیارها با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

الویت‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی									هدف
پوشش زمینی			هیدرواقلم			زمین‌شناسی		معیار	
۰/۱۵۹۲			۰/۲۳۸۴			۰/۱۷۴۰		وزن	
گروه هیدرولوژیک خاک	کاربری اراضی	شیب	فاصله از آبراهه	زمان تمرکز	تراکم شبکه‌ی زهکشی	بارش	نفوذپذیری	سنگ‌شناسی	زیرمعیار
۰/۶۸۳۳	۰/۳۱۶۷	۰/۲۳۸۴	۰/۲۱۸۶	۰/۱۶۶۹	۰/۲۷۷۷	۰/۳۳۶۷	۰/۵	۰/۵	وزن زیرمعیارها
۰/۱۰۸۸	۰/۰۵۰۴	۰/۲۳۸۴	۰/۰۹۳۶	۰/۰۷۱۵	۰/۱۱۹	۰/۱۴۴۳	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷	وزن نهایی (نرمال شده)

گام سوم: مدل‌سازی فضایی و پهنه‌بندی منطقه

یکی از مهم‌ترین توانایی‌های GIS که آن را به‌عنوان سیستمی ویژه و انحصاری مجزا می‌کند، توانایی تلفیق داده‌ها برای مدل‌سازی، مکان‌یابی و تعیین تناسب اراضی، از طریق ارزش‌گذاری پهنه‌ی سرزمین است؛ زیرا در نتیجه‌ی تلفیق و

ترکیب معیارها، بهترین نقطه برای استقرار مراکز و مکان‌های بهینه انتخاب می‌شود (پوراحمد و همکاران، ۱۳۸۶: ۳۴). برای پهنه‌بندی حوزه، میزان عضویت فازی برای عوامل سنگ‌شناسی، نفوذپذیری، تراکم شبکه‌ی زهکشی، زمان تمرکز، شیب، گروه هیدرولوژیک خاک و کاربری اراضی، به صورت گسسته (جدول‌های شماره‌ی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷) با توجه به نظر کارشناسان تعیین شد. در خصوص عامل بارش، مدل رگرسیون خطی بین متوسط بارندگی سالانه و ارتفاع هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی (رابطه‌ی شماره‌ی ۱۲) برقرار و با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) این رابطه به کل سطح تعمیم داده شد و نقشه‌ی بارش حوزه به دست آمد.

$$y = 0.1013x + 86.84R^2 = 0.9207 \quad \text{(رابطه‌ی ۱۲)}$$

در ادامه با توجه به اثرگذاری مستقیم عامل بارش در ایجاد سیلاب، از تابع عضویت فازی زیر (رابطه‌ی شماره‌ی ۱۳) استفاده و نقشه‌ی فازی این عامل تهیه شد.

$$f(x) = (x - x_{min}) / \Delta x \quad x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad \text{(رابطه‌ی ۱۳)}$$

همچنین در خصوص عامل فاصله از آبراهه با توجه به اثرگذاری معکوس این عامل در ایجاد سیلاب، از تابع عضویت فازی زیر (رابطه‌ی شماره‌ی ۱۴) استفاده شد و نقشه‌ی فازی این عامل به دست آمد.

$$f(x) = (x_{max} - x) / \Delta x \quad x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad \text{(رابطه‌ی ۱۴)}$$

نقشه‌ی فازی هر کدام از عوامل در وزن‌های به دست آمده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی ضرب شد (شکل شماره‌ی ۵). در پایان، نقشه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی با عملگر جمع جبری فازی (رابطه‌ی شماره‌ی ۱۵) که حساسیت بیشتری نسبت به سایر عملگرهای فازی در شناسایی مناطق در معرض خطر دارد، تهیه شد (شکل شماره‌ی ۶).

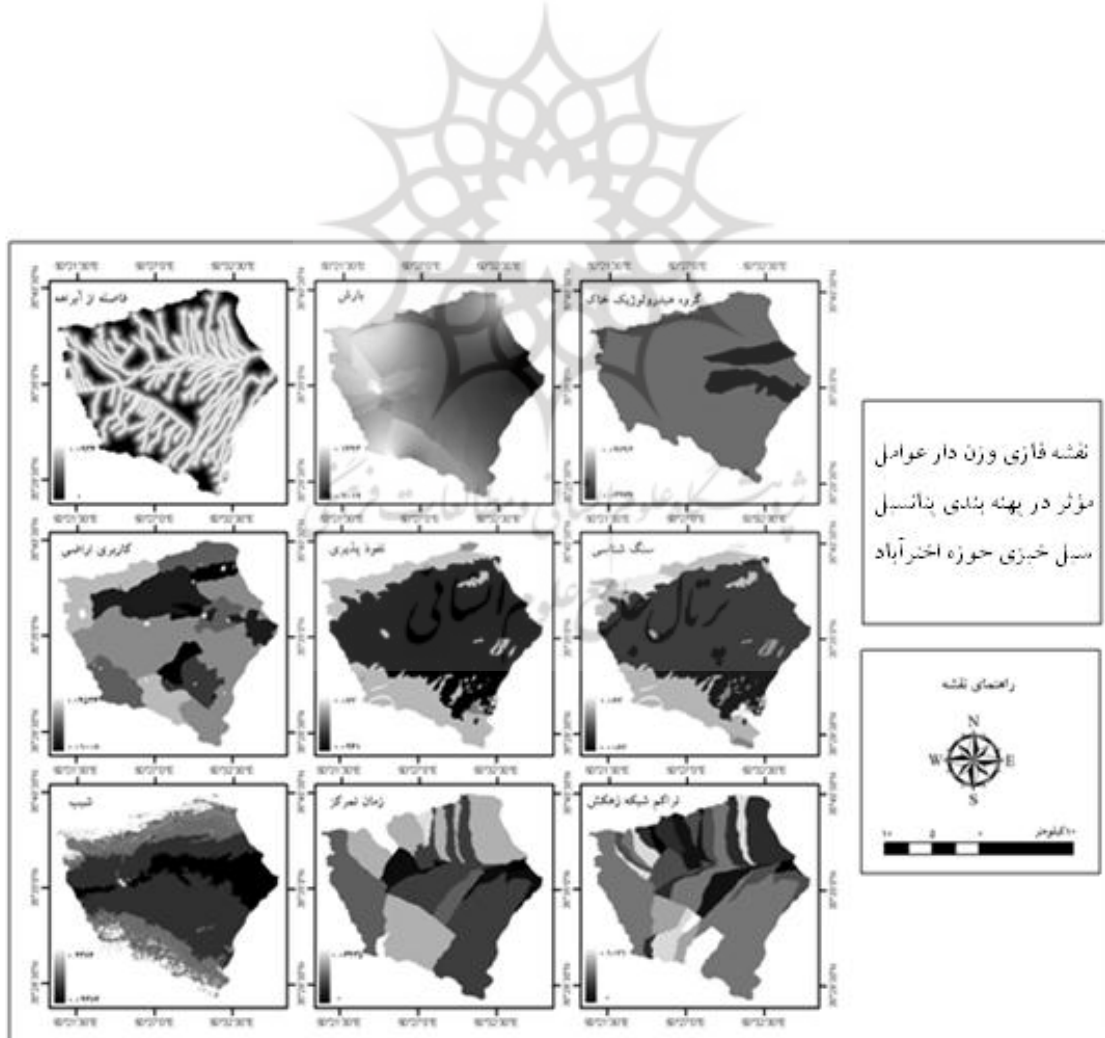
$$\mu_{Combination} = 1 - \left(\prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right) \quad \text{(رابطه‌ی ۱۵)}$$

در این رابطه، (μ_i) تابع عضویت فازی برای i امین لایه‌ی اطلاعات و n تعداد لایه‌های اطلاعات وارد شده در مدل است.

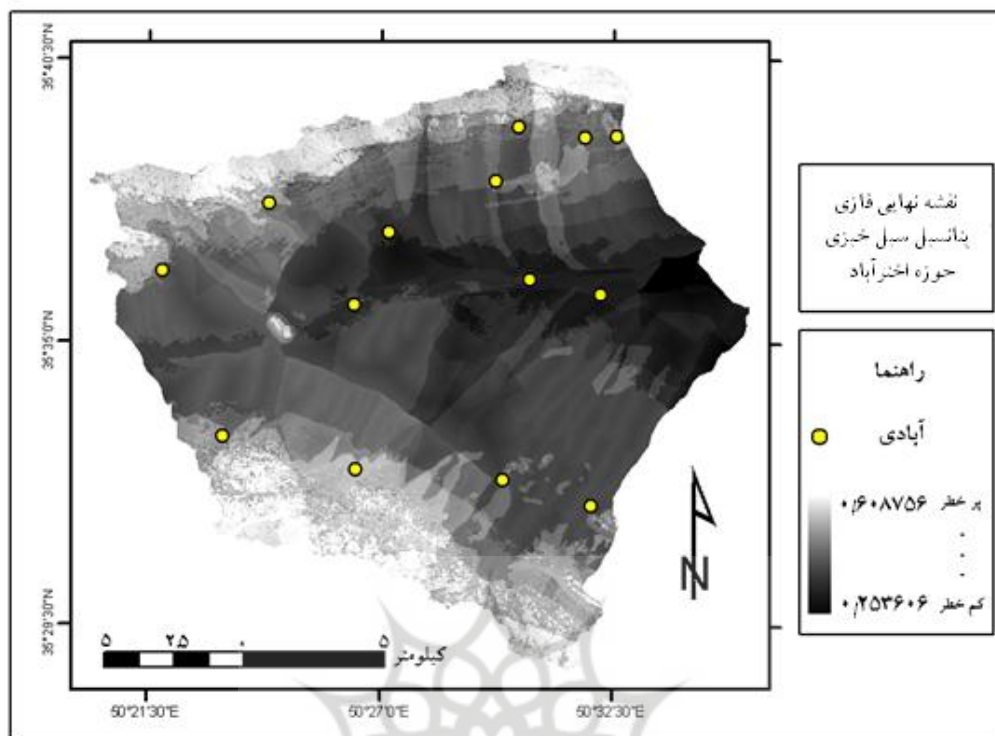
برای طبقه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌ی اخترا‌آباد، نقشه‌ی نهایی به دست آمده از منطقه، بر اساس انحراف معیار، در هفت کلاس قرار گرفت (شکل شماره‌ی ۷). کلاس ۱ با توجه به پتانسیل بیشتر در ایجاد سیلاب، به عنوان پرخطرترین کلاس و کلاس‌های دیگر، به ترتیب در درجه اهمیت پایین‌تری قرار گرفتند. لایه‌ی آبادی‌های حوزه، جهت رتبه‌بندی آنها در برابر خطر سیلاب، روی نقشه‌ی نهایی قرار گرفت که نتایج آن در جدول شماره‌ی ۹ آمده است. همچنین مساحت هر یک از پهنه‌ها به لحاظ پتانسیل ایجاد سیلاب، در جدول شماره‌ی ۱۰ بیان شده است.

جدول ۹. رتبه‌بندی آبادی‌های موجود در حوزه‌ی اختراآباد در برابر خطر سیلاب

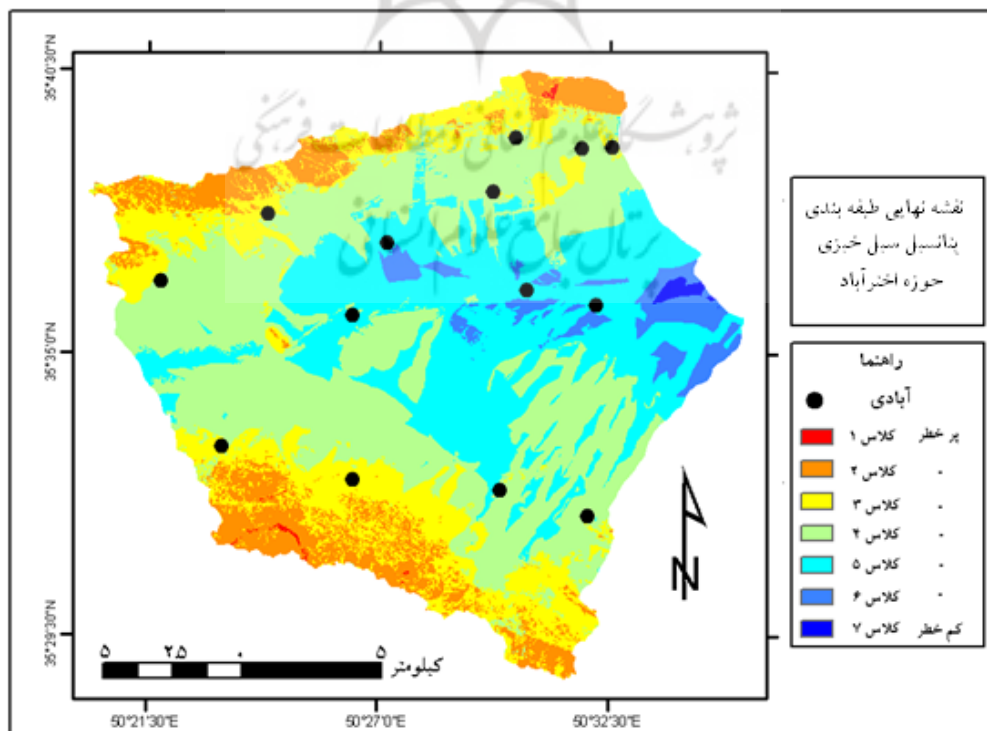
اولویت	نام آبادی	عضویت فازی	کلاس	اولویت	نام آبادی	عضویت فازی	کلاس
۱	قرخلو	۰/۵۲	۳	۸	قره ترپاق	۰/۴۲۲	۴
۲	گوی بلاغ	۰/۵۷۸	۳	۹	ابراهیم آباد	۰/۴۱۱۵	۴
۳	قمشلو	۰/۴۷۷۷	۳	۱۰	ورآباد	۰/۴۰۵۳	۴
۴	بیلفتو	۰/۴۷۶۱	۳	۱۱	موسی لو	۰/۴	۵
۵	محمدآباد	۰/۴۵۴۷	۴	۱۲	صفی آباد	۰/۳۶۹	۵
۶	مزرعه‌ی حاجی آباد	۰/۴۳۴۳	۴	۱۳	امیرآباد	۰/۳۸۷	۵
۷	آغ‌قویی	۰/۴۲۷	۴	۱۴	کشت و صنعت دشت جاوید	۰/۳۶۸۱	۵



شکل ۵. نقشه‌ی فازی وزن‌دار هر کدام از عوامل مؤثر در تعیین پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌ی اختراآباد



شکل ۶. نقشه‌ی نهایی فازی پتانسیل سیل خیزی حوزه‌ی اختراآباد با عملگر جمع فازی



شکل ۷. نقشه‌ی طبقه‌بندی پتانسیل سیل خیزی حوزه‌ی اختراآباد بر اساس انحراف معیار

جدول ۱۰. مساحت هر یک از کلاس‌های سیل‌خیزی در حوزه اختراآباد

کلاس خطرپذیری	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
کلاس ۱	۳۸/۸	۰/۱۳
کلاس ۲	۳۳۲۲/۵۶	۱۰/۷۹
کلاس ۳	۵۵۲۰/۴۵	۱۷/۹۳
کلاس ۴	۱۲۱۳۱	۹۳/۴۱
کلاس ۵	۸۴۷۶/۲۷	۲۷/۵۳
کلاس ۶	۱۱۹۹/۹۸	۳/۹
کلاس ۷	۹۶/۲۲	۰/۳۱

کلاس ۱ پرخطرترین و کلاس ۷ کم خطرترین.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با شناسایی عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی و با استفاده از ترکیب فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP) و عملگر جمع جبری فازی، مدلی را برای پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز ارائه کرده است. با مدل مورد نظر، حوزه‌ی آبخیز اختراآباد از لحاظ پتانسیل سیل‌خیزی، در ۷ کلاس پهنه‌بندی شد. کلاس ۱ و ۲ که پتانسیل بسیار زیادی در تولید رواناب دارند، با دارا بودن حدود ۱۰/۹۲ درصد مساحت حوزه، بیشتر در نواحی کوهستانی واقع شده‌اند که به سبب شیب زیاد، زمان تمرکز، نفوذپذیری و پوشش گیاهی کم، توان زیادی در تولید رواناب دارند. کلاس ۳ و ۴ که نواحی با پتانسیل زیاد و متوسط را از لحاظ سیل‌خیزی نشان می‌دهند، بیشتر در قسمت دامنه‌ای و دشتی حوزه با مساحتی حدود ۵۷/۳۴ درصد واقع شده‌اند. کلاس ۵ تا ۷ با پتانسیل سیل‌خیزی نسبتاً کم تا کم با ۳۱/۷۴ درصد از مساحت حوزه، بیشتر در مرکز حوزه قرار گرفته‌اند (جدول شماره ۹). در این پهنه‌ها با افزایش زمان تمرکز، کاهش شیب، افزایش نفوذپذیری و پوشش گیاهی، سرعت جریان آب کم شده و توان تولید رواناب کمتری را از خود نشان می‌دهند. تاکنون روش‌های مختلفی با استفاده از مدل‌های گوناگون برای پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز به کار گرفته شده است. در این پژوهش تلاش شد تا مجموعه‌ی کاملی از عوامل مؤثر در سیل‌خیزی (سنگ‌شناسی، نفوذپذیری، تراکم شبکه‌ی زهکشی، زمان تمرکز، شیب، گروه هیدرولوژیک خاک، کاربری اراضی، بارش و فاصله از آبراهه) در برابر پژوهش‌های مشابه دیگر ارائه شود. این در حالی است که در پژوهش‌های مشابه، مانند سینها و همکاران (۲۰۰۸) از عوامل ارتفاع، پوشش زمین، طول آبراهه‌ی فعال، پوشش گیاهی و تراکم جمعیت؛ بختیاری‌کیا و همکاران (۲۰۱۱) از عوامل بارش، شیب، ارتفاع، زمان تمرکز، خاک‌شناسی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی؛ کین و همکاران (۲۰۱۱) از عوامل زمین‌شناسی، شدت بارش، فراوانی سیلاب، ژئومورفولوژی و پوشش گیاهی؛ قنواتی و همکاران (۱۳۹۰) از عوامل تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه، بارش، انحنای پروفیل، انحنای پلانیمتریک، شیب، لندفرم، کاربری اراضی و زمین‌شناسی، برای پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، ویلت و همکاران (۱۹۹۱)، ژانگ و همکاران

(۲۰۰۲)، سینها و همکاران (۲۰۰۸) و قنواتی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از روش AHP که به موجب سادگی آن در اجرا و قابلیت آن در مقایسه و مدل‌سازی پدیده‌ها، حتی با واحدهای اندازه‌گیری متفاوت در پهنه‌بندی‌های مختلف به کار می‌رود، اقدام به تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی کرده‌اند. این در حالی است که وقتی تصمیم‌گیرنده با یک مسأله‌ی غیرقطعی و پیچیده روبه‌رو می‌شود و قضاوت‌های مقایسه‌ای خود را به صورت نسبت‌های غیرقطعی مانند "در حدود دو برابر مهم‌تر" و "بین دو تا چهار برابر کم‌اهمیت‌تر" بیان می‌کند، گام‌های AHP استاندارد و به خصوص رویکرد اولویت‌بندی بردار ویژه، نمی‌توانند به عنوان رویه‌های درست در نظر گرفته شوند (طالبی و ملاطیافه، ۱۳۹۰: ۳۹). در حالی که روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مورد استفاده در این پژوهش در مقایسه با روش AHP، به دلیل استفاده از مجموعه‌های فازی، سازگاری بیشتری با توضیحات زبانی و گاه مبهم انسانی دارد و در صورت انتخاب متخصصان تقریباً هم سطح و با دانش و تخصص کافی در این مورد، می‌توان به نتایج قابل قبول‌تری دست یافت. علاوه بر این، استفاده از عملگرهای فازی با توجه به ترکیب قابل انعطاف‌تر خود در برابر سایر روش‌های تلفیق موجود در زمینه‌ی پهنه‌بندی، نتایج مناسبی را در پی داشته است و می‌تواند نتایج نزدیک‌تر به واقعیتی را ارائه دهد.

در پایان و به عنوان پیشنهاد عملی از نتایج این پژوهش، توصیه می‌شود هرگونه تغییر کاربری اراضی، برنامه‌ریزی و مدیریت و نیز، فعالیت‌های بیولوژیک یا مکانیکی در حوزه‌ی مورد پژوهش، بر اساس نقشه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی تهیه‌شده انجام شود.

منابع

- آرمان، نسیم. ۱۳۸۵، **کالیبره کردن ضریب زبری مانینگ در بازه‌ای از رودخانه‌ی کرج و تجزیه و تحلیل آن با نرم‌افزار HEC-RAS**. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه احیای مناطق خشک و بیابانی، استاد راهنما: علی سلاجقه، دانشگاه تهران.
- احمدی، حسن. ۱۳۸۹، **ژئومورفولوژی کاربردی: فرسایش آبی**، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- امیدوار، کمال. ۱۳۹۰، **مخاطرات طبیعی**، چاپ اول، انتشارات دانشگاه یزد، یزد.
- امیدوار، کمال؛ کیان‌فر، آمنه و عسکری، شمس‌ا... ۱۳۸۹، **پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه کنجانچم**، فصلنامه‌ی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره‌ی ۷۲، صص. ۷۳-۹۰.
- پوراحمد، احمد؛ حبیبی، کیومرث؛ زهرایی، سجاد محمد و نظری عدلی، سعید. ۱۳۸۶، **استفاده از الگوریتم‌های فازی و GIS برای مکان‌یابی تجهیزات شهری (مطالعه‌ی موردی: محل دفن زباله‌ی شهر بابلسر)**، فصلنامه‌ی محیط‌شناسی، شماره‌ی ۴۲، صص. ۳۱-۴۲.
- خسروانجم، داود؛ الهی، شعبان؛ چاوشینی، رسول و شایان علی. ۱۳۹۰، **نقش فناوری اطلاعات در طراحی و پیاده‌سازی مدیریت دانش در مخابرات با تکنیک AHP فازی**، مجله‌ی مدیریت صنعتی دانشکده‌ی علوم انسانی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، شماره‌ی ۱۷، صص. ۵۹-۷۱.

- صفری، علیرضا. ۱۳۸۰، **تعیین الگوی مدیریت بهینه در دشت‌های سیلابی**، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، گروه احیای مناطق خشک و بیابانی، استاد راهنما: محمد مهدوی، دانشگاه تهران.
- طالبی، داود و ملاطیفه، فاطمه. ۱۳۹۰، **رویکرد ارزیابی و انتخاب عرضه‌کنندگان در طول زنجیره‌ی تأمین با استفاده از تکنیک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و برنامه‌ریزی خطی چند هدفه فازی (مطالعه‌ی موردی: مرکز بهمن موتور)**، مجله‌ی چشم‌انداز مدیریت صنعتی، شماره ۲، صص. ۴۲-۲۷.
- عالم تبریز، اکبر و محمد باقرزاده، آذر. ۱۳۸۸، **تلفیق ANP فازی و TOPSIS تعدیل شده برای گزینش تأمین‌کننده‌ی راهبردی**، پژوهش‌های مدیریت، دوره‌ی ۲، شماره ۳، صص. ۱۸۱-۱۴۹.
- عطائی، محمد. ۱۳۸۹، **تصمیم‌گیری چند معیاره فازی**، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ اول، شاهرود.
- علیزاده، امین. ۱۳۸۵، **اصول هیدرولوژی کاربردی**، چاپ بیستم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
- فرج زاده، منوچهر و نصرتی، عبدا.. ۱۳۸۳، **پهنه‌بندی حساسیت سیل‌خیزی حوضه‌ی آبریز گاوه‌رود با استفاده از GIS**، نشریه‌ی تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۳، صص. ۵۸-۴۹.
- قنوتی، عزت ا..؛ کرم، امیر و آقاعلیخانی، مرضیه. ۱۳۹۰، **کارایی روش تحلیل سلسله‌مراتبی در مطالعات سیل‌خیزی**، فصلنامه‌ی جغرافیا، شماره‌ی ۳۱، صص. ۲۷۵-۲۵۵.
- مؤمنی، منصور. ۱۳۹۰، **مباحث نوین تحقیق در عملیات**، ناشر مؤلف، چاپ اول، تهران.
- مهدوی، محمد. ۱۳۷۱، **هیدرولوژی کاربردی**، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- مهندسان مشاور داورپناه. ۱۳۸۹، **مطالعات مرحله‌ی تفضیلی - اجرایی آبخیزداری حوضه‌ی آبریز اختراآباد شهریار: مطالعات فرسایش و رسوب**، جلد هشتم، اداره‌ی کل منابع طبیعی تهران.
- مهندسان مشاور داورپناه. ۱۳۸۹، **مطالعات مرحله‌ی تفضیلی - اجرایی آبخیزداری حوضه‌ی آبریز اختراآباد شهریار: مطالعات فیزیوگرافی و توپوگرافی**، جلد اول، اداره‌ی کل منابع طبیعی تهران.
- مهندسان مشاور داورپناه. ۱۳۸۹، **مطالعات مرحله‌ی تفضیلی - اجرایی آبخیزداری حوضه‌ی آبریز اختراآباد شهریار: مطالعات خاک‌شناسی و قابلیت اراضی**، جلد چهارم، اداره‌ی کل منابع طبیعی تهران.
- مهندسان مشاور داورپناه. ۱۳۸۹، **مطالعات مرحله‌ی تفضیلی - اجرایی آبخیزداری حوضه‌ی آبریز اختراآباد شهریار: مطالعات پوشش گیاهی**، جلد ششم، اداره‌ی کل منابع طبیعی تهران.
- یمانی، مجتبی و عنایتی، مریم. ۱۳۸۴، **ارتباط ویژگی‌های ژئومورفولوژیک حوضه‌ها و قابلیت سیل‌خیزی (تجزیه و تحلیل داده‌های سیل از طریق مقایسه‌ی ژئومورفولوژیک حوضه‌های فشند بهجت‌آباد)**، فصلنامه‌ی پژوهش‌های جغرافیایی، شماره‌ی ۵۴، صص. ۵۷-۴۷.

- Alam Tabriz, A., Bagherzade Azar, M., 2002, **Combining Fuzzy ANP and Modified TOPSIS for Supplier Selection Strategy**, Journal of Management Research, Vol. 3, No.2, PP. 149-181.
- Alizadeh, A., 2006, **Principles of Applied Hydrology**, Astane Ghodse Razavi Press, Mashhad.
- Arman, N., 2006, **Calibration of Manning Coefficient in Among of Karaj River and its Analysis by Using HEC-RAS Software**, Master's Dissertation, Department of Arid and Desert Reclamation, University of Tehran.
- Atai, M., 2010, **Fuzzy Multi-Criteria Decision Making**, Shahrood Industrial University Press, Shahrood.
- Bakhtyari Kia, M., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A., Sulaiman, W. & Moradi, A., 2011, **An Artificial Neural Network Model for Flood Simulation Using GIS: Johor River Basin, Malaysia**, Journal of Environ Earth Sciences, Vol. 67, No. 1, PP. 251-264
- Chang, D., 1996, **Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP**, European Journal of Operational Research, No. 95, PP. 649-655.
- Cook, A., Venkatesh, M., 2009, **Effect of Topographic Data, Geometric Configuration and Modeling Approach on Flood Inundation Mapping**, Journal of Hydrology, No. 337, PP. 131-142.
- Davarpanah Consulting Engineers, 2010, **Detailed & Executive Watershed Studies of Akhtar Abad Watershed in Shahriyar, Physiographic and Topographic Studies**, Vol. 1.
- Davarpanah Consulting Engineers, 2010, **Detailed & Executive Watershed Studies of Akhtar Abad Watershed in Shahriyar, Soil and Land's Capability Studies**, Vol. 4.
- Davarpanah Consulting Engineers, 2010, **Detailed & Executive Watershed Studies of Akhtar Abad Watershed in Shahriyar, Vegetation Studies**, Vol. 6.
- Davarpanah Consulting Engineers, 2010, **Detailed & Executive Watershed Studies of Akhtar Abad Watershed in Shahriyar, Erosion and Sedimentation Studies**, Vol. 8.
- Farajzadeh, M., Nosrati, A., 2004, **The Zonation of Gavrood Watershed's Flood Sensitivity by Using of GIS**, Journal of Geography Science, No. 3, PP. 49-58.
- Ghanavati, E., Karam, A. & Aghalijan, M., 2012, **Flood Risk Zonation in the Farahzad Basin (Tehran) Using AHP Model**, Journal of Iranian Geographical Association, No. 31, PP.255-275.
- Horritt, M., Bates, P., 2002, **Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation**, Journal of Hydrology, No. 268, PP.87-99.
- Khosravanjam, D., Elahi, Sh., Chavoshini, R. & Shayan, A., 2011, **The Role of Information Technology in the Designing and Implementation of Knowledge Management in Communication Administration by Using Fuzzy AHP Techniques**, Journal of Industrial Management, No. 17, PP. 59-71.
- Laarhoven, V. & Pedrycz, W., 1983, **a Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory**, Journal of Fuzzy Sets and Systems, No. 11, PP. 229-241.

- Levy, J.K., 2005, **Multiple Criteria Decision Making and Decision Support Systems for Flood Risk Management**, Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, No. 19, PP. 438-447.
- Mahdavi, M., 1991, **The Applied Hydrology**, University of Tehran Press, Tehran.
- Momeni, M., 2010, **New Topics in Operations Research**. University of Tehran Press, Tehran.
- Omidvar, K., Kianfar, A., Asgari, Sh., 2010, **Zoning the Flood-Producing Potentials of Konjancham Basin**, Physical Geography Research Quarterly, No. 72, PP. 73-90.
- Omidvar, K., **Natural Hazards**, 2011, Yazd University Press, Yazd.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M. & Blazkova, S., 2005, **Uncertainty in the Calibration of Effective Roughness Parameters in HEC-RAS Using Inundation and Downstream Level Observations**, Journal of Hydrology, No. 302, PP. 46-69.
- Purahmad, A., Habibi, K., Zahrai, S., Nazari, S., 2007, **Using Fuzzy Algorithms and GIS for Urban Equipment's Site Selection (Case Study: Babolsar City's Landfill)**, Journal of Environmental Studies Quarterly, No. 42, PP. 31-42.
- Qin, Q., Tang, H., Chen, H., 2011, **Zoning of Highway Flood-Triggering Environment for Highway in Fuling District, Chongqing**, Journal of the International Society for Optical Engineering, No. 8205, PP. 820530-8.
- Safari, A., 2001, **Determining of the Optimal Management Pattern in Flood Plains**, Master's Dissertation, Department of Arid and Desert Reclamation, University of Tehran.
- Sanyal, J. & Lu, X., 2004, **Application of Remote Sensing in Flood Management with Special Reference to Monsoon Asia: A Review**, Journal of Natural Hazards, No. 33, PP. 283-301.
- Sinha, R., Bapalu, G., Singh, L. & Rath, B., 2008, **Flood Risk Analysis in the Kosi River Basin, North Bihar Using Multi-Parametric Approach of Analytical Hierarchy Process (AHP)**, Journal of Indian Soc. Remote Sens., No. 36, PP. 335-349.
- Talebi, D. & Mulla Tayefeh, F., 2011, **Supplier Evaluation and Selection Approach Along the Supply Chain Via Fuzzy Analytical Hierarchy Process Weighted Fuzzy Multiple-Objective Linear Programming (the Case Study of Bahman Motor Center)**, Journal of Industrial Management Perspective, No. 2, PP. 27-42.
- Todini, E., 1999, **An Operational Decision Support System for Flood Risk Mapping: Forecasting and Management**, Journal of Urban Water, No. 1, PP. 131-143.
- Wang, Y., Colby, J. & Mulcahy, K., 2002, **An Efficient Method for Mapping Flood Extent in a Coastal Floodplain Using Landsat TM and DEM data**, International Journal of Remote Sensing, No. 23, PP. 3681-3696.
- Willett, K., Sharda, R., 1991, **Using the Analytic Hierarchy Process in Water Resources Planning: Selection of Flood Control Projects**, Journal of Socio-Economic Planning Sciences, No. 25, PP. 103-112.

- Yamani, M. & Enayati, M., 2006, **Geomorphologic Characteristics and Related Capability Watershed Flood Hazard**, Journal of Geography Research Quarterly, No. 54, PP. 47-57.
- Zhang, J., Okada, N., Tatano, H. & Hayakawa, S., 2002, **Risk Assessment and Zoning of Flood Damage Caused by Heavy Rainfall in Yamaguchi Prefecture**, Journal of Flood Defence, No. 42, P. 162-169.



Flood Hazard Zoning in Watershed Scale using Fuzzy Logic
(Case study: Akhtar Abad Watershed)

Malekian A.

Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran

Oftadegan Khuzani A. *

M.A. in Climatology, Faculty of Geography, University of Tehran

Ashurnejad Q.

M.A. in GIS & Remote Sensing, Faculty of Geography, University of Tehran

Received: 05/08/2012

Accepted: 05/02/2013

Extended Abstract

Introduction

Flood, as one of natural disasters, causes considerable damages in almost all parts of the world including Iran. Therefore, watershed prioritization is a practical useful tool which provides relevant information in the flood prevention planning. Floods cause severe damages in terms of both natural environments and human lives, making the hydrologists and water resources managers to be concerned with estimating the potential risk associated with these events. Recent trends in storm-water best management practices are aimed at finding and focusing on high potential flood generation in parts of a watershed. In order to prevent flood occurrence, it is essential to find out the areas of the watershed where the potential of runoff generation is high and how to use and incorporate available information to improve prioritization process. Such a process is vital to support the decision making and watershed monitoring, modeling, and management. It also helps in reducing the set up and running cost and improves efficiency. For example, it is usually time consuming and costly to set up a monitoring station in each sub-basin when a watershed consists of a large number of sub-basins. For this purpose, Akhtar Abad Watershed was chosen as a case study for flood potential zoning based on the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). The watershed has an area of 30785.28 ha which is located in the southwestern part of Alborz province and northern part of Markazi province. Over the last years, floods have resulted severe damage to the infrastructure and human life losses in this region.

Methodology

The analytic hierarchy process (AHP) is one of the most commonly used methods of assessment which works on a premise that decision making of complex problems can be handled by structuring the complex problem into a simple and comprehensible hierarchical structure. Despite of its wide range of applications, the conventional AHP approach may not fully reflect a

style of human thinking, in which human's judgments are represented as exact numbers. However, in many practical situations, decision makers usually feel more confident to give interval judgments rather than expressing their judgments in the form of exact numeric values. Therefore, AHP technique involves subjectivity in pair-wise comparisons and vagueness and uncertainty dominate in this process. Combining AHP into the fuzzy system brings the triangular fuzzy number of the fuzzy set theory directly into the pair-wise comparison matrix of the AHP. The purpose is to solve vague problems, which occur during the analysis of criteria and the judgment process. FAHP should be able to tolerate vagueness or ambiguity, and should thus be more appropriate and effective than conventional AHP in real practice. In order to find out the most relevant factor in flood occurrence potential, a literature review was conducted and the suggested criteria was adjusted based on the expert's ideas and geographical facts of the region. Then, each criterion was weighted based on a paired questionnaire and Fuzzy AHP approach. A fuzzy set is a class of objects with continuous grades of membership which represents the degree of truth as an extension of valuation. Fuzzy sets generalize classical sets while the indicator functions of these sets are special cases of the membership functions of fuzzy sets for the latter only take values 0 or 1. This classification approach is able to categorize the sub-basins and identify the ones which can sufficiently represent the watershed characteristics in a reduced number in terms of their runoff generation potential. A fuzzy set operation is an operation on fuzzy sets, which are a generalization of crisp set operations. The most widely used operations are called standard fuzzy set operations, which include unions, complements, and intersections. Fuzzy set theory has been introduced into classification to help reflect uncertain information. Then Fuzzy functions were considered for spatial modeling and zoning based on the membership function of each factor. Finally, the most prone areas of the watershed to flooding were mapped.

In order to find out the potential areas, weights of each factor and sub factors were determined based on questionnaire and membership function of each responsible factor. Then fuzzy map of the each factor was incorporated to have the flood zoning map based on the most susceptible fuzzy operator. In this way, the final map was classified into seven classes based on standard deviation.

Results and Discussion

The developed FAHP system in this research is able to meet the needs of more efficient and reliable approaches for watershed classification to deal with complex and uncertain features. The results showed that the most prone areas are located in the north and south of the region while the most part of the region is in the class 4 of moderate flooding potential. The overlaid maps showed that the most susceptible areas are mostly located in areas of more than 60 percent of slope and annual precipitation range of 300-400 mm.

Conclusion

Watershed prioritization is the ranking of different sub-watersheds according to the order in which they have to be taken for treatment and flood control measures. According to the resulted map of flooding potential, the most prone areas are located in the north and south of the region where land slope is relatively high which increases runoff travel time and decrease time of

concentration. Meanwhile, increased precipitation means higher potential of flooding in terms of higher runoff potential. Application of Analytical Hierarchy Process with Fuzzy logic shows better adjustment with human explanation of the environment and could provide better and flexible results compared to other overlaying approaches.

Keywords: *Zoning, Flooding Potential, Fuzzy Logic, Fuzzy Analytical Hierarchy Process, Akhtar Abad Watershed.*

