

بررسی و مقایسه کارایی روش‌های FAHP و GCA برای مکان‌یابی پخش سیلاب در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز گربایگان)

حسنعلی فرجی سبکیار - دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
سیروس حسن پور* - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران
علی عزیزی - دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت و برنامه‌ریزی محیط زیست، دانشگاه تهران
آرش ملکیان - استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
سید کاظم علوی پناه - استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۷/۲۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۰۲/۲۱

چکیده

اولین و مهم‌ترین گام در انجام پروژه طرح پخش سیلاب، مکان‌یابی مناطق مستعد برای پخش آب و نفوذ دادن آن به داخل سفره‌های زیرزمینی است. در این راستا استفاده از سامانه‌های اطلاعات مکانی (GIS)، برای تعیین مناطق مستعد پخش سیلاب بدون استفاده از سامانه تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مقدور نیست. در این پژوهش ابتدا سه شاخص شامل شیب، ارتفاع، هدایت الکتریکی، قابلیت انتقال، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، تراکم شبکه زهکشی، زمین‌شناسی و ضخامت آبرفت که در مکان‌یابی پخش سیلاب مؤثرند با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS تبدیل به لایه‌های اطلاعاتی شده و پس از آن کلاس‌بندی شدند. سپس با روش خوشه‌بندی خاکستری (GCA)، تمام داده‌های ناقص یا گسسته به اعداد خاکستری برای بالا بردن کیفیت تحلیل و ارزش‌گذاری (وزن‌دهی) اطلاعات و داده‌ها تبدیل شدند. همچنین برای بالا بردن دقت پهنه‌بندی و تحلیل مقایسه‌ای، از دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی - فازی (AHP) و روش خوشه‌بندی خاکستری (GCA) استفاده شد. در نهایت بر اساس هر روش، نقشه نهایی حوضه تهیه و به پنج کلاس کاملاً مناسب، مناسب، متوسط، نامناسب، کاملاً نامناسب پهنه‌بندی شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که روش خوشه‌بندی خاکستری در مورد پهنه‌بندی مناطق مستعد پخش سیلاب، دقیق‌تر از روش تحلیل سلسله‌مراتبی - فازی (FAHP) بوده و همچنین نتایج حاصل از کاربرد این دو روش، نشان‌دهنده قرارگیری مناطق مستعد در واحدهای کواترنری Qb، Qscg، Qsc، PLQb، Qc2 است.

کلیدواژه‌ها: پخش سیلاب، (GIS)، حوضه آبخیز گربایگان دشت فسا، FAHP، نظریه سیستم خاکستری.

مقدمه

یکی از روش‌های بهره‌برداری از سیلاب، استفاده از روش پخش آن بر آبخوان‌هاست (Mahdavi, 2005). پخش سیلاب روی مخروط‌افکنه واقع در دهانه خروجی آبراهه‌ها با هدف ذخیره‌سازی سیلاب‌ها، روشی مناسب برای بهره‌برداری از آب خشک رودها، رودخانه‌های فصلی و همچنین جریان مازاد رودخانه‌های دائمی است. تعیین مکان‌های مناسب برای عملیات پخش سیلاب، از اهمیت بسیاری در میزان موفقیت آن برخوردار است (Mehrvarz, 2005). شناسایی مناطق سیل‌خیز و پخش سیلاب در اراضی مستعد بالادست، نه تنها به تغذیه مصنوعی آبخوان‌های حوضه منجر می‌شود، بلکه به افزایش کیفیت حاصلخیزی خاک هم کمک می‌کند (Alesheikh, 2002). در این پژوهش مکان‌یابی پخش سیلاب با تأکید بر منطق روش سیستم خاکستری، به‌ویژه روش تحلیل و خوشه‌بندی خاکستری (GCA)^۱ و فرایند سلسله‌مراتبی تحلیل فازی در محیط GIS^۲ مورد نظر است. توانایی GIS در ذخیره اطلاعات، تجزیه و تحلیل آنها، انجام محاسبات مورد نیاز و نمایش آنها به صورت نقشه‌های دقیق، جداول و نمودارها در مدت زمان کوتاه، آن را در جایگاه ویژه‌ای قرار داده است (Aronoff, 1996, 313). قرار گرفتن حوضه آبخیز گریباگان در دشت فسای استان فارس که یکی از نواحی مساعد با دشت‌های وسیع و اراضی مسطح برای فعالیت‌های کشاورزی است، این منطقه را مستعد پهنه‌بندی پخش سیلاب می‌کند. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی این حوضه آبخیز، تغذیه مصنوعی آبخوان در این منطقه بسیار ضروری و مهم است. طراحی ایستگاه پخش سیلاب نوین بر اساس تحلیل داده‌های کمی و کیفی برپایه روش‌های نوین (مانند روش فازی، نظریه سیستم خاکستری) و طراحی روش شناسی، می‌تواند یکی از طرح‌های پژوهشی مطرح کشور باشد و به‌عنوان دیدگاهی نو در برنامه‌ریزی و کنترل منابع آب و خاک معرفی شود. استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای تعیین مناطق مستعد پخش سیلاب، بدون استفاده از روش‌های مفهومی و سیستم‌های تصمیم‌گیرنده چند معیاره (MCDM)^۳ با محدودیت‌های زیادی همراه است (خسروشاهی و دادرسی، ۲۰۰۸). از آنجاکه داده‌های مورد استفاده برای مکان‌یابی از قطعیت لازم برخوردار نیستند و روش‌های جاری نیز راه‌حل کاملی برای آنها ندارند، این پرسش مطرح می‌شود که چگونه می‌توان از چنین داده‌هایی استفاده کرد؟ نظریه سیستم خاکستری (GST)^۴ روش خوشه‌بندی خاکستری در بررسی و تحلیل داده‌های ناقص یا گسسته برای افزایش دقت در مکان‌یابی از کارایی زیادی برخوردار است. یکی از اصول کلی مراحل پژوهش این است که نوع روش به کار گرفته شده می‌بایستی با خصوصیت‌های شاخص‌های انتخاب شده همخوانی داشته باشد. در بسیاری از موارد، هرچه عوامل مرتبط بیشتری برای مدل انتخاب شوند، دقت آن بالاتر خواهد بود. از سویی افزایش عوامل و داده‌ها هزینه الگوسازی‌ها را افزایش می‌دهد و آن را پیچیده‌تر می‌کند (دادرسی سبزواری، ۱۳۸۰)، از سوی دیگر، به دلیل وجود داشتن خطای انسانی یا ابزاری در اندازه‌گیری شاخص‌های محیطی، داده‌های مورد استفاده برای مکان‌یابی به دلیل ناقص بودن یا گسسته بودن، از قطعیت لازم برخوردار نیستند. در اینجا پرسشی مطرح می‌شود که آیا می‌توان با به‌کارگیری روش‌های پیچیده ریاضی خاص

1. Gray Clustering Analysis (GCA)
2. Geographical Information System (GIS)
3. Multi Criteria Decision Making (MCDM)
4. Gray System Theory (GST)

همانند مجموعه‌های فازی و خاکستری، شیوه‌ای ترکیبی در به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از داده‌های ناقص یا گسسته برای افزایش دقت مدل سازی استفاده کرد؟ در این پژوهش با هدف مقایسه مدل ترکیبی (FAHP)^۱ با مدل جدید تحلیل‌گر خاکستری در تصمیم‌گیری انتخاب مکان‌های مستعد برای پخش سیلاب، بر اساس انتخاب مؤثرترین معیارها، شناسایی کاربردی‌ترین مدل و همچنین معرفی یک تحلیل‌گر نوین داده‌ها، با عنوان تحلیل‌گر داده‌های ناقص یا ناپیوسته با روش تحلیل‌گر خاکستری، از روش سیستم خاکستری استفاده شده است.

در این پژوهش، به‌کارگیری نظریه سیستم خاکستری و مقایسه آن با مدل ترکیبی فرایند سلسله‌مراتبی تحلیل AHP^۲ و فازی (FAHP) Fuzzy در بخش آب و خاک، به‌منظور مکان‌یابی و شناسایی مکان‌های مستعد برای پخش سیلاب انجام گرفته است. در زمینه پخش سیلاب با روش‌های مختلف در سطح جهانی و داخلی، پژوهش‌های زیادی انجام شده است که می‌توان به این موارد اشاره کرد.

قرمز چشمه و غیومیان (۱۳۷۹) به مکان‌یابی مناطق مستعد پخش سیلاب با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه شیب، نفوذپذیری سطحی، قابلیت انتقال، واحدهای کواترنری با استفاده از روش‌های فازی و مفهومی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در منطقه میمه اقدام کردند. دادرسی سبزواری (۱۳۸۷)، به بررسی مناطق مستعد برای پخش سیلاب با کاربرد روش‌های مفهومی و با استفاده از روش منطق بولین، روش شاخص همپوشانی و روش فازی در سطح شش شهرستان از استان خراسان رضوی پرداخته است. آل شیخ و همکاران نیز در سال ۱۳۸۱، اقدام به مکان‌یابی عرصه‌های مستعد برای پخش سیلاب با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی در زیرحوضه آبخیز سمل از حوضه آبخیز اهرم بوشهر اقدام کرده است. این مطالعه به‌منظور تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها برای مدیریت اراضی و فرسایش خاک انجام گرفته است. حامدپناه و همکاران (۱۳۷۹)، برای تعیین مناطق مناسب پخش سیلاب با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و تصاویر ماهواره‌ای، از نقشه‌های شیب، ژئومورفولوژی، گروه‌های هیدروژیک خاک و کاربری اراضی در حوضه آبخیز طغرود استان قم استفاده کردند.

صراف (۱۹۹۸)، در ناحیه مادیا پراوش^۳، نواحی مرکزی هند، مکان‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها را تعیین کرده‌اند و از فنون سنجش از دور (RS) در استخراج برخی از نقشه‌ها، مانند کاربری اراضی، پوشش گیاهی، ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی و تلفیق آنها با سایر لایه‌های اطلاعاتی مانند نقشه شیب برای مکان‌یابی استفاده کردند. زهتابیان و همکاران (۲۰۰۱) به‌منظور تعیین مناطق مناسب برای پخش سیلاب با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و تصاویر ماهواره‌ای در حوضه آبخیز طغرود استان قم، از نقشه‌های شیب، ژئومورفولوژی، گروه‌های هیدروژیک خاک و کاربری اراضی استفاده کردند. آنها برای تلفیق این نقشه‌ها از روش‌های دووجهی، شاخص ترکیبی، فازی استفاده کردند.

1. Fuzzy Analytic Hierarchy Processes

2. Analytic Hierarchy Processes

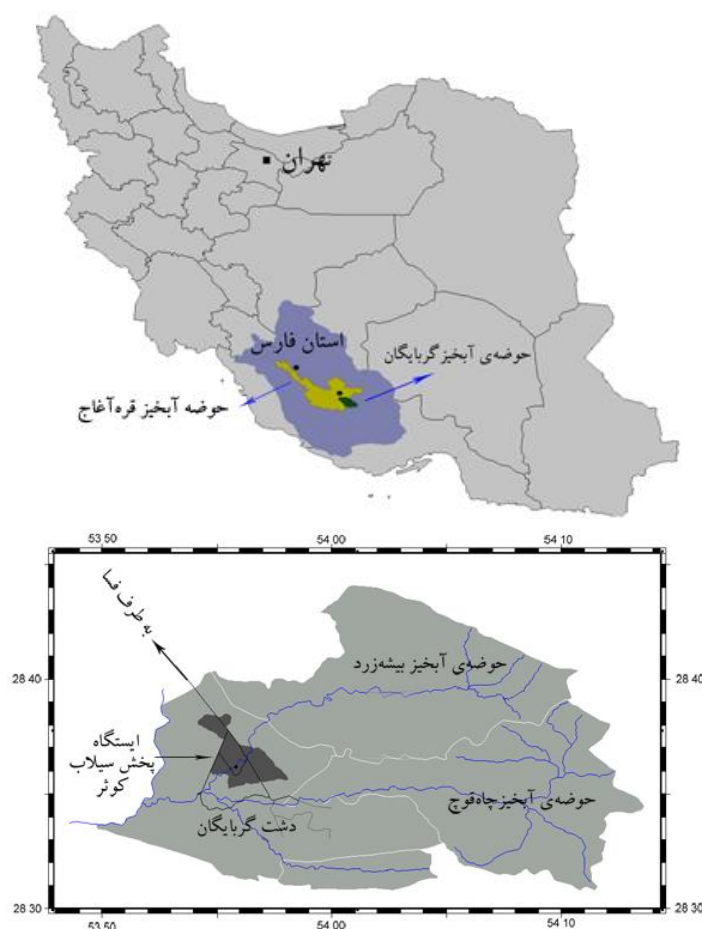
3. Madia Peravesh

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، نخست به جمع‌آوری و مطالعه منابع علمی و کتابخانه‌ای اقدام شد. سپس با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای لندست ETM^+ سال ۲۰۰۹ و داده‌های آماری، لایه‌های رقومی لازم منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

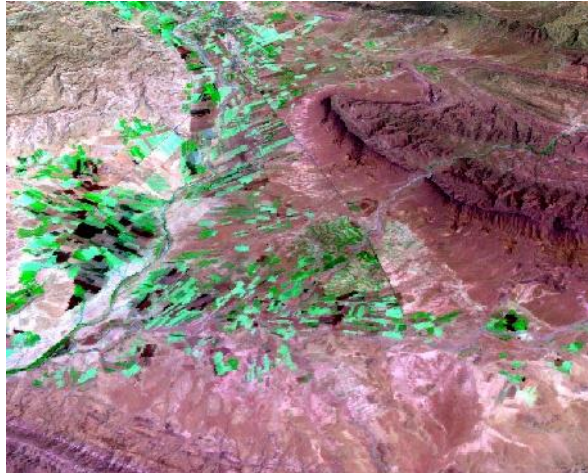
معرفی گستره مورد مطالعه

منطقه گریایگان فسا (شکل ۱) بین طول‌های شرقی $53^{\circ} 53'$ تا $53^{\circ} 57'$ و عرض‌های شمالی $28^{\circ} 35'$ تا $28^{\circ} 41'$ و ارتفاع ۱۱۲۰ تا ۱۱۶۰ متر از سطح دریا، در ۱۹۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز، روی مخروط افکنه‌ای کم‌عمق تا به نسبت عمیق به وجود آمده است (مرکز آمار ایران ۱۳۸۵). منطقه گریایگان بخشی از ناحیه زاگرس چین‌خورده در جنوب غربی ایران است. در این منطقه آثاری از سازندهای زمین‌شناسی دوران اول و دوم دیده نشده و تنها سازندهای دوران سوم و چهارم زمین‌شناسی در منطقه گسترش دارند (علایی طالقانی، ۱۳۸۱: ۲۳۶). تصاویر مورد نیاز این منطقه از سنجنده ETM^+ ماهواره لندست به شماره ۱۷۴-۴۴ تهیه شده است (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت دشت گریایگان در استان فارس

از این تصاویر می‌توان برای استخراج نقشه‌های مورد نیازی که موجود نیستند استفاده کرد. همچنین برای تهیه مدل رقومی ارتفاع (DEM) مورد نیاز این مطالعه، از تصاویر ماهواره لندست استفاده شده است.



شکل ۲. تصویر ماهواره ای ETM⁺ از حوضه آبریز گربایگان - فارس

در این پژوهش، نه شاخص و معیار مؤثر در پهنه‌بندی پخش سیلاب، از منابع مختلفی گردآوری و استخراج شده‌اند که در ادامه به هر یک از آنها اشاره می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. نمایش دیاگرام شاخص‌ها و معیارهای مورد مطالعه در مکان‌یابی پخش سیلاب

شیب: برای تهیه نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاع، مستخرج از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری، استفاده شد (بر حسب درصد است).

کیفیت آب - مؤلفه‌های هدایت الکتریکی (EC): برای محاسبه کیفیت آب، از تعداد بیست چاه مشاهده‌ای، طی یک دوره ده‌ساله نمونه‌برداری شده است. این نمونه‌ها را تجزیه شیمیایی شدند و میانگین آنها محاسبه شد. از این طریق یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های کیفیت آب، یعنی EC تحلیل شد. سپس نقشه هدایت الکتریکی (EC) از طریق درون‌یابی به‌دست آمد (واحد میکروموس بر سانتی‌متر مربع).

زمین‌شناسی: مناطقی با آبرفت‌های جوان، مناطق مناسبی برای پخش سیلاب هستند. برای تهیه این لایه اطلاعاتی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی استفاده شد (فاقد واحد متریک است).

طبقات ارتفاعی: برای ایجاد نقشه طبقات ارتفاعی، نخست نقشه توپوگرافی حوضه مطالعاتی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ که از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده بود، در محیط Arc GIS9.3.3 زمین مرجع و خطوط ارتفاعی روی آن رقومی شد. سپس با تهیه (DEM) منطقه و بستن مرز حوضه با استفاده از نرم‌افزار Aer Hydro روی نقشه و رتبه‌بندی آن، نقشه طبقاتی ارتفاعی به دست آمد (واحد طبقات ارتفاعی بر حسب متر).

ضخامت آبرفت: برای تهیه نقشه ضخامت آبرفت خشک، نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی به کار رفت که با استفاده از عمق آب زیرزمینی در چاه‌های پیژومتری و انطباق نقشه‌های تراز و توپوگرافی تهیه شده بود. برای این امر نخست نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی رقومی و پس از آن درون‌یابی خطی شده و نقشه ضخامت آبرفت به دست آمد (واحد بر حسب متر).

کاربری اراضی: برای تهیه نقشه کاربری اراضی پهنه مطالعاتی از تصویر سال ۲۰۰۹ سنجنده TM ماهواره لندست استفاده شد (فاقد واحد متریک است).

قابلیت انتقال: قابلیت انتقال یا ضریب آب‌گذری، قابلیت عبور آب را در تمام ضخامت لایه آبدار نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، هدایت هیدرولیکی آبخوان در منطقه مورد مطالعه از طریق آزمایش پمپاژ به دست آمد (واحد m^2/day).

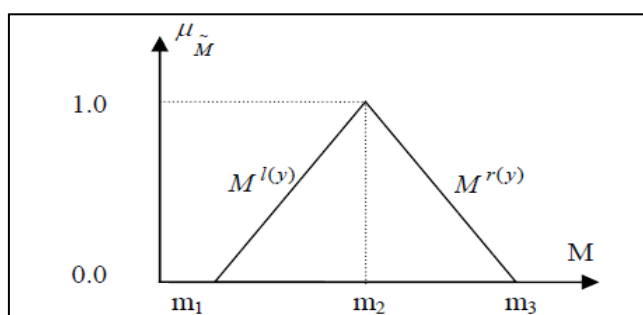
ژئومورفولوژی: از دیدگاه ژئومورفولوژیکی، گستره مطالعاتی، شامل (۱) دشت سیلابی؛ (۲) مخروط‌افکنه‌ها؛ (۳) تپه‌ماهور؛ (۴) رخنمون سنگی و (۵) پدیمت‌ها است (فاقد واحد متریک است).

تراکم زهکشی: نسبت طول تمام آبراهه‌ها در یک حوضه آبخیز به مساحت آن، تراکم آبراهه نامیده می‌شود. $\mu = \frac{\sum L_i}{A}$ که در آن L، طول هر یک از آبراهه‌های حوضه (km) و A برابر با مساحت حوضه (km^2) آبریز است (واحد بر حسب km^2).

روش FAHP

مهم‌ترین دلایل استفاده از روش فازی یا ترکیبی فازی و فرایند سلسله مراتبی تحلیل فازی (FAHP) نسبت به کلاسیک فرایند سلسله مراتبی تحلیل آن است که در روش کلاسیک فرایند سلسله مراتبی تحلیل، اعتبار مقایسه‌های دوبه‌دوی انجام گرفته، توسط اعداد قطعی بیان می‌شد (Saaty, 1980). حال اینکه بسته به شرایط، نظرات کارشناسان همیشه نمی‌تواند حالت قطعی و دقیق داشته باشد که این عدم قطعیت را می‌توان با منطق فازی نشان داد (Jiang & Eastman, 2000; Bellman & Zadeh, 1970). از سوی دیگر نتایج مقایسه‌ها در روش AHP، به‌خصوص در مطالعات فضایی که شرایط زمانی و مکانی مطرح است، همواره دچار خطای تورش است. به‌طور دقیق‌تر، در مطالعه حاضر اگر به جای روش FAHP از روش AHP استفاده می‌شد، مقایسه‌ی دو شاخص از میان شاخص‌های موجود به یک اندازه بود. در صورتی که همواره این چنین نیست، یک شاخص بسته به شرایط زمانی و مکانی، می‌تواند اهمیت کمتر یا بیشتری از شاخص دیگر داشته باشد. در حقیقت آنچه منطق فازی انجام می‌دهد، تبدیل دانش بشری در چارچوب روابط ریاضی است. در روش AHP که پروفیسور ساعتی آن را ارائه کرده است، دو نوع فازی بودن تعریف می‌شود: یکی فازی بودن در درک پدیده‌ها و دیگری فازی بودن در معنا که وابسته به عملکرد پدیده‌ها است. در روش FAHP به‌طور

مستقیم از اعداد فازی استفاده نمی‌شود، بلکه فازی بودن به طور غیرمستقیم از نسبت‌های a_{ij} توأم با یک ساختار رده‌ای استفاده می‌کند (Van Laarhoven & Pedrycz 1983; Jankowski, 1995). روش AHP در سال ۱۹۸۳ به این شکل گسترش یافت که برای مثال اگر گزینه‌ی A_1 بر گزینه‌ی A_2 ارجحیت داشته باشد، آنگاه بر اساس $A_{12} = \frac{w_1}{w_2}$ ، ممکن است به‌طور تقریبی ۳ بر یک، ۵ بر یک، یا بین ۶ بر یک تا ۸ بر یک بیان شود (Saaty, 1980). این نوع تقریب می‌تواند بر مبنای اعداد فازی مثلثی یا دوزنقه‌ای بیان شود. به‌طور کلی بیان نسبت فازی مثلثی به‌صورت زیر (شکل ۴) است (Boenderet et al, 1989).



شکل ۴. اعداد فازی مثلثی

اعداد فازی مثلثی با سه عدد قطعی (m_1, m_2, m_3) بیان می‌شوند. مقادیر به‌ترتیب کمترین مقدار، مقدار ممکن و بیشترین مقدار ممکن هستند که عضویت آنها به‌صورت رابطه شماره ۱ بیان می‌شود:

$$\mu(x/\tilde{M}) = \begin{cases} 0, & x < m_1 \\ (x - m_1)/(m_2 - m_1), & m_1 \leq x \leq m_2 \\ (m_3 - x)/(m_3 - m_2), & m_2 \leq x \leq m_3 \\ 0, & x > m_3 \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

به‌طور کلی اگر دو عدد فازی مثلثی به قرار زیر داشته باشیم، عملیات ضروری جمع و ضرب و معکوس آنها به‌گونه روابط زیر خواهد بود:

$$(m_1, m_2, m_3) + (m'_1, m'_2, m'_3) = (m_1 + m'_1, m_2 + m'_2, m_3 + m'_3) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$(m_1, m_2, m_3) * (m'_1, m'_2, m'_3) = (m_1 * m'_1, m_2 * m'_2, m_3 * m'_3) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$(m_1, m_2, m_3)^{-1} = (1/m_3, 1/m_2, 1/m_1) \quad \text{رابطه (۴)}$$

البته یادآوری می‌شود که حاصل جمع یا ضرب دو عدد فازی مثلثی، دیگر یک عدد فازی مثلثی نیست و این روابط فقط تقریبی از حاصل ضرب واقعی دو عدد فازی مثلثی و معکوس یک عدد فازی مثلثی را بیان می‌کنند. به‌طور کلی روش FAHP شامل الگوریتم‌های متنوعی است (Buckley, 1985). در سال ۱۹۸۳ دو محقق هلندی به نام‌های پدريش و فن

لارهوون روشی را برای فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی پیشنهاد کردند که بر پایه روش حداقل مجزورات لگاریتمی بود، اما پیچیدگی مراحل این روش سبب شد که چندان مورد استفاده قرار نگیرد. در سال ۱۹۹۶ روش دیگری با عنوان روش تحلیل توسعه‌ای^۱ از سوی یک محقق چینی به نام چانگ^۲ ارائه شد. اعداد مورد استفاده در این روش، اعداد مثلثی فازی هستند. مفاهیم و تعاریف FAHP، بر اساس روش تحلیل توسعه‌ای تشریح می‌شود (روابط چانگ). در روش تحلیل توسعه‌ای برای هر یک از سطرها ماتریس تصمیم‌گیری، مقدار S_k که خود یک عدد فازی مثلثی است، به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود (Chang, 1992; Buckley, 1985).

$$\sum_{j=1}^n m_{kj} * \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n m_{ij} \right] \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه بالا k بیانگر شماره سطر و i و j به ترتیب نشان‌دهنده گزینه‌ها و شاخص‌ها هستند. در روش تحلیل توسعه‌ای، پس از محاسبه S_k ها، باید درجه بزرگی آنها را نسبت به هم به دست آورد. به طور کلی اگر M_α و M_β دو عدد فازی مثلثی باشند، درجه بزرگی M_α بر M_β که با $V(M_\alpha \geq M_\beta)$ نشان داده می‌شود، به صورت رابطه شماره ۶ تعریف می‌شود:

$$hgt(M_\alpha \cap M_\beta) = \frac{m_\beta - \hat{m}_\alpha}{(m_\beta - \hat{m}_\alpha) + (\hat{m}_\beta - m_\alpha)} \quad \text{رابطه ۶}$$

به میزان احتمال بزرگی یک عدد فازی مثلثی از k عدد فازی مثلثی دیگر نیز از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$V(m_1 \geq m_2, \dots, m_k) = V(m_1 \geq m_2), \dots, V(m_1 \geq m_k) \quad \text{رابطه ۷}$$

برای محاسبه وزن شاخص‌ها در ماتریس تصمیم‌گیری به صورت رابطه زیر عمل می‌شود:

$$\hat{W}(x_i) = \text{Min} \{V(S_i \geq S_{kr})\}, k = 1, 2, 3, \dots, n, k \neq i \quad \text{رابطه ۸}$$

بنابراین، بردار وزنی^۳ شاخص‌ها به صورت رابطه ۹ خواهد بود:

$$\hat{W}(x_i) = [\hat{W}(c_1), \hat{W}(c_2), \hat{W}(c_3), \dots, \hat{W}(c_n)]^T \quad \text{رابطه ۹}$$

در مرحله آخر به کمک رابطه شماره ۱۰ از طریق نرمال‌سازی بردار وزنی نرمال شاخص‌ها را محاسبه می‌کنیم:

$$W(x_i) = [W(c_1), W(c_2), W(c_3), \dots, W(c_n)]^T \quad \text{رابطه ۱۰}$$

نتایج نرمال شده حاصل از رابطه ۱۱ که شامل اعداد غیر فازی خواهد بود، W نامیده می‌شود (Chang, 1992 & 1996).

مجموعه معادلات توابع عضویت فازی

ابتدا لایه‌ها و سپس کلاس‌های طبقاتی هر یک از معیارها با استفاده از توابع عضویت و بر اساس معادلات توابع عضویت به اعداد فازی تبدیل شده، آنگاه با استفاده از عبارات زبانی، مقایسه مطلوبیت فازی به صورت اعداد فازی برای مدل FAHP در نظر گرفته می‌شود (جدول ۱) (Chen & Pham, 2001).

جدول ۱. مقایسه مطلوبیت فازی در نظر گرفته شده برای مدل FAHP

(۱/۹ ، ۱/۹ ، ۱/۷)	AXP	بسیار نامطلوب
(۱/۹ ، ۱/۷ ، ۱/۵)	AUSP	بسیار نامطلوب تا کمی نامطلوب
(۱/۷ ، ۱/۵ ، ۱/۳)	ASP	کمی نامطلوب
(۱/۵ ، ۱/۳ ، ۱)	AMP	کمی نامطلوب تا مطلوبیت یکسان
(۱ ، ۱ ، ۱)	EP	مطلوبیت یکسان
(۱ ، ۳ ، ۵)	MP	مطلوبیت یکسان تا مطلوبیت زیاد
(۳ ، ۵ ، ۷)	SP	مطلوبیت زیاد
(۵ ، ۷ ، ۹)	VSP	مطلوبیت زیاد تا مطلوبیت خیلی زیاد
(۷ ، ۹ ، ۹)	XP	مطلوبیت خیلی زیاد

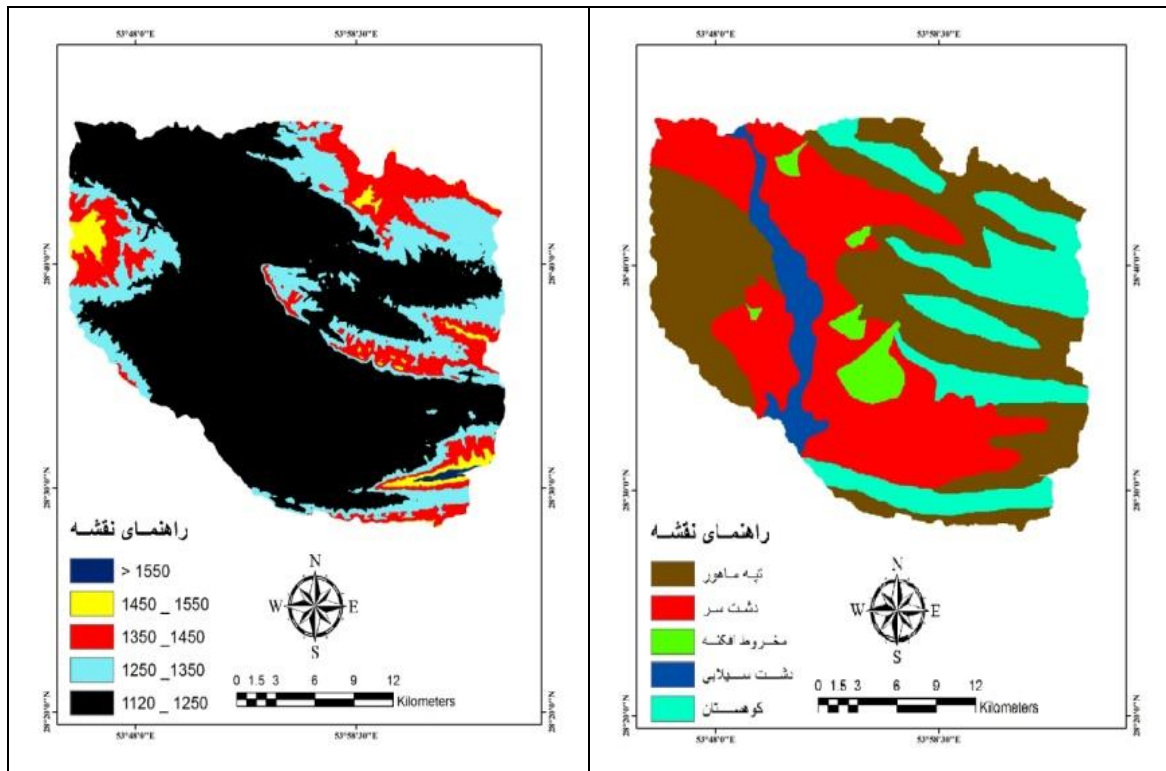
منبع: نگارندگان برگرفته از (Ghodsipour, 2006; Deng, 1999).

نقشه لایه‌ها و طبقات پارامترها بر اساس روش FAHP در محیط GIS

پس از تهیه کردن لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز مرتبط با اهداف پژوهش حاضر، این لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS به فرمت رستری با پیکسل سایز 30×30 تبدیل شد. سپس با به دست آوردن ارزش فازی لایه‌های اطلاعاتی (جدول ۲) و طبقات معیارها، از طریق محاسبات ریاضی و تعیین حدود فازی بودن لایه‌ها، اوزان نهایی به صورت عددی که ارزشی بین صفر تا یک را دارند در محیط نرم‌افزار GIS روی تک تک معیارها اعمال شد و خروجی معیارها به صورت نقشه بر اساس ارزش لایه‌ها به دست آمد. در این فرایند داده‌های مورد استفاده برای مکان‌یابی که قبل از فازی کردن به صورت گسسته بوده و از قطعیت لازم برخوردار نبودند، با استفاده از منطق فازی و روش خوشه‌بندی خاکستری (GCA) تبدیل به داده‌های پیوسته شدند. در واقع منطق فازی و GCA راه‌حلی برای تبدیل کردن داده‌های گسسته به داده‌های پیوسته است. در نقشه‌های حاصل، هر پیکسل دارای ارزشی بین (۰ تا ۱) به صورت اعداد فازی هستند (به صورت پیوسته). در این راستا هر لایه هر قدر وزن نهایی بیشتری داشته باشد، دارای ارزش بیشتری است. به گفته‌ی دیگر، هر چه ارزش لایه یا زیر لایه اطلاعاتی به یک نزدیکتر باشد، ارزش بیشتری داشته، برای پخش سیلاب مناسب‌تر است (مالچفسکی، ۱۹۹۹). بعد از تبدیل نقشه‌های اولیه (اشکال ۵ تا ۱۳) به نقشه‌های فازی لایه‌ها با استفاده از روش جمع وزنی با هم ترکیب شدند و در نهایت نقشه نهایی به دست آمد (شکل ۱۴).

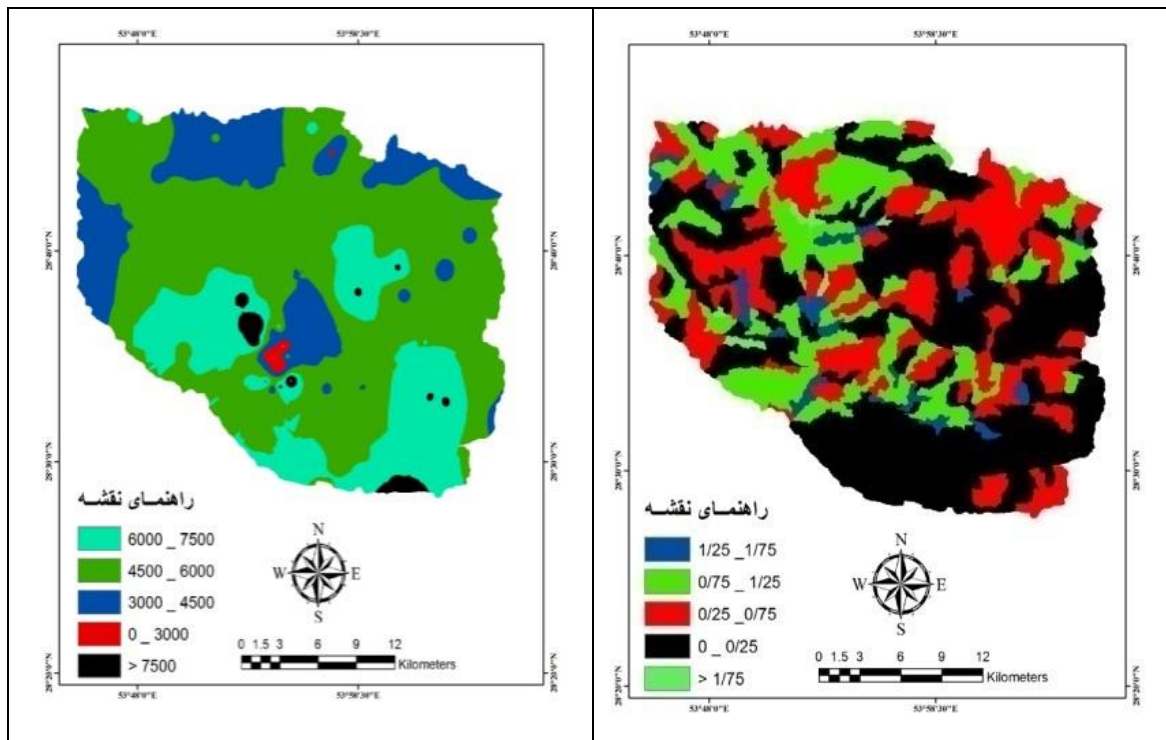
جدول ۲. ماتریس وزن‌های پارامترها با استفاده از روش مثلثی فازی FAHP

پارامتر	شیب	ضخامت آبرفت	هدایت الکتریکی	زمین‌شناسی	ژئومورفولوژی	کاربری اراضی	تراکم زهکشی	قابلیت انتقال	ارتفاع	وزن نسبی
شیب	(۱،۱۱)	(۲،۵۳)	(۵،۹۷)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۹،۹۷)	(۵،۹۷)	(۵،۳۱)	(۹،۷۵)	(۹،۹۷)	۰/۱۶۹۸
ضخامت آبرفت	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۵،۳۱)	(۵،۳۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۹،۷۵)	۰/۱۵۷۷
هدایت الکتریکی	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۵،۹۷)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۹،۷۵)	(۹،۷۵)	۰/۱۳۷۸
زمین‌شناسی	(۱،۳۵)	(۵،۹۷)	(۱،۳۵)	(۱،۱۱)	(۹،۷۵)	(۹،۷۵)	(۹،۷۵)	(۱،۳۵)	(۹،۹۷)	۰/۱۷۹۹
ژئومورفولوژی	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۳۵)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۵،۳۱)	۰/۱۳۲۵
کاربری اراضی	(۱/۹،۱/۱،۷/۵)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۱،۱۱)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۵،۳۱)	۰/۰۸۹۰
تراکم زهکشی	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۵۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۵،۳۱)	(۵،۳۱)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۹،۷۵)	۰/۱۳۳۶
قابلیت انتقال	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۵،۳۱)	(۵،۷۹)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۹،۷۵)	(۵،۹۷)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۱۱)	(۵،۳۱)	۰/۱۱۹۵
ارتفاع	(۱/۱،۹/۱،۹/۷)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۹/۱،۹/۷)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۱،۱۱)	(۱،۱۱)	۰/۰۷۳۳
پارامتر	شیب	ضخامت آبرفت	هدایت الکتریکی	زمین‌شناسی	ژئومورفولوژی	کاربری اراضی	تراکم زهکشی	قابلیت انتقال	ارتفاع	وزن نسبی
شیب	(۱،۱۱)	(۲،۵۳)	(۵،۹۷)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۹،۹۷)	(۵،۹۷)	(۵،۳۱)	(۹،۷۵)	(۹،۹۷)	۰/۱۶۹۸
ضخامت آبرفت	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۵،۳۱)	(۵،۳۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۹،۷۵)	۰/۱۵۷۷
هدایت الکتریکی	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۵،۹۷)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۹،۷۵)	(۹،۷۵)	۰/۱۳۷۸
زمین‌شناسی	(۱،۳۵)	(۵،۹۷)	(۱،۳۵)	(۱،۱۱)	(۹،۷۵)	(۹،۷۵)	(۹،۷۵)	(۱،۳۵)	(۹،۹۷)	۰/۱۷۹۹
ژئومورفولوژی	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۳۵)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۵،۳۱)	۰/۱۳۲۵
کاربری اراضی	(۱/۹،۱/۱،۷/۵)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۱،۱۱)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۵،۳۱)	۰/۰۸۹۰
تراکم زهکشی	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۵۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۵،۳۱)	(۵،۳۱)	(۱،۱۱)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۹،۷۵)	۰/۱۳۳۶
قابلیت انتقال	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۵،۳۱)	(۵،۷۹)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۹،۷۵)	(۵،۹۷)	(۱/۱،۵/۱،۳)	(۱،۱۱)	(۵،۳۱)	۰/۱۱۹۵
ارتفاع	(۱/۱،۹/۱،۹/۷)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۹/۱،۹/۷)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۱/۱،۷/۱،۵/۳)	(۱/۱،۹/۱،۷/۵)	(۱،۱۱)	(۱،۱۱)	۰/۰۷۳۳



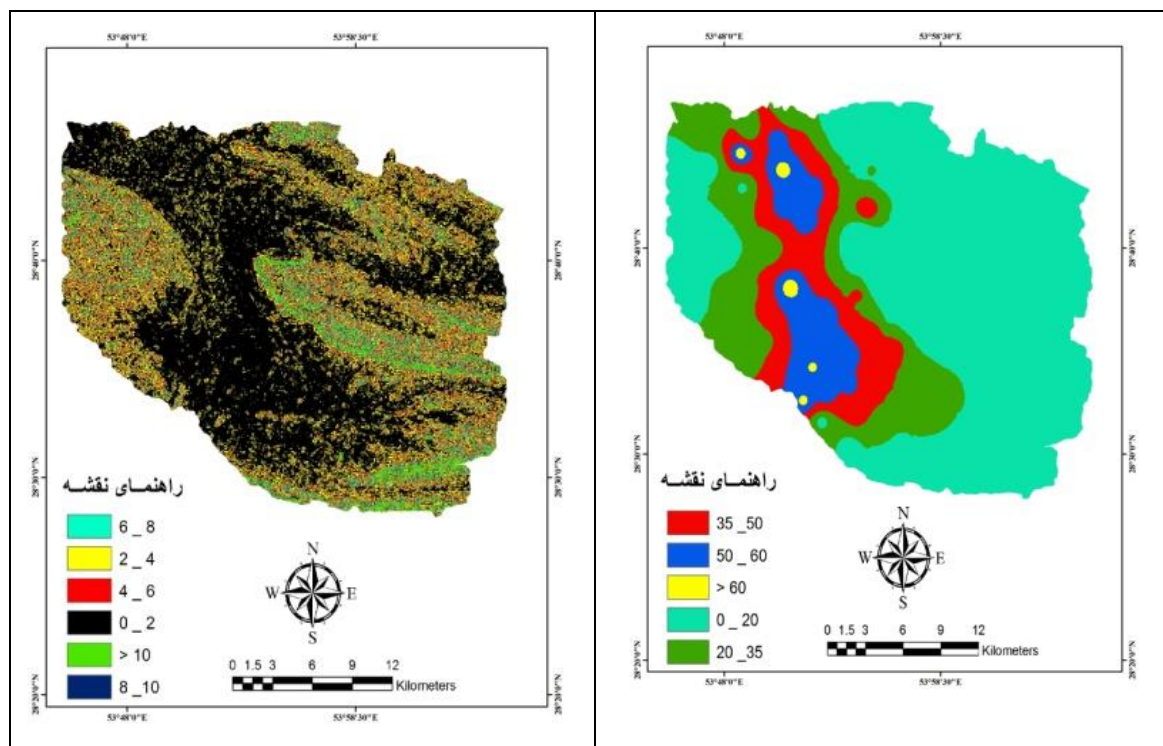
شکل ۶. نقشه طبقات ارتفاع (m)

شکل ۵. نقشه تراکم شبکه زهکشی (km²)



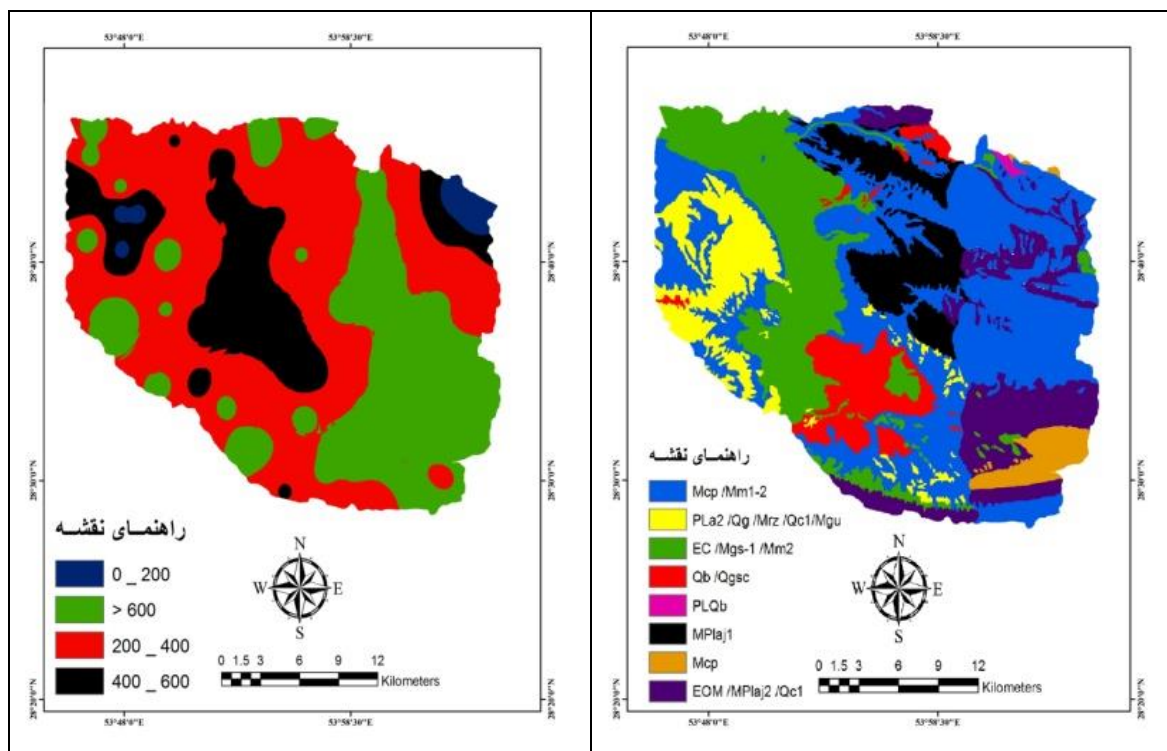
شکل ۸. نقشه طبقات شیب (%)

شکل ۷. نقشه ژئومورفولوژی



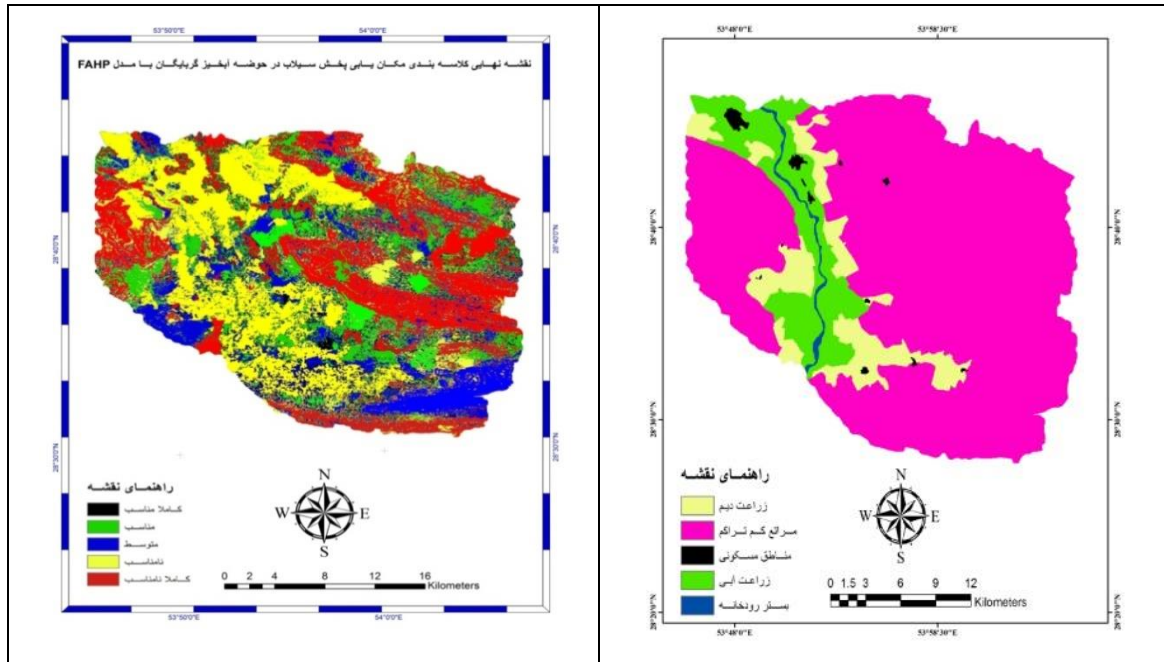
شکل ۱۰. نقشه هدایت الکتریکی (μ/cm^2)

شکل ۹. نقشه ضخامت آبرفت (m)



شکل ۱۲. نقشه قابلیت انتقال (m^2/day)

شکل ۱۱. نقشه کاربری اراضی



شکل ۱۴. نقشه رتبه‌بندی نهایی حوضه آبخیز گربایگان با استفاده از مدل FAHP

شکل ۱۳. نقشه زمین‌شناسی

نظریه سیستم خاکستری (GST)

نظریه سیستم خاکستری، در واقع یک روش نوین برای مطالعه و بررسی سیستم‌ها در شرایط عدم قطعیت است و مبتنی بر ایجاد توالی مجموعه‌ای از اعداد خاکستری است. مقادیر اعداد خاکستری معلوم نیست، اما محدوده‌ای (بازه‌ای) که در آن مقادیر قرار می‌گیرند، مشخص است. این نظریه برای نمایش میزان وضوح و صحت اطلاعات و داده‌ها، از اعداد خاکستری (توالی رنگ سفید تا سیاه) استفاده می‌کند. واژه سیاه به اطلاعات یا داده‌هایی گفته می‌شود که ساختار داخلی آن کاملاً نامعلوم، غیرقابل کدگذاری و ناشناخته است. نظریه سیستم خاکستری یکی از نظریه‌های ریاضی است که برای حل مسائلی با عدم اطمینان و داده‌های گسسته و اطلاعات ناکافی، بسیار کارآمد است. به‌طور کلی می‌توان گفت، اطلاعات برخی از گزینه‌ها به‌صورت قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان ارائه می‌شود. این قضاوت‌ها یا اطلاعات ممکن است گسسته یا نامعین باشد و مانند داده‌های قطعی و دارای اطمینان نیستند. بنابراین در شرایط نامعین، یک روش بر مبنای نظریه سیستم خاکستری که شامل تحلیل نسبی و ایجاد اعداد خاکستری بوده، تحلیل و بررسی داده‌های نامعین را دنبال می‌کند. محتوای اصلی سیستم خاکستری، شامل یک نظریه بر مبنای ترکیبی نامشخص، یک سیستم تحلیل‌گر وابسته به فضای تلاقی خاکستری و در انتها، طراحی یک سیستم الگوساز یا (GM) است که بخش اصلی سیستم خاکستری به‌شمار می‌رود. نظریه خاکستری، همانند فازی، یک روش ریاضی اثربخش برای حل مسائل نامشخص و مبهم است. نظریه در زمینه‌های بسیاری از جمله زمینه حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره، با عنوان تحلیل رابطه‌ای خاکستری به‌کار گرفته شده است. تحلیل رابطه‌ای خاکستری جزئی از نظریه خاکستری است که برای به‌دست آوردن راه‌حل مسائلی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از روابط پیچیده‌ای بین عوامل و متغیرهایشان برخوردار هستند (چن، ۱۹۸۶-۱۹۸۷).

تحلیل خوشه‌بندی خاکستری (GCA)

خوشه‌بندی خاکستری، یکی از اجزای نظریه خاکستری است. این روش بر پایه توابع سفیدکننده ارزش‌های خاکستری^۱ قرار گرفته است. روش خوشه‌بندی خاکستری یک روش آماری خاکستری بوده که به بررسی ارزش‌های اندازه‌گیری شده شاخص‌های مورد بررسی از اهداف مورد نظر در طبقه‌های خاکستری (طبقه‌های از پیش تعیین شده بر اساس ترجیحات نخبگان از شاخص‌های مورد بررسی) می‌پردازد. در آخر نیز به قضاوت و تصمیم‌گیری در مورد تعلق اهداف مورد نظر به هر طبقه می‌پردازد (Chang, 1992; Chang, 1996). در واقع این روش می‌خواهد به بررسی N نمونه مورد نظر که موضوعات طبقه‌بندی شده هستند (j) را با استفاده از M شاخص مورد بررسی که شاخص‌های طبقه‌بندی به‌شمار می‌روند (i)، در p طبقه خاکستری که طبقات خاکستری محسوب می‌شوند (k) بپردازد. در زیر مراحل کلاسیک این سیستم طبقه‌بندی به‌طور خلاصه آورده شده است (Cheng et al, 1999).

۱. اندازه‌گیری ارزش شاخص‌ها در نمونه‌های مورد نظر (d_{ij}) ؛
۲. مشخص کردن مقدار ویژه هر طبقه (λ_{ik}) ؛
۳. بی‌بعدسازی: در این مرحله برای از بین بردن تأثیر بزرگی ارزش معیارها بر تصمیم‌گیری با استفاده از رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ معیارها به‌صورت نرمال درآورده می‌شود.

$$x_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{j=1}^n d_{ij}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$y_{ik} = \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{k=1}^n \lambda_{ik}} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

۴. تولید عدد خاکستری، (مشخص کردن توابع سفیدکننده $f_{ik}(x)$ در طبقات خاکستری) که به‌طور عمده بر سه نوع هستند.

• اعداد خاکستری با حد پایین: اعداد خاکستری با حد پایین و بدون حد بالا را به صورت زیر نشان می‌دهند.

$$\otimes \in [a, \infty)$$

$$f_i^1(x) = \begin{cases} 1, & \otimes \in [\lambda_{i1}, \infty) \\ \frac{x_{ij} - \lambda_{i2}}{\lambda_{i1} - \lambda_{i2}}, & \otimes \in (\lambda_{i1}, \lambda_{i2}] \\ 0, & \otimes \notin (\lambda_{i2}, \infty) \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

۱. ارزش خاکستری یا عدد خاکستری می‌تواند عددی با اطلاعات نامطمئن تعریف شود که در یک بازه مشخص قرار می‌گیرد. برای مثال: رتبه معیارها در یک تصمیم‌گیری که به‌صورت یک متغیر زبانی بیان می‌شوند، می‌توانند به‌صورت اعداد بازه‌ای بیان شوند. این بازه اعداد به‌صورت اعداد نامطمئن است که همان اعداد خاکستری هستند.
۲. ارزش خاکستری اندازه‌گیری شده مربوط به شاخص i ام در نمونه z ام.
۳. حد شاخص k ام در طبقه k ام.

- اعداد خاکستری با حد بالا: اعداد خاکستری با داشتن تنها حد بالا به صورت زیر بیان می‌شوند.

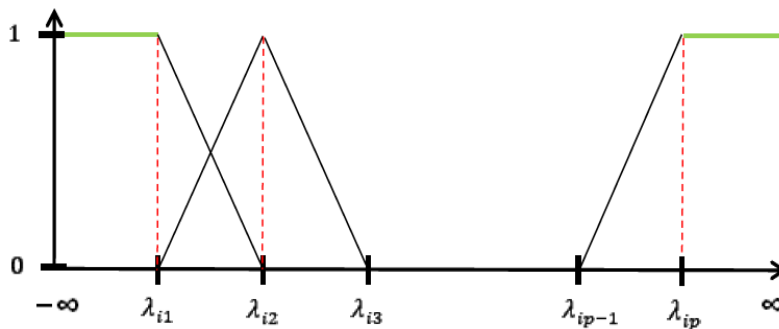
$$\otimes \in (-\infty, \bar{a}]$$

$$f_i^1(x) = \begin{cases} 1, & \otimes \in (-\infty, \lambda_{i1}] \\ \frac{\lambda_{i2} - x_{ij}}{\lambda_{i2} - \lambda_{i1}}, & \otimes \in (\lambda_{i1}, \lambda_{i2}] \\ 0, & \otimes \notin (-\infty, \lambda_{i2}] \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

- اعداد خاکستری بازها که دارای حد پایین و حد بالا هستند.

$$\otimes \in [\underline{a}, \bar{a}]$$

$$f_i^k(x) = \begin{cases} 0, & \otimes \notin (\lambda_{ip-1}, \infty) \\ \frac{x_{ij} - \lambda_{ip-1}}{\lambda_{ip} - \lambda_{ip-1}}, & \otimes \in (\lambda_{ip-1}, \lambda_{ip}] \\ 1, & \otimes \in (\lambda_{ip}, \infty) \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$



شکل ۱۵. دیاگرام توابع عضویت به صورت اعداد خاکستری

۵. محاسبه وزن مربوط به هر شاخص η_{ik}

۶. محاسبه ضریب خوشه‌بندی (α_{ik}) با استفاده از رابطه ۱۶:

$$\alpha_{ik} = \sum_{i=1}^m f_{ik}(x_{ij}) \eta_{ik} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

۷. تشکیل بردار مربوط به میزان عضویت هر نمونه به p طبقه خاکستری α_j :

$$\alpha_j = \{\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ip}\} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

۸. اعلام درجه کیفیت هر نمونه (طبقه‌ای که هر نمونه بیشترین عضویت را در آن دارد) β_{kj} :

$$\beta_{kj} = \max\{\alpha_{jk}\} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

مراحل پیاده‌سازی (GCA) برای مکان‌یابی پخش سیلاب در محیط GIS

۱. تهیه نقشه اولیه هر معیار در منطقه؛
۲. مشخص کردن کران طبقات بر اساس نظر کارشناسان (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه مطلوبیت طبقات خاکستری (K) در نظر گرفته شده برای مدل (GCA)

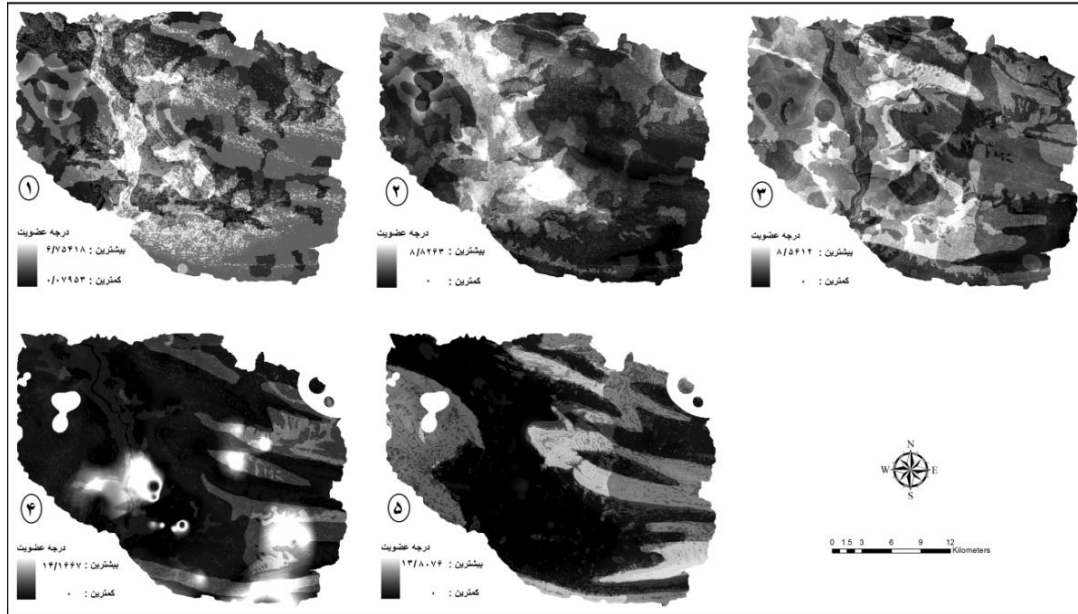
شاخص‌ها	کاملاً مناسب	مناسب	متوسط	نامناسب	کاملاً نامناسب
شیب	۲	۴	۶	۸	$۸ <$
ضخامت آبرفت	۲۰	۳۵	۵۰	۶۰	$۶۰ <$
هدایت الکتریکی	۳۰۰۰	۴۵۰۰	۶۰۰۰	۷۵۰۰	$۷۵۰۰ <$
تراکم زهکشی	$۰/۲۵$	$۱/۷۵$	$۱/۲۵$	$۱/۷۵$	$۱/۷۵ <$
قابلیت انتقال	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	$۸۰۰ <$
ارتفاع	۱۲۵۰	۱۳۵۰	۱۴۵۰	۱۵۵۰	$۱۵۵۰ <$
کاربری اراضی	مراتع کم تراکم	زراعت دیم	زراعت آبی	بستر رودخانه	مسکونی
زمین‌شناسی	۲	۴	۶	۸	۱۰
ژئومورفولوژی	دشت سیلابی	مخروط افکنه	دشت سر	تپه ماهور	کوهستان

منبع: نگارندگان

۳. نرمال‌سازی داده‌ها و کران طبقه‌ها با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲؛
۴. منظور از اعداد در شاخص‌های زمین‌شناسی جدول بالا عبارتند از عدد ۲ (Q^b , PLQ^b)؛ عدد ۴ (Mm_1 , $Mgs-1$)؛ عدد ۶ (Q^{C2})؛ عدد ۸ (Mgu , $Qc1$, EOM) و عدد ۱۰ ($MP1aj2$, Mm_{1-2} , M_{cp})؛
۵. تولید نقشه اعداد خاکستری مربوط به هر شاخص با استفاده از توابع سفیدکننده اعداد خاکستری؛
۶. تعیین وزن هر شاخص با استفاده از منطق فازی؛
۷. استفاده از رابطه ۱۶ برای ضرب وزن هر معیار در نقشه عدد خاکستری آن معیار؛
۸. جمع نقشه‌های مربوط به هر شاخص در هر یک از ۵ کلاس؛
۹. تعیین میزان تعلق هر پیکسل به هر طبقه خاکستری.

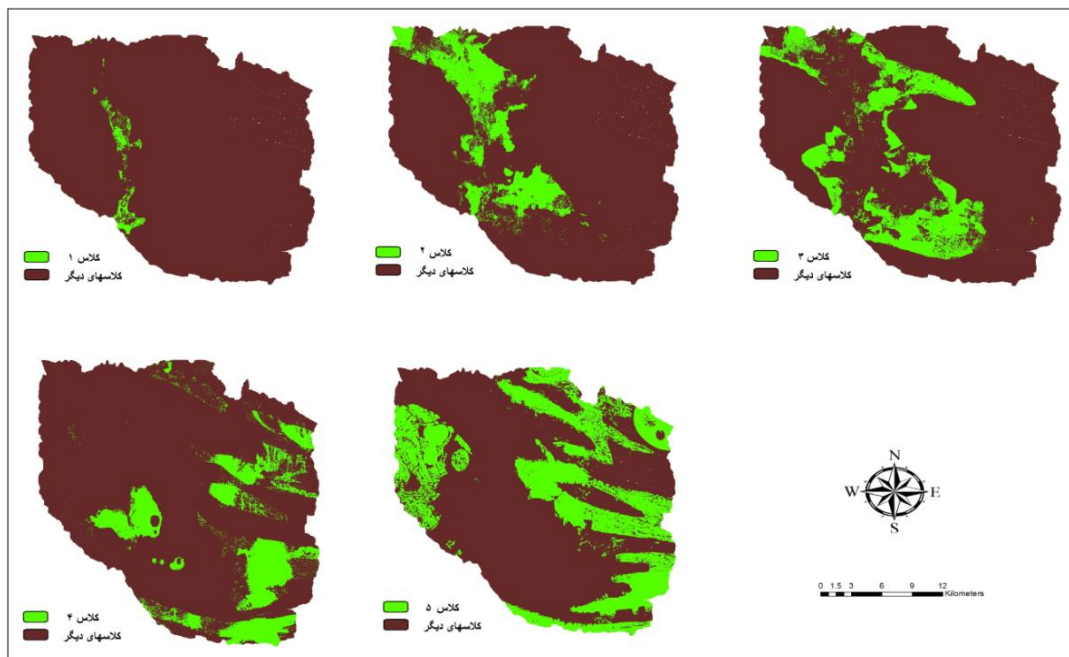
تهیه نقشه‌های خاکستری

نقشه‌های خاکستری کلاس‌های ۱ تا ۵ درجه ۵ با تحلیل خوشه‌بندی خاکستری از سیستم خاکستری در محیط GIS تهیه شده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. نقشه‌های خاکستری کلاس‌ها (درجه ۱ تا درجه ۵)

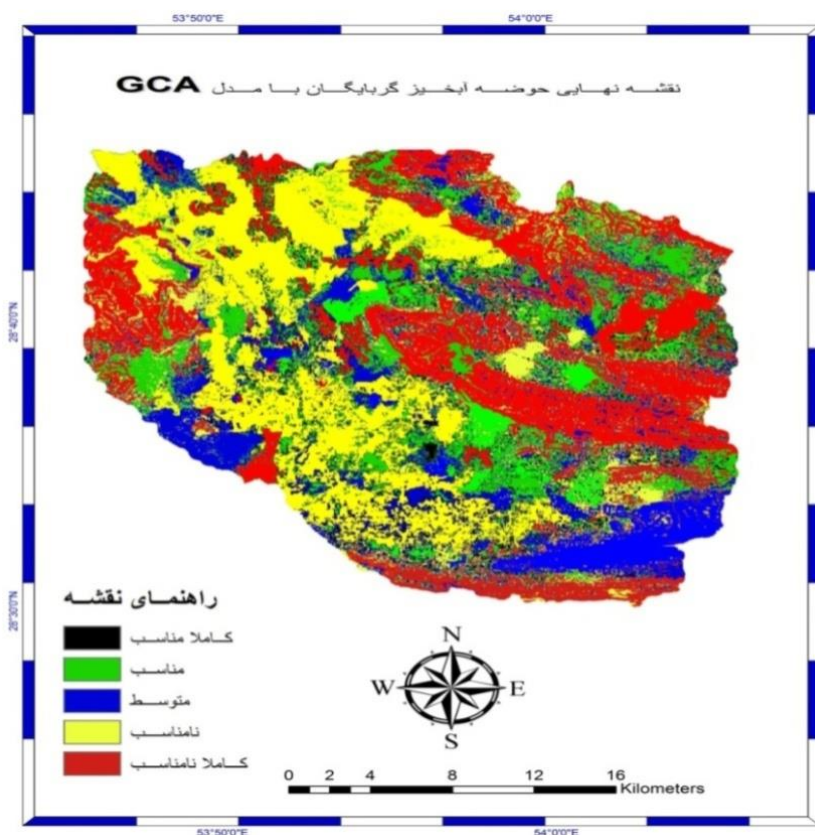
با استفاده از روابط (۷) و (۸) تهیه نقشه‌های کلاس‌های پنج گانه به صورت اندیس مربوط به هر طبقه جهت شناسایی منطقه مورد مطالعه براساس اعداد خاکستری کلاس‌های درجه ۱ تا درجه ۵ که با تحلیل خوشه‌بندی خاکستری از سیستم خاکستری در محیط GIS تهیه شده است.



شکل ۱۷. اندیس مربوط به هر طبقه به صورت عدد در کنار نقشه آن آورده شده است

نقشه نهایی تحلیل خوشه‌بندی خاکستری (GCA)

نقشه نهایی (شکل ۱۸) حاصل از تلفیق نقشه‌های کلاس‌های مختلف با تحلیل خوشه‌بندی خاکستری بر اساس ارزش‌گذاری واحدها در هر لایه اطلاعاتی و نیز بر اساس منطق نظریه خاکستری که وزن‌های به‌دست آمده در آن شامل اعداد خاکستری (۰ تا ۱) هستند.



شکل ۱۸. نقشه نهایی حاصل از تلفیق کلاس‌های عرصه‌های مکان‌یابی در محیط GIS با روش خاکستری

یافته‌های پژوهش

در ارزیابی مدل از ضریب کاپا استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار IDRISI، نقشه‌های حاصل از مدل‌ها که مکان‌های طرح پخش سیلاب در آنها انجام گرفته با فرمان Reclass ارزیابی صورت گرفت. محدوده‌های کاملاً مناسب و مناسب در دو طبقه بالایی از لحاظ ارزش قرار دارند. در یک طبقه واحدهای فضایی با ارزش یک (۱) قرار گرفته و سایر واحدهای فضایی، ارزش صفر (۰) را به خود اختصاص می‌دهند. سپس با استفاده از فرمان جداول توافقی برای نقشه‌های هر روش ضریب کاپا به‌دست آمد. محدوده متغیر ضریب کاپا بین (-۱) تا (۱) است. هر چه این رقم به سمت یک میل کند، نقشه تخمینی به واقعیت‌های زمینی نزدیکتر و دارای دقت بیشتری خواهد بود. جدول شماره ۴، مساحت پهنه‌های مناسب حاصل از دو روش را از کل حوضه (۷۹۴۶ هکتار) نشان می‌دهد.

جدول شماره ۴ نشان می‌دهد که با استفاده از مجموعه‌های فازی در ترکیب با روش فرایند سلسله‌مراتبی تحلیل (FAHP) خطای تورش^۱ ناشی از مقایسه‌ی دوبه‌دوی لایه‌ها نیز کاهش یافته است. از سوی دیگر با استفاده از منطق فازی در روش ترکیبی و ایجاد اعداد فازی، میزان دقت روش در مکان‌یابی افزایش یافته است. همچنین دقیق بودن وزن‌های فازی نسبت به وزن‌های روش AHP دلیل استفاده روش فازی و روش ترکیبی (FAHP) از داده‌های ناقص و گسسته است.

جدول ۴. نتایج بررسی مدل‌های کاربردی در مکان‌یابی پخش سیلاب در حوضه گربایگان

مدل کاربردی	میزان دقت مدل	مساحت منطقه به هکتار	ضریب کاپا
FAHP	٪۴۷/۳۷	۱۷/۱۰۱	-۰/۰۸۹۷
GCA	٪ ۵۲/۶۳	۱۲/۱۹۵	۰/۰۹۴۳
مجموع کل	٪۱۰۰	۳۰/۲۹۶	محدوده متغیر ضریب کاپا بین (-۱) تا (۱)

منبع: نگارندگان

با توجه به نتایج به دست آمده مبنی بر عوامل مؤثر بر پخش سیلاب در منطقه مطالعاتی، مهم‌ترین عوامل مؤثر در مکان‌یابی پخش سیلاب، به ترتیب اهمیت، معیارهای زمین‌شناسی، شیب، قابلیت انتقال، تراکم زهکشی و ضخامت آبرفت، در اولویت‌های برتر بوده و معیارهای دیگر در اولویت‌های بعدی هستند. بر اساس جدول شماره ۵، مهم‌ترین لایه‌ها و زیرلایه‌های تأثیرگذار معیارهای مؤثر در مکان‌یابی پخش سیلاب در پهنه مورد مطالعه با روش FAHP به شرح زیر هستند.

جدول ۵. تأثیرگذاری مهم‌ترین زیرلایه‌ها و کلاس‌های طبقات معیارهای مؤثر در مکان‌یابی با روش FAHP

ترتیب	اولویت‌بندی معیارهای مؤثر	زیرلایه‌ها و کلاس‌های مؤثر	وزن‌های به دست آمده از روش FAHP
۱	زمین‌شناسی	PLQb, Qscg, Qgsc, Mm-1, Q ^b	میزان مطلوبیت (۱ تا ۹) $\geq W_6$
۲	شیب	۰ - ۲	۰/۵۰۹
۳	قابلیت انتقال	۴۰۰ - ۶۰۰	۰/۴۹۴
۴	تراکم زهکشی	۰ - ۰/۲۵	۰/۴۷۵
۵	ضخامت آبرفت	>۶۰	۰/۵۲۳
۶	ژئومورفولوژی	(۱) دشت سیلابی (۲) مخروط افکنه	۰/۴۷۰ (۱) ۰/۲۳۴ (۲)
۷	هدایت الکتریکی	۰ - ۳۰۰۰	۰/۴۴۵
۸	کاربری اراضی	مراعات کم تراکم	۰/۵۷۵
۹	ارتفاع	۱۱۲۰ - ۱۲۵۰	۰/۴۲۳

منبع: نگارندگان

۱. ابهام به عنوان بخشی از روش که ناشی از قضاوت مستقیم کارشناسان در ارتباط با روش AHP است، خطای تورش نامیده می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در مناطق سیل‌خیز و مستعد پخش سیلاب، برنامه‌ریزی برای استفاده از این سیلاب‌ها ضمن اینکه آثار تخریبی آنها را کاهش می‌دهد، منبع آب جدیدی را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌دهد. پخش سیلاب یکی از روش‌هایی است که زمینه را برای بهره‌برداری مطلوب از سیلاب‌ها فراهم می‌آورد. در این پژوهش برای تعیین عرصه‌های مناسب برای پخش سیلاب در دشت گربایگان، از روش FAHP و GCA در رویکردی تلفیقی با سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد که مناطق مستعد پخش سیلاب در واحدهای کواترنری، PLQb, Qscg, Qgsc, Qb, Mm-1, Qc2 قرار گرفته‌اند. همچنین از نظر ژئومورفولوژی و کاربری اراضی، به ترتیب دهانه مخروط افکنه‌ها، دشت‌سرها و مراتع کم‌تراکم، مکان‌های کاملاً مناسب برای پخش سیلاب هستند. مکان‌های مستعد شناسایی شده با موقعیت ایستگاه پخش سیلاب کوثر انطباق و هماهنگی دارند و از ویژگی‌های خاصی برای پخش سیلاب برخوردارند. همچنین استفاده از روش Fuzzy و GCA، در برآورد میزان دقت و کیفیت وزن شاخص‌ها از سطح بهینه‌ای برخوردار است. به سخن دیگر، استفاده از منطق فازی و تحلیل خوشه‌بندی خاکستری، خصوصیات گسستگی معیارهای محیطی و داده‌ها را برطرف می‌کند و در نهایت، نتایج حاصل از کاربرد دو روش مورد استفاده در پژوهش حاضر، نشان می‌دهد که بر اساس معیارهای مذکور، مناسب‌ترین روش برای اجرای پروژه مکان‌یابی عرصه‌های مناسب برای پخش سیلاب، روش فازی در کنار روش خاکستری است؛ زیرا روش فازی از معیارهای مورد استفاده توابع عضویت فازی استفاده می‌کند؛ ولی GCA، توابع اعداد خاکستری را برای به دست آوردن وزن‌های دقیق و صحت داده‌های محاسبه‌شده مورد استفاده قرار می‌دهد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از دو روش، بیانگر این موضوع است که تحلیل خوشه‌بندی خاکستری در مورد پهنه‌بندی مناطق مستعد پخش سیلاب دقیق‌تر از روش فرایند سلسله‌مراتبی تحلیل فازی (FAHP) است.

منابع

- آرونوف، ا. (۱۳۷۵). **سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی**، ترجمه مدیریت سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، انتشارات سازمان نقشه‌برداری. صص ۷۵-۸۱.
- آل شیخ، ع. الف؛ علوی پناه، س. ک.؛ حامد پناه، ب. (۱۳۸۱). **کاربرد GIS در مکان‌یابی عرصه‌های پخش سیلاب**، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۶۷، صص ۳۸-۲۲.
- دادرسی سبزواری، الف؛ خسروشاهی، م.؛ پاک‌پرور، م.؛ حسینی مرنندی، ح. (۱۳۸۷). **شناخت مناطق مستعد برای گسترش سیلاب به روش کاربرد مدل‌های مفهومی (راهکاری برای مهار بیابان)**، مجله تحقیقات مرتع و بیابان ایران، سال پانزدهم، شماره ۲، صص ۲۴۱-۲۲۷.
- زهتابیان، غ.؛ ملکیان، آ.؛ سلاجقه، ک.س.؛ علوی پناه، س. ک. (۱۳۷۹). **بررسی مکان مناسب پخش سیلاب با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS در حوزه آبخیز طغرود**، همایش کاربرد GIS/RS در مطالعات مناطق بیابانی، دانشگاه تهران.
- علایی طالقانی، م. (۱۳۸۳). **ژئومورفولوژی ایران**، تهران: انتشارات قومس. صص ۸۳-۷۹.

- قدسی پور، س. ح. (۱۳۸۹). مباحثی در تصمیم‌گیری چندمعیاره: برنامه‌ریزی چندهدفه، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. صص ۴۳-۴۱.
- قرمزچشمه، ب.؛ غیومیان، ج.؛ فیض‌نیا، س. (۱۳۸۱). کاربرد GIS و SDSS در مکان‌یابی مناطق مستعد پخش سیلاب (در منطقه میمه)، نشریه علوم، سال دوم، شماره ۳ و ۴، صص. ۱۳۱-۱۱۵.
- کوثر، آ. (۱۳۷۴). مهار سیلاب‌ها و بهره‌وری بهینه از آنها. تهران: انتشارات مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع. صص ۹۷-۱۰۱.
- مرکز آمار ایران. (۱۳۸۵). سالنامه آماری استان فارسی، تهران: مرکز آمار ایران.
- مهدوی، م. (۱۳۹۰). هیدرولوژی کاربردی، جلد اول، تهران: انتشارات دانشگاه تهران. صص ۵۶-۵۹، ۲۱۸-۲۱۱.
- مهرورز مغالو، ک.؛ فیض‌نیا، س.؛ غیومیان، ج.؛ احمدی، ح. (۱۳۸۴). بررسی نهشته‌های کواترنر جهت تعیین مناطق مستعد پخش سیلاب به کمک فن سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی: دشت تسوج، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، سال دوازدهم، شماره ۴، صص. ۴۶۷-۴۳۷.
- Alaee Taleghani, M., 2002, **Geomorphology of Iran**, Ghomes Press, Tehran.
- Alesheikh, A. A., Soltani, M. J., Helali Zadeh, H., 2002. **Application of GIS in Flood Water Spreading Site Selection**, Journal of Geographical Research Quarterly, Vol. 17, No. 4, PP. 23-38.
- Aronoff, S., 1996, **Geographic Information Systems**, Translated by National Cartographic Center, National Cartographic Center Press, Iran. PP. 75-81.
- Bellman, R.E. & Zadeh, L.A., 1970, **Decision Making in a Fuzzy Environment**, Management Science, Vol. 17, PP. 141-164.
- Boender, C.G.E., De Graan, J.G. and Lootsma, F.A., 1989, **Multi-criteria Decision Analysis with Fuzzy Pair Wise Comparisons**, Vol. 29, PP. 133-143.
- Buckley, J.J., 1985, **Fuzzy Hierarchical Analysis**, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 17, PP. 233-247.
- Chang, D.Y., 1992, **Extent Analysis and Synthetic Decision, Optimization Techniques and Applications**, World Scientific, Vol 1. PP.352-355.
- Chang, D.Y., 1996, **Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP**, European Journal of Operational Research, Vol. 95, PP. 649-655.
- Chen, G., and Pham, T. T., 2001, **Introduction to Fuzzy, Sets Fuzzy, Logic and Fuzzy Control Systems**, CRC Press, Florida.
- Cheng, C. H, Yang, K. L., and Hwang, C. L., 1999, **Evaluating Attack Helicopters by AHP Based on Linguistic Variable Weight**, European Journal of Operational Research, Vol. 116, PP. 423-435.
- Dadrasi, A., Khosroshahi, M., 2008, **Identifying Suitable Areas to Floodwater Spreading By Using Conceptual Models (Strategy for Desertification Control)**, Range and Desert Research of Iran, Vol.15, No. 2, PP. 227-241.
- Deng, H., 1999, **Multicriteria Analysis with Fuzzy Pair Wise Comparisons**, International Journal of Approximate Reasoning, Vol. 21, PP. 215-231.

- Ghermez Cheshme, B., Ghayoumian, J., Feiznia, S., 2002, **Application of GIS and DSS in Flood Water Spreading Site Selection (Case Study Meimeh Basin, Isfahan)**, Quarterly Journal of Science, No. 3-4, PP. 493-500.
- Ghodsipour, H., 2006, **Discussion in Multi Criteria Decision Making**, Amirkabir University Press, Tehran.
- Hamedpanah, R., Zehtabian, G. R., Mahdavi, M., Alavipanah, S. K., Ghafaria, R., 2001, **Determination of an Appropriate Area for Flood Water Spreading by Remote Sensing Data and GIS**, Proceedings of the Conference on Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems in the Desert Area Study, Korea, 2001
- Jankowski, P., 1995, **Integrating Geographical Information Systems and Multiple Criteria Decision-making Methods**, International Journal of Geographic Information Systems, Vol. 9, No. 3, PP. 251-273.
- Jiang, H. and Eastman, R. R., 2000, **Application of Fuzzy Measures in Multi- criteria Evaluation in GIS**, International Journal of Geographic Information Systems, Vol. 14, No. 2, PP. 173-184.
- Kosar, A., 1995, **Introduction to the Floods Control and its Optimum Productivity**, Publication of Institute of Forests and Ranges Research, Iran
- Krishnamurthy, J., Srinivals, G., 1996, **An Approach to Demarcate Ground water Potential Zones Through Remote Sensing and Geographical Information System**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 10, PP. 1867-1884.
- Mahdavi, M., 2003, **Applied Hydrology**, Tehran University Press, Tehran.
- Malczewski, J., 1999, **GIS and Multicriteria Decision Analysis**, John Wiley and Sons, New York.
- Mehrvarz, K., Feiznia, S., Ghayoumian, J., Ahmadi, H., 2005, **Investigation of Quaternary Deposits Suitable for Floodwater Spreading Using GIS & RS (Case Study: Tasso Plain)**, Iranian Journal of Range and Desert Research, Vol. 21, No. 4, PP. 437- 467.
- Saaty, T.L., 1980, **The Analytic Hierarchy Process**, McGraw-Hill, New York.
- Saraf, A. K., Choudhury, P.R., 1998, **Integrated Remote Sensing and GIS for Groundwater Exploration and Identification of Artificial Recharge Sites**, International Journal of Remote Sensing, Vol.19, No. 10, PP. 1825-1841.
- Statistical Center of Iran, 2007, **The Statistical Yearbook of Fars Province**.
- Van Laarhoven, P.J.M. and Pedrycz, W., 1983, **Fuzzy Extension for Saaty's Priority Theory**, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 11, No. 1-3, PP. 229-241.
- Zehtabian, Gh. R. and et al., 2001, **An Investigation of Proper Areas for Floodwater Spreading Using Processing Satellite Image and GIS in Toghrod Catchment**, Conference on Application of RS / GIS in the Desert Research, University of Tehran.

***Floodwater Spreading Site Selection by FAHP and GCA and
Comparison of Model Performance
(Case Study: Garabaygan Catchment, Fasa Plain, Shiraz)***

Faraji H. A.

Associate Prof., Faculty of Geography, University of Tehran

Hassanpour S. *

M.A. Student of GIS, Faculty of Geography, University of Tehran

Azizi A.

M.A. Student, Faculty of Environmental Planning & Management, University of Tehran

Malakian A.

Associate Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

Alavipanah S.K.

Professor, Faculty of Geography, University of Tehran

Received: 18/10/2011 Accepted: 11/05/2013

Extended Abstract

Introduction

One of the main principles in the process of spreading floodwater is use of the water in arid and semi arid areas for an efficient utilization of both the water and the soil. Executing more than one decade research plans on floodwater spreading in the realm of Iran aquifers have proved that the plains and deserts have got a great potentiality in order to supply water and to prevent the irreparable damages of flood and desertification. The first and the most important step in executing a floodwater spreading project is a suitable zonation for water spreading and to penetrate it into underground water tables. It is impossible to use Geographical Information Systems (GIS) in order to site select potential zones for floodwater spreading without using Multi-criteria Decision Making system (MCDM). Floodwater spreading plan except to gather water and transfer waste water to nourish the aquifers by the purpose of reducing soil erosion and improving the vegetation is studied with a multi-purpose attitude. One of the most appropriate tools in site selection for certain zones is the application of computerized conceptual

models in the Geographic Information System (GIS) environment. Because there are a variety of models in this field, identifying and introducing the best model is one of the most essential actions in executing these operations or plans. We have tried in this research to observe the important factors and criteria such as: geocentric factors (geology, geomorphology and soil), hydrology, geohydrology, slope and physiographic characteristics of basin and also discussing certainty or uncertainty of effective locative data in site selection of the potential zones to spread floodwater. On the other hand we have attempted to identify and introduce the most suitable model in site selection of the potential zones to spread floodwater in the Garabaygan aquifer basin in Fars, Iran. FAHP model and GCA with some of their operators are the selective models in this research.

Methodology

Study area:

Garabaygan region in the Fasa is located in 190 Km away from southeast Shiraz in lat. from 28° 41' to 21° 41' N and long. from 53° 53' to 45° 57' E. Also it's located at 1120 to 1160 above sea level.

Methodology

Firstly in this research we calculated nine effective factors including geomorphology, geology, slope, height, land use, alluvium thickness, drainage density and electrical conductivity in floodwater site selection by using FAHP and GCA models and then we provided and classified the information layers of these nine factors by using Arc GIS 9.3. Considering the weights of every factor and the scores that they have been assigned, we made the final map of zonation based on these models by classifying them into five classes: very unsuitable, unsuitable, average, suitable, very suitable.

FAHP Method:

The analytic hierarchy process (AHP) is one of the extensively used multi-criteria decision-making methods. One of the main advantages of this method is the relative ease with which it handles multiple criteria. The use of AHP does not involve cumbersome mathematics. AHP involves the principles of decomposition, pairwise comparisons, and priority vector generation and synthesis.

A major contribution of fuzzy set theory is its capability of representing vague data. The theory also allows mathematical operators and programming to apply for the fuzzy domain. A fuzzy set is a class of objects with a continuum of grades of membership. Such a set is characterized by a membership (characteristic) function, which assigns to each object a grade of membership ranging from zero to one. Essentially, the uncertainty in the preference judgments gives rise to uncertainty in the ranking of alternatives as well as difficulty in determining consistency of preferences. These applications are performed with many different perspectives

and proposed methods for fuzzy-AHP. In this study, Chang's (1992) extent analysis on fuzzy-AHP is formulated for a selection problem.

In the fuzzy-AHP procedure, the pairwise comparisons in the judgment matrix are fuzzy numbers that are modified by the designer's emphasis.

To deal with vagueness of human thought, Zadeh first introduced the fuzzy set theory, which was oriented to the rationality of uncertainty due to imprecision or vagueness.

A triangular fuzzy number (TFN) \tilde{M} is shown in Fig. 1. A TFN is denoted simply as (m_1, m_2, m_3) . The parameters m_1, m_2 and m_3 respectively denote the smallest, possible and the largest promising value, and the largest possible value that describe a fuzzy event.

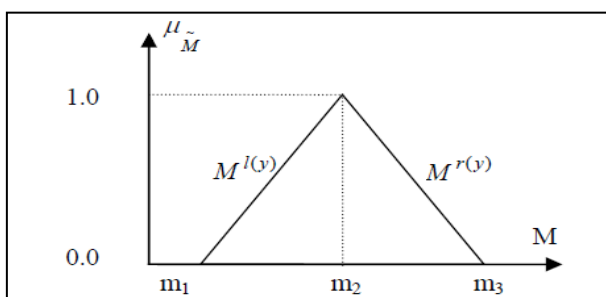


Fig. 1. A triangular fuzzy number

GCA Method:

The most important function of the theory (GCA) is proposing a modern method to study and survey systems in the uncertainty situation which is based on the gray sequence, creation of a collection of gray numbers provided that values of gray numbers are not known, but the area in which those values lie is given. Gray systems are named after colors of the concerned topics. With the purpose of clarity, in this theory information and data are displayed as indicators of the degree of darkness of the colors (color sequences from white to black). The word "black" is assigned to the information and data which their inner structure and relations are totally unknown and hardly possible to be encoded. GTS is one of the mathematical which helps much in solving problems in the three following situations: 1. Uncertainty 2. Discontinuous data 3. Insufficient data.

Results and Discussion

In this research we have used nine effective factors including geomorphology, geology, slope, height, land applying, alluvium thickness, drainage density and electrical conductivity in floodwater site selection. In this study some criteria (i.e., geology, slope, drainage density and alluvium thickness,) have maximal effects whereas some others (i.e., elevation, landuse, and geomorphology) have minimal effects.

Final map of both methods are supplied in 5 classes from completely suitable to unsuitable. Completely suitable class in FAHP model has an area of 17.101 hectares and in GCA model has an area of 12.195 hectares of total area (7946 hectares) of the province. The table 1 shows the

results.

Table 1. findings of functional models

functional models	Accuracy of the model	Area of a region in ha	capa coefficient
FAHP	%47.37	17.101	-.0897
GCA	%52.63	12.195	.0943
total	%100	30.296	

Conclusion

In this study, FAHP and GCA were used in combinative approach with GIS in order to determinate appropriate areas for flood spreading in Garbaigan plain. The findings show that susceptible regions for flood spreading are in quaternary units like: Qc2, Mm-1, Qb, Qgsc, Qscg, and PLQb. Also according to geomorphology and land uses, cone carters, plains and low density pastures are the totally appropriate zones for flood water spreading. These zones are in correspondence with the location of the Kosar floodwater spreading station. They have the special characteristics for spreading floodwater. On the other hand, according to this, our obtained results is the best reason for choosing the Fuzzy model and Gray System Theory for evaluating the quality of data in comparison with other applied models. Also comparison of finding obtained from this two models show that GCA model is more accurate than FAHP model to find susceptible regions for flood spreading.

Keywords: Floodwater Spreading, GIS, GCA, Garabaygan Catchment, FAHP.