گروه‌بندی حوضه آبخیز کرخه براساس شاخص‌های فیزیکی– مکانی با استفاده از رویکرد فازی

بهرام چوبین [۱]
کریم سلیمانی[۲]
محمود حبیب‌نژاد روشن [۳]
آرش ملکیان [٤]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۲/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۹٦/۰۲/۰۸

****

چکیده

مدیریت آبخیزها نیازمند درک شرایط آبخیزها در حوضه‌های دارای آمار و فاقد آمار است. شناسایی زیرحوضه‌های همگن به‌منظور اجرای هماهنگ عملیات آبخیزداری و کنترل سیلاب و نیز اولویت دادن به زیرحوضه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش به منظور خوشه‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز کرخه از شاخص‌های مکانی و فیزیکی (شامل خصوصیات توپوگرافی، مورفولوژیکی، خاک و کاربری اراضی) استفاده شد و تعداد ۵۳ شاخص برای زیرحوضه‌های کرخه استخراج گردید. برای کاهش تعداد متغیرها تحلیل عاملی به طور جداگانه برای هر گروه از شاخص‌ها انجام شد. نتایج تحلیل عاملی نشان داد که از بین ۵۳ شاخص فیزیکی–مکانی، ۹ شاخص (٤ شاخص مورفولوژیکی، ۳ شاخص کاربری اراضی و ۲ پارامتر خاک) دارای بار عاملی بیشتر نسبت به سایر شاخص‌ها هستند. بنابراین، از بین شاخص مورفولوژیکی، شاخص‌های سطح حوضه، کشیدگی حوضه، میانگین طول زهکش‌ها و کل پستی و بلندی؛ از بین شاخص کاربری اراضی، شاخص‌های درصد سطح مراتع، درصد سطح اراضی کشاورزی و درصد سطح اراضی بایر و از بین پارامترهای خاک، شاخص ظرفیت آب موجود در لایه خاک و شاخص هدایت هیدرولیکی اشباع شده به عنوان شاخص‌های نهایی جهت گروه‌بندی زیرحوضه‌ها انتخاب شدند. با استفاده از روش فازی (FCM)[۵] ۳۸ زیرحوضه مطالعاتی در سه گروه همگن قرار گرفتند. تعداد خوشه‌های بهینه از طریق سعی و خطا و توابع ارزیابی ضریب‌افزار و آنتروپی‌افزار تعیین شدند. نتایج نشان داد که گروه‌های سه‌گانه شامل زیرحوضه‌های مناطق شمال شرقی و بخش‌هایی از مناطق مرکزی حوضه کرخه (گروه ۱)، مناطق شمال غربی– جنوب شرقی به همراه مناطق جنوبی حوضه کرخه (گروه ۲) و مناطق مرکزی و بخش‌هایی از مناطق جنوب غربی حوضه کرخه (گروه ۳) را در برمی‌گیرند. تفکیک یک حوضه به زیرحوضه‌ها و گروه‌بندی آنها در دسته‌های مشابه از نظر خصوصیات مشابه می‌تواند به عنوان روشی در جهت اجرای عملیات آبخیزداری، کنترل سیلاب و اولویت قائل شدن برای زیرحوضه‌های بحرانی به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبخیز کرخه، خوشه‌بندی فازی، زیرحوضه‌های همگن، متغیرهای فیزیکی–مکانی.

****

۱– دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، (نویسنده مسئول)
Bahram.choubin@ut.ac.ir

۲– استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری k.solaimani@sanru.ac.ir

۳– استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری m.habibnejad@sanru.ac.ir

٤– دانشیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران Malekian@ut.ac.ir

5- Fuzzy C-Mean

۱- مقدمه

حوضه آبخیز یک واحد جغرافیایی پراهمیت برای برنامه‌های کاربردی در زمینه اکولوژی (Omernik and Griffith, 1991)، مهندسی و احیا (Graf, 1999)، و اثر آلودگی‌های غیرنقطه‌ای بر روی کیفیت آب (He and DeMarchi, 2010) اطلاق می‌شود که خوشه‌بندی آن در تفسیر فرآیندهای هیدرولوژیک، تحلیل منطقه‌ای آبدهی، کنترل و احیاء آبخیز ضروری می‌باشد. فرآیندهای هیدرولوژیکی شامل بارش، رواناب، ذخیره و هدررفت آب منجر به تشکیل اشکال زمین شامل آبراهه‌ها، دشت‌های سیلابی و عارضه‌های فرسایش می‌شود. محدودیت‌های بسیار زیادی در مفهوم حوضه آبخیز وجود دارد. به‌عنوان مثال مرز محدوده آب‌های زیرزمینی با مرز آب‌های سطحی و توپوگرافی متفاوت است (Feinstein et al., 2010). همچنین Omernik and Bailey (۱۹۹۷) بیان می‌کنند که مرز تعیین شده توسط توپوگرافی به تنهایی ممکن است بهترین واحد برای مدیریت اکوسیستم نباشد و مفهوم بومسار[1] را به عنوان یک واحد جغرافیایی جایگزین برای تجزیه و تحلیل پیشنهاد می‌نمایند. محدودیت مهم و نهایی، بخصوص که برای پیش‌بینی در حوضه‌های فاقد آمار مرتبط است، عدم وجود یک سیستم یکپارچه خوشه‌بندی حوضه است (Kult, 2013).

Wagener و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی بسیاری از روش‌های موجود برای تعریف شباهت هیدرولوژیکی یا ابداع سیستم‌های خوشه‌بندی حوضه پرداختند. ایشان ابراز کردند که به عنوان یک علم نسبتاً جوان، هیدرولوژی هنوز به توسعه یک سیستم یکپارچه خوشه‌بندی حوضه نیازمند است. هم‌اکنون نیاز به یک سیستم یکپارچه خوشه‌بندی حوضه احساس می‌شود (Wagener et al., 2007)، و تحقیقات زیادی جهت رسیدن به این هدف صورت گرفته است (Sawicz et al., 2011; Sivakumar and Singh, 2012; Winter, 2001; Wolock et al., 2004).

Winter (2001) مفهوم مناظر[2] هیدرولوژیکی را به عنوان یک چارچوب برای مفهوم عینی حرکت آب زیرزمینی، آب‌های سطحی و آب اتمسفر جهت خوشه‌بندی انواع مختلف زمین ارائه کرده است. پس از آن،Wolock و همکاران (۲۰۰٤) از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های آماری جهت گروه‌بندی ٤۳۹۳۱ آبخیز کوچک در ایالات متحده به ۲۰ منطقه هیدرولوژیکی براساس شباهت در شکل زمین، زمین‌شناسی و اقلیم استفاده کردند. Sawicz و همکاران (۲۰۱۱) یک طرح خوشه‌بندی برای حوضه‌های آبخیز در شرق ایالات متحده بر اساس تجزیه و تحلیل آماری مجموعه‌ای از شاخص‌های هیدرولوژیکی ارائه کردند. تلاش در خوشه‌بندی حوضه باید طیف وسیعی از متغیرهای حوضه را شامل شود. آب و هوا، پوشش‌گیاهی، استفاده از زمین، پوشش زمین، خاک، زمین‌شناسی، نقشه‌برداری و تغییرات انسان در طبیعت همگی ویژگی‌های فیزیکی مؤثر بر فرآیندهای بارش-رواناب در حوضه‌ها هستند (Kult, 2013).

خوشه‌بندی حوضه‌های آبخیز برای اهداف مختلف مورد نیاز است. به‌عنوان مثال در پیش‌بینی و ثبت خصوصیات جریان مانند سیل یا خشکسالی در حوضه فاقد آمار (Cavadias et al., 2001; Nathan and McMahon1990)، آنالیز فرکانس منطقه‌ای سیل (Rao and Srinivas,2006; Castellarin et al., 2008)، تعمیم درک سیستم هیدرولوژیکی (Sawicz et al., 2011) و جهت برآورد جریان رودخانه در حوضه‌های فاقد آمار (Chiang et al., 2002a,2002b; Kahya et al., 2008) استفاده می‌شود. بر طبق مطالعات Blöschl and Sivapalan (۱۹۹۵)، فرآیند تعمیم (روند انتقال اطلاعات هیدرولوژیکی از حوضه‌های دارای آمار به فاقد آمار)، در صورت مشابه بودن حوضه‌ها رضایت‌بخش خواهد بود، این درحالی است که اگر حوضه‌ها مشابه نباشند این فرآیند مستعد خطا می‌باشد. بنابراین مزیت اصلی خوشه‌بندی حوضه‌ها کاربرد آن در تعمیم‌سازی و منطقه‌ای کردن است (Razavi and Coulibaly, 2013). در واقع، در صورتی که تعمیم‌سازی برای حوضه‌های مشابه استفاده شود نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد. بطور کلی خوشه‌بندی آبخیز ممکن است تعمیم پارامترهای بارش- رواناب را حمایت کند (Hundecha et al., 2008)، که

[1]-. Ecoregion

[2]- Landscapes

این موضوع در هیدرولوژی بسیار مهم بوده، بخصوص که با مشکلات پیش‌بینی در حوضه‌های فاقد آمار (*Prediction in Ungauged Basins*) مرتبط است (*Bardossy, 2007; Yadav et al., 2007; Castiglioni et al., 2010*). همچنین خوشه‌بندی حوضه می‌تواند به کارشناسان مدیریت کمک کند، به‌عنوان مثال این خوشه‌بندی‌ها می‌تواند سیاست‌های مدیریت آبخیز که شرایط محیطی و اجتماعی مؤثر دارند را تسهیل کند (*Wardrop et al., 2007*). خوشه‌بندی حوضه‌ها بطور کلی براساس خصوصیات فیزیوگرافی یا رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌ها صورت می‌پذیرد. خصوصیات فیزیوگرافی برای خوشه‌بندی حوضه‌های فاقد آمار مناسب است، در حالیکه رفتار هیدرولوژیکی جهت خوشه‌بندی حوضه‌های فاقد آمار مناسب نیست (*Razavi and Coulibaly, 2013*).

McIntyre و همکاران (۲۰۰۵) ۱۲۷ حوضه را در انگلستان با استفاده از خصوصیات سطح حوضه، بارش سالیانه و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک خوشه‌بندی کردند. تلوری و اسلامی (۱۳۸۲)، طی تحقیقی بر روی حوضه‌های آبخیز شمال کشور (ناحیه خزری) با انتخاب مهمترین پارامترهای فیزیوگرافی و اقلیمی مربوط به ۹۰ حوضه آبخیز ناحیه خزر شرقی و ۲۹ حوضه آبخیز خزر غربی در دو روش، آن‌ها را همگن‌بندی کردند. روش اول بر اساس متغیر مساحت حوضه و متغیر هیدرولوژیکی دبی ویژه دو ساله که در این صورت هر دو ناحیه به سه گروه همگن تقسیم‌بندی شدند. روش دوم بر اساس متغیرهای مستقل یعنی مساحت، شیب متوسط وزنی، ارتفاع متوسط، تراکم زهکشی و بارندگی متوسط سالیانه حوضه، برای ناحیه خزر شرقی و مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب متوسط وزنی، تراکم زهکشی و بارندگی متوسط سالیانه حوضه، برای ناحیه خزر غربی همگن‌بندی انجام گرفت. در این مورد هر دو ناحیه به چهار گروه همگن تقسیم‌بندی شدند. غیاثی و همکاران (۱۳۸۳) از ویژگی‌های هندسی حوضه‌ها نظیر مساحت، محیط، طول و شیب آبراهه اصلی برای تعیین همگنی ٤٠ حوضه در البرز شمالی استفاده کردند، نتایج نشان داد که برای تعیین همگنی به روش سلسله‌مراتبی نیاز به اندازه‌گیری تعداد زیادی از پارامترهای هندسی نیست. Baidmariam (۲۰۱۲) حوضه آبخیز چموگا در اتیوپی را با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی خوشه‌بندی کرد. ایشان از ارتفاع حداکثر شبکه زهکشی و شیب، جهت استخراج توابع هیدرولوژیکی یک حوضه استفاده کردند (*Beven, 2000*). دارابی و همکاران (۱۳۹۱) با به کار بردن تکنیک‌های خوشه‌بندی چند میانگینی (KCA) و روش سلسله‌مراتبی (HCA) با هدف طبقه‌بندی ٢٤ زیرحوضه در گروه‌های همگن، در حوضه آبخیز پل‌دوآب شازند از ۱۰ پارامتر موفورمتریک استفاده نمودند. نتایج روش چند میانگینی نشان داد تعداد اعضای خوشه ۱، ۲، ۳، ٤ و ۵ به ترتیب برابر با ۳، ۷، ۳، ۷ و ٤ زیرحوضه می‌باشد. هم‌چنین نتایج روش سلسله‌مراتبی نیز نشان داد که تعداد اعضای خوشه‌های ۱، ۲، ۳، ٤ و ۵ به ترتیب برابر با ۳، ۷، ۲، ۸ و ٤ زیرحوضه می‌باشد. در نهایت مقایسه نتایج دو تکنیک مذکور نشان داد که ۲۳ زیرحوضه یا (۹۵%) توسط هر دو تکنیک به‌طور مشترک بیان شده است. Ssegane و همکاران (۲۰۱۲) جهت پیش‌بینی جریان در حوضه‌های فاقد آمار در امریکا از خصوصیات نزدیکی جغرافیایی و هیپسومتری آبخیزها استفاده کردند و با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی تعداد متغیرها را کاهش داده و با کمک الگوریتم خوشه‌بندی k-mean حوضه‌های مشابه را خوشه‌بندی کردند. اسلامی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از آزمون تحلیل خوشه‌ای و با توجه به پارامترهای هیدرولوژیکی و مورفومتری، سه گروه همگن از حوضه‌های آبخیز را تشخیص دادند و تحلیل منطقه‌ای آبدهی رودخانه‌های مرکزی ایران را انجام دادند. Sellami و همکاران (۲۰۱٤) پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SWAT را در حوضه‌های فاقد آمار فرانسه برآورد کردند. تعمیم پارامترهای مدل بر اساس رویکرد شباهت فیزیکی بین حوضه‌ها انجام شد. نتایج حاصله حاکی از این بود که حوضه‌های مشابه فیزیکی که در منطقه اقلیمی و جغرافیایی مشابه قرار گرفته‌اند رفتار هیدرولوژیکی مشابه

نشان می‌دهند و همچنین عدم قطعیت پیش‌بینی مشابه دارند. Latt و همکاران (۲۰۱٤) جهت مدیریت سیل در حوضه‌های فاقد آمار از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی به منظور تشخیص آبخیزهای همگن و از روش شبکه عصبی برای برآورد سیل شاخص در میانمار استفاده کردند. بر طبق خصوصیات اقلیمی و فیزیوگرافی، سه مؤلفه توسط تجزیه مؤلفه‌های اصلی مشخص گردید که در مجموع ۷۹% واریانس را به خود اختصاص دادند. از روش خوشه‌بندی k-means استفاده و چهار منطقه همگن هیدرولوژیکی تشخیص داده شد. برای هر یک از مناطق همگن سیل شاخص با استفاده از شبکه عصبی و رگرسیون برآورد شد. پیش‌بینی در حوضه‌های فاقد آمار نیازمند درک حوضه‌های همگن می‌باشد. با توجه به این موارد برای تشخیص حوضه‌های مشابه، در این مقاله فرض می‌شود که شباهت هیدرولوژیکی از رفتار فیزیکی حوضه منتج می‌شود. بنابراین تحقیق حاضر بر روی خصوصیات فیزیکی- مکانی حوضه‌ها (شامل خصوصیات مورفولوژیکی، خاک و کاربری اراضی) جهت تشخیص آبخیزهای مشابه تمرکز دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه کرخه در غرب کشور ایران، در مناطق میانی و جنوبی کوه‌های زاگرس قرار دارد. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری جزء حوضه‌های درجه دو کشور می‌باشد. مساحت کرخه برابر با ۵۱۵۲۷ کیلومتر مربع است که بین مختصات جغرافیایی ۰٦´ ،٤٦° تا ۱۰´ ،٤۹° طول شرقی و ۵۸´ ،۳۰° تا ۵٦´ ،۳٤° عرض شمالی قرار دارد (نگاره ۱). رودخانه کرخه از به هم پیوستن رودخانه‌های اصلی گاماسیاب، قره‌سو، سیمره و کشکان بوجود می‌آید که هر یک از آنها به انضمام قسمت سفلی رودخانه کرخه دارای حوضه آبخیز هستند که زیر حوضه‌های اصلی کرخه را تشکیل می‌دهند *(وزارت نیرو، ۱۳۸۳)*. نگاره ۱ موقعیت حوضه آبخیز کرخه و زیرحوضه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲- شاخص‌های مورد استفاده

در این تحقیق جهت تشخیص حوضه‌های همگن از ۳۵ شاخص فیزیکی (۲۱ پارامتر مورفولوژیکی، ٦ نوع کاربری اراضی و ۸ نوع پارامتر خاک) استفاده شد. که ذیلاً به آن می‌پردازیم:

۲-۲-۱- شاخص‌های مورفولوژیکی

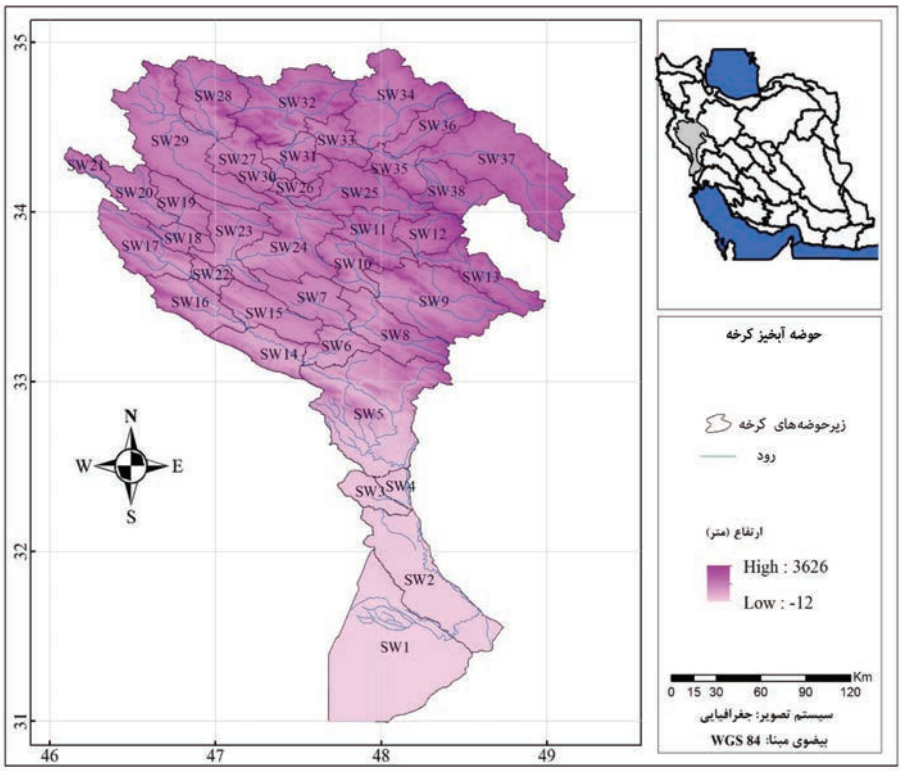
پارامترهای موفولوژیکی مورد استفاده شامل سطح حوضه، محیط حوضه، طول حوضه، ضریب فرم حوضه، ضریب فشردگی، کرویت حوضه، کشیدگی حوضه، شکل حوضه، طول آبراهه‌ها، میانگین طول شبکه زهکشی، تراکم زهکشی، فراوانی آبراهه‌ها، ضریب پیچان‌رودی (سینوزیتی)، نسبت بافت، طول جریان سطحی، تعداد پستی و بلندی، زمان تمرکز، کل پستی و بلندی، نسبت پستی بلندی، درصد شیب و شاخص رطوبت توپوگرافی هستند. جدول ۱ جزئیات شاخص‌های مورفولوژیکی محاسبه شده برای زیرحوضه‌های کرخه را ارائه می‌کند.

۲-۲-۲- شاخص‌های کاربری اراضی

علاوه بر پارامترهای مورفولوژیکی از درصد سطحی که کاربری‌های مختلف (شامل: مراتع، کشاورزی، اراضی مرطوب، اراضی بایر، سطوح شهری، اراضی جنگلی و بیشه‌زار) در هر حوضه به خود اختصاص داده‌اند نیز به عنوان شاخص‌هایی جهت خوشه‌بندی حوضه‌ها استفاده شد. نقشه کاربری اراضی مورد استفاده از شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه گردید.

۲-۲-۳- شاخص‌های خاک

در کنار شاخص‌های مورفولوژیکی و کاربری اراضی، ۸ نوع پارامتر خاک شامل درصد رس، درصد سیلت، درصد شن، ظرفیت آب موجود در لایه خاک ($mm\ H_2O/mm\ soil$)، جرم مخصوص ظاهری خاک مرطوب (g/cm^3)، محتوی کربن آلی خاک (%soil weight)، هدایت هیدرولیکی اشباع



نگاره ۱: موقعیت حوضه آبخیز کرخه و زیرحوضه‌های مورد مطالعه

شده (mm/hr) و ماکزیمم عمق ریشه دوانی در پروفیل خاک (cm) از نقشه خاک فائو استخراج شده و به عنوان شاخص‌هایی جهت خوشه‌بندی حوضه‌ها استفاده شدند.

۲-۳- تحلیل عاملی

تحلیل عاملی از جمله روش‌های چند متغیره است که در آن، متغیرهای مستقل و وابسته مطرح نیست؛ زیرا این روش جزء تکنیک‌های هم وابسته محسوب می‌گردد و کلیه متغیرها نسبت به هم وابسته‌اند. مسأله اساسی تعیین این مطلب است که آیا تعداد زیادی متغیر اصلی را می‌توان به مجموعه کوچکتری از متغیرها، با کمترین میزان ریزش اطلاعات تبدیل کرد؟ به عبارت دیگر، تحلیل عاملی می‌خواهد داده‌های پیچیده را با توصیف آنها برحسب تعداد کمتری متغیر ساده‌سازی کند *(Sewell, 2007)*. هدف اصلی تحلیل عاملی تلخیص تعداد زیادی از متغیرها در تعداد محدودی از عامل‌ها می‌باشد، بطوری که کمترین میزان از دست رفتن اطلاعات رخ دهد. در این تحقیق استخراج عامل‌ها بر اساس روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA)[1] بوده است. در این روش متغیرها در عامل‌هایی قرار می‌گیرند، به طوری که از عامل اول به عامل‌های بعدی درصد واریانس کاهش می‌یابد، از این رو متغیرهایی که در عامل‌های اولی قرار می‌گیرند، واریانس بیشتری داشته و تأثیرگذارترین هستند *(زارع چاهوکی، ۱۳۸۹)*.

۲-٤- روش خوشه‌بندی فازی

روش‌های تفکیکی به دو بخش خوشه‌بندی سخت و خوشه‌بندی فازی تقسیم می‌شوند. روش خوشه‌بندی سخت منجر به تشکیل نتایج قطعی می‌شود و هر داده به یک و فقط یک خوشه نسبت داده می‌شود که اعضای درون یک خوشه صرفاً به آن خوشه تعلق دارند، در حالی که در خوشه‌بندی فازی، یک تفکیک فازی صورت می‌گیرد به این معنی که هر داده با یک درجه تعلق به هر خوشه متعلق است. نظریه مجموعه‌های فازی بر منطق فازی (چند ارزشی) استوار بوده و اساساً به منظور اقدام در شرایط ابهام ارائه گردیده

1. Principal Component Analysis

جدول ۱: لیست شاخص‌های مورفولوژیکی

نام شاخص	فرمول	تعریف علائم	واحد
سطح حوضه (A)	-	-	Km^2
محیط حوضه (P)	-	-	Km
طول حوضه (L_b)	$L_b = 1.312A^{0.568}$	A: سطح حوضه	Km
ضریب فرم حوضه (R_f)	$R_f = \sum A / L_b^2$	A: سطح حوضه، L_b: حداکثر طول حوضه	-
ضریب فشردگی (C_C)	$Cc = P / 2\sqrt{A\pi}$	P: محیط حوضه، A: سطح حوضه، ð: عدد نپر	-
کرویت حوضه (R_c)	$Rc = 12.57A / P^2$		-
کشیدگی حوضه (R_e)	$Re = \sqrt{A/\pi} / L_b$	A: سطح حوضه، L_b: حداکثر طول حوضه	-
شکل حوضه (B_s)	$Bs = L_b^2 / A$		-
طول آبراهه‌ها (L)	$L = \sum l$	l: طول هر آبراهه	Km
میانگین طول شبکه زهکشی (L_m)	$L_m = \sum L / N$	L: کل طول آبراهه‌ها، N: تعداد آبراهه‌ها	Km
تراکم زهکشی (D_d)	$D_d = \sum L / A$	L: کل طول آبراهه‌ها، A: سطح حوضه	Km^{-1}
فراوانی آبراهه‌ها (D_f)	$D_f = \sum N / A$	N: تعداد آبراهه‌ها، A: سطح حوضه	Km^{-2}
شاخص پیچان‌رودی (سینوزیتی) (S_i)	$S_i = L_m / L_b$	L_m: میانگین طول شبکه زهکشی، L_b: حداکثر طول حوضه	-
نسبت بافت (T)	$T = \sum N / P$	N: تعداد آبراهه‌ها، P: محیط حوضه	Km^{-1}
طول جریان سطحی (L_o)	$L_o = 0.5 / D_d$	D_d: تراکم زهکشی	Km
تعداد پستی و بلندی (R_n)	$Rn = T_r * D_d$	T_r: کل پستی و بلندی، D_d: تراکم زهکشی	-
زمان تمرکز (T_c)	$T_c = (0.885 * L_b^3 / T_r)\ 0.385$	T_r: کل پستی و بلندی، L_b: حداکثر طول حوضه	hr
کل پستی و بلندی (T_r)	$Tr = H_{max} - H_{min}$	H_{max}: ارتفاع حداکثر حوضه، H_{min}: ارتفاع حداقل حوضه، L_b: حداکثر طول حوضه	m
نسبت پستی بلندی (R_r)	$Rr = (H_{max} - H_{min}) / L_b$		-
شیب	-	-	%
شاخص رطوبت توپوگرافی (TW_I)	$TWI = Ln(As/tanó)$	A_s: مساحت ویژه حوضه، ð: درجه شیب	-

است. در شرایط واقعی خوشه‌بندی فازی بسیار طبیعی‌تر از خوشه‌بندی سخت است، چون داده‌های موجود در مرز خوشه‌های مختلف مجبور به تعلق کامل به یکی از خوشه‌ها نیستند و با درجه تعلقی بین صفر تا یک (که نشان‌دهنده تعلق نسبی آنهاست) تفکیک می‌شوند *(بابایی و فیضی، ۱۳۸۳)*. کاربردی‌ترین الگوریتم خوشه‌بندی فازی، الگوریتم c-mean می‌باشد که در این الگوریتم برای خوشه‌بندی n داده در c دسته، یک تابع هدفjmبه صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

رابطه (۱)

$$J_m = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{c} u_{ik}^m \, d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{c} u_{ik}^m \left\| x_k - v_i \right\|^2$$

در رابطه (۱) m یک عدد حقیقی بزرگتر از یک است که در اکثر موارد برایm عدد ۲ انتخاب می‌شود. اگر در فرمول فوق m را برابر یک قرار دهیم تابع هدف خوشه‌بندیc میانگین (کلاسیک) غیرفازی بدست می‌آید. در فرمول فوق x_k نمونه kام و v_i نماینده یا مرکز خوشهiام و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد. u_{ik} میزان تعلق نمونه i ام در خوشه k ام را نشان می‌دهد. علامت||*|| میزان تشابه (فاصله) نمونه با (از) مرکز خوشه می‌باشد که می‌توان از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد استفاده کرد. از روی u_{ik} می‌توان یک ماتریس U تعریف کرد که دارای c سطر و n ستون می‌باشد و مؤلفه‌های آن هر مقداری بین ۰ تا ۱ را می‌توانند اختیار کنند. اگر تمامی مؤلفه‌های ماتریسU بصورت ۰ و یا ۱ باشند الگوریتم مشابه c میانگین کلاسیک خواهد بود. با اینکه مؤلفه‌های ماتریس U می‌توانند هر مقداری بین ۰ تا ۱ را اختیار کنند اما مجموع مؤلفه‌های هر یک از ستون‌ها باید برابر ۱ باشد و داریم:

رابطه (۲)

$$\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1, \forall \quad k = 1, \ldots, n$$

معنای این شرط این است که مجموع تعلق هر نمونه به c خوشه باید برابر ۱ باشد. برای بدست آوردن فرمول‌های مربوط بهuik وvi باید تابع هدف تعریف شده را مینیمم کرد. با استفاده از شرط فوق و برابر صفر قرار دادن مشتق تابع هدف روابط ۳ و ٤ را خواهیم داشت:

رابطه (۳)

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{2/(m-1)}}$$

رابطه (٤)

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}^m \, x_k}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}^m}$$

با استفاده از دو فرمول محاسبه شده مراحل الگوریتم خوشه‌بندی c میانگین فازی بصورت زیر می‌باشد:

۱- مقداردهی اولیه برای c، m و U^0. خوشه‌های اولیه حدس زده می‌شوند.

۲- مراکز خوشه‌ها محاسبه شوند (محاسبه v_iها).

۳- محاسبه ماتریس تعلق از روی خوشه‌های محاسبه شده در مرحله ۲.

٤- اگر $\varepsilon \leq \| Ul+1-Ul \|$ الگوریتم خاتمه می‌یابد و در غیر این صورت از مرحله ۲ الگوریتم تکرار می‌شود.

۲-۵- استانداردسازی داده‌ها

جهت پرهیز از تأثیر واحدهای اندازه‌گیری و عدم وابستگی به آنها، داده‌های استخراج شده استاندارد می‌شوند، در این صورت متغیرها تأثیر غیرمتجانسی بر اندازه‌گیری فاصله نخواهند داشت. بنابراین در این مطالعه متغیرها بین صفر و یک استاندارد شدند.

۲-٦- شاخص‌های ارزیابی تعداد بهینه خوشه‌ها

یکی از مهمترین مسایل در خوشه‌بندی انتخاب تعداد خوشه‌های مناسب می‌باشد. شرایط مناسب بودن تعداد خوشه‌ها زمانی ایجاد می‌شود که نمونه‌های موجود در یک خوشه تا حد امکان شبیه به یکدیگر باشند؛ همچنین نمونه‌های متعلق به خوشه‌های متفاوت تا حد امکان با یکدیگر نامشابه باشند (به‌عبارتی خوشه‌ها باید ماکزیمم فشردگی را داشته باشند و تا حد امکان جدایی آنها نیز زیاد باشد).

در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد بهینه خوشه‌بندی فازی از تابع ارزیابی ضریب‌افراز[1] (V_{PC}) و تابع ارزیابی آنتروپی‌افزار[2] (V_{PE}) استفاده شد *(بترتیب روابط ۵ و ٦، Bezdek, ۱۹۷٤)*.

رابطه (۵)

$$V_{PC} = \frac{1}{n}\left(\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}^{\ 2}\right)$$

رابطه (٦)

$$V_{PE} = -\frac{1}{n}\left(\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\ \log(u_{ik})\right)$$

مقدار تابع V_{PC} بین $1/c$ و ۱ می‌باشد که هر چه این مقدار به ۱ نزدیکتر باشد خوشه‌بندی بهتر است. در حالی که مقدار تابع V_{PE} بین ۰ تا log2c می‌باشد. نکته قابل توجه در مورد دو تابع معرفی شده در بالا این است که زمانی که PC برابر ۱ باشد PE برابر ۰ خواهد بود و در این حالت خوشه‌بندی معادل خوشه‌بندی کلاسیک است. اگر PC برابر $1/c$ باشد PE برابر log2c خواهد بود که در این حالت خوشه‌بندی در فازی‌ترین حالت خود خواهد بود. از طرف دیگر باید برای رسیدن به حالت خوشه‌بندی مطلوب PC ماکزیمم و PE مینیمم شود. بنابراین در خوشه‌بندی‌های فازی سعی می‌شود تا خوشه‌ها به خوشه‌های کلاسیک نزدیکتر باشند و نمونه‌ها با تعلق زیاد به خوشه‌ها نسبت داده شوند.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج تحلیل عاملی

هدف اصلی استفاده از تحلیل عاملی تلخیص تعداد زیادی از متغیرها در تعداد محدودی از عامل‌ها می‌باشد، بطوریکه کمترین میزان از دست رفتن اطلاعات را داشته باشیم. فرآیند تلخیص داده‌ها بر روی شاخص‌های مورفولوژیکی، کاربری اراضی و خاک بطور جداگانه صورت گرفت تا بتوان از هر سه نوع شاخص‌های مورفولوژیکی، کاربری اراضی و خاک در فرآیند خوشه‌بندی بهره برد. با توجه به اینکه مقادیر آماره KMO برای شاخص‌های مورفولوژیکی، کاربری اراضی و خاک به ترتیب برابر با ۰/۷۱، ۰/٦۹ و ۰/۷٦ شدند، پس داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب هستند *(Choubin et al., 2014)*. برای تعیین تعداد بهینه مؤلفه‌ها از مقدار ویژه[3] استفاده شد. عامل‌هایی که دارای مقدار ویژه بزرگتر از یک هستند، به عنوان عوامل مهمی که بیشترین نقش را در تبیین واریانس دارند انتخاب شدند.

نتایج تحلیل عاملی برای شاخص‌های مورفولوژیکی (جدول ۲) نشان داد که ٤ عامل مقادیر ویژه بزرگتر از یک را دارا می‌باشند، که در مجموع ۸۲ درصد واریانس را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین بعد از چرخش Varimax از بین شاخص مورفولوژیکی، شاخص‌های سطح حوضه، کشیدگی حوضه، میانگین طول زهکش‌ها، کل پستی و بلندی شاخص‌هایی بودند که دارای بار عاملی بیشتری بودند و به عنوان متغیرهای نهایی از بین شاخص‌های مورفولوژیکی انتخاب شدند (جدول ۳). این درحالی است که نتایج تحلیل عاملی برای شاخص‌های کاربری اراضی (جدول ۲) نشان داد که سه عامل مقادیر ویژه بزرگتر از یک را دارا می‌باشند، که در مجموع ۷۸/۷۲ درصد واریانس را به خود اختصاص می‌دهند. از بین شاخص کاربری اراضی، شاخص‌های درصد سطح مراتع، درصد سطح اراضی کشاورزی و درصد سطح اراضی بایر دارای بار عاملی بیشتری بودند، که نهایتاً به عنوان متغیرهای نهایی از بین شاخص‌های کاربری اراضی انتخاب شدند (جدول ۳).

هم‌چنین نتایج تحلیل عاملی برای شاخص‌های خاک (جدول ۲) نشان داد که دو عامل مقادیر ویژه بزرگتر از یک را دارا می‌باشند، که در مجموع ۸۲ درصد واریانس را به خود اختصاص می‌دهند. از بین شاخص‌های خاک، شاخص ظرفیت آب موجود در لایه خاک و شاخص هدایت هیدرولیکی اشباع شده دارای بار عاملی بیشتری بودند، که نهایتاً به عنوان متغیرهای نهایی از بین شاخص‌های خاک انتخاب شدند (جدول ۳). بنابراین طبق نتایج تحلیل عاملی

[1]-Partition Coefficient

[2]- Partition Entropy

[3]- Eigenvalues

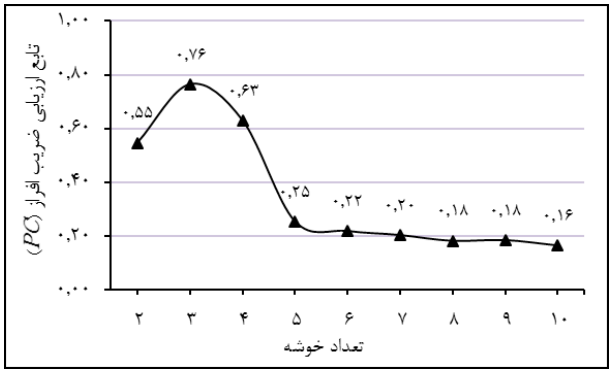
برای شاخص‌های مورفولوژیکی، کاربری اراضی و خاک نهایتاً ۹ شاخص (شامل چهار شاخص مورفولوژیکی، سه شاخص کاربری اراضی و دو پارامتر خاک) جهت خوشه‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز کرخه انتخاب شدند که در جدول ۳ مقادیر بار عاملی بعد از چرخش Varimax برای این شاخص‌ها ارائه شده است.

جدول ۲: درصد واریانس و مقادیر ویژه عامل‌های مختلف برای شاخص‌های فیزیکی-مکانی

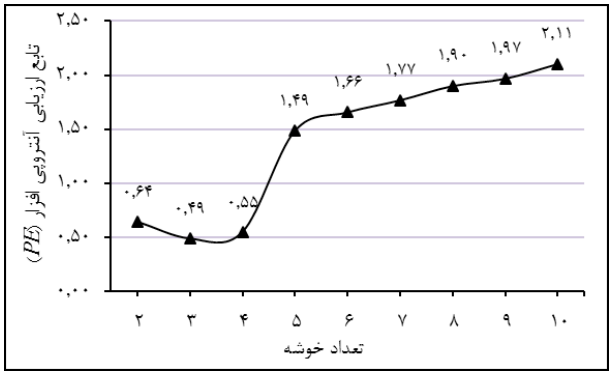
نوع شاخص	مؤلفه‌ها	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی
مورفولوژیکی	۱	۸/۳۵	۳۹/۷۵	۳۹/۷۵
	۲	٤/۷۲	۲۲/٤۸	٦۲/۲٤
	۳	۲/٤۹	۱۱/۸۵	۷٤/۰۹
	٤	۱/٦٦	۷/۹۲	۸۲/۰۲
کاربری اراضی	۱	۱/۹٦	۳۲/۷۵	۳۲/۷۵
	۲	۱/٦٤	۲۷/۲۹	٦۰/۰٤
	۳	۱/۱۲	۱۸/٦۸	۷۸/۷۲
خاک	۱	۳/۹۰	٤۸/٦۹	٤۸/٦۹
	۲	۲/٦۷	۳۳/۳۲	۸۲/۰۲

۳-۲- نتایج خوشه‌بندی فازی

پس از مشخص شدن تعداد متغیرهای نهایی، جهت آماده سازی داده‌ها برای خوشه‌بندی فازی، داده‌های محاسبه شده این متغیرها برای زیرحوضه‌ها بین ۰ تا ۱ نرمال شدند. برای خوشه‌بندی فازی (FCM) از نرم افزار Matlab_R۲۰۱۳a استفاده شد. جهت تعیین تعداد خوشه‌های بهینه از تابع ارزیابی ضریب‌افراز (V_{PC}) و تابع ارزیابی آنتروپی‌افزار (V_{PE}) استفاده شد. برای رسیدن به حالت خوشه‌بندی مطلوب باید PC ماکزیمم و PE مینیمم شود. از طریق سعی و خطا از بین ۱۰ خوشه مورد بررسی، تعداد بهینه خوشه‌ها برابر با ۳ خوشه انتخاب گردید. نگاره‌های ۲ و ۳ به‌ترتیب تابع ارزیابی ضریب افراز (V_{PC}) و تابع ارزیابی آنتروپی افزار (V_{PE}) را برای تعیین تعداد خوشه بهینه نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، در تعداد خوشه برابر با ۳، PC ماکزیمم و PE مینیمم است (به ترتیب برابر با ۰/۷٦ و ۰/٤۹). جدول ٤ نتایج خوشه‌بندی فازی را در ۳ خوشه نشان می‌دهد. در این جدول دسته‌بندی زیرحوضه‌ها به همراه درصد تعلق هر یک از زیرحوضه‌ها به دسته مربوطه ارائه شده است.



نگاره ۲: تابع ارزیابی ضریب افراز (PC) برای تعیین تعداد خوشه بهینه



نگاره ۳: تابع ارزیابی آنتروپی افزار (PE) برای تعیین تعداد خوشه بهینه

نگاره ٤ پهنه‌بندی زیرحوضه‌های کرخه به شیوه تحلیل فازی بر اساس مشابهت متغیرهای فیزیکی را در ۳ گروه همگن نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است مناطق شمال شرقی و بخش‌هایی از مناطق مرکزی در گروه ۱، مناطق شمال غربی- جنوب شرقی به همراه مناطق جنوبی در گروه ۲، مناطق مرکزی و بخش‌هایی از مناطق جنوب غربی در خوشه ۳ قرار گرفته‌اند. بنابراین با توجه به نگاره٤ مناطق همگن از نظر خصوصیات فیزیکی (پارامترهای مورفولوژیکی، نوع کاربری اراضی و خاک) حوضه آبخیز کرخه مشخص شد.

جدول ۳: مقادیر بار عاملی بعد از چرخش Varimax برای شاخص‌های فیزیکی-مکانی

شاخص‌های مورفولوژیکی انتخابی	علامت	بار عاملی	شاخص‌های کاربری اراضی انتخابی	علامت	بار عاملی	شاخص‌های خاک انتخابی	علامت	بار عاملی
سطح حوضه	A	۰/۹۵٤	درصد سطح مراتع	Range	۰/۹۹۲	ظرفیت آب موجود در لایه خاک	sol_awc	۰/۹۵۹
کشیدگی حوضه	R_e	۰/۹۳۹	درصد سطح اراضی کشاورزی	Agri	۰/۹۵۰	هدایت هیدرولیکی اشباع شده	sol_k	۰/۹۵۳
میانگین طول زهکش‌ها	L_m	-۰/۹۰۱	درصد سطح اراضی بایر	Barren	۰/۹۰۲	–	–	–
کل پستی و بلندی	T_r	۰/۸۹۵	–	–	–	–	–	–

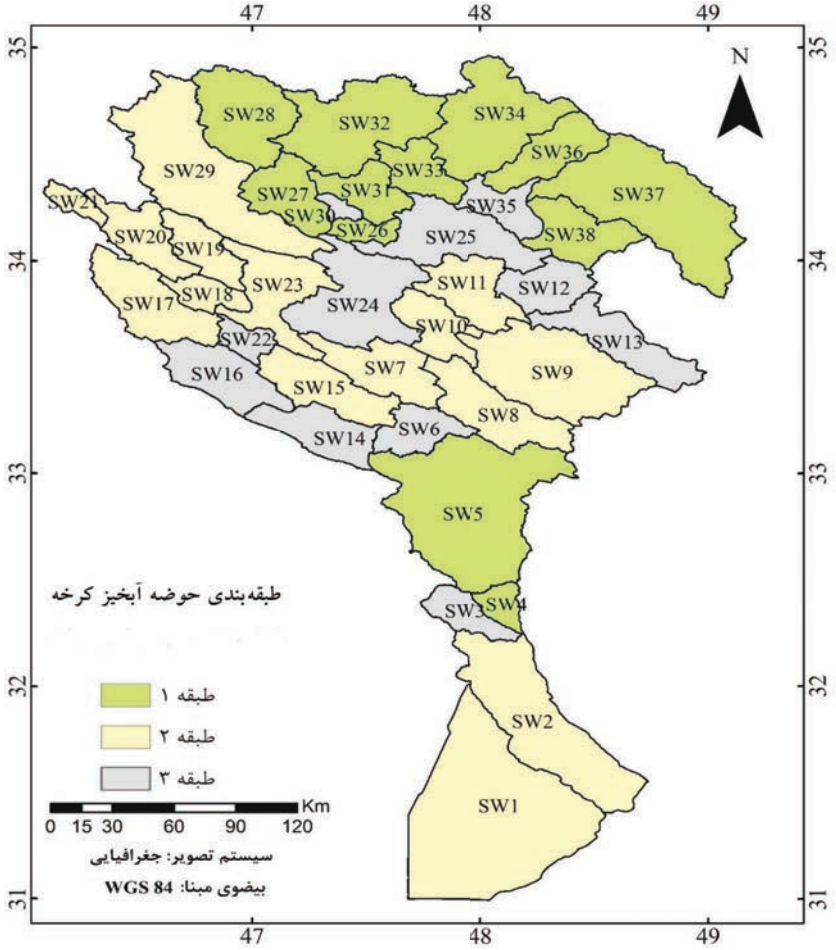
٤- بحث و نتیجه‌گیری

رویکرد ارائه شده در این تحقیق کاربرد متغیرهای فیزیکی در یک ناحیه وسیع جهت طبقه‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز کرخه بوده است. خصوصیات مورفولوژیکی، نوع کاربری اراضی و خاک در حوضه‌ها استخراج شدند و با استفاده از روش فازی ۳۸ زیرحوضه مطالعاتی در سه گروه همگن قرار گرفت.

برای دست‌یابی به مناطق همگن، از تابع ارزیابی ضریب افراز و تابع ارزیابی آنتروپی افزار استفاده شد و تعداد بهینه خوشه‌ها با توجه به مقادیر شاخص‌های ارزیابی تعیین گردید. در گروه یک، ۱۲ زیرحوضه (شامل زیرحوضه‌های ٤، ٥، ٢٦، ٢٧، ٢٨، ٣٠، ٣١، ٣٢، ٣٣، ٣٤، ٣٦، ٣٧ و ٣٨) قرار گرفتند که در مناطق شمال شرقی و بخش‌هایی از مناطق مرکزی حوضه کرخه قرار گرفته‌اند. در گروه دو، ۱۵ زیرحوضه (شامل زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۳ و ۲۹) قرار گرفتند که مناطق شمال غربی- جنوب شرقی به همراه مناطق جنوبی را شامل می‌شوند. در گروه سه، ۱۱ زیرحوضه (شامل زیرحوضه‌های ۳، ٦، ۱۲، ۱۳، ۱٤، ۱٦، ۲۲، ۲٤، ۲٥، ۳۰ و ۳٥) قرار دارد که مناطق مرکزی و بخش‌هایی از مناطق جنوب غربی حوضه کرخه را دربر می‌گیرند.

جدول ٤: تفکیک زیرحوضه‌ها به روش فازی در سه خوشه متغیرهای فیزیکی- مکانی

زیرحوضه	خوشه	درصد تعلق	زیرحوضه	خوشه	درصد تعلق
SW1	۲	۰/۷۳	SW20	۲	۰/٤۹
SW2	۲	۰/۹۰	SW21	۲	۰/٥۱
SW3	۳	۰/۹٤	SW22	۳	۰/۹۱
SW4	۱	۰/۹٤	SW23	۲	۰/۷٤
SW5	۱	۰/٦۳	SW24	۳	۰/٥٤
SW6	۳	۰/٤٥	SW25	۳	۰/۸٦
SW7	۲	۰/٥۹	SW26	۱	۰/۹٤
SW8	۲	۰/۹۲	SW27	۱	۰/۷٦
SW9	۲	۰/۸۲	SW28	۱	۰/٤٤
SW10	۲	۰/٥۸	SW29	۲	۰/٥۷
SW11	۲	۰/۷۹	SW30	۳	۰/۹۱
SW12	۳	۰/۷٤	SW31	۱	۰/۹۷
SW13	۳	۰/٦۸	SW32	۱	۰/۸۱
SW14	۳	۰/٦۲	SW33	۱	۰/۹۰
SW15	۲	۰/۷٥	SW34	۱	۰/۷٦
SW16	۳	۰/۸۸	SW35	۳	۰/۹۰
SW17	۲	۰/٦۹	SW36	۱	۰/۸٦
SW18	۲	۰/٤٦	SW37	۱	۰/۸۱
SW19	۲	۰/٦٤	SW38	۱	۰/۹۱



نگاره ٤: پهنه‌بندی زیرحوضه‌های کرخه به شیوه تحلیل فازی بر اساس مشابهت متغیرهای فیزیکی

مقایسه نتایج این مطالعه با تحقیقات پیشین حاکی از آن است که مطالعات قبلی بیشتر از روش‌های خوشه‌بندی سخت جهت طبقه‌بندی آبخیز استفاده کرده‌اند و کمتر به روش فازی پرداخته شده است. با این حال در راستای این پژوهش، تحقیقات پیشین نیز توانستند به‌طور موفقیت‌آمیزی گروه‌بندی آبخیز را با استفاده از شاخص‌های فیزیکی و روش‌های خوشه‌بندی مختلف انجام دهند *(دارابی و همکاران، ۱۳۹۱؛ اسلامی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Ssegane et al., ۲۰۱۲؛ Latt et al., ۲۰۱٤)*. دارابی و همکاران (۱۳۹۱) با به کار بردن تکنیک‌های خوشه‌بندی چند میانگینی و روش سلسله‌مراتبی، و با استفاده از ۱۰ پارامتر موفورمتریک، ٢٤ زیرحوضه از حوضه آبخیز پل‌دوآب شازند را در پنج گروه همگن طبقه‌بندی کردند. اسلامی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از آزمون تحلیل خوشه‌ای و با توجه به پارامترهای مورفومتری، سه گروه همگن از حوضه‌های آبخیز را جهت تحلیل منطقه‌ای آبدهی رودخانه‌های مرکزی ایران تشخیص دادند. Ssegane و همکاران (۲۰۱۲) نیز با استفاده از خصوصیات فیزیکی و هیپسومتری آبخیزها و با کمک الگوریتم خوشه‌بندی k-mean حوضه‌های مشابه را در سه منطقه از آمریکا خوشه‌بندی کردند. Latt و همکاران (۲۰۱٤) بر طبق خصوصیات فیزیوگرافی و با استفاده از روش خوشه‌بندی k-means چهار منطقه همگن را در میانمار تشخیص دادند.

آنالیز ویژگی‌های فیزیکی-مکانی حوضه آبخیز درک بهتری از شرایط مورفولوژیکی و فیزیکی فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها در حوضه‌های فاقد آمار مهمترین نقش را در برآوردهای هیدرولوژی دارند. تعیین و تشخیص شباهت بین زیرحوضه‌های آبخیز فاقد آمار، با ویژگی‌های فیزیکی مشابه، کمک می‌کند که عملیات حفاظت آب و خاک به

عنوان روشی برای اجرای هماهنگ در بین زیرحوضه‌ها انجام شود. منطقه مورد مطالعه به علت وسعت زیاد و همچنین کمبود اعتبارات لازم جهت اجرای عملیات آبخیزداری، نیازمند زمان زیادی می‌باشد. بنابراین تحقیق حاضر با هدف همگن‌بندی حوضه‌های آبخیز بوده است، بطوری که بتوان زیرحوضه‌هایی که از نظر پارامترهای فیزیکی به هم شباهت ذاتی دارند را در گروه‌های مشابه، خوشه‌بندی کرد. از اینرو حوضه‌هایی که در یک گروه قرار می‌گیرند، از نظر صفات استفاده شده در گروه‌بندی اختلاف معنی‌داری بین آنها وجود ندارد. به این ترتیب می‌توان عملیات حفاظتی و آبخیزداری را در یکی از زیرحوضه‌ها که شرایط بدی را نسبت به دیگر نقاط دارد، انجام داد و در نهایت این عملیات را به زیرحوضه‌های هم‌گروه تجویز کرد. بنابراین انجام چنین کاری ضمن کاهش حجم داده‌ها، سبب صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها در منطقه مورد مطالعه خواهد شد. از این رو همان‌طور که عطایی و شیران (۱۳۹۰) و دارابی و همکاران (۱۳۹۱) بیان کردند، این نوع خوشه‌بندی موجب اجرای ساده‌تر و بهتر عملیات مدیریتی و حفاظتی در مناطقی با ویژگی‌های مشابه می‌شود. در نهایت ۳ گروه پیشنهاد شده توسط این مطالعه می‌تواند به منظور اجرای عملیات حفاظتی توسط مدیران و برنامه‌ریزان اولویت‌بندی شده و تصمیم‌گیری بر اساس اولویت‌ها به مرحله اجراء درآید.

طبقه‌بندی حوضه شروع و پایان تحقیق در زمینه آبخیز نیست، بلکه تنها وسیله‌ای در جهت دستیابی به اهداف گسترده‌تر برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، محیط زیست، اکوسیستم، و دیگر سیستم‌های زمین و منابع است. با این وجود، طبقه‌بندی آبخیز قطعاً این امکان را فراهم می‌کند تا حوضه مؤثرتر و کارآمدتر مطالعه شود و استراتژی‌های مناسب‌تر توسعه یابد؛ به عبارت ساده‌تر موجب توسعه مدل، تعمیم در روش مدل‌سازی، و بهبود ارتباطات در جامعه هیدرولوژیکی و سایر رشته‌ها (تا آنجا که ممکن است) می‌شود *(Sivakumar and Singh, 2012)*.

۵- منابع و مآخذ

۱- اسلامی، پرهمت، ابراهیمی؛ علیرضا، جهانگیر، نادرقلی؛ (۱۳۹۳). تحلیل منطقه‌ای آبدهی رودخانه‌های مرکزی ایران. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ٦، شماره ۱، ص. ٧٤-٨٢.

۲- بابایی‌روچی، فیضی؛ غلامرضا، آوات؛ (۱۳۸۳). رده‌بندی استان‌های کشور بر مبنای شاخص‌های بهداشتی و جمعیتی به کمک تکنیک آماری خوشه‌بندی فازی. نشریه حکیم، دوره ۷ ، شماره ٤، ص. ۱-٦.

۳- تلوری، اسلامی؛ عبدالحسین، علیرضا؛ (۱۳۸۲). روش‌های برآورد جریان حداکثر لحظه‌ای سیل در حوضه‌های شمال کشور. پژوهش و سازندگی، دوره ١٦، شماره ۱، ص ۲-۱۳.

٤- دارابی، سلیمانی، شاهدی، میریعقوب‌زاده؛ حمید، کریم، کاکا، میرحسن؛ (۱۳۹۱). طبقه‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس پارامترهای مورفومتریک با استفاده از تحلیل‌های خوشه‌ای در حوضه آبخیز پل‌دوآب شازند. نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۲، شماره ٤، ص. ۱۹۹-۲۱۱.

۵- زارع چاهوکی، محمدعلی؛ تجزیه و تحلیل داده‌ها در پژوهش‌های منابع طبیعی با نرم‌افزار SPSS. (۱۳۸۹). انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تهران، ص. ۱۷۱-۱٦۱.

٦- عطایی، شیران؛ هوشمند، مهناز؛ (۱۳۹۰). شناسایی زیرحوضه‌های هیدرولوژیکی همگن از نظر عوامل ژئومورفولوژیک مؤثر بر سیلاب با استفاده از تحلیل خوشه‌ای (مطالعه موردی: دشت کرون)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ٤۲، شماره ۲، ص. ۷۹-۹۸.

۷- وزارت نیرو، (۱۳۸۳). مطالعات پتانسیل‌یابی و پایه طرح نیروگاه‌های برقابی متوسط در حوضه‌های آبریز دز، کارون و کرخه، گزارش مطالعات پایه حوضه کرخه: هواشناسی، جلد ۲-۵.

8- Bardossy, A. (2007). Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. Hydrology and Earth System Sciences, 11(2), 703-710.

9- Beven, K. J. (2000). Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. Hydrology

21- He, C. S., & DeMarchi, C. (2010). Modeling spatial distributions of point and nonpoint source pollution loadings in the Great Lakes Watersheds. International Journal of Environmental Science and Engineering, 2(1), 24-30.

22- Hundecha, Y., Ouarda, T. B., & Bárdossy, A. (2008). Regional estimation of parameters of a rainfall runoff model at ungauged watersheds using the "spatial" structures of the parameters within a canonical physiographic climatic space. Water Resources Research, 44(1).

23- Kahya, E., Kalaycı, S., & Piechota, T. C. (2008). Streamflow regionalization: case study of Turkey. Journal of Hydrologic Engineering, 13(4), 205-214.

24- Kult, J. (2013). Regionalization of hydrologic response in the Great Lakes basin: Considerations of temporal variability (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Milwaukee).

25- Latt, Z.Z., Wittenberg, H., & Urban, B. (2014). Clustering Hydrological Homogeneous Regions and Neural Network Based Index Flood Estimation for Ungauged Catchments: an Example of the Chindwin River in Myanmar. Water Resource Management. DOI 10.1007/s11269-014-0851-4.

26- McIntyre, N., Lee, H., Wheater, H., Young, A., & Wagener, T. (2005). Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. Water Resources Research, 41(12), W12434.

27- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resources Research, 26(7), 1465-1473.

28- Omernik, J. M., & Bailey, R. G. (1997). Distinguishing between watersheds and ecoregions. Journal of the American Water Resources Association, 33(5), 935-949.

Omernik, J. M., & Griffith, G. E. (1991). Ecological regions versus hydrologic units: frameworks for managing water quality. Journal of Soil and Water Conservation, 46(5), 334-340.

29- Rao, A. R., & Srinivas, V. V. (2006). Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. Journal of Hydrology, 318(1), 37-56.

30- Razavi, T., & Coulibaly, P. (2013). Classification and Earth System Sciences, 4(2), 203-213.

10- Bezdek, J.C. (1974), Cluster validity with fuzzy sets. J. Cybernetics 3, 58–73.

11- Bloeschl, G. (2009, December). The PUB report-gauging the status of predictions in ungauged catchments. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 10).

12- Castellarin, A., Burn, D.H., & Brath, A. (2008). Homogeneity testing: How homogeneous do heterogeneous cross-correlated regions seem? Journal of Hydrology, 360(1), 67-76.

13- Castiglioni, S., L. Lombardi, E. Toth, Castellarin, A., & Montanari, A. (2010). Calibration of rainfall-runoff models in ungauged basins: A regional maximum likelihood approach, Adv. Water Resour., 33, 1235–1242. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.04.009.

14- Cavadias, G. S., Ouarda, T. B., Bobée, B., & Girard, C. (2001). A canonical correlation approach to the determination of homogeneous regions for regional flood estimation of ungauged basins. Hydrological sciences journal, 46 (4), 499-512.

15- Chiang, S.M., Tsay, T.K., Nix, S.J. (2002a). Hydrologic regionalization of watersheds I: methodology development. J. Water Resour. Plan. Manage. 128, 3–11.

16- Chiang, S.M., Tsay, T.K., Nix, S.J. (2002b), Hydrologic regionalization of watersheds II: applications. J. Water Resour. Plan.Manage. 128, 12–20.

17- Choubin, B., Khalighi-Sigaroodi, S., Malekian, A., Ahmad, S., Attarod, P. (2014). Drought forecasting in a semi-arid watershed using climate signals: a neuro-fuzzy modeling approach. Journal of Mountain Science 11 (6): 1593–1605. DOI: 10.1007/s11629-014-3020-6.

18- Coulibaly, P., & Burn, D. H. (2005). Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows. Journal of Climate, 18(1), 191-210.

19- Feinstein, D.T., Hunt, R.J., & Reeves, H.W., (2010). Regional groundwater-flow model of the Lake Michigan Basin in support of Great Lakes Basin water availability and use studies: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5109, 379 p.

20- Graf, W. L. (1999). Dam nation: A geographic census of American dams and their large scale hydrologic impacts. Water resources research, 35(4), 1305-1311.

of Ontario watersheds based on physical attributes and streamflow series. Journal of Hydrology, 493, 81-94.

31- Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P. A., & Carrillo, G. (2011). Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. Hydrology and Earth System Sciences, 15(9), 2895-2911.

32- Sellami, H., Jeunesse, I.L., Benabdallah, S., Baghdadi, N., & Vanclooster, M. (2014). Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France). Hydrology and Earth System Sciences, Copernicus Publications, 2393-2413.

33- Sewell, M. (2007). Kernel methods. London: University of London, Department of Computer Science. Sivakumar, B., & Singh, V. P. (2012). Hydrologic system complexity and nonlinear dynamic concepts for a catchment classification framework. Hydrology and Earth System Sciences, 16(11), 4119-4131.

34- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., ... & Oki, T. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. Hydrological sciences journal, 48(6), 857-880.

35- Ssegane, H., Tollner, E. W., Mohamoud, Y. M., Rasmussen, T. C., & Dowd, J. F. (2012). Advances in variable selection methods II: Effect of variable selection method on classification of hydrologically similar watersheds in three Mid-Atlantic ecoregions. Journal of Hydrology, 438, 26-38.

36- Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P., & Woods, R. (2007). Catchment classification and hydrologic similarity. Geography Compass, 1(4), 901-931.

37- Wardrop, D. H., Kentula, M. E., Stevens, D. L., Jensen, S. F., & Brooks, R. P. (2007). Assessment of wetland condition: an example from the Upper Juniata Watershed in Pennsylvania, USA. Wetlands, 27(3), 416-431.

38- Winter, T. C. (2001). THE CONCEPT OF HYDROLOGIC LANDSCAPES1.

39- Wolock, D. M., Winter, T. C., & McMahon, G. (2004). Delineation and evaluation of hydrologic-landscape regions in the United States using geographic information system tools and multivariate statistical analyses. Environmental Management, 34(1), S71-S88.

40- Yadav, M., Wagener, T., & Gupta, H. (2007). Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. Advances in Water Resources, 30(8), 1756-1774.