

تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از شاخص RDI

حجت احمدزاده^{۱*}، احمد فاخری‌فرد^۱، محمدعلی قربانی^۱ و مسعود تجریشی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۵)

چکیده

در مدیریت ریسک خشکسالی موضوع تحلیل منطقه‌ای خشکسالی بسیار حائز اهمیت به نظر می‌رسد. در این مقاله با ارائه شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای جدید (RDI) به این موضوع مهم پرداخته شده است. برای این منظور حوضه آبریز آجی‌چای به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. برای تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی ابتدا برای هر یک ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه سری زمانی شاخص خشکسالی جریان (SDI) محاسبه شد. سپس به‌منظور تعیین مناطق همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی از تحلیل خوشه‌بندی به‌روش k-means استفاده شد. بر اساس نتایج خوشه‌بندی ۶ منطقه همگن در حوضه تشخیص داده شد. برای هر یک از این مناطق سری زمانی RDI برای دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ محاسبه شد. نتایج نشان داد که طی دوره مورد مطالعه در هر یک از مناطق ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به‌ترتیب ۸۴/۳، ۸۳/۳، ۷۸/۹، ۸۰/۱ و ۸۲/۱ درصد از مواقع ترسالی و خشکسالی خفیف رخ داده است. همچنین در همه مناطق مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا) از مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا) بیشتر است. طوری که طی دوره مورد مطالعه در مناطق ۲ و ۳ مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا) نسبت به مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا) بیش از دو برابر است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل منطقه‌ای خشکسالی، SDI، خوشه‌بندی، RDI، مناطق همگن، حوضه آبریز آجی‌چای

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲. گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hojatahmadzadeh6@gmail.com

مقدمه

خشکسالی (Drought) یکی از مهم ترین و شایع ترین بلایای جوی و اقلیمی است که بخش های مختلف جامعه مانند منابع آب قابل دسترس، کشاورزی، صنعت، اقتصاد، بهداشت و... را تحت تأثیر قرار می دهد (۱۶). بنا به تعریف پالمر خشکسالی عبارت است از کمبود رطوبت مستمر و غیرطبیعی (۱۶). لازم به ذکر است که خشکسالی، وضعیتی گذرا و برگشت پذیر از اقلیم است. شدت و مدت، مهم ترین مشخصه های خشکسالی هستند که نقش مهمی در مدیریت خشکسالی ها ایفا می کنند (۲). این پدیده بسته به شدت و مدت آن می تواند خسارات اقتصادی و حتی اجتماعی سنگینی بر منطقه تحمیل کند. واقع شدن کشور ایران در اقلیم خشک و نیمه خشک از یک طرف و بالا بودن تقاضای آب در بخش های مختلف مصرف آب به ویژه بخش کشاورزی آبی از طرف دیگر، آسیب پذیری این کشور را نسبت به پدیده خشکسالی افزایش داده است. این آسیب پذیری در حوضه هایی مانند دریاچه ارومیه که با مشکلات زیست محیطی مواجه هستند تشدید می یابد (۹).

پژوهشگران اغلب برای پایش و ارزیابی خشکسالی ها از شاخص های خشکسالی (Drought Index) مختلف که از متغیرهای هیدرولوژیکی، اقلیمی، زراعتی مشتق شده اند، استفاده می کنند و تصمیم گیری برای مدیریت خشکسالی ها بر اساس این شاخص ها صورت می پذیرد (۹). بسیاری از مطالعاتی که در زمینه تحلیل خشکسالی انجام گرفته است، پایش و تحلیل خشکسالی به صورت ایستگاهی (نقطه ای) صورت گرفته و نتایج به دست آمده برای یک ایستگاه (نقطه و یا نقاط) برای تصمیم گیری مدیریتی کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شده است. بنابراین تحلیل نقطه ای در یک منطقه ممکن است برای مدیریت ریسک خشکسالی منطقه کافی نباشد. تحلیل منطقه ای خشکسالی رویکردی است که برای فائق آمدن بر این مسئله توسعه داده شده است. شناسایی مناطق همگن خشکسالی با در نظر داشتن مؤلفه های زمانی و مکانی خشکسالی از

ویژگی های مهم در رفتارسنجی این بلیه محسوب می شود و در مدیریت آن نقش مؤثری دارد. مفیدی پور و همکاران (۸) به مطالعه رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص های SPI و SDI (Streamflow Drought Index) در حوضه آبریز اترک پرداختند. نتایج نشان داد که در سطح ۹۹ درصد رابطه زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی معنی دار بوده و این همبستگی برای دوره ۳ ماهه حداکثر است. اسلامیان و همکاران (۵) با توجه به مفهوم دبی آستانه به تعیین دوره های خشکسالی هیدرولوژیک در حوضه آبریز کرخه پرداختند. آنها ابتدا با استفاده از منحنی تداوم جریان، دبی آستانه Q_{95} را استخراج کرده و سپس دوره های خشکسالی هیدرولوژیک را طی سال های ۱۳۸۱-۱۳۴۵ برای حوضه کرخه تعیین کردند. در مطالعه ای دیگر تبری و همکاران (۱۵) با استفاده از شاخص SDI با مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه به تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی در ۱۲ ایستگاه آبسنجی واقع در شمال غرب ایران (غرب دریاچه ارومیه) طی دوره ۲۰۰۹-۱۹۷۵ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تقریباً تمام ایستگاه های آبسنجی مورد مطالعه طی سال های ۲۰۰۹-۱۹۹۷ خشکسالی شدیدی را تجربه کردند.

در زمینه خشکسالی منطقه ای مطالعات کمتری نسبت به خشکسالی نقطه ای صورت گرفته است. اسلامیان و همکاران (۶) به بررسی پراکنش مکانی ویژگی های خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از روش تحلیل خوشه ای پرداختند. در این تحقیق با استفاده از ۱۰ مشخصه خشکسالی که بر اساس شدت، مدت و فراوانی شاخص SPI سه ماهه استوار بودند و با استفاده از روش خوشه بندی سلسله مراتبی وارد (Ward Hierarchical Clustering) پنج گروه مکانی خشکسالی برای استان مشخص شد. رضیئی و عزیز (۱۲)، نیز به کمک روش های خوشه بندی و تحلیل اجزای اصلی (Principal Component Analysis) به منطقه بندی رژیم بارشی در منطقه کوهستانی غرب ایران بر اساس ۱۰ پارامتر اقلیمی

نوآوری و مزیت تحقیق حاضر را می‌توان کمی کردن شدت خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای با استفاده از شاخص جدید RDI تلقی کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

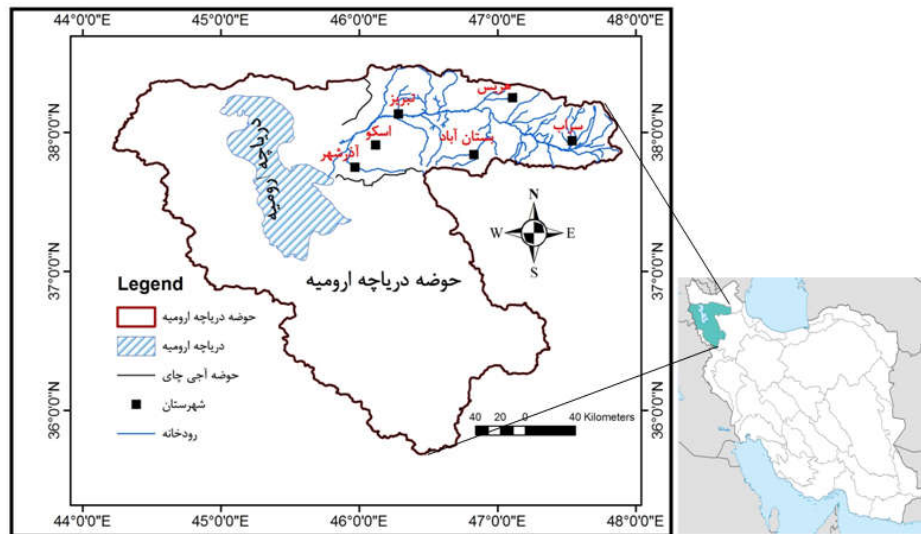
منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر حوضه آبریز آجی‌چای است که با وسعتی بالغ بر ۱۲۰۰۰ کیلومتر مربع بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه بعد از زیرحوضه زرينه‌رود محسوب می‌شود. این حوضه بین طول‌های جغرافیایی $45^{\circ}46'$ و $47^{\circ}50'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ}39'$ و $38^{\circ}28'$ شمالی واقع شده است. تلخه‌رود (آجی‌چای) در دره‌ای بین کوه‌های ارسباران غربی، قوشه داغ و سبلان از شمال و کوه‌های برقوش داغ و سهند از جنوب قرار گرفته است و در جهت عمومی شرقی- غربی جریان دارد. طول رودخانه اصلی حوضه آجی‌چای حدود ۲۶۵ کیلومتر بوده و شهرهای تبریز، آذرشهر، سراب، بستان آباد، هریس و اسکو نقاط مهم شهری آن به‌شمار می‌آیند. متوسط بارندگی سالانه حوضه آجی‌چای طی ۱۵ سال اخیر تقریباً ۳۲۰ میلی‌متر است. در شکل ۱ شمایی کلی از حوضه آجی‌چای، شبکه رودخانه‌ها و شهرستان‌های واقع در آن، نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر از آمار ۱۸ ایستگاه آب‌سنجی واقع در حوضه آبریز که از طول دوره آماری مناسب برخوردار بودند، برای بررسی تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد استفاده در تحقیق حاضر آورده شده است.

در شکل ۲ موقعیت مکانی ایستگاه‌های آب‌سنجی واقع در حوضه آجی‌چای نشان داده شده است. دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ که در آن همه ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد مطالعه در حوضه آبریز آجی‌چای دارای آمار جریان رودخانه هستند به‌عنوان دوره مشترک آماری انتخاب شد.

در ۱۷۰ ایستگاه هواشناسی پراکنده در سطح منطقه پرداختند. در این تحقیق منطقه غرب ایران به پنج زیرمنطقه همگن تقسیم شد. نتایج نشان داد که عرض جغرافیایی و همچنین ناهمواری‌های موجود در منطقه در منطقه‌بندی رژیم بارشی نقش اساسی داشته‌اند. پرودهوم و ساکوت (۱۱)، به بررسی خشکسالی منطقه‌ای در کشور فرانسه پرداختند. در این مطالعه، شاخص خشکسالی منطقه‌ای RDI (Reginol Drought Index) و خشکسالی نقطه‌ای DI برای این بررسی مورد استفاده قرار گرفتند. از ضعف‌های شاخص RDI در این تحقیق این است که تنها وقوع و یا عدم وقوع خشکسالی منطقه‌ای را مشخص می‌کند و هیچ اطلاعاتی از شدت خشکسالی نمی‌دهد. همچنین تمام ایستگاه‌ها در محاسبه خشکسالی وزن یکسانی دارند. در تحقیق حاضر سعی شده است که این ضعف‌ها مرتفع شود. سنتس و همکاران (۱۳) برای ارزیابی الگوی مکانی و زمانی خشکسالی در کشور پرتغال، با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و روش خوشه‌بندی k-means، خوشه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی را بر اساس شاخص‌های SPI یک، شش و دوازده ماهه به انجام رساندند. زانگ و همکاران (۱۷) به تحلیل فراوانی منطقه‌ای خشکسالی هواشناسی در کشور چین پرداختند. آنها در این تحقیق با استفاده از روش خوشه‌بندی Fuzzy C- Means، پنج منطقه همگن به لحاظ خشکسالی را شناسایی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که خشکسالی‌های رخ داده در شمال غربی کشور چین نسبت به سایر مناطق آن دارای مدت و شدت بیشتری هستند. کالوبا و همکاران (۷) بر اساس روش L-moments به تحلیل فراوانی منطقه‌ای خشکسالی هواشناسی در زامبیا پرداختند. نتایج نشان داد که خشکسالی در جنوب زامبیا از شمال آن شدیدتر است.

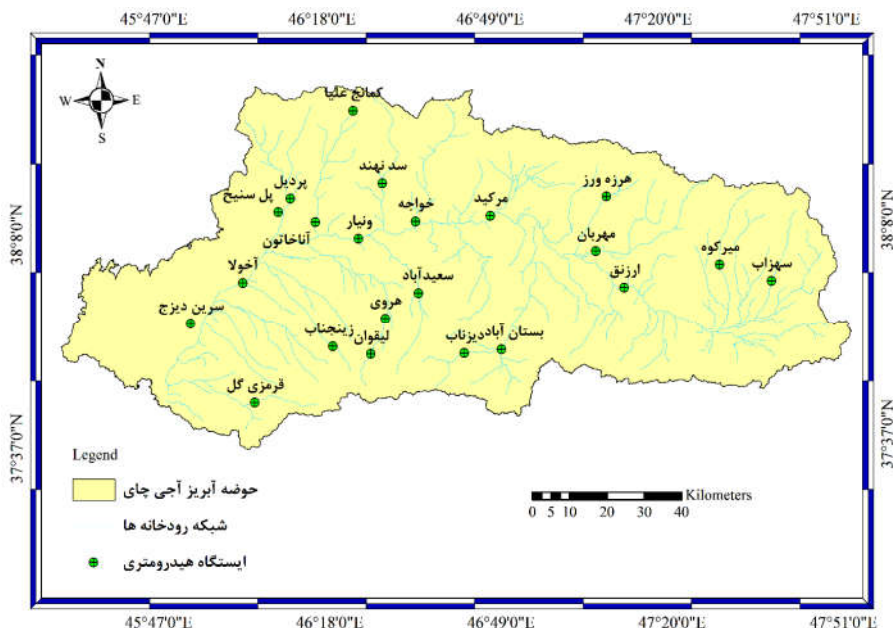
بر اساس آنچه آمد توسعه شاخص خشکسالی منطقه‌ای جدید و تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی هدف اصلی تحقیق حاضر را رقم می‌زند. در این راستا حوضه آبریز آجی‌چای به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. مهم‌ترین



شکل ۱. شمایی کلی از حوضه آبریز آجی چای، شبکه رودخانه‌ها و شهرستان‌های واقع در آن

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد استفاده در تحقیق حاضر

دوره آماری	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	رودخانه	کد ایستگاه	ایستگاه
۱۳۵۳-۱۳۹۳	۳۸	۴۷/۷	آغمیون‌چای	۳۱-۰۰۱	سهباز
۱۳۵۱-۱۳۹۳	۳۷/۸۴	۴۶/۸۱	اوجان چای	۳۱-۰۰۷	بستان آباد
۱۳۴۹-۱۳۹۳	۳۷/۸۵	۴۶/۴۸	نهندچای	۳۱-۰۱۱	نهند
۱۳۴۹-۱۳۹۳	۳۷/۹۸	۴۶/۵۸	سعید آباد	۳۱-۰۱۳	سعید آباد
۱۳۲۸-۱۳۹۰	۳۸/۱۱	۴۶/۴	آجی چای	۳۱-۰۱۵	ونیار
۱۳۶۳-۱۳۹۳	۳۸/۱۵	۴۶/۲۶	گمناب چای	۳۱-۰۱۷	آناختون
۱۳۳۲-۱۳۹۳	۳۷/۸۳	۴۶/۴۳	لیقوان	۳۱-۰۱۹	لیقوان
۱۳۴۹-۱۳۹۳	۳۷/۹۱	۴۶/۴۸	لیقوان	۳۱-۰۲۱	هروی
۱۳۴۴-۱۳۹۳	۳۸/۱۸	۴۶/۱۸	سنیخ چای	۳۱-۰۲۹	پل سنیخ
۱۳۴۶-۱۳۹۳	۳۷/۸۵	۴۶/۰۳	سردرود	۳۱-۰۳۱	زینجناب
۱۳۶۵-۱۳۹۳	۳۸/۰۳	۴۷/۵	تاجیار	۳۱-۰۳۲	میرکوه حاجی
۱۳۴۱-۱۳۹۳	۳۷/۷۳	۴۶/۱	گمبرچای	۳۱-۰۳۷	قرمزگل
۱۳۶۲-۱۳۹۳	۳۸/۰۱	۴۶/۰۵	آجی چای	۳۱-۰۴۵	آخولا
۱۳۶۵-۱۳۹۳	۳۸/۴۵	۴۶/۳۵	کمانج چای	۳۱-۰۵۹	کمانج
۱۳۶۵-۱۳۹۳	۳۷/۶۷	۴۵/۹۱	آجی چای	۳۱-۰۸۵	سرین دیزج
۱۳۶۵-۱۳۹۳	۳۸/۰۶	۴۶/۱۱	چکه چای	۳۱-۱۰۹	مهربان
۱۳۶۵-۱۳۹۳	۳۸/۱۶	۴۶/۸۱	آجی چای	۳۱-۱۱۷	مرکید
۱۳۶۵-۱۳۹۳	۳۸/۱۵	۴۶/۵۶	پازچای	۳۱-۱۱۹	خواجه
۱۳۶۵-۱۳۹۳	۳۸/۲	۴۷/۱۳	هرزورزچای	۳۱-۵۲۹	هرزورز



شکل ۲. موقعیت مکانی ایستگاه‌های آب‌سنجی واقع در حوضه آجی‌چای که از آمار کافی برخوردار هستند.

شاخص خشکسالی SDI برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاهی در ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز آجی‌چای استفاده شده است. در ادامه به معرفی و نحوه محاسبه شاخص خشکسالی ایستگاهی SDI و شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای و همچنین تشریح تحلیل خوشه‌ای پرداخته خواهد شد.

شاخص خشکسالی جریان (SDI)

چنانچه برای رودخانه‌ای داده‌های مربوط به سری زمانی رواناب ماهانه برای N سال موجود باشد آنگاه شاخص SDI با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود (۱۴):

$$y_{i,j} = \ln(Q_{i,j}) \quad (1)$$

$$j=1,2,3,\dots,12 \quad i=1,2,3,\dots,N$$

$$SDI_{i,j} = \frac{y_{i,j} - \bar{y}_j}{s_{y,j}} \quad (2)$$

در این روابط $Q_{i,j}$ میزان رواناب در ماه j ام از سال i ام، $y_{i,j}$ لگاریتم طبیعی متغیر $Q_{i,j}$ ، \bar{y}_j متوسط متغیر $y_{i,j}$ در ماه j ام از سال، $s_{y,j}$ انحراف از معیار متغیر در ماه j ام از سال و $SDI_{i,j}$

مراحل انجام تحقیق

همان‌طور که در قسمت مقدمه نیز بیان شد هدف تحقیق حاضر ارائه شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای و تحلیل خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از این شاخص برای حوضه آبریز آجی‌چای است. برای این منظور گام‌های زیر طی شد:

۱- محاسبه شاخص خشکسالی ایستگاهی SDI برای تمام ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه

۲- تحلیل خوشه‌ای و تعیین مناطق همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی با توجه سری زمانی شاخص SDI در ایستگاه‌های آب‌سنجی

۳- توسعه شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای و تحلیل خشکسالی منطقه‌ای

اولین گام شناسایی مناطق همگن به لحاظ خشکسالی است. شناسایی مناطق همگن از طریق تحلیل خوشه‌بندی و بر اساس خصوصیات و مشخصه‌های مورد نظر صورت می‌گیرد. از آنجا که موضوع تحقیق حاضر خشکسالی هیدرولوژیکی است. لذا مشخصه مورد نظر سری زمانی شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های آب‌سنجی است. در این تحقیق از

جدول ۲. طبقه‌بندی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص SDI

مقدار شاخص SDI	وضعیت خشکسالی
$SDI \geq 2$	ترسالی خیلی شدید
$1.5 \leq SDI < 2$	ترسالی شدید
$1 \leq SDI < 1.5$	ترسالی متوسط
$0 \leq SDI < 1$	ترسالی خفیف
$-1 \leq SDI < 0$	خشکسالی خفیف
$-1.5 \leq SDI < -1$	خشکسالی متوسط
$-2 \leq SDI < -1.5$	خشکسالی شدید
$SDI < -2$	خشکسالی خیلی شدید

در این رابطه $RDI_{i,j,k}$ کمیت خشکسالی منطقه‌ای در منطقه همگن k ام در ماه j ام از سال m_k ام، تعداد ایستگاه‌های آب‌سنجی قرار گرفته در خوشه k ام، $\bar{Q}_{d,j}$ متوسط جریان در ایستگاه d ام در ماه j ام و $SDI_{i,j,d}$ مقدار شاخص SDI در ایستگاه d ام در ماه j ام از سال m_k ام هستند. به تبعیت از کلاس‌بندی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص SDI (جدول ۲)، شدت خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای را می‌توان بر اساس شاخص RDI به صورت جدول ۳ دسته‌بندی کرد:

تحلیل خوشه‌بندی

خوشه به گروهی از اشیا اطلاق می‌شود که نسبت به بقیه اشیا در خوشه‌های دیگر مشابهت بیشتری با یکدیگر دارند. بنابراین هدف از آنالیز خوشه‌بندی، دسته‌بندی اشیا بر اساس میزان مشابهت بین آنها و سازماندهی گروهی داده‌ها است (۴). در این مطالعه، اشیا همان ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز آجی‌چای (شکل ۲) بوده و هر یک از سطرهای ماتریس داده‌ها مربوط به سری زمانی مقادیر شاخص SDI در هر کدام از ایستگاه‌های آب‌سنجی است. با توجه به اینکه دوره زمانی مورد مطالعه در این تحقیق ۱۳۹۳-۱۳۶۵ است لذا ابعاد ماتریس داده‌های ورودی به صورت 18×336 است که عدد ۱۸ به تعداد ایستگاه‌های آب‌سنجی و عدد ۳۳۶ به تعداد

شاخص خشکسالی جریان در ماه j ام از سال m_k ام هستند. جدول ۲ طبقه‌بندی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی را بر اساس شاخص SDI نشان می‌دهد.

شاخص خشکسالی منطقه‌ای هیدرولوژیکی (RDI)

در این تحقیق شاخص خشکسالی منطقه‌ای (RDI) جدیدی بر اساس شاخص خشکسالی ایستگاهی SDI توسعه داده شد. تفاوت شاخص‌های SDI و RDI در این است که شاخص SDI برای پایش و تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی به صورت ایستگاهی (نقطه‌ای) به کار می‌رود در حالی که شاخص RDI به منظور پایش منطقه‌ای خشکسالی توسعه داده شده است و از این لحاظ می‌تواند شاخصی مناسب برای تحلیل منطقه‌ای خشکسالی در تصمیم‌گیری‌های کلان محسوب شود (۱۱). پس از آنکه سری زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاهی با استفاده از شاخص SDI برای تمام ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز آجی‌چای (شکل ۲) محاسبه شد و با استفاده از تحلیل خوشه‌بندی مناطق و زیرحوضه‌های همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی تعیین شد، شاخص RDI برای منطقه همگن k ام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RDI_{i,j,k} = \frac{\sum_{d=1}^{m_k} \bar{Q}_{d,j} SDI_{i,j,d}}{\sum_{d=1}^{m_k} \bar{Q}_{d,j}} \quad (3)$$

$i=1,2,3,\dots,N \quad j=1,2,3,\dots,12$

جدول ۳. طبقه‌بندی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای بر اساس شاخص RDI

وضعیت خشکسالی	مقدار شاخص RDI
ترسالی خیلی شدید	$RDI \geq 2$
ترسالی شدید	$1.5 \leq RDI < 2$
ترسالی متوسط	$1 \leq RDI < 1.5$
ترسالی خفیف	$0 \leq RDI < 1$
خشکسالی خفیف	$-1 \leq RDI < 0$
خشکسالی متوسط	$-1.5 \leq RDI < -1$
خشکسالی شدید	$-2 \leq RDI < -1.5$
خشکسالی خیلی شدید	$RDI < -2$

مربع در خوشه‌بندی مجموعه‌ای از اشیا (X) از رابطه (۵) به دست می‌آید (۳):

$$J(X; V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k \in i} \|x_k^{(i)} - v_i\|^2 \quad (5)$$

در این رابطه c تعداد خوشه‌ها، $x_k^{(i)}$ فاصله شیء kام از خوشه iام از مبدأ مختصات بوده و v_i فاصله مرکز جرم خوشه iام از مبدأ مختصات است که از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} x_k}{N_i} \quad (6)$$

در این رابطه، N_i تعداد مشاهدات در خوشه iام است.

شاخص silhouette

شاخص silhouette از جمله شاخص‌هایی است که برای ارزیابی نحوه خوشه‌بندی با استفاده از روش‌های مختلف خوشه‌بندی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود (۱۰):

$$s(i) = \frac{b(i) - \text{dist}(i; k)}{\max(b(i), \text{dist}(i; k))} \quad (7)$$

$$b(i) = \min(\text{dist}(i; G), G \neq k)$$

در این رابطه، $s(i)$ مقدار شاخص silhouette برای واحد iام بوده و $\text{dist}(i; k)$ متوسط فاصله واحد iام واقع در خوشه kام از

ماه‌های واقع در دوره مورد مطالعه اشاره دارند.

برای محاسبه میزان مشابهت بین ایستگاه‌ها از فاصله اقلیدسی استفاده شده است که برای دو نقطه با مختصات $U(u_1, u_2, \dots, u_p)$ و $V(v_1, v_2, \dots, v_p)$ این فاصله از رابطه زیر به دست می‌آید (۴):

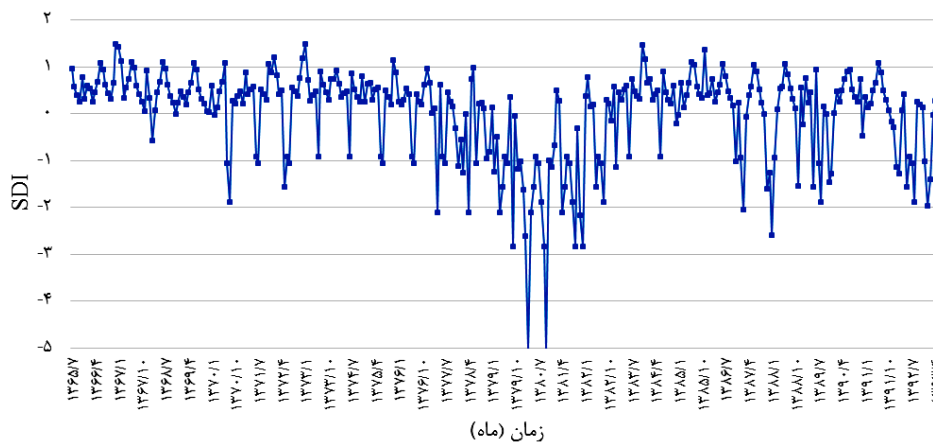
$$D^2(U, V) = (u_1 - v_1)^2 + (u_2 - v_2)^2 + \dots + (u_p - v_p)^2 \quad (4)$$

در این رابطه، $D^2(U, V)$ مجذور فاصله بین دو شیء U و V بوده و u_1, u_2, \dots, u_p متغیرهای (مشخصه‌های) مربوط به شیء U و v_1, v_2, \dots, v_p متغیرهای مربوط به شیء V هستند. در این تحقیق v_1 تا v_p در واقع سری زمانی مقادیر شاخص SDI برای هر ایستگاه آب‌سنجی هستند.

روش خوشه‌بندی K-means

روش K-means یکی از روش‌های خوشه‌بندی تجزیه‌ای است که در تحقیق حاضر برای خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی به لحاظ رفتار خشکسالی آنها مورد استفاده قرار گرفته است. این روش با یک تقسیم‌بندی تصادفی اشیا شروع به کار می‌کند و بر اساس مشابهت آنها با مراکز خوشه‌ها، کار اختصاص دادن آنها را به خوشه‌ها به انجام می‌رساند. این حلقه تا زمانی ادامه می‌یابد که شرط همگرایی محقق شود (۳). شرط همگرایی معمولاً رسیدن به میزان حداقل خطای مجذور است. خطای

سری زمانی ماهانه شاخص SDI در ایستگاه آب سنجی مرکید



شکل ۳. سری زمانی ماهانه شاخص SDI در ایستگاه آب سنجی مرکید

پایش خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز آجی چای همان‌طور که بیان شد در تحقیق حاضر از شاخص SDI به‌منظور پایش و بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز آجی چای استفاده شده است. در شکل ۳ به‌عنوان نمونه نمودار سری زمانی ماهانه شاخص SDI در ایستگاه آب‌سنجی مرکید برای دوره زمانی ۱۳۶۵-۱۳۹۳ ارائه شده است.

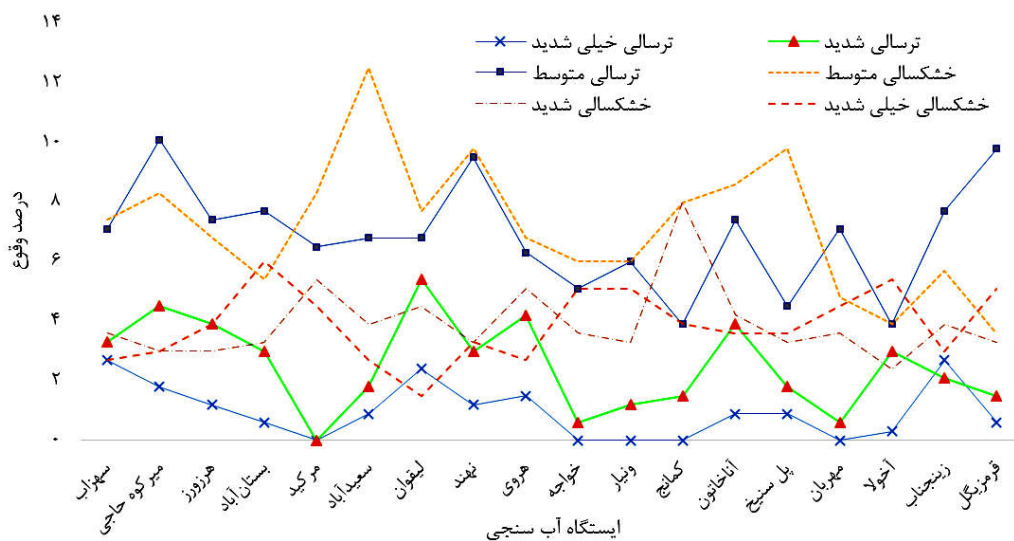
مطابق با شکل ۳ طی دوره‌های ۱۳۶۵-۱۳۶۹ و ۱۳۸۶-۱۳۸۳ اکثر مقادیر شاخص SDI بین صفر و یک بوده و وضعیت حوضه بالادست در محل ایستگاه مرکید برای این دوره‌ها ترسالی خفیف بوده است. در طی دوره ۱۳۷۸-۱۳۸۱ بیشتر مقادیر شاخص SDI پایین‌تر از خط صفر بوده و در بعضی مواقع مقدار آن به کمتر از ۲- رسیده است که حاکی از خشکسالی خیلی شدید در طی این دوره است. شدیدترین خشکسالی که در این ایستگاه در طول دوره مورد مطالعه رخ داده است با SDI برابر با ۵- است. در شکل‌های ۴ و ۵ درصد وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در شدت‌های مختلف برای هر یک از ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز آجی چای طی دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۴ در کل دوره مورد مطالعه به‌غیر از ایستگاه‌های میرکوه‌حاجی و لیتوان در بقیه ایستگاه‌ها درصد

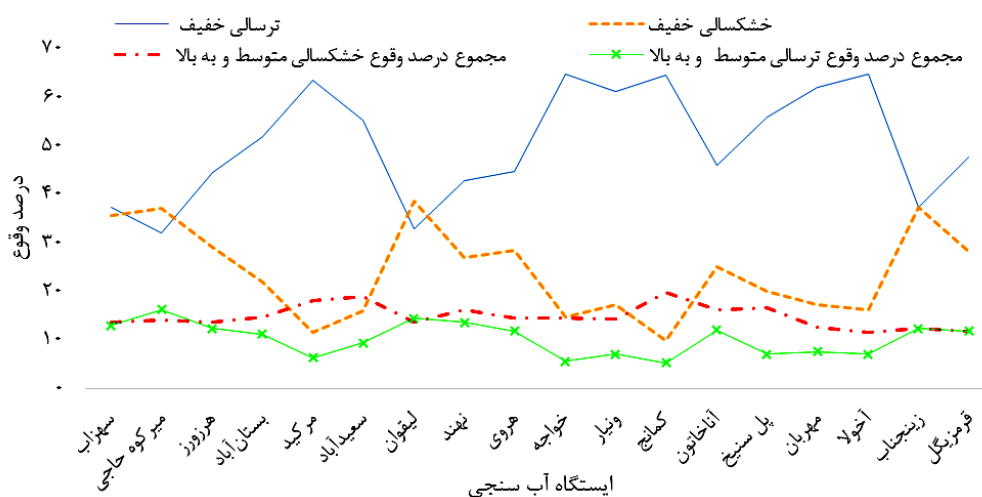
بقیه اعضای واقع در همین خوشه است. مقادیر این شاخص از ۱ تا -۱ تغییر می‌کند. هر چقدر مقدار این شاخص به یک نزدیک باشد خوشه‌بندی به‌خوبی صورت گرفته است (۱۰). در تحقیق حاضر تحلیل خوشه‌بندی به‌روش K-means با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط MATLAB انجام گرفت. تعداد خوشه‌های مختلفی را می‌توان برای خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی انتخاب کرد. ولی باید به این نکته توجه کرد که آن تعداد خوشه‌ای که دارای شاخص silhouette بیشتری است (نزدیک به یک). در این تحقیق از تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ برای خوشه‌بندی استفاده شد.

نتایج و بحث

در این بخش در ابتدا به نتایج حاصل از بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های آب‌سنجی با استفاده از شاخص SDI پرداخته خواهد شد. در ادامه به نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز آجی چای اشاره شده و مناطق همگن استخراج شده به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی معرفی خواهند شد. سپس برای هر یک از مناطق همگن، نتایج محاسبات شاخص RDI ارائه شده و تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص مذکور صورت خواهد گرفت.



شکل ۴. درصد وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در شدت‌های مختلف برای هر یک از ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آجی‌چای طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. درصد وقوع خشکسالی و ترسالی خفیف هیدرولوژیکی، به همراه مجموع وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌های هیدرولوژیکی (با شدت متوسط و به بالا) برای هر یک از ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آجی‌چای طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

آجی‌چای واقع شدند تعداد رخداد‌های خشکسالی با شدت متوسط و به بالا نسبت به ترسالی‌های متوسط و به بالا به ترتیب ۲/۸، ۲ و ۱/۶ برابر است. از آنجا که ایستگاه‌های مذکور در بستر اصلی آجی‌چای قرار دارند و رواناب تمامی سرشاخه‌ها و رودخانه‌های اصلی آجی‌چای در نهایت از بستر اصلی آن می‌گذرد لذا می‌توان گفت که با توجه به ارقام مذکور در حالت کلی در حوضه آبریز آجی‌چای تعداد رخداد‌های خشکسالی با

وقوع خشکسالی با شدت متوسط و به بالا از درصد وقوع ترسالی‌های متوسط و به بالا بیشتر است. البته می‌توان گفت که در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه‌های آب‌سنجی زینجان و قرمزی‌گل که در قسمت جنوب غربی حوضه آجی‌چای واقع شده‌اند، درصد وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها با شدت متوسط به بالا تقریباً با هم برابر هستند. بر اساس شکل‌های ۴ و ۵ در ایستگاه‌های آب‌سنجی مرکید، وینار و آخولا که در بستر اصلی

جدول ۴. نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی در حوضه آبریز آجی‌چای بر اساس شاخص SDI

نام ایستگاه	کد ایستگاه	تعداد خوشه				
		۲	۳	۴	۵	۶
سهزاب	۳۱-۰۰۱	۱	۲	۱	۱	۴
بستان آباد	۳۱-۰۰۷	۱	۳	۳	۵	۳
نهند	۳۱-۰۱۱	۲	۱	۲	۴	۶
سعید آباد	۳۱-۰۱۳	۲	۱	۴	۵	۲
ونیار	۳۱-۰۱۵	۱	۳	۳	۲	۳
آناختون	۳۱-۰۱۷	۲	۱	۲	۴	۶
لیقوان	۳۱-۰۱۹	۲	۲	۱	۱	۴
هروی	۳۱-۰۲۱	۱	۳	۳	۲	۳
پل سنیخ	۳۱-۰۲۹	۲	۱	۲	۴	۵
زینجناب	۳۱-۰۳۱	۲	۲	۱	۱	۱
میرکوه حاجی	۳۱-۰۳۲	۱	۳	۳	۵	۳
قرمزگل	۳۱-۰۳۷	۲	۱	۲	۴	۵
آخولا	۳۱-۰۴۵	۱	۳	۳	۲	۳
کمانج	۳۱-۰۵۹	۲	۱	۲	۴	۵
مهربان	۳۱-۱۰۹	۲	۱	۴	۴	۲
مرکید	۳۱-۱۱۷	۱	۳	۳	۲	۳
خواجه	۳۱-۱۱۹	۲	۱	۲	۳	۶
هرزورز	۳۱-۵۲۹	۱	۳	۳	۲	۳

گرفته در دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ اشاره دارد. در جدول ۴ نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی بر اساس شاخص SDI با توجه به تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ آورده شده است. همچنین در جدول ۵ برای هر کدام از تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ مقدار شاخص silhouette برای هر یک از ایستگاه‌های آب‌سنجی نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است متوسط مقدار شاخص silhouette در خوشه‌بندی با تعداد ۶ خوشه برابر با ۰/۱۶ است که نسبت به تعداد خوشه‌های دیگر بیشترین مقدار را دارا است. بنابراین تعداد خوشه برابر با ۶ برای خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی در نظر گرفته شد.

در جدول ۶ ایستگاه‌های آب‌سنجی همگن که بر اساس شاخص SDI خوشه‌بندی شده‌اند نشان داده شده است. مطابق

شدت متوسط و به بالا در مقایسه با ترسالی‌های متوسط و به بالا به مراتب بیشتر است.

تعیین مناطق همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز آجی‌چای

پس از محاسبه شاخص SDI برای هر یک از ایستگاه‌های آب‌سنجی، ماتریس داده‌ها برای انجام تحلیل خوشه‌بندی تشکیل شد. لازم به ذکر است که هر ردیف از ماتریس داده‌ها شامل سری زمانی ماهانه شاخص SDI برای دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ در یک ایستگاه آب‌سنجی به‌خصوص است. بنابراین ماتریس داده تشکیل شده دارای ابعاد ۱۸×۳۳۶ (۱۸ ردیف و ۳۳۶ ستون) است که ۱۸ تعداد ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد مطالعه بوده و ۳۳۶ به تعداد ماه‌های قرار

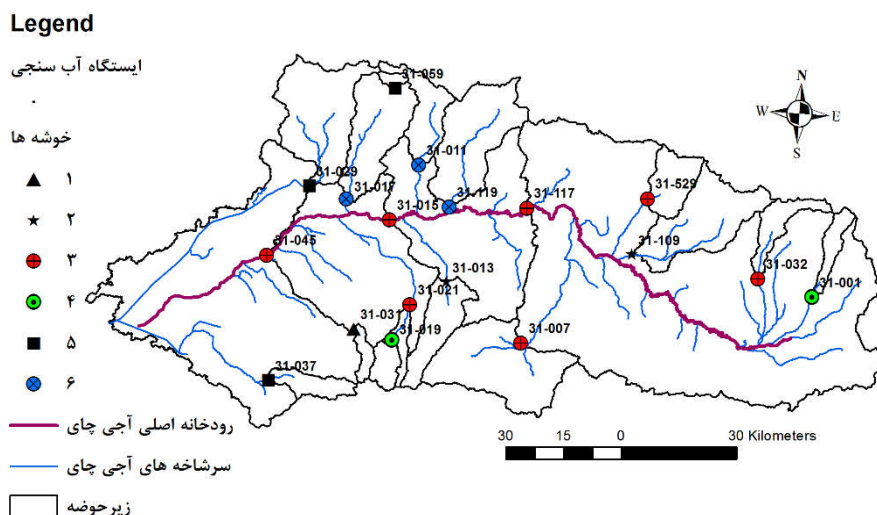
جدول ۵. مقادیر شاخص silhouette مربوط به خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی واقع در حوضه آبریز آجی‌چای بر اساس شاخص SDI

نام ایستگاه	کد ایستگاه	تعداد خوشه				
		۲	۳	۴	۵	۶
سهزاب	۳۱-۰۰۱	۰/۱۲	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۲
بستان آباد	۳۱-۰۰۷	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۱	-۰/۰۲	۰/۱۸
نهند	۳۱-۰۱۱	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۰۲	-۰/۰۲
سعید آباد	۳۱-۰۱۳	-۰/۰۷	-۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۹
ونیار	۳۱-۰۱۵	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۶
آناختون	۳۱-۰۱۷	-۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	-۰/۰۵
لیقوان	۳۱-۰۱۹	-۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۱۰
هروی	۳۱-۰۲۱	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۶
پل سنیخ	۳۱-۰۲۹	-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۱۳
زینجناب	۳۱-۰۳۱	-۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۰۰
میرکوه حاجی	۳۱-۰۳۲	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۱۸	-۰/۰۹	۰/۱۲
قرمزگل	۳۱-۰۳۷	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۱۴
آخولا	۳۱-۰۴۵	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۷
کمانج	۳۱-۰۵۹	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۵
مهربان	۳۱-۱۰۹	-۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۴	-۰/۰۴	۰/۰۳
مرکید	۳۱-۱۱۷	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۶
خواجه	۳۱-۱۱۹	-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۰۴	۱/۰۰	-۰/۰۲
هرزورز	۳۱-۵۲۹	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۱۹	۰/۲۵
متوسط شاخص silhouette		۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۶

جدول ۶. خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی بر اساس شاخص SDI در حوضه آبریز آجی‌چای

مناطق همگن هیدرولوژیکی					
۱	۲	۳	۴	۵	۶
زینجناب (۳۱-۰۳۱)	سعیدآباد (۳۱-۰۱۳)	بستان‌آباد (۳۱-۰۰۷)	سهزاب (۳۱-۰۰۱)	پل سنیخ (۳۱-۰۲۹)	نهند (۳۱-۰۱۱)
مهربان (۳۱-۱۰۹)	ونیار (۳۱-۰۱۵)	لیقوان (۳۱-۰۱۹)	قرمزگل (۳۱-۰۳۷)	آناختون (۳۱-۰۱۷)	آناختون (۳۱-۰۱۷)
هروی (۳۱-۰۲۱)	میرکوه‌حاجی (۳۱-۰۳۲)	آخولا (۳۱-۰۴۵)	مرکید (۳۱-۱۱۷)	هرزورز (۳۱-۵۲۹)	خواجه (۳۱-۱۱۹)
کمانج (۳۱-۰۵۹)					

با این جدول ایستگاه زینجناب در خوشه ۱، ایستگاه‌های سعیدآباد و مهربان در خوشه ۲، ایستگاه‌های بستان‌آباد، نیار، هروی، میرکوه حاجی، آخولا، مرکید و هرزورز در خوشه ۳، ایستگاه‌های سهزاب و لیقوان در خوشه ۴، ایستگاه‌های پل سنیخ، قرمزگل و کمانج در خوشه ۵ و ایستگاه‌های نهند، آناختون و خواجه در خوشه ۶ قرار گرفتند.



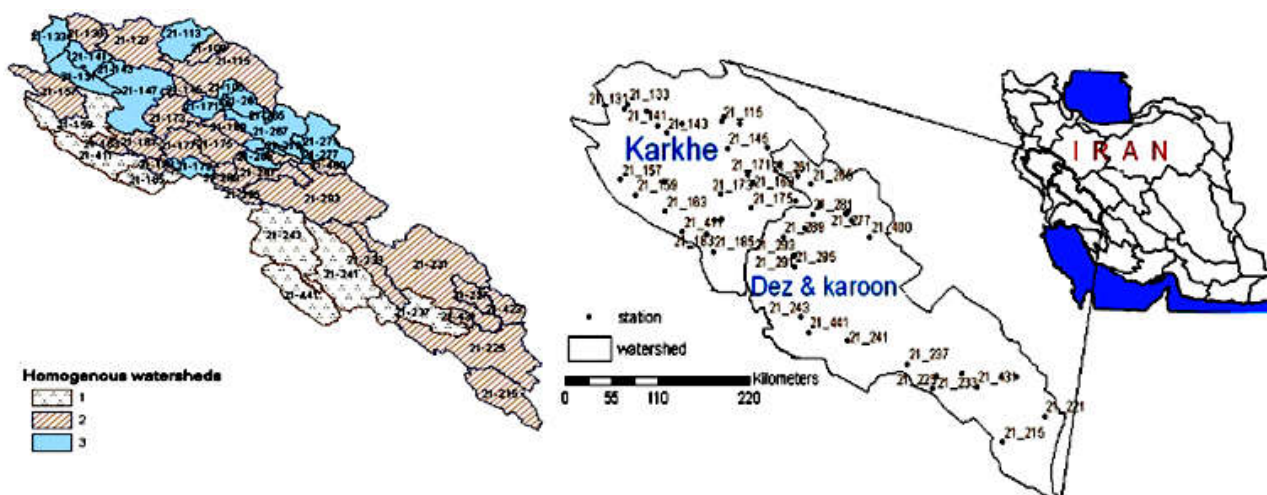
شکل ۶. خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی بر اساس شاخص SDI در حوضه آبریز آجی‌چای (رنگی در نسخه الکترونیکی)

محاسبه کردند. این پژوهشگران با استفاده از دو روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و تجزیه‌ای و با تعداد شش خوشه (در هر دو روش)، ایستگاه‌های آب‌سنجی را خوشه‌بندی کردند. نتایج نشان داد که نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی در هر دو روش در سه دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۶۵، ۲۰۰۰-۱۹۷۵ و ۲۰۰۰-۱۹۶۵ با هم متفاوت بوده و همچنین روش خوشه‌بندی تجزیه‌ای نتایج بهتری را نسبت به روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به‌دست می‌دهد (۱۱). در شکل ۸ نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی به‌روش تجزیه‌ای برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۶۵ ارائه شده است که مشابه خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آجی‌چای در تحقیق حاضر است.

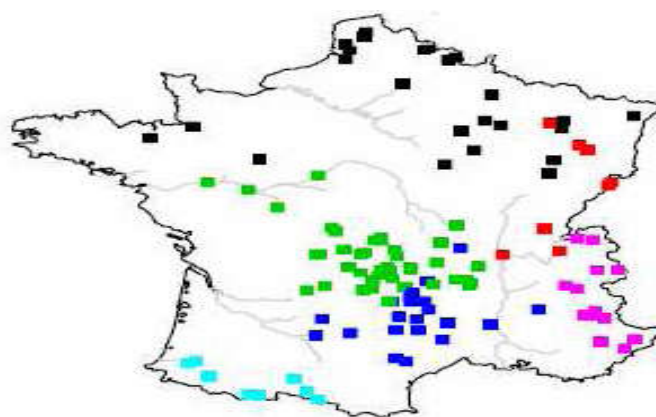
ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از شاخص RDI

همان‌طور که در بخش قبل آمد پس از انجام خوشه‌بندی ۶ منطقه همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی برای حوضه آبریز آجی‌چای به‌دست آمد. در ادامه برای هر یک از مناطق همگن ۶ گانه شاخص خشکسالی منطقه‌ای (RDI) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد. در ادامه به نتایج حاصل اشاره می‌شود.

در شکل ۶ خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی بر اساس شاخص SDI در حوضه آبریز آجی‌چای نشان داده شده است. بررسی تحقیقات مختلفی که در نقاط مختلف جهان در زمینه تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی صورت گرفته است نشان می‌دهد که این تحقیقات نیز به نتایج مشابه با نتایج تحقیق حاضر دست یافته‌اند. بایزیدی و ثقفیان (۱) که در تحقیق خود بر اساس داده‌های جریان رودخانه در ۵۴ ایستگاه آب‌سنجی، به بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه جنوب غربی ایران با استفاده از روش سطح برش (سطح برش ۷۰ درصد) پرداختند، به نتایج مشابه با تحقیق حاضر برای منطقه مورد مطالعه خود رسیدند. در این تحقیق با استفاده از تحلیل خوشه‌بندی به‌روش سلسله‌مراتبی مناطق همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی تعیین شدند. نتایج تحقیق آنها نشان داد سه منطقه همگن در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. در شکل ۷ پهنه‌بندی مناطق همگن ارائه شده است. پرودهوم و ساکوت (۱۱) نیز در تحقیق خود به نتایج مشابه با نتایج تحقیق حاضر برای منطقه مورد مطالعه خود رسیدند. آنها در تحقیق خود با استفاده از روش تحلیل خوشه‌بندی مناطق با رفتار همگن خشکسالی را در کشور فرانسه تعیین کرده و مقدار شاخص RDI را برای هر کدام از مناطق همگن



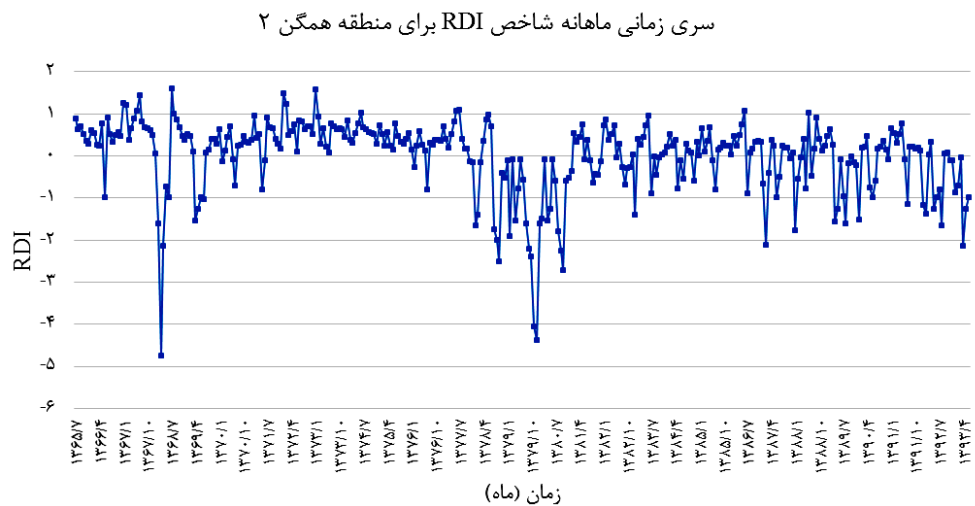
شکل ۷. پراکنش مکانی ایستگاه‌های آب‌سنجی در منطقه جنوب غرب ایران و مناطق همگن هیدرولوژیکی در آن (۱)



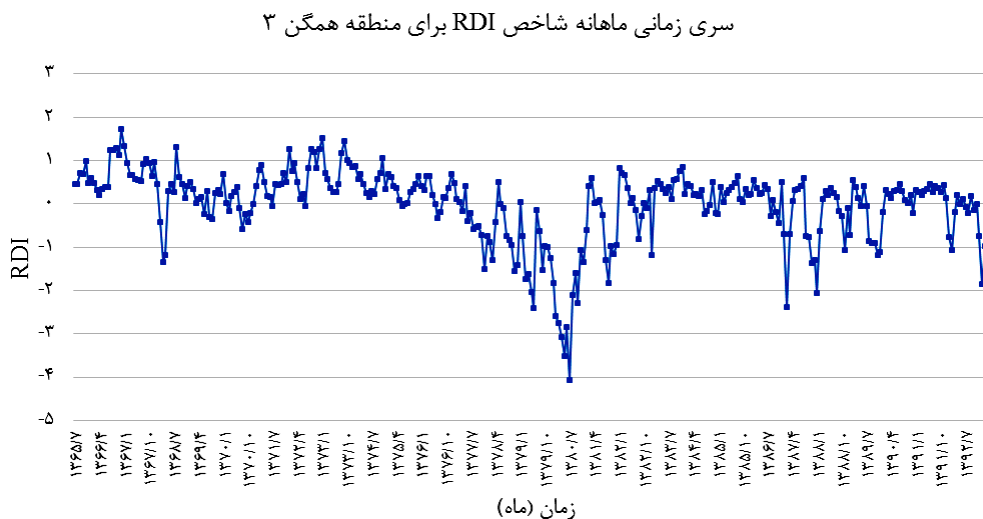
شکل ۸. نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی در حوضه‌های کشور فرانسه به روش تجزیه‌ای برای دوره ۱۹۶۵-۲۰۰۰ (۱۱)
(رنگی در نسخه الکترونیکی)

همان‌طور که در جدول ۶ آمده است منطقه همگن ۱ (خوشه شماره ۱) تنها ایستگاه زینجاناب (۳۱-۰۳۱) را شامل می‌شود و خشکسالی منطقه‌ای این منطقه همان سری زمانی ماهانه شاخص SDI برای ایستگاه زینجاناب است که به تحلیل آن در شکل‌های ۴ و ۵ پرداخته شد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌عنوان نمونه به ترتیب برای مناطق همگن ۲ و ۳ سری زمانی ماهانه شاخص RDI برای دوره زمانی ۱۳۶۵-۱۳۹۳ آورده شده است. مطابق با شکل ۹ در منطقه همگن ۲ در طی دوره‌های ۱۳۶۶-۱۳۶۷ و ۱۳۶۸-۱۳۷۱ در بیشتر ماه‌ها مقادیر شاخص RDI بیشتر از صفر بوده و در طول دوره‌های مذکور اکثر مواقع ترسالی با سطوح مختلف (بیشتر ترسالی خفیف) رخ داده است. این وضعیت برای منطقه همگن ۲ در طی دوره‌های ۱۳۶۸-۱۳۶۹ و ۱۳۷۵-۱۳۷۱ اتفاق افتاده است. در منطقه همگن ۲ طی دوره ۱۳۸۰-۱۳۷۸ در تعداد بیشتری

با سطوح مختلف (بیشتر ترسالی خفیف) رخ داده است. این حالت برای منطقه همگن ۳ در طی دوره‌های ۱۳۶۷-۱۳۶۵ و ۱۳۷۶-۱۳۷۰ و برای منطقه همگن ۴ در طول دوره‌های ۱۳۶۷-۱۳۶۵ و ۱۳۷۴-۱۳۷۰ در بیشتر ماه‌ها مقادیر شاخص RDI بیشتر از صفر بوده و در طول دوره‌های مذکور اکثر مواقع ترسالی با سطوح مختلف (بیشتر ترسالی خفیف) رخ داده است. این وضعیت برای منطقه همگن ۳ در طی دوره‌های ۱۳۶۷-۱۳۶۵ و ۱۳۷۴-۱۳۷۰ در بیشتر ماه‌ها مقادیر شاخص RDI بیشتر از صفر بوده و در طول دوره‌های مذکور اکثر مواقع ترسالی



شکل ۹. سری زمانی ماهانه شاخص RDI برای منطقه همگن ۲



شکل ۱۰. سری زمانی ماهانه شاخص RDI برای منطقه همگن ۳

منطقه همگن ۴ خشکسالی غالب در طول دوره ۱۳۷۷-۱۳۸۰ رخ داده است به طوری که در تعداد بیشتری از ماه‌های این دوره خشکسالی با سطوح مختلف (به ویژه متوسط و به پایین) رخ داده است. شدیدترین خشکسالی و ترسالی که در ناحیه ۴ در طول دوره مورد مطالعه رخ داده است با RDI به ترتیب برابر با ۲/۴- و ۳ است که در مقایسه با مناطق ۲ و ۳ در این ناحیه ترسالی شدیدتر و خشکسالی ملایم‌تر بوده است. در منطقه همگن ۵ در طول دوره ۱۳۷۷-۱۳۸۱ خشکسالی مداوم اتفاق افتاده است به طوری که در طی دوره مذکور تعداد بیشتری از

از ماه‌ها خشکسالی با سطوح مختلف رخ داده است. شدیدترین خشکسالی و ترسالی که در این ناحیه در طول دوره مورد مطالعه رخ داده است با RDI به ترتیب برابر با ۴/۷۵- و ۱/۶ است. برای منطقه همگن ۳ در اکثر ماه‌های واقع در دوره ۱۳۷۷-۱۳۸۱ در تعداد خشکسالی با سطوح مختلف (به ویژه متوسط و به بالا) رخ داده است. شدیدترین خشکسالی و ترسالی که در این ناحیه در طول دوره مورد مطالعه رخ داده است با RDI به ترتیب برابر با ۴/۲۵- و ۱/۷۵ است که از این لحاظ در مقایسه با منطقه همگن ۲ کمی ملایم‌تر است. در

جدول ۷. درصد وقوع هر یک از سطوح خشکسالی و ترسالی منطقه‌ای در ناحیه ۲ طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵

ناحیه همگن						وضعیت ترسالی و خشکسالی	مقدار شاخص RDI
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۳	۰	۱/۲	۰	۰	۲/۷	ترسالی خیلی شدید	$2 \leq RDI$
۰/۹	۰/۹	۳	۰/۶	۰/۶	۲/۱	ترسالی شدید	$1.5 \leq RDI < 2$
۵/۷	۷/۱	۶	۴/۸	۳/۶	۷/۷	ترسالی متوسط	$1 \leq RDI < 1.5$
۴۷/۶	۵۰/۶	۳۹/۳	۶۰/۱	۶۱/۳	۳۷/۵	ترسالی خفیف	$0 \leq RDI < 1$
۳۴/۵	۲۹/۵	۳۹/۶	۲۳/۲	۲۲/۹	۳۷/۵	خشکسالی خفیف	$-1 \leq RDI < 0$
۶/۳	۶/۵	۷/۷	۵/۱	۳/۶	۵/۷	خشکسالی متوسط	$-1.5 \leq RDI < -1$
۴/۲	۳/۶	۲/۷	۲/۷	۴/۸	۳/۹	خشکسالی شدید	$-2 \leq RDI < -1.5$
۰/۶	۱/۸	۰/۶	۳/۶	۳/۳	۳	خشکسالی خیلی شدید	$RDI < -2$
۱۱/۱	۱۱/۹	۱۱	۱۱/۴	۱۱/۷	۱۲/۶	مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا)	
۶/۹	۸	۱۰/۲	۵/۴	۴/۲	۱۲/۵	مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا)	

درصد از مقادیر شاخص RDI بین ۱ و ۱- قرار دارد که بر اساس جدول ۳ این دو عدد محدوده بین ترسالی و خشکسالی خفیف است. لازم به ذکر است که مطابق با جدول ۷ در مناطق ۲، ۳ و ۵ درصد وقوع ترسالی‌های خفیف به مراتب بیشتر از درصد وقوع خشکسالی‌های خفیف است این موضوع نشان از آن دارد که در این مناطق وضعیت جریان بیشتر متمایل به ترسالی خفیف بوده است.

همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ در هر یک از مناطق ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۷۵، ۸۳/۳، ۷۸/۹، ۸۰/۱، ۸۲/۱ درصد از مقادیر شاخص RDI بین ۱ و ۱- قرار دارد که بر اساس جدول ۳ این دو عدد محدوده بین ترسالی و خشکسالی خفیف است. لازم به ذکر است که مطابق با جدول ۷ در مناطق ۲، ۳ و ۵ درصد وقوع ترسالی‌های خفیف به مراتب بیشتر از درصد وقوع خشکسالی‌های خفیف است. این موضوع نشان از آن دارد که در این مناطق وضعیت جریان بیشتر متمایل به

ماه‌ها خشکسالی با سطوح مختلف (به‌ویژه در سطح متوسط) رخ داده است. شدیدترین خشکسالی و ترسالی که در این ناحیه در طول دوره مورد مطالعه رخ داده است با RDI به ترتیب برابر با ۳/۸- و ۲ است.

در منطقه همگن ۶ همانند ناحیه ۵ در طول دوره ۱۳۸۱-۱۳۷۷ خشکسالی مداوم با سطوح مختلف رخ داده است. شدیدترین خشکسالی و ترسالی که در این ناحیه در طول دوره مورد مطالعه اتفاق افتاده است با RDI به ترتیب برابر با ۳/۵- و ۲ است که تقریباً با منطقه ۵ یکسان است. لازم ذکر است که در طی دوره مورد مطالعه شدیدترین ترسالی در منطقه ۴ و شدیدترین خشکسالی در منطقه ۲ به وقوع پیوسته است. در جدول ۷ برای هر کدام از مناطق همگن ۶ گانه درصد وقوع هر یک از سطوح خشکسالی و ترسالی در طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ آورده شده است. همان‌طور که در جدول مذکور نشان داده شده است طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ در هر یک از مناطق ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۸۴/۳، ۸۳/۳، ۷۸/۹، ۸۰/۱ و ۸۲/۱

نتایج حاصل از تحقیق حاضر به‌غیر از ایستگاه‌های ليقوان و زینجاناب درصد وقوع ترسالی خیلی شدید در تمام ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه از درصد وقوع دیگر حالات خشکسالی و ترسالی کمتر است (البته به‌غیر از شدت‌های خفیف). نتایج نشان داد که در کل دوره مورد مطالعه به‌غیر از ایستگاه‌های میکوه‌حاجی و ليقوان در بقیه ایستگاه‌های آب‌سنجی درصد وقوع خشکسالی با شدت متوسط و به بالا از درصد وقوع ترسالی‌های متوسط و به بالا بیشتر است. به‌طوری که در ایستگاه‌های آب‌سنجی مرکید، ونيار و آخولا که در بستر اصلی آجی‌چای واقع شدند تعداد رخداد‌های خشکسالی با شدت متوسط و به بالا نسبت به ترسالی‌های متوسط و به بالا به‌ترتیب ۲/۸، ۲ و ۱/۶ برابر است.

خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آجی‌چای با توجه به سری زمانی شاخص SDI در آنها طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ با تعداد خوشه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ صورت گرفت. نتایج تحلیل خوشه‌بندی نشان داد که بر اساس شاخص silhouette، تعداد ۶ خوشه مناسب‌ترین تعداد برای خوشه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی است.

بر اساس تحلیل خوشه‌بندی ۶ منطقه همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز آجی‌چای تشخیص داده شد و برای هر یک از این مناطق سری زمانی شاخص خشکسالی منطقه‌ای (RDI) برای دوره ۱۳۹۳-۱۳۶۵ محاسبه شد. نشان داد که طی دوره مورد مطالعه در هر یک از مناطق ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به‌ترتیب ۸۴/۳، ۸۳/۳، ۷۸/۹، ۸۰/۱ و ۸۲/۱ درصد از مواقع ترسالی و خشکسالی خفیف رخ داده است. همچنین در همه مناطق مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا) از مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا) بیشتر است. طوری که طی دوره مورد مطالعه در مناطق ۲ و ۳ مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا) نسبت به مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا) بیش از دو برابر است.

ترسالی خفیف بوده است. بر اساس جدول ۷ مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا) طی دوره مورد مطالعه در مناطق ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ تقریباً باهم برابر هستند و در منطقه ۱ به مقدار کمی از دیگر مناطق کمتر است. درحالی که مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا) در مناطق ۱ و ۴ به مراتب از مناطق ۲، ۳ و ۶ بیشتر است. همچنین با توجه به جدول ۷ در همه مناطق مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا) از مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا) بیشتر است. طوری که طی دوره مورد مطالعه در مناطق ۲ و ۳ مجموع درصد وقوع خشکسالی (متوسط و به بالا) نسبت به مجموع درصد وقوع ترسالی (متوسط و به بالا) بیش از دو برابر است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی و تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص RDI در حوضه آبریز آجی‌چای پرداخته شد. برای این منظور ابتدا برای هر یک از ۱۸ ایستگاه آب‌سنجی واقع در حوضه سری زمانی شاخص SDI به‌صورت ماهانه برای دوره زمانی ۱۳۹۳-۱۳۶۵ استخراج شد. در ادامه پس از انجام خوشه‌بندی و تعیین مناطق همگن به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی به تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه‌ای با استفاده از شاخص RDI در حوضه آبریز آجی‌چای پرداخته شد.

نتایج نشان داد درصد وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی با سطح خیلی شدید در ایستگاه‌های بستان‌آباد، خواجه، ونيار، قمرزی‌گل و آخولا بیشتر از سایر ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه بوده است. در سطح خشکسالی شدید ایستگاه کمانج با درصد وقوع ۸ بیشترین فراوانی را داشته است. بعد از ایستگاه کمانج، ایستگاه‌های مرکید و هروی به‌ترتیب بیشترین درصد وقوع خشکسالی در سطح شدید را داشته‌اند. همچنین ایستگاه‌های سعیدآباد، نهند و پل‌سنیخ بیشترین درصد وقوع خشکسالی متوسط در بین ۱۸ ایستگاه آب‌سنجی حوضه را دارند. بر اساس

منابع مورد استفاده

1. Byzedi, M., B. Saghafian, K. Mohammadi and M. Siosemarde. 2009. Regional Analysis of Streamflow Drought: A Case Study for Southwestern Iran. *Journal of Environmental Earth Sciences* 71: 2955-2972.
2. Dracup, J. A., K. S. Lee and E. G. Paulson. 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16: 297-302.
3. Han, J. and M. Kamber. 2006. Data Mining: Concepts and Techniques. 2nd Edition, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco.
4. Hoppner, F., F. Klawonn, R. Kruse and T. Runkler. 1999. Fuzzy Cluster Analysis: Methods for Classification, Data Analysis and Image Recognition. John Wiley & Sons.
5. Islamian, S. S., M. Ghasemi and S. Soltani Ghord Faramarzi. 2012. Calculation and zoning of low flow indices and determination of hydrological drought periods (Case study: Karkheh watershed). *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources, Soil and Water Sciences* 59: 1-14. (In Farsi).
6. Islamian, S. S., R. Modarres and S. Soltani. 2005. Drought spatial clustering using standard precipitation index in Isfahan province. *Technical Note, Quarterly Journal of Water and Sewerage* 17: 75-72. (In Farsi).
7. Kaluba, P., K. M. J. Verbist, W. M. Cornelis, E. Van Ranst. 2017. Spatial mapping of drought in Zambia using regional frequency analysis. *Journal of Hydrological Sciences* 62: 1825-1839.
8. Mofidipour, A., V. Bardi Shaikh, M. Onagh and A. Sadudin. 2012. Investigating the Relationship between Meteorological and Hydrological Drought in Atrak Watershed. *Journal of Basin Management* 5: 16-26. (In Farsi).
9. Morid, S., V. Smakhtin and M. Moghaddasi. 2006. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Journal of Climatology* 26: 971-985.
10. Pollard, K. and M. van der Laan. 2002. A Method to Identify Significant Clusters in Gene Expression Data. U.C. Berkeley Division of Biostatistics Working Paper Series.
11. Prudhomme, C. and E. Sauquet. 2007. Modelling a Regional Drought Index in France. Final Project Report , Wallingford/Lyon, NERC/Centre for Ecology & Hydrology & Cemagref. (CEH Project Number: C02913).
12. Razinei, T. and G. Azizi. 2007. Regionalization of rainfall regime of the west of Iran using the principal components analysis and clustering methods. Technical Report, Water Resources Research, Third Year, Second Issue. (In Farsi).
13. Santos, J. F., I. Pulido-Calvo and M. M. Portela. 2010. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resources Research* 46: W03503, doi:10.1029/2009WR008071.
14. Soleimani, S. and A. Bahremand. 2013. Hydrological drought analysis using SDI index in halilrud basin of Iran. *The International Journal of Environmental Resources Research* 1: 3.
15. Tabari, H., J. Nikbakht and P. Hosseinzadeh Talaei. 2013. Hydrological drought assessment in northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water Resources Management* 27: 137-151.
16. Wilhite, D. A. 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Drought: A Global Assessment. London, Routledge, UK.
17. Zhang, Q., T. Qi, V. P. Singh, Y. D. Chen and M. Xiao. 2015. Regional Frequency Analysis of Droughts in China: A Multivariate Perspective. *Water Resources Management* 29(6): 1767-1787.

Regional Analysis of Hydrological Drought in Ajichai Basin Using RDI Index

H. Ahmadzadeh^{1*}, A. Fakheri Fard¹, M. A. Ghorbani¹ and M. Tajrishy²

(Received: October 14-2020; Accepted: December 8-2020)

Abstract

In drought risk management, the regional analysis of drought is significant. In this paper, this important issue is investigated by presenting the new hydrological regional drought index (RDI). For this purpose, the Ajichai basin was selected as the study area. First, the time series of the streamflow drought index (SDI) was calculated for each of the hydrometric stations in the basin for regional analysis of hydrological drought. Then, to determine the homogeneous regions in terms of hydrological drought, the k-means method was used for clustering analysis. Based on the clustering results, 6 Homogeneous regions were identified in the basin. For each of these regions, the time series of the RDI index was calculated from 1365 to 1393. The results showed that during the study period in each of the regions 1, 2, 3, 4, 5, and 6, mild Wet and mild drought has occurred at 82.1, 80.1, 78.9, 83.3, and 84.3 percent of regions, respectively. Also, the total percentage of drought events (moderate and high) is higher than the total percentage of wet events (moderate and high) in all regions. So, during the study period, the total percentage of drought events (moderate and high) is more than twice the total percentage of wet events (moderate and high) in regions 2 and 3.

Keywords: Regional analysis of drought, SDI, Clustering, RDI, Homogeneous regions, Ajichai basin

1. Department of Water Engineering, Agricultural Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran.

2. Department of Water Engineering and Environment, Civil Engineering Faculty, Sharif University, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: hojatahmadzadeh6@gmail.com