

ارزیابی پایش مکانی و زمانی خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به کمک شاخص سنجش از دور ETDI و شاخص زمینی SPI

حیب بابا جعفری^{۱*}، شهلا پایمزد^۱، مه‌نوش مقدسی^۱ و سیدمحمدرضا حسینی وردنجانی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۸)

چکیده

خشکسالی به دلیل شروع آهسته و تأثیر بلندمدت آن یکی از پیچیده‌ترین بلایای طبیعی است، امروزه استفاده از تکنیک سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای به عنوان یک ابزار مفید برای پایش خشکسالی کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، هدف، ارزیابی پایش مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با شاخص خشکسالی ETDI که از روی تصاویر ماهواره نوا بر اساس تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم SEBS، محاسبه و مقایسه آن با شاخص زمینی SPI است. بدین منظور از ۲۴۸ تصویر سنجنده AVHRR و ماهواره NOAA طی دوره آماری ۲۰۰۹-۱۹۹۸ و ۱۷ ایستگاه هواشناسی با دوره آماری ۳۰ ساله برای محاسبه شاخص ها استفاده شد. به منظور تعیین اراضی کشاورزی، تعداد شش هزار نقطه برای کاربری‌های مختلف برداشت و تبخیر و تعرق واقعی آنها به کمک الگوریتم SEBS شد. نتایج نشان داد با شروع دوره خشکسالی در سال ۱۹۹۸ شاخص ETDI، خشکسالی را در ماه می با مقدار ۹/۴ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف و ۹۰/۶ درصد در وضعیت نرمال نشان می‌دهد. با گذشت زمان، در ماه جون شرایط با مقدار ۹۵ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف و ۵ درصد در وضعیت نرمال برای شهر تبریز متفاوت‌تر می‌شود و در ماه ژوئیه کل حوضه آبریز، خشکسالی ضعیفی را تجربه می‌کند. سپس در ماه آگوست ۸۴ درصد حوضه در وضعیت نرمال و ۱۶ درصد در شهر تبریز و ارومیه خشکسالی ضعیف اعلام می‌شود، همچنین مشخص شد شاخص خشکسالی ETDI به علت ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز و ترکیب آن با داده‌های زمینی، دارای مفهوم فیزیکی بوده و از قطعیت بالایی برخوردار است و خشکسالی را سریع‌تر و دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی کشاورزی، سنجنده AVHRR، شاخص ETDI، شاخص SPI

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک، ایران

۲. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: BaBajafari69@gmail.com

مقدمه

خشکسالی به دلیل شروع آهسته و تأثیر بلندمدت آن یکی از پیچیده‌ترین بلاایای طبیعی است (۲۲). تفاوت این پدیده با سایر بلاایای طبیعی در این است که این پدیده به تدریج و در یک دوره زمانی به نسبت طولانی عمل می‌کند. به طوری که اثرات آن پس از چند سال و با تأخیر بیشتری نسبت به سایر حوادث طبیعی ظاهر می‌شود. این مسئله اهمیت پایش خشکسالی به منظور پیش‌بینی احتمال این پدیده در آینده را نشان می‌دهد (۵). پایش خشکسالی (Drought Monitoring) یکی از عوامل مهم و کلیدی در مدیریت خشکسالی، به ویژه در مناطق مستعد و در معرض خطر خشکسالی است. پایش خشکسالی عبارت است از سامانه‌ای که بدان وسیله می‌توان پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیک و تغییرات آنها را به طور پیوسته دیده‌بانی و احتمال وقوع میزان شدت و وسعت احتمالی تحت پوشش خشکسالی را برآورد کرد. یکی از اطلاعاتی که پایش خشکسالی در اختیار برنامه‌ریزان می‌گذارد، ارزیابی میزان آب قابل دسترس و چشم‌انداز آن برای آینده نزدیک یا دور است. از این رو، این اطلاعات موجب می‌شود تا برنامه‌ریزان با دیدی بازتر به پدیده خشکسالی بپردازند و بر مبنای اطلاعات دقیق‌تری، برنامه‌ریزی کنند (۲۳). تاکنون شاخص‌های متنوعی برای توصیف خشکسالی پیشنهاد شده است. از معمول‌ترین این شاخص‌ها می‌توان به شاخص شدت خشکسالی کشاورزی پالم (Palmer Drought Severity Index)، شاخص رطوبت محصول (Crop moisture index) و شاخص استاندارد بارش (Standard Precipitation Index) که به طور گسترده پذیرفته شده اشاره کرد. شاخص استاندارد بارش (SPI) توسط مکی (Mckee) و همکاران از دانشگاه ایالت کلرادو در سال ۱۹۹۳ تدوین شد. اساس آن احتمالات بارندگی برای هر مقیاس زمانی مختلف است (۱۱). بسیاری از پژوهشگران خشکسالی، به قابلیت انعطاف‌پذیری این روش اشاره داشته‌اند (۶). ویژگی SPI این امکان را به تحلیل‌گر می‌دهد تا پدیده خشکسالی و همچنین ترسالی را در یک مقیاس زمانی معین و برای هر

نقطه‌ای از دنیا تعیین کند. با پیشرفت تکنولوژی و علم سنجش از راه دور شاخص‌هایی روی کار آمدند که جایگزین شاخص‌های مبتنی بر داده‌های اقلیمی شدند. این شاخص‌ها بر اساس اطلاعاتی که توسط باندهای ماهواره‌ها ثبت شده، استخراج می‌شوند و در زمینه خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق تقسیم‌بندی که توسط فرانسچسکو تینینی و همکاران در سال ۲۰۱۲ صورت گرفت شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای می‌توانند به چهار گروه شاخص‌های مبتنی بر پوشش گیاهی، شاخص‌های دمایی، ترکیب شاخص‌های دمایی-پوشش گیاهی و شاخص‌های مبتنی بر تبخیر و تعرق تقسیم‌بندی شوند (۲۰). به تازگی شاخص‌های ماهواره‌ای توسعه یافته‌اند، که اساس آنها بر پایه تبخیر و تعرق استوار است. این شاخص‌ها به علت به کارگیری مفهوم توازن انرژی از سطح اطمینان بالایی نسبت به شاخص‌های ماهواره‌ای که از پوشش گیاهی استفاده می‌کنند، برخوردار هستند. از جمله شاخص‌های مبتنی بر تبخیر و تعرق می‌توان به شاخص کسر تبخیر و تعرق (ETDI) (Evapotranspiration Deficit Index) توسط نراسیمان و همکاران (۲۰۰۵) اشاره کرد (۱۲). محاسبه این شاخص‌ها بر اساس معادله بیلان انرژی استوار است. در زمینه خشکسالی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تحقیقات مختلفی در ایران و دیگر نقاط جهان انجام شده است. در تحقیقی به ارزیابی خشکسالی کشاورزی در منطقه بیویو کشور شیلی به کمک شاخص سنجش از دوری VCI و SPI طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ در بازه‌های زمانی یک تا شش ماه پرداخته شد. نتایج نشان داد شاخص SPI سه ماهه بیشترین همبستگی را با شاخص VCI دارد (۲۲). در تحقیقی در کشور ترکیه به ارزیابی خشکسالی کشاورزی در دشت کاواکدره این کشور به وسیله شاخص‌های سنجش از دوری NDVI، SAVI و دمای سطح زمین پرداختند. نتایج نشان داد هر دو شاخص فوق با دمای سطح زمین در طی فصل آبیاری زمانی که درجه حرارت افزایش یافته و بارندگی کم شده، رطوبت قابل دسترس را کاهش داده یافته است، همبستگی منفی دارند. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب شاخص‌های فوق

بررسی قرار دادند و به منظور پایش دقیق تر خشکسالی شاخص استاندارد بارش SPI و شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI محاسبه و کلاس بندی خشکسالی را بر اساس دو شاخص مذکور تعیین کردند. نتایج دو شاخص SPI و VCI در کلاس بندی خشکسالی نشان داد که شاخص SPI نمی تواند به صورت تمام و کمال بیانگر وضعیت خشکسالی کشاورزی باشد (۱۰). مددی و همکاران (۷) به ارزیابی تصاویر ماهواره TRMM برای پایش زمانی و مکانی خشکسالی در حوزه مرزی غرب کشور پرداختند. محاسبه پایش خشکسالی به کمک شاخص SPI و برای مقیاس زمانی سه، شش، نه و دوازده ماهه در دوره آماری ۱۲ ساله ۲۰۱۳-۲۰۰۰ انجام شد. برآورد مقدار خشکسالی SPI در سراسر منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره TRMM و نقشه بارش ایستگاه های زمینی در قالب نرم افزار متلب انجام شد. در تمام پیکسل ها به طور پیوسته SPI محاسبه شد. نتایج نشان داد بین شاخص محاسبه شده با تصاویر ماهواره ای و شاخص محاسبه شده با داده های زمینی در همه مقیاس های بررسی شده ارتباط نزدیکی است. بر طبق نتایج سال ۲۰۰۸ به عنوان سال خشک معرفی شد (۱۳). نیازی و همکاران (۱۴) به ارزیابی یک شاخص خشکسالی جدید ترکیبی مبتنی بر داده های سنجنش از دوری (Remote Sensing Combined Drought Index-RCDI) در محدوده مرکزی ایران طی سال های ۲۰۰۴-۲۰۰۱ به کمک داده های سری TRMM-3B43 و محصولات دمایی و پوشش گیاهی سنجنده MODIS ماهواره Terra پرداختند. برای ارزیابی دقت شاخص گفته شده معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (R) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) در سطح ۹۵ درصد و بر اساس مقایسه با مقادیر رطوبت خاک اندازه گیری شده در ۵۰ ایستگاه سینوپتیک انجام گرفت. نتایج نشان داد که شاخص RCDI در انطباق با مقادیر رطوبت خاک اندازه گیری شده به متوسط ضریب همبستگی معناداری ۶۱ درصد و کمترین خطاب برآورد ۱/۹۸ داشته است (۱۴). نوایی و همکاران (۱۳) به ارزیابی پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص های پوشش گیاهی

در ارزیابی خشکسالی است (۲۱). در مطالعه ای در کشور مراکش شاخص های خشکسالی هواشناسی و کشاورزی را به صورت فصلی با یکدیگر مقایسه شد. در این مطالعه یک شاخص جدید مبتنی بر سنجنش از دور با نام شاخص آب استاندارد SWI محاسبه و با دو شاخص خشکسالی هواشناسی TRMM و شاخص خشکسالی کشاورزی NDVI برای سال های هیدرولوژیکی پاییز، زمستان و بهار در یک دوره ۱۵ ساله از ۲۰۱۲-۱۹۹۸ مقایسه شد. نتایج نشان داد چون منطقه درگیر خشکسالی است شاخص SWI در فصل پاییز و زمستان ارتباط بهتری با شاخص خشکسالی هواشناسی SPI دارد (۳). در تحقیقی در کشور چین به بررسی پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی در conus در چین پرداخته شد. از نسبت شاخص تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) به شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و نسبت شاخص استاندارد بارش (SPI) به شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (SPEI) برای ارزیابی خشکسالی استفاده شد. نتایج نشان داد برای ارزیابی خشکسالی شاخص های SPEI و SPI دارای سازگاری بهتری هستند. همچنین نتایج نشان داد شاخص های سنجنش از دوری فوق عملکرد مطلوبی در ارزیابی خشکسالی دارند (۲۴). در تحقیق دیگری در به تحلیل خشکسالی حوضه دریاچه وان به صورت دوره ای طی سال های ۲۰۱۹-۱۹۸۹ با فناوری سنجنش از دور و GIS پرداخته شد. نقشه دمای سطح زمین (Land surface temperature) و پوشش کاربری/ پوشش زمین (Land Use/Land cover- LULC maps) حوضه از تصاویر ماهواره لندست ۵ و لندست ۸ به دست آمدند. شاخص استاندارد بارش به کمک داده های به دست آمده از ایستگاه های هواشناسی محاسبه شد. نتایج نشان داد سطح خشکسالی در این حوضه طی سال های ۲۰۱۹-۱۹۸۹ افزایش یافته است (۴). مؤذن زاده و همکاران ۱۳۹۱ با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنجنده مودیس، روند تغییرات شاخص نرمال شده پوشش گیاهی NDVI در ماه های نوامبر تا می سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ را در کشت مرتع و اراضی دیم در حوضه آبریز نیشابور مورد

سال است. محدوده مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شکل ۱ نشان داده شده است (۸، ۹ و ۱۳). در این مطالعه تصاویر مورد نیاز، ۴۹۰ تصویر از سنجنده AVHRR ماهواره‌های ۱۶ و NOAA-14 با قدرت تفکیک ۱/۱ کیلومتر با فرمت LAC (Local Area Coverage) از ماه می تا ماه آگوست (اوایل اردیبهشت تا اوایل شهریور) سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ به صورت روزانه، بدون پوشش ابر، از آرشیو وب سایت ناسا (NASA) www.class.ngdc.noaa.gov دریافت شد. علت انتخاب تصاویر سنجنده AVHRR دسترس بودن تصاویر به صورت روزانه بود. از بین ۴۹۰ تصویر آنها ۲۴۸ تصویر پس از چک کردن و عدم ابری بودن برای پردازش نهایی انتخاب شد.

آماده‌سازی داده‌ها

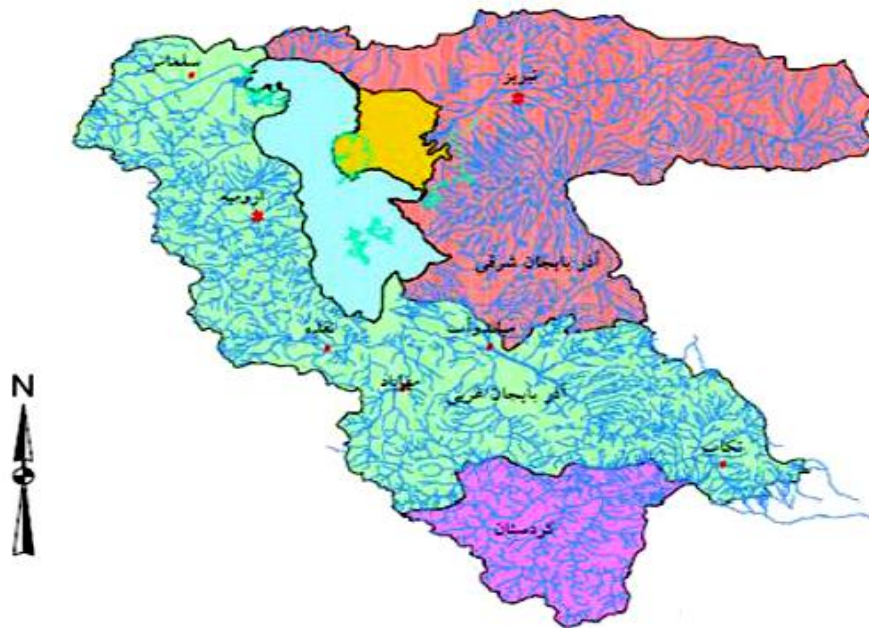
فایل اطلاعات تصاویر با فرمت LAC شامل اطلاعات مداری، ژئومتری و ضرایب واسنجی برای باندهای سنجنده AVHRR است. با استفاده از اطلاعات فایل هر تصویر، بازتابندگی (Reflectance) در باندهای ۱، ۲ و ۳ (مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی) و دمای درخشندگی (Brightness) در باندهای ۴ و ۵ (مادون قرمز حرارتی) با در نظر گرفتن اصلاحات مربوط به زاویه میل خورشیدی محاسبه شد. در این مطالعه، از نسخه ۵ نرم‌افزار ENVI (the Environment For Visualizing Images) استفاده شده است. این نرم‌افزار در IDL (Interactive Data Language) نوشته شده و زبان برنامه‌نویسی ساختار یافته قدرتمندی که پردازش یکپارچه تصاویر را ارائه می‌دهد، انعطاف‌پذیری این نرم‌افزار به قابلیت‌های IDL وابسته است. زبان برنامه‌نویسی IDL نرم‌افزار ENVI توسط David Stern در شرکت Research Systems در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۷ ارائه شد. اولین نسخه نرم‌افزار با این زبان برنامه‌نویسی با کاربرد تجزیه و تحلیل تصاویر چندطیفی و فراطیفی سنجنش از دور در سال ۱۹۴۴ تولید شد، تصحیحات رادیومتریک، سیستماتیک و غیرسیستماتیک

(VCI) شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) شاخص وضعیت دمایی (TCI) بر اساس داده‌های زمینی و سنجنش از دور ماهواره نوا در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد سنجنش از دور دقت مطلوبی در برآورد پراکندگی مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) ۰/۸۶ انطباق با شاخص SPI دارد (۱۵). امروزه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به جهت پوشش مناطق وسیع، و به منظور غلبه بر محدودیت‌های مکانی روش‌های نقطه‌ای، مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است. استفاده از این روش‌ها در علوم آب و بالاخص محاسبه تبخیر و تعرق واقعی و وارد کردن این پارامتر در خشکسالی به تازگی آغاز شده است، لذا در این تحقیق به بررسی شاخص خشکسالی ETDI بر اساس تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم SEBS از روی تصاویر ماهواره نوا می‌پردازیم. در این مطالعه تبخیر و تعرق واقعی برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه برآورد و با استفاده از این پارامتر شاخص خشکسالی محاسبه، نقشه‌های خشکسالی تهیه و نتایج با شاخص زمینی مقایسه می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با طول جغرافیایی ۷' ۴۴° تا ۵۳' ۴۷° شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰' ۳۰° تا ۳۸' ۳۰° شمالی در شمال غرب کشور قرار گرفته است. این حوضه یکی از شش حوضه اصلی ایران است. این حوضه که در سه استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی و کردستان واقع شده، دارای وسعت ۵۹۱۲۳ کیلومتر مربع بوده و وسعت دریاچه حدوداً ۲۰۰۰ کیلومتر مربع است. این منطقه از نظر اقلیمی، مشخصات دشت‌های نیمه مرتفع عرض‌های میانی با آب و هوای عمومی، زمستان‌های سرد و تابستان‌های به نسبت معتدل را دارد. میانگین سالانه بارندگی از ۳۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و رژیم قالب آن مدیترانه‌ای با بارش اندک تابستانه است. نیاز ناخالص آبیاری در این حوضه ۱۱۶ میلیون متر مکعب در



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (۱۷)

لندست توسط وب سایت ناسا و پیش از رسیدن به دست کاربر به انجام رسیده است. تصحیح تصاویر نیز با واسنجی باندها، موزائیک کردن تصاویر و ترکیب باندی در باندهای یک تا ۷ به جز باند ۶ (به علت ماهیت متفاوت) انجام شد. به منظور وضوح پدیده‌های مختلف در منطقه، از شاخص پوشش گیاهی تفاضل شده استفاده شد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره لندست در سال ۲۰۰۹ استفاده شد که عملیات پردازش روی تصاویر ماهواره‌ای در سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش انجام شد.

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

در تصاویر رقومی سنجنش از دور هر پیکسل دارای ارزش عددی است، که بازگوکننده رفتار طیفی پدیده متناظر آن در سطح زمین است. با تحلیل ارزش عددی پیکسل‌ها می‌توان پدیده‌های متناظر آنها را شناسایی و مورد ارزیابی قرار داد. با تجزیه و تحلیل ارزش‌های عددی تصاویر رقومی سنجنش از دور امکان شناسایی پدیده‌های زمینی روی تصویر فراهم شده و می‌توان نسبت به طبقه‌بندی آنها اقدام کرد. این طبقه‌بندی بر

به ترتیب در سه مرحله واسنجی داده‌ها (Calibrate Data)، زمین مرجع کردن داده‌ها (Georeference Data) و برش تصاویر با منطقه مطالعاتی صورت گرفت. در این مطالعه، برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از باندهای ۱، ۲، ۴ و ۵ سنجنده AVHRR استفاده شد. برای هر ماه به‌طور میانگین پنج تصویر بدون پوشش ابر استفاده شد. برای اجرای الگوریتم SEBS پارامترهای هواشناسی شامل دمای هوا، سرعت باد، و دمای نقطه شبنم مورد نیاز است. این اطلاعات از ایستگاه هواشناسی مورد نظر جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. علت انتخاب این ایستگاه‌ها قدمت و صحت اطلاعات موجود بود.

تصاویر دریافت شده از سنجنده TM ماهواره LANDSAT 5

لندست ۵ در سال ۱۹۸۴ پرتاب شد و حاوی سنجنده‌های Thematic (TM) است. در این مطالعه به‌منظور تهیه نقشه کاربری اراضی و تعیین کاربری کشاورزی، تصاویر سنجنده TM ماهواره LANDSAT 5 برای ماه‌های ژانویه تا جولای سال ۲۰۰۹ از وب سایت <http://www.usgs.gov> دریافت شد. گفتنی است که تصحیحات هندسی روی تصاویر ماهواره

داده شده است.

الگوریتم SEBS

به‌طور کلی، تمامی الگوریتم‌های برآورد اجزای شار انرژی بر اساس معادله بیلان انرژی استوار هستند. در ادامه، به تفکیک اجزای معادله بیلان انرژی رابطه ۱ اشاره می‌شود:

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (1)$$

که در این رابطه: R_n تابش خالص، G شارگرمای خاک، H شارگرمای محسوس و λET شارگرمای نهان بوده و تمامی واحدها برحسب W/m^2 هستند.

شار تابش خالص R_n

شار تابشی خالص برابر با مجموع تابش‌های موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی به سطح است که معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به‌شمار می‌رود. شار تابش خالص بر اساس بقای انرژی مطابق رابطه ۲ است:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + \varepsilon_0 R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} \quad (2)$$

که در این در رابطه، α آلبدوی سطحی، $R_{S\downarrow}$ میزان تابش موج کوتاه فرودی برحسب (W/m^2) است که طول موج‌های از ۰/۳ تا ۳ میکرومتر را شامل می‌شود. $R_{L\downarrow}$ میزان تابش موج بلند فرودی است برحسب (W/m^2) ، که طول موج‌های ۳ تا ۱۰۰ میکرومتر را شامل می‌شود. $R_{L\uparrow}$ میزان تابش موج بلند بازتابیده برحسب (W/m^2) است و در نهایت ε_0 میزان گسیلمندی سطحی است.

شار گرمای خاک G

شار گرمای خاک، میزان انرژی وارد شده به خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت ملکولی است. معادله شار گرمای خاک در SEBS به‌صورت رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$G_0 = R_n \cdot [\Gamma_c + (1 - f_c) \cdot (\Gamma_s - \Gamma_c)] \quad (3)$$

که در این رابطه: Γ_c و Γ_s ضرایب تجربی هستند و با استفاده از مشاهدات تجربی تعیین می‌شوند و به نوع خاک و

اساس ارزش عددی پیکسل‌ها است که در آن پدیده‌های دارای ارزش عددی یکسان، در یک گروه قرار می‌گیرند، این طبقه‌بندی که مبتنی بر ارزش عددی پیکسل‌هاست، طبقه‌بندی پیکسل پایه نامیده می‌شود (۱۷). با استفاده از محیط نرم‌افزارهای تخصصی می‌توان تصاویر را به روش‌های زیر طبقه‌بندی کرد. ۱- طبقه‌بندی نظارت نشده ۲- طبقه‌بندی نظارت شده. در طبقه‌بندی نظارت نشده، به‌طور اتوماتیک و بر اساس اختلاف اثر طیفی و محاسبات آماری، هر پیکسل به کلاس خاصی تعلق می‌گیرد. ضعف این روش در این است که در صورتی که عارضه مورد نظر دارای اختلاف اثر طیفی کمی نسبت به سایر عوارض باشد، تفکیک آن با این روش و به‌طور اتوماتیک بسیار دشوار است. برای غلبه بر این مشکل روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده ارائه شدند که در آنها از نمونه‌های تعلیمی به‌عنوان کلیدی که اثر طیفی مربوط به یک عارضه خاص و مورد نظر کاربر را نشان می‌دهد، برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در این پژوهش، اصول تئوریک طبقه‌بندی پیکسل پایه معروف (طبقه‌بندی نظارت شده) و جزئیات مربوط به آن ارائه می‌شود. پس از آماده‌سازی تصاویر لازم است مشخصات و تعداد کلاس‌های مورد نظر در محدوده مطالعه تعیین شود. در پژوهش حاضر با توجه به شناخت کافی از منطقه با استفاده از نرم‌افزار Google Earth، مطابق داده‌ها به صورت نقطه‌ای در ۶ کلاس کاربری و با توجه به وسعت منطقه تعداد ۶۰۰۰ نقطه تعیین شد. در نهایت برای اراضی باغی (۱۲۰۰) نقطه، اراضی آبی (۱۴۰۰)، اراضی دیم (۱۳۰۰)، مراتع (۹۵۰)، برای پیکره آبی (۶۵۰) و نواحی بایر (۵۰۰) نقطه برداشت شد. در این تحقیق دوره آماری ۳۰ ساله بنا نهاده شد و در انتخاب ایستگاه‌ها سعی شد در این دوره آماری به‌خصوص دوره خشکسالی اعلام شده توسط وزارت نیرو کمترین نواقص آماری وجود داشته باشد. در این راستا از ایستگاه‌های تبریز، ارومیه و بوکان، به‌منظور استفاده از آمار بارندگی برای محاسبه شاخص خشکسالی استاندارد بارش (SPI) استفاده شد. مشخصات و موقعیت ایستگاه‌های منتخب در جدول ۱ نشان

جدول ۱. مشخصات و موقعیت‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی

ایستگاه	استان	نوع ایستگاه	متولی	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)
ارومیه	آذربایجان غربی	باران‌سنجی	هواشناسی	۴۵,۰۳۳۳	۳۷,۵۳۳۳	۱۳۸۱
تبریز	آذربایجان شرقی	باران‌سنجی	هواشناسی	۴۶,۰۳۱۶۷	۳۸,۰۸۳۳۳	۱۳۷۰
بوکان	بوکان	باران‌سنجی	هواشناسی	۴۶,۰۲۶۶۶۷	۳۶,۲۵	۱۵۲۲

پایداری Obukhov است برحسب (m) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L = -\frac{\rho C_p u^* \theta_v}{k g H} \quad (۶)$$

که در این رابطه: θ_v پتانسیل دمای واقعی نزدیک سطح است. شار گرمای محسوس واقعی H با محاسبه سرعت برشی u^* و طول پایداری L از یک فرایند تکراری با استفاده از روابط (۴، ۵ و ۶) به دست می‌آید.

طول ارتفاع زبری برای انتقال گرما z_{oh}

ارتفاع زبری برای انتقال گرما (z_{oh}) در محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق از سطوح دارای پوشش گیاهی و سطوح خاک، بدون پوشش گیاهی از رابطه ۷ به دست می‌آید که B^{-1} معکوس عدد Stanton، یک ضریب بدون بعد انتقال گرما است. برای برآورد KB^{-1} رابطه ۸ مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۸ و ۱۹):

$$z_{oh} = \frac{z_{om}}{\exp(kB^{-1})} \quad (۷)$$

$$kB^{-1} = \frac{k C_d}{4 C_t} \frac{u^*}{u(h)} \left(1 - e^{-nc/2} \right) f_c^2 + 2 f_c f_s \frac{k \cdot \frac{u^*}{u(h)} \cdot \frac{z_{om}}{h}}{C_t^*} + kB_s^{-1} f_s^2 \quad (۸)$$

که در این روابط: f_c جزء پوشش گیاهی و f_s متمم آن است. C_t ضریب انتقال گرمای برگ است. برای اکثر پوشش‌های گیاهی و شرایط محیطی، C_t محدود می‌شود بین $0.005 N \leq C_t \leq 0.075 N$ (تعداد طرف‌های برگ برای انتقال گرما). ضریب انتقال گرما برای خاک با معادله

پوشش گیاهی وابسته‌اند برای اغلب خاک‌های بایر و بدون کشت $\Gamma_s = 0.315$ و برای پوشش گیاهی اغلب $\Gamma_c = 0.05$ فرض می‌شود (۹).

شار گرمای محسوس H

شار گرمای محسوس، میزان گرمای انتقال یافته به صورت همرفت و هدایت ملکولی و بر اثر اختلاف دما است. تفاوت اصلی الگوریتم‌های سنسجش از دور در برآورد تبخیر و تعرق در محاسبه شار گرمای محسوس است. برای محاسبه شار گرمای محسوس در SEBS از تئوری مشابهت استفاده شده است. در این تئوری، از چند رابطه در یک فرایند تکراری برای برآورد شار گرمای محسوس استفاده می‌شود. رابطه ۴، رابطه اصلی است که در آن شار گرمای محسوس محاسبه می‌شود:

$$\theta_0 - \theta_a = \frac{H}{k u^* \rho C_p} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{oh}} \right) - \Psi_h \left(\frac{z - d_0}{L} \right) + \Psi_h \left(\frac{z_{oh}}{L} \right) \right] \quad (۴)$$

$$u = \frac{u^*}{k} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{om}} \right) - \Psi_m \left(\frac{z - d_0}{L} \right) + \Psi_m \left(\frac{z_{om}}{L} \right) \right] \quad (۵)$$

که در این روابط: z ارتفاعی که در مشاهدات هواشناسی در آن انجام می‌شود (m)، C_p ظرفیت گرمایی هوا خشک

$$u^* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2}, \text{ سرعت برشی } (ms^{-1}), \tau_0 \text{ تنش برشی}$$

سطح، ρ چگالی هوا ($Kg m^{-3}$)، $k = 0.4$ ثابت von Karman، d_0 ارتفاع جابه‌جایی (m)، z_{oh} و z_{om} ارتفاع زبری سطح برای انتقال مومتم و گرما (m)، θ_0 و θ_a پتانسیل دما در ارتفاع z_{oh} و ارتفاع z (K)، Ψ_m و Ψ_h توابع اصلاح پایداری برای مومتم و انتقال گرمای نهان هستند. L طول

رابطه ۱۱ به دست می آید:

$$d_0 = h \left[1 - \frac{1 - e^{-\sqrt{c_1 LAI}}}{\sqrt{c_1 LAI}} \right] \quad (11)$$

که در این رابطه: h ارتفاع پوشش گیاهی، که 1m در نظر گرفته می شود زمانی که اطلاعات وجود ندارد. ثابت $c_1 = 20.6$ در نظر گرفته می شود. نکته اینکه زمانی که $LAI = 0$ ، مقدار $d_0 = 0$ اتخاذ می شود (۲).

برآورد ارتفاع جابه‌جایی به وسیله z_{om}

ارتفاع جابه‌جایی می تواند از رابطه ۱۲ به شکل زیر برآورد شود:

$$d_0 = c \cdot z_{om} \quad (12)$$

که در این روابط: c یک عدد ثابت است که به شرایط محلی وابسته است، برای سطح مرجع یونجه، c می تواند ۵.۴ در نظر گرفته شود.

دمای سطحی

دمای سطح زمین در برآورد شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس هوا و میزان تبخیر و تعرق استفاده می شود. آگاهی از توزیع مکانی و زمانی دمای سطح زمین برای تعیین بیلان انرژی زمین، مطالعات هواشناسی و تبخیر و تعرق ضروری است (۱۹). دمای سطح زمین با استفاده از تابش مادون قرمز ساطع شده از زمین که توسط باندهای حرارتی ماهواره‌ها ثبت می شود، از طریق معادله معکوس پلانک قابل برآورد است. در سنجش از دور، دمای سطح زمین که در بالای اتمسفر به وسیله سنجنده‌ها به دست می آید را دمای روشنایی می نامند که به علت پدیده‌های جذب و پخش اتمسفری، کمتر از دمای واقعی در سطح زمین است. اودراری و همکاران (۲۰۰۲) با جمع‌بندی روش‌های مبتنی بر Split-window برای تعیین دمای سطحی سنجنده AVHRR، روش اصلاح شده رابطه ۱۳ را ارائه کردند (۱۵):

$$T_s = a_0 + a_1 \times T_4 + a_2 \times (T_4 - T_5) + a_3 \times (T_4 - T_5)^2 + a_4 \times WV + a_5 \times (1 - \varepsilon) \quad (13)$$

که در این رابطه: T_4 و T_5 درخشندگی باندهای ۴ و ۵

عدد رینولدز زبری Pr عدد پراتل، $C_t^* = Pr^{-2/3} Re_*^{-1/2}$ که $Re_* = \frac{h_s u_*}{\nu}$ که h_s ارتفاع زبری خاک است. لزجت سینماتیکی برای هوا با معادله $v = 1.327 \times 10^{-5} \left(\frac{p_0}{p} \right) \left(\frac{T_a}{T_{a0}} \right)^{1.81}$ به دست می آید، که p و T_a فشار و دمای هوای محیط $p_0 = 101.3 \text{ KPa}$ و $T_{a0} = 273.15 \text{ K}$ هستند.

برای سطح خاک بدون پوشش kB^{-1} بر اساس رابطه ۹ به صورت زیر به دست می آید (۲):

$$kB_s^{-1} = 2.46 (Re_*)^{1/4} + \ln(7.4) \quad (9)$$

ارتفاع زبری آیرودینامیک z_{om}

ارتفاع زبری برای انتقال مومتم (z_{om}) به عنوان ارتفاع مرجع در محاسبات شار مومتم در نظر گرفته می شود و ارتفاعی است که در آن جریان سیال از آشفته به ورقه‌ای تغییر می کند. چندین روش برای بازیابی این پارامتر وجود دارد مانند روش پروفیل باد، ارتفاع گیاه، مراجعه به جدول طبقه‌بندی کاربری‌های زمین و غیره، که در ادامه دو روش متداول گفته شده است.

برآورد ارتفاع زبری آیرودینامیک به وسیله NDVI

معادله ساده زیر (رابطه ۱۰) با استفاده از NDVI نیز می تواند برای برآورد ارتفاع زبری آیرودینامیک استفاده شود (۱۹):

$$z_{om} = 0.005 + 0.5 \left(\frac{NDVI}{NDVI_{max}} \right)^{2.5} \quad (10)$$

ارتفاع جابه‌جایی d_0

ارتفاع جابه‌جایی، یا همان سطح صفر جابه‌جایی، ارتفاعی است که تراز سطح جابه‌جا می شود و زیر تاج پوشش گیاهی به علت پوشش گیاهی بلند قرار دارد، جایی که سرعت باد صفر است. این پارامتر می تواند با استفاده از LAI یا z_{om} برآورد شود. برآورد ارتفاع جابه‌جایی به وسیله شاخص سطح برگ (LAI) از

(H_{dry}) و شار گرمای محسوس مرطوب (H_{wet}) در محدوده خشک گرمای نهان به علت محدود بودن رطوبت خاک صفر است و گرمای محسوس حداکثر مقدار خود را دارد همچنین در محدوده مرطوب، تبخیر حداکثر مقدار را دارد و شار گرمای محسوس حداقل است. جزء تبخیر از رابطه ۱۸ به دست می آید (۲):

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G} = \frac{\Lambda_r \cdot \lambda E_{wet}}{R_n - G} \quad (18)$$

تبخیر نسبی Λ_r با استفاده از رابطه ۱۹ به دست می آید:

$$\Lambda_r = \frac{\lambda E}{\lambda E_{wet}} = 1 - \frac{\lambda E_{wet} - \lambda E}{\lambda E_{wet}} \quad (19)$$

در این رابطه λE_{wet} از رابطه ۲۰ و ۲۱ به دست می آید. در محدوده مرطوب تبخیر حداکثر مقدار خود را دارد و گرمای محسوس حداقل است.

$$\lambda E_{wet} = R_n - G_0 - H_{wet} \quad \text{or} \quad H_{wet} = R_n - G_0 - \lambda E_{wet} \quad (20)$$

$$\lambda E_{dry} = R_n - G_0 - H_{dry} = 0 \quad \text{or} \quad H_{dry} = R_n - G_0 \quad (21)$$

مدل پنمن مونیتث فائو

این مدل یکی از معتبرترین روش‌ها برای تخمین ET_0 است که مورد استفاده متخصصان قرار می گیرد. در روش مذکور، گیاه مرجع، چمن با ارتفاع ۱۲ سانتی متر و ضریب بازتابش آن ۲۳ درصد است. این معادله به عنوان معادله مرجع تبخیر و تعرق شناخته شده و سایر روش‌ها نسبت به این روش کالیبره می شوند. این مدل از رابطه ۲۲ به دست می آید:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \left[\frac{900}{(T + 273)} \right] U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (22)$$

که در این رابطه: ET_0 تبخیر و تعرق روزانه (mm/day)، R_n تابش خورشیدی روزانه رسیده به سطح گیاه ($\text{Mj m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، G شار گرما به داخل خاک ($\text{Mj m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتری (kPa^{-1})، T میانگین دمای روزانه ($^{\circ}\text{C}$)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)، e_a فشار بخار اشباع (kPa)، e_d فشار بخار واقعی (kPa) و Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع (kPa^{-1}) است (۱).

سنجنده AVHRR است. WV بخار آب موجود در جو (g/c m^2) ، ε میزان گسیلمندی سطحی و a_i ضرایب تجربی برای هر یک از سنجنده‌ها است. a_i ضرایب تجربی که در این تحقیق، مقادیر آن مطابق ضرایب زیر تعیین شد:

$$a_1 = -7.244, a_2 = 0.426, a_3 = 0.133, a_4 = 90.792$$

بخار آب موجود WV

بخار آب موجود از رابطه ۱۴ به دست می آید:

$$WV = \frac{\rho_0 \times 10}{9.806} \quad (14)$$

و ρ_0 از رابطه ۱۵ به دست می آید:

$$\rho_0 = \exp\left(1.8 + \frac{17.27 \times T_{dew}}{T_{dew} + 237.3}\right) \quad (15)$$

روند محاسباتی دمای سطح در شکل ۲ نمایش داده شده است.

تعیین شار گرمای نهان (λET)

شار گرمای نهان، میزان تلفات گرما از سطح به علت تبخیر و تعرق را نشان می دهد که برای هر پیکسل با توجه به رابطه ۱۶ محاسبه می شود:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (16)$$

که در این رابطه: λET مقدار لحظه‌ای برای زمان گذر ماهواره است (W/m^2) و میزان لحظه‌ای ET به صورت عمق تبخیر به صورت رابطه ۱۷ محاسبه می شود:

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (17)$$

که در این رابطه: ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر حسب λ گرمای نهان بخار آب یا میزان گرمای جذب شده هنگامی که یک کیلوگرم آب بخار می شود بر حسب (J/kg) و عدد ۳۶۰۰ برای تبدیل زمان ثانیه به ساعت است.

جزء تبخیری (Λ)

در الگوریتم SEBS یک روش جدید برای به دست آوردن جزء تبخیری ارائه شده است. در این روش شار گرمای محسوس (H) محدود می شود بین دو مقدار شار گرمای محسوس خشک

$$T_s = (a_0 + a_2(T_{b4} - 273) - a_3(T_{b5} - 273) + a_4 \times WV(1 - \varepsilon_0)) + 273$$

$$WV = \frac{P_0 \times 10}{9.806}$$

$$P_0 = \exp(1.8 + \frac{17.27 \times T_{dew}}{T_{dew} \times 237.3})$$

شکل ۲. روند محاسباتی دمای سطح

آب ماهیانه از ۱۰۰ - تا ۱۰۰+ نشان‌دهنده وضعیت خشک و مرطوب است. در این رابطه برای ماه مورد نظر تنش آب به کمک معادله (۲۳) برآورد و نسبت به میانگین بلندمدت تنش آب برای تعداد سال‌های مورد نظر سنجیده می‌شود، اگر مقادیر تنش آب در ماه برابر میانگین بلندمدت تنش آب بود با استفاده از رابطه ۲۴ و اگر مقادیر تنش آب در ماه بزرگ‌تر از میانگین بلندمدت تنش آن باشد با استفاده از رابطه ۲۵ تنش آب محاسبه و با جایگذاری آن در معادله ETDI_{۲۶} ماهیانه محاسبه و خشکسالی را برای کل حوضه مورد نظر ارزیابی می‌کنیم.

شاخص SPI

شاخص SPI برای هر منطقه بر اساس آمار بارندگی‌های طولانی مدت و بازه‌های زمانی مختلف (۱، ۲، ۳، ...، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۴۸ ماهه) محاسبه می‌شود. محاسبه این شاخص مستلزم برآزش مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی به سری زمانی طولانی مدت داده‌های بارندگی در هر ایستگاه است که این توزیع معمولاً توزیع گاما است (۱۱). در مرحله بعد، تابع تجمعی توزیع محاسبه شده و به توزیع نرمال تبدیل می‌شود. تابع توزیع گاما برای برآزش بر سری زمانی بارندگی به صورت رابطه ۲۷ است:

for: $x > 0$

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (27)$$

که در آن x مقادیر بارندگی بزرگ‌تر از صفر بوده و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است. مقادیر α و β نیز بر اساس تعداد مشاهدات بارندگی

شاخص ETDI

شاخص کسر تبخیر و تعرق یک شاخص خشکسالی کشاورزی براساس تبخیر و تعرق که توسط (۷) ارائه شد. نحوه محاسبه این شاخص بر اساس نسبت تنش آب استوار است. در این شاخص نسبت تنش آب با استفاده از تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های سنجش از دوری SEBS و تبخیر و تعرق مرجع پنمن مانیتث قابل محاسبه است. محاسبه این شاخص مطابق روابط (۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۶) تعریف می‌شود:

$$WS_j = \frac{(ET_0 - ET_a)}{ET_0} \quad (23)$$

که در این رابطه: ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (پنمن مانیتث)، ET_a تبخیر و تعرق واقعی که از الگوریتم سنجش از دوری SEBS، مطابق روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$WSA_{i,j} = \frac{MWS_j - WS_{i,j}}{MWS_j - \min WS_j} * 100 \quad (24)$$

if $(WS_{i,j} = MWS_j)$

$$WSA_{i,j} = \frac{MWS_j - WS_{i,j}}{\max WS_j - MWS_j} * 100 \quad (25)$$

if $WS_{i,j} > MWS_j$

$$ETDI = 0.5ETDI_{j-1} + \frac{WSA_j}{50} \quad (26)$$

در این رابطه MWS_j میانگین بلندمدت تنش آب انومالی برای ماه j ، $\max WS_j$ ماکزیمم بلندمدت تنش آب برای ماه j ، $\min WS_j$ مینیمم بلندمدت تنش آب برای ماه j است. متوسط مقادیر تنش

کل حوضه آبریز دریاچه برش داده شد. با توجه به مساحت محاسبه شده توسط نقشه کاربری اراضی بیش از ۵۵۶۵ کیلومتر مربع از سطح حوضه دریاچه ارومیه تحت اراضی کشاورزی باغی و زراعی است. در این مرحله با استفاده از قابلیت نرم افزار ENVI با اعمال پلیگون نقشه‌های حاصل از کاربری اراضی کشاورزی زراعی و باغی، برای هر تصویر تبخیر و تعرق خروجی از مدل SEBS برش خورده و سپس متوسط پلیگون‌های حاصل به عنوان مقادیر خروجی برای آن تصویر به دست آمد. این مراحل برای هر تصویر (هر ماه) به طور مجزا انجام و در نهایت نتایج مربوط به تبخیر و تعرق واقعی برای اراضی کشاورزی برای دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ استخراج شد. برای ارزیابی خشکسالی بسته به داده‌های قابل دسترس شاخص‌های متفاوتی وجود دارد. در این پژوهش با استفاده از شاخص خشکسالی ETDI و شاخص SPI خشکسالی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ خشکسالی ارزیابی شد. شاخص‌های منتخب در این پژوهش مبنا و محدوده عددی یکسانی ندارند که بتوان آنها را به یک‌باره و با یک شکل نشان داد. لذا نتایج به دو صورت مکانی و نمایش ارقام شاخص‌ها که بر اساس آن خشکسالی اعلام می‌شود به صورت نمودار مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در این بخش مقادیر شاخص ETDI برای دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ که سال‌های خشکسالی مورد تأیید وزارت نیرو است، برای سه منطقه تبریز، ارومیه، و سقز برآورد شد که ارائه نتایج آن قابل مشاهده است.

مقادیر متوسط شاخص ETDI از ۱۰۰- تا ۱۰۰+ نشان‌دهنده وضعیت خشک و مرطوب است. همان‌گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود مقادیر محاسبه شده در سال ۱۹۹۸ وضعیت خشکی را برای سه استان نشان می‌دهد. این روند برای آذربایجان غربی برای ماه‌های می و جون مقداری ثابت و در ماه جولای به بالاترین حد خشکسالی ماهانه می‌رسد که امری است طبیعی و در ماه آگوست این مقدار کاهش می‌یابد. همین روند برای آذربایجان شرقی و کردستان با مقداری کمتر قابل مشاهده است و

و متوسط آن مشخص می‌شود. سپس تابع احتمال تجمعی به صورت رابطه ۲۸ تعریف می‌شود:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta} \hat{\alpha} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{x}{\hat{\beta}}} dx \quad (28)$$

از آنجایی که تابع فوق برای $x=0$ تعریف نشده است، لذا در صورت وجود صفر در داده‌های بارندگی، احتمال تجمعی به صورت رابطه ۲۹ محاسبه می‌شود:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (29)$$

که در آن q احتمال بارندگی صفر در سری زمانی مورد بررسی است که معادل با نسبت تعداد صفرها به کل داده‌ها است. در این مرحله مقادیر SPI که در واقع نرمال مقادیر $H(x)$ است رابطه ۳۱ قابل محاسبه است:

$$\text{for } : 0 < H(x) \leq 0.5$$

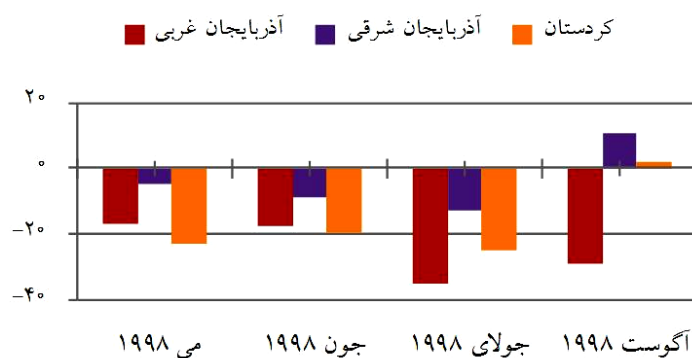
$$Z = \text{SPI} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (31)$$

$$\text{for } : 0.5 < H(x) \leq 1.0$$

$$Z = \text{SPI} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$

نتایج و بحث

هدف از این تحقیق ارزیابی پایش مکانی و زمانی خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به کمک شاخص سنجش از دوری ETDI و شاخص زمینی SPI است. علاوه بر تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده که در قسمت قبل توضیح داده شد، DEM منطقه و موقعیت و اطلاعات ایستگاه هواشناسی معرف منطقه برای هر تصویر به عنوان ورودی مدل انتخاب شد. با توجه به مساحت زیاد حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تغییرات قابل توجه اطلاعات هواشناسی و به منظور افزایش دقت خروجی الگوریتم SEBS، حوزه تقسیم شد و از بین ایستگاه‌های سینوپتیک، سه ایستگاه ارومیه، تبریز و سقز که هم از نظر قدمت و هم از نظر پراکندگی در طول حوضه مناسب بودند انتخاب شدند. در نهایت بر اساس سه ایستگاه منتخب، سه پلیگون که در برگیرنده این سه ایستگاه بود انتخاب و روی

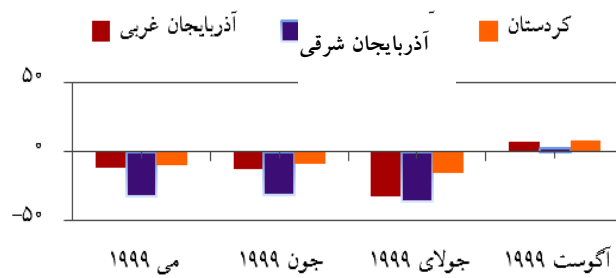


شکل ۳. هیستوگرام ارقام ماهیانه شاخص ETDI برای آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان طی سال ۱۹۹۸ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

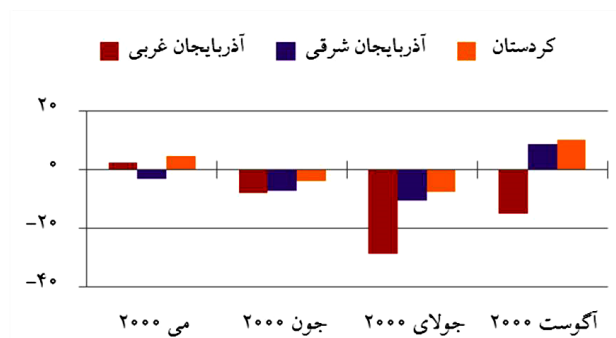
مانند نمودار قبل، در ماه جولای به بالاترین حد خشکسالی در ماه رسیده و در ماه آگوست مقدار نرمالی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴ مقادیر محاسبه شده در سال ۱۹۹۹ شرایط خشکسالی بالاتری را نسبت به سال ۱۹۹۸ نشان می‌دهد. این روند برای آذربایجان شرقی طی ماه‌های می و جون تقریباً مقداری ثابت و در ماه جولای به بالاترین حد خشکسالی ماهانه می‌رسد که با توجه به دمای بالا و تبخیر و تعرق بالا در این ماه صحت مقادیر برآورد شده توسط شاخص ETDI را نشان می‌دهد. این مقادیر برای ماه‌های می تا آگوست ۱۹۹۹ برای سه استان روند تقریباً مشابهی را دنبال می‌کند که در ماه آگوست این مقدار برای سه منطقه شرایط نرمالی را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۵ مقادیر محاسبه شده در سال ۲۰۰۰ شرایط متفاوت‌تری را نسبت به سال ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ نشان می‌دهد. این روند برای آذربایجان شرقی طی ماه‌های می و جون شرایط نرمال، در ماه جولای افزایش خشکسالی و در ماه آگوست شرایط نرمال را نشان می‌دهد. این روند در استان آذربایجان غربی برای ماه‌های می و جون مقداری نزدیک به نرمال و خشک و در ماه جولای به بالاترین مقدار خود در سال می‌رسد. به این ترتیب در استان کردستان روندی مشابه با آذربایجان شرقی را نشان می‌دهد با این تفاوت که در ماه جولای خشکسالی کمتری را نسبت به استان آذربایجان شرقی نشان می‌دهد. شاخص SPI برای هر منطقه بر اساس ثبت بارندگی طولانی مدت آن محاسبه می‌شود. این شاخص برای بازه‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۴۸، و ۷۲ ماهه قابل محاسبه است و به‌منظور هشدار اولیه و پایش شدت خشکسالی اهمیت زیادی دارد. علت انتخاب شاخص استاندارد بارش SPI و ارزیابی آن با شاخص ماهواره‌ای در این بود که این شاخص نسبت به شاخص‌هایی نظیر پالمر، ارزیابی و پایش نزدیک به زمان واقعی (ماهانه) را در موقعیت به‌نسبت مناسب‌تری نشان می‌دهد. علاوه بر آن در بازه‌های زمانی مختلف قابل محاسبه است. در این پژوهش، برای ارزیابی و پایش خشکسالی‌های کوتاه مدت (کشاورزی) از SPI سه ماهه برای ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ استفاده شد و نتایج در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ ارائه و مورد بررسی قرار گرفت.

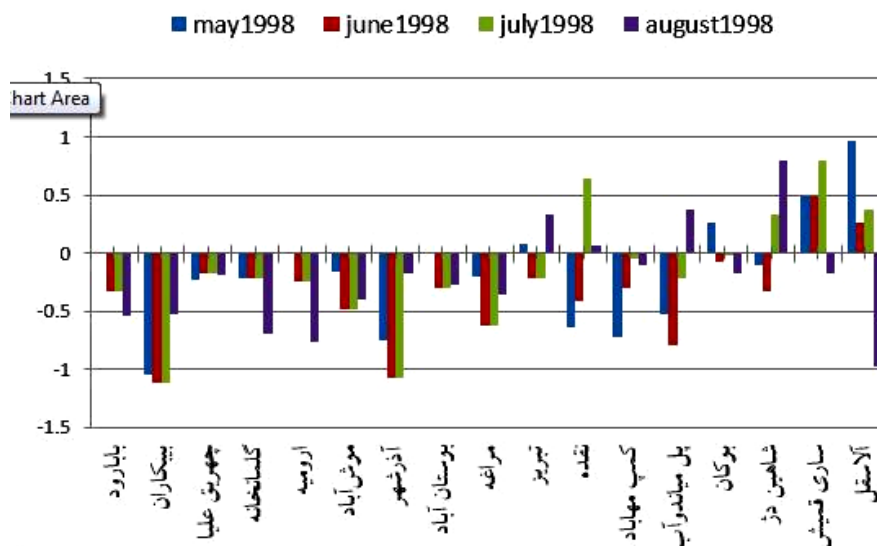
زمانی که شاخص استاندارد بارش دارای مقادیر منفی باشد خشکسالی رخ می‌دهد و زمانی که مقادیر SPI برابر ۱- یا کمتر شود خشکسالی تشدید می‌شود. با مثبت شدن شاخص بارش دوره خشکسالی خاتمه می‌یابد. بنابراین تداوم خشکسالی با توجه به زمان شروع و پایان آن تعریف می‌شود و شدت آن برای هر یک از ماه‌های خشکسالی تعریف می‌شود. لذا ملاحظه می‌شود این شدت خشکسالی در سال ۱۹۹۸ با ارقام منفی برای تمامی ماه‌ها و ایستگاه‌ها به‌جز سه ایستگاه شاهین دژ، ساری قمیش و آلاسقل شروع می‌شود. برای سال ۱۹۹۹ گویای همین مسئله است و حداکثر شدت خشکسالی مربوط به ماه می برای تمامی ایستگاه‌ها است و بقیه ماه‌ها وضعیت تقریباً نرمالی را دنبال می‌کنند. مقادیر منفی در سال ۲۰۰۰ برای تمامی ماه‌ها و ایستگاه‌ها به بالاترین



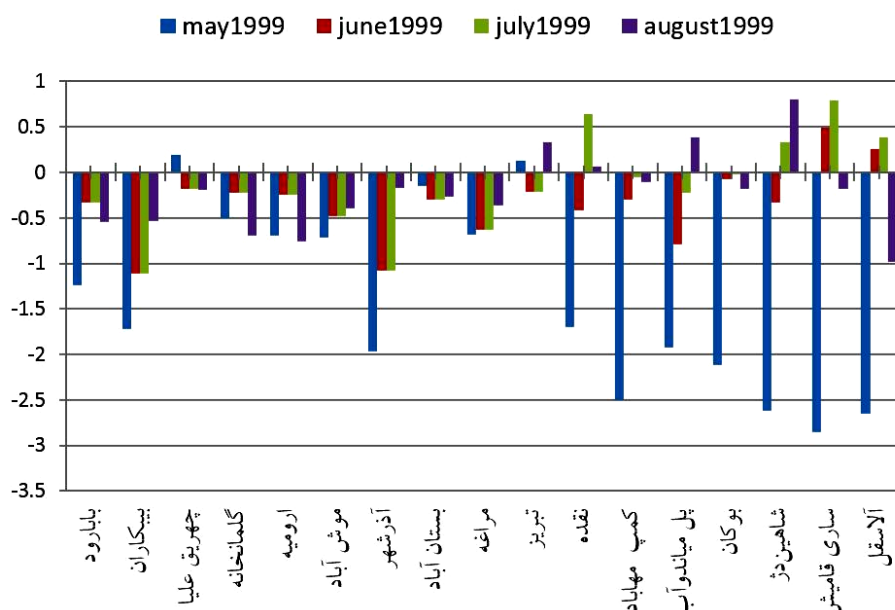
شكل ۴. هيستوگرام ارقام ماهيانه شاخص ETDI براى آذربايجان غربى، آذربايجان شرقى و كردستان طى سال ۱۹۹۹ (رنگى در نسخه الكترونيكى)



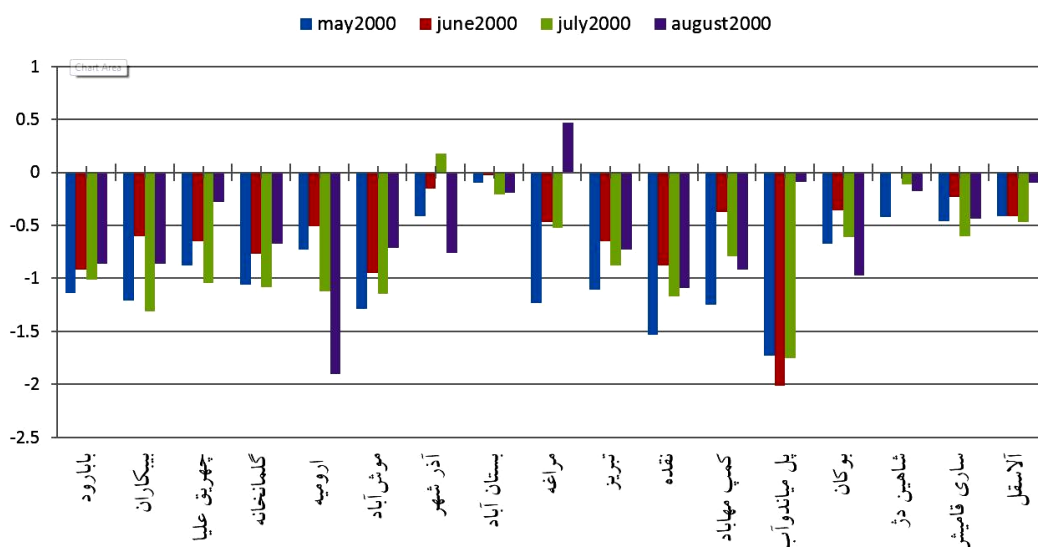
شكل ۵. هيستوگرام ارقام ماهيانه شاخص ETDI براى آذربايجان غربى، آذربايجان شرقى و كردستان طى سال ۲۰۰۰ (رنگى در نسخه الكترونيكى)



شكل ۶. هيستوگرام ارقام سه ماهه شاخص SPI براى ايستگاه باران سنجى حوضه آبريز درياچه اروميه طى سال ۱۹۹۸ (رنگى در نسخه الكترونيكى)



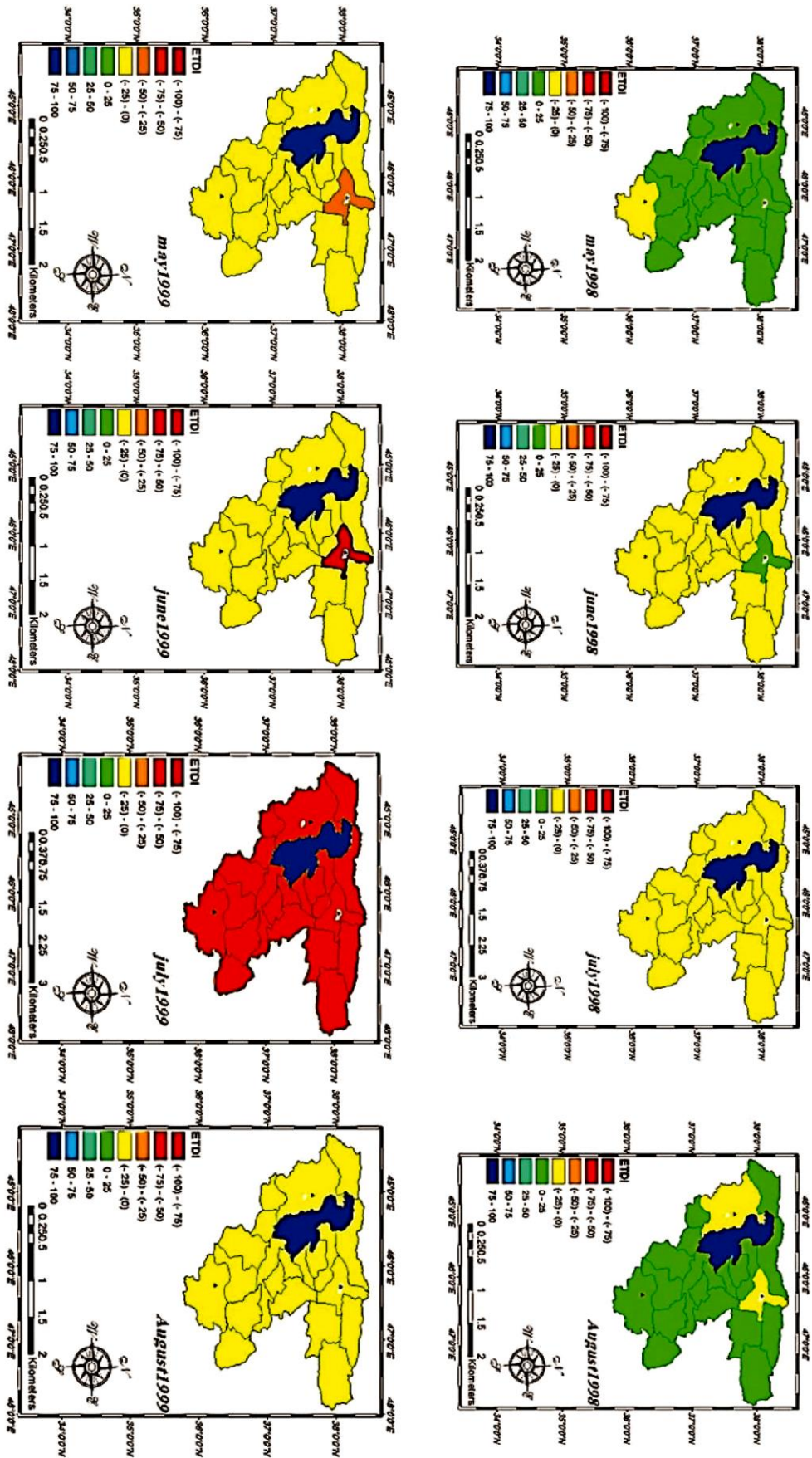
شکل ۷. هیستوگرام ارقام سه ماهه شاخص SPI برای ایستگاه باران‌سنجی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال ۱۹۹۹ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



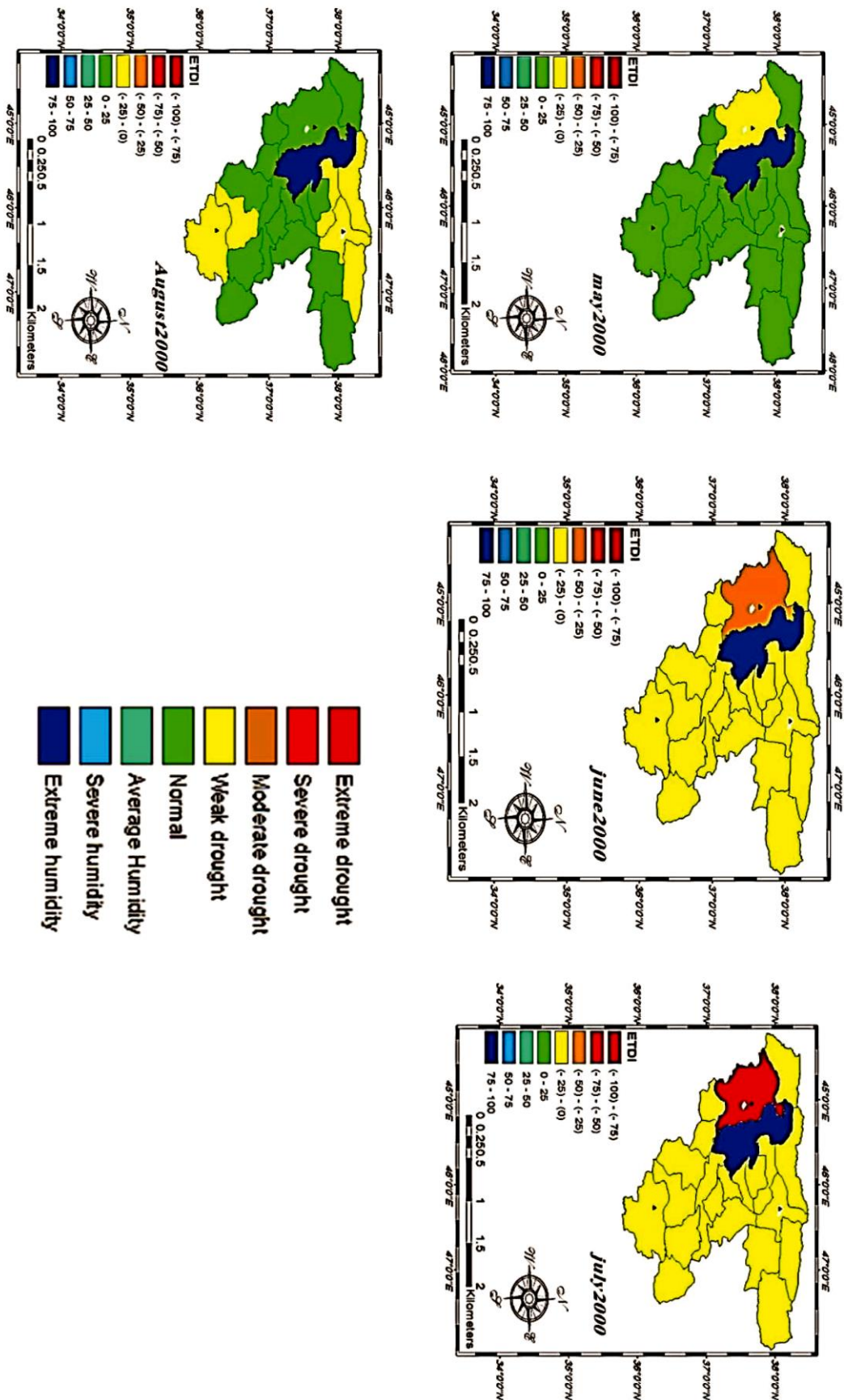
شکل ۸. هیستوگرام ارقام سه ماهه شاخص SPI برای ایستگاه باران‌سنجی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال ۲۰۰۰ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

برای هر ایستگاه روش‌های متفاوتی وجود دارد که در این مطالعه روش زمین آماری کریجینگ مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نقشه‌های نهایی خشکسالی برای دو شاخص تهیه و در شکل‌های ۹ و ۱۰ ابتدا برای شاخص ETDI و در نهایت برای شاخص SPI ارائه شد. به دلیل اینکه شاخص SPI و شاخص ETDI مبنای عددی یکسانی ندارند ولی طبقات خشکسالی این دو شاخص تقریباً در یک

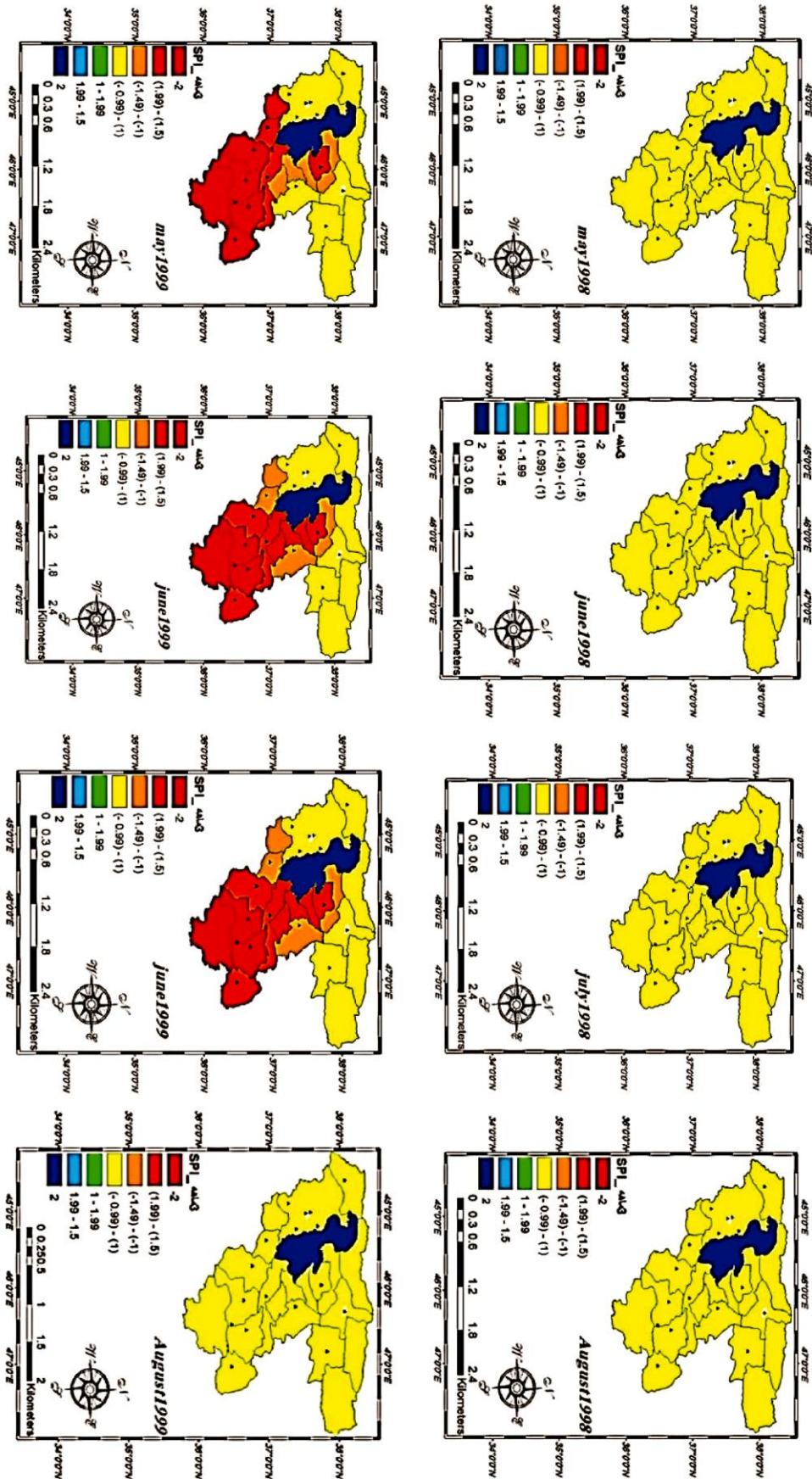
حد خود رسید و این امر، شدت بالاتر خشکسالی در سال ۲۰۰۰ نسبت به سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ را نشان داد. به منظور تحلیل مکانی خشکسالی و تهیه نقشه مربوط با استفاده از این شاخص‌ها و ارزیابی دقیق‌تر آنها از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. لذا برای تمامی ماه‌ها مقادیر عددی شاخص‌ها در موقعیت ایستگاه‌های مربوط تهیه شد. برای مکانی کردن اطلاعات حاصل از شاخص‌ها



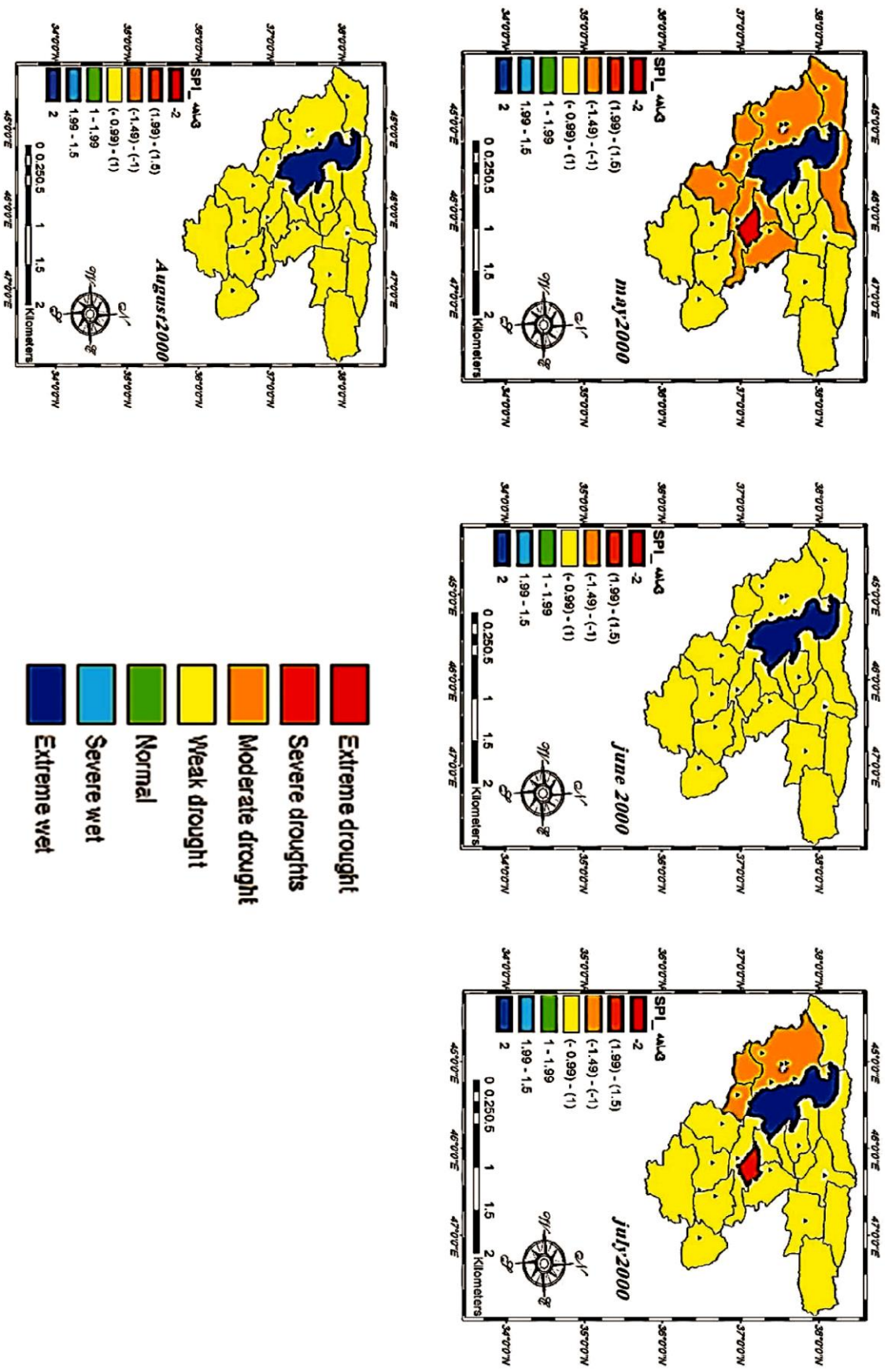
شکل ۹ الف. نقشه‌های ماهانه خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی ماه‌های می، جون، ژوئیه و اگوست ۲۰۰۰-۱۹۹۸ بر اساس شاخص ETDI



شکل ۹. نقشه‌های ماهانه خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی ماه‌های می، جون، ژوئیه و اگوست ۲۰۰۰-۱۹۸۰ بر اساس شاخص ETDI



شکل ۱۰ الف. نقشه‌های ماهانه ماهانه خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی ماه‌های می، جون، ژوئیه و اگوست ۲۰۰۰-۱۹۹۸ بر اساس شاخص SPI



شکل ۱۰. نقشه‌های ماهانه خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی ماه‌های می، جون، ژوئیه و اگوست ۲۰۰۰-۱۹۹۸ بر اساس شاخص SPI

باقی ماندن در یک طبقه را دارد ولی در شاخص ETDI با خشکسالی نرمال در سطح حوضه و خشکسالی ضعیف برای شهر ارومیه در ماه می شروع می‌شود سپس مقدار آن در ماه جون در طول حوضه تغییر کرده و حداکثر شدت خشکسالی را برای ماه جولای برای شهر ارومیه برآورد می‌کند و در نهایت شدت آن در ماه آگوست کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری در زمینه پایش خشکسالی با توجه به قابلیت اطمینان و دقت محصولات داده های سنجش از دور، توانایی را برای پیش‌بینی و نظارت بر همه اشکال خشکسالی و اثرات آن در طیفی از مقیاس‌های زمانی و مکانی را افزایش می‌دهد که با تحقیقات نوایی و همکاران (۱۴۰۰)، اردم و همکاران (۲۰۲۱)، زامبران و همکاران (۲۰۱۸) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی پایش مکانی و زمانی خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به کمک شاخص سنجش از دوری ETDI و شاخص زمینی SPI پرداخته شد. با توجه به محاسبه شاخص‌ها و نقشه‌های خروجی می‌توان به این نتیجه رسید که در حالت کلی، تأخیر ملموسی بین شروع خشکسالی کشاورزی و خاتمه آن توسط شاخص SPI نسبت به شاخص ETDI به چشم می‌خورد. در واقع شاخص ETDI نسبت به شاخص SPI عکس‌العمل سریع‌تری را برای دوره‌های خشکسالی کشاورزی نشان می‌دهد و می‌توان آن را با توجه به بررسی خشکسالی در پهنه وسیع به‌عنوان شاخص مناسب جایگزین شاخص SPI قلمداد کرد. شاخص خشکسالی ETDI به‌علت ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز و ترکیب آن با داده‌های زمینی، دارای مفهوم فیزیکی بوده و از قطعیت بالایی برخوردار است بنابراین از این شاخص می‌توان برای اقلیم‌های متفاوت برای پایش و ارزیابی خشکسالی استفاده کرد.

محدوده قرار دارند مقایسه این دو شاخص به‌صورت مکانی با استفاده از نقشه‌های خروجی GIS انجام شد. با شروع دوره خشکسالی در سال ۱۹۹۸ مطابق شکل ۹ شاخص ETDI، خشکسالی را در ماه می با مقدار ۹/۴ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف و ۹۰/۶ درصد در وضعیت نرمال نشان می‌دهد. با گذشت زمان، در ماه جون شرایط با مقدار ۹۵ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف و ۵ درصد در وضعیت نرمال برای شهر تبریز متفاوت‌تر می‌شود. سپس در ماه جولای کل حوضه آبریز، خشکسالی ضعیفی را تجربه می‌کند. شرایط در ماه آگوست کاملاً تغییر می‌کند و ۸۴ درصد حوضه در وضعیت نرمال و ۱۶ درصد در شهر تبریز و ارومیه خشکسالی ضعیف اعلام می‌شود، ولی مطابق شکل ۱۰ شاخص استاندارد بارش نسبت به تغییرات عکس‌العمل کندتری نشان می‌دهد و تقریباً روند ثابتی را دنبال می‌کند و خشکسالی را برای همه ماه‌ها ثابت اعلام می‌کند. مطابق شکل (۱۰-الف و ۱۰-ب) در سال ۱۹۹۹ مقادیر شاخص ETDI برای ماه می و جون با مقدار ۹۵/۳ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف و ۴/۷ درصد با وضعیت خشکسالی متوسط و شدید در شهر تبریز شروع می‌شود و حداکثر آن در سطح حوضه مربوط به ماه جون و جولای در وضعیت خشکسالی خیلی شدید و متوسط است که روند مشابه آن در شاخص استاندارد بارش با مقادیر (۳۰ درصد خشکسالی خیلی شدید، ۱۱ درصد خشکسالی شدید، ۹ درصد خشکسالی متوسط و ۵۰ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف) برای ماه‌های می، (۲۰ درصد خشکسالی خیلی شدید، ۲۲ درصد خشکسالی شدید، ۱۳ درصد خشکسالی متوسط و ۴۵ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف) در ماه جون، (۲۷ درصد خشکسالی خیلی شدید، ۸ درصد خشکسالی شدید، ۲۰ درصد خشکسالی متوسط و ۴۵ درصد در وضعیت خشکسالی ضعیف) در ماه جولای و خشکسالی ضعیفی در ماه آگوست برای کل حوضه مشاهده می‌شود. بر اساس شکل ۱۰ (الف و ب) این مقادیر در سال ۲۰۰۰ توسط شاخص استاندارد بارش به‌جز ماه می و جولای روند ثابتی را اعلام می‌دارد و اصرار بیشتری در

منابع مورد استفاده

1. Allen, R., G. L. Pereira, S. D. Raes and M. S. MITH. 1998. Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
2. Brutsaert, W. 1982. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications. Springer, Dordrecht.
3. Ezzine, H., A. Bouziane and D. Ouazar. 2014. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information* 36-38.
4. Fatehi Marj, A. and A. Heydarian. 2013. Drought study of agricultural meteorology and hydrology using GIS in Khuzestan province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 7(23): 19-32. (In Farsi).
5. Firat, E., A. Rutkay, A. Zehra Yigit, A. Ilknur and A. Ugur. 2021. Drought analysis of Van Lake Basin with remote sensing and GIS technologies. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 1-10.
6. Hayes, M. J., M. D. Svoboda, D. A. Wilhite and O. V. Vanyarkho. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(3): 429-438.
7. Madadi, Gh. and S. Hamza. 2016. Evaluation of TRMM satellite imagery for temporal and spatial monitoring of drought, Case study: Western border area. *Journal of Watershed Engineering and Management* 8(4): 362-376. (In Farsi).
8. McKee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale, Proceedings of the Eight Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston, M.A 179-184.
9. Moazenzadeh, R., S. Arshad, B. Hero and K Davari. 2012. Drought monitoring in non-irrigated crops using remote sensing techniques. *Water and Irrigation Management* 2(2): 32-52. (In Farsi).
10. Moghaddasi, M. and S. morid. 2011. Report of agricultural water allocation model in drought conditions in Urmia Lake basin, Wetlands protection plan of Iran. (In Farsi).
11. Moghaddasi, M., S. Morid, M. Delavar and F. Arabpour. 2015. Agricultural water consumption management approach in Urmia lake restoration. *Iran-Water Resources Research* 11(1): 1-12.
12. Narasimhan, B. and R. Srinivasan. 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology* 133(2005) 69-88.
13. Navabi, N., M. Moqaddasi and N. Ganji Khorram Del. 2021. Evaluation of agricultural drought monitoring using different indicators based on ground data and remote sensing, Case study: Urmia Lake watershed. *Watershed Engineering and Management* 13(1): 1-12. (In Farsi).
14. Niazi, Y., A. Talebi, M. H. Mokhtari and M. Vazifeh Doost. 2016. Evaluation of a new combined drought index based on remote sensing data (RCDI) in central Iran. *Echo Hydrology* 3(1): 31-43. (In Farsi).
15. Ouaidrari, H., S. N. Goward, K. P. Czajkowski, J. K. Sobrino and E. Vermot. 2002. Land surface temperature estimation from AVHRR Thermal infrared measurements an assessment for the AVHRR Land Pathfinder data set. *Remote Sensing of Environment* 81: 114-128.
16. Rahimi Khoob. A. 2005. Evaluation of several methods for estimating ground surface temperature using NOAA satellite images in the catchment area of Lake Urmia. *Research and Construction in Agriculture and Horticulture* 5(68): 84-90. (In Farsi).
17. Rezaei Banafsheh, M., H. Rostamzadeh and B. Faizizadeh. 2008. The study and evaluation of the trend of forest surface changes using the remote sensing and GIS: A Case Study of Arasbaran Forests (1987-2005). *Geographical Researches* 62: 143-159. (In Farsi).
18. Su, Z. 2002. A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes from point to continental scale. Paper presented at the Spectra Workshop.
19. Su, Z. and C. Jacobs. 2001. ENVISAT: actual evaporation. BCRS report 2001: USP-2 Report 2001, Publication of the National Remote sensing board (BCRS), Delft.
20. Su, Z. and C. Jacobs. 2001. ENVISAT: actual evaporation. BCRS report 2001: USP-2 Report 2001, Publication of the National Remote sensing board (BCRS), Delft.
21. Tonini, F., G. J. lasinio and H. Hochmair. 2012. Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information* 564-572.
22. Yıldırım, T. and Ş. Aşık. 2018. Index-based assessment of agricultural drought using remote sensing in the semi-arid region of Western Turkey. *Journal of Agricultural Sciences* 24(4): 510-516.
23. Zambrano, F., M. Lillo-Saavedra, K. Verbist and O. Lagos. 2016. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBío region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). *Remote Sensing* 8(6): 530-549.

24. Zarezadeh Mehrizi, M. and S. Morid. 2011. Drought monitoring using dam reservoir level and meteorology (Case Study of Zayandehrud water system in Isfahan). *Journal of Soil and Water Research* 42(1): 19-26. (In Farsi).
25. Zhong, S., Z. Sun and D. Liping. 2021. Characteristics of vegetation response to drought in the CONUS based on long-term remote sensing and meteorological data. *Ecological Indicators* 127: 1-14.

Assessment Monitoring Spatio-Temporal of Drought Lake Urmia Basin using ETDI Remote Sensing Index and SPI Ground Index

H. Babajafari^{1*}, Sh. Paimozd¹, M. Moghaddasi¹ and S. M. R. Hosseini Vardanjani²

(Received: November 12-2021 ; Accepted: February 27-2022)

Abstract

Drought is one of the most complex natural disasters due to its slow onset and long-term impact. Today, the use of remote sensing techniques and satellite imagery has been considered a useful tool for monitoring agricultural drought. The objective of the present study was to evaluate spatial and temporal monitoring of agricultural drought in the lake Urmia catchment area with the ETDI drought index which is calculated from Nova satellite images based on actual evapotranspiration from the SEBS algorithm and compared with the ground index SPI. For this purpose, 248 AVHRR sensor images and NOAA satellites during the statistical period of 1998-2000 and 17 meteorological stations with a statistical period of 30 years were used to calculate the indicators. To determine agricultural lands, six thousand points were marked for different uses and their actual evapotranspiration was calculated using the SEBS algorithm. The results showed that with the onset of the drought period in 1998, the ETDI index indicated 9.4% in weak drought conditions in May and 90.6% in normal conditions. Over time, in June of 1998, the situation was different with 95% in a weak drought situation and 5% in a normal situation for the city of Tabriz. In July, the entire catchment area experiences a slight drought. Then, in August, 84% of the basin is in normal condition and 16% in Tabriz and Urmia are declared weak drought. It was also founded that the ETDI drought index due to the combination of visible and infrared bands and its combination with terrestrial data has a physical meaning and has high certainty and predicts drought faster and more accurately.

Keywords: Agricultural drought, AVHRR sensor, ETDI index, SPI index

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Arak University, Arak, Iran.

2. Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

*: Corresponding author, Email: BaBajafari69@gmail.com