

DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2024.20742.1965

## بررسی اثرات خشکسالی بر کارایی مصرف آب در اقلیم و کاربری‌های مختلف

(مطالعه موردی: استان تهران)

(مقاله پژوهشی)

۱- شیما جوادی، دانشجوی دکتری رشته مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲- ابوالفضل رنجبر فردویی، استاد گروه بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۳- حسن خسروی\*، دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

hakhosravi@ut.ac.ir

۴- هادی اسکندری‌دامنه، محقق بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

### چکیده

در این مطالعه به بررسی اثرات خشکسالی بر کارایی مصرف آب (WUE) در اقلیم و کاربری‌های مختلف استان تهران پرداخته شد. برای محاسبه کارایی مصرف آب از محصولات تولید ناخالص اولیه (GPP)، تبخیر و تعرق (ET) حاصل از سنجنده مودیس و شاخص خشکسالی پالم (PDSI) استفاده شد. سپس روند تغییرات شاخص تولید ناخالص اولیه، تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب و خشکسالی در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱ با استفاده از رگرسیون خطی و آزمون‌های من-کندال و شیب تخمین‌گر سن محاسبه و به دنبال آن از پاسخ کارایی مصرف آب به خشکسالی در اقلیم و کاربری‌های مختلف با استفاده از آنالیز همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات شاخص‌های ET، GPP و PDSI با آزمون من-کندال نشان داد که به ترتیب ۸۱/۱۵، ۸۶/۲۸، ۹۹/۸۳ درصد افزایش و WUE ۷۶/۲۴ درصد کاهش یافته است که این نتایج توسط آزمون شیب تخمین‌گر سن نیز تأیید شد. بررسی رابطه کارایی مصرف آب و خشکسالی در اقلیم و کاربری‌های مختلف نشان داد که در اقلیم خشک اراضی کشاورزی و بوته‌زار به ترتیب ۹۱/۸۶ و ۷۸/۹۳ درصد رابطه منفی و کاربری مرتع ۵۱/۹۶ درصد رابطه مثبت داشته است. اراضی کشاورزی، مرتع و بوته‌زار مربوط به اقلیم نیمه‌خشک به ترتیب ۸۵/۳۸، ۶۶/۲۲، ۶۴/۲۷ درصد افزایشی و در کاربری جنگل ۸۴/۸۷ درصد کاهش یافته است. در اقلیم نیمه‌مرطوب به ترتیب ۵۳/۴۷، ۶۰/۴۸، ۷۳/۴۱ درصد از مساحت مورد مطالعه در کاربری‌های کشاورزی، مرتع و بوته‌زار رابطه مثبت و ۹۱/۳۰ درصد از کاربری جنگل رابطه منفی داشته است. در اقلیم مرطوب اثرگذاری منفی خشکسالی در ۶۶/۰۴، ۶۱/۱۵ و ۵۰/۵۶ درصد از اراضی کشاورزی، مرتع و جنگل مشاهده شده است. به‌طور کلی با توجه به نتایج ذکر شده، خشکسالی اثر منفی بر کارایی مصرف آب در استان تهران داشته است و می‌توان گفت که مقاومت اکوسیستم در برابر خشکسالی توسط همبستگی مابین شاخص خشکسالی و کارایی مصرف آب مشخص می‌شود.

واژگان کلیدی: شاخص خشکسالی، سنجنده مودیس، تولید ناخالص اولیه، تبخیر و تعرق.

### مقدمه

و جو، به‌ویژه در تنظیم تعادل کربن و آب ایفا می‌کند. خشکسالی باعث عدم تعادل عمیق در چرخه کربن زمینی می‌شود، در نتیجه برای درک متابولیسم اکوسیستم‌های زمینی نیاز به پارامتری است که یک پیوند حیاتی بین چرخه کربن و آب ایجاد کند [۱۴، ۴، ۲۳].

خشکسالی از جمله رویدادهای نگران‌کننده تغییرات اقلیمی بوده و پدیده‌ای است پیچیده با آثار متفاوت که اکوسیستم‌های زمینی را از دیدگاه ساختاری و عملکردی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بدنه اصلی اکوسیستم‌های زمینی پوشش گیاهی است و نقش کلیدی در پدوسفر، هیدروسفر

استفاده کردند. نتایج این تحقیق، افزایش کارایی مصرف آب در مناطق جنگلی و گراسلند را نشان داد.

در مطالعه‌ای دیگر، آنالیز WUE با استفاده از آزمون من-کندال در آسیای مرکزی انجام شد و بیان شد که افزایش کارایی مصرف آب ناشی از افزایش تولید ناخالص اولیه و کاهش تبخیر و تعرق بوده که به ترتیب به علت افزایش بارندگی و پاسخ پوشش گیاهی به تنش خشکی است [۳۷]. همچنین کاهش کارایی مصرف آب ناشی از تغییرات در محصولات کاشته شده و شیوه‌های استفاده غیرمنطقی از آب در مناطق کشاورزی آبی بیان شده است. در تحقیقی به بررسی تخریب اراضی تحت تأثیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI<sup>۵</sup>) بر شاخص کارایی مصرف آب در استان فارس پرداخته شده است [۱۰]. برای محاسبه کارایی مصرف آب از محصولات تولید ناخالص اولیه و تبخیر و تعرق حاصل از سنجنده مودیس استفاده شد و از داده‌های بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی، شاخص خشکسالی SPI محاسبه گردید. نتایج آنها نشان داد که شاخص‌های تبخیر و تعرق، تولید ناخالص اولیه، کارایی مصرف آب و خشکسالی در این بازه زمانی ۱۷ ساله به ترتیب ۷۵/۲۵، ۲۹/۹، ۷۸/۵۱ و ۶۷/۲۳ درصد افزایش یافته‌اند. بررسی تأثیر خشکسالی بر کارایی مصرف آب در کاربری‌های اراضی کشاورزی و گراسلند نشان داد که رابطه مثبت بین این دو شاخص به ترتیب در ۷۵/۹ و ۸۷ درصد از این کاربری‌ها دیده می‌شود که از این مقادیر به ترتیب ۴/۷ و ۷/۶ درصد رابطه معنی‌داری را نشان می‌دهد.

در آخر، می‌توان ادعان داشت که تغییرات اقلیمی اثر معنی‌داری بر اکوسیستم‌های طبیعی در برخی از مناطق جهان داشته و تولید اولیه ناخالص به‌عنوان یک شاخص مهم برای چگونگی پاسخ اکوسیستم بیان شده است. کارایی مصرف آب در گیاه بستگی به نوع گیاه و شرایط اقلیمی دارد، بنابراین اگر از گیاهان مناسب که از اتلاف آب جلوگیری می‌کنند استفاده شود این کارایی افزایش می‌یابد [۸، ۳۴].

با توجه به مرور منابع و مطالعات قبلی و همچنین با وجود اهمیت درک واکنش کارایی مصرف آب به تغییرات اقلیمی به خصوص خشکسالی مطالعات و تحقیقات کمی

کارایی مصرف آب (WUE<sup>۱</sup>) از خصوصیات مهم فیزیولوژیکی به‌منظور بیان توانایی گیاه در مقابله با تنش آب است. به همین منظور، کارایی مصرف آب به‌عنوان یک شاخص مهم برای توصیف رابطه بین کربن و چرخه آب در اکوسیستم‌ها استفاده می‌شود [۱۰، ۳۲]. تحقیقات اخیر در مورد روابط بین WUE و خشکسالی در سراسر اکوسیستم‌های زمینی نشان می‌دهد که گیاهان تنش آبی را با کاهش هدایت روزه‌ای مدیریت می‌کنند، در نتیجه کارایی مصرف آب اکوسیستم باید از سال مرطوب به خشک افزایش یابد که نشان‌دهنده مقاومت پوشش گیاهی در برابر کمبود آب است. با این حال، روابط بین کارایی مصرف آب و خشکسالی در بین اکوسیستم‌ها بحث‌برانگیز است [۱۸، ۲۸، ۲۹].

برآورد و ارزیابی کارایی مصرف آب بر اساس داده‌های مشاهده‌شده زمین در مقیاس‌های منطقه‌ای یا جهانی دشوار است. برای حل این مشکل از روش‌های سنجش از دور استفاده می‌شود. این روش‌ها در دهه‌های اخیر داده‌ها و ابزارهای مناسبی را برای محاسبه کارایی مصرف آب فراهم کرده‌اند. از جمله می‌توان به داده‌های تولید ناخالص اولیه (GPP<sup>۲</sup>) و تبخیر و تعرق (ET<sup>۳</sup>) حاصل از سنجنده مودیس (MODIS<sup>۴</sup>) اشاره نمود که در بسیاری از تحقیقات اخیر استفاده شده‌اند [۳۵، ۳۷].

در تحقیقی، کارایی مصرف آب را برای انواع مختلفی از مراتع از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ را ارزیابی کرده و در نتیجه افزایش کارایی مصرف آب را برای کاربری‌های بوت‌زار و ساوانا گزارش کردند [۱۵]. در تحقیقی دیگر، به ارزیابی ارتباط بین کارایی مصرف آب و خشکسالی پرداختند، طبق نتایج کارایی مصرف آب در اکوسیستم خشک و مرطوب به ترتیب پاسخ منفی، مثبت و منفی نشان داده شد [۱۷].

همچنین در تحقیقی به تأثیر رویدادهای خشکسالی بر کارایی مصرف آب در انواع پوشش‌های گیاهی در شمال چین پرداخته شده است [۲۲]. برای این منظور از محصولات سنجنده مودیس در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۳

1- Water Use Efficiency

2- Gross Primary Production

3- Evapotranspiration

4- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

5- Standardized Precipitation Index

این استان با وسعتی حدود ۱۸۹۰۹ کیلومتر مربع در نیمه‌شمالی ایران واقع شده و ۲/۱ درصد از مساحت کل کشور را دربر گرفته است. از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول جغرافیایی شرقی ۵۰° ۱۰' تا ۵۳° ۱۰' و عرض شمالی ۳۴° ۵۲' تا ۳۶° ۲۱' واقع شده است. شکل ۱ موقعیت استان تهران، نقشه مدل رقومی ارتفاع، کاربری اراضی و نقشه اقلیم را در این استان نشان می‌دهد.

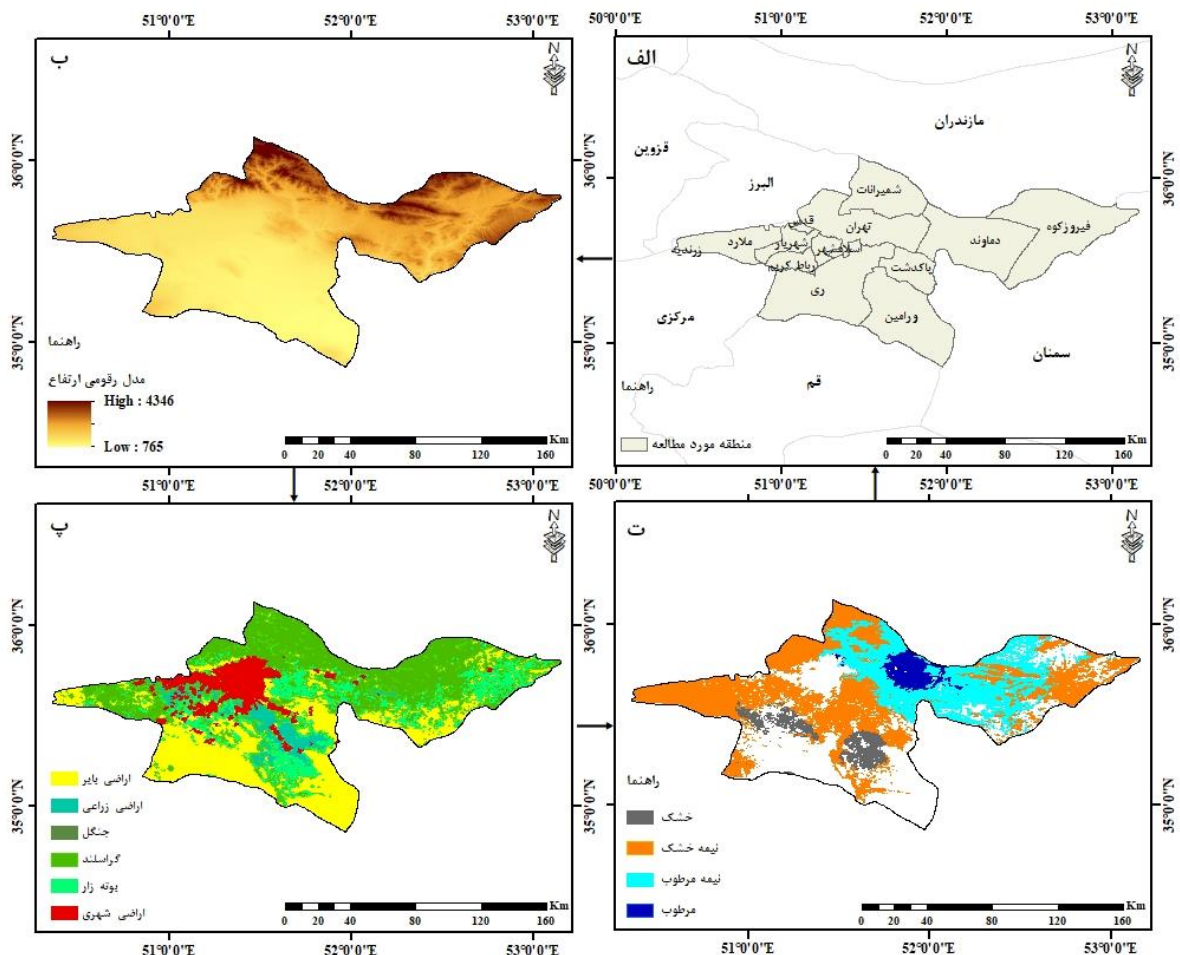
این منطقه دارای سه بخش ارتفاعی مشخص: ارتفاعات شمالی در ارتفاع بالای چهار هزار متر با دمایی بین ۰ تا ۴ درجه، ارتفاعات کوهپایه‌ای در ارتفاع دو تا سه هزارمتری با دمایی بین ۴ تا ۱۰ درجه و در آخر، ارتفاعات کمتر از هزار متر با دمای بالاتر از ۱۴ درجه است (شکل ۱-ب). میزان بارش از ۲۳۰ تا ۵۰۰ میلیمتر در سال متغیر است [۱].

در نحوه واکنش کارایی مصرف آب به تغییرات اقلیم در مقیاس‌های مختلف شناخته شده است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، بررسی رابطه اثرگذاری خشکسالی بر کارایی مصرف آب در کاربری‌ها و اقلیم‌های مختلف استان تهران در بازه زمانی سال ۲۰۰۱-۲۰۲۱ است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

استان تهران به دلیل موقعیت سیاسی، اجتماعی و اقتصادی خود از جایگاه ویژه‌ای در بحث‌های مرتبط با خشکسالی برخوردار است که مجموعه این عوامل باعث گردیده تا این استان به‌عنوان منطقه مطالعاتی این تحقیق انتخاب گردد.



شکل ۱- الف) موقعیت استان تهران؛ ب) نقشه مدل رقومی ارتفاع؛ پ) نقشه کاربری اراضی؛ و ت) نقشه اقلیم

USGS<sup>۲</sup> از سری تصاویر ماهواره‌ای Terra به دست آمد. بدین منظور برای محاسبه تولید ناخالص اولیه از سنجنده مودیس (MOD17A2) و تبخیر و تعرق از سنجنده (MOD16A2) با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر در بازه زمانی ۸ روزه استفاده شد. در این نوع محصولات سنجنده مودیس برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش پنمن مانیتیت استفاده شده است.

### محاسبه کارآیی مصرف آب (WUE)

کارآیی استفاده از آب، صد سال پیش توسط بریگز و شانز (۱۹۱۳) ارائه شد. آنها اصطلاح کارآیی استفاده از آب را به عنوان اندازه‌گیری میزان زیست‌توده تولیدشده در واحد آب مورد استفاده یک گیاه معرفی کردند و رابطه بین بهره‌وری گیاه و استفاده از آب را نشان دادند [۲]. بدین ترتیب کارآیی استفاده از آب شاخص کلیدی اتصال چرخه کربن و آب گیاهان است [۸].

در این پژوهش، شاخص مورد نظر از نسبت تولید ناخالص اولیه (GPP<sup>۳</sup>) به تبخیر و تعرق (ET<sup>۴</sup>) به دست آمد (رابطه ۱).

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (1)$$

در این رابطه، مجموع سالانه GPP بر حسب کیلوگرم کربن بر مترمربع، مجموع سالانه ET بر حسب میلی‌متر بر مترمربع و میزان WUE بر حسب کیلوگرم کربن بر میلی‌متر است.

### شاخص خشکسالی PDSI

شاخص پالمر (PDSI<sup>۵</sup>) یکی از شاخص‌های متداول خشکسالی است که با استفاده از دما و بارش منطقه خشکسالی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در واقع، این شاخص بر اساس میزان رطوبت خاک که متأثر از بارش و دما است خشکسالی را نشان می‌دهد [۸، ۳۲].

منطقه مطالعاتی توسط شاخص خشکی (AI<sup>۱</sup>) به چهار بخش اقلیمی تقسیم شد که شامل ۵۶/۴۹ درصد معادل ۵۲۹۱۴۴/۹۱ هکتار مربوط به اقلیم نیمه‌خشک، ۳۰/۷۷ درصد معادل ۲۹۰۴۸۹/۱۷ هکتار اقلیم نیمه‌مرطوب، ۷/۵۳ درصد اقلیم خشک که ۷۱۰۴۴/۷۳ هکتار از منطقه را شامل شده و در آخر، ۵/۲۱ درصد از منطقه اقلیم مرطوب بوده که حدود ۴۸۷۹۲/۴۹ هکتار از سطح استان را دربرگرفته است (شکل ۱-ت).

در این مطالعه برای تهیه نقشه کاربری سال ۲۰۰۱، از محصول MCD12Q1 سنجنده مودیس با وضوح ۵۰۰ متر استفاده گردید [۹، ۱۳]. نقشه کاربری اراضی در شش کلاس کاربری تهیه گردید (شکل ۱-پ). بر اساس این شکل بیشترین مساحت، مربوط به کاربری مرتع بوده که ۴۰/۵۱ درصد از منطقه را دربرگرفته است، سپس اراضی بایر ۳۸/۸۶، کشاورزی ۷/۸۴، اراضی شهری ۷/۴۳ و بوته‌زار ۵/۲۹ درصد را شامل می‌شوند. در آخر، جنگل با ۰/۰۷ درصد کمترین مساحت منطقه را تشکیل داده است.

### روش تحقیق

در راستای اهداف این مقاله از داده‌ای اقلیمی و ماهواره‌ای استفاده گردید که در ادامه به شرح کامل این داده‌ها پراخته می‌شود. از دو نوع داده در شکل ۲ مراحل پژوهش به صورت کلی آورده شده است.

### داده‌های پژوهش

#### داده‌های زمینی

در این مطالعه داده‌های دما و بارش ۱۳ ایستگاه سینوپتیک واقع در استان تهران طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ به صورت ماهانه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. ایستگاه‌ها بر مبنای پوشش مناسب مکانی در منطقه مطالعاتی و قابل اعتماد بودن داده‌ها انتخاب شدند.

#### داده‌های ماهواره‌ای

محصولات سنجنده مودیس (MODIS) از جمله داده‌های تولید ناخالص اولیه (GPP) و تبخیر و تعرق (ET) طی دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۱ از پایگاه داده

<sup>۲</sup>- United States Geological Survey

<sup>۳</sup>- Gross primary production

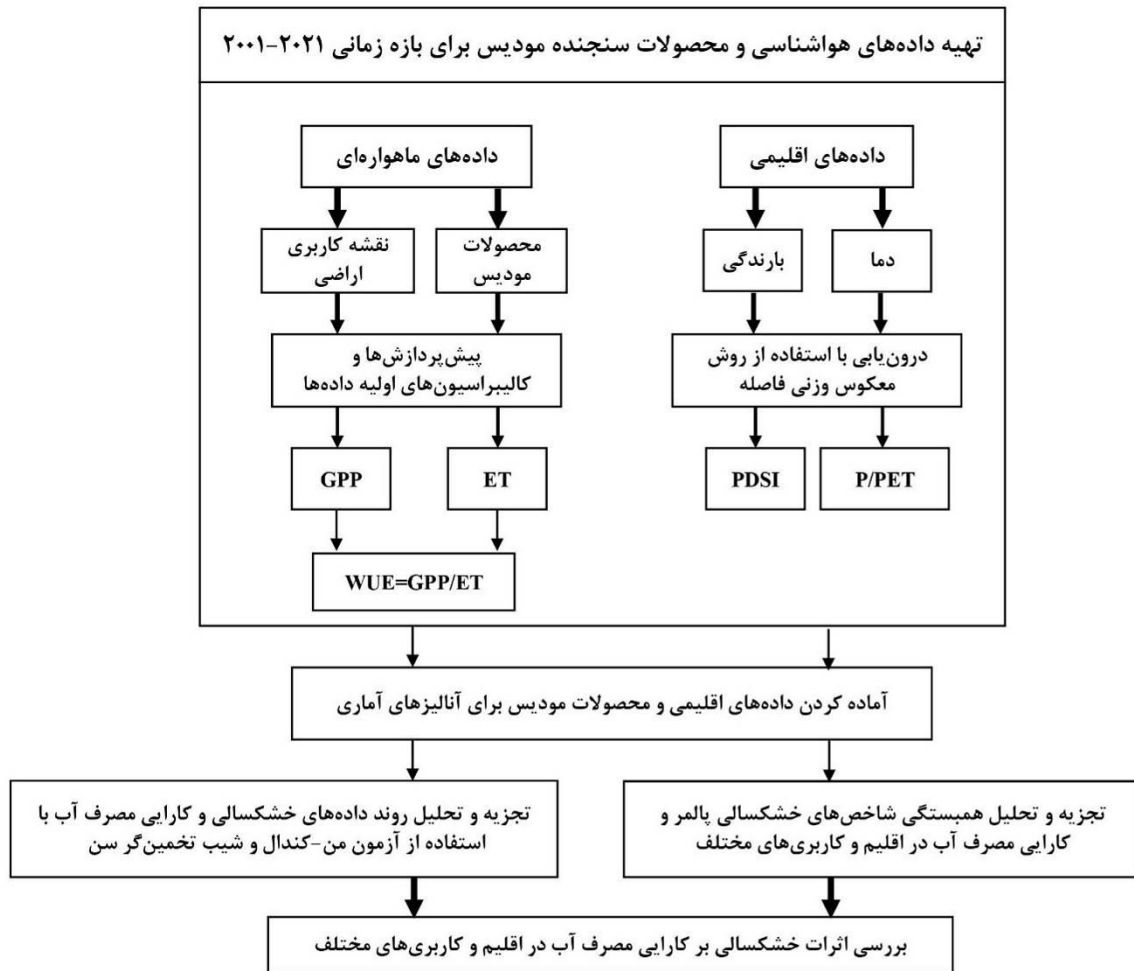
<sup>۴</sup>- Evapotranspiration

<sup>۵</sup>- Palmer Drought Severity Index

<sup>۱</sup>- Aridity Index

سپس با استفاده از روش درونیابی وزن‌دهی معکوس فاصله (Inverse distance weighting) یا همان IDW نقشه‌های مربوطه در محیط ArcGIS تهیه شد.

برای محاسبه میانگین سالانه شاخص شدت خشکسالی پالمز از داده‌های بارش و دما برای بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱ استفاده شد.



شکل ۲- شمایی کلی از فرآیند پژوهش

پس از محاسبه شاخص خشکی بر طبق جدول ۱ کلاس‌بندی انجام گرفت [۳۲] و نقشه‌های مربوطه ترسیم شد.

### شاخص خشکی AI:

شاخص خشکی (AI) به‌عنوان نسبت میانگین بارندگی سالانه (P) به میانگین تبخیر و تعرق بالقوه سالانه (PET) برای بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱ تعریف شد (رابطه ۲).

جدول ۱- دامنه عددی شاخص خشکی (AI)

شاخص خشکی	دامنه
خشک	$AI \leq 0.2$
نیمه‌خشک	$0.2 < AI \leq 0.5$
نیمه‌مرطوب	$0.5 < AI \leq 0.65$
مرطوب	$AI > 0.65$

$$AI = \frac{P}{PET} \quad (2)$$

در این مطالعه، تبخیر-تعرق از داده‌های سنجنده مودیس با کد (MOD16A2) استفاده شد که این تبخیر و تعرق از روش پنمن-مانتیث محاسبه شده است.

<sup>1</sup>- Potential Evapotranspiration

## آنالیز آماری

### بررسی روند تغییرات

روند تغییرات شاخص‌های کارایی مصرف آب، تولید ناخالص اولیه و تبخیر و تعرق در دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱ با استفاده از آنالیز ناپارامتری من‌کندال انجام شد.

### آزمون ناپارامتری من-کندال

این آزمون ابتدا توسط من [۲۶] ارائه و سپس توسط من-کندال [۱۹] بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. آزمون من-کندال برای تعیین این که آیا یک دنباله زمانی روند صعودی یا نزولی یکنواخت دارد، استفاده می‌شود.

مراحل محاسبه آماره این آزمون به شرح زیر است:

محاسبه اختلاف بین تک‌تک جملات سری با همدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر S به شرح رابطه ۳ است:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

که در آن، n طول سری زمانی،  $x_j$  و  $x_i$  داده‌های متوالی و  $\text{sgn}(x_j - x_i)$  تابع علامت بوده که به شرح رابطه ۴ قابل محاسبه است:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if}(x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{if}(x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{if}(x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

محاسبه واریانس آماره در فرمول ۵ مشاهده می‌شود:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right] \quad (5)$$

در آخر، آماره استاندارد شده یا همان Z از فرمول ۶ محاسبه می‌شود:

$$z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & \text{ifs} > 0 \\ 0, & \text{ifs} = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & \text{ifs} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

مقدار مثبت Z روند صعودی و مقدار منفی Z روند نزولی سری زمانی را نشان می‌دهد. مقدار آماره به دست آمده با مقدار قدرمطلق Z از جدول توزیع نرمال (جدول ۲) مقایسه می‌شود. در صورتی که مقدار Z بزرگتر از  $Z_{1-P/2}$  باشد، فرض صفر رد می‌شود که این مقدار از جدول ۲ به دست می‌آید [۱۱].

جدول ۲- جدول توزیع نرمال

$ Z $	سطح معنی داری
$Z = \pm 1.96$	معنی دار نیست
$Z > 1.96$	روند افزایشی و معنی دار است
$Z < -1.96$	روند کاهشی و معنی دار است

### آنالیز همبستگی بین شاخص‌های کارایی مصرف آب و خشکسالی

به منظور بررسی همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی و کارایی مصرف آب از آنالیز همبستگی استفاده شد (رابطه ۷).

$$R_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

که در آن،  $R_{x,y}$  ضریب همبستگی بین x و y است،  $x_i$  مقدار شاخص مستقل در بازه زمانی  $t_i$ ،  $y_i$  متغیرهای مستقل بازه زمانی  $t_i$  و  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  بازه زمانی (ماه، فصل یا سال) است.

ضریب همبستگی بین -۱ و ۱ تغییر می‌کند. چنانچه r مثبت باشد باشد بیانگر رابطه مستقیم کامل بین دو متغیر است به این معنی که اگر یکی از متغیرها افزایش یا کاهش یابد، دیگری نیز افزایش یا کاهش می‌یابد و زمانی که r منفی باشد یک رابطه معکوس کامل بین دو متغیر را نشان می‌دهد. یعنی اگر یک متغیر افزایش یابد متغیر دیگر کاهش می‌یابد و بالعکس [۱۲].

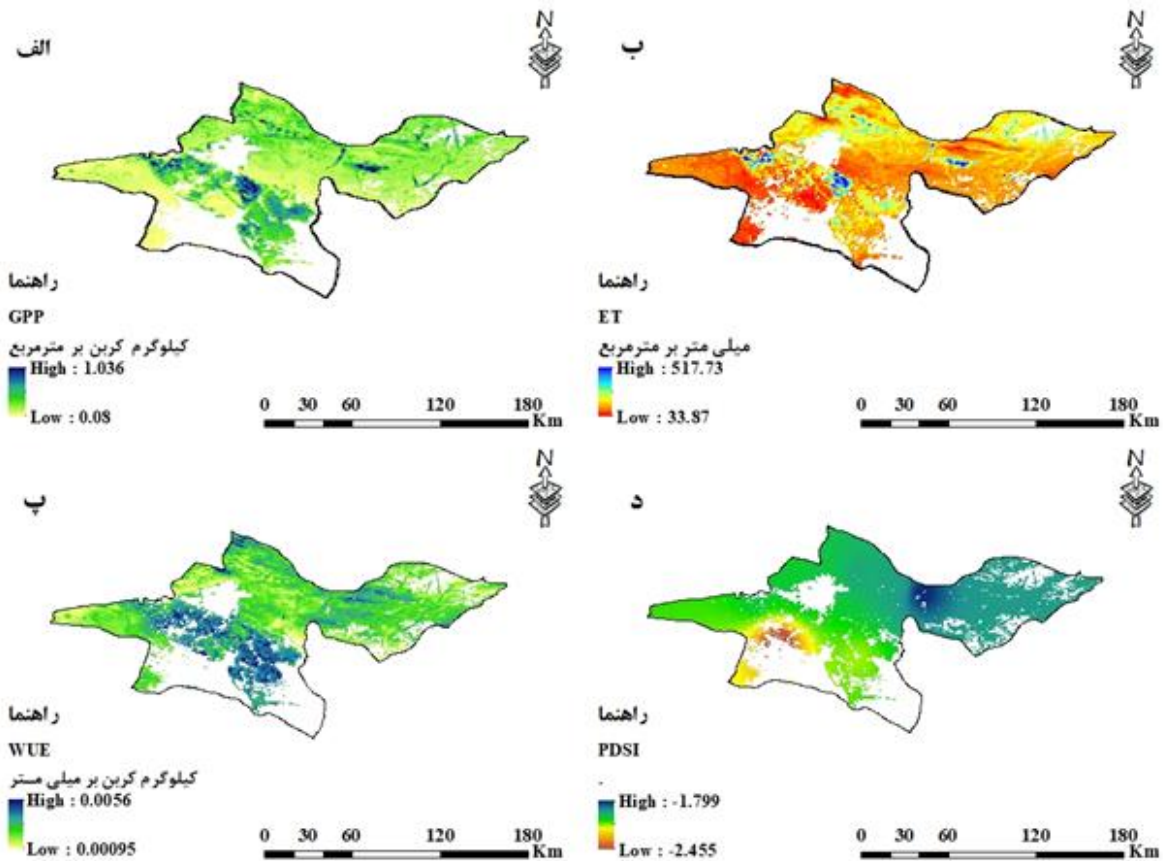
نتایج

بررسی تغییرات مکانی و زمانی WUE، ET، GPP و PDSI در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱

بررسی متوسط ۲۰ ساله شاخص‌های کارایی مصرف آب (WUE)، تولید ناخالص اولیه (GPP)، تبخیر و تعرق (ET) و خشکسالی پالمر (PDSI) در شکل ۳-الف تا د آورده شده است. بررسی این نتایج نشان داد که متوسط تولید ناخالص اولیه حدود ۰/۲۵۱ کیلوگرم کربن بر مترمربع می‌باشد، بیشترین مقدار این شاخص در قسمت‌های مرکزی و جنوب و غرب منطقه مشاهده می‌شود (شکل ۳-الف). متوسط تبخیر و تعرق حدود ۱۲۱/۰۵ میلی‌متر بر

مترمربع است که بیشترین مقدار آن به صورت پراکنده در بخش‌های مرکزی و غربی و شرق دیده می‌شود (شکل ۳-ب).

مقدار متوسط شاخص کارایی مصرف آب ۰/۰۰۲۱ کیلوگرم کربن بر میلی‌متر است و همان‌طور که در شکل ۳-پ مشاهده می‌شود بیشترین مقدار در بخش جنوب و غرب و به صورت پراکنده در بخش‌های شمال و مرکز و شرق است. شاخص خشکسالی پالمر نیز با متوسط ۱/۹۹۷- نشان‌دهنده روند منفی این شاخص در منطقه است که بیشترین مقدار آن در بخش‌های شرقی و تا حدودی مرکزی و شمالی دیده می‌شود (شکل ۳-د).



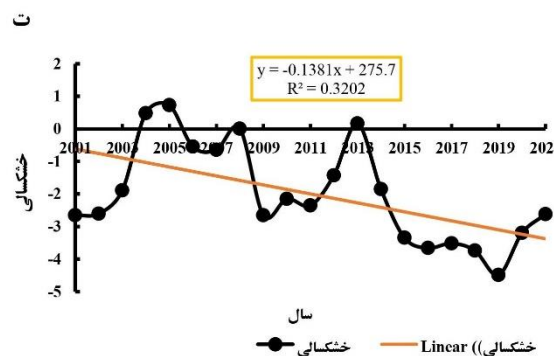
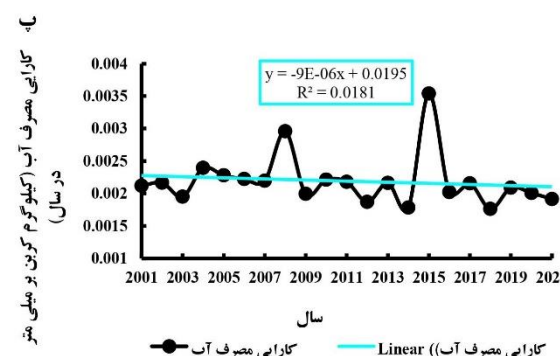
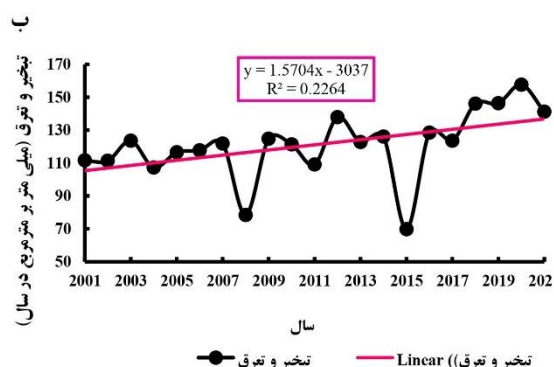
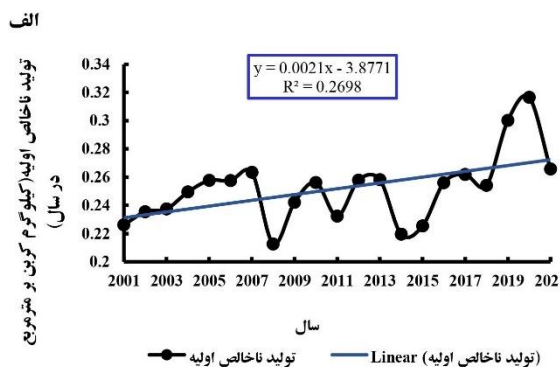
شکل ۳-الف) متوسط تولید ناخالص اولیه؛ ب) تبخیر و تعرق؛ پ) کارایی مصرف آب؛ و د) خشکسالی در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱

می‌شود (شکل ۴-ب). روند کارایی مصرف آب در این بازه ۲۰ ساله به صورت کاهشی است و بیشترین مقدار آن در سال ۲۰۱۵ و کمترین مقدار آن در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ می‌باشد (شکل ۴-پ).

روند تغییرات متوسط سالانه شاخص تولید ناخالص اولیه افزایشی بوده و بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۹ بوده است (شکل ۴-الف). روند شاخص تبخیر و تعرق نیز به صورت افزایشی بوده و کمترین مقدار آن در سال ۲۰۱۵ مشاهده

است که نشان‌دهنده افزایش خشکسالی در بازه زمانی ذکر شده است.

روند متوسط سالانه شاخص خشکسالی چنانچه در (شکل ۴-ت) مشاهده می‌شود روندی کاهشی و منفی



ادامه شکل ۴- تغییرات مکانی شاخص DSIA در منطقه مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۰

به‌طوری‌که ۸۷/۴۱ درصد از شاخص تبخیر و تعرق در منطقه افزایش و ۱۲/۵۹ درصد آن کاهش پیدا کرده است (شکل ۵-ت).

بررسی شیب تغییرات مکانی شاخص‌های WUE،

ET، GPP و PDSI در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱

بررسی کارایی مصرف آب توسط آزمون من-کندال نشان داد که ۲۳/۷۶ درصد از سطح مورد مطالعه افزایشی بوده که حدود ۳۲۰۷۷۵ هکتار از سطح استان را دربرگرفته در حالی که کاهش این شاخص ۷۶/۲۴ درصد به مساحت ۱۰۲۹۱۰۰ هکتار را شامل شده است (شکل ۵-ج). بررسی این شاخص توسط آزمون شیب تخمین‌گر سن نیز در تأیید این مقادیر نشان داد که ۷۵/۵۹ درصد از ۱۰۲۰۴۲۵ هکتار از منطقه روند کاهشی داشته در صورتی که ۲۴/۴۱ درصد از ۳۲۹۴۵۰ هکتار از منطقه مطالعاتی افزایشی بوده است (شکل ۵-چ).

بررسی شیب تغییرات شاخص‌های تولید ناخالص اولیه، تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب و خشکسالی بر اساس آزمون‌های من-کندال و شیب تخمین‌گر سن در شکل ۵ نشان داده شده است. شاخص تولید ناخالص اولیه در ۱۱۶۴۸۰۰ هکتار از منطقه ۸۶/۲۹ درصد افزایشی و در ۱۸۵۰۷۵ هکتار از منطقه ۱۳/۷۱ درصد کاهشی بوده است (شکل ۵-الف). مقادیر به‌دست آمده توسط شیب تخمین‌گر سن نشان داد که این شاخص در ۱۱۶۸۳۲۵ هکتار از منطقه ۸۶/۵۵ درصد افزایشی و ۱۳/۴۵ درصد روند کاهشی بوده است (شکل ۵-ب).

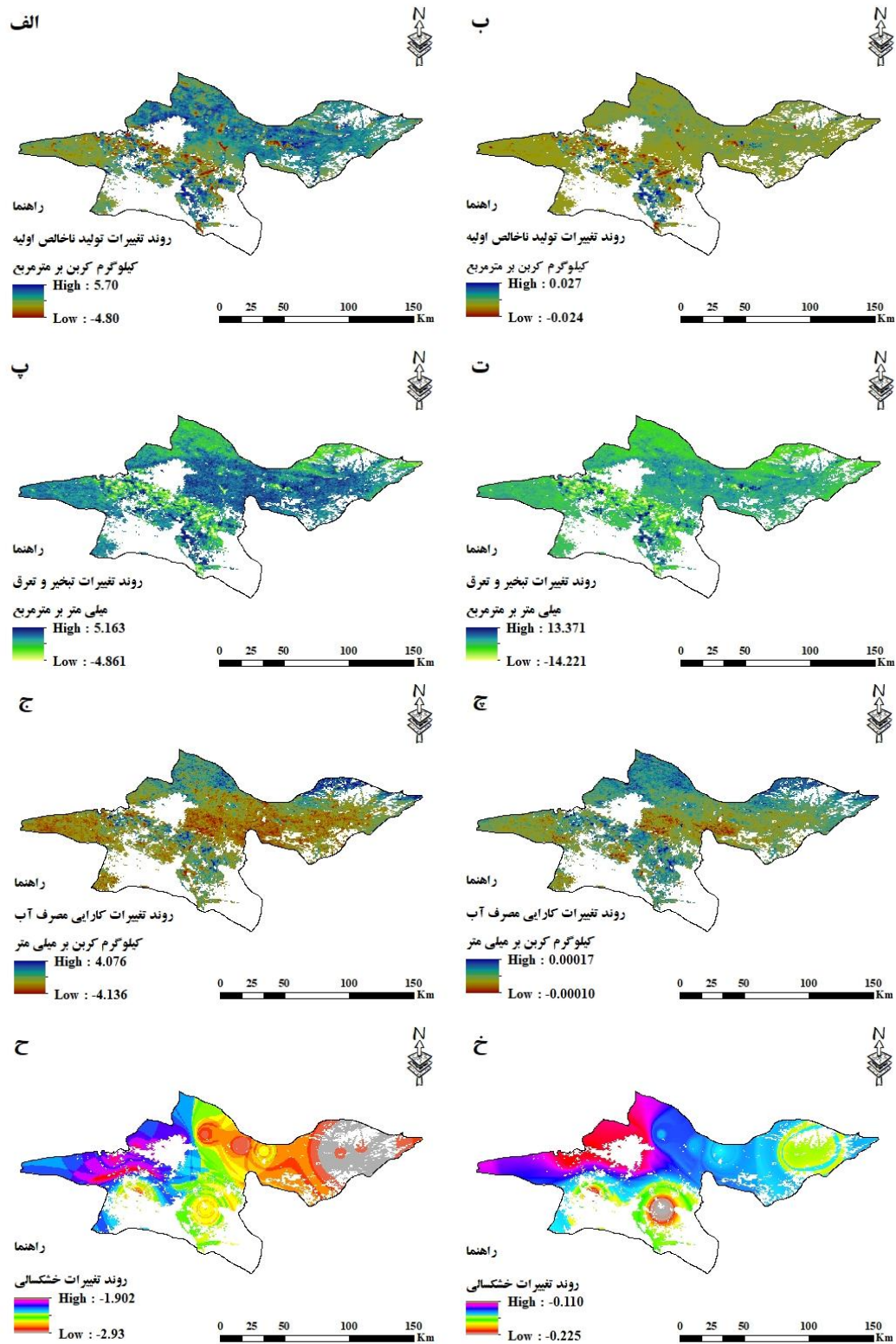
روند شیب تغییرات خشکسالی توسط آزمون من-کندال در شکل ۵-پ نشان داد که ۸۷/۱۵ درصد افزایش داشته که ۱۱۷۶۴۲۵ هکتار از منطقه را شامل می‌شود، همچنین ۱۲/۸۵ درصد از این شاخص در منطقه کاهشی بوده که ۱۷۳۴۵۰ هکتار از منطقه را دربرگرفته است. این موضوع توسط شیب تخمین‌گر سن نیز به تأیید رسید

بررسی روند تغییرات تبخیر و تعرق با آزمون من-کندال در شکل ۵-پ نشان داد که ۸۷/۱۵ درصد افزایش داشته که ۱۱۷۶۴۲۵ هکتار از منطقه را شامل می‌شود، همچنین ۱۲/۸۵ درصد از این شاخص در منطقه کاهشی بوده که ۱۷۳۴۵۰ هکتار از منطقه را دربرگرفته است. این موضوع توسط شیب تخمین‌گر سن نیز به تأیید رسید



مساحت منطقه افزایشی بوده است (شکل ۵-خ).

این روند توسط شیب تخمین‌گر سن نیز تأیید شد به‌طوری‌که ۹۱/۳۳ درصد معادل ۱۲۳۲۸۰۰ هکتار از

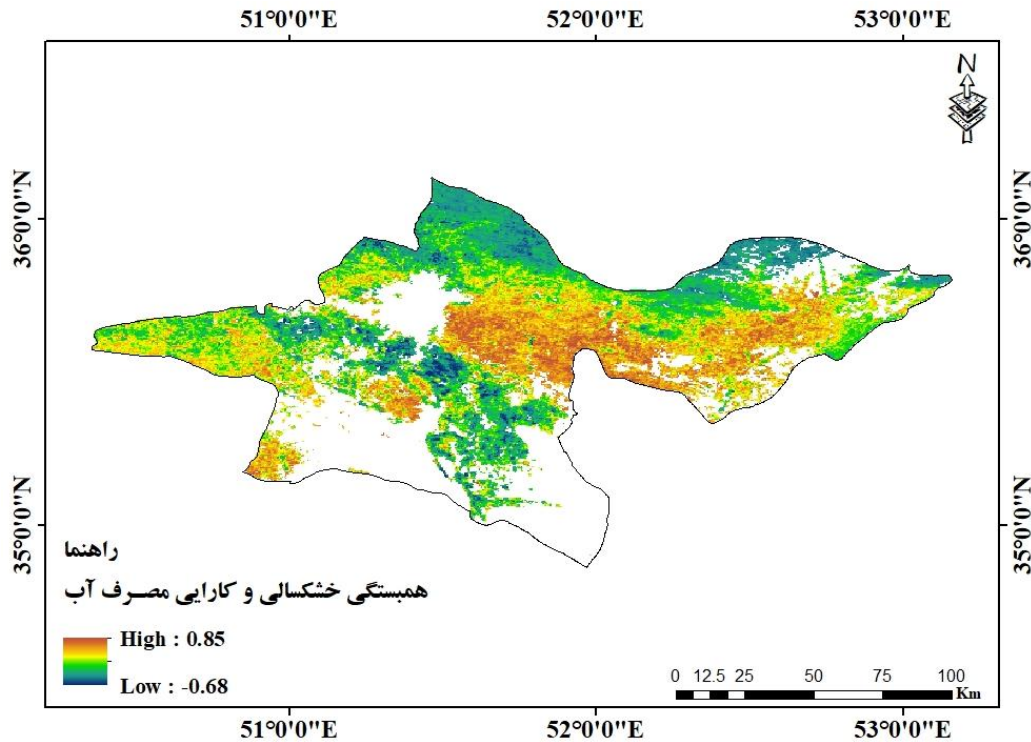


شکل ۵- الف، ب) شیب تغییرات تولید ناخالص اولیه؛ پ، ت) تبخیر و تعرق؛ ج، چ) کارایی مصرف آب؛ و، ح، خ) خشکسالی به ترتیب بر اساس آزمون‌های من-کندال و شیب تخمین‌گر سن

## همبستگی بین شاخص خشکسالی و کارایی مصرف آب

بررسی اثرگذاری خشکسالی بر شاخص کارایی مصرف آب در اقلیم‌ها و کاربری‌های مختلف در شکل ۶ آورده شده است. این بررسی نشان داد که ۵۱/۳۲ درصد از مساحت

منطقه مورد مطالعه معادل ۴۸۱۹۳۳/۹۶ هکتار دارای همبستگی منفی و ۴۸/۶۹ درصد از مساحت معادل ۴۵۷۳۰۴/۳۰ هکتار از منطقه همبستگی مثبت را نشان می‌دهد.



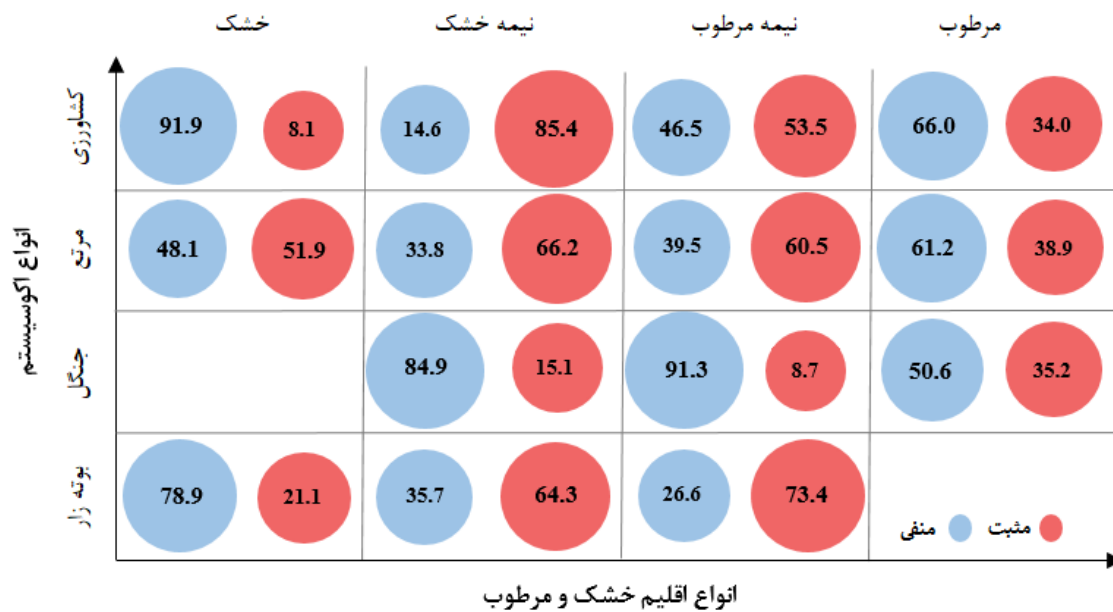
شکل ۶- همبستگی بین خشکسالی و کارایی مصرف آب

## همبستگی بین شاخص خشکسالی و کارایی مصرف بارش در اقلیم‌ها و کاربری‌های مختلف

چنانچه در شکل ۷ مشاهده می‌شود تأثیر خشکسالی بر کارایی مصرف آب در اقلیم‌ها و کاربری‌های مختلف متفاوت است که در ادامه به بررسی رابطه ذکر شده در کاربری‌های مختلف مربوط به هر اقلیم می‌پردازیم.

تأثیر خشکسالی بر کارایی مصرف آب در اقلیم خشک مربوط به کاربری اراضی کشاورزی نشان داد که ۹۱/۸۶ درصد از این رابطه منفی بوده که معادل ۲۴۵۲۵/۱۹ هکتار از منطقه می‌باشد. همچنین در اراضی بوته‌زار ۷۸/۹۳ درصد معادل ۸۵۲۶/۰۱ هکتار رابطه منفی بوده است. در صورتی که در کاربری مراتع ۵۱/۹۴ درصد از مساحت منطقه معادل ۵۳۱۵/۳۱۹ هکتار رابطه مثبت بوده است.

در اقلیم نیمه‌خشک اثرات خشکسالی بر کارایی مصرف آب در اراضی کشاورزی، مرتع و بوته‌زار نشان داد که به ترتیب در ۸۵/۳۸، ۶۶/۲۲ و ۶۴/۲۷ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه رابطه مثبت بوده و در کاربری جنگل ۸۴/۸۷ درصد رابطه منفی بوده که معادل ۱۰۰۳/۶۹ هکتار از مساحت منطقه را شامل می‌شود. در اقلیم نیمه‌مرطوب در کاربری‌های کشاورزی، مرتع و بوته‌زار ۵۳/۴۷، ۶۰/۴۸ و ۷۳/۴۱ درصد رابطه مثبت بوده که به ترتیب ۲۴۵۴/۹۴، ۹۸۷۳۵/۹ و ۱۲۱۳۹/۸ هکتار از مساحت منطقه را شامل می‌شود. در حالی که کاربری جنگل ۹۱/۳۰ درصد معادل ۱۰۲۲/۳۴ هکتار رابطه منفی داشته است. بررسی رابطه اثر خشکسالی بر کارایی مصرف آب در اقلیم مرطوب بیانگر اثرگذاری منفی خشکسالی در ۶۶/۰۴، ۶۱/۱۵ و ۵۰/۵۶ درصد از اراضی کشاورزی، مرتع و جنگل بوده است.



شکل ۷- درصد همبستگی خشکسالی و کارایی مصرف آب در انواع اقلیم و کاربری‌های اراضی

### بحث و نتیجه‌گیری

فرآیندهای تغییر اقلیم شامل افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، دما، نوسان بارندگی و افزایش مناطق تحت تأثیر خشکسالی است که همگی از عوامل مؤثر بر کارایی مصرف آب است. در نتیجه تغییر اقلیم به‌طور مستقیم تأثیر بسزایی در کارایی مصرف آب اکوسیستم دارد. بنابراین، درک کارایی استفاده از آب و فرآیندهای اصلی کنترل آن در پاسخ به تغییرات اقلیمی مفید است [۲۰].

در این مطالعه به بررسی تغییرات کارایی مصرف آب حاصل از تولیدات سنجنده مودیس شامل تولید ناخالص اولیه و تبخیر و تعرق تحت شاخص خشکسالی پالمر (PDSI) در استان تهران در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱ پرداخته شد. بدین منظور برای محاسبه تولید ناخالص اولیه از سنجنده مودیس (MOD17A2) و تبخیر و تعرق از سنجنده (MOD16A2) با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر در بازه زمانی ۸ روزه استفاده شد. نتایج نشان داد که متوسط کارایی مصرف آب در این ۲۰ سال ۰/۰۰۲۱ کیلوگرم کربن بر میلی‌متر است و بیشترین مقدار این شاخص در بخش جنوب و غرب مشاهده شده است.

بررسی روند تغییرات شاخص کارایی مصرف آب و خشکسالی توسط دو آزمون من-کندال و شیب تخمین‌گر سن نشان داد که به ترتیب این دو شاخص روندی کاهشی

و افزایشی داشته‌اند. روند کارایی مصرف آب در این مطالعه با تحقیق [۲۵] هم‌خوانی دارد. کاهش کارایی مصرف آب می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت اکوسیستم‌ها به تغییرات ناگهانی اقلیمی باشد. چنانچه در تحقیقات مختلف برای بیان تاب‌آوری اکوسیستم‌ها در برابر تغییرات و آشفتگی‌های اقلیمی رخ داده از شاخص کارایی مصرف آب استفاده کرده‌اند [۳، ۶، ۳۲].

مطالعه تغییرات کارایی مصرف آب نسبت به تغییرات اقلیمی از جمله خشکسالی نشان داد که اکوسیستم‌های مختلف پاسخ متفاوتی به تغییرات پارامترهای اقلیمی دارند. مطالعه [۲۴] در نتایج خود بیان داشت که تغییرات کارایی مصرف آب در سال‌های خشک نشان دادند که این تغییرات به عوامل متعددی از قبیل شدت و مدت تداوم خشکسالی و نوع اکوسیستم وابسته است. همچنین بررسی [۳۳] در مطالعه تغییرات کارایی مصرف آب بیان کردند که پاسخ مثبت یا منفی WUE به خشکسالی در کاربری‌های مختلف اراضی به میزان بهره‌وری، کمبود آب و میزان تبخیر و تعرق بستگی دارد. به‌طور کلی تفاوت پاسخ‌گویی اکوسیستم‌های مختلف به خشکسالی می‌تواند به علت حساسیت این مناطق به واکنش تولید ناخالص اولیه و تبخیر و تعرق به خشکسالی باشد [۷].

رابطه بین کارایی مصرف آب و خشکسالی در کاربری‌ها و اقلیم‌های مختلف متفاوت بوده است. روابط

مستند شده است که پوشش گیاهی در محیط‌های خشک ممکن است تحت تنش خشکی به سرعت به استرس آب پاسخ می‌دهد و با استفاده از استراتژی‌های فیزیولوژیکی، آناتومیکی و عملکردی از آسیب‌های مربوط به خشکسالی جلوگیری می‌کند [۳۱]. در تحقیقی دیگر بیان شده که افزایش کارایی مصرف آب منعکس‌کننده سازگاری فیزیولوژیکی پوشش گیاهی برای مقابله با خشکسالی است که با بسته‌شدن روزنه‌ها، هدایت روزنه‌ای و غلظت دی‌اکسیدکربن داخلی برگ را کاهش می‌دهد [۲۰].

با توجه به نتایج بالا می‌توان ادعان نمود که با استفاده از تحلیل بلندمدت تغییرات اقلیمی و شاخص‌های تولید و کارایی مصرف آب برآورد شده از داده‌های سنجش از دور می‌توان تغییرات پوشش گیاهی را در واحد سطح مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. همچنین مقاومت اکوسیستم در برابر خشکسالی توسط همبستگی مابین کارایی مصرف آب و خشکسالی (WUE-PDSI) مشخص می‌شود و به تنوع در ویژگی‌های بقای خشکسالی (مانند سیستم‌های ریشه دهی و طول عمر) و استراتژی‌ها (مانند رفتار روزنه‌ای) بستگی دارد.

علاوه بر تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی نیز در تغییرات کارایی مصرف آب نقش دارند. برای مثال، [۲۱] گزارش داد که افزایش کارایی مصرف آب پوشش گیاهی در چین از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ ناشی از فعالیت‌های انسانی ۶۶/۷۵ درصد و تغییرات اقلیمی ۳۳/۲۵ درصد بوده است. در نتیجه، تحقیقات بیشتر برای بررسی چگونگی تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب‌وهوایی بر کارایی مصرف آب در آینده ضروری است. همچنین پیشنهاد می‌شود عوامل مؤثر دیگر در برآورد کارایی مصرف آب مانند عوامل ادافیک، چرخه دی‌اکسیدکربن و تغییرات تابش خورشید که در این تحقیق بررسی نشده‌اند، مطالعه گردد.

منفی بین کارایی مصرف آب و خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مشاهده شده که منجر به کاهش کارایی مصرف آب شده است، در مقابل در اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب به‌علت وجود بیشتر زمین‌های زراعی با کاهش خشکسالی میزان WUE افزایش یافته است.

چنانچه در مطالعه [۳۰] رشد پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های خشک به‌علت سازگاری بیشتر با شرایط کمبود آب و حفظ افت تولید ناخالص اولیه نسبت به تبخیر و تعرق باعث افزایش کارایی مصرف آب تحت شرایط خشکسالی می‌شود و در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب به‌علت سازگاری کمتر با خشکسالی گیاهان واکنش سریعی نشان داده که منجر به افزایش تبخیر و تعرق و کاهش کارایی مصرف آب می‌شود. بنابراین تولید ناخالص اولیه در مناطق خشک و نیمه‌خشک و تبخیر و تعرق در مناطق نیمه‌مرطوب و مرطوب بر تغییرپذیری کارایی مصرف آب به خشکسالی غالب هستند. در مطالعه [۲۵] نیز بیان کردند که در اکوسیستم‌های خشک، تبخیر آب از خاک لخت، که لزوماً با بهره‌وری مرتبط نیست، تمایل به کاهش کارایی مصرف آب در مقایسه با مناطق مرطوب‌تر دارد. این نتایج با مطالعات [۳۶، ۱۶] هم‌خوانی دارد.

در تحقیقی جنگل‌ها بیشترین مقاومت را در برابر خشکسالی داشتند و پس از آن زمین‌های زراعی، علفزارها و بیابان‌ها قرار گرفتند. به نظر می‌رسد که جنگل‌ها برای رفع کمبود آب رطوبت را از لایه‌های عمیق‌تر خاک جذب می‌کنند، در حالی که علفزارها به لایه‌های کم عمق‌تر خاک محدود می‌شوند و در صورت خشکسالی، آب موجود را سریع‌تر از جنگل‌ها تخلیه می‌کنند. علاوه بر این، طول عمر طولانی‌تر به جنگل‌ها اجازه می‌دهد در برابر خشکسالی مقاومت کنند [۵، ۲۷].

تفاوت در پاسخ کارایی مصرف آب به خشکسالی و همبستگی میان این دو شاخص بین اکوسیستم‌های خشک و مرطوب بر اساس ویژگی‌های پوشش گیاهی تعیین می‌شود. در این تحقیق همبستگی‌های مثبت بیشتر در مراتع مشاهده شده و همبستگی WUE با خشکسالی در مناطق زراعی خشک و نیمه‌خشک نسبت به مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب ارتباط منفی بیشتری داشته است.

## References

- [1]. Binesh, N., Nick-Sokhan, M., & Sarang, A. (2017). Trend Detection in Tehran Temperature and Precipitation during 1984-2014. *Journal of Meteorological Organization*, 97(41), 36-45. doi: 10.30467/NIVAR.2017.45153 [in Farsi]
- [2]. Briggs, L. J., & Shantz, H. L. (1913). The water requirement of plants, in Bureau of Plant Industry Bulletin. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(12), 282-285.
- [3]. Cao, R., Hu, Z., Jiang, Z., Yang, Y., Zhao, W., Wu, G., Feng, X., Chen, R., Hao, G. (2020). Shifts in ecosystem water use efficiency on china's loess plateau caused by the interaction of climatic and biotic factors over 1985-2015. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108100. doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108100
- [4]. Cernusak, L. A. (2018). Gas exchange and water use efficiency in plant canopies. *Plant Biology*, 22(1), 52-67. doi: 10.1111/plb.12939
- [5]. Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant. *Functional plant biology*, 30(3), 239-264. doi: 10.1071/FP02076
- [6]. Cristiano, P., Villa, M. D., De Diego, M., Lacoretz, M., Madanes, N., & Goldstein, G. (2020). Carbon assimilation, water consumption and water use efficiency under different land use types in subtropical ecosystems: from native forests to pine plantations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108094. doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108094
- [7]. Eskandari Damaneh, H., jafari, R., & soltani, S. (2018). Assessment of land degradation indices obtained from remote sensing data. *Desert Management*, 5(10), 43-56. doi: 10.22034/jdmal.2018.30661 [in Farsi]
- [8]. Eskandari Damaneh, H., Eskandari Damaneh, H., Khosravi, H., & Gholami, H. (2019). Analysis and monitoring of drought using NDVI index (Case study: the west basin of Jaz Murian wetland). *Rangeland*, 13(3), 461-475. [in Farsi]
- [9]. Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Khosravi, H., Mahdavi Najafabadi, R., Khorani, A., & Li, G. (2020). Modeling Spatial and Temporal Changes in Land-Uses and Land Cover of the Urmia Lake Basin Applying Cellular Automata and Markov Chain. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(2), 57-72. doi: 10.22126/ges.2020.5303.2238
- [10]. Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khorani, A., & Li, J. (2021). Assessing the land degradation using water use efficiency (WUE) and drought indices (case study: Fars province). *Journal of Range and Watershed Managment*, 74(1), 103-120. doi: 10.22059/jrwm.2021.314310.1550 [in Farsi]
- [11]. Eskandari Damaneh, H., Eskandari Damaneh, H., Sayadi, Z., & Khorani, A. (2021). Evaluation of spatiotemporal changes and correclations of aerosol optical depth, NDVI and climatic data over Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(4), 772-786. doi: 10.22092/ijrdr.2021.125252
- [12]. Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Telfer, M. W., Comino, J. R., Collins, A. L., & Jansen, J. D. (2021). Desertification of Iran in the early twenty-first century: Assessment using climate and vegetation indices. *Scientific Reports*, 11(1), 20548.
- [13]. Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khorani, A., & Li, J. (2022). Evaluation of land degradation trend using satellite imagery and climatic data (Case study: Fars province). *Desert Ecosystem Engineering*, 8(24), 49-64. doi: 10.22052/deej.2018.7.24.35
- [14]. Frank, D., Reichstein, M., Bahn, M., Thonicke, K., Frank, D., Mahecha, M.D., Smith, P., van der Velde, M., Vicca, S., Babst, F., Beer, C., Buchmann, N., Canadell, J.G., Ciais, P., Cramer, W., Ibrom, A., Miglietta, F., Poulter, B., Rammig, A., Seneviratne, S.I., Walz, A., Wattenbach, M., Zavala, M.A., Zscheischler, J. (2015). Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. *Global Change*

- Biology*. 21(8), 2861–2880. doi: 10.1111/gcb.12916
- [15]. Gang, C., Wang, Z., Zhou, W., Chen, Y., Li, J., Chen, J., Qi, J., Odeh, I., & Groisman, P. (2016). Assessing the spatiotemporal dynamic of global grassland water use efficiency in response to climate change from 2000 to 2013. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(5), 343-354. doi: 10.1111/jac.12137.
- [16]. Guo, L., Sun, F., Liu, W., Zhang, Y., Wang, H., & Cui, H. (2019). Response of ecosystem water use efficiency to drought over China during 1982–2015: spatiotemporal variability and resilience. *Journal of Forests*, 10(7), 598. doi: org/10.3390/f10070598
- [17]. Huang, L., He, B., Han, L., Liu, J., Wang, H., & Chen, Z. (2017). A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data. *Science of the Total Environment*, 601, 1097-1107. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.084
- [18]. Huang, M., & Zhai, P. (2021). Divergent responses of ecosystem water use efficiency to drought timing over Northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, 16(4), 045016. doi: 10.1088/1748-9326/abf0d1
- [19]. Kendall, M. G. (1970). Rank Correlation Methods. U.S.A. Hassell Street Press.
- [20]. Knauer, J., Zaehle, S., Reichstein, M., Medlyn, B.E., Forkel, M., Hagemann, S., Werner, C. (2017). The response of ecosystem water-use efficiency to rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: sensitivity and large-scale biogeochemical implications. *New Phytologist*, 213(4), 1654–1666. doi: 10.1111/nph.14288
- [21]. Li, G., Chen, W., Li, R., Zhang, X., & Liu, J. (2021). Assessing the spatiotemporal dynamics of ecosystem water use efficiency across China and the response to natural and human activities. *Ecological Indicators*, 126(10), 107680. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107680.
- [22]. Li, Q., Li, H., Zhang, L., Zhang, S., & Chen, Y. (2018). Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: a meta-analysis. *Field Crops Research*, 221, 50-60. doi: 10.1016/j.fcr.2018.02.017.
- [23]. Liu, D., Yu, C., & Zhao, F. (2018). Response of the water use efficiency of natural vegetation to drought in Northeast China. *Journal of Geographical Sciences*, 28(5), 611-628.
- [24]. Liu, Y., Xiao, J., Ju, W., Zhou, Y., Wang, S., & Wu, X. (2015). Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought. *Scientific Reports*, 5, 13799. dx.doi: 10.1038/srep13799
- [25]. Luo, X., Wang, Y., & Li, Y. (2023). Responses of ecosystem water use efficiency to drought in the Lancang-Mekong River Basin. *Journal of Frontiers in Ecology and Evolution*, 11: 1203725. doi: 10.3389/fevo.2023.1203725
- [26]. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend, *Econometrica. Atmospheric and Climate Sciences*, 4(2), 245-259. dx.doi: 10.2307/1907187
- [27]. McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D.G., Yepez, E.A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New Phytologist*, 178(4), 719-739. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x
- [28]. Sun, Y., Piao, S., Huang, M., Ciais, P., Zeng, Z., & Cheng, L. (2016). Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models. *Global Ecology Biogeography*, 25(3), 311-323. doi: 10.1111/geb.12411
- [29]. Swann, S., Hoffman, Fm., Koven, C., & Randerson, J. (2016). Plant responses to increasing CO<sub>2</sub> reduce estimates of climate impacts on drought severity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(36), 10019-10024. doi: 10.1073/pnas.1604581113
- [30]. Way, D. A., Katul, G. G., Manzoni, S., & Vico, G. (2014). Increasing water use efficiency along the C3 to C4 evolutionary pathway: a stomatal optimization perspective. *Journal of Experimental Botany*, 65, 3683–3693. doi: 10.1093/jxb/eru205

- [31]. Xingming, H., Ma, H., Ding, H., Jingxiu, Q., & Zhang, Y. (2019). Response of ecosystem water use efficiency to climate change in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(9). doi: 10.1007/s10661-019-7673-z
- [32]. Xu, H., Wang, X., Zhao, C., & Zhang, X. (2019). Responses of ecosystem water use efficiency to meteorological drought under different biomes and drought magnitudes in northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107660. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107660
- [33]. Yu, Z., Wang, J., Liu, S., Rentch, J. S., Sun, P., & Lu, C. (2017). Global gross primary productivity and water use efficiency changes under drought stress. *Environmental Research Letters*, 12, 014016. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5258>
- [34]. Yuan, Z., Wang, Y., Xu, J., Wu, Z. (2021). Effects of climatic factors on the net primary productivity in the source region of Yangtze River, China. *Scientific reports*, 11(8), 41598-80494. doi: 10.1038/s41598-020-80494-9
- [35]. Zhao, A., Zhang, A., Cao, S., Feng, L., & Pei, T. (2020). Spatiotemporal patterns of water use efficiency in China and responses to multi-scale drought. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 559-570. doi: 10.1007/s00704-020-03103-9
- [36]. Zhou, Q., Luo, Y., Zhou, X., Cai, M., & Zhao, C. (2018). Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the karst area of southwestern China remote sensing approach. *Science of the Total Environment*, 645, 460-470. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.148
- [37]. Zou, J., Ding, J., Welp, M., Huang, S., & Liu, B. (2020). Using MODIS data to analyze the ecosystem water use efficiency spatial-temporal variations across Central Asia from 2000 to 2014. *Environmental Research*, 182, 108985. doi: 10.1016/j.envres.2019.108985

## Investigating the effects of drought on the water use efficiency in different climates and land uses (Case study: Tehran province) (Research Paper)

- 1- Shima Javadi, PhD in Desert Region Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Kashan, Iran.
- 2- Abolfazl Ranjbar Fordoie, Professor of Combating Desertification, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Kashan, Iran.
- 3- Hasan Khosravi\*, Associate Professor of Combating Desertification Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.  
hakhosravi@ut.ac.ir
- 4- Hadi Eskandari Damaneh, Researcher of Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

Received: 12 Oct. 2023

Accepted: 20 Jan. 2024

### Abstract

In this study, drought was investigated on water use efficiency (WUE) in different climates and uses of Tehran province. To calculate the efficiency of water consumption, the products of Gross primary production (GPP), Evapotranspiration (ET) and Palmer drought severity index (PDSI) obtained from the MODIS meter are used. Then the trend of changes in the index of primary gross production, evaporation and transpiration, water consumption efficiency and drought in the period of 2001-2021 using linearity and Mann-Kendall and slope tests, and then the response of water consumption efficiency to drought in different climates and consumptions with Use. It was evaluated from correlation analysis. By dividing annual rainfall into potential evapotranspiration (PET), the Aridity index (AI) was calculated and climate classification was done with the help of this index. The results showed that the indices of evapotranspiration, primary gross production and drought increased by 81.15, 86.86, and 99.99% respectively, and the water consumption efficiency index decreased by 76.24% in this 20-year period. Is. These results were confirmed by the slope test. Examining the relationship between the efficiency of water consumption and drought in different climates and applications showed that in dry climates, agricultural land and bushland had a negative ratio of 91.86 and 78.93, respectively, and pasture consumption had a positive ratio of 51.96. Agricultural lands, pastures and bushland related to semi-arid climate have increased by 85.38, 66.22, and 64.27 percent, respectively, and forest use has decreased by 84.87 percent. In semi-humid climate, respectively, 47.53, 60.48, 73.41% of the study area has a positive relationship in the use of agriculture, pasture and shrub land, and 91.30% of the use of forests has a negative relationship. In the climate, the negative impact of drought has been in 66.04, 61.15 and 50.56 percent of agricultural, pasture and forestry lands. In general, according to the mentioned results, drought has had a negative effect on water consumption in Tehran province, and it can be said that the resistance of the ecosystem against drought is determined by our correlation between drought index and water consumption efficiency.

**Keywords:** Drought Index, MODIS, Gross Primary Production, Evapotranspiration.