

DOI: [10.29252/ARIDBIOM.2024.21468.2008](https://doi.org/10.29252/ARIDBIOM.2024.21468.2008)

تغییرات مکانی-زمانی دو شاخص خشکسالی ماهواره‌ای و همبستگی آن‌ها با متغیرهای هیدرواقلیم و گیاهی در گستره ایران (مقاله پژوهشی)

۱- حسن مرادیان‌نسب، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲- علیرضا نفرزادگان*، استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
a.r.nafarzadegan@hormozgan.ac.ir

۳- یحیی اسماعیل‌پور، دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱

چکیده

خشکسالی یکی از فراگیرترین و پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی است که بشر با آن مواجه است. استفاده از شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور یکی از ابزارهای کارآمد جهت پیش‌بینی تغییرات مکانی-زمانی خشکسالی در مناطق وسیع دارای تنوع اقلیمی همچون کشور ایران می‌باشد. پژوهش حاضر به منظور ارزیابی مقایسه‌ای نتایج حاصل از پیش‌ماهانه وضعیت خشکسالی براساس دو شاخص مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای در فصل رشد در بازه زمانی ۲۱ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۱) در گستره ایران است. محاسبه شاخص شدت خشکسالی (DSI) و استخراج شاخص خشکسالی پالمر (PDSI) در بستر گوگل ارث انجین (GEE) انجام گردید. به علاوه، با استفاده از آزمون پیرسون، همبستگی دو متغیره بین مقادیر این دو شاخص شدت خشکسالی با متغیرهای هیدرواقلیمی شامل بارش (محصول ماهواره‌ای CHIRPS)، دما (LST سنجنده مودیس) و رطوبت خاک (محصولات GLDAS) و پوشش گیاهی (NDVI سنجنده مودیس) در هفت پهنه اقلیمی ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. توزیع مکانی طبقات مختلف خشکسالی براساس مقادیر DSI و PDSI نشان داد که در سال ۲۰۰۱ (سال خشک) به ترتیب حدود ۲۱ درصد و ۹۹ درصد گستره ایران در شرایط خشکسالی و در سال ۲۰۲۰ (سال مرطوب) به ترتیب حدود ۹۲ درصد و ۷۳ درصد کشور در شرایط ترسالی قرار داشته است. براساس تغییرات زمانی مقادیر DSI و PDSI به ترتیب ۲۵ و ۷۵ درصد ماه‌های فصل رشد در بازه زمانی ۲۱ ساله در گستره ایران، دارای وضعیت خشکسالی خفیف تا بسیار شدید (طبقات D2 تا D5) بوده‌اند. ارزیابی همبستگی دو متغیره به تفکیک هفت پهنه اقلیمی کشور نشان داد که بین مقادیر DSI و PDSI در پهنه‌های اقلیمی فراهشک، خشک، نیمه‌خشک شدید و نیمه‌خشک میانه، رابطه مستقیم معنی‌دار وجود دارد و مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه معکوس معنی‌دار و با بارش و رطوبت خاک رابطه مستقیم معنی‌دار دارند و همچنین با مقادیر NDVI دارای همبستگی مثبت قوی هستند.

واژگان کلیدی: پهنه‌های اقلیمی، تبخیر و تعرق، سنجنده مودیس، طبقات شدت خشکسالی، گوگل ارث انجین.

مقدمه

یکی از راهکارهای ضروری در راستای مدیریت اثرات و همزیستی با این پدیده، انتخاب شاخص‌های مناسب و توسعه سامانه‌های پویا و کم‌هزینه و کارآمد برای پیش‌بینی مکانی-زمانی وضعیت خشکسالی است. جهت بررسی نمونه تلاش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته است می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره نمود. زندی‌فر و همکاران [۲۵] تأثیر انواع خشکسالی‌ها بر روند تغییرات تراز آب زیرزمینی را با استفاده از شاخص‌های خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص

خشکسالی یکی از پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی است که بشر در سرتاسر جهان با آن مواجه است [۲۴]. این پدیده بر بخش‌های مختلف همچون تأمین آب، کشاورزی، انرژی، گردشگری، زیرساخت‌ها و به‌عبارت دیگر، بر کل اقتصاد کشورها تأثیر می‌گذارد [۱۷]. در ایران، وقوع مکرر خشکسالی طی دهه‌های گذشته باعث ایجاد مشکلات و مخاطرات محیطی جدی در مناطق مختلف کشور شده است [۲۰].

پاکستان، کاربرد NDVI، DSI و TVDI برای توصیف فراوانی خشکسالی را مفید دانستند. بر اساس نتایج ایشان، شاخص سالانه DSI نشان داد که پاکستان در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶ از خشکسالی و پوشش گیاهی ضعیف رنج برده است، البته از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۷، روند خشکسالی در کل منطقه به وضوح تغییر کرده و فراوانی وقایع خشکسالی روند نزولی داشته است. سرانجام، ایشان DSI و NVSWI (نسبت نرمال شده NDVI به LST) را به عنوان دو شاخص کارآمد برای پایش خشکسالی در سطوح منطقه‌ای و ملی کشور پاکستان معرفی نمودند.

Ha و همکاران [۹] برای بررسی ویژگی‌های مکانی-زمانی خشکسالی کشاورزی در منطقه سرزمین اصلی آسیای جنوب شرقی (MSEA)، مقادیر ماهانه شاخص وضعیت گیاهی (VCI) را در بستر گوگل ارث انجین (GEE) با استفاده از سری زمانی ماهانه محصول NDVI سنجنده مودیس در بازه زمانی ۲۲ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۱) استخراج و تحلیل کردند و برای ارزیابی نتایج مشاهداتی از مجموعه داده CHIRPS و محصول LST سنجنده مودیس بهره بردند. بر اساس نتایج ایشان، بیشترین تأثیر خشکسالی در بخش‌هایی از کشور میانمار ثبت گردید و بالاترین روند افزایشی خشکسالی کشاورزی در کامبوج مشاهده گردید.

Fentaw و همکاران [۸] برای پایش مکانی-زمانی خشکسالی در حوزه آبخیز تکره کشور اتیوپی، مقادیر ماهانه شاخص‌های بارش استاندارد (SPI)، وضعیت دما (TCI)، وضعیت گیاهی (VCI) و سلامت گیاهی (VHI) را در بستر گوگل ارث انجین (GEE) با استفاده از مجموعه داده CHIRPS (۲۰۲۱-۱۹۸۱) و محصولات پوشش گیاهی (NDVI) و دما (LST) سنجنده مودیس (۲۰۰۰-۲۰۲۱)، استخراج نمودند. نتایج ایشان نشان داد پوشش گیاهی در منطقه دارای روند کاهشی است و مقادیر VCI دارای همبستگی قوی با بارش و دارای همبستگی ضعیف‌تر با LST است.

در پژوهش حاضر، به منظور پایش خشکسالی در گستره ایران از دو شاخص شدت خشکسالی (DSI) و شاخص خشکسالی پالم (PDSI) استفاده شد. به طوری که مقادیر ماهانه این دو شاخص بر اساس مجموعه داده‌های

خشکسالی آب سطحی (SDI) و شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) را در محدوده مطالعاتی ماهیدشت در استان کرمانشاه مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ایشان با توجه به همبستگی ضعیف مقادیر PDSI و SDI با مقادیر GRI، عامل اصلی افت سطح آبخوان‌ها در این محدوده مطالعاتی را مدیریت ناصحیح و برداشت‌های بی‌رویه دانستند.

Zhao و همکاران [۲۷] به پایش خشکسالی در حوضه رودخانه زرد از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ با استفاده از شاخص وضعیت دما (TCI)، شاخص وضعیت گیاهی (VCI)، شاخص سلامت گیاهی (VHI) و شاخص خشکسالی دما-گیاهی (TVDI) پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که شرایط خشک در حوضه رودخانه زرد از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ پایدار بوده است و چهار شاخص خشکسالی مورد بررسی (TCI، VCI، VH، TVDI) الگوهای زمانی و مکانی نسبتاً یکسانی در سراسر منطقه مورد مطالعه را نشان دادند. با این حال، در برخی از مناطق کوچک، الگوهای زمانی و مکانی ثبت شده توسط این چهار شاخص خشکسالی، متفاوت است.

Khan و Gilani [۱۴] از شاخص شدت خشکسالی (DSI) برای بررسی خشکسالی در مقیاس جهانی بهره بردند. ایشان مقادیر DSI را با استفاده از متغیرهای تبخیر و تعرق و پوشش گیاهی مستخرج از سنجنده مودیس (MODIS) محاسبه و مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که در مقیاس قاره‌ای، استرالیا، آفریقا و آسیا بیشترین و مکررترین رویدادهای خشکسالی را دارند، در حالی که آمریکای جنوبی و شمالی در رده دوم قرار دارند.

Ali و همکاران [۳] برای پایش روند تغییرات خشکسالی در پاکستان با استفاده از داده‌های سنجنش از دور، شاخص‌های شدت خشکسالی (DSI)، نرمال شده تأمین آب گیاه (NVSWI)، وضعیت گیاهی (VCI) و نرمال شده ناهنجاری بارش (NPA) را به عنوان ابزار کار انتخاب نموده و برای محاسبه آنها از مقادیر بارش، دمای سطح زمین (LST)، نسبت تبخیر و تعرق به تبخیر و تعرق پتانسیل (ET/PET) و شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) بهره بردند. ایشان با توجه به وضعیت پوشش گیاهی و روند تغییرات قابل توجه خشکسالی در

مقادیر DSI و PDSI به ترتیب با استفاده از محصولات سنجنده مودیس (MODIS) ماهواره ترا (Terra) و مجموعه داده اقلیم و بیلان آب اقلیمی خشکی‌ها تهیه شده توسط دانشگاه آیداهو (TerraClimate) برای پهنه‌های اقلیمی ایران شامل فراخشک (A.A)، خشک (A)، نیمه خشک شدید (S.S.A)، نیمه خشک میانه (M.S.A)، نیمه خشک خفیف (H.S.A)، نیمه مرطوب (S.W)، مرطوب (W) برای ماه‌های فصل رشد (از ابتدای ماه مارس تا انتهای ماه آگوست میلادی) محاسبه و استخراج گردیدند.

منطقه مورد مطالعه

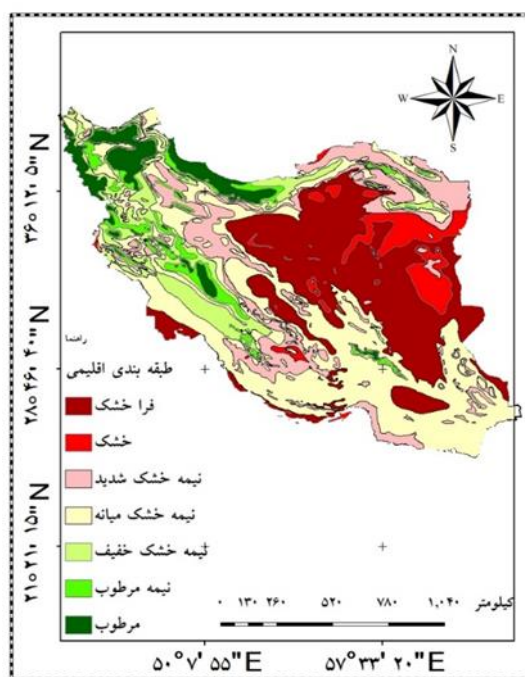
ایران در کمربند خشک و نیمه خشک جهان، بین عرض‌های جغرافیایی ۴۰-۲۵ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴-۶۵ درجه شرقی قرار دارد [۱۵].

در مطالعه حاضر، محدوده هفت پهنه اقلیمی در گستره ایران بر مبنای روش طبقه‌بندی سیلیانینف (لایه اطلاعاتی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور) در نظر گرفته شد (شکل ۱).

ماهواره‌ای برای بازه زمانی ۲۱ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۱) محاسبه و استخراج گردید. سپس روند تغییرات مکانی-زمانی وضعیت خشکسالی در کشور براساس این دو شاخص به تفکیک پهنه‌های اقلیمی مختلف کشور مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه در این مطالعه، میزان همبستگی مقادیر این دو شاخص شدت خشکسالی با همدیگر و همچنین با متغیرهای هیدرواقلیم (بارش، دمای سطح زمین و رطوب خاک) و پوشش گیاهی در کل ایران و به تفکیک پهنه‌های اقلیمی مختلف ایران مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

محاسبه و استخراج شاخص‌های خشکسالی DSI و PDSI بر اساس مجموعه داده‌های ماهواره‌ای و مقایسه مقادیر این دو شاخص با یکدیگر در زمان (۲۱ سال) و مکان (گستره ایران) با بهره‌گیری از گوگل ارث انجین (GEE) که یک بستر محاسباتی داده‌های مکانی مبتنی بر رایانش ابری است، میسر گردید.



شکل ۱- گستره مکانی هفت پهنه اقلیمی ایران مورد استفاده در مطالعه حاضر (لایه اطلاعاتی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور)

شده محاسبه شده و در مرحله آخر، مجموع مرحله قبل استاندارد می‌شود و آن مقدار، DSI نامیده می‌شود. روابط محاسبه DSI عبارتند از:

$$\text{Tran} = \frac{\text{ET}}{\text{PET}} \quad (۲)$$

که در آن، Tran نماد نسبت بین متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد. ET نماد تبخیر و تعرق و PET نماد تبخیر و تعرق پتانسیل است.

$$Z1 = \frac{\text{Tran}_i - \text{Tran}_{\text{mean}}}{\text{Tran}_{\text{sd}}} \quad (۳)$$

که در آن، Z1 نشان‌دهنده نسبت استانداردسازی برای نسبت تعرق محاسبه شده در رابطه ۳ است. Tran_i به معنای نسبت تعرق دوره ۸ روزه، $\text{Tran}_{\text{mean}}$ نماد میانگین تعرق، Tran_{sd} نماد انحراف معیار نسبت تعرق است.

$$Z2 = \frac{\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{\text{mean}}}{\text{NDVI}_{\text{sd}}} \quad (۴)$$

که در آن، Z2 نمادی از نسبت استانداردسازی برای مقادیر NDVI است. NDVI_i مقدار NDVI در هر دوره ۸ روزه را نشان می‌دهد، $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ میانگین مقدار متوسط NDVI است و NDVI_{sd} نمایانگر انحراف معیار مقادیر NDVI است.

$$Z2 + Z1 = Z \quad (۵)$$

که در آن، Z مجموع مقادیر استاندارد شده از روابط ۳ و ۴ را نشان می‌دهد.

$$\text{DSI} = \frac{Z_i - Z_{\text{mean}}}{Z_{\text{sd}}} \quad (۶)$$

که در آن، مقادیر Z نسبت استاندارد را از رابطه ۵ نشان می‌دهد. Z_i مقدار دوره مشخص شده را نشان می‌دهد، Z_{mean} نماد میانگین و Z_{sd} مقدار انحراف معیار برای مقدار Z در دوره مورد نظر را نشان می‌دهد [۱۴، ۲۴].

روش Selyaninov [۲۲] بر پایه یک ضریب هیدروترمال (HTC) بنا شده است که به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\text{HTC} = \frac{P}{0.1 \sum t} \quad (۱)$$

که در آن، P مجموع بارش (میلی‌متر) و T مجموع دماهای میانگین (t) بیشتر از ۱۰ درجه (دمای فعالیت) در طول فصل رشد است. شایان ذکر است که متقی و همکاران [۱۸]، بابائی و همکاران [۶] و Hosseini و همکاران [۱۲] نیز در مطالعات خود از این لایه اطلاعاتی استفاده نموده‌اند؛ ضمن این که از ضریب هیدروترمال ارائه‌شده توسط سیلیانینف برای بررسی خشکسالی گیاهی در بخش کشاورزی نیز استفاده می‌شود [۲، ۱۶].

بر اساس شکل ۱، گستره ایران به هفت پهنه اقلیمی شامل فراخشک (A.A)، خشک (A)، نیمه‌خشک شدید (S.S.A)، نیمه‌خشک میانه (M.S.A)، نیمه‌خشک خفیف (H.S.A)، نیمه‌مرطوب (S.W) و مرطوب (W) تقسیم شده است.

شاخص شدت خشکسالی (DSI)

شاخص شدت خشکسالی (DSI) یک شاخص ترکیبی است که متغیرهای پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق را مورد استفاده قرار می‌دهد [۲۴]. این شاخص عمدتاً برای اندازه‌گیری خشکسالی‌های هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶] و همچنین می‌تواند برای مشاهده خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد [۷]. این شاخص اولین بار توسط Mu و همکاران [۱۹] با استفاده از شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) و محصولات تبخیر و تعرق (ET و PET) سنجنده مودیس معرفی شد.

برای محاسبه این شاخص در گام اول نسبت بین تبخیر و تعرق و تبخیر و تعرق بالقوه محاسبه می‌شود. در گام دوم این نسبت استاندارد می‌شود. در گام سوم، مقادیر مستخرج از محصول NDVI سنجنده مودیس نیز استاندارد می‌شوند. در مرحله چهارم، مجموع هر دو مقدار استاندارد

هر منطقه است [۱۱]. البته به دلیل پیچیدگی مکانی و زمانی خشکسالی، ایجاد یک شاخص جهانی خشکسالی دشوار است.

نقاط قوت و محدودیت‌های PDSI و تعدادی دیگر از شاخص‌های خشکسالی توسط Keyantash و Dracup [۱۳] و همچنین Mu و همکاران [۱۹] به خوبی ارائه شده است. شایان توجه است که PDSI در ابتدا برای ارزیابی خشکسالی در اقلیم‌های نیمه‌خشک، به ویژه دشت‌های بزرگ ایالات متحده معرفی شد و بنابراین ممکن است برای برخی مناطق دیگر به خوبی کار نکند [۱۱، ۱۳].

در این مطالعه، مقادیر ماهانه PDSI در بستر گوگل ارث انجین (GEE) برای دوره رشد در یک بازه زمانی ۲۱ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۱) در گستره مکانی ایران استخراج گردید. دامنه مقادیر PDSI برای ۱۱ طبقه خشکسالی [۱۱] و دامنه معادل آن‌ها برای مقادیر DSI در جدول ۱ ارائه شده است.

مجموعه داده‌های ET و PET از ماه ژانویه ۲۰۰۱ تا انتهای ماه آگوست ۲۰۲۱ و NDVI از ماه فوریه ۲۰۰۰ تا انتهای ماه آگوست ۲۰۲۱ استخراج گردیدند؛ بنابراین در این مطالعه محاسبه و پایش مقادیر DSI از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۲۱ انجام شد. محصول تبخیر و تعرق سنجنده مودیس (MOD16A2) مبتنی بر معادله پنمن-مانتیث و دارای تفکیک زمانی ۸ روز و تفکیک مکانی ۵۰۰ متر است. قبل از محاسبه مقادیر DSI، پیش پردازشی که بر روی مجموعه داده‌ها انجام می‌شود شامل کاهش درصد ابر، حذف سایه‌ها و استخراج مقادیر میانگین ماهانه ET، PET و NDVI است.

شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)

شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) [۴، ۲۱] یکی از شاخص‌های خشکسالی پرکاربرد در سطح جهانی است که مقادیر آن نماینده‌ای از برهم کنش بارندگی و دمای هوا در

جدول ۱- طبقات وضعیت خشکسالی براساس مقادیر PDSI و DSI [۱۷]

طبقه	وضعیت	Description	مقدار DSI	مقدار PDSI
W5	تری بسیار شدید	Extremely wet	۱/۵ یا بیشتر	۴ یا بیشتر
W4	تری شدید	Very wet	۱/۲-۱/۴۹	۳-۳/۹۹
W3	تری متوسط	Moderately wet	۰/۹-۱/۱۹	۲-۲/۹۹
W2	تری خفیف	Slightly wet	۰/۶-۰/۸۹	۱-۱/۹۹
W1	تری ابتدایی	Incipient wet spell	۰/۳-۰/۵۹	۰/۵-۰/۹۹
WD	نزدیک نرمال	Near normal	۰/۲۹-۰/۰	۰/۴۹-۰/۰/۴۹
D1	خشکی ابتدایی	Incipient drought	۰/۳-۰/۵۹	۰/۵-۰/۹۹
D2	خشکی خفیف	Mild drought	۰/۶-۰/۸۹	۱-۱/۹۹
D3	خشکی متوسط	Moderate drought	۰/۹-۱/۱۹	۲-۲/۹۹
D4	خشکی شدید	Severe drought	۱/۲-۱/۴۹	۳-۳/۹۹
D5	خشکی بسیار شدید	Extreme drought	۱/۵- یا کمتر	۴- یا کمتر

(NDVI سنجنده مودیس) با سری زمانی مقادیر DSI و PDSI در کل ایران و همچنین به تفکیک هفت پهنه اقلیمی ایران با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون دو متغیره مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

بررسی همبستگی مقادیر شاخص‌های خشکسالی با متغیرهای محیطی

به منظور ارزیابی دقیق تر نتایج پایش خشکسالی، ارتباط بین سری زمانی متغیرهای هیدرواقليمی (مستخرج از محصولات ماهواره‌ای) شامل بارش (مجموعه داده CHIRPS)، دما (LST سنجنده مودیس) و رطوبت خاک (مجموعه داده GLDAS) و همچنین پوشش گیاهی

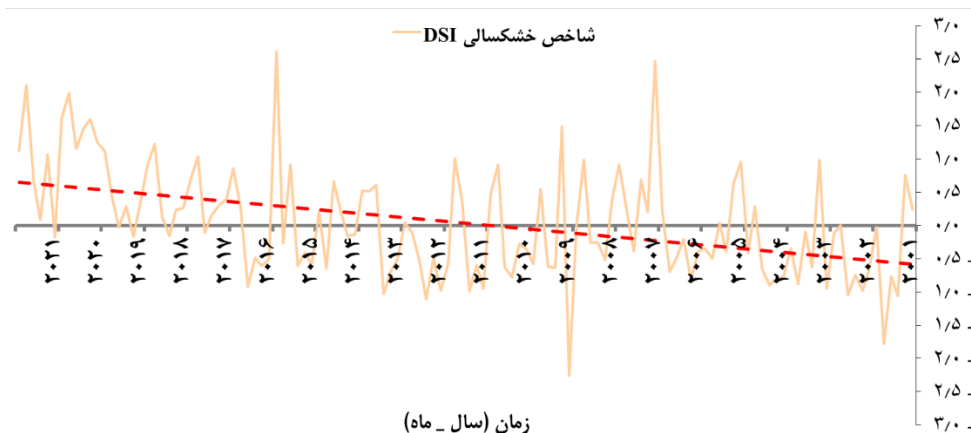
نتایج

تغییرات زمانی وضعیت خشکسالی در گستره مکانی ایران

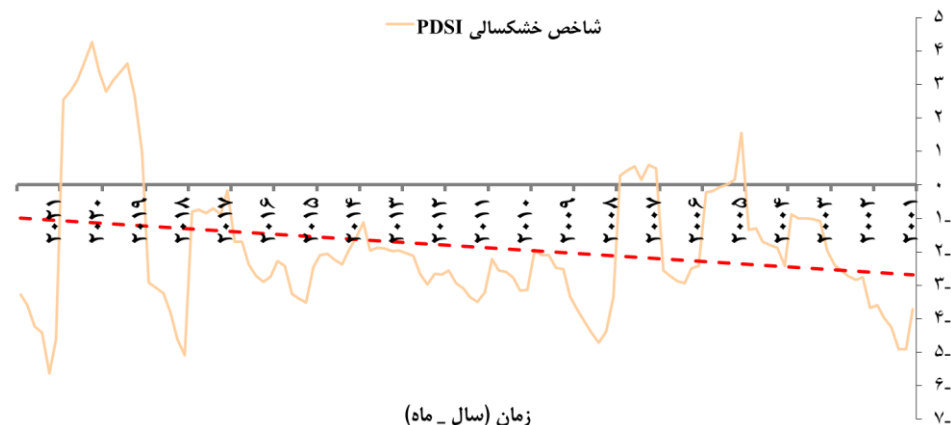
در این پژوهش، به منظور مشخص کردن دوره‌های ترسالی و خشکسالی و شدت آن‌ها در بازه زمانی ۲۱ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۱) در گستره مکانی کشور ایران از دو شاخص DSI و PDSI استفاده شد. شکل ۲ روند تغییرات میانگین مقادیر ماهانه DSI در گستره ایران را در دوره ۲۱ ساله نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که منحنی مقادیر ماهانه DSI در بعضی سال‌ها پایین‌تر از محدوده نزدیک نرمال (۰/۳، -۰/۳) و در بعضی سال‌ها بالاتر از محدوده نرمال و در اغلب سال‌ها نزدیک به محدوده نرمال بوده است به طوری که تنها در ۲۵ درصد سری زمانی ماهانه، وضعیت خشکسالی خفیف تا بسیار شدید (طبقات D2 تا D5) ثبت شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، کمترین مقادیر DSI ماهانه در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۹ رخ داده است.

همچنین با توجه به شکل ۲ می‌توان سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ را نیز جزو مرطوب‌ترین سال‌ها برای رویش گیاهی در نظر گرفت. شایان توجه است بر اساس مقادیر DSI، تمام ماه‌های فصل رشد در سال ۲۰۲۰ در طبقات بالای ترسالی (W4 و W5) قرار دارند، بنابراین بر اساس سری زمانی مقادیر DSI، می‌توان سال ۲۰۲۰ را به‌عنوان مرطوب‌ترین سال در دوره ۲۱ ساله مورد مطالعه معرفی کرد.

روند تغییرات ماهانه میانگین مقادیر PDSI در گستره ایران در فصل رشد در بازه زمانی ۲۱ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۱) در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است. بر اساس مقادیر PDSI برای بخش قابل توجهی از سری زمانی ماهانه (۷۵ درصد)، خشکسالی خفیف تا بسیار شدید (طبقات D2 تا D5) ثبت شده و قریب به اتفاق ماه‌های فصل رشد در سال ۲۰۱۹ و تمامی این ماه‌ها در سال ۲۰۲۰ دارای طبقات بالای ترسالی (W4 و W5) تشخیص داده شده‌اند (شکل ۳).



شکل ۲- روند تغییرات ماهانه میانگین مکانی مقادیر DSI در گستره ایران در فصل رشد طی دوره ۲۱ ساله



شکل ۳- روند تغییرات ماهانه میانگین مکانی مقادیر PDSI در گستره ایران در فصل رشد طی دوره ۲۱ ساله

در شرایط ترسالی و ۸۰ درصد آن نیز در تحت تأثیر طبقات مختلف خشکسالی قرار داشته است. در گستره مکانی اقلیم فراهخشک (A.A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۸ درصد، ۱۱ درصد و ۸۱ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

در اقلیم خشک (A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۶ درصد، ۱۷ درصد و ۷۷ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در گستره مکانی اقلیم نیمه‌خشک شدید (S.S.A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۶ درصد، ۱۵ درصد و ۷۹ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

در اقلیم نیمه‌خشک میانه (M.S.A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۱۲ درصد، ۱۳ درصد و ۷۵ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در گستره مکانی اقلیم نیمه‌خشک خفیف (H.S.A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۸۵ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در اقلیم نیمه‌مرطوب (S.W)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۹ درصد، ۹ درصد و ۸۲ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در نهایت، در گستره مکانی اقلیم مرطوب (W) شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۱۱ درصد، ۱۰ درصد و ۷۹ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

تغییرات مکانی وضعیتی خشکسالی در گستره ایران
محاسبه و آشکارسازی تغییرات مکانی مقادیر میانگین سالیانه DSI در گستره ایران برای دوره زمانی ۲۱ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۱) نشان داد که سطح وسیعی از مناطق دارای آمار در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۴ و ۲۰۱۲

بر اساس سری زمانی ۲۱ ساله محاسبه‌شده برای متوسط مقادیر DSI در گستره ایران (شکل ۲)، نزدیک به ۲۷ درصد دوره زمانی در شرایط نزدیک نرمال، ۳۳ درصد دوره زمانی در شرایط ترسالی و ۴۰ درصد آن نیز در تحت تأثیر طبقات مختلف خشکسالی قرار داشته است.

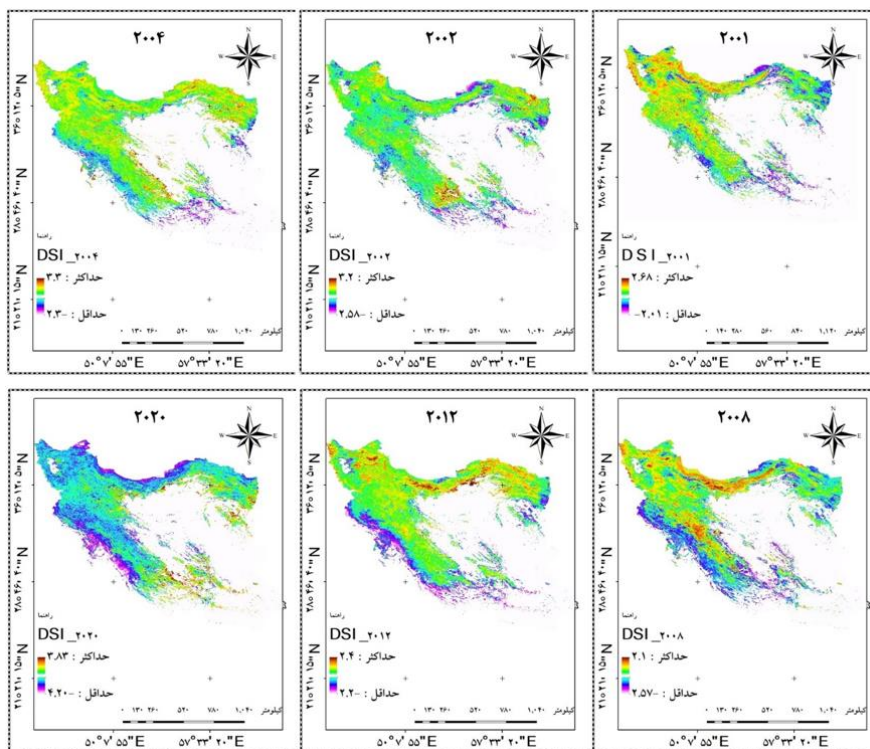
در گستره مکانی اقلیم فراهخشک (A.A)، نیمی از سری زمانی مورد بررسی در وضعیت نزدیک نرمال قرار داشته است و شرایط ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۳۳ درصد و ۱۷ درصد دوره زمانی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در گستره مکانی اقلیم خشک (A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۳۵ درصد، ۳۷ درصد و ۲۹ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در گستره مکانی اقلیم نیمه‌خشک شدید (S.S.A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۴۳ درصد، ۴۴ درصد و ۱۳ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

در اقلیم نیمه‌خشک میانه (M.S.A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۴۹ درصد، ۴۳ درصد و ۸ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در اقلیم نیمه‌خشک خفیف (H.S.A)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۵۲ درصد، ۴۴ درصد و ۴ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در گستره مکانی اقلیم نیمه‌مرطوب (S.W)، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۴۰ درصد، ۵۶ درصد و ۴ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در نهایت، در گستره مکانی اقلیم مرطوب (W) بر اساس مقادیر DSI، شرایط نزدیک نرمال و طبقات مختلف ترسالی و خشکسالی به ترتیب، ۲۰ درصد، ۷۲ درصد و ۸ درصد ماه‌های فصل رشد در دوره زمانی مورد بررسی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. به علاوه، مقادیر PDSI نیز در قالب سری زمانی ۲۱ ساله در گستره ایران استخراج گردیدند که در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس این شکل، نزدیک به ۷ درصد دوره زمانی در شرایط نزدیک نرمال، ۱۳ درصد دوره زمانی

مثبت DSI را تجربه کرده است؛ در شکل ۴ نیز واضح است که در سال ۲۰۲۰ شرایط رطوبتی بالاتری نسبت به سایر سال‌ها در دوره زمانی مورد بررسی تجربه شده است.

تحت تأثیر وضعیت‌های خشکی متوسط، شدید و بسیار شدید (طبقات D3 تا D5) بوده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده شد، بر اساس میانگین مکانی در گستره ایران، سال ۲۰۲۰ بالاترین مقدار



شکل ۴- تغییرات مکانی مقادیر DSI در گستره ایران در دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲، ۲۰۲۰).

توزیع مکانی طبقات خشکسالی در سال‌های خشک و تر

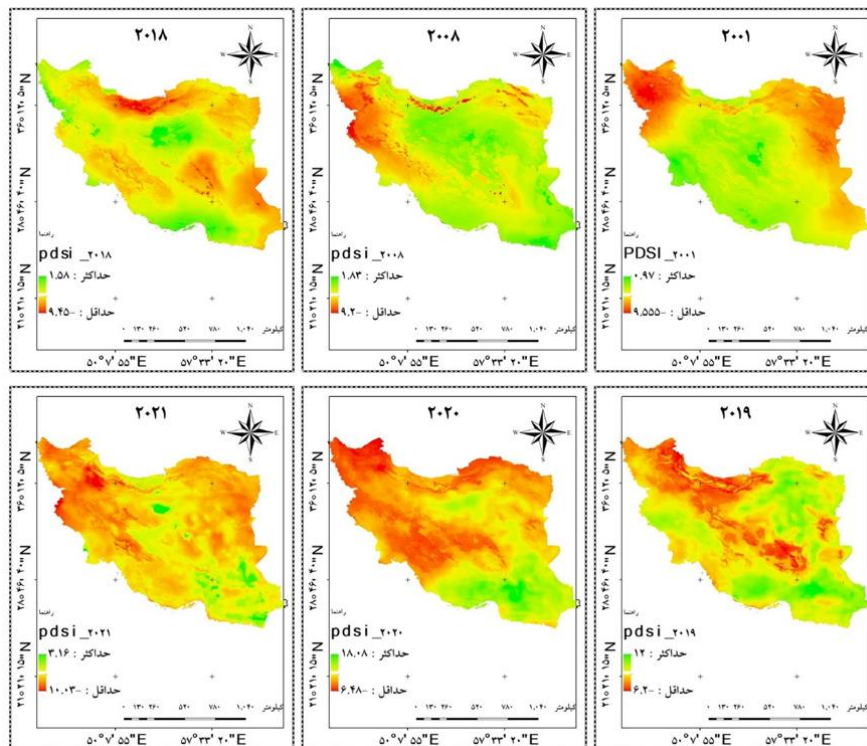
توزیع مکانی طبقات وضعیت خشکسالی طی دوره رشد در سال ۲۰۰۱ به‌عنوان سال خشک و سال ۲۰۲۰ به‌عنوان سال مرطوب با استفاده از دو شاخص DSI و PDSI در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. نمودار درصد مساحت طبقات خشکسالی بر اساس مقادیر استخراجی برای دو شاخص DSI و PDSI در گستره ایران در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۶، مقدار میانگین مکانی مقادیر DSI در سال ۲۰۰۱ (سال خشک) در گستره ایران معادل ۰/۴۴- است که منطبق با شرایط خشکسالی ابتدایی (طبقه D1) می‌باشد و کمترین مقدار DSI در گستره کشور برای این سال معادل ۲/۰۱- است که منطبق با شرایط خشکسالی بسیار شدید (طبقه D5) می‌باشد. برای سال ۲۰۲۰ (سال مرطوب) نیز میانگین مکانی مقادیر DSI در

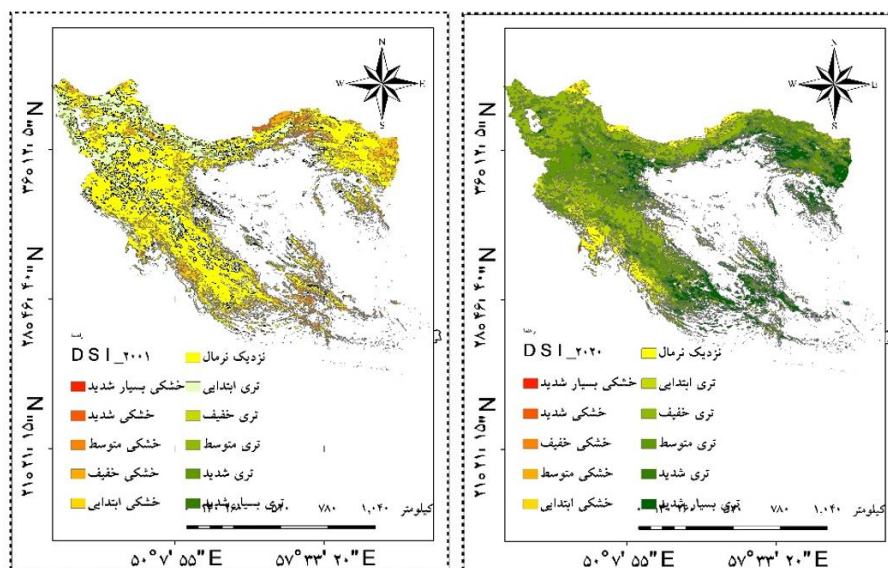
آشکارسازی تغییرات مکانی مقادیر میانگین سالیانه PDSI در گستره ایران برای دوره زمانی ۲۱ ساله نشان داد که سطح وسیعی از منطقه در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ تحت تأثیر وضعیت‌های خشکی شدید و بسیار شدید (طبقات D4 و D5) می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده شد، بر اساس میانگین مکانی در گستره ایران، سال ۲۰۲۰ بالاترین مقدار مثبت PDSI را تجربه کرده است؛ در شکل ۵ نیز واضح است که در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ میزان سبزی‌نگی و رطوبت بالایی نسبت به سایر سال‌ها در دوره زمانی مورد بررسی تجربه شده است. به‌طور کلی، مقادیر دو شاخص خشکسالی در منطقه مورد مطالعه دارای روند کلی مشابه و همچنین تفاوت‌های محلی هستند. این تفاوت‌های محلی نشان می‌دهد که کارایی هر شاخص خشکسالی در محیط طبیعی جغرافیایی و سطوح پوشش محصولات ماهواره‌ای، متفاوت خواهد بود.

برای بررسی دلیل این موضوع، بررسی‌هایی در بستر GEE انجام شد و مشخص گردید از آنجا که بعضی مناطق در گستره ایران، بر اساس محصولات ماهواره‌ای مورد استفاده در روش‌شناسی محاسبه DSI، فاقد پوشش کامل از نظر وجود مقادیر می‌باشند، بنابراین نتایج حاصل از محاسبات نتوانسته است به‌درستی وضعیت خشکسالی را در این پهنه‌ها به نمایش بگذارد.

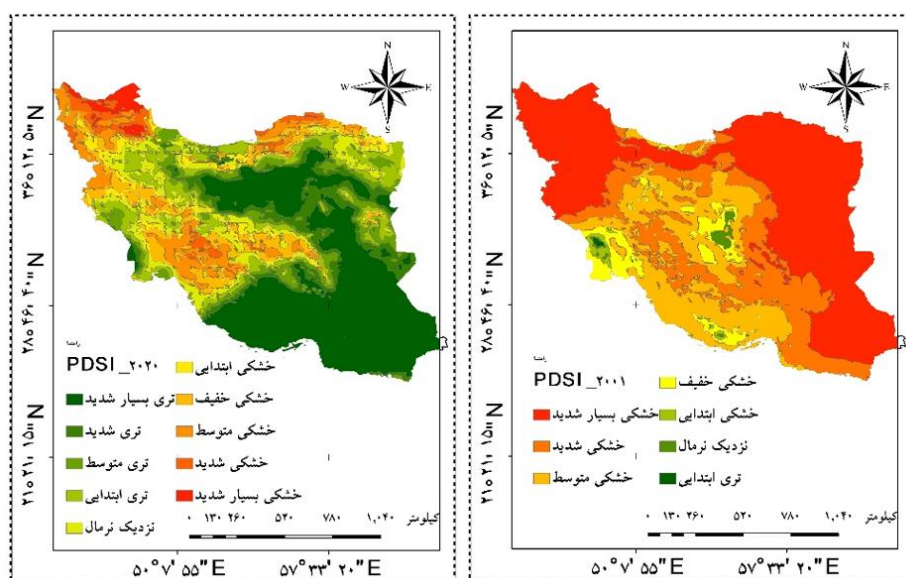
گستره ایران معادل ۱,۵۰۳ است که منطبق با شرایط ترسالی بسیار شدید (طبقه W5) می‌باشد و بیشترین مقدار DSI در گستره کشور برای سال ۲۰۲۰ معادل ۳/۸۳ است که مانند مقدار میانگین کشوری آن منطبق با شرایط ترسالی بسیار شدید (طبقه W5) می‌باشد. در اینجا شایان یادآوری است با این که سال ۲۰۰۱ یک سال خشک بوده است، عمده گستره ایران در شکل ۶ دارای وضعیت نرمال نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییرات مکانی مقادیر PDSI در گستره ایران در دوره زمانی ۲۱ ساله (۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱).



شکل ۶- گستره مکانی طبقات مختلف خشکسالی براساس مقادیر DSI در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰



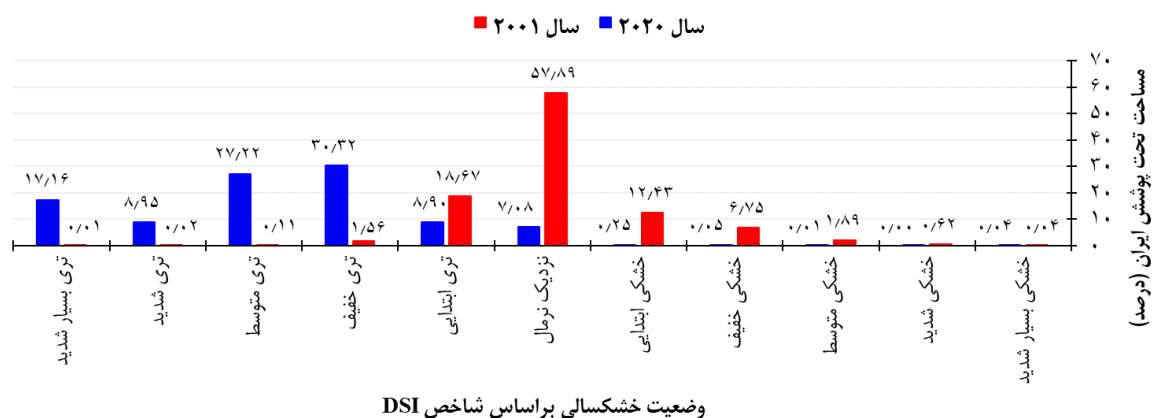
شکل ۷- گستره مکانی طبقات مختلف خشکسالی براساس مقادیر PDSI در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۱

۱۸/۰۱ است که منطبق با شرایط ترسالی بسیار شدید (طبقه W5) می‌باشد.

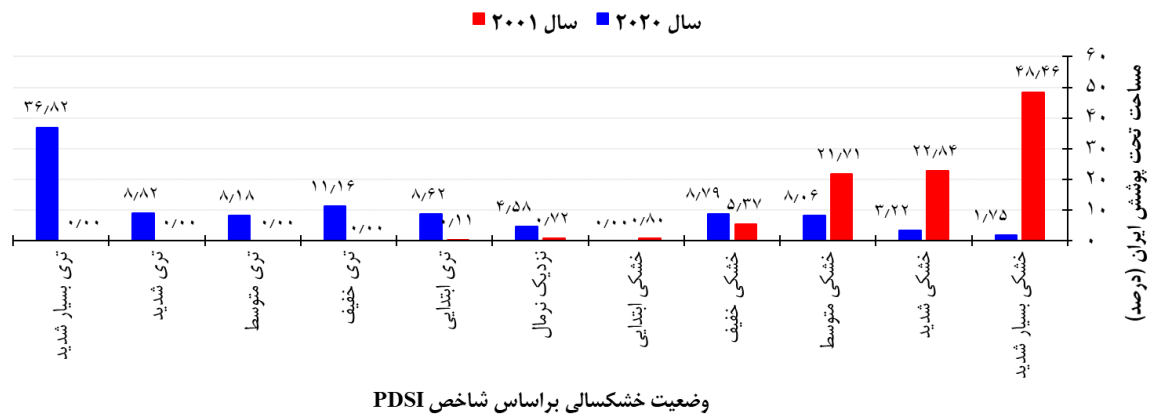
با توجه به مقادیر مساحت تحت پوشش هر طبقه خشکسالی براساس مقادیر DSI در گستره ایران (شکل ۸) در سال ۲۰۰۱ حدود ۲۱ درصد مناطق کشور در شرایط خشکی و در سال ۲۰۲۰ حدود ۹۲ درصد کشور در شرایط ترسالی قرار دارد. همچنین با توجه به شکل ۹، براساس مقادیر PDSI در سال ۲۰۰۱ حدود ۹۹ درصد منطقه در شرایط خشکسالی و در سال ۲۰۲۰ حدود ۷۳ درصد در شرایط ترسالی قرار دارد.

با توجه به شکل ۷، مقدار متوسط مکانی مقادیر PDSI در سال ۲۰۰۱ (سال خشک) در گستره ایران معادل ۴/۲۲- است که منطبق با شرایط خشکسالی بسیار شدید (طبقه D5) می‌باشد و کمترین مقدار PDSI در گستره کشور برای این سال معادل ۹/۴۸- است که مانند مقدار میانگین کشوری آن منطبق با شرایط خشکسالی بسیار شدید (طبقه D5) می‌باشد.

برای سال ۲۰۲۰ (سال مرطوب) نیز میانگین مکانی مقادیر DSI در گستره ایران معادل ۳/۳۰ است که منطبق با شرایط ترسالی شدید (طبقه W4) می‌باشد و بیشترین مقدار PDSI در گستره کشور برای سال ۲۰۲۰ معادل



شکل ۸- مساحت تحت پوشش هر طبقه خشکسالی براساس مقادیر DSI در گستره ایران در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۱



شکل ۹- مساحت تحت پوشش هر طبقه خشکسالی براساس مقادیر PDSI در گستره ایران در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰

شاخص‌های محاسبه شده خشکسالی برخوردارند، بررسی همبستگی این داده‌ها با مقادیر محاسباتی برای شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای همچون DSI و PDSI مفید به فایده خواهد بود. این نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

همچنین به منظور تجزیه و تحلیل بیشتر نتایج، ارتباط بین مجموعه داده‌های ماهواره‌ای مرتبط با بارش، دما، رطوبت خاک و پوشش گیاهی با شاخص‌های خشکسالی (PDSI و DSI) در گستره هر یک از هفت اقلیم مختلف ایران نیز استخراج گردید و در جدول ۳ ارائه گردیده است.

بررسی همبستگی شاخص‌های خشکسالی با شاخص‌های هیدرواقليمی و گیاهی

در این پژوهش به منظور ارزیابی نتایج حاصل از پایش مکانی-زمانی خشکسالی، همبستگی مقادیر دو شاخص خشکسالی مورد بررسی (PDSI و DSI) با یکدیگر و با مجموعه داده‌های ماهواره‌ای مرتبط با بارش، دما، رطوبت خاک و پوشش گیاهی در مقیاس ماهانه فصل رشد برای یک بازه زمانی ۲۱ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۱) در گستره ایران مورد بررسی قرار گرفت. به عبارت دیگر، چون محصولات ماهواره‌ای مرتبط با متغیرهای هیدرواقليمی و پوشش گیاهی معمولاً به تنهایی از وضوح زمانی و مکانی بالاتری نسبت به

جدول ۲- همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای مرتبط با بارش، دما، رطوبت خاک و پوشش گیاهی با شاخص‌های خشکسالی (PDSI و DSI) در گستره ایران طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰

شاخص‌ها و متغیرهای مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای					خشکسالی		همبستگی	شاخص
هیدرواقليم (دما، بارش و رطوبت خاک)						پیرسون	خشکسالی	
پوشش گیاهی	LST	CHIRPS	Moisture	PDSI	DSI			
NDVI	۰/۱۶	-۰/۰۶	-۰/۱۳	۰/۳۶**	۱	ضریب		
	۰/۰۷	۰/۴۹	۰/۱۵	۰		سطح معنی‌داری	DSI	
۱۲۶	۱۲۶	۱۲۵	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	تعداد		
۰/۴۰**	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۱	۱	۰/۳۶**	ضریب		
	۰/۷۹	۰/۲۳	۰/۲۵	۰		سطح معنی‌داری	PDSI	
۱۲۶	۱۲۶	۱۲۵	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	تعداد		

حرارت، بارش و رطوبت خاک ندارد. مقادیر PDSI نیز در گستره ایران همبستگی معنی‌دار (در سطح یک درصد) با شاخص پوشش گیاهی دارد.

همان‌گونه که در جدول ۲ مشخص است مقادیر DSI در گستره مکانی ایران همبستگی معنی‌دار با مقادیر PDSI (در سطح یک درصد) و شاخص پوشش گیاهی (در سطح ۵ درصد) دارد، ولی رابطه معنی‌داری با درجه

همچنین با مقادیر NDVI دارای همبستگی مثبت بسیار قوی (معنی دار در سطح یک درصد) هستند. در پهنه اقلیم نیمه خشک میانه نیز رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) بین مقادیر DSI و PDSI مشاهده گردید.

در گستره مکانی اقلیم نیمه خشک خفیف (H.S.A) مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه منفی معنی دار (در سطح یک درصد) و با بارش و رطوبت خاک رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) نشان دادند و با مقادیر NDVI دارای همبستگی مثبت بسیار قوی (معنی دار در سطح یک درصد) هستند. اما در این پهنه اقلیمی بر خلاف چهار پهنه اقلیمی فراخشک، خشک و نیمه خشک شدید و میانه، رابطه معنی دار (در سطح ۵ درصد) بین مقادیر DSI با مقادیر PDSI وجود ندارد.

با توجه به جدول ۳، در پهنه اقلیم نیمه مرطوب (S.W) مقادیر DSI فاقد رابطه معنی دار (در سطح ۵ درصد) با مقادیر درجه حرارت و بارش می باشد و تنها با رطوبت خاک رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) دارد. به علاوه، در پهنه اقلیم نیمه مرطوب نیز همانند گستره مکانی اقلیم نیمه خشک خفیف، مقادیر DSI با مقادیر NDVI همبستگی مثبت قوی (معنی دار در سطح یک درصد) دارد و با مقادیر PDSI همبستگی معنی دار ندارد.

در اقلیم مرطوب (W) بر خلاف پهنه های اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک شدید، نیمه خشک میانه و نیمه خشک خفیف، مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه مثبت (معنی دار در سطح یک درصد) و با بارش و رطوبت خاک رابطه منفی (معنی دار در سطح یک درصد) دارند.

در پهنه اقلیم مرطوب نیز همانند اقلیم های نیمه مرطوب و نیمه خشک خفیف، مقادیر DSI با مقادیر PDSI رابطه معنی دار (در سطح ۵ درصد) نشان ندادند در حالی که مانند سایر پهنه های اقلیمی مورد بررسی، در پهنه اقلیم مرطوب نیز مقادیر DSI با مقادیر NDVI همبستگی مثبت قوی (معنی دار در سطح یک درصد) دارند.

با توجه به جدول ۳ در اقلیم خشک (A) مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه منفی معنی دار (در سطح یک درصد) و با بارش و رطوبت خاک رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) دارد. در این اقلیم مقادیر DSI و NDVI دارای همبستگی مثبت بسیار قوی (معنی دار در سطح یک درصد) هستند. با این که رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) بین DSI و PDSI وجود دارد، اما مقادیر PDSI از بین متغیرهای هیدرواقليمی و پوشش گیاهی مورد بررسی، تنها با مقادیر NDVI رابطه معنی دار نشان دادند. در اقلیم فراخشک (AA) مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه منفی معنی دار (در سطح یک درصد) و با بارش و رطوبت خاک رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) نشان داده اند و همانند اقلیم خشک، PDSI رابطه معنی دار با شاخص های ماهواره ای مرتبط با درجه حرارت، بارش و رطوبت خاک در گستره اقلیم فراخشک کشور ندارد. همانند اقلیم خشک، در مناطق دارای آمار پهنه فراخشک کشور نیز مقادیر DSI و NDVI دارای همبستگی مثبت قوی (معنی دار در سطح یک درصد) هستند و بین مقادیر DSI و PDSI رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) ثبت گردید.

در گستره اقلیمی نیمه خشک شدید (S.S.A) نیز مانند پهنه های اقلیمی فراخشک و خشک، بین مقادیر DSI و PDSI رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) ثبت گردید و رابطه منفی معنی دار (در سطح یک درصد) بین مقادیر DSI و درجه حرارت و رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) بین DSI و مقادیر شاخص های ماهواره ای مرتبط با بارش و رطوبت خاک مشاهده شد. در ضمن مقادیر DSI با همبستگی مثبت بسیار قوی (معنی دار در سطح یک درصد) با مقادیر NDVI در این پهنه اقلیمی نشان دادند.

در اقلیم نیمه خشک میانه (M.S.A) نیز همانند پهنه های اقلیمی فراخشک، خشک و نیمه خشک شدید کشور، مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه منفی معنی دار (در سطح یک درصد) و با بارش و رطوبت خاک رابطه مثبت معنی دار (در سطح یک درصد) نشان دادند و

جدول ۳- همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای مرتبط با بارش، دما، رطوبت خاک و پوشش گیاهی با شاخص‌های خشکسالی (DSI) و (PDSI) در گستره هفت اقلیم مختلف ایران طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰

اقلیم	شاخص خشکسالی	همبستگی پیرسون	شاخص‌ها و متغیرهای مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای			
			خشکسالی		هیدرواقلیم (دما، بارش و رطوبت خاک)	
			DSI	PDSI	Moisture	CHIRPS
فراخشک	DSI	ضریب	۱	۰/۵۷**	۰/۶۶**	۰/۷۶**
		سطح معنی‌داری	۰	۰	۰	۰
	PDSI	تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
		ضریب	۰/۵۷**	۱	۰/۰۷	۰/۰۹
	PDSI	سطح معنی‌داری	۰	۰	۰/۴۱	۰/۳۳
		تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
خشک	DSI	ضریب	۱	۰/۵۰**	۰/۷۲**	۰/۹۹**
		سطح معنی‌داری	۰	۰	۰	۰
	PDSI	تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
		ضریب	۰/۵۰**	۱	۰/۰۷	۰/۰۴
	PDSI	سطح معنی‌داری	۰	۰	۰/۴۳	۰/۴۶
		تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
نیمه‌خشک شدید	DSI	ضریب	۱	۰/۳۷**	۰/۷۵**	۰/۹**
		سطح معنی‌داری	۰	۰	۰	۰
	PDSI	تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
		ضریب	۰/۳۷**	۱	۰/۱۱	۰/۱۲
	PDSI	سطح معنی‌داری	۰	۰	۰/۲۱	۰/۱۸
		تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
نیمه‌خشک میانه	DSI	ضریب	۱	۰/۳۴**	۰/۷**	۰/۹۸**
		سطح معنی‌داری	۰	۰	۰	۰
	PDSI	تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
		ضریب	۰/۳۴**	۱	۰/۱۴	۰/۱۳
	PDSI	سطح معنی‌داری	۰	۰	۰/۱۳	۰/۱۵۳
		تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
نیمه‌خشک خفیف	DSI	ضریب	۱	۰/۱۵	۰/۶۴**	۰/۹۹**
		سطح معنی‌داری	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰	۰/۰
	PDSI	تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
		ضریب	۰/۱۵	۱	۰/۱۳	۰/۱۴
	PDSI	سطح معنی‌داری	۰/۱۰	۰	۰/۱۴	۰/۱۱
		تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
نیمه‌مرطوب	DSI	ضریب	۱	۰/۰۸	۰/۳**	۰/۹۷**
		سطح معنی‌داری	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۰	۰/۰۷
	PDSI	تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
		ضریب	۰/۰۸	۱	۰/۱۵	۰/۱۶
	PDSI	سطح معنی‌داری	۰/۳۹	۰	۰/۱	۰/۰۸
		تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
مرطوب	DSI	ضریب	۱	-۰/۰۰۲	-۰/۲۷**	۰/۹۷**
		سطح معنی‌داری	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۰۰۲	۰/۰
	PDSI	تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
		ضریب	-۰/۰۰۲	۱	۰/۱۹*	۰/۱۶
	PDSI	سطح معنی‌داری	۰/۹۸	۰	۰/۰۲	۰/۰۳
		تعداد	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶

بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر سنجش از دور، یکی از ابزارهای کارآمد جهت پایش تغییرات مکانی-زمانی خشکسالی در مناطق وسیع دارای تنوع اقلیمی همچون کشور ایران است. در این تحقیق، دو شاخص خشکسالی DSI و PDSI به ترتیب با استفاده از محصولات سنجنده مودیس و مجموعه داده TerraClimate در مقیاس زمانی ماهانه و مقیاس مکانی گستره ایران برای دوره زمانی ۲۱ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۱) به تفکیک هفت پهنه اقلیمی کشور، محاسبه، استخراج و مقایسه گردید. به علاوه در این مطالعه، همبستگی مقادیر این دو شاخص شدت خشکسالی با متغیرهای هیدرواقلیم و پوشش گیاهی در ماه‌های فصل رشد در پهنه‌های اقلیمی مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفت.

پس از محاسبه مقادیر DSI در گستره ایران مشخص گردید که مناطق قابل توجهی عمدتاً در قسمت‌های مرکز و شرق ایران که غالباً در اقلیم فراهشک، خشک و نیمه‌خشک میانه قرار دارند، پیکسل‌های فاقد اطلاعات وجود دارد. در پژوهش حاضر، با بررسی‌هایی که در بستر گوگل ارث انجین (GEE) انجام شد مشخص گردید در ورودی‌های لازم برای محاسبه مقادیر DSI که شامل محصولات ماهواره‌ای تبخیر و تعرق (ET)، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) و NDVI بر مبنای تصاویر مودیس می‌باشند؛ در محصولات ET و PET برای مناطق مذکور، پیکسل‌های فاقد اطلاعات وجود دارد. این موضوع بیانگر این است که این شاخص کارآیی مناسبی در کل گستره ایران بویژه در پهنه‌های اقلیمی خشک و فراهشک ندارد، تا کنون مرجعی به عدم کارآیی این شاخص در گستره ایران اشاره نکرده است. به علاوه، در تحقیقات Haroon و همکاران [۱۰] در پاکستان و Angearu و همکاران [۵] در رومانی قسمت‌هایی از مناطق فاقد اطلاعات می‌باشد که در این مراجع علت آن توضیح داده نشده است که می‌تواند به همین دلیلی باشد که در بالا اشاره گردید.

از نظر زمانی، بر اساس سری مقادیر ۲۱ ساله دو شاخص شدت خشکسالی DSI و PDSI در گستره مکانی ایران، سال ۲۰۰۱ به عنوان خشک‌ترین و سال ۲۰۲۰ به عنوان مرطوب‌ترین سال در دوره ۲۱ ساله مورد مطالعه

تعیین گردید. ضمن این که بر اساس مقادیر DSI و PDSI به ترتیب، ۲۵ و ۷۵ درصد ماه‌های فصل رشد در بازه زمانی ۲۱ ساله در گستره ایران، دارای وضعیت خشکسالی خفیف تا بسیار شدید (طبقات D2 تا D5) بوده‌اند.

با بررسی خط روند این سری‌های زمانی، مشخص شد مقادیر DSI و PDSI از روند کلی مشابه بدون شیب قابل توجه (تقریباً افزایشی) تبعیت می‌کنند که می‌توان آن را در راستای نتیجه مطالعه عبداله‌ی و همکاران [۱] دانست که بعد از بررسی تغییرات زمانی وضعیت خشکسالی در ۳۹ ایستگاه سینوپتیک ایران اعلام کردند شاخص خشکسالی بارش استاندارد (SPI) در قریب به اتفاق ایستگاه‌ها روند قابل توجهی ندارد.

با استخراج سری زمانی ۲۱ ساله مقادیر دو شاخص شدت خشکسالی مورد بررسی به تفکیک هفت پهنه اقلیمی کشور، مشخص گردید بیشترین ماه‌های فصل رشد با وضعیت خشکسالی بر اساس مقادیر DSI و PDSI به ترتیب، در گستره‌های مکانی اقلیم خشک (۲۹ درصد سری زمانی) و اقلیم نیمه‌خشک خفیف (۸۱ درصد سری زمانی) اتفاق افتاده است. دلیل فراوانی کمتر ماه‌های با وضعیت خشکسالی بر اساس مقادیر DSI در بازه زمانی ۲۱ ساله می‌تواند به دلیل فراوانی پیکسل‌های فاقد اطلاعات بعد از محاسبه این شاخص در گستره ایران بویژه در پهنه‌های اقلیمی خشک و فراهشک باشد.

در رابطه با فراوانی بیشتر ماه‌های با وضعیت خشکسالی بر اساس مقادیر PDSI در پهنه اقلیمی نیمه‌خشک خفیف (H.S.A)، از آنجا که بخش مهمی از این پهنه اقلیمی در مناطق غربی کشور قرار دارد، بنابراین این نتیجه مطابق با نتیجه ترابی‌نژاد و همکاران [۲۳] است که بعد از تجزیه و تحلیل مقادیر شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد (SPEI)، فراوانی خشکسالی‌های متوسط و شدید را در مناطق غربی ایران بیشتر دانسته‌اند.

از نظر مکانی، آشکارسازی تغییرات مقادیر دو شاخص شدت خشکسالی در گستره ایران برای دوره زمانی ۲۱ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۱) نشان داد که بر اساس مقادیر DSI عمده مناطق دارای آمار در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۴ و ۲۰۱۲ تحت تأثیر وضعیت‌های خشکی متوسط، شدید و

ضمن این که Ali و همکاران [۳] برای ارزیابی شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای مانند DSI از مقادیر بارش، دمای سطح زمین، نسبت تبخیر و تعرق به تبخیر و تعرق پتانسیل (ET/PET) و شاخص پوشش گیاهی بهره بردند.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد مقادیر DSI در گستره مکانی ایران همبستگی معنی‌دار با مقادیر PDSI (در سطح یک درصد) و شاخص پوشش گیاهی (در سطح ۵ درصد) دارد، ولی رابطه معنی‌داری با درجه حرارت، بارش و رطوبت خاک ندارد. مقادیر PDSI نیز در گستره ایران همبستگی معنی‌دار با شاخص پوشش گیاهی دارد.

نتایج بررسی‌ها به تفکیک هفت پهنه اقلیمی کشور نشان داد که در پهنه‌های اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه‌خشک شدید و نیمه‌خشک میانه بین مقادیر DSI و PDSI رابطه مستقیم معنی‌دار (در سطح یک درصد) وجود دارد و مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه معکوس معنی‌دار (در سطح یک درصد) و با بارش و رطوبت خاک رابطه مستقیم معنی‌دار (در سطح یک درصد) نشان دادند و همچنین با مقادیر NDVI دارای همبستگی مثبت قوی (معنی‌دار در سطح یک درصد) هستند.

در اقلیم مرطوب بر خلاف پهنه‌های اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه‌خشک شدید، نیمه‌خشک میانه و نیمه‌خشک خفیف، مقادیر DSI با درجه حرارت رابطه مستقیم (معنی‌دار در سطح یک درصد) و با بارش و رطوبت خاک رابطه معکوس (معنی‌دار در سطح یک درصد) نشان دادند. این نتیجه اهمیت بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی و متغیرهای هیدرواقلیم را به تفکیک پهنه‌های اقلیمی مختلف آشکار می‌کند.

بسیار شدید (طبقات D3 تا D5) بوده است و بر اساس مقادیر PDSI بخش وسیعی از کشور در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ تحت تأثیر وضعیت‌های خشکی شدید و بسیار شدید (طبقات D4 و D5) بوده است. ضمن این که بالاترین مقادیر مثبت DSI و PDSI در سال ۲۰۲۰ ثبت شده است که وضعیت ترسالی حکمفرما بوده است.

بررسی توزیع مکانی طبقات مختلف شدت خشکسالی براساس مقادیر DSI و PDSI نشان داد که در سال ۲۰۰۱ (سال خشک) به ترتیب حدود ۲۱ درصد و ۹۹ درصد گستره ایران در شرایط خشکسالی و در سال ۲۰۲۰ (سال مرطوب) به ترتیب حدود ۹۲ درصد و ۷۳ درصد کشور در شرایط ترسالی قرار داشته است.

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از پایش مکانی-زمانی خشکسالی، همبستگی مقادیر دو شاخص خشکسالی مورد بررسی (DSI و PDSI) با یکدیگر و با مجموعه داده‌های ماهواره‌ای مرتبط با بارش، دما، رطوبت خاک و پوشش گیاهی در مقیاس ماهانه فصل رشد برای دوره زمانی ۲۱ ساله در گستره ایران و همچنین به تفکیک هفت پهنه اقلیمی کشور، استخراج شد. Mu و همکاران [۱۹]، PDSI را اولین شاخص خشکسالی جامع دانسته‌اند که با استفاده از اطلاعات بارش، دما و رطوبت خاک محاسبه و به طور گسترده برای تشخیص خشکسالی کشاورزی استفاده می‌شود.

Zhao و همکاران [۲۷] نیز از چنین داده‌هایی برای اعتبارسنجی شاخص‌های خشکسالی (VHI، VCI، TCI)، TVDI) برای نظارت بر شرایط خشکسالی در حوضه رودخانه زرد چین استفاده کردند که در پژوهش حاضر از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) نیز بهره گرفته شد.

References

- [1]. Abdollahi, S., Bazrafshan, O., & Shekari, M. (2022). Trend Analysis of Drought Characteristics in Iran Using Univariate and Multivariate Indices. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 334-353. doi: 10.22125/iwe.2022.150751 [in Farsi]
- [2]. Akimov, L. M. (2013). Space-time patterns of atmospheric droughts in Voronezh oblast

- during growing period. *Arid ecosystems*, 3(2), 65-70. doi: 10.1134/S2079096113020029
- [3]. Ali, S., Basit, A., Ni, J., Manzoor, Khan, F. U., Sajid, M., Umair, M., & Makanda, T. A. (2023). Impact assessment of drought monitoring events and vegetation dynamics based on multi-satellite remote sensing data over Pakistan. *Environmental science and pollution research international*, 30(5),

- 12223–12234. doi: 10.1007/s11356-022-22995-w
- [4]. Alley, W. M. (1984). The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(7), 1100-1109. doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2
- [5]. Angearu, C. V., Ontel, I., Boldeanu, G., Mihailescu, D., Nertan, A., Craciunescu, V., ... & Irimescu, A. (2020). Multi-temporal analysis and trends of the drought based on MODIS data in agricultural areas, Romania. *Remote Sensing*, 12(23), 3940. doi: 10.3390/rs12233940
- [6]. Babaei, F., Vaezi, A., Teheri, M., Zarrinabadi, E., & Eslami, S. F. (2015). Development a regression relationship between rainfed wheat yield and soil properties in a semiarid region, Zanjan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(4), 715-725. doi: 10.22059/IJSWR.2015.56795 [in Farsi]
- [7]. Elhag, K. M., & Zhang, W. (2018). Monitoring and assessment of drought focused on its impact on sorghum yield over Sudan by using meteorological drought indices for the period 2001–2011. *Remote Sensing*, 10(8), 1231. doi: 10.3390/rs10081231
- [8]. Fentaw, A. E., Yimer, A. A., & Zeleke, G. A. (2023). Monitoring spatio-temporal drought dynamics using multiple indices in the dry land of the upper Tekeze Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 13, 100781. doi: 10.1016/j.envc.2023.100781
- [9]. Ha, T. V., Uereyen, S., & Kuenzer, C. (2023). Agricultural drought conditions over mainland Southeast Asia: Spatiotemporal characteristics revealed from MODIS-based vegetation time-series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 121, 103378. doi: 10.1016/j.jag.2023.103378
- [10]. Haroon, M. A., Zhang, J., & Yao, F. (2016). Drought monitoring and performance evaluation of MODIS-based drought severity index (DSI) over Pakistan. *Natural Hazards*, 84, 1349-1366. doi: 10.1007/s11069-016-2490-y
- [11]. Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166. doi: 10.1175/1520-0477-83.8.1149
- [12]. Hosseini, A. S., Zare, M., & Mokhtari, M. H. (2019). Estimating the potential evapotranspiration (PET) using satellite imagery in arid lands. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 18(9), 1995-2008.
- [13]. Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167-1180. doi: 10.1175/1520-0477-83.8.1167
- [14]. Khan, R., & Gilani, H. (2021). Global drought monitoring with drought severity index (DSI) using Google Earth Engine. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1), 411-427. doi: 10.1007/s00704-021-03715-9
- [15]. Kheyri, R., Mojarrad, F., Masompour, J., & Farhadi, B. (2021). Evaluation of drought changes in Iran using SPEI and SC-PDSI. *The Journal of Spatial Planning*, 25(1), 143-174. doi: 20.1001.1.16059689.1400.25.1.6.1 [in Farsi]
- [16]. Melkonyan, A. (2014). Environmental and socio-economic vulnerability of agricultural sector in Armenia. *Science of the Total Environment*, 488, 333-342. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.126
- [17]. Meza, I., Siebert, S., Döll, P., Kusche, J., Herbert, C., Eyshi Rezaei, E., ... & Hagenlocher, M. (2020). Global-scale drought risk assessment for agricultural systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 695-712. doi: 10.5194/nhess-20-695-2020
- [18]. Mottaghi, S., Akbari, G. A., Minbashi, M., Allahdadi, I., Zand, E., & Lotfifar, O. (2012). The study of dispersal of english title dominant grass weeds of irrigated wheat fields of Iran and determine the effective environmental factors. *Plant Production Technology*, 11(2), 13-24. [in Farsi]
- [19]. Mu, Q., Zhao, M., Kimball, J. S., McDowell, N. G., & Running, S. W. (2013). A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(1), 83-98. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00213.1

- [20]. Nafarzadegan, A. R., Ebrahimi-Khusfi, Z., & Kazemi, M. (2021). Spatial characterization of dust emission prone arid regions using feature extraction and predictive algorithms. *Applied Geography*, 133, 102495. doi: 10.1016/j.apgeog.2021.102495
- [21]. Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought, Research Paper No. 45: US Weather Bureau. *Office of Climatology, US Weather Bureau, Washington DC*.
- [22]. Selyaninov, G. T. (1928). On agricultural climate valuation. *Proc. Agric. Meteor*, 20, 165-177.
- [23]. Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2023). Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Water and Soil*, 37(3), 473-486. doi: 10.22067/JSW.2023.81322.1257 [in Farsi]
- [24]. Wang, K., Li, T., & Wei, J. (2019). Exploring drought conditions in the three river headwaters region from 2002 to 2011 using multiple drought indices. *Water*, 11(2), 190. doi: 10.3390/w11020190
- [25]. Zandifar, S., Jalili, A., Saieedifar, Z., & Naeimi, M. (2022). Assessing drought and human interface on reducing groundwater reserves. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 20(1), 199–218. doi: 10.22092/ijfrpr.2022.356091.1513 [in Farsi]
- [26]. Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19, 333-349. doi: 10.1139/a11-013
- [27]. Zhao, X., Xia, H., Pan, L., Song, H., Niu, W., Wang, R., ... & Qin, Y. (2021). Drought monitoring over Yellow River basin from 2003–2019 using reconstructed MODIS land surface temperature in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 3748. doi: 10.3390/rs13183748

Spatiotemporal changes of two satellite-based drought indices and their correlations with hydroclimate and vegetation variables across Iran (Research Paper)

1- Hasan Moradyannasab, M.Sc. Graduate of Watershed Sciences and Engineering, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2- Ali Reza Nafarzadegan*, Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

a.r.nafarzadegan@hormozgan.ac.ir

3- Yahya Esmailpour, Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

Received: 16 Jan. 2024

Accepted: 01 Mar. 2024

Abstract

Drought is one of the most widespread and costly natural disasters that mankind is facing. The use of remote sensing-based indices is one of the efficient tools for monitoring the spatiotemporal changes of drought in vast regions with climate diversity such as Iran. The purpose of this research is to compare the results of the monthly monitoring of the drought condition based on two satellite-based indices in the growing season over a period of 21 years (2001-2021) across Iran. The drought severity index (DSI) computation and the Palmer drought severity index (PDSI) extraction was carried out through the Google Earth Engine (GEE) platform. In addition, the bivariate correlation (Pearson Test) of the values of these two indices of drought severity with hydroclimate variables including precipitation (CHIRPS satellite product), temperature (MODIS LST), and soil moisture (GLDAS products) as well as vegetation cover (MODIS NDVI) was assessed in seven different climate zones of Iran. The spatial distribution of the different categories of drought severity based on the values of DSI and PDSI showed that in 2001 (dry year) about 21% and 99% of the area of Iran was affected by drought and in 2020 (wet year) about 92% and 73% of the country was affected by wet conditions. Based on the temporal variations of DSI and PDSI values, mild to extreme drought conditions (categories D2 to D5) prevailed in 25% and 75% of the months of the growing season in the 21-year period across Iran. Examination of the bivariate correlation across each of the seven climate zones showed that there is a significant direct relationship between DSI and PDSI values in the absolute arid, arid, slightly semi-arid, and moderately semi-arid climate zones and that the DSI values have a significant inverse relationship with temperature and a significant direct relationship with rainfall and soil moisture as well as a strong positive correlation with the NDVI values.

Keywords: Climate zones, Drought severity categories, Evapotranspiration, Google Earth Engine, MODIS sensor.