




Evaluation of drought recovery duration in different land uses and climates of Iran using remote sensing

Amin Fathi Taperasht ^{✉1}, **Milad Fardadi Shilsar**²

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: amin_fathi@modares.ac.ir

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: milad_fardadi@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: May. 17, 2022</p> <p>Revised: Aug. 8, 2022</p> <p>Accepted: Aug. 24, 2022</p> <p>Published online: Sep. 23, 2022</p> <p>Keywords: Drought Recovery, Vegetation Health Index, Gross Primary Productivity, Climate Classification, Iran.</p>	<p>Drought is one of the most harmful natural disasters that affects the plants yield and terrestrial ecosystems and causes significant damage. The severity of drought and duration of drought recovery (the time required for plant to return to normal conditions, after the end of drought) are vital parameters for better drought management. This article assesses and investigates the length of drought recovery period in different land uses and climates of Iran. For this purpose, climate classification was done using the De Martonne method, and agricultural drought was monitored using the Vegetation Health Index (VHI) from 2000 to 2020 for cropland, forest, grassland, and shrubland uses. Years of 2000, 2001, and 2008 were selected as drought periods. Furthermore, using gross primary productivity (GPP), the length of drought recovery period was acquired. The results showed that the average duration of drought recovery period varies from about 34 days in the forest to 81 days in the shrubland. The rapid recovery of forests after the drought is due to their deep roots. In general, the shrubland and cropland classes had a more prolonged recovery period than the other classes, and the forest class had the shortest recovery period, which indicates the high resilience of the forest and the low resilience of the cropland and shrubland classes. Also, the results revealed that the average length of the recovery period varies from about 20 days in humid climates to 80 days in arid climates, which indicates that the conditions for drought recovery in humid climate are better than that in arid climates. In general, the drought recovery period becomes longer as one moves from a very humid climate to a dry climate.</p>
<p>Cite this article: Fathi Taperasht, A., & Fardadi Shilsar, M. (2022) Evaluation of drought recovery duration in different land uses and climates of Iran using remote sensing. <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 53 (7), 1659-1672.</p> <p>© The Author(s). DOI: http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343240.669271</p>	<p>Publisher: University of Tehran Press.</p> 

ارزیابی مدت زمان بازیابی خشکسالی در کاربری‌ها و اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از سنجش از دور

امین فتحی تپهرشت^{۱*}، میلاد فردادی شیل سر^۲۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. ایمیل: amin_fathi@modares.ac.ir۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران. ایمیل: milad_fardadi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۷/۱

واژه‌های کلیدی:

بازیابی خشکسالی،

شاخص سلامت گیاهی،

بهره‌وری ناخالص اولیه،

طبقه‌بندی اقلیم،

ایران.

خشکسالی یکی از زیان‌بارترین بلایای طبیعی است که در عملکرد گیاهان و اکوسیستم‌های زمینی تأثیر می‌گذارد و باعث به‌وجود آمدن آسیب‌های قابل توجهی می‌شود. شدت خشکسالی و طول دوره بازیابی خشکسالی (مدت زمانی که پس از اتمام خشکسالی طول می‌کشد که عملکرد گیاهان به شرایط نرمال برگردد) پارامترهای بسیار مهمی برای مدیریت بهتر خشکسالی هستند. این مقاله به ارزیابی و بررسی طول دوره بازیابی خشکسالی در کاربری‌ها و اقلیم‌های مختلف ایران پرداخته است. به این منظور، طبقه‌بندی اقلیمی با استفاده از روش دومارتن انجام و با استفاده از شاخص سلامت گیاهی (VHI) خشکسالی کشاورزی در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در کاربری‌های کشاورزی، جنگل، مرتع و درختچه‌زار پایش شد. علاوه بر این، سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ به عنوان دوره‌های خشکسالی انتخاب شدند. همچنین با استفاده از بهره‌وری ناخالص اولیه (GPP) طول دوره بازیابی خشکسالی به دست آمد. نتایج نشان داد که میانگین طول دوره بازیابی خشکسالی از حدود ۳۴ روز در جنگل تا ۸۱ روز در درختچه‌زار متغیر است و بازیابی سریع جنگل‌ها پس از خشکسالی به دلیل ریشه عمیق آن‌ها است. بطور کلی کاربری‌های درختچه‌زار و کشاورزی دوره بازیابی طولانی‌تری نسبت به سایر کاربری‌ها داشته و کاربری جنگل کوتاه‌ترین دوره بازیابی را داشت، که انعطاف‌پذیری بالای جنگل و انعطاف‌پذیری پایین کشاورزی و درختچه‌زار را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که میانه طول دوره بازیابی از حدود ۲۰ روز در اقلیم‌های مرطوب تا ۸۰ روز در اقلیم‌های خشک متغیر است که نشان‌دهنده این است که شرایط برای بازیابی خشکسالی در اقلیم‌های مرطوب‌تر نسبت به اقلیم‌های خشک‌تر مهیاتر است. بطور کلی با پیشروی از اقلیم بسیار مرطوب به اقلیم خشک، دوره بازیابی خشکسالی طولانی‌تر می‌شود.

استناد: فتحی تپهرشت، امین؛ فردادی شیل سر، میلاد (۱۴۰۱). ارزیابی مدت زمان بازیابی خشکسالی در کاربری‌ها و اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از سنجش از دور.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۷)، ۱۶۷۲-۱۶۵۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343240.669271>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

خشکسالی یک پدیده طبیعی، پیچیده و مخرب است که نشان‌دهنده‌ی کمبود آب نسبت به شرایط نرمال است (West et al., 2019; Zhu et al., 2019). این پدیده تأثیرات قابل توجهی بر زندگی انسان، منابع آب و عملکرد محصولات کشاورزی دارد (Attrill and Power, 2000; Tran et al., 2017; Wu et al., 2020). خشکسالی به چهار نوع خشکسالی هواشناسی، خشکسالی کشاورزی، خشکسالی هیدرولوژیکی و خشکسالی اقتصادی-اجتماعی تقسیم می‌شود (Gittins et al., 2021; Van Loon and Laaha, 2015). پایش خشکسالی کشاورزی به دلیل اینکه باعث کاهش عملکرد گیاهان می‌شود، امنیت غذایی را تهدید می‌کند و منجر به زیان‌های اقتصادی به ویژه در کشورهای در حال توسعه می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است (Godfray et al., 2010). با تغییر اقلیم رویدادهای خشکسالی شدیدتر و پرتکرار می‌شوند. بنابراین پایش موثر خشکسالی کشاورزی برای کاهش خسارات و مدیریت آن بسیار حیاتی است (West et al., 2019). در همین زمینه، داده‌های سنجش از دور به عنوان ابزاری کارآمد در برآورد مؤلفه‌های مختلف جهت پایش و ارزیابی اثرات خشکسالی محسوب می‌شوند.

امروزه سنجش از دور با ارائه داده‌هایی با کیفیت بالا مکانی و زمانی، نقش مهمی در مطالعات خشکسالی و حفاظت از اکوسیستم دارد (AghaKouchak et al., 2015; Gatis et al., 2017; Palumbo et al., 2017; West et al., 2019). این فناوری امکان پایش فعالیت فتوسنتز گیاه و رشد پوشش گیاهی را در مناطقی که ایستگاه و داده‌های زمینی وجود ندارد، فراهم کرده است (Beresford et al., 2013; Rhee et al., 2010; Wu et al., 2013). خشکسالی کشاورزی را می‌توان بر اساس تغییرات مشاهده شده در وضعیت پوشش گیاهی که از داده‌های سنجش از دور حاصل می‌شود ارزیابی کرد (Nemani et al., 2009). شاخص سلامت گیاهی (VHI) از ادغام دو مؤلفه شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص وضعیت دمایی (TCI) بدست می‌آید که مؤلفه اول وضعیت رطوبت و مؤلفه دوم وضعیت حرارتی را مشخص می‌کند و به طور گسترده برای ارزیابی و پایش خشکسالی کشاورزی در تحقیقات مختلف استفاده شده است (Javed et al., 2021; Wu et al., 2020; Zeng et al., 2022). مشاهدات سنجش از دور با پوشش مکانی و زمانی مناسب و به موقع برای ارزیابی اثرات خشکسالی بر اکوسیستم‌ها و پوشش‌های گیاهی مختلف نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Jiao et al., 2021).

طول دوره بازیابی خشکسالی نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری اکوسیستم در مواجهه با خشکسالی است و یک مؤلفه مهم برای مدیریت خشکسالی است (Huang et al., 2021; Liu et al., 2019). بازیابی خشکسالی از نظر هواشناسی بر بارش مورد نیاز برای بازیابی و بهبودی از یک دوره خشکسالی تمرکز داشته و از نظر هیدرولوژیکی بازیابی خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که متغیر هیدرولوژیکی مورد نظر (به عنوان مثال، جریان رودخانه) به سطح قبل از خشکسالی بازگردد. درحالی‌که بازیابی خشکسالی از دیدگاه کشاورزی عملکرد گیاهان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Martorell et al., 2014; Pan et al., 2013; Parry et al., 2016). نتایج تحقیق Ahmadi et al. (2017) نشان داد که طول دوره بازیابی خشکسالی همبستگی مثبت با شدت و مدت خشکسالی دارد. به این معنی که خشکسالی‌های شدید و طولانی‌تری برای بهبود نیاز دارند. مطالعه Yu et al. (2017) نشان داد که میانگین طول دوره بازیابی خشکسالی برای پوشش‌های مرتع، اراضی کشاورزی، درختچه‌زار و جنگل به ترتیب برابر ۸۰، ۷۵، ۶۰ و ۳۰ روز است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که مناطقی که در اقلیم‌های خشک‌تر هستند، مدت زمان بیشتری نسبت به مناطق مرطوب برای بهبودی خشکسالی نیاز دارند و در نتیجه دوره بازیابی طولانی‌تری دارند (He et al., 2018; Liu et al., 2019). همچنین مطالعه Zhang et al. (2022) که در سطح جهانی انجام شد نشان داد که مراتع طولانی‌ترین دوره بازیابی با ۵/۲۸ ماه و پس از آن درختچه‌زارها، تالاب‌ها، کشاورزی، ساوانا و جنگل‌ها به ترتیب ۵/۰۳، ۴/۵۸، ۴/۵۷ و ۴/۵۷ ماه را برای تکمیل دوره بازیابی سپری کردند. بررسی و درک طول دوره بازیابی خشکسالی برای اکوسیستم‌ها و پوشش‌های مختلف گیاهی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار حیاتی است. زیرا اگر یک منطقه قبل از بهبود کامل خشکسالی قبلی، دوره خشکسالی جدیدی را تجربه کند اکوسیستم ممکن است اثرات اکولوژیکی دائمی قابل توجهی را تجربه کرده و بطور کامل نابود شود. طول دوره بازیابی می‌تواند در اکوسیستم‌ها و اقلیم‌های مختلف متفاوت باشد.

ایران دارای اقلیم‌های متنوع است اما مطالعات زیادی نشان داده‌اند که بیشتر مساحت کشور را اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تشکیل

۱ Vegetation Health Index

۲ Vegetation Condition Index

۳ Temperature Condition Index

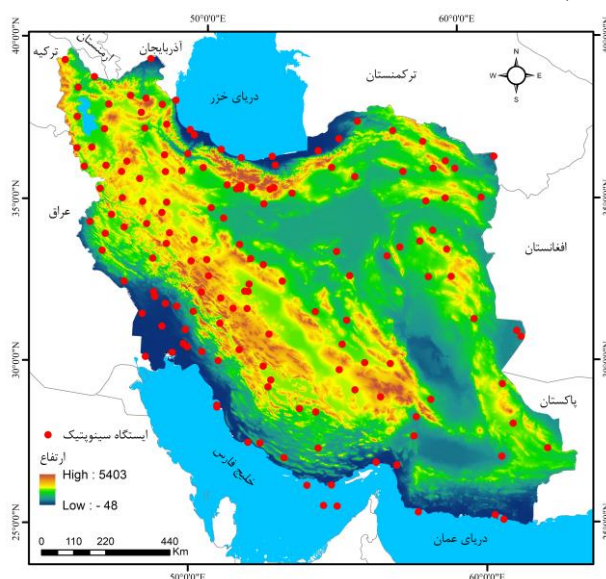
می‌دهد. (Tabari et al., 2014) طی پژوهشی با استفاده از روش‌های دوماترن^۱ و پینا در دوره ۴۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۶۶) به طبقه‌بندی اقلیم ایران پرداختند. نتایج نشان داد که بر اساس روش دوماترن ۸۸٪ مساحت ایران را اقلیم‌های خشک و نیمه خشک تشکیل داد، درحالی‌که بر اساس روش پینا^۲ ۹۶٪ مساحت ایران را اقلیم‌های خشک و نیمه خشک تشکیل داده است. (Abbasi et al., 2021) در تحقیقی با استفاده از روش دوماترن در دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ نقشه پهنه‌بندی اقلیمی را برای ایران تهیه کردند. نتایج نشان داد که اقلیم‌های خشک و نیمه خشک به ترتیب ۶۹٪ و ۲۲٪ مساحت کشور را پوشش می‌دهند.

کشاورزی ایران عمدتاً در مناطق خشک و نیمه خشک واقع شده و ایران یکی از معدود مناطق در سراسر جهان بوده که از بدترین خشکسالی در طول قرن گذشته رنج برده است، به همین دلیل کشاورزی در ایران بسیار حساس و در معرض خشکسالی شدید است که اهمیت مطالعه در این کشور را دوچندان می‌کند (Golian et al., 2015; Shahabfar et al., 2012). با بررسی مطالعات گذشته می‌توان دریافت که تا به امروز تحقیق جامعی در ارتباط دوره‌بازیابی خشکسالی و انعطاف‌پذیری کاربری‌های مختلف در اقلیم‌های انجام نشده است. از این رو هدف از این پژوهش ارزیابی انعطاف‌پذیری کاربری‌های و اقلیم‌های مختلف ایران در مواجهه با خشکسالی با استفاده از طول دوره‌بازیابی خشکسالی، در طول دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهد. کشور ایران در جنوب‌غربی آسیا و در محدوده^۰ ۲۵ و ۵' دقیقه الی ۳۹' و ۷۸' عرض شمالی و ۴۴' و ۱۰' الی ۶۳' و ۱۱' طول شرقی واقع شده است. ایران دومین کشور بزرگ خاورمیانه (پس از عربستان سعودی) و هجدهمین کشور بزرگ جهان با مساحت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع و جمعیت ۸۳۹۹۰۰۰۰ نفر است. ایران با ارمنستان، آذربایجان، ترکمنستان و دریای خزر در شمال، عراق و ترکیه در غرب، افغانستان و پاکستان در شرق و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب مرز مشترک دارد. توپوگرافی ایران پیچیده بوده و رشته کوه‌های مرتفع تا دشت‌ها و بیابان‌های وسیع را در بر می‌گیرد. تغییرات ارتفاعی از ۴۸- متر در شمال کشور تا ۵۴۰۰ متر (کوه دماوند) متغیر است. اقلیم ایران از بسیار مرطوب در مناطق شمالی تا خشک در مناطق مرکزی و جنوبی متفاوت است. اما به طور کلی شرایط اقلیم خشک و نیمه خشک بر کشور حاکم است (Zarei et al., 2019). البرز و زاگرس رشته کوه‌های مهم و اصلی ایران هستند. رشته کوه‌های البرز از شمال غربی به شمال شرقی و رشته کوه‌های زاگرس از شمال غربی تا جنوب غربی ایران امتداد یافته‌اند. این دو رشته کوه نقش مهمی در توزیع غیریکنواخت بارش از نظر مکانی-زمانی در کل کشور دارند (Dinpashoh et al., 2004).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه

داده‌ها

داده‌های زمینی

در این تحقیق، طبقه‌بندی اقلیمی با استفاده از داده‌های بارش و دمای ماهانه ۱۵۳ ایستگاه سینوپتیک ایران که از سایت سازمان هواشناسی ایران^۱ برای دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) دریافت شده، انجام شده است. مقدار میانگین دمای سالیانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین ۵/۵۶ تا ۲۸/۵ درجه سلسیوس متغیر است. داده‌های میانگین بارش سالیانه دارای پراکندگی بیشتری نسبت به داده‌های دما هستند، بطوریکه میانگین بارش سالیانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین ۳۴/۱ تا ۱۷۲۵/۳ میلی‌متر متغیر است و میانگین بارش سالیانه نیز برابر ۲۶۹/۰ میلی‌متر است (جدول ۱).

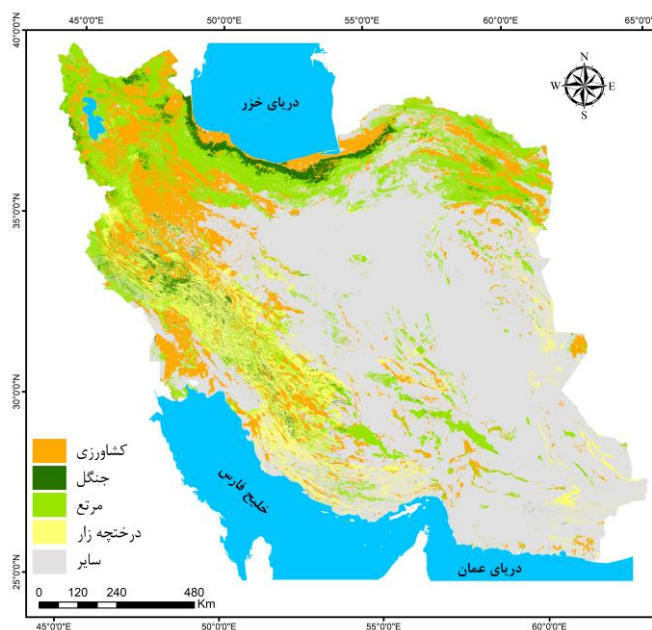
جدول ۱- آمار توصیفی داده‌های میانگین بارش و دمای سالیانه

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	میان	واریانس	انحراف معیار
دما (سلسیوس)	۵/۶	۲۸/۵	۱۸/۳	۱۷/۴	۲۹/۷	۵/۵
بارش (میلی‌متر)	۳۴/۱	۱۷۲۵/۳	۲۶۹/۰	۲۱۸/۳	۶۶۰۴۹/۹	۲۵۷/۰

داده‌های ماهواره‌ای

کاربری اراضی

در این تحقیق از GlobeLand30 که یک محصول با پوشش جهانی و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است و توسط مرکز ملی ژئوماتیک چین^۲ توسعه یافته برای نقشه کاربری اراضی در این تحقیق استفاده شده است. این محصول با استفاده از بیش از ۲۰۰۰۰ تصویر ماهواره لندست و HJ-1 چینی تهیه شده و دقت کلی طبقه‌بندی آن بیش از ۸۰٪ به دست آمده است (Chen et al., 2017). از نقشه کاربری‌های کشاورزی، جنگل، مرتع و درختچه‌زار برای انجام این تحقیق استفاده شده است. کاربری جنگل بیشتر در شمال کشور وجود دارد و مساحت محدودی از غرب را نیز پوشش داده است. گستره کاربری کشاورزی بطور کلی در غرب ایران است و مرتع نیز در بیشتر مناطق کشور یافت می‌شود. همچنین کاربری درختچه‌زار بیشتر در کوه‌های زاگرس یافت می‌شود و بیشتر از نصف کشور را زمین‌های بایر تشکیل می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه‌ی کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

^۱ <https://data.irimo.ir/>

^۲ National Geomatics Center of China (NGCC)

شاخص‌های مبتنی بر سنجنده مادیس

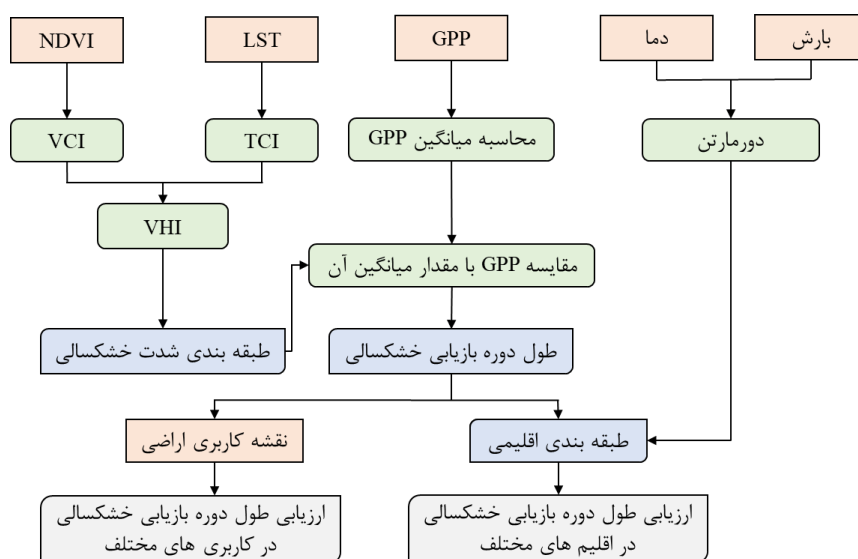
داده‌های ۸ روزه GPP با دقت مکانی ۵۰۰ متر (MOD17A2) از سنجنده MODIS تهیه شده است. الگوریتم این محصول بر اساس مدل LUE^۱ توسعه داده شده است (Running et al., 2015). GPP بزرگترین عامل جذب کربن زمینی توسط اکوسیستم‌ها به شمار می‌رود (Ahmadi et al., 2019). مطالعات زیادی دقت این محصول را تایید کرده‌اند و به طور گسترده در مطالعات منطقه‌ای و جهانی مورد استفاده قرار گرفته است (Cohen et al., 2006; Xue et al., 2015; Yu et al., 2022). تصاویر ۱۶ روزه NDVI^۲ (MOD13A2) و ۸ روزه LST^۳ (MOD11A2) با دقت مکانی ۱۰۰۰ متر از سنجنده MODIS تهیه شده‌اند و برای استخراج نقشه‌های خشکسالی از آن‌ها استفاده شده است (Didan, 2015; Wan, 2015). همه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از سامانه ابری Google Earth Engine (GEE) استخراج شده‌اند. این سامانه شامل تعداد زیادی مجموعه داده سنجش از دور است و توانایی قدرتمندی در پردازش داده دارد. در جدول (۲) خلاصه‌ای از داده‌های استفاده شده در این تحقیق آورده شده است.

جدول ۲- داده‌های استفاده شده در تحقیق

داده	نام	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی	دوره
زمینی	دما	-	ماهانه	۱۹۹۱-۲۰۲۰
	بارش	-	ماهانه	۱۹۹۱-۲۰۲۰
ماهواره‌ای	کاربری اراضی GL30	۳۰ متر	-	۲۰۱۰
	NDVI (MOD13A2.006)	۱۰۰۰ متر	۱۶ روزه	۲۰۲۰-۲۰۰۰
	GPP (MOD17A2H.006)	۵۰۰ متر	۸ روزه	۲۰۲۰-۲۰۰۰

روش

مراحل انجام تحقیق که شامل طبقه‌بندی اقلیمی، پایش خشکسالی، محاسبه طول دوره بازیابی خشکسالی و بررسی دوره بازیابی خشکسالی در پوشش‌های گیاهی و اقلیم‌های مختلف است، به صورت روندنا در شکل (۳) نشان داده شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های LST و NDVI شاخص VHI محاسبه شد و سپس خشکسالی کشاورزی از لحاظ شدت طبقه‌بندی شد. همچنین با استفاده از داده GPP و میانگین آن، طول دوره بازیابی خشکسالی به دست آمد. همچنین با استفاده از داده‌های دما و بارش طبقه‌بندی اقلیمی به روش دومارتن انجام شد. برای انجام این پژوهش از نرم‌افزارهای R و Arcmap و همچنین سامانه Google Earth Engine استفاده شده است.



شکل ۳- روندنمای تحقیق ارزیابی طول دوره بازیابی خشکسالی در پوشش‌های گیاهی و اقلیم‌های مختلف

۱ Light Use Efficiency

۲ Normalized Difference Vegetation Index

۳ Land surface temperature

طبقه‌بندی اقلیم

در این تحقیق با استفاده از داده‌های بارش و دما شاخص دومارتن برای ایران محاسبه شده است و کلاس‌های اقلیمی از همدیگر تفکیک شده‌اند (de Martonne, 1926). شاخص دومارتن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{P}{T+10} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه بالا، P میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) و T میانگین دما سالانه (درجه سلسیوس) است. همچنین این شاخص بر اساس جدول (۳) تقسیم‌بندی می‌شود.

جدول ۳- شاخص دومارتن در اقلیم‌های مختلف

شاخص دومارتن	نوع اقلیم
۰ تا ۱۰	خشک
۱۰ تا ۲۰	نیمه خشک
۲۰ تا ۲۴	مدیترانه‌ای
۲۴ تا ۲۸	نیمه مرطوب
۲۸ تا ۳۵	مرطوب
بزرگتر از ۳۵	بسیار مرطوب

پایش خشکسالی

در مطالعه حاضر از شاخص سلامت پوشش گیاهی VHI در دوره (فوریه تا جولای) برای پایش خشکسالی استفاده شده است. VHI یک شاخص گیاهی مبتنی بر سنجش از دور است و در سراسر جهان برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی استفاده می‌شود (Kogan, 1995a, 1995b, 1997). از شاخص پوشش گیاهی NDVI و دمای سطح زمین LST برای محاسبه VHI استفاده می‌شود. NDVI به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن NIR برابر باند مادون قرمز نزدیک و Red برابر باند قرمز است. VHI از مجموع وزنی دو شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI و وضعیت دمایی TCI حاصل می‌شود و می‌تواند تنش‌های مربوط به دما و آب پوشش گیاهی را تشخیص دهد (Kogan et al., 2004). VCI به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن $NDVI_i$ مقدار NDVI هر پیکسل را در یک ماه یا یک سال نشان می‌دهد، درحالی‌که $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ مقدار حداکثر و حداقل NDVI در همان ماه یا سال هستند. به صورت مشابه، TCI هم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن LST_i مقدار LST هر پیکسل در یک ماه یا یک سال است و LST_{max} و LST_{min} مقدار حداکثر و حداقل LST در همان ماه یا سال هستند. از ترکیب دو شاخص توصیف شده، VHI به دست می‌آید:

$$VHI = \alpha VCI + (1-\alpha)TCI \quad \text{رابطه (۵)}$$

که α در آن ثابت وزن دهی است و سهم VCI و TCI در VHI را مشخص می‌کند و معمولاً برابر ۰/۵ گرفته می‌شود. در جدول (۴) طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس VHI آمده است.

جدول ۴- طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص VHI

VHI	شدت خشکسالی
کمتر از ۰/۱	خشکسالی بسیار شدید
۰/۱ تا ۰/۲	خشکسالی شدید
۰/۲ تا ۰/۳	خشکسالی متوسط
۰/۳ تا ۰/۴	خشکسالی خفیف
بیشتر از ۰/۴	عدم خشکسالی

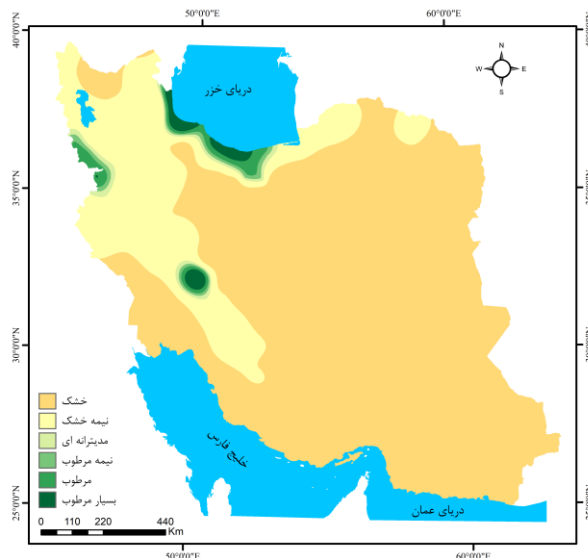
طول دوره بازیابی خشکسالی

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین بلاایای هیدرولوژیکی و اقلیمی است که باعث آسیب به ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های زمینی می‌شود. انعطاف‌پذیری اکوسیستم یک مفهوم کلیدی برای درک واکنش اکوسیستم‌ها به خشکسالی در نظر گرفته می‌شود. طول دوره بازیابی به عنوان یک معیار مهم انعطاف‌پذیری به طور گسترده برای ارزیابی مقاومت اکوسیستم‌ها و گیاهان در برابر خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته است (Yao et al., 2022). GPP که معیاری از فعالیت فتوسنتزی است در این مطالعه برای تشخیص طول دوره بازیابی اکوسیستم‌ها پس از دوره‌های خشکسالی استفاده شده است. بازیابی خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار GPP پس از خشکسالی به سطح بالاتر از حد میانگین برسد (Schwalm et al., 2017; Yu et al., 2017). یک رویداد خشکسالی متوسط (Moderate) زمانی شروع می‌شود که VHI حداقل برای یک ماه کوچکتر از ۰/۳ باشد ($VHI < 0.3$) و زمانی که VHI به بالاتر از ۰/۳ برسد ($VHI > 0.3$) پایان می‌یابد. طول دوره بازیابی می‌تواند به دلیل اختلاف در نوع پوشش گیاهی، ارتفاع و شرایط اقلیمی متفاوت باشد و در نتیجه گیاهان و اقلیم‌های مختلف انعطاف‌پذیری متفاوتی را در برابر خشکسالی از خود نشان می‌دهند.

نتایج و بحث

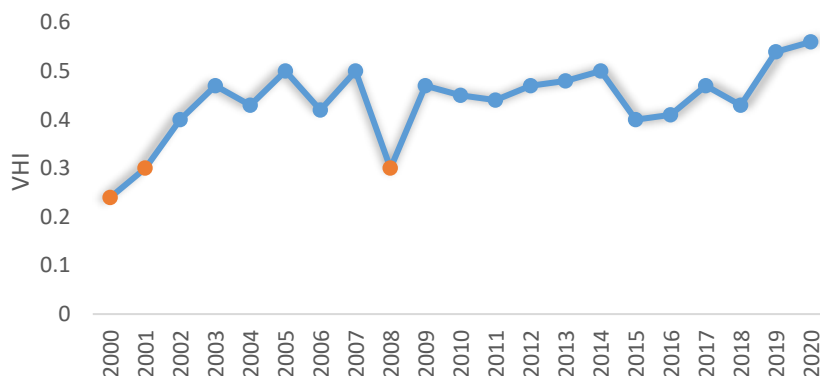
پهنه‌بندی اقلیم

نتیجه پهنه‌بندی اقلیمی دوما رتن در شکل (۴) نشان می‌دهد که ایران دارای شش کلاس اقلیمی خشک، نیمه خشک، مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب است. اقلیم خشک ۷۶/۴٪ مساحت ایران را تشکیل می‌دهد و بعد از آن اقلیم نیمه خشک با ۱۹٪/۶۵ در جایگاه دوم قرار دارد. اقلیم‌های مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب کمتر از ۴٪ مساحت ایران را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل ایران را عموماً کشوری خشک می‌نامند. با توجه نتیجه طبقه‌بندی اقلیمی، افزایش مساحت در کلاس خشک نسبت به تحقیقات گذشته دیده می‌شود، اما بطور کلی نتیجه طبقه‌بندی اقلیمی با نتایج تحقیقات قبلی انجام شده همسو است (Abbasi et al., 2022; Tabari et al., 2014).


شکل ۴- نقشه طبقه‌بندی اقلیمی ایران بر اساس روش دوما رتن

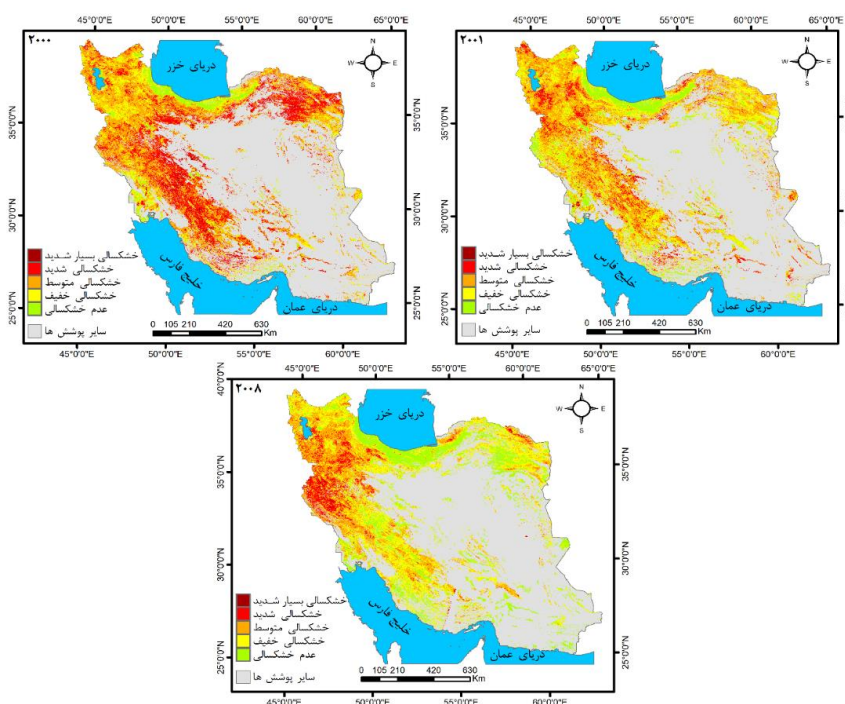
پایش خشکسالی کشاورزی

خشکسالی کشاورزی با استفاده از VHI در طول دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ پایش شد. شکل (۵) نشان می‌دهد که در کشور ایران شدیدترین خشکسالی‌ها در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ اتفاق افتاده است و در نتیجه این سه سال به عنوان دوره‌های خشکسالی در این تحقیق انتخاب شدند.



شکل ۵- میانگین شاخص VHI در طول دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰

میانگین شاخص VHI برای سه دوره خشکسالی انتخاب شده در شکل (۶) آمده است. در سال ۲۰۰۰ در بیشتر مناطق کشور خشکسالی با شدت بالا اتفاق افتاده است اما در سال ۲۰۰۱ شدت خشکسالی کمتر بوده و خشکسالی شدید در مناطق شمال غربی کشور رخ داده است. همچنین در سال ۲۰۰۸ مشابه سال ۲۰۰۱، شدت خشکسالی نسبت به سال ۲۰۰۰ کمتر بود و خشکسالی شدید قسمت‌های غربی کشور را پوشش داده است. با توجه به جدول (۵) که مساحت هر کدام از کلاس‌های خشکسالی را به صورت درصد نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که در سال ۲۰۰۰ حدود ۳۰٪ مساحت پوشش‌های گیاهی ایران را خشکسالی شدید و بسیار شدید و حدود ۴۴٪ را خشکسالی متوسط در بر گرفته است. در سال ۲۰۰۱ حدود ۱۲٪ را خشکسالی شدید و بسیار شدید و ۴۴٪ را نیز خشکسالی متوسط پوشش داده است. همچنین در سال ۲۰۰۸ خشکسالی شدید و بسیار شدید حدود ۹٪ و خشکسالی متوسط ۳۱٪ از مساحت پوشش‌های گیاهی را در بر گرفته است. بطور کلی به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ مناطق بیشتری خشکسالی را تجربه کرده و آسیب جدی به آن‌ها وارد شده است.



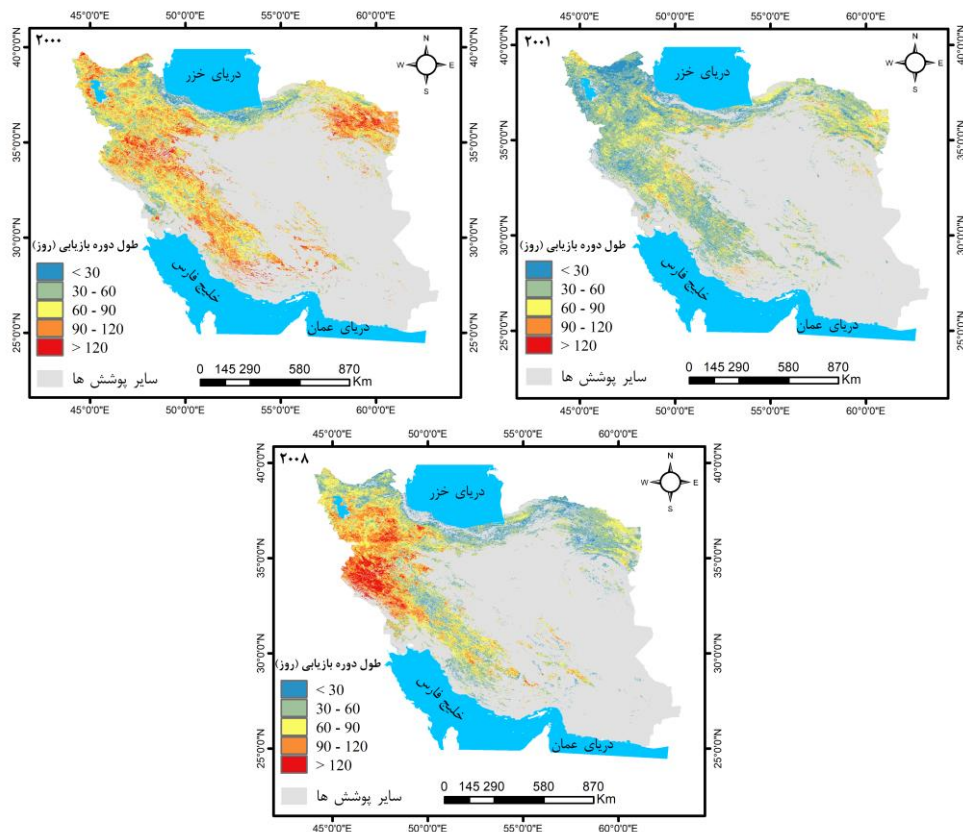
شکل ۶- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس VHI در دوره‌های خشکسالی ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸

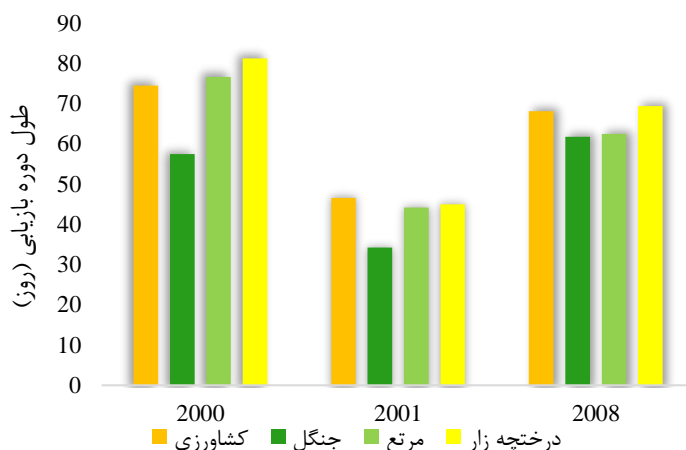
جدول ۵- درصد کلاس‌های مختلف خشکسالی در دوره‌های خشکسالی

کلاس خشکسالی	۲۰۰۸	۲۰۰۱	۲۰۰۰
خشکسالی بسیار شدید	۰/۲	۰/۲	۱/۶
خشکسالی شدید	۸/۳	۱۰/۴	۲۸/۲
خشکسالی متوسط	۳۱/۰	۴۴/۵	۴۳/۸
خشکسالی خفیف	۳۵/۷	۳۱/۰	۱۹/۲
عدم خشکسالی	۲۴/۸	۱۴/۱	۷/۲

طول دوره بازیابی خشکسالی

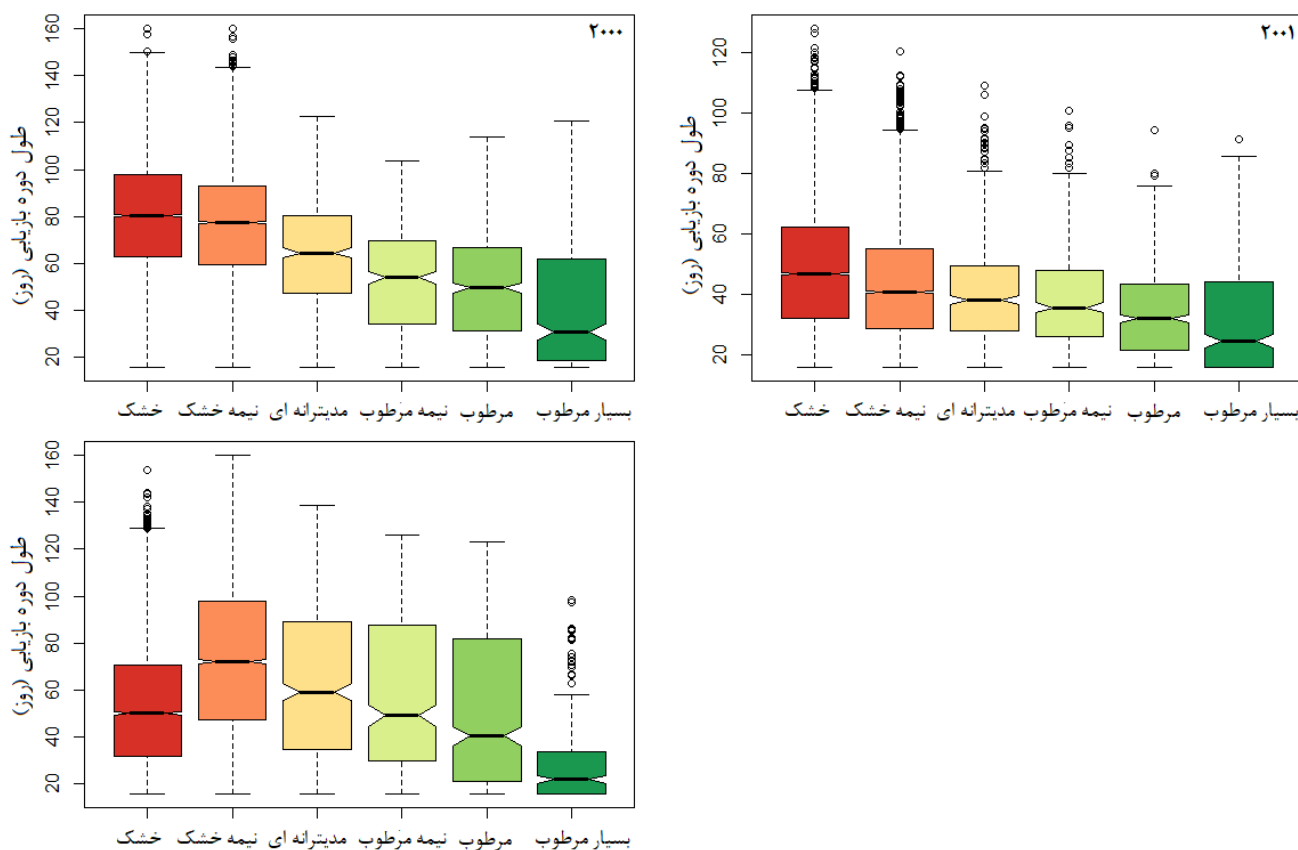
مدت زمان بازیابی و بهبودی خشکسالی برای دوره‌های خشکسالی ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ و پوشش‌های گیاهی کشاورزی، جنگل، مرتع و درختچه‌زار در شکل (۷) و (۸) نمایش داده شده است. در سال ۲۰۰۰ به غیر از قسمت‌های شمالی کشور، بیشتر مناطق دوره‌های طولانی بازیابی را شاهد بوده‌اند و در مناطقی که خشکسالی شدید بوده مدت زمان بازیابی خشکسالی به بیش از ۱۲۰ روز رسیده است. همچنین پوشش‌های درختچه‌زار و جنگل به ترتیب با میانگین ۸۱ و ۵۷ روز بیشترین و کمترین طول دوره بازیابی پس از خشکسالی را داشته‌اند. در سال ۲۰۰۱ بازیابی خشکسالی در اکثر مناطق به نسبت سال قبل سریعتر صورت گرفته است و در اکثر مناطق طول دوره بازیابی کمتر از ۶۰ روز بوده است. پوشش‌های کشاورزی و جنگل به ترتیب با ۴۷ و ۳۴ روز طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین زمان بازیابی را داشته‌اند. در سال ۲۰۰۸ در مناطق غربی که کشور که خشکسالی شدید را تجربه کرده‌اند، زمان بازیابی بیش از ۱۲۰ روز طول کشیده است و طول دوره بازیابی در سایر مناطق کوتاه‌تر بوده است. همچنین درختچه‌زار با ۶۸ و جنگل و مرتع با ۶۲ روز به ترتیب طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین زمان بازیابی را سپری کرده‌اند. زمان بازیابی کوتاه جنگل دلیل ریشه عمیق آن‌ها است و اهمیت این کاربری را در جذب و تثبیت کربن زمینی و انعطاف‌پذیری آن در برابر مواجهه با خشکسالی نشان می‌دهد. در این تحقیق بر خلاف نتایج تحقیقات گذشته که مراتع طولانی‌ترین دوره بازیابی خشکسالی را داشتند، درختچه‌زار و کشاورزی دوره بازیابی طولانی‌تری را داشتند و مطابق با نتایج آن‌ها کاربری جنگل کوتاه‌ترین دوره بازیابی را داشت (Yu et al., 2017; Zhang et al., 2022).


شکل ۷- طول دوره بازیابی خشکسالی محاسبه شده با استفاده از GPP برای دوره‌های خشکسالی ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸



شکل ۸- میانگین طول دوره بازیابی خشکسالی به تفکیک پوشش‌های گیاهی مختلف

در شکل (۹) رابطه بین طول دوره بازیابی در اقلیم‌های مختلف نشان داده شده است. در سال ۲۰۰۰ میانگین طول دوره بازیابی خشکسالی از حدود ۳۰ روز در اقلیم بسیار مرطوب تا ۸۰ روز در اقلیم خشک متغیر است. در سال ۲۰۰۱ طول دوره بازیابی خشکسالی از حدود ۳۰ روز در اقلیم بسیار مرطوب تا ۵۰ روز در اقلیم خشک متغیر بوده است. همچنین در سال ۲۰۰۸ طول دوره بازیابی خشکسالی در اقلیم بسیار مرطوب تا اقلیم نیمه خشک به ترتیب حدود ۲۰ تا ۷۵ روز در حال تغییر بوده است. در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ با پیشروی از اقلیم بسیار مرطوب به اقلیم خشک، طول دوره بازیابی خشکسالی بیشتر می‌شود اما در سال ۲۰۰۸ با پیشروی از اقلیم بسیار مرطوب به اقلیم نیمه خشک دوره بازیابی خشکسالی طولانی‌تر می‌شود و از اقلیم نیمه خشک به اقلیم خشک دوره بازیابی کوتاه‌تر می‌شود. به طور کلی با پیشروی از اقلیم‌های مرطوب به اقلیم‌های خشک، مدت زمانی که لازم است تا اثرات خشکسالی از بین برود و گیاه به حالت نرمال خود برسد و دوره بازیابی و بهبودی کامل شود طولانی‌تر می‌شود. نتایج این بخش از پژوهش، همسو با تحقیقات گذشته است که نشان دادند مناطق خشک‌تر دوره بازیابی طولانی‌تری نسبت به مناطق مرطوب‌تر دارند (He et al., 2018; Liu et al., 2019).



شکل ۹- طول دوره بازیابی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف

نتیجه‌گیری

برای مدیریت و پایش خشکسالی به منظور کاهش خسارات ناشی از آن، علاوه بر بررسی شدت آن، طول دوره بازیابی آن می‌تواند بسیار مهم و کاربردی باشد. در تحقیق حاضر به طبقه‌بندی اقلیمی و بررسی طول دوره بازیابی خشکسالی در اقلیم‌ها و پوشش‌های گیاهی مختلف در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ کشور ایران پرداخته شد. نتایج طبقه‌بندی اقلیمی نشان داد که بیش از ۹۶٪ کشور را اقلیم‌های خشک و نیمه خشک تشکیل می‌دهد. نتایج نشان داد که دوره بازیابی خشکسالی در مناطق شمالی ایران کوتاه‌تر و در مناطق شرق و غربی ایران طولانی‌تر بوده و مناطقی که خشکسالی شدیدتر را تجربه کرده‌اند، دوره بازیابی طولانی‌تری داشته‌اند. همچنین کاربری درختچه‌زار و کشاورزی طولانی‌ترین دوره بهبودی و بازیابی پس از خشکسالی را داشتند و کاربری جنگل کوتاه‌ترین دوره بازیابی را داشت. در نتیجه کاربری جنگل انعطاف‌پذیری بالایی در مواجهه با خشکسالی داشته است و کاربری‌های درختچه‌زار و کشاورزی از انعطاف‌پذیری پایینی برخوردار بودند. همچنین نتایج نشان داد که شرایط برای بازیابی خشکسالی در اقلیم‌های مرطوب مهیاتر است، بطوریکه با پیشروی از اقلیم‌های مرطوب به اقلیم‌های خشک، دوره بازیابی طولانی‌تر بوده که انعطاف بالای اقلیم‌های مرطوب‌تر را در برابر خشکسالی نشان می‌دهد. بطور کلی از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که اقلیم‌های خشک‌تر و کاربری‌های درختچه‌زار و کشاورزی در مواجهه با خشکسالی آسیب‌پذیرتر هستند و باید در مطالعات خشکسالی توجه بیشتری به آن‌ها شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abbasi, F., Bazgeer, S., Kalebasti, P.R. et al. New climatic zones in Iran: a comparative study of different empirical methods and clustering technique. *Theor Appl Climatol* 147, 47–61 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03785-9>
- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F., Teixeira, J., Anderson, M., Wardlow, B. D., & Hain, C. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452-480.
- Ahmadi, B., Ahmadalipour, A., Tootle, G., & Moradkhani, H. (2019). Remote sensing of water use efficiency and terrestrial drought recovery across the contiguous united states. *Remote Sensing*, 11(6), 731.
- Attrill, M. J., & Power, M. (2000). Modelling the effect of drought on estuarine water quality. *Water Research*, 34(5), 1584-1594.
- Beresford, A. E., Sanderson, F. J., Donald, P. F., Burfield, I. J., Butler, A., Vickery, J. A., & Buchanan, G. M. (2019). Phenology and climate change in Africa and the decline of Afro-Palaearctic migratory bird populations. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 5(1), 55-69.
- Chen, J., Cao, X., Peng, S., & Ren, H. (2017). Analysis and applications of GlobeLand30: a review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(8), 230.
- Cohen, W. B., Mausersperger, T. K., Turner, D. P., Ritts, W. D., Pflugmacher, D., Kennedy, R. E., Kirschbaum, A., Running, S. W., Costa, M., & Gower, S. T. (2006). MODIS land cover and LAI collection 4 product quality across nine sites in the western hemisphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), 1843-1857.
- de Martonne, E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *Meteorologie*, 2, 449-459.
- Didan, K. (2015). MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. In.
- Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., Moghaddam, M., Jahanbakhsh, S., & Mirnia, M. (2004). Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods. *Journal of hydrology*, 297(1-4), 109-123.
- Gatis, N., Anderson, K., Grand-Clement, E., Luscombe, D. J., Hartley, I. P., Smith, D., & Brazier, R. E. (2017). Evaluating MODIS vegetation products using digital images for quantifying local peatland CO₂ gas fluxes. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3(4), 217-231.
- Gittins, J. R., Hemingway, J. R., & Dajka, J. C. (2021). How a water-resources crisis highlights social-ecological disconnects. *Water Research*, 194, 116937.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, 327(5967), 812-818.
- Golian, S., Mazdiyasn, O., & AghaKouchak, A. (2015). Trends in meteorological and agricultural droughts

- in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 119(3), 679-688.
- He, B., Liu, J., Guo, L., Wu, X., Xie, X., Zhang, Y., ... & Chen, Z. (2018). Recovery of ecosystem carbon and energy fluxes from the 2003 drought in Europe and the 2012 drought in the United States. *Geophysical Research Letters*, 45(10), 4879-4888.
- Huang, L., Zhou, P., Cheng, L., & Liu, Z. (2021). Dynamic drought recovery patterns over the Yangtze River Basin. *Catena*, 201, 105194.
- Javed, T., Li, Y., Rashid, S., Li, F., Hu, Q., Feng, H., Chen, X., Ahmad, S., Liu, F., & Pulatov, B. (2021). Performance and relationship of four different agricultural drought indices for drought monitoring in China's mainland using remote sensing data. *Science of The Total Environment*, 759, 143530.
- Jiao, W., Wang, L., & McCabe, M. F. (2021). Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112313.
- Kogan, F. N. (1995a). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Kogan, F. N. (1995b). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655-668.
- Kogan, F. N. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621-636.
- Kogan, F., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C., & Tsooj, S. (2004). Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. *International journal of remote sensing*, 25(14), 2889-2896.
- Liu, L., Gudmundsson, L., Hauser, M., Qin, D., Li, S., & Seneviratne, S. I. (2019). Revisiting assessments of ecosystem drought recovery. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114028.
- Martorell, S., DIAZ-ESPEJO, A., Medrano, H., Ball, M. C., & Choat, B. (2014). Rapid hydraulic recovery in *Eucalyptus pauciflora* after drought: linkages between stem hydraulics and leaf gas exchange. *Plant, Cell & Environment*, 37(3), 617-626.
- Nemani, R., Hashimoto, H., Votava, P., Melton, F., Wang, W., Michaelis, A., Mutch, L., Milesi, C., Hiatt, S., & White, M. (2009). Monitoring and forecasting ecosystem dynamics using the Terrestrial Observation and Prediction System (TOPS). *Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1497-1509.
- Palumbo, I., Rose, R. A., Headley, R. M., Nackoney, J., Vodacek, A., & Wegmann, M. (2017). Building capacity in remote sensing for conservation: present and future challenges. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3(1), 21-29.
- Pan, M., Yuan, X., & Wood, E. F. (2013). A probabilistic framework for assessing drought recovery. *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3637-3642.
- Parry, S., Prudhomme, C., Wilby, R. L., & Wood, P. J. (2016). Drought termination: Concept and characterisation. *Progress in Physical Geography*, 40(6), 743-767.
- Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of environment*, 114(12), 2875-2887.
- Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2015). MOD17A2H MODIS/terra gross primary productivity 8-day L4 global 500m SIN grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Schwalm, C. R., Anderegg, W. R., Michalak, A. M., Fisher, J. B., Biondi, F., Koch, G., Litvak, M., Ogle, K., Shaw, J. D., & Wolf, A. (2017). Global patterns of drought recovery. *Nature*, 548(7666), 202-205.
- Shahabfar, A., Ghulam, A., & Eitzinger, J. (2012). Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 119-127.
- Tabari, H., Talaei, P. H., Nadoushani, S. M., Willems, P., & Marchetto, A. (2014). A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran. *Quaternary International*, 345, 158-166.
- Tran, Q. K., Jassby, D., & Schwabe, K. A. (2017). The implications of drought and water conservation on the reuse of municipal wastewater: Recognizing impacts and identifying mitigation possibilities. *Water research*, 124, 472-481.
- Van Loon, A. F., & Laaha, G. (2015). Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of hydrology*, 526, 3-14.
- Wan, Z., Hook, S., Hulley, G., 2015. MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- West, H., Quinn, N., & Horswell, M. (2019). Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111291.
- Wu, B., Ma, Z., & Yan, N. (2020). Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 244, 111813.



- Wu, J., Zhou, L., Liu, M., Zhang, J., Leng, S., & Diao, C. (2013). Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 397-410.
- Xue, B.-L., Guo, Q., Otto, A., Xiao, J., Tao, S., & Li, L. (2015). Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. *Ecosphere*, 6(10), 1-18.
- Yao, Y., Fu, B., Liu, Y., Li, Y., Wang, S., Zhan, T., Wang, Y., & Gao, D. (2022). Evaluation of ecosystem resilience to drought based on drought intensity and recovery time. *Agricultural and Forest Meteorology*, 314, 108809.
- Yu, P., Zhou, T., Luo, H., Liu, X., Shi, P., Zhao, X., Xiao, Z., Zhang, Y., & Zhou, P. (2022). Interannual variation of gross primary production detected from optimal convolutional neural network at multi-timescale water stress. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*.
- 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(1), 014016.
- Zarei, A. R., Shabani, A., & Mahmoudi, M. R. (2019). Comparison of the climate indices based on the relationship between yield loss of rain-fed winter wheat and changes of climate indices using GEE model. *Science of The Total Environment*, 661, 711-722.
- Zeng, J., Zhang, R., Qu, Y., Bento, V. A., Zhou, T., Lin, Y., Wu, X., Qi, J., Shui, W., & Wang, Q. (2022). Improving the drought monitoring capability of VHI at the global scale via ensemble indices for various vegetation types from 2001 to 2018. *Weather and Climate Extremes*, 35, 100412.
- Zhang, Z., Ju, W., Zhou, Y., & Li, X. (2022). Revisiting the cumulative effects of drought on global gross primary productivity based on new long-term series data (1982–2018). *Global Change Biology*, 00, 1–16.
- Zhu, Q., Luo, Y., Zhou, D., Xu, Y. P., Wang, G., & Gao, H. (2019). Drought monitoring utility using satellite-based precipitation products over the Xiang River Basin in China. *Remote Sensing*, 11(12), 1483.