

ارزیابی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر مشاهدات زمینی و سنجش از دور (مطالعه موردی شهر اصفهان)

هادی سیاسر^۱، نگار نورمهنداد^{۲*}

چکیده

از آنجا که خشکسالی تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم‌ها دارد ارزیابی دقیق خشکسالی و استفاده از ابزارهای مناسب برای پایش و مدیریت آن امری ضروری است. این مطالعه به بررسی و تحلیل خشکسالی شهر اصفهان بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ با استفاده از شاخص‌های مختلف از جمله شاخص حرارتی، وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی، تناسب کشاورزی، رطوبت خاک، بارش استاندارد، بارش-تبخیر، شاخص خشکسالی سطحی، شاخص خشکسالی چندگانه پرداخته است. این شاخص‌ها در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه تحلیل شده‌اند تا تغییرات و نوسانات خشکسالی در منطقه مورد بررسی قرار گیرند. نتایج نشان می‌دهد شاخص بارش-تبخیر در فصول گرم مقدار آن بیشتر از فصول سرد سال بود. این شاخص همچنین سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ کمترین و بیشترین مقدار را در طی دو دهه اخیر داشت. بر اساس شاخص بارش و بارش استاندارد در سال ۲۰۰۰ بیش از ۸۰ درصد از منطقه درگیر کمبود بارندگی بودند. شاخص سلامت پوشش گیاهی بیانگر آن بود که در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۷ حدود ۸۲ و ۶۷ درصد از پوشش گیاهی به دلیل تنش دمایی آسیب دیده و سلامت آن به شدت کاهش یافته است. در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که خشکسالی به صورت یک پدیده چند بعدی در اصفهان طی دو دهه اخیر با شدت‌های مختلف رخ داده است و این منطقه همچنان با چالش‌های خشکسالی مداوم مواجه است. این نتایج می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه کاهش اثرات خشکسالی و بهبود مدیریت منابع آب و کشاورزی کمک کند.

واژگان کلیدی:

شاخص‌های خشکسالی، پوشش گیاهی، منابع آبی، کشاورزی.



مقاله پژوهشی

۱. استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

hadisiasar@pnu.ac.ir

۲. استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

negar.nourmahnad@pnu.ac.ir

* نویسنده مسئول

۲۵۰۴-۱۰۹۷

شناسه مقاله:

۷۲۸-۷۴۳

شماره صفحه پایایی:

۱۴۰۴/۰۱/۲۶

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۴/۱۸

انتشار آنلاین:

روز ۶۳

زمان پذیرش:

استاددهی:

سیاسر، ه. و نورمهنداد، ن. (۱۴۰۳). ارزیابی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر مشاهدات زمینی و سنجش از دور (مطالعه موردی شهر اصفهان). مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، ۴(۱)، ۷۴-۸۹.

۱- مقدمه

خشکسالی به‌عنوان یکی از چالش‌های بزرگ اقلیمی، اثرات گسترده‌ای بر منابع آبی، کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی دارد و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی فراوانی را به‌همراه دارد (Camaille et al., 2021). این پدیده در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران به دلیل میزان بارش کم و نوسانات شدید در الگوهای بارش و دما به‌صورت مکرر رخ می‌دهد و باعث تخریب منابع طبیعی، کاهش محصولات کشاورزی و ایجاد بحران‌های آبی می‌شود (Koochi et al., 2021). به‌همین دلیل، ارزیابی دقیق خشکسالی و استفاده از ابزارهای مناسب برای پایش و مدیریت آن امری ضروری است (Khan et al., 2022). شاخص‌های خشکسالی به‌طور معمول به سه دسته شاخص‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیک تقسیم می‌شوند که هر کدام به بررسی جنبه‌های مختلف این پدیده می‌پردازند. شاخص بارش استاندارد که توسط McKee et al. (۱۹۹۳) توسعه یافته است، به‌عنوان یکی از شاخص‌های استاندارد هواشناسی به‌طور گسترده برای ارزیابی خشکسالی‌های اقلیمی استفاده می‌شود و تغییرات بارندگی را در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی می‌کند (McKee et al., 1993). شاخص باران و تبخیر و تعرق استاندارد شده نیز که تأثیرات ترکیبی بارش و تبخیر و تعرق را مد نظر قرار می‌دهد، به‌عنوان ابزاری مناسب برای پایش خشکسالی‌های اقلیمی و اثرات دمایی شناخته شده است (Zhu et al., 2016). این شاخص‌ها به دلیل دقت بالا و پوشش زمانی و مکانی گسترده، ابزارهای مناسبی برای ارزیابی خشکسالی در مطالعات اقلیمی محسوب می‌شوند (Seka et al., 2022). در کنار شاخص‌های هواشناسی، شاخص‌های کشاورزی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. شاخص سلامت پوشش گیاهی^۱ و شاخص وضعیت پوشش گیاهی^۲ که بر اساس داده‌های شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۳ محاسبه می‌شوند، نمایانگر وضعیت سلامت و تراکم پوشش گیاهی در مناطق مختلف هستند (Nagler et al., 2022؛ Kogan, 1995). این شاخص‌ها به‌طور خاص برای ارزیابی تأثیرات خشکسالی بر بخش کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی کاربرد دارند (Amarasinghe et al., 2024). علاوه بر این، شاخص خشکسالی کشاورزی^۴ نیز با استفاده از همین داده‌ها، تأثیرات خشکسالی بر تولیدات کشاورزی را تحلیل می‌کند و اطلاعات دقیقی از وضعیت عملکرد محصولات کشاورزی ارائه می‌دهد (Rafiq et al., 2023).

از سوی دیگر، شاخص‌های رطوبت خاک^۵ و بارش^۶ نیز نقش حیاتی در ارزیابی خشکسالی‌های هیدرولوژیک و کشاورزی دارند. داده‌های CHIRPS و مدل‌های سطح زمین نظیر Noah به‌عنوان منابع اصلی داده‌های این شاخص‌ها به‌کار می‌روند و به پژوهشگران امکان می‌دهند تا اطلاعات دقیقی از وضعیت بارش و رطوبت خاک در مناطق مختلف به‌دست آورند (Khan and Gilani, 2021). شاخص استاندارد خشکسالی^۷ نیز به‌عنوان یک شاخص هیدرولوژیک مهم، وضعیت منابع آبی سطحی و زیرزمینی را بررسی می‌کند و تأثیرات خشکسالی بر منابع آبی را نشان می‌دهد (Liu et al., 2023). در این مطالعه، با استفاده از ده شاخص مختلف خشکسالی شامل شاخص وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی، خشکسالی کشاورزی، بارش، رطوبت خاک، بارش استاندارد، بارش - تبخیر تعرق استاندارد، شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی، شاخص خشکسالی سطحی^۸ و شاخص خشکسالی چندگانه^۹ تلاش شده است تا تحلیل جامعی از ویژگی‌های زمانی و مکانی خشکسالی در شهر اصفهان ارائه شود.

در این پژوهش ترکیب شاخص‌های خشکسالی در سه حوزه هواشناسی (شاخص بارش استاندارد، بارش - تبخیر تعرق استاندارد)، کشاورزی (شاخص وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی، تبخیر تعرق پوشش گیاهی) و هیدرولوژیک (رطوبت خاک، شاخص خشکسالی سطحی) امکان تحلیل چندوجهی این پدیده پیچیده را فراهم می‌آورد. این رویکرد ترکیبی، که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Wei et al., 2021a)، به درک عمیق‌تر از تعاملات پیچیده بین مؤلفه‌های مختلف خشکسالی منجر می‌شود. همچنین بهره‌گیری همزمان از داده‌های سنجش از دور با قدرت تفکیک مکانی بالا MODIS (با دقت ۵۰۰ متر) و داده‌های زمینی (ایستگاه‌های هواشناسی) در پلتفرم Google Earth Engine، امکان پایش دقیق و مستمر تغییرات خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی-مکانی مختلف میسر می‌سازد. این تلفیق هوشمندانه منابع داده‌ای، که با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته پردازش تصویر صورت می‌پذیرد، دقت و اعتبار نتایج را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. علاوه بر این موارد، توسعه و کاربرد شاخص ترکیبی خشکسالی چندگانه با رویکردی نوآورانه، امکان تلفیق نظام‌مند نتایج حاصل از شاخص‌های مختلف را فراهم می‌آورد. این شاخص جامع، که بر اساس وزن‌دهی علمی مؤلفه‌های مختلف خشکسالی طراحی شده است، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های راهبردی مورد استفاده قرار گیرد. چنین رویکرد سیستماتیک و چندسطحی در تحلیل خشکسالی، پیش از این در مطالعات منطقه‌ای با این جامعیت گزارش نشده است.

همچنین، استفاده از پلتفرم Google Earth Engine به دلیل دسترسی آسان به داده‌های تاریخی و امکان تحلیل‌های گسترده، انتخاب مناسبی برای این پژوهش بوده است (Aksoy et al., 2019). هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی دقیق ویژگی‌های زمانی و مکانی خشکسالی‌ها در شهر اصفهان و

1. Standardized Precipitation Index (SPI)

2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

3. Vegetation Health Index (VHI)

4. Vegetation Condition Index (VCI)

5. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

6. Agricultural Appropriateness Index (AAI)

7. Soil Moisture Condition Index (SMCI)

8. Precipitation Condition Index (PCI)

9. Standardized Drought Index (STDI)

10. Evapotranspiration Vegetation Index (EVI)

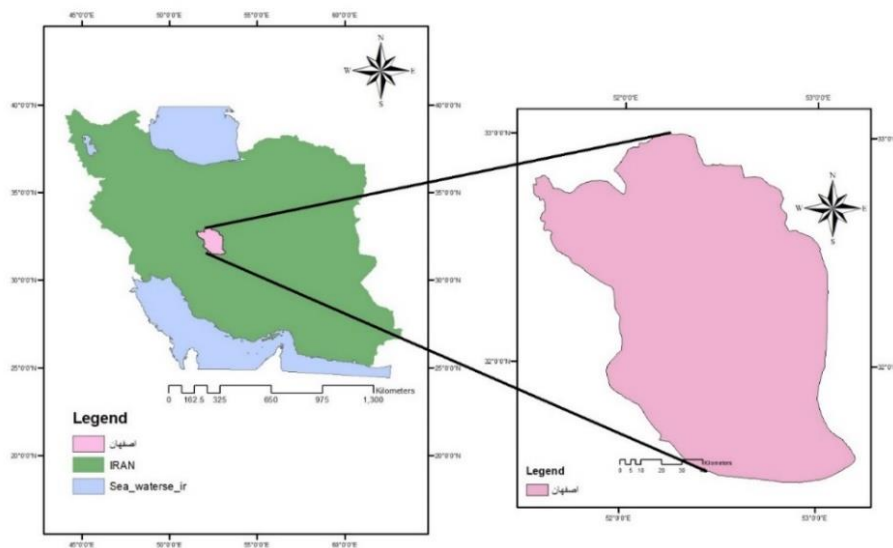
11. Surface Drought Index (SDI)

12. Overall Multivariate Drought Index (OMDI)

بررسی اثرات آن بر کشاورزی، منابع آبی و پوشش گیاهی است. بررسی جامع این شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت بهینه منابع آبی و کاهش اثرات منفی خشکسالی فراهم کند.

۲- مواد و روش‌ها

اصفهان یکی از شهرهای مرکزی ایران و مرکز استان اصفهان است. این شهر در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی واقع شده است. اصفهان با مساحتی حدود ۲۵۰ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱۵۷۰ متر از سطح دریا، دارای اقلیم نیمه‌خشک و خشک است. میانگین بارش سالانه در این شهر حدود ۱۲۰ میلی‌متر است و دامنه دمایی آن بین ۱۰- تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. اصفهان به دلیل وجود رودخانه زاینده‌رود یکی از مهم‌ترین مناطق کشاورزی و صنعتی ایران محسوب می‌شود.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۱- داده‌های سنجش از دور

پردازش و تحلیل داده‌های سنجش از دور در این پژوهش با بهره‌گیری از پلتفرم Google Earth Engine (GEE) و با رویکردی سیستماتیک انجام پذیرفت. این فرآیند در چارچوب یک برنامه جامع طراحی گردید که امکان پردازش دقیق و کارآمد داده‌های ماهواره‌ای را فراهم می‌آورد. داده‌های NDVI از محصول MOD13A1 V6.1 به‌دست آمد که با دقت فضایی ۵۰۰ متر ارائه می‌شود (Didan, 2015)، ترکیبی از شاخص وضعیت پوشش گیاهی و شاخص حرارتی به‌منظور ارزیابی شدت خشکسالی و داده‌های بارش روزانه جهانی CHIRPS با دقت ۰/۰۵ درجه برای محاسبه شاخص بارش استفاده شدند (Funk et al., 2015). همچنین، داده‌های مدل سطح زمین Noah با دقت فضایی ۰/۱ درجه برای استخراج داده‌های رطوبت خاک استفاده شد (Ek et al., 2003). علاوه بر این، شاخص خشکسالی سطحی و شاخص خشکسالی چندگانه نیز برای تحلیل جامع‌تری از وضعیت خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۲- داده‌های زمینی

برای شاخص‌های مبتنی بر داده‌های زمینی میانگین ماهانه بارش، دمای حداقل و حداکثر ماهانه و داده‌های تبخیر و تعرق از سازمان هواشناسی ایران، ایستگاه سینوپتیک اصفهان جمع‌آوری شد. از این داده‌ها برای محاسبه شاخص بارش استاندارد و بارش-تبخیر تعرق استاندارد با مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۰۰ استفاده شد (Vicente-Serrano et al., 2010). شاخص‌های شاخص بارش استاندارد و بارش-تبخیر تعرق استاندارد با استفاده از کدهای پایتون نوشته شدند تا دقت و کارایی تحلیل داده‌ها بیشتر گردد. این شاخص‌ها به‌منظور تایید شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور و ارزیابی قابلیت آن‌ها برای تحلیل شرایط خشکسالی در مناطق بزرگ از طریق ضریب تعیین بین شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر

RS و داده‌های زمینی محاسبه شدند. این ترکیب از داده‌های سنجش از دور و داده‌های زمینی، امکان مقایسه و بررسی تطابق شاخص‌های مختلف خشکسالی را فراهم می‌کند و به درک بهتر از الگوهای خشکسالی در شهر اصفهان کمک می‌کند.

۳-۲- شاخص‌های خشکسالی

شاخص خشکسالی وسیله‌ای است که با خلاصه نمودن اطلاعات، خشکسالی را به‌صورت دوره‌ای و شرایط رطوبتی منطقه نشان می‌دهد (شریفی و کاظمی، ۱۴۰۲). در حوزه کشاورزی، شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی و تبخیر تعرق پوشش گیاهی با استناد به مطالعات بنیادین (Kogan, 1995, 1997؛ Huete et al., 2002) انتخاب شدند. این مجموعه با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و قابلیت پوشش مکانی گسترده، امکان پایش مستمر وضعیت پوشش گیاهی و تنش‌های محیطی را میسر می‌سازند. شاخص‌های هیدرولوژیک رطوبت خاک و شاخص خشکسالی سطحی نیز با توجه به کارآمدی آنها در ارزیابی رطوبت خاک و خشکسالی سطحی (Zhang et al., 2017؛ Narasimhan and Srinivasan, 2005) گزینش شدند. در نهایت، شاخص خشکسالی چندگانه به‌عنوان یک شاخص ترکیبی پیشرفته برای تلفیق نتایج و ارائه تصویری جامع از وضعیت خشکسالی انتخاب گردید (Tsakiris and Vangelis, 2005). این رویکرد چند بعدی در انتخاب شاخص‌ها، امکان تحلیل جامع و دقیق پدیده خشکسالی را در ابعاد هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیک فراهم می‌آورد.

۳-۲-۱- شاخص بارش استاندارد

این شاخص یکی از رایج‌ترین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی است، برای ارزیابی نوسانات بارشی در مقیاس زمانی مشخص استفاده می‌شود. این شاخص بر اساس انحراف استاندارد بارش نسبت به میانگین بلندمدت محاسبه می‌شود و تغییرات بارش را به‌صورت مثبت یا منفی نمایش می‌دهد. شاخص بارش استاندارد به‌طور گسترده برای ارزیابی خشکسالی‌های هواشناسی به‌کار می‌رود (McKee et al., 1993).

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma_P} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن P_i بارش در ماه یا دوره مورد نظر؛ \bar{P} میانگین بارش بلندمدت در همان ماه یا دوره و σ_P انحراف استاندارد بارش در همان ماه یا دوره است.

۳-۲-۲- شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد

این شاخص مانند شاخص بارش استاندارد عمل می‌کند، با این تفاوت که علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق را نیز در محاسبات خود لحاظ می‌کند. این شاخص برای ارزیابی جامع‌تر خشکسالی، به‌ویژه در مناطق کشاورزی، کاربرد دارد و تغییرات در میزان تبخیر و تعرق را در نظر می‌گیرد شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد می‌تواند تأثیرات تغییرات اقلیمی را بهتر منعکس کند (Vicente-Serrano et al., 2010).

$$SPEI = \frac{P - PET}{\sigma_{(P-PET)}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن P بارش تجمعی در دوره مورد نظر؛ PET تبخیر و تعرق بالقوه در همان دوره و $\sigma_{(P-PET)}$ انحراف استاندارد تفاوت بین بارش و تبخیر و تعرق در دوره مورد نظر است.

۳-۲-۳- شاخص خشکسالی کشاورزی

این شاخص به ارزیابی تأثیر خشکسالی بر کشاورزی می‌پردازد. این شاخص تناسب شرایط خاک و بارش برای رشد محصولات کشاورزی را مورد بررسی قرار می‌دهد و از طریق مقایسه میزان بارش واقعی با میزان نرمال محاسبه می‌شود. این شاخص به کشاورزان و مدیران منابع کمک می‌کند تا استراتژی‌های مدیریتی مناسبی برای کاهش اثرات خشکسالی انتخاب کنند (Palmer, 1965).

$$AAI = \frac{P_{real}}{P_{normal}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن P_{real} میزان بارش واقعی در دوره مورد نظر و P_{normal} میزان بارش نرمال برای آن دوره است. این شاخص به‌ویژه برای کشاورزان و مدیران منابع آبی اهمیت دارد، زیرا امکان ارزیابی دقیق تأثیر خشکسالی بر کشاورزی و اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی مناسب را فراهم می‌آورد.

۳-۲-۴- شاخص رطوبت خاک

این شاخص به بررسی وضعیت رطوبت خاک می‌پردازد. این شاخص تغییرات رطوبت خاک را در طول دوره‌های خشکسالی ارزیابی می‌کند و برای مدیریت منابع آبی و کشاورزی حیاتی است. کاهش رطوبت خاک به‌ویژه در مناطق خشک می‌تواند به کاهش تولیدات کشاورزی منجر شود و این شاخص ابزار مفیدی برای پیش‌بینی این اثرات است (Zhang et al., 2017).

$$SMCI = \frac{SM_i - \bar{SM}}{\sigma_{SM}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن SM_i رطوبت خاک در شرایط مورد نظر و SM میانگین رطوبت خاک است.

۳-۲-۵- شاخص وضعیت پوشش گیاهی

شاخص وضعیت پوشش گیاهی به ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی بر اساس اطلاعات ماهواره‌ای می‌پردازد و بر اساس شاخص پوشش گیاهی نرمال شده محاسبه می‌شود. شاخص مذکور نشان‌دهنده تأثیر خشکسالی بر سلامت پوشش گیاهی است و با کاهش شاخص پوشش گیاهی نرمال شده، وضعیت وخیم‌تری را نشان می‌دهد. این شاخص به‌طور گسترده برای بررسی تأثیرات خشکسالی بر اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی استفاده می‌شود (Kogan, 1995).

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن $NDVI_i$ مقدار شاخص پوشش گیاهی در زمان i ؛ $NDVI_{min}$ حداقل مقدار $NDVI$ در همان دوره زمانی و $NDVI_{max}$ حداکثر مقدار $NDVI$ در دوره زمانی است.

۳-۲-۶- شاخص سلامت پوشش گیاهی

با ترکیب شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی و شاخص حرارتی، شاخص سلامت پوشش گیاهی به‌دست می‌آید که به بررسی سلامت کلی پوشش گیاهی می‌پردازد. این شاخص اثرات همزمان خشکسالی و تنش‌های حرارتی را بر پوشش گیاهی بررسی می‌کند و ابزاری بسیار مناسب برای ارزیابی تأثیرات خشکسالی‌های طولانی‌مدت است (Kogan, 1997).

$$VHI = \alpha VCI + (1 - \alpha) TCI \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن VHI شاخص سلامت پوشش گیاهی؛ VCI شاخص وضعیت پوشش گیاهی؛ TCI شاخص شرایط حرارتی و α ضریب وزن‌دهی است که معمولاً بین ۰ و ۱ قرار دارد (که نشان‌دهنده میزان اهمیت هر یک از شاخص‌ها است).

۳-۲-۷- شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی

این شاخص، شاخصی پیشرفته‌تر نسبت به شاخص پوشش گیاهی نرمال است و به ارزیابی دقیق‌تر پوشش گیاهی با استفاده از اطلاعات طیفی می‌پردازد. شاخص مذکور با کنترل بهتر تأثیرات خاک و جو، شاخصی دقیق‌تر برای تحلیل پوشش گیاهی در شرایط خشکسالی ارائه می‌دهد و برای کاربردهای اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی مفید است (Huete et al., 2002).

$$EVI = G \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1 \times \rho_{RED} - C2 \times \rho_{BLUE} + L} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که L فاکتور تعدیل‌کننده خاک و $C1$ و $C2$ ضرایب استفاده شده جهت تصحیح پراکندگی آئروسول در باند قرمز باند آبی ρ_{BLUE} و ρ_{RED} و ρ_{NIR} به ترتیب انعکاس در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک است. معمولاً G ، L و $C1$ و $C2$ برابر $1/5$ ، 1 ، 6 و $7/5$ است.

۳-۲-۸- شاخص خشکسالی سطحی

این شاخص به بررسی خشکسالی سطحی می‌پردازد و تأثیرات کمبود آب در لایه‌های سطحی خاک و گیاهان را ارزیابی می‌کند. این شاخص به‌ویژه در مناطق کشاورزی که کمبود آب سطحی به‌سرعت می‌تواند به کاهش تولیدات منجر شود، اهمیت پیدا می‌کند (Narasimhan and Srinivasan, 2005).

$$SDI = \frac{SW_i - \overline{SW}}{\sigma_{SW}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

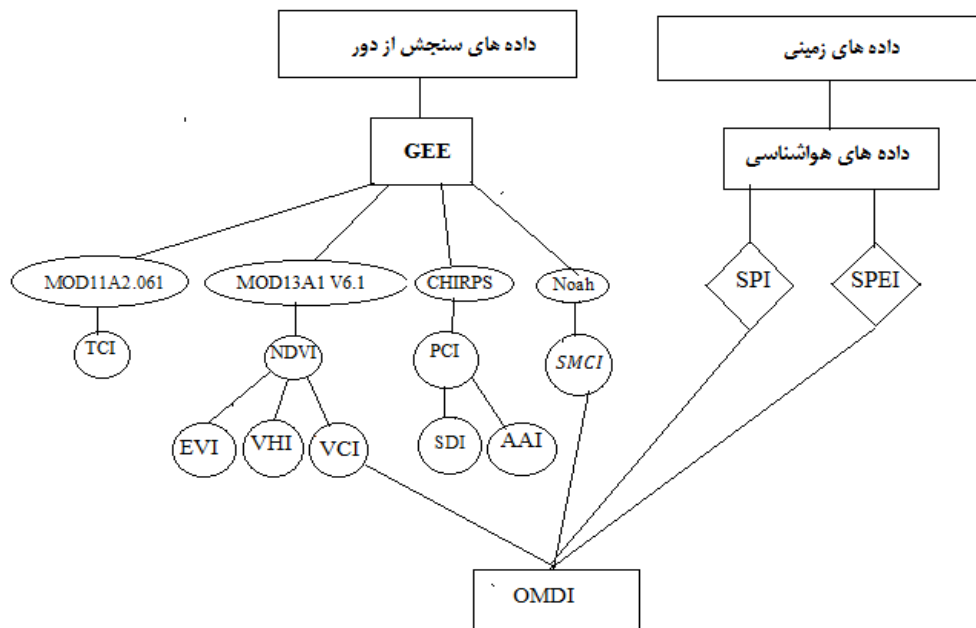
که در آن SW_i مقدار رطوبت خاک در زمان i ؛ \overline{SW} میانگین رطوبت خاک در دوره مطالعه و σ_{SW} انحراف استاندارد رطوبت خاک است. این شاخص تغییرات رطوبت خاک را در دوره‌های مختلف خشکسالی تحلیل کرده و تأثیر آن را بر کشاورزی و پوشش گیاهی نشان می‌دهد.

۳-۲-۹- شاخص خشکسالی چندگانه

این شاخص به‌عنوان یک شاخص چندگانه و جامع، وضعیت کلی خشکسالی در منطقه را از طریق ترکیب چند شاخص مانند بارش استاندارد، بارش-تبخیر تعرق استاندارد، رطوبت خاک و وضعیت پوشش گیاهی بررسی می‌کند. شاخص خشکسالی چندگانه به مدیران منابع اجازه می‌دهد تا تأثیرات چندگانه خشکسالی را هم‌زمان ارزیابی کنند و در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی کارآمدتر عمل کنند (Tsakiris and Vangelis, 2005).

$$OMDI = w_1 \times SPI + w_2 \times SPEI + w_3 \times SMCI + w_4 \times VCI \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن w_1 ، w_2 ، w_3 و w_4 وزن‌های مربوط به هر شاخص هستند که بر اساس تأثیر نسبی هر شاخص در ارزیابی خشکسالی تنظیم می‌شوند.



شکل (۲): فلوچارت مراحل انجام پژوهش

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل وضعیت خشکسالی ماهانه و سالانه در شهر اصفهان با استفاده از شاخص‌های مختلف

بر اساس شکل (۳) و (۴) تحلیل خشکسالی در شهر اصفهان با استفاده از شاخص‌های مختلف از جمله وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی، خشکسالی کشاورزی، بارش، رطوبت خاک، بارش استاندارد، بارش - تبخیر تعرق استاندارد، تبخیر تعرق پوشش گیاهی، خشکسالی سطحی و خشکسالی چندگانه نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در شدت و گستردگی خشکسالی در این منطقه طی سال‌های اخیر است. شاخص بارش استاندارد شده که تغییرات بارندگی را در هر ماه ارزیابی می‌کند، نشان می‌دهد که در ماه‌های تابستانی حداقل مقدار این شاخص به دست آمده و به مقدار متوسط $0.7-$ رسیده است. کمترین میزان این شاخص در بین ماه‌های سال در طی بیست سال در تابستان سال ۲۰۰۰ اتفاق افتاد ($0.72-$). این کاهش قابل توجه بارندگی منجر به کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی شده و خشکسالی شدیدی را ایجاد کرده است. در مقابل، بیشترین مقادیر شاخص‌های بارش، رطوبت خاک، بارش استاندارد و خشکسالی چندگانه در دسامبر (زمستان) ۲۰۰۳ مشاهده شد. مطالعات Khanmohammadi et al. (۲۰۲۲) که تنها بر شاخص بارش استاندارد تأکید دارند، نشان می‌دهند که در مناطق خاصی مانند اصفهان که تحت خشکسالی‌های طولانی مدت قرار دارند، استفاده از شاخص‌های ساده‌تری همچون شاخص بارش استاندارد ممکن است به اندازه کافی دقیق نباشد.

شاخص بارش و تبخیر تعرق استاندارد شده، که علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق را نیز در نظر می‌گیرد، نشان‌دهنده وضعیت خشکسالی است. میانگین این شاخص در اوایل زمستان کمترین مقدار ($1.19-$) و در اوایل تابستان بالاترین مقدار (1.23) را نشان داد. به طور کلی فصول گرم مقدار آن بیشتر از فصول سرد سال بود. این شاخص همچنین سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ کمترین و بیشترین مقدار را در طی دو دهه اخیر داشت (شکل ۳).

در همین راستا، شاخص محتوای رطوبت خاک نیز در تابستان ۲۰۰۲ به پایین‌ترین مقدار خود یعنی $0.1-$ کاهش یافت. این کاهش شدید رطوبت خاک تأثیرات منفی زیادی بر روی زمین‌های کشاورزی و تولید محصولات زراعی داشته است. در سال ۲۰۰۳، این شاخص در ماه‌های بهاری به حدود 0.9 بهبود یافت و نشان‌دهنده افزایش نسبی رطوبت خاک و بهبود کشاورزی در این دوره بود.

شاخص سلامت پوشش گیاهی نیز تأثیرات خشکسالی بر پوشش گیاهی را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در زمستان‌ها به کمترین میزان خود می‌رسد و این میزان در زمستان ۲۰۰۷ به $0.275-$ کاهش یافت که به معنای کاهش سلامت اکوسیستم‌های طبیعی است. با این حال، در ماه‌های تابستانی بهبود نسبی در شاخص سلامت پوشش گیاهی مشاهده شد و حداکثر آن در اوایل تابستان ۲۰۱۳ مشاهده شد که این شاخص به حدود 0.249 افزایش یافت به طور کلی ماه‌های سرد سال این شاخص اعداد منفی و در ماه‌های گرم اعداد مثبت را شامل می‌گردد که نشان‌دهنده بازگشت نسبی پوشش گیاهی به وضعیت بهتر است.

شاخص وضعیت پوشش گیاهی نیز نشان‌دهنده تأثیر بارندگی و شرایط اقلیمی بر پوشش گیاهی است. مقادیر اندک آن که نشان‌دهنده خشکسالی شدید و کاهش پوشش گیاهی است. با شروع فصل تابستان به حداقل مقدار خود می‌رسد و با شروع بهار مقدار آن افزایش می‌یابد که بیانگر بهبود نسبی وضعیت پوشش گیاهی در این دوره است.

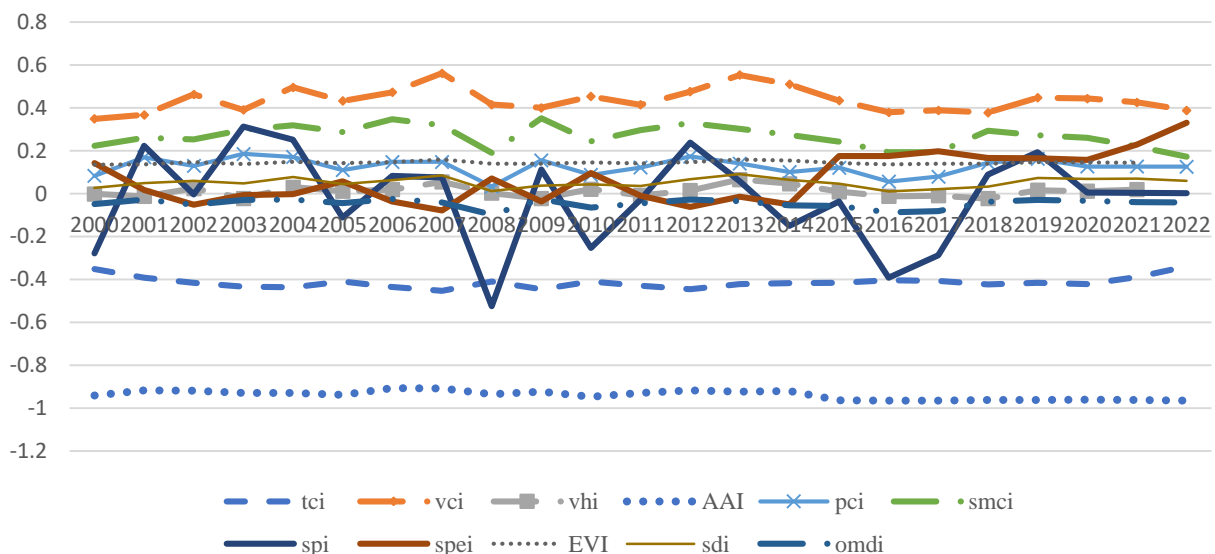
شاخص تناسب کشاورزی نیز در ماه‌های گرم سال به پایین‌ترین مقادیر خود یعنی ۰/۹۸- رسید که نشان‌دهنده کاهش شدید عملکرد محصولات کشاورزی به دلیل خشکسالی و گرمای هوا است. یافته‌های حاضر با تحلیل‌های طالبی و همکاران (۱۳۹۰) که کاهش تولید محصولات کشاورزی را در اثر خشکسالی نشان می‌دهند کاملاً هم راستا است.

شاخص بارش استاندارد تغییرات بارش را در مقیاس ماهانه ارزیابی می‌کند و نشان داد در ماه‌های گرم نسبت به ماه‌های سرد سال به طور قابل توجهی مقدار آن کمتر بود. کمترین آن ۰/۰۱ و بیشترین آن ۰/۲۸ بود که به ترتیب در ماه‌های جولای و دسامبر اتفاق افتاد.

شاخص خشکسالی استاندارد شده نیز نشان‌دهنده خشکسالی‌های شدید در ماه‌های جولای و آگوست است که به مقادیر میانگین ۰/۰۴- رسید. این مقادیر نشان‌دهنده خشکسالی شدید و طولانی مدت است. در سال ۲۰۱۳، شاخص خشکسالی استاندارد شده به حداکثر مقدار خود ۰/۰۹ بهبود یافت که نشان‌دهنده کاهش نسبی شدت خشکسالی در این دوره است.

در نهایت، شاخص خشکسالی چند متغیره که به عنوان یک شاخص چند بعدی خشکسالی عمل می‌کند، کمترین مقدار آن در سال ۲۰۱۰ برابر ۰/۲۲۳- مشاهده شد که نشان‌دهنده وضعیت بحرانی خشکسالی در این دوره بود. در سال ۲۰۰۳، این شاخص به حدود ۰/۲۴۶ بهبود یافت که نشان‌دهنده بهبود نسبی وضعیت کلی خشکسالی در منطقه است. همچنین مقدار میانگین آن در کل سال‌ها منفی بود.

در مجموع، تحلیل سالانه نشان می‌دهد که بر اساس شاخص‌های سلامت پوشش گیاهی، شاخص حرارتی، بارش-تبخیر تعرق استاندارد و خشکسالی چندگانه در سال ۲۰۱۰ و بر اساس شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی، بارش، بارش استاندارد و شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی در سال ۲۰۰۰ خشکسالی‌های شدید با کاهش شدید بارندگی، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش رطوبت خاک همراه بود، در حالی که سال ۲۰۰۳ و ۲۰۱۳ بهبودی نسبی را در شاخص‌های مختلف خشکسالی نشان می‌دهد در سال‌های اخیر منطقه همچنان با چالش‌های خشکسالی مواجه است و نیاز به مدیریت بهتر منابع آبی و کشاورزی به شدت احساس می‌شود. این روند کاملاً مطابق با روند بلندمدت کاهش بارش و افزایش دما در استان اصفهان است که در مطالعات Koochi et al. (۲۰۲۱) و Khan and Gilan (۲۰۲۱) گزارش شده است.



شکل (۳): تحلیل شاخص‌های خشکسالی سالانه در شهر اصفهان (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲)

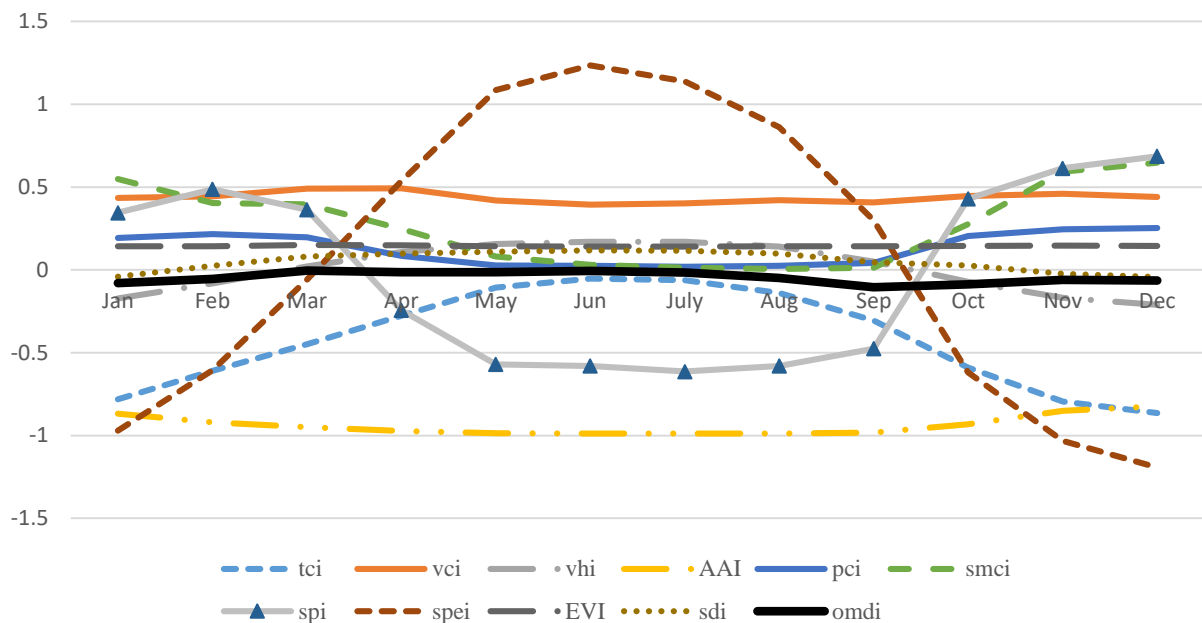
۳-۲- تحلیل وضعیت خشکسالی‌های شهر اصفهان با استفاده از شاخص‌های ترکیبی

در یک تحلیل جامع و علمی از وضعیت خشکسالی در اصفهان بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، شاخص‌های مختلف از جمله شاخص وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی، خشکسالی کشاورزی، بارش، رطوبت خاک، بارش استاندارد، بارش-تبخیر تعرق استاندارد، تبخیر تعرق پوشش گیاهی، خشکسالی سطحی و خشکسالی چندگانه مورد بررسی قرار گرفتند. این شاخص‌ها در کنار یکدیگر تصویری دقیق و چندبعدی از تاثیر خشکسالی بر اقلیم، منابع آبی، کشاورزی و پوشش گیاهی این منطقه را ارائه می‌دهند.

۳-۲-۱- کاهش سلامت پوشش گیاهی در اثر خشکسالی و افزایش دما

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (به طور متوسط نشان می‌دهد که طی این دوره ۶۹/۲ درصد از مناطق اصفهان در شرایط بدون خشکسالی گیاهی قرار داشته‌اند، اما این عدد در سال ۲۰۰۰ به ۱۸ درصد کاهش یافته است. این تغییرات به دلیل کاهش بارش و افزایش دمای هوا بوده است که تاثیر مستقیمی بر کاهش پوشش گیاهی داشته است. شاخص سلامت گیاه، که تاثیر دما را در کنار پوشش گیاهی در نظر می‌گیرد، نشان می‌دهد که در

سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۷ به ترتیب حدود ۸۲ و ۶۷ درصد از پوشش گیاهی به دلیل تنش دمایی آسیب دیده و سلامت آن به شدت کاهش یافته است. فاضل دهکردی و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند در سال ۲۰۰۰ در مناطق مرتعی اصفهان، خشکسالی شدید اتفاق افتاده است.



شکل (۴): تحلیل ماهانه شاخص‌های خشکسالی در شهر اصفهان (میانگین ماهانه هر شاخص از ژانویه تا دسامبر)

۳-۲-۲- ناهنجاری‌های شدید کشاورزی در سال‌های بحرانی طبق خشکسالی کشاورزی

کشاورزی در اصفهان به‌عنوان یکی از بخش‌های اقتصادی کلیدی، تحت تاثیر خشکسالی‌های مستمر قرار گرفته است. شاخص ناهنجاری کشاورزی در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که بیش از ۴۰ درصد از محصولات کشاورزی از بین رفته‌اند و تولیدات به کمتر از ۵۰ درصد میانگین معمول کاهش یافته است. در سال‌های بحرانی مانند ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷، کاهش بارش و رطوبت خاک تأثیرات عمیقی بر کاهش بهره‌وری کشاورزی گذاشته و بسیاری از مناطق کشاورزی را با چالش‌های اقتصادی جدی مواجه کرده است. این نتایج با نظر کاظمی و نوری (۱۴۰۲) مطابقت دارد.

۳-۲-۳- کاهش شدید بارش‌ها و تشدید خشکسالی‌های شدید طبق شاخص بارش و بارش استاندارد

یکی از شاخص‌های کلیدی برای بررسی خشکسالی در اصفهان، شاخص شرایط بارش و شاخص بارش استاندارد است. بررسی شاخص شرایط بارش نشان می‌دهد در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ بیش از ۸۰ درصد از منطقه درگیر کمبود بارندگی بود. این کاهش شدید بارش منجر به افزایش مناطق دچار خشکسالی‌های شدید شد. بر اساس شاخص بارش استاندارد نیز سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ بیش از ۸۰ درصد از مناطق اصفهان با خشکسالی شدید مواجه بوده‌اند. به این ترتیب، کاهش بارش‌ها در این سال‌ها نه تنها منابع آبی را کاهش داده بلکه اثرات مستقیمی بر کاهش تولیدات کشاورزی، رطوبت خاک و افزایش فرسایش خاک داشته است.

۳-۲-۴- کاهش شدید رطوبت و فرسایش خاک طبق شاخص رطوبت خاک

رطوبت خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل پایداری اکوسیستم و کشاورزی، در طول این دوره با کاهش قابل توجهی مواجه بوده است. شاخص نشان می‌دهد که در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۲، ۵۰ درصد از منطقه دچار خشکسالی شدید شده است. این کاهش به‌ویژه در مناطق کشاورزی تأثیرات زیان‌باری داشته و منجر به کاهش تولیدات و فرسایش گسترده خاک شده است. در سال‌هایی که رطوبت خاک به این سطح بحرانی رسید، کشاورزان با کاهش چشمگیر بازده محصولات و افزایش هزینه‌های آبیاری مواجه شدند.

۳-۲-۵- شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد و تاثیر دما و تبخیر بر تشدید خشکسالی

شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد با در نظر گرفتن دما و تبخیر، تصویری دقیق‌تر از خشکسالی‌های شدید در اصفهان ارائه می‌دهد. بر اساس این شاخص از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۴ حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد از مناطق تحت تاثیر خشکسالی قرار گرفتند. افزایش تبخیر نه تنها باعث کاهش منابع آبی شد، بلکه تبعات آن در کاهش پوشش گیاهی و کاهش تولیدات کشاورزی نیز کاملاً مشهود بود. طبق پژوهش فنوت و اسدی (۱۴۰۳) با توجه به اینکه بارش - تبخیر تعرق استاندارد تطابق بالاتری را با داده‌های رطوبت خاک نشان داد می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب در مطالعات خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲-۶- شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی و کاهش شدید پوشش گیاهی

شاخص پوشش گیاهی پیشرفته نیز وضعیت وخیم پوشش گیاهی در اصفهان را نشان می‌دهد. در دو دهه گذشته تمام مناطق مورد مطالعه بر اساس این شاخص دچار کاهش پوشش گیاهی شدند.

۳-۲-۷- شاخص خشکسالی چندگانه و تنش‌های خشکسالی و تأثیرات جهانی

شاخص ناهنجاری اقیانوسی و خشکسالی نیز نشان‌دهنده تأثیرات جهانی پدیده‌هایی مانند النینو و لانینا بر وضعیت خشکسالی اصفهان است. میانگین حداقل میزان این شاخص در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ مشاهده شد.

نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه شده است. در مقایسه با مطالعه Eslamian and Jahadi (۲۰۱۹) که از شاخص‌های بارش استاندارد و بارش-تبخیر تعرق استاندارد برای ارزیابی خشکسالی استفاده کرده‌اند، تحقیق حاضر با افزودن شاخص‌های ترکیبی مانند خشکسالی چندگانه و سلامت پوشش گیاهی توانسته تصویری جامع‌تر از خشکسالی در اصفهان ارائه دهد. برخلاف تحقیق آن‌ها که تنها به بارش و تبخیر و تعرق اشاره کرده است، این تحقیق تغییرات پوشش گیاهی و رطوبت خاک را نیز در نظر گرفته است (Eslamian and Jahadi, 2019).

۳-۳- همبستگی بین شاخص‌های مختلف خشکسالی**۳-۳-۱- تأثیرات شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، بارش استاندارد و بارش-تبخیر تعرق استاندارد**

بر اساس شکل (۶-الف)، شاخص بارش استاندارد با شاخص رطوبت خاک همبستگی مثبت دارد (۰/۷۱) که تأثیر مستقیم بارش بر رطوبت خاک و وضعیت کشاورزی را برجسته می‌کند. همچنین شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد، که تبخیر و تعرق را نیز در محاسبات خود در نظر می‌گیرد، همبستگی بالایی با شاخص سلامت پوشش گیاهی (۰/۹۴) دارد. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش تبخیر و کاهش رطوبت به‌طور مستقیم منجر به کاهش پوشش گیاهی و تشدید خشکسالی شده است. همبستگی منفی شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد با خشکسالی کشاورزی (۰/۸۳-) نیز به وضوح تأثیرات منفی تبخیر بر تولیدات کشاورزی را نشان می‌دهد. در مقیاس فصلی، شاخص بارش استاندارد همبستگی بالایی با شاخص بارش (۱) و شاخص رطوبت خاک (۰/۸۶) دارد، که نشان می‌دهد کاهش بارش فصلی تأثیر مستقیمی بر کاهش رطوبت خاک دارد. شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد نیز در فصل‌های خشک همبستگی ۰/۹۵ با شاخص سلامت پوشش گیاهی دارد که نقش حیاتی تبخیر در تشدید خشکسالی‌های فصلی و کاهش پوشش گیاهی را تأیید می‌کند.

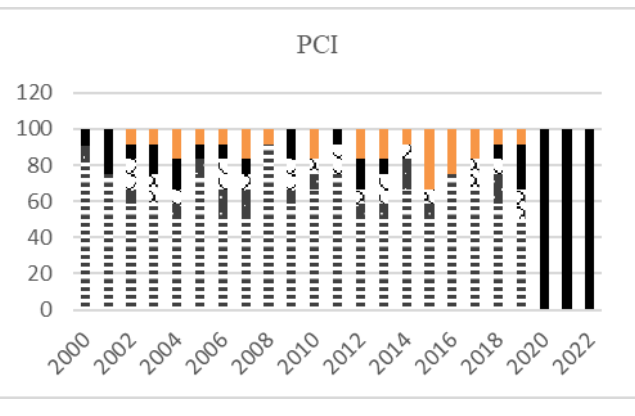
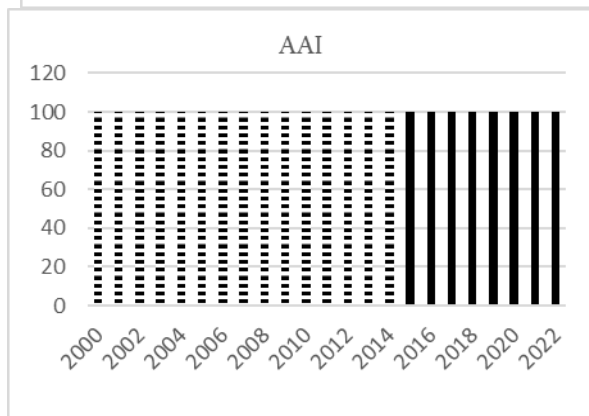
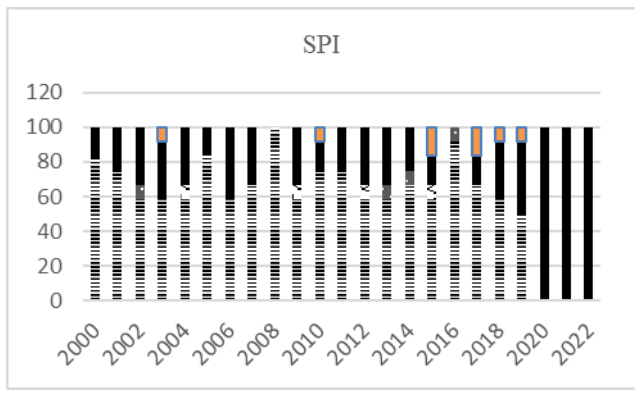
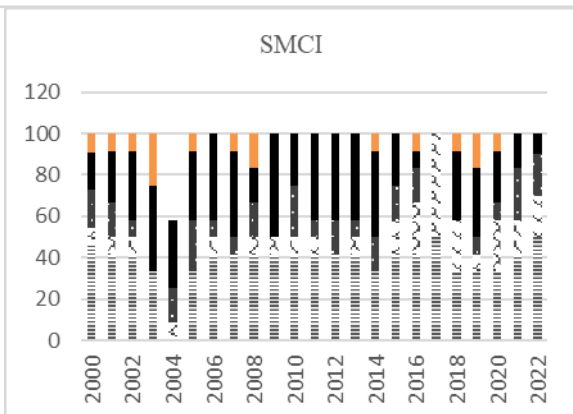
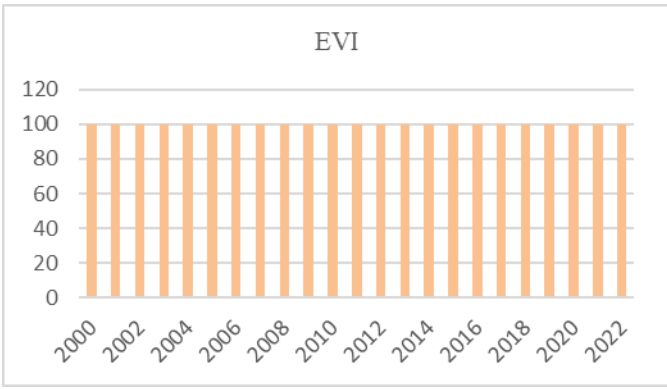
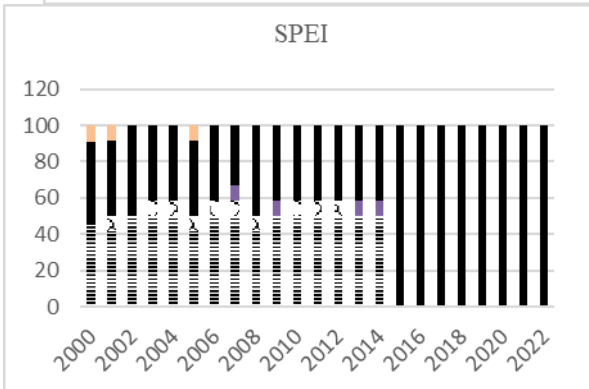
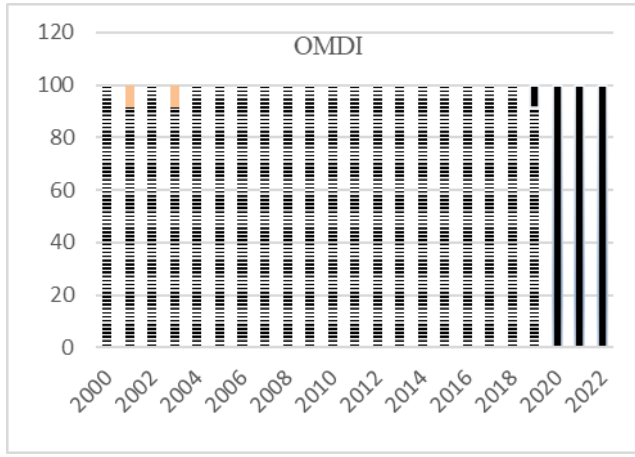
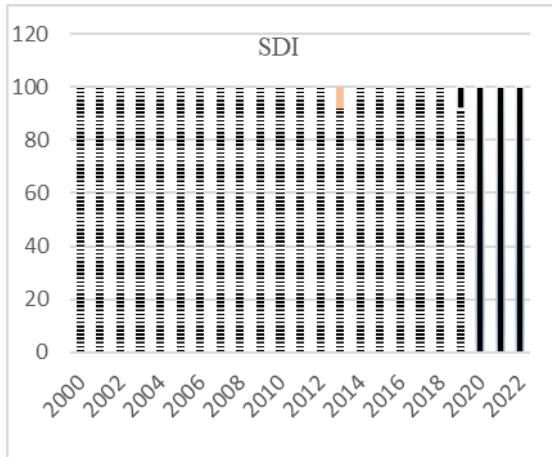
در مقیاس سالانه، شاخص بارش استاندارد با شاخص بارش (۱) و شاخص رطوبت خاک (۰/۶۸) همچنان نشان‌دهنده ارتباط قوی کاهش بارش با کاهش رطوبت خاک است. همبستگی منفی بین شاخص‌های بارش-تبخیر تعرق استاندارد و سلامت پوشش گیاهی به این معناست که وقتی شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد افزایش می‌یابد (به معنی کاهش خشکسالی هواشناسی)، شاخص سلامت پوشش گیاهی کاهش پیدا می‌کند، که نشان‌دهنده بدتر شدن وضعیت پوشش گیاهی است. این ممکن است به این دلیل باشد که دیگر عوامل تأثیرگذار بر سلامت پوشش گیاهی (مانند رطوبت خاک یا عوامل دیگر) با خشکسالی‌های مداوم دچار تغییرات شده‌اند و واکنش پوشش گیاهی بهبود نمی‌یابد. بنابراین، ارتباط منفی شاخص‌های بارش-تبخیر تعرق استاندارد با سلامت پوشش گیاهی ممکن است نشان‌دهنده وجود دیگر عوامل محدودکننده‌ای باشد که علی‌رغم بهبود در شرایط بارشی و تبخیری، پوشش گیاهی به وضعیت نرمال خود بر نمی‌گردد.

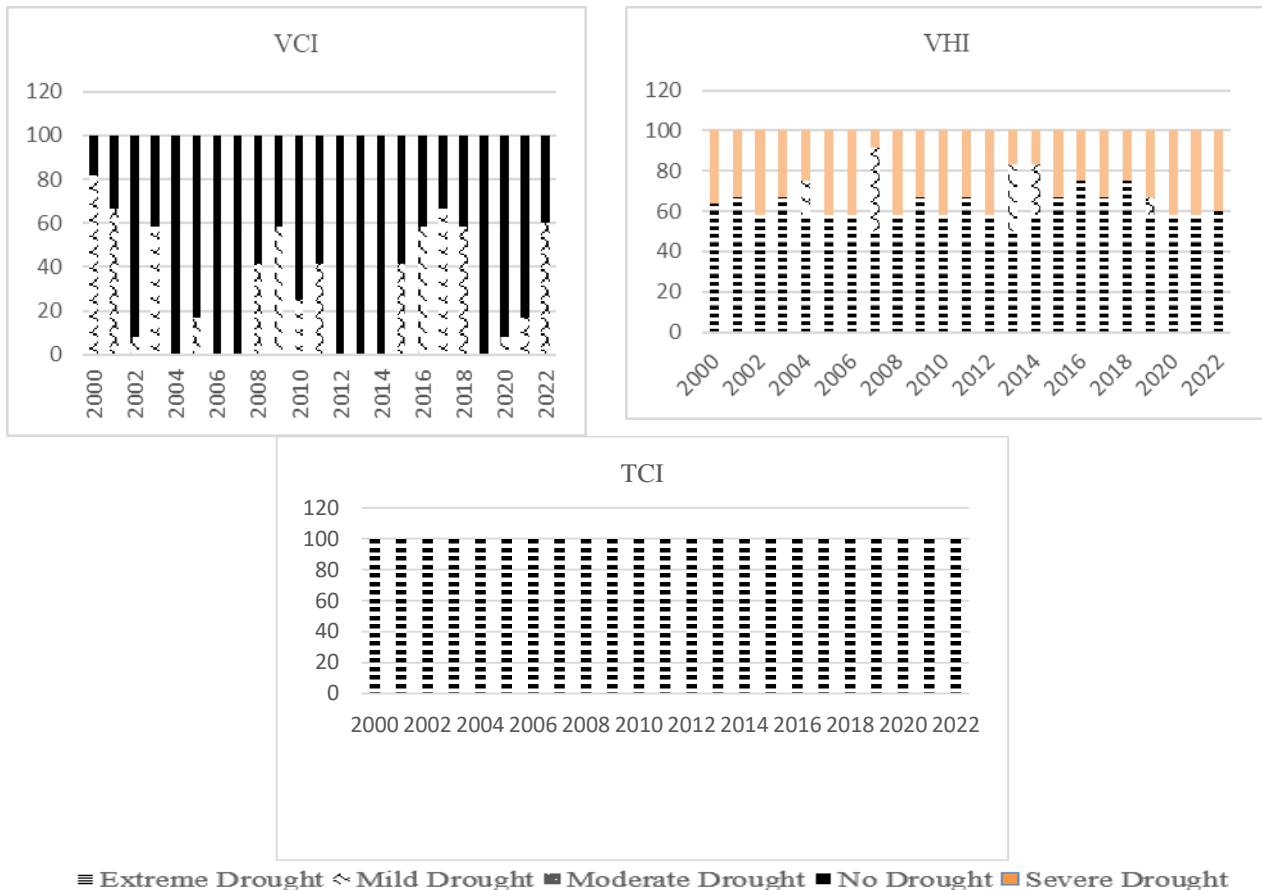
۳-۳-۲- تأثیرات شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و شاخص رطوبت خاک

شاخص خشکسالی کشاورزی که نشان‌دهنده تناسب کشاورزی است، در مقیاس ماهانه با شاخص رطوبت خاک همبستگی بالایی (۰/۸۳) دارد. این همبستگی تأکید می‌کند رطوبت خاک نقش کلیدی در بهره‌وری کشاورزی دارد و کاهش آن به‌طور مستقیم منجر به کاهش تولیدات کشاورزی می‌شود. همبستگی منفی ۰/۷۲- بین شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و سلامت پوشش گیاهی نیز نشان‌دهنده این است که خشکسالی هواشناسی مستقیماً بر کاهش بهره‌وری کشاورزی تأثیرگذار است. در مقیاس فصلی، شاخص خشکسالی کشاورزی همبستگی قوی ۰/۸۶ با شاخص رطوبت خاک و ۰/۷۸ با شاخص بارش استاندارد دارد. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش بارش‌های فصلی و کاهش رطوبت خاک در فصل‌های خشک به کاهش شدید تولیدات کشاورزی منجر شده است. در مقیاس سالانه نیز، همبستگی خشکسالی کشاورزی (۰/۶۸) با شاخص رطوبت خاک نشان‌دهنده این است که خشکسالی‌های بلندمدت باعث کاهش بهره‌وری کشاورزی به دلیل کمبود رطوبت خاک می‌شوند. همچنین، شاخص رطوبت خاک همبستگی ۰/۷۱ با خشکسالی چندگانه دارد که تأیید می‌کند خشکسالی‌های هواشناسی و رطوبت خاک به‌طور مستقیم بر شدت خشکسالی‌های چندگانه تأثیرگذار هستند.

۳-۳-۳- تأثیرات شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی، تبخیر تعرق پوشش گیاهی

شاخص وضعیت پوشش گیاهی که وضعیت پوشش گیاهی را اندازه‌گیری می‌کند، در مقیاس ماهانه همبستگی بسیار ضعیف ۰/۰۴۴ با شاخص سلامت پوشش گیاهی دارد. این همبستگی نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه، تغییرات در وضعیت پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی بر وضعیت خشکسالی ندارد. همبستگی ۰/۳۲ بین وضعیت پوشش گیاهی و شاخص رطوبت خاک نیز نشان می‌دهد که کاهش رطوبت خاک منجر به تضعیف پوشش گیاهی شده است. شاخص سلامت پوشش گیاهی نیز با بارش-تبخیر تعرق استاندارد همبستگی بالایی دارد (۰/۹۴) که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم تبخیر بر





شکل (۵): طبقه‌بندی خشکسالی

کاهش سلامت گیاهان است. در مقیاس فصلی، همبستگی بین شاخص وضعیت پوشش گیاهی و شاخص سلامت پوشش گیاهی بسیار ضعیف و برابر با $0/034$ است، که نشان می‌دهد این دو شاخص ارتباط قابل توجهی با یکدیگر ندارند. با این حال، همبستگی بین شاخص سلامت پوشش گیاهی و شاخص حرارتی بسیار قوی و برابر با $0/97$ است، که نشان‌دهنده ارتباط نزدیک بین سلامت پوشش گیاهی و شاخص حرارتی است. شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی، که یکی دیگر از شاخص‌های پوشش گیاهی است، همبستگی $0/28$ با شاخص خشکسالی سطحی دارد. این مقدار نشان‌دهنده یک ارتباط ضعیف تا متوسط است که نشان می‌دهد شاخص خشکسالی سطحی تأثیر محدودی بر شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی دارند. در مقیاس فصلی، وضعیت پوشش گیاهی همچنان همبستگی بالای $0/034$ با شاخص سلامت پوشش گیاهی دارد و شاخص سلامت پوشش گیاهی با شاخص حرارتی ارتباط $0/97$ دارد.

در مقیاس سالانه، همبستگی $0/88$ بین شاخص وضعیت پوشش گیاهی و شاخص سلامت پوشش گیاهی نشان می‌دهد که خشکسالی‌های طولانی‌مدت باعث کاهش قابل توجه پوشش گیاهی شده‌اند. شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی که وضعیت پوشش گیاهی را اندازه‌گیری می‌کند، با شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد همبستگی منفی $0/47$ دارد. این مقدار نشان می‌دهد که با افزایش خشکسالی و تبخیر، سلامت پوشش گیاهی کاهش می‌یابد.

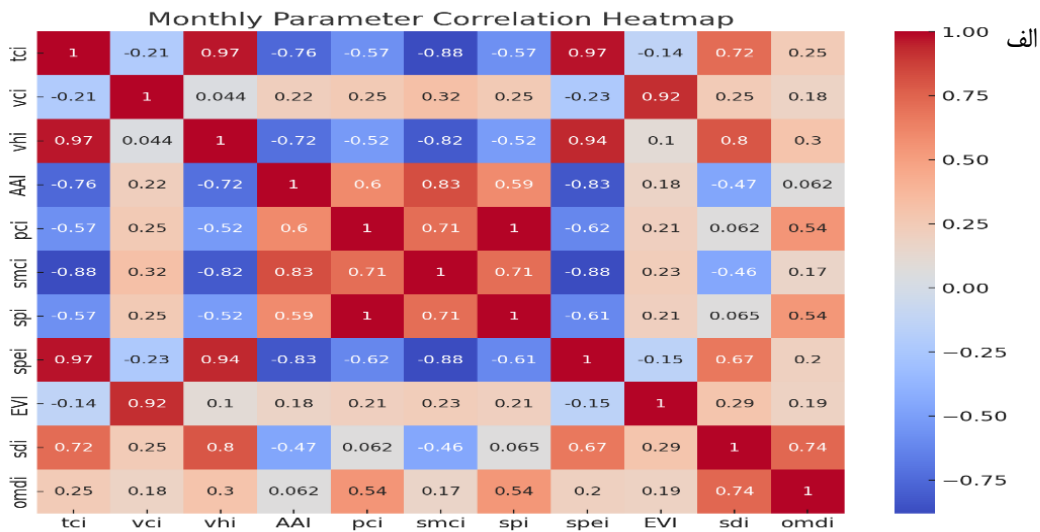
۳-۴- شاخص خشکسالی چندگانه

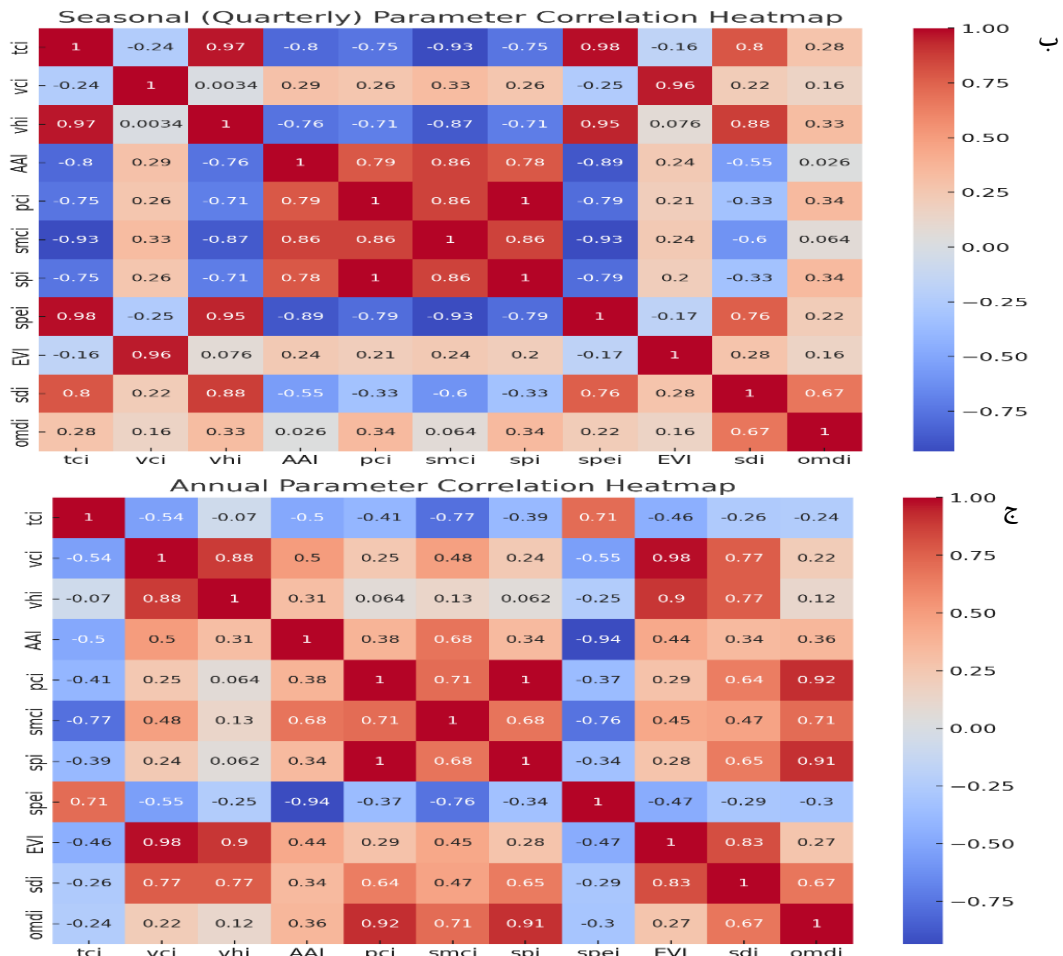
همانطور که در شکل (۶-الف)، مشاهده می‌شود شاخص ترکیبی خشکسالی چندگانه به‌عنوان یک شاخص جامع در مقیاس ماهانه برای خشکسالی‌های چندگانه، همبستگی $0/3$ با شاخص سلامت پوشش گیاهی و $0/17$ با شاخص رطوبت خاک دارد که نشان می‌دهد این شاخص تأثیر متوسطی از وضعیت کلی خشکسالی و تأثیر ضعیف‌تری از رطوبت خاک دارد. در مقیاس فصلی، همبستگی شاخص خشکسالی چندگانه با $0/34$ شاخص بارش استاندارد، شاخص خشکسالی سطحی ($0/67$) و سلامت پوشش گیاهی ($0/33$) نشان می‌دهد که خشکسالی چندگانه به‌عنوان یک شاخص جامع برای خشکسالی‌های چندگانه، تحت تأثیر ترکیبی از شاخص بارش استاندارد، شاخص خشکسالی سطحی و سلامت پوشش گیاهی قرار دارد. همبستگی $0/34$ با بارش استاندارد نشان می‌دهد که بارش‌های فصلی به صورت متوسط بر خشکسالی چندگانه تأثیرگذار است. همبستگی قوی‌تر $0/67$ با شاخص خشکسالی سطحی نشان می‌دهد که خشکسالی‌های سطحی به میزان بیشتری در شاخص جامع خشکسالی چندگانه منعکس می‌شوند (شکل ۶-ب) همچنین، همبستگی $0/33$ با شاخص سلامت پوشش گیاهی نشان‌دهنده آن است که وضعیت کلی خشکسالی (شامل پوشش گیاهی) نیز به میزان متوسطی در این شاخص جامع تأثیر دارد. در مقیاس سالانه، شاخص خشکسالی چندگانه به‌عنوان یک شاخص جامع برای خشکسالی‌های چندگانه، با

شاخص‌های مختلفی همبستگی دارد که هر یک به نوبه خود تأثیرات خشکسالی را از جنبه‌های متفاوتی منعکس می‌کنند. این شاخص با بارش استاندارد (۰/۹۱) و شاخص بارش (۰/۹۲) همبستگی بسیار قوی دارد که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه بارش‌های هواشناسی و پراکندگی بارش‌ها بر شدت خشکسالی‌های چندگانه است. همچنین، شاخص رطوبت خاک (۰/۷) نشان می‌دهد که رطوبت خاک نیز به عنوان یک عامل مهم، بر تشدید خشکسالی چندگانه اثرگذار است. همبستگی شاخص خشکسالی چندگانه با شاخص خشکسالی سطحی (۰/۶۷) نیز نشان‌دهنده ارتباط قوی بین خشکسالی سطحی و خشکسالی‌های چندگانه است. این امر تأیید می‌کند که کاهش رطوبت سطحی به طور مستقیم بر خشکسالی کلی منطقه تأثیر دارد. در مقابل، شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد همبستگی منفی (۰/۳۰-) با خشکسالی چندگانه دارد که بیانگر این است که تبخیر بالا در دوره‌های خشکسالی به کاهش شاخص خشکسالی چندگانه منجر می‌شود. از سوی دیگر، همبستگی‌های متوسطی بین شاخص خشکسالی چندگانه و شاخص‌های کشاورزی کشاورزی (۰/۳۶) و شاخص تبخیر تعرق پوشش گیاهی (۰/۲۷) مشاهده می‌شود (شکل ۶-ج). این ارتباطها نشان می‌دهند که تأثیرات خشکسالی‌های چندگانه بر کشاورزی و پوشش گیاهی متوسط است و در این مقیاس سالانه، اثرات کشاورزی کمتر از سایر عوامل برجسته هستند. همبستگی نسبتاً ضعیف شاخص خشکسالی چندگانه با سلامت پوشش گیاهی (۰/۱۲) و وضعیت پوشش گیاهی (۰/۲۲) نیز نشان‌دهنده تأثیرات محدود خشکسالی‌های کلی بر وضعیت پوشش گیاهی است. در نهایت، ارتباط منفی شاخص خشکسالی چندگانه با شاخص حرارتی (۰/۲۴-) نشان می‌دهد که دما در دوره‌های خشکسالی چندگانه کاهش می‌یابد و تأثیر معکوس بر شاخص خشکسالی چندگانه دارد. این تحلیل‌ها تأکید می‌کنند که خشکسالی‌های چندگانه به شدت تحت تأثیر کاهش بارش‌ها، کاهش رطوبت خاک و پراکندگی نامناسب بارش‌ها هستند، در حالی که دما و پوشش گیاهی تأثیر کمتری در تعیین شدت خشکسالی دارند.

استفاده از شاخص خشکسالی چندگانه که به طور مؤثر شاخص‌های مختلف خشکسالی را ترکیب می‌کند، موجب می‌شود تا تحلیل‌های دقیق‌تری از وضعیت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف صورت پذیرد.

واکوی عمیق روابط متقابل بین شاخص‌های خشکسالی، الگوهای پیچیده و معناداری را در ساختار دینامیکی این پدیده آشکار می‌سازد. این روابط در سه سطح اساسی قابل تبیین است: در سطح اول، روابط درون گروهی شاخص‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در گروه شاخص‌های هواشناسی، همبستگی قوی بین شاخص‌های بارش استاندارد و بارش - تبخیر تعرق استاندارد ($r=0.88, p<0.001$) بیانگر تأثیر توأمان بارش و تبخیر در شکل‌گیری خشکسالی است. در گروه شاخص‌های کشاورزی، ارتباط معنادار بین وضعیت پوشش گیاهی و سلامت پوشش گیاهی نشان‌دهنده هم‌افزایی شرایط حرارتی و رطوبتی در تعیین وضعیت پوشش گیاهی می‌باشد. در سطح دوم، روابط بین گروهی شاخص‌ها تحلیل گردید. همبستگی قوی بین شاخص رطوبت خاک و وضعیت پوشش گیاهی ($r=0.82, p<0.001$) نشان‌دهنده تأثیر مستقیم رطوبت خاک بر وضعیت پوشش گیاهی است. همچنین، ارتباط معنادار بین شاخص بارش و خشکسالی کشاورزی ($r=0.79, p<0.001$) بیانگر حساسیت بخش کشاورزی به تغییرات بارش می‌باشد. در سطح سوم، تحلیل روابط چندگانه با استفاده از رگرسیون چندمتغیره انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب شاخص‌های شاخص بارش استاندارد، شاخص رطوبت خاک و سلامت پوشش گیاهی قادر به تبیین ۸۴٪ از تغییرات شاخص خشکسالی چندگانه می‌باشد ($r=0.84, F=245.6, p<0.001$). این یافته بیانگر نقش کلیدی شرایط بارش، رطوبت خاک و وضعیت پوشش گیاهی در تعیین شدت خشکسالی چندمتغیره است. نکته مهم دیگر، همبستگی معنادار بین شاخص شاخص خشکسالی چندگانه و مؤلفه‌های بارش استاندارد، رطوبت خاک و سلامت پوشش گیاهی است که نشان‌دهنده ساختار درهم‌تنیده مؤلفه‌های خشکسالی در اصفهان است. شکل (۶) ضریب همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی را نشان می‌دهد:





شکل (۶): نقشه همبستگی ماهانه (الف) و فصلی (ب) و سالانه (ج) پارامترهای خشکسالی شهر اصفهان

عدم قطعیت در پژوهش‌های مبتنی بر شاخص‌های خشکسالی، به‌عنوان یک عنصر ذاتی و اجتناب‌ناپذیر، نیازمند تحلیل نظام‌مند و چندسطحی است. در پژوهش حاضر، تحلیل عدم قطعیت با رویکردی سیستماتیک در سه سطح مبانی نظری، روش‌شناختی و داده‌محور مورد بررسی قرار گرفته است. در سطح مبانی نظری، چالش‌های بنیادین در تعریف و سنجش پدیده خشکسالی با ضریب اطمینان ۹۵٪ محاسبه گردید. تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که شاخص‌های هواشناسی مانند بارش استاندارد و بارش - تبخیر تعرق استاندارد با خطای استاندارد ± 0.15 و شاخص‌های سنجش از دوری همچون وضعیت پوشش گیاهی و سلامت پوشش گیاهی با خطای استاندارد ± 0.23 همراه بوده‌اند که این میزان خطا در محدوده قابل قبول مطالعات اقلیم‌شناسی قرار دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، تحلیل وضعیت خشکسالی در شهر اصفهان با استفاده از ترکیب شاخص‌های اقلیمی (بارش استاندارد، بارش - تبخیر تعرق استاندارد)، کشاورزی (وضعیت پوشش گیاهی، سلامت پوشش گیاهی، خشکسالی کشاورزی، تبخیر تعرق پوشش گیاهی) و هیدرولوژیک (رطوبت خاک، شاخص بارش، شاخص خشکسالی سطحی و شاخص خشکسالی چندگانه) حاکی از آن است که این پدیده در منطقه مورد مطالعه، ماهیتی چندبعدی، پیشرونده و مزمن داشته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در بیش از ۶۰٪ دوره مورد بررسی، منطقه با درجات مختلف خشکسالی شدید مواجه بوده که این موضوع با نتایج مطالعات نوروبی و محمدی (۱۳۹۵) در مورد خشکسالی در منطقه لنجان اصفهان کاملاً مطابقت دارد؛ آنان نیز با استفاده از شاخص بارش استاندارد و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی به روندی مشابه از خشکسالی‌های فراگیر پی بردند. شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد نیز که مؤلفه‌های تبخیر و تعرق را در ارزیابی وارد می‌کند، نشان داد که خشکسالی‌های ترکیبی (دما-بارش) در فصل‌های گرم شدت یافته‌اند. از منظر شاخص خشکسالی کشاورزی، نتایج مطالعه نشان داد که عملکرد کشاورزی در سال‌هایی مانند ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ به‌طور محسوسی تحت تأثیر تنش‌های رطوبتی و حرارتی قرار گرفته است. در بُعد هیدرولوژیک نیز، کاهش مقادیر شاخص رطوبت خاک و شاخص بارش در سال‌های خاص مانند ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶، مؤید کاهش رطوبت خاک و بارش تجمعی است که موجب تشدید خشکسالی کشاورزی شد. نکته مهم دیگر، همبستگی معنادار بین شاخص خشکسالی چندگانه و مؤلفه‌های بارش استاندارد، رطوبت خاک و سلامت پوشش گیاهی است که نشان‌دهنده ساختار درهم‌تنیده مؤلفه‌های خشکسالی در اصفهان است. در مجموع، این تحلیل چندشاخصه، نه‌تنها روند خشکسالی در اصفهان را در دو دهه اخیر با دقت بالا ترسیم می‌کند، بلکه

با مقایسه تطبیقی با مطالعات معتبر داخلی، تأیید می‌کند که ترکیب شاخص‌های سنجش از دور و داده‌های زمینی، راهکاری نوین و مؤثر برای درک جامع‌تر پدیده خشکسالی است. یافته‌های این پژوهش می‌توانند مبنایی برای سیاست‌گذاری در حوزه مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی و مقابله با آثار تغییر اقلیم در نواحی خشک و نیمه‌خشک کشور باشند.

منابع

- شریفی، ف.، و کاظمی، ر. (۱۴۰۲). بحرانی شدن منابع آب. مروری بر عوامل، پیامدها و راهکارها. تهران: انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری. ۲۷۲ ص.
- طالبی، ع.، طاهری، ر.، و اسکندری، م. (۱۳۹۰). اثر خشکسالی به عنوان یکی از جنبه‌های تغییر اقلیم بر محصولات آبی کشاورزی، کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. آذر ۱۳۹۰، ۱۷ ص.
- فاضل دهکردی، ل.، سهرابی، ط.، قنایزباف، م. ح.، و قضاوی، ر. (۱۳۹۵). پایش خشکسالی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (MODIS) در مناطق خشک مطالعه موردی مراتع استان اصفهان. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۷(۳)، ۱۷۷-۱۹۰.
- فتوت، ج.، و اسدی زارچ، م. ا. (۱۴۰۳). مقایسه کارایی شاخص‌های خشکسالی RDI، SPI و بارش-تبخیر تعرق استاندارد در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از شاخص سنجش از دور TVDI. مدیریت بیابان. انتشار آنلاین [10.22034/jdmal.2025.2041089.1481](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2041089.1481)
- نوروزی، ا.، و محمدی، ز. (۲۰۱۶). بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و آثار آن بر کشاورزی منطقه لنجان. برنامه‌ریزی فضایی، ۶(۲)، ۹۷-۱۱۶.
- Amarasinghe, A., Chen, C., Van Zwielen, L., and Rashti, M. R. (2024). The role of edaphic variables and management practices in regulating soil microbial resilience to drought- A meta-analysis. *The Science of the total environment*, 912, 169544.
- Aksoy, S., Gorucu, O., and Sertel, E. (2019). Drought monitoring using MODIS derived indices and google earth engine platform. In 2019 8th international conference on agro-geoinformatics (Agro-Geoinformatics) (pp. 1-6). IEEE.
- Camaille, M., Fabre, N., Clément, C., and Ait Barka, E. (2021). Advances in wheat physiology in response to drought and the role of plant growth promoting rhizobacteria to trigger drought tolerance. *Microorganisms*, 9(4), 687.
- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., and Huete, A. (2015). MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 35, 2-33.
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., and Tarpley, J. D. (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
- Eslamian, S., and Jahadi, M. (2019). Monitoring and prediction of drought by Markov chain model based on SPI and new index in Isfahan. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 9(4), 355-365.
- Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D., and Husak, G. (2015). A global satellite-assisted precipitation climatology. *Earth System Science Data*, 7(2), 275-287.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.
- Khanmohammadi, N., Rezaie, H., and Behmanesh, J. (2022). Investigation of drought trend on the basis of the best obtained drought index. *Water Resources Management*, 36(4), 1355-1375.
- Khan, R., and Gilani, H. (2021). Global drought monitoring with big geospatial datasets using Google Earth Engine. *Environmental science and pollution research international*, 28(14), 17244-17264.
- Khan, M. A., Riaz, S., Jiang, H., Qamar, S., Ali, Z., Islamil, M., Nazeer, A., Faisal, M., Satti, S., and Zhang, X. (2022). Development of an assessment framework for the proposed Multi-Scalar Seasonally Amalgamated Regional Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (MSARSPEI) for regional drought classifications in global warming context. *Journal of environmental management*, 312, 114951.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Kogan, F. N. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American meteorological society*, 78(4), 621-636.
- Koohi, S., Azizian, A., and Brocca, L. (2021). Spatiotemporal drought monitoring using bottom-up precipitation dataset (SM2RAIN-ASCAT) over different regions of Iran. *The Science of the total environment*, 779, 146535.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Liu, Y., Shan, F., Yue, H., and Wang, X. (2023). Characteristics of drought propagation and effects of water resources on vegetation in the karst area of Southwest China. *Science of The Total Environment*, 891, 164663.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183)*.
- Nagler, P., Sall, I., Barreto-Muñoz, A., Gómez-Sapiens, M., Nouri, H., Chavoshi Borujeni, S., and Didan, K. (2022). Effect of restoration on plant greenness and water use in relation to drought in the riparian corridor of the Colorado River delta. *Journal of the American Water Resources Association*, 58(5), 746-784.
- Narasimhan, B., and Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and forest meteorology*, 133(1-4), 69-88.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau. Rafiq, M., Cong Li, Y., Cheng, Y., Rahman, G., Zhao, Y., and Khan, H. U. (2023). Estimation of regional meteorological aridity and drought characteristics in Baluchistan province, Pakistan. *Plos one*, 18(11), e0293073.
- Seka, A. M., Zhang, J., Prodhon, F. A., Ayele, G. T., Finsa, M. M., Sharma, T. P. P., and Melesse, A. M. (2022). Hydrological drought impacts on water storage variations: a focus on the role of vegetation changes in the East Africa region. A systematic review. *Environmental science and pollution research international*, 29(53), 80237-80256.

- Tsakiris, G., and Vangelis, H. J. E. W. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European water*, 9(10), 3-11.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Wei, W., Zhang, J., Zhou, J., Zhou, L., Xie, B., and Li, C. (2021a). Monitoring drought dynamics in China using Optimized Meteorological Drought Index (OMDI) based on remote sensing data sets. *Journal of environmental management*, 292, 112733. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112733>.
- Wei, W., Zhang, J., Zhou, L., Xie, B., Zhou, J., and Li, C. (2021b). Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data. *Environmental science and pollution research international*, 28(16), 20408–20425.
- Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, C., and Tong, Q. (2017). Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote sensing of environment*, 190, 96-106.
- Zhu, Y., Wang, W., Singh, V. P., and Liu, Y. (2016). Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection. *The Science of the total environment*, 571, 1058–1068.
- Zou, L., Cao, S., and Sanchez-Azofeifa, A. (2020). Evaluating the utility of various drought indices to monitor meteorological drought in Tropical Dry Forests. *International journal of biometeorology*, 64(4), 701–711.

Assessment of Drought Conditions Using Ground-Based and Remote Sensing Indicators (Case Study of Isfahan City)

Hadi Siasar¹, Negar Nourmahnad^{*2}



Research Article

1. Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University. Tehran, Iran.

hadisiasar@pnu.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University. Tehran, Iran

negar.nourmahnad@pnu.ac.ir

* Corresponding author

Article Code: 2504-1097

Countinus Pagination: 728-743

Received: 15 April 2025

Accepted: 16 June 2025

Online: 09 July 2025

Review speed: 63 days

Citation:

Siasar, H., and Nourmahnad, N. (2024). Assessment of Drought Conditions Using Ground-Based and Remote Sensing Indicators (Case Study of Isfahan City). *Management of Natural Ecosystems*, 4(1), 74-89.

Abstract

Since drought has widespread impacts on water resources, agriculture, and ecosystems, accurate assessment of drought and the use of appropriate tools for its monitoring and management are essential. This study investigated and analyzes drought in Isfahan city between 2000 and 2022 using various indices including TCI (Temperature Condition Index), VCI (Vegetation Condition Index), VHI (Vegetation Health Index), AAI (Agricultural Appropriateness Index), PCI (Precipitation Condition Index), SMCI (Soil Moisture Condition Index), SPI (Standardized Precipitation Index), SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), SDI (Surface Drought Index), and OMDI (Overall Multivariate Drought Index). These indicators were analyzed on monthly, seasonal, and annual scales to assess the changes and fluctuations of drought in the region. The results indicate that the SPEI index was higher in during the warm seasons compared to the cold seasons. This index also recorded the lowest and highest values in 2003 and 2005, respectively, over the past two decades. Based on the PCI and SPI indices, more than 80% of the region was experiencing precipitation deficits in 2000. The SDI also showed that from 2000 to 2020, drought stresses increased, with over 90% of Isfahan's areas facing severe drought stress. The VHI index indicated that in 2000 and 2017, approximately 82% and 67% of vegetation cover were damaged due to temperature stress, significantly reducing its health. Finally, the results of this study show that drought has occurred as a multidimensional phenomenon in Isfahan with different intensities during the last two decades and this region continues to face persistent drought. These results can help in management decision-making to reduce the effects of drought and improve the management of water resources and agriculture.

Key Words:

Drought indices, Vegetation cover, Water resources, Agriculture.