DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2026.4246

ارزیابی اثرات خشکسالی بر پویایی مراتع استان اردبیل با بهره‌گیری از شاخص‌های SPI و NDVI

(مقالهٔ پژوهشی)

۱- بهروز سبحانی*، استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
sobhani@uma.ac.ir
۲- سعیده عینی، دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳- امیررضا سبحانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یک مخاطره فراگیر اقلیمی، تأثیرات عمیقی بر پایداری و پویایی اکوسیستم‌های مرتعی دارد. هدف از پژوهش حاضر، پایش و تحلیل اثرات خشکسالی هواشناسی بر پویایی پوشش‌گیاهی مراتع استان اردبیل در طول فصل رشد است. بدین منظور، ابتدا روند بارش ایستگاه‌های منتخب هواشناسی با استفاده از آزمون من-کندال ارزیابی و شاخص بارش استاندارد (SPI) در یک دوره ۲۴ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه محاسبه گردید. سپس، وضعیت پویایی پوشش‌گیاهی با بهره‌گیری از تصاویرلندست و شاخص تفاضل نرمال پوشش‌گیاهی (NDVI) استخراج و درنهایت، با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون، روابط میان شاخص‌های خشکسالی و وضعیت پوشش‌گیاهی مرتعی تحلیل شد. نتایج نشان داد که سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۸۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۸۷، پرتکرارترین سال‌های وقوع خشکسالی در منطقه بوده‌اند. ازنظر مکانی، ایستگاه مشکین‌شهر بیشترین و ایستگاه پارس‌آباد کمترین تعداد دفعات خشکسالی را تجربه کرده‌اند. همچنین، تحلیل شدت خشکسالی نشان داد ایستگاه خلخال با خشکسالی‌های شدید و خیلی شدید و ایستگاه پارس‌آباد با خشکسالی‌های ملایم مواجه بوده‌اند. بررسی شاخص NDVI نشان داد که در بازه زمانی آبان تا اردیبهشت، فصل رشد مناطق قشلاقی و فروردین تا شهریور، فصل رشد مناطق ییلاقی استان است؛ به‌طوری‌که اردیبهشت (با حداکثر مقدار) و مردادماه (با حداقل مقدار) پیک‌های شاخص NDVI را نشان می‌دهند. بررسی همبستگی میان شاخص‌های خشکسالی و پوشش‌گیاهی نشان داد که مقدار بارش با NDVI همبستگی مثبت و معناداری ۰.۷۷ (با سطح اطمینان ۰/۰۱) دارد. در مقابل، SPI یک‌ماهه با همبستگی متوسط حدود ۲۶ درصد را با NDVI نشان می‌دهد که فاقد سطح اطمینان است. به‌طورکلی، تغییرات پوشش‌گیاهی مراتع استان اردبیل از الگوی بارش تأثیر می‌پذیرد.

واژه‌های کلیدی: پوشش زمین، مدل‌سازی مکانی، مدیریت منابع طبیعی، آزمون من-کندال.

مقدمه

خشکسالی، به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های اقلیمی، تأثیرات گسترده‌ای بر جوامع بشری، امنیت غذایی و پایداری اکوسیستم‌ها، به‌ویژه مراتع، می‌گذارد [۳۲]. مراتع، به‌عنوان منبع اصلی علوفه و حفظ‌کننده تنوع زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌شدت در برابر نوسانات اقلیمی آسیب‌پذیر هستند [۱۳]. در ایران که به‌دلیل موقعیت جغرافیایی در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد، مدیریت پایدار منابع طبیعی به‌شدت وابسته به پایش دقیق و زودهنگام اثرات کمبود بارش بر پوشش‌گیاهی است، بنابراین ارزیابی خشکسالی نیازمند استفاده از شاخص‌های چندوجهی است [۱۲].

در استان اردبیل باوجود دارا بودن پهنه‌های وسیع پوشش‌گیاهی مرتعی به علت توپوگرافی آن، پژوهش یکپارچه‌ای که به بررسی هم‌زمان اثر خشکسالی با استفاده از شاخص اقلیمی پرداخته باشد انجام‌نشده است. اغلب تحقیقات صرفاً به عوامل ایستای محیطی (ارتفاع، خاک) توجه داشته‌اند. شاخص[1] SPIبه‌عنوان یک معیار استاندارد و انعطاف‌پذیر بر پایه داده‌های بارش، به‌طور گسترده برای کمی سازی شدت و مدت خشکسالی‌های اقلیمی مورداستفاده قرار می‌گیرد و از سوی دیگر، شاخص[2] NDVIبرای ارزیابی و پویایی پوشش گیاهی در مقیاس وسیع کاربرد دارد که در بازتاب وضعیت گیاهان سطحی نقش مؤثر دارد [۳۰، ۱۹]. نوسانات اقلیمی به‌ویژه خشکسالی به‌عنوان عاملی محیطی، تأثیری عمیق و برگشت‌ناپذیر بر پایداری و عملکرد اکوسیستم‌های مرتعی دارد؛ ازاین‌رو، درک نحوه پاسخ‌دهی پوشش‌گیاهی به نوسانات اقلیمی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ضروری است [۱، ۱۷]. پوشش‌گیاهی نقشی اساسی در حفاظت از خاک و تعادل چرخه‌های هیدرولوژیکی ایفا می‌کند و تغییرات آن، معیشت جوامع وابسته به مراتع را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴، ۲۰، ۲۷، ۳۴]. مطالعات متعددی در داخل و خارج از کشور در زمینه بررسی روابط اقلیم و پوشش‌گیاهی انجام‌شده است. ازجمله؛ در استان اردبیل، اثر دما و بارندگی بر تولید مراتع منطقه هیر و نئور ارزیابی و رابطه معنی‌داری میان این عوامل اقلیمی و تولید پوشش مرتعی گزارش شد [۷، ۳۷]. قربانی و همکاران [۱۵] سلامت رویشگاهی مراتع شمال سبلان را در سه‌طبقه ارتفاعی بررسی کردند و دریافتند که مراتع طبقه سوم در ارتفاعات (۲۱۰۰ تا ۲۷۰۰ متر از سطح دریا) نسبت‌به سایر طبقات وضعیت سلامت بهتری دارند. همچنین، در مطالعه‌ای تأثیر عوامل فیزیوگرافی و خصوصیات خاک بر تنوع و غنای گونه‌ای در مراتع شهرستان نمین بررسی شد که نتایج حاکی از نقش غالب ویژگی‌های توپوگرافی بر غنای گونه‌ای بود [۳۶]. در سال‌های اخیر استفاده از قابلیت‌های تصاویر ماهواره‌ی برای پایش تغییرات پوشش‌گیاهی افزایش‌یافته است که در سال‌های اخیر استفاده از قابلیت‌های تصاویر ماهواره‌ی برای پایش تغییرات پوشش‌گیاهی افزایش‌یافته است که در حوزه سنجش‌ازدور [۱۱] با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، همبستگی معنی‌داری (در سطح یک درصد) میان شاخص بارش استانداردشده (SPI) در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه با شاخص گیاهی NDVI در استان ایلام یافتند. کارآمدی شاخص NDVI در پایش تغییرات تیپ‌های گیاهی در مطالعات [۱۶] نیز تأییدشده است. تحقیقات [۳۸] با استفاده از داده‌های چند زمانه لندست (سنسورهای ETM+ و OLI)، کاهش معنی‌دار پوشش‌گیاهی حوضه آبریز کشکان را تحت تأثیر خشکسالی گزارش کردند و بر توانایی ترکیب شاخص‌های NDVI و SPI در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر تأکید نمودند. نتایج مطالعات [۳،۲۹] در مناطق مرکزی ایران، بیشترین همبستگی را میان شاخص‌های SPI و NDVI (در سطح یک درصد) گزارش کردند. در مطالعه‌ای [۴۴] با استفاده از شاخص‌های مذکور، ضریب (R^2) برابر با ۸۵ درصد میان شاخص SPI و میانگین درصد پوشش‌گیاهی مراتع به دست آوردند. همچنین در پژوهشی [۴۲] تغییرات پوشش‌گیاهی مرتعی را با استفاده از شاخص NDVI در شهرستان کوثر استان اردبیل انجام داده‌اند. نتیجه بیانگر آن است در منطقه پوشش‌گیاهی رو به کاهش است. مطالعات خارجی مطابق با پژوهش‌های داخلی، بر نقش کلیدی خشکسالی در کاهش تراکم پوشش‌گیاهی در نواحی مرکزی و شرق ایران و آسیای مرکزی تأکیددارند [۲۲، ۲۸، ۴۱]. همچنین در پژوهشی [۲۰] ارزیابی تغییرات پوشش‌گیاهی را با شاخص‌هایSPI و SPEI در آسیای مرکزی (قزاقستان، قیرقزستان، ازبکستان، ترکمنستان و تاجیکستان) مطالعه نمودند و نتایج نشان داد که تأثیر مدت خشکسالی بر تغییرات پوشش‌جنگلی ۲۸ درصد و بر پوشش‌گیاهی ۵۶ درصد

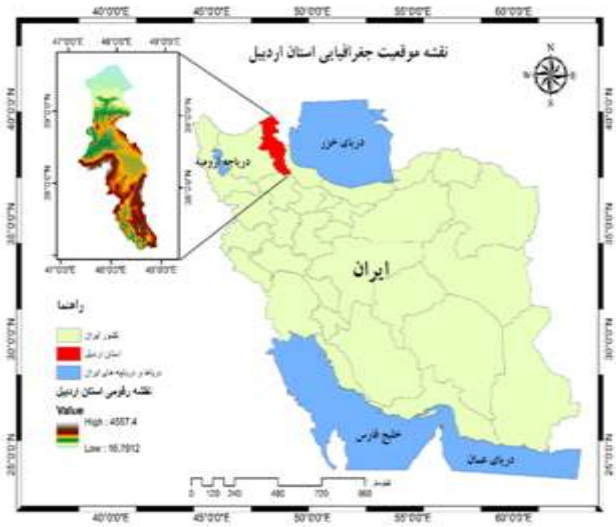
[1] Standardized Precipitation Index
[2] Normalized Difference Vegetation Index

است، در بین کشورهای موردمطالعه قزاقستان با حداکثر خشکسالی مواجه بوده است. در مطالعه دیگر [۳۳] مطالعه پایش خشکسالی را با دو شاخص NDVI و SPI برای پوشش‌گیاهی انجام دادند و به این نتیجه رسیده‌اند که همبستگی بالایی بین دو شاخص در شرایط مکانی و زمانی می‌تواند وجود داشته باشد. همچنین پژوهش‌های متعددی در چین، به تحلیل مکانی خشکسالی و ارزیابی تأثیر آن بر انواع پوشش‌گیاهی مرتعی با استفاده از سنجش‌ازدور پرداخته‌اند [۴۳، ۴۵]. استان اردبیل با داشتن پهنه‌های وسیع مرتعی، نیازمند درک این ارتباط متقابل برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از محاسبه‌ی همبستگی مکانی-زمانی بین شاخص‌های SPI و NDVI، به مدل‌سازی تأخیر پاسخ و تهیه‌ی نقشه‌های خشکسالی در پهنه‌های مرتعی استان می‌پردازد. این رویکرد نه‌تنها خلأ روش‌شناختی موجود در منطقه را پر می‌کند، بلکه ابزاری عملیاتی برای مدیریت پایدار مراتع و کاهش خسارت‌های ناشی از خشکسالی در اختیار تصمیم گیران استانی قرار خواهد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

استان اردبیل با مساحتی بالغبر ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع، در شمال غربی ایران و ازنظر موقعیت جغرافیایی بین ′۱۰ °۳۷ تا ′۷۱ °۳۹ عرض شمالی و ′۲۸ °۴۷ تا ′۹۲ °۴۸ طول شرقی واقع‌شده است (شکل ۱). این استان از شمال به جمهوری آذربایجان، از شرق به استان گیلان، از جنوب به استان زنجان و از غرب به استان آذربایجان شرقی محدود می‌شود. اقلیم استان اردبیل به‌دلیل وجود ارتفاعات سبلان، باغرو و صلوات داغ، تنوع اقلیمی قابل‌توجهی دارد و از اقلیم نیمه مرطوب سرد در مناطق کوهستانی تا اقلیم خشک و نیمه‌خشک در مناطق دشت متغیر است. میانگین بارندگی سالانه در یک دوره ۲۴ ساله (۱۳۵۷-۱۳۹۹) در نقاط مختلف استان از ۲۵۰ میلی‌متر در دشت مغان تا بیش از ۴۰۰ میلی‌متر در دامنه‌های سبلان متغیر بوده و میانگین دمای سالانه نیز بین ۸ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد است. مراتع استان اردبیل با مساحتی حدود ۸۰۰ هزار هکتار، یکی از مهم‌ترین مناطق مرتعی کشور محسوب می‌شوند که از تنوع گونه‌های گیاهی و ارزش اکولوژیکی بالایی برخوردارند [۱۰ و ۲۶].



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

داده‌های هواشناسی

داده‌های بارش ماهانه مربوط به چهار ایستگاه سینوپتیک منتخب در استان اردبیل (اردبیل، خلخال، مشکین‌شهر و پارس‌آباد) طی یک دوره آماری ۲۴ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. این داده‌ها جهت پایش خشکسالی، براساس شاخص بارش استانداردشده (SPI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه پردازش و تحلیل شدند.

داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش، به‌منظور بررسی تغییرات، تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده ETM+ و سنجنده OLI/TIRS) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و دوره بازدید ۱۶ روزه برای بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) تهیه شد. جهت تضمین دقت تحلیل، تنها تصاویری که میزان پوشش ابر آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد بود و در بازه فصل رشد قرار داشتند، مورداستفاده قرار گرفتند.

شاخص استانداردشده بارش (SPI)

شاخص SPI یکی از شاخص‌های پایش خشکسالی است که در آن مقیاس زمانی برای پایش دوره مدنظر قرارمی گیرد که آن به شرح زیر است [۴۲، ۴، ۲۳].

- استخراج داده‌های بارندگی ماهانه و تصحیح نواقص آماری: در این تحقیق به‌منظور بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی در منطقه موردمطالعه از آمار بارندگی ایستگاه چهار ایستگاه سینوپتیک که دارای دوره آماری ۲۴ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹) است، استفاده گردید.

- برازش توزیع آماری گاما بر مجموعه‌های بارندگی حاصل از مرحله قبل و محاسبه احتمالات تجمعی توزیع گاما: مجموعه‌های زمانی حاصل از مرحله قبل با توزیع گاما برازش داده می‌شود. تابع توزیع گاما به‌صورت تابع چگالی احتمال یا فراوانی زیر تعریف‌شده است (رابطه ۱).

رابطه (۱):
$$G(a) = \frac{1}{B^a.\Gamma(a)} . X^{a-1}.e^{-X/B}$$

در رابطه (۱):

a>0، a پارامتر شکل است.

β >0، β پارامتر مقیاس است.

X>0، X پارامتر بارندگی و

$\Gamma^{(a)}$، تابع گاما بوده و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

رابطه (۲):
$$\Gamma(a)=\int_0^\infty y^{a-1}e^{-y}dy$$

- تغییر شکل هم احتمال توزیع تجمعی گاما به نرمال: پس از محاسبه تابع تجمعی کل، تغییر شکل هم احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z یا (SPI) با میانگین صفر و واریانس یک انجام می‌شود.

- استخراج متغیر تصادفی Z یا (SPI) مربوط به هر مقدار بارندگی در سطوح هم احتمال از منحنی احتمالات تجمعی نرمال با استفاده از رابطه (۳).

رابطه (۳):
$$SPI = \frac{P_i - \acute{p}}{SD}$$

در رابطه (۳)Pi، مقدار بارندگی در مقیاس i ام؛ $\acute{p}$ مقدار متوسط بارندگی در دوره آمار و SD انحراف معیار. در جدول (۱) کلاس کیفی شاخص SPI ارائه‌شده است [۲۴].

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی براساس شاخص SPI در نرم‌افزار DIP

کلاس	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی ضعیف	خشکسالی نرمال	ترسالی ضعیف	ترسالی متوسط	ترسالی شدید
SPI	-۲>	-۲ تا -۱/۵	-۱/۵ تا -۱	-۱ تا ۱	۱ تا ۱/۵	۱/۵۰ تا ۲	۲<

شاخص NDVI

به‌منظور ارزیابی وضعیت پوشش مرتعی به تنش‌های محیطی، از شاخص تفاضل نرمال شده پوشش‌گیاهی (NDVI) استفاده شد. داده‌های موردنیاز از تصاویر ماهواره‌ای لندست TM و OLI با دقت ۳۰ متر تهیه گردید. در این پژوهش، شاخص NDVI به‌عنوان یک متغیر پاسخ برای پایش تغییرات تراکم پوشش‌گیاهی مرتع در طول دوره موردمطالعه در نظر گرفته شد. درنهایت، روند تغییرات زمانی این شاخص با شاخص بارش استانداردشده (SPI) ترکیب گردید تا میزان حساسیت و واکنش پوشش مرتعی به نوسانات بارش و تداوم خشکسالی‌ها به‌طور دقیق تحلیل شود. مقادیر بالاتر NDVI پوشش سبز و کمترین رقم NDVI خاک (سطح لخت بدون پوشش) است. ولی در تئوری این ارزش‌ها بین ۱ و ۱- است. برای محاسبه این شاخص از رابطه (۴) استفاده گردید [۱،۲۵ و ۱۸].

رابطه (۴):

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

که در رابطه (۴) NIR، باند انعکاسی فرا سرخ نزدیک، RED، باند انعکاسی قرمز می‌باشند.

آزمون من کندال

روش آزمون من-کندال برای بررسی روند تغییرات پوشش‌گیاهی در طول دوره مطالعه استفاده می‌گردد [۲۴]. ارزیابی آماره آزمون من کندال، براساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$S=\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} sgn(x_j - x_{i)}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i)= \begin{cases} +, if\, x_j - x_i > 0 \\ 0, \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۵)، S (آماره من کندال) نتیجه نهایی نشان‌دهنده جهت روند است. اگر S > 0 باشد روند مثبت (افزایشی) و اگر S< 0 منفی (کاهشی) است. علامت $\text{sgn}(x_j - x_i)$ تابع نقش مقایسه‌گر را برای هر جفت از داده‌ها j, i، آن‌ها را باهم مقایسه می‌کند. اگر مقدار در زمان آینده (x_j) بزرگتر از (x_i) باشد مقدار 1+ می‌گیرد. اگر مقدار در زمان آینده کمتر از زمان گذشته باشد مقدار 1- می‌گیرد یعنی (روند رشد نزولی) است. اگر باهم برابر باشد صفر می‌شود. در نمودار رتبه‌ای من کندال، اگر نقاط u و u' شروع نمودار یکدیگر را قطع کنند نشانه معنی‌داری روند است، اما اگر این نقاط موازی یکدیگر قرار بگیرند سری از نوع ایستا است. همچنین هرگاه u بیشتر از ۱/۹۶ باشد روند معنی‌دار است. u+ روند افزایش و u- روند کاهشی را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر اگر منحنی u از خطوط بالا و پایین معنی‌دار (۱/۹۶) خارج شود روند وجود دارد. اگر منحنی u و u' در محدوده معنی‌دار تلاقی بکنند ولی خارج نشوند بدین معنی است که فقط تغییر ناگهانی در میانگین رخداده است ولی روند وجود ندارد [۱۷ و ۱۴]..

ضریب همبستگی پیرسون (R)

به‌منظور بررسی روابط میان شاخص‌های خشکسالی و وضعیت پوشش‌گیاهی، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. برای تعیین معناداری آماری ضرایب به‌دست‌آمده، مقدار p–valuep محاسبه گردید. مطابق با استانداردهای آماری، در این مطالعه سطح معناداری برابر با a=۰/۰۵ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، ضرایبی که دارای p–valuep کمتر از ۰/۰۵ بودند، به‌عنوان روابط معنادار آماری در نظر گرفته شدند. استفاده از این ضریب زمانی صورت می‌گیرد که سطوح سنجش هر دو متغیر مستقل و وابسته، فاصله‌ای یا نسبی باشد [۳۸، ۲۱]. برای محاسبه آن از رابطه (۶) استفاده می‌شود.

رابطه (۶)

$$R = \frac{\sum(X - \dot{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \dot{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

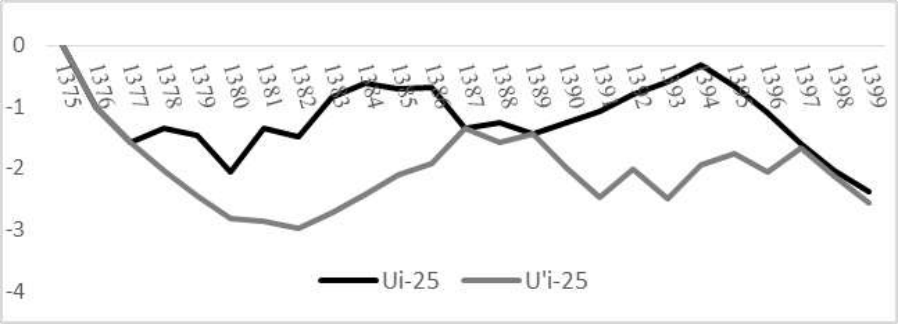
مقدار این همبستگی، بین ۱ تا ۱- است. مقادیر مثبت نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالا و مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی همبستگی پایین است. مقدار همبستگی صفر، نشان‌دهنده‌ی عدم همبستگی بین دو متغیر X و Y است [۷].

نتایج

تحلیل روند بارش با روش من کندال

۱- ایستگاه اردبیل

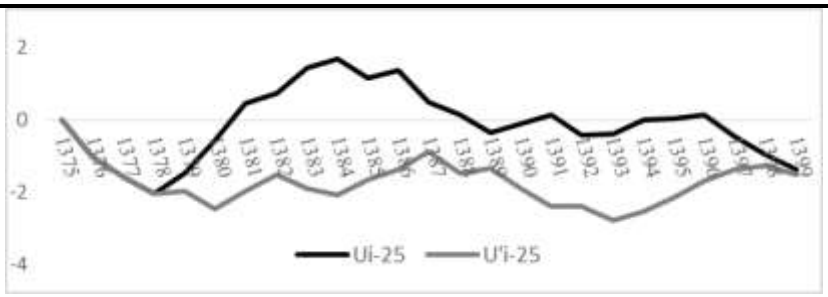
نتایج آزمون من-کندال برای ایستگاه اردبیل نشان‌دهنده روند کاهشی معنادار در سری زمانی بارش سالانه طی بازه ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ است. تقاطع خطوط برازش دهنده u و u' در ابتدای دوره رخداده و آماره آزمون از حد بحرانی ۱/۹۶± فراتر رفته است که بیانگر وجود روندی با اطمینان آماری بالا (سطح معناداری ۹۵ درصد) است. الگوی تغییرات در این ایستگاه به‌طور کامل کاهشی بوده و هیچ دوره افزایشی در آن مشاهده نمی‌شود (شکل ۲). این کاهش تدریجی اما مستمر بارش، زنگ خطری برای منابع آب سطحی و زیرزمینی اردبیل محسوب می‌شود و با گزارش‌های محلی درباره افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت اردبیل هماهنگ است. الگوی تغییرات در این ایستگاه به‌طور کامل کاهشی بوده و هیچ دوره افزایشی در آن مشاهده نمی‌شود (شکل ۲). نتایج آزمون من-کندال برای سری زمانی بارش سالانه ایستگاه اردبیل در بازه آماری ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹، حاکی از وجود یک‌روند نزولی معنادار (با اطمینان ٪۹۵) در سطح آماری است. بررسی نمودار آزمون تغییر نقطه، نشان می‌دهد که تقاطع آماره‌های u و u′ در ابتدای دوره مطالعاتی رخداده است که بیانگر آغاز تغییر روند در آن بازه زمانی است. همچنین، آماره آزمون در بخش عمده‌ای از دوره موردمطالعه، از حد آستانه بحرانی (۱/۹۶±) فراتر رفته که مؤید ثبات و تداوم روند کاهشی در بارش‌های سالانه این ایستگاه است (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار من کندال ایستگاه اردبیل

۲- ایستگاه خلخال

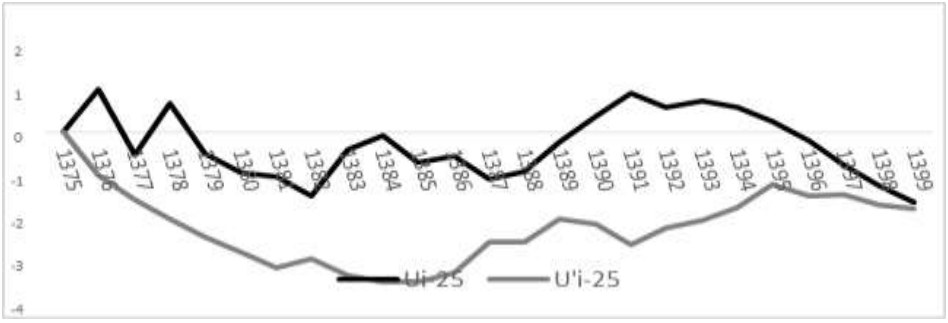
در ایستگاه خلخال از آزمون من-کندال برای بررسی تغییرات زمانی روند بارش طی دوره‌ی ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ استفاده شد (شکل ۳). براساس نمودار، تقاطع منحنی‌های آماره‌ی u و u′ در سال‌های ابتدایی دوره مشاهده می‌شود که بیانگر وقوع یک نقطه‌ی تغییر در رفتار سری زمانی بارش است. همچنین در بازه‌ی تقریبی ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۵، آماره‌ی u از حد بحرانی ۱.۹۶± عبور کرده و بنابراین، روند افزایشی در آن بخش از دوره ازنظر آماری در سطح اطمینان ٪۹۵ قابل استنتاج است. با عبور از این بازه، جهت روند به سمت مقادیر منفی تغییریافته و آماره‌ی آزمون در ادامه‌ی دوره عمدتاً در محدوده‌ی کریدور اطمینانِ منفی یا رو به خروج از آن قرار می‌گیرد که مؤید تقویت روند کاهشی و تداوم آن پس از نقطه‌ی تغییر است.



شکل ۳- نمودار من کندال ایستگاه خلخال

۳-ایستگاه مشکین‌شهر

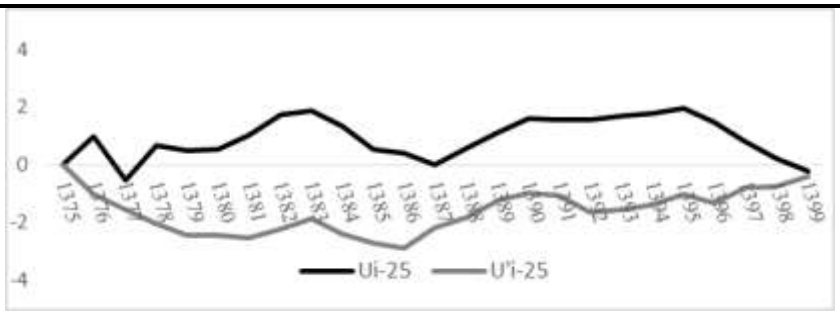
نتایج حاصل از آزمون من-کندال در ایستگاه مشکین‌شهر نشان می‌دهد که سری زمانی بارش سالانه در طول دوره‌ی آماری، فاقد روند معنادار آماری (در سطح اطمینان ٪۹۵) است. بررسی آماره‌های آزمون نشان می‌دهد که مقدار u در سرتاسر دوره‌ی موردمطالعه، در محدوده‌ی بحرانی ۱/۹۶± محصور مانده و منحنی‌های u و u′ تقاطع مشخصی ندارند؛ اگرچه در نمودار شکل ۴، تغییرات مقادیر در نیمه‌ی نخست دوره، یک رفتار نوسانی مثبت و در سال‌های اخیر گرایش به سمت مقادیر منفی را نشان می‌دهد، درنتیجه، سری زمانی بارش در ایستگاه مشکین‌شهر را می‌توان دارای رفتاری نوسانی/ایستا دانست.



شکل ۴- نمودار من کندال ایستگاه مشکین‌شهر

۴-ایستگاه پارس‌آباد

بررسی سری زمانی بارش سالانه ایستگاه پارس‌آباد با استفاده از آزمون من-کندال، نشان‌دهنده عدم وجود روند معنادار آماری (در سطح اطمینان ٪۹۵) در طول دوره‌ی آماری موردمطالعه است. آماره آزمون u در سرتاسر دوره، در محدوده‌ی بحرانی ۱/۹۶± باقی‌مانده و هیچ‌گونه تقاطع مشخصی بین منحنی‌های u و u′ مشاهده نمی‌شود. علی‌رغم این‌که روند کلی بارش در اکثر سال‌های دوره، تمایل به افزایش داشته است (همان‌طور که در نمودار شکل ۵ قابل‌مشاهده است)، این افزایش نتوانسته ازنظر آماری به سطح معناداری ۵ درصد برسد. قابل‌ذکر است که از سال ۱۳۹۵ به بعد، گرایش روند به سمت مقادیر منفی مشاهده می‌شود؛ هرچند این تغییر جهت ازنظر آماری معنادار نیست، اما می‌تواند به‌عنوان یک نشانه‌ی احتمالی از تغییرات آتی در رژیم بارش منطقه تلقی شود. با توجه به این مشاهدات، سری زمانی بارش پارس‌آباد را می‌توان دارای رفتاری نوسانی و ایستا در نظر گرفت که تغییرات مشاهده‌شده، بیشتر بازتاب‌دهنده‌ی نوسانات طبیعی است.



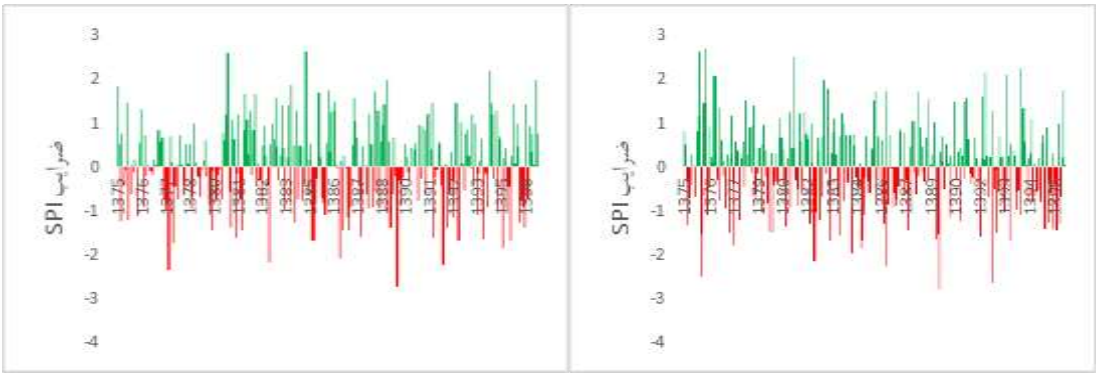
شکل ۵- نمودار من کندال ایستگاه پارس‌آباد

ارزیابی شدت و تداوم خشکسالی (SPI)

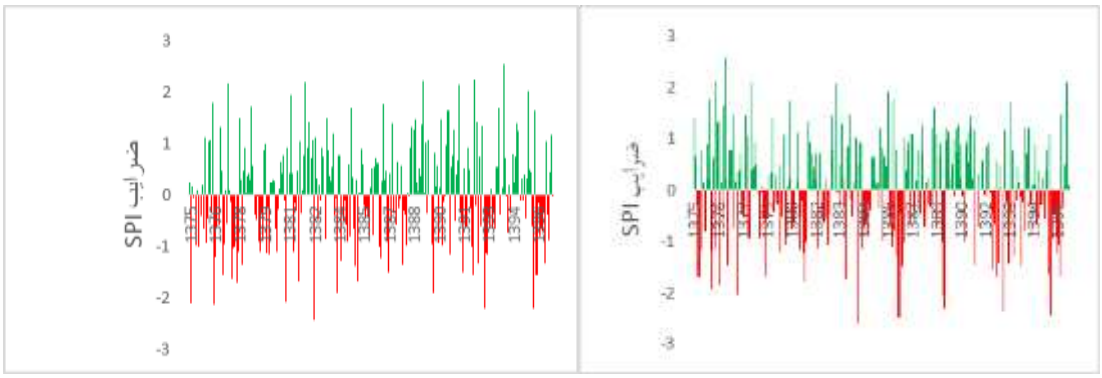
در این مطالعه، شاخص بارش استاندارد (SPI) جهت تحلیل شدت، تداوم و فراوانی رخدادهای خشکسالی به کار گرفته شد [۲۲]. شدیدترین خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که شاخص SPI دارای مقادیر عددی ۰/۴۹- یا کمتر را نشان دهد و هرچه به سمت عدد ۲- نزدیک شود برشدت خشکسالی افزوده می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه نشان داد که سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۰، ۱۳۸۵، ۱۳۸۷، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ بیشترین تعداد وقوع خشکسالی را در ایستگاه‌های موردمطالعه داشته‌اند و در میان طبقات مختلف، خشکسالی ملایم دارای بالاترین فراوانی است.

تحلیل خشک‌سالی در مقیاس یک‌ماهه

شکل‌های ۶ و ۷ نمونه‌ای از نتایج SPI یک‌ماهه را نمایش می‌دهند. با توجه به نوسانات بالای بارش‌های ماهانه، مقادیر این شاخص نیز تغییرات فصلی فراوانی را دارند. تحلیل فراوانی خشکسالی در مقیاس یک‌ماهه حاکی از آن است که ماه آبان بیشترین وقوع خشکسالی خیلی شدید، ماه‌های خرداد و مهر بیشترین وقوع خشکسالی شدید و اردیبهشت و آذر بیشترین رخداد خشکسالی ملایم را در مقیاس یک‌ماهه تجربه کرده‌اند؛ که با نتایج مطالعات [۱۹، ۳۹] که در غرب و جنوب غربی ایران به‌عمل‌آمده است همخوانی دارد. از منظر توزیع مکانی، در ایستگاه مشکین‌شهر با ثبت ۸/۲۳ درصد در طبقه خشکسالی بسیار شدید، بالاترین نسبت فراوانی را در این کلاس به خود اختصاص داده که بیانگر حساسیت اقلیمی و آسیب‌پذیری بالا در کوتاه‌ترین مقیاس زمانی است. در مقابل، ایستگاه اردبیل با ۱۷/۲۸ درصد فراوانی در طبقه شدید و ایستگاه پارس‌آباد با ۲۸/۵۸ درصد در طبقه متوسط، به‌ترتیب الگوهای میانی و تعدیل‌یافته‌تری از خشکسالی را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، ایستگاه خلخال با ۵۳/۱۷ درصد وقوع در طبقه ملایم، بیش‌ترین سهم را در این کلاس داشته و در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها، شرایط مساعدتری را تجربه می‌کند؛ به‌گونه‌ای که خشکسالی در این منطقه عمدتاً با شدت‌های پایین‌تر همراه بوده است. (جدول ۲).



شکل ۶- تغییرات شاخص SPI یک‌ماهه در ایستگاه اردبیل (راست) و خلخال (چپ)



شکل ۷- تغییرات شاخص SPI یک‌ماهه در ایستگاه مشکین‌شهر (راست) و پارس‌آباد (چپ)

جدول ۲- درصد فراوانی وقوع خشکسالی SPI یک‌ماهه ایستگاه‌های موردمطالعه استان اردبیل

	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی ملایم
اردبیل	۶/۱۸	۱۷/۲۸	۲۷/۱۶	۴۹/۳۸
خلخال	۶/۳۲	۱۳/۹۳	۲۶/۵۸	۵۳/۱۷
مشکین‌شهر	۸/۲۳	۱۴/۱۲	۲۸/۲۳	۴۹/۴۲
پارس‌آباد مغان	۷/۷۹	۱۴/۲۹	۲۸/۵۷	۴۹/۳۵

تحلیل خشکسالی در مقیاس سه‌ماهه

در این بازه، شاخص SPI بازتاب‌دهنده نوسانات بارش تجمعی سه‌ماهه است. طبق داده‌های جدول ۳، ماه‌های آذر، آبان، اردیبهشت و شهریور بیشترین فراوانی رخدادهای خشکسالی را در طبقات مختلف به خود اختصاص داده‌اند. در این میان، سال ۱۳۸۵ با بالاترین میزان تکرار خشکسالی در ایستگاه‌های موردمطالعه شناخته شد. از منظر توزیع مکانی، ایستگاه خلخال با فراوانی ۸/۶۹ درصد در کلاس خشکسالی بسیار شدید، بالاترین نسبت وقوع را در این طبقه به خود اختصاص داده است. در قیاس با این وضعیت، ایستگاه پارس‌آباد با ۱۸/۰۵ درصد در طبقه شدید و ایستگاه اردبیل با ۴۱/۶۶ درصد در طبقه متوسط، به‌ترتیب شدت‌های میانی و تعدیل‌یافته‌تری از خشکسالی را تجربه می‌کنند. در مقابل، ایستگاه مشکین‌شهر با ثبت ۴۴/۸۷ درصد از فراوانی‌ها در طبقه ملایم، کم‌ترین شدت خشکسالی را در میان ایستگاه‌های موردمطالعه نشان می‌دهد و از شرایط نسبتاً مساعدتری برخوردار است.

جدول ۳- درصد فراوانی وقوع خشکسالی SPI سه‌ماهه ایستگاه‌های موردمطالعه استان اردبیل

	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی ملایم
اردبیل	۵/۵۶	۸/۳۳	۴۱/۶۶	۴۴/۴۵
خلخال	۸/۶۹	۱۵/۹۴	۳۹/۱۴	۳۶/۲۳
مشکین‌شهر	۷/۶۹	۱۲/۸۲	۳۴/۶۲	۴۴/۸۷
پارس‌آباد مغان	۸/۳۴	۱۸/۰۵	۲۹/۱۶	۴۴/۴۵

تحلیل خشک‌سالی مقیاس شش‌ماهه

بازه شش‌ماهه به‌دلیل هم‌پوشانی با دوره رشد گیاهان، شاخصی تعیین‌کننده برای ارزیابی خشک‌سالی کشاورزی است. در بازه آماری ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹، تحلیل فراوانی نشان داد که بیشترین وقوع خشکسالی در ماه‌های آذر، دی، فروردین، اردیبهشت، مهر و بهمن تمرکز دارد؛ به‌گونه‌ای که سال ۱۳۹۶ ازنظر تکرارپذیری الگوهای خشکسالی، بیشترین فراوانی را داشته است (جدول ۴). تحلیل مکانی بیانگر آن است که ایستگاه مشکین‌شهر با غلبه خشک‌سالی‌های شدید، ایستگاه خلخال با رخدادهای متوسط و ایستگاه‌های اردبیل و پارس‌آباد با فراوانی بیشتر خشکسالی ملایم، ساختار خشکسالی متفاوتی را در استان به نمایش می‌گذارند. تحلیل مکانی بیانگر آن است ایستگاه مشکین‌شهر با ثبت ۸/۱۱ درصد از فراوانی وقوع، بالاترین سهم را در طبقه خشکسالی بسیار شدید به خود اختصاص داده است. در سوی دیگر، ایستگاه خلخال با میزان ۲۴/۶۵ درصد در طبقه خشکسالی شدید، شرایط بحرانی اما با شدت کم‌تری نسبت‌به مشکین‌شهر را نشان می‌دهد. الگوی خشکسالی در ایستگاه پارس‌آباد با ثبت ۳۳/۷۵ درصد در طبقه متوسط، بیانگر وضعیت میانی و تعدیل‌یافته‌تری است. در مقابل، ایستگاه اردبیل با فراوانی ۵۵/۲۹ درصد در طبقه خشکسالی ملایم، بیشترین سهم را در این کلاس داشته که نشان از قرارگیری این منطقه در طیف مساعدتر خشکسالی و مواجهه با ناهنجاری‌های با شدت پایین‌تر دارد.

جدول ۴- درصد فراوانی وقوع خشکسالی SPI شش‌ماهه ایستگاه‌های موردمطالعه استان اردبیل

	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی شدید	خشکالی متوسط	خشکسالی ملایم
اردبیل	۳/۵۲	۱۷/۶۵	۲۳/۵۴	۵۵/۲۹
خلخال	۷/۲۴	۲۴/۶۵	۲۰/۲۸	۴۷/۸۳
مشکین‌شهر	۸/۱۱	۱۷/۵۶	۲۹/۷۴	۴۴/۵۹
پارس‌آباد مغان	۳/۷۵	۱۱/۲۵	۳۳/۷۵	۵۱/۲۵

تحلیل خشکسالی در مقیاس نه‌ماهه

در تحلیل بلندمدت نه‌ماهه الگوی فراوانی رخدادها متفاوت بوده و ماه‌های شهریور، آبان و اسفند به‌عنوان ماه‌های بحرانی ازنظر خشکسالی خیلی شدید شناسایی شدند. همچنین، ماه‌های خرداد و دی در طبقات شدید و متوسط بیشترین سهم را داشته‌اند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که سال ۱۳۸۵ در مقیاس نه‌ماهه نیز سهم قابل‌توجهی در وقوع خشکسالی استان داشته است. براساس (جدول ۵)، ایستگاه خلخال با ثبت ۱۰/۵۲ درصد از فراوانی وقوع، بالاترین سهم را در طبقه خشکسالی بسیار شدید به خود اختصاص داده است که مبین حساسیت اقلیمی و آسیب‌پذیری قابل‌توجه این منطقه در مواجهه با تنش‌های فرین خشکی محسوب می‌شود. در قیاس با این وضعیت، ایستگاه اردبیل به‌ترتیب با مقادیر ۱۶/۰۴ و ۳۸/۲۷ درصد در طبقات شدید و متوسط، الگوی نسبتاً تعدیل‌یافته‌تری از خشکسالی را نشان می‌دهد در مقابل، ایستگاه پارس‌آباد با ۵۱/۲۱ درصد فراوانی در طبقه ملایم، بیش‌ترین سهم را در این کلاس داشته و در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها، شرایط مساعدتری را تجربه می‌کند.

جدول ۵- درصد فراوانی وقوع خشکسالی SPI نه‌ماهه ایستگاه‌های موردمطالعه استان اردبیل

	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی ملایم

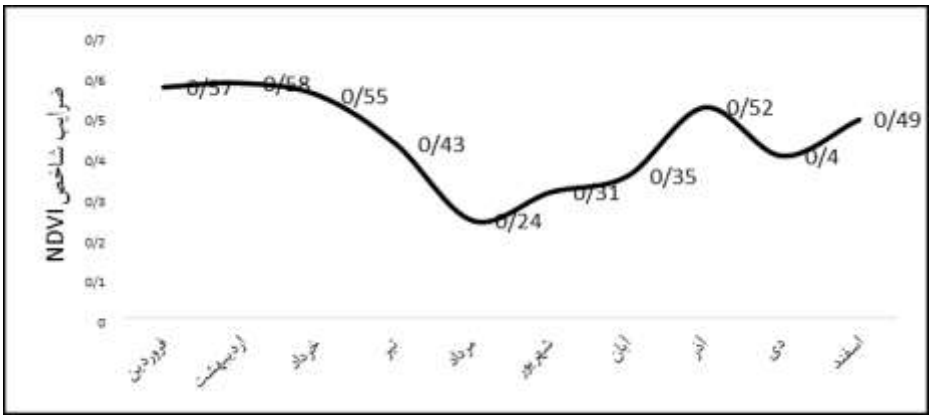
اردبیل	۱/۲۵	۱۶/۰۴	۳۸/۲۷	۴۴/۴۴
خلخال	۱۰/۵۲	۹/۲۲	۳۶/۸۴	۴۳/۴۲
مشکین‌شهر	۹/۵۹	۱۳/۶۹	۳۵/۶۳	۴۱/۰۹
پارس‌آباد مغان	۳/۶۵	۹/۷۵	۳۵/۳۶	۵۱/۲۱

تحلیل روند تغییرات شاخص گیاهی (NDVI)

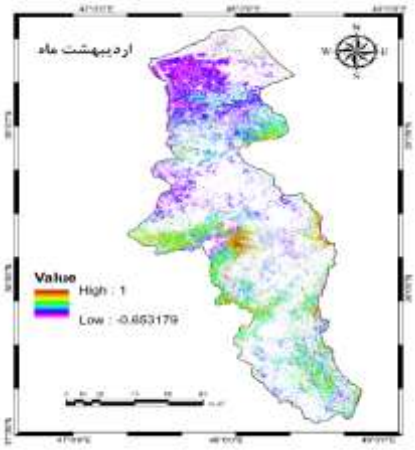
به‌منظور پایش وضعیت پوشش‌گیاهی استان اردبیل، تغییرات شاخص تفاضلی پوشش‌گیاهی (NDVI) در دوره موردمطالعه ارزیابی شد. همان‌گونه که مشخص است ماه‌های آبان تا اردیبهشت دوره رشد در مناطق شمالی یا قشلاقی و ماه‌های فروردین تا شهریور نیز دوره رشد پوشش مرتعی در مناطق ییلاقی استان است عینی و سبحانی [۱۰]؛ که نمودار تغییرات فراوانی ضریب پوشش‌گیاهی شاخص NDVI در ماه‌های اردیبهشت، فروردین و خرداد به‌ترتیب ۵۸، ۵۷ و ۵۵ و در ماه‌های آذر، دی و اسفند به‌ترتیب ۵۲، ۴۰ و ۴۹ است (شکل ۸). آستانه‌های فراوانی ضرایب NDVI برای هر یک از ماه‌های موردمطالعه در جدول (۶) ارائه‌شده است که اردیبهشت‌ماه با ۸۸ درصد دارای بالاترین ضریب NDVI و مردادماه با ۵۴ درصد دارای پایین‌ترین ضریب NDVI است که با تحقیقات زارع خور میزی [۴۴] در خصوص تولید پوشش‌گیاهی با شاخص NDVI مطابقت می‌کند.

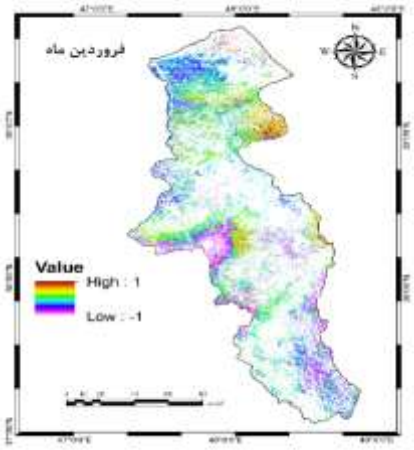
تحلیل توزیع مکانی NDVI

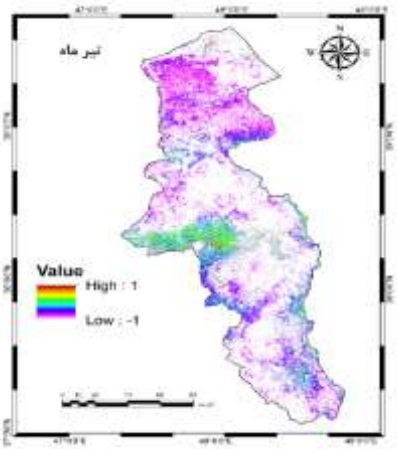
نتایج پایش وضعیت مراتع نشان داد که نوسانات پوشش‌گیاهی از الگوی فصلی مشخصی تبعیت می‌کند؛ به‌طوری‌که حداکثر و حداقل پوشش سبزینگی به‌ترتیب در ماه‌های اردیبهشت و مرداد مشاهده شد. تحلیل‌های صورت گرفته حاکی از وجود دو الگوی فنولوژیک مجزا در سطح استان است که تحت تأثیر گرادیان‌های اقلیمی و ارتفاعی قرار دارند: الگوی اول در نیمه شمالی (ایستگاه پارس‌آباد) بازه زمانی آبان تا اردیبهشت را شامل می‌شود، درحالی‌که الگوی دوم در نواحی مرکزی و جنوبی (ایستگاه‌های اردبیل، مشکین‌شهر و خلخال) در بازه فروردین تا شهریور گسترده است. ماه‌های فروردین و اردیبهشت به‌عنوان مرحله گذار فنولوژیک، فصل مشترک دوره رشد در مراتع قشلاقی و ییلاقی محسوب می‌شوند. ارزیابی درصد پوشش‌گیاهی با استفاده از شاخص NDVI نشان‌دهنده تغییرات ماهانه به شرح زیر است (اشکال ۹ تا ۱۸): فروردین (۵۵/۲۱٪)، اردیبهشت (۵۱/۸۵٪)، خرداد (۴۴/۳۵٪)، تیر (۳۱/۵۶٪)، مرداد (۲۰٪)، شهریور (۱۲/۵۱٪)، آبان (۱۸/۶۹٪)، آذر (۲۸/۹۴٪)، دی (۲۲/۹۲٪) و اسفند (۳۵/۱۰٪). بیشترین تراکم پوشش‌گیاهی در فروردین‌ماه، ناشی از هم‌پوشانیِ اوج دوره رشد در مراتع قشلاقی با آغاز فعالیت فنولوژیک در مراتع ییلاقی است. در مقابل، حداقل پوشش‌گیاهی در شهریورماه به وقوع مرحله خزان در مراتع ییلاقی و تداوم دوره رکود در مراتع قشلاقی نسبت داده می‌شود.

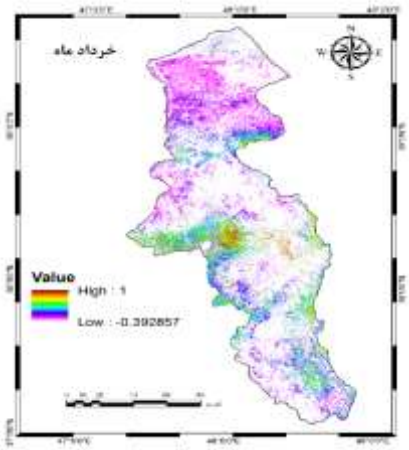


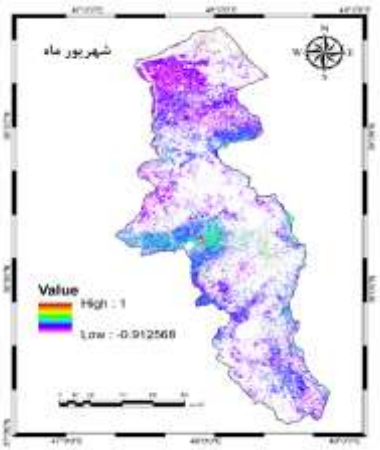
شکل ۸- نمودار تغییرات فراوانی ضریب پوشش‌گیاهی شاخص NDVI

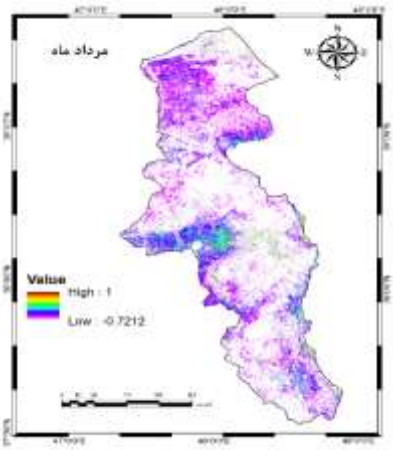

اردیبهشت ماه
Value
High : 1
Low : -0.653179

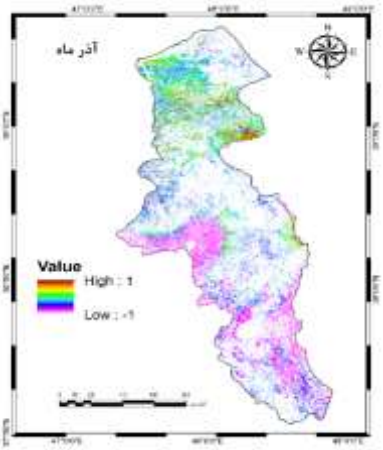

فروردین ماه
Value
High : 1
Low : -1

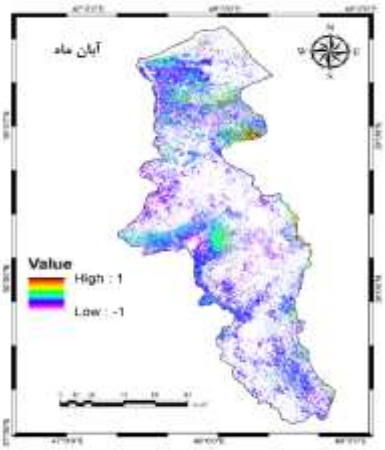

تیر ماه
Value
High : 1
Low : -1

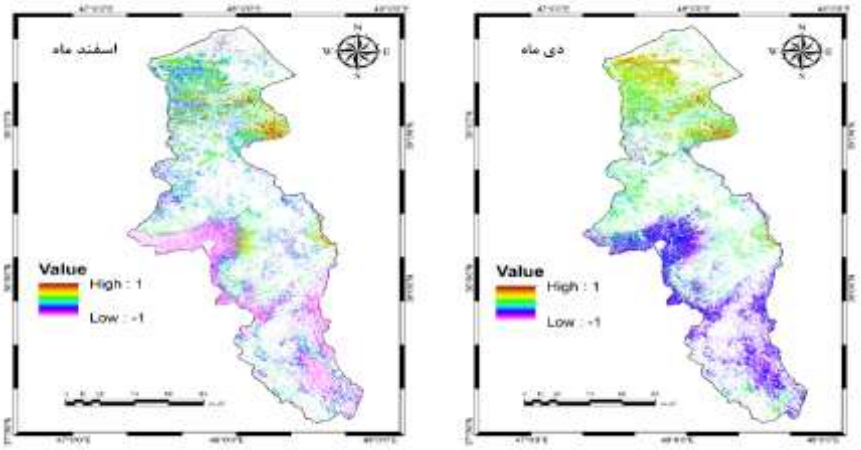

خرداد ماه
Value
High : 1
Low : -0.392857


شهریور ماه
Value
High : 1
Low : -0.912568


مرداد ماه
Value
High : 1
Low : -0.7212


آذر ماه
Value
High : 1
Low : -1


آبان ماه
Value
High : 1
Low : -1



شکل ۹ - مقادیر NDVI در سطح مراتع استان اردبیل

جدول ۶- آستانه‌های فراوانی ضریب شاخص NDVI

NDVI	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	آبان	آذر	دی	اسفند
MAX	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۸۲	۰/۷۰	۰/۷۹
MIN	-۰/۱۰	-۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۷	۰	۰	-۰/۰۴	-۰/۱۴	-۰/۲۶	-۰/۰۹
MEAN	۰/۳۸	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۴	۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۳۵

نتایج حاصل از همبستگی

تحلیل همبستگی NDVI و SPI

بررسی همبستگی میان شاخص‌های خشکسالی و پوشش‌گیاهی نشان داد که SPI یک‌ماهه با همبستگی متوسط حدود ۲۶ درصد را با NDVI نشان می‌دهد که فاقد سطح اطمینان است این دو شاخص دارای همبستگی متوسط هستند. نتایج گویای این مطلب است که تأثیرات خشکسالی بر پویایی مراتع، در مقیاس‌های زمانی یک‌ماهه بیشترین اثر خود را بر NDVI نشان می‌دهد که این امر نشان‌دهنده تأثیر زودهنگام پوشش‌گیاهی به کاهش بارش است.

تحلیل همبستگی شاخص‌های اقلیمی و گیاهی

از آنجا که انتخاب آزمون همبستگی پارامتریک پیرسون مستلزم رعایت پیش‌فرض گیری نرمالی متغیرها است، نرمال‌بودن توزیع داده‌های بارش، SPI و NDVI در بازه زمانی ۲۴ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹) (در سطح معناداری ۰/۰۵) مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج نشان داد مقادیر p−valuep−value برای تمامی متغیرها بزرگتر از ۰/۰۵ بوده و لذا فرض صفر مبنی‌بر نرمال‌بودن توزیع داده‌ها رد نشد. بر همین اساس، استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در تحلیل روابط بین شاخص‌های اقلیمی (بارش، SPI) و پوشش‌گیاهی (NDVI) مجاز و ازنظر آماری قابل توجیه است. به‌منظور تعیین میزان ارتباط و شدت وابستگی میان متغیرهای موردمطالعه، از آزمون همبستگی پیرسون با سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده گردید. جامعه آماری این پژوهش شامل داده‌های ۴ ایستگاه هواشناسی طی یک دوره ۹ ماهه (از فروردین تا آذر) بوده است. پس از تشکیل ماتریس داده‌ها، برای هر جفت متغیر، رابطه میان مقادیر بارش ماهانه و شاخص خشک‌سالی SPI در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه با شاخص پوشش‌گیاهی (NDVI) با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۷). نتایج حاصل از تحلیل همبستگی‌ها نشان‌دهنده روابط معناداری در سطوح اطمینان ۰/۰۵ و ۰/۰۱ است.

جدول ۷- ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون با بارندگی و شاخص‌های SPI و NDVI

	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 9	NDVI	P
SPI 1	۱	۰/۴۴	۰/۰۸	۰/۶۴*	۰/۲۶	۰/۷۶*
SPI 3	۰/۴۴	۱	۰/۲۴	۰/۶۱	۰/۰۵	۰/۱۷
SPI 6	۰/۰۸	۰/۲۴	۱	۰/۶۳*	-۰/۴۷	-۰/۲۲
SPI 9	۰/۶۴*	۰/۶۱	۰/۶۳*	۱	۰	۰/۳۸
NDVI	۰/۲۶	۰/۰۵	-۰/۴۷	۰	۱	۰/۷۷**
P	۰/۷۶*	۰/۱۷	-۰/۲۲	۰/۳۸	۰/۷۷**	۱

* سطح اطمینان ۰/۰۵ ** سطح اطمینان ۰/۰۱

همبستگی میان شاخص‌های SPI

یافته‌ها حاکی از وجود همبستگی مثبت معنادار میان بازه‌های زمانی مختلف خشک‌سالی است. به‌طوری‌که شاخص SPI یک‌ماهه و شش‌ماهه با شاخص SPI نه‌ماهه به‌ترتیب با ضریب ۶۴ درصد و ۶۳ درصد (با سطح اطمینان ۰/۰۵) رابطه دارد که نشان‌دهنده تداوم الگوهای خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت است.

ارتباط میان بارش و شاخص‌های گیاهی (NDVI)

براساس نتایج جدول (۷)، مقادیر بارش ماهانه همبستگی مثبت و معناداری با شاخص SPI یک‌ماهه (P<۰.۰۵) دارد. نکته حائز اهمیت، وجود همبستگی معنادار در سطح اطمینان ۰/۰۱ میان بارش ماهانه و شاخص NDVI (حدود ۷۷ درصد) است که این امر نشان می‌دهد که تغییرات پوشش‌گیاهی در مراتع استان اردبیل به‌شدت تحت تأثیر نوسانات بارش قرار دارد که با نتایج تحقیق عینی و سبحانی [۱۰] همخوانی است.

بحث و نتیجه‌گیری

خشکسالی به‌عنوان یک پدیده پیچیده اقلیمی که ناشی از تغییرات عوامل هواشناختی نظیر کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق است، در دهه‌های اخیر به‌دلیل گرمایش جهانی و افزایش تقاضای منابع آب به یکی از بحران‌های اساسی تبدیل‌شده است. ماهیت بطئی و وسعت جغرافیایی این پدیده، ضرورت پایش و ارزیابی دقیق آن را دوچندان می‌کند که پژوهش‌های انجام‌یافته نیز بر آن تأکیددارند [۴۱، ۳۵، ۹]. نتایج تحلیل روند با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد که ایستگاه‌های اردبیل و خلخال دارای روند معنی‌دار بارش هستند (تأییدشده با تقاطع خطوط روند و عبور آماره u از آستانه ۱/۹۶)؛ درحالی‌که بارش در ایستگاه‌های مشکین‌شهر و پارس‌آباد از الگوی سری زمانی ایستا تبعیت می‌کند. اگرچه الگوی بارش در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف در استان متفاوت است، اما روند کلی بارش در سال‌های اخیر در تمامی ایستگاه‌های موردمطالعه کاهشی بوده است که با تحقیقات انجام‌شده در منطقه البرز و سازمان جهاد کشاورزی [۲۵، ۱۳] همخوانی دارد. در این مطالعه، پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SPI در بازه‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه) انجام شد. نتایج نشان داد که سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۸۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۸۷ پرتکرارترین سال‌های وقوع خشکسالی در تمامی بازه‌های زمانی بوده‌اند. تحلیل‌های زمانی SPI حاکی از تداوم الگوهای خشکسالی است؛ به‌طوری‌که همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح ۰/۰۵) میان بازه یک‌ماهه با بازه‌های شش و نه‌ماهه (به‌ترتیب با ضرایب ۶۴٪ و ۶۳٪) مشاهده شد که بیانگر تأثیرپذیری بلندمدت منابع از کمبودهای کوتاه‌مدت بارش است که با نتایج مطالعات انجام‌یافته در نواحی استان البرز، دشت بم و جنوب یزد [۱۳، ۳۱، ۴۴] همخوانی دارد. در بررسی شاخص NDVI، این شاخص به‌دلیل همبستگی بالا با مقادیر بارش ماهانه، به‌عنوان کارآمدترین ابزار برای پایش خشکسالی در

مراتع استان اردبیل معرفی گردید. تحلیل زمانی پوشش‌گیاهی نشان‌دهنده وجود دو الگوی رویشی متمایز است: الگوی نخست در نیمه شمالی استان (آبان تا اردیبهشت) و الگوی دوم در مناطق مرکزی و جنوبی (فروردین تا شهریور) که تابع شرایط اقلیمی و ارتفاعی منطقه است [۳، ۴۰، ۳۳] همخوانی دارد. یافته‌های مربوط به همبستگی میان شاخص‌های هواشناختی و گیاهی نشان داد که اگرچه همبستگی SPI یک‌ماهه با NDVI (حدود ۲۶٪) ازنظر آماری غیر معنی‌دار است، اما این همبستگی بیانگر پاسخ سریع و زودهنگام پوشش‌گیاهی به کاهش بارش است. نکته حائز اهمیت، همبستگی بسیار قوی و معنی‌دار بارش ماهانه با NDVI (ضریب همبستگی ٪۷۷ در سطح ۰/۰۱) است که نشان می‌دهد تغییرات پوشش‌گیاهی در مراتع استان اردبیل به‌شدت تحت تأثیر نوسانات بارش قرار دارد؛ یافته‌ای که با نتایج پژوهش عینی و سبحانی [۱۰] همسواست. ارزیابی درصد پوشش‌گیاهی مرتعی ماهانه استان با استفاده از شاخص NDVI نشان‌دهنده این است که در ماه‌های فروردین با (۵۵/۲۱٪)، اردیبهشت (۵۱/۸۵٪)، خرداد (۴۴/۳۵٪)، بیشترین تراکم پوشش‌گیاهی مرتعی و ماه‌های شهریور (۱۲/۵۱٪)، آبان (۱۸/۶۹٪) و مرداد (۲۰٪) حداقل تراکم پوشش مرتعی دارند. بیشترین تراکم پوشش‌گیاهی در فروردین‌ماه، ناشی از هم‌پوشانیِ اوج دوره رشد در مراتع قشلاقی با آغاز فعالیت فنولوژیک در مراتع ییلاقی است. در مقابل، حداقل پوشش‌گیاهی در شهریورماه به وقوع مرحله خزان در مراتع ییلاقی و تداوم دوره رکود در مراتع قشلاقی نسبت داده می‌شود نتایج این تحقیق با یافته‌های باقری و همکاران، دادجو و همکاران، عینی و سبحانی و سبحانی و مولانوری [۴، ۷، ۱۰، ۴۲] مطابقت دارد. درمجموع، نتایج این مطالعه بر اهمیت استفاده تلفیقی از شاخص‌های هواشناختی و ماهواره‌ای برای مدیریت منابع طبیعی و کاهش اثرات خشکسالی تأکید می‌ورزد.

References

[1]. Aghajanlou, F., Akbarzadeh, P.& Eftekhari, A.R. (2024). Measurement of vegetation changes related to soil characteristics and livestock grazing Case study: Badamistan pastures of Tarem, Zanjan Province. *Journal of Rangeland*, 31(4), 323-346. http//doi.org/10.22092/ijrdr.2025.132713 [in Farsi]

[2]. Aghajanlou, F., & Akbarzadeh, P. (2026). Prolonged Assessment of Plant Species Diversity and Richness Indices in the Jishabad Rangeland (Tarom County, Iran). *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (2), 147-168.http//doi.org/10.22059/jrwm.2025.398912.1845

[3]. Arkhi, S., Barzegar Savaskari, M., Sourizaie, N., & Eshghi, B. (2023). Investigation of the correlation between vegetation indices in drought analysis using MODIS images (Case study: Qom, Isfahan, Chaharmahal and Bakhtiari, and Markazi Provinces). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 12(4), 1-20. http//doi.org/ 10.22052/deej.2024.254106.1039 [in Farsi]

[4]. Bagheri, S., Heidari Alamdarloo, A., Khosravi, H., & Abolhasani, A. (2021). Evaluation of meteorological drought on vegetation dynamics in Iran. *Rangeland Journal*, 15(4), 622-637. http//doi.org/ 20.1001.1.20080891.1400.15.4.4.5 [in Farsi]

[5]. Bagherpour, M., Seyedian, S. M., Fathabadi, A., & Mohammadi, A. (2017). Evaluation of Mann-Kendall efficiency in identifying trends of correlated series. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11(36), 11-21. [in Farsi]

[6]. Bavand, P., Moteshaffeh, B., & Geloogerdi, S.H. (2024). Comparison of SPI, PNPI, RAI and SIAP Indices in Analyzing Meteorological Drought Conditions in the Zohreh-Jarrahi Watershed. *Journal of Arid Biome*, 14(2), 145-159. http//doi.org/ 10.29252/ARIDBIOM.2025.22482.203[in Farsi]

[7]. Dadjou, F., Ghorbani, A., Mehdi Moameri, M., & Bidarlord, M. (2018). Effects of temperature and rainfall on the aboveground net primary production of Hir and Neur rangelands in Ardabil province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(3), 577-593. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.117811 [in Farsi]

[8]. Ebrahimi Khusfi, Z., Mirakbari, M., Ebrahimi Khusfi, M., & Soleimani Sardoo, M. (2022). Assessment of temporal changes of drought using Mann-Kendall and Sen's Slope tests in Kerman province during 1990-2018. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 11(36), 1-16. http//doi.org/ 10.22052/deej.2021.11.36.1 [in Farsi]

[9]. Ebrahimpour, M., Rahimi, J., Nikkhah, A., & Bazrafshan, J. (2015). Monitoring Agricultural Drought Using the Standardized Effective Precipitation Index. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(1), 04014044. http//doi.org/ 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000771 [in Farsi]

[10]. Eiyni, S., & Sobhani, S. (2021). Drought Monitoring during Growth Rangeland Coverage, Ardabil Province. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 21(60), 1-19. http//doi.org/ 10.52547/jgs.21.60.1[in Farsi]

[11]. Fazel Dehkordi, L., Azarnivand, H., Zare Chahouki, M. A., Mahmoudi Kohan, F., & Khalighi Sigaroudi, S. (2016). Drought monitoring using NDVI vegetation index (Case study: Rangelands of Ilam province). *Iranian Journal of Range and Watershed Management*, 69(1), 141-154. https://doi.org/10.22059/jrwm.2016.61739 [in Farsi]

[12]. Fooladi Doghozlo, M., & Hayatzade, M. (2025). Investigation of the Impact of Temporal and Spatial Changes in Precipitation and Temperature on Vegetation Cover Using Satellite Imagery (Case Study: Yazd Province). *Journal of Rangeland*, 18(4): 483-504. http//doi.org/20.1001.1.20080891.1403.18.4.1.3 [in Farsi]

[13]. Ghasemi, P., Karbasi, M., Zamani Nouri, A., & Saraii Tabrizi, M. (2021). Monitoring of drought zoning in Southern Alborz. *Geography and Environmental Studies*, 10(39), 90-104. http//doi.org/20.1001.1.20087845.1400.10.39.6.2 [in Farsi]

[14]. Ghorbani, A., Pournemati, A., & Bibak, N. (2019). Evaluation of habitat health in three elevation classes of north Sabalan rangelands. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(1), 1-17. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.119322 [in Farsi]

[15]. Ghorbani, A., Pournemati, A., & Bibak, N. (2019). Evaluation of habitat health in three elevation classes of north Sabalan rangelands. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(1), 1-17. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.119322 [in Farsi]

[16]. Hadian, F., Hosseini, S. Z. A., & Seyedhasani, M. (2014). Monitoring vegetation changes using precipitation data and satellite imagery in Northwest Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 21(4), 756-768. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2016.13078 [in Farsi]

[17]. Han, W., Guan, J., Zheng, J., Liu, Y., Ju, X., Liu, L., Li, J., Mao, X., & Li, C. (2023). Probabilistic assessment of drought stress vulnerability in grasslands of Xinjiang, China. *Frontiers inPlant Science*, 14:1143863. http//doi.org/10.3389/fpls.2023.1143863[in Farsi]

[18]. Imani, J., Ebrahimi, A., Gholonejad, B., & Tahmasebi, P. (2018). Comparison of NDVI and SAVI in three plant communities with different sampling intensity (Case Study: Choghakhour Lake Rangelands in Charmahal & Bakhtiri). *Iranian Journal of Range and Desert Research (IJRDR)*,25(1): 152-169. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.116233 [in Farsi]

[19]. Jahdi, R., Hanifepour, M., & Jalali, S. (2024). Assessment of drought impacts on vegetation dynamics in Golestan

province. *Geography and Environmental Sustainability*, 14(3), 15-30. http//doi.org/ 10.22126/GES.2024.10786.2762 [In Persian]

[20]. Jiang,L., Liu, B, Guo, H, Yuan, Y, Liu, W., & Jiapaer, G. (2024). Assessing vegetation resilience and vulnerability to drought events in Central Asia. *Journal of Hydrology*, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.13 1012.

[21]. Kamruzzaman, M., Almazroui, M., Salam, M. A., Anarul Haque Mondol, M., & Mizanur Rahman, M. (2022). Spatiotemporal drought analysis in Bangladesh using the standardized precipitation index (SPI) and standardizedprecipitation evapotranspiration Index (SPEI). *Scientific reports*. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24146-0

[22]. Liu, C., Yang, C., Yang, Q., & Wang, J. (2021). Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific reports*. 11(1), 1280. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3

[23]. Mahmoudzadeh, L., Tahmasebi P., Ebrahimi, A., Mahzooni Kachapi, S.S. (2026). Correlation between Vegetation Indices and Ecological Diversity Components Using Landsat-8 Imagery. *Journal of Range & Watershed Management*, 20 (1), http//doi.org/ 20.1001.1.20080891.1405.20.1.3.3[In Persian]

[24]. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (pp. 179–184). Anaheim, CA: American Meteorological Society.

[25]. Ministry of Agriculture Jihad. (1402). Annual Statistical Yearbook of the Agricultural Jihad Research Center [in Farsi]

[26]. Mirmousavi, S.H., & Karimi, H. (2013). Effect of drought on vegetation cover using MODIS sensing images case: Kurdistan Province. *Geography and Development*, 11 (31): 57-76. http//doi.org/10.22111/gdij.2013.794 (in Farsi).

[27]. Moameri, M., Mohammadirad, Z., Noori, D., & Ghorbani, A. (2025). Assessment of Key Indicators Influencing Rangeland Management: Perspectives of Local Stakeholders in Nir County Ardabil. *Journal of Rangeland*, 19(2), 226-245. http//doi.org/20.1001.1.20080891.1404.1 9.2.7.2 [in Farsi]

[28]. Moeinifar, S., Asadi, M. A., Malekinezhad, H., & Talebi, A. (2021). Determining the appropriate statistical distribution to calculate RDI in arid regions (Case study: Central Iran). *Journal of Arid Biome*, 11(1), 105-121. http//doi.org/10.29252/ARIDBIOM.2022 .17245.1873[in Farsi]

[29]. Moradyannasab, H., Nafarzadegan, A.R., & Esmaeilpour, Y. (2023). Spatiotemporal changes of two satellite-based drought indices and their correlations with hydroclimate and vegetation variables across Iran. *Journal of Arid Biome*, 13(2), 209-225. http//doi.org/10.29252/ARIDBIOM.2024 .21468.2008 [in Farsi]

[30].Pournemati, A., & Ghorbani, A. (2021). The effect of temperature and precipitation fluctuations on rangeland plant production in Sabalan rangelands. *Rangeland Journal*, 15(4), 573-588. http//doi.org/20.1001.1.20080891.1400.1 5.4.3.4 [in Farsi]

[31]. Rafiei Sardooi, E., ghtedarnejad, M., & Kohestani, S. (2026). Evaluation of Remote-Sensing-Based Indices for Drought Monitoring Using MODIS Images (Case Study: Bam Plain). *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (4), 471-489, http//doi.org/10.22059/jrwm.2025.39358 8.1821[in Farsi]

[32]. Rastgoo, P., Ramezani, B., & Rezaei, P. (2022). Drought Evaluation and Climatic Impact Assessment in Guilan Province. *Journal of Geography and*

Environmental Studies, 11 (42), 136-150.http//doi.org/20.1001.1.20087845.1401.11.42.9.8 [in Farsi]

[33]. Richards, J., Madramootoo, C., Goyal, M., & Trotman, A. (2013). Application of the Standardized Precipitation Index and Normalized Difference Vegetation Index for Evaluation of Irrigation Demands at Three Sites in Jamaica. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(11), 922–932. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000629

[34]. Rostami, A. A., Rahimi, M., & Damavandi, A.A. (2025). Investigating the Relationship between Meteorological Drought and Remotely Sensed Drought Indices in the Semnan Shurab Basin. *Journal of Arid Biome*, 15(1), http//doi.org/ 10.29252/ARIDBIOM.2026.23739.2058[in Farsi]

[35]. Rostami, F., Faramarzi, M., & Omidipour, R. (2024). Long-term Vegetation Cover Dynamics Assessment Using Remote Sensing in Semi-Arid Regions of Western Iran (Eyvan County, Ilam Province). *Journal of Arid Biome*, 14(2), 85-101. http//doi.org/10.29252/ARIDBIOM.2026.3994[in Farsi]

[36]. Sadeghpour, A., Moetamedi, J., & Sheidai Karkaj, E. (2019). Recognition the most important factors of physiography, topography and soil on plant diversity (Case study: Namin mountain rangelands, Ardebil). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(4), 838-854. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.120678 [in Farsi]

[37]. Saeidpour Dalehzi, F., Alireza Jamshidi, A., & Javan, K. (2025). Ecological Capability Assessment and Land Use Prioritization in Urmia Plain Using Makhdoom Model and Geographic Information System (GIS). *Geography and Environmental Studies*, 14 (54), 80-93. http//doi.org/ 10.71740/ges.2025.1207694 [in Farsi]

[38]. Sepahvand, A., Ghobadi, M., Karampour, M., & Mirdrikvand, B. (2021). Assessment of the effect of drought occurrence on vegetation changes in Kashkan watershed, Lorestan using multi-temporal Landsat ETM and OLI data. *Rangeland Journal*, 16(1), 126-139. http//doi.org/20.1001.1.20080891.1401.16.1.2.4 [in Farsi]

[39]. Sobhani, P., & Danehkar, A. (2024). Assessing the severity of drought in the Mesopotamian Plain and the changes in rainfall caused by it in the western and southwestern regions of Iran. *Journal of Arid Biome*, 14(2), 1-17. http//doi.org/ 10.29252/ARIDBIOM.2024.22214.2029[in Farsi]

[40]. Soureshjani Samani R., Naghipour , A. L., Tahmasbi Kohyani , P., & Heidari Ghahfarrokhi, H. G. (2026). Application of Vegetation Indices and Image Differencing of Landsat-8 and Sentinel-2 for Estimating Production in Semi-Steppe Rangelands. *Rangeland Journal* 20 (1), http//doi.org/ 20.1001.1.20080891.1405.20.1.4.4[in Farsi]

[41]. Wang, Z.J., M. Z, Xu., H.C, Hu., &, Zhang, X. (2023). Characteristics of vegetation changes and their drivers in the Yellow River basin from 1982 to 2020. Advances in Water Science, 23, 34,499-509. http//doi.org/ 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.04.003

[42]. sobhani, B., & mollanouri, E. (2024). Investigation of changes in vegetation cover using the NDVI index and its relationship with the Land surface temperature (case study: Kausar city). *Journal of Environmental Science Studies*, 9(3), 8851 8841. http//doi.org/ 10.22034/jess.2023.407679.2086 [in Farsi]

[43]. Wu, X., Zhang, R., Bento, V. A., Leng, S., Qi, J., Zeng, J., & Wang, Q. (2022). The effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, 14(18), 4658. https://doi.org/10.3390/rs14184658

[44]. Zare Khormizie, H., Hosseini, S.Z., Mokhtari,M.H., & Ghafarian Malamiri, H. R. (2017). Analysis of relationship between drought and NDVI variations in different vegetation types (Case study: Southern rangelands of Yazd province). *Journal of Arid Biome*,2(7), http://dx.doi.org/10.29252/aridbiom.7.2.85[in Farsi]

[45]. Zhao,Z., Waqar Aslam, R., Naz, I., Afzal, Z., Liaqut, A., Azeem Liaquat, M., Elmannai, H., & Zulqarnain, R.M. (2025). Assessment of Drought Impact on Rangelands Using Multi-Index Remote Sensing Approach. *Rangeland Ecology & Management*, 102, 198-209. https://doi.org/10.1016/j.rama.2025.06.018

Evaluation of the Effects of Drought on Rangeland Dynamics in Ardabil Province Using SPI and NDVI Indices
(Research Paper)

1- Behrouz Sobhani*, Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
sobhani@uma.ac.ir
2- Saeedeh Eini, PhD Graduate, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3- Amirreza Sobhani, Master's Student, Department of Urban Planning, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received: 9 Jul. 2026
Accepted: 13 Sep. 2026

Abstract
Drought, as a pervasive climatic hazard, exerts profound impacts on the sustainability and dynamics of rangeland ecosystems. The objective of this study is to monitor and analyze the effects of meteorological drought on the vegetation dynamics of rangelands in Ardabil Province during the growing season. To this end, the precipitation trends of selected meteorological stations were first evaluated using the Mann-Kendall test, and the Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated at 1-, 3-, 6-, and 9-month timescales over a 24-year period (1996–2020). Subsequently, vegetation dynamics were extracted using Landsat imagery and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Finally, the relationships between drought indices and rangeland vegetation status were analyzed using the Pearson correlation test. The results indicated that the years 2013, 2006, 2017, and 2008 were the most frequent years of drought occurrence in the region. Spatially, the Meshgin-Shahr station experienced the highest frequency of drought, while the Pars-Abad station experienced the lowest. Furthermore, drought severity analysis revealed that the Khalkhal station faced severe to extreme droughts, whereas the Pars-Abad station primarily encountered mild droughts. The analysis of the NDVI index demonstrated that the growing season for the wintering (Gheshlagh) rangelands occurs from November to May, and for the summering (Yeylagh) rangelands, it spans from April to September; May and August exhibited the maximum and minimum NDVI peaks, respectively. Correlation analysis between drought indices and vegetation showed a significant positive correlation of 77% ($p < 0.01$) between precipitation and NDVI. In contrast, the 1-month SPI showed a moderate correlation of approximately 26% with NDVI, which was statistically insignificant. In general, vegetation changes in the rangelands of Ardabil Province are significantly influenced by precipitation patterns.

Keywords: Land cover, Spatial modeling, Natural resource management, Mann–Kendall test.