



Drought-Driven Changes in Tree Density across Dryland Ecosystems of Southeastern Iran

Sirous Shamshiri¹ | Bijan Azad¹ | Majid Karimpourreihan^{2*}

1. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. International Desert Research Center (I.D.R.C.) College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Correspond E-mail: mrihan@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 02 June. 2025

Revised: 29 July. 2025

Accepted: 02 Aug. 2025

Published online: 01 Jan. 2026

Keywords:

Drought,

Plant density variation,

Species vulnerability,

Standardized Precipitation Index,

Time-lag response,

Vegetation dynamics.

Abstract

Drought is among the most severe climatic hazards in arid and semi-arid regions, and its increasing intensity and frequency in recent decades have substantially impaired the structure and functioning of terrestrial ecosystems. Nevertheless, field-based evidence on drought impacts on woody vegetation in dryland ecosystems, particularly with respect to vegetation density dynamics, remains limited. This study aimed to assess the effects of drought, using the standardized drought indices SPI and PNPI, on density variations of two woody species, *Acacia ehrenbergiana* Hayne and *Ziziphus spina-christi*, in the Espakeh Plain, Sistan and Baluchestan Province, Iran. Furthermore, transformed drought index time series were employed to investigate temporal lags in species density responses to wet and dry periods. The results demonstrated that density differences of both species between wet and dry periods were statistically significant, and that vegetation density variations exhibited a strong correspondence with the transformed SPI index. Time-series analysis revealed a lag of one to two years in density responses following wet and drought events, with the lowest densities of both species occurring one to two years after the most severe drought. Based on the SPI index, Spearman correlation coefficients between vegetation density and wet and dry periods were 0.62 and 0.96 for *A.ehrenbergiana*, and 0.88 and 0.74 for *Z.spina-christi*, respectively. In contrast, the PNPI index showed limited explanatory power for *A.ehrenbergiana*, likely due to differences in the computational frameworks of the drought indices applied in this region. Overall, drought resulted in a significant decline in the density of both species in the study area, with *A.ehrenbergiana* and *Z.spina-christi* densities decreasing from 17.33 ± 7.22 and 8.44 ± 4.51 to 8.66 ± 4.78 and 5.11 ± 3.32 individuals per hectare, respectively. Given the greater vulnerability of *Z.spina-christi* to drought stress, the development and implementation of climate-adaptive management strategies are essential to ensure its conservation and long-term persistence.

Cite this article: Shamshiri, S., Azad, B., Karimpourreihan, M. (2025). Drought-Driven Changes in Tree Density across Dryland Ecosystems of Southeastern Iran. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (4), 567-586.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.405794.1855>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: While growing global temperatures continue to affect seasonal shifts stratified worldwide, the ecosystems and community structures of dry and semi-dry environments are most negatively affected by the global climate crisis. In recent years, the most prominent seasonal factor affecting adjustment of ecosystems resulting from global temperatures on the ecosystem of the world's arid environments remains climate-related drought. While short-term meteorological shifts may occur, the absence of moisture over time contributes to ecological shifts. Changes in precipitation, regardless of the magnitude, impact vegetation, structure and resilience of the ecosystem and land-atmosphere processes. The last several years have created the most drought periods, while the severity of droughts creates the most significant concerns over the ecological stress of dry climate-sustained forests. Although vegetation responses have been monitored remotely at global and regional scales using satellite technologies, the focus at these levels is primarily on surviving vegetation while the impacts vegetation and ecosystem stress and decline have on the ecosystem remain unobserved. Are there, in particular, and the dry regions of southeastern Iran, are there are no empirical studies documenting the impact of drought on the structure and density of the tree density, and are there any remote regions of the. The focus of the present study is to identify drought-induced vegetation changes of the Espakeh Plain, with special reference to the two ecologically significant and indigenous tree species, *Ziziphus Spina-Christi* and *Acacia Ehrenbergiana*. Combined with field-based measurements, this research attempts to refine our understanding of process-level tree cover decline in arid ecosystems by identifying delayed and cumulative biological responses to long-term climatic water stress.

Materials and Methods: The research was carried out in the hyper-arid Espakeh Plain of Iran's Sistan and Baluchestan Province, which has a mean annual precipitation of around 65 mm and extreme solar exposure. The extent of drought was assessed using two of the most common climate indices, the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Percent of Normal Precipitation Index (PNPI). The indices were computed with a 12-month time step based on the long-term precipitation data from Iranshahr synoptic meteorological station. Vegetation changes were studied through long-term field monitoring conducted from 1996 to 2009. A total of 195 permanent transects, each 1,000 meters long, were systematically surveyed to measure tree density and density changes over time. To understand the combined effects of drought severity and species-specific responses on vegetation structure, a two-way analysis of variance (ANOVA) was used. Additionally, time-series data were classified and transformed to identify delays between drought events and subsequent changes in tree density, allowing us to detect delayed ecological responses to prolonged climatic water stress.

Results and Discussion: Drought was found to be the main cause of tree density decline in the Espakeh Plain. Both *Acacia ehrenbergiana* and *Ziziphus spina-christi* showed significant decreases in density ($P < 0.01$) during the study period. The density of *A. ehrenbergiana* dropped from about 17 individuals per hectare in wet years to 8.66 under severe drought conditions, while *Z. spina-christi* experienced a 39% decrease. These findings indicate significant decreases in tree cover, highlighting the vulnerability of these species to extended periods of water stress. Comparative analysis of drought indices showed that the SPI was more sensitive in detecting ecological responses than the PNPI, which was often affected by minor rainfall fluctuations. Time-series analyses further revealed a pronounced lag effect: minimum tree densities occurred one to two years following the peak of severe drought events, suggesting temporary resilience in these species that eventually fails under cumulative water deficits. Conversely, vegetation recovery following above-average precipitation was delayed by approximately twelve months, indicating that ecosystem responses to climatic variability are not immediate. These delayed responses have important implications for the management and conservation of arid dryland forests, emphasizing the need for long-term planning under changing climate conditions.

Conclusion: Prolonged drought acts as a key driver of tree density decline in southeastern Iran, with cumulative and delayed effects on woody cover and ecosystem resilience. The SPI proved to be a reliable predictor of these delayed ecological responses, highlighting its utility for monitoring and early-warning applications. Species such as *Z. spina-christi* exhibit high vulnerability and a lagged response to water stress, indicating that conservation and management strategies must be proactive and account for temporal delays in density dynamics. Effective interventions that integrate climatic early-warning systems and consider two-year biological lags are essential to sustain species persistence and maintain ecosystem functioning under increasing aridity.

Keywords: Drought, Plant density variation, Species vulnerability, Standardized Precipitation Index, Time-lag response, Vegetation dynamics

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



دوره ۷۸ (۴)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



تغییرات تراکم درختان ناشی از خشکسالی در بوم‌نظام‌های مناطق خشک جنوب‌شرق ایران

سیروس شمشیری^۱ | بیژن آزاد^۱ | مجید کریم پور ریحان^{۲*}

۱. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲. مرکز تحقیقات بین الملل بیابان، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
رایانامه: mrihan@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱

کلیدواژه‌ها:

خشکسالی،

پویایی پوشش گیاهی،

تغییرات تراکم گیاهان،

شاخص بارش استاندارد،

پاسخ تأخیری گیاهان،

آسیب‌پذیری گونه‌ها.

خشکسالی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است، افزایش شدت و فراوانی آن در سال‌های اخیر موجب تضعیف کارکرد بوم‌نظام‌های گیاهی شده است. شواهد میدانی درباره پاسخ پوشش گیاهی درختی مناطق خشک کشور به خشکسالی، به‌ویژه از منظر تغییرات تراکم گیاهی، محدود است. هدف این پژوهش، ارزیابی اثر خشکسالی با شاخص‌های استاندارد SPI و PNPI بر تغییرات تراکم دو گیاهی چگرد (*Acacia ehrenbergiana* Hayne) و کنار (*Ziziphus spina-christi*) در دشت اسپکه استان سیستان و بلوچستان بود. همچنین، با نمودارهای تبدیل‌شده شاخص‌های خشکسالی، تأخیر زمانی واکنش تراکم گونه‌ها نسبت به دوره‌های ترسالی و خشکسالی بررسی شد. نتایج نشان داد تفاوت تراکم هر دو گونه در دوره‌های ترسالی و خشکسالی از نظر آماری معنی‌دار است، تغییرات تراکم گیاهی همخوانی بالایی با نمودار تبدیل‌شده شاخص SPI دارد. تحلیل نمودارها بیانگر آن است که واکنش تراکم گیاهی با تأخیری یک تا دوساله پس از وقوع ترسالی و خشکسالی رخ می‌دهد، به‌طوری که کمینه تراکم هر دو گونه یک تا دو سال پس از شدیدترین دوره خشکسالی ثبت شده است. طبق شاخص SPI، ضرایب همبستگی اسپیرمن بین تراکم گیاهی و دوره‌های ترسالی و خشکسالی برای گونه چگرد به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۹۶ و برای گونه کنار ۰/۸۸ و ۰/۷۴ به دست آمد. در مقابل، نتایج شاخص PNPI برای گونه چگرد از قابلیت تبیین کمتری برخوردار بود که به تفاوت در ماهیت محاسباتی شاخص‌های مورد استفاده نسبت داده می‌شود. به‌طور کلی، خشکسالی موجب کاهش معنی‌دار تراکم هر دو گونه در منطقه مورد مطالعه شد؛ به‌گونه‌ای که تراکم گونه‌های چگرد و کنار به ترتیب از $7/22 \pm 17/33$ و $4/51 \pm 8/44$ به $4/78 \pm 8/66$ و $3/32 \pm 5/11$ پایه در هکتار کاهش یافت. به‌طور کلی با توجه به آسیب‌پذیری بیشتر گونه کنار نسبت به خشکسالی، تدوین و اجرای راهبردهای مدیریتی مبتنی بر شرایط اقلیمی منطقه برای حفاظت و پایداری این گونه ضروری به نظر می‌رسد.

استناد: شمشیری، سیروس، آزاد، بیژن، کریم‌پور ریحان، مجید (۱۴۰۴). تغییرات تراکم درختان ناشی از خشکسالی در بوم‌نظام‌های مناطق خشک جنوب‌شرق ایران. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۸ (۴)، ۵۸۶-۵۶۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.405794.1855>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

تأثیرات تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیشروی مدیریت منابع طبیعی، به طور فزاینده‌ای اکوسیستم‌های خشکی را در مقیاس جهانی تحت تأثیر قرار داده است. تغییر اقلیم به عنوان پدیده‌ای بلندمدت، عمدتاً از طریق افزایش دمای میانگین و تغییر در الگوهای بارش، می‌تواند فراوانی، شدت و تداوم پدیده‌هایی نظیر خشکسالی را که ماهیتی کوتاه‌مدت و نوسانی دارند، تشدید نماید (IPCC, 2021; Trenberth et al., 2014). در نتیجه این روندهای بلندمدت، اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک با افزایش تنش آبی مواجه شده‌اند که این امر پیامدهای قابل توجهی بر بهره‌وری پوشش گیاهی، زنده‌مانی گونه‌های درختی و پایداری بوم‌سازگان‌ها به همراه دارد (Allen et al., 2010; Azad et al., 2020; Vicente-Serrano et al., 2020). خشکسالی‌های آینده به سمت شدت و پیچیدگی بیشتر تکامل می‌یابند و ثبات اکوسیستم را تهدید می‌کنند (Lian et al., 2021). خشکسالی به دلیل پتانسیل بالای آن در ایجاد اختلال در عملکرد اکوسیستم‌ها، تداوم نسبی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت تا میان‌مدت و نیز پیامدهای گسترده فضایی، به عنوان یکی از پیچیده‌ترین مخاطرات اقلیمی مرتبط با آب شناخته می‌شود (Gazol et al., 2020). این پدیده می‌تواند از طریق تأثیر بر رشد پوشش گیاهی و فرایندهای بوم‌سازگانی، ظرفیت ترسیب کربن در مقیاس‌های منطقه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد (Liu et al., 2023). خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی است که اثرات معناداری بر رشد، تولید، ساختار، ترکیب و عملکرد اکوسیستم‌های گیاهی دارد و می‌تواند منجر به کاهش کمیت و کیفیت پوشش گیاهی شود (Xiao et al., 2023). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها، به‌ویژه خشکسالی‌های ناگهانی و شدید، موجب کاهش پوشش گیاهی و تأخیر در روند بازیابی آن در بسیاری از اکوسیستم‌ها (Chai et al., 2025) کاهش مقاومت و حساسیت پوشش گیاهی در مناطق مختلف می‌شود (Tang et al., 2024). همچنین مشخص شده است که پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی می‌تواند با تأخیر زمانی همراه باشد و نه فقط در زمان وقوع، بلکه در دوره‌های پس از خشکسالی نیز تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد اکوسیستم دارد (Muthuvel & Qin, 2025). این یافته‌ها اهمیت بررسی اثرات خشکسالی بر پوشش گیاهی در مقیاس‌های زمانی مختلف را برجسته می‌سازد.

خشکسالی که فراوانی و شدت آن در بسیاری از مناطق تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته است، موجب کاهش رشد، بهره‌وری و زنده‌مانی درختان شده و نرخ مرگ‌ومیر آن‌ها را در زیست‌بوم مختلف جنگلی افزایش می‌دهد (Allen et al., 2010; Senf et al., 2020; Gazol et al., 2025). درختان و جنگل‌های مناطق خشک خدمات زیست‌محیطی متعددی از جمله فراهم‌سازی زیستگاه برای تنوع زیستی، کاهش فرسایش بادی و آبی، مقابله با بیابان‌زایی، بهبود نفوذپذیری آب در خاک و ارتقای حاصلخیزی خاک را ارائه می‌کنند که در مجموع موجب افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و جوامع محلی در برابر تنش‌های خشکسالی و کم‌آبی می‌شود (FAO, 2019). تحت تأثیر اما باتوجه به افزایش دما و افزایش خشکی پایداری جنگل‌های مناطق خشک نامشخص است (Anderegg et al., 2019). همان‌طور که درجه حرارت افزایش می‌یابد، خشکی افزایش می‌یابد و به طور بالقوه فراوانی و شدت خشکسالی نیز بیشتر می‌شود (Bradford et al., 2020) که متعاقباً در اثر این عوامل در زمان وقوع خشکسالی‌های داغ و خشک، رشد کاهش (Bradford et al., 2021; Williams et al., 2013)؛ نرخ مرگ‌ومیر درختان به دلیل خشکسالی، آتش‌سوزی و شیوع حشرات نیز افزایش می‌یابد (Allen et al., 2010; McNellis et al., 2021). در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، تحلیل‌های میدانی نشان داده‌اند که درختان دچار استرس آبی مزمن می‌شوند که این پدیده به کاهش تراکم، تغییر ساختار و در نهایت مرگ درختان منجر می‌شود (Hosseini, 2024). تغییرات اقلیمی و افزایش وقوع خشکسالی، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های زمینی به‌ویژه در مناطق خشک محسوب می‌شوند (Zhang et al., 2024). شدت و فرکانس بالای خشکسالی‌ها، همراه با ناهمگونی مکانی و زمانی این پدیده، موجب شده است که پیش‌بینی پاسخ اکوسیستم‌ها به این تنش‌ها دشوار باشد. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که اثرات خشکسالی بر پوشش گیاهی اغلب با تأخیر زمانی ظاهر می‌شوند؛ به‌طوری که کاهش تراکم و سلامت پوشش گیاهی ممکن است یک تا چند سال پس از وقوع خشکسالی نیز ادامه یابد (Randriatsara et al., 2025). اثر خشکسالی بر تراکم درختان نیز ناشی از تنش گرما و طول مدت شرایط خشک و گرم است و

بیشترین تأثیر آن بر مرگ‌ومیر درختان است؛ حال با این حال، این اثر هنوز به طور کامل مشخص نیست. از این رو، ارزیابی اثر خشکسالی بر تراکم درختان در مناطق خشک برای مدیریت بهینه، احیای جنگل و کاهش مرگ‌ومیر درختان اهمیت بالایی دارد (Rajanna et al., 2023; Bradford et al., 2022).

شاخص‌های زیادی برای پایش و ارزیابی خشکسالی تاکنون توسعه یافته‌اند که هر کشوری باتوجه به توان اقتصادی و شرایط اقلیمی از یک یا مجموعه‌ای از شاخص‌ها استفاده می‌نماید؛ لذا شاخص انتخابی می‌بایست داری شرایطی از جمله قابل کمی بودن، حساسیت به تغییرات جزئی، قابل اندازه‌گیری در مقیاس ملی، قابل فهم بودن و نیز مقرون به صرفه بودن و محاسبه آسان؛ باشد؛ لذا شاخص استاندارد شده بارش (SPI^1) و شاخص درصد بارش نرمال ($PNPI^2$) به دلیل سادگی، قابل فهم بودن، محاسبه آسان و نیز با عنایت به این امر که تنها فاکتور مؤثر در محاسبه آنها عنصر بارش هست که در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی و باران سنجی اندازه‌گیری می‌گردد به عنوان دو شاخص خشکسالی مناسب جهت کمی کردن پدیده خشکسالی به حساب می‌آیند (شریفی پیچون و همکاران، ۱۴۰۱). مطالعات مختلف نیز بیانگر کارایی بالای این دو شاخص در ارزیابی پدیده خشکسالی هستند (McKee, 1993; Wilhite, 1992; Steineman, 2003; Swain et al., 2017; Sathya and Lalitha, 2019).

تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که خشکسالی‌های اقلیمی با استفاده از شاخص‌هایی مانند شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده ($SPEI^3$) با شاخص‌های پوشش گیاهی مانند $NDVI$ همبستگی دارند و می‌توانند واکنش پوشش گیاهی به خشکسالی را آشکار کنند. برای مثال، Liu (2024) نشان داد که در حوزه رودخانه زرد، کاهش $SPEI$ با کاهش $NDVI$ همراه است و این ارتباط در بخش‌های مختلف حوزه مکانی و زمانی متفاوت است. همچنین Wang et al. (2024) در منطقه Inner Mongolia, Yinshanbeilu گزارش کردند که حساسیت $NDVI$ به $SPEI$ در بازه‌های زمانی بلندمدت ($SPEI_{12}$) بیشتر است و چمنزارها نسبت به خشکسالی بیشترین پاسخ را نشان می‌دهند. ژائو^۴ و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری پوشش گیاهی $NDVI^5$ و LAI^6 و نیز شاخص‌های خشکسالی SPI و شاخص $SPEI$ اقدام به ارزیابی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی رودخانه یانگزه کشور چین نمودند که نتایج آنها بیانگر ارتباط بالای شاخص‌های مذکور با یکدیگر بود. پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی می‌تواند شامل تأخیر زمانی^۷ و اثر تجمعی^۸ باشد؛ یعنی اثر خشکسالی ممکن است ماه‌ها پس از وقوع ادامه یابد. Zhao et al. (2025) در مطالعه‌ای در سراسر چین نشان دادند که اثر تجمعی و تأخیر زمانی خشکسالی بر $NDVI$ قابل مشاهده است و مدت زمان پاسخ گیاهان بسته به نوع پوشش گیاهی و اقلیم متفاوت است. پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی در مناطق مختلف و فصل‌های متفاوت می‌تواند متفاوت باشد. Chen et al. (2022) گزارش کردند که در حوزه رودخانه Nenjiang، همبستگی $NDVI$ با $SPEI$ در فصل‌های مختلف متفاوت است و چمنزارها در برخی فصل‌ها نسبت به خشکسالی حساس تر بودند که نشان‌دهنده اهمیت تحلیل فصلی و فضایی اثر خشکسالی است. راشکی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از شاخص SPI و $UNEP$ و اندازه‌گیری‌های میدانی نشان دادند که خشکسالی در منطقه ایرانشهر موجب کاهش تراکم سه گونه توج، کهور ایرانی و اسکنبیل شده است. شریفی پیچون و همکاران (۱۴۰۱)، با استفاده از دو شاخص خشکسالی SPI و $PNPI$ و شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ اثر خشکسالی را بر تغییرات پوشش گیاهی استان فارس مورد ارزیابی قرار دادند و بیان نمودند که شاخص SPI و $PNPI$ به ترتیب شدت خشکسالی و گستره‌های سرزمینی حداکثری؛ را با دقت بالایی نشان می‌دهند و نیز نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ با نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از دو شاخص خشکسالی SPI و $PNPI$ تطابق بالایی دارند؛ لذا هر دو شاخص خشکسالی را در مطالعات آینده جهت ارزیابی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی توصیه نمودند. صفدری موالن و مردانه (۱۴۰۲) با به کارگیری شاخص‌های

1. Standardized Precipitation Index

2. Percent of Normal Precipitation Index

3. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

4. Zhao

5. Normalized difference vegetation index

6. Leaf Area Index

7. lag effect

8. cumulative effect

خشکی - دمایی ($TVDI^1$) و $NDVI$ مستخرج از تصاویر سنجنده مادیس ارتباط خشکسالی حوضه سیاه کوه را با عوامل اقلیمی مورد ارزیابی قرار دادند و بیان داشتند که در مقایسه با شاخص $NDVI$ همبستگی شاخص $TDVI$ با شاخص SPI بیشتر بوده و دقت شاخص $TDVI$ نیز به مراتب بیشتر از شاخص $NDVI$ است. جهدی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده ($SPEI$) و بیشینه مقدار شاخص گیاهی تقویت شده (EVI^2) در ماه از محصولات $MODISQ1$ طیف‌سنج مادیس بیان داشتند که جنگل‌های استان گلستان به دلیل دارا بودن درصد بالایی از رطوبت نسبی نسبت به خشکسالی حساسیت نسبتاً پایینی دارند.

با اینکه مطالعات زیادی به بررسی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی پرداخته‌اند؛ اما اکثر مطالعات بر پایه مطالعات سنجش‌ازدور و بهره‌گیری از شاخص‌های حاصل از سنجنده ماهواره‌های مختلف بوده است. با این حال تحقیقات ناپیزی در ارتباط با تأثیر خشکسالی بر خصوصیات مهم گیاهی از جمله تراکم گیاهی بر مبنای داده‌های میدانی به‌ویژه در بوم نظام‌های درختی و درختچه‌ای مناطق خشک و بیابانی کشور انجام شده است. استان سیستان و بلوچستان باتوجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خشک و شکننده آن با بحران‌های متعدد اقلیمی به‌خصوص خشکسالی مواجه بوده که شرایط اقلیمی سخت و طاقت‌فرسای این منطقه ضرورت مطالعه اثرات خشکسالی بر گونه‌های بومی و سازگار این منطقه را جهت اخذ تصمیم مناسب توسط مدیران منابع طبیعی کشور دوچندان نموده است؛ لذا هدف این مطالعه ارزیابی اثر خشکسالی با استفاده از دو شاخص پرکاربرد SPI و $PNPI$ بر میزان تراکم دو گونه گیاهی بومی و سازگار به شرایط بیابانی جنوب شرق ایران یعنی چگرد (*Acacia ehrenbergiana Hayne*) و کنار (*Zizyphus spina-christi*) و نیز و یافتن فاصله زمانی واکنش تراکم این دو گونه گیاهی به شاخص‌های خشکسالی است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در دشت اسپکه با مساحتی بالغ بر ۴۵۸۰ کیلومترمربع و با ارتفاع ۷۸۶ متر نسبت به سطح آزاد دریا در ۴۰۰ کیلومتری زاهدان و در جنوب استان سیستان و بلوچستان در موقعیت جغرافیایی ۲۶.۷۵۵۵ تا ۲۷.۴۷۱۰ عرض شمالی و ۵۹.۶۰۸۳ تا ۶۰.۷۶۵۳ طول شرقی واقع گردیده است (شکل ۱). بر اساس آمار ۳۷ ساله (۱۳۶۶-۱۴۰۲) نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه (ایستگاه سینوپتیک ایرانشهر) میانگین بلندمدت بارندگی و دمای سالانه منطقه به ترتیب ۶۵ میلی‌متر و ۳۰ درجه سلسیوس، و بر مبنای منحنی آمبروترمیک (بارش - دما) طول دوره خشکی منطقه از اوایل فروردین تا اواخر آذرماه است (شکل ۲). دارای آب‌وهوای گرم و خشک و گاهی اوقات شرعی بوده که تحت تأثیر بادهای موسمی منطقه قرار دارد در زمستان سرد و خشک است (پرقال فرمانداری ایرانشهر). پوشش گیاهی طبیعی و بومی منطقه غالباً از نوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای چگرد (*Acacia ehrenbergiana Hayne*) و کنار (*Zizyphus spina-christi*) است که تیپ غالب منطقه را نیز تشکیل می‌دهند.

۲-۲. روش تحقیق

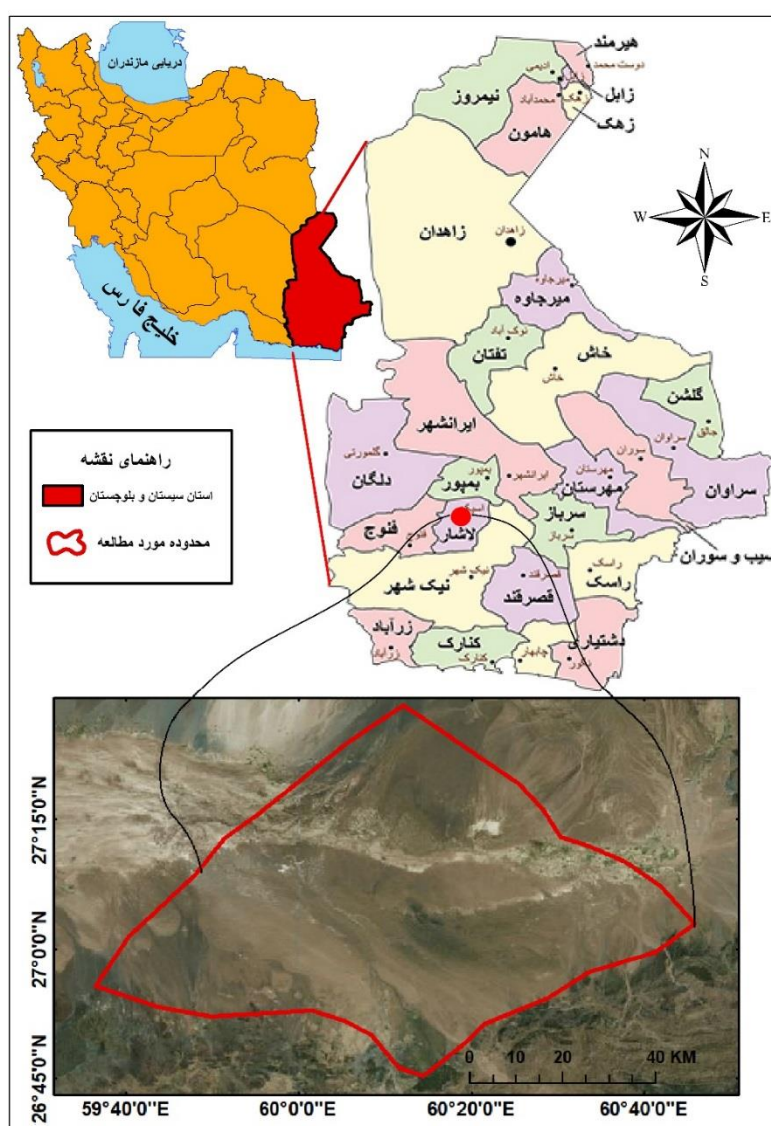
۲-۲-۱. شاخص استاندارد شده بارش (SPI)

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) به‌عنوان پرکاربردترین شاخص در مقیاس محلی تا جهانی در مطالعات پایش خشکسالی بر مبنای روابط فراوانی، مدت و بازه‌های زمانی خشک‌سالی و توزیع آماری گاما استوار است؛ زیرا که این توزیع آماری برازش مناسبی با داده‌های سری زمانی بارش دارد (McKee, 1993). شاخص SPI به‌عنوان یک شاخص ساده از لحاظ محاسبات و درعین حال قوی که تنها فاکتور مؤثر در محاسبه آن داده‌های بارن است (شمشیری، ۱۳۹۱). برای پایش دوره‌های مرطوب و خشک، و نیز شروع و خاتمه خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد

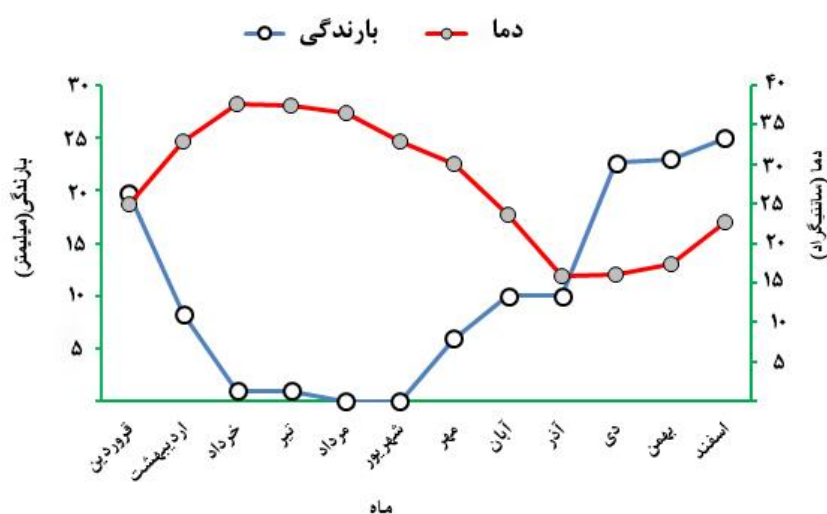
(Lorenzo-Lacruz et al., 2010). این شاخص که برای محاسبه کسری بارش بر اساس تفاوت بارش از میانگین در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۳۶ ماهه و تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید بر اساس رابطه شماره (۱) محاسبه می‌گردد که در آن $\bar{P}$ ، P_i و δ به ترتیب بارندگی سال جاری برحسب میلی‌متر، متوسط بلندمدت بارندگی بر حسب میلی‌متر و انحراف از معیار بارندگی متوسط سالانه برحسب میلی‌متر می‌باشد. در پژوهش حاضر شاخص SPI با بهره‌گیری از داده‌های بارش ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه بر مبنای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (سالانه) با استفاده از برنامه DIP^1 به منظور هشدار اولیه و پایش شدت خشکسالی محاسبه گردید و سپس شدت خشکسالی دشت اسپکه بر اساس جدول طبقه بندی کیفی شدت خشکسالی مربوط به شاخص SPI (جدول ۱) مشخص گردید.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\delta}$$

رابطه (۱)



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان سیستان و بلوچستان.



شکل ۲. منحنی آمبروترمیک دشت اسپکه بر اساس آمار ۳۷ ساله (۱۳۶۶-۱۴۰۲).

جدول ۱. شدت خشکسالی براساس شاخص استاندارد شده بارش (Vicente-Serrano et al., 2010)

شاخص استاندارد شده بارش	شدت خشکسالی
$SPI > 2$	ترسالی خیلی شدید
$1/50$ تا $1/99$	ترسالی شدید
1 تا $1/49$	ترسالی متوسط
$-0/99$ تا $0/99$	نرمال
-1 تا $-1/49$	خشکسالی متوسط
$-1/5$ تا $-1/99$	خشکسالی شدید
$SPI < -2$	خشکسالی بسیار شدید

۲-۲-۲. شاخص درصد بارش نرمال (PNPI)

شاخص PNPI به دلیل اینکه برای عموم مردم قابل فهم بوده و ساده‌ترین شاخص ارزیابی خشکسالی است (Willeke et al., 1984; Wilks, 2011) کارایی بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی داشته و توسط پژوهشگران زیادی در نقاط مختلف جهان جهت پایش خشکسالی به کارگیری شده است (Vogt et al., 2018). شاخص PNPI که از تقسیم میزان واقعی بارندگی در یک سال مشخص بر میزان میانگین بلندمدت بارندگی در یک منطقه خاص تعیین می‌گردد بر اساس رابطه شماره (۲) محاسبه و بر حسب درصد بیان می‌گردد که در این رابطه P_i و $\bar{P}$ به ترتیب بارندگی سال جاری بر حسب میلی‌متر و متوسط بلندمدت بارندگی بر حسب میلی‌متر می‌باشند. این شاخص را می‌توان برای مقیاس زمانی ماهانه و سالانه استفاده نمود (شمشیری، ۱۳۹۱). نکته حائز اهمیت مربوط به شاخص PNPI همواره مثبت بودن این شاخص می‌باشد. در پژوهش حاضر شاخص PNPI با بهره‌گیری از داده‌های بارش ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه بر مبنای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (سالانه) با استفاده از برنامه DIP محاسبه گردید و سپس بر اساس جدول طبقه‌بندی کیفی شدت خشکسالی مربوط به شاخص PNPI (جدول ۲) شدت خشکسالی مربوط به PNPI برای دشت اسپکه تعیین گردید.

$$PNPI = \frac{P_i}{\bar{P}}$$

(رابطه ۲)

جدول ۲. شدت خشکسالی بر اساس شاخص درصد بارش نرمال (Dogan et al., 2012)

PNPI (%)	۸۰	۷۰-۸۰	۵۵-۷۰	۴۰-۵۵	< ۴۰
شدت خشکسالی	نرمال	ضعیف	متوسط	شدید	خیلی شدید

۲-۲-۳. روش اندازه‌گیری میدانی تراکم گیاهی

جهت اندازه‌گیری تراکم درختان و درختچه‌ها در رویشگاه طبیعی گونه‌های چگرد و کنار طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۹، ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸، تعداد ۲۰ ترانسکت به طول ۱۰۰۰ متر در هر سال مستقر گردید. محل استقرار ترانسکت‌ها باتوجه به تراکم و توزیع گونه‌های گیاهی و فرم پوشش گیاهی به صورت سیستماتیک انتخاب گردید تا نمونه‌گیری نماینده‌ای از رویشگاه ایجاد شود. از یک سر هر ترانسکت شروع شده و تمام درختان و درختچه‌هایی که بخشی از تنه یا تاج آنها ترانسکت را قطع می‌کرد، ثبت گردید. همچنین، فاصله بین هر گیاه و گیاه بعدی در طول ترانسکت اندازه‌گیری شد تا امکان محاسبه تراکم واقعی فراهم گردد. به دلیل ناقص بودن اطلاعات برخی ترانسکت‌ها در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۴، داده‌های ۱۹۵ ترانسکت ثابت طی ۱۲ سال برای محاسبه تراکم استفاده شد. تراکم گونه‌های چگرد و کنار با استفاده از روابط ریاضی ارائه شده در منابع معتبر (روابط ۳، ۴ و ۵؛ زبیری، ۱۳۸۱؛ عابدی و همکاران، ۱۴۰۱) محاسبه گردید.

$$\bar{a}_j = \frac{(a1j + a1j \dots + akj)}{K} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$N_j = \frac{10000}{\bar{a}_j^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{j=1}^N N_j}{n} \quad \text{رابطه ۵}$$

در روابط فوق $k, a_j, n, N_j, \bar{a}_j$ و $\bar{N}$ به ترتیب تعداد فاصله بین درختان یا درختچه‌ها، فاصله درختان یا درختچه‌ها (متر)، تعداد در هکتار درختان یا درختچه‌ها در هر ترانسکت (تراکم در هر ترانسکت)، تعداد ترانسکت، میانگین فاصله درختان یا درختچه‌ها (متر) و میانگین تعداد در هکتار درختان یا درختچه‌ها (میانگین تراکم) می‌باشد.

۲-۲-۴. تجزیه و تحلیل آماری

پس از اینکه با استفاده از نرم‌افزار DIP شاخص‌های خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) و درصد بارش نرمال (PNPI) محاسبه شد در هر سال طبقه کیفی خشکسالی یا به عبارت دیگر شدت خشکسالی در آن سال بر مبنای جدول (۱ و ۲) تعیین گردید. سپس برای بررسی اثر خشکسالی و ترسالی بر میزان تراکم دو گونه گیاهی چگرد و کنار در منطقه مطالعاتی تمام طبقات ترسالی (متوسط، شدید و خیلی شدید) تحت عنوان ترسالی در نظر گرفته شد و بر همین مبنای تمام طبقات خشکسالی (ضعیف، متوسط، شدید و خیلی شدید) نیز تحت عنوان خشکسالی در نظر گرفته شد. در نهایت تراکم گیاهی در میان گونه‌های گیاهی (S^1)، خشکسالی (D^2) و تأثیر متقابل آنها ($D \times S$) با استفاده از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه^۳ بررسی و تست LSD^4 نیز برای مقایسه میانگین تراکم هر یک از گونه‌ها در دو دوره ترسالی و خشکسالی در سطح معنی داری ۵ درصد ($P < 0.05$) و به عبارتی به احتمال ۹۵ درصد به کار برده شد. باتوجه به اینکه ضرایب شاخص‌های خشکسالی تعداد سطوح زیادی دارند و این شاخص‌ها شدت خشکسالی را بر مبنای رتبه‌ها تفکیک می‌نمایند؛ لذا می‌بایست از ضریب همبستگی ناپارامتریک رتبه‌ای اسپیرمن^۵ جهت محاسبه همبستگی بین تراکم گیاهان و سالهای ترسالی و خشکسالی استفاده

1. Species

2. Drought

3. Two-way analysis of variance (ANOVA)

4. Least Significant Difference

5. Spearman

شود (بختیاری، ۱۴۰۰)؛ لذا در این پژوهش میزان همبستگی بین تراکم گونه‌های گیاهی با سال‌های وقوع ترسالی و خشکسالی با استفاده از آزمون همبستگی ناپارامتریک اسپیرمن محاسبه شد. به این صورت که همبستگی بین تراکم دو گونه چگرد و کنار در مقایسه با سال‌های وقوع ترسالی و خشکسالی برای هر دو شاخص SPI و PNPI محاسبه گردید.

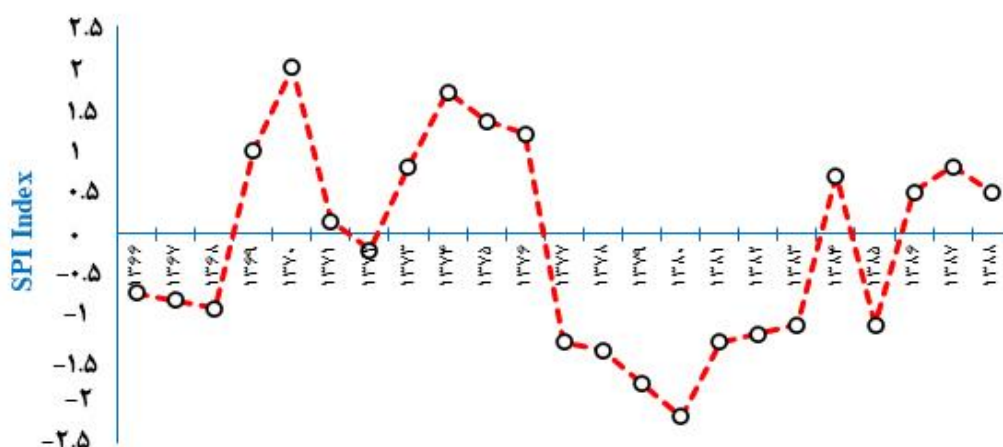
برای بررسی روند تغییرات تراکم دو گونه چگرد و کنار در مقایسه با سال‌های وقوع خشکسالی و ترسالی، ابتدا مقادیر شاخص‌های خشکسالی SPI و PNPI در سال‌های ترسالی را با هر کلاس شدتی (ضعیف، متوسط،.....) به عدد مثبت یک (+۱) و در سال‌های خشکسالی با هر کلاس شدتی (ضعیف، متوسط،.....) به عدد منفی یک (-۱) تبدیل گردید سپس نمودار تراکم هر دو گونه گیاهی در ارتباط با کلاس‌های تبدیل شده دو شاخص خشکسالی ترسیم شد. لازم به ذکر است که این روش برای اولین بار هست که در مطالعات روند تغییرات تراکم گیاهی در برابر کلاس‌های تبدیل شده شاخص‌های خشکسالی بکار برده می‌شود. در مطالعه حاضر تمام آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS و ترسیم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام پذیرفت.

۳. یافته‌های پژوهش

خروجی نرم‌افزار DIP برای شاخص SPI نشان داد که در طول دوره آماری ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۸؛ یک سال شرایط فرا مرطوب، یک سال شرایط بسیار مرطوب، سه سال شرایط نسبتاً مرطوب، ۱۰ سال شرایط نزدیک به نرمال، هفت سال شرایط نسبتاً خشک و یک سال شرایط فراخشک در طی این دوره بر منطقه حاکم بوده است (جدول ۳). مرطوب‌ترین و خشک‌ترین سال در منطقه مطالعه بر مبنای شاخص SPI به ترتیب با ارزش‌های ۲ و ۲/۲- مربوط به سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۸۰ بود (شکل ۳). بر مبنای شاخص SPI در منطقه مطالعه ۱۵ سال شرایط بارش مناسب و هشت سال میزان بارش از حد نرمال پایین‌تر بوده است. اما در همین دوره آماری شاخص PNPI نشان داد که ۱۲ سال شرایط ترسالی، یک سال شرایط خشکسالی ضعیف، دو سال خشکسالی شدید و هشت سال خشکسالی بسیار شدید بر منطقه حاکم بوده است (جدول ۳). مرطوب‌ترین و خشک‌ترین سال در منطقه مطالعه بر مبنای شاخص PNPI به ترتیب با ارزش‌های ۱۸۲ و ۱۵/۲- مربوط به سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۸۰ بود (شکل ۴). بر مبنای شاخص PNPI در این منطقه ۱۲ سال شرایط بارش نرمال و مناسب و ۱۱ سال بارش منطقه از حالت نرمال پایین‌تر بوده است. پس از محاسبه شاخص‌های خشکسالی SPI و PNPI برای سال‌های آماری موجود، روند تغییرات آنها نیز بصورت گرافیکی بررسی شد که بر مبنای شکل (۳ و ۴) الگوی روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی SPI و PNPI تقریباً مشابه می‌باشند.

جدول ۳. پایش خشکسالی بر مبنای شاخص‌های SPI و PNPI در دشت اسپکه.

PNPI		SPI		سال	PNPI		SPI		سال
مقدار	وضعیت	مقدار	وضعیت		مقدار	وضعیت	مقدار	وضعیت	
۲۶/۴	خشکسالی بسیار شدید	-۱/۴	نسبتاً خشک	۱۳۷۸	۱۳۷/۸	ترسالی	-۰/۷۱	نزدیک به نرمال	۱۳۶۶
۲۰/۷	خشکسالی بسیار شدید	-۱/۸	بسیار خشک	۱۳۷۹	۱۴۷/۴	ترسالی	-۰/۸	نزدیک به نرمال	۱۳۶۷
۱۵/۲	خشکسالی بسیار شدید	-۲/۲	فراخشک	۱۳۸۰	۱۳۳/۶	ترسالی	-۰/۹	نزدیک به نرمال	۱۳۶۸
۲۲/۲	خشکسالی بسیار شدید	-۱/۳	نسبتاً خشک	۱۳۸۱	۱۴۰/۹	ترسالی	۱	نسبتاً مرطوب	۱۳۶۹
۲۵/۵	خشکسالی بسیار شدید	-۱/۲	نسبتاً خشک	۱۳۸۲	۱۸۲/۸	ترسالی	۲	فرا مرطوب	۱۳۷۰
۲۰/۸	خشکسالی بسیار شدید	-۱/۱	نسبتاً خشک	۱۳۸۳	۱۲۵/۴	ترسالی	۰/۱۵	نزدیک به نرمال	۱۳۷۱
۳۷	خشکسالی بسیار شدید	۰/۷	نزدیک به نرمال	۱۳۸۴	۵۴/۷	خشکسالی شدید	-۰/۲	نزدیک به نرمال	۱۳۷۲
۳۵/۲	خشکسالی بسیار شدید	-۱/۱	نسبتاً خشک	۱۳۸۵	۱۴۷/۴	ترسالی	۰/۸	نزدیک به نرمال	۱۳۷۳
۴۹/۲	خشکسالی شدید	۰/۵	نزدیک به نرمال	۱۳۸۶	۱۴۲/۲	ترسالی	۱/۷	بسیار مرطوب	۱۳۷۴
۷۳/۳	خشکسالی ضعیف	۰/۸	نزدیک به نرمال	۱۳۸۷	۱۳۳/۹	ترسالی	۱/۳۵	نسبتاً مرطوب	۱۳۷۵
۸۸/۲	ترسالی	۰/۵	نزدیک به نرمال	۱۳۸۸	۱۲۹	ترسالی	۱/۲	نسبتاً مرطوب	۱۳۷۶
					۸۱/۸	ترسالی	-۱/۳	نسبتاً خشک	۱۳۷۷



شکل ۳. الگوی تغییرات شاخص SPI در دشت اسپکه بر اساس آمار ۳۷ ساله (۱۳۶۶-۱۴۰۲).



شکل ۴. الگوی تغییرات شاخص PNPI در دشت اسپکه بر اساس آمار ۳۷ ساله (۱۳۶۶-۱۴۰۲).

۳-۱. تحلیل آماری اثر خشکسالی بر میزان تراکم گیاهی

نتایج آزمون تجزیه واریانس دوطرفه نشان داد که پارامترهای خشکسالی (D) و گونه (S) به طور معنی‌داری تغییرات تراکم گونه‌های چگرد و کنار را در سطح یک درصد در دشت اسپکه ($P < 0.01$) توضیح می‌دهند (جدول ۴). میزان تراکم گیاهی گونه‌های چگرد و کنار در سال‌های وقوع ترسالی و خشکسالی (D) نیز با یکدیگر در سطح یک درصد ($P < 0.01$) تفاوت معنی‌دار داشتند و به عبارتی وقوع پدیده خشکسالی در سطح احتمال ۹۹ درصد بر میزان تراکم گونه‌های چگرد و کنار در دشت اسپکه تأثیر داشته است (جدول ۴). اما اثر متقابل خشکسالی و گونه ($S \times D$) بر میزان تراکم گیاهی در دشت اسپکه در سطح یک درصد ($P < 0.01$) تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴) به این معنا که اثر خشکسالی و نوع گونه به طور هم‌زمان بر میزان تراکم گیاهی در هر دو گونه یکسان بوده است.

نتایج آزمون LSD جهت مقایسه میانگین تراکم هر یک از گونه‌ها در دوره‌های ترسالی و خشکسالی نشان داد که تراکم گونه چگرد در دو دوره ترسالی و خشکسالی به ترتیب با میانگین $17/33 \pm 7/22$ و $8/66 \pm 4/78$ (تعداد پایه در هکتار) در سطح ۹۵ درصد اطمینان ($P < 0.05$) با همدیگر اختلاف معنی‌داری دارند (جدول ۵). همچنین تراکم گونه کنار در دو دوره ترسالی و خشکسالی به ترتیب با میانگین

۴/۵۱ ± ۸/۴۴ و ۳/۳۲ ± ۵/۱۱ (تعداد پایه در هکتار) در سطح احتمال ۹۵ درصد ($P < 0.05$) با همدیگر دارای اختلاف معنی دار بودند (شکل ۵).

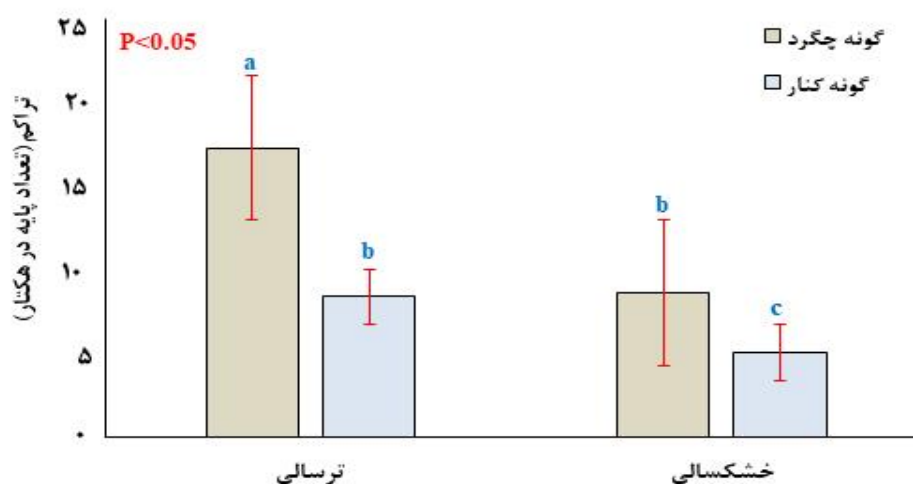
جدول ۴. نتایج آزمون تجزیه واریانس دوطرفه تأثیر گونه و خشکسالی بر تراکم چگرد و کنار در دشت اسپکه.

منابع تغییرات	درجه آزادی (DF)	F	P-Value
گونه (S)	۱	۲۹/۴۲	۰/۰۰۰۱
خشکسالی (D)	۱	۲۷/۳۶	۰/۰۰۰۱
گونه × خشکسالی (S × D)	۱	۵/۰۵	۰/۰۲۱

جدول ۵. نتایج آزمون مقایسه میانگین تراکم دو گونه چگرد و کنار در دوره‌های ترسالی و خشکسالی در دشت اسپکه.

گونه	ترسالی	خشکسالی
گونه چگرد	۱۷/۳۳ ± ۷/۲۲ ^a	۸/۶۶ ± ۴/۷۸ ^b
گونه کنار	۸/۴۴ ± ۴/۵۱ ^b	۵/۱۱ ± ۳/۳۲ ^c

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشد.



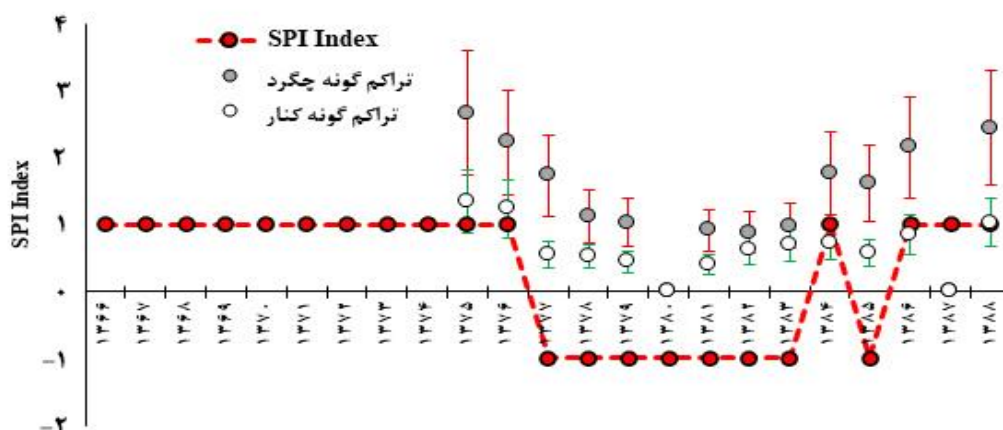
شکل ۵. مقایسه میانگین تراکم گونه چگرد و کنار در دو دوره ترسالی و خشکسالی در دشت اسپکه.

حروف مشابه به معنای عدم تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($P < 0.05$) می‌باشد.

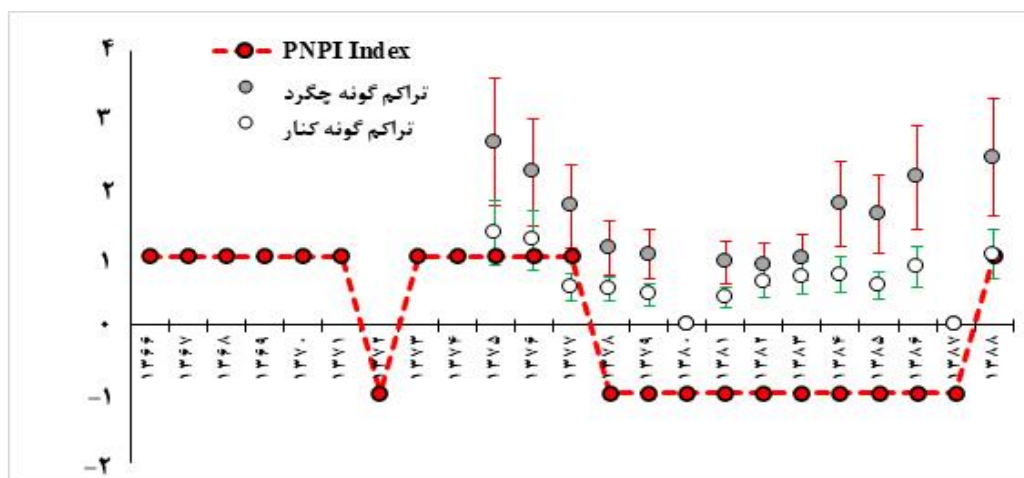
۲-۳. بررسی روند تغییرات تراکم گیاهی در ارتباط با شاخص‌های خشکسالی

برای بررسی روند تغییرات تراکم دو گونه چگرد و کنار در مقایسه با سال‌های وقوع خشکسالی و ترسالی؛ در این مطالعه اقدام به ترسیم تراکم هر دو گونه در مقابل کلاس‌های تبدیل شده هر دو شاخص خشکسالی SPI و PNPI شد. بیشترین و کمترین میزان تراکم گونه‌های گیاهی کنار و چگرد به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۸۱ می‌باشد که متناظر با دوره‌های ترسالی و خشکسالی است (شکل ۶ و ۷). نتایج نشان‌دهنده انطباق میزان تراکم گیاهی هر دو گونه با نمودار تبدیل شده شاخص SPI است به طوری که با افزایش و کاهش در کلاس‌های تبدیل شده شاخص SPI میزان تراکم گیاهی گونه‌های چگرد و کنار در دشت اسپکه نیز افزایش و کاهش یافته

است (شکل ۶). با یک مقایسه بصری می‌توان دریافت که در سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۷۶ و ۱۳۸۴ که ارزش کلاس تبدیل شده شاخص SPI در بالاترین میزان خود یعنی +۱ بوده میزان تراکم گیاهی هر دو گونه چگرد و کنار نیز بالا بوده است. بر اساس شکل (۷) میزان تراکم گیاهی هر دو گونه چگرد و کنار با نمودار تبدیل شده شاخص PNPI انطباق کمی نشان دادند به طوری که در نمودار تبدیل شده شاخص PNPI، با بالا بودن میزان تراکم گیاهی در سال ۱۳۷۵ و ۱۳۷۶؛ ارزش کلاس تبدیل شده این شاخص در بالاترین میزان خود یعنی (+۱) بود؛ اما در سال ۱۳۷۷ نیز با بالا بودن ارزش کلاس شاخص PNPI تبدیل شده، میزان تراکم گیاهی کاهش یافته بود (شکل ۷). همچنین در سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ با قرار گرفتن شاخص تبدیل شده PNPI در پایین‌ترین مقدار خود یعنی (-۱) تراکم گیاهی افزایش داشته است (شکل ۷). به طور کلی روند تغییرات میزان تراکم گیاهی هر دو گونه در نمودار تبدیل شده SPI تطابق بیشتری نسبت به نمودار تبدیل شده PNPI در دشت اسپکه داشته است (شکل ۶ و ۷). همچنین نحوه واکنش (افزایش یا کاهش) تراکم گیاهی در هر دو گونه چگرد و کنار در مقایسه با نوسانات شاخص تبدیل شده SPI یکسان است.



شکل ۶. روند تغییرات تراکم دو گونه گیاهی چگرد و کنار در ارتباط با شاخص تبدیل شده SPI (در این نمودار تراکم بر حسب تعداد پایه در هر هزار مترمربع محاسبه شده است).



شکل ۷. روند تغییرات تراکم دو گونه گیاهی چگرد و کنار در ارتباط با شاخص تبدیل شده PNPI (در این نمودار تراکم بر حسب تعداد پایه در هر هزار مترمربع محاسبه شده است).

در دشت اسپکه میزان تراکم گیاهی معمولاً چندین سال بعد از وقوع سال‌های ترسالی و خشکسالی در دوره آماری واکنش نشان داده؛ به عبارتی دیگر چند سال بعد از وقوع مرطوب‌ترین و خشک‌ترین سال میزان تراکم هر دو گونه گیاهی افزایش و کاهش نشان داده است. بر مبنای شکل (۳) سال ۱۳۷۴ دومین سال مرطوب در دوره آماری مورد بررسی بوده (بر مبنای شاخص SPI) که در سال بعد آن یعنی ۱۳۷۵ گونه گیاهی کنار و چگرد بیشترین تراکم را داشته‌اند. در واقع بیشترین تراکم گونه گیاهی از میزان بالای شاخص SPI از سال قبل تأثیر پذیرفته است. به طور مشابه در شاخص PNPI دومین و سومین سال مرطوب نیز به ترتیب در سال ۱۳۷۳ و ۱۳۷۴ به وقوع پیوسته و در سال بعد (سال ۱۳۷۵) گونه‌های گیاهی بیشترین تراکم را داشته‌اند. همچنین بر مبنای هر دو شاخص SPI و PNPI شدیدترین خشکسالی در سال ۱۳۸۰ اتفاق افتاده که کمترین میزان تراکم پوشش گیاهی هر دو گونه کنار و چگرد نیز در یک و دو سال بعد از آن به وقوع پیوسته است.

۳-۳. همبستگی بین تراکم گیاهی با شاخص‌های خشکسالی

ضریب همبستگی اسپیرمن بین تراکم گیاهی با دوره‌های ترسالی و خشکسالی بر مبنای شاخص SPI برای گونه چگرد به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۹۶ و برای گونه کنار ۰/۸۸ و ۰/۷۴ است (جدول ۵). همچنین ضریب همبستگی اسپیرمن بین تراکم گیاهی با دوره‌های ترسالی و خشکسالی بر مبنای شاخص PNPI برای گونه چگرد به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۲۰ و برای گونه کنار ۰/۸۳ و ۰/۶۶ می‌باشد (جدول ۶). باتوجه به اینکه شاخص PNPI برای گونه چگرد قابل اعتماد نبود، نتایج حاصل از آن باید با احتیاط تفسیر گردند و مقایسه این گونه با گونه کنار بر اساس این شاخص محدودیت دارد. ضریب همبستگی تراکم گونه گیاهی کنار در دوره‌های ترسالی در هر دو شاخص نسبت به دوره‌های خشکسالی بیشتر بود (جدول ۵ و ۶). اما میزان ضریب همبستگی تراکم گونه گیاهی چگرد در دوره‌های خشکسالی در شاخص SPI نسبت به دوره ترسالی بالاتر بود (جدول ۵).

جدول ۶. ماتریس همبستگی تراکم دو گونه چگرد و کنار با دوره‌های ترسالی و خشکسالی بر مبنای شاخص SPI.

ترسالی	خشکسالی
۰/۶۲	۰/۹۶
۰/۸۸	۰/۷۴

جدول ۷. ماتریس همبستگی تراکم دو گونه چگرد و کنار با دوره‌های ترسالی و خشکسالی بر مبنای شاخص PNPI.

ترسالی	خشکسالی
چگرد	۰/۴۴
کنار	۰/۸۳
	۰/۶۶

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱. بحث

هر چند که الگوی روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی SPI و PNPI در دشت اسپکه تقریباً مشابه هستند (شکل ۳ و ۴) و به‌صورت مقایسه بصری می‌توان استقرا نمود که این دو شاخص برای تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند؛ اما باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) شاخص PNPI فراوانی وقوع خشکسالی را در دشت اسپکه نسبت به شاخص SPI بیشتر نشان داد.

این اختلاف می‌تواند ناشی از سخت‌گیری بیشتر شاخص PNPI در شناسایی کاهش‌های کوتاه‌مدت بارش باشد که در مناطق خشک و بیابانی مانند دشت اسپکه، نوسانات شدید بارش رخ می‌دهد. در نتیجه، PNPI باتوجه به حساسیت بالاتر به افت‌های جزئی بارش، فراوانی وقوع خشکسالی را بیشتر برآورد نموده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب شاخص مناسب برای ارزیابی خشکسالی در مناطق خشک و بیابانی اهمیت دارد و تفاوت شاخص‌ها باید در تحلیل و تفسیر نتایج لحاظ شود.

شاخص PNPI برای گونه چگرد در این مطالعه قابل‌اعتماد تشخیص داده نشد. علت این محدودیت می‌تواند ناشی از پاسخ غیرخطی گونه چگرد به تغییرات بارش، پراکنش نامنظم و تراکم پایین آن، و تأثیر عوامل محیطی غیر بارشی مانند خاک، شیب و رقابت با سایر گونه‌ها باشد. همچنین، ناقص بودن داده‌های برخی ترانسکت‌ها در برخی سال‌ها باعث شد که شاخص PNPI برای این گونه ناپایدار و بااحتیاط تفسیر شود؛ بنابراین، نتایج مرتبط با چگرد بر اساس این شاخص باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های ذکر شده تفسیر گردند و مطالعات آینده می‌توانند از شاخص‌های مکمل یا داده‌های طولانی‌مدت‌تر برای ارزیابی عملکرد این گونه استفاده نمایند.

اختلاف مشاهده‌شده بین نتایج شاخص PNPI و SPI در این مطالعه منشأ در ماهیت محاسباتی متفاوت این دو شاخص داشت. شاخص PNPI مستقیماً نسبت بارش واقعی را به بارش میانگین بلندمدت بیان کرد، بدون اینکه توزیع آماری داده‌ها استانداردسازی شود، درحالی‌که شاخص SPI از برازش توزیع آماری (معمولاً گاما) و سپس تبدیل به توزیع نرمال استاندارد استفاده می‌کند تا انحراف بارش از میانگین بلندمدت به صورت «واحد انحراف معیار» گزارش شود که این فرایند باعث کاهش حساسیت نسبت به نوسانات شدید بارش در اقلیم‌های خشک می‌شود (McKee et al. 1993). از آنجا که دشت اسپکه دارای بارش کم و پراکندگی ناهمگون بارش است، PNPI به دلیل حساسیت مستقیم به انحرافات بارش واقعی نسبت به میانگین مقدار بیشتری از فراوانی خشکسالی را نشان داد، در حالی که SPI به واسطه استانداردسازی آماری این اختلافات را تعدیل نمود (McKee et al. 1993)؛ این تفاوت ماهوی در فرمولاسیون و عدم استانداردسازی PNPI نسبت به SPI باعث اختلاف در نتایج خشکسالی شد و اهمیت انتخاب شاخص مناسب بر اساس هدف و اقلیم مطالعه را برجسته ساخت.

در همین راستا نتایج تحقیقات شایق و سلطانی (۱۳۹۰) نشان داد که شاخص PNPI در مناطق خشک جهت پایش خشکسالی مناسب نبوده و در مقیاس سالانه شاخص SPI نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی نتایج بهتری را گزارش نموده است. بذرافشان (۱۳۸۱)، با بررسی چندین شاخص خشکسالی در چندین نمونه اقلیمی کشور شاخص SPI را جهت پایش خشکسالی مناسب دانستند. شاخص PNPI از نقطه نظر توالی و شدت ارائه ارزیابی‌های پدیده خشکسالی و نیز در تفکیک ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها و فراوانی وقوع آنها تقریباً با شاخص SPI تشابه بیشتری داشته؛ اما در شاخص PNPI چون عنصر بارندگی از توزیع نرمال تبعیت نکرده؛ بنابراین کاربرد این شاخص از شاخص SPI محدودتر بوده است (خلیقی سیگارودی، ۱۳۸۸). لذا بر اساس نتایج تحقیق حاضر نیز شاخص SPI را به منظور تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی هواشناسی در مناطق خشک و بیابانی جنوب شرق ایران پیشنهاد شده است.

نتایج آماری نشان داد که خشکسالی اثر معنی‌داری بر کاهش تراکم دو گونه چگرد و کنار داشته است. همچنین، تفاوت در ضریب همبستگی بین تراکم گونه کنار و شاخص‌های خشکسالی در دوره‌های ترسالی و تراکم گونه چگرد در دوره‌های خشکسالی می‌تواند ناشی از ویژگی‌های مورفولوژیک و اکولوژیکی گونه‌ها باشد. گونه‌هایی که سیستم ریشه‌ای سطحی دارند، مانند کنار، به افزایش آب خاک در دوره‌های ترسالی سریع‌تر واکنش نشان داده و تراکم بیشتری را تجربه می‌کنند، درحالی‌که گونه‌هایی با مقاومت متفاوت ممکن است در مواجهه با خشکسالی‌های شدید رفتار متفاوتی نشان دهند این الگو با یافته‌های دیگر مطالعات در مناطق خشک نیز سازگار است (Liu et al., 2024).

نتایج آزمون تجزیه واریانس دوطرفه (جدول ۴) و نتایج آزمون مقایسه میانگین (شکل ۵) نشان دهنده تأثیرات معنی‌دار خشکسالی بر میزان تراکم هر دو گونه چگرد و کنار در دشت اسپکه بود به طوری که تعداد پایه گونه چگرد از ۱۷/۳۳ پایه در هکتار تحت تأثیر خشکسالی به ۸/۶۶ پایه در هکتار رسیده است (شکل ۵) به عبارتی ۵۰ درصد کاهش در تعداد پایه‌های گونه چگرد همچنین به طور

مشابه خشکسالی موجب کاهش تعداد پایه‌های گونه کنار از ۸/۴۴ پایه در هکتار به ۵/۱۱ پایه در هکتار گردیده که معادل کاهش ۳۹ درصدی تعداد پایه‌های گونه کنار در دشت اسپکه می‌باشد. این کاهش تراکم می‌تواند از تنش آبی و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان ناشی شود، زیرا بارش کاهش یافته باعث کمبود آب قابل دسترس برای گیاه می‌گردد و این امر رشد، فتوسنتز و تقسیم سلولی را مختل می‌کند. بنابراین، کاهش تراکم در شرایط خشکسالی با اختلال در توازن آب و پاسخ‌های فیزیولوژیک منفی گیاهان همسو است که در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است (Zhang et al., 2023). با افزایش خشکی و شدت خشکسالی رشد گیاهان کاهش یافته و نرخ مرگومیر درختان افزایش می‌یابد (Bradford et al., 2021; McNellis et al., 2021). نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعه گویووریا^۱ و همکاران (۲۰۱۷) که اثر خشکسالی را بر گونه‌های مناطق بیابانی منفی ارزیابی نموده همخوانی دارد. همچنین نتایج مطالعه حاضر با نتایج سایر مطالعات که نتیجه گیری نموده بودند با افزایش شدت خشکسالی میزان تراکم پوشش گیاهی کاهش خواهد یافت مطابقت دارد (Li et al., 2009). جهدی و همکاران (۱۴۰۳) بیان داشتند که بالا بودن درصد رطوبت نسبی هوا موجب کاهش حساسیت پوشش گیاهی به پدیده خشکسالی می‌گردد؛ لذا می‌توان چنین نتیجه گیری نمود که کاهش تعداد پایه گونه‌های چگرد و کنار در منطقه خشک و بیابانی دشت اسپکه ناشی از پایین بودن رطوبت نسبی هوا در این منطقه می‌باشد که موجب افزایش حساسیت پوشش گیاهی به خشکسالی و در نتیجه کاهش تعداد پایه گونه‌های مذکور شده است. ژاوپینگ و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند که در مناطق خشک به دلیل اینکه دمای سطح زمین و نیز دما هوا بالا می‌باشد حساسیت پوشش گیاهی به خشکسالی زیاد است. باقری و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهش خود نشان دادند که در اکوسیستم‌های خشک و بیابانی جنوب شرق کشور همانند سیستان و بلوچستان باتوجه به کاهش رطوبت خاک در نتیجه خشکسالی و افزایش دمای هوا؛ پوشش گیاهی کاهش خواهد یافت.

در دشت اسپکه روند تغییرات تراکم دو گونه چگرد و کنار بر مبنای نمودار کلاس‌های تبدیل شده دو شاخص خشکسالی SPI و PNPI حاکی از همخوانی بالای میزان تراکم گیاهی هر دو گونه با نمودار تبدیل شده شاخص SPI است (شکل ۶) و نحوه واکنش تراکم گیاهی هر دو گونه چگرد و کنار نیز با نوسانات شاخص تبدیل شده SPI یکسان بود (شکل ۶). از جمله یافته‌های مهم این مطالعه تأخیر در واکنش میزان تراکم گیاهی چند سال بعد از وقوع ترسالی و خشکسالی بود. به‌طوری که بیشترین تراکم گونه گیاهی از میزان بالای شاخص SPI از سال قبل تأثیر پذیرفته است. بررسی واکنش تراکم گیاهی در طول زمان نشان داد که پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی و ترسالی می‌تواند دارای تأخیر زمانی باشد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که پاسخ شاخص‌های پوشش گیاهی به خشکسالی اغلب تا چند دوره بعد از وقوع رویداد خشکی قابل مشاهده است، زیرا کاهش ذخیره آب در خاک ابتدا فرایندهای رشد را تحت تأثیر قرار داده و سپس در شاخص‌های تراکم منعکس می‌شود (Liu et al., 2024).

خسروی^۲ و همکاران (۲۰۱۷) تراکم گیاهی را در هر سال با اطمینان ۹۵ درصد به ارزش SPI در سال قبل مرتبط دانستند. علاوه بر این، بررسی کلی تعامل پوشش گیاهی و خشکسالی در مقیاس جهانی نشان داده است که شاخص‌های خشکسالی مانند SPI با شاخص‌های پوشش گیاهی مثل (LAI) همبستگی معناداری دارد و این همبستگی غالباً انعکاسی از کاهش تدریجی گیاهان تحت تنش خشکی است (Zhao et al., 2024). پایین‌ترین میزان تراکم گیاهی در هر دو گونه کنار و چگرد بر مبنای هر دو شاخص SPI و PNPI به فاصله یک و دو سال بعد از وقوع شدیدترین خشکسالی اتفاق افتاده (شکل ۶ و ۷) است که با نتایج خسروی و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. پی^۳ و همکاران (۲۰۱۳) نیز بیان داشتند زمان وقوع خشکسالی بر واکنش اکوسیستم به خشکسالی تأثیر می‌گذارد. ژانگ^۴ و همکاران (۲۰۱۲) بیان داشتند که خشکسالی در فصل بهار منجر به کاهش قابل توجهی در سبزیگی گیاهان در جنوب غربی چین شده است. ژائو^۵ و همکاران (۲۰۱۸) بیان داشتند که خشکسالی با یک تأخیر زمانی بر پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.

1. Gouveia
2. Khosravi
3. Pei

4. Zhang
5. Zhao

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که ضریب همبستگی اسپیرمن تراکم گیاهی با شاخص‌های خشکسالی در گونه کنار در دوره‌های ترسالی و در گونه چگرد در دوره‌های خشکسالی بالاتر است (جدول ۵ و ۶). بالا بودن ضریب همبستگی بین تراکم گیاهی گونه کنار و شاخص‌های خشکسالی در دوره‌های ترسالی احتمالاً به دلیل آب‌دوست بودن و سطحی بودن ریشه‌های کنار باشد. همچنین، تفاوت در ضریب همبستگی بین تراکم گونه کنار و شاخص‌های خشکسالی در دوره‌های ترسالی و تراکم گونه چگرد در دوره‌های خشکسالی می‌تواند ناشی از ویژگی‌های مورفولوژیک و اکولوژیکی گونه‌ها باشد. گونه‌هایی که سیستم ریشه‌ای سطحی دارند، مانند کنار، به افزایش آب خاک در دوره‌های ترسالی سریع‌تر واکنش نشان داده و تراکم بیشتری را تجربه می‌کنند، در حالی که گونه‌هایی با مقاومت متفاوت ممکن است در مواجهه با خشکسالی‌های شدید رفتار متفاوتی نشان دهند؛ این الگو با یافته‌های دیگر مطالعات در مناطق خشک نیز سازگار است (Liu et al., 2024). در خسروی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از NDVI نشان دادند که همبستگی بین تراکم گیاهی مراتع یزد و شاخص خشکسالی SPI؛ ۰/۹۴ بوده و نتیجه‌گیری نمودند که تراکم گیاهی به تغییرات SPI حساسیت زیادی دارد. مناطق خشک به دلیل حساسیت بالا به خشکسالی وضعیت اکولوژیکی ناپایداری دارند (Prince et al., 2007). هوانگ^۱ و همکاران (۲۰۱۶) بیان داشتند که گیاهان تولیداتشان در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک با توجه به حساسیت بالا به تغییرات اقلیمی، به طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات محلی و جهانی اقلیم هستند.

۴-۲. نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه اثر خشکسالی بر مبنای دو شاخص خشکسالی SPI و PNPI بر میزان تراکم دو گونه گیاهی چگرد و کنار مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از شاخص‌های SPI و PNPI به منظور تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی هوشناسی تقریباً مشابه اما در شاخص PNPI چون عنصر بارندگی از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند و کاربرد آن از شاخص SPI محدودتر هست؛ لذا تحقیق حاضر جهت تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی در مناطق خشک و بیابانی جنوب شرق ایران شاخص SPI را توصیه می‌نماید. در دشت اسپکه روند تغییرات تراکم دو گونه چگرد و کنار بر مبنای نمودار کلاس‌های تبدیل شده دو شاخص خشکسالی SPI و PNPI حاکی از همخوانی بالای میزان تراکم گیاهی هر دو گونه با نمودار تبدیل شده شاخص SPI بود. همچنین بر مبنای نمودار تبدیل شده شاخص SPI مشخص گردید که تأخیر در واکنش میزان تراکم گیاهی یک تا دوساله بعد از وقوع ترسالی و خشکسالی خواهد بود.

نتایج این مطالعه نشان داد که خشکسالی اثر معنی‌داری بر کاهش تراکم گونه‌های چگرد و کنار داشته است؛ کاهش تراکم گونه چگرد ۵۰ درصدی و گونه کنار ۳۹ درصدی بوده است، که بیانگر حساسیت بالای پوشش گیاهی دشت اسپکه به تنش آبی است. همچنین تفاوت پاسخ گونه‌ها به خشکسالی با توجه به ویژگی‌های اکولوژیکی و مورفولوژیکی آنها مشاهده شد؛ گونه کنار به دلیل ریشه سطحی و نیاز آبی بیشتر نسبت به خشکسالی حساس‌تر بوده است. بر اساس نتایج ضریب همبستگی اسپیرمن و همخوانی تراکم گونه‌ها با شاخص‌های خشکسالی، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص‌های SPI و PNPI ابزار مناسبی برای ارزیابی اثر خشکسالی بر تراکم گیاهی در این منطقه هستند. در این مطالعه شاخص‌های خشکسالی در مقیاس سالانه بررسی شده که حال با این حال، بررسی اثرات خشکسالی در فصول مختلف سال و استفاده از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی به منظور تعیین دقیق‌تر رابطه بین خشکسالی و متغیرهای پوشش گیاهی توصیه می‌شود. با توجه به شرایط اقلیمی و خشکی شدید دشت اسپکه، کاشت گونه‌های روبوستیکا و عربیکا در این منطقه توصیه نمی‌شود، زیرا این گونه‌ها نیاز آبی بالاتری دارند و با تنش خشکی قابل توجه منطقه سازگار نخواهند بود. به جای آن، توسعه و حمایت از گونه‌های بومی مقاوم به خشکی مانند چگرد و کنار و استفاده از راهکارهای مدیریت منابع آب و خاک می‌تواند به پایداری اکوسیستم و کاهش آسیب‌های خشکسالی کمک کند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده تأثیرات بلندمدت خشکسالی بر تراکم و پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های تبدیل شده خشکسالی و داده‌های میدانی انجام شود تا اثرات دقیق‌تر و کاربردی‌تر برای مدیریت اکوسیستم‌های خشک فراهم گردد.

References

- Allen, C., Macalady, A., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660-684.
- Anderegg, W. R. L., Anderegg, L. D. L., Kerr, K. L., & Trugman, A. T. (2019). Widespread drought-induced tree mortality at dry range edges indicates that climate stress exceeds species' compensating mechanisms. *Global Change Biology*, 25(11), 3793-3802.
- Azad, B., Afzali, S. F., & Francaviglia, R. (2020). Simulating soil CO₂ emissions under present and climate change conditions in selected vegetation covers of a semiarid region. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(5), 3087-3098. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02581-3>
- Bajgain, R., Xiao, X., Wagle, P., Basara, J., & Zhou, Y. (2015). Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 151-160.
- Bagheri S, Heydari Alamdarloo E, Khosravi H, & Abolhasani A. (2021). The effect of meteorological drought on vegetation dynamics in Iran. 622-637, 15(4) (In Persian).
- Bradford, J. B., Andrews, C. M., Robles, M. D., McCauley, L. A., Woolley, T. J., & Marshall, R. M. (2021). Landscape-scale restoration minimizes tree growth vulnerability to 21st century drought in a dry forest. *Ecological Applications*, 31(2), e2238.
- Bradford, J. B., Schlaepfer, D. R., Lauenroth, W. K., & Palmquist, K. A. (2020). Robust ecological drought projections for drylands in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(7), 3906-3919.
- Bradford, J. B., Shriver, R. K., Robles, M. D., McCauley, L. A., Woolley, T. J., Andrews, C. A., Crimmins, M., & Bell, D. M. (2022). Tree mortality response to drought-density interactions suggests opportunities to enhance drought resistance. *Journal of Applied Ecology*, 59(2), 549-559.
- Chai, Y., Miao, C., AghaKouchak, A. et al. (2025). Flash droughts exacerbate global vegetation loss and delay recovery. *Nat Commun*. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67173-x>
- Dogan, S., Berktaş, A., & Singh, V. P. (2012). Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470-471, 255-268.
- Gazol, A., Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., Vicente-Serrano, S. M., Serra-Maluquer, X., Gutiérrez, E., de Luis, M., Sangüesa-Barreda, G., Novak, K., Rozas, V., Tiscar, P. A., Linares, J. C., Martínez del Castillo, E., Ribas, M., García-González, I., Silla, F., Camisón, Á., Génova, M., Olano, J. M., & Galván, J. D. (2020). Drought legacies are short, prevail in dry conifer forests and depend on growth variability. *Journal of Ecology*, 108(6), 2473-2484.
- Gazol, A., Pizarro, M., Hammond, W. M., et al. (2025). Droughts preceding tree mortality events have increased in duration and intensity, especially in dry biomes. *Nature Communications*, 16, 5779. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60856-5>
- Gouveia, C. M., Trigo, R. M., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. *Global and Planetary Change*, 151, 15-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.06.011>
- Hosseini, A. (2024). Drought-Induced Tree Decline Changed the Structure of Persian Oak Forests. *Forestist*, 74(3), 327-332. <https://doi.org/10.5152/forestist.2024.23087>
- Huang, L., He, B., Chen, A., Wang, H., Liu, J., Lü, A., & Chen, Z. (2016). Drought dominates the interannual variability in global terrestrial net primary production by controlling semi-arid ecosystems. *Scientific reports*, 6, 24639.
- Khalighi, S., Sh, Sadeghi, S., S.A, Awsati, Kh, & Ghavidel Rahimi, Y. (2009). The Study of Drought and Wet Year Assessment models for Stations in Mazandaran province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 16(1), 44-54. (In Persian).
- Khosravi, H., Haydari, E., Shekoohizadegan, S., & Zareie, S. (2017). Assessment the Effect of Drought on Vegetation in Desert Area using Landsat Data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20, S3-S12.
- Li, B., H. Tang & Chen, D. (2009). Drought Monitoring Using the Modified Temperature/Vegetation Dryness Index, *2nd International Congress on Image and Signal Processing*, China.
- Li, K., Tong, Z., Liu, X., Zhang, J., & Tong, S. (2020). Quantitative assessment and driving force analysis of vegetation drought risk to climate change: Methodology and application in Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 282-283, 107865.

- Lian, X., Piao, S., Chen, A., Huntingford, C., Fu, B., Li, L. Z. X., Huang, J., Sheffield, J., Berg, A. M., Keenan, T. F., McVicar, T. R., Wada, Y., Wang, X., Wang, T., Yang, Y., & Roderick, M. L. (2021). Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(4), 232-250.
- Liu, H., Tian, W., Li, J., Tian, H., Wang, Y., Li, L., & Wang, T. (2023). Dry air valley in the upper troposphere over the eastern Mediterranean-western Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 283, 106561.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1), 13-26.
- McDowell, N. G., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B. H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J. S., Dietze, M., Grossiord, C., Hanbury-Brown, A., Hurtt, G. C., Jackson, R. B., Johnson, D. J., Kueppers, L., Lichstein, J. W., Ogle, K., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Seidl, R., & Xu, C. (2020). Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 368(6494).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. R. (1993). THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES.
- McNellis, B. E., Smith, A. M. S., Hudak, A. T., & Strand, E. K. (2021). Tree mortality in western U.S. forests forecasted using forest inventory and Random Forest classification. *Ecosphere*, 12(3), e03419.
- Mohammad Sharifi, P., Zahra, B., & Forough, M. (2023). Temporal-spatial evaluation of the drought process and its effects on vegetation changes in Fars province. *Arid regions Geographic Studies*, 13(50), 40-57. (In Persian).
- Molan, A. S., & Mardaneh, A. (2024). Investigating the Trend of Drought Changes with Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) and Its Relationship with Atmospheric Factors (Case Study: Siah Kooh Watershed). *Journal of Water and Sustainable Development*, 10(3), 99-108. (In Persian).
- Muthuvel, D., & Qin, X. (2025). Probabilistic analysis of future drought propagation, persistence, and spatial concurrence in monsoon-dominant Asian regions under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29, 3203–3222. <https://doi.org/10.5194/hess-29-3203-2025>
- Naser, R., Alireza, S., & Mohammad, Z. (2020). Evaluation of Drought Impact on Tree and Shrub Species such as *Prosopis*, *Salvadora Persica*, and *Calligonum Comosum* in North of Iranshahr in Iran. *Journal of Natural environment hazards*, 9(24), 99-1. (In Persian).
- Park Williams, A., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Swetnam, T. W., Rauscher, S. A., Seager, R., Grissino-Mayer, H. D., Dean, J. S., Cook, E. R., Gangadagamage, C., Cai, M., & McDowell, N. G. (2013). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 3(3), 292-297.
- Patriarca, C., Bako, M., Branthomme, A., Frescino, T. S., Haddad, F. F., Hamid, A. H., Martucci, A., Chour, H. O., Patterson, P. L., & Picard, N. (2019). Trees, forests and land use in drylands: The first global assessment. FAO Forestry Paper No. 184. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 184 p.
- Pei, F., Li, X., Liu, X., & Lao, C. (2013). Assessing the impacts of droughts on net primary productivity in China. *Journal of Environmental Management*, 114, 362-371.
- Prince, S. D., Wessels, K. J., Tucker, C. J., & Nicholson, S. E. (2007). Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology*, 13(7), 1308-1313.
- Rajanna, G. A., Suman, A., & Venkatesh, P. (2023). Mitigating Drought Stress Effects in Arid and Semi-Arid Agro-Ecosystems through Bioirrigation Strategies—A Review. *Sustainability*, 15(4).
- Randriatsara, H. H.-R. H., Holtanova, E., Rizwan, K., Babaousmail, H., Rabazanahary, M. F. T., Posset, K. R., Alupot, D., & Ayugi, B. O. (2025). Historical changes in drought characteristics and their impact on vegetation cover over Madagascar. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25, 2939–2961. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-2939-2025>
- Rohayeh, J., & Mahin, H. (2024). Analyzing the Effects of Meteorological Drought on Vegetation Dynamics in the Golestan Province. *Geography and Sustainability of Environment*, 14(52), 39-51. (In Persian).
- Roya, A., Fariborz, Z., & Manijeh, M. (2022). Quantitative and qualitative morphological characteristics study of wild pistachio trees (*Pistacia atlantica* Desf.) in natural forest stands of Arasbaran. *Journal of Environmental Science Studies*, 7(1), 4503-4511. (In Persian).
- Sajedeh, B., Mojdeh, M., Soudabeh Golestani, K., & Bahram, B. (2021). Identify The onthly and Annual Trend of Air and Soil Temperature Changes Using Parametric and Non-parametric Statistical Methods at Three Synoptic Stations in Southeast of Iran. *Nivar*, 45(112), 16-27. (In Persian).

- Sathya, L., & Lalitha, R. (2019). Performance of Drought Indices in Trichy Region, Tamil Nadu. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 38(5), 1-10.
- Senf, C., Buras, A., Zang, C. S., Rammig, A., & Seidl, R. (2020). Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications*, 11(1), 6200.
- Shamsheri, S., Ghaffari, S., Mohammadi, Kh., & Soltani, S. (2012). Investigating the Drought Situation Based on Drought Indices in Kermanshah City. *The First National Conference on Desert (Sciences, Technologies and Sustainable Development)*, Tehran. <https://civilica.com/doc/160352>. (In Persian).
- Steinemann, A. (2003). DROUGHT INDICATORS AND TRIGGERS: A STOCHASTIC APPROACH TO EVALUATION. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39(5), 1217-1233. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb03704.x>
- Swain, S., Patel, P., & Nandi, S. (2017, 23-28 July 2017). Application of SPI, EDI and PNPI using MSWEP precipitation data over Marathwada, India. 2017 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*,
- Tang, J., Niu, B., Hu, Z., Zhang, X., et al. (2024). Increasing susceptibility and shortening response time of vegetation productivity to drought from 2001 to 2021. *Agricultural and Forest Meteorology*, 359, 110025. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110025>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., & Domínguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Science Reviews*, 201, 102953.
- Vogt, J., Naumann, G., Masante, D., Spinoni, J., Cammalleri, C., Erian, W., Pischke, F., Pulwarty, R., & Barbosa, P. (2018). Drought risk assessment and management. A Conceptual Framework.
- Wilhite, D. A. (1992). Preparing for drought :a guidebook for developing countries. In. Nairobi : UNEP.
- Wilks, D. S. (2019). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Elsevier.
- Willeke, G., Engineers, U. S. A. C. o., Center, W. R. S., & Resources, U. S. A. E. I. f. W. (1994). The National Drought Atlas. U.S. Army Corps of Engineers, Water Resources Support Center, Institute for Water Resources.
- Xiao, C., Zaehle, S., Yang, H., Wigneron, J.-P., Schmullius, C., & Bastos, A. (2023). Land cover and management effects on ecosystem resistance to drought stress. *Earth System Dynamics*, 14, 1211–1237. <https://doi.org/10.5194/esd-14-1211-2023>
- Zhang, L., Xiao, J., Li, J., Wang, K., Lei, L., & Guo, H. (2012). The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China. *Environmental Research Letters*, 7(4), 045706.
- Zhang, Y., Gou, X., Wang, T., Zhang, F., Wang, K., Yang, H., & Yang, K. (2024). Response of tree growth to drought variability in arid areas: Local hydroclimate and large-scale precipitation. *Environmental Research*, 249, 118417.
- Zhao, Z., Zhang, Y., Liu, L., & Hu, Z. (2018). The impact of drought on vegetation conditions within the Damqu River Basin, Yangtze River Source Region, China. *PLOS ONE*, 13(8), e0202966.
- Zhaoping, Y. G. Jixi, Z. Caiping, S. Peili, Z. Lin, S. Wenshou & Hua, O. (2011). Spatio-temporal changes of NDVI and its relation with climatic variables in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers, *Journal of Geogr. Sci.*, 21(6): 979-993.