



Analyzing the Impacts of Climate Change on Vegetation Dynamics and Agricultural Drought Intensity in the Karun River Basin Using Remote Sensing-Based Vegetation Indices

Sakine Koohi¹ | Asghar Azizian²

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: sakine.koohi3731@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: azizian@eng.ikiu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 20, 2025

Revised: Dec. 23, 2025

Accepted: Jan. 5, 2026

Published online: Feb. 2026

Keywords:

Agricultural drought monitoring, NDVI Index, Global warming, Climate models.

ABSTRACT

Rising temperatures and altered precipitation patterns driven by global warming pose a serious threat to the sustainability of vegetation and agriculture in arid and semi-arid regions such as the Karun River basin. This study investigates the impacts of climate change on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and monitors agricultural drought using the Vegetation Condition Index (VCI) under the IPCC's SSP3 and SSP5 scenarios. Climate model outputs for a historical period (1991–2014) and three future intervals (2020–2045, 2046–2072, 2073–2099) were analyzed at five synoptic stations (Borujerd, Boroujen, Abadan, Kouhrang, and Yasuj). Results for the baseline period indicate that the climate models simulate temperature with high accuracy ($R^2 > 0.95$ and RMSE in the range of ~ 1.5 – 2.2 °C). A nonparametric Theil–Sen regression model demonstrated satisfactory performance in estimating NDVI from temperature, with R^2 values between 0.49 and 0.77 and p-values < 0.05 . Analyses reveal an increase in NDVI in colder regions (up to 68.56% in Kouhrang under SSP5) and a more limited decline (up to 14% in Abadan) in warmer areas. VCI-based results indicate an increased frequency of severe droughts (up to 11% in Kouhrang) and a reduction in wet conditions. These trends are amplified under SSP5, particularly in the 2073–2099 interval, where winter VCI declines of up to 40% indicate intensifying moisture stress. The findings underscore the necessity of adaptation measures (such as integrated water resources management and crop pattern adjustments) and provide an evidence base for resilient planning in the face of climate change.

Cite this article: Koohi, S., & Azizian, A. (2026). Impact of Climate Change on Vegetation and Drought in the Karun Basin Using NDVI and VCI, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12), 3415-3434. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404497.670030>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404497.670030>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rising temperatures and shifts in precipitation patterns due to global warming present substantial risks to the longevity of vegetation and agricultural systems in arid and semi-arid zones, such as the Karun River Basin in Iran. These alterations foster more frequent and intense droughts, affecting water availability, plant cover, farming practices, and regional ecology, with forecasts suggesting a 1.5°C rise in air temperature by 2050 if current warming persists. In these vulnerable environments, ecosystems exhibit heightened sensitivity to climatic fluctuations, leading to potential disruptions in agricultural growth, food security, and sustainable livelihoods, ultimately causing notable economic damages. Vegetation serves as a pivotal indicator for drought assessment and monitoring, intersecting climate, soil, and human-animal influences; although subject to various factors, its variations remain a reliable measure of natural environmental changes driven by climatic parameters. Recent advancements in remote sensing technologies have enabled widespread utilization of satellite data for tracking vegetation shifts and droughts, particularly through spectral indices like the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Vegetation Condition Index (VCI), which accurately reflect vegetation status based on near-infrared and red wavelength reflectance. Numerous recent studies have explored climate parameter impacts on vegetation using these indices; for instance, correlations between NDVI and temperature/precipitation across diverse plant covers have been significant, with stronger ties to precipitation in lush areas. Investigations in regions like China, India, Iraq, and North Africa have demonstrated joint influences of temperature and rainfall on vegetation growth, increasing drought trends, and NDVI sensitivity varying by climate, often higher in colder, drier locales. While spectral indices are established for historical vegetation and agricultural drought analysis, most research is confined to past periods due to reliance on remote sensing imagery, with limited evaluations of future changes under climate scenarios. Yet, projecting vegetation responses to climate change (VRCC) and pinpointing high-risk areas under diverse scenarios is crucial for devising adaptation strategies by policymakers to mitigate hazards. Accordingly, this study examines relationships between climatic factors (precipitation, temperature) and NDVI, employing a Theil-Sen nonparametric regression model to forecast NDVI variations and agricultural drought via VCI under IPCC's SSP3 and SSP5 scenarios from the sixth report. Conducted at five synoptic stations in the Karun Basin over the observational period 1991–2014, it assesses future shifts across three statistical intervals: 2020–2045, 2046–2072, and 2073–2099.

Method

This research numerically evaluates climate change effects on vegetation and drought in the Karun Basin, utilizing NDVI for vegetation health and VCI for agricultural drought monitoring under SSP3 and SSP5 scenarios. The study area encompasses the Karun River Basin in southwest Iran, featuring varied climates due to the Zagros Mountains, diverse temperature and precipitation regimes, and geological structures supporting multiple vegetation types. Data included precipitation and temperature from synoptic stations (Boroujen, Borujerd, Abadan, Kouhrang, Yasuj) for 1991–2014, alongside outputs from CMIP6 models (MRI-ESM2, IPSL-CM6A-LR, GFDL-ESM4) for historical and future periods up to 2099. Spearman's nonparametric correlation assessed links between NDVI (from AVHRR satellite imagery at 0.05° resolution via Google Earth Engine) and climatic variables. Temperature data validation against observations used R^2 and RMSE metrics. The Theil-Sen nonparametric regression, robust to outliers via median slopes of paired data differences, estimated NDVI from temperature, with equations derived per station and evaluated via R^2 , MSE, p-values, and Nash-Sutcliffe efficiency. VCI, calculated from NDVI time series as $(NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) * 100$, classified drought levels: extreme (<10), severe (10–19.99), moderate (20–29.99), mild (30–39.99), and wet (>40). Future projections applied regression outputs to model temperatures, analyzing NDVI percentage changes, VCI drought frequency, and monthly VCI variations relative to baseline. All analyses ensured replicability with specified data sources and statistical methods, focusing on accuracy through trial validations of model fits.

Results

Correlation assessments revealed inverse relationships between NDVI and precipitation (Spearman's rho -0.56 to -0.78), strengthening in humid stations, while direct positive ties with temperature (0.65–0.83) indicated temperature-limited vegetation growth, with reduced correlations in hot areas like Abadan due to excessive heat. Climate models accurately simulated baseline temperatures ($R^2 > 0.95$, RMSE 1.5–2.2°C). Theil-Sen regressions yielded R^2 0.49–0.77, MSE ~0.003, and $p < 0.05$, with strong fits in cooler stations (Nash-Sutcliffe 0.78 in Kouhrang) but underestimation in dry ones (0.43 in Abadan), suggesting potential enhancements via multivariate inclusions like land surface temperature. Future NDVI projections showed

upward trends, amplified under SSP5: increases up to 68.56% in cold, high-elevation Kouhrang by 2073–2099, 33.47% in Boroujen, and milder 14% in warm Abadan, reflecting greater benefits in colder zones from alleviated cold stress. VCI analyses indicated rising severe and extreme drought frequencies (e.g., extreme from 6.9% baseline to 11% in Kouhrang under SSP5), with wet conditions declining slightly, trends intensifying in SSP5 and southern/mountainous sites. Monthly VCI changes displayed winter/spring declines (up to 40% in Borujerd, 24% in Boroujen under SSP5 in late century), signaling heightened moisture stress and disrupted growth seasons, contrasted by minor summer gains possibly from extreme precipitation. Overall, colder regions exhibit NDVI gains but face amplified drought risks in long-term high-emission scenarios.

Conclusions

This investigation highlights climate change's dual impacts on the Karun Basin, enhancing NDVI in colder areas through warming but escalating agricultural droughts via VCI declines, particularly under SSP5 with intensified temperature and moisture stresses. The Theil-Sen model and VCI proved effective for projections, though underperformance in arid zones underscores needs for multivariate refinements incorporating soil moisture or surface temperature. Dimensionless NDVI increases reached 56–68% in elevated sites, while drought frequencies rose by up to 11%, with winter VCI drops of 24–40% threatening soil humidity and crop cycles. These outcomes pose serious risks to rainfed agriculture, food security, and ecosystems, emphasizing adaptive policies like optimized water management, drought-resistant cultivars, and land-use reforms in vulnerable southern/high-altitude areas such as Kouhrang and Abadan. Integrating remote sensing platforms like Google Earth Engine with climate models offers robust tools for drought risk mapping, land planning, and ecosystem restoration funding, including reforestation or wetland revival, to bolster resilience.

Author Contributions

Conceptualization, Koohi S. and Azizian A.; methodology, Koohi S. and Azizian A.; software, Koohi S.; validation, Koohi S. and Azizian A.; writing—original draft preparation, Koohi S.; writing—review and editing, Koohi S. and Azizian A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر پویایی پوشش گیاهی و شدت خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز کارون با بهره‌گیری از شاخص‌های گیاهی مبتنی بر سنجش از دور

سکینه کوهی^۱ | اصغر عزیزیان^۲^۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه:sakine.koohi3731@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه:azizian@eng.ikui.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

پایش خشکسالی کشاورزی،

شاخص NDVI،

گرمایش جهانی،

مدل‌های اقلیمی.

افزایش دما و تغییرات الگوهای بارش ناشی از گرمایش جهانی، تهدیدی جدی برای پایداری پوشش گیاهی و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند حوضه آبریز کارون ایجاد کرده است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر شاخص پوشش گیاهی NDVI و پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص VCI تحت سناریوهای اقلیمی SSP3 و SSP5 از گزارش ششم IPCC انجام شد. خروجی اقلیمی برای دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۴) و دوره‌های آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۵، ۲۰۴۶-۲۰۷۲، ۲۰۷۳-۲۰۹۹) در پنج ایستگاه سینوپتیک (بروجرد، بروجن، آبادان، کوهرنگ، یاسوج) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در دوره پایه نشان داد که مدل‌های اقلیمی با ضریب همبستگی R^2 بیش از ۰/۹۵ و RMSE بین ۱/۵ تا ۲/۲ درجه سانتی‌گراد، از دقت بالایی در شبیه‌سازی دما برخوردار می‌باشد. مدل رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen با R^2 در محدوده ۰/۴۹ تا ۰/۷۷ و Pvalue کمتر از ۰/۰۵، کارایی مناسبی در تخمین NDVI بر اساس دما نشان داد. تحلیل‌ها حاکی از افزایش NDVI (تا ۵۶/۶۸ درصد در کوهرنگ تحت سناریوی اقلیمی SSP5) در مناطق سردسیر و کاهش محدودتر (تا ۱۴ درصد در آبادان) در مناطق گرم بود. شاخص VCI نیز افزایش فراوانی خشکسالی‌های شدید (تا ۱۱ درصد در کوهرنگ) و کاهش ترسالی‌ها را نشان داد. این روند در سناریوی SSP5 شدیدتر ارزیابی می‌شود، به‌ویژه در دوره ۲۰۷۳-۲۰۹۹، که کاهش VCI در ماه‌های زمستان (تا ۴۰ درصد) نشان‌دهنده تشدید تنش‌های رطوبتی می‌باشد. نتایج این مطالعه بر لزوم اتخاذ سیاست‌های سازگارانه مانند مدیریت منابع آب و اصلاح الگوی کشت تأکید دارد و می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی پایدار در برابر تغییرات اقلیمی باشد.

استناد: کوهی، سکینه؛ و عزیزیان، اصغر؛ (۱۴۰۴). تأثیر تغییرات اقلیمی بر پوشش گیاهی و خشکسالی در حوضه کارون با شاخص‌های NDVI و VCI، مجله تحقیقات

آب و خاک/ایران، ۵۶ (۱۲)، ۳۴۳۴-۳۴۱۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404497.670030>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404497.670030>

مقدمه

در سال‌های اخیر به دنبال افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و وقوع گرمایش جهانی، تغییر در پارامترهای اقلیمی همچون بارش و دما پدیده‌ای است که به چالشی مهم در بسیاری از نقاط دنیا بدل شده است. بطوری که پیش‌بینی شده است در صورت ادامه روند گرمایش زمین تا پایان سال ۲۰۵۰ دمای هوا با افزایش ۱/۵ درجه سانتی‌گرادی همراه خواهد بود (Jiang et al., 2021). بنابراین افزایش وقوع وقایع حدی و تغییر در الگوی دما و بارش در قرن ۲۱ دور از انتظار نمی‌باشد. وقوع این حوادث بویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون ایران از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا این مناطق با توجه به اقلیم خود دارای اکوسیستمی حساس و آسیب‌پذیر در برابر تغییر اقلیم می‌باشند (Kharuk et al., 2007; Rathore et al., 2019; Shagega et al., 2019). از خشکسالی به عنوان یکی از نتایج اجتناب‌ناپذیر تغییرات آب و هوایی می‌توان نام برد، بطوریکه با توجه به مطالعات مختلف وقوع خشکسالی‌های بیشتر و شدیدتر در بسیاری از مناطق برای قرن ۲۱ مورد انتظار است (حسین آبادی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Haile et al., 2020; Gaitán et al., 2020; Das et al., 2021; Bisht et al., 2019; Swain & Hayhoe 2015). با توجه به تاثیر خشکسالی بر بخش‌های مختلف همچون منابع آب، پوشش گیاهی، کشاورزی و اکولوژی منطقه (Wilhite et al., 2014)، بنابراین این پدیده می‌تواند منجر به چالش‌ها و اختلالات بزرگتر و مهم‌تری در زمینه توسعه کشاورزی، امنیت غذایی و زندگی پایدار شده و در نهایت خسارات اقتصادی قابل‌توجهی را مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک بوجود آورد. از آنجایی که پوشش گیاهی یک منطقه محل تلاقی اقلیم، خاک و سایر عوامل انسانی، حیوانی و غیره می‌باشد، بنابراین پوشش گیاهی از جمله مهم‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی و پایش خشکسالی به شمار می‌رود (گرچی، ۱۳۹۴). اگرچه که پوشش گیاهی تحت تاثیر عوامل مختلفی همچون فعالیت انسان‌ها و جانوران نیز قرار دارد، اما همچنان تغییرات آن می‌تواند معیاری برای بررسی تغییرات محیطی ناشی از عوامل طبیعی همچون پارامترهای اقلیمی باشد (Liu et al., 2021; Qiu and Cao 2011). به همین دلیل اخیراً پایش تغییرات پوشش گیاهی تحت تاثیر عوامل اقلیمی به موضوعی مهم تبدیل شده است (Li et al., 2014; Lin et al., 2020).

توسعه فناوری‌های مبتنی بر سنجش از دور امکان استفاده گسترده از داده‌های ماهواره‌ای را برای پایش تغییرات پوشش گیاهی و خشکسالی فراهم نموده است. یکی از روش‌های استفاده از این تصاویر برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی و پایش خشکسالی، کاربرد شاخص‌های سنجش از دور و نمایه‌های طیفی می‌باشد. از میان شاخص‌های طیفی بسیاری که برای این منظور توسعه داده شده‌اند، شاخص NDVI و VCI از مهم‌ترین نمایه‌های پوشش گیاهی می‌باشند که به طور دقیق وضعیت پوشش گیاهی و ویژگی‌های آن را براساس میزان بازتاب از دو طول موج مادون قرمز نزدیک و قرمز منعکس می‌نمایند (Eskandari Damaneh et al., 2021). در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه بررسی آثار تغییر پارامترهای اقلیمی بر پوشش گیاهی با کاربرد شاخص‌های طیفی صورت پذیرفته است. به عنوان مثال (Bagherzadeh et al., 2020) رابطه بین شاخص NDVI را با پارامترهای اقلیمی شامل دمای هوا و بارش در پوشش‌های مختلف گیاهی طی دوره آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶ و در مقیاس‌های ماهانه و سالانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات نشان داد که در تمام انواع پوشش‌های گیاهی همبستگی بین مقادیر NDVI و دما معنی‌دار بوده است. همچنین در مناطق دارای پوشش گیاهی غنی همبستگی خوبی بین مقادیر بارش و NDVI وجود دارد. (Jiang et al., 2021) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی رشد گیاهی با استفاده از شاخص‌های طیفی مبتنی بر سنجش از دور در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۶ در چین پرداختند. نتایج نشان داد که رشد پوشش گیاهی در منطقه تحت تاثیر مشترک دما و بارش قرار دارد. همچنین شدت و ناحیه تحت تاثیر خشکسالی در منطقه عمدتاً دارای روند کاهش بوده است. (Janani et al., 2021) به پایش خشکسالی با استفاده از نمایه طیفی VCI در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ بر مبنای داده‌های Landsat 8 در منطقه نامکال^۱ هند پرداختند. این محققین نشان دادند که روند افزایشی برای خشکسالی در منطقه وجود دارد و عنوان داشتند که شاخص وضعیت پوشش گیاهی از شاخص‌های مناسب برای پایش و ارزیابی خشکسالی می‌باشند. (Gaznayee et al., 2021) به ارزیابی شدت خشکسالی و ارتباط آن با برخی متغیرهای اکولوژیکی در اربیل عراق در دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ با کاربرد داده‌های ماهواره Landsat و شاخص VCI پرداختند. نتایج نشان داد شاخص وضعیت پوشش گیاهی دارای همبستگی قابل‌توجهی با بارش، مدل رقومی منطقه و عرض جغرافیایی می‌باشد. همچنین نتایج این محققین کارایی شاخص VCI را برای استخراج خصوصیات خشکسالی برجسته نمود. (Zhang et al., 2019) با تجزیه و تحلیل رابطه بین عوامل اقلیمی و شاخص NDVI در چین عنوان نمودند که با استفاده از مدل توسعه داده شده بر مبنای شاخص

و پارامترهای اقلیمی می‌توان به پیش‌بینی تغییرات پوشش گیاهی در اثر تغییر اقلیم پرداخت. (Kalisa et al., 2019) تاثیر عوامل اقلیمی را بر تغییرات پوشش گیاهی در آفریقای شمالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای AVHRR از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۵ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که روندی مثبت برای مقادیر NDVI تا پیش از سال ۱۹۹۸ وجود داشته است، ولی پس از آن مقادیر این شاخص کاهش یافته است. علاوه بر این با توجه به نتایج مشخص شد که زمین‌های زراعی در این منطقه تغییر چندانی نداشته است، درحالیکه وسعت زمین‌های غیرزراعی با کاهش زیادی همراه بوده است. همچنین در این منطقه همبستگی بیشتری بین شاخص بارش نسبت به دما وجود دارد. در تحقیق دیگری (Bao et al., 2021) با تحلیل حساسیت نمایه طیفی NDVI نسبت به پارامترهای اقلیمی در چهار منطقه آب و هوایی متفاوت و طی ۸ سناریوی اقلیمی نشان دادند که حساسیت NDVI به تغییرات دما کمتر از بارش است، همچنین مقدار حساسیت در مناطق سردتر و خشک‌تر افزایش می‌یابد. همانطور که ملاحظه می‌گردد علاوه بر معرفی نمایه‌های طیفی به عنوان شاخص‌هایی مناسب برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی و خشکسالی کشاورزی، در حال حاضر بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی (VRCC) به یکی از نگرانی‌های مهم محققین تبدیل شده است. اما بررسی مطالعات انجام شده حاکی از آن است که با توجه به وابستگی شاخص‌های طیفی به تصاویر سنجنش از دور، عمده تحقیقات در این زمینه به بازه زمانی گذشته محدود می‌شود و در کمتر تحقیقی به ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی و خشکسالی کشاورزی با استفاده از نمایه‌های طیفی تحت تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم در آینده پرداخته شده است. در حالیکه پیش‌بینی ارزیابی VRCC و شناسایی مناطق تحت تاثیر شدید تهدیدات آب و هوایی در آینده و تحت سناریوهای مختلف اقلیمی می‌تواند نقش بسزایی در طراحی راهکارهای سازگار توسط تصمیم‌گیران برای کاهش خطرات در این خصوص داشته باشد. لذا با توجه به توضیحات فوق در پژوهش حاضر تلاش شده است تا علاوه بر بررسی رابطه بین عوامل اقلیمی (شامل بارش، دما) با شاخص NDVI، با استفاده از مدل رگرسیون ناپارامتری بر مبنای روش Theil-Sen به پیش‌بینی تغییرات NDVI و خشکسالی کشاورزی (براساس شاخص VCI) تحت سناریوهای اقلیمی SSP 3 و SSP 5 از جدیدترین گزارش IPCC^۲ پرداخته شود. لازم بذکر است که پژوهش پیش‌رو در ۵ ایستگاه سینوپتیک در سطح حوضه آبخیز کارون طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ به عنوان دوره مشاهداتی انجام شده است و تغییرات آبی طی سه دوره آماری شامل ۲۰۴۵-۲۰۲۰، ۲۰۷۲-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در سطح حوضه آبریز کارون صورت گرفت. حوضه کارون در جنوب غرب ایران واقع شده است. بخش اصلی رشته‌کوه زاگرس از شمال غرب تا جنوب شرق حوضه قرار دارد و منجر شده است که اقلیم‌های متفاوتی در بخش‌های مختلف حوضه مشاهده گردد. موقعیت حوضه کارون نسبت به ورود جبهه‌های باران‌زای غربی باعث ایجاد جریان‌های پرابی در برخی از مناطق حوضه شده است. تنوع دما، رژیم بارش و ساختار زمین‌شناسی در مناطق مختلف حوضه موجب گسترش انواع مختلف پوشش گیاهی در سطح حوضه شده است. در این پژوهش از داده‌های بارش، دما ایستگاه‌های سینوپتیک بروجن، بروجرد، آبادان، کوهرنگ و یاسوج طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ استفاده شده است. همچنین از داده‌های بارش و دما مربوط به مدل‌های GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2 و تحت سناریوهای اقلیمی SSP 3 و SSP 5 طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ به عنوان دوره تاریخی و از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۹۹ برای بررسی شرایط خشکسالی و پوشش گیاهی در آینده استفاده شده است. علت انتخاب مدل‌های مذکور قرارگیری آن‌ها در گروه مدل‌های برتر در مطالعات انجام شده در سطح کشور در زمینه ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در تخمین بارش و دما می‌باشد (انصاری مهابادی و همکاران، ۱۴۰۱؛ زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰؛ کوهی و همکاران، ۱۴۰۱).

رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen

Theil-Sen که توسط (Sen 1968; Theil 1950) ارائه شده است، امکان ایجاد رگرسیون ناپارامتری را فراهم نموده است. مبنای رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen میانه مجموعه‌ای از نسبت تفاوت هر دو جفت داده متوالی از مشاهدات می‌باشد. از مزایای این روش می‌توان به اثرپذیری کم از مقادیر حدی و وجود داده پرت در مجموعه داده‌ها اشاره نمود. زیرا علی‌رغم اینکه مقدار شیب هر دو جفت داده متوالی برای نقاطی که داده پرت به شمار می‌روند، زیاد است، اما با توجه به اینکه در نهایت میانه شیب‌ها برای برآورد رابطه رگرسیون مورد

1 Vegetation Response to Climate Change

2 Intergovernmental Panel on Climate Change

استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین تاثیر مقادیر پرت ناچیز می‌شود (Wilks 2019). شکل کلی رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen مطابق با رابطه ۱ می‌باشد، که تخمین شیب و عرض از مبدا آن با استفاده از روابط ۲ و ۳ امکان‌پذیر است.

$$Y = a + bX \quad \text{رابطه ۱}$$

$$b = \text{median}\left(\frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}\right) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$a = \text{median}(y_i - bx_i) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن i و j ردیف i و j ام از داده‌ها، $i \neq j$ ، y متغیر وابسته، x متغیر مستقل، a عرض از مبدا معادله رگرسیون، b شیب خط رگرسیون می‌باشد.

نمایه‌های طیفی مورد استفاده

برای پایش تغییرات پوشش گیاهی و وضعیت خشکسالی حوضه مورد مطالعه در این پژوهش از دو نمایه طیفی پوشش گیاهی NDVI و VCI استفاده شده است. شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) با استفاده از تفاوت بین مادون قرمز نزدیک و قرمز می‌تواند نقاط دارای پوشش گیاهی را مشخص نماید و از آن به منظور توصیف پوشش گیاهی استفاده می‌شود. بازه تغییرات این شاخص در محدوده -1 تا $+1$ است، مقادیر منفی و نزدیک -1 شاخص حاکی از پهنه‌های آبی، مقادیر صفر نشان‌دهنده خاک لخت، سطوح ماسه‌ای یا برفی و مقادیر مثبت و نزدیک به $+1$ بیانگر پوشش متراکم گیاهی می‌باشد. در این مطالعه از سری زمانی NDVI بر مبنای تصاویر ماهواره‌ای AVHRR^۱ از مجموعه داده‌های (CDR) در رزولوشن مکانی 0.5° درجه و تفکیک زمانی روزانه استفاده شده است. این مجموعه داده، یکی از منابع معتبر و استاندارد برای پایش بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی در مقیاس جهانی بوده و به‌طور گسترده در مطالعات اقلیمی به‌کار گرفته شده است. دریافت داده‌های مذکور طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ با استفاده از سامانه‌ی تحت وب گوگل ارث انجین (GEE) که امکان جستجو و پردازش حجم گسترده‌ای از تصاویر و داده‌ها را فراهم نموده است، صورت پذیرفت. استفاده از محصولات CDR این مزیت را فراهم می‌کند که داده‌ها پیش‌تر تحت فرآیندهای کالیبراسیون بین‌سجندهای و تصحیحات رادیومتریکی قرار گرفته‌اند و برای تحلیل‌های بلندمدت و مطالعات تغییر اقلیم مناسب می‌باشند. شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI) براساس یک سری زمانی از NDVI اولین بار توسط (Kogan 1997) ارائه گردید. محاسبه شاخص مذکور توسط رابطه ۱ امکان‌پذیر است. مقدار صفر برای این شاخص نشان‌دهنده بیشترین شرایط خشکسالی و مقدار 100 درصد شاخص بیانگر بهترین شرایط برای پوشش گیاهی می‌باشد. درجه‌های مختلفی از خشکسالی برای VCI کمتر از 40 درصد تعریف شده است. طبقات مختلف خشکسالی براساس این شاخص در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی ارائه شده برای شاخص VCI (Kogan 1997)

VCI	وضعیت خشکسالی
< 10	خشکسالی بسیار شدید
$10 - 19/99$	خشکسالی شدید
$20 - 29/99$	خشکسالی متوسط
$30 - 39/99$	خشکسالی خفیف
> 40	ترسالی

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

نتایج و بحث

ارزیابی ارتباط بین شاخص NDVI با پارامترهای اقلیمی

در این بخش به بررسی ارتباط بین شاخص پوشش گیاهی NDVI با پارامترهای اقلیمی شامل بارش و دمای مستخرج از مدل‌های اقلیمی

1 Advanced Very High-Resolution Radiometer

2 NOAA Climate Data Record

3 Google Earth Engine



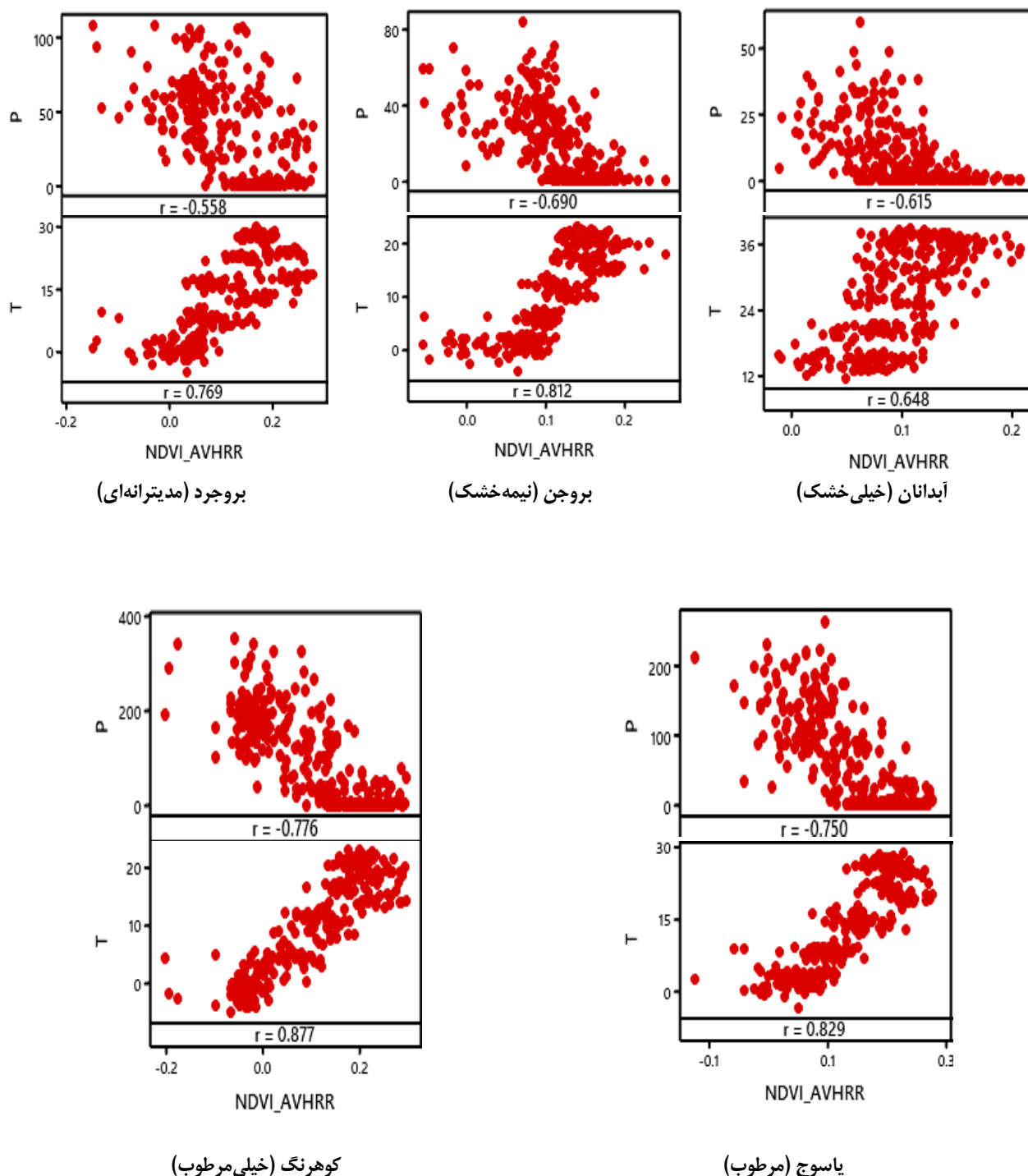
براساس روش ناپارامتری اسپیرمن طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ پرداخته شده است. ماتریس همبستگی بین مقادیر شاخص NDVI و پارامترهای اقلیمی و شاخص همبستگی اسپیرمن در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج ماتریس همبستگی در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که ارتباط بین شاخص NDVI و بارش به صورت عکس یا همبستگی منفی و ارتباط بین دما با NDVI مستقیم می‌باشد. براساس نتایج مشخص است که با افزایش رطوبت وجود ارتباط عکس بین بارش و شاخص پوشش گیاهی در ایستگاه‌ها از قدرت بیشتری برخوردار است، به‌طوری‌که در ایستگاه‌های واقع در اقلیم خیلی خشک و نیمه خشک (آبادان و بروجرد) مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن برابر با $-0/62$ و $-0/69$ است. درحالی‌که در ایستگاه‌های یاسوج و کوهرنگ که براساس طبقه‌بندی اقلیمی انجام شده توسط (Rahimi et al., 2013) در اقلیم‌های مرطوب و خیلی مرطوب قرار دارند، مقدار شاخص اسپیرمن معادل $-0/78$ و $-0/75$ برآورد شده است. در همین راستا (Du et al., 2015) در پژوهش خود نشان دادند که اثر محدود کننده رطوبت بر رشد پوشش گیاهی در مناطق با بارش سالانه کم مشهود است. همانطور که در شکل ۱ نیز مشخص است در ایستگاه‌های واقع در اقلیم مرطوب و خیلی مرطوب که از بارش سالانه بیشتری برخوردار می‌باشند وجود ارتباط عکس بین بارش و شاخص NDVI دارای قدرت همبستگی بیشتری است درحالی‌که در ایستگاه‌های با بارش سالانه‌ی کمتر، از ارتباط منفی بین بارش و شاخص پوشش گیاهی کاسته شده است. بطور کلی مشخص است که بارش از محرک‌های اصلی در افزایش شاخص NDVI در ایستگاه‌های مورد مطالعه نمی‌باشد. علاوه بر تاثیر اقلیم و میزان بارش سالانه، وجود زمین‌های زراعی در این منطقه که منجر به افزایش دخالت انسان در مدیریت آبیاری و نوع پوشش گیاهی منطقه شده است می‌تواند از دلایل دیگر این اتفاق به شمار آید. همچنین، این رفتار را می‌توان در چارچوب تفاوت میان سامانه‌های گیاهی محدود به آب و محدود به انرژی تبیین نمود. در مناطق مرطوب، رشد و پویایی پوشش گیاهی عموماً تحت کنترل کمبود رطوبت قرار ندارد، بلکه عواملی نظیر دما، تابش خورشیدی و شرایط فنولوژیکی نقش تعیین‌کننده‌تری ایفا می‌کنند. در این شرایط، افزایش بارش الزاماً به بهبود وضعیت سبزی‌نگی منجر نمی‌شود. در واقع، دوره‌های با بارش بالاتر در این مناطق غالباً هم‌زمان با افزایش پوشش ابر، کاهش تابش دریافتی، افت دمای هوا و اشباع رطوبتی خاک رخ می‌دهند که مجموع این عوامل می‌تواند منجر به کاهش فعالیت فتوسنتزی گیاهان و در نتیجه افت مقادیر NDVI شود. از سوی دیگر، در مناطق کوهستانی و مرتفع حوضه کارون، بخش قابل توجهی از بارش سالانه در فصول سرد سال اتفاق می‌افتد؛ زمانی که پوشش گیاهی یا در حالت رکود فنولوژیکی قرار دارد یا فعالیت زیستی آن بسیار محدود است. این ناهم‌زمانی زمانی بین اوج بارش و فصل رشد فعال گیاهان یکی از دلایل اصلی تضعیف یا معکوس شدن رابطه مثبت مورد انتظار بین بارش و NDVI محسوب می‌شود.

برخلاف بارش، ضریب همبستگی مثبت بین دما و شاخص پوشش گیاهی حاکی از محدودیت رشد پوشش گیاهی در ایستگاه‌ها نسبت به دما است، چنانکه با توجه به شکل ۱ با افزایش دما مقدار شاخص نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه رشد پوشش گیاهی شامل دو فرآیند فتوسنتز و تنفس است و هر دوی این فرآیند نیز از ارتباط نزدیکی با دما برخوردار می‌باشند، براساس نتایج مشخص است که کاهش دما و وقوع تنش سرما، رشد پوشش گیاهی را در این منطقه با محدودیت روبرو خواهد نمود؛ درحالی‌که گرم شدن منطقه شرایط را برای رشد پوشش گیاهی ایجاب می‌نماید. البته لازم بذکر است که افزایش بیش از حد دما می‌تواند از تاثیر معکوسی بر تغییرات شاخص NDVI برخوردار باشد، به‌طوری‌که در ایستگاه آبادان که میانگین دمای سالانه طی دوره مشاهداتی از 30 درجه سانتی‌گراد نیز فراتر رفته است همبستگی بین دما و نمایه طیفی کاهش یافته و به $0/65$ محدود شده است؛ درحالی‌که در سایر ایستگاه‌ها تغییرات ضریب همبستگی اسپیرمن در محدوده $0/88 - 0/77$ تخمین زده شده است.

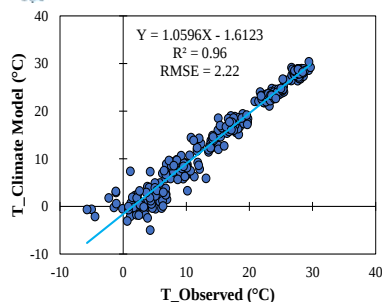
با توجه به نتایج مشخص است که مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن دما با شاخص NDVI در تمام ایستگاه‌ها بیشتر از بارش است و این مساله تاثیر بیشتر دما بر پوشش گیاهی در این منطقه را نشان می‌دهد. به عنوان مثال مقدار ضریب همبستگی بین بارش و نمایه طیفی در ایستگاه‌های بروجرد، یاسوج و یاسوج به ترتیب برابر با $-0/56$ ، $-0/69$ و $-0/75$ است، درحالی‌که ضریب همبستگی بین دما و نمایه طیفی در ایستگاه‌های مذکور به ترتیب معادل $0/77$ ، $0/81$ و $0/83$ می‌باشد. به همین دلیل در پژوهش حاضر به توسعه مدل رگرسیون ناپارامتری بر مبنای روش Theil-Sen بین دما و شاخص NDVI پرداخته شده است.

با توجه به اینکه در توسعه رگرسیون ناپارامتری بین دما و نمایه طیفی NDVI، از مقادیر دما مربوط به داده‌های اقلیمی استفاده شده است، لازم بود تا داده‌های اقلیمی دما نسبت به مقادیر مشاهداتی در ایستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار بگیرند. بنابراین در این بخش نمودار پراکنش مقادیر دمای سالانه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد داده‌های اقلیمی دما از همبستگی قابل توجهی با داده‌های مشاهداتی برخوردار می‌باشند و مقدار شاخص همبستگی R^2 در در ایستگاه‌های مورد مطالعه بیش از $0/95$ تخمین زده شده است. علاوه بر این بررسی شاخص RMSE حاکی از آن خطای کم داده‌های اقلیمی در تخمین دما نسبت به مقادیر

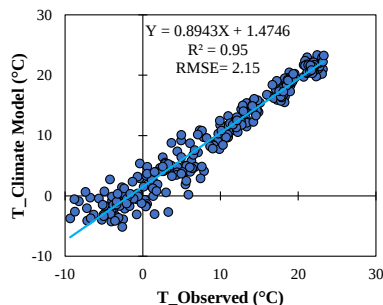
مشاهده‌ای است. بیشترین و کمترین مقدار شاخص RMSE در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر $2/2$ و $1/5$ درجه سانتی‌گراد است که به ایستگاه‌های بروجرد و آبادان تعلق دارد. بنابراین با توجه به پایین بودن مقدار RMSE و بالا بودن مقدار R^2 در دوره تاریخی می‌توان چنین عنوان نمود که مقادیر دمای بدست آمده از مدل‌های اقلیمی گزارش ۶ تغییر اقلیم به داده‌های مشاهداتی نزدیک بوده و می‌توان از آن‌ها به عنوان مبنایی برای بررسی تغییرات شرایط اقلیمی و خشکسالی در دوره‌های آتی بهره جست.



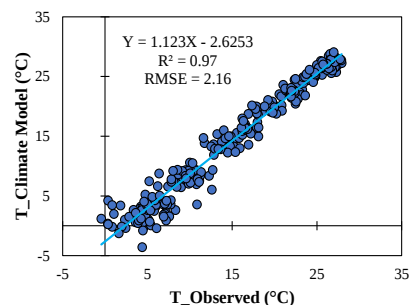
شکل ۱. همبستگی شاخص NDVI با داده‌های بارش و دما (مدل‌های اقلیمی گزارش ۶) به روش ناپارامتری اسپیرمن در ایستگاه‌های مورد مطالعه (در دوره تاریخی)



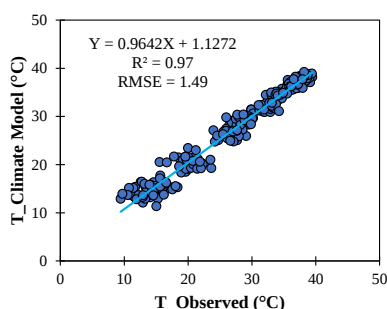
بروجد



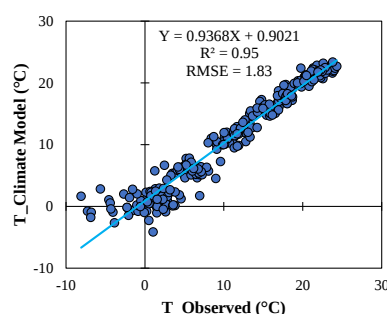
کوهرنک



یاسوج



آبدانان



بروجن

شکل ۲. بررسی مقادیر دما مشاهداتی و مدل اقلیمی در دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۱۴)

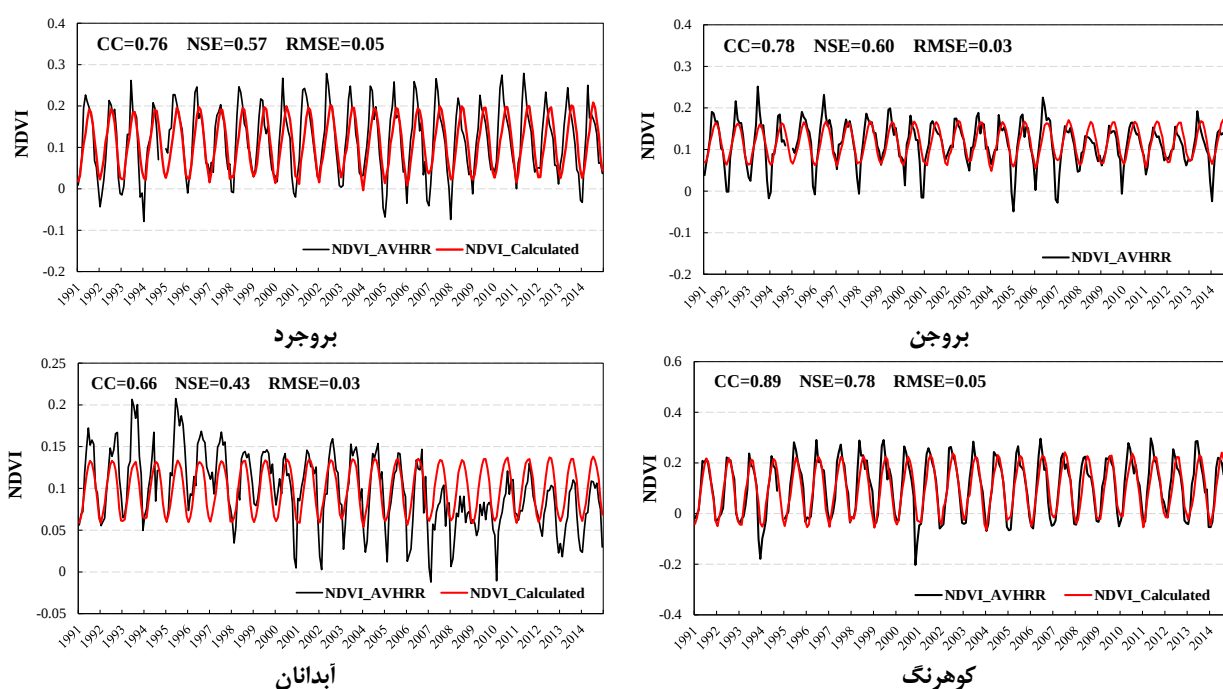
توسعه مدل رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen

نتایج حاصل از توسعه رگرسیون ناپارامتری بین مقادیر دما و نمایه طیفی NDVI به روش Theil-Sen در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است مقدار شاخص R^2 خط رگرسیون در محدوده ۰/۴۹ (ایستگاه آبادان) و ۰/۷۷ (ایستگاه کوهرنک) متغیر است. اما با توجه به اینکه بالا بودن ضریب همبستگی به تنهایی معرف کارآمد بودن یک مدل نیست لذا برای بررسی دقیق تر مدل های رگرسیون، واریانس خطاها (MSE) و مقدار آماره Pvalue نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی واریانس خطاها حاکی از آن است که در ایستگاه های مطالعاتی مقدار این شاخص به ۰/۰۳ محدود شده که نشان دهنده خطای پایین مدل رگرسیون در تخمین مقادیر NDVI می باشد. در برازش خط رگرسیون فرض صفر بر این است که خط رگرسیون برازش داده شده کارآمد نمی باشد. بنابراین در صورتیکه مقدار آماره Pvalue کوچکتر از ۰/۰۵ باشد خط رگرسیون در سطح اطمینان ۹۵ درصد مناسب ارزیابی می شود و چنانچه مقدار این آماره بیش از ۰/۰۵ برآورد شود حاکی از آن است که خط رگرسیون در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای دقت مناسبی نمی باشد. همانطور که مشاهده می شود مقدار آماره Pvalue در ایستگاه های بروجرد، بروجن، کوهرنک و یاسوج به ترتیب معادل ۰/۰۴۳، ۰/۰۴۵، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۳۲ است بنابراین مشخص است که معادلات بدست آمده توسط روش ناپارامتری Theil-Sen در ایستگاه های مذکور با قدرت مناسبی در سطح اطمینان ۹۵ کارآمد ارزیابی می شود. در ایستگاه آبادان مقدار این آماره ۰/۰۵۰ تخمین زده شده است، بنابراین خط رگرسیون مربوط به این ایستگاه نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد می تواند مناسب ارزیابی شود، اما از قدرت کمتری نسبت به معادلات سایر ایستگاه ها برخوردار است.

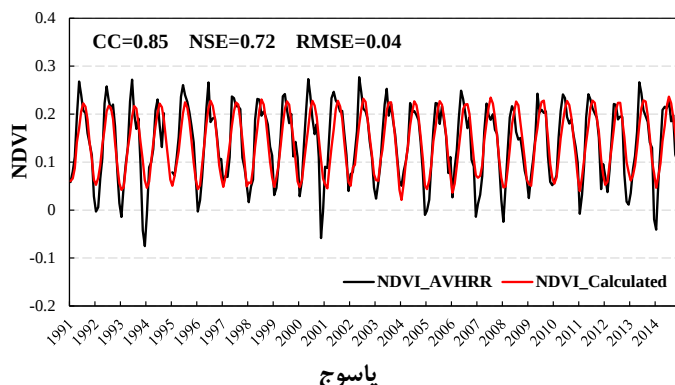
جدول ۲. معادلات بدست آمده بین دما (داده های اقلیمی گزارش ۶) و NDVI (منبع: AVHRR) به روش رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen برای هر ایستگاه (در دوره تاریخی)

ردیف	ایستگاه	معادله	Pvalue	MSE	R ²
۱	بروجد	$NDVI = 0.026 + 0.006 \times T$	۰/۰۴۳	۰/۰۰۳	۰/۵۵
۲	بروجن	$NDVI = 0.067 + 0.005 \times T$	۰/۰۴۵	۰/۰۰۱	۰/۵۲
۳	آبدانان	$NDVI = 0.020 + 0.003 \times T$	۰/۰۵۰	۰/۰۰۱	۰/۴۹
۴	کوهرنک	$NDVI = -0.010 + 0.011 \times T$	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۰/۷۷
۵	یاسوج	$NDVI = 0.045 + 0.007 \times T$	۰/۰۳۲	۰/۰۰۲	۰/۶۸

به منظور ارزیابی دقیق‌تر معادلات رگرسیون سری زمانی تغییرات شاخص NDVI منبع AVHRR و مقادیر NDVI محاسباتی براساس معادلات جدول ۲ در ایستگاه‌های مطالعاتی برای دوره تاریخی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشخص گردید که نمایه‌های طیفی محاسباتی با استفاده از مدل رگرسیون در اکثر ایستگاه‌ها از تطابق مناسبی با داده‌های منبع AVHRR برخوردار می‌باشند. بیشترین انطباق هم از نظر زمانی و هم مقدار NDVI به ایستگاه کوه‌رنگ (شاخص کارایی نش‌ساتکلیف ۰/۷۸) تعلق دارد. البته همانطور که مشاهده می‌شود عملکرد مدل رگرسیون در تخمین مقادیر نمایه طیفی در ایستگاه آبادان با کاهش مواجه بوده است بطوریکه مقدار شاخص کارایی نش‌ساتکلیف در این ایستگاه به ۰/۴۳ کاهش یافته است که کاهش مقدار این شاخص ناشی از کم‌برآوردی مدل رگرسیون در تخمین مقدار طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۷ می‌باشد. همانطور که در بخش‌های قبلی نیز عنوان شد با توجه به قرارگیری ایستگاه آبادان در اقلیم خیلی خشک و وقوع دماهای بالا (بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد) در این منطقه، از آنجایی که با افزایش دما میزان همبستگی بین دما و نمایه NDVI کاهش می‌یابد، بنابراین مدل رگرسیون توسعه داده شده با کم‌برآورد در تخمین مقدار NDVI همراه بوده است. علی‌رغم اینکه در مطالعات مختلف (Conde & Martos 2024; Du et al., 2020; Ebrahimi-Khusfi et al., 2020) عنوان شده است که ارتباط بین نمایه طیفی و بارش و دما در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک از نظر آماری معنی‌دار نیست ولی همانطور که مشاهده می‌شود کاربرد روش ناپارامتری به منظور توسعه مدل رگرسیون در اقلیم نیمه‌خشک (ایستگاه بروجن) با برخورداری از شاخص کارایی نش‌ساتکلیف ۰/۶۰ و ضریب همبستگی ۰/۷۸ منجر به نتایج مناسبی در تخمین NDVI نسبت به داده‌های AVHRR شده است. علاوه بر این لازم بذکر است که انطباق مقادیر محاسباتی توسط مدل رگرسیون و منبع AVHRR در اقلیم خیلی خشک (ایستگاه آبادان) نیز با برخورداری از ضریب همبستگی ۰/۶۶ چندان ضعیف ارزیابی نمی‌شود، ولی ممکن است که افزودن سایر متغیرهای تاثیرگذار بر تغییر پوشش گیاهی همچون دمای سطح زمین و توسعه مدل رگرسیون چندمتغیره منجر به بهبود عملکرد مدل در تخمین مقادیر شود. در همین راستا (Sharma et al., 2022) در پژوهش خود نشان دادند که دمای سطح زمین نسبت به بارش و دمای هوا از عملکرد بهتری در تخمین تغییرات شاخص برخورداری می‌باشد. به طور کلی با توجه به نتایج مشخص است که روش ناپارامتری Theil-Sen دارای دقت خوبی در توسعه مدل رگرسیونی بین مقادیر نمایه طیفی NDVI و دمای مدل‌های اقلیمی بوده است و می‌تواند تا حدود زیادی تغییرات این نمایه طیفی را بویژه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای تا خیلی مرطوب نشان دهد. بنابراین می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی تغییرات شاخص NDVI و پایش شرایط خشکسالی بر مبنای شاخص VCI (مستخرج از NDVI (Kogan 1997)) تحت سناریوهای اقلیمی در آینده استفاده نمود.



شکل ۳. بررسی NDVI محاسبه شده با روابط جدول ۲ و مقادیر منبع AVHRR



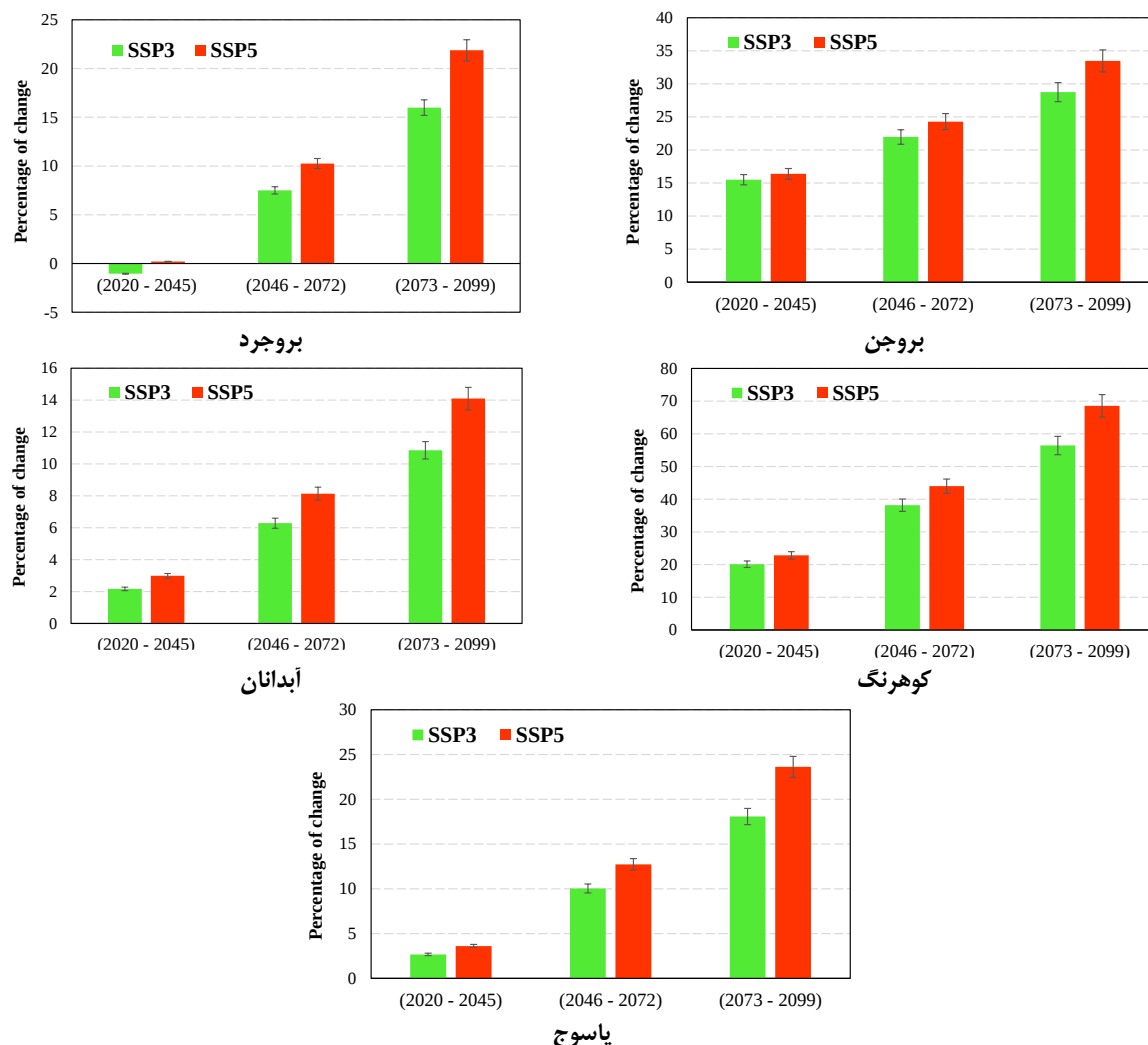
ادامه شکل ۳. بررسی NDVI محاسبه شده با روابط جدول ۲ و مقادیر منبع AVHRR

بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر شاخص NDVI و شرایط خشکسالی

در این بخش به بررسی تغییرات نمایه طیفی NDVI تحت سناریوهای اقلیمی CMIP6 در سه دوره آتی شامل ۲۰۷۳-۲۰۹۹، ۲۰۷۲-۲۰۴۶ و ۲۰۴۵-۲۰۲۰ (نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۴) پرداخته شده است (شکل ۴). شاخص NDVI به عنوان شاخصی کلیدی در ارزیابی سلامت پوشش گیاهی، بیانگر وضعیت سبزیگی و فعالیت فتوسنتزی گیاهان است و تغییرات آن در دوره های آتی می تواند بازتابی از اثرات تغییر اقلیم بر پویایی اکوسیستم های طبیعی و کشاورزی باشد. این تحلیل بر اساس خروجی مدل رگرسیون ناپارامتری بین دما و NDVI تحت دو سناریوی اقلیمی SSP3 (نمایانگر مسیر توسعه ناپایدار با انتشار متوسط گازهای گلخانه ای) و SSP5 (نمایانگر مسیر انتشار بسیار بالا) انجام شده است. در ایستگاه بروجرد، تغییرات NDVI نسبت به دوره پایه نشان دهنده روندی صعودی ولی نسبتاً ملایم است. تحت سناریوی SSP3، مقدار تغییر از کاهش خفیف ۱/۰۵- درصد در دوره نخست (۲۰۲۰-۲۰۴۵) به افزایش ۷/۵۱ و ۱۵/۹۹ درصد در دو دوره بعدی رسیده است. در سناریوی SSP5 نیز این تغییرات از ۰/۲۱ درصد افزایش در دوره اول به ۲۱/۸۷ درصد در انتهای قرن افزایش یافته است. به عبارت دیگر، انتظار می رود NDVI در ایستگاه بروجرد تا پایان قرن حدود ۱۶ تا ۲۲ درصد افزایش یابد. این روند بیانگر آن است که با وجود گرمایش اقلیم، شرایط دمایی می تواند در این منطقه منجر به بهبود نسبی فعالیت فتوسنتزی شود. در ایستگاه بروجرد، درصد تغییرات NDVI به مراتب بالاتر از سایر ایستگاه ها برآورد شده است. تحت سناریوی اقلیمی SSP3، میزان افزایش از ۱۵/۵ درصد در دوره اول به ۲۱/۹۷ و سپس ۲۸/۷۴ درصد رسیده است. در سناریوی SSP5 نیز روند مشابه ولی شدیدتر بوده و مقدار تغییرات از ۱۶/۳۷ درصد در دوره نخست به ۳۳/۴۷ درصد در انتهای قرن افزایش یافته است. به طور کلی، پیش بینی ها حاکی از افزایش بیش از ۳۰ درصدی در مقدار متوسط NDVI در ایستگاه بروجرد تا پایان قرن می باشد. در ایستگاه آبدانان، تغییرات NDVI در مقایسه با سایر مناطق کمتر و تدریجی تر است. تحت سناریوی اقلیمی SSP3، مقدار تغییر از ۲/۱۷ درصد در دوره اول به ۶/۲۹ و سپس ۱۰/۸۶ درصد افزایش یافته است، در حالی که در SSP5 از ۲/۹۹ درصد در دوره نخست به ۱۴/۱۰ درصد در پایان قرن رسیده است. این روند افزایشی آرام (حداکثر حدود ۱۰ تا ۱۴ درصد) نشان دهنده پایداری نسبی شرایط زیستی در منطقه ای است که از اقلیم خشکی برخوردار می باشد.

بیشترین تغییرات مثبت در NDVI در ایستگاه کوهرنک مشاهده می شود. تحت سناریوی SSP3، درصد تغییرات از ۲۰/۱۳ درصد در دوره اول به ۳۸/۱۹ درصد در میانه و ۵۶/۴۴ درصد در انتهای قرن افزایش یافته است، در حالی که میزان تغییرات در متوسط شاخص NDVI تحت سناریوی اقلیمی SSP5 این مقادیر به ترتیب برابر با ۲۲/۸۴، ۴۴/۰۰ و ۶۸/۵۶ درصد بوده است. این اعداد بیانگر افزایش چشمگیر بیش از ۵۰ تا ۶۵ درصدی در مقدار NDVI تا پایان قرن می باشد. در ایستگاه یاسوج نیز روند افزایش تدریجی و پیوسته در مقدار شاخص NDVI مشاهده می شود. تحت سناریوی اقلیمی SSP3، درصد تغییرات از ۲/۶۷ درصد در دوره اول به ۱۰/۰۵ و سپس ۱۸/۰۷ درصد افزایش یافته است، و در SSP5 نیز از ۳/۶۱ درصد به ۲۳/۶۱ درصد در انتهای قرن رسیده است. بر اساس این نتایج، افزایش NDVI در یاسوج تا پایان قرن حدود ۲۰ تا ۲۴ درصد پیش بینی می شود. به طور کلی، تحلیل روندها نشان می دهد که در تمامی ایستگاه ها افزایش در متوسط شاخص NDVI در سناریوی SSP5 بیش از SSP3 می باشد، که نشان دهنده تأثیر قوی تر گرمایش اقلیم در سناریوی انتشار بالا می باشد. همچنین، شدت افزایش در مناطق کوهستانی و سردسیر (مانند کوهرنک و بروجرد) بیش از مناطق گرم تر (نظیر آبدانان) است. این تفاوت ها بیانگر وابستگی شدید پاسخ پوشش گیاهی به شرایط اقلیمی محلی، ارتفاع و دسترسی به منابع آبی است. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که افزایش دما در مناطق مرتفع و سرد کشور می تواند اثرات مثبت اولیه ای بر رشد و سبزیگی گیاهان داشته باشد، در حالی که

در مناطق گرم‌تر، این اثر محدودتر است. با این حال، در بلندمدت، تداوم گرمایش بدون افزایش هم‌زمان بارش می‌تواند به کاهش پایداری اکوسیستم‌های گیاهی و تشدید فشار بر منابع آب منجر شود. از این رو، اتخاذ سیاست‌های سازگارانه در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطق با رشد سریع NDVI، برای حفظ پایداری اکولوژیکی ضروری خواهد بود.



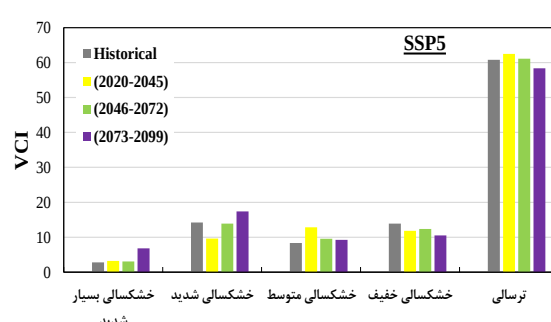
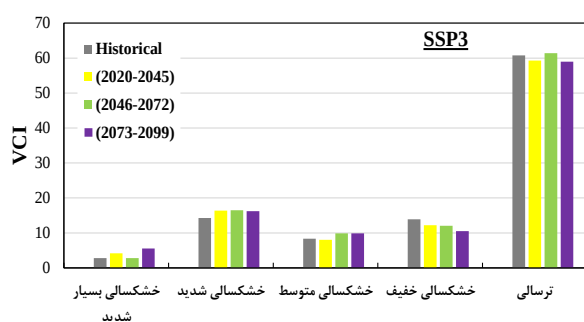
شکل ۴. تغییرات شاخص NDVI نسبت به دوره پایه در سناریوهای اقلیمی

در این بخش از تحقیق، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) که بر مبنای داده‌های NDVI محاسبه گردیده، برای ارزیابی فراوانی وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها طی دوره پایه و آینده مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور تحلیل روندهای زمانی، سه بازه آتی شامل (۲۰۴۵-۲۰۲۰)، (۲۰۷۲-۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۷۳) تحت دو سناریوی اقلیمی SSP3 و SSP5 بررسی شد. مقادیر درصد فراوانی طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی در ایستگاه‌های منتخب در شکل ۵ ارائه گردیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌ها، فراوانی وقوع خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید روندی افزایشی و در مقابل، ترسالی‌ها روندی کاهشی یا تقریباً ثابت دارند. این روند به‌ویژه تحت سناریوی SSP5، که بیانگر افزایش بیشتر دما و کاهش رطوبت نسبی است، بارزتر می‌باشد. در ایستگاه بروجرد، سهم خشکسالی‌های بسیار شدید از ۲۰۸ درصد در دوره پایه به حدود ۶۰۸ درصد در انتهای قرن (تحت SSP5) افزایش یافته است. همچنین، خشکسالی‌های شدید نیز از ۱۴۰۲ درصد در دوره پایه به بیش از ۱۷۰ درصد در دوره سوم و تحت سناریوی SSP5 رسیده است. در مقابل، ترسالی‌ها از ۶۰۰۸ درصد به حدود ۵۸/۳ درصد کاهش یافته‌اند. این امر نشان‌دهنده‌ی افزایش فراوانی شرایط خشک و کاهش تداوم ترسالی‌ها در این ایستگاه می‌باشد. در ایستگاه بروجن، روند مشابهی مشاهده می‌شود. فراوانی خشکسالی بسیار شدید از ۱۰۷ درصد در دوره پایه به بیش از ۶۰ درصد در انتهای قرن افزایش یافته است. همچنین خشکسالی شدید در دوره‌های آتی بین ۱۵/۰ تا ۱۷/۰ درصد نوسان دارد که نسبت به مقدار پایه (۱۴۰۶ درصد) افزایش داشته است. در مقابل، خشکسالی‌های خفیف از ۱۵۰۳ درصد به حدود ۹۰ درصد در انتهای قرن کاهش یافته،

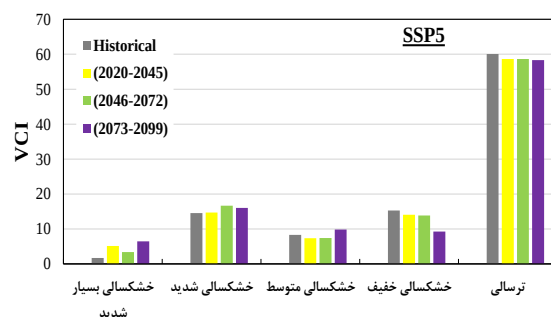
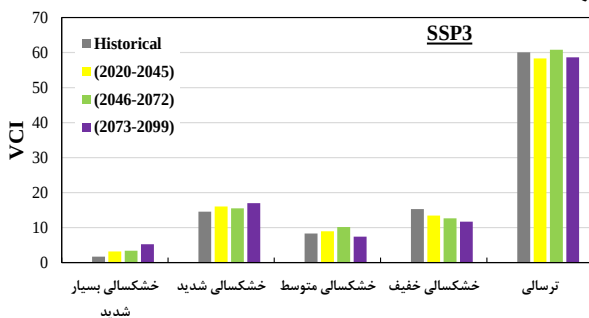


که بیانگر افزایش شدت خشکسالی و کاهش رخدادهای ملایم‌تر می‌باشد. در ایستگاه آبدانان، تغییرات پیچیده‌تر اما با الگوی مشابه مشاهده می‌شود. در دوره پایه، فراوانی وقوع خشکسالی بسیار شدید حدود ۹/۰ درصد بوده است، اما در دوره‌های آینده بین ۵/۰ تا ۹/۰ درصد متغیر می‌باشد و در انتهای قرن (SSP5) مجدداً به حدود ۶/۸ درصد می‌رسد. در عین حال، خشکسالی‌های شدید از ۱۵/۳ درصد در دوره پایه به بیش از ۱۸/۰ درصد افزایش یافته است. هرچند سهم ترسالی‌ها تقریباً ثابت و نزدیک به ۶۰/۰ درصد باقی مانده، اما افزایش تدریجی در فراوانی خشکسالی‌های شدید، نشانه‌ی افزایش بی‌نظمی‌های بارش و کاهش پایداری شرایط مرطوب در این ناحیه می‌باشد.

ایستگاه کوه‌رنگ بیشترین نوسانات را در بین ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در دوره پایه، سهم خشکسالی بسیار شدید ۶/۹ درصد بوده است، در حالی که تحت سناریوی SSP5 در بازه‌ی ۲۰۷۳-۲۰۹۹ این مقدار به حدود ۱۱ درصد افزایش یافته است. همچنین، خشکسالی‌های شدید نیز از ۱۴/۲ درصد در دوره پایه به بیش از ۱۷ درصد در میانه قرن و حدود ۱۲ درصد در انتهای قرن (SSP5) رسیده‌اند. این رفتار متغیر بیانگر ناپایداری اقلیمی و حساسیت بالای این منطقه کوهستانی به تغییرات دما و الگوی بارش می‌باشد. در مقابل، ترسالی در تمام دوره‌ها از روند کاهشی و با شیب کم اما مداوم برخوردار است و از ۶۰/۱ درصد در دوره پایه به حدود ۵۸/۳ درصد کاهش یافته است. نهایت، در ایستگاه یاسوج، سهم خشکسالی‌های بسیار شدید از ۱۰/۷ درصد در دوره پایه به حدود ۵/۰ تا ۷/۰ درصد در آینده افزایش یافته است. همچنین خشکسالی‌های شدید نیز افزایش ملایمی از ۱۴/۶ به حدود ۱۶/۰ تا ۱۷/۰ درصد را نشان می‌دهند. در حالی که، خشکسالی‌های خفیف روندی کاهشی داشته و از ۱۶ درصد به کمتر از ۱۰ درصد کاهش یافته‌اند. با وجود آنکه سهم ترسالی تقریباً ثابت مانده است (در حدود ۵۹/۰ درصد)، افزایش خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید گویای افزایش وقوع تنش‌های خشک در پوشش گیاهی منطقه می‌باشد. به‌طور کلی، مقایسه نتایج بین ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که شدت و فراوانی خشکسالی‌های بسیار شدید در مناطق جنوبی و مرتفع (نظیر آبدانان و کوه‌رنگ) نسبت به مناطق شمالی (نظیر بروجرد و بروجن) تغییرات بیشتری را تجربه می‌کند. همچنین، سناریوی SSP5 به دلیل افزایش بیشتر دما و کاهش بارش، در تمام ایستگاه‌ها خشکسالی‌های شدیدتری را نسبت به SSP3 رقم خواهد زد. بنابراین، بر اساس شاخص VCI، پیش‌بینی می‌شود که در افق بلندمدت (۲۰۷۳-۲۰۹۹)، احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید در این حوضه افزایش یافته و به تبع آن، پایداری پوشش گیاهی و وضعیت رطوبتی خاک در اغلب ایستگاه‌ها کاهش پیدا نماید. این نتایج اهمیت اجرای سیاست‌های سازگاری، مدیریت جامع منابع آب، و تغییر الگوی کشت را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از افزایش فراوانی خشکسالی‌ها برجسته می‌سازد.

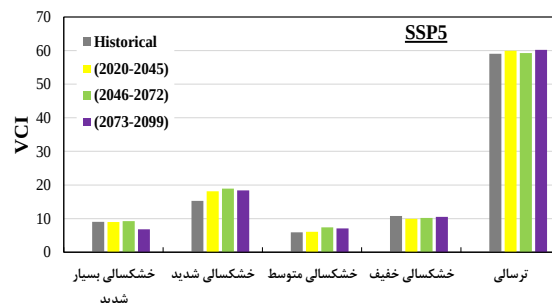
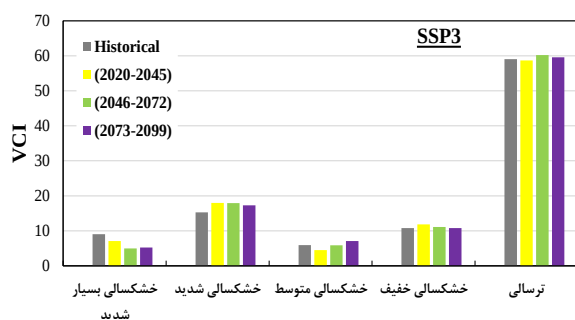


بروجرد

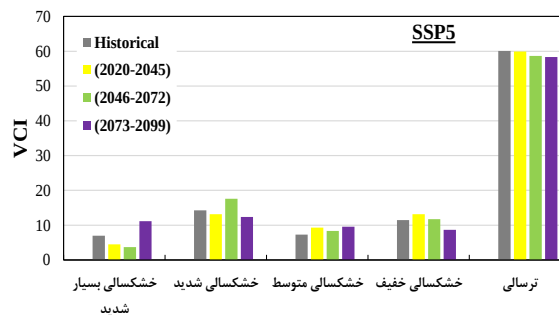
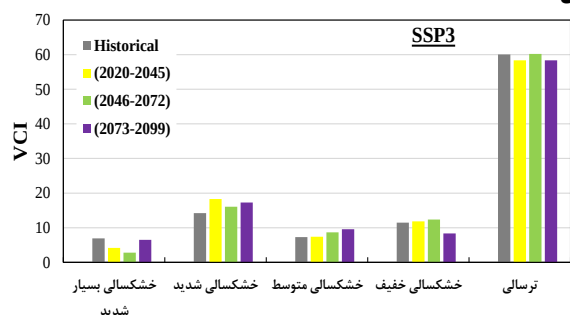


بروجن

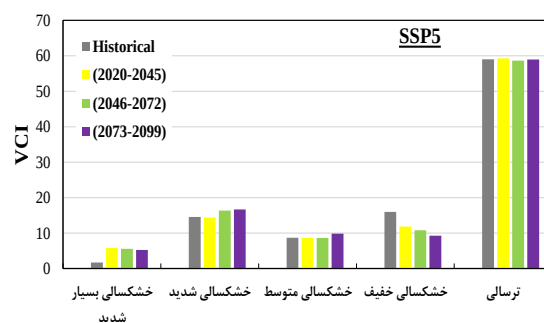
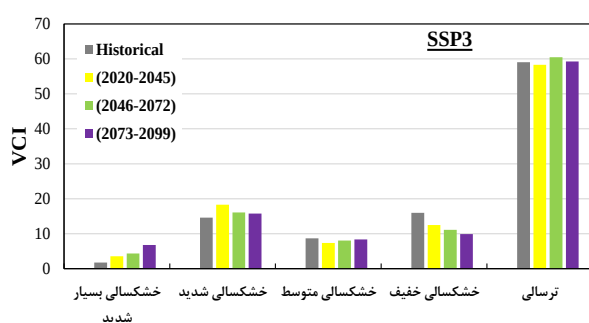
شکل ۵. فراوانی وقوع گروه‌های مختلف خشکسالی براساس شاخص VCI تحت سناریوهای اقلیمی



آبدانان



کوهرنگ



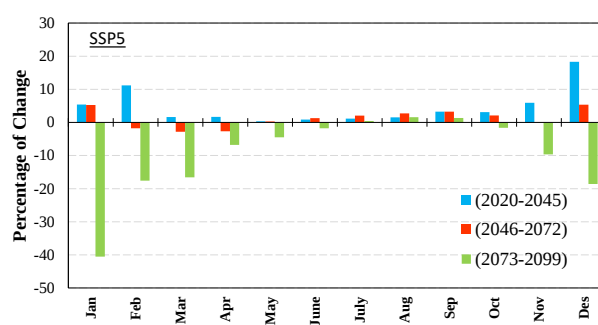
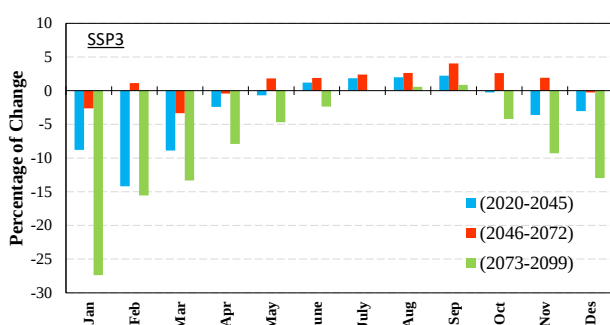
ياسوج

ادامه شکل ۵. فراوانی وقوع گروه‌های مختلف خشکسالی براساس شاخص VCI تحت سناریوهای اقلیمی

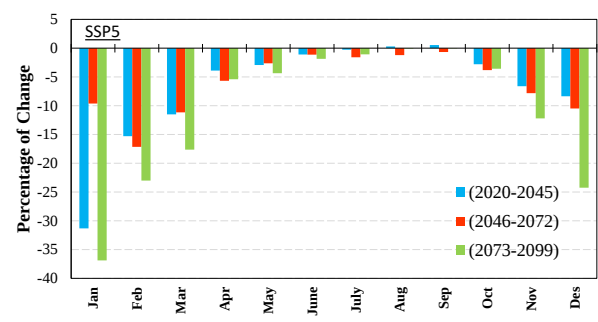
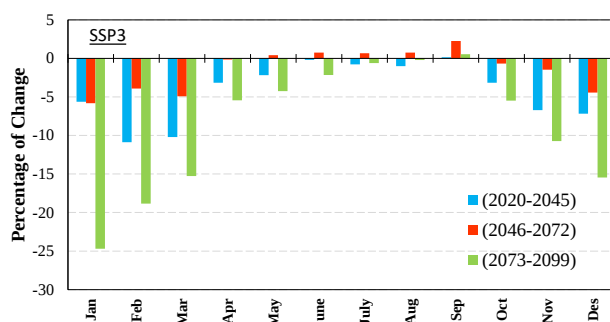
در این بخش از پژوهش، تغییرات ماهانه شاخص پوشش گیاهی (VCI) طی سه دوره زمانی آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۵، ۲۰۴۶-۲۰۷۲ و ۲۰۷۳-۲۰۹۹) و تحت دو سناریوی اقلیمی SSP3 و SSP5 نسبت به دوره پایه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج سه ایستگاه بروجرد، بروجن و کوهرنگ به‌عنوان نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. در ایستگاه بروجرد، نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ماهانه شاخص VCI در دوره اول (۲۰۲۰-۲۰۴۵) عمدتاً دارای نوسان اندکی بوده و از مقدار حدود ۸- درصد در زمستان تا ۲ درصد در تابستان متغیر می‌باشد. با این حال، تحت سناریوی اقلیمی SSP5، در همین دوره، افزایش نسبی VCI در فصل زمستان (به‌ویژه در دسامبر با حدود ۱۸ درصد) مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش دمای سطحی و کاهش تنش سرمایی در ماه‌های سرد باشد. با گذر به دوره دوم (۲۰۴۶-۲۰۷۲)، تغییرات مثبت اندکی در ماه‌های گرم سال (ژوئن تا سپتامبر) مشاهده می‌شود، اما در دوره سوم (۲۰۷۳-۲۰۹۹) کاهش شدیدی در VCI به‌ویژه در ماه‌های زمستانی رخ داده است، به‌طوری‌که مقدار تغییر در دسامبر و ژانویه تحت سناریوی SSP5 به‌ترتیب حدود ۲۷ و ۴۰ درصد کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده افزایش شدت و تداوم خشکسالی‌های زمستانه در دهه‌های پایانی قرن حاضر است که به‌طور مستقیم می‌تواند بر کاهش رطوبت خاک و افت رشد پوشش گیاهی در ابتدای فصل رشد تأثیرگذار باشد. در ایستگاه بروجن، الگوی تغییرات ماهانه VCI روندی مشابه ولی با دامنه نوسانات شدیدتر نسبت به بروجرد دارد. در دوره اول، کاهش در مقدار شاخص VCI در اغلب ماه‌ها مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که مقدار تغییرات تحت سناریوی اقلیمی SSP3 بین ۲ تا ۷ درصد و تحت سناریوی SSP5 در حدود ۳۰ درصد در ژانویه متغیر می‌باشد. این کاهش قابل‌توجه در فصل سرد نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر پوشش گیاهی این منطقه کوهستانی در برابر خشکسالی‌های زمستانه است. با پیشروی در زمان، گرچه در ماه‌های می و ژوئن بهبود نسبی (حدود ۰ تا ۲ درصد افزایش) مشاهده می‌شود، اما در دوره سوم (۲۰۷۳-۲۰۹۹) شدت افت در شاخص VCI در زمستان و اوایل بهار به بیش از ۱۵ تا ۲۴ درصد

رسیده است. چنین الگویی بیانگر کاهش چشمگیر رطوبت و افزایش تبخیر-تعرق در مناطق مرتفع در اثر افزایش دما است. وجود مقادیر منفی به‌طور پیوسته در ماه‌های نوامبر تا مارس نشان می‌دهد که احتمال بروز خشکسالی‌های زیستی در مناطق مرتفع استان چهارمحال و بختیاری در آینده بسیار بالا خواهد بود.

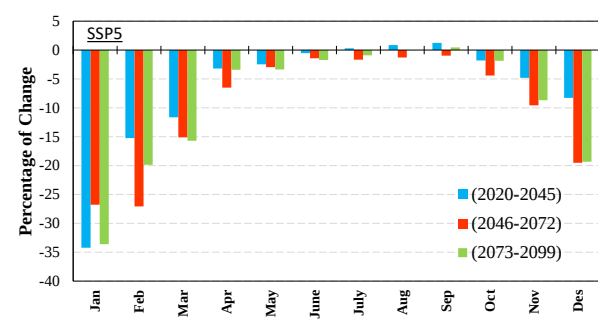
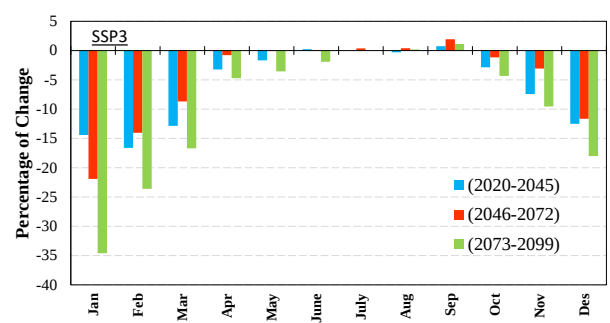
در ایستگاه کوه‌رنگ، برخلاف دو ایستگاه دیگر، در دو دوره نخست (۲۰۲۰-۲۰۷۲) روند کلی تغییرات VCI مثبت است و افزایش قابل توجهی در شاخص طی ماه‌های زمستان و اوایل بهار مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال، در ژانویه طی دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ تحت سناریوی SSP3 افزایش بیش از ۳۳ درصدی و در ماه دسامبر دوره اول (۲۰۲۰-۲۰۷۲) تحت SSP5 افزایش ۲۰ درصدی در مقدار شاخص VCI نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود که حاکی از افزایش نسبی پوشش گیاهی در نتیجه ذوب زودهنگام برف و افزایش دمای متوسط زمستان است. با این حال، در دوره سوم (۲۰۷۳-۲۰۹۹)، این روند معکوس می‌شود؛ در بیشتر ماه‌ها کاهش شدیدی در مقدار VCI رخ می‌دهد و در ژانویه و دسامبر به‌ترتیب افتی حدود ۶- تا ۲۷- درصد ثبت شده است. این تغییر جهت می‌تواند ناشی از تخلیه تدریجی منابع آبی سطحی و کاهش رطوبت خاک در اثر گرمایش بلندمدت باشد.



بروجرد



بروجن



یاسوج

شکل ۶. تغییرات ماهانه شاخص خشکسالی کشاورزی VCI تحت سناریوهای اقلیمی نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های بروجرد، بروجن و یاسوج به عنوان نمونه

در مجموع، نتایج حاکی از آن است که در حوضه مورد مطالعه، علی‌رغم وجود برخی نوسانات کوتاه‌مدت، روند کلی تغییرات VCI در بلندمدت نزولی است، به‌ویژه در سناریوی SSP5 که بیانگر افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی می‌باشد. کاهش‌های محسوس در ماه‌های زمستان و اوایل بهار نشان می‌دهد که فصل رشد در مناطق کوهستانی ایران در آینده با محدودیت‌های رطوبتی

بیشتری روبه‌رو خواهد شد. افزایش مقطعی VCI در برخی ماه‌های تابستانی، احتمالاً ناشی از کوتاه‌تر شدن فصل رشد و تمرکز بارش‌های حدی در بازه زمانی محدود است، نه بهبود واقعی شرایط زیستی گیاهان. بنابراین، می‌توان چنین عنوان نمود که تغییرات اقلیمی می‌تواند منجر به افزایش شدت و تداوم خشکسالی‌های فصلی و بی‌نظمی در چرخه پوشش گیاهی در این حوضه شود. این موضوع برای مناطق وابسته به کشاورزی دیم و منابع آبی سطحی، تهدیدی جدی محسوب می‌شود و اتخاذ راهبردهای سازگارانه در آینده ضروری خواهد بود.

جمع‌بندی

تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، چالش‌های قابل‌توجهی برای پایداری اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی ایجاد کرده است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر پوشش گیاهی و شدت خشکسالی در حوضه آبریز کارون، از طریق تحلیل ارتباط پارامترهای اقلیمی (دما و بارش) با شاخص پوشش گیاهی NDVI و پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص VCI، انجام شد. یکی از اهداف کلیدی این پژوهش، توسعه مدل رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen برای پیش‌بینی تغییرات NDVI بر اساس دما بود، که به دلیل مقاومت در برابر داده‌های پرت و انعطاف‌پذیری در تحلیل‌های اقلیمی، به‌عنوان روشی کارآمد انتخاب شد. علاوه بر این، بررسی کارایی شاخص VCI در پایش خشکسالی و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر تغییرات اقلیمی، از دیگر اهداف این مطالعه بود. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی در دوره پایه نشان داد که دما تأثیر قوی‌تری نسبت به بارش بر تغییرات شاخص NDVI دارد. ضریب همبستگی اسپیرمن بین دما و NDVI در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین ۰/۶۵ تا ۰/۸۳ تخمین زده شد، در حالی که همبستگی با بارش، منفی و در محدوده ۰/۵۶- تا ۰/۷۸- قرار داشته است. مدل رگرسیون ناپارامتری Theil-Sen با ضریب تعیین (R^2) بین ۰/۴۹ تا ۰/۷۷ و مقدار Pvalue کمتر از ۰/۰۵ در اکثر ایستگاه‌ها، دقت قابل‌قبولی در تخمین NDVI نشان داد. ارزیابی داده‌های اقلیمی مدل‌های CMIP6 نیز نشان داد که این داده‌ها با ضریب همبستگی R^2 بیش از ۰/۹۵ و خطای RMSE بین ۱/۵ تا ۲/۲ درجه سانتی‌گراد، از دقت بالایی در شبیه‌سازی دمای دوره پایه برخوردار بوده است، که این امر قابلیت اطمینان آن‌ها را برای پیش‌بینی‌های آینده تأیید می‌کند. تحلیل تغییرات NDVI در دوره‌های آتی نشان‌دهنده روند صعودی در اکثر ایستگاه‌ها بود، به‌ویژه در مناطق سردسیر و مرتفع مانند کوه‌رنگ و بروجن، که به ترتیب تا ۵۶/۶۸ درصد و ۳۳/۴۷ درصد افزایش در شاخص NDVI تحت سناریوی اقلیمی SSP5 پیش‌بینی شد. با این حال، در مناطق گرم‌تر مانند آبادان، تغییرات NDVI محدودتر (تا ۱۴ درصد) بوده است، که نشان‌دهنده پایداری نسبی اما آسیب‌پذیری بیشتر این مناطق در برابر تنش‌های حرارتی می‌باشد. در مقابل، تغییرات در شاخص VCI حاکی از افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید بود. به‌عنوان مثال، در ایستگاه کوه‌رنگ، فراوانی خشکسالی‌های بسیار شدید از ۹/۶ درصد در دوره پایه به ۱۱ درصد در دوره سوم (۲۰۷۳-۲۰۹۹) تحت سناریوی اقلیمی SSP5 افزایش یافته است، در حالی که ترسالی‌ها در اکثر ایستگاه‌ها کاهش یافته است. این روند به‌ویژه در سناریوی SSP5، که با افزایش شدید دما و کاهش رطوبت همراه است، بارزتر می‌باشد. تحلیل تغییرات ماهانه VCI نیز نشان داد که کاهش‌های شدید در ماه‌های زمستان و اوایل بهار (تا ۴۰ درصد در بروجرد و ۲۴ درصد در بروجن) می‌تواند به کاهش رطوبت خاک و کوتاه شدن فصل رشد منجر شود، در حالی که افزایش‌های مقطعی در ماه‌های تابستان احتمالاً ناشی از بارش‌های حدی می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که پیش‌بینی‌های ارائه شده در این پژوهش با درجاتی از عدم قطعیت همراه است و این نتایج براساس خروجی حاصل از چند مدل اقلیمی حاصل شده است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی، به‌ویژه تحت سناریوی SSP5، می‌تواند به تشدید خشکسالی‌ها و بی‌نظمی در چرخه‌های زیستی پوشش گیاهی در حوضه کارون منجر شود. این امر تهدیدی جدی برای کشاورزی دیم، امنیت غذایی و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی در این منطقه محسوب می‌شود. مدل رگرسیون Theil-Sen و شاخص VCI به‌عنوان ابزارهایی کارآمد برای پایش و پیش‌بینی اثرات اقلیمی معرفی شدند، اما محدودیت‌هایی نظیر کم‌برآوردی در مناطق خیلی خشک نشان‌دهنده نیاز به توسعه مدل‌های چندمتغیره با در نظر گرفتن متغیرهایی همچون دمای سطح زمین یا رطوبت خاک است. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌های سازگارانه مانند مدیریت بهینه منابع آب، توسعه ارقام مقاوم به خشکسالی، و اصلاح الگوهای کشت در مناطق پرخطر، به‌ویژه در ایستگاه‌های جنوبی و مرتفع مانند کوه‌رنگ و آبادان، در اولویت قرار گیرند. همچنین، استفاده از سامانه‌های پایش مبتنی بر سنجش از دور، مانند Google Earth Engine، و تلفیق آن‌ها با مدل‌های اقلیمی می‌تواند ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی و مدیریت مخاطرات اقلیمی فراهم آورد. این سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای تدوین نقشه‌های ریسک خشکسالی، برنامه‌ریزی کاربری اراضی، و تخصیص هدفمند منابع مالی برای پروژه‌های احیای اکوسیستم، مانند جنگل‌کاری یا احیای تالاب‌ها، مورد استفاده قرار گیرند.



منابع

- انصاری مهآبادی، ثمین؛ دهبان، حسین؛ زارعیان، محمد جواد؛ فرخ نیا، اشکان. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس پرونداد مدل‌های CMIP6. *پژوهش آب/ایران*، ۱۶(۱)، ۱۱-۲۴.
- حسین‌آبادی، سعیده؛ یعقوب‌زاده، مصطفی؛ امیرآبادی‌زاده، مهدی؛ فروزان‌مهر، مهدیه (۱۳۹۹). ارزیابی خشکسالی هواشناسی در دوره‌های آتی به کمک داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم (مطالعه موردی: شهرستان‌های زابل و شیراز). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۰(۴۰)، ۷۵-۸۷.
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر پرونداد همادی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۷(۳)، ۵۶۱-۵۷۸.
- کوهی، سکینه؛ عزیزیان، اصغر؛ مازندرانی زاده، حامد (۱۴۰۱). اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی تحت سناریوهای SSP3 و SSP5 با استفاده از روش فازری. *تحقیقات منابع آب/ایران*، ۱۸(۳)، ۱-۱۷.
- گرچی، مصطفی (۱۳۹۴). بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند خشکسالی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: استان فارس). *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. به راهنمایی محمود رائینی سرجاز. دانشگاه ساری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی.

REFERENCES

- AnsariMahabadi, S., Dehban, H., Zareian, M., & Farokhni. A. (2022). Investigation of Temperature and Precipitation Changes in the Iran's Basins in the Next 20 ears Based on the Output of CMIP6 Model. *Iranian Water Research Journal*, 16(1), 11-24. (In Persian).
- Bagherzadeh A., Vosugh Hoseini A., & Homami Totmaj L. (2020). The effects of Climate Change on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Northeast of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 671–83. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00724-x>.
- Bao Z., Zhang J., Wang G., Guan T., Jin J., Liu Y., & Ma T. (2021). The Sensitivity of Vegetation Cover to Climate Change in Multiple Climatic Zones Using Machine Learning Algorithms. *Ecological Indicators*, 124(107443), <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107443>.
- Bisht DS., Sridhar V., Mishra A., Chatterjee C., & Raghuwanshi NS. (2019). Drought Characterization over India under Projected Climate Scenario. *International Journal of Climatology*, 39(4), 1889–1911. <https://doi.org/10.1002/joc.5922>.
- Conde JLY., & Martos FM. (2024). Spatial Variability of Hydrochemistry and Environmental Controls in Karst Aquifers of the Southern Iberian Peninsula: Implications for Climate Change Impact Assessment. *The Science of the Total Environment*, 907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168141>.
- Das S., Das J., & Nanduri UV. (2021). Identification of Future Meteorological Drought Hotspots over Indian Region: A Study Based on NEX-GDDP Data. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7145>.
- Du J., Fang S., Sheng Z., Wu J., Quan Z., & Fu Q. (2020). Variations in Vegetation Dynamics and Its Cause in National Key Ecological Function Zones in China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(24), 30145–61. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09211-3>.
- Du JQ., Jiaerheng A., Zhao CX., Fang GL., & Fang SF. (2015). Dynamic Changes in Vegetation NDVI from 1982 to 2012 and Its Responses to Climate Change and Human Activities in Xinjiang, China. *Journal of Applied Ecology*, 26(12), 3567–3578.
- Ebrahimi-Khusfi Z., Mirakbari A., & Khosroshahi M. (2020). Vegetation Response to Changes in Temperature, Rainfall, and Dust in Arid Environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08644-0>.
- Eskandari Damaneh H., Jafari M., Eskandari Damaneh H., Behnia M., Khoorani A., & Tiefenbacher JP. (2021). Testing Possible Scenario-Based Responses of Vegetation Under Expected Climatic Changes in Khuzestan Province. *Air, Soil and Water Research*, 14, 1–17. <https://doi.org/10.1177/11786221211013332>.
- Gaitán E., Monjo R., Pórtolés J., & Pino-Otín MR. (2020). Impact of Climate Change on Drought in Aragon (NE Spain). *Science of the Total Environment*, 740. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140094>.
- Gaznayee HAA., Al-Quraishi AMF., & Al-Sulttani AHA. (2021). Drought Spatiotemporal Characteristics Based on a Vegetation Condition Index in Erbil, Kurdistan Region, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 11(December):4545–56. [https://doi.org/10.24996/ij.s.2021.62.11\(si\).34](https://doi.org/10.24996/ij.s.2021.62.11(si).34).
- Gorji M. (2016). Assessment of the Effect of Climate Change on the Trend of Drought Using Satellite Images (Case Study: Fars Province). *Master's thesis*. Supervisor: Raeini Sarjaz M., Sari university, Faculty of Agriculture and Natural Resources. (In Persian).

- Haile GG., Tang Q., Hosseini-Moghari SM., Liu X., Gebremicael TG., Leng G., Kebede A., Xu X., & Xiaobo Yun. (2020). Projected Impacts of Climate Change on Drought Patterns Over East Africa. *Earth's Future*, 8(7), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2020EF001502>.
- Hosseinabadi S., Yaghoobzadeh M., Amirabadizadeh M., & Foroozanmehr M. (2020). Meteorological Drought Assessment in Future Periods by Using of the Data of the Fifth Report of Climate Change (Case Study: Zabol and Shiraz Cities). *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 10(40), 78–87. (In Persian).
- Janani N., Kannan B., & Thiyagarajan G. (2021). Evaluating Vegetation Condition Index Based on Satellite Data for Monitoring Drought in Semi Arid Region. in *Soil and Water Management Technologies for Climate Resilience, Agricultural and Environmental Sustainability*.
- Jiang R., Liang J., Zhao Y., Wang H., Xie J., Lu X., & Li F. (2021). Assessment of Vegetation Growth and Drought Conditions Using Satellite-Based Vegetation Health Indices in Jing-Jin-Ji Region of China. *Scientific Reports* 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93328-z>.
- Kalisa W., Igbawua T., Henchiri M., Ali S., Zhang S., Bai Y., & Zhang J. (2019). Assessment of Climate Impact on Vegetation Dynamics over East Africa from 1982 to 2015. *Scientific Reports*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53150-0>.
- Khan JU., Islam AKMS., Das MK., Mohammed K., Bala SK., & Islam GMT. (2020). Future Changes in Meteorological Drought Characteristics over Bangladesh Projected by the CMIP5 Multi-Model Ensemble. *Climatic Change*, 162(2), 667–85. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02832-0>.
- Kharuk VI., Ranson KJ., & Dvinskaya ML. (2007). Evidence of Evergreen Conifer Invasion into Larch Dominated Forests during Recent Decades in Central Siberia. *Eurasian Journal of Forest Research*, 10(2), 163–71. <http://hdl.handle.net/2115/30308>.
- Kogan, FN. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621–36. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2).
- Koohi, S., Azizian, A., & Mazandaranizadeh. H. (2022). The Effects of Climate Change on Drought Conditions using Fuzzy Logic under SSP3 and SSP5 Scenarios. *Iran-Water Resources Research*, 18(3), 1–17. (In Persian).
- Li B., Chen F., Qin Y., & Shirazi Z. (2014). Shifting Trends and Probability Distribution of Vegetation Conditions over China. *Remote Sensing Letters*, 5(7), 619–26. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.949364>.
- Lin X., Niu J., Berndtsson R., Yu X., Zhang L., & Chen X. (2020). Ndvi Dynamics and Its Response to Climate Change and Reforestation in Northern China. *Remote Sensing*, 12(24), 1–15. doi: 10.3390/rs12244138.
- Liu Y., Tian J., Liu R., & Ding L. (2021). Influences of Climate Change and Human Activities on Ndvi Changes in China. *Remote Sensing*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/rs13214326>.
- Qiu H, & Cao MM. (2011). Spatial and Temporal Variations in Vegetation Cover in China Based on SPOT Vegetation Data. *Resources Science*, 33(2), 335–340. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotals-ZRZY201102024.htm.
- Rahimi J., Ebrahimpour M., & Khalili A. (2013). Spatial Changes of Extended De Martonne Climatic Zones Affected by Climate Change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 112(3–4), 409–18.
- Rathore P., Roy A., & Karnatak H. (2019). Modelling the Vulnerability of Taxus Wallichiana to Climate Change Scenarios in South East Asia. *Ecological Indicators*, 102(November 2017), 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.020>.
- Sen PK. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–89. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.
- Shagega FP., Munishi SE., & Kongo VM. (2019). Prediction of Future Climate in Ngerengere River Catchment, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 112, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.12.002>.
- Sharma M., Bangotra P., Gautam AS., & Gautam S. (2022). Sensitivity of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Land Surface Temperature, Soil Moisture and Precipitation over District Gautam Buddh Nagar, UP, India. *Tochastic Environmental Research and Risk Assessment: Research Journal*, 36(6), 1779–89.
- Swain S., & Hayhoe K. (2015). CMIP5 Projected Changes in Spring and Summer Drought and Wet Conditions over North America. *Climate Dynamics*, 44(9–10), 2737–50. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2255-9>.
- Theil H. (1950). A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis, Part 3. *Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A*, 53, 1397–1412.



https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20.

- Wilhite DA., Mannava VK., & Pulwarty R. (2014). Managing Drought Risk in a Changing Climate: The Role of National Drought Policy. *Weather and Climate Extremes*, 3(March 2013), 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.01.002>.
- Wilks DS. 2019. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. edited by Kelleher L., & Janco C.
- Zhang S., Li Z., Lin X., & Zhang C. (2019). Assessment of Climate Change and Associated Vegetation Cover Change on Watershed-Scale Runoff and Sediment Yield. *Water*, 11(07). <https://doi.org/10.3390/w11071373>.
- Zarrin, A., & Dadashi Roudbari. AA. (2021). Projected Consecutive Dry and Wet Days in Iran based on CMIP6 Bias-Corrected Multi-Model Ensemble. *Earth and Space Physics*, 47(3), 561–78. (In Persian).