

Analysis of the Relationship between Wet and Dry Seasons in Northern Provinces of Iran with some Teleconnection Indices

Boromand Salahi ^{1✉} | Mehdi Frotan ²

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: salahi@uma.ac.ir
2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: Mahdi.frotan23@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 20 November 2024
Accepted 04 January 2025
Published online 07 January 2025

Keywords:

NDVI,
ENSO,
Northern provinces of Iran,
Wet and dry seasons,
Remote sensing patterns.

ABSTRACT

Objective: The ENSO atmospheric phenomenon has significant impacts on precipitation, temperature, and drought patterns in different regions of the world. This study aimed to investigate the relationship between ENSO indices such as MEI, SOI, and NINO fluctuations with drought indices (TCI, VCI, VHI, and SPI) in the provinces of Guilan, Golestan, and Mazandaran during the years 2013 to 2022.

Methods: For these works, satellite NDVI, LST, and precipitation were obtained from the Google Earth Engine platform to calculate drought indices, and ENSO data were obtained from the NOAA website for correlation analysis.

Results: The results showed that the MEI and NINO indices had a positive and significant correlation with SPI, indicating an increase in precipitation and a decrease in drought intensity in the periods associated with these indices, while their relationship with other drought indices was weak and insignificant. The SOI index showed a significant inverse relationship with SPI, confirming the effect of La Niña in increasing drought.

Conclusions: During the El Niño phase, temperature increased in the northern parts of the studied provinces, but the southern highlands of Mazandaran experienced sub-zero temperatures. Vegetation cover was denser in southern Golestan and eastern Mazandaran during this period, while northern Golestan and southern Mazandaran faced a decline in vegetation cover. Drought indices also confirmed this heterogeneity; SPI indicated relative dryness in the western half of the region, TCI showed heat stress in northern Gilan and central Mazandaran, and VCI revealed a decline in vegetation health in western Gilan and the western half of Mazandaran extending to northeastern Golestan. During the La Niña phase, temperatures generally increased and northern areas became warmer, while vegetation cover decreased and dry areas expanded, particularly in northern Golestan and southern Mazandaran. The SPI and VHI indices showed that drought severity and vegetation health decline increased during this period, with a concentration of dry lands evident in Mazandaran and the central part of Golestan.

Cite this article: Salahi, B., & Frotan, M. (2025). Analysis of the Relationship between Wet and Dry Seasons in Northern Provinces of Iran with some Teleconnection Indices. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (3), 119-136. <http://doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.2>



© The Author(s)
DOI: <http://doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.2>

Publisher: Kharazmi University

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Teleconnection refers to periodic atmospheric fluctuations in the climate system. Any phenomenon that is more or less than its long-term average and periodically forms a cycle is an oscillation, of which the Southern Oscillation or El Niño is an example. The Southern Oscillation (ENSO), including El Niño and La Niña, is one of the most important examples of this phenomenon, which causes widespread atmospheric disturbances in the northern and southern hemispheres. Researchers have introduced indices such as SOI, MEI, and SST to define ENSO. This phenomenon can be exacerbated by increasing the intensity and frequency of drought in tropical regions through the precipitation control. Since Iran also suffers significant losses from wet and severe droughts due to precipitation fluctuations, it is necessary to investigate the impact of ENSO on these phenomena.

Methods

This study investigated the relationship between ENSO indices and wetness and drought in the northern regions of Iran (Guilan, Mazandaran, Golestan provinces) during 2013 to 2022. Drought indices including VCI, TCI, VHI and SPI were calculated using MODIS and Persian satellite data in the Google Earth Engine environment and related maps were drawn. Land Surface Temperature (LST) data and NDVI index were used to calculate the aforementioned indices. The NDVI index was extracted from the MOD09GA- 006-NDVI product of the MODIS satellite and used as the basis for calculating the VCI. Land Surface Temperature (LST) data from the MOD11A1 product were used to calculate the TCI and by combining these two indices, the VHI was calculated. The SPI index was also determined based on Persian satellite precipitation data. SOI, ENSO, MEI and NINO indices were extracted from the NOAA website and the temporal correlation and one-month lag between them and drought indices were analyzed. Finally, zonation maps of temperature, vegetation and drought changes in the northern provinces of Iran during El Niño and La Niña phases were drawn.

Results

The analyses showed that climate indices such as MEI and Niño indices (Niño1+2, Niño3, Niño3.4, and Niño4) have a positive and significant correlation with the Standardized Precipitation Index (SPI) in all three northern provinces of Iran. This relationship indicates that increasing the intensity of ENSO activities, especially during the El Niño phase, leads to increased precipitation and reduced drought probability. In contrast, the SOI index, which is associated with La Niña, has a negative and significant correlation with SPI, indicating an increased drought probability during this period. However, none of the climate indices studied showed a significant correlation with the indices related to temperature and vegetation (TCI, VCI, and VHI). During the El Niño period, vegetation and precipitation conditions were better and wetter areas were observed with higher plant health, but during the La Niña period, temperatures increased, the extent of dry areas increased, and plant health decreased. During the La Niña period, average temperatures increased and vegetation density decreased, and some areas experienced severe drought. The dry and wet patterns during the La Niña period were more erratic and affected by temperature and humidity changes. These changes have a direct impact on the agricultural and vegetation conditions in the northern regions of Iran.

Conclusion

The results showed that the MEI index had a positive and significant relationship with the SPI, which means a decrease in drought and an increase in precipitation, but it had a lesser effect on other drought indices. The SOI index had a negative relationship with SPI, indicating that the La Niña phase caused an increase in drought, especially in Golestan province. All the El Niño indices had a positive correlation with the SPI, and their role in reducing drought and increasing precipitation was confirmed. In the El Niño phase, the temperature increased in the north of Mazandaran province and reached below zero in the south, while in the La Niña phase, the temperature increased in the entire study area. Vegetation cover was higher in the south of Golestan province and east of Mazandaran province during the El Niño phase, but it decreased during the La Niña phase. The VHI index showed that the health of vegetation cover was better during the El Niño phase and weaker during the La Niña phase. The study of land surface temperature in different phases showed that El Niño caused a decrease in temperature in the southern highlands of Mazandaran province and an increase in the north of Golestan province. The SPI index in El Niño highlighted drought in the west of the study area and in La Niña highlighted the severity of drought in Golestan and Mazandaran provinces. The TCI and VHI indices also confirmed the unfavorable vegetation conditions in La Niña.

Keywords: NDVI, ENSO, Northern provinces of Iran, Wet and dry seasons, Remote sensing patterns.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

The data of this study is available upon request from the authors.

Acknowledgements

The esteemed reviewers are thanked for their structural and scientific comments.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by them.

Funding

This article was extracted from a research project with the research support of the University of Mohaghegh Ardabili under contract number 18096/9/D1403..

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تجزیه و تحلیل ارتباط بین ترسالی ها و خشک سالی های استان های شمالی ایران با برخی از شاخص های پیوند از دور

برومند صلاحی^۱ | مهدی فروتن^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه آموزشی جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: salahi@uma.ac.ir

۲. گروه آموزشی جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: Mahdi.frota23@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:	مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت:	۱۴۰۳/۰۸/۳۰
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۴/۱۰/۱۴
تاریخ انتشار:	۱۴۰۴/۱۰/۱۷
کلیدواژه ها:	NDVI ENSO استان های شمالی ایران، ترسالی و خشک سالی، الگوهای پیوند از دور.
هدف:	پدیده جوی ENSO، تأثیرات قابل توجهی بر الگوهای بارش، دما و خشک سالی در مناطق مختلف جهان دارند. این پژوهش با هدف بررسی ارتباط شاخص های ENSO مانند MEI، SOI و نوسانات NINO با شاخص های خشک سالی (VCI، TCI، SPI) در استان های گیلان، گلستان و مازندران طی سال های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ انجام یافته است.
روش پژوهش:	برای این کار داده های ماهواره ای NDVI، LST و بارش از پلتفرم گوگل ارث انجین برای محاسبه شاخص های خشک سالی استخراج و داده های ENSO از سایت NOAA جهت تحلیل همبستگی دریافت شدند.
یافته ها:	نتایج نشان داد شاخص های MEI و NINO همبستگی مثبت و معناداری با SPI دارند که بیانگر افزایش بارش و کاهش شدت خشک سالی در دوره های مرتبط با این شاخص ها است، در حالی که ارتباط آن ها با سایر شاخص های خشک سالی ضعیف و غیرمعنادار بود. شاخص SOI رابطه معکوس معناداری با SPI نشان داد که اثر لاتینا در افزایش خشکی را تأیید می کند.
نتیجه گیری:	در فاز لاتینو، دما در شمال استان های مورد مطالعه افزایش یافت، اما ارتفاعات جنوب مازندران دمای زیر صفر را تجربه کردند. پوشش گیاهی در این دوره در جنوب گلستان و شرق مازندران متراکم تر بود، در حالی که شمال گلستان و جنوب مازندران با کاهش پوشش مواجه شدند. شاخص های خشک سالی نیز این ناهمگنی را تأیید کردند؛ به طوری که SPI خشکی نسبی نیمه غربی منطقه، TCI تنش گرمایی در شمال گیلان و مرکز مازندران و VCI افت سلامت پوشش گیاهی در غرب گیلان و نیمه غربی مازندران تا شمال شرق گلستان را نشان داد. در فاز لاتینا، دما به طور کلی افزایش یافت و مناطق شمالی گرم تر شدند، در حالی که وسعت پوشش گیاهی کاهش یافته و مناطق خشک، به ویژه در شمال گلستان و جنوب مازندران، گسترش یافت. شاخص های SPI و VHI نشان دادند که شدت خشک سالی و افت سلامت پوشش گیاهی در این دوره افزایش یافته و تمرکز اراضی خشک در مازندران و بخش میانی گلستان مشهود بود.

استناد: صلاحی، برومند؛ و فروتن، مهدی (۱۴۰۴). تجزیه و تحلیل ارتباط بین ترسالی ها و خشک سالی های استان های شمالی ایران با برخی از شاخص های پیوند از دور. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۳)، ۱۱۹-۱۳۶. <http://doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.2>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه خوارزمی

مقدمه

واژه پیوند از دور را اولین بار آنگستروم در سال ۱۹۳۵ میلادی به کار برد. این پدیده با نوسان در جو همراه است. هر پدیده‌ای که بیش‌تر یا کم‌تر از میانگین بلندمدت خود و به‌صورت دوره‌ای باشد و یک چرخه یا سیکل را تشکیل دهد یک نوسان است و مثالی از آن نوسان جنوبی یا النینو است (امیدوار، ۱۳۹۹). این پدیده از شناخته‌شده‌ترین پیوند از دور در سامانه اقلیم است که آشفتگی‌های جوی در نیم‌کره جنوبی و شمالی را در پی دارد (امیدوار، ۱۳۹۹). دانشمندان مختلف برای تعریف رویدادهای ENSO از شاخص‌ها و معیارهای گوناگونی استفاده کرده‌اند. رایت و همکاران (۱۹۸۹) تنها فشار سطح دریا در داروین را به‌کار برده‌اند. ون‌لون و مادن (۱۹۸۱) فشار سطح دریا از داروین تا جزیره کوکوس و همچنین بارش در ناحیه آرام جنوبی استوایی را ملاک قرار داده‌اند. راسموسن و کارپنتر (۱۹۸۲) رویدادهای ENSO را بر اساس دمای سطح دریا در سواحل دور از پرو تعریف کرده‌اند. کلاریس و ون‌لون (۱۹۸۸) شاخص نوسان جنوبی (SOI^1) را همراه با ناهنجاری دمای سطح دریا (SST^2) در شرق اقیانوس آرام استوایی در نظر گرفته‌اند. ولتر (۱۹۸۷) نیز با ترکیب فشار سطح دریا، دمای هوا، ارتفاع سطح دریا، ابرناکی و مؤلفه‌های نصف‌النهار و منطقه‌ای باد سطحی، شاخصی به نام MEI^3 را برای تعریف این رویداد ارائه کرده است (امیدوار، ۱۳۹۱). با قوی‌تر شدن نوسانات جنوبی ($ENSO^4$)، ممکن است فراوانی و شدت خشک‌سالی در مناطق استوایی از طریق گرم شدن کره زمین و مهار بارندگی افزایش یابد (نپستاد^۵ و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به این که ایران کشوری است هر ساله از نوسانات بارش خسارات زیادی را متحمل می‌شود و از ترسالی‌ها و خشک‌سالی‌های مفرط رنج می‌برد لذا مطالعه تأثیر ENSO بر این پدیده امری ضروری به حساب می‌آید (ثمالی و همکاران، ۱۳۹۷). بررسی تأثیر شاخص‌های اقلیمی ENSO بر رخدادهای خشک‌سالی و ترسالی در نواحی شمالی ایران طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ به‌عنوان هدف پژوهش حاضر بوده است. همچنین این پژوهش با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی که از داده‌های ماهواره‌ای به دست آمده‌اند، مانند VCI^6 ، TCI^7 ، VHI^8 و SPI^9 و بررسی همبستگی بین این شاخص‌ها و شاخص‌های ENSO، سعی دارد الگوهای پیچیده اقلیمی مرتبط با خشک‌سالی و ترسالی را روشن کند. نوآوری اصلی تحقیق در استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل داده‌های ماهواره‌ای در محیط Google Earth Engine و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی در دوره‌های النینو و لانینا برای بررسی تغییرات دما، پوشش گیاهی و خشک‌سالی است. این رویکرد می‌تواند در ایجاد راهکارهای مدیریتی برای مقابله با این پدیده‌ها در نواحی حساس شمال ایران مؤثر باشد.

پیشینه پژوهش

۱. پیشینه تجربی

مطالعات فراوانی در مورد ارتباط شاخص‌های ENSO با شاخص‌های خشک‌سالی در دنیا انجام گرفته است. ندهدهه^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی روابط بین شاخص بارش استاندارد (SPI) حوضه کنگو و دمای سطح جهانی دریا پرداختند. آن‌ها از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و مدل شبکه عصبی اتورگرسیون غیرخطی استفاده کردند تا ارتباط بین الگوهای SPI و پدیده‌های جوی اقیانوسی جهانی را در قالب یک طرح پیش‌بینی ارزیابی کنند. نتایج نشان داد که حوضه کنگو در دو دوره (۱۹۰۱-۱۹۳۰ و ۱۹۹۱-۲۰۱۴) دچار خشک‌سالی‌های مداوم و شدید شده است. همچنین، شاخص ENSO با ضریب همبستگی ۰/۸۹ و شاخص‌های QBO^1 .

¹ - Southern Oscillation Index

² - Sea Surface Temperature

³ - Multivariate ENSO Index

⁴ - El Niño-Southern Oscillation

⁵ - Nepstad

⁶ - Vegetation Condition Index

⁷ - Temperature Condition Index

⁸ - Vegetation Health Index

⁹ - Standardized Precipitation Index

¹⁰ - Ndehedehe

شاخص‌های QBO^۱، AMO^۲ و ENSO به ترتیب با ۷۸، ۷۷ و ۷۷ درصد تأثیر قابل توجهی بر رویدادهای شدید آبی اقلیمی داشته‌اند. آبی^۳ و همکاران (۲۰۱۹)، ارتباط خشک‌سالی‌های فلوریدای جنوبی و اورگلیز را با شاخص‌های ENSO، PDO^۴ و AMO مورد بررسی قرار دادند آن‌ها شاخص SPI را برای دوره‌های ۳، ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ۶۰ ماهه ارزیابی نمودند نتایج نشان داد که تأثیر ENSO به نوسانات بارندگی در دوره‌های کوتاه‌مدت محدود است، درحالی‌که AMO و PDO بر تغییرپذیری بارندگی در دوره‌های بلندمدت تأثیر دارند. اسپینوسا^۵ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشک‌سالی طی ۸۰ سال گذشته در جزیره مادیرا پرداختند. آن‌ها از شاخص SPI برای ارزیابی شرایط خشک‌سالی استفاده کرده و ارتباط بین نوسان ال نینو-جنوبی (ENSO) و نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO^۶) را با تنوع خشک‌سالی بررسی کردند. نتایج نشان داد که رابطه‌ای واضح بین ENSO/NAO و وقوع خشک‌سالی برقرار نیست. لیو^۷ و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات مکانی و زمانی خشک‌سالی و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های آب و هوایی بزرگ‌مقیاس در حوضه دریاچه پویانگ، چین را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از شاخص SPEI^۸ خشک‌سالی منطقه را ارزیابی کرده و با روش تبدیل موجک متقاطع ارتباط آن را با الگوهای پیوند از دور سنجیدند. نتایج نشان داد که خشک‌سالی با شاخص‌های اقلیمی (PDO، AO^۹، ENSO، NAO) همبستگی زمانی معنی‌داری در فواصل محدود دارد، به‌جز شاخص IOD^{۱۰} که همبستگی معناداری مشاهده نشد. جیانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از شاخص‌های سلامت پوشش گیاهی مبتنی بر ماهواره، شرایط خشک‌سالی و رشد پوشش گیاهی را در منطقه جینگ جین-جی چین ارزیابی کردند. آن‌ها با استفاده از شاخص‌های SMN، SMT، VCI و TCI تغییرات مکانی و زمانی رشد پوشش گیاهی را بررسی کرده و حساسیت آن را نسبت به شاخص ENSO (Niño 3.4) تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که ناهنجاری‌های آب و هوایی جهانی مانند Niño 3.4 تأثیرات قابل توجهی بر شاخص‌های VHI دارند، به‌طوری‌که Niño 3.4 با VCI همبستگی منفی و با TCI همبستگی مثبت نشان داد. الله^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۲) تغییرات خشک‌سالی در جنوب آسیا و ارتباط احتمالی آن با عوامل اقلیمی و دینامیکی را بررسی کردند. آن‌ها از شاخص PDSI^{۱۳} برای ارزیابی خشک‌سالی استفاده کردند و دریافتند که افزایش بارش و کاهش کسری فشار بخار باعث افزایش NDVI^{۱۴} و کاهش خشکی شده است. همچنین، رابطه مثبت قوی بین خشک‌سالی و بارش و NDVI در مناطق مورد مطالعه مشاهده شد، درحالی‌که دما و کسری فشار بخار همبستگی منفی نشان دادند. همچنین بیان داشتند که رویدادهای ENSO و IOD ارتباطی با روند خشک‌سالی نداشتند. دونگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۳) الگوهای مکانی و زمانی و تأثیر ارتباط بین خشک‌سالی هواشناسی و دینامیک پوشش گیاهی را در حوضه رودخانه یانگ تسه با استفاده از داده‌های سنجش از دور بررسی کردند. آن‌ها داده‌های بلندمدت (۲۰۰۱-۲۰۲۰) از فلورسانس کلروفیل ناشی از خورشید (SIF^{۱۶}) و شاخص NDVI را برای ارزیابی پویایی پوشش گیاهی و رابطه آن با خشک‌سالی (SPEI) در انواع مختلف پوشش گیاهی در این منطقه به کار بردند. نتایج نشان داد که SPEI ارتباط معنی‌داری با SIF در مقایسه با NDVI دارد و الگوهای پیوند از دور مانند PDO، ENSO و لکه‌های خورشیدی به‌عنوان

¹ - Quasi-Biennial Oscillation

² - Atlantic Multidecadal Oscillation

³ - Abiy

⁴ - Pacific Decadal Oscillation

⁵ - Espinosa

⁶ - North Atlantic Oscillation

⁷ - Liu

⁸ - Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

⁹ - Arctic Oscillation

¹⁰ - Indian Ocean Dipole

¹¹ - Jiang

¹² - Ullah

¹³ - Palmer Drought Severity Index

¹⁴ - Normalized Difference Vegetation Index

¹⁵ - Dong

¹⁶ - Solar-Induced Fluorescence

محرک‌های اصلی بر تعامل بین خشک‌سالی هواشناسی و پوشش گیاهی تأثیرگذار هستند. آنگولو^۱ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی خشک‌سالی‌های شدید و ارتباط آن‌ها با نوسانات بین دهه‌ای اقیانوس آرام (IPO^۲) در منطقه آلتیپلانو پرو طی ۱۰۰ سال گذشته پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های سطح آب دریاچه Titicaca و شاخص IPO از سال ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵ و با بهره‌گیری از تکنیک‌های تبدیل موجک و تابع متعامد تجربی (EOF^۳) ارتباط این عوامل را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که تغییرات چند دهه‌ای در سطح آب با رویدادهای ال نینو/لانینا و IPO همبسته است و فاز منفی IPO با دوره‌های خشک‌سالی شدید هم‌زمان بوده است. در کشور ایران نیز به بررسی ارتباط شاخص ENSO با خشک‌سالی پرداخته شده است از جمله خداحلی و همکاران (۱۳۹۲) ارتباط الگوهای پیوند از دور SOI و NAO با خشک‌سالی در حوضه آبخیز زاینده‌رود را بررسی کردند. آن‌ها همبستگی شاخص SPI را در دوره‌های ۳، ۵ و ۸ ماهه با شاخص‌های NAO و SOI تحلیل کردند. نتایج نشان داد که بارندگی در ایستگاه‌های میمه، فریدن، فریدون‌شهر، کوهرنگ، چادگان و داران با شاخص SOI همبستگی منفی معنی‌داری دارد، درحالی‌که شاخص NAO با ایستگاه‌های شهرضا و فریدون‌شهر نیز همبستگی منفی مشابهی نشان می‌دهد. فلاح و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی همبستگی بین متغیرهای اقلیمی پیوند از دور و شاخص خشک‌سالی SPI با استفاده از روش رگرسیون درختی (M5) در استان گلستان پرداختند. آن‌ها شاخص SPI را در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۱ ماهه بررسی کردند و ارتباط آن را با نوسان‌های SOI، تعداد لکه‌های خورشیدی (SUNSPOT)، NINO، MEI و NAO تحلیل کردند. نتایج نشان داد که بین متغیرهای اقلیمی پیوند از دور و شاخص خشک‌سالی SPI در بازه ۳ ماهه همبستگی ۶۹ درصد و در بازه ۱۲ ماهه همبستگی ۶۸ درصد وجود دارد. چوبین و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از روش‌های آماری و سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس جوی به پیش‌بینی خشک‌سالی در حوضه آبخیز مهارلو بختگان پرداختند. آن‌ها با تحلیل مؤلفه اصلی (PCA^۴) از میان ۴۵ شاخص، ۸ شاخص را به‌عنوان مؤثرترین انتخاب کردند و تأثیر این شاخص‌ها را بر شاخص SPI بررسی کردند. در نهایت، برای پیش‌بینی از رگرسیون چندمتغیره استفاده کردند. نتایج نشان داد که شاخص‌های انتخابی همبستگی معنی‌داری با SPI داشته و عملکرد مدل‌های رگرسیون در مقیاس یک‌ماهه بهتر از سایر مقیاس‌های زمانی بوده است. بیات ورکشی و همکاران (۱۳۹۶) ارتباط بین پدیده انسو و وقوع خشک‌سالی در ایران را برای ۳۰ ایستگاه همدیدی بررسی کردند. آن‌ها شاخص‌های SOI، MEI، Nino 1+2، Nino 3.4، Nino 4، NOI، TNi و PNA را به‌عنوان متغیرهای مستقل و شاخص SPI را به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفتند و با استفاده از روش همبستگی پیرسون ارتباط این مؤلفه‌ها را سنجیدند. نتایج نشان داد که شاخص SOI با ۳۳/۴۳ درصد بیشترین همبستگی را با خشک‌سالی دارد و شاخص‌های MEI، Nino 3.4، Nino 4، NOI، Nino 1+2، TNi^۵ و PNA به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، آن‌ها بیان کردند که تعداد وقوع خشک‌سالی در فاز لانینا بیشتر از فاز النینو بوده است. ثمالی و همکاران (۱۳۹۸)، به بررسی ارتباط بین پدیده انسو بر خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها در استان‌های ساحلی جنوبی ایران پرداختند آن‌ها برای بررسی فازهای سرد و گرم انسو از شاخص SOI بهره بردند و دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی را نیز مشخص نمودند. نتایج نشان داد با وقوع فاز گرم ترسالی رخ داده و بارش بیش‌تر از نرمال بوده و با رخداد فاز سرد خشک‌سالی و بارش کم‌تر از نرمال بوده است. عسگری دستنائی و همکاران (۱۴۰۰)، تأثیر تعدادی از الگوهای دورپیوندی با میانگین درجه حرارت و ارتباط آن با خشک‌سالی در برخی از ایستگاه‌های سینوپتیک استان چهارمحال و بختیاری را بررسی نمودند. محمدرضایی و همکاران (۱۴۰۱)، به بررسی تأثیر شاخص‌های دمایی انسو بر خشک‌سالی هواشناسی نیمه غربی ایران پرداختند و برای انجام این کار ابتدا شاخص SPI را در مقیاس‌های زمانی مختلف برای ایستگاه‌های مورد مطالعه بررسی نمودند و ارتباط هم‌زمان و غیر هم‌زمان آن را با شاخص‌های دمایی انسو واکاوی نمودند نتایج نشان داد در فصول پاییز و بهار رابطه معناداری در شاخص‌های Nino 3.4، Nino 3، Nino 1+2 و Nino 4 مشاهده شد و این همبستگی در حالت غیر هم‌زمان بهتر از حالت هم‌زمان بود. اکبری ازیرانی (۱۴۰۱)، به آشکارسازی و تحلیل روند خشک‌سالی حوضه آبخیز جازموریان در ارتباط با

^۱ - Angulo

^۲ - Interdecadal Pacific Oscillation

^۳ - Empirical Orthogonal Function

^۴ - Principal Component Analysis

^۵ - Tropical Niña Index

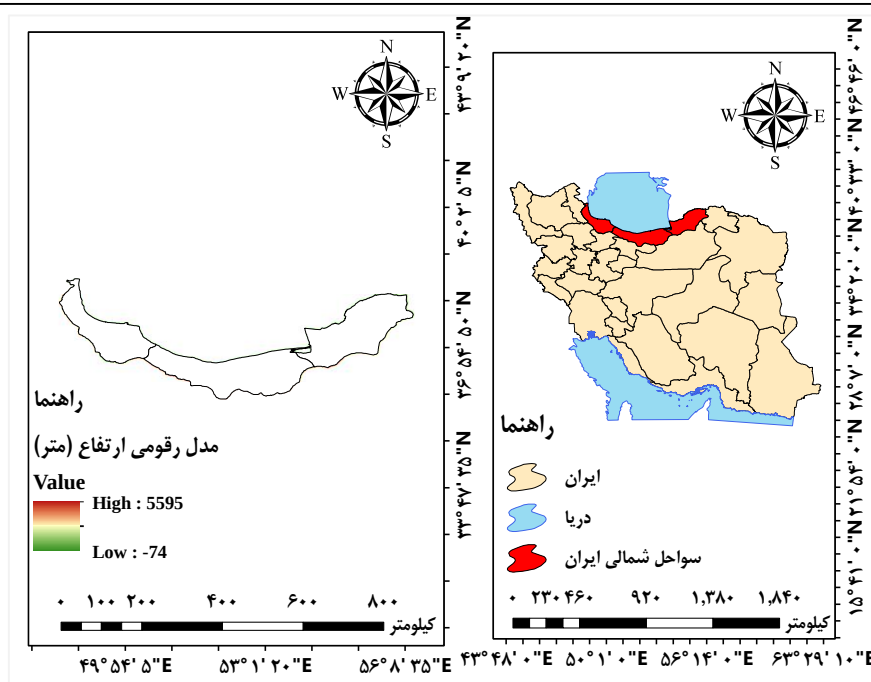
شاخص‌های جوی- اقیانوسی پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه ارتباط بین شاخص شدت خشک‌سالی SPEI ۱۲ ماهه را با نوسانات جوی و اقیانوسی بررسی نمودند و نتایج نشان داد شاخص AMO و SOI رابطه معنادار قوی در سطح ۵ درصد با خشک‌سالی حوضه مذکور داشته و شاخص AMO به تنهایی بیش از ۷۰ درصد خشک‌سالی حوضه را تبیین نموده است. محمدرضایی و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر شاخص‌های NAO و NINO4 بر خشک‌سالی هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک نواحی شمالی ایران پرداختند. آن‌ها ابتدا شاخص SPI را محاسبه کردند و سپس با استفاده از آزمون همبستگی اسپیرمن و تابع همبستگی عرضی، رابطه هم‌زمان و غیرهم‌زمان بین این شاخص‌ها و خشک‌سالی را تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که شاخص NINO4 بیشترین و شاخص NAO کمترین همبستگی را با خشک‌سالی در مناطق مورد مطالعه داشتند و بهترین مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی خشک‌سالی در ایستگاه گرگان به دست آمد. رفیعی‌طالقانی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی، ارتباط الگوهای دورپیوند اقلیمی با خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی (آب زیرزمینی) در دشت‌های فردنبه و سفیددشت استان چهارمحال و بختیاری را بررسی کردند. برای خشک‌سالی هواشناسی از شاخص SPI و برای خشک‌سالی هیدرولوژیکی از شاخص GRI استفاده شد و داده‌های بارش ماهانه و تراز آب ۱۹ حلقه چاه مشاهداتی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد شاخص‌های NAO و IOD بیشترین همبستگی معنی‌دار با خشک‌سالی هواشناسی و بارش را دارند، در حالی که IOD و ENSO با خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی همبستگی منفی دارند و تفاوت زمان پاسخ خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی تأثیر مستقیم این ارتباطات را نشان می‌دهد. میرزائی و همکاران (۱۴۰۴) در مطالعه‌ای، اثر سازوکارهای همدیدی گردش جو و شاخص دورپیوندی NAO را بر بی‌هنجاری‌های رطوبت ویژه و خشک‌سالی‌های پاییزه شمال غرب ایران بررسی کردند. با استفاده از شاخص SPI و داده‌های بازسازی‌شده NCAR/CEP در دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۶، نقشه‌های بی‌هنجاری فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و رطوبت ویژه تراز ۷۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال تهیه شد. نتایج نشان داد که حاکمیت شرایط پرفشار و پرارتفاع مانع انتقال رطوبت به منطقه شده و فاز منفی شاخص NAO بیشترین همبستگی را با خشک‌سالی پاییزه ایستگاه‌های شمال غرب ایران دارد.

با توجه به پیشینه پژوهش، بررسی ارتباط بین شاخص‌های اقلیمی ENSO و رخداد‌های خشک‌سالی و ترسالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نوسانات ENSO از مهم‌ترین پیوندهای دور در سیستم اقلیمی جهان به شمار می‌رود که به واسطه تغییرات فشار سطح دریا و دمای سطحی اقیانوس، تغییرات آب‌وهوایی مهمی را در نقاط مختلف جهان، از جمله ایران، به همراه دارد. نواحی شمالی ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و تأثیر پذیرفتن از نوسانات ENSO، مستعد تجربه خشک‌سالی و ترسالی هستند که می‌تواند به کاهش بارندگی، تغییر پوشش گیاهی و در نهایت بروز مشکلاتی در مدیریت منابع آب و کشاورزی منجر شود. از این رو، مطالعه دقیق این ارتباط می‌تواند به شناسایی و پیش‌بینی الگوهای خشک‌سالی و ترسالی کمک کند و از طریق تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثر، زمینه بهبود پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی را در این نواحی فراهم آورد.

روش‌شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

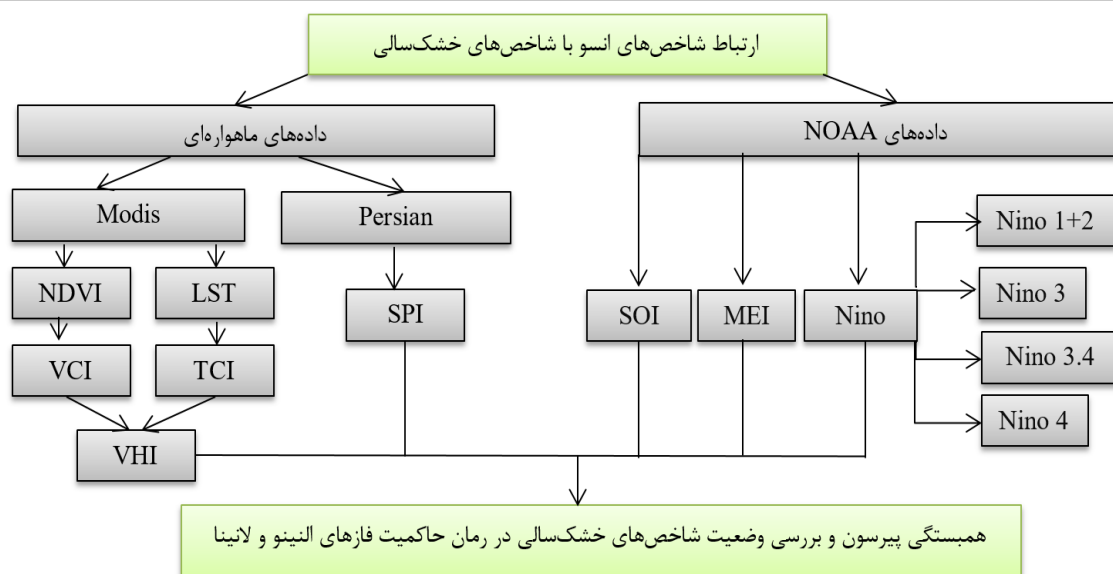
استان‌های گلستان، مازندران و گیلان به صورت هلالی شکل در جنوب دریای خزر از آستارا تا غرب کوه‌های کپه‌داغ امتداد یافته است. مساحت این منطقه در حدود ۵۸۲۵۱ کیلومتر مربع بوده و از این آمار ۲۰۳۶۷ کیلومتر مربع برای استان گلستان و برای گیلان و مازندران به ترتیب ۱۴۰۴۲ و ۲۳۸۴۲ کیلومتر مربع سهم هر کدام می‌باشد. این منطقه از لحاظ طبیعی شامل جلگه‌های مازندران، گرگان و گیلان در قسمت‌های پایکوهی و دامنه‌های شمالی کوه‌های البرز می‌باشد (تبریزی و نقوی، ۱۳۹۴). شکل ۱، موقعیت جغرافیایی استان‌های شمالی ایران را در کشور نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان‌های شمالی ایران در سطح کشور

۲. داده‌ها و روش کار

در این پژوهش، نواحی شمالی ایران شامل استان‌های گلستان، مازندران و گیلان به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد؛ این پهنه با برخورداری از تنوع اقلیمی و حساسیت اکوسیستمی، یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کشور برای تحلیل نوسانات ترسالی و خشک‌سالی است. برای انجام پایش زمانی و مکانی خشک‌سالی، مجموعه‌ای از داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های جوی به کار گرفته شد. در بخش داده‌ها، شاخص NDVI از محصول MOD09GA و داده‌های دمای سطح زمین (LST) از محصول MOD11A1 ماهواره MODIS استخراج شد. بر اساس این داده‌ها، شاخص‌های VCI و TCI مطابق تعریف استاندارد از طریق محاسبه حداقل و حداکثر سری زمانی NDVI و LST تولید شد و سپس با ترکیب آن‌ها شاخص VHI تشکیل گردید. علاوه بر این، برای پایش بارش و محاسبه شاخص SPI، داده‌های بارش ماهواره PERSIANN فراخوانی و با استفاده از میانگین و انحراف معیار سری زمانی، شاخص SPI به صورت نرمال‌سازی آماری تولید شد. در بخش داده‌های دورپیوندی نیز شاخص‌های SOI، MEI، Nino1+2، Nino3، Nino3.4 و Nino4 از پایگاه NOAA جمع‌آوری گردید. در مرحله روش کار، ابتدا تمامی داده‌ها در محیط Google Earth Engine فراخوانی، فیلتر زمانی-مکانی شده و به صورت ماهانه تجمیع شدند. شاخص‌های VCI، TCI، VHI و SPI بر اساس توابع توسعه یافته در کدنویسی محاسبه و به صورت نقشه‌های میانگین، سری زمانی و پهنه‌بندی خروجی گرفته شد. سپس با استفاده از سری زمانی شاخص‌های ENSO، همبستگی زمانی و تأخیری یک‌ماهه میان شاخص‌های دورپیوند و شاخص‌های خشک‌سالی محاسبه شد. در گام نهایی، به منظور تحلیل اثر فازهای النینو و لانینا، نقشه‌های مکانی تغییرات پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و شاخص‌های خشک‌سالی در فازهای مثبت و منفی ترسیم و با یکدیگر مقایسه شدند.



شکل ۲. نمودار جریان روش تحقیق

۳. دمای سطح زمین LST

برای محاسبه دمای سطح زمین (LST)، از داده های ماهواره MODIS استفاده شد که بر اساس الگوریتم پنجره مجزا داده های LST را به صورت خام از محصول MOD11A1 می گیرد و به مقیاس دمای کلون تبدیل می کند، این محصول شامل داده های روزانه LST است و دمای سطح زمین را با تصحیح اثرات جوی محاسبه می کند. الگوریتم پنجره مجزا یکی از روش های محاسبه دمای سطح زمین بر اساس تصاویر ماهواره ای است و بر این اصل استوار است که گازهای موجود در جو در طول موج های مختلفی عکس العمل های گوناگونی دارد در این الگوریتم ها از تفاوت تابش سنجیده شده در دو ناحیه طیفی مادون قرمز که در کنار هم قرار می گیرند برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده می شود که ناشی از تأثیرات جذب توسط گازهای اتمسفری است (سبزی پرور و همکاران، ۱۳۹۵). یک روش محاسبه الگوریتم مجزا به صورت رابطه ۱، محاسبه می شود.

$$T_s = [T_{31} + A(T_{31} + T_{32})] \left(\frac{B - \varepsilon_{31}}{C} \right) + DT_{32}(\varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}) \quad (1)$$

در رابطه فوق، T_s دمای سطح، T_{31} و T_{32} دمای درختایی در باند ۳۱ و ۳۲، ε_{31} و ε_{32} دمای گسیلندگی در باند ۳۱ و ۳۲، A نیز ضریب ثابت می باشد.

۴. شاخص پوشش گیاهی NDVI

برای تشخیص تفاوت نوع پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه از شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) استفاده می شود این شاخص بین محدوده +۱ و -۱ قرار می گیرد و بر اساس تفاوت نرمال شده میان باند قرمز و مادون قرمز نزدیک به دست می آید (فیض اله پور، ۱۴۰۲). شاخص مذکور طبق رابطه ۲، محاسبه می شود.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

۵. شاخص VCI، TCI، VHI

شاخص VCI وابسته به شاخص NDVI می باشد و مواقعی که NDVI در حداقل خود باشد شاخص VCI برابر با صفر و زمانی که NDVI در حداکثر خود باشد شاخص VCI برابر با یک می باشد و شرایط ایده آل پوشش گیاهی را نشان می دهد؛ اما شاخص TCI وابسته به دما بوده و بالاترین مقدار آن که برابر با یک می باشد در حداقل دما رخ می دهد و پایین ترین مقدار آن که برابر با صفر است در بالاترین دما رخ می دهد. شاخص VHI سلامت پوشش گیاهی را در پایش خشک سالی محاسبه می کند و مقادیر

بالای آن بیانگر وضعیت مناسب پوشش گیاهی و شدت پایین خشک‌سالی است درحالی‌که مقادیر پایین‌تر از ۰/۱ وضعیت بسیار شدید، مقادیر بین ۰/۱ تا ۰/۲ خشک‌سالی شدید، بین ۰/۲ تا ۰/۳ وضعیت متوسط و بالاتر از ۰/۴ وضعیت ترسالی را نشان می‌دهد (داودآبادی فراهانی و همکاران، ۱۴۰۰). فرمول سه شاخص مذکور به ترتیب در روابط ۳ تا ۵ تعریف می‌شود.

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} + NDVI_{\min}} \quad (3)$$

$$TCI = \frac{LST_{\max} - Lst}{LST_{\max} + LST_{\min}} \quad (4)$$

$$VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha) * TCI \quad (5)$$

در روابط فوق، $NDVI_{\max}$ و $NDVI_{\min}$ به ترتیب حداکثر و حداقل شاخص NDVI و $LST_{\max}$ و $LST_{\min}$ نیز به ترتیب حداکثر و حداقل دمای مطلق چندساله را نشان می‌دهد اما α تعیین وزنی برای اندازه‌گیری سهم VCI و TCI می‌باشد و از آنجایی‌که تشخیص آن سخت بوده مقدار ۰/۵ را جایگزین آن می‌کنند.

۶. شاخص SPI

یکی از شاخص‌های مهم در بررسی خشک‌سالی و ترسالی شاخص SPI است که با استفاده از میانگین و انحراف معیار طولانی‌مدت بارندگی در دوره مورد مطالعه به دست می‌آید. این شاخص بدون بعد بوده و خشک‌سالی و ترسالی را برای هر گام زمانی دلخواه مشخص می‌کند. همچنین برای محاسبه آن از توزیع گاما برای برازش داده‌های بارندگی بهره برده می‌شود و پس از محاسبه محاسبه‌های لازم و تعیین پارامترهای مربوط به محاسبه شاخص SPI می‌پردازد (آرخی و همکاران، ۱۴۰۱). فرمول این شاخص طبق رابطه ۶، به دست می‌آید.

$$SPI = \frac{(P_i - \bar{P})}{S} \quad (6)$$

در رابطه فوق، P_i میزان بارش در دوره مورد مطالعه، $\bar{P}$ میانگین طولانی‌مدت بارش در دوره مورد مطالعه، S انحراف معیار مقدار بارش می‌باشد. در جدول ۱، طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی بر مبنای شاخص SPI آورده شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی بر پایه شاخص SPI

SPI	شدت خشک‌سالی
< -2	خشک‌سالی حاد
-2 تا $-1/5$	خشک‌سالی شدید
$-1/5$ تا -1	خشک‌سالی متوسط
-1 تا 1	نرمال
1 تا $1/5$	ترسالی متوسط
$1/5$ تا 2	ترسالی شدید
> 2	ترسالی حاد

۲. داده‌ها و روش کار

در این پژوهش، از داده‌های روزانه بارش ۱۸ ایستگاه هواشناسی در محدوده حوضه کابل طی دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. داده‌ها از اداره هواشناسی وزارت انرژی و آب افغانستان اخذ گردید و پس از کنترل کیفی اولیه، مقادیر گم‌شده یا غیرمنطقی حذف شد تا دقت تحلیل افزایش یابد. معیار انتخاب داده‌ها، دسترسی به آمار بلندمدت و نسبتاً پیوسته در ایستگاه‌های منتخب بود. برای تعریف بارش سنگین، آستانه ۲۰ میلی‌متر در یک روز به عنوان معیار در نظر گرفته شد. دلیل این انتخاب، ماهیت کوهستانی حوضه کابل است؛ چراکه بارش‌های بیش از ۲۰ میلی‌متر در این منطقه به‌طور معمول منجر به رواناب‌های شدید و

سیلاب های خسارت زا می شود. بر همین اساس، پایگاه داده ای از روزهای بارشی بالای ۲۰ میلی متر تهیه و در قالب ماتریس (سطرها = روزهای بارشی، ستون ها = ایستگاه ها) سازمان دهی شد.

در مرحله بعد، برای شناسایی الگوهای بارش، از تحلیل خوشه ای سلسله مراتبی با روش ادغام وارد استفاده گردید. انتخاب این روش به دلیل توانایی آن در دسته بندی رخداد های پیچیده و شناسایی شباهت های ساختاری بین بارش های ایستگاه های مختلف بود. روش Moran اگرچه در تحلیل همبستگی مکانی داده ها کارآمد است، اما به دلیل تمرکز این پژوهش بر طبقه بندی الگوهای بارش های سنگین و سیلابی، روش وارد کارایی بیشتری داشت. این رویکرد امکان بررسی بارش های متنوع، از جمله رخداد های چندروزه و ناهمگن در سطح ایستگاه ها را نیز فراهم ساخت.

در کنار داده های زمینی، داده های جوی شامل جریان های جوی، ترازهای فشار و داده های سطحی نیز مورد استفاده قرار گرفت. این داده ها از پایگاه بازتحلیل NCEP/NCAR وابسته به سازمان ملی جو و اقیانوس شناسی ایالات متحده (NOAA) استخراج شدند (www.cdc.noaa.gov).

داده های روزانه در ترازهای مختلف از سطح دریا تا ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال بررسی شدند. ترسیم نقشه های جو بالا با نرم افزار GrADS انجام گرفت. رویکرد محیطی-گردشی انتخاب شد زیرا تمرکز بر روزهای بارش سنگین خاص را ممکن ساخته و به شناسایی الگوهای همبندی مؤثر کمک می کند.

این روش شناسی دارای محدودیت هایی نیز هست؛ از جمله وابستگی به کیفیت داده های ایستگاهی و بازتحلیل، کمبود شبکه متراکم ایستگاه ها در افغانستان و احتمال خطا در برون یابی داده ها برای مناطق فاقد ایستگاه. با این حال، استفاده از داده های معتبر جهانی و روش های آماری استاندارد، قابلیت تکرارپذیری مطالعه برای سایر پژوهشگران را فراهم می آورد.

یافته های پژوهش

جدول ۲، نتایج همبستگی بین شاخص های مختلف اقلیمی از جمله SOI، MEI و چهار شاخص مرتبط با پدیده نینو Nino 1+2، Nino 3، Nino 3.4 و Nino 4 را با شاخص های خشک سالی SPI، VHI، VCI، TCI و در سه استان شمالی ایران شامل گیلان، گلستان و مازندران ارائه می دهد. بر اساس این جدول، شاخص MEI با شاخص های VCI، TCI و VHI در هر سه استان همبستگی ضعیف و غیرمعناداری نشان داده و تأثیر مستقیمی بر دما و پوشش گیاهی این مناطق داشته است. با این حال، همبستگی مثبت و معنادار MEI با SPI در سطح معناداری ۰/۰۱ در هر سه استان، نشان دهنده ارتباط آن با افزایش بارش و کاهش احتمال خشک سالی در این مناطق بوده است. شاخص SOI، نیز با شاخص های VCI، TCI و VHI همبستگی ضعیف و غیرمعناداری داشته است، به این معنا که تأثیر چندانی بر دما و پوشش گیاهی این استان ها نداشته است؛ اما همبستگی منفی و معنادار SOI با SPI نشان می دهد که افزایش SOI که معمولاً با پدیده لانینا همراه است، می تواند به کاهش بارش ها و افزایش احتمال خشک سالی منجر شود. این همبستگی منفی در هر سه استان مشاهده شده و در گلستان شدیدتر بوده است. شاخص های مختلف نینو الگوی مشابهی را با SPI نشان داده اند؛ به این ترتیب که هر چهار شاخص نینو با SPI در هر سه استان همبستگی مثبت و معناداری داشته اند به ویژه شاخص های Nino 3.4 و Nino 3 همبستگی بالایی با SPI نشان داده که بیانگر تأثیر چشمگیر فعالیت های این مناطق از نینو در افزایش بارش است؛ اما شاخص های نینو با شاخص های VCI، TCI و VHI همبستگی معناداری نشان نداده است.

جدول ۲. نتایج همبستگی همزمانی شاخص های پیوند از دور با شاخص های خشک سالی

Mazandaran				Golestan				Gilan				Correlations	
SPI	VHI	VCI	TCI	SPI	VHI	VCI	TCI	SPI	VHI	VCI	TCI		
۰/۲۸۹**	۰/۰۵۷	۰/۰۵۲	۰/۰۶۱	۰/۳۰۵**	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	۰/۲۹۱**	۰/۰۵۴	۰/۰۴۷	۰/۰۶۴	R	MEI
۰/۰۰۱	۰/۵۳۶	۰/۵۷	۰/۵۰۷	۰/۰۰۱	۰/۶۶۱	۰/۸۲۹	۰/۴۵۱	۰/۰۰۱	۰/۵۶	۰/۶۰۸	۰/۴۸۹	Sig.	
۰/۲۴۳**	۰/۰۰۸	۰/۰۱۴	۰/۰۰۸	۰/۲۷۲**	۰/۰۲۱	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰/۲۳۳*	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱۴	R	SOI
۰/۰۰۸	۰/۰۹۳	۰/۸۷۶	۰/۹۳	۰/۰۰۳	۰/۸۲۱	۰/۷۹۸	۰/۸۲۶	۰/۰۱۱	۰/۸۹۳	۰/۸۹۶	۰/۸۸۱	Sig.	

۰/۲۲۶*	-۰/۰۳۸	-۰/۰۲۲	۰/۰۳۴	۰/۲۲۶*	-۰/۰۲۲	۰/۰۳۲	۰/۰۳۶	۰/۲۲۱*	-۰/۰۴۴	-۰/۰۱۹	۰/۰۴۴	R	Nino 1+2
۰/۰۱۳	۰/۶۷۸	۰/۸۱۵	۰/۷۰۹	۰/۰۱۳	۰/۸۱۲	۰/۷۳۱	۰/۶۹۴	۰/۰۱۱	۰/۶۳۷	۰/۸۳۳	۰/۶۳۷	Sig.	
۰/۳۰۳**	-۰/۰۲۹	-۰/۰۳۴	۰/۰۳۳	۰/۳۲۰**	-۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۳۶	۰/۲۸۹**	-۰/۰۲۹	-۰/۰۰۲	۰/۰۴۱	R	Nino 3
۰/۰۰۱	۰/۷۵۷	۰/۷۱۶	۰/۷۱۸	۰	۰/۹۴۸	۰/۵۹	۰/۶۹۴	۰/۰۰۱	۰/۷۵۵	۰/۸۲۶	۰/۶۵۳	Sig.	
۰/۳۳۷**	-۰/۰۲۱	-۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۰/۳۵۲**	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۳۲	۰/۳۱۰**	-۰/۰۱۶	-۰/۰۱۲	۰/۰۳۲	R	Nino 3.4
۰	۰/۸۲۱	۰/۷۸	۰/۷۴۸	۰	۰/۹۶	۰/۵۱۷	۰/۷۳۸	۰/۰۰۱	۰/۸۶	۰/۸۹۹	۰/۷۲۶	Sig.	
۰/۳۷۸**	۰/۰۲۱	-۰/۰۲۹	۰/۰۳۱	۰/۲۸۷**	۰/۰۲۱	۰/۰۵۴	۰/۰۲۵	۰/۲۶۵**	-۰/۰۱۷	-۰/۰۱۳	۰/۰۳۳	R	Nino 4
۰/۰۰۲	۰/۸۱۹	۰/۷۵۱	۰/۷۳۵	۰/۰۰۱	۰/۸۲۲	۰/۵۶۲	۰/۷۸۸	۰/۰۰۳	۰/۸۵۷	۰/۸۸۵	۰/۷۲۴	Sig.	

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ درصد معنی داری

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ درصد معنی داری

جدول ۳، نتایج همبستگی شاخص‌های پیوند از دور با شاخص‌های خشک‌سالی را با تأخیر زمانی یک ماهه نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان دادند که شاخص MEI با شاخص‌های خشک‌سالی VCI، TCI و VHI در هر سه استان گیلان، گلستان و مازندران همبستگی معناداری نداشته و تأثیر مستقیمی بر دما و پوشش گیاهی این مناطق نداشته است اما با شاخص SPI در گیلان (۰/۳۲۴)، گلستان (۰/۳۴۰) و مازندران (۰/۳۲۱) همبستگی مثبت و معناداری داشته است و می‌توان گفت افزایش شدت فعالیت‌های انسو با افزایش بارش در این استان‌ها مرتبط بوده و موجب کاهش خشک‌سالی می‌شود. شاخص SOI نیز با شاخص SPI در گیلان ۰/۳۱۵-، در گلستان ۰/۳۲۱- و در مازندران ۰/۳۴۳- همبستگی معکوس و معناداری داشته است و نشان می‌دهد با افزایش SOI که با پدیده لانینا مرتبط است، احتمال وقوع خشک‌سالی در این مناطق افزایش می‌یابد. شاخص SOI با شاخص‌های VCI، TCI و VHI در هیچ‌یک از استان‌ها همبستگی معناداری نشان نداده و بیانگر عدم تأثیر مستقیم آن بر دما و پوشش گیاهی بوده است. علاوه بر این، شاخص‌های مختلف نوسانات نینو (Nino 1+2، Nino 3، Nino 3.4 و Nino 4) نیز با SPI همبستگی مثبت و معناداری در هر سه استان نشان داده‌اند و در افزایش بارش و کاهش خشک‌سالی مؤثر بوده‌اند اما با شاخص‌های VCI، TCI و VHI همبستگی معناداری نشان نداده است.

جدول ۳. نتایج همبستگی با تأخیر زمانی یک ماهه شاخص‌های پیوند از دور با شاخص‌های خشک‌سالی

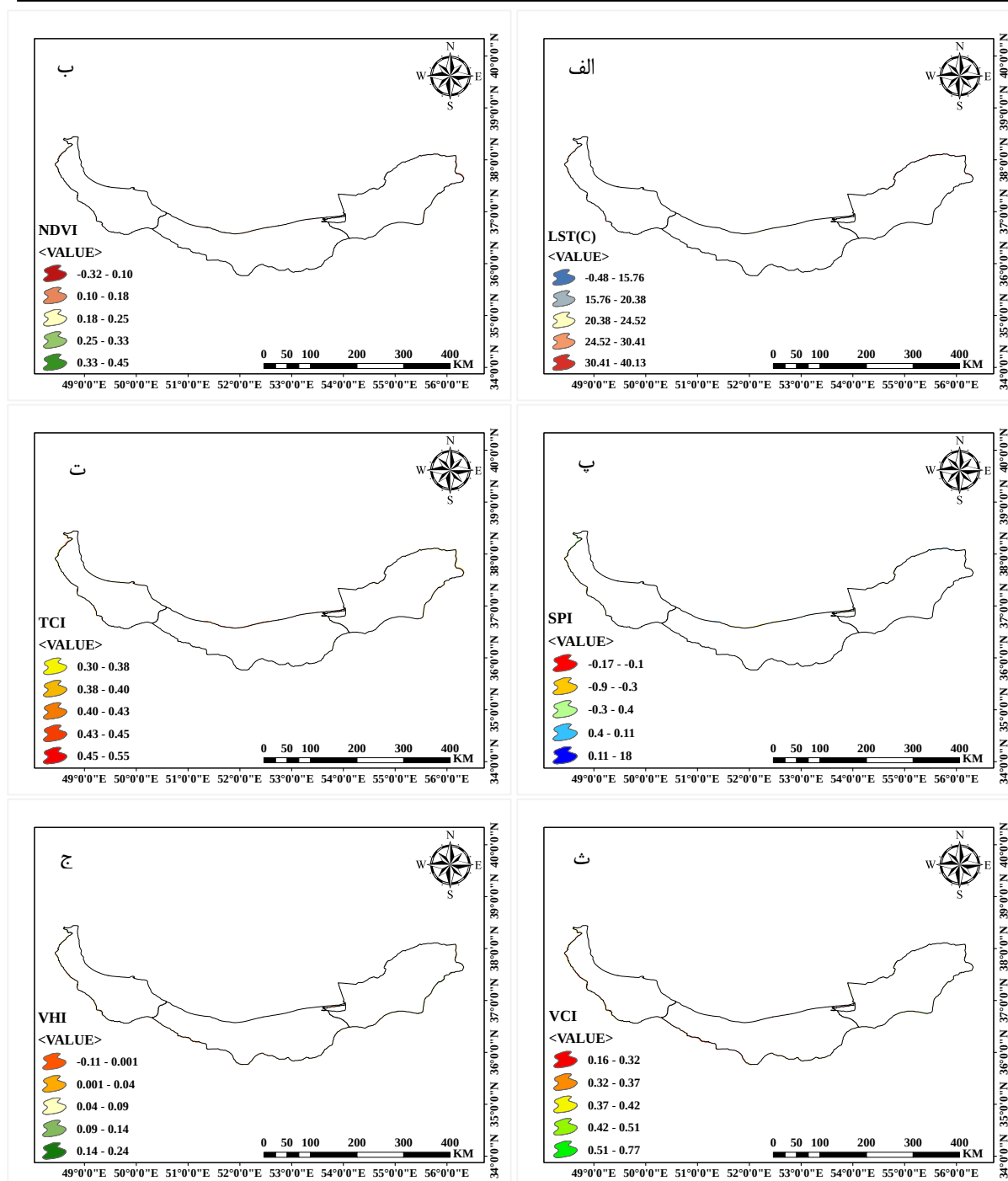
Mazandaran				Golestan				Gilan				Correlations	
SPI	VHI	VCI	TCI	SPI	VHI	VCI	TCI	SPI	VHI	VCI	TCI	R	MEI
۰/۳۲۱**	-۰/۰۰۵	-۰/۰۶۵	۰/۰۵۴	۰/۳۴۰**	-۰/۰۲۴	۰/۰۱۴	۰/۰۶۷	۰/۳۲۴**	-۰/۰۴۷	-۰/۰۶۷	۰/۰۵۴		
۰	۰/۵۹۱	۰/۴۸۳	۰/۵۵۶	۰	۰/۷۹۳	۰/۸۷۶	۰/۴۷۱	۰	۰/۶۱۳	۰/۴۶۶	۰/۵۵۶	Sig.	
-۰/۳۴۳**	۰/۰۴۴	۰/۰۰۷	-۰/۰۴۲	-۰/۳۲۱**	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵	-۰/۰۴۸	-۰/۳۱۵**	۰/۰۳۸	۰/۰۶۸	-۰/۰۴۵	R	SOI
۰	۰/۶۳۶	۰/۴۴۸	۰/۶۴۶	۰	۰/۷۷۹	۰/۷۸۶	۰/۶۰۳	۰	۰/۶۸۳	۰/۴۶۲	۰/۶۲۵	Sig.	
۰/۲۴۲**	-۰/۰۲۵	-۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۲۶۴**	-۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۳۱	۰/۲۵۱**	-۰/۰۳۳	-۰/۰۰۸	۰/۰۲۶	R	Nino 1+2
۰/۰۰۸	۰/۷۹۱	۰/۸۹	۰/۸۵۵	۰/۰۰۴	۰/۹۴۶	۰/۴۴۷	۰/۷۳۷	۰/۰۰۶	۰/۷۲۲	۰/۹۲۸	۰/۷۷۸	Sig.	
۰/۳۲۸**	-۰/۰۲۶	-۰/۰۲۴	۰/۰۰۳	۰/۳۶۰**	-۰/۰۰۵	۰/۰۷۳	۰/۰۴۳	۰/۳۳۰**	-۰/۰۲۴	-۰/۰۱۵	۰/۰۳۳	R	Nino 3
۰	۰/۷۷۶	۰/۷۹۹	۰/۷۴۶	۰	۰/۹۶	۰/۴۳۱	۰/۶۴۴	۰	۰/۷۹۹	۰/۸۷۴	۰/۷۲۲	Sig.	
۰/۳۴۱**	-۰/۰۰۸	-۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۰/۳۷۳**	۰/۰۱۷	۰/۰۷۲	۰/۰۲۶	۰/۳۳۰**	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	R	Nino 3.4
۰	۰/۹۳۷	۰/۸۸۱	۰/۸۷۷	۰	۰/۸۵۸	۰/۴۳۵	۰/۷۸	۰	۰/۹۹	۰/۹۵۹	۰/۸۷۶	Sig.	
۰/۳۷۹**	۰/۰۱۵	-۰/۰۰۶	-۰/۰۱۱	۰/۲۹۶**	۰/۰۵۶	۰/۰۶۲	-۰/۰۰۱	۰/۲۶۳**	۰/۰۱۹	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷	R	Nino 4
۰/۰۰۲	۰/۸۶۷	۰/۹۴۶	۰/۹۰۶	۰/۰۰۱	۰/۵۴۵	۰/۵۰۳	۰/۹۱۶	۰/۰۰۴	۰/۸۳۷	۰/۹۳۹	۰/۹۴	Sig.	

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ درصد معنی داری

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ درصد معنی داری

در شکل (۳-الف)، وضعیت دمای سطح زمین برای استان‌های شمالی ایران در طی سال‌های حاکمیت النینو به تصویر کشیده شده است. در این تصویر مشاهده می‌شود که در شمال شرق منطقه مورد مطالعه (گلستان)، دما با میانگین ۴۰/۱۳ درجه سانتی‌گراد

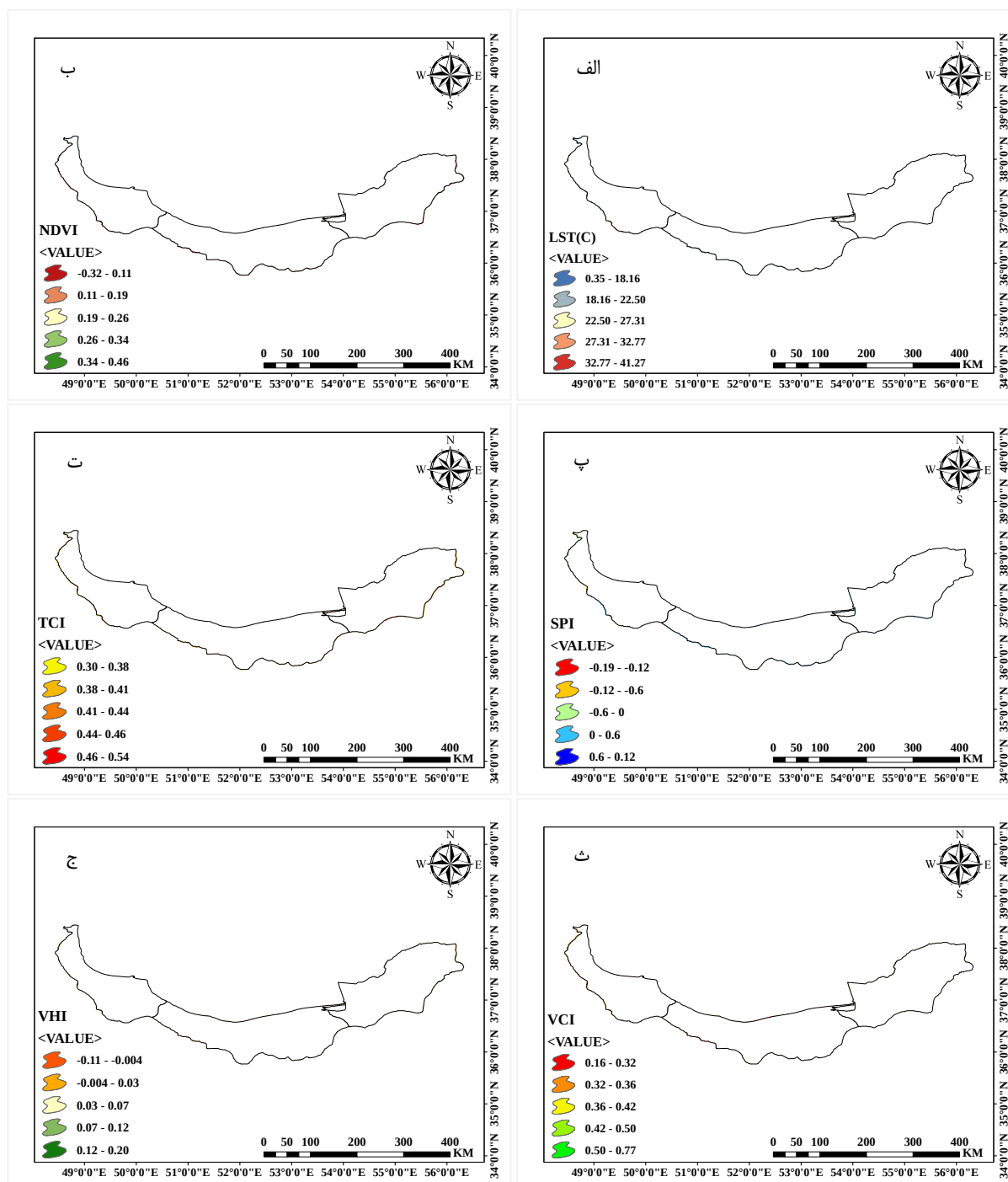
نسبت به سایر نواحی بالاترین مقدار را دارد. در مقابل، در جنوب غرب استان مازندران که به ارتفاعات رشته‌کوه البرز می‌رسد، دما به زیر صفر درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. همچنین، در هر سه استان نیمه جنوبی نسبت به نیمه شمالی دماهای کمتری دارند و به تدریج با حرکت به سمت شمال و مناطق شهری، دما افزایش می‌یابد. این الگو نشان می‌دهد که نقش توپوگرافی، به‌ویژه ارتفاعات البرز، در تعدیل و کاهش دما بسیار تعیین‌کننده است و موجب شکل‌گیری یک گرادیان حرارتی مشخص از جنوب به شمال می‌شود. همچنین، تأثیر پدیده النینو در تقویت گرم‌تر شدن نواحی پست و هم‌جوار با کرانه‌های جنوبی دریای خزر نسبت به مناطق مرتفع داخلی قابل‌مشاهده است. شکل ب وضعیت شاخص پوشش گیاهی را طی سال‌های وقوع پدیده النینو نمایش می‌دهد. بر اساس این شکل، تراکم و بیشینه سبزی‌نگی با مقدار حدود $0/45$ در بخش‌های جنوبی استان گلستان، مرکز گیلان و شرقی مازندران به‌طور واضح قابل‌مشاهده است. این الگو و به‌صورت نواری پیوسته، تداوم تراکم پوشش گیاهی را از غرب تا شرق منطقه نشان می‌دهد. در مقابل، در شمال گلستان و جنوب مازندران شرایط متفاوتی حاکم است؛ به‌گونه‌ای که مقدار شاخص تا حدود $0/32$ - کاهش می‌یابد. این کاهش بیانگر کاهش شدید یا نبود پوشش گیاهی در این نواحی است. چنین شرایطی در ارتفاعات البرز و سواحل جنوب شرقی دریای خزر نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود. شکل پ نمای از شاخص SPI را طی فاز النینو نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، نیمه غربی منطقه مورد مطالعه در مقایسه با نیمه شرقی، خشکی بیشتری را تجربه کرده است. در بخش‌های غربی و برخی نواحی مرکزی، پتانسیل خشک‌سالی با مقدار حدود $0/17$ - در سطح بالاتری قرار دارد؛ درحالی‌که در شرق استان مازندران و جنوب غرب گلستان، شرایط مطلوب‌تری با مقدار شاخص $0/18$ مشاهده می‌شود. در نتیجه، به‌طور کلی، استان‌های مورد بررسی بر اساس طبقه‌بندی شاخص SPI در وضعیت نرمال قرار می‌گیرند. این الگو نشان می‌دهد که اثرات فاز النینو در منطقه به‌صورت مکانی ناهمگن ظاهر شده و همواره با افزایش بارندگی همراه نیست، بلکه ممکن است در برخی نواحی تشدید خشکی را نیز در پی داشته باشد. بر اساس شاخص TCI در شکل ت مشخص است که طی فاز النینو، در شمال گیلان، بخش‌هایی از مرکز مازندران و شمال شرق گلستان مقدار این شاخص تا حداقل $0/30$ واحد کاهش یافته است. این وضعیت نشان‌دهنده تنش گرمایی بیشتر، افزایش خشکی و کاهش رطوبت پوشش گیاهی در این نواحی است. در مقابل، در مرکز تا غرب گلستان، شمال شرق و جنوب غرب مازندران و حتی برخی نواحی غرب گیلان شرایط مطلوب‌تری مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که مقدار شاخص TCI در این مناطق به حداکثر حدود $0/55$ رسیده و بیانگر کاهش پتانسیل خشکی در این بخش‌ها است. شکل ث شاخص VCI را در سال‌های تحت تأثیر پدیده النینو نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سلامت پوشش گیاهی در شرق مازندران و همچنین جنوب و شمال غرب گلستان با مقدار بیشینه حدود $0/77$ در وضعیت مطلوب‌تری قرار دارد. در مقابل، در غرب استان گیلان و به‌ویژه در نیمه غربی مازندران و نواحی واقع در مرکز تا شمال شرق گلستان، شرایط سلامت گیاهی به‌طور قابل‌توجهی تضعیف شده و پتانسیل خشک‌سالی با مقدار حداقل $0/16$ افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها بیانگر حساسیت بیشتر پوشش گیاهی در نواحی غربی نسبت به نوسانات اقلیمی ناشی از النینو است؛ در حالی‌که مناطق شرقی پایداری بالاتری در برابر کاهش رطوبت از خود نشان می‌دهند. در نهایت، شکل ج وضعیت شاخص VHI را در سال‌های تحت تأثیر فاز النینو نشان می‌دهد. بر اساس این تصویر، بیشینه این شاخص با مقدار حدود $0/24$ در نیمه شمالی گیلان، استان مازندران و نیمه جنوبی گلستان مشاهده می‌شود که بیانگر وضعیت مطلوب و سالم پوشش گیاهی در این نواحی است. در مقابل، در نیمه شمالی گلستان و نیمه جنوبی مازندران، وضعیت سلامت پوشش گیاهی بحرانی بوده و مقدار شاخص VHI تا حدود $0/11$ - کاهش یافته است. چنین مقادیری حاکی از تنش شدید و آسیب‌پذیری بالای پوشش گیاهی در این مناطق است. چنانچه به این نواحی توجه کافی نشود، این وضعیت می‌تواند در آینده پیامدهای جدی برای بخش کشاورزی و بهره‌وری اکوسیستم ایجاد کند.



شکل ۳. الف) نقشه دمای سطح زمین، ب) شاخص پوشش گیاهی NDVI، پ) شاخص خشکسالی SPI، ت) شاخص خشکسالی TCI، ث) شاخص خشکسالی VCI، ج) شاخص خشکسالی VHI در طی سال‌های النینو

در شکل ۴، بخش الف، وضعیت دمای سطح زمین در سال‌های رخداد لانینا نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین دما نسبت به سال‌های النینو یک درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بیشترین دما با $41/27$ درجه سانتی‌گراد در جنوب گیلان و نیمه شمالی گلستان به‌طور گسترده‌ای به چشم می‌خورد. این افزایش دما حتی در ارتفاعات البرز نیز قابل ملاحظه است و بر خلاف دوره‌های النینو، در جنوب مازندران دیگر دمای زیر صفر درجه مشاهده نمی‌شود. این الگو نشان می‌دهد که حاکمیت لانینا موجب تقویت گرمایش در نواحی کم‌ارتفاع و حتی مناطق مرتفع شده و دامنه نوسانات حرارتی را در سراسر منطقه کاهش داده است. در بخش ب، وضعیت شاخص NDVI طی سال‌های لانینا نشان می‌دهد که وسعت پوشش گیاهی کاهش یافته

و اراضی بدون پوشش گیاهی افزایش پیدا کرده است. مناطق فاقد گیاه و درخت در شمال گلستان و جنوب مازندران با مقدار حدود ۰/۳۲- به‌وضوح قابل تشخیص‌اند؛ در مقابل، در جنوب گلستان و نیمه شمالی مازندران و گیلان، تراکم سبزی‌نگی با مقدار حدود ۰/۴۶ فراوان مشاهده می‌شود. این الگو بیانگر آن است که دوره‌های لانینا تنش خشکی را تشدید کرده و توان رویشی در بخش‌هایی از منطقه کاهش یافته، در حالی که نواحی شمالی‌تر و نزدیک‌تر به منابع رطوبتی همچنان شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه دارند. شکل پ، شاخص SPI را طی فاز لانینا نمایش می‌دهد. در این دوره، الگوی پراکندگی مناطق خشک و مرطوب نظم مشخصی ندارد، اما خشکی بیشتر در مرکز مازندران، شمال گلستان و بخش عمده‌ای از گیلان قابل مشاهده است. کمینه شاخص SPI از ۰/۱۷- در طول دوره حاکمیت النینو به ۰/۱۹- در فاز لانینا کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش شدت خشک‌سالی است. این کاهش حتی در نواحی نسبتاً مرطوب نیز دیده می‌شود، هرچند در مجموع، کل منطقه همچنان در طبقه‌بندی نرمال خشک‌سالی قرار دارد. این وضعیت نشان می‌دهد که فاز لانینا موجب افزایش خشکی نسبی و اختلال در پراکندگی بارش در منطقه شده است. در شکل ت، شاخص TCI در طول فاز لانینا نشان می‌دهد که نسبت به دوره النینو، گستره مناطق مرطوب کاهش یافته و مناطق خشک در جنوب مازندران، شمال شرق گلستان و بخش قابل‌توجهی از گیلان گسترش یافته‌اند. کمینه این شاخص در این نواحی به حدود ۰/۳۰ رسیده است؛ در حالی که در غرب گلستان و نیمه شمالی مازندران، شرایط دمایی مناسب‌تری با مقدار ۰/۵۴- مشاهده می‌شود. این الگو حاکی از آن است که لانینا موجب تشدید تنش حرارتی و کاهش توان رطوبتی گیاهان در بخش‌های وسیعی از منطقه شده است. شکل ث وضعیت شاخص VCI را نمایش می‌دهد. اگرچه شدت تغییرات آن در مقایسه با دوره النینو تفاوت چشمگیری ندارد، اما تغییرات مکانی پوشش گیاهی به‌وضوح قابل مشاهده است. در دوره لانینا، وسعت مناطق دارای پوشش گیاهی سالم‌تر افزایش یافته است. افزایش نسبی دما و وجود مقداری رطوبت در برخی نواحی، موجب بهبود توان رویشی گیاهان در بخش‌هایی از منطقه شده و وسعت این اراضی را گسترش داده است. در نهایت، شکل ج شاخص VHI را در شرایط لانینا برای استان‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. در استان گیلان الگوی مشابهی با دوره النینو مشاهده می‌شود، اما بیشینه شاخص VHI از ۰/۲۴ در دوره النینو به ۰/۲۰ کاهش یافته است. کاهش سلامت گیاهان در مازندران محسوس‌تر است و در گلستان، اراضی خشک عمدتاً در نواحی میانی این استان متمرکز شده‌اند. این وضعیت بیانگر کاهش هم‌زمان سلامت حرارتی و پوشش گیاهی در فاز لانینا است؛ عاملی که می‌تواند نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر این نواحی در برابر تنش‌های اقلیمی باشد.



شکل ۴. الف) نقشه دمای سطح زمین، ب) شاخص پوشش گیاهی NDVI، پ) شاخص خشکسالی SPI، ت) شاخص خشکسالی TCI، ث) شاخص خشکسالی VCI، ج) شاخص خشکسالی VHI در طی سال‌های لاتینا

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شاخص‌های ENSO نقش مهمی در کنترل خشکسالی و وضعیت پوشش گیاهی در شمال ایران دارند. به‌گونه‌ای که شاخص‌های MEI و نینو با شاخص SPI همبستگی مثبت و معناداری نشان می‌دهند؛ امری که بیانگر تأثیر آن‌ها در افزایش بارش و کاهش احتمال وقوع خشکسالی است. در مقابل، ارتباط این شاخص‌ها با سایر شاخص‌های

خشک سالی ضعیف و غیرمعمول ارزیابی شد. از سوی دیگر، شاخص SOI رابطه ای معکوس و معنادار با SPI داشت که بیانگر نقش لانینا در افزایش شدت خشک سالی، به ویژه در استان گلستان است. در فاز النینو، منطقه با الگوی اقلیمی ناهمگن مواجه شد؛ به گونه ای که دمای سطح زمین در شمال شرق تا حدود ۴۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت، در حالی که ارتفاعات جنوب مازندران دماهای زیر صفر را تجربه کردند. پوشش گیاهی نیز رفتار متفاوتی نشان داد؛ بیشترین تراکم سبزیگی در جنوب گلستان و شرق مازندران مشاهده شد، اما شمال گلستان و جنوب مازندران با اراضی فاقد پوشش گیاهی مواجه بودند. شاخص های خشک سالی نیز این ناهمگنی را تأیید کردند؛ به طوری که SPI خشکی نسبی نیمه غربی منطقه، TCI تنش گرمایی را در شمال گیلان، مرکز مازندران و شمال شرق گلستان و VCI افت سلامت پوشش در غرب گیلان و نیمه غربی مازندران مرکز تا شمال شرق گلستان را نشان داد، در حالی که VHI سلامت نسبی پوشش را در شمال گیلان، مازندران و جنوب گلستان و وضعیت بحرانی را در شمال گلستان و جنوب مازندران به ثبت رساند. در مقابل، فاز لانینا با افزایش کلی دما در منطقه همراه بود و جنوب گیلان و شمال گلستان گرم تر شدند. در این دوره، وسعت پوشش گیاهی کاهش یافته و مناطق فاقد گیاه بخصوص در شمال گلستان و جنوب مازندران گسترش یافت. شاخص SPI شدت بیشتر خشک سالی را در شمال گلستان، مرکز مازندران و بخش عمده ای از گیلان نشان داد، TCI افزایش تنش حرارتی را در جنوب مازندران و شمال شرق گلستان ثبت کرد و اگرچه VCI بهبود نسبی پوشش گیاهی را نشان داد، کاهش مقدار VHI از ۰/۲۴ به ۰/۲۰ بیانگر افت سلامت گیاهی در مازندران و تمرکز اراضی خشک در بخش میانی گلستان بود.

نتایج این مطالعه با بسیاری از یافته های پژوهشگران پیشین همسو است. همان طور که در مطالعات داخلی بیات و ورکشی و همکاران (۱۳۹۶) و محمدرضایی و همکاران (۱۴۰۲) گزارش شده، شاخص های MEI و NINO بیشترین همبستگی مثبت را با شاخص SPI نشان می دهند و با افزایش بارش و کاهش شدت خشک سالی همراه هستند. علاوه بر این، یافته پژوهش حاضر مبنی بر اینکه شاخص SOI با افزایش احتمال خشک سالی، به ویژه در گلستان، همبستگی معکوس دارد، با نتایج خدافلی و همکاران (۱۳۹۲) و ثمالی و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد؛ این مطالعات نیز فاز سرد ENSO (لانینا) را با افزایش خشکی و کاهش بارش مرتبط دانسته اند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در جمع آوری داده ها، تهیه گزارش پژوهش و تحلیل داده ها مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۱۸۰۹۶/۹/۱۴۰۳ استخراج گردیده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می شود.

منابع

- اکبری ازیرانی، طیبیه (۱۴۰۱). آشکارسازی و تحلیل روند خشک سالی حوضه آبخیز جازموریان در ارتباط با شاخص های جوی-اقیانوسی. <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.359615.109> ۱-۱۶. پژوهش های تغییرات آب و هوایی، ۳(۱۱)، ۱-۱۶.
- امیدوار، کمال (۱۳۹۱). آب و هواشناسی دینامیک. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه یزد.

- امیدوار، کمال (۱۳۹۹). *رابطه آب و هوایی/ اتمسفر و اقیانوس*. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه یزد.
- آرخی، صالح؛ برزگر سواسری، مرضیه و عمادالدین، سمیه (۱۴۰۱). بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش‌ازدور VCI، TCI و VHI در ارزیابی خشک‌سالی با تصاویر مودیس (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(۳)، ۱۸۹-۲۲۴. <https://doi.org/10.22067/geoe.2021.72253.1102>
- بیات ورکشی، مریم؛ ایلدرومی، علیرضا و نوری، حمید (۱۳۹۶). بررسی ارتباط بین پدیده انسو و وقوع خشک‌سالی در ایران. *دانش آب و خاک*، ۲۷(۲)، ۱۴۳-۱۵۶. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_6429.html
- تبریزی، نازنین و تقوی، مریم (۱۳۹۴). مقایسه تطبیقی استان‌های کلان منطقه شمال ایران با تأکید بر ویژگی‌های ساختاری و امکانات لازم جهت توسعه پایدار گردشگری. *سومین همایش ملی گردشگری، جغرافیا و محیط زیست پایدار، همدان*. <https://civilica.com/doc/395892>
- ثمالی، رضا؛ ام‌البین بذرافشان، مهدی بی‌نیاز و مسلمی، حمید (۱۳۹۸). بررسی ارتباط بین پدیده انسو بر خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها در استان‌های ساحلی جنوبی ایران. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱، ۲۱۷-۲۳۱. <https://civilica.com/doc/1211110>
- چوبین، بهرام؛ محمد گلشن، فرزانه و ساجدی حسینی، ف. (۱۳۹۴). پیش‌بینی خشک‌سالی با استفاده از روش‌های آماری و سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی. *ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۳(۱۱)، ۴۳-۵۲. https://www.wmji.ir/article_697025.html
- خداقلی، مرتضی؛ کاوسی، مهناز؛ آروین، عباسعلی و صبحی، راضیه (۱۳۹۲). بررسی ارتباط از دور علامت‌های SOI و NAO با خشک‌سالی حوضه آبخیز زاینده‌رود. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۷(۲۱)، ۴۱-۵۲. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1392.7.21.5.9>
- داودآبادی فراهانی، محمدحسین؛ علیرضا شریفی، مهدی عربی. (۱۴۰۰). پایش خشک‌سالی کشاورزی استان مرکزی با استفاده از شاخص‌های VHI و PDSI. *علوم و فنون نقشه‌برداری*، ۱۱(۳)، ۸۳-۱۰۰. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.2322102.1400.11.3.7.9.100-83>
- رفیعی طاقانکی، زهرا؛ نصرافهانی، محمدعلی؛ میرعباسی نجف‌آبادی، رسول. (۱۴۰۲). بررسی مشخصه‌های خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی (آب زیرزمینی) و ارتباط آن با الگوهای دورپیوند هواشناسی (دشت‌های سفیددشت و فرادنبه، استان چهارمحال و بختیاری). *پژوهش آب ایران*، ۱. <https://doi.org/10.22034/iwrj.2023.14530.2556>
- سبزی‌پرو، علی‌اکبر؛ فخاری‌زاده شیرازی، الهام؛ ناظم‌السادات، سید محمدجعفر و رضایی، یوسف (۱۳۹۵). اعتبارسنجی دمای سطح حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و لندست-۵ (مطالعه موردی: مزارع گندم دشت مرودشت). *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۴)، ۲۵-۴۳. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.8864.2260>
- عسگری دستنائی، آسیه؛ گندمکار، امیر و خداقلی، مرتضی (۱۴۰۰). بررسی تأثیر خودآکای روند دمایی در مدیریت مخاطره خشک‌سالی (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۸(۳)، ۲۸۳-۲۹۹. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2021.330273.675>
- فلاح، اعظم؛ خلیل‌قربانی، امیراحمد؛ دهقانی، جواد و بذرافشان، مهدی (۱۳۹۳). بررسی میزان همبستگی بین متغیرهای اقلیمی پیوند از دور با شاخص خشک‌سالی SPI به روش رگرسیون درختی (M5). *دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست)*. <https://civilica.com/doc/305632>
- فیض‌اله‌پور، مهدی. (۱۴۰۲). برآورد دمای سطح زمین (LST) و مقایسه آن با شاخص‌های NDMI، NDWI و NDVI به‌منظور بررسی تنش آبی با تأکید بر تغییرات کاربری اراضی (LULC) در سیستم ماشین بردار پشتیبانی (SVM) (منطقه مورد مطالعه: تالاب انزلی). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۰(۲)، ۱۳۱-۱۴۸. <http://dx.doi.org/10.61186/jsaeh.10.2.131>
- محمدرضایی، مریم؛ سلطانی، سعید و مدرس، رضا. (۱۴۰۱). تأثیر شاخص‌های دمایی انسو بر خشک‌سالی هواشناسی در نیمه غربی ایران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۱۳-۲۷. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9632.1053>
- محمدرضایی، مریم؛ سلطانی، سعید و مدرس، رضا. (۱۴۰۲). بررسی رابطه شاخص‌های NAO و NINO4 با خشک‌سالی هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک نواحی شمالی ایران. *دانش آب و خاک*، ۳۳(۲)، ۱۵۰-۱۳۵. <https://doi.org/10.22034/ws.2021.48311.2441>
- میرزائی، محمد؛ امینی‌نیا، کریم؛ پناهی، علی و همت‌زاده، ابوالفضل. (۱۴۰۴). واکاوی اثر سازوکارهای همدیدی گردش جو و یک شاخص دورپیوندی بر بی‌هنجاری‌های نم و یخ و خشک‌سالی‌های پاییزه شمال غرب ایران. *هواشناسی کشاورزی*، ۱۳(۱)، ۳۴-۵۳. <https://doi.org/10.22125/agmj.2024.424085.1161>

References

- Abiy, A.Z., Melesse, A. M. & Melesse, W. (2019). Teleconnection of Regional Drought to ENSO, PDO, and AMO: Southern Florida and the Everglades. *Atmosphere*, 10, 295. <https://doi.org/10.3390/atmos10060295>
- Akbari Azirani, T. (2022). Detection and trend analysis of drought in the Jazmurian basin of Iran associated with ocean-atmospheric indices. *Climate Change Research*, 3(11), 1-16. (in Persian) <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.359615.1091>
- Angulo, E.Ch., & Pereira Filho, A.J. (2023). Extreme Droughts and Their Relationship with the Interdecadal Pacific Oscillation in the Peruvian Altiplano Region over the Last 100 Years. *Atmosphere*, 14, 1233. <https://doi.org/10.3390/atmos14081233>
- Arekhi, S., Barzegar Savasari, M., & Emadaddian, S. (2022). Investigating the Indicators Resulting from Remote Sensing Technology in Drought Assessment using MODIS Images (Case Study: Qom, Isfahan, Chaharmahal and Bakhtiari, and Markazi Provinces). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(3), 189-224. (in Persian) <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.72253.1102>
- Asgari Dastnaei, A., Gandomkar, A., & Khodaqholi, M. (2021). Self-analysis of temperature trend in drought hazards management (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Environmental Management Hazards*, 8(3), 283-299. (in Persian) <https://doi.org/10.22059/jhsci.2021.330273.675>
- Bayat Varkeshi, M., Ildaromi, A., & Nouri, H. (2017). Study of Relation between ENSO Phenomenon and Drought Occurrence in Iran. *Water and Soil Science*, 27(2), 143-156. (in Persian) https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_6429.html?lang=en
- Choubin, B., Golshan, M., & Sajedi-Hosseini, F. (2016). Predicting Drought using Statistical Methods and Large-Scale Climate Signals. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11), 43-52. (in Persian) https://www.wmji.ir/article_697025.html?lang=en
- Davoodabadi Farahani, M. H., Sharifi, A., & Arabi, M. (2021). Monitoring agricultural drought in Markazi province using VHI and PDSI indices. *Surveying Sciences and Techniques*, 11(3), 83-100. (in Persian) <http://dorl.net/dor/20.1001.1.2322102.1400.11.3.7.9>
- Dong, X., Zhou, Y., Liang, J., Zou, D., & Wu, J., Wang, J. (2023). Assessment of Spatiotemporal Patterns and the Effect of the Relationship between Meteorological Drought and Vegetation Dynamics in the Yangtze River Basin Based on Remotely Sensed Data. *Remote Sens*, 15, 3641. <https://doi.org/10.3390/rs15143641>
- Espinosa, L.A., Portela, M.M., & Rodrigues, R. (2019). Spatio-temporal variability of droughts over past 80 years in Madeira Island. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100623>
- Fallah, A., Khalil Ghorbani, A. A., Dehghani, J., & Bazrafshan, M. (2014). Investigating the correlation between remotely linked climatic variables and the SPI drought index using the tree regression method (M5). *The Second National Conference on Water Crisis (Climate Change, Water and Environment)*. (in Persian) <https://civilica.com/doc/305632>
- Feyzolahpour, M. (2023). Estimating land surface temperature (LST) and comparing it with NDMI, NDWI and NDVI indices to investigate water stress with emphasis on land use changes (LULC) in the support vector machine (SVM) system (study area: Anzali wetland). *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 10(2), 131-148. (in Persian) <http://dx.doi.org/10.61186/jsaeh.10.2.131>
- 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, 13775. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93328-z>
- Khodaghohi, M., Kavousi, M., Arvin, A. A., & Sabouhi, R. (2013). Investigation of Teleconnection between SOI and NAO Signals and Droughts in Zayanderoud Watershed Basin. *Journal of Watershed Management Science and Engineering of Iran*, 7(21), 41-52. (in Persian) <http://jwmsei.ir/article-1-259-fa.html>
- Liu, W., Zhu, Sh., Huang, Y., Wan, Y., Wu, B., & Liu, L. (2020). Spatiotemporal Variations of Drought and Their Teleconnections with Large-Scale Climate Indices over the Poyang Lake Basin, China. *Sustainability*, 12, 3526. <https://doi.org/10.3390/su12093526>

- Mirzaie, M., Amininia, K., Panahi, A., & Hammetzadeh, A. (2025). The analysis of the effects of a teleconnection index and synoptic mechanism of atmospheric circulation on specific humidity anomalies and droughts during autumn in northwestern Iran. *Journal of Agricultural Meteorology*, 13(1), 34–53. (in Persian) <https://doi.org/10.22125/agmj.2024.424085.1161>
- Mohammadrezaei, M., Soltani, S., & Modarres, R. (2022). Effect of ENSO indices on meteorological drought in the midwest of Iran. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 13–27. (in Persian) <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9632.1053>
- Mohammadrezaei, M., Soltani, S., & Modarres, R. (2023). Investigation of the relationship of NINO4 and NAO indices with meteorological drought in synoptic stations in northern Iran. *Water and Soil Science*, 33(2), 135–150. (in Persian) <https://doi.org/10.22034/ws.2021.48311.2441>
- Ndehedehe, Ch.E., Anyah, R.O., Alsdorf, D., Agutu, N.O., Ferreira, V.G. (2019). Modelling the impacts of global multi-scale climatic drivers on hydro-climatic extremes (1901–2014) over the Congo basin. *Science of The Total Environment*, 621: 1569-1587. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.203>
- Nepstad, D., Lefebvre, P., Lopes da Silva, U., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solórzano, L., Moutinho, P., Ray, D., & Guerreira Benito, J. (2004). Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. *Global Change Biplgy*, 10, 704-717. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00772.x>
- Rafiei-Taghanki, Z., Nasr-Esfahani, M. A., & Mirabbasi Najafabadi, R. (2023). Investigation of meteorological and hydrological (groundwater) drought characteristics and their relationship with teleconnection patterns (Case studies: Sefiddasht and Faradaneh plains, Chaharmahal and Bakhtiari Province). *Iran Water Research Journal*, 1. (in Persian) <https://doi.org/10.22034/iwrj.2023.14530.2556>
- Sabziparvar, A. A., Fakhari-Zadeh Shirazi, E., Nazemosadat, S. M. J. & Rezaei, Y. (2016). Validation of Land Surface Temperature (LST) from Landsat-5 and MODIS Images (Case Study: Wheat Fields of Marvdasht Plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(4), 25-43. (in Persian) <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.8864.2260>
- Samali, R., Umm al-Banyan Bazrafshan, M., Bi-Niaz, & Moslemmi, H. (2019). Studying the relationship between the ENSO phenomenon on droughts and wet years in the southern coastal provinces of Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1, 217-231. (in Persian) <https://civilica.com/doc/1211110>
- Tabrizi, N., & Naqvi, M. (2015). Comparative comparison of the metropolitan areas of northern Iran with respect to structural characteristics and sustainable tourism development opportunities. *Geography of Tourism Space*, 14, 49-69. (in Persian) <https://sanad.iau.ir/journal/gjts/Article/520226?jid=520226>
- Ullah, I., Ma, X., Ren, G., Yin, J., Iyakaremye, V., Syed, S., Lu, K., Xing, Y., & Singh, V.P. (2022). Recent Changes in Drought Events over South Asia and Their Possible Linkages with Climatic and Dynamic Factors. *Remote Sens*, 14, 3219. <https://doi.org/10.3390/rs14133219>