



## Determination of the threshold and sensitivity assessment of the urban ecosystems Vegetation Index in the face of climate shocks the case study of Gorgan city

Mahmood Zoghi<sup>1</sup>, Mohammad Javad Amiri<sup>2</sup>✉

1. Department of Environmental Education, College of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: [zoghi87@ut.ac.ir](mailto:zoghi87@ut.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Environmental Education, College of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: [Mjamiri@ut.ac.ir](mailto:Mjamiri@ut.ac.ir)

### Article Info

Article type:  
Research Article

### Article History:

Received:

21 March 2023

Received in revised form:

27 May 2023

Accepted:

1 July 2023

Available online:

5 August 2023

### Keywords:

Ecosystem,  
Threshold,  
Palmer,  
Vegetation,  
Climate.

### ABSTRACT

Today, climate change and its obvious negative effects on ecosystems have caused concern. This research seeks to test whether vegetation changes are sensitive to climate shocks and also how the ecosystem recovery process is through this index. In this regard, by using the GEE platform, Java coding, GIS and statistical analysis, vegetation and Palmer indices were calculated and based on time series climate data, vegetation and climate changes were presented. The results of Palmer's drought index show that during the statistical period (1985-2020) the study area is facing drought or is moving towards drought. Also, the results indicate the longest period of drought in the region from 2013 to 2020. Totally from 420 evaluated months, the NDVI index is below the change threshold in 70 months. Among these, 31 months of the study period is below the acceptable threshold in green and non-reservoir seasons, which is ecologically worrying. The distribution of the vegetation index based on hexagons in 1985 and 2005 had a normal and almost normal distribution; But in 2020, the graph deviated from the normal state and skewed towards the vegetation cover index under stress or even thin covers. According to the analysis of the indicators, it is predicted that the Gorgan region is on the border of such ecological developments and the historical ecosystem of the region is moving towards new ecosystems or being in a new equilibrium state with climatic conditions and human disturbances.

**Cite this article:** Zoghi, M., & Amiri, M. J. (2023). Determination of the threshold and sensitivity assessment of the urban ecosystems Vegetation Index in the face of climate shocks the case study of Gorgan city. *Geographical Urban Planning Research Quarterly*, 11 (2), 97-114.

<http://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2023.353153.1774>



© The Author (s). **Publisher:** University of Tehran Press

DOI: [10.22059/JURBANGEO.2023.353153.1774](https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2023.353153.1774)

## **Extended Abstract**

### **Introduction**

Today, climate change and its obvious negative effects on terrestrial ecosystems have caused great concern to humans. These changes are effective on vegetation performance, plant distribution patterns, and have economic and environmental consequences. Therefore, it is important to know the behavioral pattern of vegetation changes against climate changes. Reviewing the studies of scientists in the world shows many researchers have used the NDVI index to study temporal and spatial changes in vegetation and its relationship with the climatic index of precipitation in different parts of the world. Studies have shown that NDVI follows precipitation with different time scales. Surveys showed that there are very few studies on determining the threshold of changes in the vegetation cover index in the face of climate shocks. Determining these thresholds can provide a suitable solution for evaluating the state of the ecosystem, the consequences of climate shocks and the reversibility or disturbance in the ecosystem. This study was conducted with the aim of improving our understanding of the dynamics of vegetation in the forest city of Gorgan during 1985-2020 against climatic stresses.

### **Methodology**

The current research is a comparative and monitoring research and seeks to test whether changes in vegetation cover are sensitive to climate shocks and also how the ecosystem recovery process is through this index. To achieve the goal, first, NDVI index was selected among the optimal vegetation indices and its calculation process was done as a time series in the GEE system. In parallel with those climate shocks, the main elements including temperature, precipitation and storm were calculated during the historical process of 35 years and the average and standard deviation statistical indicators were calculated for them and the trend of changes in the thresholds was determined.

The results of climate plots and climate changes show that in the years before 1985, 2005 and 2020, drastic changes have occurred in climatic elements and climatic factors. Therefore, these years can be considered as the periods when the climate shock happened. Next, the region was divided into 436 hexagons and the NDVI index for each of the hexagons was calculated and modeled for the years 1985, 2005 and 2020 as selected years affected by climate shocks. In conclusion, to analyze the trend of changes in the time series of the vegetation index and compare the behavior of its changes with climatic indices, the Palmer index was calculated.

### **Results and discussion**

The results of climate change monitoring based on the Palmer index showed that during the statistical period the study area is facing drought in most years. The most severe climatic fluctuations and drought in the region were recorded in 2018 and in the months of October to December. The longest period of drought has also prevailed in the region from 2013 to 2020. During this period, rainfall, temperature and storm fluctuations have the most changes. The results of drought monitoring show that in 270 months, the region is facing climatic drought stress, 57 months of the study period, the region is facing severe and very severe drought stress. The results of the time series of the NDVI vegetation index showed that, out of the 420 evaluated months, 70 months of the year the NDVI index is below the change threshold, 31 of which are in the green and non-accumulating seasons, the seasons when the vegetation is expected to be at its maximum. Placing below the acceptable range means crossing the ecological thresholds and challenges the recovery and restoration of the ecosystem, also the ecological performance will be affected at this point. Based on the assessment of the Palmer index, from 2014 to 2019, the situation of the Palmer index is in the extreme drought range. Also, since 2015, i.e. with a one-year time delay, NDVI index

has experienced the lower limit of the equilibrium threshold of vegetation cover. These conditions are also valid for the years 2008, 2009, 2002 and 1997. In general, it can be said that the vegetation cover index is dependent on climatic changes and fluctuations and shows high sensitivity to changes. The important point in this section is that in the years when the NDVI index changes are at the lower limit of the threshold, we witness the most climate shocks and temperature changes, the occurrence of severe storms and precipitation fluctuations. The distribution of the vegetation index based on hexagons in 1985 and 2005 have a normal distribution; but in 2020, the graph has deviated from the normal state and skewed towards the vegetation cover index under stress or even thin covers. The visual interpretation done on the vegetation cover index in 1985 confirms the condition of the vegetation cover in the southern and western limits of the region in a state with suitable dense and pasture vegetation and forest cover on the edges. However, in 2005 and 2020, this cover has been changed and mainly turned into agricultural land and poor rangeland. In such a way that in 2020, the situation of the region has revealed the critical state of vegetation. The vegetation cover index in the central areas of the city has also reached from a relatively favorable situation in 1985 to a critical situation with almost no dense and stress-free vegetation cover in 2020. The results of the present studies are consistent with the studies of Visentr Serrano et al. in 2013 and confirm the relationship between NDVI vegetation and climate change. In addition, the results of the studies are consistent with the studies of Alwesabi 2012, Xiai & Moody, 2005 and Yan et al. 2001. In such a way that the present study and the aforementioned studies all confirm the influence of the vegetation index on climate fluctuations and precipitation with a one-year time difference.

### **Conclusion**

In general, the threshold is defined as a border with different conditions. After crossing the thresholds, the stability and positioning of the NDVI in the equilibrium range is often difficult, and the ecosystem is constantly spending energy to restore itself or to position itself in a new stability state. The result of the mentioned disorders is the reduction of resilience and resistance in the region, which leads the ecosystem to alternative states or crossing the threshold or being in a new equilibrium state. The results showed that the areas where green vegetation is concentrated and denser are less affected by climatic stresses and show more resilience. However, the areas that have become spots and islands due to destruction in the urban areas are more affected by climatic stress and destruction and show less tolerance against the destruction factors. The results help managers to focus their management plans for the preservation and maintenance of urban green spaces as well as forest and pasture ecotones on the edge of the city by knowing the thresholds.

### **Funding**

There is no funding support.

### **Authors' Contribution**

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

### **Conflict of Interest**

Authors declared no conflict of interest.

### **Acknowledgments**

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

## تعیین آستانه و ارزیابی حساسیت شاخص پوشش گیاهی اکوسیستم‌های شهری در مواجهه با شوک‌های اقلیمی، مطالعه موردی: منطقه شهری گرگان

محمود ذوقی<sup>۱</sup>، محمدجواد امیری<sup>۲</sup> ✉

۱ - گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، رایانامه: [zoghi87@ut.ac.ir](mailto:zoghi87@ut.ac.ir)  
۲ - نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، رایانامه: [mjamiri@ut.ac.ir](mailto:mjamiri@ut.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>امروزه تغییر اقلیم و اثرات منفی آشکار آن بر اکوسیستم‌ها موجب نگرانی شده است. این پژوهش در پی آن است که آزمون کند؛ آیا تغییرات پوشش گیاهی در مقابل شوک‌های اقلیمی حساس بوده و همچنین روند بازبازی اکوسیستم از طریق این شاخص چگونه است. در این راستا با بهره‌گیری از پلتفرم GEE، کد نویسی جاوا، GIS و تحلیل‌های آماری، شاخص‌های پوشش گیاهی و پالمر محاسبه و همچنین بر اساس داده‌های اقلیمی سری زمانی تغییرات پوشش گیاهی و اقلیمی ارائه شد. نتایج شاخص خشک‌سالی پالمر نشان می‌دهد طی دوره آماری (۱۹۸۵-۲۰۲۰) منطقه مطالعاتی با خشک‌سالی مواجه می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی منطقه از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ است. در مجموع از ۴۲۰ ماه مورد ارزیابی در ۷۰ ماه، شاخص NDVI در پایین حد آستانه تغییرات قرار دارد. از این میان قرارگیری ۳۱ ماه از طول دوره مطالعاتی در پایین حد آستانه قابل‌پذیرش در فصول سبز و غیر خزان کننده می‌باشد که به لحاظ اکولوژیکی نگران‌کننده است. توزیع پراکنش شاخص پوشش گیاهی بر مبنای هگزگون نیز در سال ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ دارای توزیع نرمال و تقریباً نرمال بوده؛ اما در سال ۲۰۲۰ نمودار از وضعیت نرمال خارج و چولگی به سمت شاخص پوشش گیاهی تحت استرس و یا حتی پوشش‌های تنک میل کرده است. مطابق بررسی شاخص‌ها پیش‌بینی می‌گردد منطقه گرگان در مرز چنین تحولات اکولوژیکی قرار داشته و اکوسیستم تاریخی منطقه با شرایط اقلیمی و اختلال‌های انسانی به سمت اکوسیستم‌ها جدید یا قرارگیری در وضعیت تعادلی جدید در حال حرکت است.</p>	<p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۲/۰۱/۰۱</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۲/۰۳/۰۶</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۲/۰۴/۱۰</p> <p><b>تاریخ چاپ:</b> ۱۴۰۲/۰۵/۱۴</p> <p><b>واژگان کلیدی:</b> آستانه، اکوسیستم، اقلیم، پالمر، پوشش گیاهی</p>

**استناد:** ذوقی، محمود و امیری، محمدجواد. (۱۴۰۲). تعیین آستانه و ارزیابی حساسیت شاخص پوشش گیاهی اکوسیستم‌های شهری در مواجهه با شوک‌های اقلیمی، مطالعه موردی: منطقه شهری گرگان. *پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری*، ۱۱ (۲)، ۹۷-۱۱۴.

<http://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2023.354548.1787>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران



DOI: [10.22059/JURBANGEO.2023.354548.1787](https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2023.354548.1787)

## مقدمه

تنش‌های آب‌وهوایی مانند خشک‌سالی یا دوره‌های باران شدید مهم‌ترین چالش زیست‌محیطی جهان بوده و تأثیرات اجتناب‌ناپذیری بر ترکیب، پوشش، ساختار و عملکرد پوشش گیاهی زمینی دارند (Hossain & Li, 2021; Li et al., 2019). پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های زمینی طیف وسیعی از کالاها و خدمات اکوسیستمی را فراهم کرده و ارائه پایدار این خدمات به‌شدت پایداری اکوسیستم وابسته است (Isbell et al., 2015; Hossain & Li, 2021) شواهد زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد فراوانی و بزرگی تنش‌های آب‌وهوایی در حال افزایش بوده و این روندها در آینده نیز ادامه خواهد داشت (Zhang et al., 2019). تنش‌های آب‌وهوایی و تغییرات اقلیمی بر بهره‌وری اولیه پوشش گیاهی زمین و الگوهای توزیع گیاهان تأثیرگذار بوده و پیامدهای اقتصادی و محیط‌زیست عمده‌ای دارد (De Keersmaecker et al., 2015). به‌عنوان مثال تنش‌های شدید اقلیمی مانند امواج گرما با کاهش دسترسی به آب و کاهش تبادل  $CO_2$  خالص در اکوسیستم بهره‌وری اولیه را کاهش می‌دهد در نتیجه تنش حاصله می‌تواند پوشش گیاهی را با اختلال مواجه نماید (McDowell et al., 2008). امروزه تغییر اقلیم و اثرات منفی آشکار آن بر اکوسیستم‌های خشکی موجب نگرانی شدید انسان شده است و ضرورت تبیین روشن‌تر و کمی آن را مطرح ساخته است. از جمله این اثرات، تغییرات زمانی و مکانی پویایی پوشش گیاهی و ارتباط آن‌ها با تغییر اقلیم است. امروزه بسیاری از مطالعات تأثیرات شدید آب‌وهوایی را بر پوشش گیاهی بررسی نموده و شواهد قابل اتکایی مبنی بر تأثیر تغییرات اقلیم بر پوشش گیاهی زمین ارائه کرده‌اند (Chu et al., 2019). همچنین در دهه اخیر دانشمندان اقلیم‌شناسی، به اقلیم‌های محلی و منطقه‌ای تحت تأثیرات انسانی توجه بیشتری کرده‌اند تا درک بهتری از چگونگی تغییر عناصر محرک آب‌وهوایی داشته باشند. رشد صنعتی و توسعه شهرنشینی دو عامل اصلی تغییرات آب‌وهوای جهانی بشمار می‌روند که منجر به افزایش دمای سطح زمین، از بین رفتن پوشش گیاهی و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ، غیرقابل تبخیر و سخت شدن زمین شده‌اند که در حال حاضر این موضوع مهم‌ترین مسئله در سراسر جهان می‌باشد (Taloor et al., 2021; Badapalli et al., 2021). تخریب زمین به‌عنوان یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی جهانی در دهه‌های اخیر شناخته شده است که توجه بسیاری از محققان، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران را افزایش داده است. این تخریب منجر به تحت تأثیر قرار گرفتن عملکردهای اکوسیستم، کیفیت عمومی زندگی، معیشت انسان و ... شده است (Kumar et al., 2022). همچنین رشد و توسعه روزافزون شهرنشینی با گسترش کالبدی شهرها رابطه مستقیم داشته و توسعه فیزیکی شهرها موجب دوری از طبیعت و قطع رابطه انسان با محیط‌زیست می‌شود (خوانین زاده و همکاران، ۱۳۹۶). این دوری از طبیعت موجب اهمیت یافتن فضای سبز شهری شده به طوری که این کاربری شهری نقش غیرقابل‌جایگزینی در تنظیم و حفاظت از هوا سپهر، آب‌وخاک، کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای، افزایش و حفظ ثبات اقلیمی و کنترل آلودگی در شهرها دارد. در نتیجه هرگونه تغییر در آن تأثیر بزرگی بر محیط‌زیست طبیعی و تعادل اکوسیستمی دارد (Weishou et al., 2011).

## مبانی نظری

### سنجش‌ازدور و شاخص پوشش گیاهی

تصاویر سنجش‌ازدور چند طیفی شامل ترکیبی از باندها است که یک تصویر ترکیبی ایجاد می‌نماید تا برای تفسیر و تحلیل استفاده شود (Huang et al., 2021). داده‌های سنجش‌ازدور روشی پیشرفته برای نظارت بر پویایی پوشش گیاهی و تشخیص تغییر پوشش زمین در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف فراهم می‌کند (Nila et al., 2019).

مطالعات مختلف شاخص‌های مختلفی را پیشنهاد نمودند. این شاخص‌ها عمدتاً شامل شاخص‌های  $RVI^1$ ,  $NDVI^2$ ,  $DVI^3$  و  $IPVI^4$  بوده که معروف‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها شاخص  $NDVI$  می‌باشد. این شاخص به دلیل توانایی در نمایش پوشش گیاهی، مشخص کردن تنش‌های ریشی، تاریخچه طولانی، سادگی و تکیه بر باندهای چند طیفی و سهولت دستیابی به عنوان یک شاخص محبوب در میان دانشمندان گسترش یافت (Huang et al., 2021). مطالعه رفتار پوشش گیاهی، مدل‌سازی آب‌وهوایی، طبقه‌بندی پوشش گیاهی در سطح جهان، پایش محصولات کشاورزی، مطالعات بیابان‌زدایی و خشک‌سالی، حفاظت از محیط‌زیست، بررسی اکوسیستم‌ها، بررسی تعادل آب و انرژی در سطوح جهانی از جمله کاربردهای  $NDVI$  می‌باشد (فیروزی و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از داده‌های بلندمدت شاخص پوشش گیاهی ( $NDVI$ ) و داده‌های اقلیمی در بسیاری مناطق فرصت مناسبی برای درک ما از پایداری اکوسیستم فراهم می‌نماید (Park et al., 2016; Isbell et al., 2015; Hossain & Li, 2021).

### شاخص‌های اقلیمی

تغییر شرایط آب‌وهوایی ناشی از تغییرات اقلیم به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌ها شناخته شده که اثرات مخرب اقتصادی، زیست‌محیطی را به دنبال دارد. این تأثیرات با وارد آوردن اثرات منفی بر ذخایر طبیعی آب، تغذیه رودخانه‌ها، محیط‌زیست طبیعی، عملکرد کشاورزی و مراتع بروز می‌کند (انصاری و داوری، ۱۳۸۹). بر اساس مرور منابع شاخص‌های مختلفی برای توصیف پدیده‌های اقلیمی استفاده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها شاخص خشک‌سالی پالم (PDSI) شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق (SPEI) از رایج‌ترین شاخص‌ها برای توصیف شرایط آب‌وهوایی می‌باشند. مطالعات مختلف از این شاخص‌ها به‌عنوان شاخص‌های مناسب برای ارزیابی حساسیت جوامع گیاهی به تنش‌های آب‌وهوایی نام برده‌اند (Vicente-Serrano et al., 2012; Hossain & Li, 2021). برای بررسی تغییرات شرایط اقلیمی و تنش‌های آب‌وهوایی، بررسی روند تغییرات عناصر اقلیمی و شاخص‌های مرتبط با آن‌ها به‌عنوان یک ابزار مدیریتی و برنامه‌ریزی قوی با اهمیت می‌باشد. از جمله مهم‌ترین عناصر قابل بررسی برای تنش‌های اقلیمی می‌توان به بررسی روند تغییرات سری زمانی دما، بارش و طوفان اشاره نمود. همچنین مناسب‌ترین شاخص که بیانگر مشخصه شدت، تداوم و گستردگی مکانی تنش اقلیمی می‌باشد می‌توان به شاخص خشک‌سالی پالم اشاره نمود (Palmer, 1965). در بیان مختصر، پالم (۱۹۶۵) با استفاده از داده‌های دما و بارندگی ماهانه و به کمک یک معادله ساده بیلان آب خاک دولا به و تعریف معیاری به نام بارندگی مناسب برای اقلیم منطقه، شاخصی را ارائه کرد که اکنون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرور مطالعات دانشمندان در سطح دنیا، مطالعات متنوعی را از کاربرد شاخص‌های اقلیمی، پوشش گیاهی و سنجش‌ازدوری برای ارزیابی اکوسیستم‌ها نشان می‌دهد و امروزه دانشمندان محیط‌زیست به‌طور فزاینده‌ای آگاه می‌شوند که سنجش‌ازدور می‌تواند نقش مهمی در ارائه شواهد مورد نیاز برای تعیین شرایط اکولوژیکی و مسیر پیش رو ایفا نمایند (Kumar et al., 2022). در ادامه به برخی از مطالعات انجام شده در خصوص موضع تحقیق اشاره خواهد شد، تا بر اساس مطالعات پیشین هدف‌گذاری‌های تحقیق برای تکمیل خلاءها موجود صورت گیرد. شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده ( $NDVI$ ) به‌طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل پویایی پوشش گیاهی و روابط آن با تغییرات آب‌وهوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chu et al., 2019). در این میان تعدادی از مطالعات شواهدی ارائه نمودند که در

1. Ratio Vegetation Index
2. Normalized difference vegetation index
3. Infrared percentage vegetation index
4. Difference Vegetation Index

مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی روابط بین NDVI و تنوع آب‌وهوایی به دلیل تغییرات در ویژگی زیست‌بوم‌ها پیچیده و ناهمگن است (Lu et al., 2019) به‌طور مثال ویسنته-سرانو و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعات خود نشان دادند که پوشش گیاهی زمین تحت تأثیر خشک‌سالی قرار دارد (Vicente-Serrano et al., 2013). در مقابل ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثرات مثبت خشک‌سالی را بر پوشش گیاهی در اکثر مناطق چین گزارش نمودند (Zhang et al., 2017). از سویی دیگر چگونگی واکنش پوشش گیاهی به تنش‌های آب‌وهوایی مختلف (خشک یا مرطوب شدید) نامشخص بوده و به‌عنوان یک چالش برای مطالعات اکوسیستم‌های زمینی و تحقیقات اقلیمی بدل شده است. محققان زیادی از شاخص NDVI جهت مطالعه تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی و ارتباط آن با شاخص اقلیمی بارش در نقاط مختلف جهان استفاده کرده‌اند (Alwesabi, 2012; Xiao & Moody, 2005; Yun-Hao et al., 2001). مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که NDVI با تأخیرهای زمانی گوناگون از بارش تبعیت می‌کنند که این تاخیرات می‌تواند ناشی از خشکی نسبی مکان مطالعه، توپوگرافی، و همچنین ترکیب ساختار پوشش گیاهی باشد. بنابراین حساسیت مقادیر NDVI به نوسانات بارش در هر منطقه‌ای متفاوت و زمان‌های تأخیر آن نیز بین یک یا دو ماه متغیر می‌باشد (Krakauer et al., 2017). تحقیقات انجام‌شده در این زمینه در ایران اغلب ارتباط NDVI را با عناصر اقلیمی برای پیش‌خشک‌سالی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. از جمله تحقیقات انجام‌شده می‌توان به تحقیقات ابوالفتحی (۱۳۹۴)، میر موسوی (۲۰۱۱) و محمدیاری و همکاران در سال ۱۳۹۳ اشاره نمود. که در مطالعات خود در خصوص شاخص NDVI و تغییرات اقلیمی به این نتیجه دست یافتند که NDVI پیوند نزدیکی با بارش داشته و این پیوند به‌صورت خطی و غیرخطی می‌باشد (محمدیاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ ابوالفتحی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Mirmosavei & Kareimeh, 2013). فرج زاده و کریمی در سال ۱۳۹۲ در مطالعات خود مقادیر شاخص NDVI را برای گیاهان شهری و پوشش تنک بین (۵/۱-۰/۰)، برای مناطق گیاهی معمولی و نیمه متراکم (۵/۰-۰/۶) و برای مناطق گیاهی بسیار متراکم و انبوه (۶/۰-۰/۷) تعریف کردند. همچنین طبق مطالعات آن‌ها پوشش آب، برف و یخ مقادیر NDVI منفی داشته و خاک‌ها نیز مقادیر کمتر از ۰/۰۵ را به خود اختصاص می‌دهند (فرج زاده و کریمی، ۱۳۹۲).

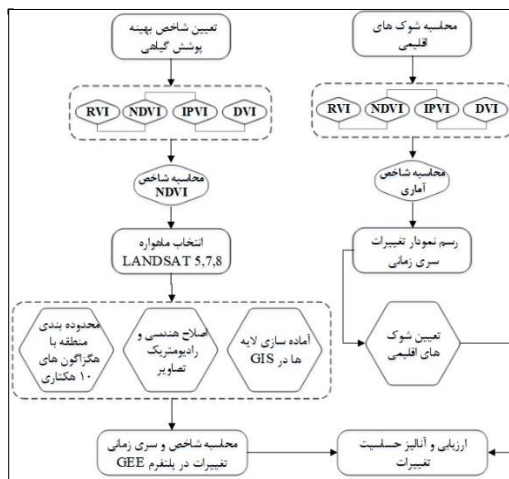
به‌طور کلی خلأ مطالعاتی قابل اشاره در تحقیقات بررسی‌شده را می‌توان توجه کمتر محققان در خصوص ارتباط این تغییرات با وضعیت سلامت و پایداری اکوسیستم‌ها دانست. بررسی‌ها نشان داد مطالعات بسیار کمی در خصوص تعیین آستانه تغییرات شاخص پوشش گیاهی در مواجهه با شوک‌های اقلیمی وجود دارد. تعیین این آستانه‌ها می‌تواند راهکار مناسبی جهت ارزیابی وضعیت اکوسیستم، تبعات ناشی از شوک‌های اقلیمی و برگشت‌پذیر بودن یا اختلال در اکوسیستم را ارائه نماید. ارزیابی و دسترسی به این اطلاعات کمک شایانی در مدیریت پایدار اکوسیستم‌های شهری و طبیعی نموده به‌طوری‌که میزان اختلال شناسایی و تأثیر آن بر پایداری اکوسیستم‌های شهری قابل‌ردیابی خواهد بود. از این مطالعه باهدف بهبود درک ما از پویایی پوشش گیاهی در شهر جنگلی گرگان طی سال ۱۹۸۵-۲۰۲۰ میلادی در مقابل تنش‌های اقلیمی انجام شد. اهداف اصلی تحقیق شامل:

- ❖ بررسی تغییرات زمانی - مکانی شاخص NDVI
- ❖ ارزیابی تأثیر تنش‌های اقلیمی بر روی پوشش گیاهی
- ❖ بررسی مقاومت پوشش گیاهی در برابر تغییرات اقلیمی و انعطاف‌پذیری پس از اختلال‌ها
- ❖ تعیین آستانه تغییرات شاخص NDVI

## روش پژوهش

تحقیق حاضر یک تحقیق با ماهیت پژوهش مقایسه‌ای و پایش محور است. در این مطالعه تلاش بر این است تا با بررسی وضعیت تغییرات پوشش گیاهی در واحدهای منطقه‌ای (بررسی در مقیاس ۱۰ هکتاری هر شش‌ضلعی) مقایسه و روند زمانی و فضایی تعیین گردد. در این مطالعه پس از کمی‌سازی شاخص پوشش گیاهی در هر واحد شش‌وجهی در مقیاس‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰ هکتاری از هر مقیاس تعداد ۲۰ نمونه به روش تصادفی انتخاب و تغییرات شاخص پوشش گیاهی در آن‌ها بررسی شد. برای انتخاب بهترین مقیاس شش‌وجهی، داده‌های تجمیعی آن‌ها با نقشه اصلی مطابقت داده شد. نتایج نشان داد بالاترین همبستگی، با داده‌های اصلی در مقیاس ۱۰ هکتار می‌باشد. بنابراین واحد ۱۰ هکتاری برای ارزیابی و نقشه‌سازی‌ها و همچنین محاسبه شاخص NDVI انتخاب شد. علت انتخاب شش‌وجهی به این دلیل می‌باشد که این شکل هندسی بیشترین مناطق را پوشش داده و مشکلات و گپ‌های فی‌مابین سایر اراضی هندسی مثل دایره و بیضی را ندارد. در ادامه نتایج سری زمانی داده‌های پوشش گیاهی و انطباق آن با شاخص‌های اقلیمی و آب‌وهوایی ارتباط تغییرات شاخص پوشش گیاهی و حساسیت آن در مقابل شوک‌های اقلیمی و تغییرات آب‌وهوایی مورد ارزیابی و تفسیر بصری قرار گرفت. در ادامه با توجه به هدف تحقیق که بررسی اثرات تغییرات شاخص پوشش گیاهی در مواجهه با تغییرات و شوک‌های اقلیمی بوده و به دنبال روند احیا این شاخص در اکوسیستم می‌باشد روند تغییرات شاخص‌ها بررسی شد. برای رسیدن به این امر ابتدا شاخص NDVI از میان شاخص‌های بهینه پوشش گیاهی بر اساس نظرات پلن خبرگی از میان شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی (RVI, NDVI, IPVI, DVI) انتخاب و فرایند محاسبه آن به صورت سری زمانی در سامانه GEE انجام شد. به موازات آن شوک‌های اقلیمی عناصر اصلی شامل دما، بارش و طوفان طی روند تاریخی ۳۵ ساله محاسبه و شاخص‌های آماری میانگین و انحراف معیار برای آن‌ها محاسبه و روند تغییرات آستانه‌ها مشخص گردید. تعیین آستانه‌ها با محاسبه شاخص‌های آماری میانگین در طول دوره مطالعاتی و جمع و تفریق جبری آن با انحراف از معیار داده‌ها برای مشخص نمودن حد بالایی و پایینی آستانه انجام شد. در ادامه منطقه به ۴۳۶ شش‌ضلعی تقسیم و شاخص NDVI برای هر کدام از شش‌ضلعی‌ها محاسبه و مدل‌سازی گردید. این محاسبات برای سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ به عنوان سال‌های منتخب و متأثر از شوک‌های اقلیمی انجام شد. نتایج پلات‌های اقلیمی و تغییرات آب‌وهوایی نشان می‌دهد در سال‌های پیش از ۱۹۸۵، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ تغییرات شدید در عناصر اقلیمی و فاکتورهای اقلیمی حادث شده است. بنابراین این سال‌ها را می‌توان به عنوان دوره‌هایی مدنظر قرار داد که شوک اقلیمی اتفاق افتاده است. در ادامه از طریق مقایسه نتایج توزیع NDVI در نرم‌افزار GIS و تغییرات آن طی دوره مطالعاتی و همچنین تطبیق روند تغییرات شاخص NDVI با محاسبات اقلیمی از طریق نمودارهای سری زمانی رسم شده ارزیابی حساسیت شاخص پوشش گیاهی به تغییرات اقلیمی در طول دوره مطالعاتی ارزیابی شد. در خاتمه نیز برای تحلیل روند تغییرات سری زمانی شاخص پوشش گیاهی و مقایسه رفتار تغییرات آن و همچنین تعیین خشک‌سالی‌های حادث شده در منطقه، شاخص خشک‌سالی پالمر محاسبه و روند خشک‌سالی در منطقه با پویایی تغییرات NDVI مقایسه شد. شکل شماره ۱ فرایند انجام تحقیق را نشان می‌دهد.

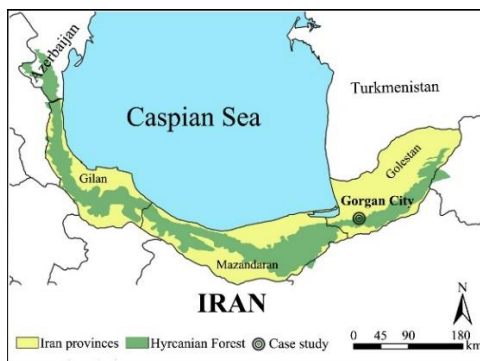




شکل ۱. فلویدیاگرام فرایند انجام تحقیق

### محدوده مورد مطالعه

گرگان یکی از شهرهای جنگلی شمال ایران بوده که آب‌وهوای معتدل دارد. دارای اقلیم بسیار متنوع بوده که کوه، جنگل و چمنزار، جلگه و دشت، بیابان و شوره‌زار، دریا و خلیج، رودخانه و تالاب و زمین کشاورزی را شامل می‌شود. مجاورت جنگل‌های هیرکانی با شهر گرگان این شهر را به یکی از شهرهای مهم از نظر اکولوژی و محیط‌زیست بدل کرده است. جنگل‌های هیرکانی نوار سبزی است که از جلگه گرگان تا قسمتی از کشور آذربایجان کشیده شده است (شکل شماره ۲).



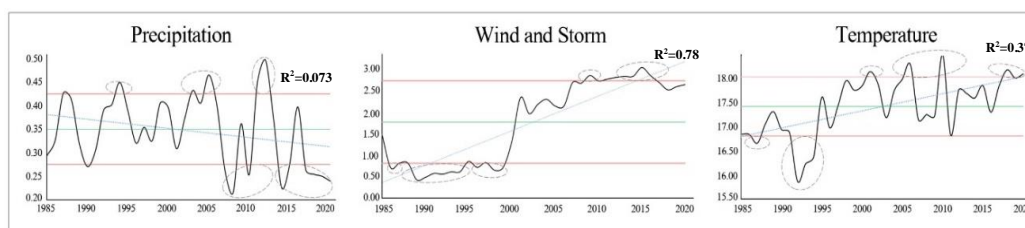
شکل ۲. معرفی منطقه مطالعاتی شهر جنگلی گرگان

شواهد علمی نشان می‌دهند که سابقه تاریخی این جنگل‌ها به دوران سوم زمین‌شناسی (ژوراسیک) یا همان عصر دایناسورها بازمی‌گردد. اهمیت این سابقه طولانی زمانی آشکار می‌شود که بدانیم هم‌زمان با عصر یخبندان، به‌غیر از جنگل‌های هیرکانی که به دلیل قرار گرفتن بین رشته‌کوه‌های البرز و دریای خزر از اقلیم معتدل‌تری برخوردار بودند، جنگل‌های پهن‌برگ به‌جز تعداد معدودی نبود شدند؛ از همین رو است که جنگل‌های هیرکانی را مادر جنگل‌های جوان اروپا و شمال آمریکا می‌دانند. جنگل‌های هیرکانی ایران جزء ۲۰۰ منطقه اکولوژیکی معرفی شده توسط بنیاد جهانی حمایت از حیات‌وحش می‌باشد. این جنگل‌ها در مقابل تغییرات آب‌وهوایی بسیار مقاوم هستند به‌گونه‌ای که میلیون‌ها سال است به بقای خود ادامه می‌دهند. در عصر یخبندان این جنگل‌ها کوچک‌تر شدند اما با پایان عصر یخبندان دوباره

گسترش یافتند اما امروزه به دلیل نرخ بالای تخریب‌های انسانی و توسعه‌های شهری در معرض تهدید قرار گرفته‌اند (Bahram et al., 2012; Poorazimy et al., 2017; Jahani & Saffariha, 2021)

### محاسبه زمانی وقوع شوک‌های اقلیمی

به‌منظور تعیین وقوع شوک‌های اقلیمی ابتدا ارزیابی جامعی از شاخص‌های تأثیرگذار بر اکولوژی شهری انجام و شاخص‌های بارش، درجه حرارت و طوفان به‌عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین شاخص‌ها بر سلامت پوشش گیاهی و همچنین شاخص‌های اصلی و محرک تغییرات پوشش گیاهی انتخاب شدند. در ادامه روند ۳۵ ساله شاخص‌ها بررسی و سری زمانی این تغییرات مطابق شکل ۳ بررسی گردید.



شکل ۳. روند تغییرات شاخص‌های هیدروکلیماتولوژی

بر اساس ارزیابی انجام‌شده از نمودارهای شکل شماره ۳ شوک‌های اقلیمی بر اساس محاسبه میانگین و انحراف معیار مشخص گردید. تشخیص شوک‌ها، بر اساس حد آستانه بالاتر یا پایین‌تر از تفاضل میانگین از انحراف معیار، و جمع میانگین با انحراف معیار مشخص می‌شود. بازه‌هایی که از این محدوده خارج شده‌اند به‌عنوان شوک اقلیمی تعیین شده و به‌صورت خطوط نقطه‌چین دایره در شکل نمایان است. معمولاً سال‌های بعد از شوک از منظر اکولوژی برای بررسی پایداری، احیا و بازگشت‌پذیری اکوسیستم‌ها مهم بوده و برای تعیین آستانه‌ها سال‌های قبل و بعد از شوک موردتوجه است.

### محاسبه شاخص NDVI

ماهواره لندست دارای طولانی‌ترین رکورد مداوم رصدهای ماهواره‌ای بوده و استفاده از آن‌ها در مطالعات بسیار کاربردی است. این ماهواره یک منبع ارزشمند برای نظارت بر تغییرات جهانی و منبع اصلی رصدهای زمین بوده که با ارائه تصاویر با وضوح متوسط در تصمیم‌گیری‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد (Chander et al., 2009). در این تحقیق حسب نیاز از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده و شاخص NDVI بر اساس فرمول‌های ذیل از طریق کد نویسی در پلتفرم GEE محاسبه و نتایج آن ارائه شد. از منظر ریاضی NDVI به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NDVI شاخص پوشش گیاهی نرمال شده، RED و NIR بازتاب طیفی حسگرها در مناطق مرئی و NIR می‌باشند. به‌طور کلی مقادیر NDVI بین ۱- تا ۱+ متغیر می‌باشد. مقادیر NDVI برای آب‌ها منفی، برای سطوح سنگی و بتنی نزدیک به صفر و برای پوشش گیاهی از جمله گیاهان، درختچه‌ها، علف‌ها و جنگل‌ها مثبت و نزدیک به ۱ می‌باشد (Jones & Vaughan, 2010; Guha et al., 2022). در تحقیق حاضر از داده‌های NDVI ماهواره‌های لندست ۵، ۷ و ۸ در سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ مورداستفاده قرار گرفت. داده‌ها پس از کد نویسی از طریق پلتفرم GEE محاسبه و نتایج ارائه شد. پلتفرم GEE رویکردی نوین در پردازش تصاویر ماهواره‌ای بوده که با استفاده از ابزار و زبان برنامه‌نویسی

کمک شایانی به محققین در انجام تحقیقات نموده است. سامانه GEE یک پلتفرم محاسبات رایانش ابری است که برای ذخیره و پردازش مجموعه داده‌های عظیم برای تجزیه و تحلیل انواع مختلف داده‌های مکانی از جمله تصاویر ماهواره‌ای طراحی شده است (Mutanga & Kumar, 2019) و کاربردهای مختلف آن در جامعه سنجش از راه دور، به سرعت در حال توسعه می‌باشد (Amani et al., 2020). این سامانه محبوب‌ترین پلت فرم محاسبات ابری در علم سیستم زمین است و برای تجزیه و تحلیل مشکلات زیست‌محیطی در مقیاس جهانی رایج شده است (Zhao et al., 2021). این پلتفرم به طور گسترده برای پردازش داده‌های مربوط به تغییرات محیطی، از جمله کشاورزی (Lobell et al., 2015; Zhou et al., 2019; Q. Huang et al., 2018)، آب (Shelestov et al., 2017)، Teluguntla et al., 2018; Wang et al., 2019; Midokisa et al., 2017; Azzari & Lobell, 2017; Zurqani (پوشش زمین/کاربری زمین (DeVries et al., 2020) (Kakooei & Baleghi, 2020) تغییرات آب‌وهوا (Hao et al., 2018) بلایا (Bullock et al., 2020; Chen et al., 2017) و شهرنشینی (Goldblatt et al., 2018; Liu et al., 2018) و همچنین زمینه‌های دیگر (Gorelick et al., 2017) استفاده می‌گردد. Gong et al., 2020) برای محاسبه سری زمانی شاخص NDVI حدود ۹۸۰ تصویر از انواع مختلف ماهواره لندست فراخوانی و مبنای محاسبات قرار گرفت. در ادامه برای هر سال از طریق ۲۸ تصویر شاخص NDVI محاسبه و میانگین شاخص در طول سال مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. فراخوانی داده‌ها و کدهای محاسباتی در پلتفرم GEE بر اساس فرمول محاسبه NDVI به شرح ذیل انجام شد (شکل شماره ۴).

```

1 var isfahan = table;
2 Map.centerObject(isfahan);
3 var landsat = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
4 .filterBounds(isfahan)
5 .filterDate('2013-01-01', '2021-01-01');
6 print(landsat);
7 var ndvi = landsat.map(function(img){
8   var index = img.normalizedDifference(['B5', 'B4']);
9   return index.rename('ndvi')
10  .copyProperties(img, ['system:time_start',
11    'system:time_end']);
12 });
13 var chart = ui.Chart.image.series(
14   ndvi, isfahan, ee.Reducer.mean(), 30, 'system:time_start'
15 ).setChartType('ScatterChart')
16 .setOptions({
17   title : 'ndvi changes over a year',
18   vAxis : {title : 'ndvi values'},
19   hAxis : {title : 'date'},
20   lineWidth : 1,
21   pointSize : 2,
22   series : {
23     0 : {color : 'red'}
24   }
25 });
26 print(chart);

```

شکل ۴. کد نویسی جاوا در سامانه GEE/محاسبه شاخص پوشش گیاهی NDVI

برای تعیین کمی عدم قطعیت NDVI، روش بیزی به‌عنوان یک روش مفید شناخته می‌شود؛ زیرا چگالی‌هایی را ارائه می‌دهد که می‌توانند از طریق مدل‌ها منتشر شوند. عدم قطعیت مقادیر NDVI با استفاده از تحلیل بین کالیبراسیون بیزی محاسبه شد (Pinzon & Tucker, 2014) و این مجموعه داده خطای  $\pm 0.15$  واحد NDVI را برای ۳۵ سال نشان می‌دهد. این عدم قطعیت اندازه‌گیری محافظه‌کارانه مقادیر NDVI نشان می‌دهد که تشخیص تغییرات مکانی و زمانی در پویایی پوشش گیاهی با استفاده از این مجموعه داده لندست ممکن و قابل قبول است.

## محاسبه شاخص اقلیمی پالم

کاربرد شاخص‌های خشک‌سالی در خلاصه‌سازی بسیاری از پارامترهای مؤثر در خشک‌سالی در برنامه‌ریزی‌ها مفید است. همچنین توسط شاخص‌های خشک‌سالی می‌توان شدت و وسعت خشک‌سالی را به کمیت در آورد و ارزیابی کرد (Heim,2000). شاخص خشک‌سالی پالم ترکیبی از بارندگی رخ، داده ذخیره رطوبتی و نیاز رطوبتی است که بر اساس محاسبه بیلان آبی معرفی شده است. در محاسبات این شاخص علاوه بر داده‌های درجه حرارت برای محاسبه تبخیر و تعرق و بارندگی، نیاز به داده‌های رطوبت خاک می‌باشد. از آنجاکه شاخص شدت دوره‌های خشک پالم بر اساس معادلات بیلان آبی با نگاهی به گذشته به صورتی ارائه شده که بنیان آن بر روابط بین عرضه و تقاضای رطوبت استوار است؛ لذا می‌توان اظهار داشت که مقادیر محاسبه شده برای این شاخص، یک اندازه کمی واحدی را از شدت دوره‌های خشک به دست می‌دهند. به جهت حجم بالای معادلات و محاسبات شاخص پالم و عدم امکان ارائه همه در یک مقاله، گام‌های اساسی محاسبه PDSI در این مقاله فقط نام‌برده شده‌اند که به ترتیب شامل: محاسبات هیدرولوژیکی، محاسبه ضرایب اقلیمی، محاسبه مقادیر CAFEC (شرایط مناسب اقلیمی برای شرایط موجود) محاسبه شاخص آنومالی، رطوبت و محاسبه شدت خشک‌سالی است که برای مطالعه بیشتر به مرجع انصاری و همکاران ۱۳۸۷ و یا همیم، ۲۰۰۰ مراجعه شود. بر اساس معادلات شاخص پالم کد نویسی در پلتفرم GEE مطابق شکل شماره ۵ انجام و نتایج مشخص گردید. برای تفسیر نتایج حاصله از جدول شماره ۱ استفاده شده است.

```

1 Map.centerObject(geometry);
2 Map.addLayer(geometry);
3 var pds = ee.ImageCollection('IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE')
4 .filterBounds(geometry)
5 .filterDate('1985-01-01','2021-01-01')
6 .select('pdsi')
7 .map(function(img){
8   return img.multiply(0.01)
9   .copyProperties(img,['system:time_start','system:time_end']);
10 });
11 var chart = ui.Chart.image.series(pds, geometry,
12 ee.Reducer.mean(), 1000, 'system:time_start');
13 print(chart);

```

شکل ۵. کد نویسی جاوا در سامانه GEE/ محاسبه شاخص اقلیمی پالم

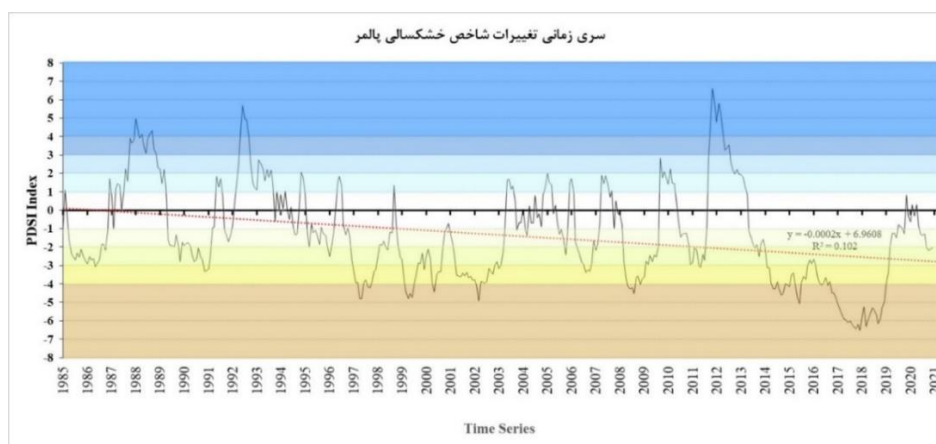
جدول ۱. محدوده شاخص اقلیمی پالم

درجه‌بندی خشک‌سالی	محدوده PDSI
خشک‌سالی بسیار شدید	$PDSI \leq -4$
خشک‌سالی شدید	$-4 < PDSI \leq -3$
خشک‌سالی متوسط	$-3 < PDSI \leq -2$
خشک‌سالی خفیف	$-2 < PDSI \leq -1$
نزدیک به نرمال	$-1 < PDSI \leq +1$
ترسالی خفیف	$+1 < PDSI \leq +2$
ترسالی متوسط	$+2 < PDSI \leq +3$
ترسالی شدید	$+3 < PDSI < +4$
ترسالی بسیار شدید	$+4 \leq PDS$

## یافته‌ها

## شاخص و عناصر اقلیم

نتایج محاسبه ماهانه شاخص شدن خشک‌سالی پالم در دوره زمانی ۳۵ ساله برای گرگان در نمودار شکل شماره ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از پایش تغییرات اقلیمی بر اساس شاخص پالم در گرگان نشان می‌دهد که در طی ۳۵ دوره آماری (۱۹۸۵-۲۰۲۰) منطقه مطالعاتی در اکثر سال‌ها با خشک‌سالی مواجه است. در غالب ماه‌های سال خشک‌سالی در منطقه حاکم شده و رطوبت نسبت به نرمال در ماه‌ها مشهود هست. روند تغییرات رسم شده در شکل شماره ۶ نیز به‌وضوح نرخ حرکت به سمت خشک‌سالی را در منطقه مشخص می‌نماید. شدیدترین نوسان اقلیمی و خشک‌سالی حاکم در منطقه در سال ۲۰۱۸ و ماه‌های اکتبر تا دسامبر این سال (مهر تا آذر) است.



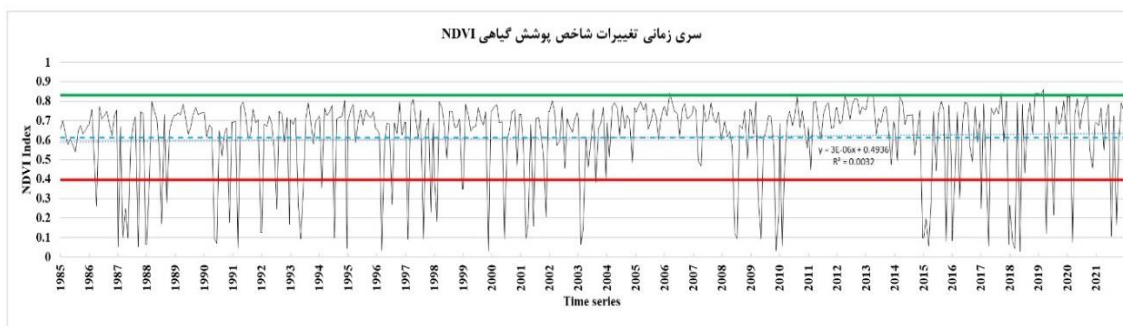
شکل ۶. تغییرات سری زمانی شاخص خشک‌سالی پالم سال ۱۹۸۵-۲۰۲۰

تحلیل و بررسی روند تغییرات خشک‌سالی‌ها در طول دوره آماری نشان داد که در بعضی از مواقع دوره‌های خشک با تداوم بیشتر از چند سال نیز به وقوع پیوسته است، در صورتی که بارندگی‌های مناسبی در بعضی از ماه‌های این سال‌ها اتفاق افتاده است (شکل ۳). اما به‌طور کلی تغییرات شاخص پالم با شوک‌های ناشی از عناصر اقلیمی همبستگی کاملی در منطقه مطالعاتی دارد. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی در منطقه از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ در منطقه حاکم است. در این دوره نوسانات بارندگی، دما و طوفان نیز بیشترین تغییرات را دارد. روند نمودار عناصر اقلیمی عنوان شده نیز سیر تغییر اقلیم منطقه به خشک‌سالی را تأیید می‌نماید. نتایج حاصل از پایش خشک‌سالی نشان می‌دهد ۲۷۰ ماه از دوره مطالعه، منطقه با تنش خشک‌سالی اقلیمی مواجه بوده و از این میان ۵۷ ماه از طول دوره مطالعاتی منطقه با تنش خشک‌سالی شدید و بسیار شدید مواجه است. این تنش خشک‌سالی می‌تواند از تبعات افزایش ۳ درجه‌ای میانگین دما در منطقه ناشی شده باشد. همچنین افت ۵۰ درصدی بارش در منطقه نیز بر روندهای خشک‌سالی تأثیر بسزایی داشته است. متأسفانه نتایج بررسی در دهه‌های اخیر تداوم خشک‌سالی در منطقه را تأیید می‌نماید که به‌عنوان یک عامل استرس در منطقه نگرانی‌های زیست‌محیطی را برای این منطقه کشور دوچندان می‌نماید. بدین سبب که حضور جنگل‌های هیرکانی و تنوع گونه‌ای در این اقلیم بالا بوده و شوک‌های اقلیمی می‌تواند روند اکوسیستم را با اختلال مواجه نماید. مواجه با چنین اختلال‌هایی اکوسیستم‌ها را از مسیر پایدار خارج کرده انرژی اکوسیستم می‌بایست در نگهداری اکوسیستم در وضعیت خود یا بازیابی صرف گردد. افزایش طوفان‌ها و سرعت باد در منطقه نیز اغتشاش ناشی از تغییرات اقلیمی را تأیید

می‌نماید. از این رو در ادامه بررسی روند تغییرات شاخص NDVI به‌عنوان یک اندیکاتور حساس در مقابل تغییرات و تنش‌های اقلیمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج بررسی‌ها ارائه می‌گردد.

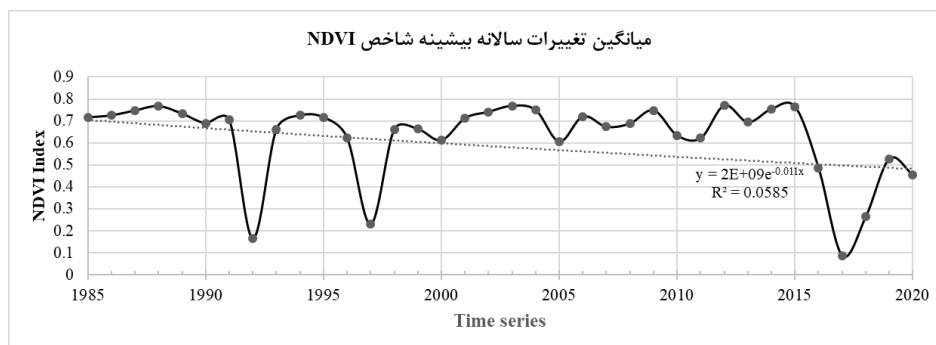
#### تغییرات سری زمانی شاخص پوشش گیاهی NDVI

به‌منظور بررسی نتایج شاخص پوشش گیاهی NDVI پس از مرتب‌سازی داده‌ها به‌صورت سری زمانی (سری زمانی ماهانه) ارزیابی جامعی انجام شد. مطابق بررسی‌ها در مجموع از ۴۲۰ ماه مورد ارزیابی در ۷۰ ماه سال شاخص NDVI در پایین حد آستانه تغییرات قرار داشته است. بخش عمده این قرارگیری در حد پایینی آستانه را می‌توان مرتبط با تغییرات فصل عنوان داشت. این تغییرات به صورتی است که ۲۴ ماه از طول کل دوره مطالعاتی شاخص در فصل زمستان در حد پایینی آستانه قرار گرفته است که تا حدودی به سبب خزان بودن پوشش گیاهی در این فصل قابل‌پذیرش است. اما نکته نگران‌کننده قرارگیری ۳۱ ماه از طول دوره مطالعاتی در پایین حد آستانه قابل‌پذیرش در فصول سبز و غیر خزان‌کننده است. عمده این ماه‌ها فصول بهار و تابستان را شامل شده فصولی که انتظار می‌رود پوشش گیاهی در حداکثر حالت خود باشد. برای بررسی دقیق‌تر و ارزیابی حساسیت تغییرات شاخص پوشش گیاهی نسبت به شاخص‌های اقلیمی ماه‌های مورد اشاره در انطباق با تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار گرفت (شکل شماره ۷).



شکل ۷. تغییرات سری زمانی شاخص پوشش گیاهی NDVI سال ۱۹۸۵-۲۰۲۰

بر اساس تفسیر انجام‌شده حسب شاخص پالمر از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۱۹ وضعیت شاخص خشک‌سالی پالمر در محدوده خشک‌سالی بسیار شدید قرار گرفته است. در نتیجه این نوسانات اقلیمی و با توجه به حساسیت این شاخص از سال ۲۰۱۵ یعنی با یک سال تأخیر زمانی حد پایینی آستانه تعادلی پوشش گیاهی را تجربه نموده است. همچنین این همبستگی در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۰۲ و ۱۹۹۷ نیز برقرار می‌باشد. بنابراین می‌توان عنوان داشت شاخص پوشش گیاهی با تغییرات و نوسانات اقلیمی وابسته بوده و حساسیت بالایی در مقابل تغییرات از خود نمایان می‌سازد. نمودارهای شکل شماره ۷ و ۸ این همبستگی را با شاخص‌های اقلیمی به‌وضوح نشان می‌دهد.

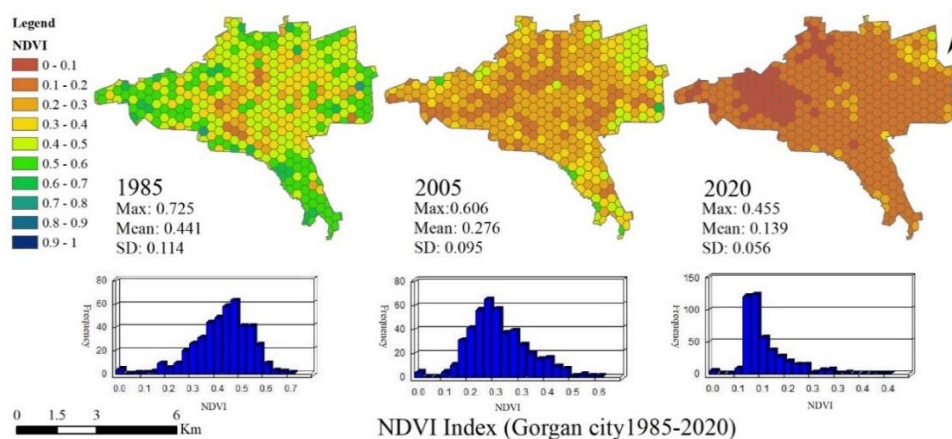


شکل ۸. میانگین تغییرات سالانه بیشینه شاخص NDVI

نکته حاضر اهمیت در این بخش این است که در سال‌هایی که تغییرات شاخص NDVI در حد پایینی آستانه قرار دارد بیشترین شوک‌های اقلیمی و تغییرات دمایی، وقوع طوفان‌های شدید و نوسانات بارش را شاهد هستیم. به‌طور کلی آستانه به‌عنوان مرزی با مقادیر و ارزش‌های مختلف در شرایط متفاوت تعریف می‌گردد که با اعمال فشار بر یک سیستم و عبور وضعیت فعلی آن از حد موجود آستانه مجاز، سیستم در برگشت به شرایط نخست و تعادلی خود ناتوان می‌شود. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌گردد پس از عبور از آستانه‌ها غالباً ثبات و قرارگیری وضعیت شاخص پوشش گیاهی NDVI در محدوده تعادلی سخت شده و اکوسیستم مدام در حال صرف انرژی برای بازیابی خود یا قرارگیری در وضعیت ثبات جدید می‌باشد. این فرایند در ارزیابی وضعیت اکوسیستم‌ها بسیار بااهمیت می‌باشد به‌طوری‌که اکوسیستم در سال‌هایی که در محدوده موردپذیرش آستانه قرار گرفته است عملکرد بهتری داشته و تولیدات اولیه، خدمات اکوسیستمی در آن سال‌ها در شرایط مطلوبی قرار گرفته است.

#### تغییرات منطقه‌ای شاخص پوشش گیاهی NDVI

تغییرات منطقه‌ای پوشش گیاهی بر مبنای شش ضلعی‌های ۱۰ هکتاری بیان‌کننده توزیع فضایی تغییرات شاخص NDVI است. مطابق آنچه گفته شد حساسیت شاخص پوشش گیاهی با تغییر پارامترهای اقلیمی دارای همبستگی بوده و سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ به‌عنوان سال‌های منتخب پس از شوک‌های اقلیمی جهت بررسی وضعیت NDVI انتخاب شدند. مطابق نتایج شکل شماره ۹ تغییر شاخص NDVI در دوره مطالعه بسیار محسوس است. شکل شماره ۹ توزیع فضایی نحوه تغییرات در هر شش ضلعی را مشخص می‌نماید. بر این اساس میانگین سالانه NDVI از عدد ۰/۴۴۱ در سال ۱۹۸۵ به میزان ۰/۲۷۶ در سال ۲۰۰۵ افت پیدا کرده است. همچنین با ادامه روند نزولی میزان شاخص NDVI در سال ۲۰۲۰ به رقم ۰/۱۳۹ رسیده است. به‌صورت خطی افت بیش از ۳ برابری در طول دوره بررسی اتفاق افتاده که عمدتاً بر اثر تغییرات کاربری اراضی و شوک‌های اقلیمی است. با بررسی‌های بیشتر مشخص می‌گردد حداکثر شاخص NDVI در سال ۱۹۸۵ برابر با ۰/۷۲۵ بوده که این رقم در سال ۲۰۲۰ معادل ۰/۴۵۵ می‌رسد. این تغییرات در میزان حداکثری نیز نشان‌دهنده حضور عامل استرس‌زا در منطقه هست که منجر به تنش در پوشش گیاهی شده است. همچنین به سبب تغییرات کاربری اراضی در منطقه تخریب فضای سبزه‌های طبیعی نیز حادث شده است.



شکل ۹. توزیع فضایی تغییرات شاخص NDVI

شاخص پوشش گیاهی بر مبنای شش ضلعی‌ها نیز در سال ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ دارای توزیع نرمال و تقریباً نرمال بوده؛ اما در سال ۲۰۲۰ نمودار از وضعیت نرمال خارج و چولگی به سمت شاخص پوشش گیاهی تحت استرس و یا حتی پوشش‌های تنک میل کرده است. تفسیر بصری انجام‌شده بر روی شاخص پوشش گیاهی در سال ۱۹۸۵ وضعیت پوشش گیاهی در محدوده جنوبی و غربی منطقه را در وضعیت با پوشش گیاهی مناسب متراکم و مرتعی و در لبه‌ها پوشش جنگلی را تأیید می‌نماید. اما در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ این پوشش دست‌خوش تغییر شده و عمدتاً تبدیل به فضای کشاورزی و مراتع فقیر شده است. به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۲۰ وضعیت منطقه وضعیت بحرانی پوشش گیاهی را نمایان کرده است. شاخص پوشش گیاهی در مناطق مرکزی شهر نیز از وضعیت نسبتاً مطلوب در سال ۱۹۸۵ به وضعیت بحرانی و تقریباً فاقد پوشش گیاهی متراکم و بدون استرس در سال ۲۰۲۰ رسیده است. به‌طور کلی عمده‌ترین دلیل تغییرات در شاخص پوشش گیاهی شهر گرگان را می‌توان در نوسانات و تنش‌های اقلیمی، توسعه شهری، تغییر کاربری اراضی از مرتع و جنگل به اراضی کشاورزی و همچنین توسعه و نفوذ مناطق شهری و زیرساخت‌های گردشگری در محدوده‌های جنگلی و طبیعی عنوان داشت. از سویی دیگر شوک‌های اقلیمی و تنش‌های آب‌هوایی وضعیت تعادل در شاخص پوشش گیاهی NDVI در منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند و احتمال احیا و بازگشت اکوسیستم به وضعیت اولیه را با بحران روبرو نموده‌اند. نتیجه اختلال‌های اشاره‌شده کاهش میزان رزلینس و ریزستنس در منطقه بوده که اکوسیستم را به سمت وضعیت‌های جایگزین یا عبور از آستانه یا فرارگیری در یک وضعیت تعادلی جدید هدایت می‌نماید. همچنین ادامه فرایندهای اختلالی امکان برقرار شدن فرایندهای جایگزینی اکوسیستم و عبور اکوسیستم از وضعیت قبلی به سمت یک اکوسیستم جدید را دارد. پیش‌مطابق بررسی شاخص‌ها پیش‌بینی می‌گردد منطقه گرگان در مرز چنین تحولات اکولوژیکی قرار داشته و اکوسیستم تاریخی منطقه با شرایط اقلیمی و اختلال‌های انسانی به سمت اکوسیستم‌ها جدید در حال حرکت است.

## بحث

نظر به اینکه منطقه مطالعاتی طی دوره مطالعه با نوسانات شاخص‌های اقلیمی و به‌تبع آن تغییر در پوشش گیاهی مواجه بوده است موجب شده شاخص پوشش گیاهی در این منطقه با اختلال مواجه گردد. برای بررسی حساسیت و ارتباط شاخص پوشش گیاهی NDVI با تغییرات اقلیمی و نوسانات آب‌وهوایی مطالعات متنوعی انجام‌شده است. در مطالعه حاضر نتایج شاخص خشک‌سالی پالمر نشان می‌دهد طی دوره آماری (۱۹۸۵-۲۰۲۰) منطقه مطالعاتی با



خشک‌سالی مواجه می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی منطقه از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ است. در مجموع از ۴۲۰ ماه مورد ارزیابی در ۷۰ ماه، شاخص NDVI در پایین حد آستانه تغییرات قرار دارد. از این میان قرارگیری ۳۱ ماه از طول دوره مطالعاتی در پایین حد آستانه قابل‌پذیرش در فصول سبز و غیر خزان‌کننده می‌باشد که به لحاظ اکولوژیکی نگران‌کننده است. توزیع پراکنش شاخص پوشش گیاهی بر مبنای هگزگون نیز در سال ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ دارای توزیع نرمال و تقریباً نرمال بوده؛ اما در سال ۲۰۲۰ نمودار از وضعیت نرمال خارج و چولگی به سمت شاخص پوشش گیاهی تحت استرس و یا حتی پوشش‌های تنک میل کرده است. نتایج مطالعات حاضر با مطالعات Visentr Serrano و همکاران در سال ۲۰۱۳ منطبق بوده و ارتباط پوشش گیاهی NDVI با تغییرات اقلیمی را تأیید می‌نماید. همچنین نتایج این پژوهش با مطالعات Alwesabi 2012; Xiai & Moody, 2005; Yan et al., 2001 و منطبق است. به‌گونه‌ای که مطالعه حاضر و مطالعات یادشده همگی تأثیرپذیری شاخص پوشش گیاهی از نوسانات اقلیمی و بارش را با اختلاف‌زمانی یک‌ساله تأیید می‌نمایند. مطالعات انجام‌شده ابوالفتحی در سال ۱۳۹۴ و میر موسوی در سال ۲۰۰۱ نیز تأثیرپذیری شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و NDVI را تأیید می‌نمایند.

### نتیجه‌گیری

در اکوسیستم‌های شهری - جنگلی با فضاهای سبز شهری و مرتعی با توجه به حساسیت آن‌ها عملکرد اکولوژیکی از طریق تخریب و اختلال صورت می‌گیرد. این تغییر عملکرد در پوشش گیاهی گاهی غیرقابل‌برگشت بوده و ممکن است توان اکوسیستم و عملکرد اکولوژیکی آن را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین توسعه‌های شهری، عدم مدیریت فضاهای سبز شهری و جنگلی موجب شکنندگی و تخریب اکوسیستم می‌گردد؛ بنابراین توجه به مدیریت صحیح و بازیابی و احیا فضاهای سبز شهری و جنگل‌ها و مراتع حاشیه آن بسیار مهم است. امروزه پاسخ پوشش گیاهی به تأثیرات و آشفتگی‌های محیطی مرکز توجه مطالعات علمی بوده است. در این میان توجه به تغییرات شاخص‌های اقلیمی و همچنین توسعه شهری به‌عنوان پارامترهای اصلی و مخرب پوشش گیاهی در مرکز توجه دانشمندان قرار گرفته است. این تغییرات به سبب تأثیر مستقیم و سریع بر روی عملکرد اکولوژیکی اکوسیستم‌ها از منظر اکولوژیک از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌طوری‌که ثبات و پایداری اکولوژیکی اکوسیستم‌های شهری - جنگلی و شهری - مرتعی وابسته به سلامت فضاهای سبز می‌باشد. نتایج این مطالعه کمک می‌نماید تا مدیران با شناخت آستانه‌ها برنامه‌های مدیریت خود را برای حفظ و نگهداری فضاهای سبز شهری و همچنین اکوتون‌های جنگلی و مرتعی حاشیه شهر متمرکز نمایند. نتایج این تحقیق نشان داد مناطقی که پوشش گیاهی سبز و به‌صورت متمرکز و متراکم‌تر قرار گرفته است، کمتر تحت تأثیر تنش‌های اقلیمی بوده و تاب‌آوری بیشتری را از خود نشان می‌دهد. اما مناطقی که به سبب تخریب در محدوده‌های شهری به‌صورت لکه‌ای و جزیره‌ای قرار گرفته‌اند بیشتر تحت تأثیر تنش‌های اقلیمی و تخریب قرار داشته و توان تحمل کمتری را در مقابل عوامل تخریب از خود نشان می‌دهند. به‌طورکلی اکوسیستم‌های شهری - جنگلی در طی گذشت زمان و در نتیجه برهم‌کنشی پویا میان فرایندهای اجتماعی - اقتصادی و بیوفیزیکی رشد و تکامل یافته و تاب‌آوری اکولوژیکی این اکوسیستم‌ها تحت تأثیر چنین برهم‌کنش‌هایی قرار دارد. در نواحی شهری، اختلال‌های ایجادشده موجب اختلال در عملکردهای اکولوژیک و بیوفیزیکی شده و کاهش تاب‌آوری سیستم را به دنبال دارد؛ بنابراین تقویت شبکه‌های اکولوژیک از طریق افزایش به‌هم‌پیوستگی پوشش گیاهی بر پایه اصول اکولوژی منظر، عاملی در جهت حفظ فرایندهای طبیعی و عملکردهای بیوفیزیکی پوشش گیاهی شده و منجر به ارتقا شاخص پوشش گیاهی نیز می‌گردد.

همچنین با ایجاد تعادل میان خدمات انسانی و اکوسیستمی، می‌توان ارتقای تاب‌آوری سیستم در مقابل فشارهای زیست‌محیطی را فراهم آورد.

## تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

## منابع

- ابوالفتحی، خدیجه؛ علی خواه اصل، مرضیه و رضوانی، محمد. (۱۳۹۴). تیپ بندی و ارزیابی مراتع با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) (مطالعه موردی: تحت واحد شهرآباد زیر حوزه آبخیز حبله رود). فصلنامه انسان و محیط‌زیست، ۱۳(۲)، ۴۵-۵۵.
- خوانین‌زاده، علیرضا؛ سرباز، محمد و احمدیان، شادی. (۱۳۹۶). بررسی روند تغییرات فضای سبز در سه دهه گذشته با استفاده از سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: شهر یزد). جغرافیا و توسعه فضای شهری، ۴(۲)، ۹۹-۱۱۵.
- انصاری، حسین و داوری، کامران. (۱۳۸۹). ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی خشک‌سالی با استفاده از شاخص پالم (مطالعه موردی: حوزه‌های آبریز قره قوم و بخشی از حوزه اترک). پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۷(۲)، ۱۴۰-۱۲۵.
- فیروزی، فاطمه؛ طاووسی، تقی و محمودی، پیمان. (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات سری‌های زمانی متغیرهای محیطی (NDVI)، Albedo LST و رطوبت خاک) دشت سیستان در شرق ایران. دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
- محمدیاری، فاطمه؛ پورخیز، حمیدرضا؛ توکلی، مرتضی و اقدر، حسین. (۱۳۹۳). تهیه نقشه پوشش گیاهی و پایش تغییرات آن با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان بهبهان). فصلنامه اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۳(۹۲)، ۲۳-۳۴.
- فرج زاده، منوچهر و کریمی، نعمت‌الله. (۱۳۹۲). مبانی هواشناسی ماهواره‌ای. چاپ اول، تهران: سازمان سمت.

## References

- Alwesabi, M. (2012). *MODIS NDVI satellite data for assessing drought in Somalia during the period 2000-2011*. Student Thesis Series INES.
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., & Parsian, S. (2020). Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326–5350.
- Azzari, G., & Lobell, D. B. (2017). Landsat-based classification in the cloud: An opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 202, 64–74.
- Badapalli, P. K., Kottala, R. B., Madiga, R., & Mesa, R. (2021). Land suitability analysis and water resources for agriculture in semi-arid regions of Andhra Pradesh, South India using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Energy and Water Resources*, 7(4), 1–16.
- Bahram, M., Pölme, S., Köljalg, U., Zarre, S., & Tedersoo, L. (2012). Regional and local patterns of ectomycorrhizal fungal diversity and community structure along an altitudinal gradient in the Hyrcanian forests of northern Iran. *New Phytologist*, 193(2), 465–473.

- Bullock, E. L., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2020). Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 238, 110968.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903.
- Chen, B., Xiao, X., Li, X., Pan, L., Doughty, R., Ma, J., Dong, J., Qin, Y., Zhao, B., & Wu, Z. (2017). A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 104–120.
- Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., & Wang, M. (2019). NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 650, 2051–2062.
- De Keersmaecker, W., Lhermitte, S., Tits, L., Honnay, O., Somers, B., & Coppin, P. (2015). A model quantifying global vegetation resistance and resilience to short-term climate anomalies and their relationship with vegetation cover. *Global Ecology and Biogeography*, 24(5), 539–548.
- DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W., & Lang, M. W. (2020). Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111664.
- Goldblatt, R., Stuhlmacher, M. F., Tellman, B., Clinton, N., Hanson, G., Georgescu, M., Wang, C., Serrano-Candela, F., Khandelwal, A. K., & Cheng, W. H. (2018). Using Landsat and nighttime lights for supervised pixel-based image classification of urban land cover. *Remote Sensing of Environment*, 205, 253–275.
- Gong, P., Li, X., Wang, J., Bai, Y., Chen, B., Hu, T., Liu, X., Xu, B., Yang, J., & Zhang, W. (2020). Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111510.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Guha, S., Govil, H., Taloor, A. K., Gill, N., & Dey, A. (2022). Land surface temperature and spectral indices: A seasonal study of Raipur City. *Geodesy and Geodynamics*, 13(1), 72–82.
- Hao, B., Ma, M., Li, S., Li, Q., Hao, D., Huang, J., Ge, Z., Yang, H., & Han, X. (2019). Land use change and climate variation in the three gorges reservoir catchment from 2000 to 2015 based on the Google Earth Engine. *Sensors*, 19(9), 2118.
- Hossain, M. L., & Li, J. (2021). NDVI-based vegetation dynamics and its resistance and resilience to different intensities of climatic events. *Global Ecology and Conservation*, 30, e01768.
- Huang, Q., Long, D., Du, M., Zeng, C., Qiao, G., Li, X., Hou, A., & Hong, Y. (2018). Discharge estimation in high-mountain regions with improved methods using multisource remote sensing: A case study of the Upper Brahmaputra River. *Remote Sensing of Environment*, 219, 115–134.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6.
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T. M., Bonin, C., Bruelheide, H., & De Luca, E. (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526(7574), 574–577.

- Jahani, A., & Saffariha, M. (2021). Modeling of trees failure under windstorm in harvested Hyrcanian forests using machine learning techniques. *Scientific Reports*, 11(1), 1–13.
- Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications*. edition 1. publisher: Oxford university press.
- Kakooei, M., & Baleghi, Y. (2020). A two-level fusion for building irregularity detection in post-disaster VHR oblique images. *Earth Science Informatics*, 13(2), 459–477.
- Krakauer, N. Y., Lakhankar, T., & Anadón, J. D. (2017). Mapping and attributing normalized difference vegetation index trends for Nepal. *Remote Sensing*, 9(10), 986.
- Kumar, B. P., Babu, K. R., Anusha, B. N., & Rajasekhar, M. (2022). Geo-environmental Monitoring and Assessment of Land Degradation and Desertification in the Semi-arid regions using Landsat 8 OLI/TIRS, LST, and NDVI approach. *Environmental Challenges*, 8, 100578.
- Liu, X., Hu, G., Chen, Y., Li, X., Xu, X., Li, S., Pei, F., & Wang, S. (2018). High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing of Environment*, 209, 227–239.
- Lobell, D. B., Thau, D., Seifert, C., Engle, E., & Little, B. (2015). A scalable satellite-based crop yield mapper. *Remote Sensing of Environment*, 164, 324–333.
- Lu, Q., Zhao, D., Wu, S., Dai, E., & Gao, J. (2019). Using the NDVI to analyze trends and stability of grassland vegetation cover in Inner Mongolia. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3), 1629–1640.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A. & Williams, D. G. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New Phytologist*, 178(4), 719–739.
- Midekisa, A., Holl, F., Savory, D. J., Andrade-Pacheco, R., Gething, P. W., Bennett, A., & Sturrock, H. J. W. (2017). Mapping land cover change over continental Africa using Landsat and Google Earth Engine cloud computing. *PloS One*, 12(9), e0184926.
- Mirmosavei, S., & Kareimeh, H. (2013). Effect of drought on vegetation cover using MODIS sensing images case: Kurdistan Province. *Geography and Development Iranian Journal*, 11(31), 57–76.
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google earth engine applications. *In Remote Sensing*, 11(5), 591- 611.
- Nila, M., Salma, U., Beierkuhnlein, C., Jaeschke, A., Hoffmann, S., & Hossain, M. L. (2019). Predicting the effectiveness of protected areas of Natura 2000 under climate change. *Ecological Processes*, 8(1), 1–21.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Park, T., Ganguly, S., Tømmervik, H., Euskirchen, E. S., Høgda, K.-A., Karlsen, S. R., Brovkin, V., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2016). Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 11(8), 84001.
- Pinzon, J. E., & Tucker, C. J. (2014). A non-stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g time series. *Remote Sensing*, 6(8), 6929–6960.
- Poorazimy, M., Shataee, S., Attarchi, S., & Mohammadi, J. (2017). Estimation of aboveground biomass using Alos-Palsar data in Hyrcanian forests (Case study: ShastKalateh, Gorgan). *Forest and Wood Products*, 70(3), 479–488.
- Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google Earth Engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite

- imagery for crop mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5, 17.
- Taloor, A. K., Manhas, D. S., & Kothiyari, G. C. (2021). Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data. *Applied Computing and Geosciences*, 9, 100051.
- Teluguntla, P., Thenkabail, P. S., Oliphant, A., Xiong, J., Gumma, M. K., Congalton, R. G., Yadav, K., & Huete, A. (2018). A 30-m landsat-derived cropland extent product of Australia and China using random forest machine learning algorithm on Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 325–340.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1–27.
- Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., & Revuelto, J. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 52–57.
- Wang, Y., Ma, J., Xiao, X., Wang, X., Dai, S., & Zhao, B. (2019). Long-term dynamic of Poyang Lake surface water: A mapping work based on the Google Earth Engine cloud platform. *Remote Sensing*, 11(3), 313.
- Weishou, S., Di, J., Hui, Z., Shouguang, Y., Haidong, L., & Naifeng, L. (2011). The response relation between climate change and NDVI over the Qinghai-Tibet plateau. *Journal of the World Academy of Science. Engineering and Technology*, 59, 2216–2222.
- Xiao, J., & Moody, A. (2005). Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982–1998. *International Journal of Remote Sensing*, 26(11), 2371–2390.
- Yun-Hao, C., Xiao-Bing, L., & Feng, X. (2001). NDVI changes in China between 1989 and 1999 using change vector analysis based on time series data. *Journal of Geographical Sciences*, 11(4), 383–392.
- Zhang, Q., Kong, D., Singh, V. P., & Shi, P. (2017). Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. *Global and Planetary Change*, 152, 1–11.
- Zhao, Q., Yu, L., Li, X., Peng, D., Zhang, Y., & Gong, P. (2021). Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 3778.
- Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Liu, R., Zou, Z., Zhao, G., & Ge, Q. (2019). Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine. *Science of the Total Environment*, 689, 366–380.
- Zurqani, H. A., Post, C. J., Mikhailova, E. A., Schlautman, M. A., & Sharp, J. L. (2018). Geospatial analysis of land use change in the Savannah River Basin using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69, 175–185.