



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 37, Issue 1, No.101, 2026, pp. 23- 42

Received: 19/08/2025 Accepted: 25/05/2026

Monitoring and Investigating Changes in Water Use Efficiency (WUE) of Different Climates in Kerman Province

Ali Mehrabi  *

Associate professor, Department of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
Mehrabi@uk.ac.ir

Abstract

Water Use Efficiency (WUE) is a key indicator for understanding the dynamics of carbon and water cycles across different climatic regimes, which is essential for assessing how ecosystems adapt and respond to complex environmental changes. In this study, Gross Primary Production (GPP) and Evapo-Transpiration (ET) data derived from satellite imagery were used to investigate WUE across all climatic zones—humid, semi-humid, semi-arid, and arid—in Kerman Province from 2004 to 2014. To evaluate the influence of various environmental factors—including temperature, precipitation, solar radiation, vapor pressure deficit, Leaf Area Index (LAI), and soil moisture—the geographic detector method and partial correlation analysis were applied. The results showed that over the study period, GPP and ET increased at average rates of 0.0065 g C/m²/year and 2.23 kg H₂O/m²/year, respectively, while WUE decreased at an average rate of 0.01 g C/kg H₂O/m²/year. Among the environmental factors examined, LAI made the largest contribution to WUE in most climatic regions. Furthermore, precipitation and solar radiation emerged as the most important primary climatic drivers influencing the development of climates in the central humid and semi-humid regions, as well as the central and western humid and semi-humid regions of the province, respectively.

Keywords: Water Use Efficiency (WUE), Climate Change, Evapo-Transpiration (ET), Gross Primary Productivity (GPP), Kerman Province.

Introduction

Water Use Efficiency (WUE) is an indicator that links plant carbon gain to water loss through evapotranspiration, operating within the interconnected plant–soil–atmosphere continuum. At the ecosystem level, WUE is commonly defined as the ratio of Gross Primary Production (GPP) to Evapo-Transpiration (ET), representing the amount of organic carbon sequestered per unit of water lost. This metric offers valuable insights for sustainable ecosystem management aimed at optimizing water resource use. WUE is regulated by vegetation

*Corresponding Author

Mehrabi, A. (2026). Monitoring and investigating changes in water use efficiency of Different Climates in Kerman Province. *Geography and Environmental Planning*, 37 (1), 23 - 42 .



2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2026.146361.1742

traits—such as stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration—as well as by various environmental factors. Key environmental drivers affecting plant ecosystems include temperature, precipitation, solar radiation, and vapor pressure deficit. Each of these factors has a critical threshold in relation to WUE and these thresholds vary across ecosystems due to differing local environmental conditions. For instance, an increase in average precipitation generally enhances WUE, whereas excessive precipitation may suppress it. In this study, remotely sensed GPP and ET data were used to estimate the WUE of terrestrial ecosystems in Kerman Province. Partial correlation analysis and the geographic detector method were employed to explore the relationships between WUE and its driving factors. The primary objectives of this study were to investigate the spatiotemporal changes in WUE from 2004 to 2024 and identify the dominant driving factors, along with their spatial characteristics that influenced the adaptation and development of the region's ecosystems.

Materials & Methods

The climatic drivers analyzed in this study included temperature (TEM), precipitation (PRE), and solar radiation (RAD). Temperature and precipitation datasets were obtained from the WorldClim database consisting of monthly averages covering the period from 2004 to 2024. Solar radiation data were derived from the net Surface Solar Radiation (SSR) product of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA5). Leaf Area Index (LAI) data were obtained from the MOD17 product of the MODIS sensor, which provided 8-day interval data at a spatial resolution of 500 m, spanning from February 2000 to the present. Vapor Pressure Deficit (VPD) data were derived from the TerraClimate dataset, a comprehensive monthly climate product covering global land areas. Soil Moisture (SM) data were obtained from a global surface soil moisture dataset with a spatial resolution of 500 m, covering the period from 2000 to the present. The geographic detector method was employed to detect spatial heterogeneity across geographical areas and identify its driving factors. This method enabled the detection of interactions between two dependent variables, as well as the magnitude and direction of such interactions. In this study, the geographic detector was used to examine the spatial heterogeneity WUE and identify the underlying driving forces.

Research Findings

To identify the key drivers influencing GPP, ET, and WUE, a partial correlation analysis was conducted to examine the relationships between these three variables and the six environmental factors. The results indicated that PRE had a significantly stronger influence on GPP, ET, and WUE compared to the other climatic factors and exhibited distinct spatial distribution patterns. Precipitation was positively correlated with GPP, WUE, and ET in the central regions, particularly in humid and semi-humid areas. In contrast, a negative correlation between precipitation and these indices was observed in the southern semi-arid and arid regions. Solar radiation was the second most important factor affecting ET, GPP, and WUE. Spatially, positive correlations between solar radiation and both GPP and ET were mainly distributed in the humid and semi-humid regions of the central and western parts of the province. Conversely, a significant negative correlation between solar radiation and WUE was observed in the southern part of the study area. The influence of solar radiation on WUE was most pronounced in the humid and semi-humid central and eastern regions, where the average correlation exceeded 0.65. The effect of TEM on ET and WUE was relatively weak, except in the humid and semi-humid central and eastern regions, where the average correlation exceeded 0.2. Temperature showed a positive and relatively strong correlation with GPP although a negative correlation was observed in some western semi-arid regions. The responses of GPP, ET, and WUE to LAI were significantly stronger than those to other drivers, indicating an overall strong positive correlation. With the exception of scattered negative correlations in the western and southern arid and semi-arid regions, most areas exhibited significant positive correlations. The spatial patterns of soil surface moisture influence on the three indices indicated a generally low correlation. In contrast, the spatial distributions of the effects of Vapor Pressure Deficit (VPD) on GPP and ET showed a high degree of consistency, with positive correlations prevailing in the southern semi-arid regions. The influence of VPD on WUE was particularly prominent in the western semi-humid region, where a positive correlation dominated.

Discussion of Results & Conclusion

This study qualitatively and quantitatively assessed the effects of climatic and ecological environmental factors using partial correlation analysis and the geographic detector method. The influences of the various driving factors on Gross Primary Production (GPP), Evapo-Transpiration (ET), and Water Use Efficiency (WUE) exhibited clear spatial distribution patterns. Among all factors, Leaf Area Index (LAI) had the greatest impact on GPP, ET, and WUE. Specifically, LAI was more strongly correlated with GPP because changes in LAI directly alter photosynthetic rates, thereby effectively influencing vegetation productivity. Reduced rainfall resulting from successive droughts—particularly in the arid and semi-arid regions of the province—had a notable impact on changes in ET and GPP. Conversely, more favorable rainfall conditions in the humid and semi-humid regions had positively influenced GPP through their effects on vegetation. However, as the vegetation in these regions was predominantly grassland, the increase in GPP remained relatively limited, which in turn led to a comparatively weak response in WUE. The influence of solar radiation on GPP, ET, and WUE was more pronounced in humid and semi-humid regions, where water resources were more abundant. In these areas, increased solar radiation not only accelerated plant transpiration by providing energy for water vapor evaporation, but also effectively regulated vegetation photosynthetic rates, thereby enhancing GPP. However, because the increase in ET was substantially greater than that in GPP, the net effect on WUE was negatively correlated. In this study, we investigated the spatiotemporal changes in WUE in Kerman Province from 2004 to 2024, as well as the driving factors underlying these changes. The results showed that, across the study area, GPP and ET increased by 75% and 57.3%, respectively. In contrast, WUE decreased across 76.45% of the study area. The effects of 6 environmental drivers—temperature (TEM), precipitation (PRE), solar radiation (RAD), Leaf Area Index (LAI), Vapor Pressure Deficit (VPD), and Soil Surface Moisture (SM)—were analyzed by using partial correlation analysis and the geographic detector method. The results indicated that the increase in LAI was the primary driver of the increases in GPP, ET, and WUE. Moreover, the interaction between LAI and other factors was stronger than that among the other driving factors. The effects of climatic factors also exhibited clear spatial differentiation. Precipitation exerted the greatest influence in the humid and semi-humid central regions of Kerman Province, whereas solar radiation had a stronger impact in the humid and semi-humid central and western regions of the province. The findings of this study offer valuable perspectives for understanding the mechanisms driving changes in WUE and can inform future research on ecosystem development across different climatic regions.

مقاله پژوهشی

پایش و بررسی تغییرات کارایی مصرف آب اقلیم‌های مختلف استان کرمان

علی مهرابی* ، دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
mehrabi@uk.ac.ir

چکیده

کارایی مصرف آب، یک شاخص مهم برای درک مکانیزم چرخه کربن و آب در اقلیم‌های مختلف به حساب می‌آید که برای درک چگونگی سازگاری و توسعه اقلیم‌ها با تغییرات پیچیده محیطی ضروری است. در این راستا از داده‌های تولید ناخالص اولیه و تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، برای بررسی کارایی مصرف آب در کل اقلیم‌های مناطق مرطوب، نیمه‌مرطوب، نیمه‌خشک و خشک استان کرمان طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ استفاده شد. به‌منظور ارزیابی نقش عوامل مختلف محیطی شامل دما، بارش، تابش خورشیدی، کمبود فشار بخار، شاخص سطح برگ و رطوبت خاک، بر روی کارایی مصرف آب از روش آشکارساز جغرافیایی و تحلیل همبستگی جزئی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در طول دوره مورد مطالعه، شاخص‌های تولید ناخالص اولیه و تبخیر و تعرق به ترتیب با نرخ متوسط ۰/۰۰۶۵ گرم کربن بر متر مربع در سال و ۲/۲۳ کیلوگرم آب بر متر مربع در سال افزایش، و کارایی مصرف آب با نرخ متوسط ۰/۰۱ گرم کربن بر کیلوگرم آب بر متر مربع در سال کاهش یافته است. از بین عوامل مختلف محیطی، شاخص سطح برگ، بیشترین سهم را در کارایی مصرف آب در غالب مناطق آب‌وهوایی دارد. همچنین عوامل بارش و تابش خورشیدی به ترتیب از مهمترین عوامل تأثیرگذار اولیه آب‌وهوایی در توسعه اقلیم‌های مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب مرکزی و مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب مرکز و غرب استان به حساب می‌آیند. واژه‌های کلیدی: کارایی مصرف آب، تغییرات آب‌وهوایی، تبخیر و تعرق، تولید ناخالص اولیه، استان کرمان

*نویسنده مسؤول

مهرابی، علی. (۱۴۰۵). پایش و بررسی تغییرات کارایی مصرف آب اقلیم‌های مختلف استان کرمان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۷ (۱)، ۲۳-۴۲.



مقدمه

کارایی مصرف آب^۱ (WUE) شاخصی است که افزایش کربن گیاهی را با از دست دادن آب از طریق تبخیر و تعرق مرتبط می‌کند و در زنجیره به هم پیوسته گیاه - خاک - اتمسفر عمل می‌کند. WUE در سطح اقلیم، معمولاً به‌عنوان نسبت تولید ناخالص اولیه^۲ (GPP) به تبخیر و تعرق^۳ (ET) تعریف می‌شود که نشان‌دهنده مقدار کربن آلی جداشده در واحد آب از دست رفته است. این معیار می‌تواند بینش‌های ارزشمندی را برای مدیریت اقلیم پایدار با هدف بهینه‌سازی استفاده از منابع آب، ارائه دهد (Wang et al., 2021, p. 143; Huang et al., Peters et al., 2018, p. 744; 2017, p. 1097). مطالعات اولیه WUE اقلیم‌ها بر تکنیک‌های تجربی، متکی بود، مانند اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات میدانی مستقیم که عمدتاً بر اجزای پوشش گیاهی در مقیاس کوچک مانند برگ‌ها متمرکز بوده است. پژوهش‌های بعدی، از داده‌های به‌دست‌آمده از سایت‌های محلی اندازه‌گیری و تکنیک کوواریانس، برای تجزیه و تحلیل این موضوع استفاده می‌کنند (Edwards et al., 2012, p. 653) که این روش نیز محدودیت‌هایی چون در دسترس بودن سایت و تأثیر مخرب عوامل آب‌وهوایی نزدیک به سطح دارد و مانع از تداوم این مجموعه داده‌ها می‌شود و چالش‌هایی را برای تحقیقات در مقیاس بزرگ ایجاد می‌کند. در سال‌های اخیر، علم سنجش از دور با ارائه داده‌های با وضوح بالا در مقیاس بزرگ و وسعت مکانی و زمانی زیاد، نقش مهمی در تخمین و مطالعه WUE پیدا کرده است. در این راستا، تصاویر سنجنده مودیس با ارائه محصولاتی چون GPP و ET، به‌صورت بلندمدت و پیوسته، نقش ویژه‌ای در تجزیه و تحلیل دینامیک مکانی و زمانی شاخص WUE و ارتباط آن با عوامل مختلف محیطی، ایفا می‌کند. مطالعات اخیر نشان از تغییرات قابل توجه فصلی WUE داشته‌اند که این امر در درک نحوه واکنش اقلیم‌ها در مقابل تغییرات محیطی، بسیار مهم است (Du et al., 2019, p. 126; Liu et al., 2021, p. 10; Zou et al., 2020, p. 37).

WUE توسط ویژگی‌های پوشش گیاهی از جمله هدایت روزنه‌ای و غلظت دی اکسید کربن بین سلولی و عوامل محیطی مختلف کنترل می‌شود. عوامل محیطی شامل دما، بارش، تابش خورشیدی و کسری فشار بخار، عوامل اصلی تأثیرگذار در اکوسیستم‌های گیاهی هستند. هر یک از این عوامل در ارتباط با شاخص WUE، دارای آستانه بحرانی است و این مقادیر بحرانی در اقلیم‌های مختلف به دلیل تأثیرات مختلف زیست محیطی، متفاوت است؛ به طوری که افزایش متوسط بارش به طور کلی باعث افزایش شاخص شده است؛ در حالی که بارش بیش از حد می‌تواند آن را سرکوب کند (Tarin et al., 2020, p. 496). همچنین تأثیر متغیرهای هواشناسی نیز در مناطق مختلف، متفاوت است؛ برای مثال، شاخص WUE با افزایش تابش خورشیدی در عرض‌های جغرافیایی بالاتر، افزایش می‌یابد. با اینکه بارش در مناطق مختلف دمایی ویژگی‌های متمایزی ایجاد می‌کند. به‌طور خاص، روابط متقابل قوی بین بارش و شاخص WUE در مناطقی با گرمای کافی وجود دارد. افزایش دمای جهانی با افزایش شاخص کمبود فشار بخار باعث ایجاد تغییر در فعالیت آنزیمی در گیاهان، افزایش نرخ تعرق و کاهش نرخ خالص فتوسنتز می‌شود. این تغییرات فرآیندهای

¹ Water-use efficiency

² Gross Primary Productivity

³ Evapotranspiration

رشد پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به کاهش WUE، منجر می‌شود (Roby et al., 2020, p. 132). با تشدید تغییرات آب‌وهوایی جهانی، تجزیه و تحلیل عمیق شاخص WUE و عوامل آب‌وهوایی برای درک انعطاف پذیری اقلیم‌ها و مدیریت موثر منابع آب ضروری است.

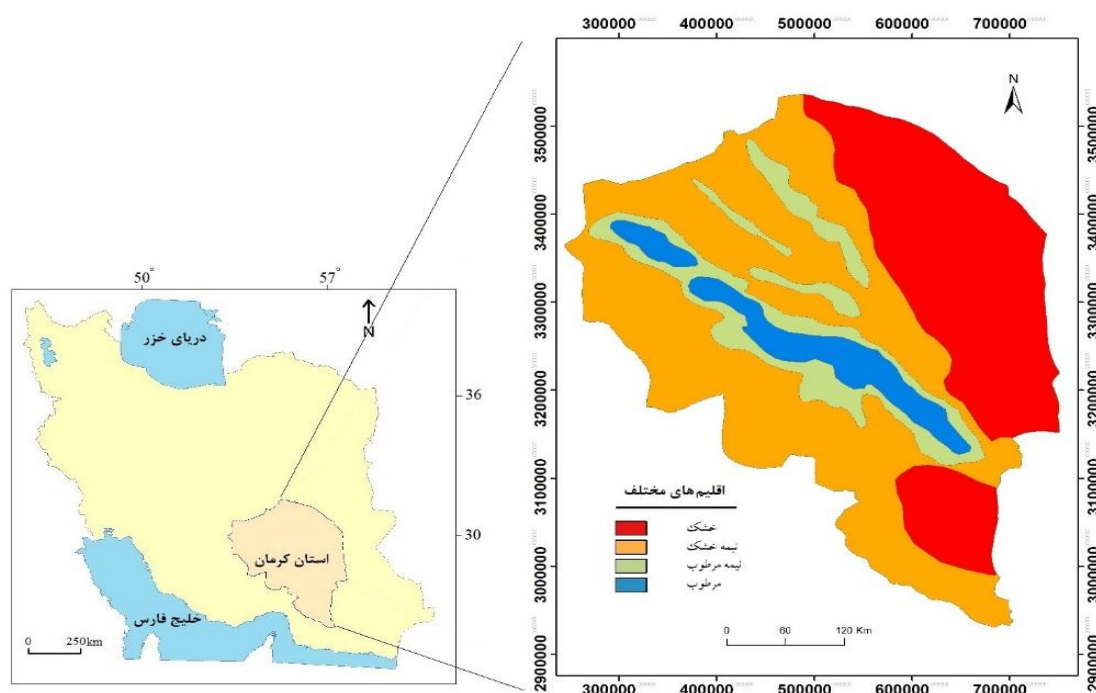
گنگ و همکاران در پژوهشی، شاخص WUE را برای انواع مراتع طی مدت ۱۳ سال، ارزیابی و در نتیجه افزایش WUE را برای کاربری‌های ساوانا و بوته‌زار گزارش کردند (Gang et al., 2016, p. 343). هوانگ و همکاران، در پژوهشی دیگر، به ارزیابی ارتباط بین خشکسالی و WUE پرداختند، طبق نتایج به دست آمده، WUE در اقلیم خشک، نیمه‌خشک و مرطوب به ترتیب پاسخ منفی، منفی و مثبت نشان داده است (Huang et al., 2017, p. 1097). زو و همکاران، در تحقیقی دیگر، آنالیز WUE را با استفاده از آزمون من‌کندل در آسیای مرکزی انجام دادند و بیان کردند که افزایش WUE ناشی از کاهش ET و افزایش GPP بوده که به ترتیب به علت پاسخ پوشش گیاهی به تنش خشکی و افزایش بارندگی است (Zou et al., 2020, p. 10). همچنین کاهش WUE ناشی از روش‌های استفاده غیرمنطقی از آب در زمین‌های کشاورزی و تغییرات در محصولات کاشت شده بیان شده است. اسکندری دامنه و همکاران، در پژوهشی به بررسی تخریب اراضی تحت تأثیر شاخص بار استاندارد شده بر شاخص WUE در استان فارس پرداخته شده است. برای محاسبه شاخص WUE از داده‌های GPP و ET به دست آمده از سنجنده مودیس استفاده شد و از داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی، شاخص خشکسالی محاسبه شد (اسکندری دامنه و همکاران، ۱۴۰۰، ص. ۱۰۳). جوادی و همکاران، اثرات خشکسالی را بر WUE در اقلیم و کاربری‌های مختلف استان تهران مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش برای محاسبه WUE از محصولات GPP، ET و شاخص خشکسالی پالمر استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که خشکسالی اثر منفی بر WUE داشته است و مقاومت اکوسیستم در برابر خشکسالی توسط همبستگی ما بین شاخص خشکسالی و WUE مشخص می‌شود (جوادی و همکاران، ۱۴۰۲، ص. ۳).

رشد اقتصادی، همراه با گرم‌شدن کره زمین، تعاملات پیچیده بین فعالیت‌های انسانی و توسعه اکوسیستم‌های زمینی را تشدید کرده است. در مسیر توسعه اقتصادی، تغییر الگوهای کاربری زمین می‌تواند منجر به کاهش رطوبت خاک شده و این نیز بر تعادل آب در گیاهان تأثیر گذاشته و ظرفیت آنها برای تولید مواد آلی را کاهش داده و تبخیر و تعرق را تشدید کرده است؛ در نتیجه، این ممکن است منجر به کاهش WUE شود. علاوه بر این، تغییرات پوشش گیاهی در مقیاس بزرگ ناشی از بازسازی اکولوژیکی نیز مستقیماً بر تغییرات شاخص WUE تأثیر می‌گذارد (Xue et al., 2022, p. 128). جمع‌بندی سابقه تحقیق نشان می‌دهد که WUE یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی تعامل کربن و آب در اکوسیستم‌های زمینی است که در مطالعات متعددی با استفاده از داده‌های میدانی و در سال‌های اخیر داده‌های سنجنش از دور بررسی شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که WUE تحت تأثیر عوامل اقلیمی و محیطی مختلف قرار دارد و پاسخ آن به این عوامل در اقلیم‌ها و مناطق گوناگون متفاوت است. با وجود این، بیشتر مطالعات پیشین یا به مقیاس‌های محدود مکانی پرداخته‌اند یا اثر عوامل محرک را به صورت مجزا بررسی کرده‌اند؛ در حالی که نوآوری این پژوهش در تحلیل بلندمدت و یکپارچه تغییرات مکانی-زمانی WUE با استفاده از داده‌های پیوسته سنجنش از دور نهفته است. در این مطالعه، با ترکیب هم‌زمان محصولات GPP و ET سنجنده MODIS و

به‌کارگیری تحلیل همبستگی جزئی و روش آشکارساز جغرافیایی، اثر عوامل محرک اقلیمی و محیطی بر WUE به‌صورت دقیق و تفکیک‌شده بررسی شده است. تمرکز بر استان کرمان به‌عنوان منطقه‌ای با تنوع اقلیمی و کاربری اراضی بالا و فاقد مطالعات جامع پیشین، ارزش افزوده علمی این پژوهش را دوچندان می‌کند. هدف این تحقیق، بررسی پویایی مکانی-زمانی WUE طی دوره ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ و تعیین نقش عوامل اقلیمی و محیطی مؤثر بر آن، به‌منظور پشتیبانی از مدیریت پایدار منابع آب و توسعه اقلیم‌های منطقه است.

محدوده مورد مطالعه

استان کرمان به لحاظ توپوگرافی بسیار متنوع است؛ به طوری که از کوه‌ها، تپه‌ها، دشت‌ها و بیابان درهم‌تنیده شده‌اند (شکل ۱). بخش‌های مرکزی و غربی غالباً از رشته‌کوه‌های با ارتفاع بیش از سه هزار متری تشکیل شده است. بیابان لوت با متوسط ارتفاع ۱۰۰ متر، گستره وسیعی از استان را به خود اختصاص داده و دشت‌های متعددی نیز با روند شمال غربی - جنوب شرقی در سطح استان پراکنده شده است. این تفاوت ساختاری باعث شکل‌گیری شرایط آب‌وهوایی مختلف و انواع پوشش گیاهی شده است؛ به طوری که استان کرمان به استان چهار فصل ایران مشهور است (مزیدی و همکاران، ۱۴۰۰، ص. ۳۵)؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل براساس مناطق مختلف آب‌وهوایی (اداره هواشناسی استان کرمان) می‌تواند به ما کمک کند تا درک جامع و عمیق‌تری از وضعیت کلی و ویژگی‌های محلی مناطق مختلف داشته باشیم. در شکل ۱ نقشه اقلیم‌های مختلف، ارائه شده است.



شکل ۱: نقشه اقلیم‌های مختلف و موقعیت محدوده مورد مطالعه (منبع نگارنده، ۱۴۰۴)

Figure 1: Location map of the studied area

روش‌شناسی پژوهش

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، برای برآورد WUE از محصولات GLASS-GPP و GLASS-ET مبتنی بر سنجنده MODIS با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و تفکیک زمانی ماهانه استفاده شد که از مرکز ملی داده‌های علوم سیستم زمین (<http://www.geodata.com>) قابل دریافت هستند. داده‌های دما^۱ (TEM)، بارش^۲ (PRE) و تابش خورشیدی^۳ (RAD) براساس مجموعه داده بازتحلیل ERA5 مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های هوای میان‌برد (ECMWF) استخراج شدند که پوشش زمانی پیوسته ماهانه و تفکیک مکانی حدود ۳۱ کیلومتر را ارائه می‌دهد و از طریق سامانه (<https://cds.climate.copernicus.eu>) در دسترس است (شکل ۲). برای شاخص سطح برگ (LAI)، از محصول MOD15A2H سنجنده MODIS با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و تفکیک زمانی ۸ روزه استفاده شد (<https://lpdaac.usgs.gov>). کسری فشار بخار (VPD) از مجموعه داده اقلیمی TerraClimate با تفکیک مکانی حدود ۴ کیلومتر و تفکیک زمانی ماهانه استخراج شد که کل خشکی‌های جهان را پوشش داده و از وبگاه رسمی آن (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>) قابل دانلود است. همچنین داده‌های رطوبت سطحی خاک (SM) مبتنی بر محصولات SMAP بوده که از سال ۲۰۰۰ تاکنون را در بر می‌گیرد (<https://nsidc.org>). تفکیک مکانی اصلی این محصول ۹ کیلومتر است و به‌منظور هم‌مقیاس‌سازی با دیگر داده‌ها، از روش بازنمونه‌برداری مدل‌محور (model-based downscaling) استفاده شد و به شبکه ۵۰۰ متری تبدیل شدند. قابل ذکر است که تمامی نقشه‌های حاصل از داده‌های مذکور، در سیستم مختصات UTM و دیتوم WGS84 زون ۴۰ شمال تهیه شدند.

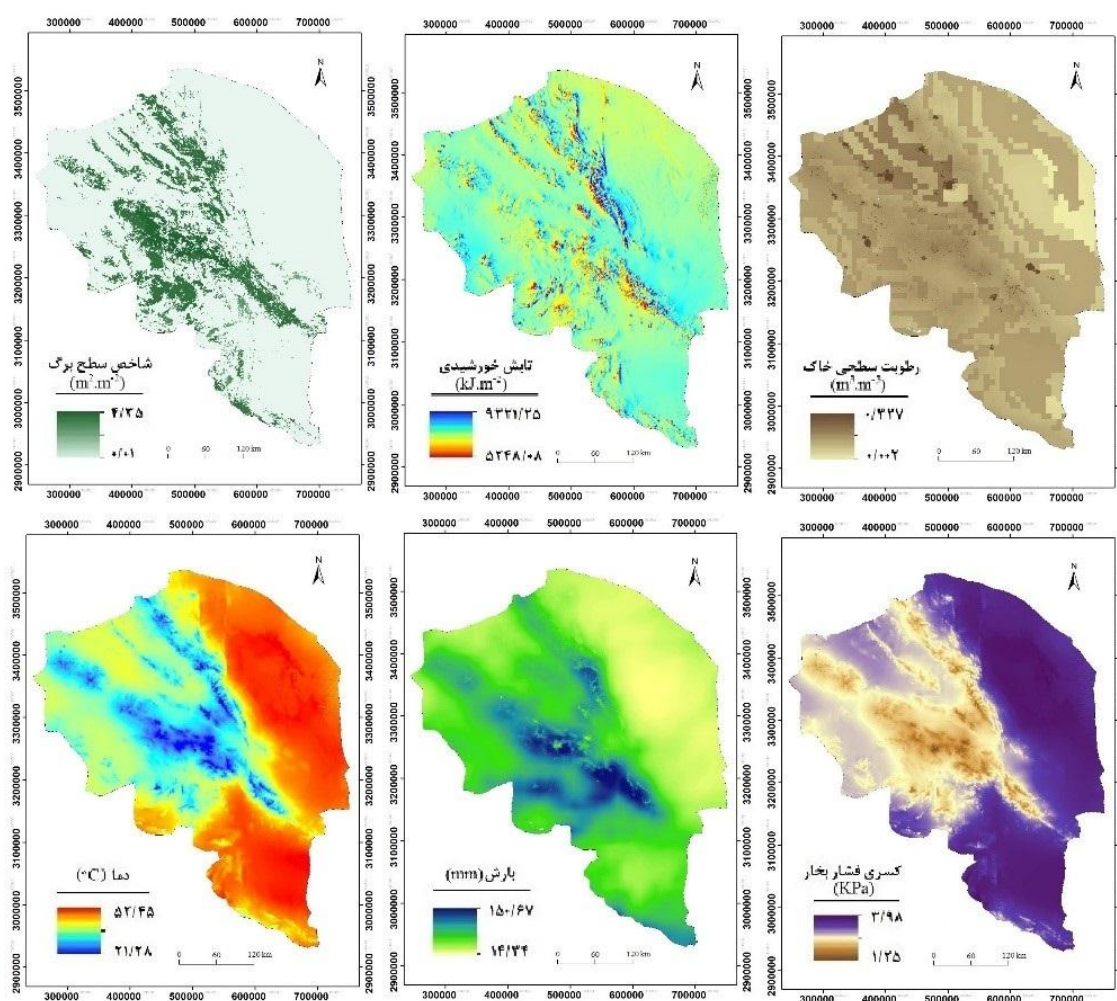
آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها

با توجه به استفاده از مجموعه داده‌های متنوع با تفکیک‌های مکانی و زمانی متفاوت، تمامی داده‌ها پیش از انجام تحلیل‌های مکانی-زمانی و آزمون‌های روند، تحت یک فرآیند یکپارچه آماده‌سازی و پیش‌پردازش قرار گرفتند. در گام نخست، تمامی لایه‌های داده به یک سیستم مختصات مکانی یکسان منتقل شدند. به‌منظور یکسان‌سازی تفکیک مکانی، داده‌های با تفکیک درشت‌تر (از جمله داده‌های اقلیمی ERA5 و TerraClimate) با استفاده از روش بازنمونه‌برداری دوخطی (bilinear resampling) به شبکه‌ای با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر، هم‌مقیاس با محصولات MODIS، تبدیل شدند. از نظر زمانی، تمامی داده‌ها به مقیاس ماهانه همسان‌سازی شدند. داده‌های با تفکیک زمانی زیرماهانه، نظیر LAI هشت‌روزه MODIS، به‌صورت میانگین ماهانه، تجمیع و داده‌های روزانه ERA5 نیز به مقادیر ماهانه تبدیل شدند. بدین ترتیب، کلیه متغیرها برای دوره زمانی مشترک ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ شمسی آماده‌سازی شدند. پس از همسان‌سازی مکانی و زمانی، شاخص کارایی مصرف آب (WUE) برای هر پیکسل و هر ماه براساس نسبت تولید ناخالص اولیه به تبخیر و تعرق براساس فرمول زیر محاسبه شد:

^۱ Temperature^۲ Precipitation^۳ Solar Radiation

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (1)$$

در این رابطه، مجموع سالانه GPP بر حسب گرم کربن بر مترمربع، مجموع سالانه ET بر حسب کیلوگرم آب بر مترمربع و میزان WUE بر حسب گرم کربن بر کیلوگرم آب بر مترمربع است. در نهایت، مجموعه داده‌های اقلیمی و محیط زیستی شامل دما، بارش، تابش خورشیدی، کسری فشار بخار، شاخص سطح برگ و رطوبت سطحی خاک، به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده با داده‌های WUE تلفیق شدند.



شکل ۲: نقشه عوامل محرک بر WUE در منطقه مورد مطالعه (منبع نگارنده، ۱۴۰۴)

Figure 2: Map of driving factors on water use efficiency in the study area

تحلیل روند

برای تشخیص روند WUE از آزمون روند من‌کندال استفاده شد. از این روش برای تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی با گرایش‌های مرکزی ناپایدار و پیش‌بینی روندهای توسعه آتی استفاده می‌شود (Sen et Zhou et al., 2020, p. 241; al., 1968, p. 1379). مراحل اصلی روش به شرح زیر است:

تحلیل روند WUE براساس سری‌های زمانی ماهانه انجام شد. بدین منظور، ابتدا کلیه داده‌های مورد استفاده شامل ET و GPP که دارای تفکیک زمانی زیرماهانه بودند (نظیر داده‌های ۸ روزه MODIS)، به مقیاس ماهانه تجمیع شدند. سپس مقادیر ماهانه WUE برای هر پیکسل در دوره زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ شمسی محاسبه شد. به منظور کاهش نوسانات فصلی و تمرکز بر تغییرات بلندمدت، سری‌های زمانی ماهانه به میانگین‌های سالانه، تبدیل و آزمون ناپارامتری من-کندال بر روی سری‌های زمانی سالانه WUE اعمال شد. معناداری روندها در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) ارزیابی و شدت تغییرات با استفاده از برآوردگر شیب سن محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل همبستگی جزئی

از طریق تجزیه و تحلیل همبستگی جزئی می‌توان میزان همبستگی بین دو متغیر را مشخص کرد. از آنجایی که در تجزیه و تحلیل همبستگی چندگانه، روابط بین متغیرها شامل پیچیدگی‌های زیادی است؛ همبستگی جزئی می‌تواند با از بین بردن تداخل سایر متغیرها رابطه واقعی بین دو متغیر را به دقت منعکس کند و دقت تحلیل بین متغیرها را بهبود بخشد. اصل همبستگی جزئی این است که با کنترل تأثیر خطی سایر متغیرهای مستقل، همبستگی خطی بین متغیرهای مدنظر، تجزیه و تحلیل می‌شود. ضریب همبستگی بین دو عامل هنگام کنترل تأثیر خطی عوامل دیگر با ضریب همبستگی جزئی R نشان داده می‌شود (Zhang et al., 2023, p. 2437; Li et al., 2022, p. 57)

$$R = \frac{r_{xy} - r_{xy}r_{yz}}{\sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{1 - r_{yz}^2}} \quad (2)$$

که در آن R همبستگی متغیرهای X و Y تحت تأثیر متغیر Z است و r_{xy} ، r_{xz} ، و r_{yz} ضرایب همبستگی ساده بین متغیرهای X، Y و Z هستند و وقتی ضریب از ۱- تا ۱ تغییر می‌کند؛ به این معنی است که همبستگی از منفی به مثبت تغییر کرده است. در این تحقیق برای بررسی رابطه واقعی بین WUE و عوامل محرک اقلیمی و زیست‌محیطی، از تحلیل همبستگی جزئی استفاده شد. متغیر پاسخ WUE و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده شامل دما، بارش، تابش خورشیدی، کسری فشار بخار، شاخص سطح برگ و رطوبت خاک بودند. همچنین ضریب همبستگی جزئی بین WUE و هر یک از متغیرهای مستقل، در حالی که اثر خطی سایر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده کنترل شده، محاسبه شد.

آشکارساز جغرافیایی

برای تشخیص ناهمگونی فضایی مناطق جغرافیایی و کشف عوامل محرک آن از آشکارساز جغرافیایی استفاده می‌شود. این روش قدرت توضیح فضایی تعامل بین عوامل و متغیرهای مستقل را بدون تعیین جهت اثر آنها می‌سنجد. این پژوهش از آشکارساز جغرافیایی برای تشخیص ناهمگونی فضایی و نیروهای محرک WUE استفاده می‌کند. مراحل اصلی روش به شرح زیر است (Zhang et al., 2023, p. 2437).

۱- واکاوی و تشخیص عامل: این شامل تشخیص عدم تشابه فضایی Y و همچنین برآورد مقداری است برای عامل X که عدم تشابه فضایی ویژگی Y را توضیح می‌دهد و می‌تواند بر حسب مقادیر q اندازه‌گیری شود.

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

به طوری که q توان تأثیر یک عامل معین است، L نشان دهنده طبقه‌بندی متغیر (Y) یا عامل (X) و N_h و N به ترتیب تعداد سلول‌های لایه h و کل منطقه را نشان می‌دهند، σ_h^2 و σ^2 به ترتیب واریانس‌های لایه h و کل منطقه هستند. مقدار q بین $[0, 1]$ متغیر است و نشان می‌دهد X چه مقدار ناهمگونی فضایی Y را توضیح می‌دهد.

۲- تشخیص چگونگی تعاملات: این مرحله شامل شناسایی تعاملات بین عوامل مختلف X_i است. به‌طور خاص، اینکه آیا حضور همزمان عوامل X_1 و X_2 ظرفیت پیش‌بینی متغیر وابسته Y را افزایش یا کاهش می‌دهد، ارزیابی می‌کند. این فرآیند ارزیابی با تعیین مقادیر q ویژه برای هر متغیر انجام می‌گیرد. همانطور که در **جدول ۱** نشان داده شده است، پنج نوع تعامل بین دو متغیر مستقل و متغیر وابسته وجود دارد.

برای شناسایی ناهمگونی فضایی و تعیین عوامل محرک WUE در استان کرمان، از آشکارساز جغرافیایی استفاده شد. در این تحلیل شاخص WUE، متغیر وابسته (Y) بود و متغیرهای مستقل (X) شامل دما، بارش، تابش خورشیدی، کسری فشار بخار، شاخص سطح برگ، رطوبت خاک بودند. به‌منظور تحلیل تعامل بین عوامل، ترکیب دو یا چند متغیر مستقل و اثر هم زمان آن‌ها بر WUE بررسی شد و نوع تعامل‌ها (افزایشی، تعدیلی یا غیرخطی) با مقادیر q ویژه شناسایی شد. تمام پردازش داده‌ها، طبقه‌بندی متغیرها و محاسبه شاخص q با استفاده از نرم‌افزار R و بسته GD انجام شد که امکان بازتولید کامل تحلیل را فراهم می‌کند.

جدول ۱: مبنای قضاوت برای تشخیص رابطه تعاملی (Song et al., 2020, p. 593).

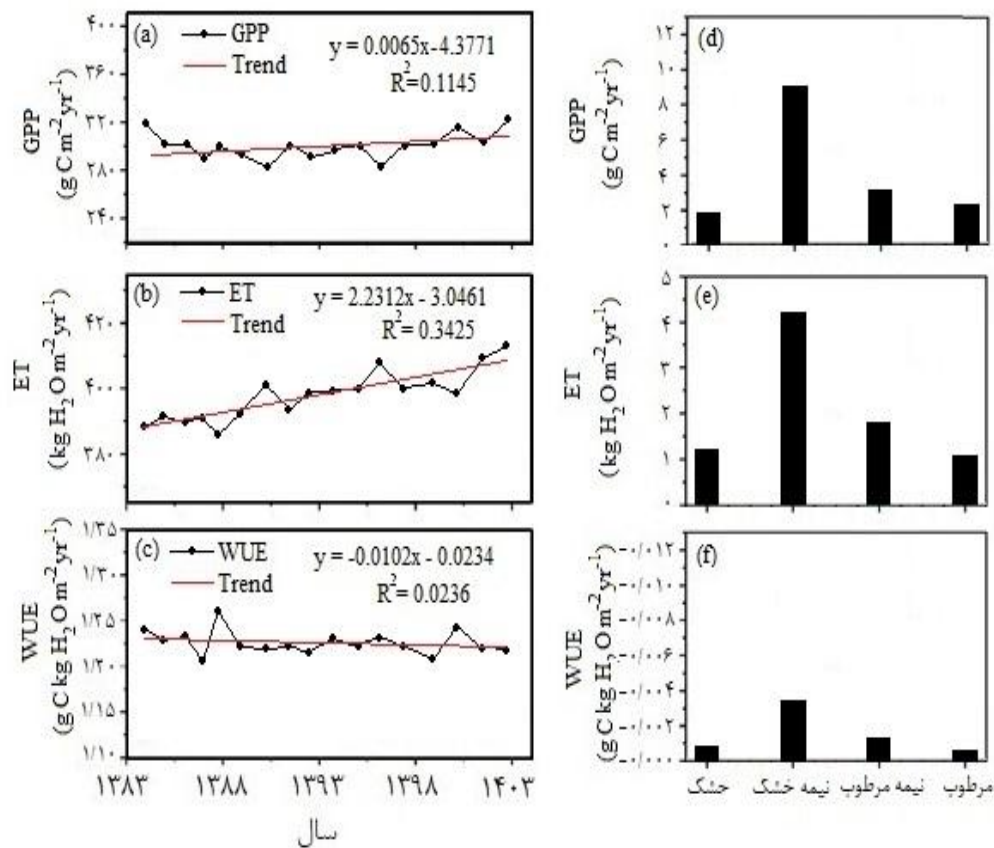
Table 1: Basis of judgment for recognizing interactive relationship (Song et al., 2020, p. 593)

انواع تعامل بین متغیرها	الگو
تضعیف غیر خطی	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
تضعیف غیرخطی تک عاملی	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
بهبود دو عاملی	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
مستقل	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
افزایش غیرخطی	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل آنها

تغییرات مکانی-زمانی در ET، GPP و WUE

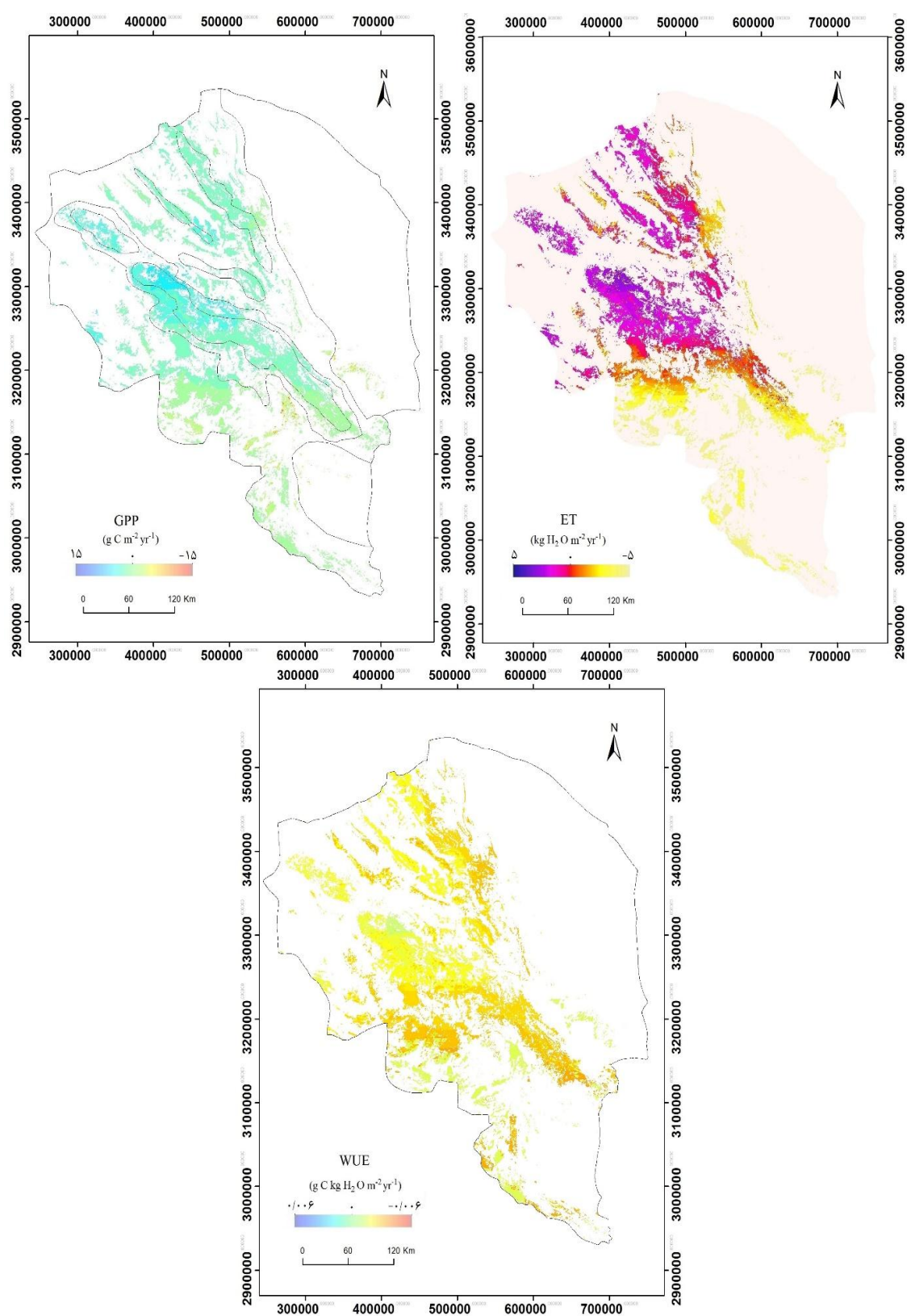
همانطور که در **شکل ۳** نشان داده شده است ET و GPP در طول سال‌های ۱۳۸۳-۱۴۰۳ به ترتیب با مقادیر متوسط گرم کربن بر متر مربع در سال و ۲/۲۳ کیلوگرم آب بر متر مربع در سال افزایش یافته‌اند، همچنین WUE با مقدار ۰/۰۱ گرم کربن بر کیلوگرم آب بر متر مربع در سال کاهش یافته است. علاوه بر این، ویژگی‌های متغیر مناطق مختلف آب‌وهوایی بررسی شد و نتایج نشان داد که ET، GPP و WUE در بیشتر مناطق آب‌وهوایی در منطقه به‌طور چشمگیری تغییر یافته است. در میان مناطق آب‌وهوایی، منطقه نیمه‌خشک بالاترین نرخ تغییرات را نشان داد.



شکل ۳: (a-c)، ویژگی‌های تغییرات زمانی GPP، ET و WUE بین سال‌های ۱۳۸۳-۱۴۰۳ و (d-f)، نرخ تغییرات آنها در مناطق مختلف آب‌وهوایی. (منبع نگارنده، ۱۴۰۴)

Figure 3: (a-c), Characteristics of the temporal changes of GPP, ET and WUE between 1383-1403. and (d-f), their rates of change in different climatic regions

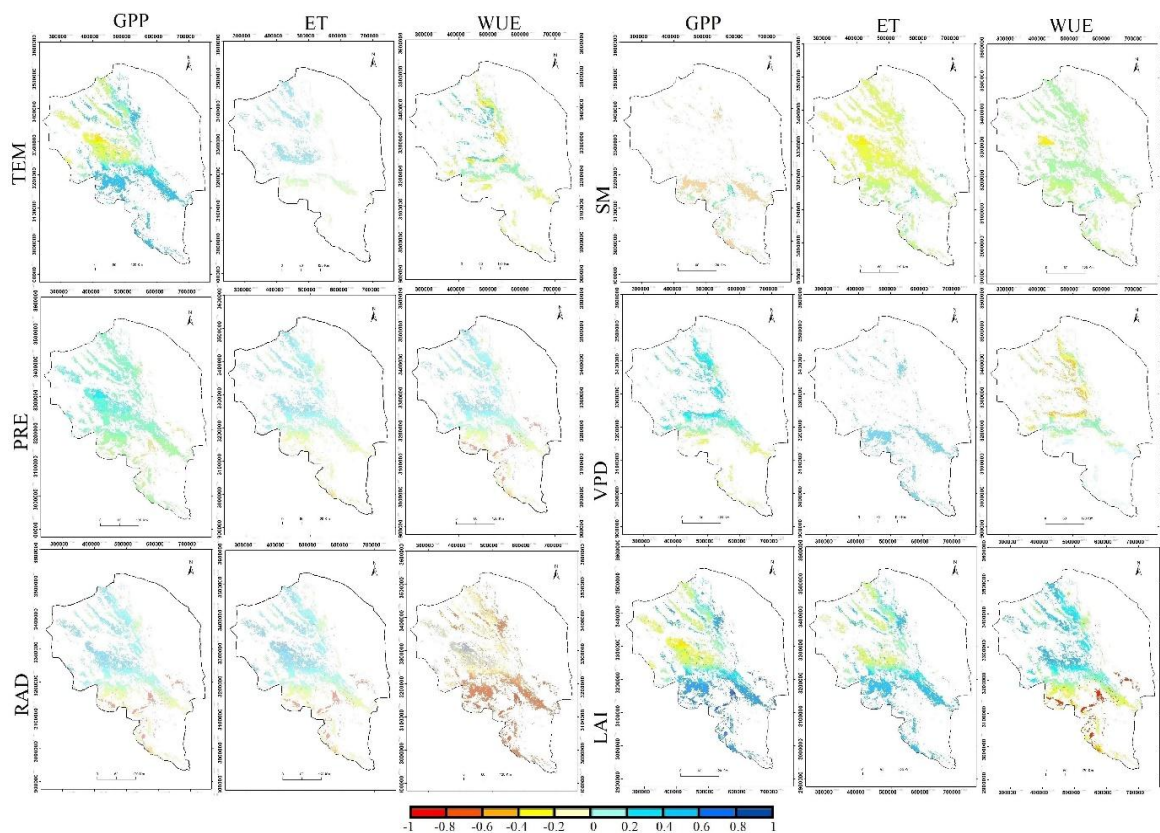
ویژگی‌های تغییرات فضایی GPP، ET و WUE در طول ۲۰ سال گذشته در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تغییرات شاخص GPP در ۷۵ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه افزایش و ۲۵ درصد کاهش این شاخص را نشان می‌دهد. شاخص ET در ۵۷/۳ درصد از سطح منطقه افزایش و ۴۲/۷ درصد کاهش این شاخص را نشان می‌دهد. شاخص WUE در ۷۶/۴۵ درصد از سطح مورد مطالعه کاهشی بوده است؛ در حالی که افزایش این شاخص ۲۳/۵۵ درصد از سطح منطقه را شامل می‌شود. از منظر فضایی، این مناطق به‌طور گسترده‌ای در بخش مرکزی و غربی منطقه مورد مطالعه، به‌ویژه در مناطق آب‌وهوایی مرطوب و نیمه‌مرطوب توزیع شده‌اند.



شکل ۴: ویژگی‌های تغییرات فضایی GPP، ET و WUE بین سال‌های ۱۳۸۳-۱۴۰۳ (منبع نگارنده، ۱۴۰۴)
Figure 4: Characteristics of spatial changes in GPP, ET and WUE between 2004-2024

همبستگی بین WUE، GPP، ET و عوامل محرک

برای شناسایی عوامل کلیدی محرک بر GPP، ET و WUE، یک تجزیه و تحلیل همبستگی جزئی انجام شد تا همبستگی بین WUE، GPP، ET و شش عامل محرک را مشخص کند و نتیجه در **شکل ۵** نشان داده شده است. نتایج نشان داد که فاکتور بارش نسبت به سایر عوامل اقلیمی دارای یک تأثیر قابل توجه قوی‌تری بر GPP، ET و WUE است و ویژگی‌های توزیع فضایی متمایزی را نشان می‌دهد. بارش در مناطق مرکزی، به‌ویژه در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب، همبستگی مثبتی با GPP، WUE و ET دارد؛ با این حال، یک همبستگی منفی بین این عامل و شاخص‌های مذکور در منطقه نیمه‌خشک و خشک جنوبی مشاهده شد. عامل تابش خورشیدی، دومین عامل اصلی مؤثر بر ET، GPP و WUE است. از نظر فضایی، مناطقی با همبستگی مثبت بین محرک تابش خورشیدی و GPP و ET عمدتاً در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب مرکز و غرب استان توزیع شدند، برعکس، همبستگی منفی معنی‌داری بین این عامل با WUE در بخش جنوبی منطقه مشاهده شد. تأثیر تابش خورشیدی بر WUE در منطقه مرطوب و نیمه‌مرطوب مرکزی و شرقی منطقه مورد مطالعه با میانگین کلی بیش از ۰/۶۵ قابل توجه‌ترین بود. تأثیر دما بر ET و WUE نسبتاً ضعیف بود، به جز همبستگی متوسط بیش از ۰/۲ در منطقه مرطوب و نیمه‌مرطوب مناطق مرکزی و شرقی منطقه مورد مطالعه. دما روی شاخص GPP همبستگی مثبت و نسبتاً قوی دارد؛ البته در بعضی از مناطق نیمه‌خشک غربی، این همبستگی منفی است.



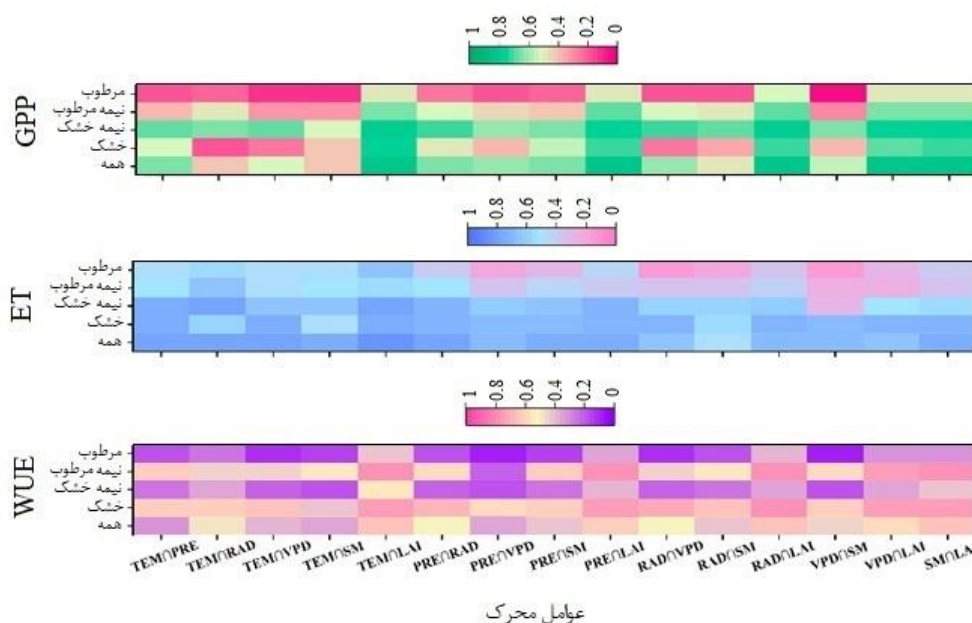
شکل ۵: همبستگی جزئی بین محرک‌های مختلف و GPP، ET و WUE (منبع نگارنده، ۱۴۰۴)

Figure 5: Partial correlation between different drivers and GPP, ET, and WUE

پاسخ‌های GPP ، ET و WUE به شاخص سطح برگ به‌طور درخور توجهی قوی‌تر از سایر عوامل محرک بود که نشان‌دهنده یک همبستگی مثبت به‌طور کلی قوی است. به‌جز همبستگی‌های منفی پراکنده مشاهده‌شده در منطقه خشک و نیمه‌خشک غربی و جنوبی، بیشتر مناطق همبستگی معنی‌دار مثبتی ارائه کردند. الگوهای فضایی تأثیر رطوبت سطحی خاک بر سه شاخص نشان‌دهنده همبستگی پایین این عامل دارد. علاوه بر این، توزیع فضایی اثرات عامل کسری فشار بخار (VPD) بر GPP و ET درجه بالایی از سازگاری را نشان داد. یک همبستگی مثبت در مناطق نیمه‌خشک جنوبی منطقه مورد مطالعه غالب است. تأثیر عامل کسری فشار بخار بر WUE به‌ویژه در منطقه نیمه‌مرطوب غربی، که در آن یک همبستگی مثبت غالب بود، برجسته است.

تشخیص و تجزیه و تحلیل تعاملی عوامل محرک

برای بررسی بیشتر اثرات عوامل محرک مختلف بر GPP ، ET و WUE ، از یک آشکارساز جغرافیایی برای بررسی اثرات تعاملی بین عوامل مختلف استفاده شد (شکل ۶). تجزیه و تحلیل نشان داد که عوامل متعددی ($Tem \cap Pre$ ، $Tem \cap Rad$ ، $Tem \cap SM$ ، $Tem \cap VPD$ ، $Tem \cap LAI$ ، $Pre \cap Rad$ ، $Pre \cap SM$ ، $Pre \cap VPD$ ، $Pre \cap LAI$ ، $Rad \cap SM$ ، $Rad \cap VPD$ ، $Rad \cap LAI$ ، $SM \cap VPD$ ، $SM \cap LAI$ و $VPD \cap LAI$) یک نوع افزایش دو عاملی از تعامل با GPP ، ET و WUE را در سراسر منطقه مورد مطالعه به نمایش گذاشتند. درخور ذکر است برهمکنش LAI با سایر عوامل به‌طور ویژه‌ای معنی‌دار بود؛ به‌ویژه تعامل بین $Tem \cap LAI$ که به ترتیب به $0/82$ ، $0/83$ و $0/66$ رسید. در میان عوامل دیگر، $Pre \cap Rad$ و $Tem \cap Rad$ به شدت با GPP ، ET و WUE تعامل داشتند؛ در حالی که $Tem \cap VPD$ یک اثر افزایش غیرخطی بر WUE داشت.



شکل ۶: نتایج تشخیص اثرات تعاملی عوامل مختلف محرک بر GPP ، ET و WUE (منبع نگارنده، ۱۴۰۴)

Figure 6: Results of detecting the interactive effects of different driving factors on GPP ، ET and WUE

در اقلیم‌های مختلف، برهمکنش بین شاخص سطح برگ و سایر عوامل، به‌ویژه در منطقه خشک و نیمه‌خشک نسبت به سایر عوامل معنی‌دارتر بود. در اینجا، تعامل بین شاخص سطح برگ و GPP و ET تقریباً به ۰/۸ رسید؛ در حالی که تأثیر بر WUE در منطقه نیمه‌مرطوب قوی‌ترین بود. مهم‌تر از همه، اثرات متقابل عوامل به‌طور درخور توجهی در مناطق مختلف آب‌وهوایی متفاوت است.

اثر تغییرات GPP و ET بر WUE

WUE یک شاخص جامع است که توانایی تثبیت کربن و مصرف آب گیاهان را نشان می‌دهد. نظارت بر روند GPP و ET در اقلیم‌های مختلف استان کرمان در ۲۰ سال گذشته روند افزایش درخور توجهی را در این متغیرها نشان داده است که با یافته‌های تحقیقات قبلی مطابقت دارد (Ji et al., 2023, p. 194; Tian et al., 2024, p. 210). در مناطق آب‌وهوایی مختلف، تفاوت‌های آشکاری در GPP، ET و WUE وجود دارد. GPP و ET در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب بیشتر از مناطق خشک است. در منطقه نیمه‌مرطوب (شکل ۴)، افزایش GPP و ET بیشترین میزان را در بین تمام انواع آب‌وهوا نشان داد. این منطقه در ۲۰ سال گذشته بهبود درخور توجهی در پوشش گیاهی نشان داده است؛ در نتیجه GPP در این منطقه به میزان درخور توجهی افزایش یافته است. علاوه بر این، گرم شدن آب‌وهوای منطقه، همراه با افزایش تعرق پوشش گیاهی (Yu et al., 2023, p. 134; Xie et al., 2024, p. 120)، منجر به افزایش درخور توجهی در ET شده است. از آنجایی که نرخ رشد ET بیشتر از GPP است، WUE در این منطقه نیز روند کاهشی را نشان داده است. در مقایسه با منطقه نیمه‌مرطوب، منطقه مرطوب نیز مقادیر بالایی برای GPP و ET ارائه کرده است؛ با این حال، به دلیل وجود بخار آب فراوان در مناطق مرطوب، افزایش ET بیشتر از GPP است که منجر به افزایش کمتری در WUE می‌شود.

تأثیر عوامل محرک بر ET، GPP و WUE

این مطالعه با استفاده از روش‌های همبستگی جزئی و آشکارساز جغرافیایی، تأثیرات اقلیمی و عوامل محیطی اکولوژیکی را به‌طور کیفی و کمی ارزیابی کرد. اثرات عوامل محرک مختلف بر ET، GPP و WUE دارای ویژگی‌های توزیع فضایی آشکار است. از بین این عوامل، فاکتور شاخص سطح برگ بیشترین تأثیر را بر ET، GPP و WUE داشته است؛ به طوری که شاخص سطح برگ با GPP همبستگی بیشتری دارد؛ زیرا تغییر در شاخص سطح برگ می‌تواند سرعت فتوسنتز را تغییر دهد و بنابراین، به‌طور موثر بر بهره‌وری پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد. کاهش بارندگی در نتیجه خشکسالی‌های پی در پی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک استان به‌خوبی تأثیر خود را در تغییرات شاخص‌های ET و GPP گذاشته است. در عوض، بهتر بودن شرایط بارندگی در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب، با تأثیر بر پوشش گیاهی، GPP نیز پاسخ مثبتی نشان می‌دهد. به دلیل اینکه نوع پوشش گیاهی در این منطقه عمدتاً علفزار است، افزایش GPP نسبتاً محدود است که منجر به پاسخ نسبتاً ضعیف WUE نیز می‌شود. اثرات تابش خورشیدی بر این شاخص‌ها در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب، که در آن منابع آبی مناسب‌تر است، بارزتر

است؛ به طوری که افزایش تابش خورشیدی با تامین انرژی برای تبخیر بخار آب، نه تنها تعرق گیاه را تسریع می‌کند، به طور موثری سرعت فتوسنتز پوشش گیاهی را تنظیم می‌کند و باعث افزایش GPP می‌شود (p. Peng et al., 2024, 43; Shamloo et al., 2021, p. 1638)؛ با این حال، از آنجایی که افزایش ET بسیار بیشتر از GPP است، تأثیر آن بر WUE همبستگی منفی دارد. اثرات دما بر شاخص‌های مذکور در مقایسه با بارش و تابش خورشیدی نسبتاً کمتر است. گرم شدن آب‌وهوای جهانی، به افزایش GPP و ET و کاهش WUE با توزیع پراکنده در مناطق مختلف استان کرمان منجر شده است. رابطه بین کسری فشار بخار و WUE در استان کرمان همبستگی منفی دارد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که افزایش کسری فشار بخار روی پوشش گیاهی و محیط زیست تأثیر می‌گذارد. برای گیاهان، افزایش کسری فشار بخار می‌تواند مستقیماً باعث بسته شدن روزنه‌ها شود تا از تعرق بیش از حد جلوگیری شود؛ با این حال، بسته شدن روزنه، همچنین جذب CO₂ توسط گیاهان را مهار می‌کند و GPP تجمعی را کاهش می‌دهد. از نظر محیطی، افزایش کسری فشار بخار منجر به افزایش تقاضای تبخیر جوی می‌شود و در نتیجه تبخیر خاک را تحریک می‌کند (Mu et al., 2024, p. 121; Bai et al., 2023, p. 128).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تغییرات مکانی و زمانی WUE در استان کرمان از سال ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ و عوامل محرک این تغییرات بررسی شد. نتایج نشان داد در منطقه مورد مطالعه، GPP و ET به ترتیب به میزان ۷۵ و ۵۷/۳ درصد افزایش داشته است. و از طرفی WUE در ۷۶/۴۵ درصد از سطح مورد مطالعه کاهشی بوده است. همچنین تأثیر شش عامل محرک زیست‌محیطی دما، بارش، تابش خورشیدی، شاخص سطح برگ، کسری فشار بخار و رطوبت سطحی خاک از طریق تجزیه و تحلیل همبستگی جزئی و روش‌های آشکارساز جغرافیایی تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که افزایش شاخص سطح برگ نیروی محرکه اصلی برای افزایش GPP، ET و WUE است و تعامل بین شاخص سطح برگ و سایر عوامل بیشتر از عوامل محرک دیگر بود. همچنین تأثیر عوامل اقلیمی تمایز فضایی واضحی را نشان داد. بارش بیشترین تأثیر را در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب مرکزی استان کرمان داشته است؛ در حالی که تابش خورشیدی تأثیر قوی‌تری در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب مرکز و غرب استان داشت. یافته‌های مطالعه حاضر می‌تواند دیدگاه‌های مختلفی را برای مطالعه تغییرات و مکانیسم‌های محرک WUE در روند توسعه آبی اقلیم‌های مناطق مختلف آب‌وهوایی ارائه دهد.

این مطالعه نشان داد که شاخص سطح برگ (LAI) نقش اصلی در افزایش تولید ناخالص اولیه (GPP)، تبخیر و تعرق (ET) و WUE دارد و تعامل آن با سایر عوامل زیست‌محیطی بیشترین تأثیر را بر تغییرات مکانی و زمانی WUE دارد. نتایج فضایی نشان داد که بارش و تابش خورشیدی تأثیر متفاوتی در مناطق مختلف استان دارند که این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و کشاورزی، بهینه‌سازی بهره‌وری اقلیم و بازسازی مناطق کم‌بازده کمک کند. براساس یافته‌ها، توصیه می‌شود که در مناطق با کاهش WUE، مدیریت پوشش گیاهی و بازسازی اقلیم با تمرکز بر افزایش شاخص سطح برگ و استفاده بهینه از منابع آب اعمال شود. علاوه بر این، پژوهش‌های آتی می‌توانند با بررسی تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، مدل‌های پیش‌بینی WUE را توسعه دهند و مکانیزم‌های پاسخ اقلیم به عوامل متعدد محیط زیستی را دقیق‌تر مشخص کنند.

منابع

- اسکندری دامنه، هادی، غلامی، حمید، مهدوی، رسول، خورانی، اسدالله، و لی، جونران (۱۴۰۰). ارزیابی تخریب اراضی با استفاده از شاخص کارایی مصرف آب و خشکسالی (مطالعه موردی: استان فارس). *مرتع و آبخیزداری*، ۱۷۴(۱)، ۱۰۳-۱۲۰. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.314310.1550>
- جوادی، شیما، رنجبرفردویی، ابوالفضل، خسروی، حسن، و اسکندری دامنه، هادی (۱۴۰۲). بررسی اثرات خشکسالی بر کارایی مصرف آب در اقلیم و کاربری‌های مختلف (مطالعه موردی: استان تهران). *خشک بوم*، ۱۳(۲)، ۱-۱۵. https://aridbiom.yazd.ac.ir/article_3297.html
- مزیدی، احمد، عنایت‌پور، مهدیه، و حسینی، سیدسلام (۱۴۰۰). تعیین اقلیم استان کرمان با استفاده از روش‌های منحنی آمبروترمیک، ضریب خشکی دومارتون، اقلیم نمای آمبروزه. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۴(۲)، ۳۵-۴۳. <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.287987.1565>

References

- Bai, Y., Liang, S.L., Jia, A.L., & Li, S. (2023). Different satellite products revealing variable trends in global gross primary production. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128(7), e2022JG006918. <https://doi.org/10.1029/2022JG006918>
- Du, X., Zhao, X., Zhou, T., Jiang, B., Xu, P., Wu, D., & Tang, B. (2019). Effects of climate factors and human activities on the ecosystem water use efficiency throughout Northern China. *Remote Sensing*, 11(4), 37-66. <https://doi.org/10.3390/rs11232766>
- Edwards, C.E., Ewers, B.E., McClung, C.R., Lou, P., & Weinig, C. (2012). Quantitative variation in water-use efficiency across water regimes and its relationship with circadian, vegetative, reproductive, and leaf gas-exchange traits. *Molecular Plant*, 5(3), 653-668. <https://doi.org/10.1093/mp/sss004>
- Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khoorani, A. & Li, J. (2021). Assessing the land degradation using water use efficiency (WUE) and drought indices (case study: Fars province). *Journal of Range and Watershed Management*, 74(1), 103-120. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.314310.1550> [In Persian]
- Gang, C., Wang, Z., Zhou, W., Chen, Y., Li, J., Chen, J., Qi, J., Odeh, I. & Groisman, P. (2016). Assessing the spatiotemporal dynamic of global grassland water use efficiency in response to climate change from 2000 to 2013. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(5), 343-354. <https://doi.org/10.1111/jac.12137>
- Huang, L., He, B., Han, L., Liu, J., Wang, H. & Chen, Z. (2017). A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data. *Science of the Total Environment*, 601, 1097-1107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.084>
- Javadi, S., Ranjbar Fardoie, A., Khosravi, H. & Eskandari Damaneh, H. (2023). Investigating the effects of drought on the water use efficiency in different climates and land uses (Case study: Tehran province). *Journal of Arid Biome*, 13(2), 1-15. https://aridbiom.yazd.ac.ir/article_3297.html [In Persian]
- Ji, Y., Zeng, S., Tang, Q., Yan, L., Wu, S., Fan, Y., & Chen, J. (2023). Spatiotemporal variations and driving factors of China's ecosystem water use efficiency. *Ecological Indicators*, 148, 110077. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110077>
- Li, M., Yan, Q., Li, G., Yi, M., & Li, J. (2022). Spatio-Temporal Changes of Vegetation Cover and Its Influencing Factors in Northeast China from 2000 to 2021. *Remote Sensing*, 14, 5720. <https://doi.org/10.3390/rs14225720>
- Liu, W., Mo, X., Liu, S., Lin, Z., & Lv, C. (2021) Attributing the changes of grass growth, water consumed and water use efficiency over the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 598, 126464. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126464>
- Mazidi, A., Enayatpor, M., & Hosseini, SS. (2021). Climate determination of Kerman province using ambrothermic curve methods, Domarten drought coefficient, Amberjeh climate view. *Geography and Human Relationships*, 4(2), 35-43. <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.287987.1565> [In Persian]

- Mu, Y., Jia, X., Ye, Z., Guo, X., Hao, S., Zha, T., Zhang, Y., Han, C., Gao, S., & Xing, F. (2024). Vegetation factors and atmospheric dryness regulate the dynamics of ecosystem water use efficiency in a temperate semiarid shrubland. *Journal of Hydrology*, 639, 131644. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131644>
- Peng, J., Xue, Y., Pan, N., Zhang, Y., Liang, H., & Zhang, F. (2024). Exploring the Spatiotemporal Alterations in China's GPP Based on the DTEC Model. *Remote Sensing*, 16(6), 43-61. <https://doi.org/10.3390/rs16081361>
- Peters, W., van der Velde, I.R., Van Schaik, E., Miller, J.B., Ciais, P., Duarte, H.F., Laan-Luijkx, I.T., Molen, M.K., Scholze, M., & Schaefer, K. (2018). Increased water-use efficiency and reduced CO₂ uptake by plants during droughts at a continental scale. *Nature geoscience*, 11(10), 744-748. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0212-7>
- Roby, M.C., Scott, R.L., & Moore, D.J. (2020). High vapor pressure deficit decreases the productivity and water use efficiency of rain-induced pulses in semiarid ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(10), e2020JG005665. <https://doi.org/10.1029/2020JG005665>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *JASA*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shamloo, N., Taghi Sattari, M., Apaydin, H., Valizadeh Kamran, K., & Prasad, R. (2021). Evapotranspiration estimation using SEBAL algorithm integrated with remote sensing and experimental methods. *International Journal of Digital Earth*, 14(11), 1638-1658. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1962996>
- Song, Y., Wang, J., Ge, Y., & Xu, C. (2020). An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data. *Remote Sensing*, 57(12), 593-610. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1760434>
- Tarin, T., Nolan, R.H., Medlyn, B.E., Cleverly, J., & Eamus, D. (2020). Water-use efficiency in a semi-arid woodland with high rainfall variability. *Change Biology*, 26(12), 496-508. <https://doi.org/10.1111/gcb.14866>
- Tian, F., Zhu, Z., Cao, S., Zhao, W., Li, M., & Wu, J. (2024). Satellite-observed increasing coupling between vegetation productivity and greenness in the semiarid Loess Plateau of China is not captured by process-based models. *Science of the total environment*, 906, 167664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167664>
- Wang, M., Ding, Z., Wu, C., Song, L., Ma, M., Yu, P., Lu, B., & Tang, X. (2021). Divergent responses of ecosystem water-use efficiency to extreme seasonal droughts in Southwest China. *Science of the total environment*, 760, 143427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143427>
- Xie, Z., Yao, Y., Tang, Q., Liu, M., Fisher, J.B., Chen, J., Zhang, X., Jia, K., Li, Y., & Shang, K. (2024). Evaluation of seven satellite-based and two reanalysis global terrestrial evapotranspiration products. *Journal of Hydrology*, 630, 130649. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130649>
- Xue, Y., Liang, H., Zhang, B., & He, C. (2022). Vegetation restoration dominated the variation of water use efficiency in China. *Journal of Hydrology*, 612, 128257. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128257>
- Yu, Q., Lu, H., Yao, T., Xue, Y., & Feng, W. (2023). Enhancing sustainability of vegetation ecosystems through ecological engineering: A case study in the Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental quality management*, 325, 116576. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116576>
- Zhang, H., Dong, G., Wang, J., Zhang, T.L., Meng, X., Yang, D., Liu, Y., & Bin, L. (2023). Understanding and extending the geographical detector model under a linear regression framework. *International Journal of Geographical Information Science*, 37, 2437-2453. <https://doi.org/10.1080/13658816.2023.2266497>
- Zhou, Z., Ding, Y., Shi, H., Cai, H., Fu, Q., Liu, S., & Li, T. (2020). Analysis and prediction of vegetation dynamic changes in China: Past, present and future. *Ecological Indicators*, 117, 106642. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106642>
- Zou, J., Ding, J., Welp, M., Huang, S., & Liu, B. (2020). Using MODIS data to analyse the ecosystem water use efficiency spatial-temporal variations across Central Asia from 2000 to 2014. *Environmental research*, 182, 108985. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108985>