Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

Online ISSN: 2588-5146
Homepage: https://khu.ac.ir

Detection and analysis of land cover forcing evapotranspiration in Karun basin using MODIS sensor products

Mohammad Hossein Naserzadeh [1]✉ | Parviz Ziaian Firouzabadi [2] | Zahra Hejazizadeh [3] | Shirin Moradjani Honom [4]

1. Corresponding Author, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: nasserzadeh@khu.ac.ir
2. Department of Remote Sensing and Geographical Information Systems, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: zeaiean@khu.ac.ir
3. Climatology in Environmental Planning, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran,Iran. E-mail: hejazizadeh@khu.ac.ir
4. Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: Sh.moradjani@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 May 2025
Accepted 05 October 2025
Published online 07 January 2025

Keywords:
Detection,
Land cover,
Evapotranspiration,
Karun Basin
MODIS sensor.

ABSTRACT

Objective: This study investigates the spatio-temporal dynamics of evapotranspiration (ET) and its modulation by biophysical variables and land use/land cover (LULC) changes in the Karun River Basin, southwestern Iran, from 2000 to 2023. The basin, spanning 67,257 km² and characterized by diverse topography, experiences significant annual water loss (72% of 413 billion m³ national precipitation) due to ET, leading to salt and sediment accumulation.

Methods: Data from MODIS products (MCD12Q1, MOD13A1, MCD43A3, MOD11A2, MOD16A3, CHIRPS) provided land cover, NDVI, albedo, LST, precipitation, and ET at 500-meter resolution, supplemented by Landsat imagery (30-meter resolution) for validation.

Results: Multiple regression and Geographically Weighted Regression (GWR) analyses revealed a 39.5% ET increase (31.48 to 43.92 mm/year), a 32.78% NDVI rise (0.18 to 0.239), and a 16.35% LST decrease (33.52°C to 28.05°C), correlated with a 6.90% agricultural decline (6,939,225 to 6,460,335 ha), a 6.94% rangeland increase (3,840,375 to 4,106,780 ha), and a 42.76% forest expansion (156,000 to 222,700 ha). GWR (AdjR^2 > 0.97, peak 0.9887 in 2010) identified spatial non-stationarity, with overprediction in mountainous northeast regions and underprediction in agricultural southwest plains, reflecting LULC influences. Landsat-derived false color composites and classifications (overall accuracy 85–90%, Kappa 0.85–0.90) validated a 2,477 km² forest loss to high-ET rangelands/agriculture, driving warm-season ET elevation.

Conclusions: Results emphasize the need for integrated hydrological models incorporating irrigation data and high-resolution analyses to enhance sustainable water management in this water-stressed region.

Cite this article: Naserzadeh , M.H, Ziaian Firouzabadi, P., Hejazizadeh, Z, Moradjani Honom, Sh.. (2025). Detection and analysis of land cover forcing evapotranspiration in Karun basin using MODIS sensor products. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (4), 1-26. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.3

© The Author(s)
Publisher: Kharazmi University
DOI: http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.3

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Evapotranspiration (ET) represents a critical component of the hydrological cycle, profoundly influencing water resource dynamics, ecosystem services, and climate regulation, particularly in arid and semi-arid regions such as Iran. Annually, the country experiences approximately 413 billion cubic meters of precipitation, of which 72% (equivalent to 296 billion cubic meters) is lost to the atmosphere through evapotranspiration processes. The Karun River Basin, recognized as one of Iran's most water-abundant watersheds, is strategically positioned in the southwestern part of the country. This basin, characterized by diverse topography ranging from rugged mountains to expansive plains, witnesses substantial annual evaporation of fresh water from its surface, resulting in the accumulation of salts and sediments that exacerbate environmental challenges. This study investigates the spatio-temporal dynamics of ET within the Karun Basin from 2000 to 2023, integrating biophysical variables (e.g., Normalized Difference Vegetation Index [NDVI], albedo, land surface temperature [LST], and precipitation) with land use/land cover (LULC) changes. By employing advanced geospatial and statistical analyses, including multiple regression and Geographically Weighted Regression (GWR), the research elucidates the spatial non-stationarity of ET and its modulation by LULC transformations, addressing gaps in prior studies that overlooked high-resolution validation and human-induced factors.

Methods

The study area encompasses the Karun River Basin in southwestern Iran, spanning longitudes 48° to 52° E and latitudes 29° to 34° N, with a total extent of 67,257 square kilometers. This basin is defined by its two principal rivers, Karun and Dez, which originate in the Zagros Mountains, traverse complex mountainous terrain, converge approximately 50 kilometers north of Ahvaz in the Khuzestan Plain, and ultimately discharge into the Persian Gulf. The region's diverse physiography—from elevations exceeding 4,000 meters in the uplands to near-sea-level plains—contributes to varied hydrological and ecological processes.

Primary datasets included biophysical variables derived from MODIS products: land cover classifications from MCD12Q1 (500-meter spatial resolution, annual composites); NDVI from MOD13A1; albedo from MCD43A3; LST from MOD11A2; precipitation from CHIRPS (5-kilometer resolution); and actual ET from MOD16A3 (500-meter resolution, annual). Auxiliary data comprised Landsat imagery (TM/ETM+/OLI, 30-meter resolution) for validation, including false color composites (NIR-Red-Green bands) and supervised classification using the Maximum Likelihood algorithm in ArcGIS Pro v3.4. Land cover changes were interpolated linearly across key years (2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2023) into a continuous time series, with six classes: rangeland/vegetation, agriculture, forest, barren land, urban/built-up, and water.

Data preprocessing involved atmospheric and geometric corrections, resampling to 500-meter resolution via bilinear interpolation, and clipping to basin boundaries. Statistical analyses encompassed multiple regression in Excel (Analysis ToolPak) to model ET against biophysical predictors, ANOVA for temporal comparisons across decadal periods, and trend analysis via scatter plots with linear regression lines. Spatial modeling utilized GWR in ArcGIS Pro (Bisquare kernel, 80 neighbors) to capture local variations in ET relationships. Classification accuracy was validated using stratified random sampling, confusion matrices, overall accuracy (OA), and Kappa coefficient, yielding OA >85% and Kappa >0.85 across years. All analyses were conducted in ArcGIS Pro v3.4 and Microsoft Excel.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

Results

This research elucidates the interplay between land cover dynamics and biophysical variables in modulating ET rates across cold (January) and warm (June) seasons in the Karun Basin. Temporal analysis revealed ET rates in June were at least fivefold higher than in January for all land cover types, with irrigated and rain-fed agricultural lands exhibiting the highest values (up to 170 mm/month), followed by rangelands (150 mm/month), while barren and urban lands recorded the lowest (<50 mm/month). Over 2000–2023, LULC changes included a 6.90% decline in agriculture (6,939,225 to 6,460,335 hectares), a 6.94% increase in rangelands (3,840,375 to 4,106,780 hectares), a 42.76% expansion in forests (156,000 to 222,700 hectares), and a 21.31% urban growth (104,100 to 126,280 hectares). These shifts correlated with a 39.5% ET increase (31.48 to 43.92 mm/year), a 32.78% NDVI rise (0.18 to 0.239), and a 16.35% LST decrease (33.52°C to 28.05°C), alongside modest precipitation stability (387.36 to 391.87 mm/year) and albedo reduction (198.48 to 195.74).

Multiple regression (R^2=0.998, Adjusted R^2=0.947, Significance F<0.0001) confirmed NDVI (β=208.27, P=3.71E-08) and precipitation (β=0.020, P=0.0018) as significant ET predictors, with albedo (P=0.736) and LST (P=0.056) showing negligible effects. ANOVA indicated significant inter-decadal differences in LST (F=2222.62, P<0.001) and precipitation (P<0.05), reflecting climatic variability. Linear trends corroborated these patterns: ET (+0.56 mm/year, R^2=0.43, P<0.01), NDVI (+0.002/year, R^2=0.55, P<0.001), and LST (-0.1°C/year, R^2=0.35, P<0.01).

GWR analysis (AdjR^2>0.97 across years, peak in 2010 at 0.9887) unveiled spatial non-stationarity, with bipolar residuals: overprediction in northeastern mountainous areas (dominated by natural processes like topographic constraints) and underprediction in southwestern agricultural plains (influenced by irrigation). Geospatial dispersion analysis of GWR maps highlighted clustered overprediction in rugged uplands and diffuse underprediction in irrigated lowlands, aligning with LULC transitions (e.g., agriculture-to-rangeland conversion at 3.60%). Landsat false color composites and classifications (OA=85–90%, Kappa=0.85–0.90) validated MODIS-derived changes, enhancing detection of subtle shifts like a 2,477 km² forest loss (2000–2020) to rangelands and rain-fed agriculture, which amplified warm-season ET by promoting high-evapotranspiration classes.

These findings underscore LULC's moderating role in ET heterogeneity, where agricultural expansion drives basin-wide ET increases, while natural recovery in uplands tempers LST. The integration of high-resolution Landsat data addresses validation gaps, confirming MODIS reliability while revealing irrigation's unmodeled influence on underprediction.

Conclusion

This study demonstrates that over 2000–2023, the Karun Basin underwent significant LULC transformations, including a 6.90% agricultural decline and 6.94% rangeland expansion, driving a 39.5% ET increase (31.48 to 43.92 mm/year), 32.78% NDVI growth (0.18 to 0.239), and 16.35% LST reduction (33.52°C to 28.05°C). Multiple regression affirmed NDVI and precipitation as primary ET drivers, while GWR (AdjR^2>0.97) exposed spatial non-stationarity, with overprediction in mountains and underprediction in plains reflecting LULC moderation. Landsat validation (OA=85–90%, Kappa=0.85–0.90) detailed transitions like 2,477 km² forest loss to high-ET rangelands/agriculture, elevating basin ET volume. These dynamics highlight human interventions (e.g., irrigation) and natural recovery's interplay in hydrological shifts. Findings advocate integrated models incorporating anthropogenic data and high-resolution analyses for sustainable water management, providing a geospatial framework for regional planning in water-scarce environments.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

Keywords: Detection, Land cover, Evapotranspiration, Karun Basin, MODIS sensor.

Author Contributions

First author: Thesis supervisor, research design, supervision of research procedures, review and validation of results, revision, review, and finalization of the manuscript.
Second author: Second thesis supervisor or advisor, participation in research design, research supervision, reviewing and editing the manuscript.
Third author: Thesis advisor, participation in research design, supervision of research, reviewing and editing the manuscript.
Fourth author: Preparation and organization of samples, data collection, computations, statistical data analysis, interpretation of information and results, drafting the manuscript.

Data Availability Statement

"Not applicable".

Acknowledgements

Acknowledgments and appreciation should be included in the article. Example sentence:
We would like to express our gratitude to the esteemed research department of Kharazmi University, our supervisors, advisors, and honorable reviewers for their cooperation in conducting this research.

Ethical considerations

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

Funding

This article has not received financial support from any university research department.

Conflict of interest

According to the authors, there is no conflict of interest in this article.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: ۵۱۴۶- ۲۵۸۸

Homepage: https://khu.ac.ir

آشکارسازی و تحلیل واداشت تبخیر و تعرق پوشش اراضی در حوضه کارون با استفاده از محصولات سنجنده مادیس

محمد حسین ناصرزاده[۱]✉| پرویز ضیائیان فیروزآبادی [۲] | زهرابیگم حجازی زاده [۳] | شیرین مرادجانی‌هنم [۴]

۱. نویسنده مسئول، اقلیم شناسی گروه جغرافیا، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: nasserzadeh@khu.ac.ir

۲. گروه سنجش از دور و سیستم های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: zeaiean@khu.ac.ir

۳. اقلیم شناسی گروه جغرافیا، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: hejazizadeh@khu.ac.ir

۴. آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: Sh.moradjani@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

کلیدواژه‌ها:
آشکارسازی،
پوشش اراضی،
تبخیر و تعرق،
حوضه کارون،
سنجده MODIS.

هدف: این پژوهش به تحلیل پویایی‌های فضایی ـ زمانی تبخیر و تعرق (ET) و اثر متغیرهای بیوفیزیکی و تغییرات کاربری/پوشش اراضی (LULC) در حوضه آبریز رودخانه کارون (جنوب‌غرب ایران) طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ می‌پردازد. این حوضه با وسعت ۶۷/۲۵۷ کیلومتر مربع و توپوگرافی متنوع، سالانه با اتلاف چشمگیر منابع آبی مواجه است؛ به‌طوری‌که حدود ۷۲ درصد از بارش ملی (معادل ۴۱۳ میلیارد مترمکعب) به دلیل تبخیر و تعرق از دست می‌رود و پیامد آن انباشت نمک و رسوب است.

روش پژوهش: داده‌های ماهواره‌ای MODIS (MCD12Q1، MOD13A1، MCD43A3، MOD11A2، MOD16A3 و CHIRPS) اطلاعات مربوط به کاربری اراضی، شاخص NDVI، آلبدو، دمای سطح زمین (LST)، بارش و تبخیر و تعرق را با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر فراهم آوردند و تصاویر لندست با قدرت تفکیک ۳۰ متر جهت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج حاصل از رگرسیون چندمتغیره و رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR) بیانگر افزایش ۵/۳۹ درصدی تبخیر و تعرق (از ۴۸/۳۱ به ۹۲/۴۳ میلی‌متر در سال)، رشد ۷۸/۳۲ درصدی شاخص NDVI (از ۱۸/۰ به ۲۳۹/۰) و کاهش ۳۵/۱۶ درصدی دمای سطح زمین (از ۵۲/۳۳ به ۰۵/۲۸ درجه سلسیوس) بود. این تغییرات همزمان با کاهش ۹۰/۶ درصدی اراضی کشاورزی، افزایش ۹۴/۶ درصدی مراتع و گسترش ۷۶/۴۲ درصدی جنگل‌ها رخ داد. مدل GWR ($AdjR^2$) بالاتر از ۹۷/۰، بیشینه ۹۸۸۷/۰ در سال ۲۰۱۰) نشان‌دهنده ناایستایی فضایی بود؛ به‌گونه‌ای که در مناطق کوهستانی شمال‌شرق برآورد بیش از مقدار واقعی و در دشت‌های کشاورزی جنوب‌غرب برآورد کمتر از مقدار واقعی مشاهده شد. همچنین، صحت‌سنجی با تصاویر لندست (دقت کلی ۸۵ تا ۹۰ درصد و ضریب کاپای ۸۵/۰ تا ۹۰/۰) نشان داد که حدود ۲/۴۷۷ کیلومتر مربع از جنگل‌ها به کاربری‌های با تبخیر و تعرق بالا (مراتع و کشاورزی) تغییر یافته‌اند که سبب افزایش ET در فصل گرم گردید.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، نتایج این پژوهش بر اهمیت استفاده از مدل‌های یکپارچه هیدرولوژیکی تأکید می‌کند؛ مدل‌هایی که داده‌های آبیاری و تحلیل‌های با وضوح بالا را در بر گیرند تا راهکارهای مؤثرتری برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق تحت تنش آبی فراهم شود.

استناد: ناصرزاده، محمدحسین؛ ضیائیان، پرویز؛ حجازی زاده، زهرا؛ و مرادجانی هنم، شیرین (۱۴۰۴). آشکارسازی و تحلیل واداشت تبخیر و تعرق پوشش اراضی در حوضه کارون با استفاده از محصولات سنجنده مادیس. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۴)، ۱-۲۶.
http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.3

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

مقدمه

تبخیر و تعرق (ET) به عنوان یک فرآیند کلیدی و پیونددهنده در چرخه‌های آب، انرژی و کربن، نقشی حیاتی در پایداری سیستم‌های هیدرولوژیکی و اکولوژیکی ایفا می‌کند. این مؤلفه که مجموع تبخیر از سطوح مرطوب (خاک، رواناب) و تعرق از پوشش گیاهی را شامل می‌شود، نه تنها یک جزء اصلی از بیلان آب محسوب می‌شود، بلکه به طور مستقیم بر متغیرهای اقلیمی خرد و کلان، از جمله دما و رطوبت هوا، تأثیرگذاراست آلن[1] و همکاران (۲۰۱۱) و میرالز[2] و همکاران (۲۰۲۰). اهمیت ET در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند بخش‌های وسیعی از ایران، به مراتب بیشتر است. در این مناطق، محدودیت شدید منابع آب، همراه با نرخ بالای تابش خورشیدی و دمای محیط، منجر به تشدید تنش‌های آبی، افزایش شوری خاک، کاهش بهره‌وری در بخش کشاورزی و پیامدهای زیست‌محیطی جدی مانند بیابان‌زایی و فرونشست زمین می‌شود. بر اساس آمارهای رسمی، از مجموع حدود ۴۱۳ میلیارد متر مکعب بارش سالانه در ایران، رقمی بالغ بر ۷۲ درصد (معادل ۲۹۶ میلیارد متر مکعب) از طریق فرآیندهای تبخیر و تعرق به اتمسفر باز می گردد مدنی (۲۰۱۴). این رقم تکان‌دهنده نشان می‌دهد که هرگونه مدیریت پایدار منابع آب بدون درک عمیق، پایش دقیق و مدل‌سازی علمی ET تقریباً غیرممکن است و بخش بزرگی از آب قابل دسترس کشور خارج از چرخه مدیریت انسانی قرار دارد.

در این میان، حوضه آبریز کارون، به عنوان بزرگ‌ترین و استراتژیک‌ترین حوضه آبریز جنوب‌غرب ایران، یک آزمایشگاه طبیعی برای مطالعه تعاملات پیچیده هیدرولوژیکی به شمار می‌رود. این حوضه با مساحت ۶۷،۲۵۷ کیلومتر مربع، از یک سو سرچشمه‌های کوهستانی و پربرف زاگرس مرکزی با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر را در بر می‌گیرد و از سوی دیگر به دشت‌های آبرفتی و حاصلخیز خوزستان منتهی می‌شود. این تنوع توپوگرافیک، شیب‌های اقلیمی چشمگیری را از شرایط سرد و مرطوب کوهستانی تا گرم و خشک دشتی ایجاد کرده که به خودی خود توزیع مکانی ET را به شدت ناهمگون می‌سازد. علاوه بر این عوامل طبیعی، حوضه کارون در دهه‌های اخیر تحت فشارهای انسانی بی‌سابقه‌ای قرار گرفته است. توسعه گسترده کشاورزی آبیاری‌محور، به ویژه برای محصولات پرآب‌بری مانند نیشکر، احداث سدهای متعدد برای تولید برق و ذخیره آب، رشد سریع شهرنشینی و تغییرات گسترده در کاربری اراضی، دینامیک طبیعی آب را دگرگون کرده و به پیچیدگی تحلیل فرآیندهای هیدرولوژیکی افزوده‌اند کریمی و همگاران (۲۰۱۵) این تعاملات دوسویه میان سیستم‌های طبیعی و انسانی، ضرورت یک تحلیل یکپارچه و چندبعدی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

برای مواجهه با این پیچیدگی‌ها، فناوری سنجش از دور در دهه‌های اخیر به ابزاری کارآمد و ضروری برای پایش متغیرهای محیطی در مقیاس‌های بزرگ تبدیل شده است. در همین راستا، مطالعات متعددی در ایران و جهان، قابلیت الگوریتم‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطحی را برای برآورد ET ارزیابی کرده‌اند. در داخل کشور، تحقیقات اولیه مانند پژوهش یعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) بر روی دشت نیشابور، با استفاده از داده‌های ماهواره مودیس، همبستگی مستقیم و قوی میان ET و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) را به اثبات رساندند. پژوهش‌های تکمیلی توسط نوری و فرامرز (۱۳۹۶) و اولیا و سیما (۱۴۰۰)، با مقایسه الگوریتم‌هایی نظیر SEBAL و ارزیابی عدم قطعیت‌های ناشی از تفکیک مکانی داده‌های ماهواره‌ای (MODIS) در مقابل (Landsat)، نشان دادند که انتخاب سنجنده و الگوریتم مناسب تا چه حد می‌تواند بر دقت نتایج در مناطق ناهمگون کشاورزی تأثیرگذار باشد. به طور مشابه، باباجعفری و همکاران (۱۳۹۷) با الگوریتم SEBS در حوضه دریاچه ارومیه و قاسمی و همکاران (۱۴۰۲) با مقایسه مدل هیدرولوژیکی SWAT و الگوریتم SEBAL در حوضه کارون، کارایی این ابزارها را در برآورد نیاز آبی گیاهان و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی تأیید کردند. این مطالعات پایه‌های روش‌شناختی لازم برای استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در مدیریت آب ایران را فراهم آوردند.

[1] - Allen
[2] - Mirales

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

فراتر از ارزیابی‌های روش‌شناختی، کانون توجه بخش دیگری از تحقیقات، بررسی تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی، به ویژه تغییر کاربری اراضی، بر دینامیک ET بوده است. سلطانی گرد فرامرزی و دانشور مروست (۱۳۹۸) نشان دادند که چگونه تبدیل مراتع به اراضی شهری و زراعی منجر به تغییرات قابل توجهی در تبخیر و تعرق پتانسیل می‌شود. این یافته‌ها در مقیاس جهانی نیز تأیید شده‌اند؛ برای مثال، دیاز و همکاران (۲۰۱۵) در برزیل و احمدپور و همکاران (۲۰۲۵) در آلمان، به صورت کمی نشان دادند که جایگزینی پوشش‌های طبیعی مانند جنگل و مرتع با اراضی کشاورزی، به ترتیب منجر به افزایش رواناب و افزایش ET فصلی می‌شود. این تحقیقات، در کنار مطالعاتی مانند پژوهش جیاردینو و همکاران (۲۰۲۳) که ارتباط میان روند افزایش دمای سطح زمین (LST) و تغییرات پوشش جنگلی را تحلیل کردند، به وضوح نشان می‌دهند که تصمیمات مرتبط با کاربری اراضی دارای پیامدهای مستقیم و قابل اندازه‌گیری بر بیلان آب و انرژی هستند. روند جهانی افزایش ET، که توسط جعفر و سجود (۲۰۲۴) با تحلیل داده‌های ۳۰ ساله جهانی مستند شده، این نگرانی را تشدید می‌کند که تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به صورت هم‌افزا در حال سرعت بخشیدن به چرخه آب و افزایش تنش آبی هستند.

با این وجود، علی‌رغم این مجموعه ارزشمند از پژوهش‌ها، یک بررسی دقیق نشان می‌دهد که مطالعات پیشین در ایران دارای کاستی‌های مشخصی هستند. بسیاری از این تحقیقات، به دلیل محدودیت داده، فاقد اعتبارسنجی نتایج با داده‌های زمینی یا ماهواره‌ای با وضوح مکانی بالا بوده‌اند. این امر به‌ویژه در مناطق کشاورزی با الگوی کشت خرد و ناهمگون، دقت برآوردها را زیر سؤال می‌برد. مهم‌تر از آن، اکثر مطالعات به تحلیل جامع تعاملات پیچیده میان عوامل انسانی و طبیعی نپرداخته و اثرات ترکیبی تغییرات کاربری اراضی، الگوهای آبیاری و ساختارهای هیدرولیکی (مانند سدها و شبکه‌های انتقال آب) را بر ET نادیده گرفته‌اند. در نتیجه، تصویر دقیقی از دینامیک فضایی–زمانی ET و نقش مشخص تغییرات антропо ژنیک در حوضه‌های کلیدی مانند کارون در دسترس نیست. اغلب تحلیل‌ها به بررسی روندهای کلی و متوسط در مقیاس حوضه محدود شده و از شناسایی "نقاط داغ (Hotspots) "یا مناطقی که دارای ناهمسانی فضایی شدید و حساسیت بالا به تغییرات هستند، بازمانده‌اند.

در پاسخ به این شکاف‌های تحقیقاتی، پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع، چندمقیاسی و فضایی–زمانی تغییرات ET در حوضه آبریز کارون طی دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ و ارزیابی کمی اثر متغیرهای بیوفیزیکی و تغییرات کاربری/پوشش اراضی طراحی شده است. این مطالعه با تلفیق داده‌های چندمنبعی از سنجنده‌های MODIS (برای پوشش زمانی گسترده) و Landsat (برای دقت مکانی بالا) و به کارگیری روش‌های آماری پیشرفته، به ویژه رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR)، به دنبال آن است تا از یک تحلیل کلی فراتر رفته و به درک روابط مکانی غیرایستای میان ET و عوامل مؤثر بر آن دست یابد.

نوآوری و شکاف پژوهش :نوآوری اصلی این تحقیق در رویکرد یکپارچه و چندوجهی آن نهفته است. این مطالعه با تمرکز بر اعتبارسنجی دقیق نتایج با استفاده از داده‌های با وضوح بالا، تحلیل همزمان تعاملات انسانی–طبیعی و شناسایی ناهمسانی‌های مکانی ET از طریق مدل‌سازی پیشرفته، شکاف‌های کلیدی موجود در تحقیقات پیشین را پر می‌کند. استفاده از تحلیل GWR این امکان را فراهم می‌آورد تا به جای یک رابطه ثابت و متوسط برای کل حوضه، روابط متغیر و محلی میان ET و عواملی مانند دما، پوشش گیاهی و نوع کاربری اراضی را مدل‌سازی کنیم. این رویکرد، علاوه بر ارتقای دانش نظری در زمینه هیدرولوژی سنجش از دوری، کاربردهای عملی و مدیریتی مشخصی را ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی علمی برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب فراهم آورد تا با شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و درک دقیق‌تر تأثیر سیاست‌های توسعه‌ای، تصمیمات آگاهانه‌تری برای مدیریت پایدار منابع آب حیاتی حوضه کارون اتخاذ نمایند.

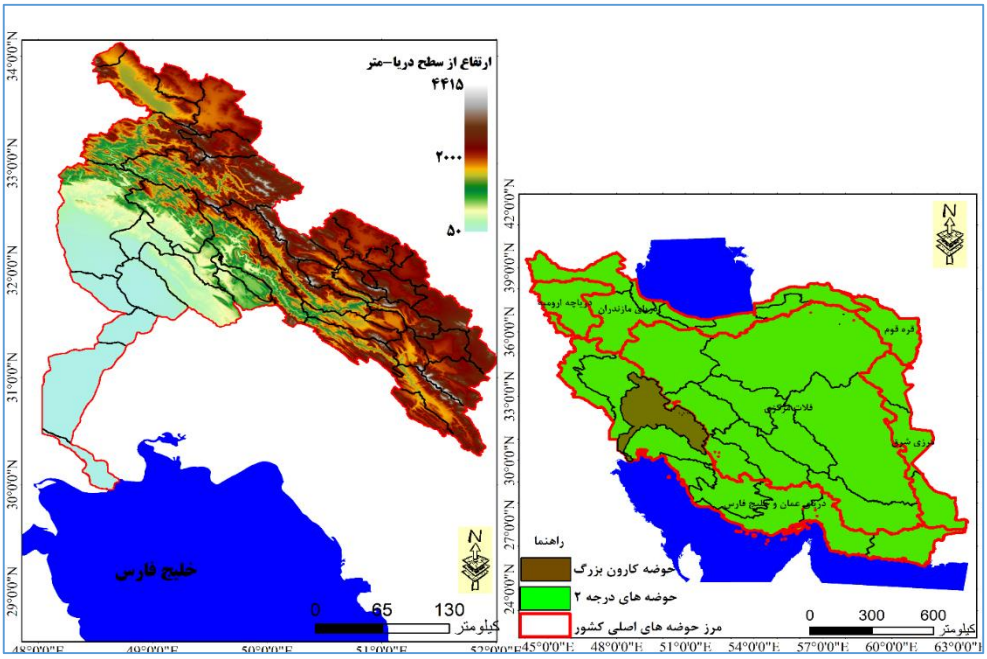
روش‌شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز رودخانه کارون، به عنوان پرآب‌ترین و طویل‌ترین سیستم رودخانه‌ای ایران، انتخاب گردیده است. این حوضه با مساحتی بالغ بر ۶۷،۰۰۰ کیلومتر مربع، از منظر جغرافیایی و اکولوژیکی، یک گرادیان بسیار برجسته از شرایط متنوع را به نمایش می‌گذارد؛ از ارتفاعات سیستم کوهستانی زاگرس در شمال و شرق که سرچشمه اصلی رودخانه بوده و ارتفاع آن‌ها به

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

بیش از ۴۰۰۰ متر از سطح دریا می‌رسد، تا دشت‌های آبرفتی و حاصلخیز خوزستان در جنوب و غرب که در ارتفاعات پایین‌تری استقرار یافته و به عنوان قطب کشاورزی کشور ایفای نقش می‌نمایند. این شیب توپوگرافیک شدید، گرادیان‌های اقلیمی قابل توجهی را از اقلیم سرد کوهستانی تا گرم و خشک در طول حوضه ایجاد نموده است. این تنوع اقلیمی، در معیت فشار فزاینده ناشی از فعالیت‌های انسانی نظیر کشاورزی فشرده و آبیاری، سدسازی‌های متعدد و توسعه شهری، این حوضه را به یک آزمایشگاه طبیعی ایده‌آل برای مطالعه تعاملات پیچیده بین فرآیندهای هیدرولوژیکی، تغییرات اقلیم و دگرگونی‌های پوشش اراضی مبدل ساخته است. انتخاب این حوضه به دلیل اهمیت استراتژیک آن در تأمین آب، امنیت غذایی و تولید انرژی برای کشور و همچنین آسیب‌پذیری مشهود آن در برابر تغییرات اقلیمی، توجیه علمی می‌یابد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه کارون

۲. داده‌ها و روش کار

۲-۱. داده‌های MODIS

بخش اعظم متغیرهای بیوفیزیکی و همچنین نقشه‌های پایه پوشش اراضی از محصولات استاندارد سنجنده MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) با توان تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استخراج گردید. این داده‌ها به دلیل پوشش زمانی پیوسته (از سال ۲۰۰۰ تاکنون) و توان تفکیک زمانی بالا (روزانه تا ۱۶ روزه)، برای تحلیل‌های روند بلندمدت و پایش پویایی‌های بین‌سالی و فصلی به عنوان یک منبع داده بهینه تلقی می‌شوند. محصولات مورد استفاده عبارتند از:

پوشش اراضی (Land Cover): از محصول سالانه پوشش اراضی مودیس (MCD12Q1) به عنوان نقشه پایه برای طبقه‌بندی استفاده شد.

شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI): از محصول ترکیبی ۱۶ روزه (MOD13A1) به عنوان یک نماگر (proxy) برای سلامت، تراکم و فعالیت فتوسنتزی پوشش گیاهی استخراج شد.

دمای سطح زمین (LST): از محصول ترکیبی ۸ روزه (MOD11A2) به عنوان یک پارامتر کلیدی در مدل‌سازی بیلان انرژی سطح و فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده شد.

آلبیدو (Albedo): از محصول ترکیبی ۸ روزه آلبیدوی موج کوتاه (MCD43A3) برای ارزیابی میزان بازتابندگی انرژی خورشیدی از سطح زمین استفاده گردید.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

تبخیر و تعرق (ET): از محصول سالانه تبخیر و تعرق (MOD16A3) به عنوان متغیر وابسته اصلی در تحلیل‌های مکانی بهره گرفته شد. این محصول بر اساس الگوریتم پنمن–مانتیث توسعه یافته و یک برآورد فضایی از تبخیر و تعرق واقعی ارائه می‌دهد.

۲–۲. داده‌های Landsat

به منظور ارزیابی صحت (Accuracy Assessment) نقشه‌های پوشش اراضی تولید شده از داده‌های MODIS، از تصاویر ماهواره لندست سنجنده‌های (TM, ETM+, OLI) با دقت مکانی بالاتر (۳۰ متر) به عنوان داده‌های مرجع یا "حقیقت زمینی" (Ground Truth) برای سال‌های کلیدی (۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳) استفاده شد. انتخاب لندست به دلیل توان تفکیک مکانی بالای آن است که امکان شناسایی دقیق‌تر کلاس‌های پوشش اراضی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از داده‌های درشت‌مقیاس‌تر MODISرا فراهم می‌آورد. این داده‌ها از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) تهیه گردید.

۲–۳. داده‌های اقلیمی / بارش

داده‌های رستری مربوط به متغیر بارش از پایگاه داده (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) CHIRPS استخراج گردید. این پایگاه داده، با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای مادون قرمز و داده‌های ایستگاه‌های زمینی، اطلاعات بارش را با وضوح مکانی بالا (حدود ۵ کیلومتر) و پوشش زمانی گسترده ارائه می‌دهد که به ویژه برای مناطق کوهستانی و داده‌مبنا مانند بخش‌هایی از زاگرس، منبع قابل اتکایی محسوب می‌شود.

۲–۴. پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های رستری پس از تصحیح اتمسفری و هندسی، به ترکیبات سالانه (annual composites) تبدیل شدند تا اثرات فصلی و ابرناکی کاهش یابد. سپس، با روش درونیابی دوخطی به رزولوشن مشترک ۵۰۰ متر همسان‌سازی و بر اساس مرز حوضه کارون برش داده شدند.

۲–۵. طبقه‌بندی پوشش اراضی و ارزیابی صحت

با استفاده از داده‌های ۵۰۰ متری MODIS، نقشه‌های پوشش اراضی برای سال‌های کلیدی در شش کلاس (مرتع/پوشش گیاهی، کشاورزی، زمین‌های بایر، شهری/انسان‌ساخت، آب و جنگل) با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم حداکثر احتمال (Maximum Likelihood) تولید گردید. این الگوریتم هر پیکسل را بر اساس احتمال تعلق آن به کلاسی که بیشترین شباهت آماری (بر اساس میانگین و ماتریس کوواریانس) را با نمونه‌های آموزشی آن کلاس دارد، طبقه‌بندی می‌کند. سپس مساحت هر کلاس در هر سال محاسبه شد و برای ایجاد یک سری زمانی پیوسته جهت تحلیل‌های زمانی، از روش میانیابی خطی (Linear Interpolation) برای تخمین مساحت در سال‌های میانی استفاده شد. معیارها:

صحت کلی (Overall Accuracy): نشان‌دهنده نسبت کل پیکسل‌هایی است که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند.

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^{k} {}_{ii}n}{N}$$

که ${}_{ii}n$ تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده کلاس i و N تعداد کل پیکسل‌هاست.

ضریب کاپا: معیاری از توافق بین نقشه طبقه‌بندی شده و داده‌های مرجع است که اثر توافق شانسی را حذف می‌کند و ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد طبقه‌بندی ارائه می‌دهد .نتایج ارزیابی صحت نشان داد که طبقه‌بندی‌ها از دقت بسیار بالایی برخوردارند.

$$\kappa = \frac{{}_{e}P_{o} - P}{{}_{e}P - 1}$$

که ${}_{o}P$ صحت مشاهده‌شده و ${}_{e}P$ صحت مورد انتظار است. نتایج نشان داد که صحت کلی در تمام سال‌ها بیش از ۸۶% و ضریب کاپا بیش از ۰.۸۵ است (جدول ۱).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

۲-۶. نرمال‌سازی داده‌ها

به منظور استانداردسازی و قابل مقایسه کردن متغیرهایی با واحدهای اندازه‌گیری و دامنه‌های عددی متفاوت، تمامی داده‌های پیوسته با استفاده از روش Z-score نرمال‌سازی شدند. این فرآیند برای تحلیل‌های رگرسیون چندمتغیره حیاتی است، زیرا از تسلط متغیرهایی با مقادیر بزرگ) مانند (LST بر متغیرهایی با مقادیر کوچک) مانند (NDVI) در فرآیند مدل‌سازی جلوگیری کرده و به ضرایب رگرسیون قابلیت تفسیر بهتری می‌بخشد. متغیرهای پیوسته با روش Z-score استاندارد شدند:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

که x مقدار مشاهده، μ میانگین، و σ انحراف معیار است.

۲-۷. تحلیل‌های آماری

تحلیل رگرسیون زمانی: به عنوان یک گام اکتشافی، برای بررسی رابطه بین تغییرات مساحت هر کلاس پوشش اراضی و میانگین حوضه‌ای متغیرهای بیوفیزیکی و اقلیمی، از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره در محیط Microsoft Excel استفاده شد. این تحلیل به شناسایی محرک‌های اصلی و روندهای کلی تغییرات پوشش اراضی در مقیاس کلان حوضه کمک کرد.

مدل‌سازی مکانی با GWR

تحلیل رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR): به منظور تحلیل ناهمسانی مکانی در روابط بین تبخیر و تعرق (et) و متغیرهای پیش‌بین، از مدل GWR استفاده گردید. GWR بر این فرض استوار است که روابط بین متغیرها در فضا ثابت نبوده و به صورت محلی تغییر می‌کنند. پارامترهای اصلی مدل در نرم‌افزار ArcGIS Pro به شرح زیر تنظیم شدند:

- Neighborhood Type: Number of Neighbors (کرنل انطباقی) این روش برای داده‌هایی که به صورت نامنظم پراکنده شده‌اند، مناسب‌تر از کرنل ثابت است.
- Number of Neighbors 80: این عدد برای تعریف اندازه همسایگی محلی هر رگرسیون استفاده شد.
- Local Weighting Scheme :Bisquare یک تابع کرنل رایج که به نقاط نزدیک‌تر در همسایگی وزن بیشتری اختصاص می‌دهد و تأثیر نقاط دورتر را به تدریج کاهش می‌دهد.
- Scale Data: فعال (برای استانداردسازی متغیرها).

ارزیابی نتایج GWR در دو سطح صورت گرفت:

- تحلیل آماره‌های تشخیصی کلی: بررسی معیارهایی نظیر R^2 تعدیل‌شده ($AdjR^2$) و معیار اطلاعاتی آکائیک (AICc) برای مقایسه برازش مدل در سال‌های مختلف و ارزیابی بهبود آن نسبت به مدل‌های جهانی.
- تحلیل فضایی باقی‌مانده‌ها: تفسیر نقشه‌های باقی‌مانده‌های استاندارد شده به منظور شناسایی خوشه‌های فضایی خطا مناطق (Overprediction) و (Underprediction) و استنتاج فرآیندهای مکانی حاکم که در مدل لحاظ نشده بودند.

رگرسیون موزون جغرافیایی برای تحلیل ناهمسانی مکانی روابط ET اجرا شد:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k-1}^{p} \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i$$

پارامترها: کرنل ۸۰ ،Bisquare همسایه، استانداردسازی داده‌ها. آماره‌های $AdjR^2$ و AICc برای ارزیابی کلی و نقشه باقی‌مانده‌ها برای تحلیل فضایی استفاده شد.

۲-۷. نرم‌افزارها

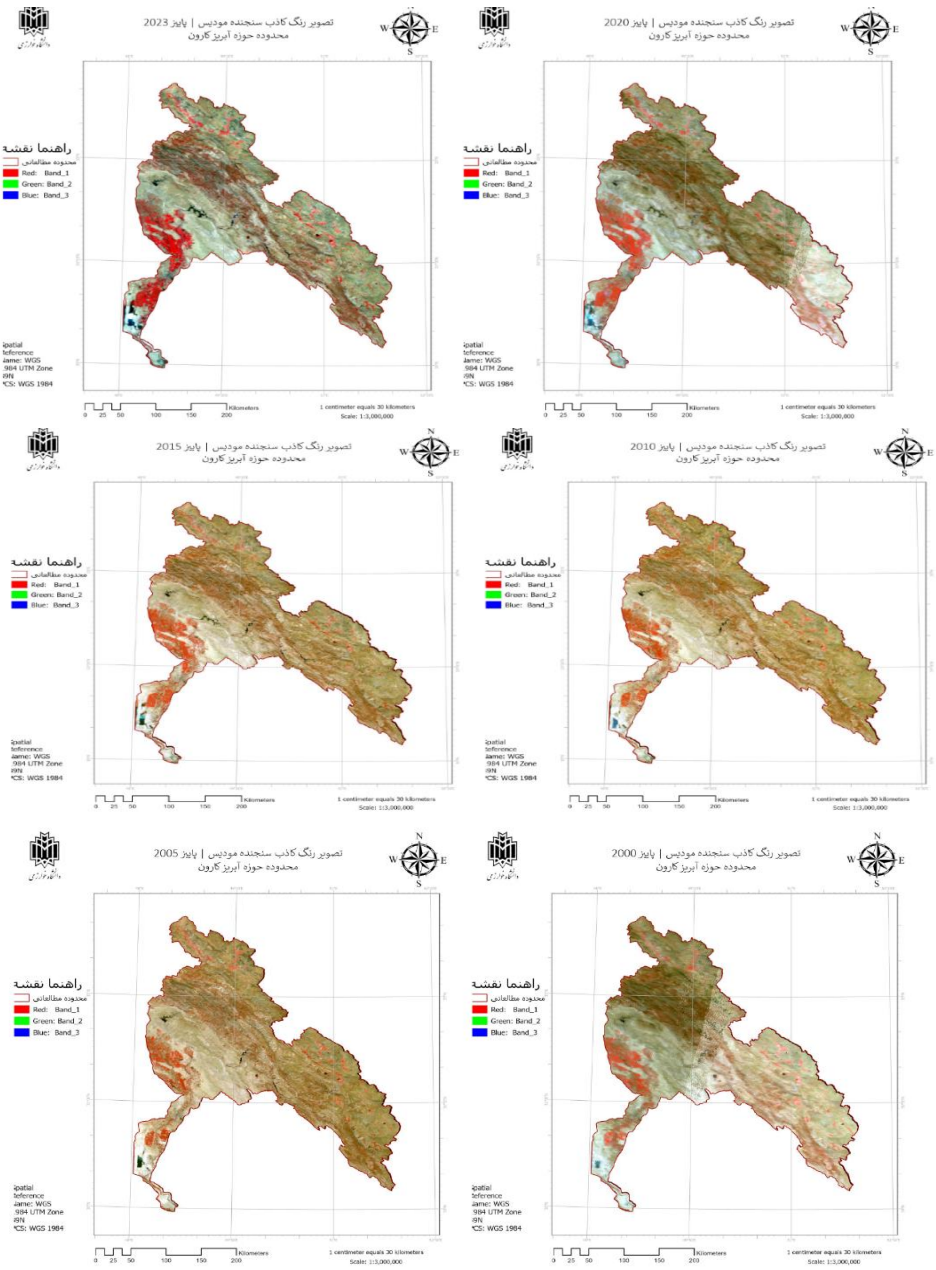
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

تمام مراحل پردازش داده‌های مکانی، تحلیل‌های GWR و تهیه نقشه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS Pro v3.4 و با استفاده از جعبه‌ابزارهای Spatial Analyst و Spatial Statistics انجام گرفت. تحلیل‌های آماری تکمیلی، مدیریت داده‌های جدولی و تولید نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel صورت پذیرفت.

یافته‌های پژوهش

استفاده از تصاویر رنگ کاذب مودیس

به منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی پوشش اراضی و شرایط سطح زمین در حوضه آبریز کارون، از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استفاده گردید. برای این منظور، تصاویر فصلی پاییز مربوط به سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳ تهیه و پردازش شدند. جهت نمایش و آشکارسازی بهتر تمایز بین کاربری‌ها و پوشش‌های سطحی مختلف، ترکیب رنگ کاذب (False Color Composite) به کار گرفته شد.



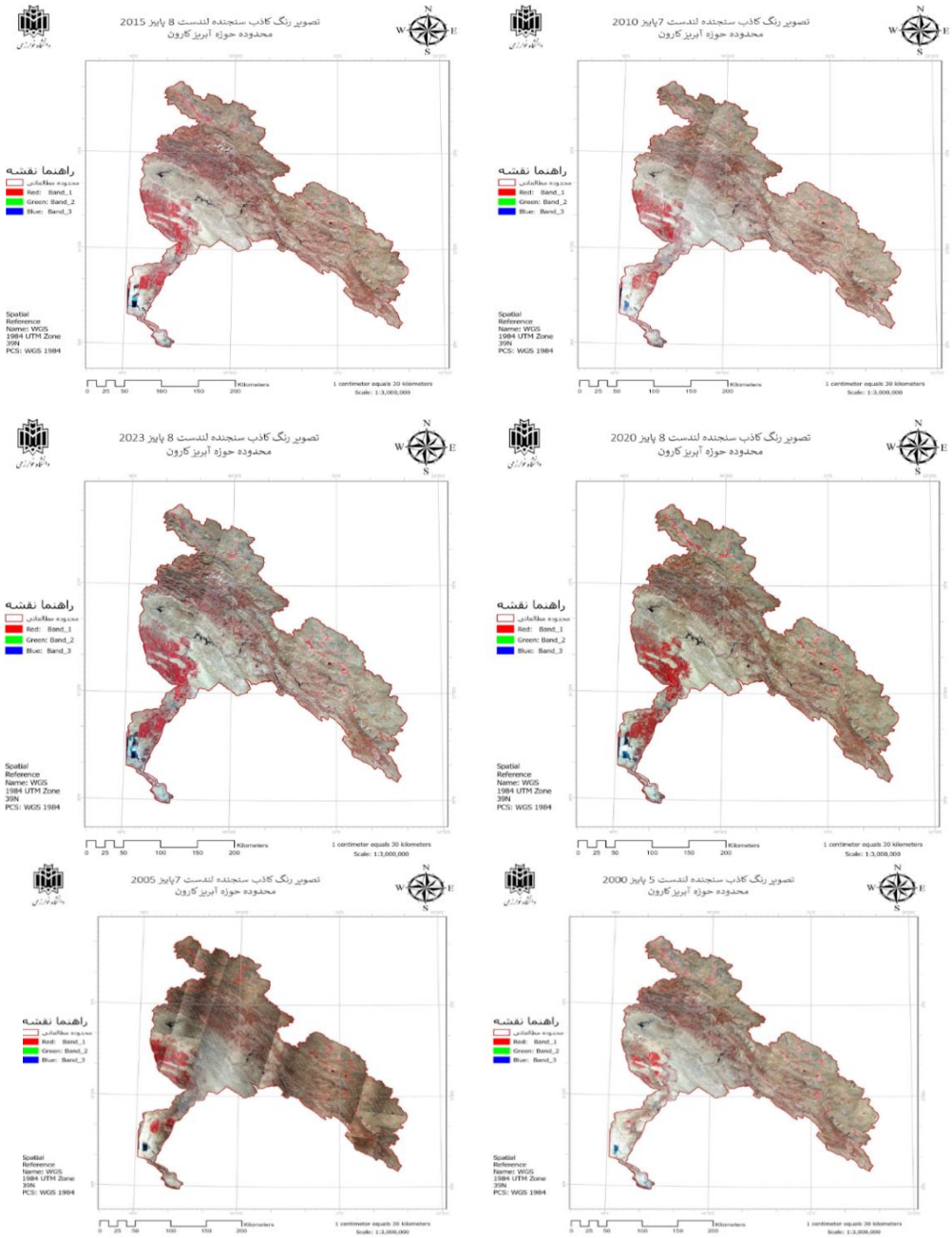
شکل ۲. تصویر کاذب سنجنده مودیس فصل پاییز از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ محدوده حوزه آبریز کارون

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

این ترکیب به دلیل استفاده از باندهای فروسرخ نزدیک و مرئی، قابلیت بالایی در تفکیک پوشش گیاهی، مناطق بایر و منابع آبی دارد. پوشش‌های گیاهی در این ترکیب به رنگ قرمز روشن و تیره، مناطق بایر و خاکی به رنگ‌های قهوه‌ای و خاکستری، و سطوح آبی به رنگ آبی یا فیروزه‌ای ظاهر می‌شوند. بنابراین، تصاویر فالس‌کالر علاوه بر بهبود درک بصری از تغییرات مکانی-زمانی، به عنوان مبنایی برای استخراج متغیرهای سنجش‌ازدور و صحت‌سنجی سایر داده‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

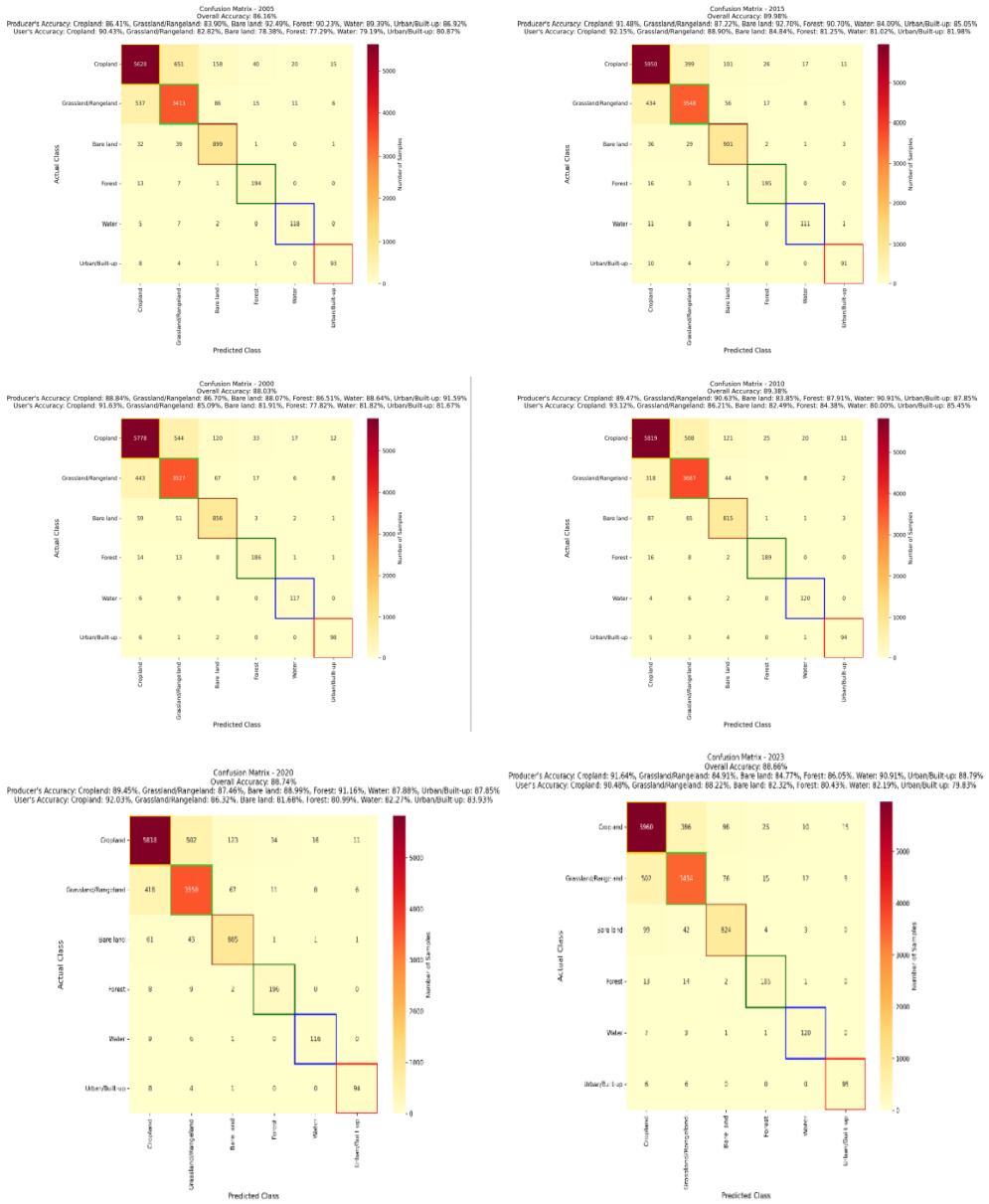
تصاویر false color و طبقه‌بندی پوشش اراضی لندست ۵، ۷ و ۸

تصاویر false color از داده‌های لندست برای برجسته‌سازی تفاوت‌های طیفی کلاس‌های پوشش اراضی (مانند مرتع/پوشش گیاهی، کشاورزی، جنگل، زمین‌های بایر، شهری/انسان‌ساز و آب) تولید شدند. ترکیب باندهای NIR (باند ۴ یا ۵)، Red (باند ۳ یا ۴) و Green (باند ۲ یا ۳) پوشش گیاهی را به رنگ قرمز یا صورتی برجسته کرد و مناطق شهری/بایر را به رنگ خاکستری یا آبی نشان داد.



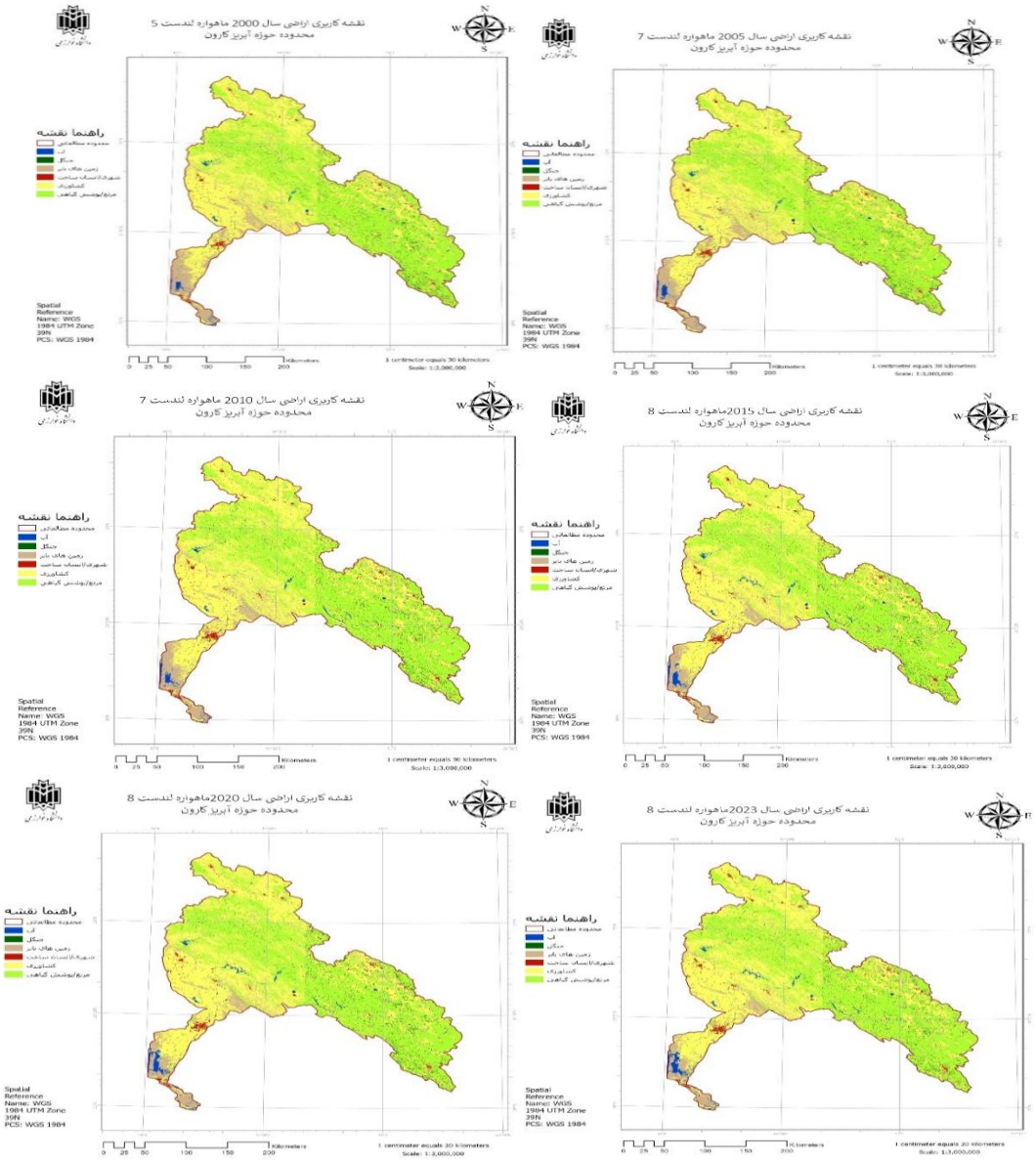
شکل ۳. تصویر رنگ کاذب لندست از پاییز ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ محدوده حوزه آبریز کارون

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

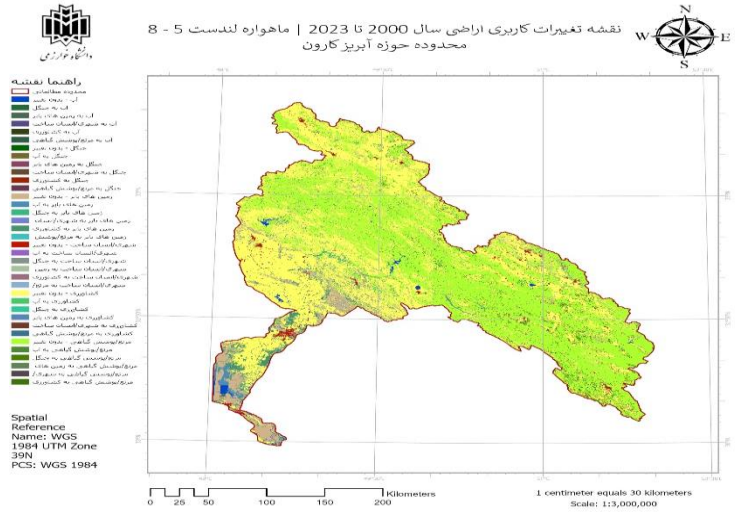


شکل ۳. ماتریس صحت طبقه بندی کاربری اراضی سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی لندست ۵ تا ۸ حوزه آبریز کارون از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳



شکل ۵. نقشه تغییرات کاربری اراضی لندست ۵ تا ۸ حوزه آبریز کارون از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

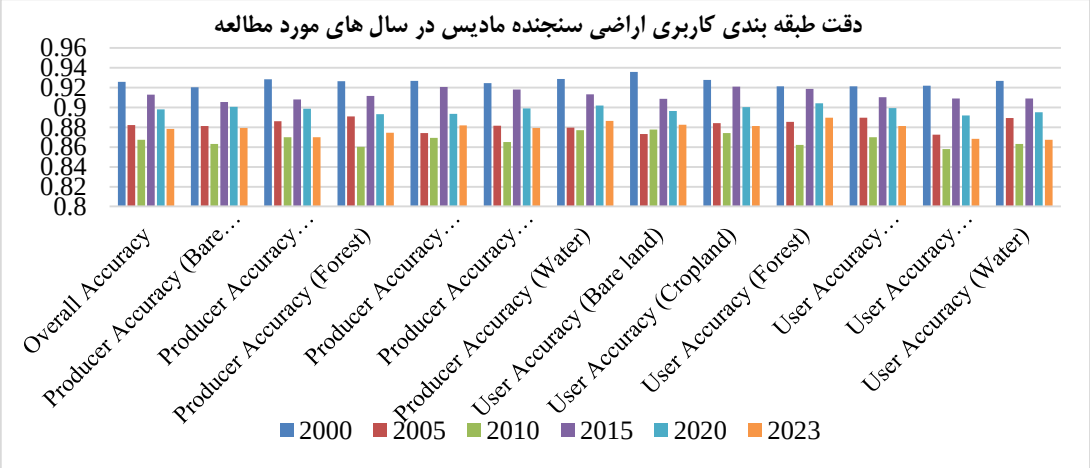
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

تحلیل نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی کاربری اراضی سنجنده مودیس (۲۰۰۰–۲۰۲۳)

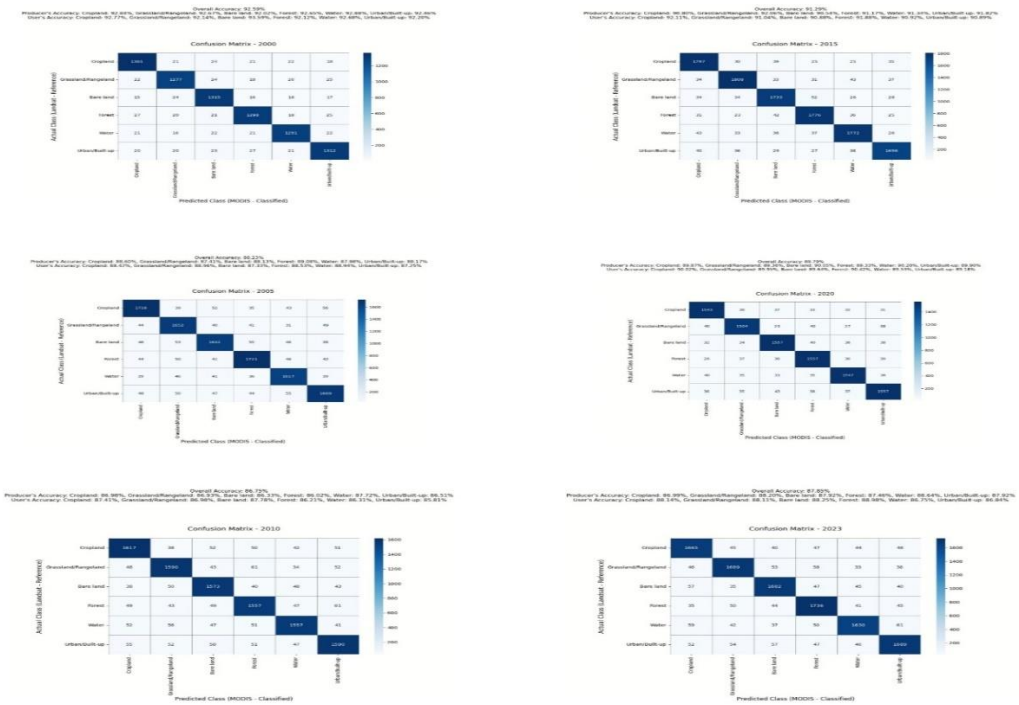
فرایند طبقه‌بندی کاربری اراضی در شش مقطع زمانی (۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳) با بهره‌گیری از الگوریتم ماکسیمم لایکلیهود (Maximum Likelihood Classification – MLC) انجام شد. نتایج حاصل، بیانگر ارزیابی کمی و کیفی عملکرد مدل طبقه‌بندی بوده و در سه سطح کلی، روند زمانی و بررسی کلاس‌های کاربری قابل تحلیل است.

تحلیل کلی عملکرد مدل

مدل طبقه‌بندی مبتنی بر الگوریتم ماکسیمم لایکلیهود در تمامی سال‌های مورد بررسی، عملکردی مطلوب و قابل اتکا نشان داده است. شاخص صحت کلی (Overall Accuracy) در کلیه دوره‌ها بالاتر از ۸۶ درصد بوده و از آستانه مرسوم برای طبقه‌بندی‌های با دقت بالا (۸۵ درصد) فراتر رفته است. دامنه صحت کلی بین ۸۶/۷۵ درصد در سال ۲۰۱۰ تا ۹۲/۵۹ درصد در سال ۲۰۰۰ متغیر بوده است. این تغییرپذیری بیانگر تأثیر شرایط زمانی و کیفی داده‌ها بر عملکرد مدل است. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ماکسیمم لایکلیهود توانایی بالایی در تفکیک کلاس‌های کاربری اراضی در مقیاس حوضه مورد مطالعه داشته است.



شکل ۶. نمودار دقت طبقه بندی کاربری اراضی سنجنده مادیس در سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

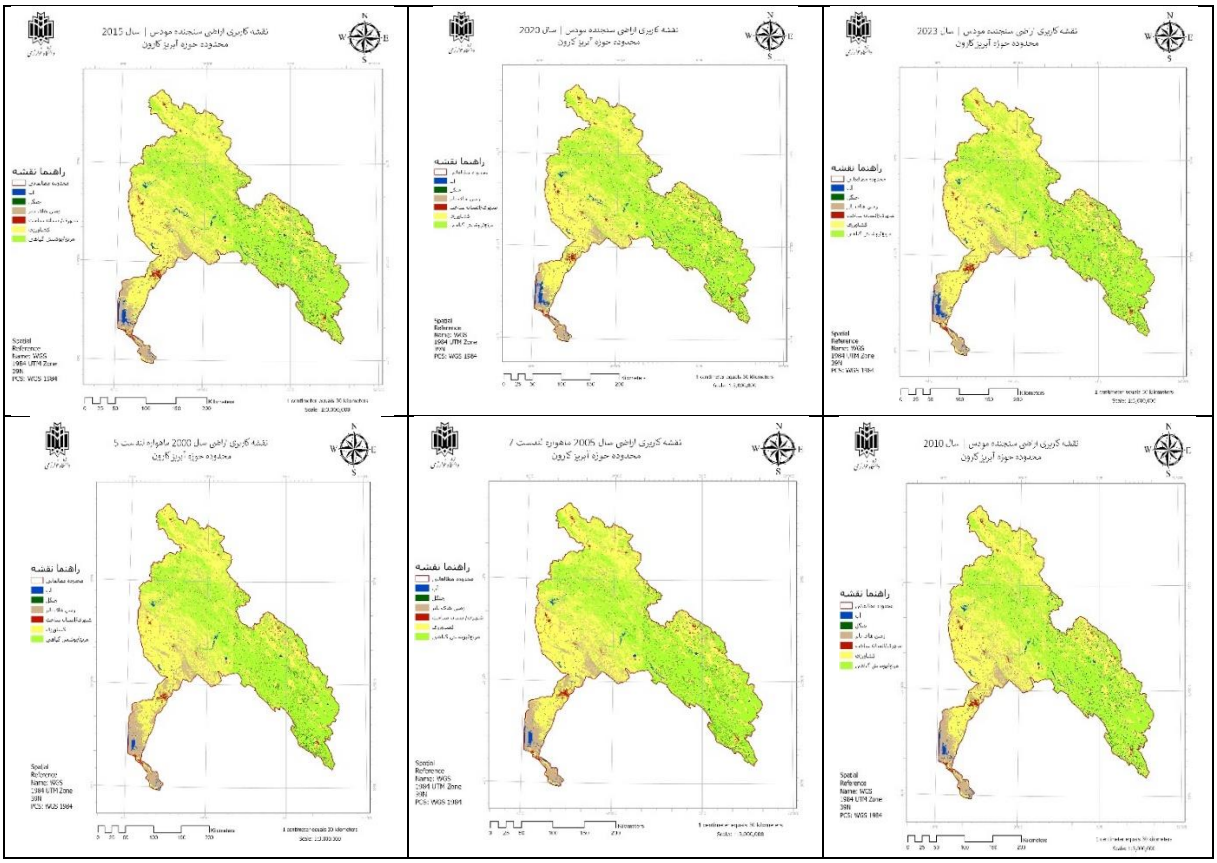


شکل ۷. ماتریس صحت طبقه بندی ماهواره مادیس از سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

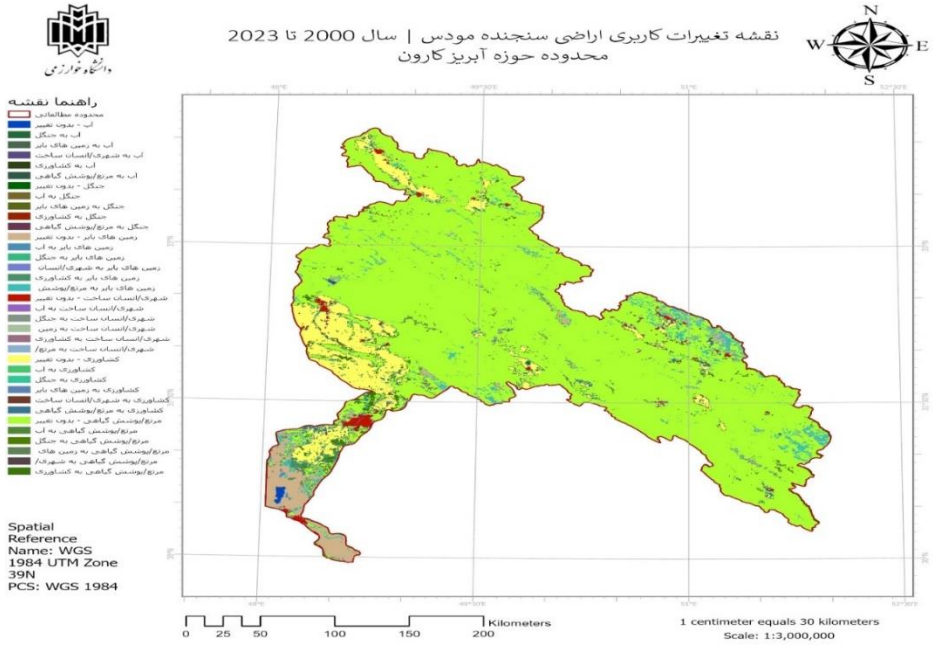
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

یافته های مربوط به تغییرات پوشش اراضی

داده‌ها تغییرات کلاس‌های پوشش اراضی {مرتع/پوشش گیاهی، کشاورزی، زمین‌های بایر، جنگل، شهری/انسان‌ساز، آب} را در حوضه کارون نشان می‌دهند. مجموع مساحت ۱۱،۸۹۴،۵۵۰ واحد {هکتار} است. پایداری کلاس‌ها ۸۸/۹۳۳ درصد و تغییرات ناخالص ۱۱/۰۷ درصد را تشکیل می‌دهند. نتایج با تحلیل‌های تبخیر و تعرق و GWR هم‌خوانی دارد.



شکل ۸. نقشه کاربری اراضی سنجنده مودیس در حوزه آبریز کارون از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳



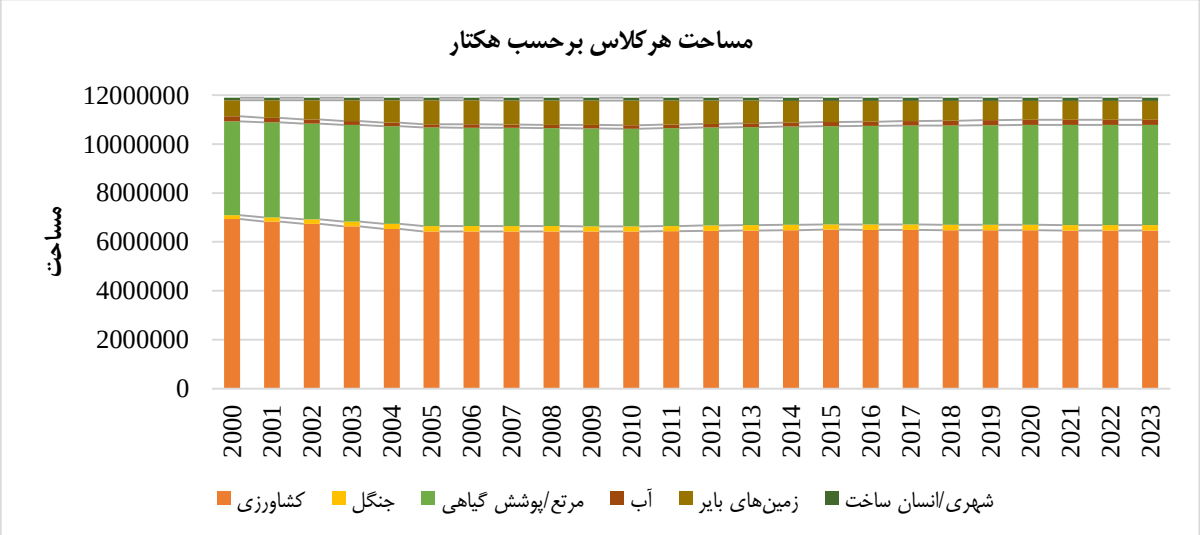
شکل ۹. نقشه تغییرات کاربری اراضی سنجنده مودیس در حوزه آبریز کارون از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

تغییرات مساحت کلاس‌های پوشش اراضی

تغییرات مساحت کلاس‌ها

تحلیل تغییرات خالص نشان‌دهنده کاهش مساحت کشاورزی از ۶،۹۳۹،۲۲۵ هکتار در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۸۴۹ به ۶،۴۶۰،۳۳۵ هکتار در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۹۲۲ است که معادل کاهش ۴۷۸،۸۹۰ هکتار یا ۶/۹۰ درصد بوده و احتمالاً ناشی از تغییرات اقلیمی یا سیاست‌های کاربری اراضی است. در مقابل، مرتع/پوشش گیاهی از ۳،۸۴۰،۳۷۵ هکتار در سال ۲۰۰۰ باZ-score برابر ۱/۹۷۹- به ۴،۱۰۶،۷۸۰ هکتار در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۹۹۴ افزایش یافته که رشدی معادل ۲۶۶،۴۰۵ هکتار یا ۶/۹۴ درصد را نشان می‌دهد و بیانگر احیای طبیعی یا تبدیل کاربری‌هاست. مساحت جنگل با افزایش ۶۶،۷۰۰ هکتار یا ۴۲/۷۶ درصد از ۱۵۶،۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۹۱۶- به ۲۲۲،۷۰۰ هکتار در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۱/۱۰۷ رسیده است. کلاس آب با رشد ۶،۸۶۰ هکتار یا ۳/۴۶ درصد از ۱۹۸،۲۵۰ هکتار در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۰۵۳ به ۲۰۵،۱۱۰ هکتار در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۱/۳۰۶ تغییر کرده است. زمین‌های بایر از ۶۶۱،۵۰۰ هکتار در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۷۴- به ۷۷۲،۴۵۰ هکتار در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۷۲۳- افزایش یافته که معادل ۱۱۰،۹۵۰ هکتار یا ۱۶/۷۷ درصد است. کاربری شهری/انسان‌ساز نیز با رشد ۲۲،۱۸۰ هکتار یا ۲۱/۳۱ درصد از ۱۰۴،۱۰۰ هکتار در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۴۱۱- به ۱۲۶،۲۸۰ هکتار در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۲/۳۹۳ رسیده است.

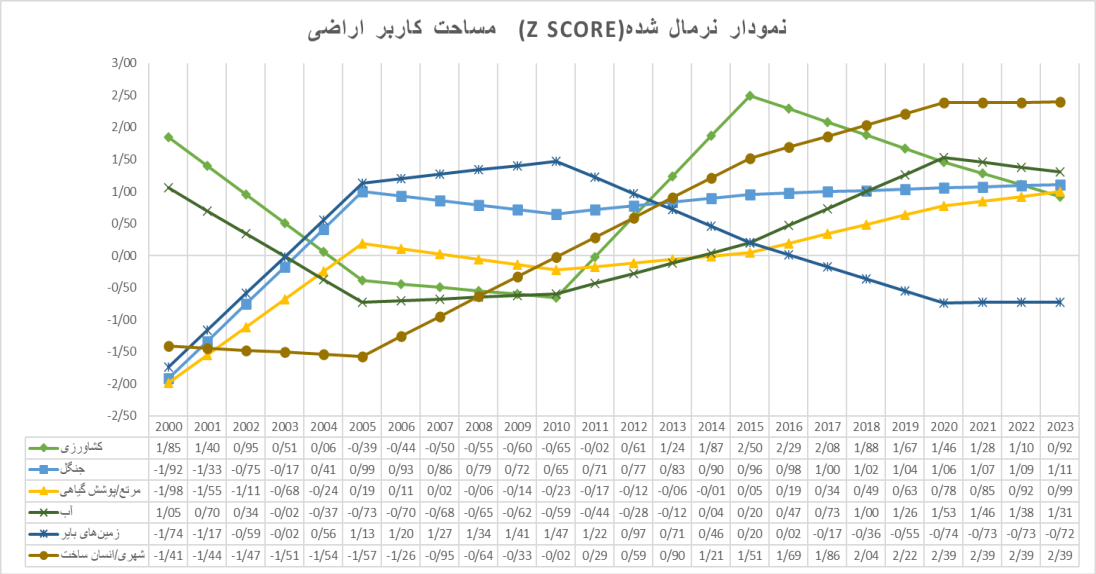


شکل ۱۰. نمودار نمودار روند مساحت کلاس‌های پوشش اراضی (۲۰۰۰-۲۰۲۳)(نشان‌دهنده کاهش کشاورزی و افزایش مرتع و کاربری‌های شهری)

تحلیل مقادیر نرمال‌شده Z-score

Z-score برای استانداردسازی و مقایسه تغییرات نسبی کلاس‌ها به کار رفت تا انحرافات از میانگین را بدون تأثیر مقیاس‌های مختلف نشان دهد. میانگین Z-score کشاورزی ۰/۸۵ است که غلبه اولیه در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۸۴۹ و کاهش بعدی در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۹۲۲ را نشان می‌دهد. مرتع با میانگین Z-score برابر ۰/۰۳- پایداری نسبی دارد، اما در سال‌های اخیر مانند ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۹۹۴ افزایش یافته است. کاربری شهری با میانگین Z-score برابر ۰/۴۱ روند صعودی قوی را تأیید می‌کند که از ۱/۴۱۱- در سال ۲۰۰۰ به ۲/۳۹۳ در سال ۲۰۲۳ رسیده است. جنگل با میانگین ۰/۵۷، آب با ۰/۲۶ و زمین‌های بایر با ۰/۱۹ نیز تغییرات مثبت ملایمی دارند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]



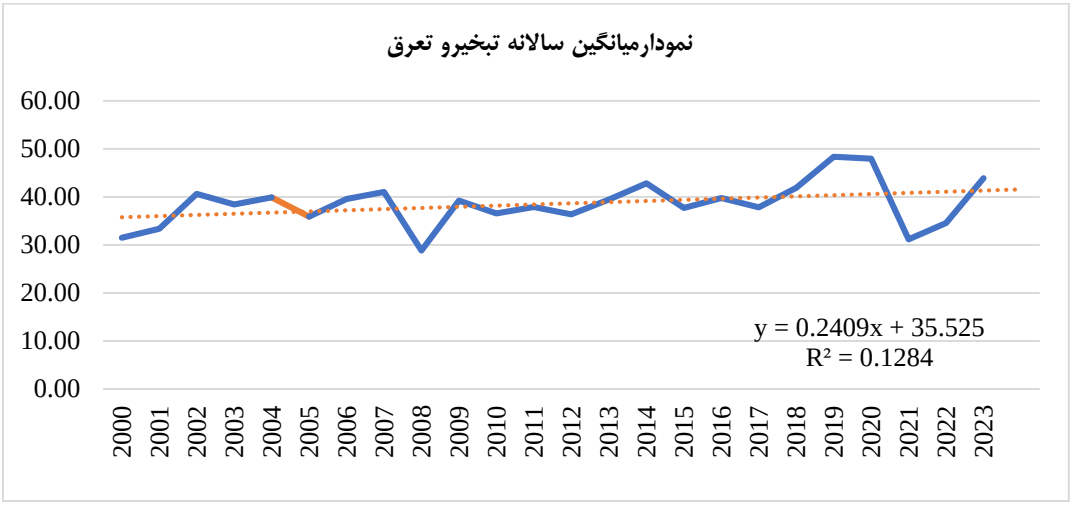
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
کشاورزی	1/85	1/40	0/95	0/51	0/06	-0/39	-0/44	-0/50	-0/55	-0/60	-0/65	-0/02	0/61	1/24	1/87	2/50	2/29	2/08	1/88	1/67	1/46	1/28	1/10	0/92
جنگل	-1/92	-1/33	-0/75	-0/17	0/41	0/99	0/93	0/86	0/79	0/72	0/65	0/71	0/77	0/83	0/90	0/96	0/98	1/00	1/02	1/04	1/06	1/07	1/09	1/11
مرتع/پوشش گیاهی	-1/98	-1/55	-1/11	-0/68	-0/24	0/19	0/11	0/02	-0/06	-0/14	-0/23	-0/17	-0/12	-0/06	-0/01	0/05	0/19	0/34	0/49	0/63	0/78	0/85	0/92	0/99
آب	1/05	0/70	0/34	-0/02	-0/37	-0/73	-0/70	-0/68	-0/65	-0/62	-0/59	-0/44	-0/28	-0/12	0/04	0/20	0/47	0/73	1/00	1/26	1/53	1/46	1/38	1/31
زمین‌های بایر	-1/74	-1/17	-0/59	-0/02	0/56	1/13	1/20	1/27	1/34	1/41	1/47	1/22	0/97	0/71	0/46	0/20	0/02	-0/17	-0/36	-0/55	-0/74	-0/73	-0/73	-0/72
شهری/انسان ساخت	-1/41	-1/44	-1/47	-1/51	-1/54	-1/57	-1/26	-0/95	-0/64	-0/33	-0/02	0/29	0/59	0/90	1/21	1/51	1/69	1/86	2/04	2/22	2/39	2/39	2/39	2/39

شکل ۱۱. نمودار روند Z-score کلاس‌های پوشش اراضی - بیانگر کاهش نسبی کشاورزی و افزایش کاربری‌های شهری و مرتع

کاهش ۶/۹۰ درصد مساحت کشاورزی و افزایش ۶/۹۴ درصد مرتع و ۴۲/۷۶ درصد جنگل، همراه با رشد ۲۱/۳۱ درصد کاربری‌های شهری، الگوهای دینامیک پوشش اراضی را نشان می‌دهد. تحلیل Z-score این تغییرات نسبی را برجسته کرده و کاهش کشاورزی می‌تواند بر بیلان آبی و تبخیر و تعرق تأثیر بگذارد. این یافته‌ها مبنایی علمی برای مدیریت پایدار منابع در حوضه کارون فراهم می‌کنند.

تغییرات پارامترهای محیطی

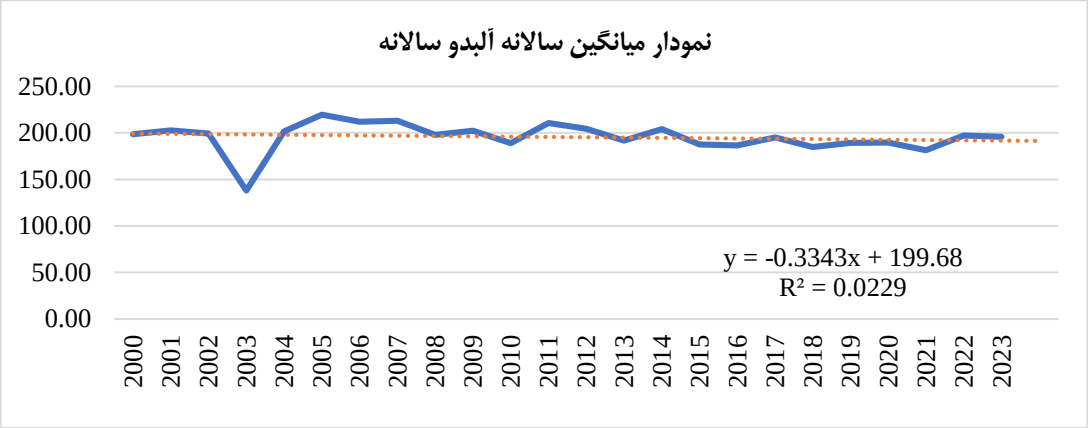
تبخیر و تعرق از ۳۱/۴۸ میلی‌متر در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۴۸- به ۴۳/۹۲ میلی‌متر در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۱/۱۳ افزایش یافت که نشان‌دهنده رشد ۳۹/۵ درصد است و احتمالاً به افزایش پوشش گیاهی یا تغییرات اقلیمی مرتبط است.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات سری زمانی تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

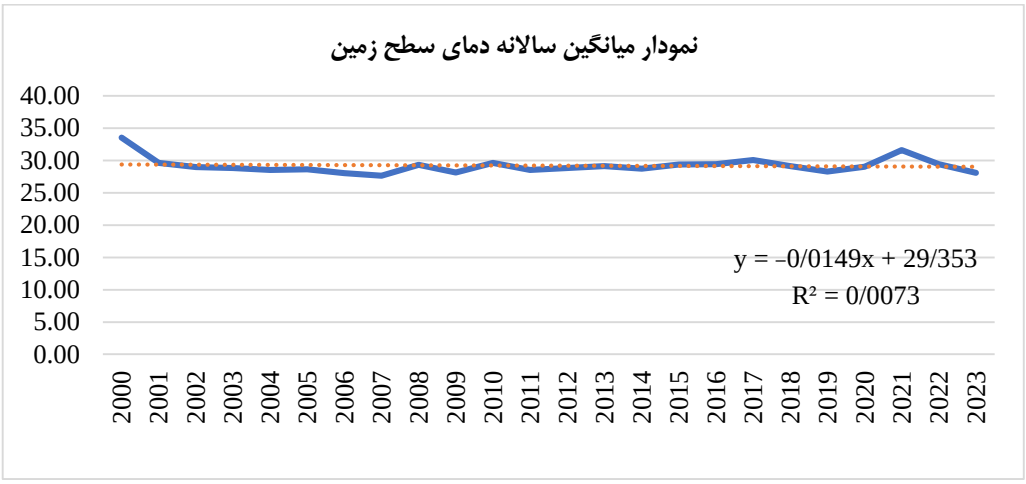
آلبیدو از ۱۹۸,۴۸ واحد در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۰/۱۹ به ۱۹۵,۷۴ واحد در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۰۲ کاهش یافت که کاهشی ملایم (۱/۳۸ درصد) را نشان می‌دهد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]



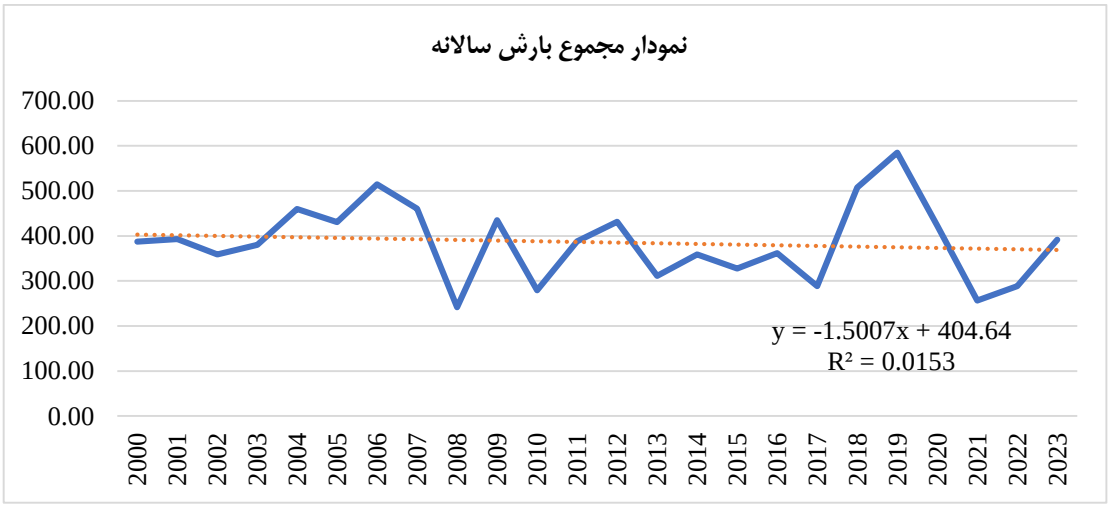
شکل ۱۳. نمودار تغییرات سری زمانی آلبدو در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

دمای سطح زمین از ۳۳/۵۲ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۳/۵۵ به ۲۸/۰۵درجه در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۹۱- کاهش یافت که کاهشی ۱۶/۳۵ درصد را نشان می‌دهد و با افزایش پوشش گیاهی هم‌خوان است.



شکل ۱۴. نمودار تغییرات سری زمانی دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

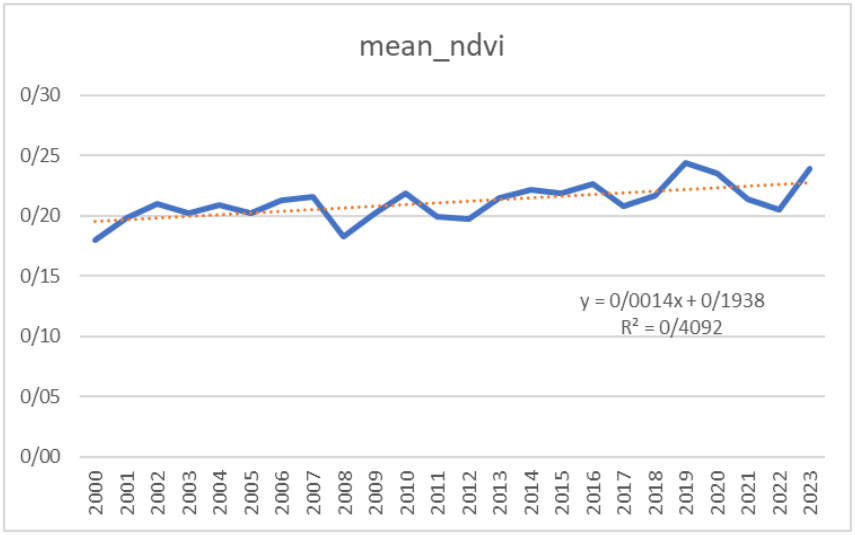
بارش از ۳۹۷,۳۶ میلی‌متر در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۰/۰۹ به ۳۹۱/۸۷ میلی‌متر در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۰/۰۷ کاهش یافت که کاهش جزئی ۰/۱۶ درصد را نشان می‌دهد، اما نوسانات قابل توجهی در سال‌های میانی مشاهده شد.



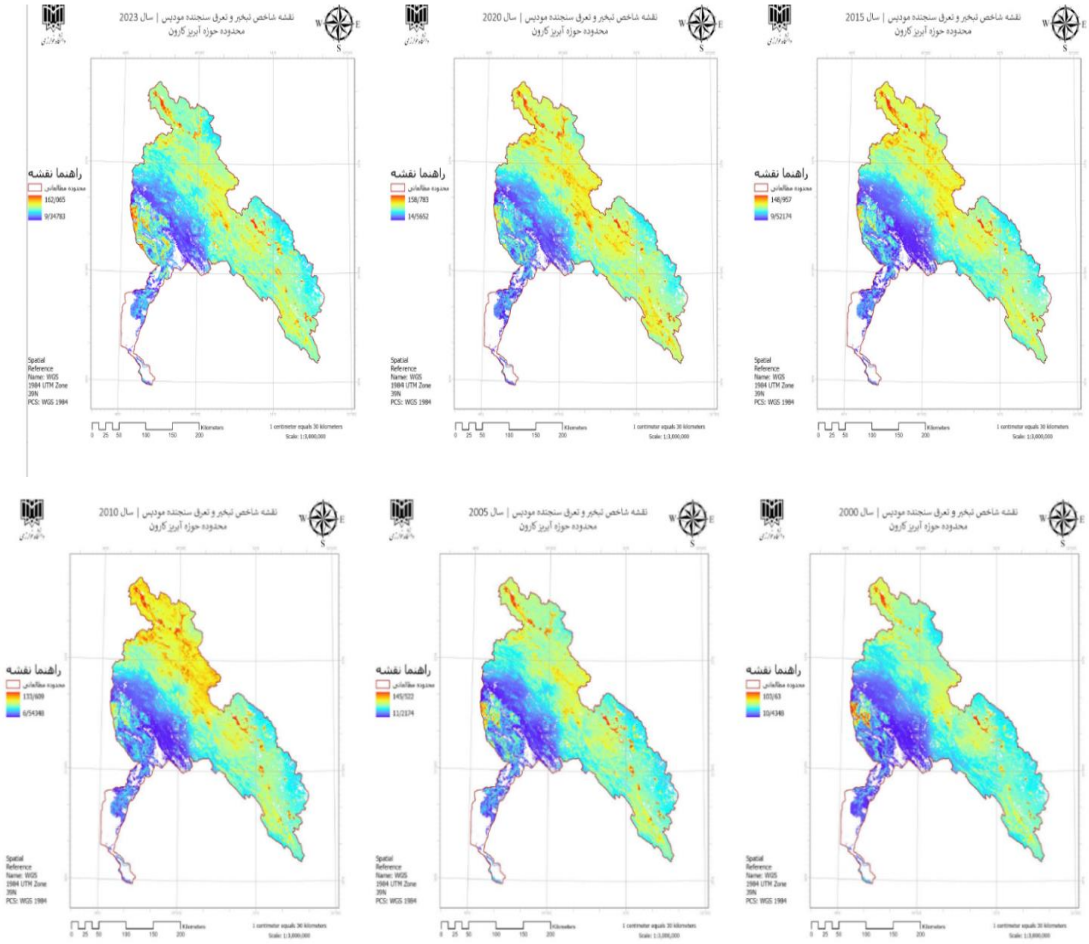
شکل ۱۵. نمودار تغییرات سری زمانی مجموع بارش سالانه در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

شاخص پوشش گیاهی از ۰,۱۸ در سال ۲۰۰۰ با Z-score برابر ۱/۹۹- به ۰/۲۳۹ در سال ۲۰۲۳ با Z-score برابر ۱/۷۳ افزایش یافت که رشد ۳۲/۷۸ درصد را نشان می‌دهد و با افزایش مرتع در تحلیل پوشش اراضی هم‌راستاست.

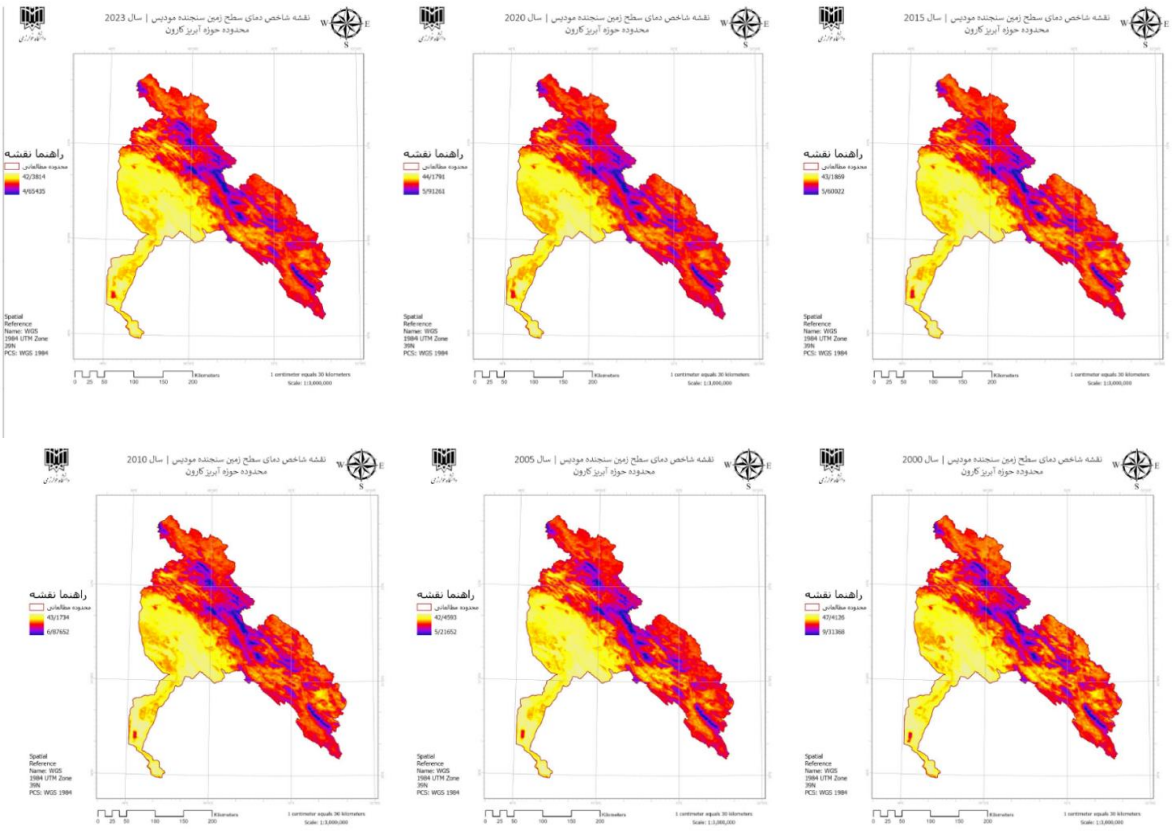


شکل ۱۶. نمودارتغییرات سری زمانی میانگین شاخص پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

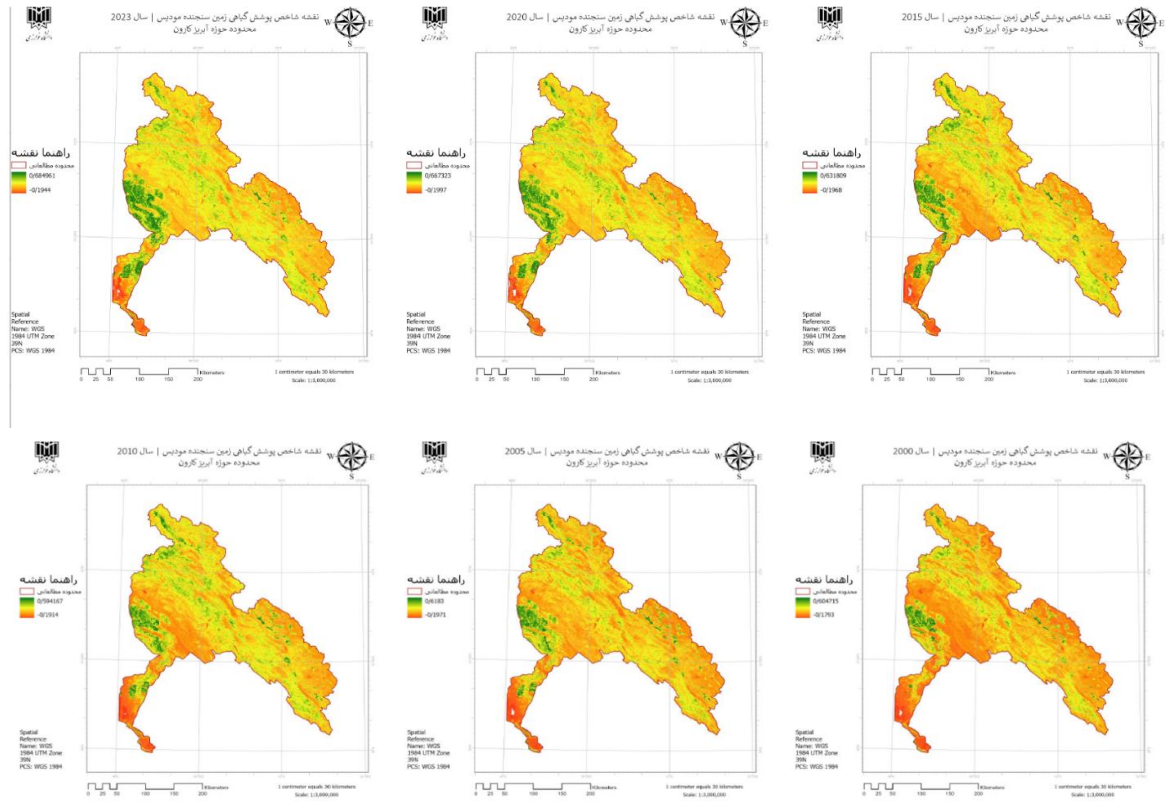


شکل ۱۷. نقشه های شاخص تبخیر و تعرق حوزه آبریز کارون ،میانگین سالانه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

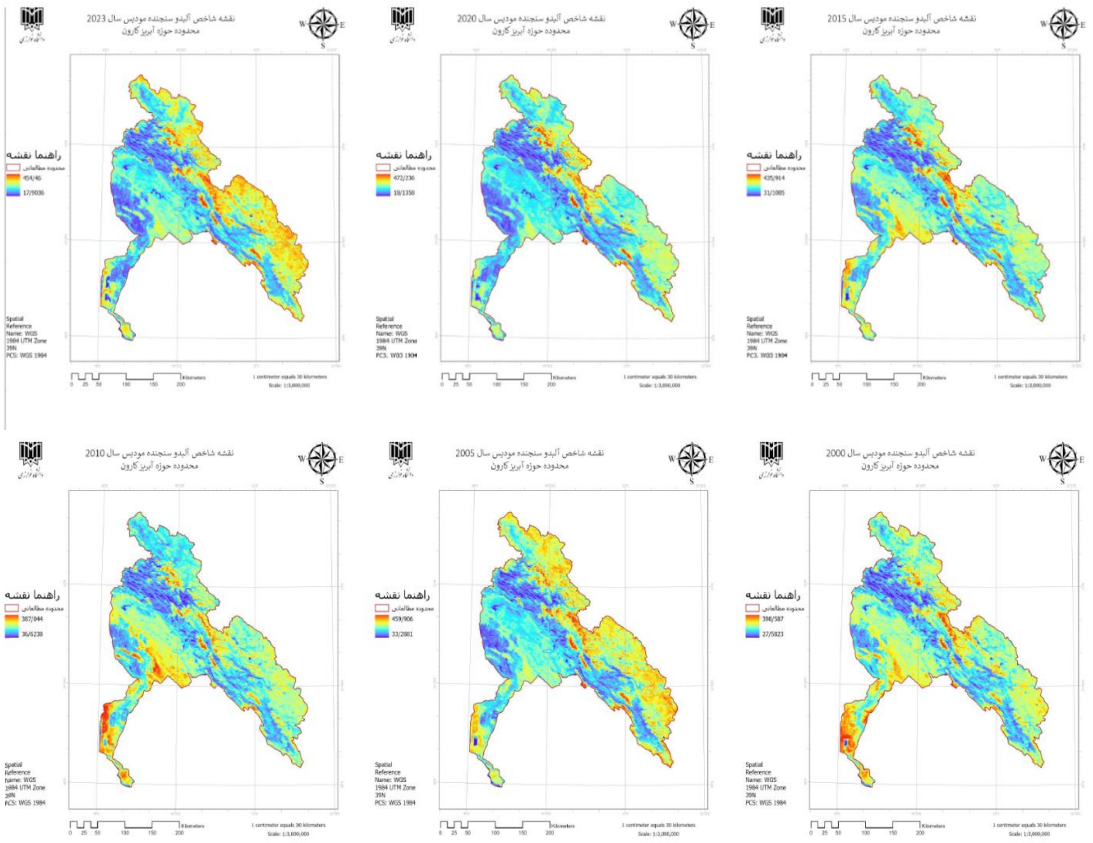


شکل ۱۸. نقشه های شاخص دمای سطح زمین حوزه آبریز کارون، میانگین سالانه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

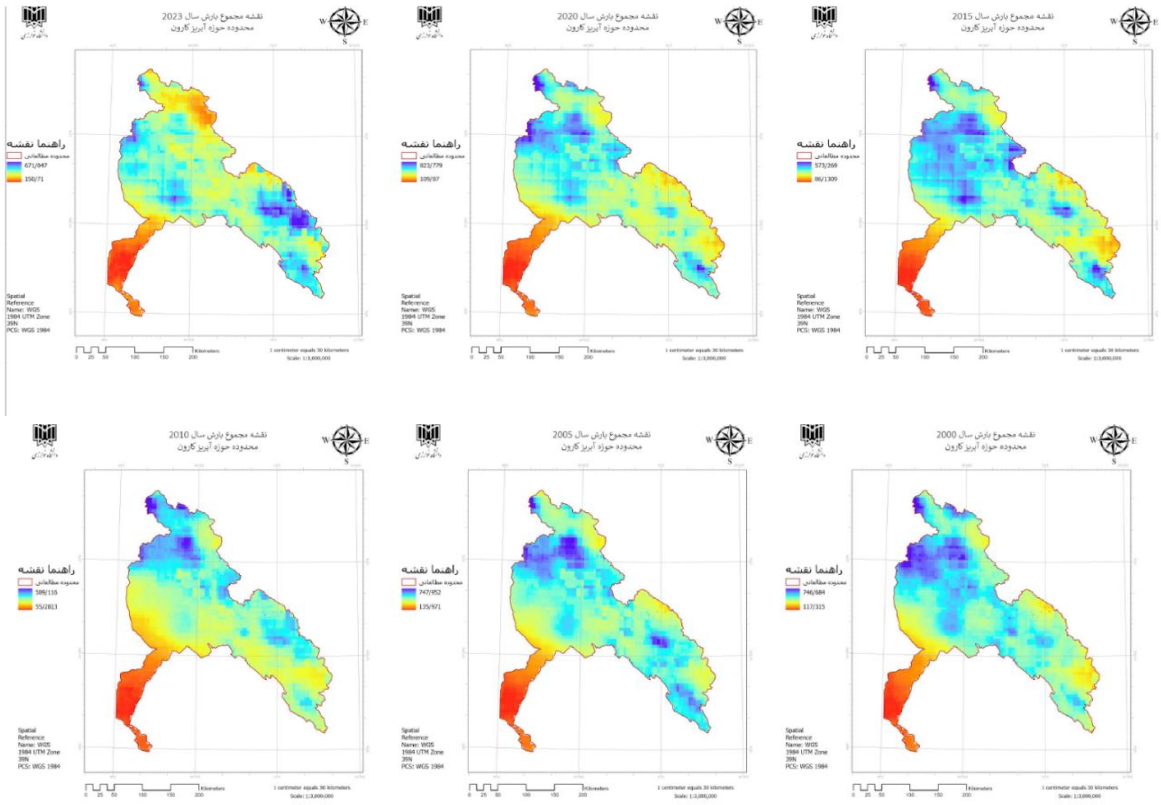


شکل ۱۹. نقشه های شاخص پوشش گیاهی حوزه آبریز کارون، میانگین سالانه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]



شکل ۲۰. نقشه های شاخص آلبدو حوزه آبریز کارون، میانگین سالانه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳



شکل ۲۱. نقشه های توضیع مکانی بارش حوزه آبریز کارون، مجموع سالانه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

مدل رگرسیون چندمتغیره

مدل رگرسیون چندمتغیره برازش قوی را نشان داد (R^2=۰,۹۹۸، Adjusted R^2=۰,۹۴۷، Significance F<۰,۰۰۰۱). شاخص پوشش گیاهی با ضریب ۲۰۸,۲۷ و P-value برابر ۳,۷۱-E۰۸ و بارش با ضریب ۰,۰۲۰ و P-value برابر ۰,۰۰۱۸ تأثیر معنادار بر تبخیر و تعرق داشتند، در حالی که آلبیدو (P-value=۰,۷۳۶) و دمای سطح زمین (P-value=۰,۰۵۶) غیرمعنادار بودند. باقی‌مانده‌های استانداردشده انحرافات کم را نشان می‌دهند که دقت مدل را تأیید می‌کند.

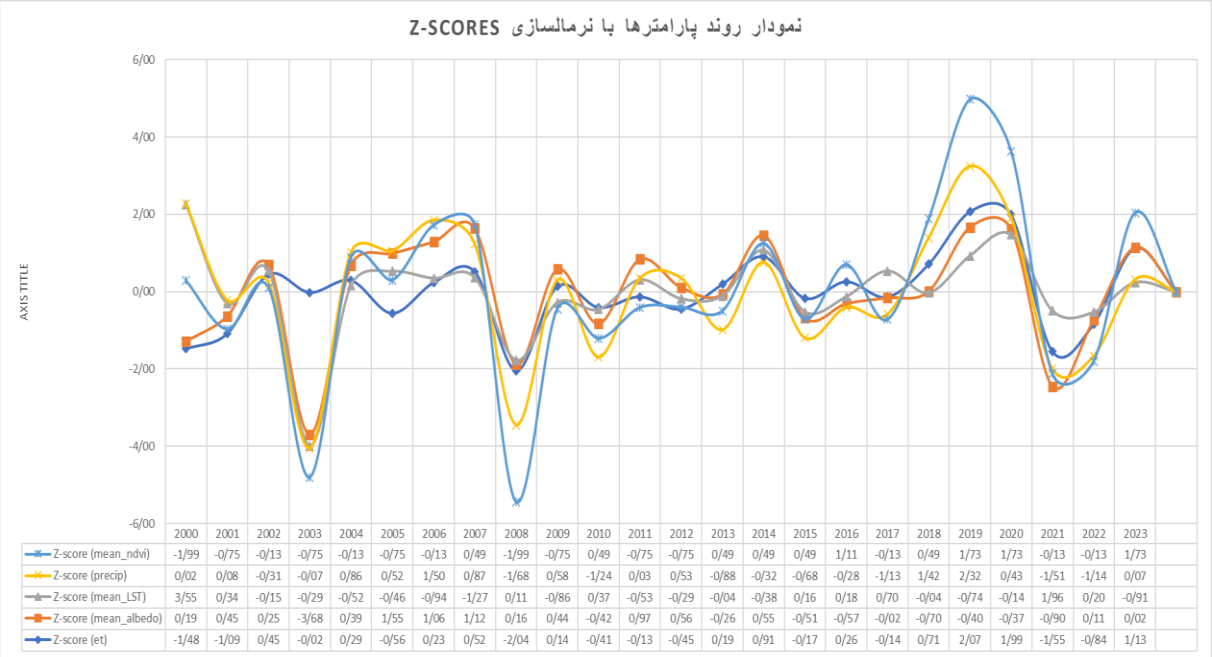
جدول ۱. نتیجه رگرسیون چند متغییره

SUMMARY OUTPUT					
Regression Statistics					
Multiple R	0.998812769				
R Square	0.997626947				
Adjusted R Square	0.947270989				
Standard Error	2.071334857				
Observations	24				
ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	4	36073.7577	9018.439424	2101.990578	7.49181E-25
Residual	20	85.80856183	4.290428091		
Total	24	36159.56626			
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
mean_albedo	-0.008615708	0.025227922	-0.341514793	0.73627815	-0.061240231
mean_LST	-0.400469712	0.197486142	-2.027837035	0.056109325	-0.812418584
precip	0.020375498	0.005667705	3.59501732	0.001809159	0.008552872
mean_ndvi	208.2696188	24.20555856	8.604206273	3.71758E-08	157.7777084
	Upper 95%	Lower 95/0%	Upper 95/0%		
Intercept	#N/A	#N/A	#N/A		
mean_albedo	0.044008814	-0.061240231	0.044008814		
mean_LST	0.011479161	-0.812418584	0.011479161		
precip	0.032198124	0.008552872	0.032198124		
mean_ndvi	258.7615291	157.7777084	258.7615291		

تحلیل مقادیر نرمال‌شده

استانداردسازی با Z-score تغییرات نسبی را برجسته کرد. میانگین Z-score برای تبخیر و تعرق برابر ۰/۰۲ بود که از ۱/۴۸− در سال ۲۰۰۰ به ۱/۱۳ در سال ۲۰۲۳ افزایش یافت. آلبیدو با میانگین ۰/۰۱− از ۰/۱۹ به ۰/۰۲ تغییر کرد که پایداری نسبی را نشان می‌دهد. دمای سطح زمین با میانگین ۰/۰۱ از ۳/۵۵ به ۰/۹۱− کاهش یافت. بارش با میانگین ۰/۰۳ نوسانات زیادی داشت و شاخص پوشش گیاهی با میانگین ۰/۰۱ از ۰/۹۹− به ۱/۷۳ افزایش یافت که قوی‌ترین روند صعودی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]



	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Z-score (mean_ndvi)	-1/99	-0/75	-0/13	-0/75	-0/13	-0/75	-0/13	0/49	-1/99	-0/75	0/49	-0/75	-0/75	0/49	0/49	0/49	1/11	-0/13	0/49	1/73	1/73	-0/13	-0/13	1/73
Z-score (precip)	0/02	0/08	-0/31	-0/07	0/86	0/52	1/50	0/87	-1/68	0/58	-1/24	0/03	0/53	-0/88	-0/32	-0/68	-0/28	-1/13	1/42	2/32	0/43	-1/51	-1/14	0/07
Z-score (mean_LST)	3/55	0/34	-0/15	-0/29	-0/52	-0/46	-0/94	-1/27	0/11	-0/86	0/37	-0/53	-0/29	-0/04	-0/38	0/16	0/18	0/70	-0/04	-0/74	-0/14	1/96	0/20	-0/91
Z-score (mean_albedo)	0/19	0/45	0/25	-3/68	0/39	1/55	1/06	1/12	0/16	0/44	-0/42	0/97	0/56	-0/26	0/55	-0/51	-0/57	-0/02	-0/70	-0/40	-0/37	-0/90	0/11	0/02
Z-score (et)	-1/48	-1/09	0/45	-0/02	0/29	-0/56	0/23	0/52	-2/04	0/14	-0/41	-0/13	-0/45	0/19	0/91	-0/17	0/26	-0/14	0/71	2/07	1/99	-1/55	-0/84	1/13

شکل ۲۲. نمودار روند نرمال شده با Z-score مقادیر پارامترهای محیطی شاخص پوشش گیاهی ، بارش ، دمای سطح زمین ، آلبدو و تبخیروتعرق

یافته‌های پژوهش بر اساس تحلیل رگرسیون موزون جغرافیایی

این بخش با هدف اصلی تحلیل و مدل‌سازی پویایی‌های فضایی-زمانی تبخیر و تعرق در حوضه آبریز کارون و بررسی ارتباط آن با چشم‌اندازهای پوشش اراضی و متغیرهای بیوفیزیکی تدوین شد. با استفاده از روش رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR)، روابط پیچیده و ناهمسان مکانی بین تبخیر و تعرق به عنوان متغیر وابسته اصلی و متغیرهای پیش‌بین بیوفیزیکی شامل شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، آلبیدو (Albedo)، دمای سطح زمین (LST) و بارش مورد بررسی و کمی‌سازی قرار گرفت. هدف این مطالعه نشان دادن چگونگی تغییر تأثیر این متغیرها بر تبخیر و تعرق تحت تأثیر ساختار پوشش اراضی منطقه بود. فصل حاضر به بحث و تفسیر یکپارچه یافته‌ها، ارائه نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی می‌پردازد.

بحث

نتایج حاصل از تحلیل‌های GWR، تصویری چندوجهی از عملکرد اکوسیستم حوضه ارائه می‌دهد که در دو محور اصلی مورد بحث قرار می‌گیرد: ارزیابی عملکرد کلی مدل و تحلیل ناهمسانی مکانی روابط. این تحلیل‌ها با تلفیق داده‌های محیطی مانند آلبیدو، دمای سطح زمین، بارش و شاخص پوشش گیاهی، رابطه معنادار این پارامترها با تغییرات تبخیر و تعرق و پوشش اراضی را تأیید می‌کند.

ارزیابی عملکرد و پویایی زمانی مدل

آماره‌های تشخیصی کلی حاصل از مدل‌های GWR، قدرت تبیین فوق‌العاده بالای مدل را در تمامی دوره‌های زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد، به‌طوری که مقادیر ضریب تبیین تعدیل‌شده ($AdjR^2$) همواره بالاتر از ۰,۹۷ بوده است. این موضوع تأیید می‌کند که متغیرهای بیوفیزیکی منتخب، از جمله آلبیدو، دمای سطح زمین، بارش و NDVI، پیش‌بینی‌کننده‌های بسیار قوی و مناسبی برای مدل‌سازی مکانی تبخیر و تعرق بوده‌اند. تحلیل روند زمانی این آماره‌ها، پویایی قابل‌توجهی را آشکار می‌سازد؛ عملکرد و دقت مدل در سال ۲۰۱۰ به اوج خود می‌رسد با بالاترین $AdjR^2$ و کمترین AICc، که حاکی از ساختار خطی و پایدارتر روابط بین متغیرهای پیش‌بین (مانند کاهش دمای سطح زمین و افزایش بارش در این دوره) و تبخیر و تعرق است. در مقابل، در سال‌های اخیر مانند ۲۰۲۳ با $AdjR^2$ ۰,۹۷۴۳، ممکن است به دلیل افزایش پیچیدگی‌های سیستمی و تغییرات محیطی مانند کاهش آلبیدو

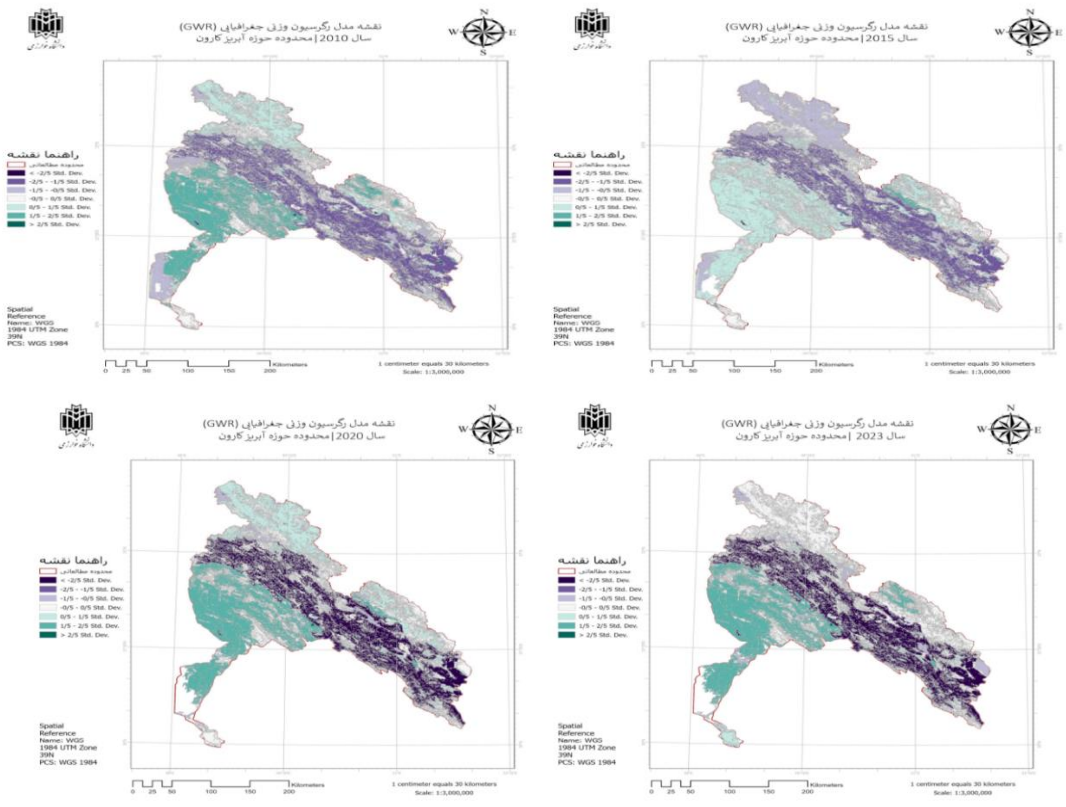
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

و نوسانات بارش، این روابط دستخوش تغییر شده باشند. این پویایی زمانی نشان می‌دهد که پارامترهای محیطی با تغییرات پوشش اراضی، از جمله کاهش کشاورزی و افزایش مرتع، به‌صورت مستقیم در عملکرد مدل اثرگذار بوده‌اند.

ناهمسانی مکانی و نقش تعدیل‌گر پوشش اراضی

مهم‌ترین یافته این پژوهش، که از طریق تحلیل فضایی باقی‌مانده‌های استاندارد شده مدل به دست آمد، شناسایی ناهمسانی مکانی قدرتمند در روابط مدل‌سازی شده است. در حالی که آماره‌های کلی، عملکرد بالای مدل را نشان می‌دهد، توزیع جغرافیایی خطاها نشان می‌دهد که این عملکرد در سراسر حوضه یکسان نیست. یک الگوی دوقطبی پایدار از خطای سیستماتیک مشاهده شد که به طور مستقیم با کلاس‌های اصلی پوشش اراضی و متغیرهای محیطی همبستگی دارد:

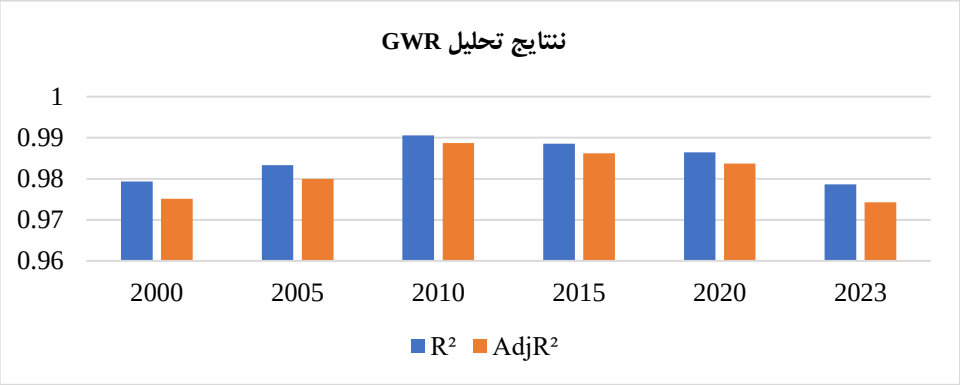
- حاکمیت فرآیندهای طبیعی در پوشش اراضی کوهستانی (Overprediction): در مناطق کوهستانی شمال‌شرقی، مدل به طور مداوم تبخیر و تعرق را بیش از حد واقعی برآورد کرده است. این خطا نشان‌دهنده تأثیر عوامل محلی مانند توپوگرافی پیچیده، ظرفیت محدود نگهداری آب در خاک و کاهش آلبیدو در این مناطق است که به عنوان عوامل کنترل‌کننده و محدودکننده بر تبخیر و تعرق عمل می‌کنند. این فرآیندهای مقیاس خرد توسط داده‌های ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی متوسط به‌طور کامل قابل شناسایی نیستند و لذا تأثیر آنها در باقی‌مانده‌های مدل ظاهر می‌شود. کاهش دمای سطح زمین در این مناطق نیز با این الگو هم‌راستاست.
- حاکمیت فرآیندهای انسان‌زاد در پوشش اراضی کشاورزی (Underprediction): در مقابل، در دشت‌های جنوب‌غربی که پوشش غالب آن اراضی کشاورزی است، مدل به طور سیستماتیک تبخیر و تعرق را کمتر از حد واقعی تخمین زده است. این الگو، نقش کلیدی پوشش اراضی کشاورزی، فعالیت‌های مرتبط با آن (مانند آبیاری) و افزایش بارش محلی را به عنوان عوامل اصلی در اصلاح چرخه هیدرولوژیکی منطقه آشکار می‌سازد. اگرچه داده‌های مستقیم مربوط به آب آبیاری استفاده نشد، الگوی فضایی خطا و افزایش NDVI در این مناطق، این فرضیه را قویاً تأیید می‌کند که مدل به دلیل عدم لحاظ این ورودی آب مصنوعی، قادر به پیش‌بینی صحیح تبخیر و تعرق بسیار بالا در این نواحی نیست.



شکل ۲۳. نقشه های مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی حوزه مطالعاتی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

بنابراین، تحلیل باقی‌مانده‌های GWR به وضوح نشان می‌دهد که نوع پوشش اراضی به عنوان یک متغیر تعدیل‌گر کلیدی عمل می‌کند و تأثیر متغیرهای اقلیمی مانند آلبیدو، دمای سطح زمین و بارش بر تبخیر و تعرق را در مناطق کشاورزی با مناطق کوهستانی کاملاً متفاوت می‌سازد. این همبستگی میان داده‌های محیطی و پوشش اراضی، رابطه تنگاتنگ این عوامل را در پویایی‌های تبخیر و تعرق تأیید می‌کند.



شکل ۲۴. نمودار نتایج تحلیل رگرسیون وزنی جغرافیایی سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

در نتیجه تحلیل GWR، نشان داد که فرآیند تبخیر و تعرق در حوضه مورد مطالعه توسط مجموعه‌ای از متغیرهای بیوفیزیکی کنترل می‌شود که تأثیر آنها اساساً ناهمسان (non-stationary) بوده و به شدت تحت تأثیر نوع پوشش اراضی قرار دارد. روش رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR) نه تنها توانست تبخیر و تعرق را با دقت بسیار بالا مدل‌سازی کند، بلکه تحلیل باقی‌مانده‌های آن به عنوان یک ابزار تشخیصی قدرتمند، به شناسایی و تفکیک مکانی فرآیندهای حاکم بر سیستم منجر شد. نتیجه اصلی این تحقیق آن است که در مناطق با پوشش گیاهی طبیعی و کوهستانی، فرآیندهای فیزیکی و محدودیت‌های محیطی کنترل‌کننده اصلی تبخیر و تعرق هستند، در حالی که در مناطق دشتی، پوشش اراضی کشاورزی و مدیریت انسانی آب به عامل غالب در تعیین مقادیر تبخیر و تعرق تبدیل شده است. این یافته بر اهمیت تلفیق داده‌های مربوط به فعالیت‌های انسانی در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه تأکید دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل پویایی‌های فضایی–زمانی تبخیر و تعرق (ET) در حوضه آبریز کارون و بررسی نقش متغیرهای بیوفیزیکی و تغییرات کاربری اراضی بر آن بود. یافته‌های به‌دست‌آمده بر اساس تحلیل‌های سری زمانی تغییرات مساحت کاربری اراضی، شاخص‌های محیطی، رگرسیون چندمتغیره و رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR) نشان داد که فرآیندهای هیدرولوژیکی منطقه از الگوهای پیچیده و ناهمسانی مکانی قابل‌توجهی تبعیت می‌کنند.

نتایج حاکی از آن است که تغییرات کاربری اراضی، به‌ویژه کاهش مساحت اراضی کشاورزی از ۶،۹۳۹،۲۲۵ هکتار در سال ۲۰۰۰ به ۶،۴۶۰،۳۳۵ هکتار در سال ۲۰۲۳ (کاهش ۶/۹۰ درصد) و افزایش مراتع از ۳،۸۴۰،۳۷۵ به ۴،۱۰۶،۷۸۰ هکتار (رشد ۶/۹۴ درصد)، اثر معناداری بر تغییرات ET و بیلان آبی داشته است. این تحولات با افزایش ۳۹/۵ درصدی ET، رشد ۳۲/۷۸ درصدی شاخص پوشش گیاهی (ndvi) و کاهش ۱۶/۳۵ درصدی میانگین دمای سطح زمین (LST) همراه بوده و بیانگر نقش احیای طبیعی در تعدیل شرایط اقلیمی است. همچنین افزایش ۴۲/۷۶ درصدی سطح جنگل (از ۱۵۶،۰۰۰ به ۲۲۲،۷۰۰ هکتار)، ۳/۴۶ درصدی سطح آب (از ۱۹۸،۲۵۰ به ۲۰۵،۱۱۰ هکتار)، ۱۶/۷۷ درصدی زمین‌های بایر (از ۶۶۱،۵۰۰ به ۷۷۲،۴۵۰ هکتار) و ۲۱/۳۱ درصدی کاربری‌های شهری (از ۱۰۴،۱۰۰ به ۱۲۶،۲۸۰ هکتار) بر پیچیدگی الگوهای کاربری اراضی افزوده است.

مدل رگرسیون چندمتغیره با $R^2 = ۰,۹۹۸$، $Adjusted\ R^2 = ۰,۹۴۷$ و $Significance\ F < ۰,۰۰۰۱$ نشان داد که NDVI (ضریب = ۲۰۸,۲۷، P-value = 3.71E-08) و بارش (ضریب = ۰,۰۲۰، P-value = ۰,۰۰۱۸) (اثر مثبت و معناداری بر ET

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

دارند، درحالی‌که آلبیدو (P-value = ۰,۷۳۶) (و دمای سطح زمین (P-value = ۰,۰۵۶) (تأثیر معناداری نشان ندادند. بررسی باقی‌مانده‌ها (مانند مقدار –۲,۳۴۸ در سال ۲۰۲۲) نیز صحت پیش‌بینی مدل را تأیید کرد.

نتایج GWR این یافته‌ها را تقویت نمود و با برازش بالای $AdjR^2$ (بیش از ۰,۹۷)، به‌ویژه در سال ۲۰۱۰ ($AdjR^2$ = ۰,۹۸۸۷) و واریانس خطا = ۰,۰۱۱۱)، ناهمسانی مکانی روابط ET را آشکار ساخت. در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳، مقادیر $AdjR^2$به ترتیب ۰,۹۷۵۱ و ۰,۹۷۴۳ و واریانس خطا ۰,۰۲۵۷ و ۰,۰۲۶۹ بود که نشان‌دهنده کاهش نسبی دقت مدل است. الگوی فضایی باقی‌مانده‌ها شامل پیش‌بینی بیش‌ازحد (overprediction) در نواحی کوهستانی شمال‌شرقی و پیش‌بینی کمتر از حد (underprediction) در دشت‌های کشاورزی جنوب‌غربی، بر نقش تعدیل‌گر تغییرات کاربری اراضی دلالت دارد. تحلیل نقشه‌های GWR نیز خوشه‌های متمرکز پیش‌بینی بیش‌ازحد در کوهستان‌ها با توپوگرافی ناهموار و پراکندگی وسیع پیش‌بینی کمتر از حد در دشت‌های آبیاری‌شده را آشکار کرد که نشان‌دهنده ناهمسانی مکانی در فرآیند تبخیر و تعرق است.

بررسی روند پارامترهای محیطی نشان داد که مقدار ET از ۳۱,۴۸ میلی‌متر در سال ۲۰۰۰ به ۴۳,۹۲ میلی‌متر در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. این تغییر با رشد NDVI از ۰,۱۸ به ۰,۲۳۹ و کاهش LST از ۳۳,۵۲ به ۲۸,۰۵ درجه سانتی‌گراد هم‌خوانی دارد. بارش نیز با وجود میانگین نسبتاً پایدار (از ۳۸۷,۳۶ به ۳۹۱,۸۷ میلی‌متر) نوسانات شدیدی داشته است (مانند ۵۸۴,۹۰۴ میلی‌متر در سال ۲۰۱۹). علاوه بر این، آلبیدو از ۱۹۸,۴۸ به ۱۹۵,۷۴ واحد کاهش یافت. نتایج رگرسیون خطی روندها نشان داد که به طور متوسط سالانه، ET حدود ۰,۵۶ میلی‌متر افزایش، آلبیدو ۰,۳۶ واحد کاهش، LST حدود ۰,۱ درجه کاهش، بارش ۱,۴۵ میلی‌متر افزایش و NDVI حدود ۰,۰۰۲ واحد رشد داشته است که با تغییرات کاربری اراضی سازگار است.

این نتایج بیانگر آن است که در مناطق کوهستانی، فرآیندهای طبیعی همراه با محدودیت‌های محیطی از قبیل ظرفیت پایین نگهداری آب، عامل اصلی کنترل ET هستند؛ درحالی‌که در دشت‌ها، مدیریت انسانی منابع آب و گسترش اراضی کشاورزی نقش غالب دارند. کاهش ۶/۹۰ درصدی اراضی کشاورزی و افزایش ۲۱/۳۱ درصدی کاربری‌های شهری، در کنار پایداری نسبی بارش، موجب افزایش پیچیدگی سیستم هیدرولوژیکی شده و ضرورت توجه به داده‌های انسانی را برجسته می‌سازد. نقشه‌های مکانی تولیدشده در محیط ArcGIS Pro نیز امکان تحلیل دقیق‌تر توزیع فضایی این الگوها را فراهم کرده است. در این راستا پیشنهادهای ارائه شده به شرح ذیل است:

- ✓ تلفیق داده‌های انسانی: در مدل‌سازی‌های آینده، وارد کردن داده‌های مرتبط با الگوهای آبیاری و مدیریت منابع آب برای افزایش دقت پیش‌بینی ET در مناطق کشاورزی ضروری است.
- ✓ تحلیل در مقیاس خرد: بهره‌گیری از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر می‌تواند در شناسایی تأثیرات محلی، به‌ویژه در نواحی کوهستانی، مؤثر باشد.
- ✓ پایش بلندمدت: تداوم پایش تغییرات کاربری اراضی و پارامترهای محیطی برای ارزیابی پایداری اکوسیستم و اثرات تغییر اقلیم توصیه می‌شود.
- ✓ مدل‌سازی یکپارچه: توسعه مدل‌های هیدرولوژیکی چندعاملی که تعاملات میان کاربری اراضی، فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی را دربر گیرد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش چارچوبی علمی برای مدیریت پایدار منابع آب در حوضه آبریز کارون ارائه می‌دهد و بر اهمیت رویکردهای تلفیقی مبتنی بر داده‌های مکانی و محلی در برنامه‌ریزی منابع طبیعی، به‌ویژه در ارتباط با مدیریت تغییرات کاربری اراضی، تأکید می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان در انجام و انتشار این پژوهش علمی، اصول اخلاقی را رعایت کرده‌اند و این امر مورد تأیید آنهاست.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای دوم یا استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

نویسنده چهارم: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر از حمایت مالی هیچ سازمان و یا موسسه‌ای برخوردار نبوده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه خوارزمی، اساتید راهنما، مشاور و داوران گرامی به خاطر همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

اولیاء، امیرحسین و سیما، سمیه (۱۴۰۰). عدم قطعیت‌های برآورد تبخیر–تعرق واقعی در مقیاس حوضه آبریز با استفاده از مدل SEBAL، *تحقیقات آب و خاک ایران*، (۵)۵۲، ۱۲۲۱–۱۲۰۹

دهقانی، نوید؛ قاسمیه، هدی؛ ساداتی نژاد، جواد و قربانی، خلیل (۱۳۹۶). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیک مطالعه موردی: حوضه آبخیز بازفت صمصامی، *اکوهیدرولوژی*، ۱، ۱۰۲–۸۹.

سلطانی گردفرامرزی، سمیه و نجمه، دانشور مروست (۱۳۹۸). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر تبخیر و تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: زیر حوضه سقز). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۱)، ۱۸۹–۱۷۷.

صابر، مهناز؛ صلاحی، برومند و مفیدی، عباس (۱۴۰۳)، بررسی زمانی–مکانی تبخیر و تعرق در بخش جنوبی حوضه آبریز رودخانه ارس، *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۴ (۷۴)، ۲۳–۱.

ضیایی، نوید؛ اونق، مجید؛ عسگری، حمیدرضا؛ مساح بوانی، علیرضا و سلمان ماهینی، عبدالرسول (۱۳۹۶). مقایسه اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر شدت خبر و ریسک بیابانزایی حوضه حبله رود، استان تهران، *مهندسی اکوسیستم آب*، ۶ (۱۶)، ۱۱۸–۱۰۵.

فتحیان، فرشاد؛ احمدزاده، حجت و باقری هارونی، محمد حسین (۱۴۰۳). مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق مبتنی بر فناوری سنجش از دور و مدل SWAT مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی‌چای، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۵ (۵۷)، صفحه ۱۸۲–۱۶۶.

قاسمی، حجت الله؛ صراف، امیرپویا و امین نژاد، بابک (۱۴۰۲). بکارگیری مدل SWAT و الگوریتم SEBAL در برآورد مقادیر تبخیر و تعرق حوضه آبریز کارون، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، (۶) ۱۷، صفحه ۱۲۱۴–۱۱۹۵

نوری، حمید و فرامرزی، محمد (۱۳۹۶). بررسی تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف اراضی مناطق کوهستانی با استفاده از الگوریتم سبال و ترکیب تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat 8، *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۸ (۲)، صفحه ۵۶–۳۹.

ولی‌زاده کامران، خ؛ جهان‌بخش، س؛ زاهدی، م و رضایی بنفشه، م (۱۳۹۱). برآورد تبخیر – تعرق واقعی و تحلیل ارتباط آن با کاربری زمین در محیط GIS، *فضای جغرافیایی*، ۳۷، ۵۴–۳۹.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

References

Ahmadpour, S., Bayzidi, Y., & Trachte, K. (2025). Spatio-temporal patterns of evapotranspiration in the temperate Eastern German lowlands and its response to climate and land use change. *Theor Appl Climatol* 156, 307. https://doi.org/10.1007/s00704-025-05529-5

Dias,L.C.P., Macedo,M.N., Costa,M.H., Coe,M.T., & Neill,C. (2015). *Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil, Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, Part B(PB), 108-122.

De la Casa, A.C., & Ovando, G.G. (2014). Climate change and its impact on agricultural potential in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 1–11.

Dehghani, N., Ghasemieh, H., Sadatinejad, J., & Ghorbani, K. (2017). Assessing the impact of climate change on runoff using a hydrological model: Case study of Bazoft-Samsami watershed. *Ecohydrology*, 1, 89–102.

Emile Soro, G., Berthe Yao, A., Morton Kouame, Y., & Goula, B.(2017). Climate Change and Its Impacts on Water Resources in the Bandama Basin, Côte D'ivoire. *Journal Hydrology*, 4(18), 13.

Fathian, F., Ahmadzadeh, H., & Bagheri Harouni, M. H. (2024). Comparison of remote sensing-based and SWAT model approaches for evapotranspiration estimation: Case study of Ajichai watershed. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 15(57), 166–182.

Giardino, C., Battisti, S., et al. (2023). Spatio-Temporal Analysis of Land Surface Temperature and Land Cover Changes in Central Italy Using MODIS Data. *Land*, 13(6), 796. https://doi.org/10.3390/land13060796

Ghasemi, H., Sarraf, A. P., & Aminnejad, B. (2023). Application of SWAT model and SEBAL algorithm for estimating evapotranspiration in the Karun River basin. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(6), 1195–1214.

Hadi, H., & Jaafar Lara, H., Sujud (2024). High-resolution satellite imagery reveals a recent accelerating rate of increase in land evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 315, 14489. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114489

Hewitson B.C., & Crane R.G. (1996). Climate downscaling: techniques and application. *Journal Climat Research*. 7(29), 85-95.

IPCC, 2014. Climate Change (2014), *Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.688.

Jabbari S., Khajadini J., Jafari R., & Soltani S. (2014). Investigating the changes of vegetation cover percentages using satellite images in the Semirom area. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(10), 27-38. (In Persian)

Kouhi, M., & Sanaei Nejad, H. (2014). Evaluation of Climate Change Scenarios based on Two Statistical Downscaling Methods for Reference Evapotranspiration in Urmia Region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(7), 559-574. (In Persian).

Noori, H., & Faramarzi, M. (2017). Investigation of actual evapotranspiration under different land uses in mountainous areas using SEBAL algorithm and combined MODIS and Landsat 8 satellite imagery. *Geography and Environmental Planning*, 28(2), 39–56.

Oliaei, A., & Sima, S. (2021). Uncertainties in actual evapotranspiration estimation at the watershed scale using SEBAL model, *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 52(5), 1209–1221.

Saber, M., Salahi, B., & Mofidi, A. (2024). Spatiotemporal analysis of evapotranspiration in the southern part of Aras River watershed. *Applied Research Journal of Geographical Sciences*, 24(74), 1–23.

Soltani Gardfaramarzi, S., & Daneshvar Marvast, N. (2019). Impact of land use changes on potential evapotranspiration (Case study: Saqqez sub-basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(1), 177–189.

Silva, B.B.D., Mercante, E., Boas, M. A.V., Wrublack, S.C., & Oldoni, L.V. (2018). *Satellite-Based ET Estimation Using Landsat 8 Images and SEBAL Model, Revista Ciência Agronômica*, 49(2), 221-227.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]

Tan, L., Kaiyuan Z., Qiangqiang, Z., & Yanjuan W. (2021). Evapotranspiration Estimation Using Remote Sensing Technology Based on a SEBAL Model in the Upper Reaches of the Huaihe River Basin. *Atmosphere*, 12, 1599. https://doi.org/10.3390/atmos12121599

Thobela, M. N., Adeboye, M. T., et al. (2023). Forecasting Actual Evapotranspiration Using MODIS Data and Machine Learning Techniques in a Semi-Arid Region of South Africa. *Water*, 15(10), 176. https://doi.org/10.3390/w1510176

Valizadeh Kamran, Kh., Jahanbakhsh, S., Zahedi, M., & Rezaei Banafshah, M. (2012). Estimation of actual evapotranspiration and analysis of its relationship with land use in GIS environment. *Scientific–Research Journal of Geographical Space*, 37, 39–54.

Yang, L., Li, J., Sun, Z., Liu, J., Yang, Y., Li, T. (2022). Daily actual evapotranspiration estimation of different land use types based on SEBAL model in the agro-pastoral ecotone of northwest China. *PLoS ONE*. 17(3), e0265138. https://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0265138

Yaghoobzadeh, M., Broomandnasab, S., Izadpanah, Z,. & Kaboli, H. (2015). Assessment of Trends of spatial and temporal changes evapotranspiration Using a GIS in semi-arid regions. *Journal of Water Research in Agriculture*. 29 (2), 221-233. (In Persian)

Ziaei, N., Ounagh, M., Asgari, H. R., Masah Bavani, A., & Salman Mahini, A (2017). Comparative effect of climate change scenarios on drought severity and desertification risk in the Hablehroud watershed, Tehran Province. *Water Ecosystem Engineering*, 6(16), 105–118.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2011). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Miralles, D. G., Teuling, A. J., van Heerwaarden, C. C., & de Arellano, J. V. G. (2020). Evapotranspiration in the global water cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2417-2437. https://doi.org/10.5194/hess-24-2417-2020

Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781–1800. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019

Karimi, P., & Bastiaanssen, W. (2015). Assessment of water resources in complex semi-arid basins: The case of the Karun Basin, Iran. *Journal of Hydrology*, 527, 435–450. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.032

Running, S. W., Mu, Q., Zhao, M., & Ryu, Y. (2017). MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) and water balance: Status, successes, and challenges. *Hydrological Processes*, 31(19), 3275–3290. https://doi.org/10.1002/hyp.11347

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328. https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.1.4]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.3]