Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

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

Ecological Catastrophe in the Sultanieh Grassland: An Integrated Assessment of Anthropogenic and Climatic Drivers Using Remote Sensing and Catastrophe Theory

Gholam Hassan Jafari [1]✉ | Isa Piri [2] | Payam Afshar [3]

1. Corresponding Author, Department of Geography, Faculty of Human Sciences, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: jafarihas@znu.ac.ir
2. Department of Geography, Faculty of Human Sciences, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: isapiri@znu.ac.ir
3. Department of Geography, Faculty of Human Sciences, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: payam.afshr@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 15 October 2025
Accepted 14 January 2025
Published online 07 January 2025

Keywords:
Anthropocene,
Landuse Change,
Sultanieh Grassland,
Ecological Rupture,
Catastrophe Theory.

ABSTRACT

Objective: This study aims to investigate the drivers of ecological rupture in the Sultanieh Grassland, one of Iran's most valuable natural ecosystems, which has experienced severe degradation over the past two decades. The research seeks to identify and prioritize the relative contributions of climatic, hydrological, and anthropogenic factors in triggering systemic instability and to assess whether the ecosystem has crossed a critical threshold toward irreversible collapse.

Methods: An integrated analytical framework was employed, combining multi-source datasets from 2000 to 2021. Remote sensing indicators—including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Temperature (LST), and Soil Moisture (SM)—were derived from MODIS and Landsat imagery. Hydroclimatic time series (temperature, precipitation, potential evapotranspiration [PET], and groundwater levels) were analyzed alongside demographic statistics and land use/land cover (LULC) changes. A multi-criteria weighting approach, grounded in catastrophe theory, was applied to objectively quantify the relative influence of key drivers while minimizing subjective bias in decision-making.

Results: The analysis reveals a 15% decline in effective precipitation, a 1°C increase in mean annual temperature, and a groundwater table drop exceeding 30 meters over the study period. These environmental stresses were compounded by a fourfold population growth and a doubling of per capita water consumption. Consequently, vegetation cover declined persistently, with NDVI decreasing from 0.2817 in 2004 to 0.1701 in 2021, while barren lands expanded significantly. Within the catastrophe theory framework, three primary drivers—groundwater depletion, vegetation loss, and population–water pressure—were identified as collectively responsible for 50% of the system's destabilization. The evidence confirms a transition from a stable ecological state to a dissipative, degraded phase.

Conclusions: The Sultanieh Grassland has likely crossed a critical ecological threshold due to the synergistic intensification of anthropogenic and climatic pressures within a geomorphologically and hydrologically vulnerable setting. Without immediate intervention—including sustainable groundwater management, strict control of urban expansion, and active restoration of hydrological equilibrium—the ecosystem faces irreversible transformation into an active source of dust emissions and desertification. This study underscores the urgency of science-based policy actions to prevent the total collapse of this irreplaceable natural and cultural heritage site.

Cite this article: Jafari, Gh. H., Piri, I., & Afshar, P. (2025). Ecological Catastrophe in the Sultanieh Grassland: An Integrated Assessment of Anthropogenic and Climatic Drivers Using Remote Sensing and Catastrophe Theory. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (4), 117-132. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.7

© The Author(s)
Publisher: Kharazmi University
DOI: http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.7

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Sultanieh Grassland, located between the northern slopes of the Alborz Mountains and the southern foothills of the Qaflankuh range in northwestern Iran, represents one of the country's most ecologically and culturally significant grassland ecosystems. Recognized as part of a UNESCO World Heritage landscape, this Grassland historically sustained lush natural vegetation despite a semi-arid climate, owing to a unique hydrogeological setting: a shallow impermeable layer of white clayey soil and a high groundwater table that enabled natural, continuous irrigation. However, over the past two decades, the Grassland has undergone severe degradation. This study investigates the drivers of this ecological rupture within the Anthropocene framework—where human activities act as dominant geological forces—by integrating climatic, hydrological, demographic, and land-use dynamics. While prior studies have examined isolated aspects of this decline, a holistic, quantitative assessment linking these pressures through a theoretical lens of systemic instability remains absent. This research addresses that gap by employing catastrophe theory to model the non-linear transition from ecological stability to collapse.

Methods

This study adopts a mixed-methods, spatio-temporal analytical approach. Climatic data (temperature, precipitation, and potential evapotranspiration) from four meteorological stations (Zanjan, Kharmdarreh, Kheirabad, Khodabandeh) spanning 2000–2021 were analyzed for trends and anomalies. Groundwater levels were assessed using piezometric well records and GRACE satellite-derived terrestrial water storage anomalies. Remote sensing indicators—including Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Temperature (LST), Soil Moisture (SM), and surface runoff—were extracted from MODIS and Landsat imagery via Google Earth Engine. Land use/land cover (LULC) changes were classified using the Random Forest algorithm, with validation through field surveys. Crucially, analyses were conducted at two spatial scales: the entire Sultanieh watershed and the core Grassland area, to avoid masking localized degradation with regional greening (e.g., from agricultural expansion). Finally, a multi-criteria weighting method, based on impact intensity scoring (Chatterjee & Bhattacharya, 2013), was applied to prioritize drivers, and results were interpreted through Thom's (1970) catastrophe theory to identify critical thresholds.

Results

Results reveal a compound crisis. Annual temperature rose by 0.8–1.1°C, while effective precipitation declined by ~15% between the first (2000–2010) and second (2011–2021) decades. Concurrently, the groundwater table plummeted by over 30 meters (from 16.7 m to 47.6 m depth), with abrupt drops of 13–15 m occurring in 2001 and 2013—indicative of hydrological tipping points. Demographic pressure intensified dramatically: regional population grew 4.3-fold since 1966, and per capita water consumption doubled from 99 to 203 liters/day, driving unsustainable aquifer extraction. In the Grass's core, NDVI declined persistently from a peak of 0.2817 in 2004 to a historic low of 0.1701 in 2021—a 40% reduction—while barren land expanded from 310 km² to 413 km². Weighted impact analysis identified three dominant drivers: groundwater depletion, vegetation loss, and population-water pressure, collectively accounting for 50% of the destabilizing influence. Climatic stressors (reduced rainfall, higher temperatures, increased PET) contributed 40%, while land-use change and livestock overgrazing accounted for the remaining 10%.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

These findings confirm that the Sultanieh Grassland has transitioned from a stable ecological state to a dissipative, degraded one—a shift consistent with catastrophe theory's prediction of sudden system collapse following gradual parameter changes. The synchronous decline in NDVI and groundwater levels serves as a definitive signature of this bifurcation. Critically, while climate change exacerbates vulnerability, anthropogenic pressures—particularly unregulated groundwater mining—are the primary catalysts. This aligns with global dryland studies (e.g., Du et al., 2018) and Iranian research (Jafari, 2007; Sayadghafam, 2013), which identify human water demand as the chief driver of aquifer depletion in arid zones. The spatial correlation between zones of severe groundwater drawdown and vegetation loss further underscores hydrological rupture as the linchpin of ecological instability. Without intervention, the Grassland risks irreversible desertification, transforming from a moisture-retaining ecosystem into a dust-emitting source.

Conclusion

This study provides robust, multi-source evidence that the Sultanieh Grassland is in an advanced state of ecological collapse, driven by the synergistic intensification of anthropogenic and climatic stressors. The findings underscore an urgent need for systemic policy reform: strict regulation of groundwater extraction, closure of illegal wells, and adoption of efficient irrigation technologies, urban growth containment, and restoration of natural vegetation through enforced fallow periods. Given the Grassland's status as a cultural and ecological heritage site, its preservation demands immediate, science-based management. Beyond this case, the integrated methodology—combining remote sensing, hydro-climatic time series, and catastrophe theory—offers a transferable framework for anticipating and mitigating ecological tipping points in vulnerable dryland ecosystems worldwide.

Keywords: Anthropocene, Landuse Change, Sultanieh Grassland, Ecological Rupture, Catastrophe Theory.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

"Not applicable".

Acknowledgements

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

Ethical considerations

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

Funding

This article has received no financial support.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: **۵۱۴۶– ۲۵۸۸**

Homepage: https://khu.ac.ir

تحلیل گسیختگی اکولوژیکی چمن سلطانیه در عصر آنتروپوسن: رویکردی تلفیقی مبتنی بر سنجش از دور، داده‌های هیدرواقلیمی و نظریه کاتاستروف

غلام حسن جعفری [۱]✉| عیسی پیری [۲] | پیام افشار [۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: jafarihas@znu.ac.ir

۲. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: isapiri@znu.ac.ir

۳. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: payam.afshr@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

کلیدواژه‌ها:
آنتروپوسن،
تغییر کاربری اراضی،
چمن سلطانیه،
گسیختگی اکولوژیکی،
نظریه کاتاستروف.

هدف: چمن سلطانیه، به‌عنوان یکی از ارزشمندترین اکوسیستم‌های طبیعی ایران، در دو دهه اخیر با تخریب گسترده‌ای مواجه شده است. هدف این پژوهش، تحلیل عوامل مؤثر بر گسیختگی اکولوژیکی این زیست‌بوم شکننده و شناسایی نقاط آستانه بحرانی است تا راهبردهای پیشگیرانه برای حفظ پایداری آن ارائه شود.

روش پژوهش: این مطالعه با رویکردی تلفیقی و توصیفی–تحلیلی انجام شده است. داده‌های مورد استفاده شامل شاخص‌های سنجش از دور (NDVI، LST، رطوبت خاک)، سری‌های زمانی هیدرواقلیمی (دما، بارش، تبخیر–تعرق پتانسیل و سطح آب زیرزمینی)، آمارهای جمعیتی و تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ است. تحلیل‌ها در دو سطح «کل حوضه» و «محدوده اصلی چمن» انجام شد تا از سوگیری ناشی از تغییرات کاربری در حاشیه‌ها جلوگیری گردد. برای اولویت‌بندی عوامل گسیختگی، از روش وزن‌دهی چندمعیاره در چارچوب نظریه کاتاستروف استفاده شد که امکان محاسبه وزن‌ها بر اساس مکانیسم درونی سیستم را فراهم می‌آورد.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان می‌دهد که کاهش ۱۵ درصدی بارش مؤثر، افزایش ۱ درجه‌ای دمای میانگین و افت بیش از ۳۰ متری سطح آب زیرزمینی، همراه با رشد چهار برابری جمعیت و دو برابری سرانه مصرف آب، منجر به کاهش پایدار پوشش گیاهی (کاهش NDVI از ۰/۲۸۱۷ در سال ۲۰۰۴ به ۰/۱۷۰۱ در سال ۲۰۲۱) و گسترش چشمگیر اراضی بایر شده است. بر اساس تحلیل وزن‌دهی، سه شاخص «افت سطح ایستابی»، «کاهش پوشش گیاهی» و «فشار جمعیتی–آبی» به‌عنوان عوامل اصلی (با سهم ترکیبی ۵۰ درصد) در القای گسیختگی شناسایی شدند. نتایج تأیید می‌کنند که سیستم از وضعیت پایدار خارج شده و وارد فاز «میرا» گشته است.

نتیجه‌گیری: این مطالعه هشدار می‌دهد که بدون مداخله فوری در مدیریت منابع آب، کنترل گسترش شهری و بازگرداندن تعادل هیدرولوژیکی، چمن سلطانیه به‌زودی به یک کانون فعال گرد و غبار و بیابان‌زایی تبدیل خواهد شد. احیای این اکوسیستم مستلزم سیاست‌های علمی‌محور، ممنوعیت برداشت‌های غیرمجاز از آبخوان‌ها، اجرای سیستم‌های آبیاری هوشمند و حفاظت از پوشش گیاهی طبیعی است. چارچوب روش‌شناختی به‌کاررفته در این پژوهش همچنین می‌تواند به‌عنوان الگویی برای تحلیل و مدیریت گسیختگی‌های اکولوژیکی در سایر اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک جهان مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: جعفری، غلام حسن؛ پیری، عیسی؛ و افشار، پیام (۱۴۰۴). تحلیل گسیختگی اکولوژیکی چمن سلطانیه در عصر آنتروپوسن: رویکردی تلفیقی مبتنی بر سنجش از دور، داده‌های هیدرواقلیمی و نظریه کاتاستروف. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۴)، ۱۱۷–۱۳۲.
http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.7

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

مقدمه

چمن سلطانیه به‌عنوان یکی از اکوسیستم‌های طبیعی و ارزشمند ایران، نقشی کلیدی در حفظ پایداری اکولوژیکی، تأمین خدمات زیست‌محیطی و حمایت از معیشت جوامع محلی ایفا می‌کند. این منطقه، که در موقعیت توپوگرافی منحصربه‌فردی بین دو رشته‌کوه شمالی و جنوبی واقع شده، تحت تأثیر عوامل هیدرولوژیکی، اقلیمی و ژئومورفولوژیکی خاصی قرار دارد. با این حال، فشارهای ناشی از بهره‌برداری‌های انسانی، تغییرات اقلیمی و گسیختگی‌های ساختاری در چرخه آب، این اکوسیستم را به‌شدت آسیب‌پذیر ساخته‌اند (داورپناه و خلفی، ۱۳۸۷). شناخت عوامل مؤثر بر ناپایداری چمن سلطانیه، نه‌تنها برای حفظ تنوع زیستی و کیفیت محیط‌زیست، بلکه برای تضمین توسعه پایدار منطقه ضروری است.

در ادبیات نظری اکولوژی معاصر، پدیده تغییرات ناگهانی و گسترده در اکوسیستم‌ها، با مفهوم «حالت‌های پایدار جایگزین» تبیین می‌شود. اسکفر و کارپنتر[1] (۲۰۰۳) تأکید می‌کنند که چنین گسیختگی‌هایی، نتیجه عبور سیستم از یک نقطه آستانه بحرانی است؛ جایی که تغییرات تدریجی در عواملی مانند دما یا رطوبت، تا لحظه عبور از آستانه تأثیر چندانی ندارند، اما پس از آن، منجر به تحولی سریع، گسترده و اغلب غیرقابل برگشت می‌شوند. این دیدگاه، دید ما را نسبت به مدیریت اکوسیستم‌ها دگرگون می‌کند: دیگر نمی‌توان انتظار داشت که پاسخ سیستم به فشارهای محیطی خطی و قابل پیش‌بینی باشد.

گسیختگی‌های هیدرولوژیکی–که به‌معنای پاره‌شدگی یا انفصال در روابط طبیعی سیستم‌های آبی تعریف می‌شوند (فرهنگ فارسی معین)؛ از جمله کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی، افت سطح ایستابی و تغییر در الگوهای بارش، تأثیر مستقیمی بر چرخه آب و تغذیه پوشش گیاهی دارند. این اختلالات می‌توانند ظرفیت آبخوان‌ها را کاهش داده، رطوبت خاک را محدود کرده و توان بازسازی طبیعی اکوسیستم را تضعیف نمایند. همزمان، تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش دمای میانگین، کاهش بارش و تشدید خشکسالی‌ها، شرایط را برای بقای اکوسیستم‌های حساس مانند چمن سلطانیه پیچیده‌تر کرده‌اند (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۹۴؛ فرجزاده اصل، احمدی و علیجانی، ۱۳۹۲). در چنین بستری، چمن سلطانیه—به‌عنوان اکوسیستمی وابسته به رژیم آبی پایدار و خاک‌های نفوذناپذیر– در معرض خطر جدی تخریب و خشک‌شدگی قرار گرفته است (جعفری و کریمی، ۱۴۰۰).

پیشینه پژوهش

۱. پیشینه نظری

در سال‌های اخیر، نظریه کاتاستروف به‌عنوان چارچوبی نوین برای مدل‌سازی پدیده‌های محیطی غیرخطی و ناپایدار، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این راستا، خیری‌زاده آروق و اسمعیل‌پور (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای در کلانشهر تبریز، از توابع تئوری کاتاستروف در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای مکانیابی بهینه توسعه فضایی–کالبدی شهر استفاده کردند. آن‌ها با تلفیق متغیرهای طبیعی (مانند گسل‌های فعال، توپوگرافی نامساعد، لیتولوژی ناپایدار، سطح آب زیرزمینی و اراضی کشاورزی) و مخاطرات زیست‌محیطی، نشان دادند که روش‌های سنتی تصمیم‌گیری چندمعیاره، در معرض سوگیری‌های ذهنی قرار دارند. در مقابل، رویکرد مبتنی بر تئوری کاتاستروف، با محاسبه اهمیت معیارها از طریق مکانیسم درونی سیستم، نه‌تنها عدم قطعیت‌های تصمیم‌گیری را کاهش می‌دهد، بلکه منجر به نتایجی با قابلیت تکرارپذیری و انطباق بالا با واقعیت میدانی می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که توسعه شهری در تبریز عمدتاً در پهنه‌های پرخطر (مانند نوار گسل شمال تبریز) انجام شده و اکنون تنها راهکارهای پایدار، محدود شدن به توسعه درون‌زا یا جهت‌گیری به سمت جنوب شهر است.

در زمینه ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی، صادق‌فام (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای نوآورانه در دشت مراغه–بناب، از توابع عضویت فازی کاتاستروف برای یکپارچه‌سازی ۱۱ لایه داده ناهمگن (هیدروژئولوژی، کاربری اراضی، شیب و ...) استفاده کرد. این رویکرد، با کاهش وابستگی به قضاوت کارشناسی و محاسبه وزن‌ها بر اساس مکانیسم درونی سیستم، منجر به تولید شاخصی بدون بعد از

[1] - Scheffer & Carpenter

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

«پتانسیل آب زیرزمینی» شد که با واقعیت میدانی همخوانی بالایی داشت. همچنین، وی با تلفیق نظریه کاتاستروف و روش DRASTIC، وزن‌های پارامترهای آسیب‌پذیری را به‌صورت پویا و متناسب با شرایط محلی تعیین کرد.

مصری علمداری و خیری‌زاده آروق (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای نوآورانه، از توابع تئوری کاتاستروف در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر ورزقان استفاده کردند. آن‌ها با تلفیق متغیرهای مکانی چندبعدی–از جمله تراکم ساختمانی، کیفیت سازه‌ها، لیتولوژی زیربنایی، دسترسی به خدمات اضطراری و فضاهای باز، موفق شدند عدم قطعیت‌های رایج در تصمیم‌گیری چندمعیاره را کاهش دهند و نقشه‌ای قابل تکرار از آسیب‌پذیری شهری تولید کنند. این یافته، گستره کاربردی نظریه کاتاستروف را به‌طور چشمگیری گسترش داده و الگویی قوی برای تحلیل سیستم‌های ترکیبی (انسان–طبیعت) فراهم می‌آورد.

اسفندیاری درآباد، رستمی و مصطفی‌زاده (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای در حوضه آبریز زمکان کرمانشاه، از توابع تئوری کاتاستروف در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده کردند. آن‌ها با تلفیق ۱۳ فاکتور مؤثر (از جمله شیب، بارش، ارتفاع و سازندهای زمین‌شناسی) و به‌کارگیری مکانیسم وزن‌دهی مبتنی بر ساختار ریاضی درونی سیستم، موفق به تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با دقتی بالغ بر ۹۰ درصد (بر اساس منحنی ROC) شدند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تئوری کاتاستروف نه‌تنها قادر به ترکیب همزمان داده‌های کمّی و کیفی است، بلکه با کاهش عدم قطعیت‌های تصمیم‌گیری و ارائه وزن‌های عینی بر اساس ماهیت سیستم، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل بحران‌های ژئومورفولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد روش‌شناختی، الهام‌بخش به‌کارگیری چارچوب مشابهی در تحلیل گسیختگی اکولوژیکی چمن سلطانیه شده است؛ جایی که تعامل پیچیده عوامل هیدرولوژیکی، اقلیمی و انسانی نیز منجر به تحولات ناگهانی در وضعیت اکوسیستم شده است.

این چارچوب روش‌شناختی، الهام‌بخش به‌کارگیری سیستم‌های تصمیم‌یار ترکیبی در تحلیل گسیختگی هیدرولوژیکی چمن سلطانیه شده است، جایی که یکپارچه‌سازی داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی نیز مستلزم رویکردی عینی و غیرذاتی است. مطالعاتی مانند پژوهش داورپناه و خلفی (۱۳۸۷) با استفاده از RS و GIS، کاهش ۲۳۸ هکتاری مساحت چمن سلطانیه طی ۵۲ سال (۱۹۵۵–۲۰۰۷) را مستند کرده‌اند که نشان‌دهنده روند تخریبی منطقه است. همچنین، جعفری و محمدی (۱۳۹۷) و جعفری و کریمی (۱۴۰۰) با بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی و کواترنری، نقش عوامل تاریخی–از جمله فعالیت‌های یخچالی و وجود لایه‌های نفوذناپذیر خاک–را در شکل‌گیری چمن سلطانیه تأیید کرده‌اند.

۲. پیشینه تجربی

در ادبیات جهانی، بحث درباره نسبت مشارکت منابع طبیعی در مقابل منابع انسانی در تولید گرد و غبار همواره یکی از محورهای کلیدی تحقیقات بیابان‌زایی بوده است. در این زمینه، دو، وانگ و ایکسو[1](۲۰۱۸) در مطالعه‌ای جامع در شمال چین، با توسعه یک مدل فرسایش بادی با قدرت تفکیک مکانی–زمانی بالا، نشان دادند که بیش از ۹۶ درصد از گرد و غبار تولیدی در این منطقه از مناطق طبیعی (مانند بیابان‌های گاشون گوبی و کوموتاگه) سرچشمه می‌گیرد، در حالی که سهم مناطق انسانی (مانند اراضی کشاورزی و مراتع تخریب‌شده) تنها حدود ۳/۷ درصد است. با این حال، آن‌ها تأکید کردند که هرچند سهم کمّی منابع انسانی ناچیز به‌نظر می‌رسد، اما پیامدهای کیفی آن بسیار جدی‌تر است؛ زیرا فرسایش بادی در مناطق انسانی منجر به از دست رفتن کربن آلی خاک می‌شود، پدیده‌ای که مستقیماً بر حاصلخیزی خاک و توان تولید اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. در واقع، ۳۲/۵ درصد از کل اتلاف کربن آلی خاک در شمال چین از مراتع و ۷/۵ درصد از اراضی کشاورزی نشأت می‌گیرد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تخریب پوشش گیاهی توسط انسان، حتی اگر به‌تنهایی منبع اصلی گرد و غبار نباشد، می‌تواند به‌عنوان یک «عامل تشدیدکننده کیفی» عمل کند که ساختار خاک را تضعیف کرده و آن را مستعد فرسایش بادی می‌سازد.

در سال‌های اخیر، شواهد فزاینده‌ای از ارتباط علّی بین تخریب پوشش گیاهی منطقه‌ای، تغییرات اقلیمی و افزایش فراوانی و شدت طوفان‌های گرد و غبار در غرب ایران ارائه شده است. در این زمینه، نوری، فرامرزی و صادقی (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای در منطقه

[1] - Du, Wang & Xue

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

زاگرس نشان دادند که کاهش پوشش گیاهی (با استفاده از سری زمان NDVI ماهواره MODIS در بازه ۲۰۰۰–۲۰۱۶) همراه با تغییرات اقلیمی (افزایش دما، کاهش بارش و افزایش سرعت باد) منجر به گسترش روزهای همراه با هوای گرد و غباری شده است. آن‌ها با تحلیل انواع هوا و پیش‌بینی روندها تا سال ۲۰۶۰، نشان دادند که دو نوع هوای گرد و غباری (گرم/خشک/بادی و داغ/بسیار خشک) در فصل گرم سال، بیش از ۸۴ درصد از روزهای گرد و غباری را در دوره اخیر تشکیل داده‌اند و فراوانی این الگوهای خطرناک در آینده نزدیک افزایش خواهد یافت. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که تخریب پوشش گیاهی نه‌تنها یک پیامد محیطی، بلکه یک عامل تشدیدکننده فعال در چرخه گرد و غبار است.

در مطالعه‌ای در حوزه آبریز سیستان (مرز ایران و افغانستان)-یکی از مهم‌ترین کانون‌های گرد و غبار در جنوب غربی بوروغنی، پورهاشمی و غلامی (۲۰۲۱) با ترکیب داده‌های سنجش از دور، مدل‌های آماری دو متغیره (FR و WO) و تکنیک‌های تفسیرپذیری مبتنی بر نظریه بازی (SHAP)، نقشه‌ای دقیق از پتانسیل منابع گرد و غبار تهیه کردند. آن‌ها با شناسایی ۲۱۱ نقطه منبع گرد و غبار و تحلیل عوامل مؤثر (خاک، ژئومورفولوژی، شیب، NDVI، کاربری اراضی و لیتولوژی)، نشان دادند که خاک، ژئومورفولوژی و شیب بیشترین تأثیر را در تشکیل منابع گرد و غبار دارند؛ همچنین، با استفاده از SHAP، تأیید شد که سه عامل خاک، شیب و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) بیشترین سهم را در خروجی مدل‌ها دارند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که کاهش پوشش گیاهی، نه‌تنها یک شاخص وضعیت اکولوژیکی، بلکه یکی از عوامل کنترل‌کننده مستقیم در تولید گرد و غبار محسوب می‌شود.

در این راستا، رویکردهای مدیریتی سنتی که بر تغییرات تدریجی و خطی متمرکزند، قادر به پیش‌بینی یا پیشگیری از تحولات ناگهانی و غیرقابل برگشت در اکوسیستم‌های پیچیده نیستند. نظریه کاتاستروف، که توسط تام (۱۹۷۵) در حوزه توپولوژی ریاضی مطرح شد، چارچوبی مناسب برای تحلیل چنین تحولات بحرانی فراهم می‌آورد. این نظریه به بررسی تغییرات ناگهانی در سیستم‌های دینامیکی در پاسخ به تغییرات تدریجی پارامترهای کنترلی می‌پردازد و امکان شناسایی «نقاط آستانه» یا «شرایط بحرانی» را فراهم می‌سازد. کاربرد این نظریه در مطالعات محیطی، به‌ویژه در زمینه‌های بیابان‌زایی، کاهش پوشش گیاهی و انتشار گرد و غبار، به‌خوبی مستند شده است. به‌عنوان مثال دو، وانگ و ایکسو (۲۰۱۸)، بوروغنی، پورهاشمی و غلامی (۲۰۲۱) و نوری، فرامرزی و صادقی (۲۰۱۹) با استفاده از مدل‌های کاتاستروفی، نشان دادند که کاهش ناگهانی پوشش گیاهی می‌تواند منجر به فرسایش خاک، تشدید طوفان‌های گرد و غبار و حتی تبدیل مناطق سبز به منابع گردوغبار شود. همچنین، اسچفر و کارپنتر[1] (۲۰۰۳) تأکید کردند که عبور از آستانه‌های اکولوژیکی می‌تواند وضعیت‌های غیرقابل برگشتی را ایجاد کند که مدیریت آن‌ها پس از وقوع بسیار دشوار است.

۳. مدل مفهومی

در ادبیات موضوع، تخریب سرزمین دیگر صرفاً به‌عنوان یک پدیده فیزیکی (مانند فرسایش یا کاهش پوشش گیاهی) در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه به‌عنوان پیامد تعامل پیچیده عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در سیستم‌های اکولوژیکی شکننده تعریف می‌شود (گوستافسون[2]، ۲۰۱۳؛ ویلنیوو، می و یونپ[3] ۱۹۹۲). در این زمینه، اسکندری دامنه، زهتابیان و خسروی (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای جامع در دشت میناب، تأکید کرد که تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نتیجه هم‌افزایی خشکسالی‌های طولانی‌مدت (ناشی از تغییر اقلیم) و فشارهای انسانی غیرپایدار (مانند برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، گسترش کشاورزی و روش‌های آبیاری ناکارآمد) است. وی همچنین بر این نکته کلیدی تأکید داشت که آینده‌نگری نظام‌مند، باید محور اصلی مدیریت پایدار منابع طبیعی قرار گیرد، زیرا تخریب سرزمین پیامدهای زنجیره‌واری مانند کاهش امنیت غذایی، افزایش طوفان‌های گرد و غبار، مهاجرت جوامع محلی و فقر را به‌دنبال دارد.

از این رو، این پژوهش با به‌کارگیری نظریه کاتاستروف، در پی آن است تا گسیختگی‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی مؤثر بر چمن سلطانیه را تحلیل کرده، نقاط بحرانی پایداری اکوسیستم را شناسایی نماید و راهبردهای پیشگیرانه‌ای برای حفظ این زیست‌بوم

[1] - Scheffer & Carpenter
[2] - Gustafsson
[3] - Villeneuve, Mee & UNEP

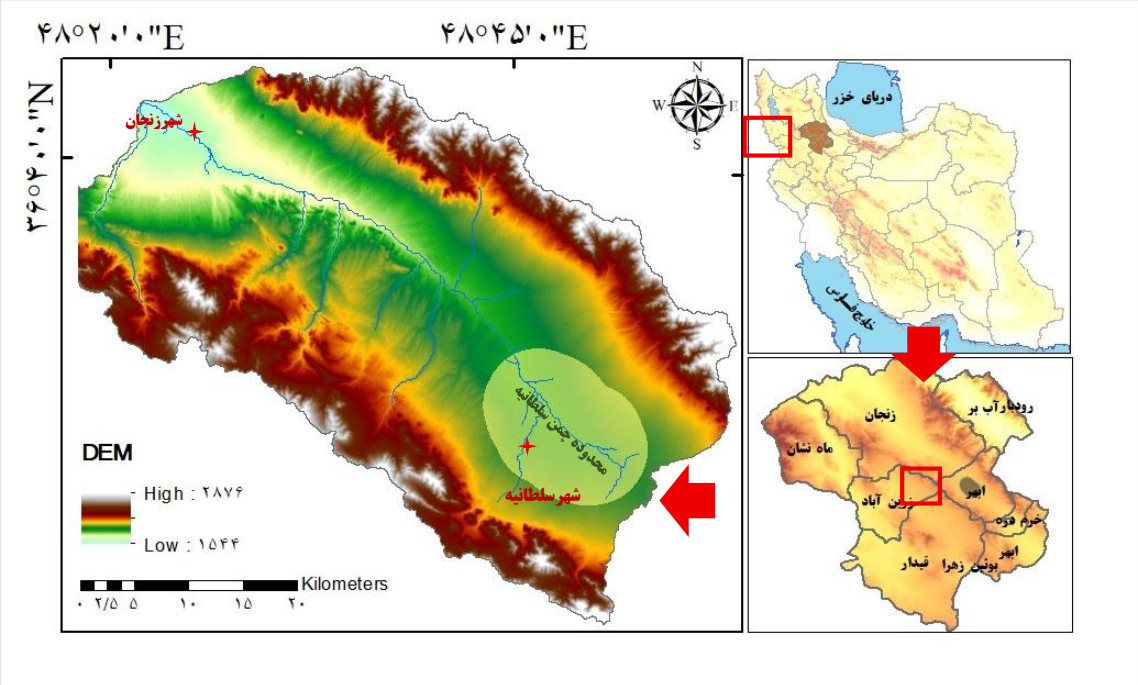
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

ارزشمند ارائه دهد. چنین رویکردی نه‌تنها به بهبود مدیریت منابع آب و خاک کمک می‌کند، بلکه می‌تواند الگویی برای مدیریت اکوسیستم‌های مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان باشد.

روش‌شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

دشت سلطانیه در شمال غربی ایران، در بخش مرکزی استان زنجان واقع شده است. این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده‌ی عرض‌های جغرافیایی°۳۶ و′۲۰ تا °۳۶ و ′۳۰ شمالی و طول‌های جغرافیایی °۴۸ و ′۴۳ تا °۴۸ و ′۴۸ شرقی قرار دارد (شکل ۱). از نظر اقلیمی، دشت سلطانیه در رده‌ی اقلیم نیمه‌خشک سرد (طبقه‌بندی کوپن: BSk) قرار می‌گیرد که با میانگین بارش سالانه حدود ۳۵۰–۳۶۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه نزدیک به ۹ درجه سانتی‌گراد همراه است. توپوگرافی منطقه عموماً مسطح تا دامنه‌ای ملایم بوده و شیب کلی آن از جنوب به سمت شمال و از شرق به غرب کاهش می‌یابد. میانگین ارتفاع دشت سلطانیه از سطح دریا در حدود ۱۸۰۰ متر است. خاک‌های غالب منطقه از نوع لومی–رسی با بافت سطحی لومی و لایه زیرین آهکی هستند که در عمق حدود ۶۰ سانتی‌متری به‌صورت یک سطح نفوذناپذیر یکنواخت، ظاهر می‌شوند. این ویژگی خاک، همراه با سطح بالای آب زیرزمینی (در برخی نقاط تا عمق ۰/۶ متری)، نقش کلیدی در حفظ رطوبت سطحی و شکل‌گیری چمن‌های طبیعی ایفا می‌کند. منابع آب سطحی و زیرزمینی در این دشت اگرچه محدود هستند، اما از نظر پراکنش، توزیع نسبتاً گسترده‌ای دارند و در گذشته به‌عنوان پایه‌های هیدرولوژیکی پایداری اکوسیستم چمن عمل کرده‌اند.



شکل ۱. موقعیت مکانی محدوده چمن سلطانیه

زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منطقه نیز به‌عنوان یکی از عوامل بنیادین شکل‌دهنده به پویایی‌های محیطی، در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. چمن سلطانیه در پهنه زمین‌ساختی فعال ایران مرکزی و در حاشیه کمربند چین‌خورده زاگرس واقع شده و ساختار آن تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی، آتشفشانی و رسوبی است. لایه‌های نئوژن و کواترنری شامل مارن، آهک، ماسه‌سنگ و رسوبات آبرفتی، همراه با گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها، نقش تعیین‌کننده‌ای در ذخیره‌سازی آب زیرزمینی، نفوذپذیری خاک و پایداری اکولوژیکی دارند.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

چمن سلطانیه در دامنه‌های میانی دو رشته‌کوه شمالی و جنوبی، در ارتفاع مناسب و با شیب بسیار کم (در برخی نقاط نزدیک به صفر)، واقع شده است. این موقعیت توپوگرافی، همراه با جهت غالب بادهای جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی، منطقه را در ردیف نواحی بادخیز قرار داده است. ساختار زمین‌شناسی منطقه و میزان بارش سالانه (میانگین ۳۵۸ میلی‌متر) باعث حفظ سطح بالای آب زیرزمینی شده است.

۲.داده‌ها و روش کار

پژوهش حاضر با هدف ارائه راهکارهای علمی و عملی برای مدیریت ناپایداری‌های محیطی و حفظ پایداری اکوسیستم در دشت چمن سلطانیه (استان زنجان) طراحی شده است. این مطالعه در راستای پاسخ به چالش‌های واقعی زیست‌محیطی منطقه، از جمله کاهش منابع آبی، تخریب پوشش گیاهی، فرسایش خاک و تشدید خشکسالی‌ها، انجام شده و با تحلیل جامع وضعیت موجود، زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مؤثر در سطح محلی و منطقه‌ای خواهد بود. از نظر ماهیت، این پژوهش کاربردی و از نوع توصیفی–تحلیلی است که با تلفیق روش‌های کمّی و کیفی، به بررسی گسیختگی‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ می‌پردازد.

در بخش کمّی، داده‌های مربوط به اقلیم (بارش، دما)، منابع آب (سطح ایستابی، دبی رودخانه‌ها)، پوشش گیاهی (شاخص NDVI) و تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های Landsat، MODIS و Sentinel-2، داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری، و همچنین اطلاعات سازمان‌های آب و محیط‌زیست استخراج و پردازش شده‌اند. این فرآیند با بهره‌گیری از پلتفرم‌های GEE[1] و نرم‌افزار ArcGIS انجام گرفته است. در مقابل، بخش کیفی پژوهش با استفاده از برداشت‌های میدانی، مصاحبه با خبرگان محلی، تحلیل متون تخصصی و به‌ویژه مدل‌سازی مبتنی بر نظریه سیستم‌های پیچیده و مدل کاتاستروف[2] توسعه یافته است. این رویکرد ترکیبی امکان درک همزمان روندهای کمّی تغییرات محیطی و تفسیر رفتارهای غیرخطی و ناگهانی سیستم اکولوژیکی را فراهم می‌آورد.

جامعه آماری پژوهش، کل محدوده دشت چمن سلطانیه است که با توجه به تنوع اقلیمی، ژئومورفولوژیکی و اکولوژیکی، در معرض فشارهای زیست‌محیطی متعددی قرار دارد. نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند انجام شده و مناطقی که بیشترین تغییرات را در شاخص‌های اکولوژیکی و هیدرولوژیکی نشان داده‌اند، انتخاب شده‌اند. این انتخاب با تحلیل نقشه‌های شیب، خاک، بارش، پوشش گیاهی و وضعیت منابع آبی صورت گرفته و با بازدیدهای میدانی و استفاده از دستگاه GPS تکمیل شده است. داده‌ها در دو دسته اصلی تقسیم شده‌اند: داده‌های طبیعی (اقلیمی و هیدرولوژیکی) و داده‌های آنتروپوسنی (انسان‌زاد) مانند رشد جمعیت، تغییر کاربری اراضی و فشار چرای دام. تمامی داده‌ها پیش از تحلیل، تحت فرآیند کنترل کیفیت قرار گرفته و داده‌های ناقص یا پرت اصلاح یا حذف شده‌اند. همچنین، برای یکپارچه‌سازی شاخص‌های دارای مقیاس‌های مختلف، از روش نرمال‌سازی فازی استفاده شده است.

تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری از روش‌های چندبعدی انجام شده است: تحلیل سری‌های زمانی شاخص‌ها در محیط Excel، پردازش تصاویر ماهواره‌ای در GEE، تحلیل‌های مکانی–زمانی در ArcGIS و به‌ویژه مدل‌سازی کاتاستروف برای شناسایی آستانه‌های بحرانی و نقاط گذار ناگهانی در سیستم محیطی. این مدل غیرخطی به پژوهش امکان می‌دهد تا نه تنها روندهای تدریجی تغییرات را رصد کند، بلکه لحظات بحرانی که در آن‌ها سیستم از یک وضعیت پایدار به وضعیت ناپایدار دیگری جهش می‌کند را پیش‌بینی نماید. شاخص‌های مورد بررسی شامل متغیرهای کنترلی (مانند بارش، دما، سطح آب زیرزمینی)، متغیرهای پاسخ (مانند تغییرات پوشش گیاهی، فرسایش خاک) و شاخص‌های ترکیبی (SPI، LST، MTI) بوده‌اند که در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی و در محدوده حوضه آبریز چمن سلطانیه تحلیل شده‌اند.

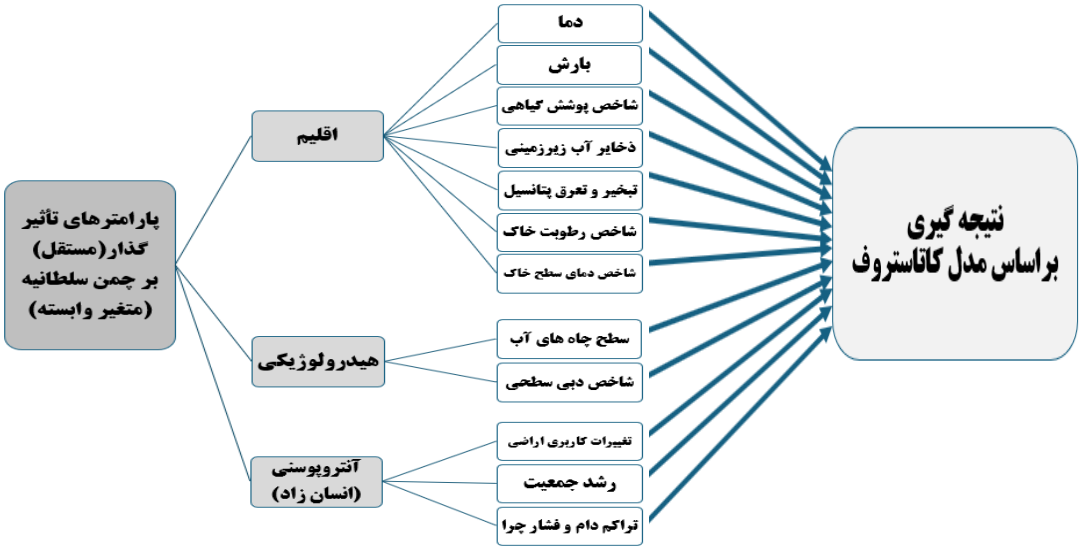
در نهایت، این پژوهش با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، مشاهدات میدانی، تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی نظری، چارچوبی جامع برای درک پیچیدگی‌های سیستم محیطی چمن سلطانیه ارائه می‌دهد. یافته‌های آن نه تنها به شناسایی روندها و نقاط بحرانی

[1] - Google Earth Engine

[2] - Catastrophe Theory

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی راهبردهای مدیریت پایدار منابع طبیعی، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و جلوگیری از فروپاشی اکوسیستم در این منطقه ارزشمند مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۲).



شکل ۲. چارت بررسی نقش پارامترهای تأثیرگذار در ناپایداری چمن سلطانیه با استفاده از روش کاتاستروف

یافته‌های پژوهش

۱. تغییرات اقلیمی، گرمایش و کاهش بارش

تحلیل داده‌های دمایی چهار ایستگاه هواشناسی مجاور (خرمدره، زنجان، خیرآباد و خدابنده) در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه در تمامی ایستگاه‌ها روندی صعودی داشته است. افزایش دما در این دو دهه بین ۰/۸ تا ۱/۱ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده که با معیارهای جهانی تغییر اقلیم همخوانی دارد و به‌عنوان هشداری جدی برای بروز تنش‌های اقلیمی در مقیاس محلی تلقی می‌شود (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین دمای چهار ایستگاه مقایسه دو دهه (۲۰۰۰–۲۰۲۱)

ردیف	ایستگاه	ارتفاع (متر)	میانگین دما (سانتی گراد)		میزان تغییر
			دهه اول	دهه دوم	
۱	خرمدره	۱۵۷۸	۱۲/۷	۱۳/۶	+ ۰/۹ °C
۲	زنجان	۱۶۵۹	۱۱/۸	۱۲/۹	+ ۱/۱ °C
۳	خیرآباد	۱۷۶۴	۱۱/۵	۱۲/ ۵	+ ۱/۰ °C
۴	خدابنده	۱۸۹۸	۱۱/۳	۱۲/۱	+ ۰/۸ °C

تحلیل رگرسیون خطی بین ارتفاع ایستگاه‌ها و دمای ثبت‌شده، رابطه‌ای معکوس و قوی را تأیید می‌کند؛ به‌طور متوسط، دما به‌ازای هر ۱۰۰۰ متر افزایش ارتفاع، حدود ۴ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد؛ این شیب در دهه دوم (۲۰۱۱–۲۰۲۱) به ۳/۴ درجه کاهش یافته است که نشان‌دهنده تضعیف گرادیان دمایی عمودی در پی گرمایش جهانی است.

همچنین، بررسی سالانه داده‌های ایستگاه خیرآباد–نزدیک‌ترین ایستگاه به چمن سلطانیه–افشای جهش‌های دمایی ناگهانی در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۷، ۱۳۹۱، ۱۳۹۳، ۱۳۹۶ و ۱۴۰۰ را نشان می‌دهد که در آن‌ها افزایش دما نسبت به سال قبل از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد فراتر رفته است. چنین جهش‌هایی می‌توانند به‌عنوان نقاط آستانه (tipping points) در سیستم اقلیمی منطقه تفسیر شوند؛ نقاطی که در آن‌ها سیستم از حالت پایدار خارج شده و به سمت گسیختگی زیست‌محیطی سوق داده می‌شود. این افزایش

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

دما، با کاهش دوره‌های سرما و افزایش تبخیر–تعرق، منجر به کاهش رطوبت خاک، تضعیف چرخه آب و در نهایت کاهش تاب‌آوری پوشش گیاهی شده است.

در موازات گرمایش، کاهش بارش سالانه نیز الگویی نگران‌کننده را آشکار می‌سازد. داده‌های چهار ایستگاه نشان می‌دهند که در دهه دوم (۲۰۱۲–۲۰۲۱) نسبت به دهه اول (۲۰۰۰–۲۰۱۱)، بارش سالانه به‌طور متوسط ۱۵ درصد کاهش یافته است (جدول ۲).

جدول ۲. میانگین بارندگی سالانه در دو دهه اخیر(میلی متر)

ردیف	ایستگاه	دهه اول	دهه دوم	تغییرات	درصد تغییر (درصد)
۱	زنجان	۳۲۰/۴۶	۲۸۰/۱۱	−۵۷/۷	−۱۶/۷
۲	خرمدره	۳۰۸/۴۶	۲۸۲/۷۴	−۵۶/۶	−۱۷/۲
۳	خدابنده	۳۷۴/۳۷	۳۲۸/۰۳	−۵۲/۸	−۱۴/۶
۴	خیرآباد	۳۳۲/۷۰	۲۶۶/۴۲	−۵۵/۳	−۱۵/۷

این کاهش در ایستگاه‌های زنجان (۱۶/۷ درصد)، خرمدره (۱۷/۲ درصد)، خدابنده (۱۴/۶ درصد) و خیرآباد (۱۵/۷ درصد) مشاهده شده است. سال ۲۰۱۰ به‌عنوان نقطه عطف گسیختگی اقلیمی بارش شناسایی شد. علاوه بر کاهش مطلق بارش، همبستگی بین ارتفاع و بارش نیز از ۰/۹۷ در دهه اول به ۰/۶۶ در دهه دوم کاهش یافته است؛ این امر نشان می‌دهد که عوامل غیرتوپوگرافی–مانند گرمایش جهانی و تغییر در الگوهای گردش جوی–در کنترل بارش منطقه نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کنند. در نتیجه، کارایی بارش در تغذیه اکوسیستم به‌شدت کاهش یافته است.

۲. پاسخ اکوسیستم، کاهش پوشش گیاهی و خشکی

بررسی شاخص NDVI در بازه ۲۲ ساله (۲۰۰۰–۲۰۲۱) در سطح کل حوضه آبریز، الگویی نوسانی اما با روند کلی نزولی در دهه دوم را نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۳. داده‌های سری زمانی تغییرات پوشش گیاهی دوره ۲۲ ساله

سال	۲۰۰۰	۲۰۰۲	۲۰۰۴	۲۰۰۶	۲۰۰۸	۲۰۱۰
NDVI	۰/۱۵	۰/۱۵۴	۰/۱۵۴	۰/۱۶۷	۰/۱۴۲	۰/۲۰۲
سال	۲۰۱۱	۲۰۱۳	۲۰۱۵	۲۰۱۷	۲۰۱۹	۲۰۲۱
NDVI	۰/۱۵۶	۰/۱۷۵	۰/۱۷۲	۰/۱۵۹	۰/۱۸۵	۰/۱۷۴

با این حال، تحلیل در سطح کل حوضه می‌تواند گمراه‌کننده باشد؛ زیرا گسترش باغ‌شهرها و تبدیل اراضی مرتعی به کشاورزی-هرچند از منظر بوم‌شناسی تخریب‌آور-در NDVI به‌عنوان «افزایش پوشش گیاهی» ثبت می‌شود. بر این اساس، تحلیل NDVI تنها در محدوده هسته‌ای چمن سلطانیه انجام شد که نتایج بسیار متفاوتی را آشکار ساخت (جدول ۴).

جدول ۴. نتایج سری زمانی تغییرات پوشش گیاهی محدوده چمن سلطانیه

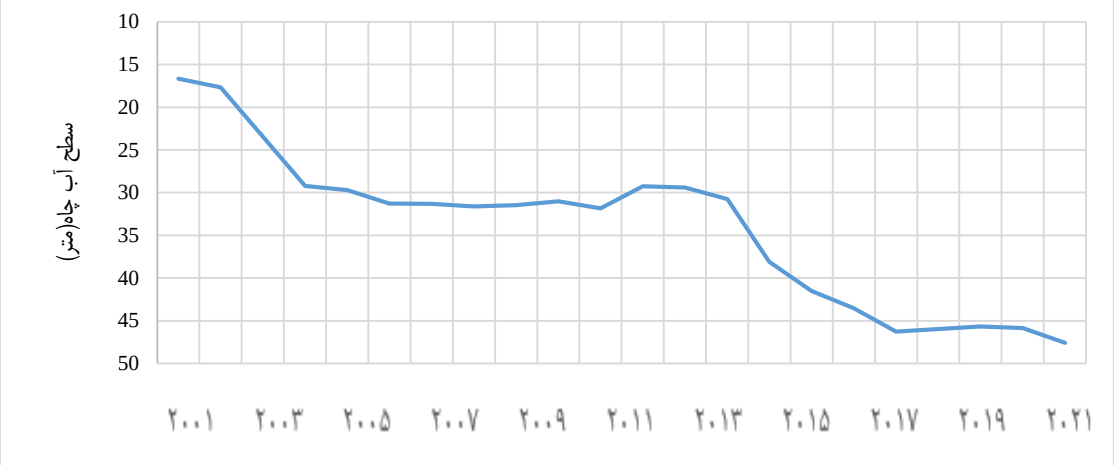
ردیف	سال	NDVI	توضیح وضعیت
۱	۲۰۰۰	۰/۲۱۲۲	شروع دوره با پوشش متوسط
۲	۲۰۰۴	۰/۲۸۱۷	اوج پوشش گیاهی
۳	۲۰۰۸	۰/۱۹۷۱	افت محسوس در اثر خشکسالی
۴	۲۰۱۳	۰/۱۹	یکی از پایین‌ترین مقادیر تا آن زمان
۵	۲۰۱۸	۰/۱۸۱۳	نزدیک شدن به شرایط بحرانی
۶	۲۰۲۱	۰/۱۷۰۱	پایین‌ترین مقدار، تأیید خشکی کامل

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

در این محدوده، NDVI از ۰/۲۱۲۲ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۲۸۱۷ در سال ۲۰۰۴ (اوج پوشش گیاهی) رسید، اما از آن پس روندی نزولی داشت. کاهش تدریجی تا سال ۲۰۱۳ (NDVI: ۰/۱۹) و سپس ادامه این روند تا ۰/۱۸۱۳ در سال ۲۰۱۸ و در نهایت ۰/۱۷۰۱ در سال ۲۰۲۱–کمترین مقدار در کل دوره مطالعه–نشان‌دهنده خشکی شدید و نابودی تدریجی چمن طبیعی است. این مقدار تقریباً ۴۰ درصد کمتر از اوج سال ۲۰۰۴ بوده و بیانگر یک فرآیند غیرقابل برگشت در سلامت اکوسیستم است.

۳. بحران آب، افت آب زیرزمینی، کاهش رطوبت خاک و افزایش تبخیر

داده‌های ماهواره‌ای GRACE و سنجش‌های زمینی نشان می‌دهند که ذخایر آب معادل (LWE) در دشت سلطانیه روندی کاهشی پیوسته داشته‌اند. همزمان، عمق سطح آب چاه‌های منطقه از ۱۶/۶۶ متر در سال ۲۰۰۰ به ۴۷/۶ متر در سال ۲۰۲۱ رسیده است؛ یعنی افتی بیش از ۳۰ متر در ۲۱ سال با میانگین سالانه ۱/۵ متر. سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۳ به‌عنوان نقاط عطف گسیختگی هیدرولوژیکی شناسایی شدند که در آن‌ها جهش‌های ناگهانی ۱۳ تا ۱۵ متری در سطح آب رخ داده است (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار سطح آب چاه های منطقه مورد مطالعه

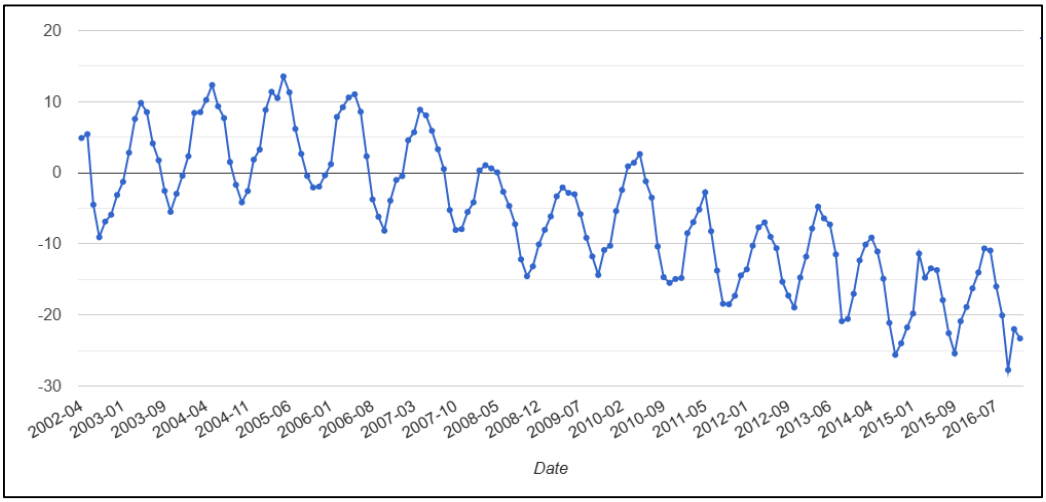
افزایش تبخیر–تعرق پتانسیل (PET) نیز الگویی صعودی داشته است؛ به‌طوری‌که میانگین سالانه PET از ۱۴۳۰۱ میلی‌متر در سال ۲۰۰۰ به ۱۶۱۳۴ میلی‌متر در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته است (جدول ۵).

جدول ۵. میانگین سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)

سال	۲۰۰۰	۲۰۰۲	۲۰۰۴	۲۰۰۶	۲۰۰۸	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۳	۲۰۱۵	۲۰۱۷	۲۰۱۹	۲۰۲۱
PET	۱۴۳۰۱	۱۴۶۵۳	۱۴۰۸۴	۱۴۹۰۴	۱۵۳۳۴	۱۵۹۰۸	۱۳۲۲۹	۱۴۷۲۴	۱۴۶۸۴	۱۴۷۹۴	۱۳۷۲۶	۱۶۱۳۴

این افزایش، همراه با کاهش رطوبت خاک (SM) (شکل ۳) و افزایش دمای سطح خاک (LST) (جدول ۷) که از °C۲۲/۶۴ در سال ۲۰۰۴ به °C۲۶/۲۵ در سال ۲۰۲۱ رسیده است؛ مثلث فشار اقلیمی را در منطقه تشکیل داده است. این سه شاخص، به‌طور همزمان، منجر به افزایش تلفات آب، کاهش ظرفیت نگهداری رطوبت توسط خاک و تضعیف چرخه طبیعی آب شده‌اند (شکل ۴).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

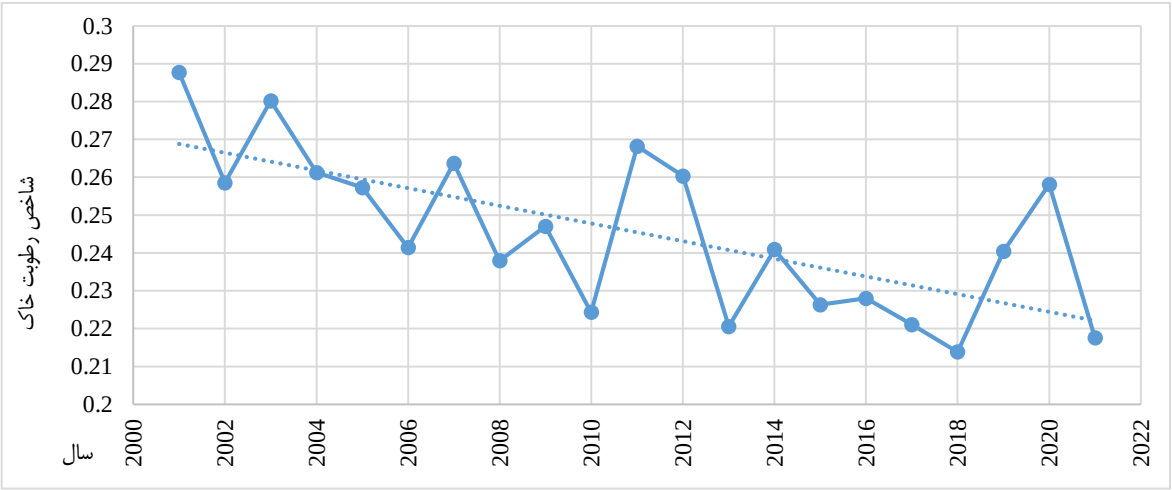


شکل ۴. نمودار تغییرات آب ذخیره در خاک

همزمان، دبی رواناب سطحی نیز کاهش چشمگیری داشته است (جدول ۶). روند یکنواخت دبی در دهه اول به‌الگویی ناهمگن و کاهشی در دهه دوم تبدیل شده و سال ۲۰۱۸ به‌عنوان اوج گسیختگی هیدرولوژیکی شناسایی شد. این کاهش مستقیماً بر رطوبت خاک و تاب‌آوری پوشش گیاهی تأثیر منفی گذاشته است (شکل ۵).

جدول ۶. شاخص دبی سطحی (میلی متر در روز)

سال	۲۰۰۰	۲۰۰۲	۲۰۰۴	۲۰۰۶	۲۰۰۸	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۳	۲۰۱۵	۲۰۱۷	۲۰۱۹	۲۰۲۱
Runoff	۰/۰۲۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۲	۰/۰۳۴	۰/۰۲۹	۰/۰۳۳	۰/۰۵۸	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	۰/۰۳۳	۰/۰۲۸



شکل ۵. نمودار شاخص رطوبت متوسط خاک

۴. فشارهای آنتروپوسنی، رشد جمعیت، تغییر کاربری و چرای بی‌رویه

رشد جمعیت منطقه (از ۱۰۱۸۳۴ نفر در سال ۱۹۶۶ به ۴۴۱۱۱۳ نفر در سال ۲۰۱۶) و افزایش سرانه مصرف آب (از ۹۹ لیتر در روز به ۲۰۳ لیتر) منجر به افزایش ده‌برابری در تقاضای کل آب شده است. این فشار، در بستری با منابع آب محدود و اقلیم نیمه‌خشک، بهره‌برداری غیرپایدار از آبخوان‌ها را تشدید کرده است.

تحلیل تغییرات کاربری اراضی (۲۰۰۱–۲۰۲۱) با استفاده از الگوریتم رندوم فورست[1] در پلتفرم GEE نشان می‌دهد که سطح پوشش گیاهی طبیعی در دهه اول کاهش یافته، اما در دهه دوم با گسترش کشاورزی، ظاهراً بهبود یافته است–هرچند این «بهبود»

[1] - Random Forest

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

در واقع جایگزینی چمن طبیعی با کشت‌های مصنوعی است. در عین حال، مساحت شهری از ۲۵/۳۴ کیلومترمربع به ۳۲/۸۲ کیلومترمربع (۲۹/۵+ درصد) افزایش یافته است که نشان‌دهنده گسترش شهرنشینی و تخریب مستقیم چمن است (جدول ۷)

جدول ۷. تغییرات کاربری اراضی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ (کیلومتر مربع)

ردیف	شاخص	سال					درصد تغییر
		۲۰۰۱	۲۰۰۶	۲۰۱۱	۲۰۱۶	۲۰۲۱	
۱	پوشش گیاهی	۱۳۸۰/۵۲	۱۳۲۴/۷۳	۱۲۷۲/۱۱	۱۳۶۷/۴۴	۱۴۰۰/۰۶	- ۰/۰۱
۲	زمین‌های بایر	۳۱۰/۲۷	۳۶۴/۲۹	۴۱۳/۱۲	۳۱۷/۸۲	۳۰۴/۷۸	- ۰/۰۱
۳	ساخت بنا	۲۵/۳۴	۲۷/۵۶	۳۰/۸۸	۳۱/۹۴	۳۲/۸۲	+ ۲۹/۵
۱۴	منابع آب سطحی	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۱	+ ۱۶/۷

همچنین، تعداد دام‌های سبک (گوسفند و بز) در منطقه در ۲۰ سال گذشته نزدیک به دو برابر شده است (از ۰/۶ به ۱/۲ رأس در هکتار). این افزایش، دوره استراحت مرتع را از ۶ ماه به ۳ ماه کاهش داده و منجر به فرسایش خاک، کاهش مواد آلی، تغییر ترکیب گونه‌های گیاهی (جایگزینی گونه‌های خوش‌خوراک با گونه‌های مهاجم) و کاهش نفوذپذیری خاک شده است.

۵. تلفیق شاخص‌ها و مدل‌سازی گسیختگی با نظریه کاتاستروف

این رویکرد با هدف تعیین اهمیت نسبی هر یک از شاخص‌های کلیدی در القای ناپایداری سیستم طراحی گردید. بر این اساس، از روش وزن‌دهی چندمعیاره مبتنی بر مقیاس شدت اثر[1] استفاده شد که پیشینه‌ای مستند در مطالعات محیطی دارد (چاترجی و بهتاچاریا[2]، ۲۰۱۳). بر اساس این روش، هر شاخص با توجه به شدت اثر آن ($S_i = (1\sim5)$ از ۱ تا ۵) وزن‌دهی شد و سپس وزن نسبی آن با رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$W_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i}$$ رابطه ۱.

این روش تضمین می‌کند که مجموع وزن‌های تمام شاخص‌ها برابر با یک باشد (رابطه ۲).

$$\sum_{i=1}^{n} W_i = 1$$ رابطه۲.

یافته‌ها نشان می‌دهند که افت سطح یستابی، کاهش پوشش گیاهی و رشد جمعیت/مصرف آب هرکدام با شدت اثر ۵ (حداکثر) و وزن ۱۶/۶۷ درصد، مهم‌ترین عوامل گسیختگی هستند. پس از آن‌ها، کاهش بارش، افزایش دما و افزایش PET با وزن ۱۳/۳۳ درصد و در نهایت تغییر کاربری اراضی (۶/۶۷ درصد) و پرورش دام (۳/۳۳ درصد) قرار دارند. این توزیع وزن‌ها تأکید می‌کند که گسیختگی چمن سلطانیه نتیجه‌ی تعامل پیچیده‌ی عوامل اقلیمی و آنتروپوسنی است، اما فشارهای انسانی–به‌ویژه برداشت بی‌رویه آب–نقش محوری‌تری ایفا می‌کنند (جدول ۸).

جدول ۸. تعیین وزن نسبی شاخص های بحرانی متغییر های کلیدی در مدل کاتاسروف

شاخص(X)	منطق تخصیص	شدت اثر S_i	وزن نسبی $\frac{x}{\sum s_i}$	وزن اثرگذاری (درصد)
افت سطح ایستابی	کاهش شدید تغذیه طبیعی چمن	۵	۰/۱۶۶	۱۶/۶۷
پوشش گیاهی	بیانگر کاهش سلامت پوشش گیاهی	۵	۰/۱۶۶	۱۶/۶۷
رشد جمعیت و افزایش مصرف آب	افزایش استخراج و برداشت غیرپایدار	۵	۰/۱۶۶	۱۶/۶۷
کاهش بارش	کاهش ورودی منابع آب سطحی و زیرزمینی	۴	۰/۱۳۳	۱۳/۳۳
افزایش دما	افزایش نرخ تبخیر و اتلاف آب	۴	۰/۱۳۳	۱۳/۳۳
افزایش تبخیر و تعرق	تسریع در خشکیدگی منطقه	۴	۰/۱۳۳	۱۳/۳۳

[1] - Impact Intensity Scale

[2] - Chatterjee & Bhattacharya

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

شاخص(x)	منطق تخصیص	شدت اثر S_i	وزن نسبی $\frac{x}{\sum s_i}$	وزن اثرگذاری (درصد)
تغییر کاربری اراضی	کاهش سطح طبیعی چمن و تغییر به اراضی کشت و ساخته‌شده	۲	۰/۰۶۶	۶/۶۷
پرورش دام اهلی	فشار انسانی بر منابع طبیعی	۱	۰/۰۳۳	۳/۳۳
مجموع		۳۰	~۱	۱۰۰

بحث

تخریب چمن سلطانیه، به‌عنوان یکی از ارزشمندترین زیست‌بوم‌های طبیعی ایران، در عصر آنتروپوسِن با دو چالش همزمان و متقابل مواجه است: (۱) تغییرات اقلیمی با روند گرم‌شدنی پایدار و (۲) فشارهای ناشی از تحولات اجتماعی–اقتصادی و الگوهای بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی. این دو عامل، نه تنها به‌تنهایی، بلکه در تعامل پویا با یکدیگر، گسیختگی‌های ساختاری در سیستم‌های هیدرولوژیکی، اکولوژیکی و ژئومورفولوژیکی منطقه را تشدید کرده‌اند. این گسیختگی‌ها در محدوده‌ای به وسعت ۳۵ کیلومترمربع در اطراف و درون چمن سلطانیه، شواهد ملموسی از ناپایداری محیطی ایجاد کرده‌اند.

همخوانی این نتایج با مطالعات پیشین، هم در سطح ملی (عباسی‌نژاد، ۱۳۸۵؛ جعفری و کریمی، ۱۴۰۰؛ صادق‌فام، ۱۳۹۵؛ داورپناه و خلفی، ۱۳۸۷) و هم در سطح بین‌المللی دو، وانگ و ایکسو (۲۰۱۸)، بوروغنی، پورهاشمی و غلامی (۲۰۲۱) و نوری، فرامرزی و صادقی (۲۰۱۹) اعتبار یافته‌ها را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که چمن سلطانیه نمونه‌ای بومی از الگوی جهانی «فروپاشی اکوسیستم‌های خشک» در پی ترکیب فشارهای آنتروپوسنی و اقلیمی است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که چمن سلطانیه–به‌عنوان یک اکوسیستم شکننده و هیدرولوژیکی وابسته به تعادل ظریف بین منابع آب سطحی، زیرزمینی و شرایط اقلیمی–در دو دهه اخیر وارد مرحله‌ای از ناپایداری ساختاری شده است. این ناپایداری نتیجه‌ی تعامل هم‌افزای فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی است که به‌صورت تجمعی و غیرخطی، سیستم را از حالت پایدار خارج کرده و به سوی وضعیت «میرا» سوق داده‌اند. تحلیل‌های چندمنبعه (از جمله سری‌های زمانی دما، بارش، سطح آب زیرزمینی، NDVI، LST، PET، تغییر کاربری اراضی و داده‌های جمعیتی) همگی به‌صورت هم‌راستا، شواهدی قاطع از گذار اکولوژیکی غیرقابل برگشت ارائه می‌دهند.

در این مسیر، رشد جمعیت (افزایش بیش از ۴ برابری در ۵۰ سال گذشته) و افزایش سرانه مصرف آب (از ۹۹ به ۲۰۳ لیتر در روز) منجر به برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها و افت شدید سطح ایستابی (بیش از ۳۰ متر در ۲۱ سال) شده است. این فشار آبی، در کنار کاهش ۱۵ درصدی بارش مؤثر و افزایش ۱ درجه‌ای دمای میانگین، سه‌ضلعی بحران را در منطقه تشکیل داده است. در پی این تحولات، پوشش گیاهی طبیعی از ۱۳۸۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ به ۱۲۷۲ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۱ کاهش یافت و همزمان مساحت اراضی بایر از ۳۱۰ به ۴۱۳ کیلومترمربع رسید. هرچند در سال‌های اخیر، گسترش کشاورزی و کاشت درختان شهری باعث بهبود ظاهری شاخص NDVI در سطح کل حوضه شده، اما تحلیل‌های محلی‌سازی‌شده در محدوده هسته‌ای چمن سلطانیه، کاهش پیوسته و عمیق پوشش گیاهی طبیعی را تأیید می‌کنند–به‌طوری‌که NDVI در سال ۲۰۲۱ به پایین‌ترین مقدار تاریخی خود (۰/۱۷۰۱) رسید.

با استفاده از روش وزن‌دهی چندمعیاره مبتنی بر شدت اثر، مشخص شد که افت سطح ایستابی، کاهش پوشش گیاهی و رشد جمعیت/مصرف آب به‌تنهایی ۵۰ درصد از کل تأثیرات مؤثر بر گسیختگی اکولوژیکی را تشکیل می‌دهند. این در حالی است که عوامل اقلیمی (کاهش بارش، افزایش دما و PET) ۴۰ درصد و سایر عوامل (مانند تغییر کاربری و چرای بی‌رویه) تنها ۱۰ درصد را به خود اختصاص داده‌اند. این یافته، برخلاف تصور رایج از تغییر اقلیم به‌عنوان عامل اصلی، فشارهای انسانی، به‌ویژه مدیریت نادرست منابع آب را به‌عنوان محرک اصلی بحران شناسایی می‌کند.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

از دیدگاه نظریه کاتاستروف، افت هم‌زمان شاخص‌های NDVI و سطح ایستابی به‌عنوان متغیرهای حالت (state variables) و پارامترهای کنترلی (control parameters)، شواهدی قوی از عبور سیستم از نقطه آستانه بحرانی فراهم می‌آورد. این گذار، دیگر تنها یک کاهش تدریجی در عملکرد اکولوژیکی نیست، بلکه تغییر حالت سیستم از یک زیست‌بوم جاذب رطوبت به یک کانون تولید گرد و غبار است. تحلیل‌های فضایی نیز همپوشانی قوی بین مناطق با افت شدید آب زیرزمینی و نواحی تخریب‌شده را تأیید می‌کنند و گسیختگی هیدرولوژیکی را به‌عنوان محرک اصلی ناپایداری زیست‌محیطی معرفی می‌نمایند.

در نهایت، این پژوهش هشدار می‌دهد که ادامه روند کنونی–بدون بازنگری بنیادین در سیاست‌های مصرف آب، برنامه‌ریزی شهری، مدیریت مراتع و کنترل برداشت‌های غیرمجاز–منجر به فروپاشی کامل این اکوسیستم ارزشمند خواهد شد. احیای چمن سلطانیه مستلزم مداخلات فوری، مبتنی بر داده و چندبخشی است که در آن، بازیابی آبخوان‌ها، کاهش فشار جمعیتی–اقتصادی، اجرای سیستم‌های آبیاری هوشمند و حفاظت از پوشش گیاهی طبیعی به‌عنوان اولویت‌های استراتژیک در نظر گرفته شوند. بدون چنین اقداماتی، چمن سلطانیه نه‌تنها از لحاظ اکولوژیکی، بلکه از منظر فرهنگی و تاریخی–به‌عنوان بخشی از میراث جهانی–در معرض از بین رفتن دائمی قرار خواهد گرفت.

ملاحظات اخلاقی

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

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در جمع‌آوری داده‌ها، تهیه گزارش پژوهش و تحلیل داده‌ها مشارکت داشتند.

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 داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

اسفندیاری درآباد، فریبا؛ رستمی، قباد؛ مصطفی‌زاده، رئوف و عابدینی، موسی (۱۴۰۳). ارزیابی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری کاتاستروف در حوضه آبریز زمکان کرمانشاه. *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی*، ۱۳(۲)، ۱۰۶-۱۲۵. https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.452001.1498

اسکندری دامنه، حامد؛ زهتابیان، غلامرضا؛ خسروی، حسن؛ آذرنیوند، حسین و براتی، علی اکبر (۱۴۰۰). شبیه‌سازی آینده تغییرات مکانی و زمانی کاربری و پوشش اراضی در مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت میناب). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۸ (۳)، ۵۲۰-۵۳۶. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125019

اسماعیلی، رضا و حسین‌زاده، محمدمهدی (۱۳۹۴). مقایسه روش‌های روزگن و استیل رود در طبقه‌بندی رودخانه‌های کوهستانی، مطالعه موردی البرز شمالی، حوضه آبریز لاویج. *پژوهشهای دانش زمین*، ۶ (۱)، ۶۴-۷۹.

جعفری، غلام حسن و کریمی، زینب (۱۴۰۰). بررسی ژئومورفولوژیکی چمن سلطانیه (استان زنجان). *مطالعات علوم محیط زیست*، ۶ (۲)، ۳۵۹۶-۳۶۰۴. https://www.jess.ir/article_129309.html?lang=fa

جعفری، غلام‌حسن و محمدی، هژیر (۱۳۹۷). دومینو در ژئومورفولوژی (مطالعه موردی: حوضه آبریز قزل‌اوزن). *پژوهش های فرسایش محیطی*. ۸ (۳)، ۱۶-۳۶. http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-422-fa.html

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

خیری‌زاده آروق، منصور و اسمعیل‌پور، مرضیه (۱۴۰۰). کاربرد توابع تئوری کاتاستروف در مکان‌یابی بهینهٔ توسعهٔ فضایی شهرها براساس متغیرها و مخاطرات طبیعی (مورد: کلان‌شهر تبریز). *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۹ (۶۲)، ۱-۳۰. https://doi.org/10.22111/gdij.2021.6001

داورپناه، غلامرضا و خلفی، جعفر (۱۳۸۷). بررسی روند تغییرات چمن سلطانیه با استفاده از RS-GIS، *همایش ژئوماتیک ۸۷ و چهارمین همایش یکسان سازی نام‌های جغرافیایی*، تهران. https://civilica.com/doc/37098

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۵). *گزارش مطالعات خاک و زمین‌شناسی منطقه سلطانیه*. تهران: وزارت صنعت، معدن و تجارت.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۵). گزارش مطالعات زمین‌شناسی منطقه سلطانیه. تهران: وزارت صنعت، معدن و تجارت.

سازمان هواشناسی کشور (۱۴۰۰). گزارش اقلیم‌شناسی استان زنجان. تهران: مرکز پیش‌بینی و پژوهش.

شایان، سیاوش و اکبریان محمد (۱۳۹۴). تأثیر وقایع اقلیمی حدی بر فرایندهای ژئومورفولوژیکی بادی از منظر نظریه کاتاستروفی (مطالعه موردی: جلگه غربی مکران). *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۰ (۴)، ۶۳-۵۴. http://georesearch.ir/article-1-86-fa.html

صادق‌فام، سینا (۱۳۹۵) *مدل‌سازی ترکیبی کمی–کیفی و تحلیل ریسک آبخوان دشت مراغه–بناب با استفاده از تئوری کاتاستروف*. رساله دکتری، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران.

عباسی نژاد، حسین و محمدی، شاپور (۱۳۸۱). نظریه کاتاستروف و کاربرد آن در اقتصاد. *پژوهش‌های اقتصادی ایران*، ۴ (۱۲)، ۱۱-۲۸. https://ijer.atu.ac.ir/article_3828_ce9ba0ecc0a9610fb5c05444d5b35b93.pdf

فرج زاده اصل، منوچهر؛ احمدی، محمد؛ علیجانی، بهلول؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ مفیدی، عباس و بابائیان، ایمان (۱۳۹۲). بررسی وردایی الگوهای پیوند از دور و اثر آن‌ها بر بارش ایران. *پژوهش های اقلیم شناسی*، ۱ (۱۵)، ۳۱-۴۵. https://clima.irimo.ir/?_action=xml&article=14936

مصری علمداری، پریچهر و خیری زاده آروق، منصور (۱۳۹۹). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای فضاهای شهری با کاربست تئوری کاتاستروف (مورد: شهر ورزقان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹ (۳)، ۹۹-۱۲۳. https://doi.org/10.22067/geoeh.2020.67013.0

میکائیلی حاجی‌کندی، خدیجه؛ سبحانی، بهروز و رامش، سعید (۱۴۰۰). آشکارسازی تغییرات دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های واقعی و ارتباط آن با پوشش اراضی بخش جنوبی دریاچه ارومیه. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۶ (۲)، ۲۰۳-۱۹۱. http://georesearch.ir/article-1-1032-fa.html

وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۹۸). *مطالعات منابع آب و خاک حوضه زنجان چای و ابهرچای*. تهران: مؤسسه تحقیقات آب و خاک.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

References

Abbasi Nejad, H. & Mohamadi, S. (2002). Catastrophe theory and its application in economics. *Iranian Journal of Economic Research*, 4(12), 11-28. (in Persian) https://ijer.atu.ac.ir/article_3828_ce9ba0ecc0a9610fb5c05444d5b35b93.pdf

Boroughani, M., Pourhashemi, S., Gholami, H. & Kaskaoutis, D. G. (2021). Predicting of dust storm source by combining remote sensing, statistic-based predictive models and game theory in the Sistan watershed, southwestern Asia. *Journal of Arid Land*, 13(11), 1103-1121. https://doi.org/10.1007/s40333-021-0023-3

Chatterjee, R. & Bhattacharya, B. (2013). Weighting of environmental indicators for vulnerability assessment. *Ecological Indicators*, 32, 24–32.

Du, H., Wang, T., Xue, X. & Li, S. (2018). Modelling of sand/dust emission in Northern China from 2001 to 2014. *Geoderma*, 330, 162-176. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.038

Esfandiary Darabad, F., Rostami, G., Mostafazadeh, R. & Abedini, M. (2024). Assessment of landslide risk using catastrophe theory in Zemkan watershed, Kermanshah. *Quantitative Geomorphological Research*, 13 (2), 106-125. (in Persian) https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.452001.1498

Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivand, H. & Barati, A. (2021). Simulation of future spatial and temporal changes in land uses and cover in arid areas (Case study: Minab plain). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(3), 520-536. (in Persian) https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125019

Esmaeili, R. & Hosseinzadeh, M. (2015). Comparison of Rozgen and Steelrod methods in classifying mountain rivers, case study of Northern Alborz, Lavij watershed. *Earth Science Research* , 6 (1), 64-79. (in Persian)

Farajzadeh, M. , Ahmadi, M. , Alijani, B. , Qavidel Rahimi, Y. , Mofidi, A. & Babaeian, I. (2013). Study on Variation of Major Teleconnection Patterns (MTP) associated with Iran's Precipitatio. *Journal of Climate Research*, 1392 (15), 31-45. (in Persian) https://clima.irimo.ir/?_action=xml&article=14936

Gustafsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U. & Emanuelsson, A. (2013). The methodology of the FAO study: Global Food Losses and Food Waste-extent, causes and prevention-FAO, 2011.

Jafari, G. & Karimi, Z. (2021). Geomorphological study of Soltanieh grass (Zanjan province). *Journal of Environmental Science St*udies, 6 (2), 3596-3604. (in Persian) https://www.jess.ir/article_129309.html?lang=fa

Jafari, H. & Mohamadi, H. (2018). Dominoes in Geomorphology (Case study: Ghezel Owzan basin). *E.E.R.*, 8 (3), 16-36. (in Persian) http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-422-fa.html

KheirizadehArouq, M. & Esmaeilpour , M. (2021). Application of Catastrophe Theory in Optimum SiteSelection for Spatial Development of Cities Based on Natural Hazards and Variables (Case Study: TabrizMetropolis). *Geography and Development*, 19 (62), 1-30. (in Persian) http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2021.6001

Mesri Alamdari, P. & Kheirizadeh Arough, M. (2020). Vulnerability Assessment of Cities to Earthquake based on the Catastrophe Theory: A Case Study of Varzeqan City, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9 (3), 99-123. (in Persian) https://doi.org/10.22067/geoeh.2020.67013.0

Mikaili HajiKandi, K., Sobhani, B. & Vramesh, S. (2021). Detection of Surface Temperature Changes Using Satellite Images and Real Data and its Relationship with the Covered Vegetation in the Southern Part of the Lake Urmia. *GeoRes*, 36 (2), 191-203. (in Persian) http://georesearch.ir/article-1-1032-fa.html

Nouri, H., Faramarzi, M., Sadeghi, S. H. & Nasseri, S. (2019). Effects of regional vegetation cover degradation and climate change on dusty weather types. *Environmental Earth Sciences*, 78(24), 723. https://doi.org/10.1007/S12665-019-8763-5

Scheffer, M. & Carpenter, S. R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in ecology & evolution*, 18(12), 648-656. http://www.trends.com

Shayan, S. & Akbarian, M. (2016). The Impact of Climatic Extreme Events on Aeolian Geomorphic Process from Catastrophic Theory aspect (Case study: Coastal Plain of Western Makran). *GeoRes*, 30 (4), 54-63. (in Persian) http://georesearch.ir/article-1-86-fa.html

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]

Thom, R. (1975). Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models. W. A. Benjamin.

Villeneuve, J. P., Mee, L. D., UNEP, N. K. & Intergovernmental Oceanic Commission. (1992). World-wide and regional intercomparison for the determination of organochlorine compounds and petroleum hydrocarbons in sediment sample IAEA-357. Report no. 51 (No. IAEA-AL--55). UNEP, Nairobi (Kenya).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.7.0]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.7]