



Assessment of Actual Evapotranspiration Variability in Response to Vegetation Types along a Precipitation Gradient

Elham Banihashemi,¹ Pejman Tahmasebi,^{2*} Elham Ghehsareh Ardestani,³ Khodayar Abdollahi⁴

1. Ph.D. Candidate, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: banihashemi.elham.m71@gmail.com

2. Associate Prof., Rangeland Ecology, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. *Corresponding author. Email: pejman.tahmasebi@sku.ac.ir

3. Associate Prof., Ph.D. in Nature Engineering, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: elham.ghehsareh@nres.sku.ac.ir

4. Associate Prof., Ph.D. in Water Engineering, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: kabdolla@sku.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 03 October 2025
Revised 05 November 2025
Accepted 11 December 2025
Available online 22 December 2025

Keywords:

Evapotranspiration,
Vegetation growth forms,
Precipitation gradient,
WAPOR,
Steppe,
Semi-steppe

ABSTRACT

objective: Evapotranspiration (ET) is a key component of the hydrological cycle, governed by both climatic and biotic factors. This study aimed to investigate the response of ET to different vegetation growth forms along a precipitation gradient across steppe and semi-steppe rangelands in Chaharmahal and Bakhtiari and Isfahan provinces, Iran.

Method: Data were extracted from five rangeland sites with varying precipitation regimes and analyzed using a Generalized Linear Model (GLM).

Results: Results indicated that the precipitation gradient had a dominant and statistically significant effect on ET ($p < 0.001$), whereas the independent effect of vegetation growth forms was mostly nonsignificant. However, the interaction between growth forms and precipitation was significant in certain plant groups, particularly perennial grasses and shrubs ($p < 0.05$). Pearson correlation analysis also revealed a strong and positive relationship between vegetation cover and ET—especially for perennial grasses ($r = 0.788$, $p < 0.001$) and total vegetation cover ($r = 0.957$, $p < 0.001$).

Conclusion: These findings suggest that wetter regions supported denser vegetation and maintained higher ET without vegetation decline, indicating strong water recycling and vegetation persistence. In contrast, drier regions exhibited reduced vegetation cover and ET due to water limitations. Overall, the rainfall gradient plays a critical role in shaping vegetation structure and ET regime in dryland ecosystems.

Cite this article: Banihashemi, E., Tahmasebi, P., Ardestani, E., Abdollahi, K. (2026). Assessment of Actual Evapotranspiration Variability in Response to Vegetation Types along a Precipitation Gradient. *Journal of ECOHYDROLOGY*, 12(4), 945-963. <http://doi.org/10.22059/ije.2026.397981.1877>



© Elham Banihashemi, Pejman Tahmasebi, Elham Ghehsareh Ardestani, Khodayar Abdollahi.
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2026.397981.1877>

Abstract

Introduction

Actual Evapotranspiration (ETa) is a crucial component of the hydrological cycle, influenced by both climatic and biotic factors. ET is influenced by several factors, including climatic conditions (such as temperature, humidity, and solar radiation), soil characteristics (such as texture and moisture), and vegetation type and structure. The findings highlight the key role of vegetation forms in regulating ETa and the response of rangeland ecosystems to rainfall changes, and indicate that species composition and rainfall intensity are the main drivers of hydrological patterns and water productivity. Given the importance of ETa as a major water loss pathway and an indicator of ecosystem function, the results of this study provide a practical and generalizable basis for improving the resilience of rangelands to drought, optimizing plant species selection, and developing sustainable water resource management strategies. While numerous studies have examined these factors separately, understanding how vegetation growth forms and precipitation gradients interact to affect ETa patterns in arid and semi-arid rangelands has received less attention.

Objectives

This study provides a quantitative and scientific framework for analyzing ET variability at the regional level by examining the variability of actual evapotranspiration (ETa) under the influence of vegetation forms in steppe and semi-steppe rangelands of Chaharmahal-Bakhtiari and Isfahan provinces and along the annual precipitation gradient

Materials and Methods

The research was conducted across five rangeland sites with varying precipitation levels (130 to 800 mm) in Chaharmahal Va Bakhtiari and Isfahan provinces. To integrate field data with remote sensing information, seven representative sites of 250×250 m—matching the pixel resolution of WaPOR products—were selected in each region. Vegetation sampling was conducted during the peak growing season in 2020, using a combination of transects, macroplots, and microplots to measure canopy cover, including perennial grasses, shrubs, perennial forbs, and annual plants, during the peak growing season. Data analysis was performed using General Linear Model (GLM) and Pearson correlation tests in SPSS software.

Findings

The GLM results showed that the precipitation gradient had a dominant and significant effect on ETa ($p < 0.001$, $F = 78.371$, Adjusted $R^2 = 0.953$), while the individual effects of vegetation growth forms were not significant. However, significant interactions were found between precipitation gradient and growth forms, particularly for perennial grasses ($p = 0.015$, $F = 3.813$) and shrubs ($p = 0.009$, $F = 4.372$). Pearson correlation analysis confirmed strong positive relationships between vegetation cover and ETa, with the highest correlations for total vegetation cover ($r = 0.957$, $p < 0.001$) and perennial grasses ($r = 0.788$, $p < 0.001$).

Conclusion

The results of this study showed that an accurate explanation of the evapotranspiration (ET) pattern in rangeland ecosystems is only possible by simultaneously considering climatic conditions and vegetation composition. Although vegetation forms alone do not play a decisive role at the regional level, their interactions with rainfall and climatic conditions become key elements in regulating the water balance of the ecosystem. These interactions are

especially important for perennial grasses and shrubs in areas with higher rainfall. The findings revealed that in high-rainfall regions, increased ETa alongside denser vegetation reflects the formation of a sustainable hydrological cycle. In contrast, in low-rainfall areas, water constraints act as the key determinant factor, simultaneously limiting both vegetation cover and ETa. This research demonstrates that the precipitation gradient plays a determining role in shaping both vegetation structure and ET patterns, and that understanding the interactions between these factors provides a valuable basis for sustainable management of water resources and vegetation cover in dryland ecosystems.

Authors Contributions

Pejman Tahmasebi: Guidance in selecting the topic, selecting the study area, collecting the required information, editing and reviewing the article, controlling the results

Elham Ghehsareh: Guidance in reviewing and editing the article

Khodayar Abdollahi: Guidance in reviewing and editing the article

Elham Banihashemi: conducting and writing the research, analyzing the data, writing and making corrections and applying comments to the abstracted article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon reasonable request to the corresponding author.

Acknowledgments

To my esteemed professors who guided me in writing and completing this article.

Ethical considerations

All text used in this research has been written in accordance with scientific and ethical principles.

Funding

The author declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



تحلیل تغییرپذیری تبخیر - تعرق واقعی تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی در طول شیب تغییرات بارندگی

الهام بنی‌هاشمی،^۱ پژمان طهماسبی،^۲ الهام قهساره اردستانی،^۳ خدایار عبدالهی^۴

۱. دانشجوی دکتری، دکتری مهندسی علوم مرتع، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، نویسنده اول، رایانامه: banihashemi.elham.m71@gmail.com
۲. دانشیار، اکولوژی مرتع، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، نویسنده دوم، رایانامه: pejman.tahmasebi@sku.ac.ir
۳. دانشیار، دکتری مهندسی طبیعت، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، نویسنده سوم، رایانامه: elham.ghehsareh@nres.sku.ac.ir
۴. دانشیار، دکتری مهندسی آب، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، نویسنده چهارم، رایانامه: kabdolla@sku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقدمه: تبخیر - تعرق واقعی (ETA) به عنوان مؤلفه‌ای کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی، متأثر از عوامل اقلیمی و زیستی است. اگرچه مطالعات متعددی به بررسی جداگانه این عوامل پرداخته‌اند، درک اثرات متقابل شکل‌های رویشی و گرادیان بارندگی بر الگوی ETA در مراتع خشک و نیمه‌خشک کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

اهداف: این مطالعه با هدف تحلیل تأثیر شکل‌های مختلف پوشش گیاهی بر ETA در طول یک شیب تغییرات بارندگی در مناطق استپی و نیمه‌استپی انجام شد.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر در پنج منطقه مرتعی با شرایط بارندگی متفاوت (۱۳۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر) در استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان انجام شد. داده‌های پوشش گیاهی شامل شکل‌های رویشی گندمیان چندساله، بوته‌ای‌ها، علفی‌های چندساله و گیاهان یک‌ساله در دوره اوج رشد رویشی اندازه‌گیری شد. داده‌های ETA از سامانه WaPOR با وضوح مکانی ۲۵۰×۲۵۰ متر استخراج شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل خطی عمومی (General Linear Model, GLM) و آزمون همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS انجام شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

یافته‌ها: نتایج GLM نشان داد شیب تغییرات بارندگی تأثیر غالب و معناداری بر میزان ETA دارد (سطح معناداری $p < 0.001$). $F = 78.371$ و ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adjusted R²) برابر با ۰/۹۵۳، در حالی که اثر مستقل شکل‌های رویشی در تمامی موارد معنادار نبود. با این حال، اثر متقابل معناداری برای گندمیان چندساله ($F = 3.813$ ، $p = 0.015$) و بوته‌ای‌ها ($F = 4.372$ ، $p = 0.009$) مشاهده شد. همبستگی پیرسون نیز رابطه مثبت و معناداری را بین پوشش گیاهی و ETA تأیید کرد (بالاترین میزان همبستگی پوشش کل گیاهی $r = 0.957$ ، $p < 0.001$ و گندمیان چندساله $r = 0.788$ ، $p < 0.001$).

کلیدواژه‌ها:
تبخیر - تعرق،
اشکال رویشی،
شیب تغییرات بارندگی،
WAPOR
استپی و نیمه‌استپی.

نتیجه گیری نهایی: یافته‌ها نشان داد در مناطق با بارندگی زیاد، افزایش ETA همراه با پوشش گیاهی متراکم‌تر، نشان‌دهنده شکل‌گیری یک چرخه هیدرولوژیک پایدار است. در مقابل، در مناطق کم‌بارش، محدودیت آب به عنوان عامل کنترل‌کننده اصلی، هم پوشش گیاهی و هم ETA را به طور هم‌زمان محدود می‌کند. این پژوهش نشان می‌دهد شیب تغییرات بارندگی نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار پوشش گیاهی و الگوهای ETA دارد و درک اثر متقابل بین این عوامل می‌تواند مبنای مناسبی برای مدیریت پایدار منابع آب و پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد.

استناد: بنی‌هاشمی، الهام؛ طهماسبی، پیمان؛ قهساره اردستانی، الهام؛ عبدالهی، خدایار. تحلیل تغییرپذیری تبخیر - تعرق واقعی تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی در طول شیب

تغییرات بارندگی. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲(۴)، ۹۴۵-۹۶۳.

<http://doi.org/10.22059/ije.2026.397981.1877>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © الهام بنی‌هاشمی، پیمان طهماسبی، الهام قهساره اردستانی، خدایار عبدالهی.



مقدمه

فرایند تبخیر - تعرق^۱، شامل تبخیر آب از سطح خاک و تعرق از طریق پوشش گیاهی، به عنوان یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی در اکوسیستم‌های طبیعی شناخته می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳؛ کانگ و همکاران، ۲۰۲۳). این فرایند نقش مهمی در تعادل آب، انتقال انرژی و تبادل گازهای گلخانه‌ای میان سطح زمین و اتمسفر ایفا می‌کند (جونگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ چن و همکاران، ۲۰۱۴؛ ما و ژانگ، ۲۰۲۲؛ وو و همکاران، ۲۰۲۰). میزان ET تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله شرایط اقلیمی (نظیر دما، رطوبت و تابش خورشید)، ویژگی‌های فیزیکی خاک (مانند بافت و رطوبت)، و نیز نوع و ساختار پوشش گیاهی قرار دارد. ویژگی‌هایی همچون ارتفاع، تراکم شاخ و برگ، ساختار ریشه‌زایی و تاج‌پوشش گیاهی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم ET دارند (جونز، ۱۹۹۲؛ پیل، مک ماهون و فیلیسون، ۲۰۱۰؛ برتا، پو و استووین، ۲۰۱۴؛ ما، سیلایگی و یوزسا، ۲۰۲۴). افزون بر این، ET حدود ۶۰ درصد بارش جهانی را به جو بازمی‌گرداند و در مناطق خشک این سهم به بیش از ۹۰ درصد نیز می‌رسد که اهمیت آن را در تراز آبی و انرژی کره زمین نشان می‌دهد (جاسچکو و همکاران، ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، به دلیل ارتباط مستقیم تعرق با تبادل CO₂، فرایند ET با چرخه کربن و تغییرات اقلیمی پیوند نزدیکی دارد (فیشر و همکاران، ۲۰۱۷؛ تولینگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ لیو، وو و یانگ، ۲۰۲۲).

پژوهش‌ها نشان داده‌اند نوع، ساختار و سن پوشش گیاهی نقش مؤثری در فرایند ET دارند. تفاوت در ویژگی‌های ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی میان گونه‌های مختلف، مانند درختان پهن‌برگ و سوزنی‌برگ یا گونه‌های خزان‌دار و همیشه‌سبز، به اختلاف در میزان تعرق آن‌ها منجر می‌شود (گارنیر و همکاران، ۱۹۹۶؛ پاتاکا و همکاران، ۱۹۹۸؛ کلیهر و همکاران، ۲۰۰۱؛ براندائو و همکاران، ۲۰۱۷؛ گانگ و همکاران، ۲۰۲۱). این نتایج تأکید دارند که تنوع در شکل‌های رویشی و مراحل رشدی گیاهان می‌تواند الگوهای ET را در مقیاس‌های مختلف پوشش گیاهی تحت تأثیر قرار دهد. انواع پوشش گیاهی مانند جنگل‌ها، بوته‌زارها، علفزارها و زمین‌های زراعی، هریک نرخ‌های منحصر به فردی از ET را نشان می‌دهند که ناشی از تفاوت در شاخص سطح برگ (LAI)، توانایی جذب آب، زمان‌بندی رشد و ظرفیت ذخیره‌سازی رطوبت خاک است (سوزوکی، یاتاکا و یاسوناری، ۱۹۹۸؛ لاند هولم و ویلیامز، ۲۰۱۵؛ کوئی و همکاران، ۲۰۲۲). شکل‌های رویشی مختلف مانند گیاهان یک‌ساله، چندساله، گندمیان، بوته‌ای‌ها و درختچه‌ها، با توجه به ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی خود (عمق ریشه، ساختار برگ، تراکم پوشش و زمان فعالیت فیزیولوژیکی)، الگوهای متفاوتی از ET نشان می‌دهند (شولزه، ۱۹۸۲؛ ویول و همکاران، ۲۰۰۷؛ رایش‌اشتاين و همکاران، ۲۰۱۴؛ راناکایر، ۱۹۳۴؛ لکبرگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ لی و ژانگ، ۲۰۲۱؛ شائو و همکاران، ۲۰۲۴). این تفاوت‌های ساختاری و عملکردی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش مهمی در تنظیم ET اکوسیستم‌های مرتعی و پویایی منابع آب دارند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ استفنسون، ۱۹۹۸؛ پاتاکا، اورن و اسمیت، ۲۰۰۰؛ فیشر و همکاران، ۲۰۱۷؛ هان و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو، یانگ و کوئی، ۲۰۰۸؛ بای و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

مطالعات متعددی به بررسی پاسخ شکل‌های رویشی مختلف به تغییرات بارندگی پرداخته‌اند. به عنوان نمونه، تحقیقات شبیه‌سازی‌شده در بیابان‌های نیومکزیکو نشان داده‌اند تفاوت در فنولوژی، ساختار ریشه و زمان رشد شکل‌های رویشی مانند گندمیان C4 و بوته‌ای‌های همیشه‌سبز، تأثیر قابل توجهی بر الگوهای ET دارد؛ گندمیان، به دلیل هم‌زمانی رشد با بارش‌های تابستانه، تعرق بیشتری نسبت به بوته‌ای‌ها دارند، در حالی که گیاهان یک‌ساله اثر کمتری بر ET نشان می‌دهند (رینولدز، کمپ و تهنون، ۲۰۰۰). مطالعات جهانی نیز تفاوت‌های قابل توجهی در ET انواع پوشش‌های جنگلی، علفزاری و زراعی گزارش کرده‌اند که عمدتاً به ساختار تاج گیاهی، شاخص سطح برگ و نیاز آبی گونه‌ها مرتبط است (پیل، مک ماهون و فیلیسون، ۲۰۱۰). همچنین، نتایج مطالعات شن و همکاران (۲۰۲۲) و لو (۲۰۲۵) نشان داد تراکم و ترکیب انواع پوشش گیاهی به همراه دسترسی به منابع آب، عامل اصلی تعیین‌کننده الگوهای ET در مناطق نیمه‌خشک و خشک است. تغییرات مکانی به‌ویژه در امتداد شیب بارندگی، باعث ایجاد تفاوت‌های قابل توجهی در شرایط اقلیمی مانند میزان بارش، دما، رطوبت نسبی و تابش خورشید می‌شود که به طور مستقیم بر میزان ET تأثیرگذارند. مطالعات مختلف از جمله پژوهش‌های سیوپالان، کومار و هریس (۲۰۰۱) و آلبرتسون،

1 Evapotranspiration, ET

کاتول و وایبرگ (۲۰۰۱) به پیچیدگی اثر متقابل بین شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی در شکل‌گیری الگوهای ET اشاره داشته‌اند. مطالعه‌ای در فلات Loess چین، نشان داد تغییرات مکانی و زمانی ET تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی و مؤلفه‌های اقلیمی از جمله سرعت باد، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، فشار هوا، رطوبت، تابش و بارندگی است، در حالی که دما تأثیر کمتری بر ET دارد (ما و همکاران، ۲۰۱۹).

داده‌های سنجش از دور نیز نشان می‌دهند تغییرات زمانی ET عمدتاً تابع مراحل رشد گیاه و رژیم آبیاری است، در حالی که تغییرات مکانی بیشتر به نوع پوشش گیاهی وابسته است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰). سایر متغیرها مانند تابش خورشیدی، سرعت باد، تغییرات بارندگی و ساختار تاج گیاهی نیز نقش مهمی در تعیین الگوهای مکانی ET دارند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ مو و همکاران، ۲۰۰۴؛ هتفیلد، پروگر و کوستاس، ۲۰۰۷). مطالعات مدل‌سازی نشان داده‌اند بارش، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مهم‌ترین عامل تغییرات ET است، در حالی که پوشش گیاهی نقش مهمی در تنظیم الگوهای مکانی - زمانی ET دارد (لی و همکاران، ۲۰۲۱؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۵). در مقیاس جهانی، یانگ و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که روند افزایشی ET از دهه ۱۹۸۰ تا کنون عمدتاً ناشی از تغییرات در تراکم و ترکیب پوشش گیاهی بوده است، در حالی که فنگ و همکاران (۲۰۲۰)، لیو و همکاران (۲۰۲۱) و وانگ و همکاران (۲۰۲۲) به این نتیجه رسیدند که بارش و تغییرات اقلیمی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرپذیری ET دارند. با این حال، بررسی اثر شکل‌های رویشی به عنوان واحدهای عملکردی متمایز بر تغییرپذیری ET در امتداد شیب‌های بارندگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ این امر نشان می‌دهد ترکیب اثر پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی تعیین‌کننده اصلی تغییرات ET است و تحلیل شکل‌های رویشی می‌تواند تصویر جامع‌تری از روابط هیدرولوژیکی در مراتع خشک و نیمه‌خشک ارائه دهد. اهمیت این موضوع زمانی مشخص‌تر می‌شود که تغییرات وسیع پوشش گیاهی، از جایگزینی علفزارها با بوته‌زارهای چوبی تا تغییر در ترکیب گونه‌های گندمیان و علفی، با دگرگونی‌های عمده در چرخه‌های آب، انرژی و کربن همراه است (بورکهارت و تیزدیل، ۱۹۷۶؛ ون آوکن، ۲۰۰۰؛ ویلکاکس، ۲۰۰۲؛ شلزی‌نگر و همکاران، ۱۹۹۰؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲). هر یک از شکل‌های رویشی، پاسخی متفاوت به شرایط اقلیمی و منابع آب دارد؛ برای مثال، گندمیان چندساله در مناطق مرطوب با تعرق بالا به بازچرخش مؤثر آب کمک می‌کنند، در حالی که بوته‌ها با ریشه‌های عمیق‌تر در شرایط خشک دوام می‌آورند و الگوهای متفاوتی از ET را شکل می‌دهند (شلزی‌نگر و همکاران، ۱۹۹۰؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲). تحلیل اشکال رویشی، رویکردی کارآمد برای نشان دادن تفاوت‌های ساختاری و عملکردی پوشش گیاهی است که طیف متنوعی از پاسخ‌ها به شرایط اقلیمی و منابع آب را بازتاب می‌دهد.

این مطالعه با بررسی تغییرپذیری تبخیر - تعرق واقعی (ET) تحت تأثیر شکل‌های رویشی در مراتع استپی و نیمه‌استپی استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان و در امتداد شیب بارش سالانه، چارچوبی کمی و علمی برای تحلیل تغییرپذیری ET در سطح منطقه‌ای ارائه می‌دهد. یافته‌ها به اهمیت نقش کلیدی فرم‌های رویشی در تنظیم ET و پاسخ اکوسیستم‌های مرتعی به تغییرات بارندگی می‌پردازد و نشان می‌دهد ترکیب گونه‌ای و شدت بارش، محرک‌های اصلی الگوهای هیدرولوژیکی و بهره‌وری آب هستند. با توجه به اهمیت ET به عنوان مسیر اصلی از دست رفتن آب و شاخص عملکرد اکوسیستم، نتایج این مطالعه مبنایی عملی و قابل تعمیم برای ارتقای تاب‌آوری مراتع در برابر خشکسالی، بهینه‌سازی انتخاب گونه‌های گیاهی و توسعه راهبردهای مدیریت پایدار منابع آب فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

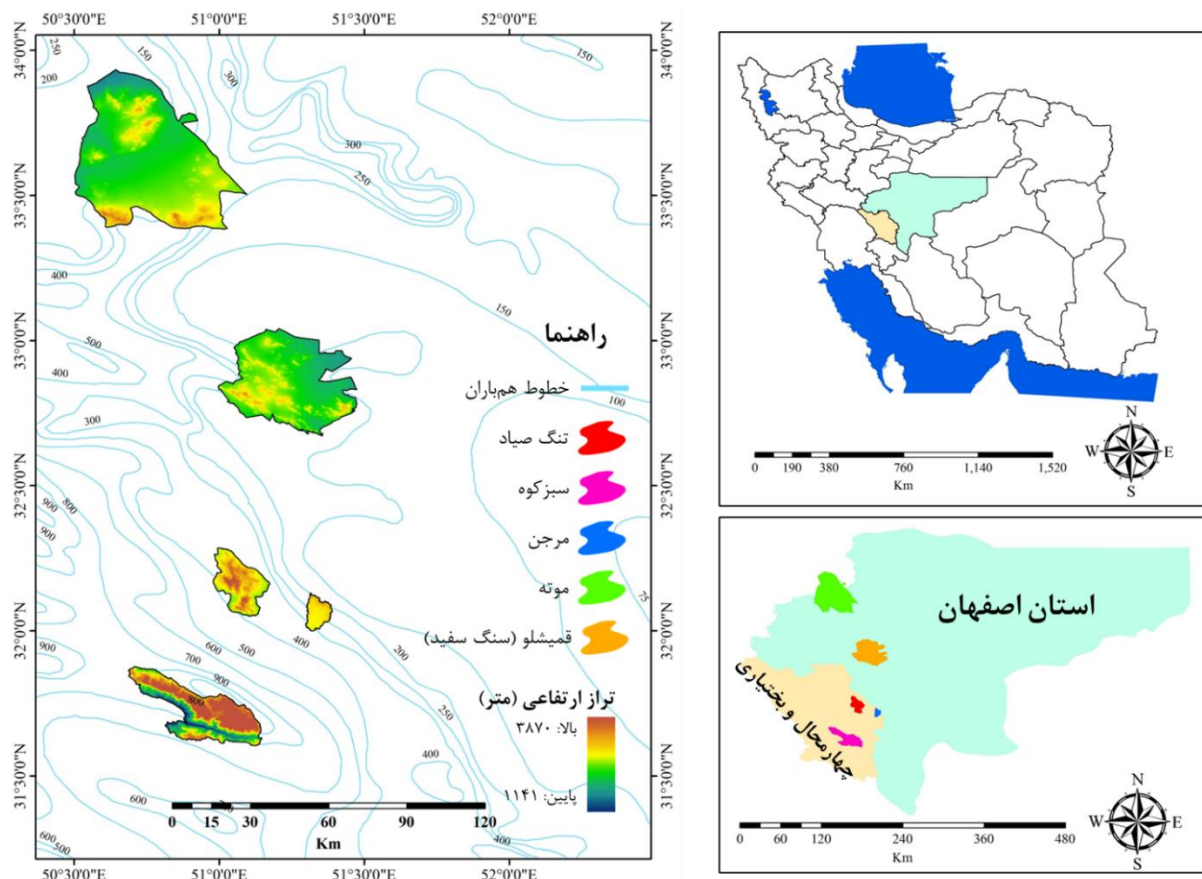
مناطق مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه شامل پنج اکوسیستم مرتعی واقع در استان‌های چهارمحال و بختیاری (سه منطقه) و اصفهان (دو منطقه) هستند که در امتداد شیب تغییرات بارندگی قرار دارند. تقسیم‌بندی اقلیمی این مناطق بر اساس نقشه به‌روز شده اقلیم جهان به روش Köppen-Geiger انجام شده است (پیل، فینلیسون و مک ماهون، ۲۰۰۷). بارش سالانه در این مناطق از ۱۳۰ میلی‌متر در مراتع استپ بیابانی (سنگ سفید) تا ۸۰۰ میلی‌متر در مراتع مدیترانه‌ای (سبزکوه) متغیر بوده و ارتفاع آن‌ها بین ۱۶۰۰ تا ۳۸۷۰

متر از سطح دریا قرار دارد. (شکل ۱). این مناطق عبارت‌اند از: ۱- سبزه‌کوه؛ ۲- تنگ صیاد؛ ۳- مرجن (نزدیک شهرستان بروجن)؛ ۴- سنگ سفید (نزدیک روستای قمیشلو)؛ ۵- منطقه حفاظت‌شده موه (شکل ۱). انتخاب این سایت‌ها بر اساس قرارگیری در طول شیب بارش و تنوع قابلیت‌های تولید گیاهی صورت گرفته است. برخی مشخصات جغرافیایی و اقلیمی مناطق مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مناطق مورد بررسی در این تحقیق

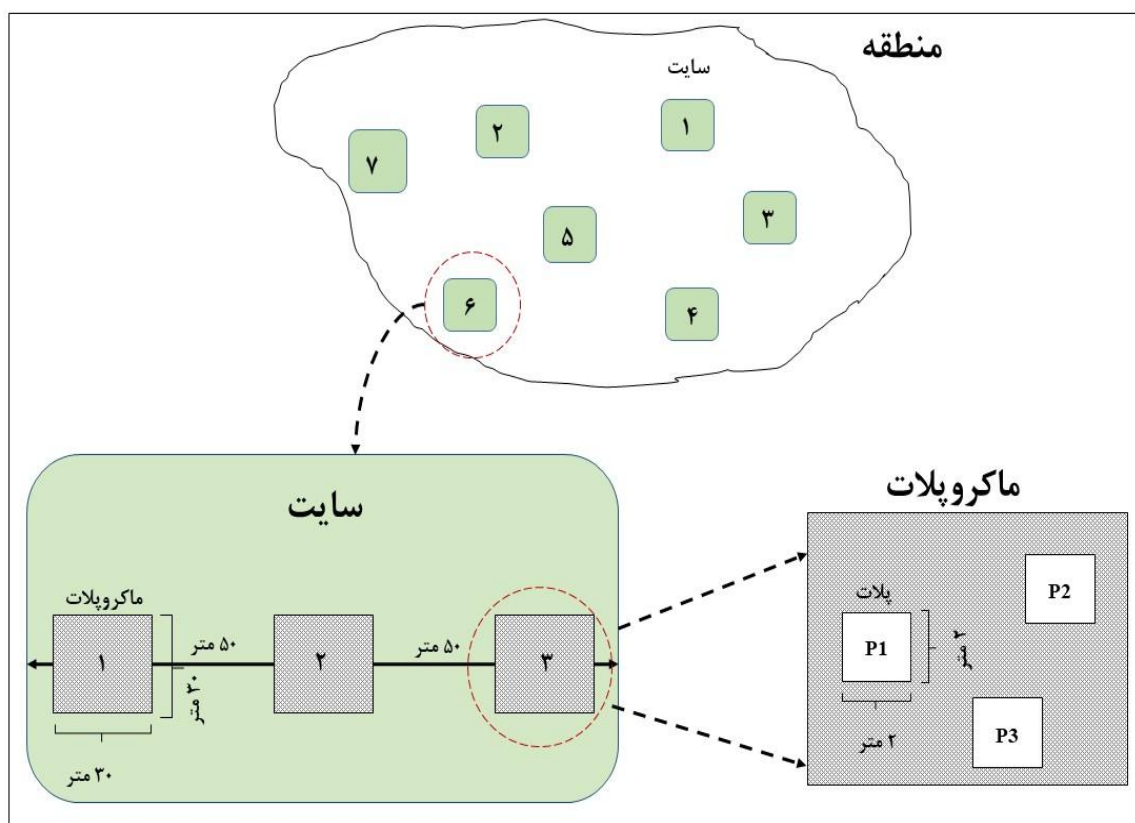
نام منطقه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	کلاس اقلیمی	حداقل ارتفاع (متر)	حداکثر ارتفاع (متر)	میانگین ارتفاع نقاط نمونه‌برداری (متر)	متوسط بارندگی (میلی‌متر)	میانگین دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد)	تیپ گیاهی
سنگ سفید	تا ۱۰°۵۰	تا ۲۰°۳۳	استپ بیابانی	۱۶۸۷	۲۷۶۷	۱۸۴۳	۱۳۰	۱۱/۵	Anabasis aphylla L. Artemisia sieberi Bess Scariolla Hertia angustifolia (DC.) O Kuntze
موته	تا ۳۰°۵۰	تا ۵۷°۳۳	استپ	۱۸۰۰	۳۰۰۰	۱۸۶۷	۳۰۰-۲۰۰	۱۳/۴	Artemisia sieberi Bess
مرجن	تا ۱۷°۵۱	تا ۰°۳۲	استپ	۲۲۴۸	۲۳۷۳	۲۲۸۷	۲۵۰	۱۰/۸	Stipa hohenaekeriana Astragalus verus Bromus tomentellus Acanthophyllum spinosum
تنگ صیاد	تا ۵۹°۵۰	تا ۱۷°۳۲	نیمه‌استپ	۲۱۰۰	۳۱۴۱	۲۲۱۰	۳۵۰	۱۱/۵	Astragalus verus
سبزه‌کوه	تا ۴۰°۵۰	تا ۲۷°۳۱	مدیترانه‌ای	۳۱۲۰	۳۸۷۰	۲۴۲۴	۸۰۰ تا ۴۰۰	۱۴/۲	Daphne mucronata Royle Astragalus adsensens Boiss



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و تراز ارتفاعی مناطق مورد مطالعه در کشور

نمونه‌برداری از پوشش گیاهی

در هر منطقه، به منظور تطبیق با وضوح مکانی داده‌های ET واقعی استخراج شده از محصول WaPOR (پیکسل‌های 250×250 متر)، تعداد ۷ سایت معرف با همین ابعاد (250×250 متر) انتخاب شد. این پیکسل‌ها از نظر یکنواختی پوشش گیاهی، ناهمواری و دسترسی به صورت میدانی بررسی و انتخاب شدند. در هر سایت یک ترانسکت تعریف شد و در امتداد هر ترانسکت، سه ماکروپلات به ابعاد 30×30 متر با فاصله تقریبی ۵۰ متر از یکدیگر جانمایی شدند تا تنوع خردمقیاس پوشش درون هر پیکسل ثبت شود (شکل ۲). در هر ماکروپلات، سه پلات 2×2 متر به صورت تصادفی انتخاب شدند (فیض‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۱). در هر یک از این پلات‌ها، درصد پوشش گیاهی مربوط به شکل‌های رویشی مختلف شامل گندمیان (یک‌ساله و چندساله)، گیاهان علفی (یک‌ساله و چندساله) و گونه‌های بوته‌ای، با استفاده از روش چشمی با برآورد سطح پوشش زمینی اندازه‌گیری شد. میانگین مقادیر پلات‌ها، ابتدا در سطح ماکروپلات و سپس در سطح هر سایت 250×250 متری محاسبه شد تا با مقیاس داده‌های WaPOR هماهنگ شود. بنابراین در هر یک از پنج منطقه مطالعاتی، هفت سایت معرف ($n = 7$) با در نظر گرفتن تنوع شرایط اکولوژیک انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌برداری از پوشش گیاهی در هر منطقه، هم‌زمان با دوره اوج رشد غالب‌ترین گونه‌های گیاهی (از اواسط اردیبهشت تا اواخر خردادماه ۱۴۰۰) انجام شد تا حداکثر پوشش گیاهی قابل ثبت باشد.



شکل ۲. نمایی کلی از طرح نمونه برداری در مناطق مورد مطالعه (با میانگین گیری از مشخصات ماکروپلات‌ها درصد پوشش گیاهی کل و به تفکیک هر شکل رویشی در سطح سایت استخراج شد).

بر آورد تبخیر - تعرق (ET_a)^۲

به منظور برآورد مقادیر ET_a ^۱ در مناطق مورد مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای سامانه^۲ $WaPOR^2$ (Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data) استفاده شد. این سامانه که توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۳ توسعه یافته، با هدف پایش بهره‌وری آب در کشاورزی و ارائه داده‌های مکانی نزدیک به واقعیت طراحی شده است (فائو، ۲۰۲۰). داده‌های مورد نیاز این پژوهش از مجموعه داده^۴ $FAO/WAPOR/2/L3_ETa$ موجود در پلتفرم گوگل ارث انجین^۴ استخراج شد. سامانه^۴ $WaPOR$ با تکیه بر الگوریتم $ETLook$ که بر پایه مدل پنمن - مانیتث^۵ توسعه یافته، امکان تخمین دقیق ET را با استفاده از ترکیب داده‌های سنجش از دور و پارامترهای هواشناسی فراهم می‌سازد. الگوریتم $ETLook$ ، از طریق یک مدل دومنبعی، مقادیر تعرق گیاهی و تبخیر از سطح خاک را به صورت مجزا و بر مبنای ویژگی‌های سطح زمین از جمله $NDVI$ ، آلودگی، رطوبت خاک، تابش، ارتفاع زمین و متغیرهای اقلیمی محاسبه می‌کند (باستینسن و همکاران، ۲۰۱۲). این داده‌ها با وضوح مکانی 250×250 متر و بازه‌های زمانی ده‌روزه ($mm/10days$)، استخراج شدند. برای هماهنگی با زمان برداشت پوشش گیاهی، داده‌های $WaPOR$ منطبق با دوره اوج رشد گونه‌های غالب گیاهی در هر منطقه (از اواسط اردیبهشت تا اواخر خرداد ۱۴۰۰) انتخاب شد تا بازتابی از بیشینه تعرق گیاهی ثبت شود و مقادیر استخراج شده، نماینده واقعی‌ترین شرایط زیستی گیاهان باشند.

1. Actual Evapotranspiration
2. <https://data.apps.fao.org/catalog/dataset/wapor-v-3>
3. FAO
4. Google Earth Engine
5. Penman-Monteith

استفاده از سامانه WapOR در این مطالعه، با هدف تحلیل الگوهای مکانی ET در پاسخ به تفاوت‌های پوشش گیاهی و تغییرات بارندگی صورت گرفت. این سامانه با بهره‌گیری از داده‌های معتبر و ساختار علمی منسجم، امکان مقایسه دقیق بین مناطق مختلف و تبیین اثرپذیری فرایندهای ETa از پوشش گیاهی را فراهم می‌سازد. همچنین، هم‌پوشانی زمانی و مکانی داده‌های WapOR با مقیاس و زمان‌بندی نمونه‌برداری میدانی، دقت تحلیلی را در ارزیابی ارتباط بین نوع پوشش گیاهی و تغییرات ETa افزایش داده است. توانایی تفکیک مؤلفه‌های ET، دسترسی رایگان، پوشش مکانی وسیع، و ثبات روش‌شناختی در مقایسه با روش‌های مدل‌سازی یا ایستگاهی، از جمله مزایای کلیدی WapOR برای تحلیل‌های اکولوژیکی در مقیاس‌های بزرگ به شمار می‌آید (فائو، ۲۰۲۰).

تجزیه و تحلیل داده

به منظور ارزیابی تأثیر شکل‌های مختلف رویشی گیاهان و شیب‌های تغییرات بارندگی بر میزان ETa، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو - ویلک^۱ (شاپیرو و ویلک، ۱۹۶۵) و همگنی واریانس‌ها با آزمون لون^۲ (لون، ۱۹۶۰) بررسی شد. پس از تأیید این فرضیات مدل عمومی خطی^۳ برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در محیط نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در این تحلیل، درصد پوشش شکل‌های مختلف رویشی (شامل گیاهان یک‌ساله، علفی چندساله، گندمیان چندساله و بوته‌ای) به عنوان متغیرهای مستقل و ETa به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. اثر منطقه به عنوان شاخص شیب تغییرات بارندگی و همچنین، اثر متقابل منطقه (مناطق مختلف استپی و نیمه‌استپی) و شکل‌های رویشی در مدل لحاظ شد تا نقش ترکیبی پوشش گیاهی و گرادیان بارندگی بر ETa مشخص شود. برای هر شکل رویشی، یک مدل جداگانه اجرا شد و آماره‌های F، سطح معناداری (p)، ضریب تعیین (R²) و ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adjusted R²) گزارش شد. به منظور بررسی ارتباط مستقیم بین درصد پوشش هر شکل رویشی با ETa، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این تحلیل ابتدا به طور کلی برای همه مناطق و سپس به تفکیک برای هر منطقه انجام شد تا شدت و معناداری روابط در شرایط مختلف بارش مشخص شود. علاوه بر این، همبستگی بین ETa و پوشش کل گیاهی نیز مورد بررسی قرار گرفت. این تحلیل امکان مقایسه نقش هر شکل رویشی، اثر شیب بارندگی و اثر متقابل آن‌ها بر تغییرات تبخیر - تعرق واقعی (ETa) را فراهم می‌سازد.

نتایج

نتایج تحلیل GLM به تفکیک برای هر یک از شکل‌های رویشی شامل گیاهان یک‌ساله، گندمیان چندساله، علفی‌های چندساله و بوته‌ای، در قالب مدل‌های جداگانه بررسی شد. در تمامی مدل‌ها، اثر شیب تغییرات بارندگی (اثر منطقه) به صورت معنادار و با قدرت تبیین بالا بر ETa مشاهده شد (سطح معناداری $p < 0.001$). به عنوان نمونه، در مدل شکل بوته‌ای، عامل منطقه با مقدار $F=78/371$ و ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adjusted R²) برابر با ۰/۹۵۳، بالاترین سهم تبیینی را در میان مدل‌ها داشت. این نتایج بیانگر آن است که شرایط مکانی - که خود بازتابی از شیب تغییرات اقلیمی از قبیل تفاوت در بارندگی و دما هستند - نقش تعیین‌کننده‌ای در تبیین تغییرات مکانی ETa در مناطق مورد مطالعه دارند. در مقابل، اثر مستقل شکل‌های رویشی در هیچ‌یک از مدل‌ها از نظر آماری معنادار نبود. شکل‌های رویشی یک‌ساله ($F=0/153$ ، $p=0/699$)، گندمیان چندساله ($F=0/163$ ، $p=0/690$)، علفی‌های چندساله ($F=0/031$ ، $p=0/861$) و بوته‌ای‌ها ($F=0/594$ ، $p=0/448$) به‌تنهایی اثر قابل توجهی بر ETa نداشتند. این یافته‌ها نشان می‌دهد نوع پوشش گیاهی به صورت مستقل و بدون در نظر گرفتن زمینه محیطی، تأثیر معناداری بر ETa ندارد.

با این حال، اثر متقابل بین شکل‌های رویشی و منطقه (شیب تغییرات بارندگی) در برخی موارد از نظر آماری معنادار بود. به‌ویژه در مورد شکل رویشی گندمیان چندساله ($F=3/813$ ، $p=0/015$) و شکل رویشی بوته‌ای ($F=4/372$ ، $p=0/009$)، اثرات متقابل

1. Shapiro-Wilk test

2. Levene's test for homogeneity of variance

3. General Linear Model = GLM

معناداری مشاهده شد. این نتایج بیانگر آن است که تأثیر این دو شکل رویشی بر ETa بسته به شرایط مکانی متفاوت است؛ به بیانی، عملکرد آن‌ها در فرایند ETa متأثر از تفاوت‌های اقلیمی ناحیه‌ای بوده و الگوی ثابتی در تمامی مناطق ندارند. در مقابل، اثر متقابل شکل‌های رویشی یک‌ساله و علفی چندساله با منطقه (شیب تغییرات بارندگی) از نظر آماری معنادار نبود (به ترتیب با $p=0/931$ و $p=0/907$). این امر نشان می‌دهد تغییرات مشاهده‌شده در ETa مرتبط با این شکل‌های رویشی عمدتاً تحت تأثیر شیب تغییرات بارندگی بوده و اثر ترکیبی نوع پوشش گیاهی و شیب تغییرات بارندگی در این موارد محدود است. در مجموع، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کند که عامل منطقه (شیب تغییرات بارندگی) نقش غالب و تعیین‌کننده‌ای در تغییرات ETa دارد و برخی شکل‌های رویشی تنها در تعامل با شرایط مکانی می‌توانند بر این فرایند اثرگذار باشند (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج تحلیل مدل خطی عمومی (GLM) برای بررسی اثر شکل‌های رویشی، منطقه و تعامل آن‌ها بر ET

منبع	df	F	Sig	a. R Squared	Adjusted R Squared
منطقه	۴	۱۶/۱۷۲	۰/۰۰۰		
یک‌ساله	۱	۰/۱۵۳	۰/۶۹۹	۰/۹۱۵	۰/۸۸۳
منطقه * یک‌ساله	۴	۰/۲۰۹	۰/۹۳۱		
منطقه	۴	۵۵/۳۸۵	۰/۰۰۰		
گندمیان چندساله	۱	۰/۱۶۳	۰/۶۹۰	۰/۹۸۳	۰/۹۷۶
منطقه * گندمیان چندساله	۴	۳/۸۱۳	۰/۰۱۵		
منطقه	۴	۲۱/۷۷۸	۰/۰۰۰		
علفی چندساله	۱	۰/۰۳۱	۰/۸۶۱	۰/۹۲۵	۰/۸۹۸
منطقه * علفی چندساله	۴	۰/۲۴۹	۰/۹۰۷		
منطقه	۴	۷۸/۳۷۱	۰/۰۰۰		
بوته‌ای	۱	۰/۵۹۴	۰/۴۴۸	۰/۹۶۶	۰/۹۵۳
منطقه * بوته‌ای	۴	۴/۳۷۲	۰/۰۰۹		

نتایج به دست آمده از آزمون همبستگی پیرسون نشان‌دهنده وجود همبستگی مثبت و معنادار بین ETa و تمامی شکل‌های رویشی بودند ($p < 0/01$). به طور خاص، بیشترین میزان همبستگی میان ETa و پوشش کل گیاهی مشاهده شد ($r = 0/957$) که نقش عمده و مستقیم تراکم کلی پوشش گیاهی در افزایش میزان ETa در مناطق مختلف را نشان می‌دهد. در میان اشکال رویشی، شکل رویشی گندمیان چندساله بالاترین ضریب همبستگی با ETa را نشان داد ($r = 0/788$, $p < 0/01$) که بیانگر اهمیت ویژه این گروه در تعیین الگوی ETa در این اکوسیستم‌هاست. پس از آن، گیاهان علفی چندساله ($r = 0/706$, $p < 0/01$) و یک‌ساله‌ها ($r = 0/695$, $p < 0/01$) نیز دارای همبستگی‌های بالا و معناداری با ETa بودند. این روابط نشان می‌دهد افزایش درصد پوشش این شکل‌های گیاهی احتمالاً به افزایش میزان ETa منجر می‌شود.

شکل رویشی بوته‌ای نیز دارای همبستگی مثبت و معناداری با ETa بود ($r = 0/557$, $p = 0/01$)، اگرچه میزان این همبستگی نسبت به سایر شکل‌های رویشی پایین‌تر بود. این موضوع می‌تواند ناشی از ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک خاص این نوع پوشش گیاهی مانند پوشش تاجی کمتر، سطح برگ محدودتر و سازگاری با شرایط خشک باشد. در مجموع، نتایج این تحلیل بیانگر آن است که میزان پوشش گیاهی - هم به صورت کلی و هم در سطح اشکال گیاهی خاص - تأثیر قابل توجهی در تعیین

میزان ETa در اکوسیستم‌های مورد مطالعه دارد. این یافته‌ها مؤید نقش ساختار پوشش گیاهی در فرایندهای هیدرولوژیک بوده و می‌تواند در مدیریت منابع آب و پوشش گیاهی مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد داشته باشد (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین ET و پوشش شکل‌های مختلف رویشی در کلیه مناطق مطالعه‌شده

فرم‌های رویشی	Pearson Correlation	Sig. (2-tailed)
یک‌ساله	۰/۶۹۵***	۰/۰۰۰
علفی چندساله	۰/۷۰۶**	۰/۰۰۰
گندمی چندساله	۰/۷۸۸**	۰/۰۰۰
بوته‌ای	۰/۵۵۷**	۰/۰۰۱
پوشش گیاهی کل	۰/۹۵۷**	۰/۰۰۰

آزمون همبستگی پیرسون به تفکیک هر منطقه نشان داد شدت و معناداری رابطه بین شکل‌های مختلف پوشش گیاهی و ETa بسته به شرایط اقلیمی و بارندگی مناطق متفاوت است که به عنوان کم‌بارش‌ترین ناحیه این مطالعه (با میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۳۰ میلی‌متر) شناخته می‌شود، هیچ‌یک از شکل‌های پوشش گیاهی همبستگی معناداری با ETa نداشتند. بیشترین همبستگی مثبت، هرچند غیرمعنادار، مربوط به علفی‌های چندساله بود ($p = ۰/۶۹۴$, $r = ۰/۰۸۴$) و بیشترین همبستگی منفی در گیاهان یک‌ساله مشاهده شد ($p = ۰/۳۲۳$, $r = -۰/۴۴۰$). منفی بودن این همبستگی می‌تواند به چرخه رشد کوتاه‌مدت و کاهش تراکم یک‌ساله‌ها طی فصل خشک مربوط باشد؛ به طوری که سهم واقعی آن‌ها در تعرق محدود است و کاهش پوشش موجب افزایش تبخیر مستقیم از سطح خاک می‌شود. در نتیجه، با افزایش نسبی حضور یک‌ساله‌ها، الگوی کلی ETa به طور معکوس تغییر می‌کند و رابطه منفی، هرچند غیرمعنادار، ظاهر می‌شود. به طور کلی، در شرایط اقلیمی بسیار خشک سنگ سفید - جایی که محدودیت منابع آبی نقش غالب‌تری ایفا می‌کند - ETa بیشتر تحت تأثیر عوامل محیطی همچون تبخیر مستقیم از خاک، شدت تابش و دما قرار دارد و نقش پوشش گیاهی در کنترل آن به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در منطقه موته که در مقایسه با سنگ سفید از بارندگی بیشتر (۲۰۰-۳۰۰ میلی‌متر) برخوردار است، شکل رویشی گندمی چندساله همبستگی بسیار بالایی با ETa نشان داد ($r = ۰/۹۹۲$) که در سطح ۰/۰۱ معنادار بود ($p < ۰/۰۰۱$). این یافته نشان می‌دهد در مناطق با بارندگی متوسط، گیاهان گندمی چندساله می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر الگوهای ET داشته باشند، احتمالاً دلیل آن می‌تواند ساختار ریشه‌ای و ویژگی‌های فیزیولوژیکی این گروه گیاهی باشد.

در منطقه مرجن، اگرچه هیچ‌یک از شکل‌های رویشی گیاهی همبستگی معناداری با ETa نشان ندادند، اما مقادیر نسبتاً بالای همبستگی برای گیاهان یک‌ساله ($p = ۰/۶۹۴$, $r = ۰/۱۲۶$) قابل توجه است. این منطقه از نظر اقلیمی در موقعیت حد واسط بین نواحی خشک‌تر (مانند سنگ سفید) و مرطوب‌تر (مانند سبزکوه) قرار دارد. به نظر می‌رسد در چنین شرایطی، ترکیب پیچیده‌ای از عوامل محیطی شامل شدت تابش، دما، نوسانات بارندگی، توزیع فصلی رطوبت خاک، توپوگرافی، شیب و پراکندگی پوشش گیاهی، هم‌زمان بر ETa تأثیرگذار هستند و این موضوع ممکن است به کاهش وضوح ارتباط مستقیم بین شکل‌های رویشی پوشش گیاهی و ETa منجر شود. در منطقه تنگ صیاد نیز همبستگی معناداری بین شکل‌های رویش گیاهی و ETa مشاهده نشد. با این حال، گندمیان چندساله دارای همبستگی منفی نسبتاً بالا بود ($p = ۰/۱۱۷$, $r = -۰/۶۴۶$). این منطقه با وجود میانگین بارندگی نسبتاً بالا (۳۵۰ میلی‌متر)، از نظر توپوگرافی و تنوع ارتفاعی شرایط پیچیده‌تری دارد. به نظر می‌رسد شرایط توپوگرافی پیچیده، ناهمگنی‌های خرداقلیمی و توزیع ناهمگون پوشش گیاهی در این منطقه، اثرگذاری مستقیم شکل‌های رویشی بر ETa را کاهش داده است.

در منطقه سبزکوه که بیشترین میزان بارندگی را در میان مناطق مورد مطالعه دارد، همبستگی معنادار و مثبت بین گندمیان چندساله و ETa وجود داشت ($p = ۰/۰۰۷$, $r = ۰/۸۹۲$). همچنین، پوشش گیاهی کل نیز همبستگی معناداری با ETa نشان داد ($p = ۰/۰۱۳$, $r = ۰/۸۶۱$). در مقابل، بوته‌ها در این منطقه همبستگی منفی و معنادار با ETa داشتند ($p = ۰/۰۵۰$, $r = -۰/۷۵۴$). این بیانگر اثر قوی‌تر پوشش گیاهی در کنترل و تنظیم ETa در مناطق با منابع آبی فراوان‌تر است، جایی که پوشش متراکم‌تر و

فعال تر گیاهی می‌تواند مستقیم بر اتلاف آب اثرگذار باشد. به طور کلی، نتایج نشان داد در مناطق با بارندگی بالاتر (مانند موته و سبزکوه)، برخی از انواع پوشش گیاهی، به‌ویژه گندمیان چندساله و پوشش گیاهی کل، تأثیر معنادار با Eta دارند. در حالی که در مناطق کم‌بارش، اغلب شکل‌های رویشی تأثیر معناداری از نظر آماری بر Eta نشان نمی‌دهند. این موضوع حاکی از آن است که در شرایط مرطوب‌تر، ساختار پوشش گیاهی نقش بیشتری در فرایند Eta دارد، در حالی که در مناطق خشک‌تر، سایر عوامل محیطی نقش غالب را ایفا می‌کنند (جدول ۴).

جدول ۴. ضریب همبستگی پیرسون بین ET و شکل‌های مختلف پوشش گیاهی در طول شیب تغییرات بارندگی (تفکیک‌شده برای هر منطقه)

مناطق	شکل‌های رویشی	Pearson Correlation	Sig. (2-tailed)
سنگ سفید	یک‌ساله	-۰/۴۴۰	-۰/۳۲۳
	علفی چندساله	-۰/۶۹۴	-۰/۰۸۴
	گندمی چندساله	-۰/۱۳۳	-۰/۷۷۶
	بوته‌ای	-۰/۲۸۶	-۰/۵۳۴
	پوشش گیاهی کل	-۰/۲۹۱	-۰/۵۲۷
موته	یک‌ساله	-۰/۳۹۳	-۰/۳۸۳
	علفی چندساله	-۰/۳۰۲	-۰/۵۱۰
	گندمی چندساله	۰/۹۹۲**	-۰/۰۰۰
	بوته‌ای	-۰/۶۶۱	-۰/۱۰۶
	پوشش گیاهی کل	۰/۸۰۵*	-۰/۰۲۹
مرجن	یک‌ساله	۰/۶۹۴	-۰/۱۲۶
	علفی چندساله	-۰/۰۴۱	-۰/۹۳۸
	گندمی چندساله	-۰/۲۹۴	-۰/۵۷۲
	بوته‌ای	-۰/۰۵۰	-۰/۹۲۴
	پوشش گیاهی کل	-۰/۱۶۲	-۰/۷۶۰
تنگ صیاد	یک‌ساله	-۰/۱۷۶	-۰/۷۰۶
	علفی چندساله	-۰/۲۹۱	-۰/۵۲۷
	گندمی چندساله	-۰/۶۴۶	-۰/۱۱۷
	بوته‌ای	-۰/۴۱۹	-۰/۳۵۰
	پوشش گیاهی کل	-۰/۰۸۴	-۰/۸۵۷
سبزکوه	یک‌ساله	-۰/۲۱۷	-۰/۶۳۹
	علفی چندساله	-۰/۴۲۶	-۰/۳۴۱
	گندمی چندساله	۰/۸۹۲**	-۰/۰۰۷
	بوته‌ای	-۰/۷۵۴	-۰/۰۵۰
	پوشش گیاهی کل	۰/۸۶۱*	-۰/۰۱۳

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان داد در امتداد شیب تغییرات بارندگی، الگوی تبخیر - تعرق نه تنها تحت تأثیر مستقیم میزان بارندگی قرار دارد، بلکه نوع و تراکم پوشش گیاهی نیز در این فرایند نقش تعدیل‌کننده ایفا می‌کند. اگرچه نتایج حاصل از مدل خطی عمومی (GLM) نشان داد اثر مستقل شکل‌های رویشی بر Eta معنادار نبود (مقادیر $p > ۰/۰۵$ برای تمامی شکل‌های رویشی شامل یک‌ساله‌ها، گندمیان چندساله، علفی‌های چندساله و بوته‌ای‌ها)، اما اثر شیب تغییرات بارندگی (عامل منطقه) که نماینده‌ای از شرایط اقلیمی به‌ویژه بارندگی است، در تمام مدل‌ها بسیار معنادار و با قدرت تبیین بالا همراه بود (برای مثال، در شکل رویشی بوته‌ای: $F = ۷۸/۳۷۱$, $\text{Adjusted } R^2 = ۰/۹۵۳$) این یافته با مطالعات جهانی همچون آلن و همکاران (۱۹۹۸) و

پیل، مک ماهون و فیلیسون (۲۰۱۰) و همچنین مطالعات اخیر مانند لی و همکاران (۲۰۲۳) و کانگ و همکاران (۲۰۲۳) هم‌راستا است که نقش بارندگی را به عنوان عامل کلیدی کنترل‌کننده ET در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک تأیید کرده‌اند. همچنین، پژوهش‌های سیوآپالن، کومار و هریس (۲۰۰۱) و آلبرتسون، کاتول و وایبرگ (۲۰۰۱) بر پیچیدگی روابط بین اقلیم و پوشش گیاهی در شکل‌گیری الگوهای ET تأکید داشته‌اند. نتایج حاضر با تأیید این پیچیدگی‌ها نشان می‌دهد اگرچه پوشش گیاهی به تنهایی نقش تعیین‌کننده‌ای ندارد، اما اثرگذاری آن بر ETa وابسته به شرایط بارندگی هر منطقه است و تنها در صورت فراهم بودن بستر اقلیمی مناسب می‌تواند بر الگوی هیدرولوژیکی مؤثر واقع شود.

در نواحی مرطوب‌تری همچون سبزکوه که در بالادست شیب تغییرات بارندگی قرار دارند، بیشترین میزان ETa همراه با بالاترین درصد پوشش گیاهی ثبت شد. گندمیان چندساله و بوته‌ای‌ها در این منطقه پوشش غالب را تشکیل دادند و نسبت به سایر مناطق بالاتر بود. این روند نشان می‌دهد در شرایط بارشی مناسب، افزایش پوشش گیاهی با رشد فعال‌تر گونه‌ها و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی هم‌راستا است و سبب ارتقای ETa می‌شود؛ به گونه‌ای که ETa بالا در این مناطق می‌تواند نمادی از فعالیت اکولوژیکی شدید و چرخه آبی پویا باشد؛ مفهومی که ژانگ، داویس و والکر (۲۰۰۱) و هاکسمن و همکاران (۲۰۰۴) نیز در مطالعات خود در اکوسیستم‌های مشابه مطرح کرده‌اند. این یافته با نتایج پژوهش هان و همکاران (۲۰۲۱) و فیشر و همکاران (۲۰۱۷) که بر بازخورد مثبت بین پوشش گیاهی و ET در اکوسیستم‌های مولد تأکید دارند، همخوانی دارد. همچنین، چاپین و همکاران (۲۰۰۲) و وودوارد (۱۹۸۷) بیان کرده‌اند که ساختار جوامع گیاهی، خود تحت تأثیر اقلیم شکل می‌گیرد و هم‌زمان نیز بر ET اثر می‌گذارد. در سوی دیگر شیب بارندگی، در مناطقی مانند سنگ‌سفید، موته و مرجن که با بارش‌های سالانه اندک مواجه‌اند، میزان ETa و پوشش گیاهی به شدت کاهش یافت. در این مناطق، گیاهان یک‌ساله و علفی‌های چندساله به دلیل وابستگی زیاد به رطوبت سطحی و فقدان توان جذب آب از لایه‌های عمیق‌تر خاک، عملکرد محدودی نشان دادند. کاهش پوشش این گیاهان سبب افت ظرفیت تعرق و در نتیجه کاهش کلی ETa شد. این یافته‌ها با نتایج مطالعات شولزه، بک و مولر هوهنشتاین (۲۰۰۵) مطابقت دارد که نشان دادند در مناطق خشک، عوامل اقلیمی همچون کمبود بارش، به طور مستقیم بر ساختار پوشش و میزان ET اثرگذار بوده و نقش پوشش گیاهی در چنین شرایطی کم‌رنگ‌تر می‌شود. این موضوع همچنین از یافته‌های ما و ژانگ (۲۰۲۲) پشتیبانی می‌کند که نشان می‌دهند در شرایط تنش آبی شدید، محدودیت‌های محیطی بر ویژگی‌های بیولوژیکی غلبه می‌کنند. همچنین کروک، مریت و جکمن (۲۰۰۴) در بررسی‌های خود تأکید کرده‌اند که مدل‌های اکوهیدرولوژیکی توانایی برآورد دقیق ET و تولید گیاهی در طیف وسیعی از کاربری‌های اراضی را دارند.

نتایج تحلیل‌های همبستگی منطقه‌ای نیز به خوبی با الگوی کلی مشاهده‌شده همخوانی دارند و نشان می‌دهند شدت و جهت رابطه بین شکل‌های پوشش گیاهی و ETa، وابستگی زیادی به شرایط اقلیمی هر منطقه دارد. برای مثال، در منطقه نسبتاً مرطوب و پایدار موته، ارتباط بسیار قوی و معناداری بین پوشش شکل رویشی گندمی چندساله و میزان ETa مشاهده شد ($r = 0.992$, $p < 0.001$). این یافته نشان می‌دهد در چنین مناطق، این شکل‌های رویشی با ریشه‌های عمیق و رشد مداوم، ظرفیت بالاتری برای تعرق دارند و نقش مؤثرتری در افزایش ETa ایفا می‌کنند. مطابق با یافته‌های رینولدز، کمپ و تهنون (۲۰۰۰) و همچنین لی و ژانگ (۲۰۲۱)، گندمیان چندساله در مقایسه با گونه‌های بوته‌ای، به‌ویژه در شرایطی که رشد آن‌ها با بارش‌های تابستانه هم‌زمان می‌شود، مقادیر بالاتری از تبخیر - تعرق (ET) را نشان می‌دهند؛ هرچند این الگو ممکن است تحت تأثیر تغییرپذیری بین‌سالی قرار گیرد. در مقابل، گیاهان یک‌ساله به دلیل محدودیت در توسعه ریشه و وابستگی بیشتر به رطوبت سطحی، سهم اندکی در افزایش ET دارند. در مجموع، این شواهد حاکی از نقش تعیین‌کننده گونه‌های چندساله در تنظیم فرایندهای هیدرولوژیکی و پایداری عملکرد اکوسیستم در نواحی نیمه‌خشک است. در مقابل، در مناطق خشک‌تر مانند سنگ‌سفید و مرجن، نبود همبستگی معنادار میان پوشش گیاهی و ETa نشان داد در چنین مناطق کم‌بارشی، محدودیت‌های شدید رطوبتی و نوسانات اقلیمی مانع تأثیرگذاری پوشش گیاهی بر ETa می‌شوند و عوامل غیرزیستی مانند رطوبت خاک و دمای سطح زمین اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند (مطابق با یافته‌های ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ مو و همکاران، ۲۰۰۴؛ هنتفیلد، پروگر و کوستاس، ۲۰۰۷؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۵). تحلیل همبستگی پیرسون بین پوشش گیاهی کل و ETa طی گرادیان بارندگی، با ضریب

بسیار بالا ($p < 0.001$ ، $r = 0.957$)، تأیید می‌کند که افزایش ETa در مناطقی با بارش سالانه بیشتر نه تنها به کاهش پوشش گیاهی منجر نمی‌شود، بلکه می‌تواند شاخصی از بهره‌وری و فعالیت بیولوژیکی بالا باشد. در واقع، ETa بالا در چنین اکوسیستم‌هایی نشانه‌ای از کارکرد هیدرولوژیکی سالم و چرخه بازخورد مثبت بین بارندگی، پوشش گیاهی و ETa است مفهومی که در مطالعات آلن و همکاران (۱۹۹۸) و ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) نیز مورد تأکید قرار گرفته و اخیراً توسط یانگ و همکاران (۲۰۲۳) در مقیاس جهانی تأیید شده است.

در میان شکل‌های پوشش گیاهی، گندمیان چندساله با بیشترین ضریب همبستگی کلی ($p < 0.001$ ، $r = 0.788$) با ETa و اثر متقابل معنادار با منطقه (شیب تغییرات بارندگی) ($p = 0.015$)، نقش کلیدی در تعیین الگوی ETa ایفا کردند. این شکل رویشی، به واسطه سیستم ریشه‌ای عمیق، طول دوره رشد بلندمدت و هم‌زمانی با فصل بارندگی، می‌تواند در شرایط اقلیمی متنوع، نقش مهمی در تعدیل و پایداری ET ایفا کند (شولزه، ۱۹۸۲؛ کورک و اسمال، ۲۰۰۴). شکل رویشی بوته‌ای نیز در امتداد شیب بارندگی عملکرد قابل توجهی نشان داد. اگرچه به طور کلی مقاومت بیشتری در برابر کم‌آبی دارند، اما در مناطق مرطوب‌تر مانند سبزکوه، به دلیل فراوانی نسبی، اثر متقابل معناداری با شرایط اقلیمی داشتند. این موضوع تأکید می‌کند که حتی گونه‌های مقاوم به خشکی نیز در اقلیم‌های مساعد می‌توانند ظرفیت عملکردی بالاتری داشته باشند. نوسانات مشاهده‌شده در برخی نواحی مانند تنگ‌صیاد نیز اهمیت عوامل غیر اقلیمی مانند شیب، نوع خاک و مدیریت چرا را برجسته می‌کند (چاپین و همکاران، ۲۰۰۲؛ ماستر و همکاران، ۲۰۱۲).

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد تبیین دقیق الگوی تبخیر - تعرق (ET) در اکوسیستم‌های مرتعی تنها با در نظر گرفتن هم‌زمان شرایط اقلیمی و ترکیب پوشش گیاهی امکان‌پذیر است. اگرچه شکل‌های رویشی به‌تنهایی نقش تعیین‌کننده‌ای در سطح منطقه‌ای ندارند، اما اثرات متقابل آن‌ها با بارندگی و شرایط اقلیمی، به عناصر کلیدی در تنظیم تعادل آبی اکوسیستم تبدیل می‌شوند. این تأثیرات متقابل به‌ویژه در مورد گندمیان چندساله و بوته‌ای‌ها در مناطق با بارندگی بیشتر، اهمیت بیشتری دارد. این پژوهش با وجود ارائه بینشی ارزشمند در مقیاس ناحیه‌ای، با محدودیت‌هایی نیز همراه بود که زمینه را برای مطالعات آینده فراهم می‌سازد. مقیاس مکانی داده‌های WaPOR (۲۵۰ متر) اگر برای پوشش دادن عرصه‌های وسیع مرتعی و تحلیل‌های کلان بسیار کارآمد است، اما برای بررسی روابط بسیار ریزمقیاس طراحی نشده است. همچنین، تمرکز این مطالعه بر یک دوره رویش بوده تا اثر شیب بارندگی در یک مقطع زمانی مشخص بررسی شود؛ بنابراین، پایش تغییرات در یک گرادیان زمانی بلندمدت برای درک پاسخ پوشش گیاهی و ET به نوسانات اقلیمی شدید (مانند خشکسالی‌های ممتد) ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به مشاهده اثر متقابل قوی و غیرخطی بین شکل‌های رویشی و گرادیان بارندگی، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی به تبیین سازوکارهای شکل‌دهنده «جایگاه هیدرولوژیک» (Hydrological Niche) در گونه‌های کلیدی در طول گرادیان‌های مکانی و زمانی بپردازند. هدف اصلی، کمی‌سازی این موضوع خواهد بود که هر شکل رویشی (به‌ویژه گندمیان چندساله و بوته‌ای‌ها) چگونه از طریق الگوهای متفاوت ریشه‌دوانی، تعدیل رطوبت خاک و ایجاد ریزاقلیم، یک جایگاه هیدرولوژیک منحصر به فرد را در موقعیت‌های مختلف گرادیان بارندگی ایجاد و تثبیت می‌کند. از منظر مدیریتی، یافته‌ها ضرورت تفکیک سیاست‌های احیای پوشش گیاهی بر اساس شرایط اقلیمی هر منطقه را برجسته می‌کنند. در مناطق خشک، تمرکز باید بر تقویت گونه‌های بومی مقاوم به خشکی با کارکرد هیدرولوژیکی مؤثر باشد، در حالی که در مناطق مرطوب‌تر، استفاده پایدار از گونه‌هایی با پتانسیل بالای ET می‌تواند به بهبود چرخه آب و بهره‌وری اکوسیستم کمک کند. همچنین، تحلیل مکانی و اقلیمی هم‌زمان می‌تواند در انتخاب نوع پوشش گیاهی برای تثبیت و بهبود شرایط رطوبتی، نقش مؤثری داشته باشد؛ بنابراین، راهبردهای مدیریتی در اکوسیستم‌های مرتعی باید مبتنی بر تحلیل هم‌زمان اقلیم، شکل‌های پوشش گیاهی و داده‌های مکانی دقیق باشد تا بتوان با دیدی جامع‌تر به حفظ پایداری و تاب‌آوری منابع طبیعی در برابر تغییرات اقلیمی دست یافت.

منابع

- 1 Albertson, J. D., Katul, G. G., & Wiberg, P. (2001). Relative importance of local and regional controls on coupled water, carbon, and energy fluxes. *Advances in Water Resources*, 24(9-10), 1103–1118.
- 2 Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- 3 Bai, P., Liu, X., Zhang, Y., Liu, C., & Liang, K. (2020). Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China. *Water Resources Research*, 56(10), e2020WR027285. <https://doi.org/10.1029/2020WR027285>
- 4 Bastiaanssen, W. G. M., Cheema, M. J. M., Immerzeel, W. W., Miltenburg, I. J., & Pelgrum, H. (2012). Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resources Research*, 48, W11512. <https://doi.org/10.1029/2011WR010482>
- 5 Berretta, C., Poë, S., & Stovin, V. (2014). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, 511, 374–386.
- 6 Brandão, C., do Rosário Cameira, M., Valente, F., de Carvalho, R. C., & Paço, T. A. (2017). Wet season hydrological performance of green roofs using native species under Mediterranean climate. *Ecological Engineering*, 102, 596–611.
- 7 Burkhardt, J., & Tisdale, E. (1976). Causes of juniper invasion in southwestern Idaho. *Ecology*, 57(3), 472–484.
- 8 Chapin, F. S. III, Matson, P. A., & Mooney, H. A. (2002). Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer.
- 9 Chen, Y., Xia, J., Liang, S., Feng, J., Fisher, J. B., Li, X.,... & Yuan, W. (2014). Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China. *Remote Sensing of Environment*, 140, 279–293.
- 10 Croke, B. F. W., Merritt, W. S., & Jakeman, A. J. (2004). A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 291(1–2), 115–131.
- 11 Cui, J., Lian, X., Huntingford, C., Gimeno, L., Wang, T., Ding, J., & Stott, P. A. (2022). Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport. *Nature Geoscience*, 15, 982–988. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01061-7>
- 12 Feizabadi, M. F., Tahmasebi, P., Broujeni, E. A., Ebrahimi, A., & Omidipour, R. (2021). Functional diversity, functional composition and functional β diversity drive aboveground biomass across different bioclimatic rangelands. *Basic and Applied Ecology*, 52, 68–81.
- 13 Feng, S., Liu, J., Zhang, Q., Zhang, Y., Singh, V. P., Gu, X., & Sun, P. (2020). A global quantitation of factors affecting evapotranspiration variability. *Journal of Hydrology*, 584, 124688. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124688>
- 14 Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M. F., Hook, S., Baldocchi, D., Hu, T., Jung, M., Reichstein, M., Shi, X., & Wood, E. F. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, 53(4), 2618–2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>
- 15 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020a). WaPOR database methodology, V2 release (unpublished). Rome, Italy.
- 16 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020b). WaPOR—The FAO portal to monitor water productivity through open access or remotely sensed derived data. FAO, Rome, Italy. <https://wapor.apps.fao.org/home/1>
- 17 Gong, Y., Zhang, X., Li, H., Zhang, X., He, S., & Miao, Y. (2021). A comparison of the growth status, rainfall retention and purification effects of four green roof plant species. *Journal of Environmental Management*, 278, 111451. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111451>

- 18 Granier, A., Biron, P., Breda, N., Pontailler, J. Y., & Saugier, B. (1996). Transpiration of trees and forest stands: Short and long-term monitoring using sapflow methods. *Global Change Biology*, 2(3), 265-274.
- 19 Han, J., Chen, J., Shi, W., Song, J., Hui, D., Ru, J., & Wan, S. (2021). Asymmetric responses of resource use efficiency to previous-year precipitation in a semi-arid grassland. *Functional Ecology*, 35(3), 807–814. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13756>
- 20 Hatfield, J. L., Prueger, J. H., & Kustas, W. P. (2007). Spatial and temporal variation of energy and carbon fluxes in Central Iowa. *Agronomy Journal*, 99, 285–296.
- 21 Huxman, T. E., Smith, M. D., Fay, P. A., Knapp, A. K., Shaw, M. R., Loik, M. E., Smith, S. D., Tissue, D. T., Zak, J. C., Weltzin, J. F., Pockman, W. T., Sala, O. E., Haddad, B. M., Harte, J., Koch, G. W., Schwinning, S., Small, E. E., & Williams, D. G. (2004). Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 429(6992), 651–654. <https://doi.org/10.1038/nature02561>
- 22 Jackson, R. B., Banner, J. L., Jobbágy, E. G., Pockman, W. T., & Wall, D. H. (2002). Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 418(6898), 623–626. <https://doi.org/10.1038/nature00910>
- 23 Jasechko, S., Sharp, Z. D., Gibson, J. J., Birks, S. J., Yi, Y., & Fawcett, P. J. (2013). Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 496(7445), 347–350. <https://doi.org/10.1038/nature11983>
- 24 Jones, H. (1992). *Plants and microclimate*. Cambridge University Press.
- 25 Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S. I., Sheffield, J., Goulden, M. L., ... & Zhang, K. (2010). Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467(7318), 951–954.
- 26 Kang, L., Cao, S., Cao, G., Liu, X., Zhang, Z., & Li, X. (2023). Temporal and spatial changes of evapotranspiration in the Shaliu River Basin of Qinghai Lake. *Arid Zone Research*, 40(3), 358–372. (in Chinese)
- 27 Kelliher, F. M., Lloyd, J., Rebmann, C., Wirth, C., Schulze, E. D., & Baldocchi, D. D. (2001). Evaporation in the boreal zone during summer—physics and vegetation. In *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System* (pp. 151–165). Academic Press.
- 28 Kurc, S. A., & Small, E. E. (2004). Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico. *Water Resources Research*, 40(9).
- 29 Lekberg, Y., Gibbons, S. M., Rosendahl, S., & Ramsey, P. W. (2013). Severe plant invasions can increase mycorrhizal fungal abundance and diversity. *ISME Journal*, 7, 1424–1433.
- 30 Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. In I. Olkin (Ed.), *Contributions to probability and statistics: Essays in honor of Harold Hotelling* (pp. 278–292). Stanford University Press.
- 31 Li, C., Li, Z., Gao, Z., & Sun, B. (2021). Estimation of evapotranspiration in sparse vegetation areas by applying an optimized two-source model. *Remote Sensing*, 13(7), 1344. <https://doi.org/10.3390/rs13071344>
- 32 Li, X., Xu, X., Tian, W., Wang, Y., Zhao, L., & Li, X. (2023b). Contribution of climate change and vegetation restoration to interannual variability of evapotranspiration in the agro-pastoral ecotone in northern China. *Ecological Indicators*, 154, 110485. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110485>
- 33 Li, Y., & Zhang, K. (2021b). Effects of NDVI/Land-Use on Evapotranspiration in the Loess Plateau. *Yellow River*, 43(12), 43–49. (in Chinese)
- 34 Liu, J., You, Y., Li, J., Sitch, S., Gu, X., Nabel, J. E. M. S., Lombardozzi, D., Luo, Y., & Kong, D. (2021). Response of global land evapotranspiration to climate change, elevated CO₂, and land use change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311, 108663. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108663>
- 35 Liu, M., Wu, X., & Yang, H. (2022). Evapotranspiration characteristics and soil water balance of alfalfa grasslands under regulated deficit irrigation in the inland arid area of Midwestern China. *Agricultural Water Management*, 260, 107316. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107316>

- 36 Liu, Q., Yang, Z., & Cui, B. (2008). Spatial and temporal variability of annual precipitation during 1961–2006 in Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 361(3-4), 330–338.
- 37 Lundholm, J. T., & Williams, N. S. G. (2015). Effects of vegetation on green roof ecosystem services. In R. Sutton (Ed.), *Green roof ecosystems* (pp. 211–232). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7_9
- 38 Lv, X., Tong, S., Mei, L., Ren, J., Bao, G., Huang, X., Bao, Y., & Dorjsuren, A. (2025). Spatio-temporal variations of evapotranspiration and its driving factors on the Mongolian Plateau. *Ecological Indicators*, 173, 113415. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113415>
- 39 Ma, N., & Zhang, Y. (2022). Increasing Tibetan Plateau terrestrial evapotranspiration primarily driven by precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 317, 108887. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108887>
- 40 Ma, N., Szilagyi, J., & Jozsa, J. (2024). Water-balance-based evapotranspiration for 56 large river basins: A benchmarking dataset for global terrestrial evapotranspiration modeling. *Journal of Hydrology*, 630, 130607. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130607>
- 41 Ma, Z., Yan, N., Wu, B., Stein, A., Zhu, W., & Zeng, H. (2019). Variation in actual evapotranspiration following changes in climate and vegetation cover during an ecological restoration period (2000–2015) in the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 689, 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.155>
- 42 Maestre, F. T., Quero, J. L., Gotelli, N. J., Escudero, A., Ochoa, V., Delgado-Baquerizo, M., ... & Wang, D. (2012). Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science*, 335(6065), 214–218. <https://doi.org/10.1126/science.1215442>
- 43 Mo, X., Liu, S., Lin, Z., & Zhao, W. (2004). Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin. *Journal of Hydrology*, 285(1-4), 125–142.
- 44 Pataki, D. E., Oren, R., & Smith, W. K. (2000). Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought. *Ecology*, 81(9), 2557–2566.
- 45 Pataki, D. E., Oren, R., Katul, G., & Sigmon, J. (1998). Canopy conductance of *Pinus taeda*, *Liquidambar styraciflua* and *Quercus phellos* under varying atmospheric and soil water conditions. *Tree Physiology*, 18(5), 307–315.
- 46 Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- 47 Peel, M. C., McMahon, T. A., & Finlayson, B. L. (2010). Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scale. *Water Resources Research*, 46(9).
- 48 Raunkjær, C. (1934). *Life forms of plants and statistical plant geography*. Clarendon, Oxford.
- 49 Reichstein, M., Bahn, M., Mahecha, M. D., Kattge, J., & Baldocchi, D. D. (2014). Linking plant and ecosystem functional biogeography. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(38), 13697–13702.
- 50 Reynolds, J. F., Kemp, P. R., & Tenhunen, J. D. (2000). Effects of long-term rainfall variability on evapotranspiration and soil water distribution in the Chihuahuan Desert: A modeling analysis. *Plant Ecology*, 150(1), 145–159.
- 51 Schlesinger, W. H., Reynolds, J. F., Cunningham, G. L., Huenneke, L. F., Jarrell, W. M., Virginia, R. A., & Whitford, W. G. (1990). Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247(4946), 1043–1048. <https://doi.org/10.1126/science.247.4946.1043>
- 52 Schulze, E. D. (1982). Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations. In O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond, & H. Ziegler (Eds.), *Physiological plant ecology. II. Encyclopedia of plant physiology* (pp. 615–676). Springer, Berlin.
- 53 Schulze, E.-D., Beck, E., & Müller-Hohenstein, K. (2005). *Plant ecology*. Berlin: Springer.
- 54 Shao, X., Zhang, Y., Ma, N., Liu, C., & Zhang, J. (2024). Drought-induced ecosystem resistance and recovery observed at 118 flux tower stations across the globe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 356, 110170. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110170>
- 55 Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>

- 56 Shen, X. J., Liu, Y. W., Wu, L. Y., Ma, R., & Li, Z. L. (2022). Grassland greening impacts on global land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 838(Pt 3), 155851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155851>
- 57 Sivapalan, M., Kumar, P., & Harris, D. (2001). Nonlinear propagation of multi-scale dynamics through hydrologic subsystems. *Advances in Water Resources*, 24(9-10).
- 58 Stephenson, N. (1998). Actual evapotranspiration and deficit: Biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. *Journal of Biogeography*, 25(5), 855-870.
- 59 Suzuki, R., Yatagai, A., & Yasunari, T. (1998). Satellite-derived vegetation index and evapotranspiration estimated by using assimilated atmospheric data over Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 76(4), 663-671.
- 60 Teuling, A. J., Hirschi, M., Ohmura, A., Wild, M., Reichstein, M., Ciais, P., Buchmann, N., Ammann, C., Montagnani, L., Richardson, A. D., Wohlfahrt, G., & Seneviratne, S. I. (2009). A regional perspective on trends in continental evaporation. *Geophysical Research Letters*, 36(2), L02404. <https://doi.org/10.1029/2008GL036584>
- 61 Van Auken, O. W. (2000). Shrub invasions of North American semiarid grasslands. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, 197-215. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.197>
- 62 Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882-892.
- 63 Wang, D., Gao, G., An, J., Shao, Y., Lue, Y., & Fu, B. (2022). Comparisons of three scaling up methods to estimate stand transpiration of a xerophytic shrub (*Salix psammophila*) in northern China. *Journal of Hydrology*, 608, 127593. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127593>
- 64 Wang, S., Zhu, C., Huang, Z., Li, Y., Cui, C., & Zhang, C. (2025). Primary roles of soil evaporation and vegetation in driving terrestrial evapotranspiration across global drylands. *Science of the Total Environment*, 958, 178073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178073>
- 65 Wilcox, B. P. (2002). Shrub control and streamflow on rangelands: A process based viewpoint. *Journal of Range Management*, 55(4), 318-326. <https://doi.org/10.2307/4003464>
- 66 Woodward, F. I. (1987). *Climate and plant distribution*. Cambridge University Press.
- 67 Wu, D., Xie, X., Tong, J., & Li, Y. (2020). Sensitivity of vegetation growth to precipitation in a typical afforestation area in the Loess Plateau: Plant-Water Coupled Modelling. *Ecological Modelling*, 430, 109128. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109128>
- 68 Yang, W., Wang, Y., Liu, X., Zhao, H., Wang, G., & Shao, R. (2020). Estimating the evaporation in the Fenghuo Mountains permafrost region of the Tibetan Plateau. *Catena*, 194, 104754. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104754>
- 69 Yang, Y., Roderick, M. L., Guo, H., Miralles, D. G., Zhang, L., & McVicar, T. R. (2023a). Evapotranspiration on a greening Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(9), 626-641. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00464-3>
- 70 Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37, 701-708. <https://doi.org/10.1029/2000WR900325>
- 71 Zhang, S., Lei, Y., Li, H., & Wang, Z. (2010). Temporal-spatial variation in crop evapotranspiration in Hebei Plain, China. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2 part 2), 672-677.
- 72 Zhang, X., Ren, Y., Yin, Z. Y., Lin, Z., & Zheng, D. (2009). Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971-2004. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D15).
- 73 Zhang, Y., Chiew, F. H. S., Pena-Arancibia, J., Sun, F., Li, H., & Leuning, R. (2017). Global variation of transpiration and soil evaporation and the role of their major climate drivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13), 6868-6881. <https://doi.org/10.1002/2016JD026310>