Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Evaluating watershed response to meteorological drought in the propagation process to hydrological drought at the event scale

Mohammad Rostami Khalaj*[1], Hamzeh Noor[2], Ali Bagherian Kalat[3]

1. Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran, Email: m.rostamikhalaj@areeo.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran, Email: h.noor@areeo.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran, Email: alibagheriankalat@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history
Received: 04 November 2025
Revised: 20 December 2025
Accepted: 21 December 2025
Published online: 20 January 2026

Keywords:
Climate change, Drought severity, Watershed sensitivity coefficient, Exponential propagation model.

ABSTRACT

Drought is one of the most critical climatic hazards in arid and semi-arid regions, where persistent water shortages impose substantial environmental and economic impacts. Understanding the propagation of meteorological drought into hydrological drought is a fundamental step toward sustainable water resource management. This study investigates the relationship between meteorological drought characteristics and event-scale propagation ratios, and assesses the sensitivity of watersheds in Khorasan Razavi Province to this propagation process. Using monthly precipitation and streamflow data from 46 catchments over a 29-year period, we computed the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Streamflow Index (SSI). Exponential relationships were fitted between standardized propagation ratios and meteorological drought characteristics (severity and intensity), and sensitivity coefficients were derived for each catchment. The results show that propagation ratios decrease exponentially with increasing meteorological drought severity and intensity across all catchments. The average coefficients of determination for the severity- and intensity-based relationships were 0.43 and 0.48, respectively, with over 85% of the catchments exhibiting statistically significant fits. Among the studied basins, the Mosheng catchment showed the highest sensitivity (severity sensitivity = 2.29; intensity sensitivity = 1.77), whereas the Dahaneh-Shur catchment exhibited the lowest (severity sensitivity = 1.08; intensity sensitivity = 0.92), indicating more stable hydrological behavior. A significant negative association was also found between snow fraction and severity sensitivity, suggesting that a higher contribution of snowfall reduces the magnitude of drought propagation. Overall, the findings highlight substantial spatial heterogeneity in catchment responses to drought propagation and underscore the critical role of climatic and physiographic controls. These results provide a scientific basis for identifying vulnerable catchments and for developing adaptive water management strategies in the dry regions of Iran.

Citation: Rostami Khalaj, M., Noor, H., & Bagherian Kalat, A. (2025). Evaluating watershed response to meteorological drought in the propagation process to hydrological drought at the event scale. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 13(4), 41-56.

DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0

***Corresponding author:** Mohammad Rostami Khalaj
Address: Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural ResourcesResearch and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran.
Tel: +989158165411
Email: m.rostamikhalaj@areeo.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

Publisher: Iranian Rainwater Catchment Systems Association
© Author(s)

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems 2025, Volume 13, Issue 4

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

Evaluating watershed response to meteorological drought in the propagation process to hydrological drought at the event scale

Mohammad Rostami Khalaj*[1], Hamzeh Noor[2], Ali Bagherian Kalat[3]

1. Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural ResourcesResearch and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran, Email: m.rostamikhalaj@areeo.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran, Email: h.noor@areeo.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural ResourcesResearch and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran, Email: alibagheriankalat@gmail.com

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Understanding how meteorological droughts propagate into hydrological droughts is essential for effective drought risk management and water resource planning. While meteorological drought originates in a deficit of precipitation, its translation into streamflow deficits depends strongly on watershed characteristics, climate conditions, and surface–subsurface interactions. Recent studies have highlighted drought propagation as a nonlinear process that varies across climatic and physiographic settings. However, most previous research has focused on long-term or spatial analyses, while event-scale propagation-which captures the dynamics within individual drought episodes-remains less explored, particularly in semi-arid regions such as northeastern Iran. This study analyzes the event-scale propagation of drought from meteorological to hydrological systems across multiple watersheds in Razavi Khorasan Province, Iran.

Methodology: Monthly precipitation and streamflow data from 30 hydrometric stations across Razavi Khorasan Province were analyzed. The original text states a 30-year period; please verify if this aligns with the 29-year period mentioned in your abstract for consistency. Meteorological and hydrological droughts were characterized using the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Streamflow Index (SSI), respectively. A gamma distribution was fitted to the non-zero precipitation and discharge records. Drought events were identified when index values fell below –1. To assess drought propagation at the event scale, each hydrological drought event was paired with its preceding meteorological drought. For every paired event, the duration, severity, and intensity of both drought types were calculated. Propagation ratios were then determined as the ratio of hydrological to meteorological drought characteristics, enabling a quantitative assessment of drought evolution between systems. Subsequently, exponential relationships between standardized propagation ratios and meteorological drought characteristics (severity and intensity) were fitted using nonlinear regression for each catchment. The resulting coefficients, denoted as K_S and K_I, represent the catchment's sensitivity to variations in meteorological drought severity and intensity, respectively. Finally, Pearson correlation analysis was employed to examine relationships between these sensitivity coefficients and key environmental variables, including precipitation seasonality, snow fraction, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), mean slope, soil water holding capacity, and the aridity index.

Results and Discussion: The analysis demonstrated that standardized drought propagation ratios decreased exponentially with increasing meteorological drought severity and intensity across all catchments, confirming the nonlinear nature of the process. The fitted exponential relationships yielded average coefficients of determination (R^2) of 0.43 for severity-based (R_S*) and 0.48 for intensity-based (R_I*) ratios, with over 85% of catchments showing statistically significant fits ($p < 0.05$). The sensitivity coefficients K_S and K_I exhibited considerable spatial variability, ranging from 1.08 to 2.29 and 0.92 to 1.77, respectively. The Moushang catchment showed the highest sensitivity (K_S= 2.29; K_I = 1.77), while the Dahaneh-Shur catchment showed the

***Corresponding author:** Mohammad Rostami Khalaj
Address: Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural ResourcesResearch and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran.
Tel: +989158165411
Email: m.rostamikhalaj@areeo.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

lowest (K_S = 1.08; K_I = 0.92). Corresponding R^2 values were 0.80 and 0.71 for Moushang, and 0.54 and 0.52 for Dahaneh-Shur, indicating a stronger and more predictable drought response in the more sensitive catchment.
Correlation analysis revealed a statistically significant negative relationship between K_S and snow fraction (fs) ($r = –0.30$, $p < 0.05$). This suggests that basins with a greater contribution from snowfall experience attenuated drought propagation, likely because snow accumulation and gradual melt delay and buffer runoff deficits. Other environmental variables-including NDVI, slope, soil water holding capacity, precipitation seasonality, and the aridity index-showed weak or non-significant correlations with K_S and K_I. These findings indicate that catchments with lower snow fraction, sparse vegetation, and limited soil water storage are more vulnerable to intensified drought propagation, where even moderate meteorological droughts can lead to severe streamflow reductions. Conversely, catchments with higher snow storage or infiltration capacity demonstrate greater hydrological resilience.

Conclusion: This study establishes an event-based framework for quantifying drought propagation dynamics from meteorological to hydrological systems. The results confirm that the transformation follows a nonlinear exponential pattern, governed primarily by drought severity and catchment characteristics. The derived sensitivity coefficients (K_S and K_I) effectively capture catchment responsiveness, serving as practical indicators for identifying vulnerable areas. Catchments such as Moushang, Sabi–Kal Salar, Mah Nesa, and Beirut, with high K_S and K_I values, exhibit a strong and rapid hydrological response to meteorological droughts. These basins require prioritized attention in drought risk management, including enhanced monitoring, optimized reservoir operations, and regulated water use during drought periods. In contrast, basins like Dahaneh-Shur, with lower sensitivity, possess greater inherent buffering capacity. Overall, the findings underscore the value of event-scale analysis for elucidating drought propagation mechanisms, especially in data-limited semi-arid regions. Integrating key environmental controls such as snow dynamics can significantly improve drought forecasting and resilience planning. Future work should extend this analysis to larger spatiotemporal domains and incorporate remote sensing data and process-based hydrological modeling to further unravel the physical drivers of drought propagation.

Ethical Considerations

Data availability statement: The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Funding: This research was conducted as an independent research and part of the results of a research project and has received financial support from the Jahad-e-Keshavarzi Organization of Razavi Khorasan Province

Authors' contribution: **Mohammad Rostami Khalaj:** Conceptualization, conducting software and statistical analyses, writing the initial draft of the article. **Hamzeh Noor:** Supervision, analysis of relevant information, editing and revising the article, verification of results. **Ali Bagherian Kalat:** Collaboration in data preparation, information gathering, and field visits.

Conflicts of interest: The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Acknowledgment: The authors sincerely appreciate the cooperation and financial and scientific support provided by the Jahad-e-Keshavarzi Organization of Razavi Khorasan Province and the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute in conducting this study. This article is derived from a research project with the approved code 020220-02015-0202-006-29-148, which was carried out with the financial and technical backing of these two esteemed institutions.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

ارزیابی پاسخ حوزه‌های آبخیز به خشکسالی هواشناسی در فرآیند انتشار به خشکسالی هیدرولوژیکی در مقیاس رخداد

محمد رستمی خلج*[۱]، حمزه نور[۲]، علی باقریان کلات[۳]

۱. استادیار، گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران، m.rostamikhalaj@areeo.ac.ir

۲. دانشیار، گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران، h.noor@areeo.ac.ir

۳. استادیار، گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران، alibagheriankalat@gmail.com

مشخصات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: ۱۳ آبان ۱۴۰۴
بازنگری: ۲۹ آذر ۱۴۰۴
پذیرش: ۳۰ آذر ۱۴۰۴
انتشار برخط: ۳۰ دی ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:
تغییر اقلیم، شدت خشکسالی، ضریب حساسیت حوضه، مدل نمایی انتشار.

چکیده

خشکسالی از مهم‌ترین بلایای اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که با ایجاد کمبود منابع آب، اثرات گسترده‌ای بر محیطزیست و اقتصاد تاثیر می‌گذارد. درک چگونگی انتقال خشکسالی از بخش هواشناسی به هیدرولوژیکی، یکی از گام‌های اساسی در مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی ارتباط ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی با نسبت انتشار در مقیاس رخداد و ارزیابی حساسیت حوزه‌های آبخیز استان خراسان رضوی در برابر فرآیند انتشار خشکسالی است. برای این منظور، داده‌های بارش و رواناب ماهانه ۴۶ حوضه در بازه زمانی ۲۹ ساله مورد استفاده قرار گرفت و شاخص‌های SPI و SSI محاسبه شدند. سپس روابط نمایی بین نسبت‌های انتشار استاندارد و ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی برازش داده شد و ضرایب حساسیت برای هر ایستگاه استخراج شد. نتایج نشان داد که در تمامی حوضه‌ها نسبت انتشار با افزایش شدت و حدت خشکسالی هواشناسی به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. میانگین ضرایب تعیین برای روابط شدت و حدت به‌ترتیب برابر ۰/۴۳ و ۰/۴۸ بوده و در بیش از ۸۵ درصد از حوضه‌ها از نظر آماری معنی‌دار است. حوضه موشنگ با ضریب حساسیت شدت ۲/۲۹ و ضریب حساسیت حدت ۱/۷۷ به‌عنوان حساس‌ترین و حوضه دهنه‌شور با ضریب حساسیت شدت ۱/۰۸ و ضریب حساسیت حدت ۰/۹۲ به‌عنوان پایدارترین حوضه شناسایی شد. هم‌چنین بین کسری برف و ضریب حساسیت شدت رابطه منفی معنی‌داری مشاهده شد که نشان می‌دهد افزایش سهم بارش برفی موجب کاهش شدت انتشار می‌شود. یافته‌ها حاکی از ناهمگنی مکانی قابل‌توجه در رفتار حوضه‌ها و نقش مؤثر شرایط اقلیمی و فیزیوگرافی در کنترل فرآیند انتشار خشکسالی است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای شناسایی حوضه‌های بحرانی و تدوین راهبردهای مدیریت تطبیقی منابع آب در مناطق خشک ایران باشد.

استناد: رستمی خلج، محمد، نور، حمزه و باقریان کلات، علی. (۱۴۰۴). ارزیابی پاسخ حوزه‌های آبخیز به خشکسالی هواشناسی در فرآیند انتشار به خشکسالی هیدرولوژیکی در مقیاس رخداد. *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۳(۴)، ۴۱-۵۶.

DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران

© نویسندگان

* **نویسنده مسئول:** محمد رستمی خلج

نشانی: گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

تلفن: ۰۹۱۵۸۱۶۵۴۱۱

پست الکترونیکی: m.rostamikhalaj@areeo.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و فراگیرترین بلایای طبیعی است که در تمامی مناطق اقلیمی، با شدت و بسامد متفاوت، بر منابع آب، کشاورزی و محیط زیست اثر می‌گذارد. این پدیده در مقایسه با سایر مخاطرات اقلیمی، به‌دلیل ماهیت تدریجی، گستردگی فضایی و تداوم زمانی، آثار اجتماعی و اقتصادی عمیق‌تری بر جای می‌گذارد (Hosseini et al., 2020 ؛Wu et al., 2022). افزایش گرمایش جهانی و تغییر الگوهای بارش، موجب شده است که چرخه بروز خشکسالی‌ها از نظر فراوانی، مدت و شدت دچار دگرگونی شود و در بسیاری از مناطق، از جمله ایران، روندهای افزایشی در وقوع خشکسالی مشاهده شود (Abro et al., 2022 ؛Tareke, 2025).

بیش‌تر پژوهش‌های گذشته رابطه‌ی بین شاخص‌های SPI و SSI را در مقیاس زمانی ماهانه یا فصلی بررسی کرده‌اند، اما تحلیل در مقیاس رخداد می‌تواند تصویر دقیق‌تری از ویژگی‌های هر خشکسالی و نحوه‌ی پاسخ سیستم هیدرولوژیکی ارائه دهد (Huang et al., 2017؛ Houmma et al., 2025). در این رویکرد، شاخص‌هایی مانند شدت و حدت برای هر رخداد محاسبه می‌شود و نسبت انتشار شدت و حدت به‌عنوان سنجه‌ای از میزان تضعیف یا تشدید خشکسالی در طی انتقال به کار می‌رود. چنین تحلیلی به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک ایران که در معرض تغییرات بارش و فشارهای انسانی هستند، کاربردی و ضروری است.

مطالعه انتشار خشکسالی[1] یا بررسی چگونگی تبدیل خشکسالی هواشناسی به هیدرولوژیکی، در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Zhou et al., 2021). درک صحیح این فرآیند به مدیران منابع آب کمک می‌کند تا رابطه‌ی بین کاهش بارش و کاهش جریان رودخانه‌ها را درک کنند و سامانه‌های هشدار زودهنگام و برنامه‌ریزی تخصیص آب را بهبود نمایند (Barker et al., 2016؛ Ding et al., 2021). از آن‌جاکه پاسخ سیستم‌های هیدرولوژیکی به کمبود بارش می‌تواند با تأخیر زمانی و با تغییر در شدت رخ دهد، بررسی دقیق این رابطه در مقیاس رخداد[2] از اهمیت زیادی برخوردار است (Huang et al., 2017).

مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که شدت و تأخیر در انتشار خشکسالی از هواشناسی به هیدرولوژیکی تحت‌تأثیر عواملی مانند نوع اقلیم، میزان بارش فصلی، سهم برف، شیب زمین و ظرفیت نگهداری آب خاک است (Wu et al., 2022؛ Zeleňáková et al., 2025). Barker et al., (2016) و Ding et al., (2021) با استفاده از شاخص‌های استانداردشده SPI و SSI، تفاوت‌های چشم‌گیری را در نسبت انتشار در مناطق مرطوب و خشک چین و اروپا گزارش کردند. هم‌چنین Wu et al., (2022) بیان کردند که گرمایش جهانی موجب افزایش احتمال خشکسالی‌های هم‌زمان هواشناسی–هیدرولوژیکی و تسریع انتقال اثرات آن شده است.

در ایران مطالعات متعددی به ارزیابی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های استانداردشده SPI و SSI پرداخته‌اند (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۴؛ کوشکی و همکاران، ۱۳۹۶؛ علیمیرزایی و همکاران، ۱۳۹۷؛ آذرخشی و فرزادمهر، ۱۴۰۰). نتایج نشان داده که رابطه بین دو نوع خشکسالی در استان‌ها و حوضه‌های مختلف کشور، از نظر شدت و تأخیر، ناهمگن است. برای مثال، در حوضه کرخه رابطه‌ی خطی ضعیف و در خراسان رضوی و اردبیل همبستگی مثبت ولی با تأخیر زمانی متفاوت گزارش شده است (آوند و همکاران، ۱۴۰۳؛ فرجی عموقین و همکاران، ۱۴۰۳). چنین اختلاف‌هایی نشان می‌دهد که عوامل فیزیکی و انسانی در کنترل انتشار نقش چشمگیری دارند.

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در تحلیل خشکسالی‌های ترکیبی، هنوز شناخت کافی از رابطه بین ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و نسبت انتشار در مقیاس رخداد در حوضه‌های ایران وجود ندارد. اغلب مطالعات داخلی، میانگین ماهانه یا روند کلی شاخص‌ها را بررسی کرده‌اند و از تحلیل دینامیک رخدادها، شامل شدت، مدت، و پاسخ هیدرولوژیکی غفلت شده است (رضی و شکوهی، ۱۳۹۹؛ شاکر سوره و اسدی، ۱۳۹۸). بنابراین، ارزیابی دقیق همبستگی بین ویژگی‌های رخدادهای خشکسالی هواشناسی و میزان انتشار آن‌ها به حوضه‌های هیدرولوژیکی می‌تواند گامی مؤثر در تبیین رفتار هیدرولوژیکی مناطق مختلف کشور باشد.

مرور پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهد که انتشار خشکسالی از هواشناسی به هیدرولوژیکی پدیده‌ای پیچیده و چندعاملی است که تحت تأثیر هم‌زمان ویژگی‌های اقلیمی، فیزیوگرافی، پوشش گیاهی و رفتار ذخیره‌ای حوضه قرار دارد. مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف جهان نشان داده‌اند که شدت و تأخیر انتشار در اقلیم‌های متفاوت، رفتارهای ناهمگنی دارد و گرمایش جهانی نیز این فرآیند را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تشدید کرده است. در ایران نیز یافته‌های پژوهش‌ها حاکی از آن است که رابطه بین شاخص‌های SPI و SSI در حوضه‌های مختلف از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند و تفاوت‌های مکانی قابل‌توجهی در واکنش هیدرولوژیکی حوضه‌ها نسبت به کمبود بارش وجود دارد. در عین حال، بیش‌تر مطالعات داخلی تاکنون بر تحلیل سری زمانی ماهانه یا فصلی متمرکز بوده‌اند و

[1] Drought Propagation
[2] Event Scale

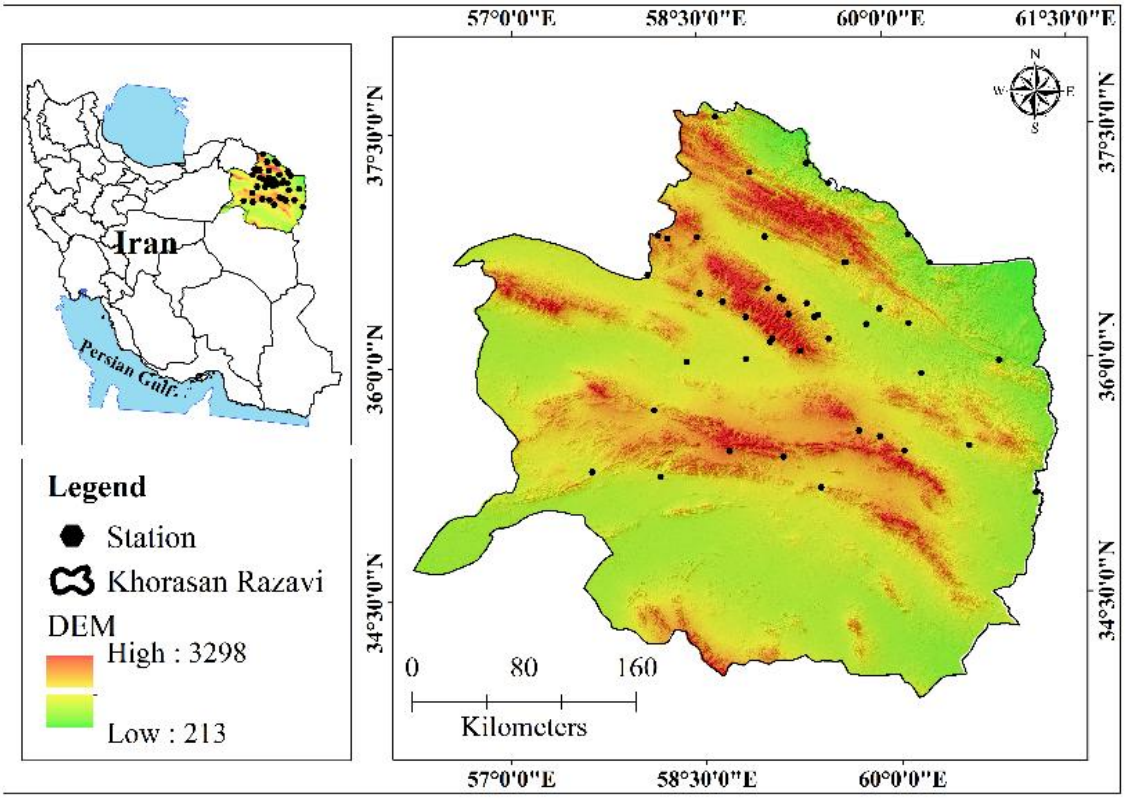
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

کم‌تر به بررسی رخدادمحور ویژگی‌های خشکسالی پرداخته‌اند؛ در نتیجه، شناخت دقیقی از نحوه تعامل شدت، حدت و مدت خشکسالی هواشناسی با فرآیند انتشار در مقیاس رخداد و در سطح حوزه‌های آبخیز ایران فراهم نشده است. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر ارزیابی ارتباط ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی با نسبت انتشار در سطح رخداد در برخی از حوضه‌های استان خراسان رضوی است. در این مطالعه با استفاده از شاخص‌های SPI و SSI، نسبت‌های انتشار شدت و حدت محاسبه و رابطه آن‌ها با ویژگی‌های رخدادهای هواشناسی شامل مدت، شدت و فراوانی بررسی شده است. نوآوری این پژوهش در تمرکز بر تحلیل در مقیاس رخداد و به‌کارگیری رویکرد رویداد–محور برای درک پویایی انتقال خشکسالی در سامانه‌های هیدرولوژیکی ایران است که می‌تواند مبنایی برای بهبود هشدار زودهنگام و مدیریت ریسک خشکسالی در سطح حوزه‌های آبخیز کشور فراهم آورد.

مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی در شمال‌شرق ایران با مساحتی حدود ۱۱۸ هزار کیلومترمربع، بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳′ ۳۰° تا ۳۷′ ۴۰° شمالی و طول‌های ۵۶° تا ۶۱° شرقی قرار دارد. این استان به‌دلیل گستردگی زیاد و تفاوت قابل‌توجه در ارتفاع (از کم‌تر از ۳۰۰ متر تا بیش از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا) دارای تنوع اقلیمی بالایی است؛ به‌طوری‌که از نواحی نیمه‌خشک در جنوب و شرق تا اقلیم‌های سرد و کوهستانی در شمال و غرب امتداد می‌یابد. متوسط بارندگی سالانه استان حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که به‌صورت زمانی و مکانی نابرابر توزیع شده و عمدتا در فصول سرد سال رخ می‌دهد. وجود رشته‌کوه‌های بینالود و هزارمسجد در بخش‌های شمالی و غربی نقش مهمی در توزیع بارش و شکل‌گیری رواناب‌های سطحی دارد (آذرخشی و فرزادمهر، ۱۴۰۰). در این مطالعه از داده‌های هواشناسی و هیدرومتری ۴۶ حوضه در استان خراسان رضوی که دارای آمار کافی بودند و ایستگاه‌های آن‌ها پراکنش مکانی مناسبی داشتند استفاده شد. موقعیت محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های هیدرومتری در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه های هیدرومتری منتخب

Figure 1- Study area and location of selected hydrometric stations

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

روش تحقیق

به‌طور خلاصه روش پژوهش حاضر به‌صورت زیر بوده است:

۱- جمع‌آوری و تهیه اطلاعات مورد نیاز

۲- محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

۳- شناسایی رخدادهای خشکسالی (مدت، شدت و حدت)

۴- جفت‌سازی رخدادهای هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از روش Huang و همکاران، (۲۰۱۷) و Ding و همکاران، (۲۰۲۱)

۵- محاسبه نسبت‌های انتشار خشکسالی

۶- استخراج متغیرهای محیطی حوضه‌ها برای بررسی نقش شرایط فیزیکی و اقلیمی در کنترل انتشار خشکسالی

داده‌های مورد استفاده شامل بارش ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی و دبی متوسط ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری در خروجی حوضه بوده است. دوره آماری مورد بررسی ۲۹ ساله (۱۳۶۷–۱۳۹۵) است. داده‌های بارش از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های جریان از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ و کنترل کیفی آن‌ها با استفاده از آزمون‌های تداوم، نرمال بودن و یکنواختی انجام شد. برای هم‌پوشانی زمانی، تنها ایستگاه‌هایی انتخاب شدند که در طول دوره آماری دارای حداقل ۹۵ درصد داده‌های معتبر باشند. پس از یکپارچه‌سازی داده‌ها، دو سری زمانی ماهانه شامل بارش و دبی ثبت شده در ایستگاه برای محاسبات شاخص‌ها استفاده شد. برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی از دو شاخص استاندارد شده SPI[1] و SSI[2] استفاده شد که نخستین‌بار توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳) معرفی شد. این شاخص‌ها بر اساس برازش تابع توزیع گاما بر داده‌های بارش یا دبی و سپس تبدیل احتمالات به مقادیر نرمال استاندارد محاسبه می‌شوند. شاخص SPI با استفاده از داده‌های بارش و شاخص SSI بر اساس داده‌های دبی در مقیاس ماهه محاسبه شد. در این مطالعه از بسته‌های SPEI و fitdistrplus در محیط نرم‌افزاری R استفاده شد. مقادیر شاخص کم‌تر از ۱- به‌عنوان شرایط خشکسالی در نظر گرفته شد. به منظور شناسایی رخدادهای خشکسالی، ماه‌هایی که مقدار SPI یا SSI کم‌تر از آستانه بودند به‌عنوان دوره‌های خشکسالی در نظر گرفته شدند. هر رشته زمانی از ماه‌های متوالی با مقدار شاخص کم‌تر از ۱- یک رخداد خشکسالی[3] محسوب شد. برای هر رخداد، سه ویژگی اصلی شامل مدت[4]، شدت و حدت محاسبه شد. شدت به‌صورت مجموع کمبود شاخص نسبت به آستانه ۱- و حدت به‌صورت میانگین شدت در طول رخداد محاسبه شد. روابط آن‌ها به‌صورت زیر است:

$$S = \sum_{t=1}^{D} \left| (X_t + 1) \right| \qquad (۱)$$

$$I = \frac{S}{D} \qquad (۲)$$

که در آن S= شدت خشکسالی، I= حدت خشکسالی، X_t= مقدار شاخص در ماه t. این محاسبات جداگانه برای هر دو شاخص SPI و SSI انجام شده و نتایج در قالب رخدادهای هواشناسی و هیدرولوژیکی ثبت شدند. برای بررسی فرآیند انتشار خشکسالی از مرحله هواشناسی به هیدرولوژیکی، رخدادهای دو شاخص SPI و SSI بر اساس ترتیب زمانی با یکدیگر زوج‌سازی[5] شدند. هر رخداد هیدرولوژیکی تنها زمانی قابل نسبت‌دادن به یک رخداد هواشناسی است که سه شرط زیر برقرار باشد: الف) آغاز رخداد هیدرولوژیکی باید پس از آغاز رخداد هواشناسی و در بازه زمانی حداکثر ۱ تا ۳ ماهه رخ دهد. ب) در صورت وجود چند رخداد هواشناسی که در این بازه زمانی قرار گیرند، رخدادی انتخاب می‌شود که بیش‌ترین همپوشانی زمانی را با رخداد هیدرولوژیکی داشته باشد و در صورت برابر بودن همپوشانی، رخداد با شدت بالاتر به‌عنوان رخداد منشأ انتخاب می‌شود. ج) اگر هیچ رخداد هواشناسی در بازه ۱ تا ۳ ماه پیش از رخداد هیدرولوژیکی وجود نداشته باشد، آن رخداد هیدرولوژیکی غیرقابل زوج‌سازی محسوب می‌شود و از تحلیل انتشار کنار گذاشته می‌شود. (Huang et al., 2017; Xiong et al., 2025; Ding et al., 2021). پس از تطبیق رخدادها، ویژگی‌های متناظر (شدت و حدت) برای هر جفت رخداد استخراج شد و نسبت‌های انتشار طبق روابط زیر محاسبه شد:

[1] Standardized Precipitation Index
[2] Standardized Streamflow Index
[3] Drought Event
[4] Duration
[5] Event Pairing

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

$$RS = \frac{S_H}{S_M} \quad (۳)$$

$$RI = \frac{I_H}{I_M} \quad (۴)$$

که در آن S_M= شدت خشکسالی هواشناسی و I_M= حدت خشکسالی هواشناسی، S_H= شدت خشکسالی هیدرولوژیکی و I_H= حدت خشکسالی هیدرولوژیکی هستند.

برای یکپارچه‌سازی دامنه مقادیر نسبت‌های انتشار و بهبود امکان مقایسه میان حوضه‌ها، از تبدیل خطی پیشنهادی Xiong et al. (2025)استفاده شد. در این روش، مقادیر خام نسبت انتشار شدت و حدت که دامنه‌ای باز و نامتقارن دارند، به بازه محدود ۱− تا ۱ نگاشته می شوند. این تبدیل علاوه‌بر محدودسازی دامنه و جلوگیری از اثرگذاری بیش‌ازحد مقادیر بسیار بزرگ، سبب تقارن آماری حول صفر می‌شود؛ به‌طوری‌که مقادیر مثبت نشان‌دهنده تشدید انتشار و مقادیر منفی بیانگر تضعیف آن هستند. برخلاف نسبت‌های اصلی که توزیع آن‌ها معمولاً چولگی زیاد دارد، شکل نرمال‌شده R_S^* و R_I^* دارای پراکندگی یکنواخت‌تر بوده و برای تحلیل همبستگی و رگرسیون مناسب‌ترند.

$$R_S^* = \begin{cases} \frac{RS-1}{RS}, & RS \geq 1 \\ RS-1 & RS < 1 \end{cases} \quad (۵)$$

$$R_I^* = \begin{cases} \frac{RI-1}{RI}, & RI \geq 1 \\ RI-1 & RI < 1 \end{cases} \quad (۶)$$

مقادیر میانگین R_S^* و R_I^* برای هر حوضه محاسبه شد. مقادیر مثبت این دو شاخص بیانگر تشدید خشکسالی در طی انتشار و مقادیر منفی آن‌ها نشان‌دهنده تضعیف انتشار هستند.

به‌منظور بررسی نقش شرایط فیزیکی و اقلیمی حوضه در فرآیند انتشار خشکسالی، مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی شامل شیب متوسط حوضه (درصد)، شاخص فصلی بودن بارش (Ps)، کسری برف (fs)، شاخص خشکی (Ai)، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)و ظرفیت نگهداری آب خاک (SWC) استخراج شد. این متغیرها بر اساس مطالعات پیشین (Huang et al., 2017; Houmma et al., 2025) از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر انتقال خشکسالی از مرحله هواشناسی به هیدرولوژیکی شناخته شده‌اند.

شاخص فصلی‌بودن بارش به‌منظور سنجش تمرکز زمانی بارش در طول سال محاسبه شد. این شاخص بیانگر درجه ناهمگنی بارش‌های ماهانه در یک سال بوده و از نسبت مجموع قدرمطلق اختلاف بارش ماهانه از میانگین ماهانه به بارش سالانه به‌دست می‌آید. مقدار پایین Ps (نزدیک صفر) نشان‌دهنده توزیع یکنواخت بارش در طول سال است، در حالی‌که مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده تمرکز فصلی بیش‌تر و وقوع بخش عمده‌ای از بارش در چند ماه محدود سال است. هم‌چنین، کسری برف به‌عنوان نسبت کل بارش به صورت برف به کل بارش سالانه تعریف شد. این شاخص نشان‌دهنده سهم برف از بارش کل بوده و بر اساس داده‌های دما و آستانه حرارتی صفر درجه سلسیوس ($T < 0°C$) برآورد شد؛ به‌طوری‌که ماه‌هایی که میانگین دمای آن‌ها کم‌تر از صفر است به‌عنوان بارش برفی در نظر گرفته شدند.

برای سنجش وضعیت خشکی اقلیم، شاخص خشکی محاسبه شد که از نسبت تبخیر و تعرق بالقوه به بارندگی سالانه به‌دست می‌آید. افزایش مقدار Ai نشان‌دهنده کاهش رطوبت و در نتیجه خشکی بیش‌تر منطقه است. شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) نیز به‌عنوان نمایه‌ای از وضعیت پوشش گیاهی و میزان سبزینگی سطح زمین از داده‌های ماهواره‌ای بلندمدت MODIS استخراج شد. در نهایت، ظرفیت نگهداری آب خاک که بیانگر توان خاک در ذخیره رطوبت و مقاومت در برابر تنش‌های خشکی است، از داده‌های جهانی خاک (FAO SoilGrids) برای محدوده مورد مطالعه استخراج شد. مقادیر بالای SWC نشان‌دهنده توان بالاتر خاک در کاهش اثرات کمبود بارش و در نتیجه تضعیف فرآیند انتشار خشکسالی است.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که در هر حوضه، نسبت انتشار در مقیاس رخداد به‌صورت کاهشی نمایی با افزایش شدت یا حدت خشکسالی هواشناسی تغییر می‌کند (شکل‌های ۲ و ۳). به بیان دیگر، با افزایش شدت یا حدت خشکسالی هواشناسی مقدار نسبت انتشار استاندارد ($\overline{R_S^*}$ و $\overline{R_I^*}$) تمایل به کاهش دارد. این رفتار را می‌توان با روابط نمایی زیر بیان کرد:

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

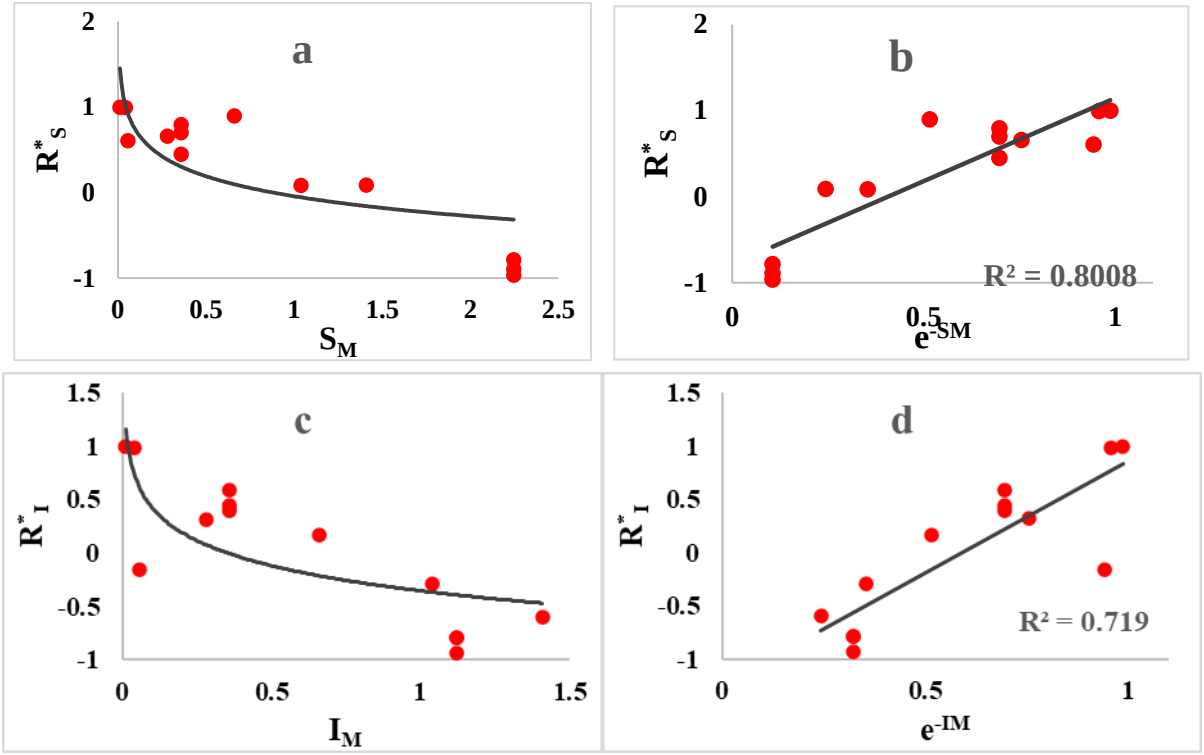
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

$$R_S^* = K_S e^{-S_M} - b_s \quad (۷)$$

$$R_I^* = K_I e^{-I_M} - b_I \quad (۸)$$

که در آن، ضرایب K_S و K_I به‌ترتیب بیانگر حساسیت حوضه به تغییرات شدت و حدت خشکسالی هواشناسی هستند. با توجه به این‌که در شرایطی که شدت یا حدت خشکسالی هواشناسی بسیار زیاد می‌شود (یعنی خشکسالی بسیار شدید رخ می‌دهد)، مقدار نسبت انتشار به حداقل مقدار خود (حدود ۱-) میل می‌کند، بنابراین مقادیر ثابت $b_I=b_S$ ۱-= در نظر گرفته شد (Xiong et al., 2025).

این ضرایب در واقع نرخ تغییر نسبت انتشار را در پاسخ به تغییرات شاخص خشکسالی هواشناسی نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بزرگ‌تر K_S یا K_I به معنای حساسیت بالاتر حوضه در برابر تغییرات خشکسالی و در نتیجه تمایل بیش‌تر به تشدید انتشار است در مطالعات Xiong et al., 2025 این موضوع به روشنی بیان شده است لذا برای شناسایی حوضه‌های حساس می‌توان از این شاخص‌ها استفاده کرد. نتایج تحلیل برازش نمایی بین نسبت‌های انتشار استاندارد و ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی نشان داد (شکل های ۲ و ۳) که حوضه موشنگ با مقادیر K_S= ۲/۲۹ و K_I= ۱/۷۷ به‌عنوان حساس‌ترین حوضه شناسایی شد، در حالی‌که حوضه دهنه‌شور با K_S= ۱/۰۸ و K_I= ۰/۹۲ کم‌ترین حساسیت را نسبت به انتشار خشکسالی از نوع هواشناسی به هیدرولوژیکی نشان داد. این امر نشان می‌دهد که در موشنگ، تغییرات شدت و حدت خشکسالی هواشناسی به‌صورت مستقیم و با پاسخ سریع‌تری در سیستم هیدرولوژیکی بازتاب می‌یابد. در حالی‌که حوضه‌هایی با مقادیر پایین‌تر، مانند دهنه‌شور، از پایداری هیدرولوژیکی بیش‌تر و ظرفیت تعدیل بالاتر برخوردارند. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که تفاوت‌های ساختاری و اقلیمی حوضه‌ها، نظیر شرایط توپوگرافی، ظرفیت ذخیره خاک و نوع جریان‌های سطحی و زیرسطحی، تأثیر چشمگیری بر شدت و نحوه انتشار خشکسالی دارند که این موضع با مطالعات Zeleňáková et al., 2025 مطابقت دارد.

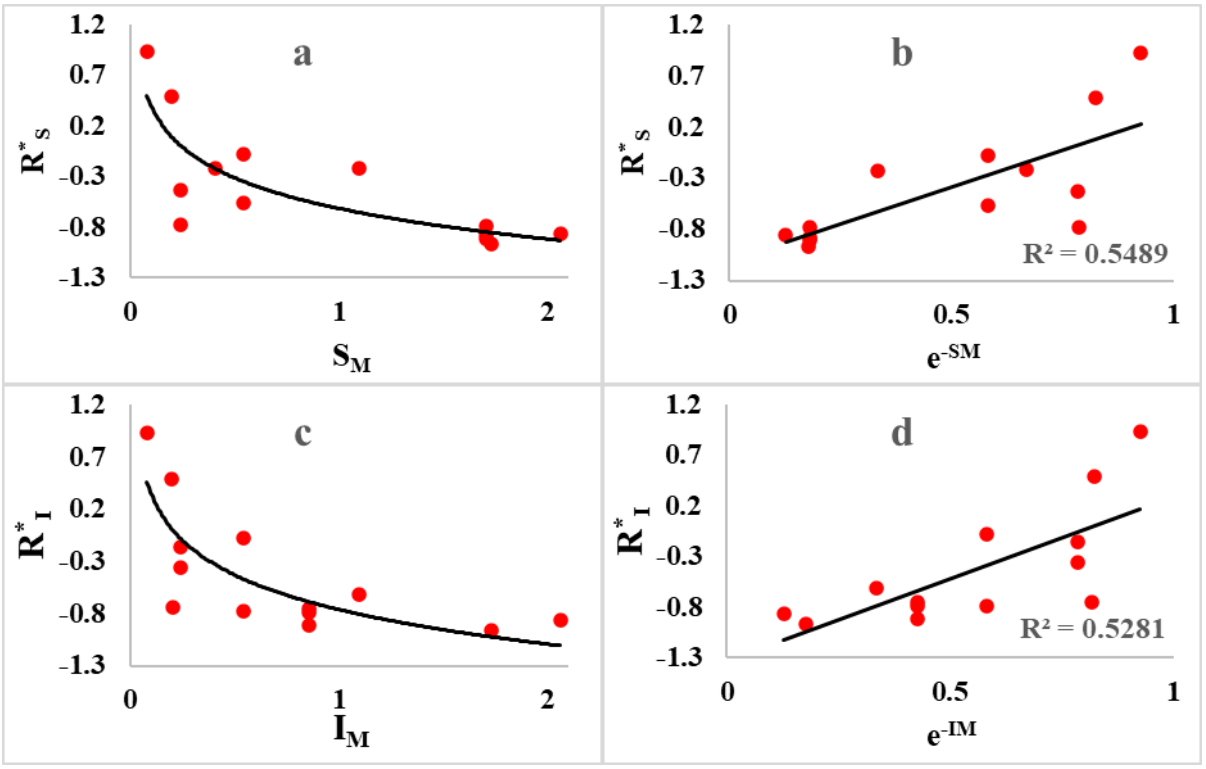


شکل ۲- رابطه غیرخطی بین ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و شاخص‌های انتشار خشکسالی در حوضه موشنگ (c–a) و نمودارها بهترین منحنی برازش نمایی و ضریب تعیین (R^2) پس از خطی کردن رابطه (d –b)

Figure 2- The nonlinear relationship between meteorological drought characteristics and drought propagation indices in the Moushang catchment (a–c), and the best-fitted exponential curve and coefficient of determination (R^2) after linearization (b–d)

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]



شکل ۳- رابطه غیرخطی بین ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و شاخص‌های انتشار خشکسالی در حوضه دهنه شور (a–c) و نمودارها بهترین منحنی برازش نمایی و ضریب تعیین (R^2) پس از خطی کردن رابطه (b–d)

Figure 3- The nonlinear relationship between meteorological drought characteristics and drought propagation indices in the Dahaneh-Shur catchment (a–c), and the best-fitted exponential curve and coefficient of determination (R^2) after linearization (b–d)

براساس برازش روابط فوق برای تمامی ایستگاه‌ها، میانگین ضرایب تعیین (R^2) برای روابط $\overline{R_S^*}$ و $\overline{R_I^*}$ به‌ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۴۸ محاسبه شد که در بیش از ۸۵ درصد از حوضه‌ها از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بودند. مقادیر محاسبه‌شده برای K_S و K_I در جدول (۱) آورده شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که در تمامی حوضه‌های استان خراسان رضوی، انتشار خشکسالی از نوع هواشناسی به هیدرولوژیکی دارای رفتار غیرخطی و نمایی است؛ به‌طوری‌که نسبت انتشار در مقیاس رخداد با افزایش شدت یا حدت خشکسالی هواشناسی کاهش می‌یابد. این یافته با نتایج پژوهش‌های Huang et al. (2017)، Ding et al., (2021) و Wu et al., (2022) همسو است که در آن‌ها نیز نشان داده شد در بیش‌تر مناطق نیمه‌خشک، ارتباط بین شاخص‌های SPI و SSI به‌صورت نمایی و کاهشی با افزایش شدت رخداد تبیین می‌شود. در واقع، زمانی‌که خشکسالی هواشناسی شدیدتر می‌شود، سیستم هیدرولوژیکی ظرفیت محدودی برای پاسخ‌گویی دارد و پس از آستانه‌ای مشخص، تغییرات بارش اثر متناسبی بر جریان‌ها ندارد (Houmma et al., 2025؛ Barker et al., 2016).

توزیع مقادیر KS و KI نشان‌دهنده ناهمگنی قابل‌توجه در واکنش حوضه‌ها به انتشار خشکسالی است؛ به‌طوری‌که مقادیر KS در بازه حدود ۱/۰۸ تا ۲/۲۹ قرار دارند و KI در بازه حدود ۰/۹۲ تا ۱/۹ مشاهده می‌شود. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه بعد از ایستگاه موشنگ ایستگاه های صبی- کال سالار، ماه نسا و بیروت حساسترین حوضه ها نسبت به خشکسالی هواشناسی هستند. این دسته از حوضه‌ها به‌دلیل مقادیر بالای شاخص‌های حساسیت، بیش‌ترین پتانسیل برای تشدید اثر خشکسالی هواشناسی در مرحله هیدرولوژیکی را نشان می دهند و بنابراین در الویت اقدامات مدیریت منابع آب و طراحی سیستم‌های هشدار زودهنگام قرار می‌گیرند. تحلیل ضرایب حساسیت نشان داد که حوضه‌های واقع در نواحی با بارش کم‌تر، تبخیر بالاتر و پوشش گیاهی ضعیف‌تر، مقادیر KS و KI بیش‌تری دارند. این امر نشان‌دهنده واکنش سریع‌تر جریان‌های سطحی به کمبود بارش و ظرفیت پایین‌تر این مناطق در ذخیره و تعدیل آب است که این موضوع با مطالعات Hosseini et al. (2020) و Abro et al. (2022) مطابقت دارد. از سوی دیگر، مناطق مرتفع‌تر با سهم قابل‌توجه بارش برفی تمایل به کاهش مقادیر KS دارند.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

جدول ۱- مقادیر ضرایب حساسیت KS و KI در ایستگاه های مختلف

Table 1- Sensitivity coefficients (K_S and K_I) for different hydrological stations

ردیف	حوضه	K_S	K_I	ردیف	حوضه	K_S	K_I
1	اریه- چهارباغ	1.82	1.58	24	سرآسیاب شاندیز	1.84	1.39
2	امامزاده-رادکان	1.97	1.90	25	سنگدیوار	1.38	1.31
3	امامزاده میامی	1.51	1.60	26	شریف آباد- خالدار	1.62	1.62
4	اولنگ اسدی	1.56	1.50	27	صبی- کال سالار	2.20	1.70
5	ایرج آباد-ششطراز	1.78	1.70	28	صنوبر	1.64	1.48
6	آق دربند	*	*	29	طاغان	1.92	1.65
7	باغ عباسی	1.72	1.50	30	عیش آباد	1.79	1.18
8	بیروت	2.10	1.43	31	غارشیشه- بردو	1.45	1.59
9	تیمنک سفلی	1.67	1.68	32	قره تیکان	1.79	1.61
10	چشمه علی	1.40	1.16	33	کارده- بالادست	1.18	0.87
11	چکنه علیا	2.01	1.84	34	کپکان-گرنی	1.82	1.53
12	چهچهه	1.56	1.44	35	کرتیان	1.60	1.54
13	حاتم قلعه	1.82	1.59	36	کلاته رحمان	1.46	1.37
14	حسین آباد جنگل	1.71	1.73	37	کلاته منار	*	*
15	حصار-دهبار	1.98	1.38	38	کوشک آباد	1.69	1.35
16	دهنه شور- مشکان	1.08	0.92	39	گلستان-جاغرق	2.08	1.39
17	دوآب مزرعه	1.44	1.57	40	گلمکان	1.69	1.51
18	دولت آباد- خرم دره	1.77	1.55	41	ماه نسا	2.15	1.52
19	دیزباد علیا	1.74	1.36	42	مجموع دورود	1.61	1.36
20	روح آباد	*	*	43	محمد تقی بیگ	1.60	1.35
21	زرنده – اندراب	1.15	1.13	44	موشنگ	2.29	1.77
22	زشک	1.93	1.46	45	نشیب	1.94	1.53
23	زیر بند گلستان	1.20	0.98	46	ینگجه – آبشار	1.38	1.26

* حوضه‌هایی که تعدا رویداد خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی جفت شده کمی دارند و در محاسبات دخالت داده نشدند.

تحلیل همبستگی حساسیت خشکسالی با متغیرهای محیطی

برای پیونددادن حساسیت‌های انتشار با ویژگی‌های فیزیوگرافی و اقلیمی، همبستگی بین KS و KI و مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی شامل شاخص فصلی بودن‌بارش، کسری برف، NDVI، شیب متوسط، ظرفیت نگهداری آب خاک و شاخص خشکی محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد تنها همبستگی معنی‌دار (سطح معنی‌داری $p<0.05$) مربوط به ارتباط منفی بین KS و کسری برف است. این رابطه نشان می دهد در حوضه‌هایی که سهم برف از بارش بالاتر است، KS تمایل به کاهش دارد؛ به بیان دیگر سهم قابل‌توجه بارش به‌صورت برف می تواند موجب تضعیف انتشار شدت خشکسالی (کاهش تشدید هیدرولوژیکی) شود. ذخیره‌سازی و آزادسازی تدریجی برف که اثر کاهش بارش را به‌صورت نرم‌تر و با تأخیر در جریان‌ها مستهلک می‌کند می‌تواند دلیل این موضوع باشد.

سایر همبستگی‌ها بین KS و KI و متغیرهای فصلی‌بودن بارش، NDVI، شیب، ظرفیت خاک و شاخص خشکی ضعیف و از نظر آماری معنی‌دار نبودند (همه $p>0.05$). به‌عنوان مثال همبستگی KS با NDVI منفی و کم و همبستگی بین KI با کسری برف منفی و غیر معنی‌دار به‌دست آمد، هرچند الگوی تغییرات آن‌ها با مطالعات مشابه در ایران و سایر مناطق نیمه‌خشک سازگار است (امیری و پورقاسمی، ۱۳۹۸؛ کوشکی و همکاران، ۱۳۹۶). احتمالاً این ضعف در همبستگی ناشی از نقش ترکیبی عوامل انسانی (مانند برداشت آب‌های زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی و بهره‌برداری از سدها) است که در مدل‌های آماری ساده لحاظ نشده‌اند. همان‌طورکه رضی و شکوهی (۱۳۹۹) و شاکر سوره و اسدی (۱۳۹۸) نیز گزارش کرده‌اند، عوامل مدیریتی می‌توانند در برخی موارد اثر اقلیم را بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ها تعدیل یا حتی وارونه کنند.

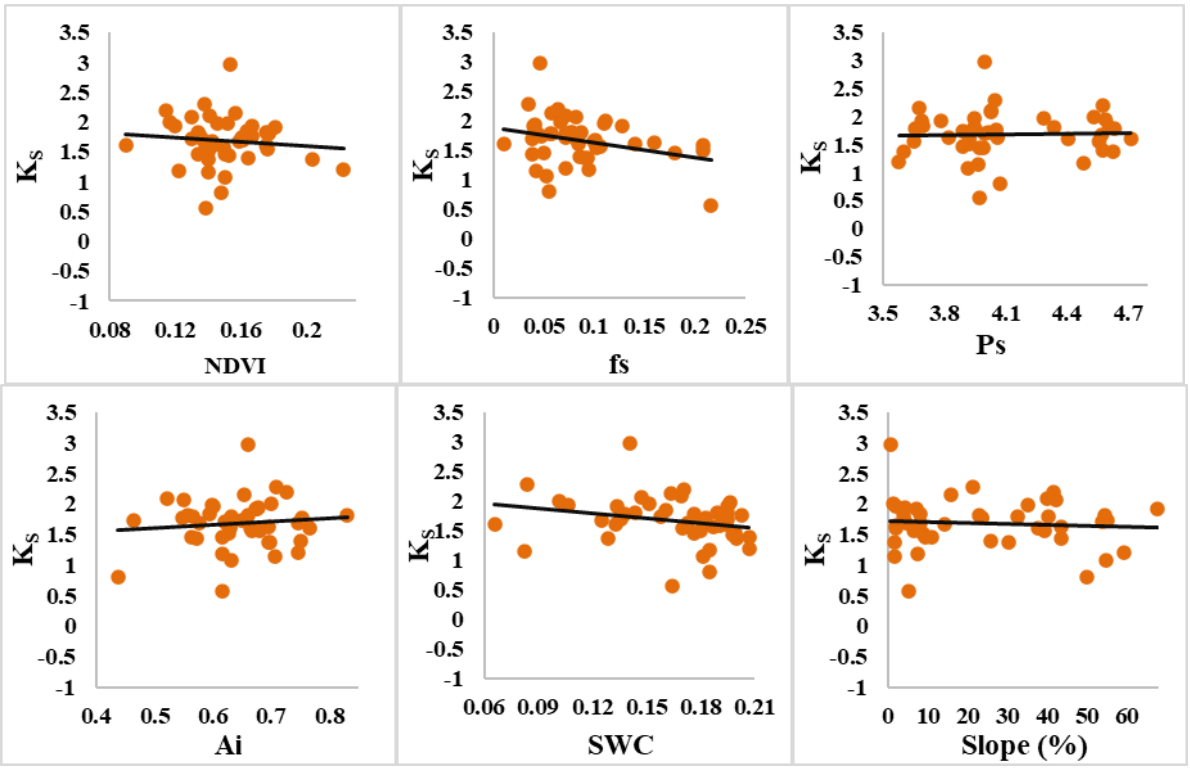
بررسی مقادیر متغیرهای محیطی در این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که ترکیبی از ویژگی‌های اقلیمی، پوشش گیاهی نسبتا پایین و ظرفیت محدود ذخیره خاک ممکن است توانمندی حوضه را در تعدیل اثر کاهش بارش کاهش داده و درنتیجه تشدید انتشار را تسهیل کند. از سوی دیگر، ایستگاه‌هایی با نسبت قابل‌توجه برف یا ظرفیت خاک بالاتر به‌طور کلی مقادیر KS کم‌تری دارند که با نتایج همبستگی منفی بین KS و کسری برف هم‌خوانی دارد (Houmma et al., 2025 ؛Wu et al., 2022). هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد در حوضه‌های حساس، باید پایش جریان‌ها رودخانه‌ای و مخازن ذخیره موجود در منطقه تقویت شود و برنامه‌های مدیریت مصرف و ذخیره آب بر اساس

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

پیش‌بینی خشکسالی بازنگری شود. در مناطقی که سهم بارش برف کم‌تر است و مقادیر K_S و K_I بالاتر است، حتی کاهش‌های کوچک بارش می‌تواند باعث کاهش چشمگیر جریان‌های سطحی شود (Houmma et al., 2025 ؛Salimi et al., 2021)؛ بنابراین این مناطق باید در اولویت برنامه‌های افزایش تاب‌آوری و مدیریت منابع آب قرار گیرند.

به‌طورکلی، نتایج این تحقیق با دیدگاه‌های جهانی درباره نقش عوامل اقلیمی و فیزیوگرافی در کنترل فرآیند انتشار خشکسالی هم‌خوانی دارد (Houmma et al., 2025 ؛Wu et al., 2022 ؛Huang et al., 2017)، اما بر اهمیت تحلیل‌های محلی و منطقه‌ای در کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران تأکید می‌کند. در این مناطق، اثرات انسانی و بهره‌برداری‌های ناپایدار از منابع آب می تواند مسیر طبیعی انتشار خشکسالی را دگرگون کند. بنابراین برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و ارتقای مدیریت منابع آب، لازم است تحلیل‌های آینده با داده‌های بلندمدت‌تر، مدل‌های دینامیکی و متغیرهای سنجش‌ازدوری (مانند دمای سطح زمین و رطوبت خاک) ترکیب شوند تا روابط علت–معلولی انتشار خشکسالی با جزئیات بیش‌تری روشن شود (فرجی عموقین و همکاران، ۱۴۰۳؛ آوند و همکاران، ۱۴۰۳).

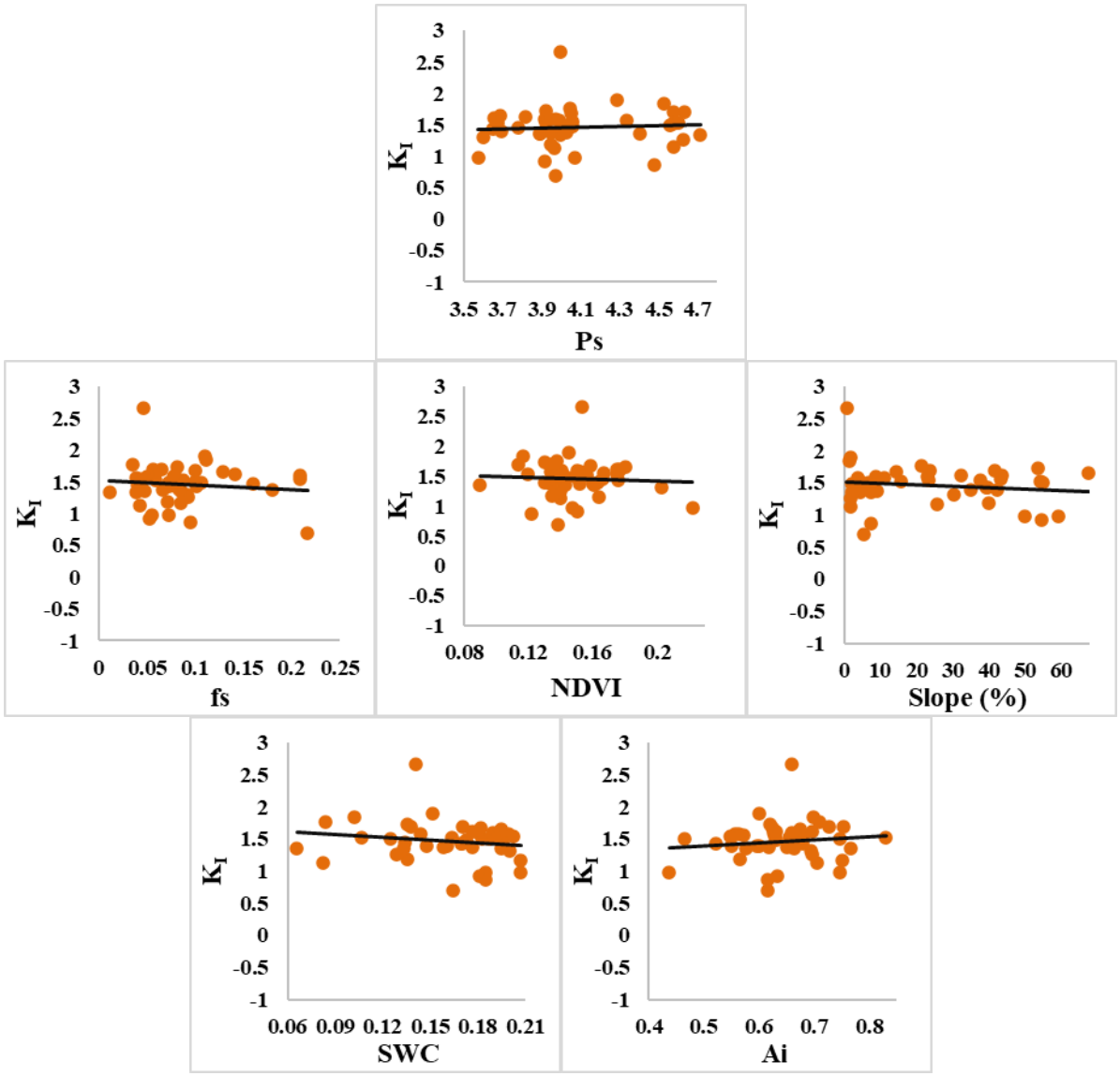


شکل ۴- رابطه بین ضریب حساسیت شدت خشکسالی و عوامل محیطی

Figure 4- Relationship between the drought severity sensitivity coefficient (K_s) and environmental factors

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]



شکل ۵- رابطه بین ضریب حساسیت حدت خشکسالی و عوامل محیطی

Figure 5- Relationship between the drought intensity sensitivity coefficient (K_i) and environmental factors

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که انتشار خشکسالی از نوع هواشناسی به هیدرولوژیکی در حوضه‌های استان خراسان رضوی دارای رفتاری غیرخطی و نمایی است و نسبت‌های انتشار در مقیاس رخداد با افزایش شدت و حدت خشکسالی هواشناسی کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که با تشدید خشکسالی هواشناسی، پاسخ سامانه هیدرولوژیکی به‌صورت غیرمتناسب و پیچیده رخ می‌دهد و در برخی حوضه‌ها کاهش بارش به سرعت و شدت بیش‌تری در جریان‌های سطحی بازتاب می‌یابد.

با وجود آن‌که این پژوهش تصویری نسبتاً دقیق از الگوی انتشار خشکسالی در حوضه‌های استان خراسان رضوی ارائه می‌دهد، اما با چند محدودیت مهم همراه است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرند. دوره آماری مورد استفاده به‌دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های هیدرومتری، تنها تا سال ۱۳۹۵ را در بر می‌گیرد. در نتیجه، بخشی از خشکسالی‌های شدید دهه اخیر در تحلیل لحاظ نشده و امکان بررسی روندهای اخیر فراهم نشده است. برخی از متغیرهای محیطی نظیر شیب، شاخص پوشش گیاهی، ظرفیت نگهداری آب خاک و تبخیر–تعرق بالقوه از منابع مختلف و با تفکیک مکانی متفاوت استخراج و با محاسبه میانگین در سطح حوضه، یک‌سان‌سازی شده‌اند. این رویکرد احتمالاً بخشی از ناهمگونی‌های مکانی درون‌حوضه‌ای را ساده‌سازی کرده است.

مقایسه ضرایب حساسیت K_S و K_I میان حوضه‌های مختلف نشان داد که دامنه تغییر این ضرایب از حدود ۱ تا بیش از ۲ متغیر است. حوضه موشنگ با K_S برابر ۲/۲۹ و K_I برابر ۱/۷۷ بالاترین میزان حساسیت را دارا بوده و به‌عنوان حوضه‌ای بسیار واکنش‌پذیر نسبت به

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

تغییرات بارش شناسایی شد، درحالی‌که حوضه دهنه‌شور با با K_S برابر ۱/۰۸ و K_I برابر ۰/۹۲ پایین‌ترین حساسیت را نشان داد و از پایداری هیدرولوژیکی بیش‌تری برخوردار است. این تفاوت‌ها بیانگر نقش مؤثر شرایط اقلیمی و فیزیوگرافی حوضه‌ها در تعیین شدت و الگوی انتشار خشکسالی است. تحلیل ارتباط بین ضرایب حساسیت و متغیرهای محیطی نشان داد که تنها کسری برف با K_S رابطه‌ای معکوس و معنی‌دار دارد؛ به‌گونه‌ای که سهم بیش‌تر بارش برفی موجب کاهش شدت انتشار می‌شود. این نتیجه تأکید می‌کند که وجود برف به‌عنوان منبع ذخیره طبیعی، نقش مهمی در تعدیل پاسخ هیدرولوژیکی و کاهش اثرات خشکسالی ایفا می‌کند. سایر متغیرها از جمله شاخص فصلی‌بودن بارش، NDVI، شیب و ظرفیت نگهداری آب خاک همبستگی معنی‌داری با ضرایب حساسیت نشان ندادند که احتمالاً ناشی از اثرات ترکیبی عوامل انسانی، کاربری اراضی و برداشت منابع آب است.

به‌طورکلی، نتایج نشان می‌دهد که حوضه‌های دارای مقادیر بالاتر K_S و K_I در برابر تغییرات بارش آسیب‌پذیرتر هستند و خشکسالی در آن ها سریع‌تر به مرحله هیدرولوژیکی منتقل می‌شود. این حوضه‌ها باید در اولویت برنامه‌های مدیریت خشکسالی، طراحی سامانه‌های هشدار سریع و مدیریت تطبیقی منابع آب قرار گیرند. از سوی دیگر، حوضه‌های کم‌حساس‌تر مانند دهنه‌شور، که دارای سهم بالاتری از بارش برفی و ظرفیت ذخیره خاک هستند، می‌توانند نقش مهمی در تعدیل و جبران اثرات خشکسالی‌های منطقه‌ای ایفا کنند. در نهایت، با توجه به محدودیت داده‌های مشاهداتی و عوامل انسانی دخیل در رفتار هیدرولوژیکی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از مدل‌های دینامیکی و داده‌های سنجش از دور با تفکیک مکانی و زمانی بالا استفاده شود تا روابط علت–معلولی انتشار خشکسالی دقیق‌تر شناسایی شود. هم‌چنین به‌کارگیری شاخص‌های ترکیبی (مانند SPEI و SWI) می‌تواند به درک بهتر از اثرات هم‌زمان دما، تبخیر و تغییرات کاربری زمین بر فرآیند انتشار خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور کمک کند.

ملاحظات اخلاقی

دسترسی به داده‌ها: داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

حمایت مالی: این پژوهش در قالب بخشی از طرح تحقیقاتی و از سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی حمایت مالی دریافت نموده است.

مشارکت نویسندگان: **محمد رستمی خلج:** مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله. **حمزه نور:** راهنمایی، تحلیل اطلاعات مربوطه، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج. **علی باقریان کلات:** همکاری در تهیه و آماده‌سازی داده‌ها و اطلاعات و بازدیدهای صحرایی.

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

سپاس‌گزاری: نویسندگان بدین‌وسیله از همکاری و حمایت‌های مالی و علمی سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در اجرای این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌نمایند. این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با کد مصوب ۰۲۰۲۲۰–۰۲۰۱۵–۰۲۰۲–۰۰۶–۲۹–۱۴۸ بوده که با پشتیبانی مالی و فنی این دو نهاد محترم انجام شده است.

منابع

۱. آذرخشی، مریم، و فرزادمهر، جلیل. (۱۴۰۰). بررسی ارتباط خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در استان خراسان رضوی. مرتع و آبخیزداری، ۷۴(۴)، ۶۸۹–۷۰۲. doi: 10.22059/jrwm.2022.333753.1620

۲. آوند، محمدتقی، مرادی، حمیدرضا و حزباوی، زینب. (۱۴۰۳). ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی زمان حال و پیش‌نگری آن در آینده در حوزه آبخیز تجن. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۴)، ۵۷–۷۸. doi: 10.22098/mmws.2023.13352.1330

۳. اسکندری دامنه، حامد، زهتابیان، غلامرضا، خسروی، حسن و آذره، علی. (۱۳۹۴). بررسی و تحلیل ارتباط زمانی و مکانی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در استان تهران. اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۴(۹۶)، ۱۱۳–۱۲۰. doi: 10.22131/sepehr.2016.18947

۴. امیری، مهدیس و پورقاسمی، حمیدرضا. (۱۳۹۸). بررسی ارتباط بین خشکسالی‌های آب‌شناسی و هواشناسی در حوزه آبخیز مهارلو، استان فارس. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۳)، ۷۲۵–۷۳۸. doi: 10.22092/ijwmse.2017.114791.1333

۵. رضی، فهیمه، و شکوهی، علیرضا. (۱۳۹۹). تعیین اثر شدت و مدت خشکسالی بر زمان تأخیر بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و بررسی عدم قطعیت‌ها (مطالعه موردی: حوضه تالاب انزلی). اکوهیدرولوژی، ۷(۴)، ۸۴۳–۸۵۴. doi: 10.22059/ije.2020.303979.1341

۶. شاکر سوره، فاطمه و اسدی، اسماعیل. (۱۳۹۸). ارتباط بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت سلماس. مهندسی اکوسیستم بیابان، ۸(۲۲)، ۸۹–۱۰۰. doi: 10.22052/deej.2018.7.22.59

۷. کوشکی، راضیه، رحیمی، محمد، امیری، مجتبی، محمدی، مجید و دستورانی، جعفر. (۱۳۹۶). بررسی رابطه زمانی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوزه آبریز کرخه. اکوهیدرولوژی، ۴(۳)، ۶۸۷–۶۹۶. doi: 10.22059/ije.2017.62496

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

۸. علیمیرزایی، زینب، زارع بیدکی، رفعت و زمانی احمد محمودی، رسول. (۱۳۹۷). پایش خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه آبخیز کارون شمالی. هیدروژئومورفولوژی، ۵(۱۵)، ۱۱۵-۱۳۳ doi: 20.1001.1.23833254.1397.5.15.7.3

۹. فرجی عموقین، عرفان، کانونی، امین و حسنپور کاشانی، مهسا. (۱۴۰۳). بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و رابطه انتشار آن‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی در دشت اردبیل. مدیریت آب و آبیاری، ۱۴(۳), ۶۴۹-۶۶۴ doi: 10.22059/jwim.2024.371936.1141

References

1. Abro, M. I., Elahi, E., Chand, R., Zhu, D., Muhammad, J., Daudpoto, M. R., ... & Khaskheli, M. A. (2022). Estimation of a trend of meteorological and hydrological drought over Qinhuai River Basin. Theoretical and Applied Climatology, 147(3), 1065–1078.
2. Alimirzaei, Z., Zare Bidaki, R., & Zamani-Ahmadmahmoodi, R. (2018). Monitoring Hydrological and Meteorological Drought in the North Karun Basin. Journal of Hydrogeomorphology, 5(15), 115-133. doi: 20.1001.1.23833254.1397.5.15.7.3. [In Persian]
3. Amiri, M., & Pourghasemi, H. R. (2019). Investigation of the relationship between hydrological and meteorological droughts at Maharloo Watershed, Fars Province. Watershed Engineering and Management, 11(3), 725-738. doi: 10.22092/ijwmse.2017.114791.1333. [In Persian]
4. Avand, M., Moradi, H. R., & Hazbavi, Z. (2024). Evaluation of present meteorological and hydrological drought and its future forecast in the Tajan Watershed. Water and Soil Management and Modelling, 4(4), 57-78. doi: 10.22098/mmws.2023.13352.1330. [In Persian]
5. Azarakhshi, M., and Farzadmehr, J., (2022). Investigating the relationship between meteorological and hydrological drought in Razavi Khorasan Province. Journal of Range and Watershed Management, 74(4), 689-702. doi: 10.22059/jrwm.2022.333753.1620. [In Persian]
6. Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A., & Svensson, C. (2016). From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. Hydrology and Earth System Sciences, 20(6), 2483–2505.
7. Ding, Y., Xu, J., Wang, X., Cai, H., Zhou, Z., Sun, Y., & Shi, H. (2021). Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China. Journal of Environmental Management, 283, 111980.
8. Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, G. R. , Khosravi, H., & Azareh, A. (2016). Investigation and analysis of temporal and spatial relationship between meteorological and hydrological drought in Tehran Province. Geographical Data (SEPEHR), 24(96), 113-120. doi: 10.22131/sepehr.2016.18947. [In Persian]
9. Faraji Amogein, E., Kanooni, A., & Hasanpour Kashani, M. (2024). Investigating meteorological and hydrological drought characteristics and their propagation relationship under the influence of human activities in Ardabil plain. Water and Irrigation Management, 14(3), 649-664. doi: 10.22059/jwim.2024.371936.1141. [In Persian]
10. Hosseini, T. S. M., Hosseini, S. A., Ghermezcheshmeh, B., & Sharafati, A. (2020). Drought hazard depending on elevation and precipitation in Lorestan, Iran. Theoretical and Applied Climatology, 142, 365–378.
11. Houmma, I. H., Hadri, A., Boudhar, A., Karaoui, I., Oussaoui, S., El Khalki, E. M., ... & Kinnard, C. (2025). Analysis of the propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought and their joint effects on low-flow drought variability in the Oum Er Rbia Watershed, Morocco. Remote Sensing, 17(2), 281.
12. Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., & Ma, L. (2017). The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. Journal of Hydrology, 547, 184–195.
13. Koushki, R., Rahimi, M., Amiri, M., Mohammadi, M., & Dastorani, J. (2017). Investigation of relationship between meteorological and hydrological drought in Karkheh watershed. Journal of Ecohydrology, 4(3), 687-698. doi: 10.22059/ije.2017.62496. [In Persian]
14. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179–183). Anaheim, California, American Meteorological Society.
15. Razi, F., & Shokoohi, A. (2020). Determining the effect of intensity and duration of drought on the lag time between meteorological and hydrological drought and examining uncertainties (Case study: Anzali Basin). Journal of Ecohydrology, 7(4), 843-854. doi: 10.22059/ije.2020.303979.1341 [In Persian]
16. Salimi, H., Asadi, E., & Darbandi, S. (2021). Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. Applied Water Science, 11(2), 1–10.
17. Shaker Sureh, F., & Asadi, E. (2022). Meteorological and hydro-logical drought communication in Salmas Plain. Desert Ecosystem Engineering, 8(22), 89-100. doi: 10.22052/deej.2018.7.22.59[In Persian]
18. Tareke, K. A. (2025). Long-term hydrological drought monitoring and trend analysis in Blue Nile River basin. Heliyon, 11(1), e23101.
19. Wu, G., Chen, J., Shi, X., Kim, J. S., Xia, J., & Zhang, L. (2022). Impacts of global climate warming on meteorological and hydrological droughts and their propagations. Earth's Future, 10(3), e2021EF002542.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]

20. Xiong, H., Han, J., & Yang, Y. (2025). Propagation from meteorological to hydrological drought: Characteristics and influencing factors. Water Resources Research, 61(4), e2024WR037765.
21. Zeleňáková, M., Abd Elhamid, H., Soľáková, T., Purcz, P., de Michele, C., Blišťan, P., ... & Portela, M. M. (2025). Assessment of meteorological and hydrological droughts in the eastern Slovakia using SPI and SSI indices. Modeling Earth Systems and Environment, 11(4), 253.
22. Zhou, Z., Shi, H., Fu, Q., Ding, Y., Li, T., & Liu, S. (2021). Investigating the propagation from meteorological to hydrological drought by introducing the nonlinear dependence with directed information transfer index. Water Resources Research, 57(8), e2021WR030028

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-07]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.4.4.0]