

# Spatial analysis of meteorological to hydrological drought propagation and the role of environmental basin characteristics in Khorasan Razavi Province

Mohammad Rostami Khalaj<sup>1\*</sup>, Hamze Noor<sup>2</sup> and Ali Bagheriyan Kalat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

Received: 26 September 2025

Accepted: 28 February 2026

## Extended abstract

### Introduction

Drought propagation, defined as the transfer of moisture deficits from meteorological to hydrological drought, represents a central topic in water resources management, particularly in arid and semi-arid regions. Understanding the spatial patterns of drought propagation and identifying the controlling factors are essential for designing risk-reduction strategies and achieving sustainable management of aquifers and surface runoff. Considering the sensitivity of catchments to climatic stress in eastern Iran, this study aims to analyze the spatial dynamics of drought propagation and assess the influence of catchment environmental characteristics in Khorasan Razavi Province.

### Materials and methods

This study utilized data from 46 catchments over a 29-year period (April 1988 to September 2016). Meteorological and hydrological droughts were identified using the standardized precipitation index (SPI) and the standardized streamflow index (SSI), respectively. Drought events were extracted using a threshold of SPI or SSI  $\leq -1$ , and paired events were determined. For each event, the intensity and severity of both meteorological and hydrological droughts were calculated, followed by the derivation of drought propagation ratios and their normalized forms. A set of physiographic and climatic catchment variables—including slope, normalized difference vegetation index (NDVI), precipitation seasonality index (Ps), snow fraction ( $f_{\square}$ ), aridity index (Ai), and available water capacity (AWC)—were averaged at the catchment scale and analyzed using Pearson correlation to assess their relationships with drought propagation ratios.

### Results and discussion

Spatial analyses indicated that the mean meteorological drought intensity ranged from 0.23 to 2.17, with an average of approximately 2.1, whereas hydrological drought intensity ranged from 0.14 to 1.16, with a mean of 0.65. The coefficient of variation (CV) was 63% for hydrological drought intensity and 37.7% for meteorological drought, indicating greater spatial variability in hydrological drought. At the catchment level, 54% of the catchments exhibited a reduction in propagation intensity, and 67% showed a decrease in propagation severity. The mean propagation intensity and severity ratios were  $-0.03$  and  $-0.1$ , respectively, suggesting a general attenuation of drought effects during the transfer from meteorological to hydrological systems. Significant negative correlations between meteorological drought characteristics and propagation ratios ( $r = -0.48$  for intensity and  $r = -0.67$  for severity) indicate that stronger meteorological drought events tend to experience greater attenuation during propagation; that is, high-intensity meteorological drought does not always translate into equally severe hydrological drought. Among environmental factors, NDVI showed a significant negative relationship with both propagation ratios, and AWC was negatively correlated with the severity propagation ratio. In contrast, precipitation seasonality (Ps) and aridity index (Ai) did not exhibit significant correlations with propagation ratios, while snow fraction ( $f_{\square}$ ) showed only a weak negative correlation with propagation intensity. Catchment slope also showed no significant relationship with propagation ratios. These patterns suggest that, in Khorasan Razavi, intrinsic catchment characteristics—particularly vegetation cover and soil water storage capacity—play a key role in attenuating drought propagation.

\* Corresponding author: m.rostamikhaj@areeo.ac.ir

## Conclusions

The results of this study indicate that drought propagation in the 46 catchments of Khorasan Razavi is predominantly characterized by a reduction in both intensity and severity, with 54% of catchments showing decreased propagation intensity and 67% exhibiting reduced severity. The mean propagation ratios for intensity and severity were  $-0.03$  and  $-0.1$ , respectively. Meteorological drought intensity and severity emerged as the strongest controls on drought propagation, showing significant negative correlations with propagation ratios. Among environmental factors, vegetation cover (NDVI) and soil water storage capacity were the most influential in mitigating drought propagation, whereas climatic indices had no significant impact.

**Keywords:** Drought attenuation, Drought intensity, NDVI, Physiographic characteristics, Standardized index

Cite this article: Rostami Khalaj, M., Noor, H., Bagheriyan Kalat, A., 2026. Spatial analysis of meteorological to hydrological drought propagation and the role of environmental basin characteristics in Khorasan Razavi Province. *Watershed. Water. Eng. Manag.* 18(2), 223-236.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



## تحلیل منطقه‌ای انتشار خشکسالی هواشناسی به هیدرولوژیکی و نقش ویژگی‌های محیطی حوضه‌ها در استان خراسان رضوی

محمد رستمی خلیج<sup>۱\*</sup>، حمزه نور<sup>۲</sup> و علی باقریان کلات<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات،

آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

انتشار خشکسالی یعنی انتقال کمبود رطوبت از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی که یکی از مباحث محوری در مدیریت منابع آب به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک است. شناخت الگوهای مکانی این انتشار و تعیین عواملی که آن را تعدیل می‌کنند، برای طراحی راهکارهای کاهش ریسک و مدیریت پایدار آبخوان‌ها و رواناب ضروری است. با توجه به اهمیت حساسیت حوضه‌ها نسبت به تنش‌های اقلیمی در شرق ایران، این پژوهش به‌منظور تحلیل مکانی انتشار خشکسالی و بررسی نقش ویژگی‌های محیطی حوضه‌ها در استان خراسان رضوی انجام شد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های ۴۶ حوضه در بازه زمانی ۲۹ ساله (فروردین ۱۳۶۷ تا شهریور ۱۳۹۵) استفاده شد. برای شناسایی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌ترتیب از شاخص‌های استاندارد بارش (SPI) و شاخص شدت خشکسالی جریان (SSI) استفاده شد و رخداد‌های خشکسالی با آستانه  $\geq -1$  استخراج و رخداد‌های جفت‌شده تعیین شدند. برای هر رخداد، شدت و حدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی محاسبه شد و سپس نسبت‌های شدت و حدت انتشار و نسخه‌های نرمال‌شده آنها به‌دست آمد. مجموعه‌ای از متغیرهای فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه‌ها (شیب، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص فصلی بودن بارش (Ps)، کسری برف (f<sub>s</sub>)، شاخص خشکی (Ai) و ظرفیت نگهداری آب خاک (AWC)) به‌صورت میانگین حوضه‌ای استخراج شد و مورد تحلیل همبستگی قرار گرفتند.

### نتایج و بحث

تحلیل‌های مکانی نشان داد که میانگین شدت خشکسالی هواشناسی در محدوده ۰/۲۳ تا ۲/۱۷ با میانگین تقریبی ۲/۱ قرار گرفت، در حالی که شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در دامنه ۰/۱۴ تا ۱/۱۶ و میانگین ۰/۶۵ قرار دارد. ضریب تغییرات شدت خشکسالی هیدرولوژیکی حدود ۶۳ درصد و برای شدت خشکسالی هواشناسی حدود ۳۷/۷ درصد محاسبه شد که بیانگر تغییرپذیری مکانی بیشتر خشکسالی هیدرولوژیکی است. در سطح حوضه‌ها، ۵۴ درصد از حوضه‌ها کاهش در شدت انتشار و ۶۷ درصد کاهش در حدت انتشار را نشان می‌دهند، به‌طوری که میانگین شدت انتشار ۰/۰۳- و میانگین حدت

انتشار ۰/۱- به دست آمد؛ این الگو نشان دهنده تضعیف عمومی اثر خشکسالی در مسیر انتقال به سامانه‌های هیدرولوژیکی است. همبستگی منفی و معنی‌دار میان ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و نسبت‌های شدت و حدت انتشار (به ترتیب ۰/۴۸- و ۰/۶۷-) نشان می‌دهد که رخداد‌های هواشناسی با شدت و حدت بالاتر تمایل دارند در حین انتشار تضعیف بیشتری را تجربه کنند، یعنی شدت بالای خشکسالی جوی همیشه به شدت هیدرولوژیکی متناظر تبدیل نمی‌شود. در بررسی عوامل محیطی، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) رابطه منفی و معنی‌داری با هر دو نسبت انتشار نشان داد و ظرفیت نگهداری آب خاک نیز با نسبت حدت انتشار همبستگی منفی معنی‌دار داشت. در مقابل، شاخص فصلی بودن بارش و شاخص خشکی رابطه معنی‌داری با نسبت‌های انتشار نشان ندادند و کسری برف تنها همبستگی منفی ضعیفی با نسبت شدت انتشار داشت. شیب حوضه نیز رابطه معنی‌داری با نسبت‌ها نشان نداد. این الگوها نشان می‌دهد که در خراسان رضوی، ویژگی‌های درونی حوضه به‌ویژه پوشش گیاهی و ظرفیت ذخیره خاک نقش کلیدی در تضعیف انتقال خشکسالی ایفا می‌کنند.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در ۴۶ حوضه استان خراسان رضوی، فرایند انتشار خشکسالی عمدتاً با تضعیف شدت و حدت همراه است؛ به‌گونه‌ای که در ۵۴ درصد حوضه‌ها شدت و در ۶۷ درصد حوضه‌ها حدت خشکسالی در مرحله انتقال کاهش یافت. میانگین نسبت‌های انتشار شدت و حدت به ترتیب حدود ۰/۰۳- و ۰/۱- بود. شدت و حدت خشکسالی هواشناسی قوی‌ترین کنترل‌کننده‌های انتشار شناخته شدند و بین هر دو با نسبت‌های انتشار، همبستگی منفی و معنی‌دار مشاهده شد. در میان عوامل محیطی، پوشش گیاهی (NDVI) و ظرفیت نگهداری آب خاک مؤثرترین نقش را در تضعیف انتشار داشتند، در حالی که شاخص‌های اقلیمی نقش چشمگیری نشان ندادند.

**واژه‌های کلیدی:** تضعیف خشکسالی، شاخص استاندارد شده، شاخص پوشش گیاهی، شدت خشکسالی، ویژگی‌های فیزیوگرافی

### مقدمه

خشکسالی بر منابع سطحی و زیرزمینی است (Barker et al., 2016; Ding et al., 2021). انتشار خشکسالی به انتقال تدریجی اثر کمبود بارش از فاز هواشناسی به فازهای دیگر سامانه هیدرولوژیکی، شامل خشکسالی‌های کشاورزی، هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی اطلاق می‌شود. شدت خشکسالی<sup>۱</sup> یکی از شاخص‌های کلیدی برای بیان کمی شدت اثر خشکسالی در طول یک دوره زمانی است و معمولاً به صورت مجموع قدر مطلق مقادیر منفی شاخص استاندارد خشکسالی<sup>۲</sup> SPI و<sup>۴</sup> SSI در بازه زمانی رخداد تعریف می‌شود.

شدت در واقع نشان دهنده حجم کمبود رطوبت طی دوره خشکسالی است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، اثر خشکسالی عمیق‌تر و گسترده‌تر است (Mckee et al., 1993). حدت خشکسالی<sup>۵</sup> یا شدت میانگین خشکسالی

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات هیدرولوژیک و اقلیمی جهانی، تأثیرات گسترده‌ای روی تأمین آب، کشاورزی و پایداری اکوسیستم‌ها دارد و از منظر زمانی و مکانی دارای پیچیدگی‌های زیادی است (McKee et al., 1993; Wu et al., 2022). تفاوت در منشأ، دوام و شدت خشکسالی‌ها (هواشناسی، هیدرولوژیک و کشاورزی) موجب می‌شود تحلیل جامع این پدیده مستلزم پژوهش هم‌زمان شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیک و در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص هر حوضه باشد (Liu et al., 2020; Salimi et al., 2021).

در این چارچوب، فهم مسیر و مکانیزم انتشار خشکسالی<sup>۱</sup> از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این فرایند تعیین‌کننده زمان تأخیر، تضعیف یا تقویت اثرات

<sup>۴</sup> Standardized Streamflow Index

<sup>۵</sup> Drought Intensity

<sup>۱</sup> propagation

<sup>۲</sup> Drought Severity

<sup>۳</sup> Standardized Precipitation Index

تحلیل نسبت‌های انتشار، به ابزارهای مؤثری برای سنجش چگونگی تغییر مدت، شدت و تأخیر خشکسالی در طی این فرایند بدل شده‌اند و امکان بررسی دقیق‌تر تعامل میان اجزای سامانه هیدرو-اقلیمی را فراهم آورده‌اند (Ding et al., 2021). در این چارچوب، تعیین نقش عوامل محیطی در کنترل مکانی انتشار خشکسالی نیز از طریق روش‌های آماری و یادگیری ماشین مورد توجه قرار گرفته است (Liu et al., 2017; Huang et al., 2020).

در ادبیات بین‌المللی، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها بر فهم سازوکار پیوند خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی متمرکز بوده‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که تأخیر و شدت انتشار عمدتاً تحت تأثیر شرایط اقلیمی، ویژگی‌های ذخیره رطوبتی و ساختار حوضه قرار دارد. برای نمونه، Barker et al., (2016) در بریتانیا نشان دادند که مقدار بارش مؤثر و رطوبت خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در فاصله زمانی میان دو نوع خشکسالی دارند. پژوهش‌های انجام‌شده در شرق آسیا نیز تأکید کرده‌اند که افزایش دما، تبخیر-تغرق پتانسیل و پراکنش نامتوازن بارش، فرایند انتشار را طولانی‌تر و شدت انتقال را کمتر می‌کند (Huang et al., 2017).

یافته‌های اخیر در مناطقی همچون اسلواکی و شمال آفریقا نیز نشان می‌دهد که ارتفاع حوضه، الگوی بارش فصلی و وضعیت پوشش گیاهی می‌توانند الگوی مکانی انتشار خشکسالی را تغییر دهند (Zeleňáková et al., 2025; Houmma et al., 2025). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی و رفتار آبخوان‌ها برجسته‌تر بوده است؛ به‌طوری‌که تأخیر بیشتر در آغاز خشکسالی هیدرولوژیکی همراه با تداوم طولانی‌تر آن گزارش شده است (Achite et al., 2023).

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی به بررسی جنبه‌های مختلف خشکسالی پرداخته‌اند؛ از تحلیل SPI در استان‌های مختلف (Raziei et al., 2007) تا مطالعات منطقه‌ای درباره انتشار خشکسالی و تأثیر آن بر آب‌های زیرزمینی (Azarakhshi and Chamanpira, 2022).

به‌عنوان شاخصی مکمل برای ارزیابی کیفیت پدیده در طول دوره خشکسالی استفاده می‌شود و از تقسیم شدت خشکسالی بر مدت<sup>۱</sup> آن به‌دست می‌آید. حدت نشان‌دهنده شدت نسبی پدیده در هر واحد زمان است و از آن برای مقایسه رخداد‌های مختلف با طول‌های متفاوت استفاده می‌شود. این شاخص امکان تمایز بین خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و شدید با خشکسالی‌های طولانی و ملایم را فراهم می‌سازد. مقدار بالاتر حدت، بیانگر خشکسالی‌های شدیدتر در بازه زمانی کوتاه‌تر است (Salimi et al., 2021).

مطالعات متعددی روند انتشار خشکسالی را در سطوح مختلف بررسی کرده‌اند، نتایج نشان می‌دهد که عوامل محلی فیزیکی و مدیریتی (ساختار حوضه، ظرفیت ذخیره خاک و آبخوان، پوشش زمین، ارتفاع و فصل‌پذیری بارش) توانایی قابل‌توجهی در کنترل نسبت انتشار و زمان تأخیر دارند (Huang et al., 2017; Hosseini et al., 2020). بسیاری از مطالعات جهانی و منطقه‌ای، از جمله بررسی‌های حوضه‌ای در چین، اروپا و آفریقا، نشان داده‌اند که الگوهای انتشار از نظر مکانی ناهمگن است و تعمیم نتایج بین حوضه‌ها بدون در نظر گرفتن شرایط محلی می‌تواند منجر به خطا در مدیریت منابع آب شود (Houmma et al., 2025).

بنابراین، پژوهش‌های متمرکز بر مقیاس حوضه که علاوه بر شاخص‌های استاندارد، عوامل محیطی را نیز لحاظ کنند، برای ارائه راه‌حل‌های مدیریتی کاربردی ضروری‌اند.

در ادبیات معاصر معمولاً در بررسی پیوند خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی، از شاخص‌های استاندارد SPI مانند برای تبیین کمبود بارش و از شاخص‌هایی نظیر SSI یا شاخص‌های مبتنی بر جریان و حجم برای ارزیابی وضعیت هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Liu et al., 1993; McKee et al., 2020; Salimi et al., 2021).

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین خطرهای اقلیمی است که با گذار از مرحله هواشناسی به مرحله هیدرولوژیکی، آثار گسترده‌تری بر منابع آب برجای می‌گذارد. در سال‌های اخیر، رویکردهای رخدادمحور و

<sup>1</sup> Duration

محاسبه می‌شود. سپس، نقش مجموعه‌ای از ویژگی‌های محیطی و فیزیوگرافی در کنترل مقادیر انتشار تحلیل خواهد شد تا تصویر روشن‌تری از پویایی مکانی انتشار خشکسالی در این استان ارائه شود.

### مواد و روش‌ها

استان خراسان رضوی با وسعتی حدود ۱۱۸/۸۵۱ کیلومتر مربع در شمال شرق ایران واقع شده و از نظر اقلیمی در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور قرار دارد. این استان از شمال با ترکمنستان، از شرق با افغانستان، از غرب با سمنان و از جنوب با خراسان جنوبی هم‌مرز است. میانگین بارش سالانه استان حدود ۲۲۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه بین ۱۲ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است. الگوی بارندگی عمدتاً در فصول زمستان و بهار رخ می‌دهد و تبخیر سالانه در اغلب دشت‌ها بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر است. منابع اصلی آب سطحی استان شامل حوزه‌های آبخیز کشف‌رود، کال‌شور، قره‌قوم و بخشی از حوزه‌های فرعی اترک و کارده است که هر یک دارای ویژگی‌های فیزیوگرافی و اقلیمی متفاوتی هستند.

این تفاوت‌ها شرایطی مناسب برای بررسی تأثیر عوامل طبیعی بر انتشار خشکسالی فراهم می‌کند (Azarakhshi and Farzadmehr, 2022). در این پژوهش 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 ایستگاه‌های استفاده شده در استان خراسان رضوی و ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.

داده‌های مورد نیاز در این پژوهش شامل بارش (۵۵ ایستگاه باران‌سنجی)، رواناب (دبی ماهانه ۴۶ ایستگاه هیدرومتری) (شکل ۱)، تبخیرتقرق، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) و مدل رقومی ارتفاع (DEM) است. داده‌های بارش و رواناب از ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو برای بازه زمانی فروردین ۱۳۶۷ تا شهریور ۱۳۹۵ گردآوری شده‌اند. داده‌های تبخیرتقرق از بانک اقلیم‌شناسی پایگاه فائو (FAO-CLIMWAT) و داده‌های NDVI از تصاویر سنجنده MODIS با تفکیک

بر اساس یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده در حوضه‌های کرخه، انزلی، سلماس و تهران، مدت و شدت خشکسالی هواشناسی تأثیر مستقیمی بر شدت و تاخیر خشکسالی هیدرولوژیکی دارد و این رابطه تحت تاثیر ویژگی‌هایی همچون ارتفاع، بارش سالانه، نفوذپذیری خاک و پویایی آبخوان تغییر می‌کند (Alimirzaei et al., 2018; Koushki et al., 2017)؛ Eskandari Damaneh; Razi and Shokoohi, 2020 (et al., 2016).

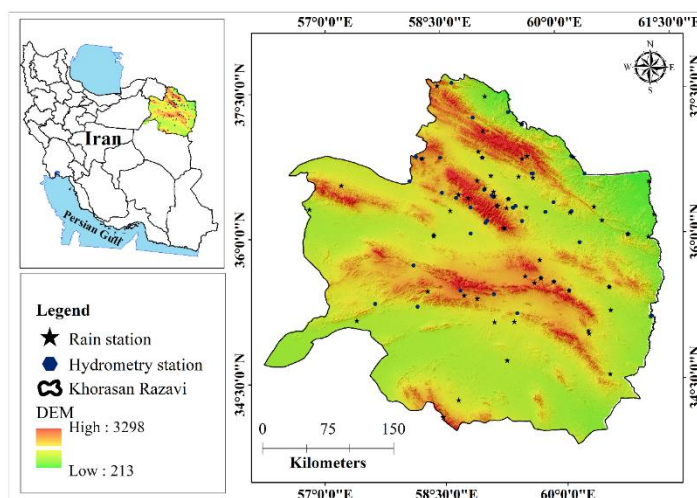
افزون بر آن، مطالعات اخیر در شمال و شمال شرق کشور نشان داده‌اند که روند هم‌پوشانی و تواتر خشکسالی‌های توام در حال افزایش است و تحلیل مکانی انتشار برای مدیریت منابع آب ضروری‌تر از گذشته شده است (Avand; Janbozorgi et al., 2021)؛ (et al., 2024). ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور با روش‌های سری‌زمانی می‌تواند در شناسایی الگوهای مکانی و زمانی خشکسالی مفید باشد (Khoshgoftar et al., 2019). در مورد استان خراسان رضوی نیز برخی پژوهش‌ها بر آسیب‌پذیری مناطق مرکزی و جنوبی نسبت به هم‌زمانی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی تاکید داشته‌اند (Azarakhshi and Farzadmehr, 2022)، اما این مطالعات یا بر یک نوع خشکسالی متمرکز بوده‌اند یا تنها بخش‌هایی از حوضه را بررسی کرده‌اند.

مرور مجموع این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که انتشار خشکسالی پدیده‌ای مکانی-وابسته است و عوامل فیزیوگرافی، اقلیمی و زمین‌شناختی نقش متفاوتی در حوضه‌های گوناگون ایفا می‌کنند. با وجود پیشرفت‌های انجام‌شده، هنوز در استان خراسان رضوی پژوهشی جامع که به‌طور هم‌زمان از رویکرد رخدادمحور، شاخص‌های استاندارد SPI و SSI و تحلیل نظام‌مند عوامل فیزیوگرافی و محیطی در مقیاس حوضه بهره‌برد، انجام نشده است.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل مکانی فرایند انتشار خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی در سطح حوضه‌های استان خراسان رضوی انجام شده است. در این پژوهش، رخدادهای خشکسالی با استفاده از شاخص‌های استاندارد SPI و SSI استخراج و نسبت‌های انتشار

هم‌مقیاس‌سازی داده‌ها از روش Bilinear به اندازه پیکسل یک کیلومتر استفاده شد. سپس مقادیر متوسط هر متغیر برای حوضه‌ها محاسبه شد.

مکانی یک کیلومتر و در بازه زمانی مورد مطالعه استخراج شد. اطلاعات توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت ۳۰ متر استخراج شد. برای



شکل ۱- محدوده مورد پژوهش و موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب

Fig. 1. The study area boundary and the location of rain gauge stations and selected hydrometric stations

$$SM = \sum_{i=1}^{D_m} |SPI_i| \quad (1)$$

$$IM = \frac{SM}{D_m} \quad (2)$$

$$SH = \sum_{i=1}^{D_h} |SSI_i| \quad (3)$$

$$IH = \frac{SH}{D_h} \quad (4)$$

که در آن  $D_m$  مدت خشکسالی هوشناسی (تعداد ماه‌های متوالی با  $SPI \leq -1$ ) و  $D_h$  مدت خشکسالی هیدرولوژیکی (تعداد ماه‌های متوالی با  $SSI \leq -1$ )،  $SM$  شدت خشکسالی هوشناسی،  $IM$  حدت خشکسالی هوشناسی،  $SH$  شدت خشکسالی هیدرولوژیکی و  $IH$  حدت خشکسالی هیدرولوژیکی هستند. رخداد‌های  $SPI$  و  $SSI$  که در زمان و مکان هم‌پوشانی داشتند به‌عنوان رخداد‌های جفت‌شده<sup>۵</sup> در نظر گرفته شدند.

برای تحلیل ارتباط میان خشکسالی‌های هوشناسی و هیدرولوژیکی، لازم است رخداد‌هایی انتخاب شوند که از نظر زمانی و مکانی با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند. به این رخداد‌ها، رخداد‌های جفت‌شده گفته می‌شود. هر رخداد هیدرولوژیکی تنها زمانی قابل نسبت‌دادن به یک رخداد هوشناسی است که سه شرط زیر برقرار باشد: الف) آغاز رخداد هیدرولوژیکی باید پس از آغاز رخداد هوشناسی و در بازه زمانی حداکثر یک تا سه ماهه رخ

### محاسبه شاخص‌های خشکسالی و شناسایی

رخداد‌ها: برای شناسایی خشکسالی‌های هوشناسی و هیدرولوژیکی، از شاخص‌های استاندارد  $SPI^1$  و  $SSI^2$  استفاده شد (McKee et al., 1993؛ Salimi et al., 2021). این شاخص‌ها بر اساس توزیع گاما محاسبه و برای هر ماه و هر ایستگاه تعیین شدند. مقادیر منفی شاخص نشان‌دهنده خشکسالی و مقادیر مثبت بیانگر ترسالی هستند. برای استخراج رخداد‌های خشکسالی، آستانه  $SPI$  یا  $SSI \leq -1$  به‌عنوان شروع خشکسالی در نظر گرفته شد.

این آستانه بر پایه طبقه‌بندی استاندارد شاخص‌های  $SPI$  و  $SSI$  و تعریف خشکسالی با شدت متوسط است (McKee et al., 1993) و در مطالعات رخداد‌محور به‌طور گسترده به‌عنوان مرز آغاز خشکسالی مستقل به‌کار رفته شده است. هر رخداد شامل سه ویژگی اصلی است: مدت (تعداد ماه‌های متوالی زیر آستانه)، شدت خشکسالی<sup>۳</sup> ( $SM$  برای  $SPI$  و  $SH$  برای  $SSI$ ) و حدت خشکسالی<sup>۴</sup> ( $IM$  و  $IH$ ). این مقادیر به‌ترتیب طبق رابطه‌های (۱) تا (۴) زیر محاسبه شدند (Xiong et al., 2025).

<sup>4</sup> Drought Intensity

<sup>5</sup> Paired events

<sup>1</sup> Standardized Precipitation Index

<sup>2</sup> Standardized Streamflow Index

<sup>3</sup> Drought Severity

سالانه تعریف کرد. داده‌های مورد نیاز مقادیر بارش ماهیانه بلندمدت برای هر ایستگاه است.

مقدار شاخص فصلی بودن بارش نزدیک صفر نشان‌دهنده توزیع یکنواخت بارش در طول سال و مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده تمرکز فصلی قوی‌تر است. کسری برف معمولاً نسبت مجموع بارش به صورت برف به کل بارش را می‌دهد. می‌توان بر اساس دما آستانه‌ای ( $T < 0^{\circ}\text{C}$ ) سهم بارش به صورت برف را تخمین زد. برای محاسبه شاخص خشکی از نسبت تبخیر و تعرق به بارندگی استفاده شد. هرچه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد نشان می‌دهد منطقه خشک‌تر است.

### نتایج و بحث

#### توزیع مکانی ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و

هیدرولوژیکی: بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده بر روی داده‌های ۴۶ حوضه در بازه زمانی ۲۹ ساله (فروردین ۱۳۶۷ تا شهریور ۱۳۹۵)، الگوهای مکانی مشخصی در توزیع ویژگی‌های خشکسالی مشاهده شد. میانگین شدت خشکسالی هواشناسی ( $\overline{SM}$ ) در محدوده ۰/۲۳ تا ۲/۱۷ با میانگین ۱/۲ متغیر بود که توزیع فضایی یکنواختی را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌داد (شکل ۱-ا). در مقابل، شدت خشکسالی هیدرولوژیکی ( $\overline{SH}$ ) با دامنه تغییرات ۰/۱۷ تا ۲/۶۱ و میانگین ۱/۳۹، از تغییرپذیری فضایی بیشتری برخوردار بود (شکل ۱-ب)، به طوری که ضریب تغییرات آن ۶۳ درصد محاسبه شد در حالی که این مقدار برای خشکسالی هواشناسی حدود ۳۷/۷ درصد به دست آمده است که نشان‌دهنده تأثیرپذیری بیشتر از عوامل فیزیوگرافی و ذخیره‌ای حوضه‌هاست.

یافته‌های مشابهی توسط Huang et al., (2017) و Barker et al., (2016) گزارش شده‌اند که بیانگر آن است که انتقال اثرات خشکسالی از فاز جوی به فاز هیدرولوژیکی معمولاً با تضعیف دامنه و تأخیر زمانی همراه است.

مقایسه کمی ویژگی‌های خشکسالی در مرحله انتشار نشان داد که در ۵۴ درصد از حوضه‌ها، شدت خشکسالی در حین انتقال از مرحله هواشناسی به هیدرولوژیکی تضعیف شده است، به گونه‌ای که میانگین

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 به عنوان رخداد منشأ انتخاب می‌شود. ج) اگر هیچ رخداد هواشناسی در بازه یک تا سه 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).

انتخاب صحیح رخداد‌های جفت‌شده باعث می‌شود که ویژگی‌های هر دو نوع خشکسالی (مدت، شدت و حدت) به صورت مقایسه‌پذیر بررسی شده و نسبت‌های انتشار ( $RI$  و  $RS$ ) به دقت محاسبه شوند (Xiong et al., 2025; Huang et al., 2017).

محاسبه نسبت‌های انتشار و تحلیل عوامل مؤثر در مقیاس حوضه: برای هر رخداد جفت‌شده، نسبت انتشار بر اساس رابطه‌های (۵) و (۶) محاسبه شد (Xiong et al., 2025; Huang et al., 2017).

$$RS = \frac{SH}{SM} \quad (5)$$

$$RI = \frac{IH}{IM} \quad (6)$$

که در آن،  $RS$  نسبت شدت انتشار و  $RI$  نسبت حدت انتشار است. به منظور مقارن‌سازی داده‌ها و کاهش تأثیر مقادیر حدی، نسبت‌ها به صورت نرمال‌شده توسط رابطه‌های (۷) و (۸) تعریف شدند تا مقادیر بالاتر از یک و پایین‌تر از یک در بازه‌ای بین ۱- تا یک نگاشته شوند.

$$R_S^* = \begin{cases} \frac{RS-I}{RS} & RS \geq I \\ RS-I & RS < I \end{cases} \quad (7)$$

$$R_I^* = \begin{cases} \frac{RI-I}{RI} & RI \geq I \\ RI-I & RI < I \end{cases} \quad (8)$$

سپس مقادیر میانگین  $R_S^*$  و  $R_I^*$  برای هر حوضه محاسبه شد. در مرحله بعد، مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی شامل شیب متوسط (درصد)، شاخص فصلی بودن بارش ( $Ps$ )، کسری برف ( $fs$ )، شاخص خشکی ( $Ai$ )، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده ( $NDVI$ ) ظرفیت نگهداری آب خاک ( $\theta$ ) استخراج شد. برای سنجش تمرکز یا فصلی بودن بارش در طول سال معمولاً از شاخص فصلی بودن بارش استفاده می‌شود.

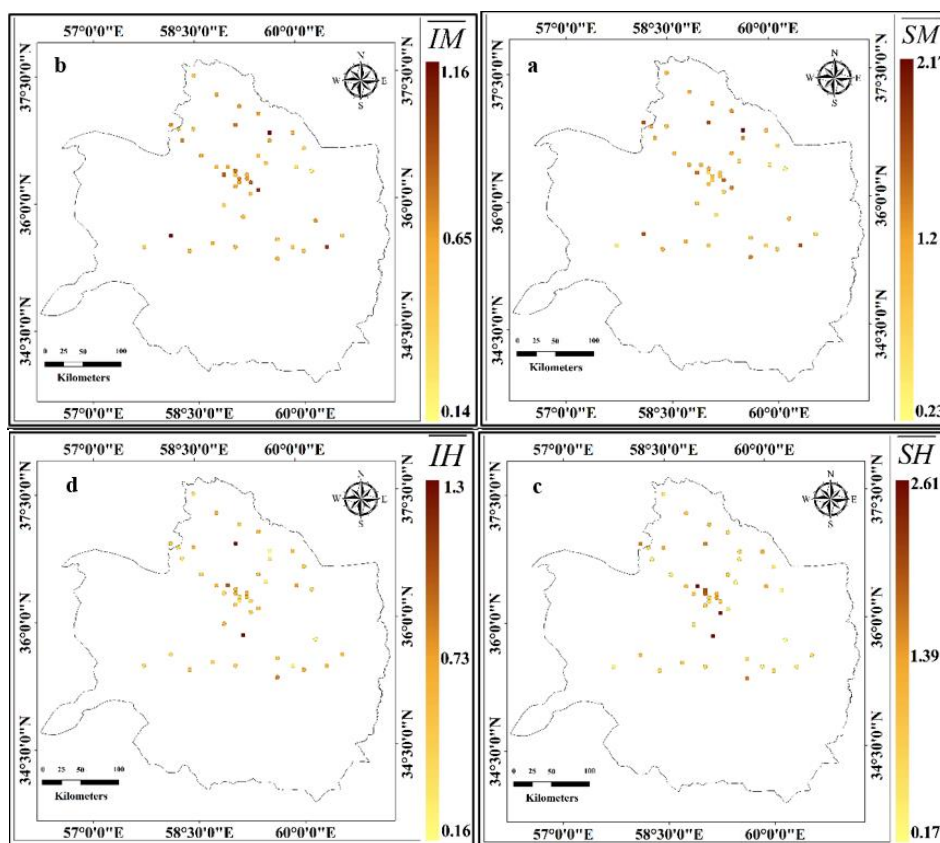
این شاخص را می‌توان به صورت نسبت مجموع قدرمطلق اختلاف ماهانه از میانگین ماهانه به بارش

توزیع مکانی نسبت‌های انتشار، الگوی ناهمگونی را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

حوضه بالادست سد کارده کمترین مقادیر  $\overline{R_S^*}$  و بیشترین مقادیر تضعیف را دارند و حوضه روح آباد بیشترین مقادیر  $\overline{R_S^*}$  را دارند که خشکسالی هواشناسی با شدت زیاد به سامانه‌های هیدرولوژیکی منتقل می‌شود. در حوضه بالادست سد کارده شیب، پوشش گیاهی و ظرفیت رطوبتی خاک نسبت به حوضه روح آباد بیشتر است و این موضوع می‌تواند موجب تعدیل تأثیر خشکسالی هواشناسی رو سامانه‌های هیدرولوژیکی شود. همان‌گونه که Xiong et al., (2025) اشاره کرده‌اند، تفاوت در ویژگی‌های فیزیوگرافی مانند شیب، ظرفیت نگهداری آب خاک و تراکم پوشش گیاهی می‌تواند به‌عنوان عوامل تعدیل‌کننده اصلی در شدت انتقال عمل کنند.

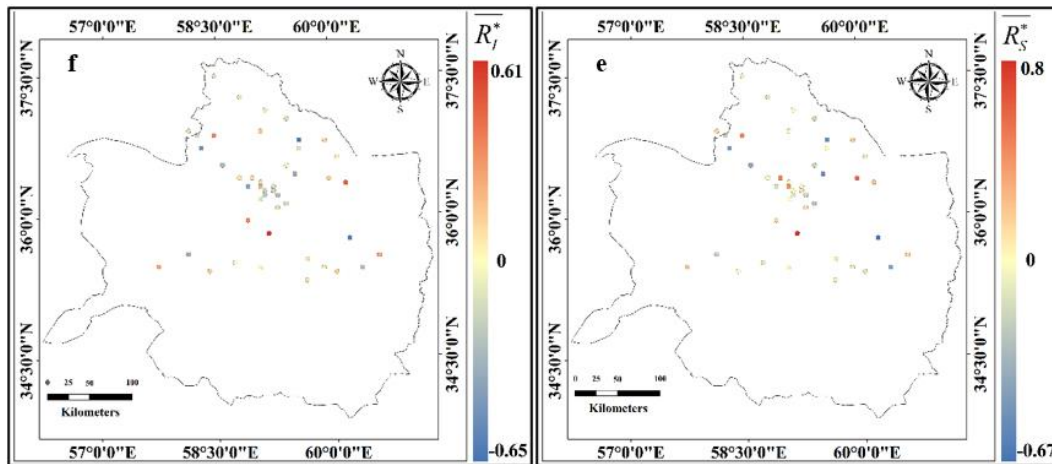
نسبت شدت انتشار  $\overline{R_S^*}$  در این حوضه‌ها مقداری منفی را به خود اختصاص داده است (شکل ۱- e). این الگو برای حدت خشکسالی بسیار بارزتر است، به‌طوری که در ۶۷ درصد از حوضه‌ها، میانگین نسبت حدت انتشار  $\overline{R_I^*}$  مقادیر منفی را نشان می‌دهد (شکل ۱- f).

میانگین  $\overline{R_S^*}$  در منطقه مورد مطالعه  $-0.03$  و میانگین  $\overline{R_I^*}$  در منطقه  $-0.1$  محاسبه شد که حاکی از تضعیف عمومی هر دو شاخص در فرایند انتشار است. این امر نشان می‌دهد که کمبود بارش به‌صورت تدریجی و با شدت کاهش یافته به سامانه‌های هیدرولوژیکی منتقل می‌شود. چنین الگویی با نتایج پژوهش‌های Wu et al., (2022) و Zhou et al., (2021) مطابقت دارد که نشان داده‌اند در مناطق خشک و نیمه‌خشک، سیستم‌های هیدرولوژیکی به‌دلیل وجود ذخایر زیرسطحی و تاخیر در پاسخ رواناب، واکنش ملایم‌تری نسبت به کمبود بارش دارند.



شکل ۲- توزیع مکانی ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در محدوده مورد مطالعه، a: میانگین شدت خشکسالی هواشناسی، b: میانگین حدت خشکسالی هواشناسی، c: میانگین شدت خشکسالی هیدرولوژیکی، d: میانگین حدت خشکسالی هیدرولوژیکی، e: میانگین نسبت شدت انتشار، f: میانگین نسبت حدت انتشار

**Fig. 2.** Spatial distribution of meteorological and hydrological drought characteristics in the study area: (a) Mean meteorological drought severity, (b) Mean meteorological drought intensity, (c) Mean hydrological drought severity, (d) Mean hydrological drought intensity, (e) Mean severity propagation ratio, (f) Mean intensity propagation ratio



ادامه شکل ۲

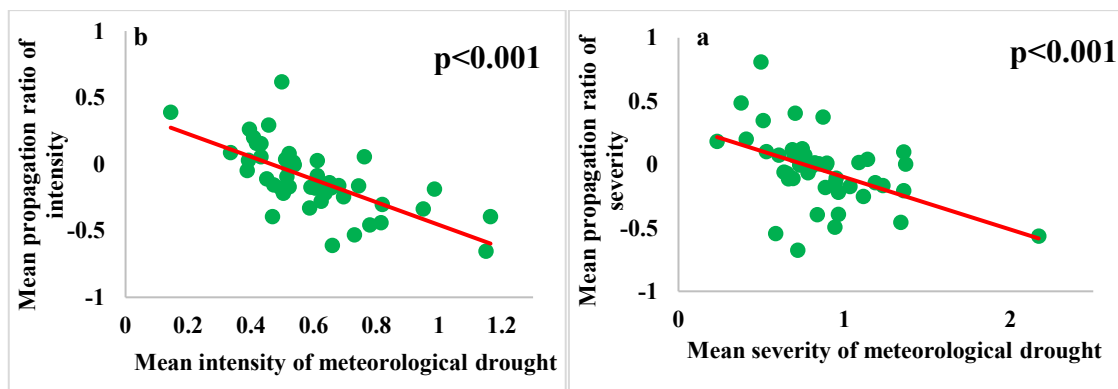
Fig. 2. Continued

که خشکسالی‌های هواشناسی با شدت و حدت بالاتر، در فرایند انتشار با تضعیف بیشتری مواجه می‌شوند. مشابه این روند در مطالعات Razi and Shokoohi, (2020) در حوضه تالاب انزلی و Azarakhshi and Farzadmehr, (2022) در استان خراسان رضوی مشاهده شد که در آنها شدت بالای خشکسالی‌های جوی الزاماً منجر به تشدید هم‌زمان خشکسالی‌های هیدرولوژیکی نشده است. از دیدگاه فیزیکی، این پدیده می‌تواند بیانگر ظرفیت سازگاری طبیعی حوضه‌ها در برابر تنش‌های کوتاه‌مدت اقلیمی باشد (Huang et al., 2017; Houmma et al., 2025).

**تأثیر فاکتورهای محیطی:** در میان فاکتورهای اقلیمی بررسی‌شده، شاخص فصلی بودن بارش و کسری برف رابطه معنی‌داری با نسبت شدت انتشار نشان ندادند (به ترتیب با p-value های ۰/۸ و ۰/۵۶) با این حال، کسری برف همبستگی منفی ضعیف (۰/۰۸-) با نسبت شدت انتشار دارد. شایان ذکر است که شاخص خشکی نیز رابطه معنی‌داری با هیچ‌یک از نسبت‌های انتشار ندارد که بیانگر نقش حاشیه‌ای این متغیر در کنترل انتشار خشکسالی در مناطق مورد مطالعه است.

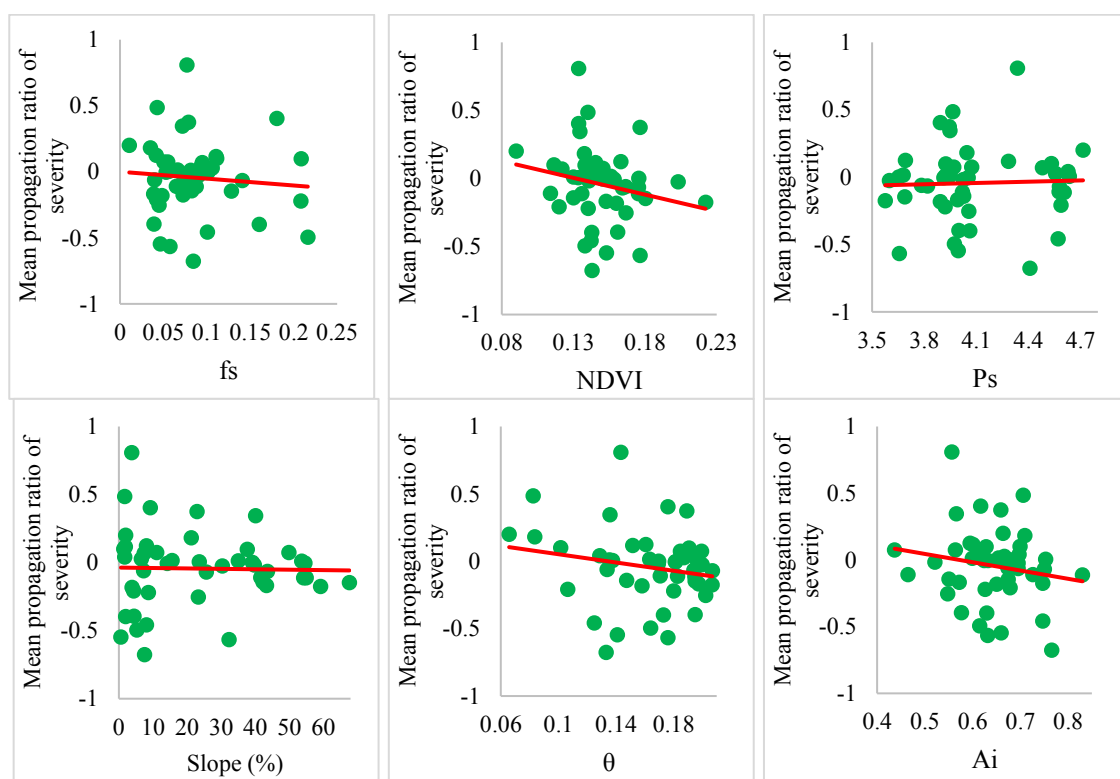
**نقش ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی بر انتشار خشکسالی:** برای بررسی رابطه اولیه بین عوامل محیطی و نسبت انتشار خشکسالی، از همبستگی پیرسون استفاده شد، زیرا متغیرها کمی و پیوسته بوده و توزیع تقریبی نرمال داشتند. این تحلیل امکان شناسایی رابطه‌های خطی اولیه را فراهم می‌کند، با این حال، لازم است توجه شود که همبستگی ساده نمی‌تواند اثر هم‌خطی یا تأثیر هم‌زمان چند متغیر را در نظر بگیرد؛ بنابراین، نتایج به‌عنوان تحلیل اکتشافی ارائه شده و تحلیل‌های چندمتغیره می‌تواند در مطالعات بعدی انجام شود.

بررسی رابطه بین ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و نسبت‌های انتشار نشان داد که شدت و حدت خشکسالی هواشناسی به ترتیب دارای همبستگی منفی قوی و بسیار قوی با نسبت‌های انتشار هستند. به‌طور مشخص، همبستگی ۰/۴۸- بین میانگین شدت خشکسالی هواشناسی و میانگین نسبت شدت انتشار و همبستگی ۰/۶۷- بین میانگین حدت خشکسالی هواشناسی و میانگین نسبت حدت انتشار مشاهده شد که هر دو در سطح اطمینان ۹۹/۹ درصد معنی‌دار هستند ( $p\text{-value} < 0.001$ ). این نتایج حاکی از آن است



شکل ۳- رابطه بین میانگین شدت خشکسالی هواشناسی و میانگین نسبت انتشار شدت (شکل a) و بین میانگین حدت خشکسالی هواشناسی و میانگین نسبت انتشار حدت (شکل b)

Fig. 3. Relationship between (a) mean mean severity of meteorological drought and mean propagation ratio of severity, and (b) mean intensity of meteorological drought and mean propagation ratio of intensity



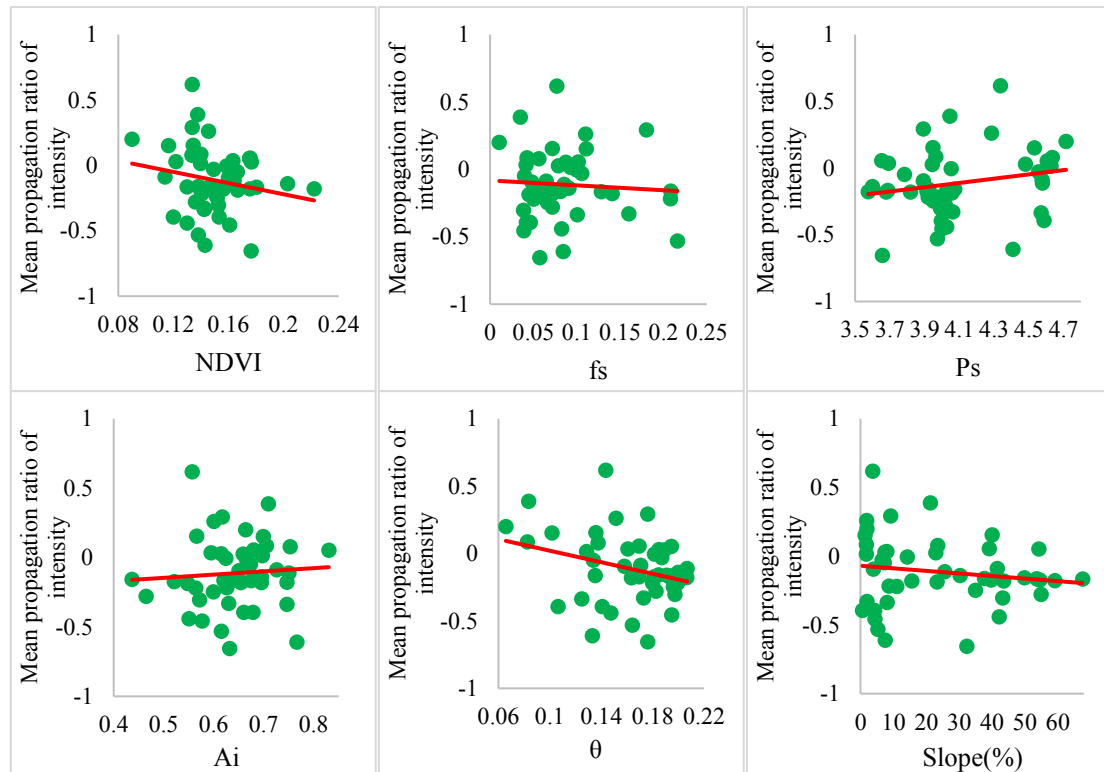
شکل ۴- رابطه بین میانگین نسبت انتشار شدت و فاکتورهای محیطی

Fig. 4. Relationship between the mean propagation ratio of severity and environmental factors

رابطه معنی‌داری با هیچ‌یک از نسبت‌های انتشار نشان نداد. یافته‌های مشابهی توسط Hosseini et al., (2020) و Liu et al., (2020) گزارش شده است که افزایش تراکم پوشش گیاهی باعث ارتقای نفوذپذیری خاک و افزایش رطوبت ذخیره‌شده در لایه‌های سطحی و زیرسطحی می‌شود، در نتیجه شدت انتقال خشکسالی کاهش می‌یابد. همچنین، رابطه منفی معنی‌دار میان ظرفیت نگهداری آب خاک و نسبت حدت انتشار

تحلیل روابط بین ویژگی‌های حوضه و نسبت‌های انتشار نشان داد که پوشش گیاهی (NDVI) دارای همبستگی منفی معنی‌دار با هر دو نسبت شدت و حدت انتشار است (به ترتیب  $-0.2$  و  $-0.19$  با  $p\text{-value} < 0.01$ ). این نتیجه نشان می‌دهد که حوضه‌های با پوشش گیاهی متراکم‌تر، تضعیف بیشتری در انتشار خشکسالی تجربه می‌کنند. همچنین، ظرفیت نگهداری آب خاک رابطه منفی معنی‌داری با نسبت حدت انتشار نشان داد ( $p\text{-value} = 0.044$  با  $-0.29$ ), در حالی که شیب حوضه

(۲۹/۰-) تأییدی بر نقش خاک به عنوان ذخیره گاه رطوبتی و عامل کاهش انتقال تنش های اقلیمی به



شکل ۵- رابطه بین میانگین نسبت انتشار حدت و فاکتورهای محیطی

Fig. 5. Relationship between the mean propagation ratio of intensity and environmental factors

همخوان است، جایی که نقش پارامترهای سطحی و ذخیره ای خاک در تعدیل انتشار خشکسالی به مراتب بیشتر از عوامل اقلیمی گزارش شد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که در استان خراسان رضوی، پوشش گیاهی و ظرفیت نگهداری آب خاک مهم ترین عوامل کاهش دهنده شدت انتشار خشکسالی از مرحله هواشناسی به هیدرولوژیکی هستند و سیاست های مدیریتی مبتنی بر افزایش نفوذپذیری خاک، احیای پوشش گیاهی و مدیریت آب های زیرزمینی می تواند کارایی بالایی در کاهش اثرات خشکسالی های آتی داشته باشد.

#### نتیجه گیری

نتایج این پژوهش که با هدف تحلیل مکانی انتشار خشکسالی هواشناسی به هیدرولوژیکی و ارزیابی نقش عوامل فیزیوگرافی و اقلیمی در ۴۶ حوضه استان خراسان رضوی انجام شد، نشان داد که فرایند انتشار خشکسالی در این منطقه از الگوی مکانی ناهمگنی

به طور کلی، نتایج این بخش نشان می دهد که در میان تمامی فاکتورهای بررسی شده، ویژگی های خشکسالی هواشناسی (شدت و حدت) قوی ترین نقش را در کنترل فرایند انتشار ایفا می کنند. از میان فاکتورهای محیطی، پوشش گیاهی به عنوان مهم ترین عامل تعدیل کننده انتشار خشکسالی شناسایی شد، در حالی که فاکتورهای اقلیمی مانند فصلی بودن بارش و شاخص خشکی نقش کم رنگ تری داشتند. این الگو می تواند ناشی از توانایی پوشش گیاهی در افزایش نفوذ آب به لایه های عمقی خاک و تغذیه آبخوان ها باشد، که منجر به حفظ جریان پایه در دوره های خشک شده و اثرات خشکسالی هواشناسی را تضعیف می کند.

از طرف دیگر، یکنواختی نسبی شرایط اقلیمی در مناطق مورد مطالعه (همانطور که توسط ضریب تغییرات پایین فصلی بودن بارش و شاخص خشکی نشان داده شد) می تواند دلیل نقش کم رنگ تر این فاکتورها باشد. یافته های حاضر با نتایج Xiong et al., (2025) در چین و Houmma et al., (2025) در مراکش

مدیریتی، این نتایج بر اهمیت اقداماتی مانند احیای پوشش گیاهی، افزایش نفوذپذیری خاک، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز تأکید دارد. این اقدامات می‌توانند به‌عنوان راهکارهای مؤثر در کاهش آسیب‌پذیری سامانه‌های هیدرولوژیکی در برابر خشکسالی‌های آتی مورد توجه قرار گیرند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با استفاده از مدل‌های تلفیقی (هیدرولوژیکی-اقلیمی) و سنجش‌ازدور با دقت بالا، به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر الگوی انتشار خشکسالی بپردازند. همچنین، تلفیق تحلیل مکانی انتشار با داده‌های آب زیرزمینی می‌تواند تصویر کامل‌تری از پویایی خشکسالی و پیامدهای آن در مقیاس حوزه فراهم آورد.

#### تشکر و قدردانی

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 ۰۲۰۲۲-۰۲۰۱۵-۰۲۰۲-۰۰۶-۲۹-۱۴۸ است که با پشتیبانی مالی و فنی این دو نهاد محترم انجام شده است.

#### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

پیروی می‌کند و شدت آن در حوضه‌های مختلف متأثر از ویژگی‌های درونی هر حوضه است. یافته‌ها نشان دادند که میانگین شدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۶۵ بوده و در بیش از نیمی از حوضه‌ها (۵۴ درصد) شدت و در دو سوم آن‌ها (۶۷ درصد) حدت خشکسالی در مرحله انتقال کاهش یافته است. این امر بیانگر آن است که تأثیر کمبود بارش در اغلب موارد با گذر از سطح جو به سامانه‌های آبی تضعیف می‌شود.

بررسی روابط آماری میان ویژگی‌های خشکسالی و نسبت‌های انتشار نشان داد که شدت و حدت خشکسالی هواشناسی قوی‌ترین اثر را بر انتشار دارند و بین هر دو شاخص با نسبت‌های انتشار رابطه‌ی منفی و معنی‌داری وجود دارد. این نتایج مؤید آن است که خشکسالی‌های شدیدتر لزوماً به خشکسالی‌های هیدرولوژیکی قوی‌تر منجر نمی‌شوند، بلکه بخشی از اثرات آن در سیستم خاک و پوشش گیاهی جذب و تعدیل می‌شود. از میان متغیرهای محیطی بررسی‌شده، شاخص پوشش گیاهی و ظرفیت نگهداری آب خاک به‌عنوان مؤثرترین عوامل در کاهش شدت انتشار شناسایی شدند، در حالی‌که شاخص فصلی بودن بارش، کسری برف و شاخص خشکی تأثیر معنی‌داری نشان ندادند.

به‌طور کلی، می‌توان گفت که در استان خراسان رضوی، فرایند انتشار خشکسالی بیشتر تحت کنترل عوامل درونی حوضه‌ها است تا متغیرهای اقلیمی. پوشش گیاهی انبوه، شیب ملایم و ظرفیت رطوبتی بالاتر خاک باعث می‌شوند تا شدت انتقال خشکسالی هواشناسی به هیدرولوژیکی کاهش یابد. از دیدگاه

#### منابع مورد استفاده

- Achite, M., Simsek, O., Adarsh, S., Hartani, T., Caloiero, T., 2023. Assessment and monitoring of meteorological and hydrological drought in semiarid regions: The Wadi Ouahrane basin case study (Algeria). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 130, 103386.
- Alimirzaei, Z., Zare Bidaki, R., Zamani-Ahmadmohammadi, R., 2018. Monitoring Hydrological and Meteorological Drought in the North Karun Basin. *Journal of Hydrogeomorphology*, 5(15), 115-133. (in Persian).
- 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).
- Azarakhshi, M., Farzadmehr, J., 2022. Investigating the Relationship between Meteorological and Hydrological Drought in Razavi Khorasan Province. 74(4), 689-702. (in Persian).
- Barker, L.J., Hannaford, J., Chiveron, A., Svensson, C., 2016. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2483-2505.

- Chamanpira, R., 2023. Assessment of Hydrological Drought Impacts on Groundwater in the Kashkan Basin, Final Project Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. (in Persian).
- 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.
- Eslandari 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. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 24(96), 113-120. doi: 10.22131/sepehr.2016.18947(in Persian).
- Hosseini, T.S.M., Hosseini, S.A., Ghermezcheshmeh, B., Sharafati, A., 2020. Drought hazard depending on elevation and precipitation in Lorestan, Iran. *Theoretical & Applied Climatology*, 142.
- 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.
- 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.
- Janbozorgi, M., Hanifepour, M., Khosravi, H., 2021. Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modelling*, 1(2), 1-13. doi: 10.22098/mmws.2021.1215(in Persian).
- Khoshgoftar, M.M., Akhoondzadeh Hanzaei, M., Khosravi, I., 2019. The Comparison of ARIMA and Neural Network methods for Modeling and Monitoring of Drought Using Remote Sensing Time Series Data (Case Study: City of Arak). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(109), 185-197. doi: 10.22131/sepehr.2019.35646(in Persian).
- 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).
- Kubiak-Wójcicka, K., Bąk, B., 2018. Monitoring of meteorological and hydrological droughts in the Vistula basin (Poland). *Environmental monitoring and assessment*, 190(11), 691.
- Liu, Q., Zhang, S., Zhang, H., Bai, Y., Zhang, J., 2020. Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing. *Science of the total environment*, 711, 134585.
- 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)*.
- 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).
- Raziei, T., Daneshkar Arasteh, P., Akhtari, R., Saghafian ,B., 2007. Investigation of Meteorological Droughts in the Sistan and Baluchestan Province, Using the Standardized Precipitation Index and Markov Chain Model. *Iran-Water Resources Research*, 3(1), 25-35. (in Persian).
- Salimi, H., Asadi, E., Darbandi, S., 2021. Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Applied Water Science*, 11(2), 1-10.
- 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.
- Xiong, H., Han, J., Yang, Y., 2025. Propagation from meteorological to hydrological drought: Characteristics and influencing factors. *Water Resources Research*, 61(4), e2024WR037765.
- 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.
- 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.