

Original Research Article

Evaluation of the Impacts of Groundwater Level Decline on Vegetation Cover Dispersion Using the Shannon Entropy Model: A Case Study of Roshtkhar County

Hamid Amoonia^{1*}, Mohammadreza Yousefi Roshan¹, Amir Hasan Jangi¹

¹Department of Geography Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran



10.22034/GRD.2025.23045.1657

Received:

May 03, 2025

Accepted:

August 26, 2025

Keywords:

Shannon entropy, Spatial dispersion, Vegetation cover, Remote sensing, Roshtkhar

Abstract

Groundwater resources in arid and semi-arid regions play a vital role in sustaining vegetation cover and livelihoods, and their decline entails extensive ecological and social consequences. This study aimed to examine the trends of vegetation cover changes and their relationship with groundwater level decline in Roshtkhar County over the period 1990-2023. For this purpose, Landsat satellite data, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and the Shannon entropy model were used to analyze the spatial heterogeneity there. The results indicated that groundwater levels have declined by more than 50 meters over the past three decades. Simultaneously, the Shannon entropy increased from 0.801 in 1990 to 0.924 in 2023, reflecting the intensified spatial dispersion and fragmentation of the vegetation cover. The findings revealed that the increase in vegetation heterogeneity does not indicate improved ecological conditions but is rather driven by land-use changes, the replacement of water-intensive crops with less-demanding species, and human pressures on natural resources. The results also suggest that, if the current conditions persist, consequences such as land subsidence, aquifer salinization, and severe reductions in agricultural productivity are likely by 2050. This study underscores the necessity of integrated water resource management and crop pattern optimization as the key prerequisites for the sustainability of dryland ecosystems.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



* **Corresponding Author:** Hamid Amoonia
Address: Farhangian University, Tehran, Iran

Email: h.amoonia@cfu.ac.ir

Extended Abstract

1. Introduction

Understanding vegetation spatial patterns is vital for assessing ecosystem health, especially in water-stressed arid and semi-arid regions. These areas, often characterized by sparse and sensitive vegetation, face significant challenges from climate change and human pressures. Roshtkhar County in Iran exemplifies such an environment, experiencing a severe decline in groundwater levels, which necessitates precise monitoring of its vegetation dynamics. Quantifying the spatial dispersion or heterogeneity of vegetation cover objectively is challenging. While indices like NDVI provide information on vegetation density, they often miss crucial details about spatial structure and fragmentation. Shannon's entropy model, derived from the information theory, offers a robust method to measure the complexity or dispersion within a spatial system. Specifically, Shannon's relative entropy (G), a normalized index, allows for standardized comparisons of dispersion across time and space, effectively differentiating between uniform and highly fragmented landscapes. Given the ecological importance of vegetation in Roshtkhar and the intense pressure on its water resources, the primary objective of this study was to utilize Shannon's relative entropy model to quantitatively assess the trend of spatial vegetation cover dispersion from 1990 to 2023. A key goal was to analyze the relationship between this dispersion trend, the groundwater level fluctuations (approx. 1986-2022), and the region's topography. The findings aim to provide insights for sustainable resource management in similar vulnerable areas, highlighting the need for quantitative tools to understand complex ecosystem dynamics.

2. Research Methodology

This research employed a descriptive-analytical approach with remote sensing and GIS to investigate the quantitative trends in the vegetation spatial dispersion in Roshtkhar County, a predominantly arid area in Khorasan Razavi Province, Iran (~4,360 km²). The study period was 1990-2023 for vegetation and water years from 1986 to 2022 for groundwater. Time-series Landsat imagery (TM and OLI sensors, 30m resolution) for 1990, 2000, 2010, 2015, 2020, and 2023 were acquired from USGS. After standard radiometric and atmospheric corrections, NDVI was calculated using ENVI 5.6 to map the vegetation cover for each year. The groundwater level data were sourced from the provincial Regional Water Authority. To incorporate topography, the area was classified into five elevation zones using a DEM (Figure 3). Shannon's relative entropy model was then applied to quantify the spatial dispersion annually. Relative entropy (G) was calculated as $G = H / \ln(n)$, where $H = - \sum [p_i * \ln(p_i)]$, 'p_i' is the proportion of vegetation cover in topographic zone 'i', and 'n' is the number of zones (n = 5). G ranges from 0 (maximum concentration) to 1 (maximum dispersion). The calculations were performed using Excel and ArcGIS. Finally, the temporal trend of G was compared with the groundwater level trends to analyze the interplay between the vegetation spatial structure and the water resource availability.

3. Results and discussion

The analysis revealed significant and contrasting trends in the groundwater levels and vegetation dispersion in Roshtkhar County. The groundwater elevation showed a severe and nearly continuous decline over the ~35-year period, dropping approximately 50 meters from above 1110 m to just over 1060 m. This drastic reduction highlights a critical pressure on the groundwater resources and aquifer depletion. Conversely, Shannon's relative entropy (G) for vegetation cover, measuring spatial dispersion, followed a different trajectory. G increased sharply from 0.801 in 1990 to 0.913 in 2000. Despite minor fluctuations, it maintained a high level with a slight upward trend, reaching 0.924 in 2023. This indicates a sustained shift towards greater heterogeneity and spatial dispersion of the vegetation cover. While the total vegetation area mapped via NDVI showed an overall increase

(from ~8,000 ha to nearly 30,000 ha), its spatial distribution changed, with increased contributions from low and high elevation zones at the expense of mid-elevation areas. The key finding is the stark contrast; that is, severe groundwater depletion occurred concurrently with increased (or stabilization at high levels of) vegetation spatial dispersion. This seemingly paradoxical outcome probably does not signify ecological improvement. Instead, it strongly suggests a complex structural rearrangement of the landscape driven by adaptation to water stress. The increased dispersion might result from factors like shifts towards more drought-resistant but potentially scattered crops (e.g., saffron), fragmentation of agricultural lands due to changing economic viability or land tenure, uneven development, or the patchy survival of the native vegetation in micro-refugia. The analysis also confirmed that topography significantly influences how this dispersion shows up, modulating the response of the vegetation system to environmental pressures like water scarcity.

4. Conclusion

This study quantitatively assessed the vegetation spatial dispersion in Roshtkhar County using Shannon's relative entropy, relating it to groundwater trends and topography. A major finding was the contrasting long-term trends, namely a severe, continuous ~50-meter decline in groundwater levels (approx. 1986-2022) alongside a significant increase and stabilization of the vegetation spatial dispersion (G rising from 0.801 in 1990 to 0.924 in 2023). This increased heterogeneity, occurring amidst resource depletion, is interpreted not as ecological recovery but as evidence of landscape structural rearrangement. This rearrangement probably reflects adaptive responses to water stress, such as changes in land use, cropping patterns towards more scattered cultivation, land fragmentation, or patchy vegetation survival. Topography was confirmed as a key factor modulating these spatial patterns. The research demonstrates the utility of Shannon's relative entropy as a valuable quantitative tool for capturing complex spatial dynamics and their interactions with environmental drivers like water availability in arid/semi-arid regions. It highlights that relying solely on overall vegetation indices can be misleading, and understanding spatial structure is crucial for assessing ecosystem sustainability. These findings underscore the need to incorporate such spatial metrics into sustainable resource management frameworks, particularly for developing integrated water conservation and land use planning strategies in fragile ecosystems under pressure. Future work could enhance this understanding by incorporating detailed land use data, grazing information, and higher-resolution remote sensing inputs.

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثرات کاهش سطح آب زیرزمینی بر پراکندگی پوشش گیاهی با مدل آنتروپی شانون (منطقه مورد مطالعه: شهرستان رشتخوار)

حمید عمونیا^{*}، محمدرضا یوسفی روشن^۱، امیر حسن جنگی^۱

^۱ گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران.

doi 10.22034/GRD.2025.23045.1657

چکیده

منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک نقش حیاتی در پایداری پوشش گیاهی و نظام‌های معیشتی ایفا می‌کنند و افت آن‌ها پیامدهای اکولوژیکی و اجتماعی گسترده‌ای به همراه دارد. این پژوهش باهدف بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی و ارتباط آن با افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان رشتخوار طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ انجام گرفت. بدین منظور از داده‌های ماهواره‌ای لندست، شاخص نرمال تفاضلی پوشش گیاهی (NDVI) و مدل آنتروپی شانون برای تحلیل ناهمگونی فضایی استفاده شد. نتایج نشان داد سطح آب زیرزمینی طی سه دهه گذشته بیش از ۵۰ متر افت داشته است. هم‌زمان، مقدار آنتروپی شانون از ۰٫۸۰۱ در سال ۱۹۹۰ به ۰٫۹۲۴ در سال ۲۰۲۳ افزایش یافت که بیانگر تشدید پراکندگی فضایی و قطعه‌قطعه شدن پوشش گیاهی است. یافته‌ها آشکار ساخت که افزایش ناهمگونی پوشش گیاهی نه به معنای بهبود شرایط اکولوژیکی، بلکه ناشی از تغییرات کاربری زمین، جایگزینی محصولات کم‌آبر و فشارهای انسانی بر منابع طبیعی است. پیش‌بینی‌ها نیز نشان می‌دهد که در صورت تداوم شرایط کنونی، پیامدهایی نظیر فرونشست زمین، شور شدن آبخوان و کاهش شدید توان کشاورزی در افق ۲۰۵۰ محتمل خواهد بود. نتایج این پژوهش بر ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب و اصلاح الگوی کشت به‌عنوان پیش‌شرط‌های کلیدی برای پایداری اکوسیستم‌های خشک تأکید دارد.

تاریخ دریافت:

۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:

۰۴ شهریور ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی،
پراکندگی پوشش گیاهی،
آنتروپی شانون،
سنجش‌ازدور،
رشتخوار

۱ مقدمه

منابع آب زیرزمینی نقشی حیاتی در پایداری و تاب‌آوری اکولوژیکی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند. این مناطق تقریباً ۴۱٪ از سطح خشکی زمین را پوشانده است و نزدیک به دو میلیارد نفر در سراسر جهان را پشتیبانی می‌کنند (بورل^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). در این اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر، پوشش گیاهی به‌طورمعمول تنک، لکه‌ای و به‌شدت حساس به تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی است که این امر، تحلیل فضایی آن را برای مدیریت و حفاظت مؤثر زمین ضروری می‌سازد (المالکی^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). ارزیابی ناهمگونی پوشش گیاهی نه‌تنها بازتاب‌دهنده تنوع زیستی و تاب‌آوری اکوسیستم است، بلکه سیاست‌ها را در جهت مبارزه با بیابان‌زایی و

Email: h.amoonia@cfu.ac.ir

^{*} نویسنده مسئول: حمید عمونیا

آدرس: گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان.

¹ Burrell

² Almalki

تخریب زمین هدایت می‌کند (رحیمی و جونگ، ۲۰۲۵). با پیشرفت سنجش‌ازدور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، محققان اکنون می‌توانند پویایی‌های پوشش گیاهی را در طول زمان با استفاده از شاخص‌های مشتق‌شده از ماهواره مانند شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی^۱ پایش کنند (احمدی و همکاران، ۲۰۲۳). به‌منظور کمی‌سازی میزان پراکنش پوشش گیاهی، مدل آنتروپی شانون به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است که دلیل آن توانایی این مدل در اندازه‌گیری پیچیدگی و ناهمگونی فضایی است (وانگ و ژائو، ۲۰۱۸). به‌طور خاص، آنتروپی نسبی شانون یک معیار قوی برای تمایز بین الگوهای پوشش گیاهی یکنواخت و بسیار قطعه‌قطعه شده ارائه می‌دهد که این امر به‌ویژه برای پایش تغییرات اکولوژیکی در مناظر سرزمین‌های خشک ارزشمند است (وانگ و ژائو، ۲۰۱۸؛ رحیمی و جونگ، ۲۰۲۵). به‌کارگیری این مدل در مناطقی مانند شهرستان رشتخوار، بینش‌های حیاتی برای برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت انطباقی در مناطقی که تنش‌های اکولوژیکی رو به رشدی را تجربه می‌کنند، فراهم می‌آورد.

مطالعه پراکنش پوشش گیاهی، به توزیع فضایی و تغییرپذیری پوشش گیاهی در یک چشم‌انداز معین اشاره دارد. در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک، این متغیر به‌عنوان شاخص کلیدی عملکرد اکولوژیکی، تاب‌آوری و پایداری کاربری اراضی عمل می‌کند (کفی^۳ و همکاران، ۲۰۰۷). میزان پراکنش پوشش گیاهی بازتاب‌دهنده نتایج تعاملات پیچیده میان عوامل اقلیمی، ویژگی‌های خاک، فعالیت‌های انسانی و عوارض توپوگرافی است (بورل و همکاران، ۲۰۲۰). سطوح بالای پراکنش به‌طور معمول نشان‌دهنده چشم‌اندازهای قطعه‌قطعه شده با کاهش اتصال و یکپارچگی اکولوژیکی است، درحالی‌که سطوح پایین‌تر اغلب پوشش گیاهی همگن‌تر و احتمالاً پایداری را نشان می‌دهد (وانگ و ژائو، ۲۰۱۸).

سنجش این پراکنش برای درک فرآیندهای بیابان‌زایی، تخریب زیستگاه و از دست دادن تنوع زیستی پدیده‌هایی که به‌طور فزاینده‌ای در محیط‌های خشک تحت فشار نیروهای انسان‌زاد و ناشی از تغییرات اقلیمی آشکارتر می‌شوند - ضروری است (رحیمی و جونگ، ۲۰۲۵). استفاده از شاخص‌های کمی مانند آنتروپی نسبی شانون به محققان این امکان را می‌دهد تا پیچیدگی الگوهای پوشش گیاهی را با دقت ثبت کرده و امکان مقایسه در مقیاس‌های فضایی و زمانی را فراهم آورند (هاکبا^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). از این‌رو، پراکنش پوشش گیاهی نه‌تنها به‌عنوان یک تمرکز تحلیلی مرکزی در پایش محیطی عمل می‌کند، بلکه راهنمای استراتژی‌های انطباقی در مدیریت پایدار اراضی و احیای اکولوژیکی نیز است (فائو، ۲۰۲۰).

به نظر می‌رسد در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مانند شهرستان رشتخوار، پراکنش پوشش گیاهی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط توپوگرافی و سطح آب زیرزمینی قرار داشته باشد. این دو متغیر مستقل، نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل منابع رطوبتی، دمای موضعی و شرایط خاک دارند که همگی از عوامل اصلی در استقرار و پایداری پوشش گیاهی محسوب می‌شوند (پنگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات انجام‌شده در نواحی مشابه، نشان می‌دهند که شاخص پراکندگی پوشش گیاهی در مناطقی با شیب کم، ارتفاع پایین و دسترسی به منابع آب زیرزمینی سطحی، مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد که بیانگر تراکم بیشتر گیاهان است (بهلینگ و همکاران، ۲۰۲۲). توپوگرافی به‌واسطه تأثیر بر عمق خاک، ظرفیت نگهداری آب و الگوی زهکشی، الگوهای خرد اقلیمی متنوعی ایجاد می‌کند که پراکنش ناهمگون پوشش گیاهی را در سطح چشم‌انداز تسهیل

¹ NDVI

² Wang & Zhao

³ Kéfi

⁴ Huckleba

می‌سازد (پنگ و همکاران، ۲۰۲۳). از سوی دیگر، مناطقی که سطح آب زیرزمینی در آن‌ها در عمق مناسبی قرار دارد (در حد ۳٫۵ تا ۴٫۵ متر از سطح زمین)، بستر مناسبی برای استقرار گونه‌های گیاهی فراهم می‌کنند؛ چراکه ریشه‌ها قادر به دسترسی به رطوبت زیرسطحی خواهند بود (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۹). در مقابل، افزایش بیش‌ازحد عمق آب زیرزمینی یا کاهش شدید آن، منجر به افت تراکم گیاهی می‌شود. در پژوهش‌های مشابه در کشور چین نیز، همبستگی مستقیم بین نقشه‌های توزیع پوشش گیاهی و داده‌های رقومی ارتفاع و عمق آب زیرزمینی مشاهده شده است که دلالت بر تأثیر هم‌زمان توپوگرافی و آب زیرزمینی بر الگوی پراکنش پوشش گیاهی دارد (لیو و همکاران، ۲۰۲۴).

مشکلی که در این مطالعه به آن پرداخته می‌شود، ناشی از نیاز به پر کردن شکاف روش‌شناختی در زمینه مطالعه توزیع فضایی پوشش گیاهی است. رویکردهای سنتی برای پایش تغییرات پوشش گیاهی عمدتاً به شاخص‌های منفرد متکی بوده‌اند. برای مثال، درحالی‌که شاخص‌های پوشش گیاهی مشتق‌شده از تصاویر ماهواره‌ای، نگاهی از شرایط سطح ارائه می‌دهند، اغلب فرآیندهای توپوگرافیک را که برای درک تصویر کامل محیطی ضروری هستند، نادیده می‌گیرند. درنتیجه، مدیران محیطی و سیاست‌گذاران اغلب با ارزیابی‌های جزئی مواجه می‌شوند که ممکن است منجر به تصمیمات بهینه مدیریت منابع نشوند. پرداختن به این موضوع به‌ویژه در مناطقی مانند شهرستان رشتخوار که در آن تعادل ظریف بین دسترسی به آب و سلامت پوشش گیاهی برای معیشت‌های محلی و انعطاف‌پذیری اکوسیستم حیاتی است، فوری و از اهمیت بالایی برخوردار است.

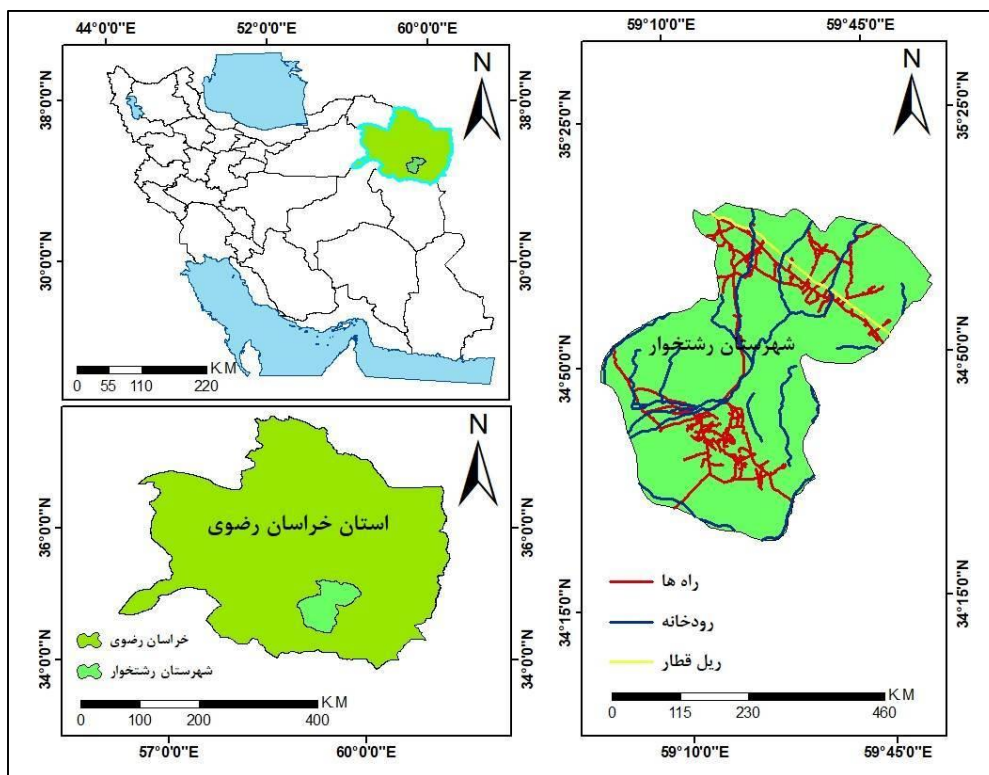
مطالعات نشان می‌دهند ترکیب سنجش‌ازدور (مانند شاخص NDVI) با معیارهای اطلاعاتی نظیر آنتروپی شانون، امکان شناسایی ریز پهنه‌های اکولوژیک و ناهمگونی‌های ساختاری در پوشش گیاهی را فراهم می‌کند (وانگ و ژائو، ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر در کشور ایران، پژوهش‌های بسیاری به مطالعه تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی با استفاده از سنجش‌ازدور انجام گرفته است (بهرنگ منش و همکاران، ۱۳۹۸؛ حلبیان و همکاران، ۱۴۰۲؛ عساکره و همکاران، ۱۴۰۲؛ مهرانی و همکاران، ۱۳۹۹؛ یوسفی روشن و عمونیا، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲). برخی از پژوهش‌ها نیز به کاربرد روش آنتروپی شانون در تحلیل پراکنده رویی نواحی جغرافیایی نظیر شهرها اشاره نمودند (رحیمی و حسینعلی، ۲۰۲۱؛ عبدی تربقان و همکاران ۲۰۲۰؛ کمانرودی کجوری و همکاران، ۲۰۲۰؛ نیک پور و همکاران، ۲۰۲۲)؛ اما پژوهش‌های مشابه پژوهش حاضر و در مناطق مشابه (مثل حوضه فاروب) اثربخشی این روش را در تعیین عوامل کلیدی مؤثر بر پراکنش زمین‌لغزش‌ها ازجمله عمق آب زیرزمینی (۳٫۸-۱۶ متر)، شیب زمین (<۲۵ درجه) و ویژگی‌های خاک (هدایت الکتریکی $<2.45 \text{ ds/m}$) تأیید کرده‌اند (شکاری بادی و همکاران، ۱۳۹۴). در مراتع استان اردبیل نیز نقش عوامل محیطی مؤثر بر پراکنش گونه با استفاده از روش جکنایف و منحنی‌های پاسخ بررسی گردید که ارتباط معناداری بین شاخص‌های آنتروپی حداکثر و عوامل توپوگرافی مانند ارتفاع و جهت شیب را نشان داده است (غفاری و همکاران، ۱۳۹۹). این یافته‌ها اهمیت ادغام معیارهای اطلاعاتی با داده‌های مکانی را در مدیریت پایدار اکوسیستم‌های شکننده مناطق خشک برجسته می‌نماید و کارایی کلی این روش را نشان می‌دهد.

نهایتاً هدف اصلی این پژوهش، شناسایی کارایی استفاده از مدل آنتروپی نسبی شانون برای تحلیل تغییرات فضایی-زمانی پوشش گیاهی در شهرستان رشتخوار، با تأکید بر وضعیت ارتفاعی و آب زیرزمینی است. نوآوری این پژوهش، ترکیب داده‌های میدانی چاه‌ها با شاخص‌های سنجش‌ازدور (آنتروپی شانون و NDVI) برای تحلیل تأثیر استخراج آب بر پراکنش پوشش گیاهی است. این رویکرد برای اولین بار در حوضه‌های نیمه‌خشک ایران اجرا شده است. در کل این تحقیق با تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور و خروجی مدل آنتروپی شانون، قصد دارد تا میزان تغییرپذیری و تصادفی بودن فضایی در مجموعه داده‌های پوشش گیاهی و آب زیرزمینی را طی یک دوره مشخص، به‌صورت کمی ارزیابی کند.

۲ مواد و روش تحقیق

۲٫۱ منطقه مورد مطالعه

شهرستان رشتخوار، واقع در استان خراسان رضوی، با مساحت نزدیک به ۴۳۶۰ کیلومترمربع، از نظر موقعیت نسبی در بخش جنوبی این استان جای گرفته و با شهرستان‌های تربت حیدریه، گناباد و خواف هم‌مرز است (شکل ۱). این شهرستان با فاصله‌ای تقریبی ۲۰۰ کیلومتری از مرکز استان، در موقعیت مطلق جغرافیایی بین عرض‌های ۳۴° ۴۵' تا ۳۵° ۲۸' شمالی و طول‌های ۵۹° ۵۰' تا ۵۹° ۵۹' شرقی و ارتفاع متوسط ۱۱۴۰ متر از سطح دریا قرار دارد. اقلیم رشتخوار به‌طور غالب خشک و بیابانی است. منابع آبی این منطقه عمدتاً شامل رودخانه‌های فصلی کال سالار و کال دونخ، چاه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌ها بوده که تحت تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر و بهره‌برداری بی‌رویه، با کاهش شدید سطح و کیفیت مواجه شده‌اند. سدهای شهید یعقوبی و شهید حسینی، به‌عنوان منابع ذخیره آب، نیز به دلیل شرایط اقلیمی، کارایی خود را از دست داده‌اند. منطقه رشتخوار به‌دلیل وجود ۳۵۰ چاه کشاورزی فعال با میانگین عمق ۸۰ مترو میانگین افت ۵۰ متری آب زیرزمینی در ۳۳ سال گذشته، نمونه‌ای ایده‌آل برای مطالعه بازآرایی پوشش گیاهی تحت فشار منابع آبی است (آب منطقه‌ای، ۱۴۰۳).



شکل ۱. محدوده جغرافیایی شهرستان رشتخوار

پوشش گیاهی شهرستان متناسب با اقلیم خشک، شامل گیاهان مقاوم به خشکی و شوری نظیر پسته و خارشتر است، درحالی‌که عرصه‌های جنگلی محدود است و مناطق بیابانی نظیر دره دریز و کال سوهه تنوع بیشتری از گیاهان را نشان می‌دهند. کشاورزی و دامپروری، با تکیه بر محصولاتی چون پسته، زعفران، گندم و جو، بخش اصلی اقتصاد منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۲).



شکل ۲. برخی از پوشش‌های گیاهی شهرستان رشتخوار: ۱- گندم ۲- پسته ۳- مزارع زعفران در فصل بهار

۲,۲ داده‌های تحقیق

داده‌های این پژوهش بعد از تعیین قلمرو مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای لندست سری‌های ۴-۵، ۸-۹ در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) تهیه شده‌اند (جدول ۱). تصاویر از ماه ۷ و ۸ میلادی انتخاب شده‌اند به این دلیل که در این فصل پوشش گیاهی تراکم بالاتری دارند و حداقل پوشش ابری نیز در این زمان در منطقه است. در انتخاب بازه زمانی ۳۳ ساله دو معیار بود اول اینکه فاصله زمانی به اندازه‌ای باشد که تغییرات سطح آب زیرزمینی بتواند بر روی پوشش گیاهی مؤثر باشد و دوم اینکه در این زمان‌ها تصاویر مناسب برای پردازش قابل دریافت از سایت باشد. از سری‌های ۴-۵ و ۸-۹ برای پردازش و استخراج پوشش گیاهی استفاده شده است. سری ۴-۵ به دلیل اینکه تصاویر سال‌های قدیمی‌تر موجود بود و حداکثر دوره زمانی را پوشش بدهد. سری ۸-۹ به این دلیل که تصاویر جدیدتر و با کیفیت بالاتر باشد.

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای اخذ شده از سایت USGS

ردیف	ماهواره	سنجنده	path/row	باند	تاریخ	قدرت تفکیک مکانی (متر)
۱	لندست ۴-۵	TM	۱۵۹/۳۶	۴-۳	۱۹۹۰/۰۷/۲۸	۳۰
۲	لندست ۴-۵	TM	۱۵۹/۳۶	۴-۳	۲۰۰۰/۰۷/۰۷	۳۰
۳	لندست ۴-۵	TM	۱۵۹/۳۶	۴-۳	۲۰۱۰/۰۷/۳۰	۳۰
۴	لندست ۸-۹	OLI	۱۵۹/۳۶	۵-۴	۲۰۱۵/۰۸/۰۲	۳۰
۵	لندست ۸-۹	OLI	۱۵۹/۳۶	۵-۴	۲۰۲۰/۰۷/۳۰	۳۰
۶	لندست ۸-۹	OLI	۱۵۹/۳۶	۵-۴	۲۰۲۳/۰۷/۳۱	۳۰

۳ روش تحقیق

این پژوهش با استفاده از روش توصیفی-تحلیلی به بررسی کمی روند پراکنده رویی و تغییرات پوشش گیاهی به کمک مدل آنتروپی نسبی شانون، در شهرستان رشتخوار طی دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ می‌پردازد. بعد از دانلود تصاویر مرحله پیش‌پردازش، شامل تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری بر روی آنها انجام گرفته است. در ادامه پردازش تصاویر جهت استخراج داده پوشش گیاهی منطقه به کمک شاخص NDVI در ابزار مفهومی ENVI5.6 انجام گردید. فرمول محاسباتی این شاخص به صورت زیر بیان می‌شود.

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

که در آن NDVI، نمایه تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی است. Red و NIR به ترتیب اندازه‌گیری‌های تابش طیفی (بازتاب) ثبت شده توسط سنجندها در نواحی قرمز (مرئی) و مادون قرمز نزدیک (NIR) می‌باشند. مقادیر شاخص NDVI، بدون در نظر گرفتن نوع ورودی اعم از تابش، بازتاب یا عدد دیجیتال (DN)، همواره در بازه‌ای بین ۱- تا ۰ قرار می‌گیرند. به طور معمول، این شاخص برای آب‌ها مقادیر منفی، برای عوارضی مانند سنگ‌ها، ماسه‌ها و

سطوح بتنی نزدیک به صفر و برای انواع پوشش‌های گیاهی اعم از محصولات کشاورزی، بوته‌ها، چمن‌زارها و جنگل‌ها مقادیر مثبت نشان می‌دهد (جونز و وون، ۲۰۱۰). در جدول ۲ طبقه‌بندی مقادیر NDVI توسط حمی و همکاران (۲۰۲۴) ارائه شده است:

جدول ۲. طبقه‌بندی مقادیر NDVI (ترحمی و همکاران، ۲۰۲۴)

سطح سبزی پوشش گیاهی	محدوده‌های طبقه‌بندی
مناطق غیر گیاهی، مناطق باز، آب‌ها	$-1 < NDVI < -0.3$
پوشش گیاهی با تراکم بسیار کم	$-0.3 < NDVI < 0.15$
پوشش گیاهی با تراکم کم	$0.15 < NDVI < 0.25$
پوشش گیاهی با تراکم متوسط	$0.25 < NDVI < 0.35$
پوشش گیاهی با تراکم زیاد	$0.35 < NDVI < 1$

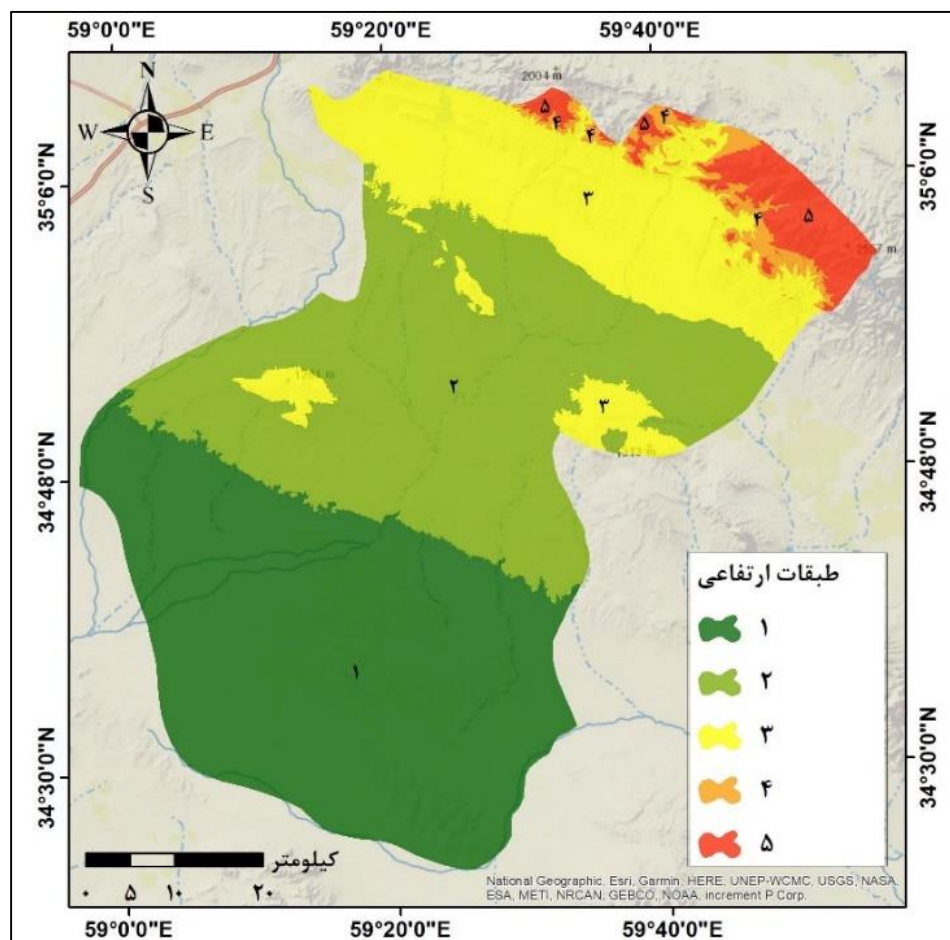
در این پژوهش دامنه ۰/۱۵ تا ۱ در منطقه مورد مطالعه به عنوان محدوده دارای پوشش گیاهی در نظر گرفته شده و کمتر از این مقدار محدوده فاقد پوشش گیاهی است. همچنین جهت محاسبه نرخ تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان از یک مدل کمی استفاده شده است که این مدل با عنوان مدل آنتروپی نسبی شانون شناخته می‌شود. این مدل که نخستین بار در نظریه اطلاعات توسط کلود شانون معرفی شد، ابزاری قدرتمند برای سنجش تنوع و میزان بی‌نظمی در توزیع داده‌هاست (شانون، ۱۹۴۸). در تحلیل‌های فضایی، این مدل به طور گسترده برای ارزیابی یکنواختی یا پراکندگی کلاس‌های مختلف در یک منظره یا نقشه کاربری اراضی به کار می‌رود.

از منظر مفهومی، زمانی که پوشش‌های مختلف گیاهی به صورت یکنواخت در سطح منطقه پراکنده باشند، مقدار آنتروپی بالا بوده و نشان‌دهنده پیچیدگی و تنوع بالای الگوهای فضایی است (شروین و پرات ای فورنلز، ۲۰۱۹). در مقابل، تمرکز پوشش در چند کلاس خاص موجب کاهش مقدار آنتروپی می‌شود. این ویژگی باعث شده تا آنتروپی شانون در مطالعات بوم‌شناسی به ویژه در ارزیابی تنوع پوشش گیاهی (مانند تنوع آلفا یا بتا) و همچنین در بررسی پیچیدگی الگوهای مکانی پوشش زمین با استفاده از داده‌های سنجش از دور کاربرد وسیعی داشته باشد (کاشمن، ۲۰۲۱). یکی از مزایای مهم این مدل، سادگی محاسبه و تفسیر آن است؛ زیرا با ارائه یک شاخص کمی، امکان تحلیل میزان عدم قطعیت یا پراکندگی در الگوی مکانی پوشش گیاهی را فراهم می‌سازد (نووساد و استپینسکی، ۲۰۲۰). به همین دلیل، مدل آنتروپی شانون به عنوان یک چارچوب نظری معتبر و کاربردی، می‌تواند در تحلیل پوشش گیاهی و ارزیابی ساختار فضایی آن جایگاهی قابل توجه داشته باشد. قابلیت آنتروپی شانون شامل جهت‌گیری الگوها و شناسایی پیکربندی آنها است (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۳) که محاسبات آن در نرم‌افزارهای Excel و ArcGIS انجام می‌پذیرد. آنتروپی نسبی شانون مقداری بین صفر و یک است که صفر نشان‌دهنده توزیع متمرکز پدیده و یک نشان‌دهنده توزیع پراکنده پدیده است (نیک پور و همکاران، ۲۰۲۲). مقادیر آنتروپی نسبی شانون (G) توسط رابطه (۱) زیر محاسبه می‌گردد:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \times \ln(p_i), G = \frac{H}{\ln(n)}$$

در این پژوهش برای سنجش میزان پراکندگی و ناهمگونی پوشش گیاهی از شاخص آنتروپی شانون (H) استفاده شد. در آن p_i بت مساحت پوشش گیاهی در طبقه i به کل مساحت پوشش گیاهی را نشان می‌دهد و درواقع بیانگر احتمال حضور پوشش گیاهی در هر طبقه است. لگاریتم طبیعی (ln) به عنوان پایه محاسبات در

نظر گرفته شد و n نیز تعداد طبقات ارتفاعی را مشخص می‌کند. این طبقات از روی مدل ارتفاعی رقومی^۱ از حداقل ۷۵۰ تا ۲۵۲۸ متر تهیه شده است. مبنای تقسیم‌بندی بر اساس فواصل مساوی، به ۵ طبقه تقسیم شده است. در مدل آنتروپی شانون H ایش مقدار H بر پراکندگی بیشتر و توزیع ناهمگن‌تر پوشش گیاهی دارد. به‌منظور تحلیل فضایی دقیق‌تر، ناحیه‌بندی منطقه بر اساس طبقه‌بندی ارتفاعی انجام گرفته است تا هم روند تغییرات پوشش گیاهی در هر طبقه به‌طور مجزا بررسی شود و هم ارتباط بین ارتفاع و تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان مورد تحلیل قرار گیرد. شکل ۳ نقشه ناحیه‌بندی منطقه را بر اساس این طبقه‌بندی نشان می‌دهد.



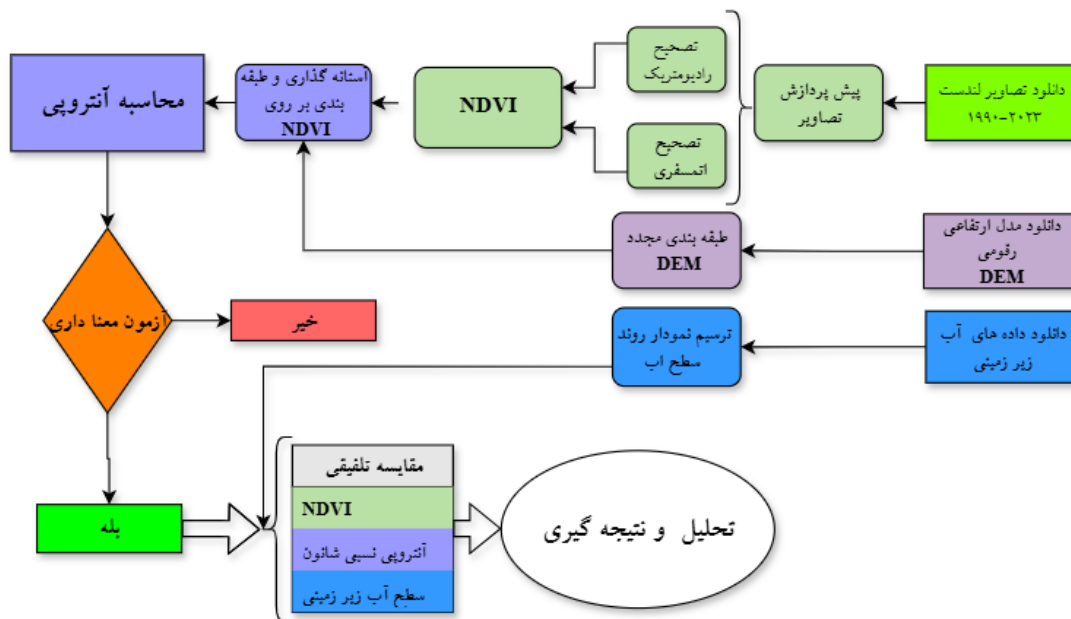
شکل ۳. ناحیه بندی محدوده شهرستان رشتخوار جهت محاسبات مدل آنتروپی شانون

در این پژوهش برای بررسی وجود روند در سری زمانی آنتروپی نسبی شانون، از رگرسیون خطی ساده به‌عنوان روش پارامتریک استفاده شد. در این روش، مدل $S_t = \beta_0 + \beta_1 t + \epsilon_t$ بر داده‌ها برازش داده شد که در آن S_t مقادیر آنتروپی نسبی در زمان β_0 عرض از مبدأ، β_1 شیب خط روند و ϵ_t جمله خطا است. معناداری شیب (β_1) با استفاده از آزمون t بررسی شد.

بعد از ارزیابی روند تغییرات پوشش گیاهی، جهت مقایسه آن با آب زیرزمینی در شهرستان، داده‌های روند عمق آب زیرزمینی از طریق گزارش آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی تهیه شده است. این داده به‌صورت نمودار خطی از سال ۱۳۶۵ تا ۱۴۰۱ ترسیم شده است. در مرحله بعد داده‌های NDVI، آنتروپی نسبی شانون و سطح آب

¹ DEM

زیرزمین باهم ادغام شده‌اند و ارتباط و روند آنها در نرم‌افزار Excel باهم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و با مقایسات موجود در ارتباط با موضوع و منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهایتاً با توجه به موجود بودن داده‌های زمانی، مقادیری برای سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ و ۲۰۵۱ پیش‌بینی شده‌اند. شکل ۴ فلوچارت روش پژوهش را در این مطالعه نشان می‌دهد.

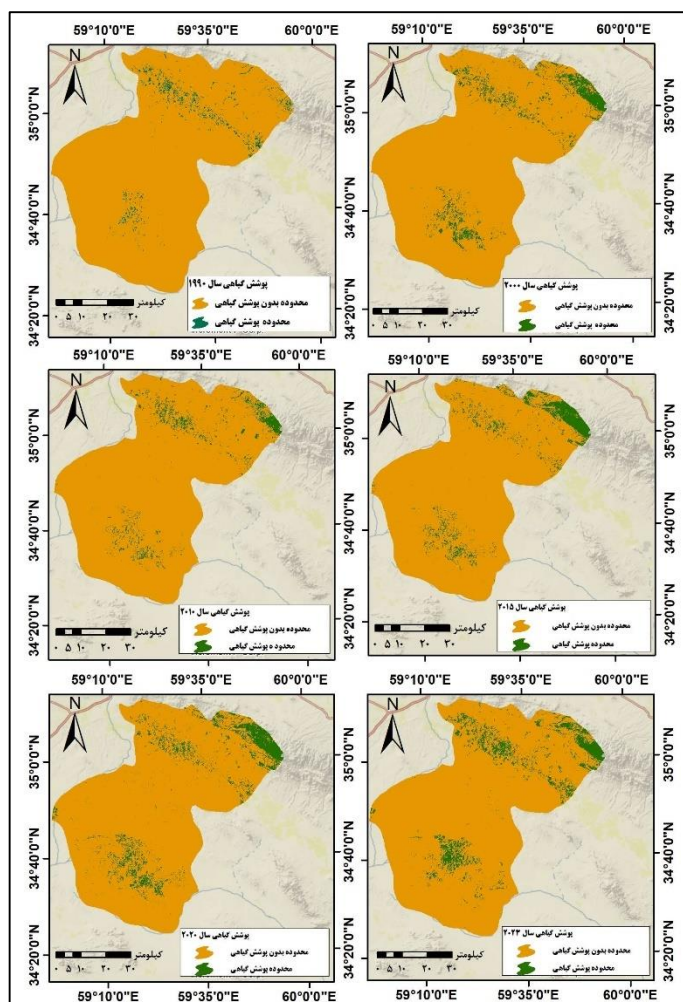


شکل ۴. فلوچارت مراحل انجام پژوهش

۴ بحث و یافته‌ها

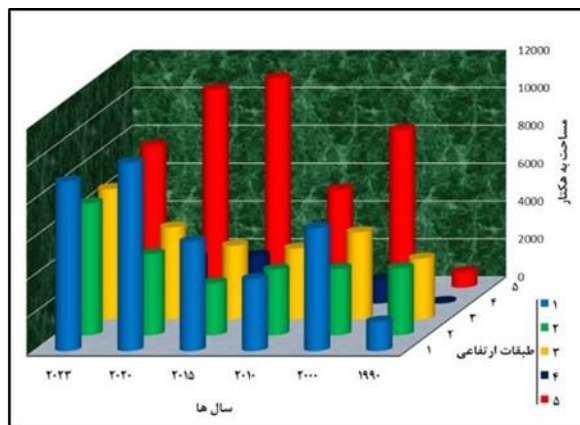
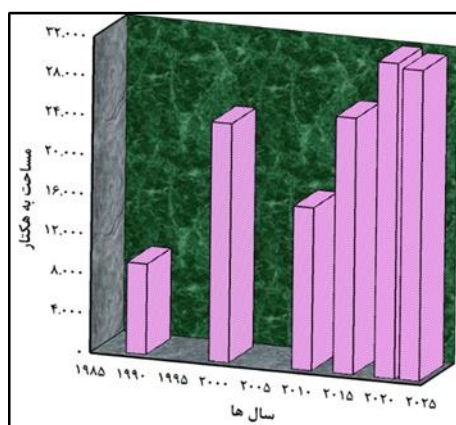
۴٫۱ روند استخراج نقشه پوشش گیاهی از طریق شاخص NDVI

بر اساس طبقه‌بندی مبتنی بر شاخص NDVI (آستانه پوشش گیاهی ≤ 0.15) که در روش تحقیق ذکر شده، نقشه‌های تهیه‌شده برای سال‌های مورد مطالعه تصویر روشنی از ترکیب فضایی و روند زمانی پوشش گیاهی شهرستان رشت‌خوار ارائه می‌دهد (شکل ۵). الگوی فضایی پوشش‌های گیاهی تغییرات قابل‌تأملی را نشان می‌دهد؛ به‌ویژه ناحیه شمال‌شرق شهرستان که در سال‌های اولیه تنها لکه‌های پراکنده‌ای از پوشش را دارد، به‌تدریج از اواخر دهه ۱۹۹۰ و به‌ویژه در بازه‌های میانی و پایانی سری زمانی نشان‌دهنده افزایش سطح و چگالی پوشش گیاهی در آن منطقه است. هم‌زمان، در بخش‌های مرکزی و جنوبی نقشه‌ها، پوشش‌های گیاهی به‌صورت نقاط کوچک و پراکنده حفظ شده‌اند و در طول زمان تا حدودی افزایش کمی و پراکندگی فضایی افزایشی را نشان می‌دهند اما هیچ‌گاه به‌صورت نوارهای پیوسته درنیامده‌اند. این تفسیر توصیفی می‌تواند پایه‌ای برای تحلیل‌های کمی باشد تا شدت، نرخ و مکان دقیق تغییرات پوشش گیاهی در دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۳ به‌صورت عددی و آماری تعیین گردد.



شکل ۵. نقشه مناطق دارای پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی در شهرستان

شکل ۶، شامل دو نمودار میله‌ای، به‌منظور نمایش تغییرات زمانی مساحت پوشش گیاهی در شهرستان رشتخوار طراحی گردیده است. نمودار سمت چپ، روند تغییرات مساحت کل پوشش گیاهی را از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ به تصویر می‌کشد و یک روند صعودی کلی را نشان می‌دهد؛ به‌نحوی که مساحت کل از حدود ۸,۰۰۰ هکتار در ابتدای دوره به نزدیک ۳۰,۰۰۰ هکتار در انتهای دوره افزایش یافته است، هرچند یک کاهش موقتی در حدود سال ۲۰۰۵ نیز قابل‌مشاهده است. نمودار سمت راست، این روند کلی را با تفکیک مساحت پوشش گیاهی در پنج طبقه مختلف توپوگرافی (ارتفاعی) طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳، مورد واکاوی دقیق‌تر قرار می‌دهد. تحلیل این نمودار بیانگر یک بازتوزیع فضایی قابل‌توجه در پوشش گیاهی است؛ درحالی که در سال ۱۹۹۰، بیشترین سهم مساحت متعلق به طبقات ارتفاعی میانی (طبقات ۲ و ۳) بود، در دهه‌های بعد، به‌ویژه از سال ۲۰۰۰ به بعد، افزایش چشمگیری در مساحت پوشش گیاهی طبقات با کمترین (طبقه ۱) و به‌خصوص بیشترین ارتفاع (طبقه ۵) رخ داده است، به‌طوری که طبقه ۵ به طبقه غالب از نظر وسعت تبدیل گردید. در مقابل، اهمیت نسبی طبقات میانی کاهش یافته است؛ بنابراین، با تلفیق اطلاعات هر دو نمودار، استنتاج می‌شود که افزایش کلی مشاهده‌شده در مساحت پوشش گیاهی شهرستان، عمدتاً ناشی از گسترش آن در نواحی پست و به‌ویژه در مرتفع‌ترین مناطق بوده است که این امر، هم‌راستا با یافته‌های تحلیل آنتروپی مبنی بر افزایش ناهمگونی و پراکندگی فضایی پوشش گیاهی است.



شکل ۶. روند زمانی تغییرات مساحت کل پوشش گیاهی (نمودار چپ) و توزیع آن در طبقات مختلف توپوگرافی (نمودار راست).

۴،۲ نتایج مدل آنتروپی شانون

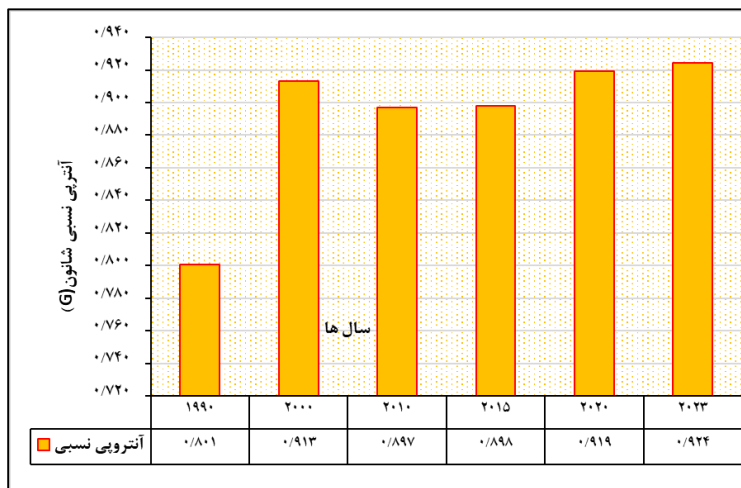
نتایج مدل آنتروپی در جدول ۳ ارائه شده است. جدول ارائه شده شامل مراحل مختلف محاسبه آنتروپی و ضریب نرمال شده برای سال‌های مختلف است. در سطرهای ۱ تا ۵، اطلاعات مربوط به هر طبقه توپوگرافی آمده است. ستون‌های دوم تا ششم ($\ln^*pi$ برای سال‌های مختلف)، شامل مقادیر $\ln^*pi$ برای طبقات مختلف در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳ هستند. سطر (Σ)، مجموع مقادیر $\ln^*pi$ برای همه طبقات در هر سال محاسبه شده است. این مجموع در واقع همان مقدار منفی آنتروپی ($-H$) است. سطر ($\ln(5)$)، مقدار لگاریتم طبیعی ۵ (تعداد طبقات) محاسبه شده است. سطر (G)، ضریب نرمال شده با تقسیم مقدار آنتروپی (H) بر $\ln(5)$ محاسبه شده است. بعد از محاسبه آنتروپی نسبی شانون با استفاده از آزمون t بررسی شد که نتایج در سطح اطمینان ۹۵٪ ($\alpha=0.05$) با مقدار $p=0.014$ معنادار بود. این نتیجه نشان‌دهنده وجود روند افزایشی معنادار در سری زمانی آنتروپی نسبی شانون طی دوره مورد مطالعه است که حاکی از افزایش پیوسته پراکندگی پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه است.

جدول ۳. محاسبه شاخص آنتروپی شانون (H) و شاخص نرمال شده ($G = H/\ln(n)$) طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳

$\ln^*pi_{2023}$	$\ln^*pi_{2020}$	$\ln^*pi_{2015}$	$\ln^*pi_{2010}$	$\ln^*pi_{2000}$	$\ln^*pi_{1990}$	
-۰/۳۵۸	-۰/۳۶۳	-۰/۳۳۴	-۰/۳۳۸	-۰/۳۵۳	-۰/۳۰۱	۱
-۰/۳۳۴	-۰/۲۶۹	-۰/۲۳۷	-۰/۳۲۷	-۰/۲۸	-۰/۳۶۸	۲
-۰/۳۳۳	-۰/۲۸۶	-۰/۲۸۴	-۰/۳۳۷	-۰/۳۱۶	-۰/۳۶۷	۳
-۰/۱۲۲	-۰/۱۹۵	-۰/۲۲۶	-۰/۰۷۸	-۰/۱۵۴	-۰/۰۳۹	۴
-۰/۳۴۲	-۰/۳۶۶	-۰/۳۶۴	-۰/۳۶۴	-۰/۳۶۷	-۰/۲۱۴	۵
-۱/۴۸۸	-۱/۴۸	-۱/۴۴۵	-۱/۴۴۴	-۱/۴۷	-۱/۲۸۹	مجموع H
۱/۴۸۸	۱/۴۸	۱/۴۴۵	۱/۴۴۴	۱/۴۷	-۱/۲۸۹	+H
۱/۶۰۹	۱/۶۰۹	۱/۶۰۹	۱/۶۰۹	۱/۶۰۹	۱/۶۰۹	$\ln 5$
۰/۹۲۴	۰/۹۱۹	۰/۸۹۸	۰/۸۹۷	۰/۹۱۳	۰/۸۰۱	$G=H/\ln(n)$

مقدار (G) نشان می‌دهد که چه مقدار پراکنش پوشش گیاهی در هر سال نسبت به حالت کاملاً تصادفی نزدیک‌تر است. هرچه مقدار (G) بیشتر باشد، پراکنش بیشتر و توزیع ناهمگن‌تر است. با توجه به شکل ۷، می‌توان مشاهده کرد که مقدار (G) در طول زمان افزایش یافته است که نشان می‌دهد پراکنش پوشش گیاهی در

منطقه مورد مطالعه در حال افزایش است. البته در ۱۰ سال اول روند به صورت خیلی سریعی این پراکندگی افزایش یافته است و احتمال دخالت عوامل تأثیرگذار بر پراکندگی بیشتر می شود. باید دید علت این تغییر چه بوده است و اینکه چرا روند پراکندگی پوشش گیاهی در این شهرستان رو به افزایش است. در این پژوهش یکی از متغیرهای تأثیرگذار که سطح آب زیرزمین است را با این تغییرات مورد مقایسه قرار داده ایم.



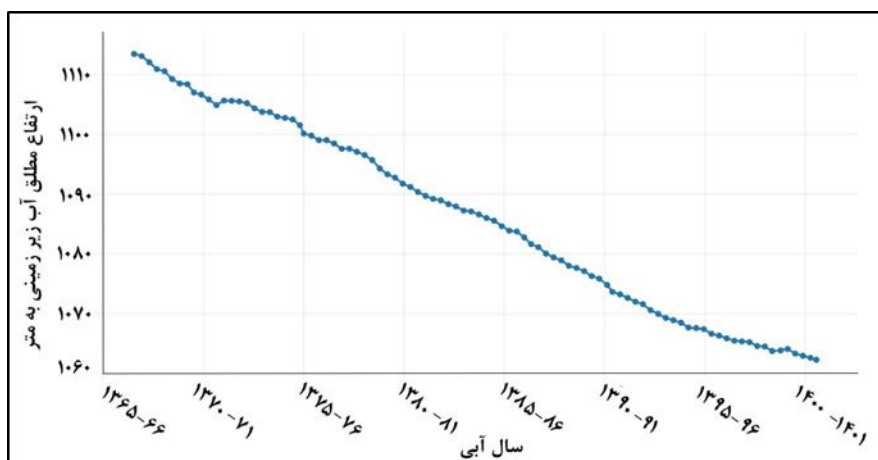
شکل ۷. روند آنتروپی نسبی شانون (G) طی سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳

۴/۳ روند تغییرات سطح آب زیرزمین

سطح آب زیرزمینی شهرستان رشتخوار، طی دوره زمانی سال آبی ۱۳۶۵-۶۶ (۱۹۸۶-۱۹۸۷) لغایت ۱۴۰۱-۱۴۰۰ (۲۰۲۱-۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۸). در این بازه زمانی، یک روند کاهشی مشخص و تقریباً مستمر در سطح آبخوان مشاهده می شود. ارتفاع مطلق آب زیرزمینی که در ابتدای دوره سال آبی ۱۳۶۵-۶۶ (۱۹۸۶-۱۹۸۷) در تراز اندکی بالاتر از ۱۱۱۰ متر ثبت گردیده است، به طور مداوم کاهش یافته و در انتهای دوره مورد مطالعه سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ (۲۰۲۱-۲۰۲۲) به سطحی کمی بالاتر از ۱۰۶۰ متر رسیده است. بدین ترتیب، افت تجمعی قابل توجهی، معادل تقریباً ۵۰ متر، طی یک دوره حدوداً ۳۵ ساله در سطح ایستایی منطقه به ثبت رسیده است که بیانگر فشار وارد بر منابع آب زیرزمینی و کاهش ذخایر استراتژیک آب در این شهرستان است.

مقایسه روند تغییرات ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی و شاخص آنتروپی نسبی پوشش گیاهی در شهرستان رشتخوار طی دوره های زمانی مورد بررسی، نتایج قابل تأملی را نمایان می سازد. همان طور که مشاهده می شود، سطح آب زیرزمینی در این شهرستان از سال آبی ۱۳۶۵-۶۶ (۱۹۸۶-۱۹۸۷) لغایت ۱۴۰۱-۱۴۰۰ (۲۰۲۱-۲۰۲۲)، روندی قویاً کاهشی و مستمر را تجربه نموده است؛ به نحوی که افت تجمعی حدود ۵۰ متری در تراز ایستایی به ثبت رسیده و این امر به وضوح بر فشار شدید وارده بر منابع آب زیرزمینی و تخلیه آبخوان در این بازه زمانی حدوداً ۳۵ ساله دلالت دارد. در مقابل، بررسی روند تغییرات شاخص آنتروپی نسبی شانون برای پوشش گیاهی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ میلادی، الگوی متفاوتی را آشکار می سازد؛ این شاخص که معیاری برای سنجش ناهمگونی و پراکندگی فضایی پوشش گیاهی است، پس از یک افزایش قابل توجه اولیه از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ (از ۰/۸۰۱ به ۰/۹۱۳)، علی رغم نوسانات جزئی، در سطوح بالایی باقی مانده و حتی روند صعودی ملایمی را تا سال ۲۰۲۳ (رسیدن به ۰/۹۲۴) نشان داده است؛ بنابراین، یک تضاد بارز میان این دو روند مشاهده می شود: در شرایطی که بحران کمیت منابع آب زیرزمینی با کاهش مداوم سطح ایستایی تشدید گردیده، ساختار فضایی پوشش گیاهی منطقه به سمت ناهمگونی، پراکندگی و تنوع بیشتر سوق یافته یا در وضعیت ناهمگن بالایی تثبیت شده است. این

تقابل روندی می‌تواند بیانگر تغییرات پیچیده‌ای در الگوهای کاربری اراضی و مدیریت کشاورزی در پاسخ به محدودیت‌های آبی باشد؛ ازجمله، احتمال داده می‌شود که تغییراتی در الگوی کشت، خرد شدن اراضی، یا توسعه‌های نامتوازن فضایی به وقوع پیوسته باشد که منجر به افزایش آنتروپی فضایی پوشش گیاهی هم‌زمان با افت شدید منابع آب زیرزمینی گردیده است. این یافته‌ها لزوم بررسی‌های دقیق‌تر در خصوص اندرکنش میان مدیریت منابع آب و دینامیک‌های پوشش/کاربری اراضی در این منطقه را مورد تأکید قرار می‌دهد.



شکل ۸. نمودار روند تغییرات سطح آب زیرزمین طی دوره ۱۳۶۵ تا ۱۴۰۱

بررسی هم‌زمان روند کاهشی سطح آب زیرزمینی و روند افزایشی یا تثبیت در سطح بالای آنتروپی نسبی پوشش گیاهی در شهرستان رشتخوار، یافته‌ای را ارائه می‌دهد که در نگاه نخست ممکن است غیرمنتظره تلقی گردد. انتظار اولیه آن است که کاهش دسترسی به منابع آبی، به کاهش کلی پوشش گیاهی، تمرکز آن در نواحی مساعدتر و یا یکنواخت‌سازی به نفع گونه‌های مقاوم منجر شود که همگی قاعده‌تاً باید به کاهش شاخص آنتروپی (کاهش ناهمگونی فضایی) بینجامند. بااین‌حال، این پدیده به‌ظاهر متناقض می‌تواند در چارچوب واکنش‌های پیچیده سیستم‌های جغرافیایی و اکولوژیکی-اجتماعی به تنش آبی تبیین گردد. این افزایش در آنتروپی نسبی، احتمالاً نه به‌عنوان یک پیامد مستقیم و مثبت کم‌آبی بر پراکنش گیاه، بلکه به‌عنوان نتیجه‌ای از فرایندهای انطباقی و تحولات ساختاری در چشم‌انداز ناشی از محدودیت منابع آب قابل تفسیر است. ازجمله عوامل محتمل می‌توان به تغییرات گسترده در الگوهای کشاورزی و کاربری اراضی اشاره نمود؛ به‌گونه‌ای که ممکن است جایگزینی کشت‌های یکپارچه و آب‌بر با کشت‌های متنوع‌تر، پراکنده‌تر، یا متکی بر قطعات کوچک‌تر صورت گرفته باشد. همچنین، فرایندهای قطعه‌قطعه شدن چشم‌انداز^۱ یا رهاسازی نامتوازن اراضی کشاورزی به دلیل کاهش صرفه اقتصادی، می‌توانند به ایجاد یک موزایک فضایی ناهمگن‌تر و درنتیجه افزایش محاسبه‌شده در آنتروپی نسبی منجر شده باشند. علاوه بر این، واکنش‌های اکولوژیکی ناهمگن، نظیر استقرار لکه‌ای گونه‌های مقاوم‌تر یا بقای پوشش گیاهی صرفاً در پناهگاه‌های خرد با شرایط محلی مساعدتر، نیز می‌تواند در افزایش پیچیدگی و پراکندگی فضایی مشاهده‌شده نقش داشته باشد؛ بنابراین، این روند افزایشی در آنتروپی، بیش از آنکه نشان‌دهنده بهبود وضعیت پوشش گیاهی باشد، به‌احتمال‌زیاد بیانگر یک بازآرایی ساختاری و افزایش پیچیدگی فضایی در چشم‌انداز شهرستان رشتخوار تحت تأثیر فشار فرایندهای کمبود آب زیرزمینی است. در فضای اقتصادی حاکم بر منطقه و اینکه پارادایم فکری مردم منطقه پارادایم‌های امکان‌گرایی به‌جای پارادایم پایداری محیط زیستی است و از طرف دیگر مدیریت دولتی در بخش کشاورزی نیز برنامه مدون و آمایشی خاصی برای القای

¹ landscape fragmentation

پارایم پایداری ندارد و یا قدرت اجرای آن را به دلیل شرایط اقتصادی ندارد؛ بنابراین، مردمان این شهرستان بر اساس نیازهای اقتصادی و چگونگی روند بازار به تلاش برای استفاده از گونه‌های متفاوت و مقاوم در برابر خشک‌سالی نظیر زعفران روی آورده‌اند که نیاز به منابع آبی کمتری دارد و چالش کمبود آب را حل نموده است.

۴/۴ تطبیق روند آب زیرزمینی با پراکندگی پوشش گیاهی

با ادغام یافته‌های کمی جدول ۴ و شواهد پژوهش شاطری و همکاران (۱۴۰۱)، تحلیل جامع تغییرات اکولوژیکی شهرستان رشتخوار نشان می‌دهد که افت ۱۳۰ متری سطح آب زیرزمینی (از ۱۱۱۰ متر در ۱۳۶۶ به ۱۲۴۰ متر در ۱۴۰۰) به‌عنوان محرک اصلی، منجر به تغییر استراتژیک الگوی کشت به سمت محصولات کم‌آب‌بر (به‌ویژه پسته) شده است که این گذار نه‌تنها شاخص NDVI را ۱۲۰٪ افزایش داده (از ۰/۲۵ به ۰/۵۵)، بلکه با ایجاد تکه‌تکه‌شدگی ساختاری چشم‌انداز، آنتروپی شانون را ۳۱٪ بالا برده (از ۰/۷۰ به ۰/۹۲)؛ این تغییرات اکولوژیکی مستقیماً با پیامدهای توسعه‌ای مرتبط است: گزارش‌های میدانی پژوهش شاطری و همکاران (۱۴۰۱) حاکی از آن است که ۵۵/۷٪ کشاورزان به کشت پسته روی آورده‌اند که ضمن ایجاد اشتغال (ضریب اهمیت ۰/۰۷۸) و تنوع شغلی (ضریب ۰/۰۸۶)، درآمد خانوارها را ۴۳/۹٪ افزایش داده و به‌تبع آن، همبستگی مثبت قوی بین عمق آب و شاخص‌های پوشش گیاهی را توجیه می‌کند؛ درواقع، با این شرایط، افزایش پوشش گیاهی باوجود کاهش آب، تناقض نیست، بلکه بازتابی از تطبیق هوشمندانه کشاورزان با بحران منابع آبی است که با توسعه روستایی پایدار همراه شده، هرچند تداوم افت ۱۳۰ متری سطح آب هشدار می‌دهد که این مدل برای پایداری بلندمدت نیازمند تلفیق سیاست‌های حفاظت از آب (مانند آبیاری قطره‌ای) با توسعه کشت محصولات کم‌آب‌بر است.

جدول ۴. تطبیق داده‌های سطح آب زیرزمینی و پوشش گیاهی در شهرستان رشتخوار

سال میلادی	عمق آب زیرزمینی (متر)	تغییر عمق نسبت به ۱۹۹۰ (متر)	NDVI	تغییر NDVI نسبت به ۱۹۹۰	آنتروپی نسبی (G)	تغییر G نسبت به (۱۹۹۰)
۱۹۹۰	۱۱۱۵	۵	۰/۲۸	+۰/۰۳	۰/۸۰۱	۰ (پایه)
۲۰۰۰	۱۱۴۰	۳۰	۰/۳۸	+۰/۱۳	۰/۹۱۳	+۰/۱۱۲
۲۰۱۰	۱۱۸۵	۷۵	۰/۴۷	+۰/۲۲	۰/۸۹۷	+۰/۰۹۶
۲۰۱۵	۱۲۱۰	۱۰۰	۰/۵۱	+۰/۲۶	۰/۸۹۸	+۰/۰۹۷
۲۰۲۰	۱۲۴۰	۱۳۰	۰/۵۵	+۰/۳۰	۰/۹۱۹	+۰/۱۱۸
۲۰۲۳	۱۲۴۵	۱۳۵	۰/۵۶	+۰/۳۱	۰/۹۲۴	+۰/۱۲۳

درنهایت بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده بر روی داده‌های آنتروپی و اجزای آن در طبقات توپوگرافی، ارتباط معناداری میان الگوی پراکندگی پوشش گیاهی و ویژگی‌های توپوگرافیک در شهرستان رشتخوار قابل استنتاج است. شواهد این ارتباط در تغییرات نامتجانسی است که در سهم نسبی هر طبقه توپوگرافی ($\pi * \ln(\pi)$) در شکل‌دهی به ناهمگونی کلی چشم‌انداز طی دوره مورد مطالعه مشاهده گردید. به‌طور مشخص، افزایش اهمیت نسبی مشاهده‌شده برای طبقات معرف کمترین توپوگرافی (طبقه ۱) و همچنین طبقات با توپوگرافی متوسط به بالا و بالا (طبقات ۴ و ۵)، در کنار کاهش سهم نسبی طبقات با توپوگرافی متوسط (طبقات ۲ و ۳)، نشان می‌دهد که واکنش سیستم پوشش گیاهی به تغییرات محیطی (به‌ویژه کاهش منابع آب زیرزمینی) به‌طور قابل‌توجهی توسط مشخصات توپوگرافیک تعدیل شده است. از آنجایی‌که توپوگرافی به‌عنوان یک عامل کنترل‌کننده کلیدی بر توزیع منابع (نظیر آب‌وخاک)، میکروکلیم و همچنین الگوهای فعالیت انسانی (به‌ویژه کشاورزی و کاربری اراضی) عمل می‌نماید، منطقی است که بازآرایی فضایی و افزایش پیچیدگی مشاهده‌شده در ساختار پوشش گیاهی منطقه، به‌شدت تحت تأثیر و مرتبط با این بستر توپوگرافیک زیربنایی در نظر گرفته

شود؛ بنابراین، می‌توان قائل شد که دینامیک‌های فضایی پوشش گیاهی و تغییرات آن در پراکندگی، به‌طور تفکیک‌ناپذیری با ساختار توپوگرافیک شهرستان در ارتباط بوده‌اند.

۴٫۵ پیش‌بینی روند تغییرات

جدول ۵ پیش‌بینی سناریوهای آینده شهرستان رشتخوار، مبتنی بر روندهای خطی مشاهدات تاریخی (۲۰۲۳-۱۹۹۰) و با فرض ادامه وضع موجود بدون مداخله مدیریتی، تصویری هشداردهنده از آینده اکولوژیکی-هیدرولوژیکی منطقه ترسیم می‌کند.

جدول ۵. محاسبات آماری روند پیش‌بینی متغیرها

متغیر	منبع داده‌های تاریخی	نرخ تغییر سالانه	فرمول پیش‌بینی
عمق آب زیرزمینی	جدول تطبیقی (۱۹۹۰-۲۰۲۳)	۳/۹۴ متر/سال	$1245 + 3.34 * (x - 2023)$
NDVI	جدول تطبیقی (۱۹۹۰-۲۰۲۳)	۰/۰۰۸۵ واحد/سال	$0.56 + 0.0085 * (x - 2023)$
آنتروپی نسبی (G)	جدول تطبیقی (۱۹۹۰-۲۰۲۳)	۰/۰۰۳۷ واحد/سال	$0.924 + 0.0037 * (x - 2023)$

بر اساس محاسبات جدول ۶ استخراج می‌گردد که در آن نرخ تغییرات سالانه (افت ۳٫۹۴ متری آب، رشد ۰٫۰۰۸۵ واحدی NDVI و افزایش ۰٫۰۰۳۷ واحدی آنتروپی)، در سناریو ۱۴۱۰ (۲۰۳۱) عمق آب به ۱۲۷۷ متر خواهد رسید که با عبور از آستانه ۱۲۰۰ متری، خطر فرونشست زمین در مناطق با خاک‌های رسی را جدی می‌کند؛ هم‌زمان NDVI به ۰٫۶۳ و آنتروپی به ۰٫۹۵ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده گسترش بی‌رویه کشت است. در سناریو ۱۴۲۰ (۲۰۴۱) با رسیدن عمق آب به ۱۳۱۶ متر، شوره‌زودی آبخوان (مطابق شواهد دانشگاه تهران) کیفیت آب را به‌شدت کاهش داده و عملکرد محصولات کم‌آب‌بر مانند پسته را تا ۴۰٪ تخریب می‌کند، اگرچه NDVI به ۰٫۷۱ و آنتروپی به ۰٫۹۹ می‌رسد. بحران در سناریو ۱۴۳۰ (۲۰۵۱) به اوج می‌رسد: عمق ۱۳۵۵ متری آب، فروپاشی کامل کشاورزی را به دنبال دارد زیرا هزینه استخراج آب از درآمد حاصل از کشت فراتر رفته و آنتروپی به حداکثر مقدار خود (۱٫۰۰) می‌رسد که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت اما فریبنده پوشش گیاهی در شرایط فاجعه‌بار است. این پیش‌بینی‌ها که بر اساس مدل‌های خطی ساده هستند، هشدار فوری برای اجرای مداخلات مدیریتی مانند محدودیت توسعه افقی کشت، تغذیه مصنوعی آبخوان و اصلاح الگوی مصرف آب ارائه می‌دهند؛ در غیر این صورت، توسعه ظاهری کشاورزی رشتخوار تا دو دهه آینده به قیمت نابودی کامل منابع آبی تمام خواهد شد.

جدول ۶. محاسبات آماری روند پیش‌بینی متغیرها

سال میلادی	عمق آب زیرزمینی (متر)	NDVI	آنتروپی نسبی (G)	پیامد احتمالی
۲۰۳۱	۱۲۷۷	۰/۶۳	۰/۹۵	فرونشست زمین
۲۰۴۱	۱۳۱۶	۰/۷۱	۰/۹۹	شوری شدید آبخوان
۲۰۵۱	۱۳۵۵	۰/۸۰	۱	فروپاشی کشاورزی

۵ نتیجه‌گیری

این پژوهش با تمرکز بر منطقه نیمه‌خشک رشتخوار، نشان داد که کاهش مداوم سطح آب‌های زیرزمینی (بیش از ۵۰ متر طی سه دهه اخیر) با الگوهای پیچیده‌ای در پراکندگی پوشش گیاهی همراه بوده است. تحلیل مبتنی بر مدل آنتروپی شانون و شاخص NDVI آشکار ساخت که ناهمگونی فضایی پوشش گیاهی در دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ روندی افزایشی داشته و مقدار شاخص آنتروپی نسبی از ۰٫۸۰۱ به ۰٫۹۲۴ ارتقا یافته است. این هم‌زمانی تضادآمیز بین افت منابع آب و افزایش ناهمگونی فضایی، برخلاف انتظار اولیه مبنی بر کاهش پوشش،

نشان‌دهنده بازآرایی ساختاری چشم‌انداز تحت فشار تنش آبی است و نه بهبود اکولوژیکی واقعی. یافته‌ها بیانگر آن است که در این منطقه، تغییرات کاربری زمین، الگوهای جدید کشت (نظیر جایگزینی محصولات کم‌آب‌بر مانند زعفران و پسته) و قطعه‌قطعه‌شدن اراضی، نقشی تعیین‌کننده در افزایش شاخص آنتروپی ایفا کرده‌اند (شاطری و همکاران، ۱۴۰۱؛ رحیمی و جونگ، ۱۴۰۴). نتایج حاضر در همسویی با پژوهش‌های بین‌المللی، بر اهمیت نقش توپوگرافی و منابع آب زیرزمینی در کنترل الگوهای پوشش گیاهی تأکید دارد. به‌عنوان نمونه، هوانگ و همکاران (۲۰۱۹) و پنگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که توزیع فضایی پوشش گیاهی در مناطق خشک مستقیماً از نوسانات سطح آب زیرزمینی و شرایط توپوگرافیک متأثر می‌شود. همچنین، یافته‌های بهلینگ و همکاران (۲۰۲۲) در ایران نشان دادند که خشک‌سالی و فشارهای آبی نه‌تنها موجب کاهش تراکم پوشش، بلکه سبب افزایش پراکندگی و ناهمگونی الگوهای گیاهی می‌شوند. در سطح ملی نیز، پژوهش‌های مشابه (شکاری بادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ غفاری و همکاران، ۱۳۹۹) بر اهمیت شاخص‌های آنتروپی در آشکارسازی تعامل میان متغیرهای محیطی و الگوهای پراکنش گیاهان تأکید داشته‌اند. همخوانی این نتایج با پژوهش حاضر، نشان‌دهنده اعتبار روش به‌کاررفته و تعمیم‌پذیری آن در محیط‌های خشک ایران است. در کنار این تطبیق‌ها، یافته‌های این پژوهش بر وجود یک شکاف مفهومی در مدیریت منابع تأکید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که تغییرات مشاهده‌شده در پوشش گیاهی نه نتیجه برنامه‌ریزی آگاهانه، بلکه بازتابی از سازگاری‌های خودانگیخته کشاورزان و بهره‌برداران محلی در برابر بحران آب است. این الگو، مشابه با آنچه در دیگر مناطق خشک گزارش شده است (بورل و همکاران، ۲۰۲۰؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۴)، نشان می‌دهد که جوامع انسانی در مواجهه با کمبود آب، به‌طور تدریجی به سمت الگوهای تولیدی متنوع‌تر اما پراکنده‌تر حرکت می‌کنند؛ فرآیندی که گرچه در کوتاه‌مدت موجب پایداری نسبی معیشت می‌شود، اما در بلندمدت تهدیدی جدی برای توازن اکولوژیکی و پایداری منابع آبی محسوب می‌گردد. بر اساس پیش‌بینی‌های ارائه‌شده در این مطالعه، تداوم وضعیت کنونی می‌تواند طی سه دهه آینده پیامدهایی نظیر فرونشست زمین (در سال ۲۰۳۱)، شوری شدید آبخوان (در سال ۲۰۴۱) و فروپاشی کشاورزی (در سال ۲۰۵۱) را به همراه داشته باشد. چنین چشم‌اندازی، با آنچه در گزارش‌های بین‌المللی پیرامون مناطق خشک جهان نیز مطرح شده است (فائو، ۲۰۲۰)، همخوانی دارد و نشان می‌دهد که بدون مداخله مدیریتی و اصلاح الگوهای مصرف و تولید، توسعه کشاورزی موجود به قیمت نابودی کامل منابع آبی تمام خواهد شد.

درمجموع، این پژوهش نشان داد که شاخص‌های اطلاعاتی همچون آنتروپی شانون، همراه با داده‌های سنجش‌ازدور، چارچوبی معتبر برای تبیین پیچیدگی تعاملات میان منابع آب و پوشش گیاهی فراهم می‌آورد. همچنین، نتایج به‌طور شفاف تأکید می‌کنند که افزایش شاخص آنتروپی در مناطق خشک نباید به‌عنوان بهبود زیستی تفسیر گردد، بلکه باید آن را نشانه‌ای از بازآرایی فضایی و سازگاری‌های اجتماعی-اقتصادی در برابر فشار هیدرولوژیکی دانست؛ بنابراین، توصیه می‌شود سیاست‌گذاران منابع آب و کشاورزی، با تکیه بر شواهد این‌چنینی، راهبردهایی چندبعدی شامل ارتقای بهره‌وری آبی، اصلاح الگوی کشت و حفاظت فعال از اکوسیستم‌های شکننده را در دستور کار قرار دهند.

References

- Abdi Torbaghan, J., Sarrafi, M., & Razavian, M. (2020). Urban physical development analysis using Shannon entropy, Holdren, and Moran models (Case study: Kashmar city). Sustainable Development of Geographic Environment, 1, 53–72. [In Persian]

- Ahmadi, H., Masoudian, S., & Kaviani, M. (2019). Analysis of vegetation cover changes in arid regions of Iran using spatial indices. *Rangeland and Watershed Management Research*, 25(3), 345–360. [In Persian]
- Ahmadi, K., Sahak, A. S., & Sahak, A. T. (2023). Evaluation of urban sprawl and land use/cover variation patterns through remote sensing data: A case study in Kabul City, Afghanistan. *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 4(6), 10–20. <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2023.4.6.434>
- Almalki, R., Khaki, M., Saco, P. M., & Rodriguez, J. F. (2022). Monitoring and mapping vegetation cover changes in arid and semi-arid areas using remote sensing technology: A review. *Remote Sensing*, 14(20), 5143. <https://doi.org/10.3390/rs14205143>
- Asakereh, H., Taheri Alam, S., & Farhadi, N. (2024). NDVI changes in relation to Iran's precipitation climate. *Geographic Information Quarterly "Sepehr"*. [In Persian]
- Behling, R., Roessner, S., Foerster, S., Saemian, P., Tourian, M. J., Portele, T. C., ... & Lorenz, C. (2022). Interrelations of vegetation growth and water scarcity in Iran revealed by satellite time series. *Scientific Reports*, 12, 20784. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24712-6>
- Behrangmanesh, M., Khosravi, H., Azarnivand, H., & Senator, A. (2020). Quantifying vegetation cover changes using remote sensing (Case study: Fars Province). *Plant Ecosystem Conservation Journal*, 7(15), 295–318. [In Persian]
- Burrell, A. L., Evans, J. P., & De Kauwe, M. G. (2020). Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification. *Nature Communications*, 11, 3853. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710-7>
- Cushman, S. A. (2021). Entropy in Landscape Ecology: A Quantitative Textual Multivariate Review. *Entropy*, 23(11), 1425. <https://doi.org/10.3390/e23111425>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Supporting sustainable agricultural development in global drylands. <https://www.fao.org/partnerships/academia/news/news-detail/Supporting-sustainable-agricultural-development-in-global-drylands/en>
- Ghaffari, S., Ghorbani, A., Ma'mari, M., Mostafazadeh, R., Bidarlord, M., & Kakeh Mami, A. (2020). Modeling and identifying influencing factors in the distribution of *Festuca ovina* species using maximum entropy method in the northern rangelands of Ardabil Province. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 27(3), 433–462. [In Persian]
- Halebiyan, A., Shaemi, A., & Nourbakhsh, S. (2024). Vegetation dynamics in inner and outer buffer zones of anthropogenic activities in central Zagros. *Plant Ecosystem Conservation Journal*, 11(23), 1–17. [In Persian]
- Huang, F., Zhang, D., & Chen, X. (2019). Vegetation response to groundwater variation in arid environments: Visualization of research evolution, synthesis of response types, and

- estimation of groundwater threshold. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1849. <https://doi.org/10.3390/ijerph16101849>
- Huckleba, G., Andresen, B., & Roach, T. N. (2023). Multi-scale spatial ecology analyses: a Kullback information approach. *Landscape Ecology*, 38(3), 645-657.
 - Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications*. Oxford University Press.
 - Kamanroudi Kajouri, M., Zanganeh, A., Karami, T. A., & Gholinia, S. (2020). Analyzing sprawl and spatial changes of Babol city. *Human Geography Research*, 52, 889–902. [In Persian]
 - Kéfi, S., Rietkerk, M., Alados, C. L., Pueyo, Y., Papanastasis, V. P., Elaiç, A., & de Ruiter, P. C. (2007). Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature*, 449(7159), 213–217. <https://doi.org/10.1038/nature06111>
 - Liu, Y., Wu, G., Ma, B., Wu, T., Wang, X., & Wu, Q. (2024). Revealing climatic and groundwater impacts on the spatiotemporal variations in vegetation coverage in marine sedimentary basins of the North China Plain, China. *Scientific Reports*, 14(1), 10085.
 - Mehrani, A., Riazi, B., Mirbagheri, S. A., & Khorasani, N. A. (2021). Monitoring vegetation cover changes in Golestan Province and international wetlands (Alma Gol, Ala Gol, and Aji Gol) and its causes based on bi-temporal NDVI analysis. *Plant Environmental Physiology*, 16(64), 97–111. [In Persian]
 - Mohammadiyari, F., Pourkhabaz, H., Tavakoli, M., & Aghdar, H. (2015). Mapping vegetation cover and monitoring its changes using remote sensing and GIS techniques (Case study: Behbahan County). *Geographic Information Quarterly "Sepehr"*, 23(92), 23–34. [In Persian]
 - Nikpour, A., Amoonia, H., & Shokri, S. (2022). Measurement and evaluation of urban sprawl in coastal areas – Case study: Babolsar County. *Geographic Information Quarterly "Sepehr"*, 31, 161–175. [In Persian]
 - Nowosad, J., & Stepinski, T. F. (2018). Information-theoretical approach to measuring landscape complexity. *BioRxiv*, 383281.
 - Peng, L., Wan, Y., Shi, H., Anwaier, A., & Shi, Q. (2023). Influence of climate, topography, and hydrology on vegetation distribution patterns—Oasis in the Taklamakan Desert hinterland. *Remote Sensing*, 15(22), 5299. <https://doi.org/10.3390/rs15225299>
 - Rahimi, E., & Jung, C. (2025). Analyzing vegetation heterogeneity trends in an urban-agricultural landscape in Iran using continuous metrics and NDVI. *Land*, 14(2), 244. <https://doi.org/10.3390/land14020244>
 - Rahimi, M., & Hosseinali, F. (2021). Monitoring expansion and analyzing the spatial distribution of Zanzan city over four decades using statistical and spatial analyses. *Urban Structure and Function Studies*, 8, 168–190. [In Persian]

- Rahmi, M. A. A., Parikesit, P., & Withaningsih, S. (2024). Vegetation change analysis using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Sumedang Regency. In E3S Web of Conferences (Vol. 495, p. 02007). EDP Sciences.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Shatri, M., Izadi, A., & Izadi, M. (2023). Consequences of Changing the Pattern of Saffron and Pistachio Cultivation and its Impact on the Development of Rural Areas (Case study: Rashtkhar city). Geography and Development, 21(72), 178–204. [In Persian]
- Shekari Badi, A., Mo'tamedi Rad, M., & Mohammadiya, M. (2015). Integrating ANP model and Shannon entropy index to estimate factors affecting the occurrence and zoning of landslide hazard (Case study: Faroub-Rouman Basin, Neyshabur). Geographical Studies of Arid Regions, 6(22), 89–103. [In Persian]
- Sherwin, W. B., & Prat i Fornells, N. (2019). The Introduction of Entropy and Information Methods to Ecology by Ramon Margalef. Entropy, 21(8), 794. <https://doi.org/10.3390/e21080794>
- Tabatabaezadeh, M., Hadian, F., Hosseini, S. Z. A., Barkhordari, J., & Khosravi, H. (2014). Assessing plant adaptation to precipitation changes in desert areas using NDVI (Case study: Ardakan-Aqda Plain). Natural Ecosystems of Iran, 5(1), 23–36. [In Persian]
- Wang, C., & Zhao, H. (2018). Spatial heterogeneity analysis: Introducing a new form of spatial entropy. Entropy, 20(6), 398. <https://doi.org/10.3390/e20060398>
- Yousefi Roshan, M., & Amoonia, H. (2022). Estimating vegetation cover in Babolsar County using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Physical Geography, 4(57), 127. [In Persian]
- Yousefi Roshan, M., & Amoonia, H. (2023). Estimation of vegetation and agricultural lands in Babolsar County using Sentinel-2 satellite imagery and NDVI index. Environmental Science and Technology, 135(8), 143. [In Persian]