



Investigation of the Hydrological Drought of Groundwater Using HDMI Index in Urmia Plain

Arvin Miralizadeh¹, Somayeh Hejabi², Mehdi Kouchakzadeh³

1. M.Sc Student, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

3. Associate Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: Arvinmiralizadeh@modares.ac.ir

Keywords:

Drought, Groundwater Resources Index, Hydrological drought management index, Standardized Well Discharge Index, Modified Standard Electrical Conductivity Index

Extended Abstract

Introduction

Groundwater is one of the important resources that provide resilience against climate change and water shortage during drought. One of the advantages of using groundwater during a drought is that it is often less vulnerable to fluctuations in weather patterns than surface water. While surface water can be affected by changes in precipitation and temperature, groundwater is insulated by the layers of rock and sediment that surround it, which can help maintain a relatively stable water supply even during drought. Therefore, accurate and sustainable management of groundwater resources is important, especially during times of drought when the demand for water is high. Urmia Plain, located in the northwest of Iran, is a semi-arid region that relies heavily on groundwater for agricultural and domestic purposes. Droughts in this region have become increasingly frequent and severe and are a significant threat to the sustainability of groundwater resources. As a result, sustainable management of groundwater resources during drought requires a combination of actions and decisions aimed at reducing water demand, increasing water supply, and improving water use efficiency. By using the combination of quantitative indicators of drought GRI (Groundwater Resource Index), SDWI (Standardized Discharge Index of Exploitation Wells) and qualitative index MSEC (Modified Standard Electrical Conductivity Index) to multivariable hydrological drought management index HDMI in Urmia plain during the

Received:

30 May 2023

Revised:

26 Jun 2023

Accepted:

03 Jul 2023

How to cite this article:

Miralizadeh, A., Hejabi, S., & Kouchakzadeh, M. (2023). Investigating the hydrological drought of groundwater using HDMI index in Urmia plain. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(3), 57- 72. [10.22077/JDCR.2023.6432.1025](https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6432.1025).



years (2003 to 2018) was discussed and the trend of this management index was investigated using Mann-Kendall and Sen's Slope.

Materials and Methods

In order to carry out this study, information on quantitative and qualitative parameters of groundwater in Urmia plain was received from the Water Resources Management Organization. Quantitative information of groundwater, including the level of underground water (water table), discharge of observation wells, and qualitative parameters, including sampling information of observation wells, such as electrical conductivity (EC), are used to calculate the following drought indicators

Drought indices

Groundwater Resources Index

The GRI index is used to monitor the hydrological drought of groundwater. At first, a suitable statistical distribution is fitted, which is usually used due to the flexibility of the gamma distribution. Then, the cumulative distribution function is converted to a normal distribution using equal probabilities, so that its standardized and average becomes zero for each region and each desired period and the standard deviation becomes one. Its positive numbers indicate the absence of drought and negative numbers indicate the existence of this phenomenon.

standardized electrical conductivity index

Electrical conductivity is one of the most important parameters in determining the quality of groundwater. Extracting and calculating the SECI index is the same as the GRI index, with the difference that in this index, the electrical conductivity factor is used instead of the groundwater level.

Standardized Well Discharge Index

This index uses the flow rate of production wells to evaluate the quantitative status of the aquifer, the extraction and calculation method of the SWDI index is the same as the GRI index, and the gamma distribution can be used, with the difference that in this index, the flow rate of production wells is used instead of the groundwater level.

Results and Discussion

The results of the study showed that Urmia plain has experienced several hydrological droughts during the years under study. The monitoring results of hydrological drought management index for the entire region of Urmia Plain show that the longest observed duration is 7 years, which started from 2012 and until the end of 2018, and the most severe drought observed in 2018 was -2.2.

The results of Mann-Kendall's test on the drought indicators of Urmia Plain are presented in the table below (Table 1). The results show that the HDMI and GRI drought indices have a decreasing trend with a slope of -0.144 and -0.297 respectively, which if the current situation continues, the GRI index in 2026 will be less than -2 and the HDMI index in 2031 will reach less than -6. Therefore, taking management decisions to prevent the consequences of the drought of groundwater resources is a vital and necessary matter.

Conclusion

Using the HDMI index can help decision makers to identify periods of hydrological drought and take appropriate measures to reduce the effects of drought on groundwater resources. The findings of this study can be used for better management of groundwater resources in Urmia plain. Also, the suggestion of future studies on the effects of climate change and human activities on the groundwater resources of Urmia plain should be considered.

Table 1. General results of Mann-Kendall test in Urmia Plain

S (Sen's Slope)	Z _{MK}	
-0.144	** -5.62	GRI
-	-0.219	SDWI
-	0.276	SECI
-0.297	** -6.19	HDMI
Significance at the 0.05 level**		



بررسی خشکسالی هیدرولوژیک آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص HDMI در دشت ارومیه

آروین میرعلیزاده^{۱*}، سمیه حجابی^۲، مهدی کوچک زاده^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
 ۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 ۳. دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- *نویسنده مسئول: Arvinmiralizadeh@modares.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی:

از آنجاکه آب‌های زیرزمینی اهمیت بسزایی در تأمین نیاز آب مصرفی بخش‌های مختلف دارند در نتیجه مدیریت و برنامه‌ریزی پیامدهای ناشی از خشکسالی بر منابع زیرزمینی از مسائل مهم و حیاتی در برنامه‌ریزی و اداره کشورها محسوب می‌شود. بدین منظور در این تحقیق با استفاده از ترکیب شاخص‌های کمی خشکسالی GRI (شاخص منبع آب زیرزمینی)، SDWI (شاخص دبی استاندارد شده چاه‌های بهره‌برداری) و شاخص کیفی MSECی (شاخص هدایت الکتریکی استاندارد اصلاح شده) به شاخص چند متغیره مدیریتی خشکسالی هیدرولوژیکی HDMI در دشت ارومیه در طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۷ پرداخته شد. نتایج پایش این شاخص مدیریتی خشکسالی در دشت ارومیه نشان می‌دهد که طولانی‌ترین تداوم مشاهده شده طبق این شاخص مدیریتی ۷ سال است که از سال ۱۳۹۱ شروع و تا پایان سال ۱۳۹۷ ادامه دار بود و شدیدترین خشکسالی مشاهده شده در سال ۱۳۹۷ با مقدار ۲/۲- بوده است. جهت مشاهده روند خشکسالی بر روی شاخص‌های خشکسالی از آزمون من کندانال استفاده شد نتایج نشان داد با ادامه این شیب خط روند فعلی در منطقه تا سال ۱۴۰۵ مقدار شاخص GRI به کمتر از ۲- و تا سال ۱۴۱۰ شاخص مدیریت خشکسالی HDMI به کمتر از ۶- خواهد رسید که نشان از وضعیت عدم بهره‌برداری و قرار گرفتن منابع زیرزمینی در معرض خشکسالی بسیار شدید است. در صورت ادامه وضع موجود امکان استفاده پایدار از منابع زیرزمینی دشت ارومیه غیرممکن خواهد بود.

خشکسالی، شاخص مدیریت خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص منبع آب زیرزمینی، شاخص دبی استاندارد شده چاه‌های بهره‌برداری، شاخص هدایت الکتریکی استاندارد اصلاح شده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۳/۰۹

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۴/۱۲

مقدمه

آب‌های زیرزمینی، یک منبع حیاتی برای میلیاردها نفر در سراسر جهان به شمار می‌روند و انعطاف‌پذیری را در برابر تغییرات آب‌وهوا و کمبود آب در طول خشکسالی فراهم می‌نمایند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل توزیع نامتوازن باران در زمان و مکان‌های مختلف، آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی به حساب می‌آیند. هم‌زمان با افزایش جمعیت در جهان، به دلیل افزایش تقاضای آب و بهره‌برداری بیش‌ازحد، کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در بسیاری از سفره‌های زیرزمینی در سراسر جهان کاهش یافته است. کارشناسان معتقدند انسان در قرن بیست و یکم با بحران کم‌آبی مواجه خواهد شد، این بحران در مناطق خشک و نیمه‌خشک کوهی زمین به علت محدودیت منابع آب سطحی چشم‌گیرتر خواهد بود (Belhassan, 2020; Mirzavand et al., 2021). نبود یک تعریف دقیق از پدیده خشکسالی موجب شده است تشخیص وقوع این پدیده طبیعی با مشکل مواجه شود، خشکسالی باید برای هر منطقه و هر بهره‌بردار به‌طور اختصاصی تعریف شود و نباید به دنبال یک تعریف واحد برای خشکسالی بود، بر اساس تعاریف مختلف ارائه‌شده برای خشکسالی، می‌توان آن را در ۴ دسته شامل خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی تقسیم‌بندی نمود. خشکسالی هیدرولوژیکی مربوط به اثر دوره‌های خشکی بر آب‌های سطحی یا زیرزمینی است. خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح تراز ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی از حد معمول خود پایین‌تر باشد. علاوه بر بارش عامل‌های اقلیمی دیگر مانند دماهای بالا، توسعه شهری، تغییر در کاربری اراضی و تأسیس سدها نیز می‌توانند به‌طور عمده بر روی خشکسالی هیدرولوژیکی تأثیر بگذارند (Ndayiragije and Li, 2022). ارزیابی پایش خشکسالی و بررسی تأثیر آن بر منابع آب یکی از پیش‌نیازها جهت تهیه تصمیمات مدیریتی و استراتژیک از اقدامات مهم و اساسی مجریان و دست‌اندرکاران می‌باشد (Ghorbani et al., 2023). در سال‌های گذشته شاخص‌های مختلفی جهت تعریف کمی خشکسالی توسعه پیدا کرده‌اند که کارایی این شاخص‌ها در پایش خشکسالی تحت تأثیر انتخاب

دقیق این شاخص‌ها قرار می‌گیرد. بر همین اساس در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده از شاخص‌های مختلف خشکسالی توسط محققین استفاده شده است که در ادامه به نتایج تعدادی از آن‌ها اشاره می‌گردد: نصری و مدرس (Nasri and Modarres, 2017) به بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های جریان کم در استان اصفهان پرداختند برای این منظور از دوری آماری ۲۰ ساله برای ۲۲ ایستگاه هیدرومتری مورد استفاده قرار دادند. نتایج تحلیل روند با استفاده از روش من-کندال و همبستگی اسپیرمن نشان داد دبی میانگین روزانه و شاخص جریان‌های کم در اغلب ایستگاه‌ها دارای روند معنی‌دار منفی است. در نتیجه کاهش دبی روزانه و کاهش دبی جریان‌های کم به‌ویژه در سال‌های اخیر زنگ خطری برای مدیریت منابع آب به‌ویژه در حوضه سد زاینده‌رود در سال‌های آینده است. مصطفی و رحمان (Mustafa and Rahman, 2018) به بررسی روند و شدت خشکسالی شاخص SPI در دوره‌های زمانی مختلف در کشور اردن پرداختند و مشاهده نمودند خشکسالی طولانی‌مدت در کل کشور هر ۱۵ تا ۲۰ سال یک‌بار رخ می‌دهد. نتیجه آزمون من-کندال نشان از روند معنی‌دار کاهشی می‌دهد که به این نتیجه رسیدند در سال‌های نه‌چندان دور با کاهش تدریجی میزان بارندگی دچار خشکسالی شدید در منطقه خواهند شد. میرونی‌دیس و همکاران (Myronidis et al., 2018) به تحلیل و پیش‌بینی روند خشکسالی هیدرولوژیکی در قبرس پرداختند، آن‌ها برای این منظور از شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی جریان استاندارد شده (SDI) برای ۱۱ ایستگاه هیدرومتری استفاده کردند و مشاهده کردند این شاخص هیدرولوژیکی بر اساس آزمون من-کندال در سری‌های زمانی سالانه و فصلی از روند معنی‌دار کاهشی با شیب سن ۹/۴- درصد پیروی کرده است. افضل و رغاب (Afzal and Ragab, 2019) خطر خشکسالی و تغییرات اقلیم بر منابع آب حوضه فروم در انگلستان تحت مدل DiCaSM با استفاده از سناریو تغییر اقلیم UKCP09 در آینده با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI¹، RDI² و SMD² مورد بررسی قرار دادند و افزایش شدت وقایع خشکسالی در تمام شاخص‌های

¹ Reclamation Drought Index

² Soil Moisture Deficit index

شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روند خشکسالی بر اساس دو شاخص مورد مطالعه معنی دار بوده و در حال افزایش است. وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در مقایسه با هواشناسی و کشاورزی با تأخیر روی می‌دهد در نتیجه کاهش یا جبران خسارات ناشی از این خشکسالی بسیار مشکل و پرهزینه است. بدین جهت آگاهی، برنامه‌ریزی و تهیه برنامه مدون مقابله با خشکسالی جهت پایش و کاهش خسارات ناشی از آن برای هر منطقه‌ای ضروری است از آنجاکه در دشت ارومیه چنین مطالعاتی صورت نگرفته است. از این‌رو در این پژوهش با ترکیب ۳ شاخص خشکسالی کمی و کیفی آب زیرزمینی شامل SDWI، GRI و MSECI به بررسی روند مدیریتی هیدرولوژیکی شاخص چند متغیره HDMI در منطقه خشک و نیمه‌خشک دشت ارومیه پرداخته شده است. با توجه به داده‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه ۱۷ چاه پیزومتری مناطق مختلف در محدوده دشت ارومیه در بازه زمانی ۱۶ ساله (۱۳۸۲ - ۱۳۹۷) انتخاب گردید و با استفاده از روش چندضلعی تیسن پارامترهای مورد نیاز نظیر سطح ایستابی، دبی چاه‌های بهره‌برداری و هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی به کل منطقه تعمیم داده شد و شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده در پژوهش با استفاده از تابع آماری گاما در نرم‌افزار برنامه‌نویسی R مورد محاسبه قرار گرفته است.

خشکسالی مشاهده کردند و بیشترین کاهش سطح منابع آب زیرزمینی را در دهه ۲۰۸۰ پیش‌بینی کردند. ناظری تهرودی و همکاران (Nazeri Tahroudi et al., 2020) به بررسی مدیریت خشکسالی هیدرولوژیکی در استان خراسان جنوبی پرداختند، برای این کار از شاخص‌های منبع آب زیرزمینی (IRG¹)، هدایت الکتریکی اصلاح شده (MSECI²) و دبی برداشت استاندارد شده (IDWS³) استفاده کردند و با تلفیق این سه شاخص به شاخص مدیریت خشکسالی هیدرولوژیکی IMDH⁴ رسیدند و مشاهده کردند که بهره‌برداری از آب زیرزمینی در بیشتر نواحی منطقه مورد مطالعه با مشکل مواجه گردیده، به طوری که ۸۶ درصد مناطق مورد مطالعه در وضعیت بهره‌برداری محدود و ۱۰ درصد در وضعیت بهره‌برداری بدون مشکل و ۴ درصد در وضعیت عدم بهره‌برداری قرار دارند. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2022) به ارزیابی تغییرات خشکسالی با استفاده از آزمون من کندال و شیب سن در استان کرمان در طی سال‌های (۱۹۹۰ - ۲۰۱۸) با استفاده از شاخص خشکسالی بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده پرداختند و به این نتیجه رسیدند شیب روند شاخص IEPS⁵ در طی دوره زمانی (۱۹۹۰ - ۱۹۹۶) افزایشی است که بیانگر کاهش خشکسالی و در طی سال‌های (۱۹۹۷ - ۲۰۱۸) روند کاهشی داشته است که نشان‌دهنده افزایش شدت خشکسالی در سال‌های اخیر در این استان است. ویشواکارما و همکاران (Vishwakarma et al., 2022) به بررسی شاخص‌های خشکسالی SPEI، SPI و IPSA⁶ پرداختند و روند این شاخص‌ها را با استفاده از آزمون من کندال و شیب سن در کشور هند مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ASPI بهتر از SPEI برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی عمل می‌کند و شاخص ASPI از روند معنی‌دار با شیب سن ۰/۰۰۹ - پیروی می‌کند که نشان می‌دهد احتمال قرار گرفتن در معرض خشکسالی در آینده نزدیک بسیار بالا است. توماسلا و همکاران (Tomasella et al., 2023) به بررسی اثرات خشکسالی و روند آن در برزیل با استفاده از دو

¹ Groundwater Resources Index

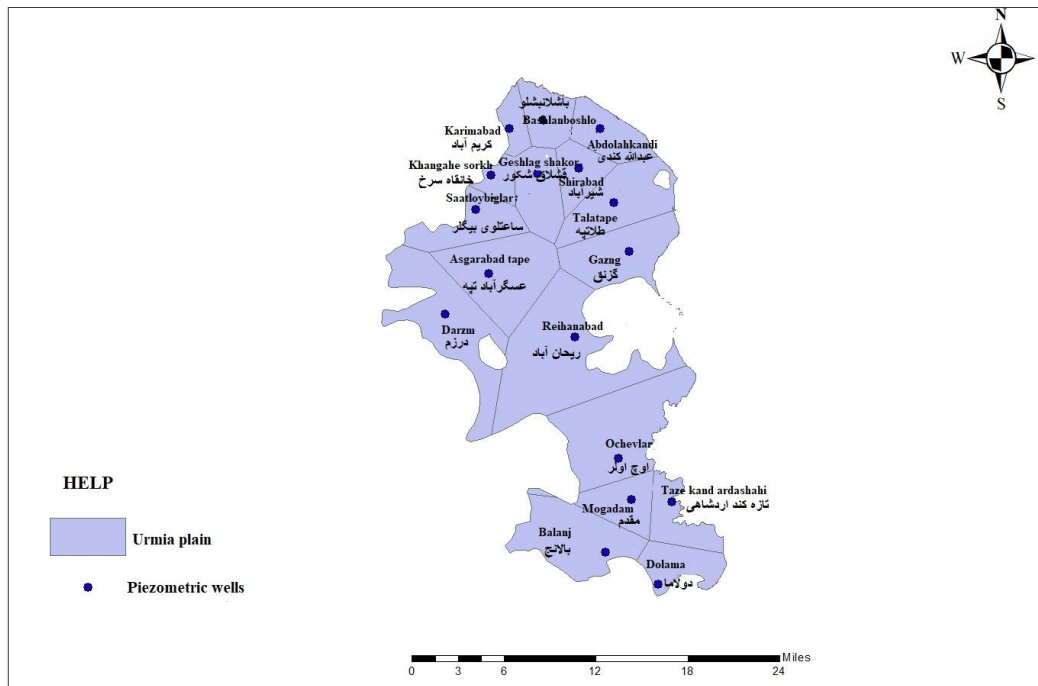
² Standardized electrical conductivity index

³ Standardized Well Discharge Index

⁴ Hydrogeological Drought Management Index

⁵ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

⁶ Agricultural Standardized Precipitation Index



شکل ۱. پلیگون بندی منطقه مورد مطالعه به روش چندضلعی تیسن

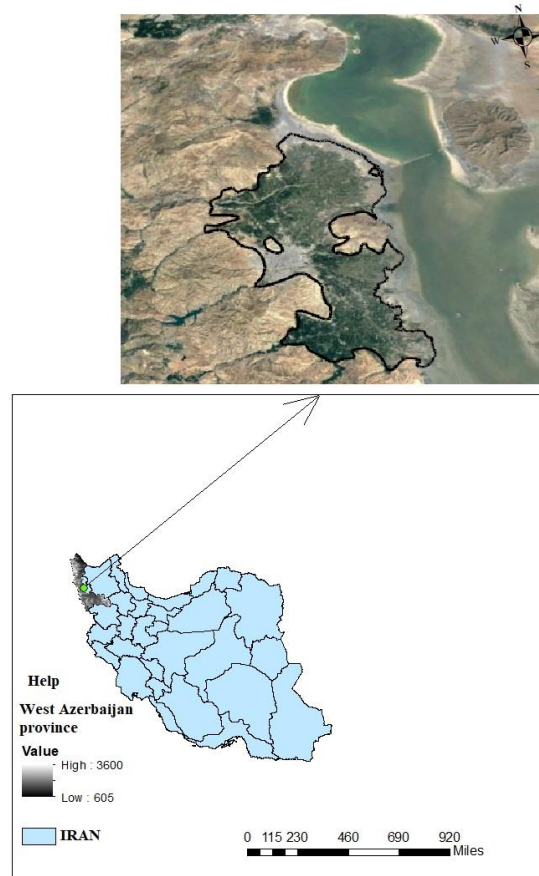
Fig1. Polygonization of the studied area using Thiessen's polygonal method

نفر است. دشت ارومیه با مساحت ۱۱۴۳۱۷ هکتار در کنار ضلع غربی دریاچه ارومیه قرار گرفته است. دشت ارومیه با متوسط بارندگی ۳۰۴ میلیمتر در سال دارای اقلیم سرد و خشک می باشد و متوسط سالانه تبخیر سطحی آن حدود ۱۵۰۰ میلیمتر تخمین زده شده است. این دشت در اراضی ساحلی و کم شیب غرب دریاچه ارومیه واقع شده و رودخانه های شهرچای، روضه چای، باراندوزچای و نازلو چای پس از عبور از ارتفاعات غربی وارد دشت ارومیه شده و به دریاچه ارومیه می ریزند.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

شهر ارومیه مرکز استان آذربایجان غربی است که در فاصله ۱۸ کیلومتری دریاچه ارومیه، در مختصات ۴۵ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی از مبدأ خط استوا در داخل جلگه ای به طول ۷۰ کیلومتر و به عرض ۳۰ کیلومتر قرار گرفته است. این شهرستان در آخرین سرشماری ارائه شده از سوی مرکز آمار ایران دارای جمعیتی بالغ بر ۱۰۴۰۵۶۵



شکل ۲. محدوده مورد مطالعه

Fig2. Study area

خشکسالی هیدرولوژیکی آب‌های زیرزمینی به‌کاربرده می‌شود که توسط مهندسین و سناتورهای منطقه‌ای مدیران‌های در کالابریای ایتالیا در سال ۲۰۰۸ ایجاد و مورد آزمایش قرار گرفت، آن‌ها شاخص GRI را با استفاده از یک مدل ساده تعادل توزیع ماهانه آب استخراج و مورد ارزیابی قرار دادند (Mendicino et al., 2008). برای محاسبه این شاخص نیز می‌توان از توزیع گاما استفاده کرد. شاخص GRI با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\delta_{D,m}} \quad (1)$$

که در این رابطه، $D_{y,m}$ تراز سطح آب زیرزمینی در ماه m از سال y است. $\mu_{D,m}$ و $\delta_{D,m}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی ماه m برای سال D است. وضعیت خشکسالی مشاهده‌شده، طبق این شاخص هیدرولوژیکی را با استفاده از (جدول ۱) می‌توان مورد ارزیابی قرار داد.

داده‌های مورد استفاده

جهت انجام این مطالعه، اطلاعات داده‌های پارامترهای کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت ارومیه از اداره کل آب منطقه‌ای و سازمان مدیریت منابع آب دریافت شد. اطلاعات کمی آب زیرزمینی شامل سطح آب زیرزمینی (ایستایی)، دبی چاه‌های مشاهده‌ای و پارامترهای کیفی شامل اطلاعات نمونه‌برداری چاه‌های مشاهده‌ای نظیر هدایت الکتریکی (EC) استفاده‌شده است. به‌منظور تعیین سال‌های مشترک آمار ۱۷ حلقه چاه پیژومتری طی دوره‌ی آماری (۱۳۸۲ - ۱۳۹۷) انتخاب و آزمون همگنی به روش ران تست، روی داده‌ها انجام و داده‌های مفقود به روش نسبت‌ها با نزدیک‌ترین ایستگاه یا چاه مشاهده‌ای که بیشترین همبستگی را با ایستگاه دارای داده‌های کامل داشته است، بازسازی شد.

شاخص منابع آب زیرزمینی GRI

شاخص منبع آب زیرزمینی GRI به‌منظور پایش

شاخص SECI

هدایت الکتریکی یکی از مهم ترین پارامترها در تعیین وضعیت کیفی آب زیرزمینی به حساب می آید. استخراج و نحوه محاسبه شاخص SECI همانند شاخص GRI است، با این تفاوت که در این شاخص از عامل هدایت الکتریکی به جای تراز سطح آب زیرزمینی استفاده می شود.

$$SECI = \frac{EC_i - EC}{\sigma} \quad (2)$$

که EC_i شوری (هدایت الکتریکی)، EC متوسط شوری (هدایت الکتریکی) و σ انحراف معیار شوری (هدایت الکتریکی) است.

از آنجا که روند نزولی سطح آب زیرزمینی مشخص کننده خشکسالی است، اما در مورد هدایت الکتریکی این روند به صورت صعودی است زیرا بر اثر خشکسالی و افت سطح آب، هدایت الکتریکی آب زیرزمینی افزایش می یابد. برای هماهنگ شدن دو شاخص منبع آب زیرزمینی و تغییرات هدایت الکتریکی آب زیرزمینی بر اثر خشکسالی و در نهایت ارزیابی اثر ترکیبی آنها در این مطالعه، شاخص هدایت الکتریکی به صورت زیر استاندارد شد (Faryabi and Mozaffarizade, 2017).

$$MSECI = - \left(\frac{EC_i - EC_{Ave}}{\sigma} \right) \quad (3)$$

شاخص دبی استاندارد شده چاه های بهره برداری SWDI

برای ارزیابی وضعیت کمی آبخوان ها معمولاً از ضرایب قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی آنها استفاده می شود، اما از آنجا که دبی بیشتر نشان دهنده قابلیت انتقال بیشتر آبخوان و وضعیت هیدرولوژیکی مناسب تر است. از چگونگی پراکندگی چاه های بهره برداری و دبی آنها برای ارزیابی پتانسیل کمی استفاده می شود (Nazeri Tahroudi et al., 2020b).

این شاخص از دبی چاه های بهره برداری برای ارزیابی وضعیت کمی آبخوان استفاده می کند، استخراج و نحوه محاسبه شاخص SWDI نیز همانند شاخص GRI است و می توان از توزیع گاما استفاده کرد، با این تفاوت که در این شاخص از دبی چاه های بهره برداری به جای تراز سطح آب زیرزمینی استفاده می شود.

$$SWDI = \frac{Q_i - Q_{Ave}}{\sigma} \quad (4)$$

SDWI شاخص دبی استاندارد شده چاه های بهره برداری، Q_{Ave} متوسط دبی چاه های بهره برداری و σ انحراف معیار دبی چاه های بهره برداری است.

شاخص HDMI

شاخص HDMI یک شاخص چند متغیره است که از ترکیب پارامترهای کمی و کیفی، سطح آب زیرزمینی، هدایت

جدول ۱. طبقه بندی شدت شاخص های GRI, SECI, SWDI (Mendicino et al., 2008).

Table1 . Severity classification of GRI, SECI, SWDI indicators (Mendicino et al., 2008).

طبقه بندی خشکسالی Classification of drought	مقدار شاخص Index value
ترسالی بسیار شدید Very severe	2 < -
ترسالی شدید Severe	1.99 تا 1.5
Moderate ترسالی متوسط	1 تا 1.49
نرمال Normal	0 تا -0.99
خشکسالی متوسط Moderate drought	-1 تا -1.49
خشکسالی شدید Severe drought	-1.5 تا -1.99
خشکسالی بسیار شدید Very severe drought	- < -2

مدیریت خشکسالی برای چاه‌های بهره‌برداری رسیدند، دامنه تغییرات این شاخص در (جدول ۲) ارائه شده است.

$$HDMI = GRI + MSEC I + SWDI \quad (۵)$$

الکتریکی و دبی چاه بهره‌برداری جهت مدیریت خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. فاریابی و مظفری زاده در سال ۱۳۹۶ با ترکیب دو شاخص کمی GRI و SWDI با یک شاخص کیفی MSEC I به یک شاخص مؤثر در

جدول ۲. میزان تأثیر خشکسالی و پیشنهادهای مدیریتی شاخص HDMI (فاریابی و مظفری زاده، ۱۳۹۶).

Table 2. The impact of drought and management suggestions of the HDMI index (Faryabi and Mozafarizadeh, 2016)

چگونگی بهره‌برداری How to operate	میزان تأثیر خشکسالی The impact of drought	مقدار شاخص HDMI HDMI index value
بهره‌برداری بدون مشکل Operation without problems	بدون تأثیر Effectless	- > 6
بهره‌برداری بدون مشکل Operation without problems	کم Low	6 تا 3
بهره‌برداری با محدودیت کم Low-restraint operation	متوسط medium	3 تا 0
بهره‌برداری محدود Limited use	متوسط medium	0 تا -3
عدم بهره‌برداری Non-exploitation	زیاد Much	-3 تا -6
عدم بهره‌برداری Non-exploitation	خیلی زیاد very much	-6 > -

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (۷)$$

آزمون من _ کندال

روش‌های مختلفی برای تحلیل روند سیر تحولات متغیرهای محیطی ارائه شده است. از جمله این روش‌های می‌توان به آنالیز همبستگی و آزمون‌های ناپارامتری اشاره نمود، در این تحقیق به منظور آنالیز روند خشکسالی از آزمون ناپارامتری من کندال استفاده گردید. این آزمون ابتدا توسط من در سال ۱۹۴۵ ارائه و سپس توسط کندال در سال ۱۹۴۸ توسعه یافته شده است. این آزمون با استفاده از روابط زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرد (Kendall, M.G. 1975. McKee, TB.1993)

$$S = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (۸)$$

که در آن X_j مدار داده j ، n تعداد داده‌ها و $\text{sgn}(X_i - X_j)$ تابع علامت است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

توزیع آماری گاما

توزیع گاما یکی از توزیع‌های احتمالی پیوسته دارای دو پارامتر مقیاس β و پارامتر شکل α است. ابتدا داده‌ها با توزیع احتمال دو پارامتری گاما برازش داده و به توزیع نرمال تبدیل می‌گردند. استفاده از این روش بر روی داده‌ها منجر به نمایش دقیق و مؤثر آن از طریق تابع ریاضی احتمال تجمعی می‌گردد. به کمک آن می‌توان احتمال رخ داد داده‌ها را حول محور یک از طریق جابجایی تابع احتمال تجمعی گاما به متغیر Z تصادفی نرمال استاندارد، با میانگین صفر و انحراف استاندارد یک به دست آورد. تابع توزیع گاما به صورت تابع چگالی احتمال یا فراوانی به صورت زیر طبق فرمول شماره (۶) تعریف شده است.

$$g(x_k) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x_k^{\alpha-1} e^{-x_k/\beta}, X > 0 \quad (۶)$$

در این رابطه، $\alpha > 0$ پارامتر شکل، $\beta > 0$ پارامتر مقیاس، X مجموع بارندگی در مقیاس زمانی k و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که بر اساس رابطه (۷) به دست می‌آید:

فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها است. در صورت وجود روند مقادیر Z مثبت نشان‌دهنده وجود روند مثبت و مقادیر Z منفی نشان‌دهنده وجود روند منفی است.

نتایج و بحث

با بررسی و تحلیل نتایج حاصل از شاخص خشکسالی آب زیرزمینی GRI طبق (شکل ۳) مشاهده می‌شود وضعیت منابع آب زیرزمینی دشت ارومیه در طی مدت ۱۶ سال روند نزولی داشته و از سال ۱۳۸۷ به بعد مقدار این شاخص به منفی رسیده و این روند منفی ادامه‌دار بوده است که شدیدترین وضعیت خشکسالی در سال ۱۳۹۷ با مقدار ۱/۲- در منطقه مشاهده شده است.

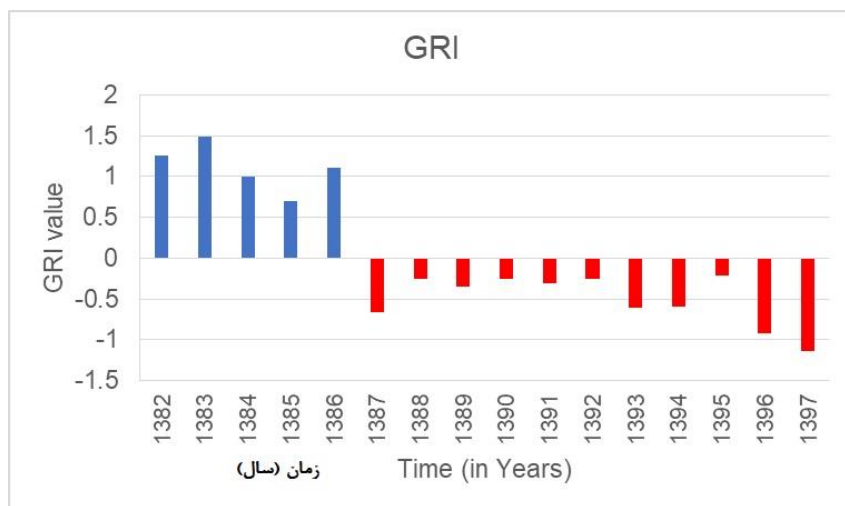
$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

جهت محاسبه واریانس آماره از رابطه شماره (۱۰) استفاده می‌شود.

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^n tp(p)(p-1)(2p+5)}{18}$$

تعداد دنباله‌ها برای P امین مقدار و P تعداد مقادیر دنباله‌ها است. در نهایت آمار استاندارد شده Z از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{when } s = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (11)$$



شکل ۳. نمودار شاخص متوسط GRI منطقه مورد مطالعه

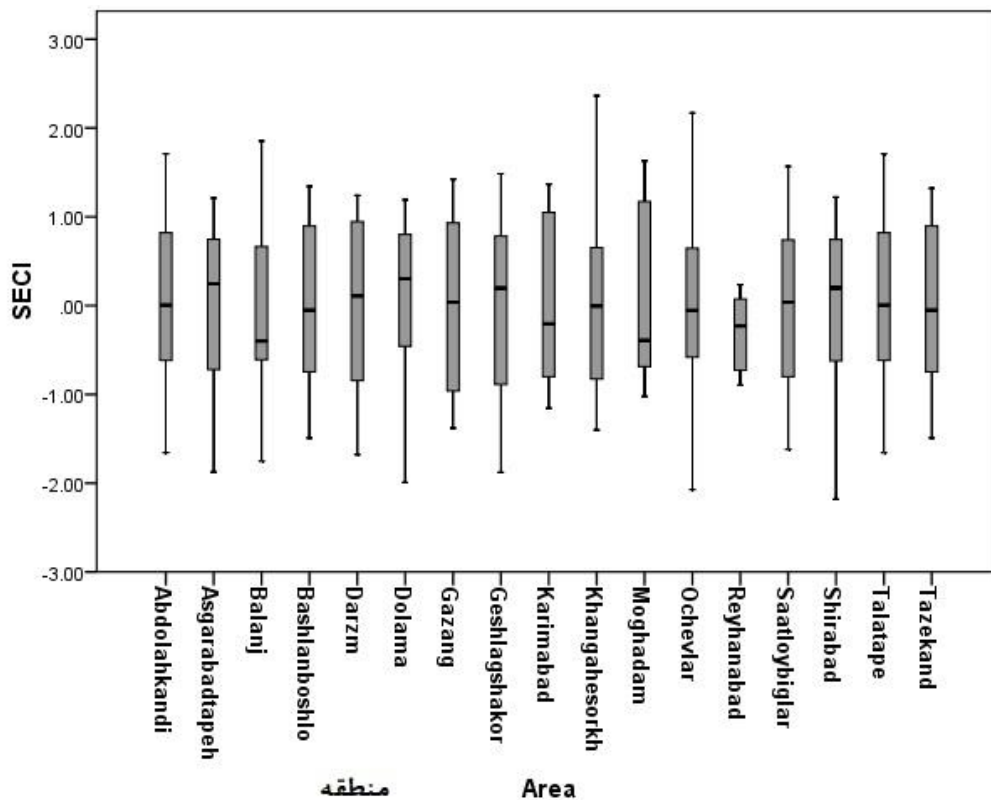
Fig.3. Average GRI index chart of the studied area

اطلاعات چاه‌های پیژومتری به کل محدوده دشت از روش چندضلعی تیسن در نرم‌افزار Arc Gis استفاده گردید. شدیدترین خشکسالی مشاهده شده در مقیاس ماهانه برای کل منطقه با مقدار ۱/۳۹- در ماه خرداد سال ۱۳۸۷ بوده است، به طوری که خشکسالی از اردیبهشت سال ۱۳۸۷ شروع گشته و تا شهریور سال ۱۳۸۸ ادامه‌دار بوده است. طولانی‌ترین تداوم مشاهده شده در مقیاس زمانی ماهانه با تداوم ۲۴ ماهه است که در آن خشکسالی از فروردین سال ۱۳۹۶ شروع شده و تا اسفند ۱۳۹۷ ادامه‌دار بوده است. برای دستیابی به شاخص SECI از پارامتر هدایت الکتریکی (شوری) استفاده شده است. مقدار این شاخص

نتایج وقوع شدت خشکسالی‌ها بر اساس شاخص GRI در طول بازه زمانی در محدوده دشت ارومیه برای ۱۷ چاه پیژومتری نشان می‌دهد، شدیدترین خشکسالی مشاهده شده در مقیاس ماهانه در منطقه طلاتپه با مقدار ۳/۸۷- در ماه فروردین سال ۱۳۹۲ بوده است. در حقیقت خشکسالی در این منطقه از شهریور سال ۱۳۹۱ شروع شده و تا اردیبهشت سال ۱۳۹۲ ادامه‌دار بوده است. طولانی‌ترین تداوم مشاهده شده در مقیاس زمانی ماهانه در منطقه دولاما با تداوم ۷۹ ماهه است که در آن خشکسالی از شهریور سال ۱۳۹۱ شروع شده و تا پایان اسفند سال ۱۳۹۷ ادامه‌دار بوده است. جهت تعمیم

مناطق قرار گرفته بودند به طوری که میانه نمودار جعبه‌ای این مناطق در بازه ۰ تا ۲ در طی سال‌های مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این شاخص می‌تواند نشان‌دهنده افزایش محدودیت‌های برداشت از منابع زیرزمینی باشد. با استفاده از روش چندضلعی تیسن پارامتر هدایت الکتریکی به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شد.

برای ۱۷ چاه بهره‌برداری در محدوده دشت ارومیه به صورت سالیانه محاسبه گردید، نمودار جعبه‌ای شاخص SECI محاسبه شده مناطق مورد مطالعه در محدوده دشت ارومیه (شکل ۴) نشان می‌دهد که وضعیت چاه بهره‌برداری منطقه قشلاق شکور، ساعتلوی بیگلر و عبدالله کندی در وضعیت نسبتاً بدتری نسبت به سایر

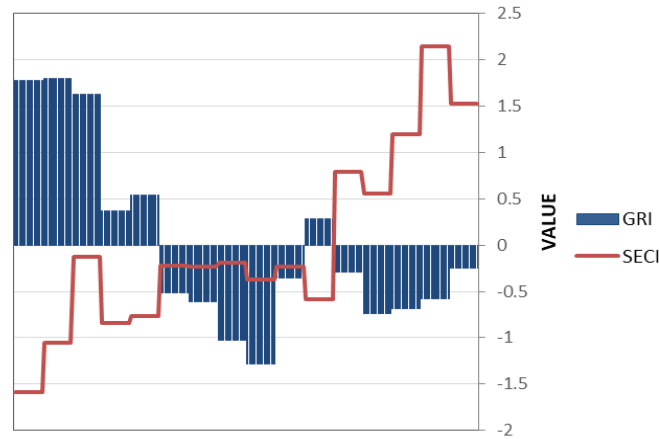


شکل ۴. نمودار شاخص سالیانه SECI مناطق مورد مطالعه در محدوده دشت ارومیه

Fig4. Annual SECI index diagram of the study areas in Urmia plain

ادامه‌دار بوده است. همان‌طور که در (شکل ۵) مشاهده می‌کنید با کاهش شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی شاخص استاندارد شده هدایت الکتریکی افزایش یافته، این بدین معنی است که افت سطح آب زیرزمینی باعث افزایش شوری آب زیرزمینی شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که خشکسالی از سال ۱۳۸۹ بر روی آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بوده است و باعث افت سطح آب زیرزمینی و به تبع آن شوری آن گشته است.

طولانی‌ترین تداوم مشاهده شده در مناطق باشلانبشلو و تازه کند با تداوم ۸ سال است که در آن خشکسالی از سال ۱۳۸۳ شروع شده و تا سال ۱۳۹۰ ادامه‌دار بوده است. نتایج این شاخص می‌تواند نشان‌دهنده افزایش محدودیت‌های برداشت از منابع زیرزمینی باشد. با استفاده از روش چندضلعی تیسن پارامتر هدایت الکتریکی به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شده است. طولانی‌ترین تداوم خشکسالی مشاهده شده برای کل منطقه دشت ارومیه تداوم ۳ ساله است که از سال ۱۳۹۵ شروع و تا سال ۱۳۹۷

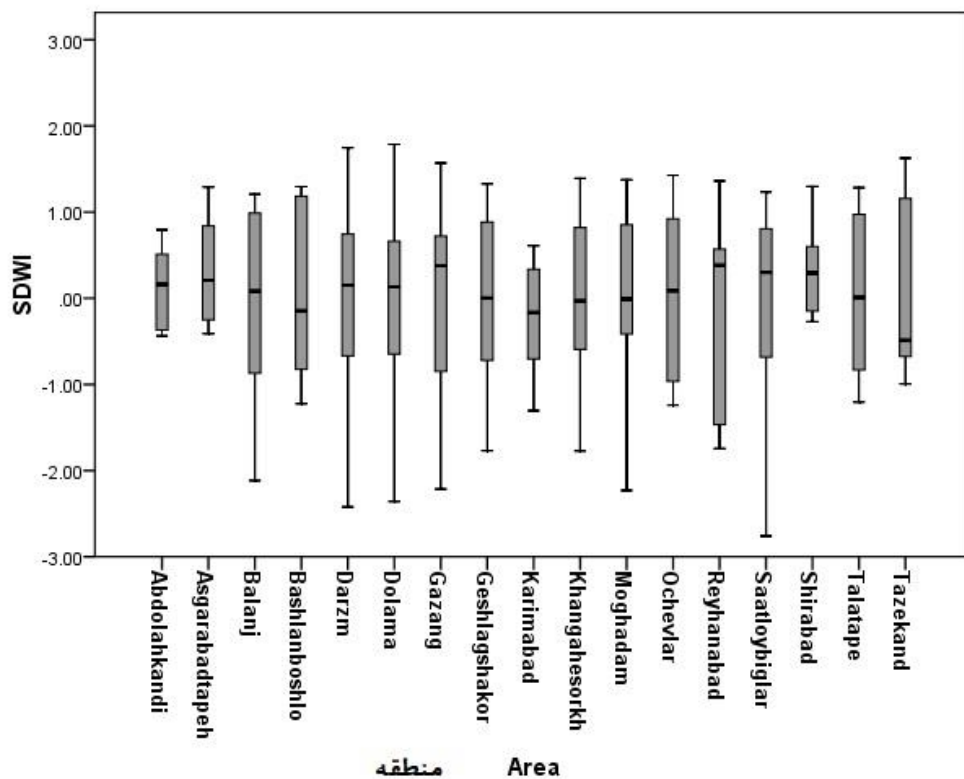


شکل ۵. نمودار مقایسه نوسانات شاخص GRI و SECI سالیانه در دشت ارومیه در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۷

Fig 5. Comparison chart of annual fluctuations of GRI and SECI index in Urmia plain in the period from 2003 to 2018

منفی تر باشد ناچیز بودن پتانسیل آب زیرزمینی در آن منطقه را می توان نتیجه گرفت (تهروردی و همکاران، ۱۳۹۹). نتایج پهنه بندی مکانی شاخص SDWI نشان می دهد که مناطق شیرآباد و عسگرآباد تپه به ترتیب در سال های (۱۳۸۲ - ۱۳۸۴) و (۱۳۹۴ - ۱۳۹۶) بیشترین مقدار خشکسالی شدید را تجربه کرده اند و در سال ۱۳۸۸ بیشترین مناطق شامل بالانج، درزم، ساعتلوی بیگلر و مقدم تحت تأثیر خشکسالی شدید بوده اند.

برای محاسبه شاخص SDWI از پارامتر دبی چاه های بهره برداری مناطق مورد مطالعه در محدوده دشت ارومیه استفاده شد، نمودار شاخص SDWI محاسبه شده مناطق مورد مطالعه در محدوده دشت ارومیه در (شکل ۶) نشان می دهد، نزدیکی میانه نمودار جعبه ای شاخص SDWI به چارک سوم در منطقه تازه کند اردشاهی نشان دهنده عدم وجود پتانسیل مناسب آب زیرزمینی در این منطقه از دشت ارومیه بوده است، به طور کلی هرچه این شاخص

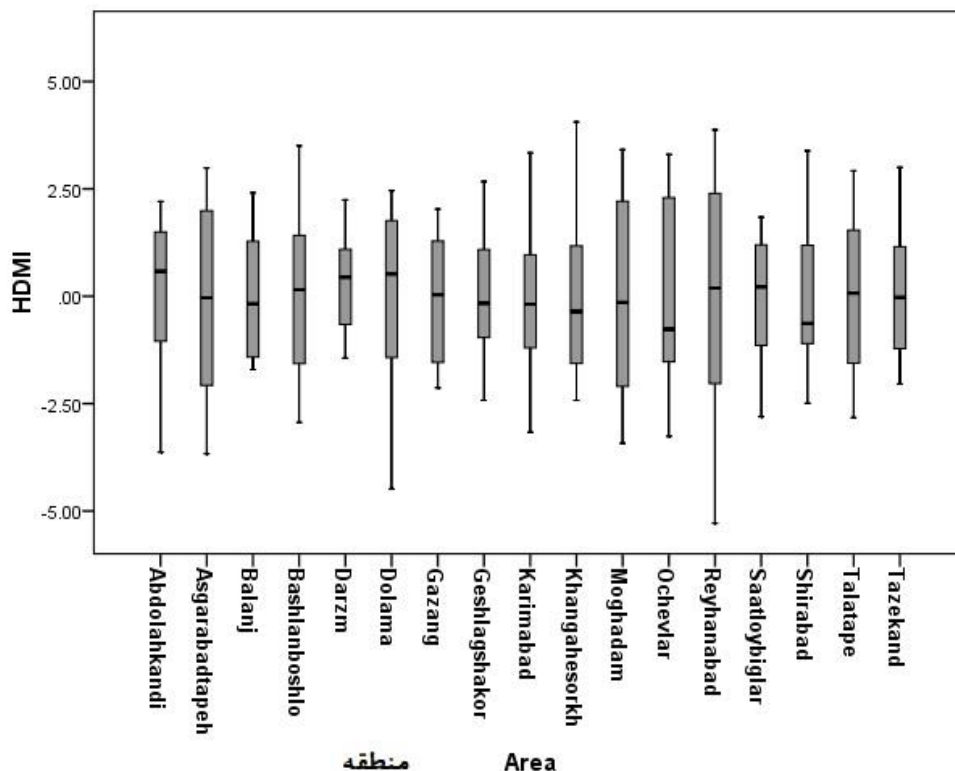


شکل ۶. نمودار شاخص SDWI سالیانه مناطق مورد مطالعه در محدوده دشت ارومیه

Fig6. Annual SDWI index diagram of the studied areas in Urmia plain

دشت ارومیه در طی مدت ۱۶ سال نشان می‌دهد که مناطق اوچ اولر و شیرآباد متمایل به چارک اول در محدوده ۰ تا ۳- قرار داشته‌اند که نشان می‌دهد در این سال‌ها بیشترین وضعیت غالب، وضعیت بهره‌برداری محدود با میزان تأثیر متوسط خشکسالی بر این مناطق در طول بازه زمانی مورد مطالعه بوده است. میانه نمودار جعبه‌ای سایر مناطق مورد مطالعه در بازه ۰ تا ۳ قرار گرفته که نشان می‌دهد این مناطق بیشتر در وضعیت بهره‌برداری با محدودیت کم قرار داشته‌اند که نشان می‌دهد وضعیت غالب بر این مناطق، وضعیت بهره‌برداری با محدودیت کم قرار بوده است. نتایج شاخص HDMI حاکی از این است که خشکسالی تأثیر آن چنانی بر وضعیت بهره‌برداری مناطق نداشته است.

شدیدترین خشکسالی مشاهده شده با استفاده از شاخص SDWI در مناطق دزم و دولاما به ترتیب با مقدار ۲/۴- و ۲/۳- در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۶ بوده است. طولانی‌ترین تداوم مشاهده شده در مناطق باشلانیشلو، تازه کند و کریم آباد با تداوم ۹ سال بوده است. برای محاسبه شاخص مدیریتی خشکسالی HDMI از ترکیب ۳ شاخص GRI، MSEC و SDWI استفاده گردید. بیشترین مقدار این شاخص نشان‌دهنده وضعیت بهتر خشکسالی و کمیت و کیفیت مناسب آب زیرزمینی در این منطقه و کمترین مقدار این شاخص هم بیانگر تأثیر زیاد خشکسالی و کمیت و کیفیت نامناسب آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه است. در شکل ۷ با توجه به میانه نمودار جعبه‌ای شاخص HDMI مناطق مورد مطالعه در



شکل ۷. نمودار شاخص HDMI مناطق مورد مطالعه در محدوده دشت ارومیه

Fig7. HDMI index diagram of the studied areas in Urmia plain

شروع شده و تا سال ۱۳۹۳ ادامه‌دار بوده است. نتایج پایش این شاخص مدیریتی خشکسالی برای کل منطقه دشت ارومیه نشان می‌دهد طولانی‌ترین تداوم مشاهده شده ۷ سال است که از سال ۱۳۹۱ شروع و تا سال ۱۳۹۷ ادامه‌دار بوده و شدیدترین خشکسالی مشاهده شده در سال ۱۳۹۷ با مقدار ۲/۲- بوده است. نتایج شاخص HDMI به

شاخص چند متغیره مدیریتی HDMI نشان می‌دهد شدیدترین خشکسالی در مناطق ریحان آباد با مقدار ۵,۲- در سال ۱۳۹۷ بوده که خشکسالی از سال ۱۳۹۳ در این منطقه شروع شده و تا سال ۱۳۹۷ ادامه‌دار بوده است. طولانی‌ترین تداوم مشاهده شده در منطقه اوچ اولر با تداوم ۷ سال است که در آن خشکسالی از سال ۱۳۸۷

در دشت ارومیه باید با تأمل بیشتری انجام گیرد. نتایج آزمون من کندال بر روی شاخص های خشکسالی دشت ارومیه در جدول زیر ارائه شده است. نتایج نشان می دهد شاخص های خشکسالی HDMI، GRI از روند کاهشی به ترتیب با شیب سن های $-0/144$ و $-0/297$ برخوردار می باشند که در صورت ادامه وضع موجود شاخص GRI در سال ۱۴۰۵ به کمتر از ۲- و شاخص HDMI در سال ۱۴۱۰ به کمتر از ۶- خواهد رسید. لذا اخذ تصمیمات مدیریتی جهت جلوگیری از پیامدهای ناشی از خشکسالی منابع زیرزمینی یک امر حیاتی و ضروری است.

جدول ۳. متغیر Z آزمون من کندال شاخص ها و پارامترها در دشت ارومیه

Table 3. The z variable of Kendall's Man test of indicators and parameters in Urmia Plain

Sen's Slope	Z _{MK}	
-0.144	** -5.62	GRI
-	-0.219	SDWI
-	0.276	SECI
-0.297	** -6.19	HDMI

** معنی داری در سطح ۰/۰۵

هیدرولوژیکی HDMI نشان از وجود روند معنی دار منفی با شیب سن $-0/297$ است، نشان می دهد به طور متوسط هر سال $0/12$ درصد از مقدار این شاخص کاسته می شود. بدین صورت با ادامه این روند در دشت ارومیه از سال ۱۴۱۰ به بعد مقدار این شاخص به کمتر از ۶- خواهد رسید. با ادامه روند موجود اکثر مناطق در محدوده دشت ارومیه در محدوده عدم بهره برداری قرار خواهند گرفت. - نتایج آزمون من کندال بر روی شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی GRI منابع زیرزمینی دشت ارومیه نشان از وجود روند منفی با شیب سن $-0/144$ است. این روند نشان می دهد به طور متوسط هر سال $0/09$ درصد از مقدار این شاخص کاسته و با ادامه این روند کاهشی تا سال ۱۴۰۵ مقدار GRI به کمتر از ۲- خواهد رسید که نشان از قرار گرفتن خشکسالی بسیار شدید بر روی منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه است. در صورت ادامه وضع موجود امکان استفاده پایدار از منابع زیرزمینی دشت ارومیه غیرممکن خواهد بود. تدوین برنامه جامع مقابله با خشکسالی برای کاهش آسیب های

نتیجه گیری

یکی از اقدامات اولیه و مؤثر برای کاهش اثرات و خسارات خشکسالی، پایش و پیش بینی خشکسالی است که باید به طور مستمر در دستور کار مرکز ملی خشکسالی و ستاد بحران قرار گیرد، به همین منظور در این تحقیق به بررسی روند مدیریتی خشکسالی هیدرولوژیکی چند متغیره HDMI آب های زیرزمینی با ترکیب ۳ شاخص خشکسالی SDWI، GRI و MSEC در طی سال های (۱۳۸۲ - ۱۳۹۷) در دشت ارومیه پرداخته و نتایج کلی پژوهش حاصل به شرح زیر ارائه می شود: - از سال (۱۳۹۵ - ۱۳۹۷) تمامی مناطق مورد مطالعه با استفاده از شاخص مدیریتی HDMI در وضعیت بهره برداری محدود قرار داشته اند که نشان می دهد بهره برداری از آب زیرزمینی با مشکل مواجه شده که می تواند نشان دهنده هشدار وضعیت بهره برداری برای سال های آینده باشد و بهره برداری از آب زیرزمینی تمام مناطق مورد مطالعه در دشت ارومیه باید با تأمل بیشتری انجام گیرد. - نتایج آزمون من کندال بر روی شاخص مدیریت خشکسالی

groundwater salinization studies, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 2463-2476.

Mustafa, A. & Rahman, G. (2018). Assessing the Spatio-temporal Variability of Meteorological Drought in Jordan, *Earth Systems and Environment*, 2, 247-264.

Myronidis, D., Ioannou, K., Fotakis, D. & Dörflinger, G. (2018). Streamflow and Hydrological Drought Trend Analysis and Forecasting in Cyprus, *Water resources management*, 32, 1759-1776.

Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y. & Ahmadi, F. (2020). Hydrogeological Drought Management Based on HDMI Multivariate Index, *Environment and Water Engineering*, 6(4), 473-484. [In Persian].

Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y. & Ahmadi, F. (2020b). Hydrogeological Drought Management Based on HDMI Multivariate Index, *Environment and Water Engineering*, 6(4), 473-484. [In Persian].

Tomasella, J., Cunha, A.P.M.A., Simões, P.A. & Zeri, M. (2023). Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980–2019, *Natural Hazards*, 116(2), 2173-2190.

Vishwakarma, A., Choudhary, M.K. & Chauhan, M.S. (2022). Non-parametric trend and the validity of a newly developed drought indicator for agricultural application over the central India region, *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), 1-13.

خشکسالی یک ضرورت است و باید راهکارهای مدیریتی، سیاست‌ها و فعالیتهای کوتاه‌مدت و بلندمدت جهت کاهش خسارات و آسیب‌های وارده اتخاذ گردد.

منابع

Afzal, M. & Ragab, R. (2019). Drought Risk under Climate and Land Use Changes: Implication to Water Resource Availability at Catchment Scale, *Water*, 11, 1790.

Belhassan, K. (2021). Water scarcity management, In *Water Safety, Security and Sustainability: Threat Detection and Mitigation* (pp. 443-462), Cham: Springer International Publishing.

Ebrahimi-Khusfi, Z., Mirakbari, M., Ebrahimi-Khusfi, M. & Soleimani-Sardoo, M. (2022). Evaluation of Drought Temporal Changes using Mann-Kendall test and Sens Slope in Kerman Province for the Period 1990 to 2018, *Iranian Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 11, 1–16. [In Persian].

Faryabi, M. & Mozaffarizade, J. (2017). Hydrogeological drought management index (HDMI) as a tool for groundwater resource management under drought conditions (Case Study: Dayyer-Abdan district, Boushehr province), *Iranian Journal of Ecohydrol*, 4, 737–748. [In Persian].

Nasri, M. & Modares, R. (2017). Investigating Low Flows Trend Assessment in Isfahan Province, *Journal of Range and Watershed Managment*, 70(1), 247–256. [In Persian].

Mendicino, G., Senatore, A. & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate, *Journal of Hydrology*, 357, 282–302.

Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S.J. & Bagheri, R. (2020). An overview on source, mechanism and investigation approaches in