



University of Tehran Press

The Impact of the Decline in Lake Urmia's Water Level on Groundwater Resources: Environmental Consequences and Planning

Zahra Mohammadnejad Aghdam¹ | Sina Besharat² | Kamran Zeinalzadeh³ |
Shirin Mohammadkhan^{4*}

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: z.mnejad523@gmail.com
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: s.besharat@urmia.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: K.zeinalzadeh@urmia.ac.ir
4. Corresponding Author, Department of physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mohamadkh@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received June 28, 2025
Revised July 07, 2025
Accepted July 27, 2025
Published online 17 August 2025

Keywords:
aquifer
groundwater
lake water level
Urmia Lake
spatial planning.

ABSTRACT

This study examines the relationship between groundwater fluctuations and the desiccation of Lake Urmia from 2001 to 2016. The results indicate that the lake's water level has declined at a rate of 0.25 meters per year, with the Sufian-Shabestar, Kahriz, and Miandoab aquifers experiencing the most significant changes (coefficient of variation: 24–79%). Analysis of data from 721 piezometric wells using Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation in GIS revealed a reversal in groundwater flow direction in the Salmas, Tasuj, and Sufian-Shabestar aquifers, now trending away from the lake. A Vulnerability assessment using the MOVE model identified the Miandoab aquifer as the most vulnerable (weight: 0.63), while the Tabriz and Urmia aquifers were the least vulnerable (weight: 0.45). Key contributing factors include excessive extraction from deep wells, land-use conversion to orchards, and economic reliance on agriculture. In contrast, industrial and tourism development positively mitigated vulnerability. The study emphasizes that water resource management in the Lake Urmia basin must be tailored to the hydrological and socio-economic characteristics of each aquifer, prioritizing the regulation of high-risk aquifers such as Salmas and Sufian-Shabestar. These findings can significantly inform policies for Lake Urmia's restoration and sustainable groundwater management.

Cite this article: Mohammadnejad Aghdam, Z.; Besharat, S.; Zeinalzadeh, K. & Mohammadkhan, Sh. (2025). The Impact of the Decline in Lake Urmia's Water Level on Groundwater Resources: Environmental Consequences and Planning. *Town and Country Planning*.17 (1), 129-148. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.397189.670510>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.397189.670510>

Publisher: University of Tehran Press.



انتشارات دانشگاه تهران

آمایش سرزمین

شاپا الکترونیکی: ۶۲۶۸-۲۴۲۳

سایت نشریه: <https://jtcp@ut.ac.ir/>

تأثیر کاهش سطح دریاچه ارومیه بر منابع آب زیرزمینی: پیامدهای محیطی و الزامات آمایشی

زهرا محمدنژاد اقدم^۱ | سینا بشارت^۲ | کامران زینالزاده^۳ | شیرین محمدخان^{۴*}

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: z.mnejad523@gmail.com

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: s.besharat@urmia.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: K.zeinalzadeh@urmia.ac.ir

۴. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mohamadkh@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی، مروری

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

کلیدواژه:

آبخوان، آمایش سرزمین،

آب زیرزمینی،

تراز آب دریاچه،

دریاچه ارومیه.

این پژوهش به بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و خشک شدن دریاچه ارومیه طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد تراز دریاچه ارومیه با شیب ۰٫۲۵ متر در سال کاهش یافته و آبخوان‌های صوفیان- شبستر، کهریز، و میاندوآب بیشترین تغییرات (ضریب تغییرات ۲۴-۷۹٪) را تجربه کرده‌اند. تحلیل داده‌های ۷۲۱ چاه پی‌زومتری با روش‌های درون‌یابی وزنی معکوس (IDW) در GIS نشان داد جهت جریان آب در آبخوان‌های سلماس، تسوج، و صوفیان- شبستر معکوس شده و به سمت دریاچه تغییر کرده است. ارزیابی آسیب‌پذیری با مدل MOVE نشان داد آبخوان میاندوآب با وزن ۰٫۶۳ بیشترین و آبخوان‌های تبریز و ارومیه با وزن ۰٫۴۵ کمترین آسیب‌پذیری را دارند. مهم‌ترین عوامل مؤثر شامل برداشت بی‌رویه از چاه‌های عمیق، تغییر کاربری اراضی به باغات، و وابستگی اقتصادی به کشاورزی بوده‌اند. درحالی‌که توسعه صنعتی و گردشگری نقش مثبتی در کاهش آسیب‌پذیری داشته‌اند. این مطالعه تأکید می‌کند مدیریت منابع آب در حوضه دریاچه ارومیه باید مبتنی بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی و اجتماعی- اقتصادی هر آبخوان باشد و کنترل برداشت از آبخوان‌های پرخطر مانند سلماس و صوفیان- شبستر در اولویت قرار گیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاری‌های احیای دریاچه ارومیه و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی کمک شایانی کند.

استناد: محمدنژاد اقدم، زهرا؛ بشارت، سینا؛ زینالزاده، کامران و محمدخان، شیرین (۱۴۰۴). تأثیر کاهش سطح دریاچه ارومیه بر منابع آب زیرزمینی: پیامدهای محیطی و الزامات آمایشی. *آمایش سرزمین*، ۱۷ (۱) ۱۳۹-۱۴۸. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.397189.670510>

© نویسندگان. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.397189.670510>



مقدمه

منابع آب زیرزمینی نقش حیاتی در تأمین امنیت آبی و حمایت از معیشت کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کنند (May et al., 2022: 25). در مناطقی مانند بخش‌هایی از آسیا و آفریقا استفاده از آب زیرزمینی بهره‌وری کشاورزی را در فصول خشک افزایش داده و تولید محصولات را برای کشاورزان کوچک بهبود بخشیده است (Mosha et al., 2022: 2). همچنین، در کشورهایی نظیر میانمار و مصر این منابع برای مصارف خانگی و بهداشتی، به‌ویژه در دوره‌های کمبود آب سطحی، ضروری هستند (Arif et al., 2022: 42).

خشک شدن دریاچه‌های داخلی مانند دریاچه ارومیه، دریاچه آرال، و دریاچه جویان شرقی چالش‌های محیط زیستی و بهداشتی قابل توجهی ایجاد کرده است (Sadeghi-Bazargani et al., 2019: 227-237; Tussupova et al., 2012: 2; Shengchun et al., 2016: 1036). مداخلات انسانی، از جمله برداشت بی‌رویه آب و تغییرات اقلیمی، این فرایند را تسریع بخشیده و پیامدهایی چون تخریب اکوسیستم‌ها و افزایش بیماری‌های تنفسی و پوستی را به دنبال داشته است (Abbaspour et al., 2012: 258; Haghi et al., 2023: 2). کاهش تراز دریاچه ارومیه به عنوان یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های شور جهان بحث‌های علمی متعددی را درباره تعامل آن با منابع آب زیرزمینی برانگیخته است. برخی مطالعات معتقدند که خشک شدن دریاچه به کاهش تراز آب‌های زیرزمینی منجر شده است؛ چنان که تحقیقات در دریاچه پویانگ چین کاهش سطح آب را به تغییرات بستر رودخانه و شاخه‌های پایین‌دست نسبت داده‌اند (Ge & Zhu, 2021: 1; Guo et al., 2022: 3). همچنین، در دریاچه بوردو ترکیه، کاهش سریع سطح آب به ایجاد ترک‌های زمین ناشی از کاهش فشار هیدرولیکی مرتبط بوده است (Bücker et al., 2022: 439). در مقابل، نظریه‌ای دیگر بر این باور است که برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها، به‌ویژه از چشمه‌های تأمین‌کننده دریاچه، عامل اصلی خشک شدن دریاچه ارومیه بوده و به وضعیت هیدرولوژیکی آن آسیب رسانده است (Khorrami et al., 2023: 3; Berahman, 2022: 141).

با وجود این مطالعات، همچنان ابهاماتی در مورد جهت و شدت تعامل بین کاهش تراز دریاچه ارومیه و تغییرات آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های اطراف آن وجود دارد. بسیاری از پژوهش‌ها به صورت جداگانه به بررسی اثر محیط زیستی یا هیدرولوژیکی پرداخته‌اند. اما تحلیل‌های تلفیقی که ویژگی‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی-اقتصادی، و آمایشی را به صورت یکپارچه در نظر بگیرند محدود هستند. این خلأ تحقیقاتی ضرورت بررسی جامع تعاملات دریاچه و آبخوان‌ها را با تأکید بر پیامدهای محیطی و الزامات برنامه‌ریزی سرزمین برجسته می‌کند.

کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه‌های بسته، مانند دریاچه ارومیه، پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های محلی، امنیت معیشتی، ساختار فضایی سکونتگاه‌ها، و سلامت انسانی دارد (Roshan et al., 2016: 2; Sadeghi-Bazargani et al., 2019: 237; Moravej et al., 2021: 2). این پدیده به افزایش طوفان‌های گردوغبار، شور شدن خاک، نابودی پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی، و گسترش بیماری‌ها منجر شده و مهاجرت‌های اجباری، کاهش زیست‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی، و نابرابری‌های منطقه‌ای را به دنبال داشته است (Berahman, 2022: 141; Haghi et al., 2023: 1). هدف این پژوهش تحلیل تغییرات جریان و تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های اطراف دریاچه ارومیه، ارزیابی آسیب‌پذیری آن‌ها با استفاده از چارچوب MOVE، و ارائه راهکارهای آمایشی برای مدیریت پایدار منابع آب و حمایت از احیای دریاچه است. از منظر برنامه‌ریزی سرزمین، این مطالعه بستری برای ارزیابی تاب‌آوری محیط زیستی، ظرفیت توسعه فضایی، و سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد فراهم می‌آورد (Abbaspour et al., 2012: 258; Tussupova et al., 2012: 2).

مواد و روش‌ها

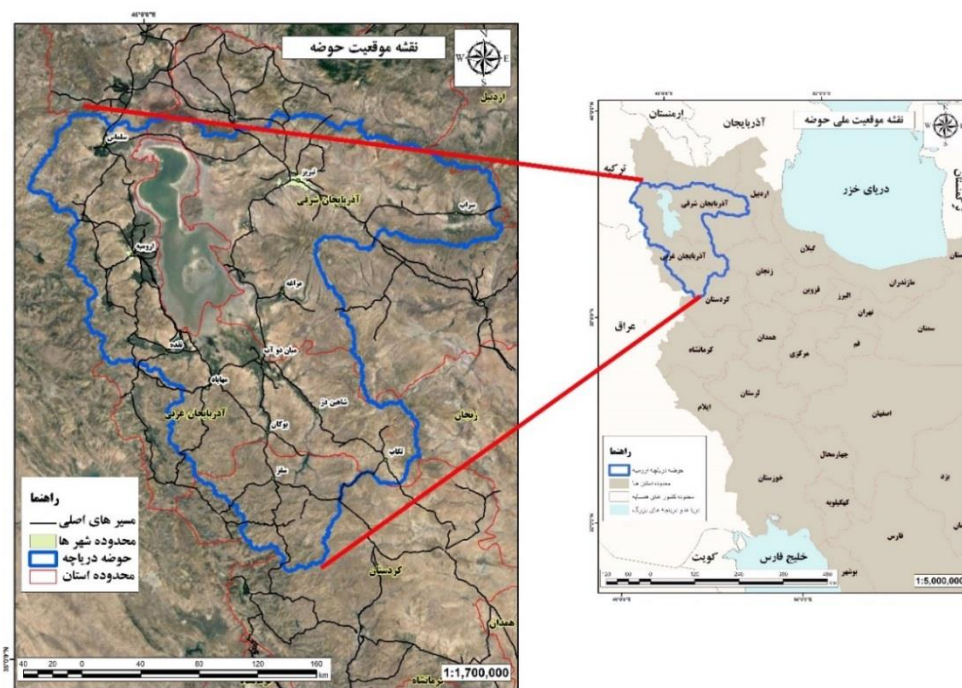
ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز دریاچه ارومیه مساحتی حدود ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع دارد. حداکثر ارتفاع این حوضه ۳۷۵۱ متر و حداقل آن ۱۲۰۲ متر است. این منطقه از نظر آب‌وهوایی در محدوده سرد و نیمه‌خشک قرار دارد. متوسط بارش سالیانه آن در حدود ۲۷۰ تا ۴۷۰

میلی متر نوسان دارد (شرکت منابع آب آذربایجان غربی). این حوضه با چالش‌های قابل توجهی مانند خشک‌سالی، ساخت سد، و تغییرات کاربری اراضی مواجه است (IWRM Co, 2019: 35).

این حوضه یک حوضه بسته داخلی است که زهکشی آن به دریاچه ارومیه منتهی می‌شود (شکل ۱). دریاچه ارومیه یکی از منحصربه‌فردترین اکوسیستم‌های آبی جهان است که همواره با چالش‌هایی مانند تغییرات اقلیمی، هیدرولوژیکی، محیط زیستی، و مداخلات انسانی روبه‌رو بوده است. این حوضه دارای حدود ۲۰ رودخانه دائمی و فصلی و دوره‌ای است که منابع تأمین‌کننده آب سطحی دریاچه هستند.

شوری دریاچه ارومیه در طول سال‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته تا جایی که از ۱۶۶ گرم در لیتر در سال ۱۹۹۵ به بیش از ۴۰۰ گرم در لیتر در سال‌های خشک رسیده است (ستاد احیای دریاچه ارومیه، ۲۰۱۵).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه حوزه آبریز ارومیه

روش تحقیق

برای تحلیل تغییرات تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های اطراف دریاچه ارومیه، داده‌های تراز آب زیرزمینی از ۷۲۱ چاه پیژومتری در دو استان آذربایجان شرقی و غربی (۱۳۸۰ - ۱۳۹۴) جمع‌آوری و استانداردسازی شد. تراز آب محلی هر چاه از ارتفاع تراز آب‌های آزاد کسر شد تا تراز آب زیرزمینی (GWL) محاسبه شود و میانگین سالیانه آن برای حذف نوسانات فصلی تعیین شد. این داده‌ها در نرم‌افزار ArcGIS با روش درون‌یابی فاصله معکوس وزن‌دار (IDW) پردازش شدند تا نقشه‌های سطح آب زیرزمینی تولید شود (Shepard, 1968: 2). محدوده‌های آبخوان‌ها به عنوان موانع انتشار در نظر گرفته شدند (شکل ۳) و داده‌ها به ۱۰ کلاس طبقه‌بندی شدند. جهت جریان آب زیرزمینی با ابزار شیب هیدرولیکی و جریان تجمعی محاسبه شد تا ارتباط آن با کاهش تراز دریاچه ارومیه، که از داده‌های ماهواره‌ای جیسون ۲ و ۳ استخراج شد، بررسی شود.

برای تحلیل جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های اطراف دریاچه ارومیه، شیب هیدرولیکی و روش جریان تجمعی در نرم‌افزار ArcGIS به کار گرفته شد تا جهت حرکت آب زیرزمینی محاسبه و با فلش‌هایی روی نقشه‌ها نمایش داده شود. داده‌های تراز دریاچه ارومیه از اطلاعات آلتیمتری روزانه ماهواره‌های جیسون ۲ و ۳ استخراج و میانگین سالیانه آن‌ها محاسبه شد. برای نمایش سطح آب دریاچه، تصاویر سه‌رنگ اصلی ماهواره لندست ۷ استفاده شد. همچنین، ضریب تغییرات (CV) تراز

آب زیرزمینی برای ۷۲۱ چاه پیزومتری در بازه ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ (انتخاب سال ۱۳۹۴ به دلیل عدم دسترسی به داده‌های پس از این سال است) محاسبه شد تا نوسانات زمانی و مکانی آبخوان‌ها به صورت درصدی ارزیابی شود (شکل ۲).

ضریب تغییرات

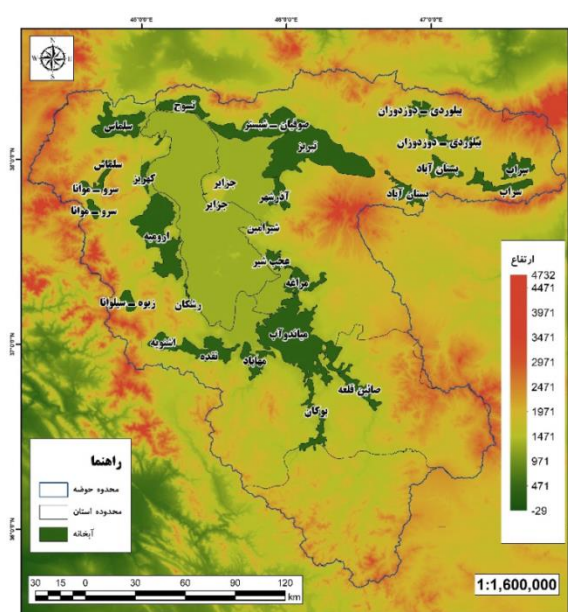
برای نشان دادن بهتر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی از ضریب تغییرات (رابطه ۱) استفاده شد.

$$\%CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

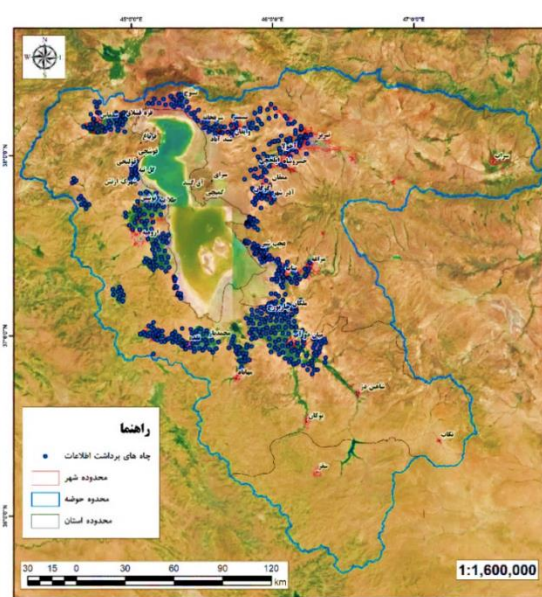
در این رابطه CV ضریب تغییرات، σ انحراف معیار، و μ میانگین است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه σ انحراف معیار و n تعداد داده‌هاست. شکل ۵ وضعیت ضریب تغییرات در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



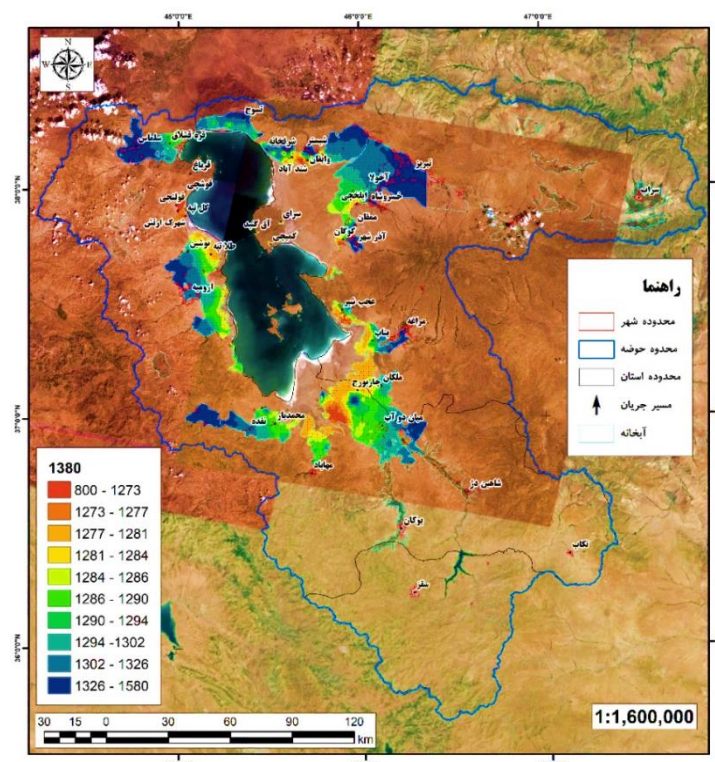
شکل ۳. آبخوان‌های حوزه آبریز دریاچه ارومیه



شکل ۲. موقعیت چاه‌های مورد استفاده

جدول ۱. خصوصیات آبخوان‌های حوزه آبریز دریاچه ارومیه (IWRM, 2019)

ردیف	آبخوان	نوع	مساحت (Km2)	ضخامت اشباع (متر)	ضریب ذخیره‌سازی (%)
۱	سلماس	نامحدود/ محصور	۳۹۷,۳۳	۳۵	۳
۲	تسوج	فریاتیکی	۲۱۲,۶۵	۳۰	۳
۳	صوفیان- شبستر	نامحدود/ محصور	۴۷۹,۳۲	۳۰	۵
۴	تبریز	نامحدود/ محصور	۱۱۸۱,۱۹	۶۵	۲,۵
۵	آذرشهر	فریاتیکی	۱۲۲,۱۵	۵۰	۳,۵
۶	شیرامین	فریاتیکی	۱۸,۰۶	۲۵	۳,۵
۷	عجب‌شیر	فریاتیکی	۸۷,۹۸	۴۵	۴
۸	مراغه	فریاتیکی	۱۸۸,۴۰	۲۵	۳
۹	میاندوآب	نامحدود/ محصور	۱۲۵۶,۷۰	۵۰	۲
۱۰	مهاباد	نامحدود/ محصور	۱۷۲,۷۶	۳۰	۳,۶
۱۱	نقده	نامحدود/ محصور	۲۸۸,۴۱	۹۰	۳,۶
۱۲	راشکان	فریاتیکی	۲۷,۷۳	۳۵	۵
۱۳	ارومیه	نامحدود/ محصور	۷۴۹,۵۵	۴۰	۶
۱۴	کهریز	فریاتیکی	۶۷,۵۱	۳۵	۳,۵



شکل ۴. تراز آب‌های زیرزمینی (سال ۱۳۸۰)

به منظور تحلیل جامع آسیب‌پذیری محیطی و آمایشی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه از چارچوب^۱ MOVE استفاده شد. این چارچوب آسیب‌پذیری را از طریق سه مؤلفه کلیدی شامل مواجهه، حساسیت، و ظرفیت سازگاری در ابعاد محیطی، اجتماعی، اقتصادی، و نهادی ارزیابی می‌کند. با توجه به کمی و غیر قابل اندازه‌گیری بودن این معیار در سطح آبخوان‌های مورد مطالعه برای هر یک از این معیارها شاخص‌هایی بدین شرح انتخاب شد:

مواجهه^۲

۱. جمعیت

تعداد افراد حاضر در حوضه دریاچه ارومیه شدت قرارگیری جوامع در معرض تهدیدات کاهش تراز دریاچه، مانند شوری خاک و کاهش منابع آب، را نشان می‌دهد. این شاخص به جای مواجهه کلی، که چندبعدی و دشوار است، از جمعیت به عنوان معیاری قابل محاسبه برای تخمین آسیب‌پذیری اجتماعی استفاده می‌کند (Hagenlocher et al., 2018: 1).

۲. تعداد مهاجران واردشده

تعداد مهاجران واردشده به محدوده هر آبخوان به عنوان معیاری ملموس برای ارزیابی شدت تهدیدات بر جوامع محلی استفاده می‌شود (Welle & Birkmann, 2015: 1).

۳. درصد مهاجران واردشده به کل جمعیت

نسبت مهاجران شکنندگی اجتماعی ناشی از کاهش منابع آب را نشان می‌دهد. این شاخص، به جای مواجهه مستقیم، نسبت مهاجران را برای برآورد فشارهای اجتماعی-اقتصادی اندازه‌گیری می‌کند (UNEP, 2017; Birkmann, 2013: 637).

1. methods for the improvement of vulnerability assessment in europe

2. exposure

حساسیت^۱

۱. میزان برداشت از چاه‌های عمیق برداشت از آب‌های عمیق معمولاً فشار شدیدی بر آبخوان‌ها وارد می‌کند که حساسیت آن‌ها را در برابر کاهش تراز دریاچه و پیامدهای محیطی، مانند افت تراز آب زیرزمینی و تشدید خشکیدگی دریاچه، افزایش می‌دهد. این شاخص به جای حساسیت کلی، که چندعاملی است، میزان برداشت را برای ارزیابی فشار هیدرولوژیکی و شکنندگی اکوسیستم اندازه‌گیری می‌کند (AghaKouchak et al., 2015: 2; Madani, 2014: 320).

۲. مجموع برداشت از آب‌های زیرزمینی افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها را افزایش می‌دهد. زیرا در مناطق گرم و خشک میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی همواره محدود است و با وجود تغییرات اقلیمی و کاهش بارش این رقم دارای سیر نزولی است (Estrella & Saalismaa, 2013: 1).

۳. ضریب تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی نوسانات تراز ناپایداری هیدرولوژیکی آبخوان‌ها را در برابر تغییرات محیطی نشان می‌دهد. این شاخص، به جای حساسیت کلی، ضریب تغییرات را برای ارزیابی شکنندگی آبخوان‌ها اندازه‌گیری می‌کند (Pahl-Wostl, 2007: 3).

۴. مساحت باغات باغات با نیاز آبی بالا آبخوان‌ها را در برابر کاهش منابع آب شکننده می‌کنند (Keshavarz et al., 2016: 2). تغییرات کاربری اراضی همواره یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی حساسیت اکولوژیکی و پایداری محیطی یک منطقه به شمار می‌رود. زیرا این تغییرات می‌توانند بر تنوع زیستی، چرخه‌های هیدرولوژیکی، و کیفیت خاک تأثیرات عمیقی داشته باشند (Foley et al., 2005: 2).

۵. مساحت مناطق زراعی زراعت آبی فشار زیادی بر آبخوان‌ها وارد می‌کند و شکنندگی آن‌ها را افزایش می‌دهد. این شاخص، به جای حساسیت عمومی، مساحت زراعی را برای ارزیابی تأثیر کاربری اراضی بر پایداری آبخوان‌ها اندازه‌گیری می‌کند (AghaKouchak et al., 2015: 1).

۶. درصد اشتغال کل کشاورزی وابستگی معیشتی به کشاورزی آبی جوامع را در برابر کاهش منابع آب آسیب‌پذیر می‌کند (UNEP, 2017). این در حالی است که میزان مصرف آب در کشاورزی حدود ۹۵ درصد کل آب در دسترس و بهره‌وری در این بخش حدود ۳۳ درصد است.

ظرفیت سازگاری^۲

۱. شاغلان بخش صنعت تعداد شاغلان بخش صنعت به عنوان شاخص ظرفیت سازگاری انتخاب شد. زیرا اشتغال صنعتی وابستگی به آبخوان‌ها را کاهش می‌دهد و تاب‌آوری اقتصادی را تقویت می‌کند. این شاخص، به جای ظرفیت سازگاری کلی، شاغلان صنعت را برای ارزیابی تنوع معیشتی اندازه‌گیری می‌کند (Hagenlocher et al., 2018: 1).

۲. تعداد کارگاه‌های صنعتی تعداد کارگاه‌های صنعتی به عنوان شاخص ظرفیت سازگاری انتخاب شد. زیرا زیرساخت‌های صنعتی پتانسیل کاهش فشار بر منابع آب و افزایش تاب‌آوری را دارند. این شاخص، به جای ظرفیت سازگاری عمومی، کارگاه‌ها را برای برآورد توان اقتصادی اندازه‌گیری می‌کند (Madani, 2014: 1).

1. sensitivity

2. adaptive capacity

۳. نرخ باسوادی

جوامع باسواد توانایی بیشتری برای پذیرش روش‌های پایدار و مدیریت منابع دارند. این شاخص، به جای ظرفیت سازگاری کلی، باسوادی را برای ارزیابی آگاهی اجتماعی اندازه‌گیری می‌کند (Pahl-Wostl, 2007: 3).

۴. تعداد اقامتگاه‌های گردشگری

تعداد اقامتگاه‌های گردشگری به عنوان شاخص ظرفیت سازگاری انتخاب شد. زیرا گردشگری معیشت‌های جایگزین ایجاد می‌کند و فشار بر آبخوان‌ها را کاهش می‌دهد. به طور کلی تنوع در اشتغال ظرفیت سازگاری در جوامع را افزایش می‌دهد (Keshavarz et al., 2013: 1).

سپس با استفاده از روش آنتروپی شانون و تاپسیس شاخص‌ها وزن‌دهی و در نهایت آبخوان‌ها بر اساس حساسیت به مشکلات محیطی ناشی از افت تراز آب‌های زیرزمینی مرتب و در مرحله آخر بر اساس روش K-mean خوشه‌بندی شدند. در جدول ۲ معادلات مورد استفاده و مراحل انجام‌شده به اختصار آورده خواهد شد.

جدول ۲. مراحل و معادلات مورد استفاده در روش آنتروپی شانون و تاپسیس برای تحلیل جامع آسیب‌پذیری محیطی و آمایشی حوضه

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m [p_{ij} * \ln p_{ij}] \quad [1] \quad d_j = 1 - E_j \quad [2] \quad W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad [3] \quad \text{اوزان شاخص‌ها بر اساس معادلات آنتروپی شانون محاسبه می‌شود.}$$

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}} \quad [4] \quad \text{ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی می‌شود.}$$

$$V = N_D * W_{n*n} \quad [5] \quad \text{ماتریس نرمال‌شده با اوزان معیارها وزن‌دهی می‌شود.}$$

$$A^+ = \left\{ \left(\max_i v_{ij} | j \in J \right) \left(\min_i v_{ij} | j \in J' \right) | i = 1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+\} \quad \text{راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی تعیین می‌شوند.}$$

$$A^- = \left\{ \left(\min_i v_{ij} | j \in J \right) \left(\max_i v_{ij} | j \in J' \right) | i = 1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \quad [6] \quad \text{مگزینه ایده ال منفی}$$

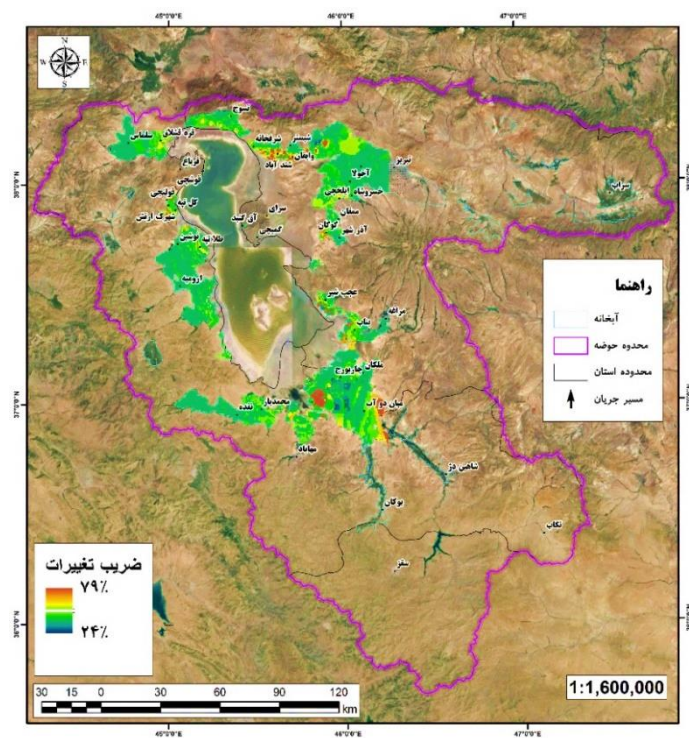
$$d_{i^+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j^+})^2} \quad [7] \quad d_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j^-})^2} \quad [8] \quad \text{فاصله هر گزینه از A+ و A- محاسبه می‌شود.}$$

$$Ci^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad [9] \quad \text{شاخص Ci برای هر گزینه محاسبه و گزینه‌ها بر اساس آن رتبه‌بندی می‌شوند.}$$

$$2 \| \mu_k - \mu_{ik} \| x \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n = J \quad [10] \quad \text{نتایج بر اساس روش K-mean با استفاده از نرم‌افزار SPSS خوشه‌بندی می‌شوند.}$$

نتایج

ضریب تغییرات بر اساس معادلات ۱ و ۲ محاسبه و سپس میان‌یابی شدند که در شکل ۵ قابل مشاهده است. محدوده این ضریب بین ۲۴ تا ۷۹ درصد است که کمترین میزان با رنگ آبی و بیشترین میزان با رنگ قرمز نشان داده شده است.

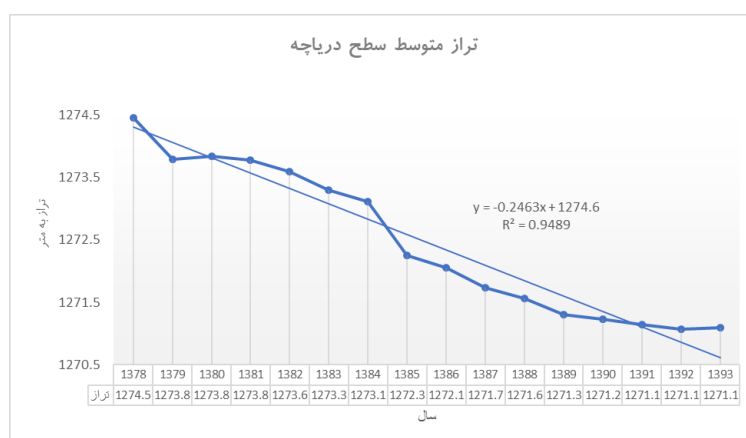


شکل ۵. ضریب تغییرات در محدوده مورد مطالعه

همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیشترین میزان تغییرات مربوط به آبخوان‌های صوفیان- شبستر، کهریز، میاندوآب، تبریز، آذرشهر، و عجب‌شیر است.

تراز دریاچه ارومیه

بر اساس داده‌های آلتیمتری جیسین نتایج تراز آب دریاچه پیوسته کاهشی است (شکل ۶). با توجه به این داده‌ها افت متوسط سالیانه حدود ۰/۱۴۶ متر است. روند کاهشی تا حدود سال ۱۳۹۰ ادامه‌دار بوده، اما از این نقطه به بعد کاهش شدت کمتری داشته و تراز آب به صورت نسبی پایدارتر شده است.



شکل ۶. تراز دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۳

با توجه به شکل ۶ می‌توان روند کاهشی تراز دریاچه ارومیه را از تراز ۱۲۷۴ متر در سال ۱۳۷۸ تا تراز ۱۲۷۱ متر در سال ۱۳۹۳ به‌روشنی مشاهده کرد. در این شکل همچنین روند کاهشی این تراز به صورت خطی برازش داده شده که R^2 آن ۰/۹۵ است.

است که نشان دهنده این است که با احتمال ۹۹ درصد می‌توان رابطه ۳ را به عنوان روند خشکیدگی این دریاچه مورد استفاده قرار داد.

$$y = -0.2463x + 1274.6$$

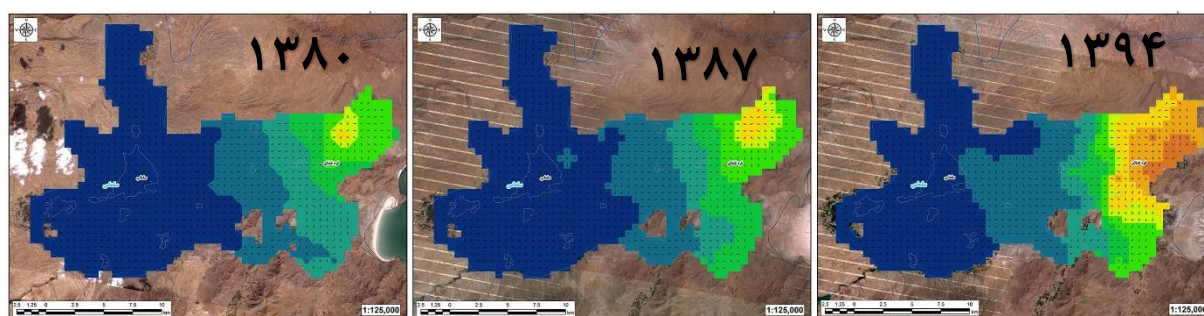
رابطه ۳

در این رابطه x سال مورد نظر و y تراز دریاچه است. البته با توجه به روند از سال ۱۳۹۰ به بعد می‌توان دید تراز آب دریاچه به یک حالت ثابت رسیده است.

بررسی روند تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های مختلف حوضه

آبخوان سلماس

وضعیت تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان سلماس همچنین جهت جریان آن در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۷، و ۱۳۹۴ در شکل ۷ آورده شده است.

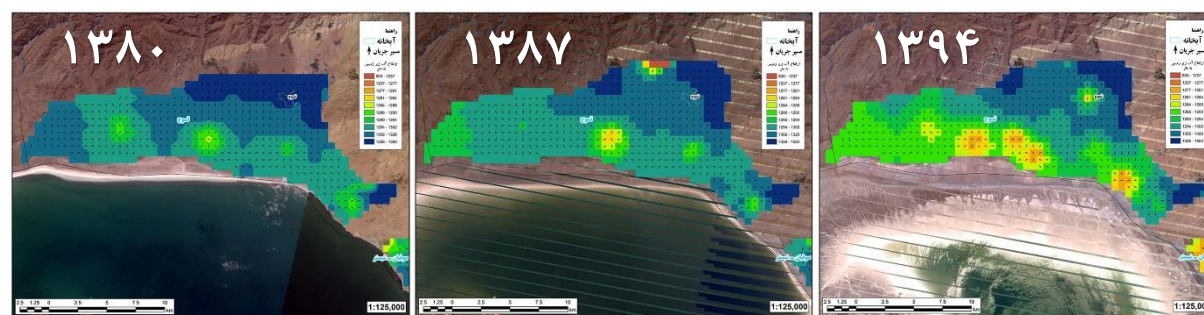


شکل ۷. روند تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان سلماس

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود جهت جریان در این آبخوان در سال ۱۳۸۰ تقریباً از دریاچه به سمت آبخوان بوده است که در سال‌های بعد این روند تشدید شده. همچنین تراز آب کاهش چشمگیری داشته است. به نظر می‌رسد برداشت آب در قسمت شمال شرق این آبخوان بیش از حد تحمل آبخوان بوده است.

آبخوان تسوج

وضعیت تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان تسوج همچنین جهت جریان آن در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۷، و ۱۳۹۴ در شکل ۸ آورده شده است.

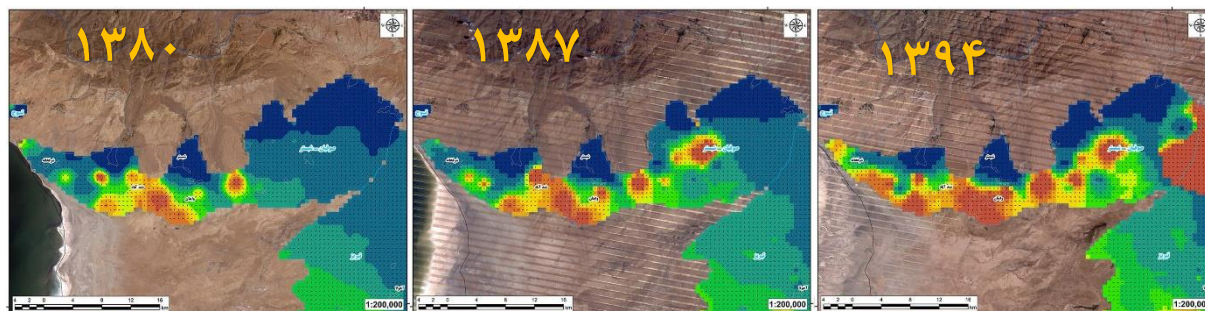


شکل ۸. روند تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان تسوج

با توجه به وضعیت تراز آب و همچنین جهت جریان و محدوده‌های دارای جهات همگرا در این آبخوان در سال ۱۳۸۰ می‌توان برآورد کرد نفوذ آب از دریاچه به سمت این آبخوان در جریان بوده است. با گذشت زمان از تراز آب کاسته شده و بر کانون‌هایی که آب از دریاچه به سمت آن‌ها در جریان بوده است افزوده شده است.

آبخوان صوفیان- شبستر

وضعیت تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان صوفیان- شبستر همچنین جهت جریان آن در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ در شکل ۹ آورده شده است.

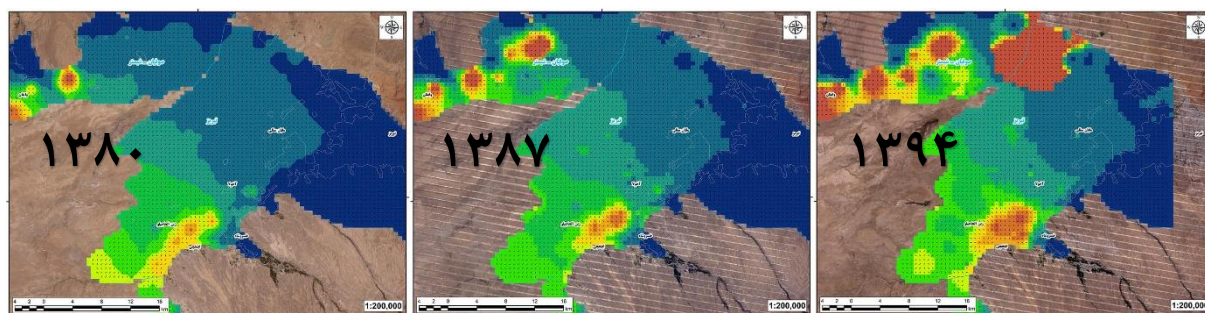


شکل ۹. روند تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان صوفیان- شبستر

در این آبخوان هم هرچند از سال‌های ۱۳۸۰ کانون‌هایی وجود داشته که از دریاچه تغذیه می‌شد، با گذشت زمان و افت بیشتر تراز آب‌های زیرزمینی که در شکل ۹ مشهود است، این روند نیز شدت بیشتری گرفت. با توجه به نقشه‌های سالیانه می‌توان گفت این روند افزایشی از سال ۱۳۸۳ شروع شده و ادامه یافته است. همچنین با توجه به تراز آب دریاچه در متن شکل می‌توان دریافت افزایش برداشت از این آبخوان باعث کاهش شدید ورود آب زیرزمینی به دریاچه شده است.

آبخوان تبریز

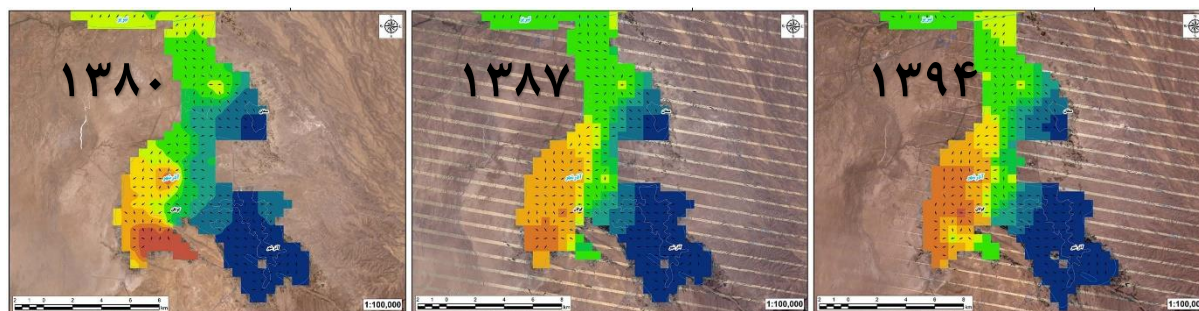
وضعیت تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان تبریز همچنین جهت جریان آن در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که جهت جریان آب‌های زیرزمینی از این آبخوان به سمت دریاچه است. هرچند تراز آب در سال‌های بعد از ۱۳۸۰ نسبت به این سال پایه کاهش داشته است، این روند کاهشی بسیار کم است و به نظر می‌رسد پس از سال ۱۳۸۷ (که دارای روند کاهشی کمی بوده است) تقریباً به تعادل رسیده است.



شکل ۱۰. روند تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان تبریز

آبخوان آذرشهر

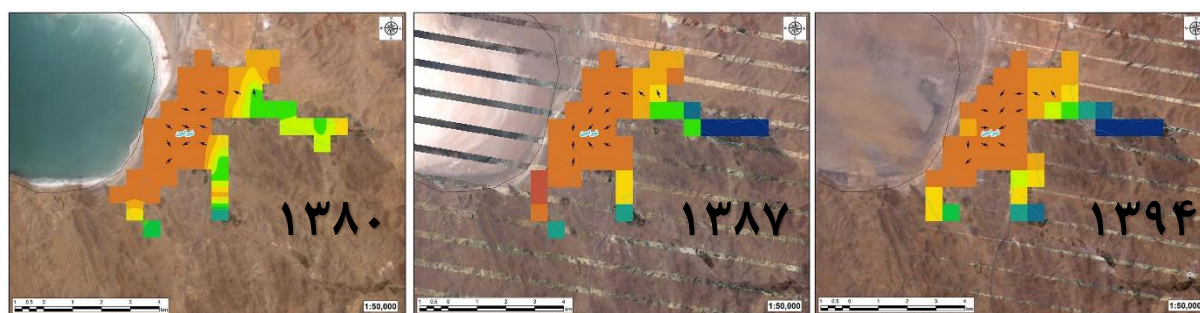
با توجه به تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان آذرشهر که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود تراز آب در این مدت افت قابل ملاحظه‌ای داشته است. ولی روند جریان آب همچنان به سمت دریاچه است. کاهش تراز سطح آب زیرزمینی در این آبخوان از سال ۱۳۸۵ تشدید شده و دو کانون شمال غربی و جنوبی غربی بیشترین میزان افت تراز را داشته‌اند. با نگاهی به تغییرات سطح دریاچه در سال‌های متوالی می‌توان دید بعد از سال ۱۳۸۶ این تغییرات شیب تندتری نسبت به سال‌های قبل‌تر یافته است. با توجه به شرایط در سال ۱۳۸۷ می‌توان دریافت برداشت بی‌رویه بیش از کاهش تغذیه یا افت تراز دریاچه در این وضعیت مؤثر بوده است.



شکل ۱۱. روند تراز و جهت جریان آبهای زیرزمینی در آبخوان آذرشهر

آبخوان شیرامین

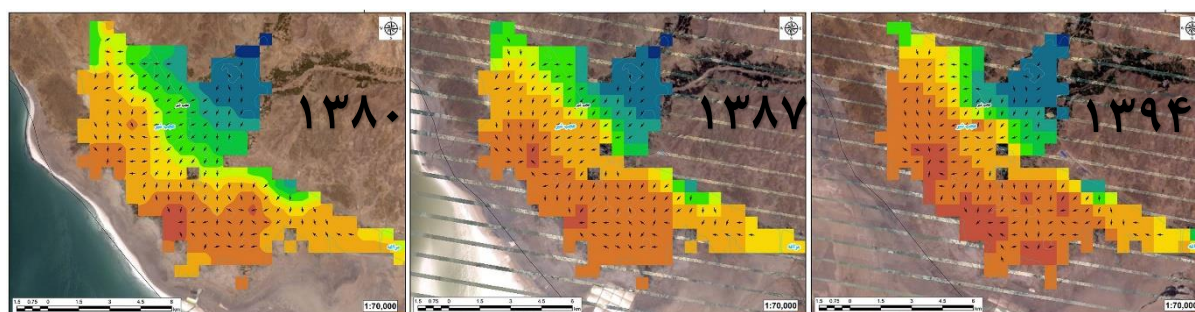
با نگاهی به شکل ۱۲ می‌توان دریافت تراز آب در این آبخوان از ابتدای دوره مورد مطالعه به نسبت پایین بوده است که تا انتهای دوره تغییرات عمده‌ای نداشته است. بیشترین تغییرات مربوط به قسمت شرقی حوضه است. با این حال هرچند در سال‌های شروع دوره مورد مطالعه روند جریان در بخشی از منطقه به سمت دریاچه و بخشی به سمت آبخوان بوده است، با پایین رفتن سطح آب در دریاچه، روند جریان در سال ۱۳۹۴ کاملاً به سمت آبخوان شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است کاهش تراز آب دریاچه نیز تأثیر چشمگیری در این روند نداشته است.



شکل ۱۲. روند تراز و جهت جریان آبهای زیرزمینی در آبخوان شیرامین

آبخوان عجب‌شیر

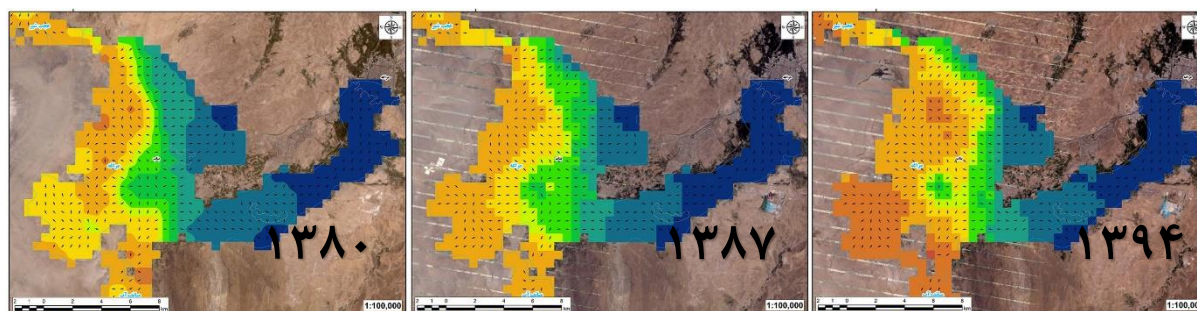
با توجه به شکل ۱۳ می‌توان به‌وضوح تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان عجب‌شیر را مشاهده کرد. تراز آب از سال ۱۳۸۰ شروع به کاهش کرده و در سال ۱۳۸۸ به بیشترین میزان کاهش رسیده و سپس در حد متوسطی باقی مانده است. روند جریان در این آبخوان به سمت دریاچه بوده است. ولی در سال‌های پایانی دوره مورد مطالعه برخی جریانات معکوس نیز در این آبخوان مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳. روند تراز و جهت جریان آبهای زیرزمینی در آبخوان عجب‌شیر

آبخوان مراغه

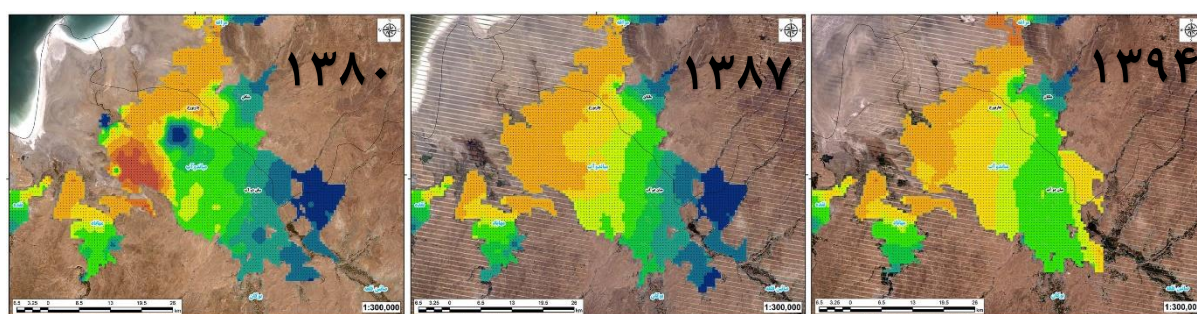
با توجه به شکل ۱۴ همچنین شکل ۴ می‌توان دید در آبخوان مراغه سه کانون با تراز آب پایین وجود دارد که در سال‌های مختلف گسترش پیدا کرده سپس محدود شده‌اند. بخش شمال در سال ۱۳۸۰ وجود داشته است. سپس محدود می‌شود و دوباره در سال ۱۳۸۸ مشاهده می‌شود و سپس کاهش می‌یابد. بخش غربی نیز در سال ۱۳۸۸ ظاهر و سپس محدود می‌شود؛ هرچند در سال ۱۳۹۳ بار دیگر گسترده می‌شود. روند جریان در این آبخوان عمدتاً به سمت دریاچه است. با این حال جریان‌های شمالی در سال‌هایی که افت تراز مشاهده می‌شود، مانند سال‌های ۱۳۸۹ به بعد، برخلاف دریاچه، محدوده شمالی را تغذیه می‌کند. همچنین جهت جریان در قسمت جنوبی آبخوان در سال ۱۳۹۳ برخلاف دریاچه است.



شکل ۱۴. روند تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان مراغه

آبخوان میاندوآب و مهاباد

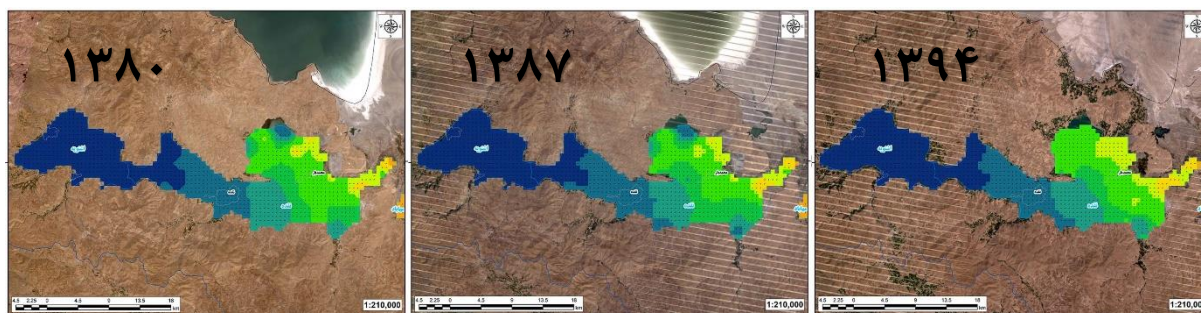
با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۴ مشاهده می‌شود برخلاف بسیاری از آبخوان‌های دریاچه ارومیه روند تراز آب‌های زیرزمینی در قسمت غربی آبخوان به سمت افزایش تراز آب است. در این بخش جهت جریان ابتدا به سمت آبخوان بوده است و سپس در سال ۱۳۸۸ جهت جریان با افزایش سطح سفره به سمت دریاچه میل می‌کند. آبخوان مهاباد یکی از آبخوان‌های به نسبت پایدار در حوزه دریاچه ارومیه است. با توجه به شکل ۱۵ می‌توان دید جهت جریان عمدتاً به سمت دریاچه ارومیه است و تراز آب‌های زیرزمینی در این دوره تغییرات چندانی ندارد.



شکل ۱۵. روند تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان میاندوآب و مهاباد

آبخوان نقده

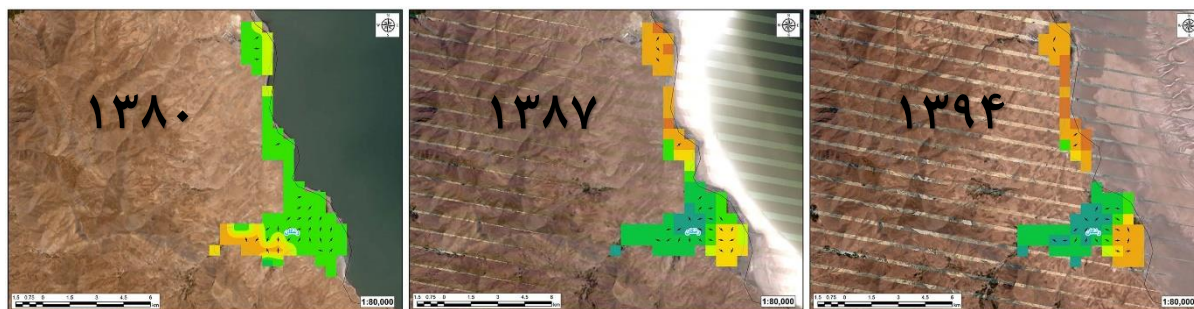
همانند آبخوان مهاباد آبخوان نقده نیز تغییر چندانی از نظر تراز آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه ندارد و بر اساس شکل ۱۶ مشخص می‌شود به‌خصوص در مناطق غربی حوزه تراز آب بالا است و عقب‌نشینی دریاچه نیز نتوانسته است خللی در این مسئله ایجاد کند. جهت جریان زیر سطحی نیز در این آبخوان به سمت دریاچه است.



شکل ۱۶. روند تراز و جهت جریان آبهای زیرزمینی در آبخوان نقده

آبخوان رشکان

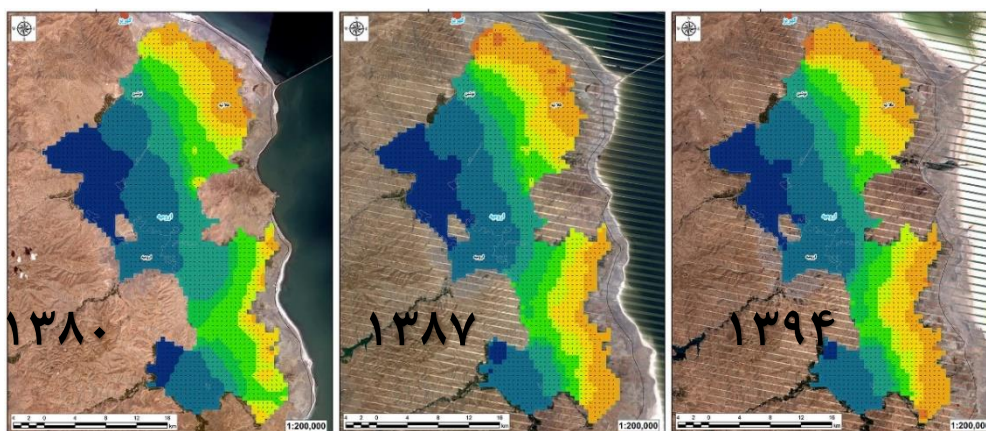
با توجه به اشکال ۱۷ و ۴ می‌توان دید غیر از سال ۱۳۸۱ که جهت جریان به سمت جنوب غربی حوضه است در سایر سال‌ها وضعیت مشابهی وجود دارد و پس از افت تراز در سال ۱۳۸۲ وضعیت به همان شکل حفظ شده است. البته در سال ۱۳۸۳ به صورت استثنا شاهد افت تراز بی‌سابقه در کل آبخوان هستیم. جهت جریان نیز غیر از سال ۱۳۸۱ که خلاف جهت دریاچه است در سایر سال‌ها به سمت دریاچه است.



شکل ۱۷. روند تراز و جهت جریان آبهای زیرزمینی در آبخوان رشکان

آبخوان ارومیه

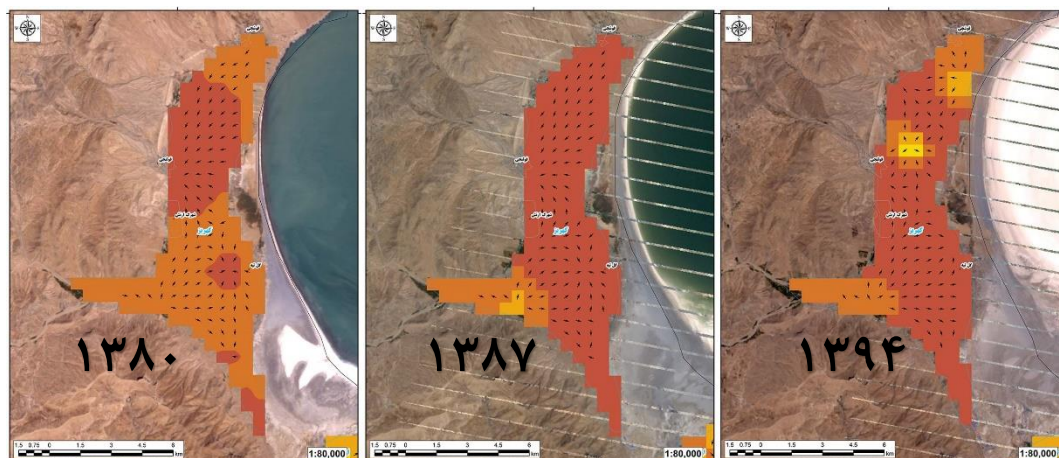
با توجه به شکل ۱۸ و ۴ دیده می‌شود که تغییرات تراز آب در این حوضه چندان نبوده و پایداری نسبی در آن حکم‌فرما است. البته به مقدار کم در قسمت‌های مجاور دریاچه افت تراز انجام شده است. ولی همچنان جهت جریان به سمت دریاچه است.



شکل ۱۸. روند تراز و جهت جریان آبهای زیرزمینی در آبخوان ارومیه

آبخوان کهریز

آبخوان کهریز بر اساس شکل ۱۹ و ۴ یکی از آبخوان‌هایی است که تراز آب‌های زیرزمینی در آن بسیار پایین است. ولی طی سال‌های مطالعه تغییرات چندانی در آن اتفاق نمی‌افتاده است. جهت جریان عمده در این آبخوان از سمت دریاچه است که این مسئله نیز تغییر خاصی در طول دوره مورد مطالعه نداشته است.



شکل ۱۹. روند تراز و جهت جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان کهریز

معیارها و شاخص‌های مدل MOVE در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. معیارها و شاخص‌های مدل MOVE در آبخوان‌های دریاچه ارومیه

آبخوان	مواجهه			ظرفیت سازگاری				حساسیت			
	جمعیت	مهاجران وارد شده	درصد مهاجران وارد شده به کل جمعیت	تعداد شاغلان بخش صنعت	تعداد کارگاه‌های صنعتی	نرخ با سوادی	تعداد اقامتگاه	چاه عمیق	مجموع برداشت از آب‌های زیرزمینی	ضریب تغییرات مساحت باغ	مساحت زراعت
آذر شهر	۱۱۰۳۱۱	۴۱۱۳	۳.۷۳	۷۲۶۳	۴۵	۷۹.۶۷	۲	۱۴.۱۱۷	۸۲.۸۴۸	۷۵.۴۹	۸۷.۹۳
تبریز	۱۹۳۱۳۰۳	۹۸۸۰۹	۳۰.۹۹	۴۶۰۶۷	۱۹۸	۱۷۲.۵۲	۹۷	۱۹۰.۷۰۶	۳۰۳.۵۴۲	۷۳	۶۰.۵۵۲
مراغه	۳۹۷۴۹۶	۱۳۲۹۶	۵.۸۷	۳۳۴۳	۱۵	۱۵۵.۶۳	۱۳	۸.۶۵	۱۱۹.۳۳۹	۷۵.۶۸	۱۵۱.۹۹
صوفیان - شبستر	۱۳۵۴۲۱	۶۵۸۳	۴.۸۶	۴۴۹۲	۳۰	۷۷.۵۳	۱	۱۱۸.۰۲۸	۱۶۶.۶۳۷	۷۸.۷۸	۲۳۰.۵۴۱
عجب شیر	۷۰۸۵۲	۱۲۷۳	۱.۸۰	۴۶۱	۱	۷۵.۲۳	۲	۹.۸۰۷	۴۹.۷۹۶	۸۱.۲	۷۲.۲۸
میاندوآب	۳۵۹۸۸۷	۸۲۱۲	۴.۱۴	۹۲۹	۸	۱۵۷.۹۴	۴	۲۷.۰۳۰۶	۲۰۰.۳۱۰۶	۷۵.۷۲	۱۰۱۷.۴۱
ارومیه	۱۰۴۰۵۶۵	۴۹۰۰۰	۴.۷۱	۸۸۴۰	۵۹	۸۵.۴	۳۷	۲۷۴	۷۰۲	۷۵.۲۹	۵۲۵.۳۴
سلماس	۱۹۶۵۴۶	۷۹۶۵	۴.۰۵	۵۹۳	۵	۸۱.۶	۵	۱۷۸	۲۰۰	۷۳.۱۱	۲۸۳.۶۸
مهاباد	۲۳۶۸۴۹	۱۲۱۷۲	۵.۱۴	۴۸۱	۷	۸۲.۱	۱۱	۸	۴۹	۷۵.۸۸	۱۱۷.۰۲
نقده	۱۲۷۶۷۱	۳۸۶۵	۳.۰۳	۴۵۷	۴۲	۸۲.۸	۴	۲۸	۹۷	۷۲.۹۲	۲۲۸.۷۳

در این جدول جمعیت، مهاجران وارد شده، درصد مهاجران به کل جمعیت، تعداد شاغلان بخش صنعت، تعداد کارگاه‌های صنعتی، تعداد اقامتگاه‌ها، درصد اشتغال کل کشاورزی بر اساس آمارنامه‌های سالنامه‌های آماری مرکز آمار ایران، حجم برداشت آب‌های زیرزمینی و برداشت از چاه‌های عمیق با استفاده از آمار شرکت مدیریت منابع آب ایران، ضریب تغییرات بر اساس محاسبات انجام شده، مساحت باغ و مساحت مناطق زراعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده است. در مرحله بعد این اعداد بر اساس روش آنتروپی شانون بی بعد و سپس وزن هر یک از شاخص‌ها محاسبه شد (معادلات ۱ تا ۳). نتایج این عملیات در جدول ۴ آورده شده است. بر اساس این جدول بیشترین وزن مربوط به تعداد شاغلان بخش صنعت و کمترین وزن مربوط به ضریب تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی است.

جدول ۴. وزن شاخص‌ها بر اساس روش آنتروپی شانون

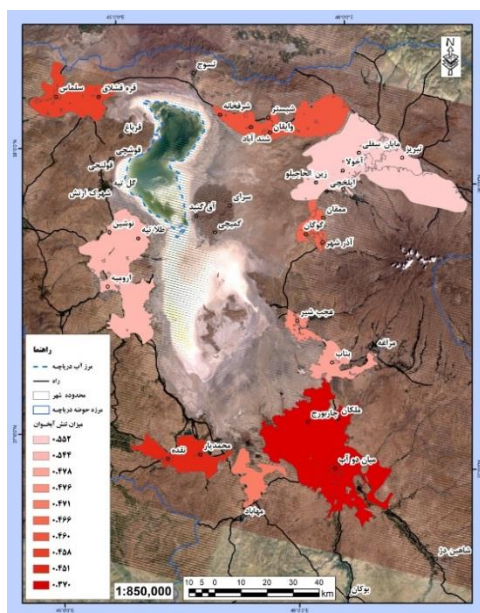
آنتروپی شانون	مواجهه			ظرفیت سازگاری					حساسیت			
	جمعیت	مهاجران وارد شده	وارد شده به کل جمعیت	تعداد شاغلان بخش صنعت	تعداد کارگاه های صنعتی	نرخ با سوادی	تعداد اقامتگاه	چاه عمیق	مجموع برداشت از آبهای زیرزمینی	ضریب تغییرات	مساحت باغ	مساحت زراعت
Wj	۰.۰۹۰۲	۰.۱۱۷۶	۰.۰۷۱۸	۰.۱۶۸۳	۰.۱۱۰۲	۰.۰۰۹۸	۰.۱۴۴۳	۰.۰۹۴۵	۰.۰۵۵۵	۰.۰۰۰۱	۰.۰۸۱۷	۰.۰۵۲۷
												در صد اشغال کل کشاورزی
												۰.۰۰۳۲

بر اساس اوزان جدول ۴ شاخص‌ها به سه گروه با اهمیت کم و متوسط و زیاد بدین شرح تقسیم‌بندی شدند: اهمیت کم شامل ضریب تغییرات، درصد اشتغال کل کشاورزی، نرخ باسوادی؛ اهمیت متوسط شامل مساحت زمین‌های زراعی، مجموع برداشت از آب‌های زیرزمینی، درصد مهاجران وارد شده به کل جمعیت، مساحت باغات، جمعیت، برداشت از چاه عمیق؛ اهمیت زیاد شامل تعداد کارگاه‌های صنعتی، مهاجران وارد شده، تعداد اقامتگاه، تعداد شاغلان بخش صنعت.

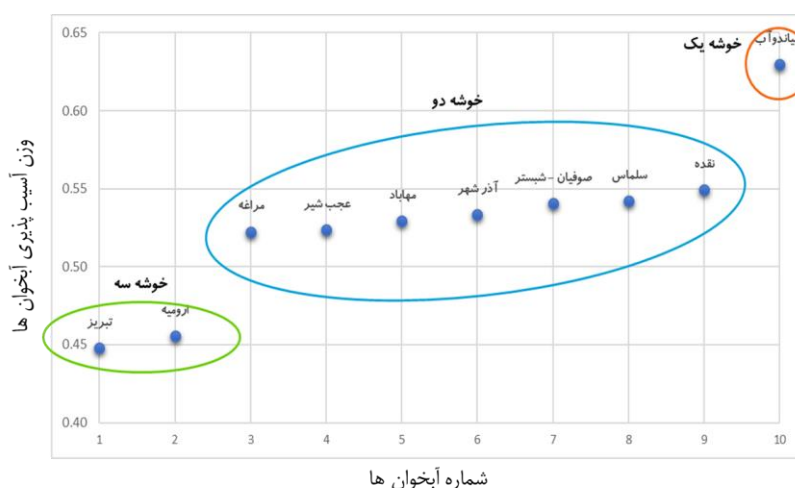
سپس شاخص‌های مدل MOVE بر اساس معادلات ۴ تا ۹ محاسبه و وزن هر یک از آبخوان‌ها بر اساس حساسیت آن‌ها به پیامدهای محیط و الزامات آمایشی مشخص شد که در جدول ۵ و شکل ۲۰ نشان داده شده است. هر چه این عدد بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این آبخوان و لزوم حفاظت آن در برابر تغییرات سطح آب سفره‌های زیرزمینی است.

جدول ۵. وزن شاخص‌های مدل MOVE

وزن	آبخوان
0.4477	تبریز
0.4556	ارومیه
0.5224	مراغه
0.5239	عجب‌شیر
0.5292	مهاباد
0.5336	آذرشهر
0.5405	صوفیان-شبه‌ستر
0.5421	سلماس
0.5491	نقده
0.6299	میاندوآب



شکل ۲۰. وزن‌دهی آبخوان‌های آبخیز ارومیه بر اساس مدل MOVE



شکل ۲۱. خوشه‌بندی اوزان آبخوان‌ها بر اساس روش K-Mean

این اوزان با استفاده از روش K-Mean خوشه‌بندی و به سه دسته با حساسیت زیاد، یعنی میاندوآب، حساسیت متوسط، یعنی آبخوان‌های نقره، سلماس، صوفیان- شبستر، آذرشهر، مهاباد، عجب‌شیر، مراغه، و حساسیت کم، یعنی ارومیه و تبریز، طبقه‌بندی شدند.

بحث و نتیجه

این مطالعه به بررسی تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های اطراف دریاچه ارومیه می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد کاهش تراز آب دریاچه ارومیه تأثیرات منفی بر آبخوان‌های مجاور داشته است. البته این روند برای تمام آبخوان‌ها یکسان نیست. مثلاً، آبخوان‌هایی مانند سلماس، صوفیان- شبستر، تسوج که تراز آب زیرزمینی آن‌ها به طور قابل توجهی کاهش یافته است نشان‌دهنده ارتباط مستقیم میان تراز آب دریاچه و آبخوان‌ها است. همچنین، این کاهش تراز آب منجر به تغییر جهت جریان آب‌های زیرزمینی از سمت دریاچه به برخی آبخوان‌ها شده که نشان‌دهنده فشار هیدرولیکی منفی در این مناطق است. این حالت که در آبخوان‌های سلماس، صوفیان- شبستر، و کهریز در ابتدای دوره وجود داشته است به آبخوان‌های شیرامین، عجب‌شیر، و مراغه در انتهای دوره تسری یافته است.

روش‌های استفاده‌شده در این مطالعه شامل تجزیه و تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی و مدل‌سازی هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار Arc/GIS بود. روش‌های مختلفی از جمله معادله‌های ضریب تغییرات و انحراف معیار برای تحلیل دقیق‌تر داده‌ها به کار گرفته شدند. این روش‌ها کمک کردند تا تفاوت‌های جزئی در تراز آب‌های زیرزمینی و تأثیرات محیطی به‌دقت مشخص شوند. یکی از یافته‌های کلیدی این مطالعه تفاوت‌های مشاهده‌شده در تأثیرات تغییرات آب دریاچه بر آبخوان‌های مختلف است. مثلاً، آبخوان‌های محدود و محصور مانند میاندوآب تأثیرات بیشتری را نسبت به آبخوان‌های نامحدود تجربه کرده‌اند. این مسئله نشان‌دهنده تفاوت در خصوصیات هیدرولوژیکی و پاسخ به تغییرات محیطی است.

محققان مختلف با استفاده از روش‌های گوناگون به بررسی برخی از این آبخوان‌ها پرداخته‌اند که عمده آن‌ها نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. مثلاً دین‌پژوه (۲۰۱۴) با بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی در دشت شبستر متوجه افت کیفیت در چاه‌های منطقه در دوره مورد مطالعه خود شد که نشان‌دهنده نشت آب شور دریاچه به آبخوان است. همچنین پاریزی و همکارانش (۲۰۲۲) با محاسبه مقادیر منفی رسانایی هیدرولیکی در آبخوان صوفیان- شبستر و کهریز به این نتیجه رسیدند که جریان آب زیرزمینی از سمت دریاچه به آبخوان است. جوادزاده و همکارانش (۲۰۲۰) به نتایج مشابهی در مورد افت آب در آبخوان تسوج و صوفیان شبستر دست یافتند.

نتایج این مطالعه اهمیت مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی را در مناطق اطراف دریاچه ارومیه برجسته می‌کند. کاهش تراز آب دریاچه نه تنها بر خود دریاچه بلکه بر منابع آب زیرزمینی اطراف آن نیز تأثیرات منفی داشته است. این تأثیرات شامل کاهش تراز آب زیرزمینی و تغییر جهت جریان آب‌ها به سمت دریاچه است که می‌تواند مشکلات محیط زیستی و اقتصادی زیادی ایجاد کند. با اضافه کردن سایر مؤلفه‌ها که رنگ اجتماعی و اقتصادی به این مطالعات داده است می‌توان جمع‌بندی در مورد حساسیت آبخوان‌های منطقه ارائه داد. بدین ترتیب مشخص می‌شود آبخوان‌های جنوبی بیشترین حساسیت را نسبت به تمامی عوامل از خود نشان داده‌اند. با توجه به خشک شدن دریاچه از سمت جنوب و کاهش تراز آب بیشتر در این محدوده و دوره طولانی‌تری که در معرض این پدیده قرار گرفته‌اند این موضوع قابل توجه است. از سوی دیگر آبخوان‌هایی مانند تبریز و ارومیه که علاوه بر روند صنعتی شدن جوامع در این آبخوان‌ها و ارتفاعات قابل توجهی که در جوار آن‌ها وجود دارد به کمترین میزان حساسیت در مجموعه آبخوان‌های دریاچه ارومیه تبدیل شده‌اند همچنین با مراجعه به جدول ۴ می‌توان دید اهمیت باغات در ایجاد شرایط حساس محیطی نسبت به زمین‌های زراعی، که البته درصدی از آن‌ها به صورت دیم کشت می‌شوند، بیشتر است. همچنین با توجه به نتایج این جدول می‌توان گفت تنوع‌بخشی به کسب‌وکارها و تغییر باغداری و کشاورزی به سمت کارهای صنعتی که مصرف آب بسیار کمتری دارند همچنین رواج گردشگری در استان‌های آذربایجان غربی و شرقی می‌تواند راهکار آمایشی مؤثری در برون‌رفت از بحران آب در منطقه باشد.

برای مقابله با این مشکلات، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های جامع مدیریت منابع آب اجرا شوند که شامل استفاده بهینه از منابع آب، کنترل برداشت غیر مجاز آب، و اجرای پروژه‌های احیای دریاچه باشد. همچنین، پژوهش‌های بیشتر در زمینه تأثیرات طولانی مدت تغییرات تراز آب دریاچه بر اکوسیستم‌های محلی و منابع آب زیرزمینی مورد نیاز است تا بتوان راهکارهای مؤثرتری را برای حفظ و مدیریت این منابع ارائه داد. اجرای راهکارهای پیشنهادشده نه تنها به حفظ منابع آب زیرزمینی کمک می‌کند بلکه می‌تواند به احیای دریاچه ارومیه و بهبود شرایط محیط زیستی منطقه نیز منجر شود.

منابع

- Abbaspour, M., Javid, A. H., Mirbagheri, S. A., Ahmadi Givi, F., & Moghimi P. (2012). Investigation of lake drying attributed to climate change. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9(2), 257-266. doi: 10.1007/S13762-012-0031-0.
- AghaKouchak, A., Feldman, D., Hoerling, M. *et al.* (2015). Water and climate: Recognize anthropogenic drought. *Nature*, 524, 409-411. <https://doi.org/10.1038/524409a>.
- Arif, A., Tri, E., Suswatiningsih (2022). Irigasi Air Tanah Mendukung Pertanaman Kacang Tanah, Jagung dan Kedelai di Lahan Kering pada Musim Kemarau. *AgriHealth*, 3(2), 124-124. doi: 10.20961/agrihealth.v3i2.62537.
- Berahman, S. (2022). Saving Lake Urmia: The Impact of Water Heritage on People's Lives. 1(2), 132-141. doi: 10.58981/bluepapers.2022.2.13.
- Birkmann, J., Buckle, P., Jaeger, J., Pelling, M., Setiadi, N., Garschagen, M., Fernando, N., & Kropp, J. (2010). Extreme events and disasters: a window of opportunity for change? Analysis of changes, formal and informal responses after mega-disasters. *Nat Hazards*, 55(3), 637-655.
- Bücker, M., Flores Orozco, A., Gallistl, J., Steiner, M., Aigner, L., Hoppenbrock, J., Glebe, R., Morales Barrera, W., Pita de la Paz, C., García García, C. E., Razo Pérez, J. A., Buckel, J., Hördt, A., Schwalb, A., & Pérez, L. (2021). Integrated land and water-borne geophysical surveys shed light on the sudden drying of large karst lakes in southern Mexico. *Solid Earth*, 12(2), 439-461. doi: 10.5194/SE-12-439-2021.
- Dinpajouh, Y., Fakhrafard, A., Hassanpour Aghdam, M. A., & Beheshti Vaighan, V. (2014). Analysis of groundwater quality changes trend in Shabestar-Soofian plain [In Persian]. *Civilica*. <https://civilica.com/doc/970704>
- Dziubanski, D. & Franz, K. (2023). Projecting hydrologic change under land use and climate scenarios in an agricultural watershed using agent-based modeling. *Frontiers in Water*, 5. 1020080. 10.3389/frwa.2023.1020080.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574. DOI: 10.1126/science.1111772.
- Ge, H. & Zhu, L. (2021). Analysis of the water level drop in the tail zone of the largest tributary of Poyang Lake, China. *Arab J Geosci*, 14, 1284. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07654-7>.
- Guo Yanyou, L., Xijun, W., & Xinghua, Ch. Y. (2022). Dry-Season Water Level Shift Induced by Channel Change of the River-Lake System in China's Largest Freshwater Lake, Poyang Lake. *Wetlands*, 42(8). doi: 10.1007/s13157-022-01615-w.
- Hagenlocher, M., Renaud, FG., Haas, S., & Sebesvari, Z. (2018). Vulnerability and risk of deltaic social-ecological systems exposed to multiple hazards. *Sci Total Environ*, 2018 Aug 1, 631-632:71-80. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.013. Epub Mar 7. PMID: 29524904.
- Haghi, M., Diznabi, S. H., Karaboz, I., & Ersoy Omeroglu, E. (2023). Arsenic pollution and arsenic-resistant bacteria of drying Urmia Salt Lake. *Frontiers in Environmental Science*, 11. doi: 10.3389/fenvs.2023.1195643.
- IWRM Co. (2019). Iran's Water Resources Management Company. <https://www.wrm.ir>.
- Khorrarni, B., Ali, S., Sahin, O. G., & Gunduz, O. (2023). Model-coupled GRACE-based analysis of hydrological dynamics of drying Lake Urmia and its basin. *Hydrological Processes*, 37(5), e14893. <https://doi.org/10.1002/hyp.14893>.
- Kumar, S., Mishra, A., & Singh, U. K. (2023). Assessment of Land Cover Changes and Climate Variability Effects on Catchment Hydrology Using a Physically Distributed Model. *Sustainability*, 15(13), 10304. <https://doi.org/10.3390/su151310304>.
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *J Environ Stud Sci*, 4, 315-328 (2014). <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>.
- May, S.Y., Khaing, K.K., & Ward, J.S.T. (2022). *The role of groundwater in rural water supply*. CRC Press.
- Moravej, M., Renouf, M. A., Lam, K. L., Kenway, S. J., & Urich, C. (2021). Site-scale Urban Water Mass Balance Assessment (SUWMBA) to quantify water performance of urban design-technology-environment configurations. *Water Research*, Vol. 188, 2021, 116477, ISSN 0043-1354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116477>.
- Mosha, D.B., Gudaga, J.L., Gama, D., & Kashaigili, J.J. (2022). Valuing groundwater use. 275-294. doi: 10.1201/9781003024101-15.
- Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions Towards Adaptive Management of Water Facing Climate and Global Change. *Water Resources Management*, 21, 49-62. 10.1007/s11269-006-9040-4.
- Roshan, G., Masoompour, J., Samakosh, J. A., & Orosa, J.. (2016). The impacts of drying of Lake Urmia on changes of degree day index of the surrounding cities by meteorological modelling. *Environmental Earth Sciences*, 75(20), 1-14. doi: 10.1007/S12665-016-6200-6.

- Sadeghi-Bazargani, H., Allahverdipour, H., Asghari Jafarabadi, M., & Azami-Aghdash, S. (2019). Lakes Drying and Their Adverse Effects on Human Health: A Systematic Review. *Iran J Public Health*. 2019 Feb, 48(2), 227-237. PMID: 31205876; PMCID: PMC6556201.
- Shengchun, X., Xiaomei, P., & Quanyan, T. (2016). Climatic and human drivers of recent lake-level change in East Juyan Lake, China. *Regional Environmental Change*, 16(4), 1063-1073. doi: 10.1007/S10113-015-0822-1.
- Sukhsehaj Kaur, Ch. S. (2023). Assessing impacts of Spatio-temporal changes in land use and land cover on the hydrologic response of an Indian Catchment. doi: 10.5194/egusphere-egu23-14603.
- Tussupova, K., Anchita, Hjorth, P., & Moravej, M. (2020). Drying Lakes: A Review on the Applied Restoration Strategies and Health Conditions in Contiguous Areas. *Water*, 12(3), 749. <https://doi.org/10.3390/w12030749>.