تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ویژه‌نامه تخصصی: دریاچه ارومیه
Volume 19, No. 2, Summer 2023 (IR-WRR), Special Issue: Urmia Lake
۱۹۶-۲۰۶

بررسی فرونشست اطراف دریاچه ارومیه با استفاده از مشاهدات ژئودتیک

معصومه آمیغ‌پی[۱*]، سیاوش عربی[۲]، فاطمه قراییان[۳] و اکرم ملایی[۳]

چکیده

با توجه به وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه و عزم دولت برای احیای آن، توجه به تأثیر بهره‌برداری‌های بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در دشتهای اطراف دریاچه امری است که نقش مؤثری بر تغذیه دریاچه و احیای آن خواهد داشت. متأسفانه فشار بر منابع آب‌های زیرزمینی با مقاصد کشاورزی مناطق متعددی از کشور را با پدیده فرونشست مواجه کرده است. در دشتهای اطراف دریاچه ارومیه نیز گسترش کشاورزی و فشار بر منابع آب زیرزمینی موجب فرونشست مساحت قابل توجهی از منطقه شده است. در این تحقیق با استفاده از تلفیق مشاهدات ژئودتیک نقشه فرونشست دشتهای اطراف دریاچه ارومیه به دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که ۱۳ منطقه فرونشست در اطراف دریاچه ارومیه با بیشینه نرخ ۱۸/۹ سانتی‌متر در سال ایجاد شده است، بطوری که ۷۰ درصد محیط دریاچه ارومیه با پدیده فرونشست مواجه می‌باشد و در مجموع مساحتی بالغ بر ۴۰۰۰ کیلومتر مربع در اطراف دریاچه ارومیه در حال فرونشست می‌باشد. با توجه به تهدیدهایی که فرونشست برای منابع آب و خاک منطقه ایجاد می‌کند، لزوم مدیریت استخراج منابع آب زیرزمینی و پیاده‌سازی الگوی کشت و روش‌های آبیاری نوین می‌بایست به سرعت مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: فرونشست، تداخل‌سنجی راداری، دریاچه ارومیه، آب زیرزمینی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۱۱

۱- رییس اداره ترازیابی دقیق و تداخل‌سنجی راداری، اداره کل نقشه‌برداری زمینی و بنیادی، سازمان نقشه‌برداری کشور.
۲- معاون اداره کل نقشه‌برداری زمینی و بنیادی، سازمان نقشه‌برداری کشور.
۳- اداره کل نقشه‌برداری زمینی وبنیادی، سازمان نقشه‌برداری کشور.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.

Investigating the Land Subsidence around Urmia Lake using Geodetic Observations

M. Amighpey [1], S. Arabi[2], F. Ghoraiyan[3], and A. Molayi[3]*

Abstract

Considering the critical situation of the Urmia Lake and the decision made by the government on its restoration, attention should be given to the effects of over-exploitation of the ground water resources in the plains upstream the lake plays a critical role in recharging and restoring the lake. In various areas of Iran, over-extraction of ground water resources for agricultural purposes caused land subsidence. Similarly in the plains around Lake Urmia, the agricultural development and pressure on ground water resources caused the subsidence of a significant area in the region. In this study, a subsidence map of the Urmia Lake's surrounding areas was assessed by applying combined various geodetic observations. Results showed that there are 13 subsidence areas around Urmia Lake. The maximum rate of subsidence in these areas is 18.9 cm/yr and unfortunately 70 percent of the perimeter of the lake is subsiding. The area of subsidence is about 4000 square kilometers. Considering the subsidence hazards to water and soil resources of the region, ground water resource management, optimal cultivation pattern performance and modern irrgation methods should be accounted for urgently.

Keywords: Subsidence, InSAR, Urmia Lake, Groundwater.

Received: June 20, 2023
Accepted: August 2, 2023

1- Head of leveling and InSAR office, Geodesy and Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran. Email: amighpey@yahoo.com
2- Deputy Director of the Geodesy and Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran.
3- Geodesy and Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran.
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1402.19.2.11.8

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران، یک دریاچه شور در شمال غربی کشور ایران است که طبق تقسیمات کشوری، این دریاچه میان دو استان آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی قرار گرفته است. بررسی نوسانات سطح آب دریاچه‌ها به لحاظ اهمیت، ماهیت و موقعیت این مجموعه‌های آبی در سال‌های اخیر اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این حوضه با داشتن دشتهایی مانند دشت ارومیه، تبریز، آذرشهر، بوکان، بناب، ملکان، میاندوآب، مهاباد، نقده، سلماس، پیرانشهر و اشنویه یکی از کانون‌های ارزشمند فعالیت کشاورزی و دامداری در ایران به‌شمار می‌رود.

این دریاچه از اواسط دهه ۸۰ شروع به خشک شدن کرد و امروزه در خطر خشک شدن کامل قرار دارد. دلایل بسیاری برای خشک شدن دریاچه ذکر شده‌است که از جمله می‌توان به سدسازی بی‌رویه، احداث بزرگراه بر روی دریاچه و استفاده بی‌رویه از منابع آب حوضه آبریز دریاچه و همچنین بارش کم برف و باران در سال‌های اخیر اشاره نمود.

در صورت عدم احیای دریاچه و با خشک شدن کامل دریاچه ارومیه یک کویر نمک بـا وسعت بیش از ۴۴۰۰ کیلومتر مربع تشکیل می‌شود که پیامدهای آن در شکل پیدایش کانون ایجاد ریزگرد در شمال غرب کشور، شوری و نابـودی زمینهای کشاورزی استانهای پیرامونی، تخریب منابع معیشتی کشاورزی و دامداری کـه عمده ترین منبع درآمـد ساکنان این منطقه است، گریبانگیر کشور خواهد شد. می‌توان گفت که بـه نوعی زندگی مردم در ایـن ناحیه از کشور بـا وضعیت اکولوژیک منطقه پیوند دارد و هرگونه تحول در اوضاع بـوم‌شناسی منطقه، مفهوم امنیت در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی را بـرای ساکنان منطقه و بـه‌ویژه روستاییان، متأثر خـواهد ساخت (Amini et al., 2020).

تأثیر مسلم توسعه ناپایدار فعالیتهای کشاورزی و اختصاص بیش از ۸۷ درصد از منابع آبی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به بخش کشاورزی در چند دهه اخیر بر خشک شدن دریاچه، لزوم توجه جدی در این حوضه را آشکار می‌سازد. مسلماً این مسأله افزون بر تأثیر مستقیم بر کیفیت زندگی جوامع محلی پیرامون دریاچه، اثر مخربی بر کیفیت و کمیت فعالیت های کشاورزی در منطقه نیز داشته است. از این‌رو، استقرار کشاورزی پایدار با هدف تغییر در الگوی مصرف آب و نهادهای شیمیایی در بخش کشاورزی بـه عنوان مهمترین گام در راستای احیای دریـاچه ارومیه مـورد تـوجه قـرار گرفته است (Sayyah and Rahmati, 2017).

افزایش روز افزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به ویژه در حوضه‌های با نهشته‌های آبرفتی، در مناطق مختلفی از سرزمین ایران، موجب فرونشست زمین شده است. به عبارتی علاوه بر اندازه‌گیری‌های سطح آبهای زیرزمینی در چاههای پیزومتری وزارت نیرو که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه حجم آبهای زیرزمینی و تهدید منابع آبی است، نقشه‌های فرونشست تهیه شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور نیز نشان‌دهنده تأثیر کاهش سطح آب زیرزمینی بر سطح زمین و تهدید خاک ایران زمین بصورت فرونشست‌های گسترده و متعدد در مناطق کشاورزی است (Amighpey et al., 2023).

اولین اندازه‌گیری کمی و آشکارسازی عددی فرونشست در ایران، با تکرار مشاهدات شبکه ترازیابی درجه یک ایران و محاسبه تغییر ارتفاعی ایستگاه‌های ترازیابی انجام شد (Amighpey et al., 2008). در این تحقیق، فرونشست ۴۴ منطقه از استانهای کشور محاسبه و شناسایی شده بود که اولین گزارش و اندازه‌گیری کمی فرونشست در اطراف دریاچه ارومیه نیز مبتنی بر محاسبه تغییر ارتفاعی ایستگاه‌های ترازیابی دقیق استانهای آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی در این تحقیق محاسبه شده بود. در این تحقیق تغییر ارتفاعی ایستگاه ترازیابی واقع در یامچی در ۵ کیلومتری مرند به حداکثر مقدار $1.8m \pm 0.72 \frac{mm}{\sqrt{KM}}$ طی ۱۶ سال می‌رسید. همچنین، در ایستگاه ترازیابی سلماس در آذربایجان غربی فرونشست کاسه‌ای شکل با حداکثر نشست $1m \pm 1.03 \frac{mm}{\sqrt{KM}}$ در ۱۷ سال گزارش شده بود.

با توجه به ابعاد گسترده مخاطرات پدیده فرونشست مانند تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، شکست و یا بیرون زدگی لوله جـدار چاه‌ها در نتیجه تنش‌های تراکمی ناشی از تراکم آبخوان‌ها و ایجاد اختلال در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، پیشروی امـواج در مناطق پست ساحلی، کاهش برگشت‌ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها، کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی و کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم، مدیریت و جلوگیری از گسترش این پدیده امری ضروری در توسعه پایدار کشور محسوب می‌شود. به منظور رویارویی با این مخاطره گام

نخست شناسایی محدوده‌های فرونشست زمین و نرخ آن و گام بعدی مدیریت بهینه منابع آب‌های زیرزمینی است.

بررسی تغییرات سطح زمین، می‌تواند به عنوان پیش نشانگر حوادث مهیبی چون زلزله و آتشفشان و به منظور بررسی و کنترل رفتار گسل‌های فعال و همچنین مدل‌سازی گسل‌های مسبب زلزله و یا برای شناخت و کنترل پدیده‌هایی مانند فرونشست و زمین لغزش، نقش مهمی را در مدیریت بحران داشته باشد. بدین منظور در دهه‌های اخیر، تلاش گسترده‌ای به منظور اندازه‌گیری تغییرات پوسته زمین توسط تکنیک‌هایی چون تداخل‌سنجی راداری، ترازیابی دقیق و GPS انجام شده است (Ghayournajarkar and Fukushima, 2022; Polan and Zebker, 2022; Bagheri et al., 2017).

فرونشست گسترده اطراف دریاچه ارومیه نشان‌دهنده فشار وارده بر منابع آب زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه است که خود می‌تواند به عنوان یکی از دلایل کاهش سطح آب دریاچه مورد توجه قرار گیرد. بدین جهت و به منظور شناسایی مناطق فرونشست اطراف دریاچه ارومیه و ایجاد توجه به وضعیت نامطلوب استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه که علاوه بر تهدید منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه منجر به تهدید خاک منطقه نیز شده است، در این تحقیق ضمن بررسی رابطه کاهش سطح آب زیرزمینی بر کاهش آب دریاچه، با استفاده از تلفیق انواع مشاهدات ژئودتیک، نقشه فرونشست دشتهای اطراف دریاچه ارومیه محاسبه شده است.

۲- اندرکنش کاهش سطح آب زیرزمینی بر کاهش آب دریاچه

اندرکنش آبهای زیرزمینی و سطحی در زمان و مکان بسیار پیچیده و مبهم است. این ارتباط نه تنها از عوامل آب و هوا، زمین ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی و زیستی، بلکه از فعالیتهای انسانی نیز تأثیر می‌پذیرد (Sophocleous, 2002). مطالعات Zekster (1996) نشان می‌دهد که حدود ۲ درصد آب دریاچه بایکال، ۰/۵ درصد دریاچه بالخاش، ۳۰ تا ۴۰ درصد دریاچه ایسسیککول و ۱ درصد دریای خزر از آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. Grannemann et al. (2000) با استفاده از بیلان آب برآورد کردند که آب زیرزمینی به طور مستقیم و غیرمستقیم 80 درصد از آب ورودی توسط حوضه آبگیر به دریاچه میشیگان را شامل می‌شود. Dadaser-Celik and Celik (2017) با مدل‌سازی عددی اندرکنش آبهای سطحی و زیرزمینی در حوضه پالس ترکیه، مشخص نمودند که نقش آبهای زیرزمینی به صورت مستقیم و غیر مستقیم در تأمین آب دریاچه بسته توزال بسیار دارای اهمیت است. آنها توصیه کردند که در مدیریت منابع آب دریاچه ها و تالابها باید به نقش آبهای زیرزمینی توجه نمود. Farhoudi-Hafdaran and Ketabchi (2018) از شبیه‌سازی عددی اندرکنش دریاچه ارومیه و آبخوان ساحلی دشت عجب شیر نتیجه گرفتند که کاهش سطح تراز دریاچه با روند ۰/۴ متر بر سال، تراز متوسط آبخوان را به اندازه ۱/۷ متر در طول ۱۰ سال کاهش می‌دهد. از نحوه اندرکنش آبهای زیرزمینی و سطحی در ناحیه اطراف دریاچه ارومیه، اطلاعات کافی و مناسبی وجود ندارد. به همین دلیل فرضیه های متفاوتی در مورد میزان و نحوه ارتباط افت آبخوانها و کاهش تراز آب دریاچه و افت کیفیت آب‌های‌زیرزمینی مطرح گردیده است (Shemshaki and Karami, 2018). مطالعه Hosseini-Moghar et al. (2020) نشان داده است که مدیریت حوضه دریاچه ارومیه باید بر اساس ارزیابی جامع کلیه ذخایر و جریان‌های آب در این حوضه از جمله بهره‌برداری انسانی از آب‌های زیرزمینی و سطحی باشد. Rahimi and Breuste (2021) فاکتور دخالت انسانی همچون سدسازی و استخراج بی رویه آب زیرزمینی را علت اصلی خشکی دریاچه ارومیه معرفی نموده‌اند.

منابع آب سطحی حوضه دریاچه ارومیه توسط ۱۴ رودخانه بزرگ به دریاچه ارومیه تخلیه می‌شوند. متأسفانه جهت تأمین آب دشتهای مجاور و دور از دریاچه با حفر بی‌رویه چاه استخراج بیش از ظرفیت از منابع آب زیرزمینی صورت پذیرفته است که این موجب افت سطح آب آبخوانهای منطقه شده است. شکل ۱ وضعیت محدوده های مطالعاتی آبی وزارت نیرو در اطراف دریاچه ارومیه براساس وضعیت سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل تمامی دشتهای اطراف دریاچه ارومیه دارای وضعیت ممنوعه و ممنوعه بحرانی می‌باشند.

افت شدید سطح تراز آب زیرزمینی در آبخوانهای منطقه، موجب شده تمام آبراهه‌ها و رودخانه‌های عبوری از این دشتها در طول سال به جز موارد سیلاب شدید، تبدیل به منابع تغذیه‌کننده آبهای زیرزمینی شود و قبل از رسیدن به دریاچه جذب زمین شود و منابع آبی تغذیه‌کننده دریاچه مورد تهدید قرار گرفته است. نتایج پژوهشی که با محاسبه جریانهای ورودی و خروجی آب زیرزمینی و تغییر حجم مخزن آبخوان در بازه زمانی اردیبهشت ماه ۱۳۸۷ تا اردیبهشت ماه ۱۳۹۵ انجام شد، نشان می‌دهد که آب چاههای این منطقه به طور غالب از نفوذ مستقیم جریانهای سطحی در سطح منطقه و یا جریانهای برگشتی مانند آب برگشتی کشاورزی تأمین می‌شود (Shemshaki and Karami, 2018).

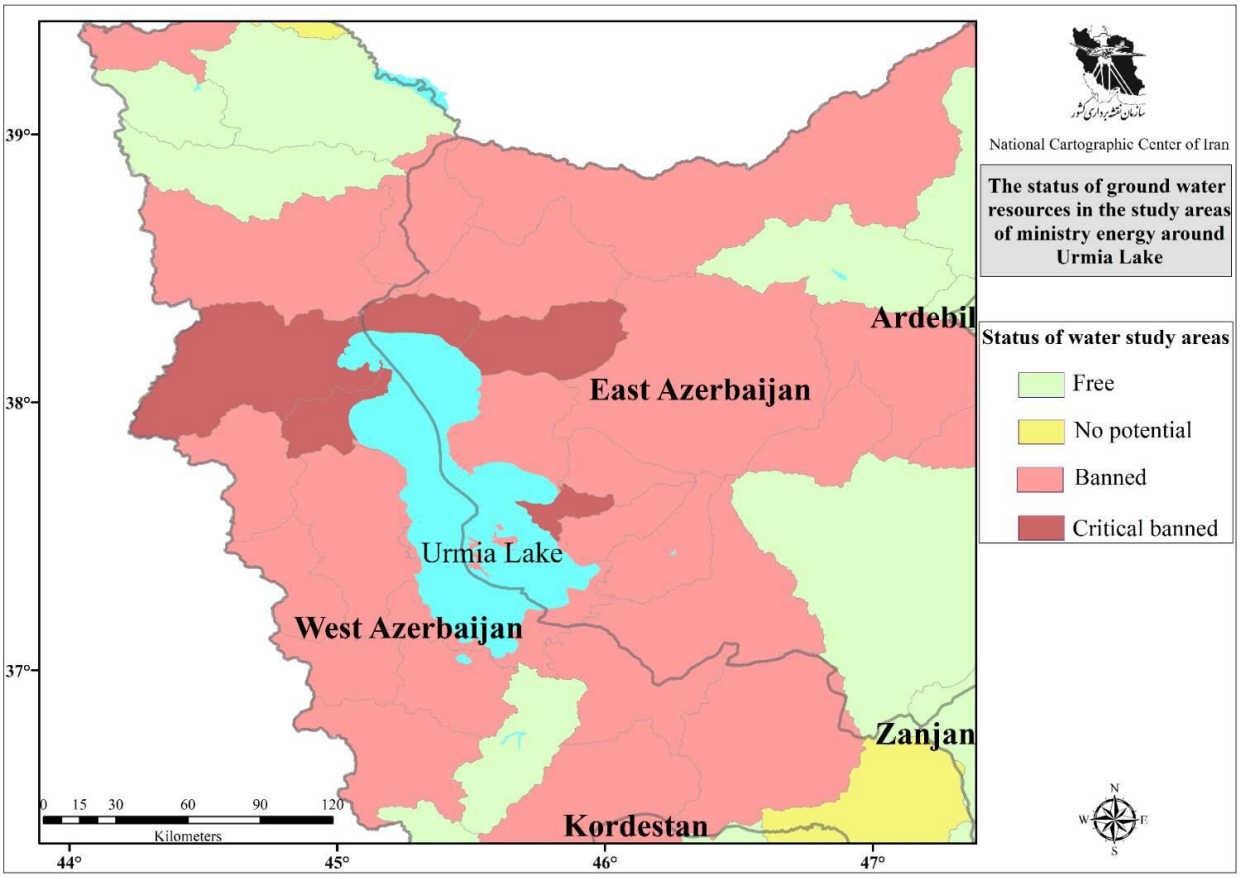

Fig. 1- The status of ground water resources in the study areas around Urmia Lake

شکل ۱- وضعیت منابع آب زیرزمینی در محدوده‌های مطالعاتی وزارت نیرو در اطراف دریاچه ارومیه

از دیگر سو، این کاهش شدید سطح تراز آب زیرزمینی موجب کاهش شدید کیفیت آب و شوری آن و تهدید کشاورزی منطقه شده است. از دیگر آثار مخرب این عدم مدیریت منابع آبی مناطق اطراف دریاچه ارومیه و افت سطح آب زیرزمینی ایجاد پدیده فرونشست سطح زمین در بسیاری از دشتهای منطقه است. از مهم‌ترین مخاطرات پدیده فرونشست می‌توان به تخریب سیستم‌های آبیاری و خاکهای حاصلخیز کشاورزی، تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب زمین و کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم، کاهش برگشت‌ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها، کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی اشاره کرد. با توجه به آثار مخرب فرونشست زمین و تهدیدهای آن برای آب و خاک حوضه دریاچه ارومیه، شناسایی گستره و وضعیت فرونشست منطقه به منظور جلوگیری از پیشرفت این مخاطره امری ضروری است. لذا در قسمت بعد میدان جابجایی سطحی منطقه اطراف دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳- پایش میدان جابجایی سطحی زمین در اطراف دریاچه ارومیه با استفاده از مشاهدات ژئودتیک

اندازه‌گیری کمی تغییرات سطح زمین، نخستین گام اساسی در جهت شناسایی و کنترل مخاطرات فرونشست زمین است. بدین منظور در دهه‌های اخیر، اندازه‌گیری تغییرات ارتفاعی پوسته زمین توسط مشاهدات ژئودتیک مانند تداخل‌سنجی راداری، ترازیابی دقیق و GPS انجام شده است. تکرار مشاهدات ترازیابی دقیق، به عنوان دقیق‌ترین و پرهزینه‌ترین مشاهده ژئودتیک ارتفاعی، تغییرات ارتفاعی سطح زمین را در ایستگاههای ترازیابی در فواصل ۲ کیلومتر اندازه‌گیری می‌کند. مشاهدات ایستگاه‌های دایمی GPS نیز تغییرات مسطحاتی و ارتفاعی سطح زمین را با دقت بالا در ایستگاه مربوطه نشان می‌دهد. از دیگرسو، در چند دهه اخیر تکنیک تداخل‌سنجی راداری به عنوان یک تکنیک متداول برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین شده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به عنوان ابزار

نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین شناسی همچون زلزله، فرونشست، زمین لغزش و غیره مطرح کرده است.

به منظور دستیابی به نقشه فرونشست در اطراف دریاچه ارومیه، از تلفیق میدان جابجایی به دست آمده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، ترازیابی دقیق و مشاهدات ایستگاههای دایمی ژئودینامیک استفاده شد (شکل ۲). نخستین شواهد کمی فرونشست، بر اساس گزارش تغییر ارتفاعی مسیرهای ترازیابی دقیق درجه یک کشور بود که قبلاً فرونشست‌های کاسه‌ای شکل را در مناطق کشاورزی نشان داده بود (Amighpey et al., 2008). به عنوان نمونه، شکل ۳ تغییر ارتفاعی منطقه ایواوغلی، مرند، صوفیان استکه بیشترین فرونشست در این مسیر گزارش شده بود. همانطور که از این شکل مشخص است فرونشست حداکثر به میزان ۱/۷۷ متردر ایستگاه ACAD1030 در ۸ کیلومتری شهرستان مرند مشاهده گردیده است.

همچنین، دراین تحقیق، از سری زمانی ۱۷ ایستگاه ژئودینامیک با مشاهدات دایمی GPS که نشان دهنده رفتار و نرخ جابجایی در منطقه بود، استفاده شد. به عنوان نمونه شکل ۴ سری زمانی مؤلفه ارتفاعی ایستگاه ارومیه که نشان‌دهنده فرونشست منطقه است را نشان می‌دهد. پس از پردازش داده‌های مربوط به طرح ژئودینامیک سراسری و بررسی نتایج و تعیین تغییرات زمانی موقعیت مکانی ایستگاه‌ها بر اساس داده‌های محاسبه شده ایستگاه ارومیه از سال ۲۰۰۶ تا اواسط ۲۰۲۰ در حدود ۶۰ سانتیمتر فرونشست داشته است که به طور میانگین ۴ سانتیمتر در سال فرونشست ایستگاه می‌باشد. البته باید توجه داشت که نرخ فرونشست در سال‌های مختلف تفاوت‌هایی اندک وجود دارد. با بررسی فرونشست این ایستگاه با نقشه فرونشست حاصل از تداخل‌سنجی راداری (۴/۱ سانتیمتر در سال) نتایج یکدیگر را تأیید می‌نمایند.

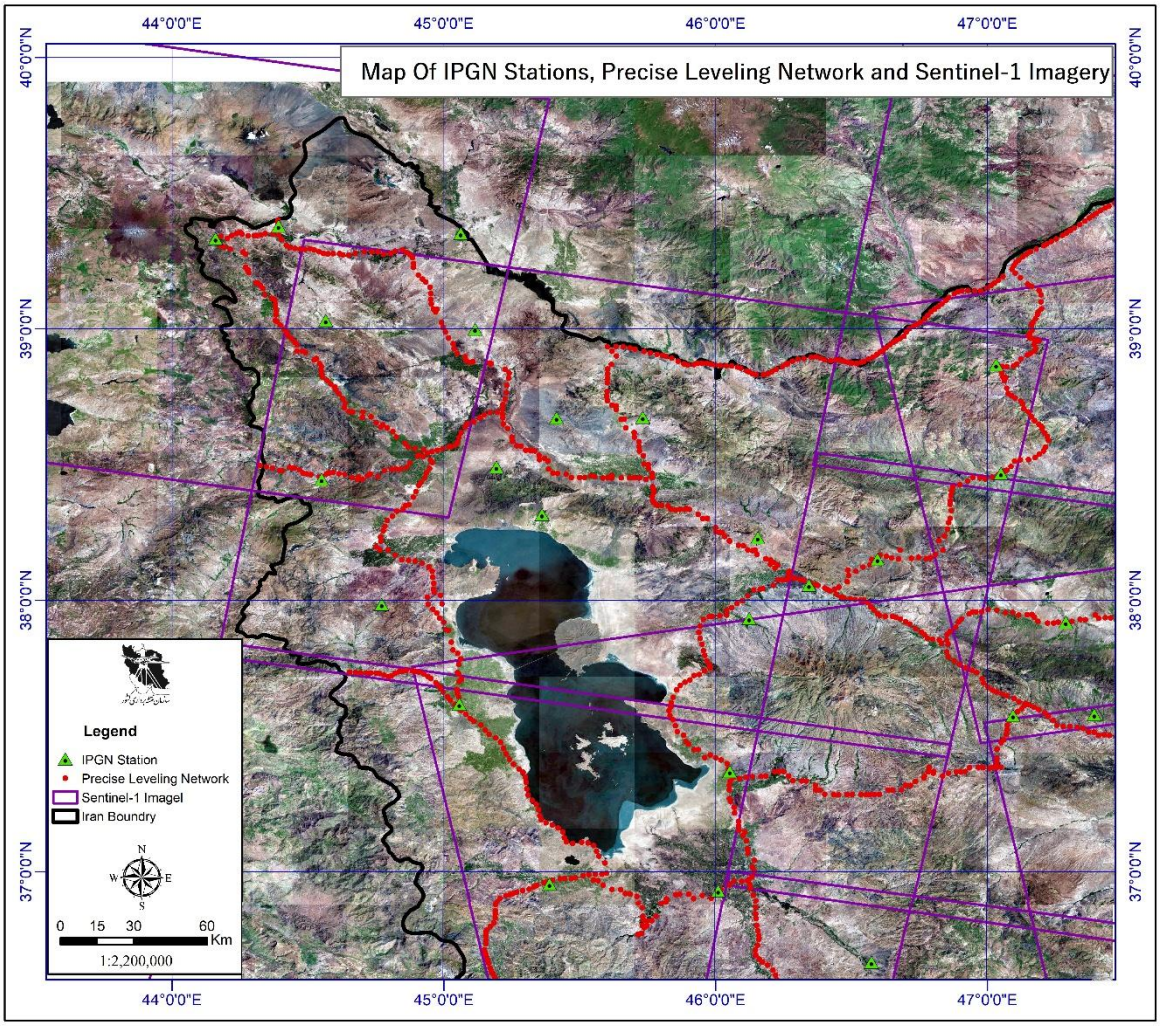

Fig. 2- Applied geodetic observations for computing earth surface deformation around Urmia Lake

شکل ۲- مشاهدات ژئودتیک استفاده شده برای محاسبه میدان جابجایی سطحی زمین در اطراف دریاچه ارومیه

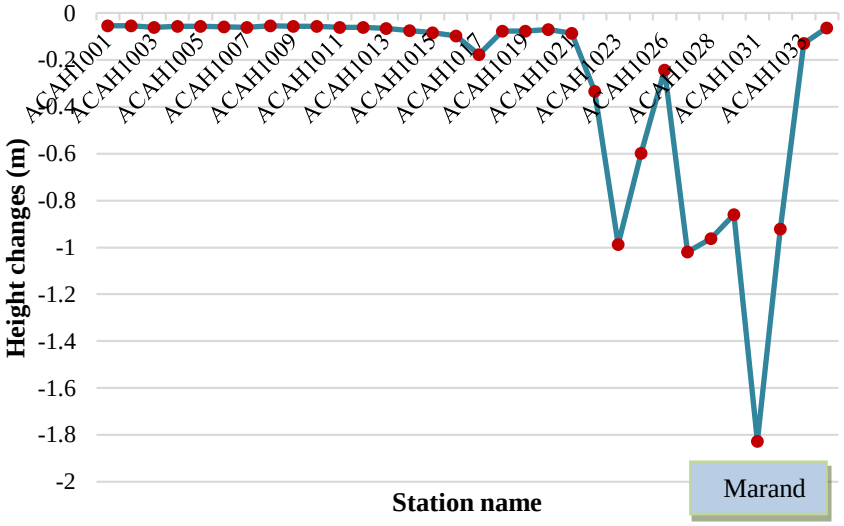

Fig. 3- Precise levelling height changes in Ivavgholi -Marand- Soofiyan route between 1988-2004
شکل ۳- نمودار تغییرات ارتفاعی خط ترازیابی حد فاصل ایواوغلی-مرند-صوفیان در بین سال‌های ۸۳-۶۷ (۲۰۰۴-۱۹۸۸)

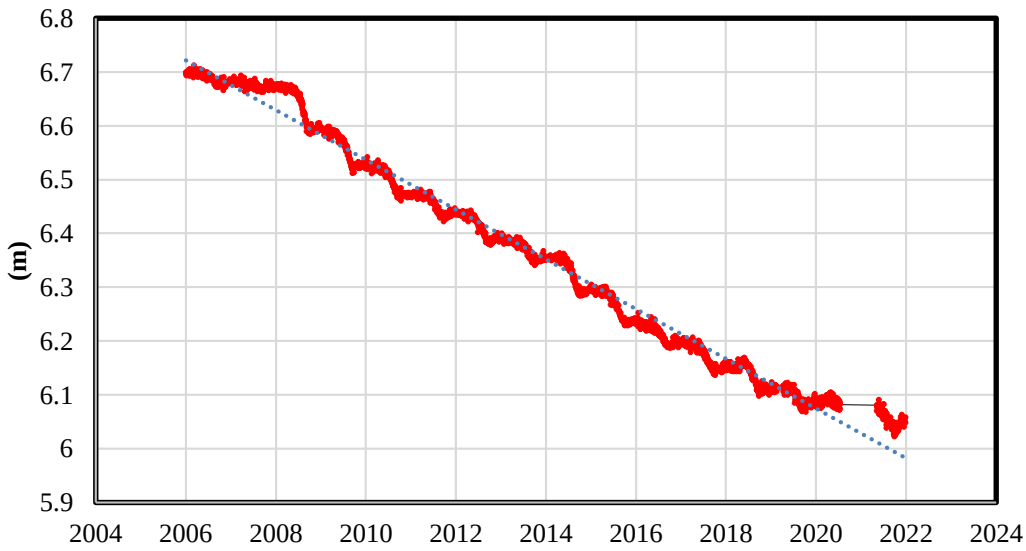

Fig. 4- The subsidence time series of GPS observation of Urmia station
شکل ۴- نمایش سری زمانی فرونشست ایستگاه ژئودینامیک ارومیه

به منظور تهیه نقشه فرونشست اطراف دریاچه ارومیه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، تصاویر راداری ماهواره sentinel-1 و اطلاعات مداری تصاویر برای کل ایران در بازه زمانی سالهای ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ از سایت مرکز فضایی اروپا اخذ شد (شکل ۲). ۹۶ تصویر در سه عرض گذر برای منطقه در بازه این دوسال در فاصله زمانی ۲۴ روز برداشت شد. همچنین مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر برای منطقه دانلود شد.

ماهواره sentinel-1 که ماهواره راداری پرتاب شده مرکز فضایی اروپا است، آپریل ۲۰۱۴ در ادامه ماموریتهای ماهواره های ERS-1,2 و Envisat پرتاب شده است. این ماهواره بهبود قابل توجهی در کوتاه شدن بازه زمانی بین تصاویر یک منطقه و پوشش بهتر تصاویر ایجاد کرده است. این ماهواره به‌صورت منظم تصاویری با دوره زمانی ۱۲ روزه از سطح زمین تهیه می کنند. داده‌های SLC ماهواره sentinel-1 از باند C با طول موج ۵/۶ سانتی‌متر است. این تصاویر از سه نوار[۱]

کنار هم که هر نوار دارای ۹ قطعه[۲] است، تشکیل شده است. این تصاویر محدوده ۱۵۰ کیلومتر در راستای مسیر پرواز ماهواره و ۲۵۰ کیلومتر در راستای عمود بر پرواز را با قدرت تفکیک مکانی حدود ۱۴ متر پوشش می‌دهد. لازمه پوشش کامل کره زمین با دوره تکرار کوتاه ۱۲ روزه این تصاویر، تصویربرداری در مد عرض گذر گسترده[۳] است. از آنجا که عرض گذر تصاویر رابطه مستقیم با طول آنتن سنجنده دارد، تصاویر رادار با دریچه مصنوعی می‌تواند حداکثر عرض گذری حدود ۸۰ کیلومتر داشته باشد. برای پردازش تصاویر این ماهواره برای جلوگیری از ایجاد آفست در قطعات هر نوار، عملیات یکسان‌سازی قطعات و برای جلوگیری از ایجاد آفست در نوارهای کنار هم عملیات یکی کردن قطعات می باید اعمال شود. از آنجایی که تکنولوژی مشاهده زمین با اسکن‌های پیشرفته سرعت بالای داپلر در راستای آزیموت را تولید می‌کند، برای جلوگیری از ایجاد پرش و ناپیوستگی در اختلاف فاز تصاویر در بین قطعات هر نوار، ثبت هندسی بسیار دقیق تصاویر در حد یک هزارم پیکسل در راستای آزیموت مورد نیاز است. بدین منظور نرم‌افزار GMTSAR با قدرت ثبت هندسی بسیار دقیق انتخاب شد. به منظور شناسایی مناطق فرونشست، با به کارگیری تکنیک خطوط مبنای کوتاه تصاویر مورد پردازش قرار گرفت و نقشه میانگین میدان جابجایی سطحی زمین در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ به همراه سری زمانی میدان جابجایی سطحی زمین در این بازه زمانی به دست آمد. به منظور به حداقل رساندن عدم وابستگی زمانی تصاویر فاصله زمانی ۱۳۰ روز و برای به حداقل رساندن خطای باقیمانده اثر توپوگرافی خط مبنای مکانی بیشینه ۱۳۰ متر اتخاذ شد.

در نهایت، با بررسی تصاویر اپتیکی مناطق و حذف مناطق بیابانی و سیل‌خیز، مناطق فرونشست مورد شناسایی قرار گرفت و نقشه جابجایی قائم در این مناطق با استفاده از میدان جابجایی سطحی به دست آمده از تداخل‌سنجی راداری به دست آمد. شکل ۵ نمونه‌ای از نقشه‌های فرونشست تولید شده را نمایش می‌دهد. مطابق شکل نواحی ساحلی دریاچه دچار فرونشست شده و فرونشست به نزدیکی محدوده کلان شهرهای ارومیه و تبریز و بسیاری از شهرهای منطقه امتداد پیدا کرده است.

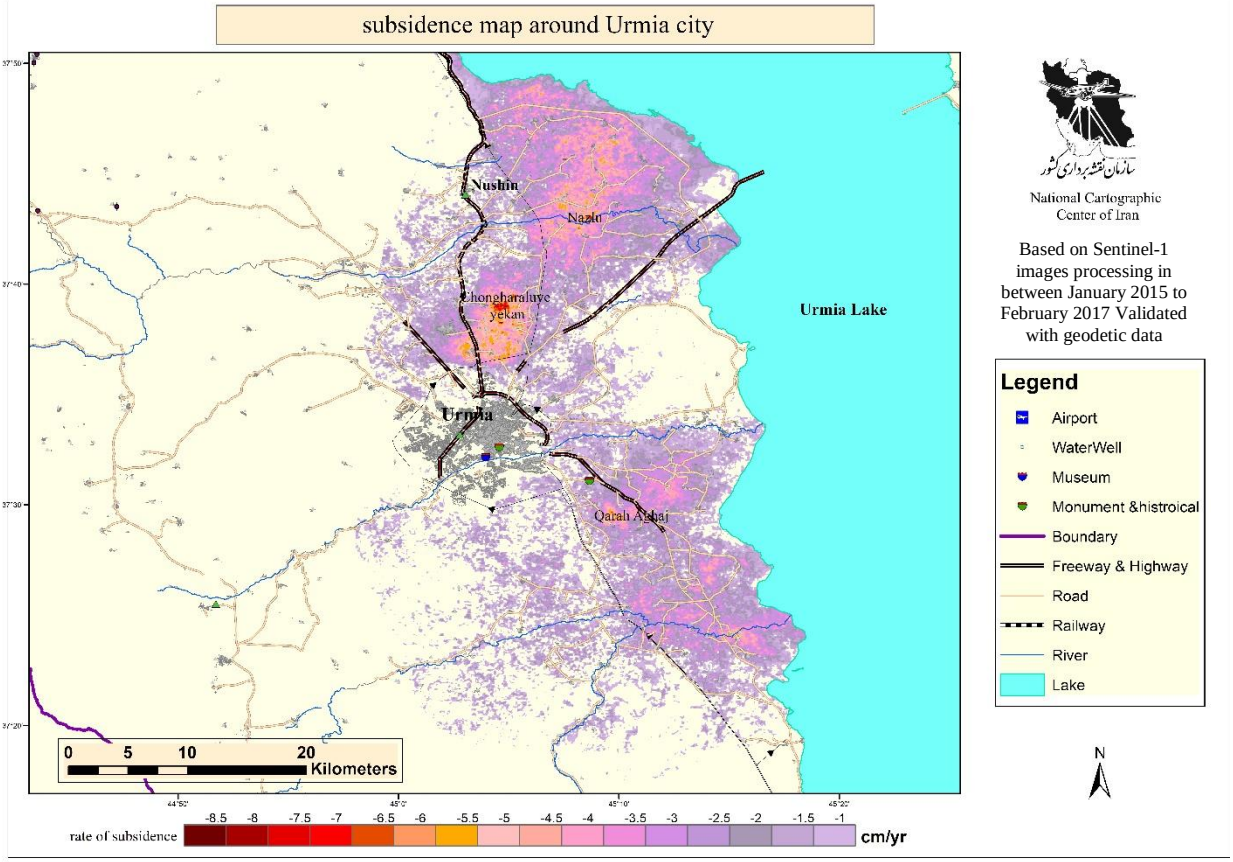

Fig. 5- Urmia City subsidence map
شکل ۵- نقشه فرونشست ارومیه

شکل ۶ نقشه تجمیعی وضعیت فرونشست اطراف دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد. طبق این شکل ۱۳ منطقه فرونشست در اطراف دریاچه ارومیه در این بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ ایجاد شده است که ۶ منطقه در استان آذربایجان شرقی و ۶ منطقه در آذربایجان غربی بوده و فرونشست محدوده ملکان میاندوآب نیز بین این دو استان است. این مناطق شامل فرونشست مرند با نرخ بیشینه ۱۸/۹ سانتی‌متر در سال، ایلخچی با نرخ بیشینه ۱۲/۲ سانتی‌متر در سال، شبستر با نرخ بیشینه ۱۰/۸ سانتی‌متر در سال، تسوج با نرخ بیشینه ۶/۶ سانتی‌متر در سال، ملکان و میاندوآب با نرخ بیشینه ۵/۸ سانتی‌متر در سال، عجب شیر و بناب با نرخ بیشینه ۵ سانتی‌متر در سال در آذربایجان شرقی و سلماس با نرخ بیشینه ۱۴/۶ سانتی‌متر در سال، خوی با نرخ بیشینه ۱۲/۱ سانتی‌متر در سال، ارومیه با نرخ بیشینه ۸/۲ سانتی‌متر در سال، آغبلاق با نرخ بیشینه ۶/۲ سانتی‌متر در سال، نقده و پیرانشهر با نرخ بیشینه ۵/۳ سانتی‌متر در سال، و اطراف روستاهای زری و زورآباد با نرخ بیشینه ۸/۲ سانتی‌متر در سال در آذربایجان غربی است.

با مقایسه شکل‌های ۱ و ۶ مشخص است که تمامی فرونشستهای اطراف دریاچه ارومیه در دشتهای ممنوعه و ممنوعه بحرانی وزارت نیرو اتفاق افتاده است. به عنوان نمونه همانطور که از شکل ۷ مشخص است از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۴ سطح آب‌های زیرزمینی در حوضه آبخوان مرند یک سیر نزولی داشته است و در طی این زمان سطح آب زیرزمینی در این آبخوان در حدود ۱۰ متر کاهش داشته است. بالاترین نرخ فرونشست در مرند با بیشینه نرخ ۱۸/۹ سانتی‌متر در سال و پس از آن در سلماس با بیشینه نرخ ۱۴/۶ سانتی‌متر در سال اتفاق افتاده است.

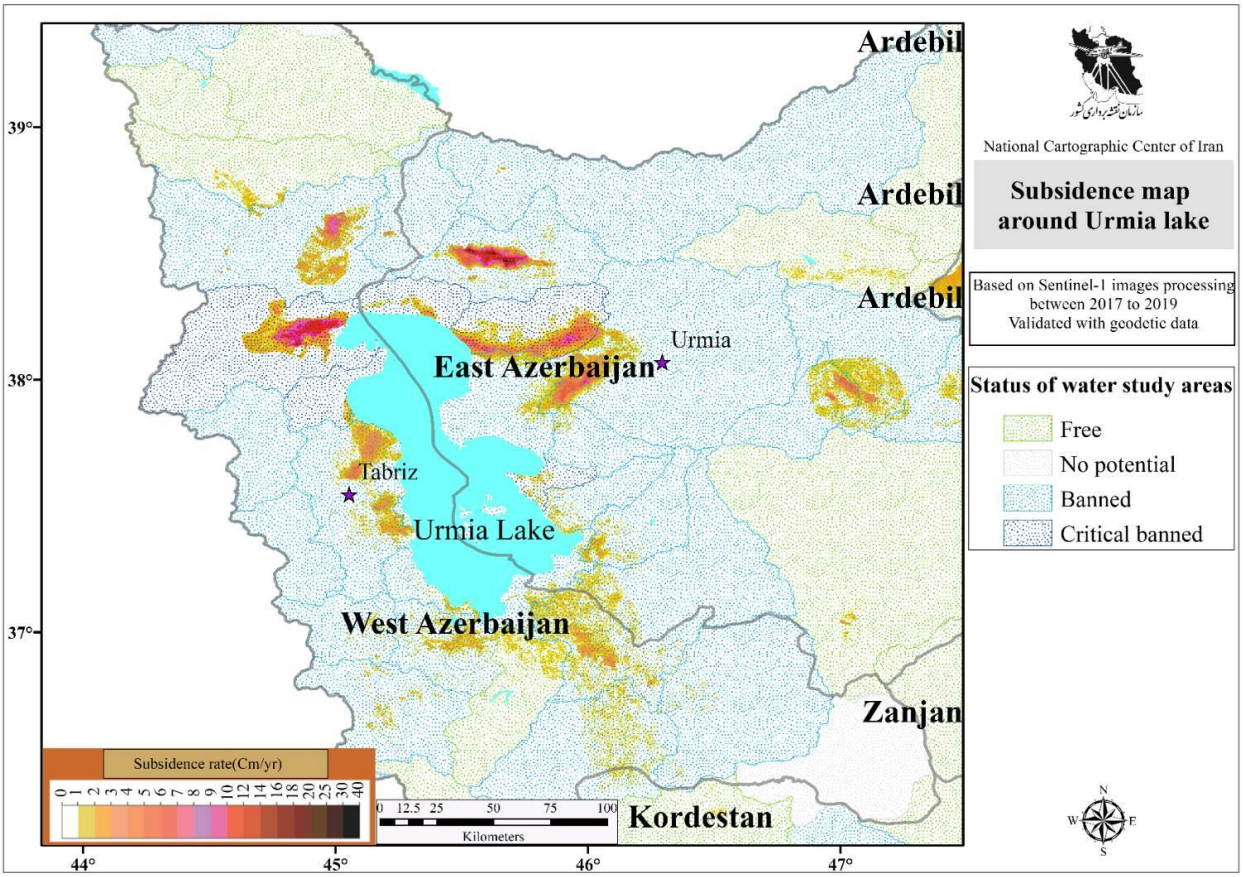

Fig. 6- Subsidence map around Urmia Lake

شکل ۶- نقشه فرونشست اطراف دریاچه ارومیه

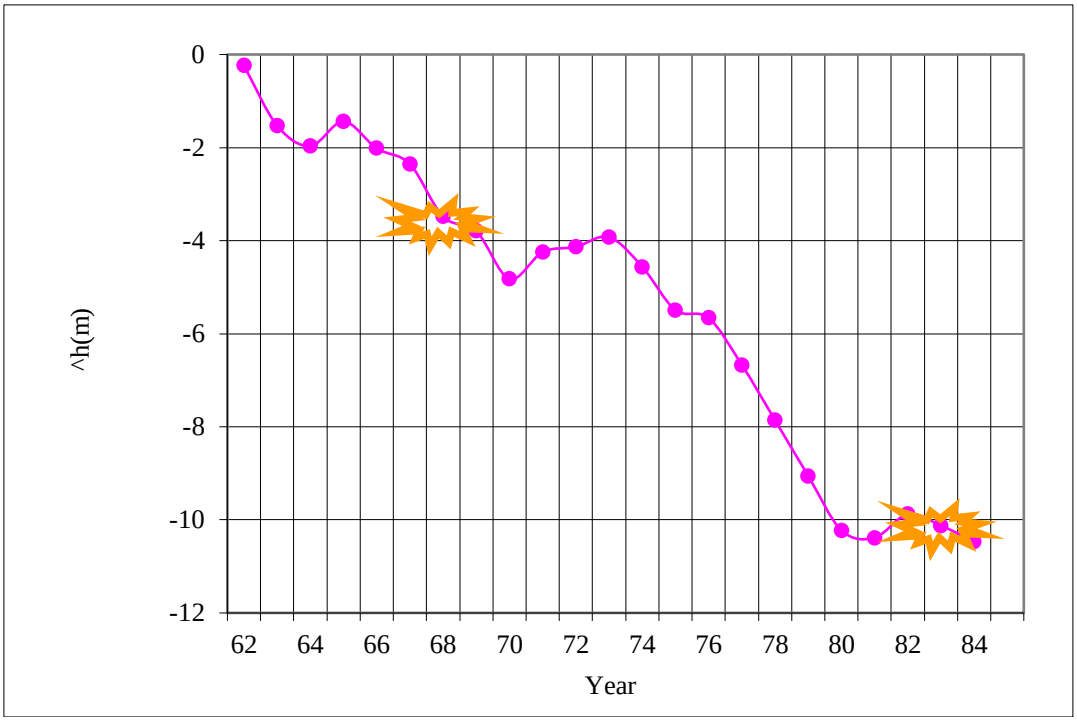

Fig. 7- Groundwater level changes in Marand Aquifer

شکل ۷- تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی حوضه آبخوان مرند

۴- بحث و نتیجه‌گیری

طی چند دهه اخیر، سازگاری با کم‌آبی به‌عنوان مسأله‌ای اساسی در بسیاری از کشورهای جهان مطرح بوده است. با قرار گرفتن مساحتی بالغ بر ۷۰ درصد از ایران در سطح نیمه خشک و خشک، این سرزمین از دیرباز با چالش کم‌آبی مواجه بوده است. این در حالی است که تغییرات اقلیمی و افزایش دوره‌های خشک‌سالی، نفوذناپذیری بسیاری از زمین‌ها در اثر فعالیت‌های انسانی (عدم تقویت آبخوان‌ها)، توسعه شهرنشینی و تقاضای فزاینده برای آب در بخش‌های مختلف کشاورزی، آشامیدنی و صنعت، کاهش کمی و کیفی منابع آب و ضعف مدیریت منابع آب، موجب تشدید بحران کم‌آبی در کشور گردیده است (Fanni and Maroofi, 2017). یکی از بارزترین جلوه‌های سوء مدیریت منابع آبی در ایران در حوضه دریاچه ارومیه است که علاوه بر خشکی دریاچه ارومیه موجب آسیب جدی به آبخوان منطقه نیز شده است.

در جنوب و جنوب غرب آسیا مسأله کمبود آب بیشتر از کمبود زمین مناسب، موجب توقّف طرح‌های توسعه کشاورزی شده است. با توجه به گسترش کشاورزی در شمال غرب ایران، اعمال روشهای کارا در زمینه کاهش مصرف آب کشاورزی ضروری می‌نماید. همچنین، تعامل مناسب بین توسعه کشاورزی و احیای دریاچه ارومیه می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. توسعه کشاورزی و وضعیت دریاچه ارومیه به هم وابسته بوده و تأثیرات آنها بر همدیگر دوسویه و متقابل است، به طوری که توسعه بی‌رویه کشاورزی سبب کاهش سطح آب زیرزمینی و بحرانی‌تر شدن وضعیت دریاچه ارومیه می‌شود و انجام اقدامات لازم برای احیای دریاچه سبب محدودتر شدن کشاورزی و ایجاد تنش در بین کشاورزان در منطقه مورد مطالعه خواهد شد؛ بنابراین لازم است یک تعامل مناسب بین دو مقوله مهم توسعه کشاورزی و احیای دریاچه ارومیه انجام شود.

با روند خشک شدن دریاچه ارومیه تلاشهایی به منظور افزایش آب ورودی به آن انجام شده است. در این زمینه مسلماً می‌بایست اثر منفی افت شدید سطح تراز آب زیرزمینی در آبخوانهای منطقه بر منابع آبی تغذیه‌کننده دریاچه را مورد توجه قرار داد، زیرا این افت شدید آب زیرزمینی موجب جذب آب آبراهه‌ها و رودخانه‌های عبوری دشتهای اطراف دریاچه ارومیه به آبخوان قبل از رسیدن آنها به دریاچه می‌شود. از طرف دیگر این افت سطح آب زیرزمینی موجب فرونشست سطح زمین در بسیاری از دشتهای منطقه شده است (شکل ۶). نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در مجموع مساحتی بالغ بر ۴۰۰۰ کیلومتر مربع در اطراف دریاچه ارومیه در حال فرونشست است که گسترده‌ترین

مناطق فرونشست اطراف دریاچه، شبستر و ملکان میاندوآب است. این در حالی است که ۷۰ درصد محیط دریاچه ارومیه با فرونشست‌های دشتهای اطراف دریاچه محاط شده است. گرچه تقریباً تمام منطقه اطراف دریاچه شاهد فرونشست با سرعت بالا می‌باشد، اما نیمه شمالی دریاچه شاهد نرخ بالاتری از فرونشست و وضعیت بحرانی‌تری است. با توجه به تهدیدی که پدیده فرونشست بر منابع آبی و خاکی حوضه دریاچه ارومیه ایجاد کرده است، لزوم کنترل پدیده فرونشست منطقه از طریق اجرای الگوی کشت مناسب، اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب، تغییر روش‌های آبیاری و تغذیه مصنوعی امری فوری و ضروری است.

از طرفی به علت گسترش فرونشست‌ها در لبه مرزی کلانشهرهای ارومیه و تبریز، کنترل گسترش این پدیده به داخل شهرها می‌بایست مورد اهتمام جدی قرار گیرد. همچنین، ضروری است که پارامتر نرخ و محدوده فرونشست در طرحهای گسترش و توسعه شهری و مکان‌یابی مراکز صنعتی درنظر گرفته شود و پیشنهاد می‌شود فرونشست به عنوان یک عامل محدود کننده در توسعه شهرها و مکان‌یابی پروژه‌های عمرانی درنظر گرفته شود.

نرخ بالای فرونشست اطراف دریاچه ارومیه نشان دهنده فشار وارده بر منابع آب زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه است که خود می‌تواند به عنوان یکی از دلایل کاهش سطح آب دریاچه مورد توجه قرار گیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند در سیاست‌گذاریهای آبی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد استفاده مدیران، محققان و اندیشمندان قرار گرفته و گامی مؤثر در احیای دریاچه ارومیه و تخصیص پایدار و عادلانه منابع آبی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و کنترل فرونشست دشتهای اطراف این دریاچه باشد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله کمال تشکر را از حمایت مالی و امکان دسترسی به داده‌های ژئودتیک مورد نیاز این مطالعه توسط سازمان نقشه‌برداری کشور ابراز می‌دارند.

پی‌نوشت‌ها

1- Swath
2- Burst
3- Wide Swath Mode

۶- مراجع

Amighpey M, Arabi S, Talebi A, Jamoor Y (2008) Studying subsidence area in Iran applying Precise leveling remeasurement. Surveying 20(4):5-15 (In Persian)

Amighpey M, Arabi S (2023) Comprehensive Iran subsidence atlas. National Cartographic Center of Iran, Tehran (In Persian)

Amini M, Kouhestani H, Kazemiyeh F (2020) Effects of water-level decline in Urmia Lake on rural areas (Case study: Dole District, Urmia). Environmental Sciences 18(2):165-186

Bagheri M, Dehghani M, Esmaeili A, Akbari V (2019) Assessment of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar time series analysis and artificial neural network in a geospatial information system case study of Rafsanjan Plain. Journal of Applied Remote Sensing 13(4):44-53

Dadaser-Celik F, Celik M (2017) Modelling surface water-groundwater interactions at the Palas Basin (Turkey) using FREEWAT. Italian Journal of Groundwater 6(3):53-60

Fanni Z, Maroofi A (2017) The drought's effects of Urmia Lake on natural and human disasters. Vulnerability of Peripheral Area 2(58):1-16

Farhoudi-Hafdaran R, Ketabchi H (2018) Numerical simulation of Urmia Lake and Ajabshir coastal aquifer interaction. Iran-Water Resources Research 14(1):45-58

Ghayournajarkar N, Fukushima Y (2022) Using InSAR for evaluating the accuracy of locations and focal mechanism solutions of local earthquake catalogues. Geophysical Journal International 230(1):607-622

Grannemann, N G, Hunt, R J, Nicholas J R, Reilly TE, Winter T C (2000) The importance of ground water in the great Lakes Region. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report, 4008:19p.

Hosseini-Moghari, S M, Araghinejad S, Tourian M J, Ebrahimi K, Döll P (2020) Quantifying the impacts of human water use and climate variations on recent drying of Lake Urmia basin: The value of different sets of space borne and in situ data for calibrating a global hydrological model. Hydrology and Earth System Sciences 24:1939–1956

Poland M P, Zebker H A (2022) Volcano geodesy using InSAR in 2020: The past and next decades. Bulletin of Volcanology 84(3):27

Rahimi A, Breuste J (2021) Why is Lake Urmia drying up? Prognostic modeling with land-use data and artificial neural network. Frontiers in Environmental Science 9:603916

Sayyah A,Sadat rahmati F (2017) Modeling local society participant in restoration of lake Urmia by applying stable agriculture. Mehre Sadegh publication, Tehran, (In Persian)

Shemshaki A, Karami Gh (2018) Spatial and temporal variation of groundwater flow in southeastern bank of Urmia Lake. Hydrogeology 4(1)

Sophocleous M (2002) Interaction between groundwater and surface water: The state of the science. Journal of Hydrogeology 10(1):52 –67

Zekster I S (1996) Groundwater discharge into lakes: A review of recent studies with particular regard to large saline lakes in central Asia. International Journal of Salt Lake Research 4:233-249