

Research Paper



Assessment of Land Subsidence Variations in the Urmia Plain Aquifer Using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR)



Fariba Hemmati ¹, Sara Khanjari ², Akram Alizadeh ³

1. Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. F.Hemmati@cfu.ac.ir
2. Master of Science, Department of Geology, Faculty of Science, Urmia University. sarageologist21@gmail.com
3. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran. akramalizadeh@gmail.com

Keywords

Land Subsidence
Differential Interferometric (DInSAR)
SNAP Software
Urmia Plain Aquifer.

Receive: 2025/06/28

Accepted: 2025/10/01

Published: 2026/04/12

ABSTRACT

Introduction

The Urmia Plain, a vital agricultural hub in northwestern Iran, has faced a serious and increasingly critical challenge of land subsidence in recent decades. This phenomenon, posing a major threat to the region's environment and economy, results from a combination of natural and anthropogenic factors. Natural factors include a complex tectonic structure, active faults, fine-grained sediments, and shallow alluvial aquifers, which have predisposed the area to subsidence. On the other hand, human factors, particularly the over-extraction of groundwater for agricultural, industrial, and urban uses, coupled with semi-arid climatic conditions and prolonged droughts, have led to a severe decline in groundwater levels and the exacerbation of this phenomenon. The consequences of this crisis are not limited to geotechnical issues but also include infrastructure damage, reduced agricultural productivity, and ecosystem instability.

Although scattered studies in geology and hydrology have been conducted in the region, comprehensive research specifically analyzing subsidence using modern technologies like Radar Interferometry (InSAR) and in direct conjunction with ground data (piezometry) has been limited. Previous studies have primarily focused on identifying and reporting subsidence rates at specific points (e.g., around Lake Urmia) and have less frequently addressed spatiotemporal causal analysis on a large scale and the zoning of critical areas.

Methodology

This research aimed to investigate the land subsidence phenomenon in the aquifer of the Urmia Plain by employing an integrated approach combining remote sensing data and ground data. The methodology of this study was systematically designed and executed in several main stages.

The data used in this research were gathered from reliable domestic and international sources. The most important of these data included Sentinel-1A radar images from the European Space Agency for the period 2015 to 2023, the SRTM digital elevation model with 30-meter accuracy from NASA, water level data from 23 piezometric wells from the Regional Water Authority for the period 2002-2003 to 2022-2023 (1381 to 1401 in the Persian calendar), and 1:100,000 scale geological maps.

*Correspondin Author: Fariba Hemmati. F.Hemmati@cfu.ac.ir

How to cite this article Hemmati; Fariba, Khanjari; Sara & Alizadeh, Akram. (2026). Assessment of Land Subsidence Variations in the Urmia Plain Aquifer Using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR). *Hydrogeomorphology*, 13(46): 59 – 72. endpage

DOI: [10.22034/hyd.2025.67902.1798](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.67902.1798)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

Key findings of this research reveal that processing radar images with the DInSAR technique uncovered a significant rate of land subsidence within the study area. The range of cumulative land surface changes over the 8-year period (2015-2023) fluctuated between 0.96 meters (uplift) and -0.09 meters (subsidence), with the maximum subsidence value (-0.9 meters) concentrated in the southern parts of the region. The accuracy and reliability of these processings were confirmed by a coherence value of 0.76. On the other hand, the analysis of data from 23 piezometric wells over the 20-year period (2002-2022) shows a worrying pattern of aquifer depletion, leading to a water level drop of over 13 meters in some areas. The conducted zoning identified areas with very severe, severe, moderate, and low decline. However, a very important and key finding was the absence of a direct and simple relationship between the amount of water decline and the intensity of subsidence. Specifically, high and very high subsidence classes (collectively 48.8% of the area's total) occurred predominantly in areas with moderate to low water decline (0 to -3.5 meters). In particular, the very high subsidence class (19.06% of the region) showed its highest concentration within the range of relatively low water decline (0 to -1.5 meters), while areas with very severe water decline (more than -7 meters) had a negligible share in the subsidence phenomenon.

Conclusions

The results of this research indicate that the unexpected pattern of subsidence distribution signifies the determining role of intrinsic local geological and hydrogeological characteristics (such as the thickness, compressibility, and geotechnical properties of fine-grained layers) in the intensity of this phenomenon, such that these factors are much more significant than merely the amount of water level decline. The observation of subsidence in areas with low water decline and its persistence even after water levels stabilize shows that time-dependent phenomena like secondary consolidation and creep in fine-grained layers can cause subsidence to continue. Furthermore, the mismatch between the spatial distribution of subsidence (concentrated in the center and south) and the pattern of water decline (severe in the north) again emphasizes the crucial role of local geological factors. From a management perspective, these findings necessitate adopting an approach based on local characteristics, identifying subsidence hotspots, and implementing management strategies tailored to the conditions of each sub-region. Additionally, continuous and integrated monitoring of this phenomenon by combining remote sensing techniques and ground data is highly recommended for a better understanding of the mechanisms and for assessing the effectiveness of mitigation strategies.



ارزیابی تغییرات فرورنشست زمین در آبخوان دشت ارومیه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR)



فریبا همتی^{۱*}، سارا خنجری^۲، اکرم علیزاده^۳

۱- گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران، F.Hemmati@cfu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، sarageologist21@gmail.com

۳- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، akramalizadeh@gmail.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

این پژوهش با هدف تحلیل تغییرات فرورنشست زمین و بررسی ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت ارومیه، با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR) و داده‌های ماهواره سنتینل-۱ طی دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳، در محیط نرم‌افزار SNAP انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین نرخ فرورنشست در بخش‌های جنوبی محدوده مطالعاتی به میزان حدود ۹ سانتیمتر در سال رخ داده است. در مقابل، در بخش‌های شمالی، پدیده بالآمدگی سطح زمین (فرازنشست) مشاهده گردید.

همزمان، داده‌های هیدروژئولوژیکی ۲۳ چاه پیزومتری طی دوره ۱۳۸۱-۱۴۰۱ نشان‌دهنده افت شدید سطح آب زیرزمینی (بیش از ۱۳ متر) در طی دو دهه گذشته است. نکته برجسته تحقیق، وجود رابطه غیرخطی بین میزان افت آب و شدت فرورنشست است. برخلاف انتظار، بیشترین وسعت فرورنشست در طبقات بالا در محدوده افت متوسط آب (۱.۵- تا ۳.۵- متر) و در طبقات بسیار بالا در محدوده افت کم آب (۰ تا ۱.۵- متر) رخ داده است.

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که شدت فرورنشست زمین لزوماً با میزان برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیم ندارد. برخلاف انتظار، مناطق مرکزی و جنوبی با افت آب متوسط، بیشترین فرورنشست را تجربه کرده‌اند، در حالی که مناطق شمالی با افت آب شدید، فرورنشست ناچیزی داشته‌اند. این الگوی ناهمگون می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی احتمالاً نقش تعیین‌کننده‌تری در توزیع مکانی فرورنشست دارند.

فرورنشست زمین
تداخل‌سنجی تفاضلی
(DInSAR)
نرم‌افزار SNAP
آبخوان دشت ارومیه.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

*نویسنده مسئول: فریبا همتی
رایانامه: F.Hemmati@cfu.ac.ir
ارجاع به این مقاله: همتی، فریبا؛ خنجری، سارا؛ علیزاده؛ اکرم (۱۴۰۵). ارزیابی تغییرات فرورنشست زمین در آبخوان دشت ارومیه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR). هیدروژئومورفولوژی، ۱۳ (۴۶): ۷۲ - ۵۹.

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.67902.1798



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

دشت ارومیه، به عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی در شمال غرب ایران، در دهه‌های اخیر با مسئله فروروشست زمین مواجه شده است. این پدیده ناشی از ترکیب عوامل زمین‌ساختی، زمین‌شناسی و انسانی، به یکی از چالش‌های عمده محیط‌زیستی و اقتصادی منطقه تبدیل شده است. ساختار پیچیده زمین‌ساختی، وجود گسل‌های فعال، رسوبات ریزدانه و آبخوان‌های آبرفتی کم‌عمق، از جمله ویژگی‌های زمین‌شناسی این دشت هستند که آن را مستعد فروروشست کرده‌اند (کریم‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸: ۱). شرایط اقلیمی نیمه‌خشک منطقه، کاهش بارندگی‌های سال‌های اخیر و استمرار خشکسالی، وابستگی به منابع آب زیرزمینی را افزایش داده است. برداشت بی‌رویه از این منابع برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شهری، منجر به افت قابل توجه سطح آب‌های زیرزمینی و ظهور پدیده فروروشست در بخش‌های مختلف دشت شده است. این پدیده علاوه بر آثار ژئوتکنیکی، پیامدهای جدی در تخریب زیرساخت‌ها، کاهش بهره‌وری کشاورزی و ناپایداری زیست‌محیطی به همراه دارد (مقیم و همکاران، ۱۴۰۰: ۷۹۱). اگرچه برخی مطالعات زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و ساختاری در منطقه ارومیه انجام شده است، اما پژوهش‌های محدودی به بررسی فروروشست زمین با استفاده از روش‌های نوین مانند تداخل‌سنجی راداری (InSAR) پرداخته‌اند. به عنوان نمونه، با تحلیل داده‌های چند حسگر ماهواره‌ای و استفاده از روش SBAS، نرخ بیشینه فروروشست در دریاچه ارومیه حدود ۹۰ میلی‌متر در سال گزارش شده که ناشی از کاهش شدید سطح آب دریاچه بوده است. این نتایج می‌تواند به طراحی شبکه‌های ژئودتیکی و برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات احتمالی کمک کند (کریم‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸: ۱). همچنین، بررسی تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی بر کاهش سطح آب دریاچه ارومیه نشان داده است که افزایش دما، کاهش بارش، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و ساخت سدها از مهم‌ترین عوامل کاهش سطح آب و پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی آن هستند (باشیریان و همکاران، ۲۰۲۰: ۱). در تحقیقی که با استفاده از داده‌های Sentinel-1 و تکنیک‌های InSAR انجام شد، فروروشست زمین در نواحی اطراف دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که برخی مناطق با نرخ فروروشست بالای ۱۳.۳ میلی‌متر در ماه مواجه هستند و عواملی همچون بارش، منابع آب زیرزمینی و تغییرات مساحت دریاچه ارومیه بر فروروشست تأثیر دارند. برای پیش‌بینی فروروشست، از مدل‌های یادگیری عمیق مانند MLP، CNN و LSTM استفاده شده و نتایج نشان داد که مدل تجمیعی وزنی از پیش‌بینی‌ها دقت بیشتری نسبت به مدل‌های منفرد دارد (رادمن و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۴۱۳). در مطالعه‌ای که با استفاده از روش SBAS-InSAR و داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1A انجام شد، فروروشست پل دریاچه ارومیه در فاصله زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نرخ فروروشست سالانه بین ۱۰ تا بیش از ۲۱۰ میلی‌متر متغیر است و بیشترین نشست در نواحی مرکزی پل رخ داده است. دقت نتایج با داده‌های GPS تأیید شد (ضمیری‌اقدم و همکاران، ۲۰۲۰: ۹۷). با استفاده از داده‌های InSAR و مدل‌های یادگیری ماشین، نقشه حساسیت فروروشست زمین در حوزه آبخیز بختگان تهیه شد. نتایج نشان داد که عوامل زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها نقش مهم‌تری نسبت به برداشت آب زیرزمینی در بروز فروروشست دارند. مدل جنگل تصادفی بهترین عملکرد را داشته و روش‌های ارائه شده برای نقشه‌برداری حساسیت فروروشست در مناطق خشک و نیمه‌خشک قابل اطمینان است (قره‌چایی و همکاران، ۲۰۲۳: ۱). بررسی روند تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و تحلیل داده‌های ۳۱ ایستگاه پیرومتری در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ نشان داد که تراز آب زیرزمینی در تمامی ایستگاه‌ها روند کاهشی دارد و در بیش از نیمی از ایستگاه‌ها این روند به صورت معنی‌دار است. میانگین کاهش تراز آب زیرزمینی در این دشت حدود ۱۹.۹ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۷). در پژوهشی به بررسی علل کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در آبخوان ارومیه پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و تغییرات دما، از عوامل اصلی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی به شمار می‌روند. این مطالعه همچنین از ترکیب روش‌های تبدیل موجک و آنتروپی برای تحلیل تغییرات استفاده کرده است (افضلی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۷۶). پژوهشی به بررسی خصوصیات تراز-سطح دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مشاهدات زمینی پرداخته است. در این تحقیق، شش مدل پیشنهادی شامل توابع پایه چندجمله‌ای، نمایی، فوریه، گوسین، کسری (گویا) و شبکه عصبی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که مدل تابع کسری بهترین عملکرد را از خود به نمایش گذاشته و قادر است مساحت دریاچه را با خطای RMSE معادل ۵۷.۸ کیلومتر مربع و NSE برابر با ۰.۹۹۵۸ برآورد کند. علاوه بر این، این مدل توانایی تخمین مساحت روزانه

دریاچه را بدون نیاز به مشاهدات فضایی دارد، که این امر می‌تواند به بهبود مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی کمک شایانی نماید (صادقی و همکاران، ۱۴۰۰: ۸۳). در پژوهشی به بررسی تغییرات مورفولوژیکی آبخوان دشت کهرئیز با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر ماهواره‌ای سنتیل بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ پرداخته شده است. این آبخوان در غرب دریاچه ارومیه قرار دارد و دارای لیتولوژی کربناته است. نتایج نشان می‌دهد که در این بازه زمانی هیچگونه فرونشستی در آبخوان مشاهده نشده و میزان بالاآمدگی سطح زمین بین ۰.۳۴ تا ۱.۵۱ متر بوده است. دگرشکلی‌های منطقه ناشی از زلزله و فعالیت‌های تکتونیکی می‌تواند عامل برجستگی‌های قابل توجه در ساختار زمین باشد (جمشیدی ترکمانی مولا و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۷). در مطالعه‌ای که تأثیر سه عامل بارش، جمعیت و تورم بر افت تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه در بازه زمانی ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۸ را بررسی کرده است، نتایج نشان داد که جمعیت و تورم تأثیر بیشتری نسبت به بارش بر افت آبخوان داشته‌اند. مدل‌سازی با رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز این نتایج را تأیید کرد. در نهایت مشخص شد که عوامل اجتماعی-اقتصادی بیش از تغییرات اقلیمی در افت منابع آب زیرزمینی مؤثر بوده‌اند (یوسفی و همکاران، ۱۴۰۲: ۵۵). در پژوهشی که فرونشست زمین در اطراف دریاچه ارومیه را با استفاده از داده‌های ژئودتیک و تداخل‌سنجی راداری مورد بررسی قرار داده، نتایج نشان داد که ۱۳ ناحیه با بیشینه نرخ فرونشست ۱۸.۹ سانتی‌متر در سال شناسایی شده‌اند و حدود ۷۰٪ از مناطق پیرامون دریاچه تحت تأثیر این پدیده قرار دارند. علت اصلی فرونشست، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی اعلام شده است (آمیغ‌پی و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۹۶). پژوهشی در دشت اردبیل با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (تصاویر Sentinel-1A) و الگوریتم چندمعیاره ARAS به بررسی پدیده فرونشست پرداخت. نتایج نشان داد نرخ فرونشست در بازه ۰ تا ۲۲ میلی‌متر قرار دارد که بیشترین تمرکز آن در بخش‌های مرکزی، شرقی و شمال‌شرقی دشت است. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، معیارهای افت سطح آب زیرزمینی، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی و کاربری اراضی به عنوان مهم‌ترین عوامل شناسایی شدند. در نهایت، ۲۶۷.۴۱ کیلومترمربع از منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد و ۴۰۳.۲۱ کیلومترمربع در کلاس خطر زیاد طبقه‌بندی گردید (آقایی و عابدینی، ۱۴۰۲: ۹۴). مطالعه‌ای در استان البرز به بررسی پدیده فرونشست زمین در حریم شهری پنج شهرستان پرداخت. بر اساس نتایج حاصل از پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳، نرخ فرونشست در محدوده ۱۵ تا ۳۲۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که کانون‌های اصلی آن در بخش‌های شرقی و جنوبی منطقه متمرکز بود. تحلیل‌های چندمعیاره نشان داد عواملی شامل افت سطح آب زیرزمینی، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را در بروز این پدیده داشته‌اند. در نهایت، ۳۱ درصد از منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد و ۲۳ درصد در کلاس خطر زیاد طبقه‌بندی شد (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۳: ۱۳۵). تحقیقات نشان می‌دهد که ارتباط مستقیمی بین افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین در این دشت وجود دارد. تحلیل دقیق این ارتباط با استفاده از داده‌های پیژومتری و فناوری InSAR می‌تواند بینش‌های ارزشمندی درباره بحران‌های زیست‌محیطی موجود فراهم کند.

پژوهش حاضر با تلفیق داده‌های تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳) و پیژومتری، به تحلیل رابطه‌ی علی میان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین، همچون پهنه‌بندی مناطق بحرانی می‌پردازد. تمایزهای بنیادین این مطالعه نسبت به پیشینه در دو محور اصلی است: نخست، کاربرد داده‌های DInSAR و پیژومتری در بازه‌ی زمانی ۲۰ ساله که امکان تحلیل هم‌زمان مکانی-زمانی این پدیده را در مقیاس کامل آبخوان دشت ارومیه فراهم ساخته و محدودیت‌های روش‌شناختی مطالعات تک‌منبعی-موضعی پیشین (مانند کریم‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸) را برطرف می‌کند. دوم، ارائه‌ی الگویی برای پهنه‌بندی مناطق بحرانی مبتنی بر تلفیق نرخ‌های فرونشست، افت سطح آب و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی است که گامی فراتر از رویکردهای صرفاً شناسایی‌محور (نظیر آمیغ‌پی و همکاران، ۱۴۰۲) برداشته و زیرساختی برای مدیریت ریسک فضا‌محور ایجاد می‌کند.

پژوهش حاضر به دنبال پاسخ‌گویی به سؤالات زیر است:

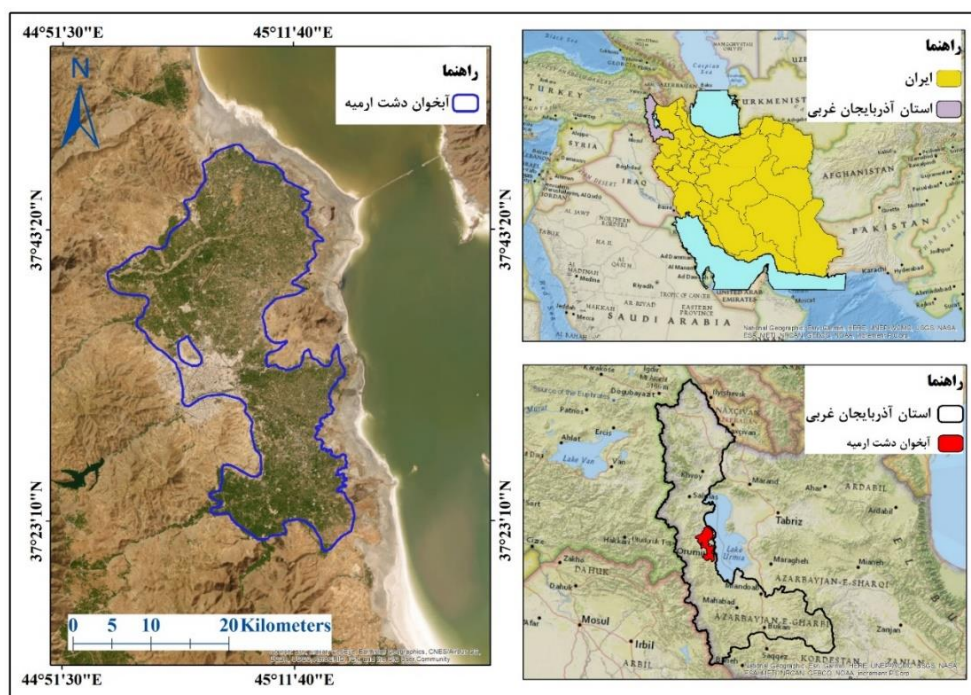
- الگوی مکانی و زمانی فرونشست زمین در آبخوان دشت ارومیه در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ چگونه است؟
- چه رابطه‌ای میان افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین در این منطقه وجود دارد؟
- کدام نواحی از آبخوان دشت ارومیه به‌عنوان مناطق بحرانی از نظر فرونشست قابل شناسایی هستند و چه ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی دارند؟

مواد و روش

آبخوان دشت ارومیه در شمال غرب ایران، در استان آذربایجان غربی و بین طول‌های جغرافیایی $44^{\circ} 52'$ تا $44^{\circ} 15'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 18'$ تا $37^{\circ} 45'$ شمالی واقع شده است. این آبخوان با مساحتی معادل 749 کیلومتر مربع، شامل 352 سکونتگاه روستایی است (شکل ۱). ارتفاع متوسط دشت از سطح دریا 1381 متر می‌باشد و توسط رشته‌کوه‌های مختلف احاطه شده است. ویژگی‌های زمین‌شناسی، از جمله رسوبات ریزدانه و ساختارهای گسلی فعال، این دشت را به منطقه‌ای مستعد فرانشست تبدیل کرده‌اند. اقلیم این منطقه نیمه‌خشک بوده و بارش‌ها عمدتاً از مهر تا خرداد رخ می‌دهند. منابع آب سطحی عمدتاً از چهار رودخانه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای تأمین می‌شود که مجموع تخلیه سالانه آن‌ها حدود 830 میلیون مترمکعب برآورد می‌گردد. در دشت ارومیه، دو نوع سفره آب زیرزمینی وجود دارد: سفره آزاد و سفره تحت فشار. سفره آزاد، با مساحتی معادل 764 کیلومتر مربع، عمده‌ای از منابع آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. در حال حاضر، حدود 18803 حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق، 46 دهنه چشمه رشته قنات به تأمین منابع آب زیرزمینی منطقه کمک می‌کنند. جریان آب زیرزمینی عمدتاً از غرب به شرق است (نورمند و بخش ۴۹ و

همکاران، ۱۳۹۲: ۱). دشت ارومیه به عنوان یک قطب کشاورزی مهم، محصولات اصلی خود را شامل سیب، انگور، گردو و چغندر قند تولید می‌کند. این محصولات عمدتاً به سیستم‌های آبیاری پرمصرف وابسته هستند و بیش از 80 درصد آب مورد نیاز کشاورزی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق تأمین می‌شود.

محدودیت‌های اصلی زمین‌های کشاورزی در این دشت شامل بالا بودن سطح آب زیرزمینی و مشکلات زهکشی است. مساحت اراضی زیر کشت آبی و باغی در سال 1389 معادل 4620 کیلومتر مربع و در سال 1392 حدود 4680 کیلومتر مربع گزارش شده است (یونس‌زاده جلیلی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۵). تغییرات قابل توجهی در کاربری اراضی، از جمله تبدیل اراضی مرتعی به کشاورزی و گسترش اراضی شهری، مشاهده شده است.



شکل (۱): موقعیت آبخوان دشت ارومیه با توجه به حوضه‌های آبریز کشور و حوضه آبریز آذربایجان

Figure (1): Location of the Urmia Plain Aquifer within Iran's major watershed basins and the Azerbaijan Watershed Basin

در این پژوهش، تغییرات سطح زمین در آبخوان دشت ارومیه با استفاده از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 و به‌کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR) مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج حاصل، داده‌های مربوط به سطح آب زیرزمینی در دوره زمانی 1381 تا 1401 نیز تحلیل شده‌اند.

(۱) گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها: در گام نخست، داده‌های مورد نیاز از منابع معتبر داخلی و بین‌المللی گردآوری و برای تحلیل‌های بعدی آماده‌سازی شدند. جزئیات این داده‌ها در جدول (۱) زیر ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش

Table (1): Specifications of the data used in the research

نوع داده	شرح	منبع	بازه زمانی/مقیاس/دقت
تصاویر راداری Sentinel-1	تصاویر SLC با پلاریزاسیون VV و مد IW، مورد استفاده در تحلیل DInSAR	سازمان فضایی اروپا ^۱	طول موج ۵.۵۴ سانتی‌متر، بازه ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۲
مدل رقومی ارتفاعی (DEM) SRTM	مدل رقومی ارتفاعی برای حذف اثرات توپوگرافی از اینترفروگرام‌ها	NASA	دقت افقی ۳۰ متر
داده‌های سطح ایستابی	اطلاعات عمق سطح آب زیرزمینی از ۲۳ حلقه چاه در آبخوان دشت ارومیه	سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی	بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱
نقشه‌های زمین‌شناسی	نقشه‌های مورد استفاده برای تفسیر ژئومورفولوژیکی مناطق دچار فرورانش	سازمان زمین‌شناسی	مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، شیت‌های ارومیه، اشنویه، سرو

(۲) پردازش داده‌های راداری: برای آماده‌سازی تصاویر راداری و استخراج اطلاعات موردنیاز جهت تحلیل تغییرات سطح زمین، تصاویر راداری با مشخصات مندرج در جدول (۲) انتخاب و پردازش شدند.

جدول (۲): مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده در تحلیل DInSAR

Table (2): Specifications of the Radar Imagery Used in DInSAR Analysis

پلاریزیشن	حالت مدار	نوع	تاریخ	ماهواره
VV	Descending	SLC	2015/05/02	Sentinel-1A
VV	Descending	SLC	2023/04/26	Sentinel-1A

حذف ناپیوستگی‌های بین قطعات (De-burst): در این مرحله، به‌منظور حذف ناپیوستگی‌ها و آثار مصنوعی (artifacts) موجود در تصاویر SLC (Single Look Complex)، فرآیند De-burst اعمال شد. این ناپیوستگی‌ها معمولاً ناشی از مشکلات در پردازش‌های اولیه یا خطاهای محاسباتی هنگام دریافت داده‌ها هستند. حذف این خطاها نقش بسزایی در ارتقای دقت تحلیل‌های بعدی دارد (فررتی^۲، ۲۰۰۲: ۸).

چندنگاه‌سازی (Multilooking): به‌منظور کاهش نویز و بهبود کیفیت تصاویر، فرآیند Multilooking انجام گرفت. در این روش، با تجمیع چندین خط و پیکسل، وضوح مکانی تصویر به‌صورت جزئی کاهش یافته اما سطح نویز به‌طور قابل‌توجهی پایین آورده می‌شود. این تکنیک برای مطالعات مرتبط با تغییرشکل سطح زمین اهمیت ویژه‌ای دارد (هانسن^۳، ۲۰۰۱: ۸۱).

هم‌ترازسازی هندسی تصاویر (Co-registration): در این مرحله، تصویر پیرو (Post-image) بر اساس داده‌های مدارهای بر روی تصویر مرجع (Reference-image) هم‌تراز شد. دقت این هم‌ترازسازی برای تحلیل‌های مبتنی بر تغییرات سطح زمین حیاتی است، چرا که هرگونه عدم‌انطباق می‌تواند منجر به خطای چشمگیر در نتایج نهایی شود (ماسونت و فیگل^۴، ۱۹۹۸: ۲۵۴).

(۳) تولید اینترفروگرام: برای تحلیل تغییرات سطح زمین، اینترفروگرام اولیه از طریق استفاده از داده‌های دو تصویر راداری تولید شد. این فرآیند بر اساس اختلاف فاز بین دو تصویر مرجع و پیرو انجام می‌گیرد و این امکان را فراهم می‌کند تا تغییرات سطح زمین شبیه‌سازی و مدل‌سازی شوند. فاز اینترفروگرام به‌طور ریاضی به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

¹ ESA, SciHub.

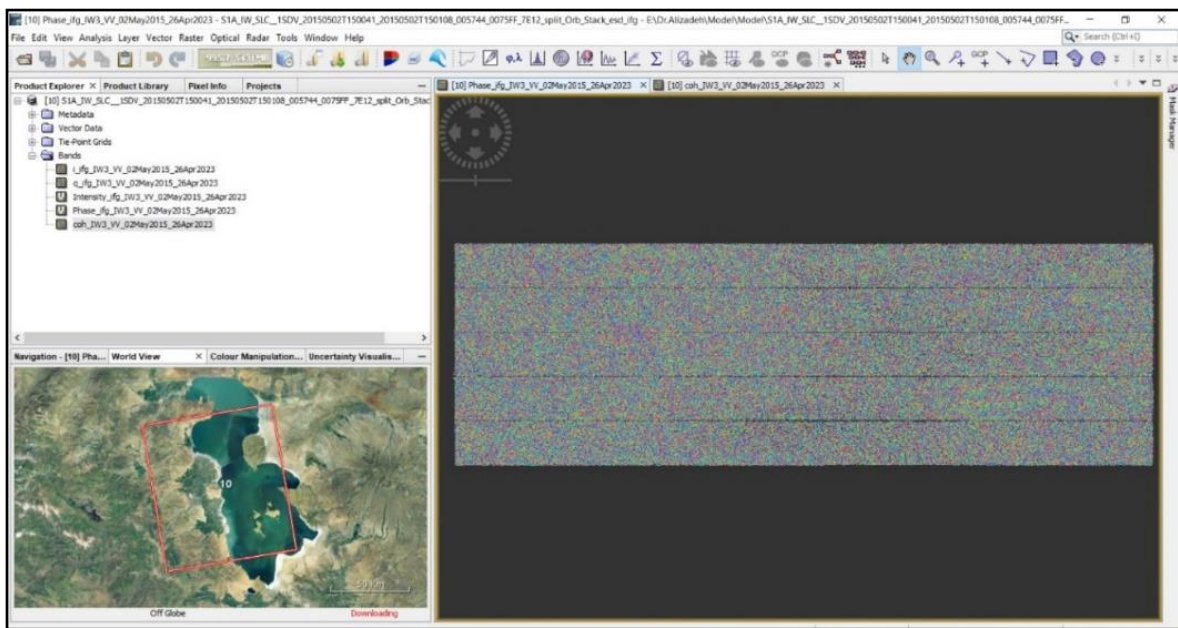
² Ferretti et al.

³ Hanssen.

⁴ Massonnet & Feigl.

$$\Delta\emptyset = \emptyset_{atm} + \emptyset_{Topo} + \emptyset_{Defo} + \emptyset_{orb} \quad (1)$$

که \emptyset_{atm} اثرات ناشی از جو یا اتمسفری، \emptyset_{Topo} اثرات ناشی از توپوگرافی سطح زمین، \emptyset_{Defo} تغییرات ناشی از جابجایی و تغییرات سطح زمین، مانند فرونشست و \emptyset_{orb} اثرات مربوط به تغییرات مداری ماهواره. در این تحقیق، اثرات اتمسفری با استفاده از مدل سازی فاز میان مدت و تحلیل زمان سری کاهش یافت. این فرآیند با بهره گیری از مدل های ریاضی پیچیده و الگوریتم های خاص انجام شد تا دقت نتایج بهبود یابد و اثرات محیطی و جوی به حداقل برسد (ماسونت و فیگل، ۱۹۹۸: ۴۶۱). در این پژوهش، اینترفروگرام حاصل از پردازش جفت تصاویر ماهواره ای Sentinel-1A که جهت آشکارسازی تغییرات سطحی طراحی شده است، به منظور نمایش فرآیند پردازش داده های راداری در شکل ۲ ارائه گردید.



شکل (۲): اینترفروگرام حاصل از پردازش جفت تصاویر Sentinel-1A در مود IW

Figure (2): Differential SAR Interferogram (DInSAR) derived from Sentinel-1A TOPSAR data in Interferometric Wide swath mode

(۴) حذف اثرات توپوگرافی و بازبازی فاز: برای حذف اثرات توپوگرافی از فاز اینترفروگرام، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر (SRTM) به عنوان مرجع استفاده شد (ناسا، ۲۰۱۵). با استفاده از این مدل، مؤلفه فاز مرتبط با توپوگرافی سطح زمین (\emptyset_{Topo}) از سیگنال کل حذف گردید. این مرحله برای جداسازی سیگنال های مرتبط با تغییر شکل زمین ضروری است و از جمله مراحل کلیدی در تحلیل تغییرات سطح زمین محسوب می شود (فار و همکاران، ۲۰۰۷: ۱). در مرحله بعد، عملیات Unwrapping "فاز" انجام شد تا داده های فاز پیچیده به مقادیر پیوسته تبدیل شوند. این فرآیند با استفاده از الگوریتم های موجود در نرم افزار SNAP صورت گرفت. عملیات Unwrapping فاز برای بازبازی فاز واقعی تغییر شکل (\emptyset_{Defo}) ضروری است و به عنوان اولین گام در استخراج نرخ جابجایی سطح زمین به کار می رود (غلیا، ۲، ۱۹۹۸: ۲۹).

(۵) ارزیابی نتایج: به منظور ارزیابی صحت نتایج حاصل از تحلیل DInSAR، از داده های مربوط به افت تراز آب زیرزمینی در منطقه مطالعه شده بهره گیری شد. این داده ها از سوی سازمان آب منطقه ای آذربایجان غربی و برای بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ گردآوری شده اند.

¹ Farr et al.

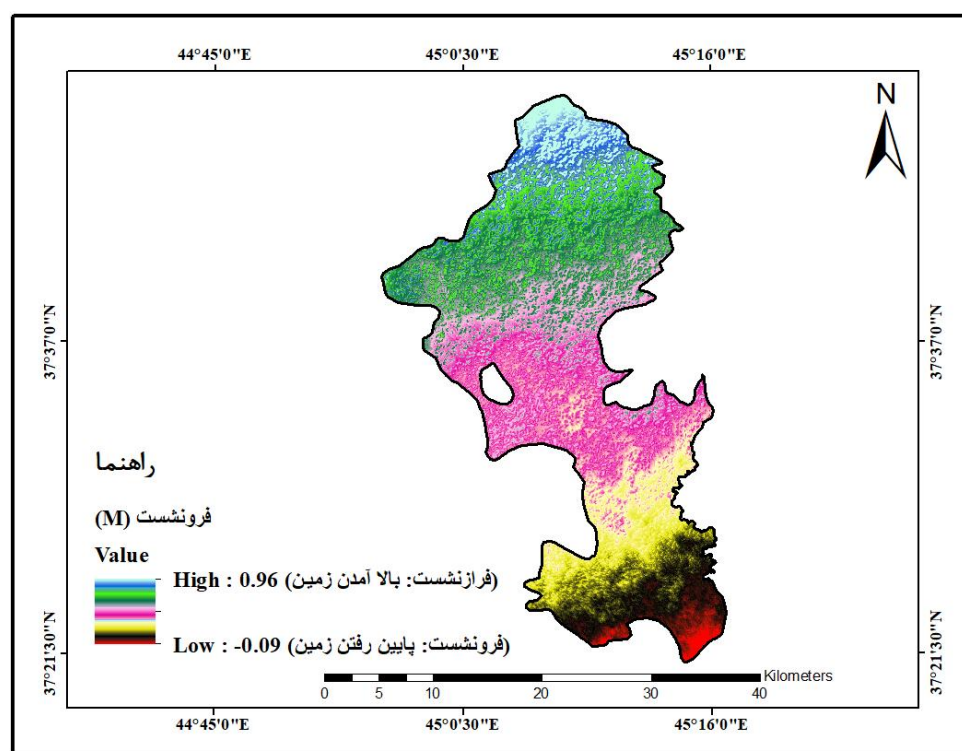
² Ghiglia.

به منظور تحلیل فضایی تغییرات سطح آب زیرزمینی، ابتدا نقشه‌های سالانه افت تراز آب با استفاده از روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله (IDW) در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4 تولید گردیدند. سپس با تطبیق مکانی و زمانی نقشه‌های فرونشست استخراج‌شده از DInSAR با نقشه‌های تغییرات سطح آب، هم‌پوشانی مکانی بین نواحی با بیشترین میزان فرونشست و بیشینه افت سطح آب زیرزمینی بررسی شد.

یافته‌ها و بحث

در این پژوهش، برای بررسی تغییرات فرونشست در آبخوان دشت ارومیه، از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 بهره گرفته شد. دو تصویر SLC با تاریخ‌های ۲ مه ۲۰۱۵ و ۲۶ آوریل ۲۰۲۳ از مسیر نزولی و نوار IW3 ماهواره Sentinel-1A که پوشش مناسبی برای منطقه مورد نظر دارد، انتخاب گردید. انتخاب این مسیر تصویربرداری با هدف افزایش دقت مکانی و به حداقل رساندن خطاهای هندسی و فیزیکی در پردازش‌های بعدی انجام شد.

نتایج حاصل از تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR) و پردازش دو تصویر مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ نشان داد که میزان تغییرات تجمعی سطح زمین در بازه زمانی ۸ ساله، حاکی از نرخ قابل توجهی از فرونشست در محدوده مطالعاتی است (شکل ۳). دامنه تغییرات مکانی این پدیده از ۰.۹۶ متر تا -۰.۰۹ متر در نوسان است. مقدار بحرانی فرونشست حداکثر (-۰.۰۹ متر) که عمدتاً در بخش‌های جنوبی محدوده متمرکز شده است. به منظور ارزیابی دقت مدل تداخل‌سنجی، از نقشه همبستگی (Coherence Map) تولیدشده در فرآیند DInSAR استفاده شد. مقدار همبستگی در مناطقی که جابجایی در حدود -۰.۰۷ متر گزارش شده بود، معادل ۰.۷۶ برآورد گردید که نشان‌دهنده دقت مناسب پردازش‌ها و صحت‌سنجی قابل‌اعتماد نتایج استخراج‌شده می‌باشد.

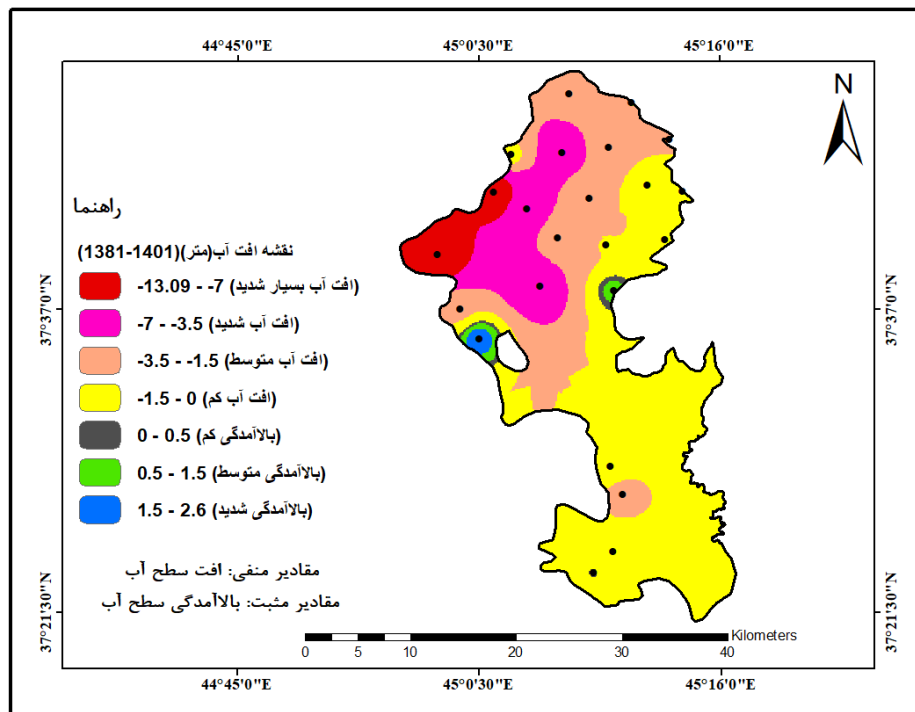


شکل (۳): میزان فرونشست زمین بر حسب متر با استفاده روش تداخل‌سنجی تفاضلی

Figure (3): Land Subsidence Magnitude (m) Derived Using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR)

در ادامه پژوهش، به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت ارومیه، نقشه‌های افت آب زیر زمینی با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از ۲۳ حلقه چاه پیژومتری، طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، تهیه گردید. داده‌های مورد استفاده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی پایش شده و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد پردازش و تحلیل مکانی قرار گرفتند.

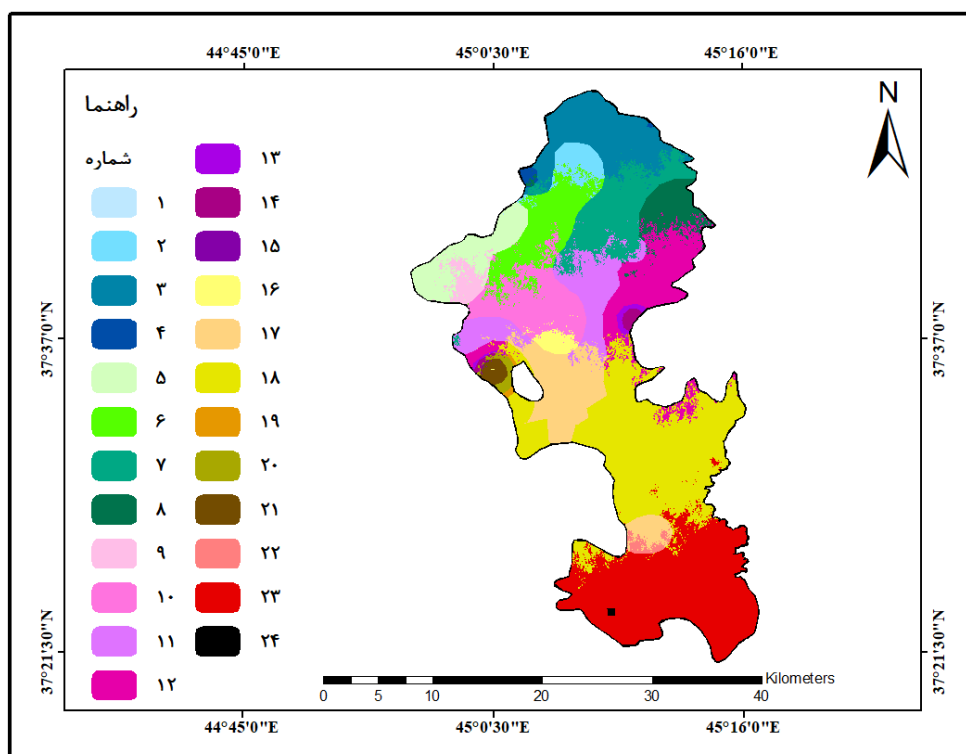
نقشه‌های تولیدشده، روند مکانی-زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی را طی دوره مطالعه به‌وضوح نشان داده و نقش کلیدی در درک دینامیک آبخوان ایفا می‌کنند (شکل ۴). نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی در دوره ۲۰ ساله ۱۳۸۱-۱۴۰۱ الگوی فضایی نگران‌کننده‌ای از تخلیه منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. داده‌های کمی بیانگر آن است که بخش‌های وسیعی از منطقه مورد مطالعه با افت شدید سطح آب مواجه بوده‌اند، به‌طوری‌که در برخی نواحی میزان افت به بیش از ۱۳ متر رسیده است. این میزان افت نه‌تنها از نظر کمی قابل توجه است، بلکه از نظر اکولوژیک و هیدروژئولوژیک نیز پیامدهای عمیقی خواهد داشت. از دیدگاه هیدروژئولوژیک، تغییرات مشاهده‌شده در سه دسته اصلی قابل طبقه‌بندی است: نخست، مناطق با افت بسیار شدید و شدید که نشان‌دهنده بحران شدید در این آبخوان‌ها است. دوم، مناطق با افت متوسط و کم که اگرچه نسبت به دسته اول شرایط بهتری دارند، اما همچنان در وضعیت تنش آبی قرار دارند. سوم، مناطق با بالآمدگی کم تا شدید که درصد کمی از منطقه را پوشش می‌دهند. از جمله پیامدهای این افت سطح آب می‌توان به کاهش ذخیره آبی آبخوان، افزایش هزینه‌های استحصال آب، کاهش کیفیت آب در نتیجه نفوذ آب‌های شور، و احتمال وقوع پدیده فرونشست زمین اشاره کرد. این تغییرات می‌تواند اثرات مستقیمی بر امنیت آبی منطقه، کشاورزی پایدار، و توسعه اقتصادی داشته باشد.



شکل (۴): نقشه تغییرات سطح آب برای سالهای ۱۳۸۱-۱۴۰۱ (بر حسب متر)

Figure (4): Map of water-level changes for the years 2002-2022 (in meters).

نتایج حاصل از تحلیل‌های مکانی که با استفاده از دستور UNION در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد، در شکل ۵ ارائه گردیده است. داده‌های فرونشست زمین در پنج طبقه: بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا دسته‌بندی شدند. تغییرات سطح آب زیرزمینی نیز در هفت بازه مشخص (۱۳.۵- تا -۷ متر، -۷ تا -۳.۵ متر، -۳.۵ تا -۱.۵ متر، -۱.۵ تا -۰.۵ متر، ۰ تا ۰.۵ متر، ۰.۵ تا ۱.۵ متر و ۱.۵ تا ۲.۵ متر) طبقه‌بندی گردید. برای هر ترکیب از طبقه فرونشست و بازه افت آب، مساحت (کیلومتر مربع) و درصد مساحت نسبی محاسبه شد تا امکان ارزیابی کمی از گستردگی و پراکندگی مکانی پدیده فراهم آید (جدول ۳).



شکل (۵): نقشه ارتباط فضایی بین فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی
 Figure (5): Spatial Correlation Map Between Land Subsidence and Groundwater Decline

جدول (۳): اطلاعات آماری نقشه همپوشانی فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی
 Table (3): Statistical Data on the Overlay Map of Land Subsidence and Groundwater Decline

شماره محدوده	میزان فرونشست (M)	میزان افت آب زیرزمینی (M)	درصد مساحت	شماره محدوده	میزان فرونشست (M)	میزان افت آب زیرزمینی (M)	درصد مساحت
۱	بسیار پایین	-۷ - -۱۳.۰۹	۰.۰۶۶	۱۳	متوسط	۰ - ۰.۵	۰.۴۰۰
۲	بسیار پایین	-۳.۵ - -۷	۱۳.۶۶	۱۴	متوسط	۰.۵ - ۱.۵	۰.۴۱۰
۳	بسیار پایین	-۱.۵ - -۳.۵	۵۵.۳۴	۱۵	متوسط	۱.۵ - ۲.۶	۰.۰۳۲
۴	بسیار پایین	-۱.۵ - ۰	۱.۸۶	۱۶	بالا	-۷ - -۱۳.۰۹	۰.۸۷
۵	پایین	-۷ - -۱۳.۰۹	۳۲.۱۸	۱۷	بالا	-۳.۵ - -۷	۷.۱۵
۶	پایین	-۳.۵ - -۷	۴۳.۲۹	۱۸	بالا	-۱.۵ - -۳.۵	۲۰.۵۸
۷	پایین	-۱.۵ - -۳.۵	۵۳.۶۳	۱۹	بالا	-۱.۵ - ۰	۰.۱۵
۸	پایین	-۱.۵ - ۰	۲۲.۴۲	۲۰	بالا	۰ - ۰.۵	۰.۳۹
۹	متوسط	-۷ - -۱۳.۰۹	۹.۴۸	۲۱	بالا	۰.۵ - ۱.۵	۰.۵۵
۱۰	متوسط	-۳.۵ - -۷	۴۵.۲۳	۲۲	بسیار بالا	-۱.۵ - -۳.۵	۰.۵۰
۱۱	متوسط	-۱.۵ - -۳.۵	۴۵.۱۸	۲۳	بسیار بالا	-۰ - ۱.۵	۱۸.۵۰
۱۲	متوسط	-۱.۵ - ۰	۵۳.۶۶	۲۴	بسیار بالا	۰ - ۰.۵	۰.۰۶

با توجه به داده‌های جدول (۳)، طبقات فرونشست بسیار پایین (۹/۵ درصد از مساحت منطقه) و پایین (۲۰/۲۹ درصد از مساحت منطقه) در مجموع ۲۹.۸۰ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص می‌دهند. در طبقه فرونشست بسیار پایین، بیشترین مساحت مربوط به محدوده افت سطح آب زیرزمینی -۱.۵ تا -۳.۵ متر (۵۵.۳۴ کیلومتر مربع، ۷.۴۱ درصد) است. در طبقه فرونشست پایین نیز

بیشترین وسعت در محدوده افت ۱.۵- تا ۳.۵- متر (۵۳.۶۳ کیلومتر مربع، ۷/۱۸ درصد) مشاهده می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه، علی‌رغم افت متوسط سطح آب زیرزمینی، نرخ فرانشست کمتری را تجربه می‌کند. در مقابل، طبقه فرانشست متوسط (۲۱.۴۱ درصد از مساحت منطقه) بیشترین وسعت خود (۵۳.۶۶ کیلومتر مربع، ۱۸.۷ درصد) را در محدوده افت آب ۰ تا ۱.۵- متر دارد.

طبقات فرانشست بالا و بسیار بالا در مجموع ۴۸/۸ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. نکته قابل تأمل، الگوی توزیع فضایی طبقه فرانشست بالا (با پوشش ۲۹.۷۱ درصد از منطقه) است که بیشترین مساحت آن (۱۵۳.۶۵ کیلومتر مربع، معادل ۲۰.۵۸ درصد از کل منطقه) در محدوده افت متوسط سطح آب زیرزمینی (۱.۵- تا ۳.۵- متر) واقع شده است. این یافته از اهمیت علمی بالایی برخوردار است، چرا که نشان می‌دهد وقوع فرانشست شدید لزوماً پیامد مستقیم برداشت بی‌رویه (در افت شدید سطح آب) نیست. اگرچه طبقه فرانشست بسیار بالا (با پوشش ۱۹.۰۶ درصد از منطقه) به طور کلی وسعت کمتری دارد، اما بیشترین تمرکز مکانی آن (۱۳۸.۱۱ کیلومتر مربع، معادل ۱۸.۵۰ درصد از کل منطقه) در محدوده افت نسبتاً کم سطح آب زیرزمینی (۰ تا ۱.۵- متر) مشاهده شده است. این نتیجه‌گیری به طور قوی از این فرضیه پشتیبانی می‌کند که حتی مقادیر نسبتاً کم افت سطح آب می‌تواند در مناطقی با پیش‌زمینه زمین‌شناسی مستعد (از نظر لیتولوژی و ضخامت لایه) به بروز فرانشست بسیار شدید منجر گردد.

این عدم انطباق بین میزان افت سطح آب و شدت فرانشست، که در آن کاهش بیشتر سطح آب همیشه منجر به فرانشست شدیدتر نمی‌شود، لزوم درک عمیق‌تر از مکانیزم‌های مؤثر در این پدیده را آشکار می‌سازد. به نظر می‌رسد که علاوه بر میزان افت آب، عوامل زمین‌شناسی شامل قابلیت فشردگی، ضخامت لایه‌های ریزدانه و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت فرانشست ایفا می‌کنند.

نتایج نشان می‌دهد که پدیده فرانشست در برخی موارد حتی در مناطقی با افت کم سطح آب زیرزمینی (در محدوده ۰ تا ۱.۵- متر) نیز رخ داده است. این مشاهده بیانگر آن است که توقف یا کندی روند افت سطح آب زیرزمینی لزوماً به توقف فرانشست منجر نمی‌شود. تداوم فرانشست در شرایط پایدار نسبی سطح آب زیرزمینی را می‌توان به پدیده‌های وابسته به زمان از جمله تحکیم ثانویه و خزش در لایه‌های خاک ریزدانه نسبت داد. این مکانیزم‌ها باعث می‌شوند فرآیند فرانشست با وجود تثبیت سطح آب زیرزمینی، تا مدتی به صورت تأخیری ادامه یابد.

بر اساس نقشه‌های نهایی، پراکنش فضایی فرانشست و افت سطح آب زیرزمینی از الگوی همگونی تبعیت نمی‌کند. کانون‌های اصلی فرانشست در بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه واقع شده‌اند، در حالی که این مناطق عموماً با مقادیر افت آب متوسط تا کم همراه بوده‌اند. در مقابل، مناطقی با افت آب بسیار شدید در بخش شمالی، سهم ناچیزی در فرانشست زمین داشته‌اند. این عدم تطابق فضایی، گویای نقش کلیدی عوامل زمین‌شناسی محلی از جمله ویژگی‌های لیتولوژیکی (مانند ضخامت و قابلیت فشردگی لایه‌های ریزدانه) است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پراکنش مکانی فرانشست بیش از آنکه تابعی از افت سطح آب باشد، تحت تأثیر ویژگی‌های ذاتی زیرسطحی منطقه است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌طور جامع به بررسی پدیده فرانشست زمین و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت ارومیه پرداخت. یافته‌های تحقیق نشان داد که منطقه با نرخ قابل توجهی از فرانشست زمین مواجه است که بیشترین مقدار آن در بخش‌های جنوبی محدوده مطالعاتی به حدود ۰/۰۹- متر می‌رسد. همزمان، تحلیل داده‌های هیدروژئولوژیکی نشان از افت شدید سطح آب زیرزمینی در طی دو دهه گذشته دارد که در برخی نواحی به بیش از ۱۳ متر رسیده است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین میزان افت سطح آب زیرزمینی و شدت فرانشست زمین وجود ندارد. برخلاف انتظار، بیشترین گستره فرانشست‌های بسیار بالا و بالا (۴۸.۸٪ از منطقه) در مناطقی با افت آب متوسط تا کم (۰ تا ۳.۵- متر) رخ داده است، در حالی که مناطقی با افت آب شدید (بیش از ۱۳- متر) سهم ناچیزی در فرانشست داشته‌اند. این الگو مؤید آن است که مکانیزم‌های

فرونشست بیش از آنکه تحت کنترل مستقیم میزان برداشت از منابع آب باشد، تابعی از شرایط زمین‌شناسی محلی شامل ویژگی‌های لیتولوژیکی، ضخامت لایه‌های ریزدانه و خصوصیات ژئوتکنیکی است.

از دیدگاه مدیریتی، این مطالعه بر ضرورت اتخاذ رویکردی مبتنی بر ویژگی‌های محلی تأکید دارد. شناسایی نقاط کانونی فرونشست و اجرای راهبردهای مدیریتی متناسب با شرایط هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی هر زیرمنطقه، امری ضروری است. ادامه پایش یکپارچه این پدیده با تلفیق تکنیک‌های سنجش از دور و داده‌های زمینی، برای درک بهتر مکانیزم‌های فرونشست و اتخاذ راهکارهای مؤثر کاهش اثرات آن، به شدت توصیه می‌شود.

References

- Afzali, S., Mollaienia, M., komasi, M. & Salkhordeh Haghghi, M. (2021). Studying Causes of Decreasing Groundwater Level (Case Study: Urmia Aquifer). *Irrigation and Water Engineering*, 12(1), 276-294. (in persian)
- Aghayary, L. & Abedini, M. (2023). Investigating and zoning land subsidence using Aras multi-criteria model analysis, case study: Ardabil plain). *Journal of Hydrogeomorphology*, 10(36), 94-112. (in persian).
- Amighpey, M., Arabi, S., Ghoraiyan, F. & Molayi, A. (2023). Investigating the Land Subsidence around Urmia Lake using Geodetic Observations. *Iran-Water Resources Research*, 19(2), 196-206. (in persian).
- Asghari Saraskanroud, S., Esfandyari, F., Faal Naziri, M. & Zeinali, B. (2025). Estimation and evaluation of the risk of land subsidence in the urban boundaries of Savajbalag-Nazarabad-Chaharbagh-Karaj-Ferdis cities. *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(41), 135-161. (in persian).
- Bashirian, F., Rahimi, D., Movahedi, S., & Zakerinejad, R. (2020). Water level instability analysis of Urmia Lake Basin in the northwest of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-14.
- Behmanesh, J., Samadi.R., & Rezaei.H. (2016). Investigation of groundwater level changes trend (Case Study: Urmia plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(4), 67-84. (in persian).
- European Space Agency (ESA). (2022). Sentinel-1 Technical Guide. European Space Agency. Retrieved from <https://scihub.copernicus.eu>.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., & Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45(2), 1-33.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2002). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.
- Geological Survey and Mineral Explorations of Iran (GSI). (2007). 1:100,000-scale geological maps: Urmia, Oshnaviyeh, and Saro sheets. Tehran: Geological Survey of Iran. (in persian)
- Gharechae, H., Samani, A. N., Sigaroodi, S. K., Baloochiyan, A., Moosavi, M. S., Hubbard, J. A., & Sadeghi, S. M. M. (2023). Land subsidence susceptibility mapping using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and machine learning models in a semiarid region of Iran. *Land*, 12(4), 1-20.
- Ghiglia, D. C. (1998). Two-dimensional phase unwrapping: Theory, Algorithms, and Software.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Jamshidi Torkamani Mola, L., Alizadeh, A. & Hemmati, F. (2023). Geology and Evaluating Elevation Change in the Kahrez Plain Aquifer Using Interferometric Radar Techniques. *Journal of Tectonics*, 6(24), 57-68. (in persian)
- Karimzadeh, S., Matsuoka, M., & Ogushi, F. (2018). Spatiotemporal deformation patterns of the Lake Urmia Causeway as characterized by multisensor InSAR analysis. *Scientific Reports*, 8(1), 5357.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.
- Moghim, H., AbbasNovinpour, E. & Morshedi, B. (2021). Investigation of the phenomenon of subsidence due to the decrease of groundwater level in the city of Urmia using the zoning of changes in the distribution of soil layers. *Journal of Ecohydrology*, 8(3), 791-806. (in persian).

- Normand, B., Daneshfaraz, R., & Barikhajasteh, H. (Habib). (2013). Water resources management of Urmia Plain using hydrological and hydrogeological studies. Proceedings of the Second International Conference on Modeling Plant, Water, Soil and Weather, Kerman, Iran, 1-11. (in persian).
- Radman, A., Akhoondzadeh, M., & Hosseiny, B. (2021). Integrating InSAR and deep-learning for modeling and predicting subsidence over the adjacent area of Lake Urmia, Iran. *GIScience & Remote Sensing*, 58(8), 1413-1433.
- Rajabi, A. M., & Ghorbani, E. (2016). Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-7.
- Sadeghi, V., Etemadfard, H. & Naeimi, Y. (2021). Design of water level-surface models for Urmia Lake based on ground and space observations. *Iranian Water Researches Journal*, 15(4), 83-96. (in persian)
- Shahbazi, S., Mousavi, Z., & Rezaei, A. (2022). Constraints on the hydrogeological properties and land subsidence through GNSS and InSAR measurements and well data in Salmas plain, northwest of Urmia Lake, Iran. *Hydrogeology Journal*, 30(2), 533-555.
- Tang, W., Zhao, X., Li, J., Cheng, S., & Xiong, W. Monitoring Land Subsidence in the Fenhe River Basin, Northern China, to Support Hazard Mitigation and Groundwater Management Using Sentinel-1 InSAR Time Series Analysis. Northern China, to Support Hazard Mitigation and Groundwater Management Using Sentinel-1 InSAR Time Series Analysis.
- United States Geological Survey (USGS). (2015). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global Digital Elevation Model. NASA Earth Data via EarthExplorer. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- West Azerbaijan Regional Water Organization. (2023). Groundwater level depth data of Urmia Plain observation wells (2015–2022) [Internal dataset, received as Excel file]. Urmia: West Azerbaijan Regional Water Company. (in persian)
- Youneszadeh Jalili, S., Kamali, M., & Arasteh, P. D. (2017). Analytical study of land use changes (irrigated agriculture) in the watershed of Lake Urmia using Landsat imagery, 20 (78) ,15-28. (in persian)
- Yousefi, K., Dusti Rezaei, M. & Ahmadaali, J. (2024). Sensitivity Analysis of The Urmia Plain Aquifer Level. *Desert Management*, 11(4), 55-70. (in persian)
- Zamiri Aghdam, F., Akhoondzadeh, M., & Dehghani Jabbarlou, M. (2022). Monitoring of Urmia Lake Bridge Subsidence during 2014-2021 Using DInSAR-SBAS Method and GPS Data. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 11(4), 97-105. (in persian).