



University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: <https://ije.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6101

Assessment of Land Subsidence Hazard in the Isfahan–Borkhar Plain Using a Simple Weighting and Factor Optimization through the Analytic Hierarchy Process (AHP)

Rana Azizi ¹, Ali M. Rajabi ²*, Ali Manafiazar ³, Mohammad Sayari ⁴

1. Ms.c Student, Engineering Geology Department, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran; Email: rana.azizi@ut.ac.ir
2. Associate Prof., Engineering Geology Department, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran; Email: amrajabi@ut.ac.ir
3. PhD Candidate, Engineering Geology Department, School of Geology, College of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; Email: ali.manafiazar@modares.ac.ir
4. Ph.D. in Geology, Applied Researches Department, Regional Water Company of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: m.sayari@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 29 June 2025

Revised 10 August 2025

Accepted 10 August 2025

Available online 23 September 2025

Keywords:

Land subsidence,
Isfahan-Borkhar,
Simple Additive Weighted
(SAWF),
Analytic Hierarchy Process
(AHP),
Synthetic Aperture Radar
Interferometry (InSAR).

ABSTRACT

In this study, the potential for land subsidence in the Isfahan-Borkhar plain was assessed using a simple weighted overlay method and the Analytic Hierarchy Process (AHP). Seven influential factors including aquifer lithology, land use, groundwater extraction rate, recharge, aquifer thickness, distance from faults, and groundwater level fluctuations were analyzed. An initial subsidence potential map, with index values ranging from 52 to 162, was produced using ArcGIS. To optimize the weighting and improve consistency with field conditions, the weights of each parameter were determined through the AHP method, resulting in a final subsidence potential map with index values ranging from 57.4 to 170.7. Validation using InSAR satellite data indicated that the correlation between the predicted potential map and actual subsidence was higher for the AHP method (0.62) compared to the simple weighted overlay approach (0.52). According to the proposed model, the central, northern, and southwestern areas of the Isfahan-Borkhar plain exhibit the highest subsidence risk and require the implementation of groundwater management strategies and mitigation measures to reduce the hazards associated with land subsidence.

Cite this article: Azizi, R., Mohammad Rajabi, A., Manafiazar, A., Sayari, M. (2026). Assessment of Land Subsidence Hazard in the Isfahan-Borkhar Plain Using a Simple Weighting and Factor Optimization Through the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Journal of ECOHYDROLOGY*, 13(3), 1404-1432.



<https://doi.org/10.22059/ije.2025.402822.1883>

© Rana Azizi, Ali Mohammad Rajabi, Ali Manafiazar, Mohammad Sayari.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2025.402822.1883>

Abstract

In this study, the potential for land subsidence in the Isfahan-Borkhar plain was assessed using a simple weighted overlay method and the Analytic Hierarchy Process (AHP). Seven influential factors including aquifer lithology, land use, groundwater extraction rate, recharge, aquifer thickness, distance from faults, and groundwater level fluctuations were analyzed. An initial subsidence potential map, with index values ranging from 52 to 162, was produced using ArcGIS. To optimize the weighting and improve consistency with field conditions, the weights of each parameter were determined through the AHP method, resulting in a final subsidence potential map with index values ranging from 57.4 to 170.7. Validation using InSAR satellite data indicated that the correlation between the predicted potential map and actual subsidence was higher for the AHP method (0.62) compared to the simple weighted overlay approach (0.52). According to the proposed model, the central, northern, and southwestern areas of the Isfahan-Borkhar plain exhibit the highest subsidence risk and require the implementation of groundwater management strategies and mitigation measures to reduce the hazards associated with land subsidence.

Introduction

Land subsidence is a gradual downward movement of the Earth's surface, commonly caused by increased effective stress, compaction of fine-grained sediments, and extensive groundwater extraction. In recent decades, it has become a major global concern, while in Iran the problem is intensified by the country's arid climate and long-term overexploitation of aquifers. Subsidence leads to critical environmental and socio-economic impacts, including degradation of groundwater resources, surface fissuring, infrastructure damage, and reduced aquifer storage capacity. Several regions of Iran—such as Isfahan, Tehran, Yazd, Qom, and Semnan—have experienced severe subsidence. The Isfahan–Borkhar plain is particularly vulnerable due to its fine-grained alluvial deposits and significant groundwater-level decline. Understanding the spatial extent and controlling factors of subsidence in this area is essential for planning mitigation strategies and protecting valuable urban and historical assets. Recent assessments widely employ multi-criteria decision-making methods, especially AHP and SAWF, to evaluate subsidence potential. AHP provides a structured framework for weighting influential factors through pairwise comparisons, while InSAR-based techniques enable precise monitoring of ground deformation. Findings indicate that AHP is an effective tool for optimizing parameter weighting in subsidence analysis.

Materials and Methods

This research focuses on assessing land subsidence potential across the Isfahan-Borkhar plain, a region recognized as one of Iran's most vulnerable and rapidly deforming sedimentary basins. To quantify and spatially characterize subsidence susceptibility, two multi-criteria decision-making approaches the Simple Additive Weighting Framework (SAWF) and the Analytic Hierarchy Process (AHP) were applied using seven hydrogeological and geological conditioning factors. These factors were prepared, classified, and assigned weights based on expert evaluations, ensuring that both groundwater-related and geomorphological controls on subsidence were captured. The integrated SAWF model produced a subsidence susceptibility index ranging from 56 to 162, highlighting significant spatial heterogeneity. High-risk zones were concentrated in Gaz-e Borkhar, Dolatabad, Habibabad, and Khorzug, which correspond to areas experiencing intense groundwater extraction and the presence of compressible fine-grained sediments. Moderate-to-high susceptibility appeared in Mahmoudabad, Baharan, Sin,

Amorzidehabad, Gourt, northern Isfahan, and the vicinity of Shahid Beheshti Airport. These areas, although less critical, remain exposed to considerable long-term deformation. Within the AHP framework, expert-constructed pairwise comparison matrices were normalized, and final weights were computed for each thematic layer. After rescaling these weights to a standardized 0–5 numerical system, they were applied to the corresponding raster classes. The resulting AHP-based susceptibility index (57.4–170.7) corroborated the SAWF results while revealing slightly enhanced susceptibility in zones such as Kushk, implying localized hydrogeomechanical sensitivity. To validate the two models, Sentinel-1 InSAR data for the April 2023–April 2024 period were processed to derive vertical deformation rates across the plain. The interferometric map showed maximum subsidence of -0.0928 m, with severe deformation concentrated in Dolatabad, Gaz-e Borkhar, Habibabad, Baharan, Khorzug, northern Isfahan, the southwestern domain of the plain, and eastern sectors of the airport. These hotspots aligned closely with high-susceptibility zones predicted by both SAWF and AHP. Conversely, areas such as Sin, Gourt, Amorzidehabad, and parts of Khomeinishahr exhibited moderate deformation, consistent with their susceptibility classification. A visual and statistical comparison between model outputs and InSAR data demonstrated strong spatial coherence. Correlation coefficients ($R^2 = 0.52$ for SAWF and $R^2 = 0.62$ for AHP) indicate that AHP provides higher predictive accuracy and better represents the complex interplay of geological and hydrological factors governing subsidence. Overall, the study confirms that the AHP model is a more robust and reliable tool for subsidence hazard assessment in the Isfahan–Borkhar plain and underscores the critical need for groundwater management in its most vulnerable zones.

Results and Discussion

The primary objective of this study was to assess land subsidence potential across the Isfahan–Borkhar plain using two multi-criteria evaluation methods: the Simple Additive Weighting Framework (SAWF) and the Analytic Hierarchy Process (AHP). Excessive groundwater exploitation has caused significant declines in the water table, thereby accelerating the likelihood of subsidence in this region. Considering the concentration of valuable historical structures within the metropolitan area of Isfahan, identifying and monitoring subsidence-prone zones is essential for preserving cultural heritage and reducing structural hazards. Within the SAWF method, seven key indicators including aquifer material, land use, groundwater pumping rate, recharge, aquifer thickness, fault proximity, and groundwater-level fluctuations were identified as influential parameters and integrated in the ArcGIS environment. To optimize the weighting of these indicators, the AHP method was applied using expert judgments. A comparison of the two approaches demonstrates that AHP achieves higher accuracy and a stronger correlation with actual subsidence data (62% versus 52%). This difference can be attributed to two main factors. First, the revised weighting of layers in the SAWF method, based on the knowledge of local experts familiar with the hydrogeological characteristics of the plain, improved the realism of the assigned weights. Second, the structured and systematic nature of AHP through pairwise comparisons and the derivation of relative importance values enables a more precise assessment of each parameter's contribution. In contrast, SAWF lacks such structured comparison, and weights are assigned without accounting for interdependencies among factors. As a result, the AHP model better captures the true influence of each layer on subsidence and produces a more reliable susceptibility map. According to the analyses, the highest subsidence potential occurs in the central, northern, and southwestern sectors of the plain. Dolatabad, Gaz-e Borkhar, Habibabad, and Khorzug were identified as the most hazardous zones. Mahmoudabad, Baharan, Sin, Amorzidehabad, Gourt, and the Shahid Beheshti Airport area fall into high-risk

but comparatively lower hazard categories. Portions of Kushk, Shahinshahr, and central Isfahan also exhibit moderate to high susceptibility. A visual comparison of the SAWF and AHP maps with processed satellite-based subsidence results indicates strong spatial agreement, supporting the reliability of the models. Nevertheless, uncertainties related to human-generated groundwater data, outdated information, intrinsic satellite limitations, and model simplifications imply that the resulting maps should be interpreted cautiously, particularly when used for engineering or management decisions.

Author Contributions

All authors participated in the analysis, data interpretation, and manuscript preparation.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

No

Ethical considerations

The authors affirm that the study complies with the journal's ethical standards.

Funding

No funding was received to support this study.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

ارزیابی خطر فرونشست زمین در دشت اصفهان - برخورد با روش وزن دهی ساده و بهینه سازی عوامل با تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

رعنا عزیزی^۱، علی محمد رجبی^۲، علی منافی آذر^۳، محمد سیاری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران، نویسنده اول، رایانامه: rana.azizi@ut.ac.ir
۲. دانشیار، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران، نویسنده دوم، رایانامه: mrajabi@ut.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، نویسنده سوم، رایانامه: ali.manafiazar@modares.ac.ir
۴. دانش آموخته دکتری زمین شناسی، گروه تحقیقات کاربردی، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، اصفهان، ایران، نویسنده چهارم، رایانامه: m.sayari@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

در این مطالعه، پتانسیل فرونشست زمین در دشت اصفهان - برخورد با بهره‌گیری از روش وزن دهی ساده، ارزیابی و با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بهینه شد. به این منظور، هفت شاخص اصلی و مؤثر بر فرونشست زمین که شامل جنس آبخوان، کاربری زمین، میزان پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت و با بهره‌نمی این هفت لایه، نقشه اولیه پتانسیل فرونشست زمین با شاخص بین ۵۲ تا ۱۶۲ در محیط ArcGIS تولید شد. به منظور بهینه‌سازی وزن لایه‌های یادشده و افزایش تطابق با فرونشست واقعی، وزن هر یک از این پارامترها با استفاده از روش AHP تعیین و نقشه نهایی پتانسیل فرونشست با شاخص ۱۷۰/۷-۵۷/۴ تهیه شد. برای صحت‌سنجی نتایج، از داده‌های ماهواره‌ای InSAR استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد میزان همبستگی فرونشست استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای با نقشه پتانسیل در روش وزن دهی ساده برابر با ۰/۵۲ بوده، در حالی که این مقدار در روش AHP به ۰/۶۲ افزایش یافته است. بر اساس مدل ارائه‌شده، نواحی مرکزی، شمال و جنوب غربی دشت اصفهان - برخورد بیشترین پتانسیل فرونشست را دارند و نیازمند اجرای برنامه‌های مدیریتی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی به منظور کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست زمین هستند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

فرونشست،

اصفهان - برخورد،

وزن دهی ساده (SAWF)،

تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)،

تداخل‌سنجی راداری (InSAR).

استناد: عزیزی، رعنا؛ محمد رجبی، علی؛ منافی آذر، علی؛ سیاری، محمد. ارزیابی خطر فرونشست زمین در دشت اصفهان - برخورد با روش وزن دهی ساده و بهینه‌سازی

عوامل با تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). *اکوهیدرولوژی*، ۱۳(۳)، ۱۴۰۴-۱۴۳۲.

<https://doi.org/10.22059/ije.2025.402822.1883>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © رعنا عزیزی، علی محمد رجبی، علی منافی آذر، محمد سیاری.



۱- مقدمه

فرونشست، بر اساس تعاریف بین‌المللی، پدیده‌ای است که طی آن، سطح زمین به صورت تدریجی و رو به پایین حرکت می‌کند یا فرو می‌ریزد. این فرایند می‌تواند در پی تغییر تنش مؤثر در خاک، تراکم و تحکیم رسوبات ریزدانه یا آبخوان نشی^۱ به علت زهکشی، بارگذاری و برداشت‌های زیرسطحی، همچنین بر اثر انحلال مواد زیرزمینی نظیر نمک‌ها و کربنات‌ها، جریان‌های جانبی، فرسایش مکانیکی و فعالیت‌های تکتونیکی رخ دهد و گاه با جابه‌جایی افقی اندکی همراه باشد (پلنڈ، ۱۹۸۴؛ ما^۳ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ترزاقی^۴، ۱۹۲۵؛ گالووی و بوربی^۵، ۲۰۱۱؛ بیتس و جکسون^۶، ۱۹۸۰؛ گالووی^۷ و همکاران، ۲۰۰۸؛ آدیامن^۸، ۲۰۱۲). عامل اصلی بروز پدیده فرونشست، افزایش تقاضا برای منابع آب زیرزمینی است؛ تقاضایی که به طور مستقیم با گسترش شهرنشینی، توسعه صنایع و افزایش فعالیت‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارتباط دارد (گالووی و همکاران، ۱۹۹۹؛ معتق^۹ و همکاران، ۲۰۰۸). پیامدهای فرونشست زمین به طور مستقیم و غیرمستقیم بروز می‌یابند. این پیامدها شامل شوری منابع آب، تخریب سفره‌های زیرزمینی، آسیب به زیرساخت‌ها، ایجاد شکاف‌های سطحی، کاهش ذخیره آبخوان‌ها، تغییر در الگوی آبراهه‌ها، آلودگی محیط، کاهش توان کنترل سیلاب و خسارت به اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی و صنعتی است (امینی و همکاران، ۱۴۰۳؛ عرب‌عامری^{۱۰}، ۲۰۲۰؛ ما، ۲۰۰۶).

در دهه‌های اخیر، فرونشست در سطح بین‌المللی به عنوان یک چالش جدی مطرح شده است (گالووی و همکاران، ۲۰۰۸؛ دینار^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸). پدیده فرونشست در ایران نیز در مقیاس‌های متفاوت رخ داده است. موقعیت اقلیمی خشک و نیمه‌خشک کشور و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی برای مقاصد کشاورزی، این مسئله را به یکی از بحران‌های زیست‌محیطی ایران بدل ساخته است (علیزاده، ۱۳۶۷؛ جهانگیر^{۱۲}، ۲۰۲۰). تا کنون وقوع فرونشست در مناطق متعددی همچون اصفهان (طالبی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲)، تهران (منافی‌آذر و همکاران، ۱۳۹۷-ا؛ منافی‌آذر^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۳؛ طراوت‌روی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۸-ا؛ دهقانی و همکاران، ۲۰۱۳-ا؛ دهقانی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۳-ب)، یزد (آمیغ‌پی و عربی^{۱۶}، ۲۰۱۶)، سمنان (عرب‌عامری، ۲۰۲۰)، اراک (رجبی و قربانی^{۱۷}، ۲۰۱۶)، قم (خداپرست^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۸؛ رجبی، ۲۰۱۸؛ رجبی و همکاران، ۲۰۲۴؛ جعفری^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۵) و خراسان رضوی (رحمتی^{۲۰} و همکاران، ۲۰۱۹) گزارش شده است. مطالعه نرخ فرونشست نقش مهمی در پیش‌بینی، مهار و کنترل پیامدهای آن دارد. افزون بر این، تحلیل عوامل ایجادکننده فرونشست ضروری است تا برای هر منطقه متناسب با شرایط آن، راهکار مناسب ارائه شود (آزرم و همکاران، ۱۴۰۱؛ گالووی و بوربی، ۲۰۱۱).

- 1 Aquitard
- 2 Poland
- 3 Ma
- 4 Terzaghi
- 5 Galloway & Burbey
- 6 Bates & Jackson
- 7 Galloway
- 8 Adiyaman
- 9 Motagh
- 10 Arabameri
- 11 Dinar
- 12 Jahangir
- 13 Manafiazar
- 14 Taravatroy
- 15 Dehghani
- 16 Amighpey & Arabi
- 17 Rajabi & Ghorbani
- 18 Khodaparast
- 19 Jafari
- 20 Rahmati

روش‌های متعددی برای سنجش نرخ فرونشست در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای به کار گرفته می‌شود (گالووی و همکاران، ۱۹۹۹). از رایج‌ترین و مهم‌ترین این روش‌ها، روش وزن‌دهی ساده^۱ است. این روش به عنوان پرکاربردترین روش تصمیم‌گیری چندشاخصه، ساده‌ترین و مستقیم‌ترین شیوه در مواجهه با مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۲) است که اهمیت نسبی هر یک از معیارهای مورد تحقیق را مشخص می‌کند (روشکوفسکی^۳، ۲۰۱۳؛ هوانگ و یون^۴، ۱۹۸۱). در این رویکرد، فرایند تصمیم‌گیری تنها بر پایه ماتریس تصمیم و بردار وزن شاخص‌های ارزیابی انجام می‌گیرد (مصلح‌الدین و گومانتی^۵، ۲۰۱۷؛ مصلح‌الدین^۶ و همکاران، ۲۰۱۷؛ هدایت^۷ و همکاران، ۲۰۱۷؛ منافی‌آذر و همکاران، ۲۰۲۴). روش‌های AHP^۸ (ساعتی^۹، ۱۹۸۰) و SAWF (PCSM^{۱۰}) (ندیری^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸) از جمله روش‌های وزن‌دهی هستند. تا کنون پژوهش‌های متعددی در زمینه به‌کارگیری روش وزن‌دهی ساده در ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین صورت گرفته است (منافی‌آذر و همکاران، ۱۳۹۷-ب؛ مقدم و همکاران، ۱۳۹۹؛ ندیری و همکاران، ۲۰۱۸).

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) که نخستین بار توسط ساعتی در دهه ۱۹۷۰ میلادی معرفی شد، از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به شمار می‌رود. در این روش، یک مسئله پیچیده به سطوح مختلف شامل هدف، معیارها و گزینه‌ها تجزیه شده و روابط میان آن‌ها در قالب یک سلسله‌مراتب سازمان‌دهی می‌شود. سپس با استفاده از مقایسات زوجی، اهمیت نسبی معیارها و گزینه‌ها تعیین و وزن‌دهی می‌شود. این مقایسات به صورت قضاوت‌های کارشناسانه انجام شده و با محاسبه نرخ سازگاری، اعتبار نتایج ارزیابی می‌شود. یکی از مزیت‌های اصلی AHP قابلیت آن در ترکیب داده‌های کمی و کیفی در یک چارچوب یکپارچه است. همچنین، این روش امکان مشارکت ذی‌نفعان مختلف در فرایند تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند و از این‌رو در حوزه‌های مدیریت منابع، برنامه‌ریزی شهری، محیط زیست و مهندسی به طور گسترده به کار گرفته می‌شود. بر اساس این ویژگی‌ها، AHP به عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و انتخاب گزینه‌های بهینه در مسائل پیچیده شناخته می‌شود (ساعتی، ۱۹۸۰).

تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری^{۱۲} (InSAR) از کارآمدترین ابزارها برای تشخیص تغییر شکل‌های سطحی به شمار می‌آیند، زیرا این روش امکان تهیه نقشه‌های دقیق از فرونشست زمین را در مناطق وسیع با وضوح بالایی زمانی و مکانی فراهم می‌کند و از لحاظ محاسباتی، نسبت به روش‌های سنتی مانند GPS^{۱۳} و ترازیابی، کارآمدتر است (لو^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرونو و سارتی^{۱۵}، ۲۰۰۰؛ هونگ^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۲؛ گالووی و همکاران، ۱۹۹۸؛ کروسو^{۱۷} و همکاران، ۲۰۰۲). از میان تکنیک‌های InSAR، تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با دیافراگم مصنوعی^{۱۸} (D-InSAR) یکی از روش‌های رایج است که توانایی بالایی در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین در مقیاس بزرگ دارد (توماس^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۴).

1 Simple Additive Weighting (SAW)

2 Multi Criteria Decision Making

3 Roszkowska

4 Hwang & Yoon

5 Muslihudin & Gumanti

6 Muslihudin

7 Hidayat

۸. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (The Analytic Hierarchy Process)

9 Saaty

10 Point Count System Models

11 Nadiri

12 Interferometric synthetic-aperture radar

۱۳. سیستم موقعیت‌یابی جهانی (Global Positioning System)

14 Luo

15 Fruneau & Sarti

16 Hung

17 Crosetto

18 Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

19 Tomás

شهر اصفهان در بخش مرکزی فلات ایران واقع شده و به عنوان سومین شهر بزرگ و پرجمعیت کشور شناخته می‌شود. رودخانه زاینده‌رود با عبور از این شهر، به شکل‌گیری نهشته‌های کواترنری در منطقه منجر شده است (محمدی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). از نظر زمین‌ساختی، اصفهان در زون ساختاری سندج - سیرجان قرار دارد (آقاناتی^۲، ۲۰۰۴). این شهر دارای اقلیمی خشک است و مقادیر دما و بارش آن تحت تأثیر شرایط توپوگرافی متغیر است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۱۳۹۳). براساس داده‌های ژئوتکنیکی به‌دست‌آمده در مطالعات آمینی و همکاران (۱۴۰۳)، بافت اصلی دشت اصفهان از جنس نهشته‌های ریزدانه و رسی است که ضخامت آن در شمال و شمال غرب این شهر در حال افزایش است. طی دهه‌های اخیر، پدیده فرونشست در اصفهان مشاهده شده و کاهش همراه با نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی، به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر آن گزارش شده است (صداقت^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). از این‌رو مطالعه این پدیده در این شهر از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا امکان حفاظت از بناهای تاریخی متعدد و جلوگیری از گسترش آن به مناطق مسکونی حیاتی را فراهم می‌کند (آزرم و همکاران، ۱۴۰۱).

در این پژوهش، پتانسیل فرونشست دشت اصفهان - برخوار با بهره‌گیری از دو رویکرد وزن‌دهی SAWF و AHP مورد ارزیابی قرار گرفته است. در چارچوب این روش‌ها، هفت لایه اصلی مؤثر بر پدیده فرونشست شامل جنس آبخوان، کاربری زمین، میزان پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و تغییرات سطح آب زیرزمینی لحاظ شد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصل با داده‌های فرونشست استخراج‌شده از تصاویر راداری مقایسه شد. یافته‌ها بیانگر آن است که AHP می‌تواند روش مناسبی برای بهینه‌سازی وزن لایه‌های مؤثر بر فرونشست زمین باشد.

۲- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، دشت اصفهان - برخوار بوده که با مساحتی برابر با ۱۲۴۴ کیلومتر مربع در شمال اصفهان واقع شده است. این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول‌های شرقی ۵۱° ۲۸' تا ۵۱° ۵۷' و عرض‌های شمالی ۳۲° ۳۶' تا ۳۲° ۵۱' واقع شده است. دشت برخوار تقریباً در مرکز ایران، در بخش میانی پهنه ساختاری سندج - سیرجان و در مرکز حوضه آبریز گاوخونی قرار دارد. ترکیب رسوبی این دشت عمدتاً شامل رس، سیلت و رسوبات آبرفتی است که منشأ آن‌ها از کوه‌های پیرامونی (مالمیر و دلبری، ۱۳۹۳؛ آقاناتی، ۲۰۰۴؛ گورابی^۴ و همکاران، ۲۰۲۰) است. این رسوبات پس از حمل و رسوب‌گذاری، در دشت‌های آبرفتی، تراس‌های رودخانه‌ای و دشت‌هایی که بر اثر تغییرات اقلیمی و فرایندهای تکتونیک شکل گرفته‌اند، نهشته شده‌اند (گورابی و همکاران، ۲۰۲۰). دشت‌های آبرفتی عمدتاً در بخش‌های شرقی، شمالی و شمال‌شرقی اصفهان گسترش دارند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۱۳۹۳).

اقلیم منطقه تحت تأثیر فاصله آن از دشت کویر (در شرق و جنوب شرقی) و نواحی کوهستانی (در غرب) بوده و شامل سه تیپ نیمه‌مرطوب سرد، بیابانی و نیمه‌بیابانی است؛ با این حال، در تقسیم‌بندی کلی می‌توان اقلیم آن را خشک دانست (سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۱۳۹۳). واحدهای اصلی زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه (شکل ۱) شامل Qt2 و Qcf متعلق به دوره کواترنر هستند. جدیدترین نهشته‌های جریان آبرفتی (Qcf) در منطقه مورد مطالعه، عمدتاً از خاک رس تشکیل شده‌اند که در مجاورت نهشته‌های قدیمی‌تر (Qt2) شامل رسوبات بادبزی شکل مخروط‌افکنه و تراس دره قرار گرفته‌اند. شکل ۲ موقعیت چاه‌های برداشت و پیژومترها، مدل رقومی ارتفاعی^۵ و گسل‌ها را در دشت مورد مطالعه نشان می‌دهد.

1 Mohammadi

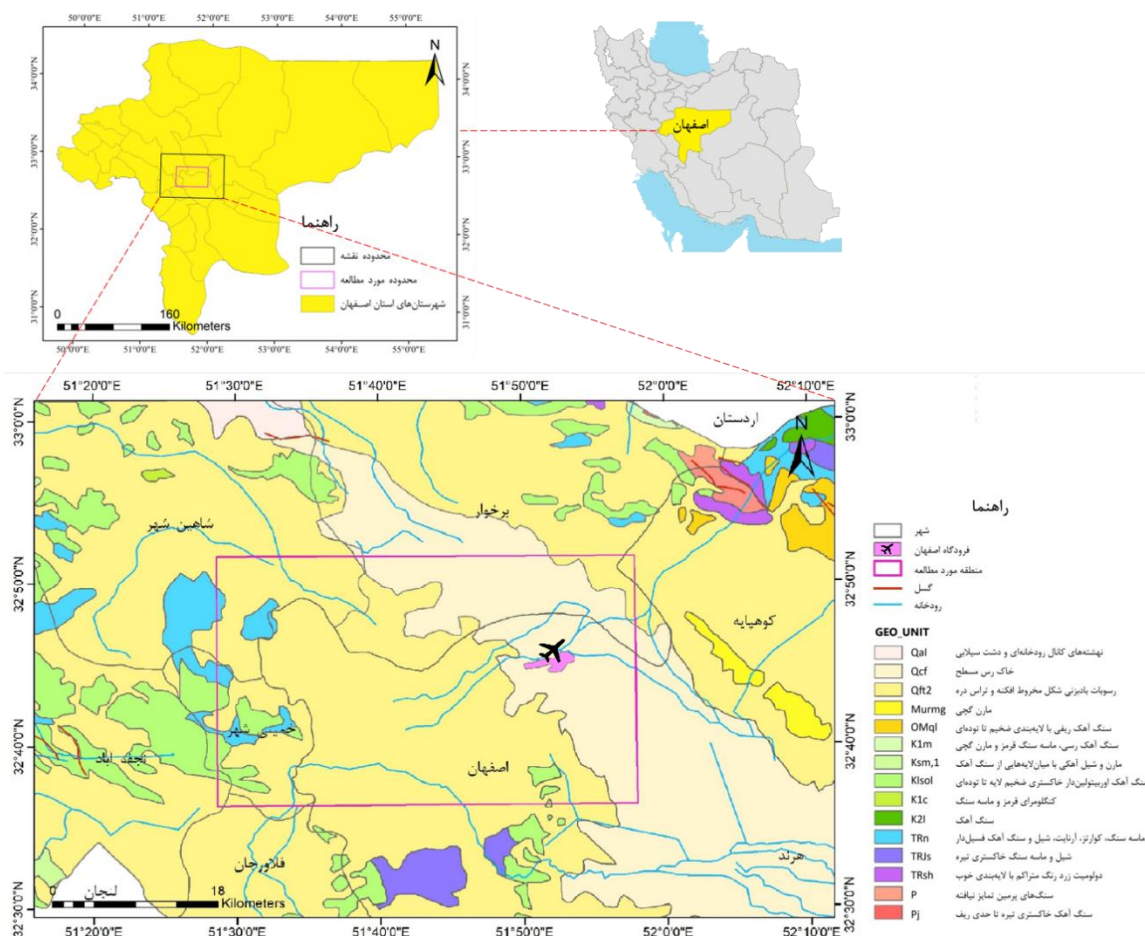
2 Aghanabati

3 Sedaghat

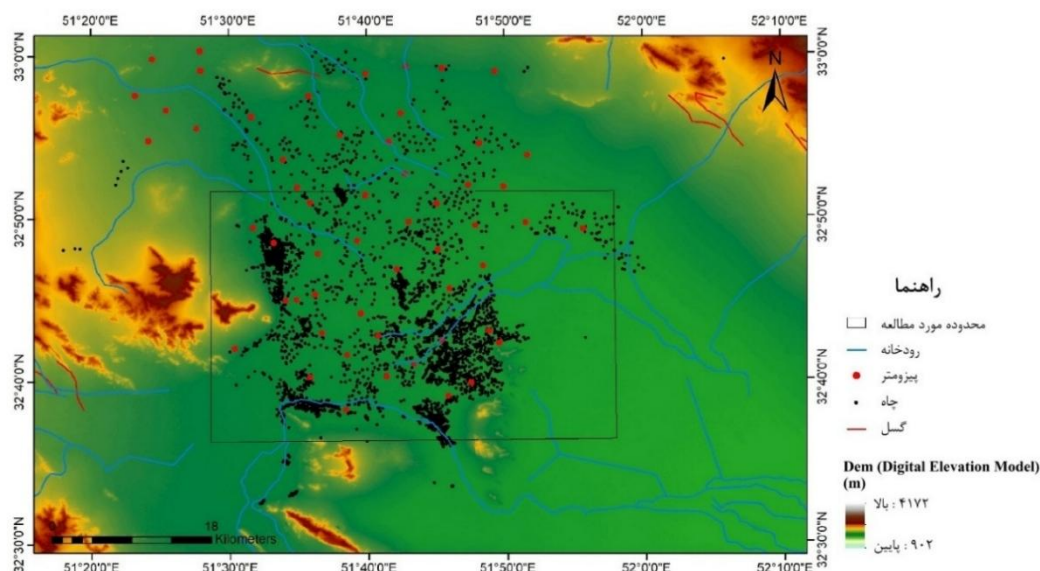
4 Goorabi

5 Digital elevation model (DEM)

رودخانه زاینده‌رود به عنوان بزرگ‌ترین رودخانه فلات مرکزی ایران، با عبور از شهر اصفهان نقش زهکش اصلی منطقه را ایفا می‌کند. با این حال، به دلیل برداشت‌های گسترده در بالادست، احداث سد و تداوم خشکسالی‌های اخیر، جریان این رودخانه به طور کامل خشک شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۱۳۹۳؛ گورابی و همکاران، ۲۰۲۰). خشک شدن زاینده‌رود به کاهش نرخ تغذیه آبخوان منجر شده و این امر، همراه با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی (ژو و همکاران، ۲۰۱۳)، سبب افت سطح ایستابی و کاهش فشار منفذی شده است که در نتیجه، افزایش تنش مؤثر و تشدید فرونشست زمین را در پی دارد (گورابی و همکاران، ۲۰۲۰). بخشی از مسیر این رودخانه از حوضه برخوار اصفهان عبور می‌کند (مالمیر و دلبری، ۱۳۹۳).



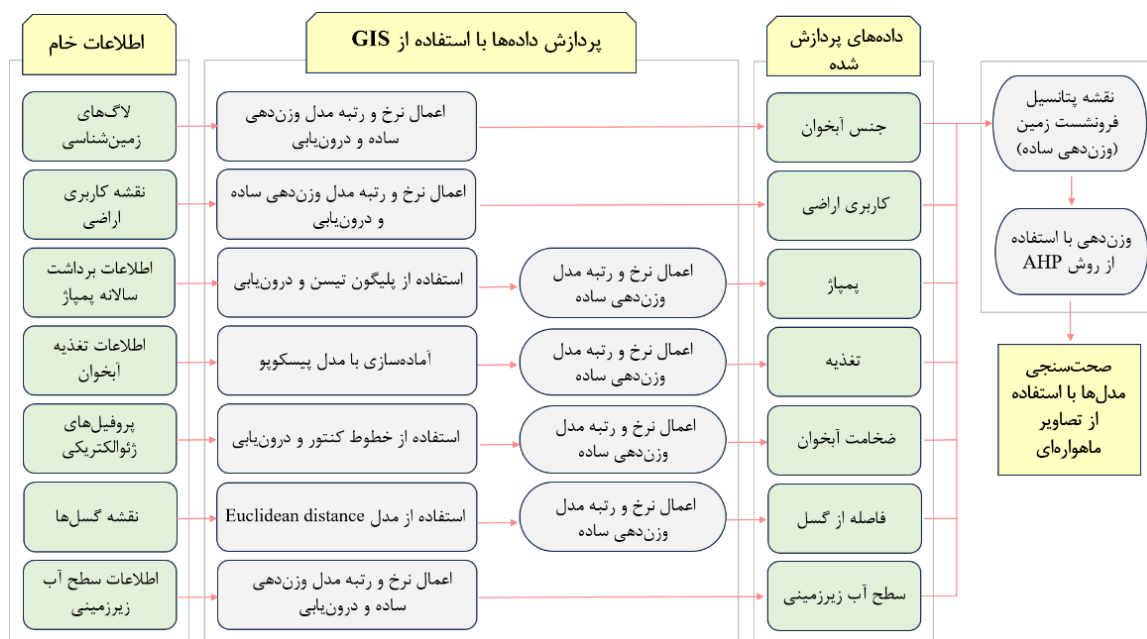
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. موقعیت چاه‌های برداشت و پیزومترها، DEM و گسل‌ها در دشت و محدوده شهری اصفهان - برخوار

۳- روش تحقیق

در این پژوهش به منظور بررسی خطر فرونشست زمین در دشت اصفهان - برخوار از مدل امتیازدهی نقطه‌ای (PCSM) استفاده شد. ابتدا هفت لایه مؤثر بر فرونشست شامل جنس آبخوان، کاربری زمین، میزان پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و تغییرات سطح آب زیرزمینی، شناسایی و با روش وزن‌دهی ساده رتبه‌بندی شدند. سپس این لایه‌ها در محیط ArcGIS با هم ترکیب شده و نقشه اولیه پتانسیل فرونشست تهیه شد. در ادامه، برای دقت بیشتر، وزن لایه‌ها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) اصلاح شده و نقشه نهایی پتانسیل فرونشست به دست آمده است. در پایان، نتایج هر دو روش با نقشه فرونشست حاصل از داده‌های تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) مقایسه شد و براساس ضریب همبستگی به‌دست‌آمده، مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی فرونشست در دشت اصفهان - برخوار انتخاب شد (شکل ۳).



شکل ۳. گام‌های روش تحقیق با استفاده از روش وزن‌دهی ساده و AHP

۳-۱- روش وزن‌دهی ساده (SAWF)

روش SAWF به منظور ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین توسعه یافته است و بر پایه داده‌های متنوعی از جمله اطلاعات زمین‌شناسی، اندازه‌گیری‌های پیرومتری، نتایج آزمایش‌های پمپاژ و نقشه‌های کاربری اراضی عمل می‌کند (ندیری و همکاران، ۲۰۱۸). در ساختار SAWF هفت عامل اصلی شامل محیط آبخوان (A)، کاربری اراضی (L)، میزان پمپاژ (P)، تغذیه آبخوان (R)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله از گسل (F) و افت سطح آب زیرزمینی (T)، به عنوان متغیرهای مؤثر در بروز فرونشست در نظر گرفته می‌شوند (جدول ۱). برای هر یک از این عوامل، بسته به اهمیت آن‌ها در فرایند فرونشست، وزنی بین ۱ تا ۵ اختصاص می‌یابد؛ به گونه‌ای که وزن ۵ بیشترین اثرگذاری و وزن ۱ کمترین نقش را نشان می‌دهد. علاوه بر این، هر عامل به زیرمجموعه‌هایی تفکیک شده و در این سطح جزئی‌تر، تأثیر آن‌ها بر اساس رتبه‌ای بین ۱ تا ۱۰ سنجیده می‌شود (جدول ۲). رتبه‌های بالاتر بیانگر سهم بیشتر آن عامل در وقوع فرونشست هستند. در نهایت، با ترکیب وزن‌ها و رتبه‌های هر عامل، شاخص پتانسیل فرونشست در نقاط مختلف مطابق با رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$SVI = A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + R_r R_w + I_r I_w + F_r F_w + T_r T_w \quad (1)$$

که در آن شاخص پتانسیل فرونشست (SVI) به صورت حاصل ضرب رتبه (r) در وزن (w) هر لایه محاسبه می‌شود. به بیان دیگر، در این شاخص r بیانگر رتبه هر لایه و w نشان‌دهنده وزن اختصاص یافته به آن است (ندیری و همکاران، ۲۰۱۸). شاخص پتانسیل فرونشست زمین بر اساس مدل وزن‌دهی ساده بین ۲۴ و ۲۴۰ است که با توجه به رابطه ۱ و جدول ۲، در صورتی که تمام لایه‌های مؤثر بر فرونشست در رتبه ۱ قرار داشته باشند، شاخص پتانسیل برابر با ۲۴ و اگر تمام لایه‌های مؤثر بر فرونشست در رتبه ۱۰ قرار گیرند این شاخص برابر با ۲۴۰ خواهد بود که با افزایش این عدد از ۲۴ به ۲۴۰، احتمال افزایش خطر و آسیب‌پذیری فرونشست زمین افزایش می‌یابد.

جدول ۱. توضیحات لایه‌های مورد استفاده در روش SAWF و وزن آن‌ها (ندیری و همکاران، ۲۰۱۸)

وزن	توضیحات	لایه‌ها
جنس آبخوان (A)	جنس لایه‌های خاک نقش اساسی در فرونشست زمین دارد. رسوبات ریزدانه مانند سیلت و رس به دلیل نفوذپذیری پایین، خاصیت الاستیک کم و ضریب تحکیم بالا، پس از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، دچار تحکیم برگشت‌ناپذیر می‌شوند که باعث فرونشست زمین می‌شود.	۵
کاربری اراضی (L)	نحوه استفاده از زمین و فعالیت‌های مستقر در آن بر فرونشست اثرگذار است. برای مثال، در مناطق کشاورزی برداشت آب زیرزمینی می‌تواند باعث فرونشست شود، در حالی که در محل سدها، وزن سازه‌ها موجب تراکم خاک و نشست سطح زمین می‌شود.	۴
پمپاژ (P)	برداشت بیش از حد آب زیرزمینی باعث افت سطح آب و کاهش فشار هیدرولیکی می‌شود، که فضای بین ذرات خاک کاهش می‌یابد و فرونشست رخ می‌دهد. به بیان دیگر، افزایش پمپاژ به طور مستقیم پتانسیل فرونشست را افزایش می‌دهد و کاهش آن اثر عکس دارد.	۴
تغذیه (R)	تغذیه به میزان آبی اشاره دارد که از سطح زمین وارد آبخوان می‌شود. وقتی تغذیه کافی باشد، فشار هیدرولیکی افزایش می‌یابد و فاصله بین ذرات خاک بیشتر می‌شود، که این امر تنش مؤثر را کاهش می‌دهد و احتمال فرونشست را کم می‌کند.	۳
ضخامت آبخوان (I)	ضخامت آبخوان با میزان فرونشست رابطه مستقیم دارد. آبخوان‌های ضخیم امکان برداشت آب بیشتری دارند و وزن بیشتری بر رسوبات وارد می‌شود که تغییر شکل خاک را تشدید می‌کند، در حالی که آبخوان‌های کم‌عمق ظرفیت برداشت پایین‌تری دارند و فرونشست کمتری ایجاد می‌کنند.	۲
فاصله از گسل (F)	گسل‌ها با ایجاد حرکت‌های زمین‌شناسی و جابه‌جایی ذرات خاک، می‌توانند فرونشست را تشدید کنند. هرچه یک منطقه به گسل نزدیک‌تر باشد، خطر فرونشست بیشتر است و مناطق دورتر، ریسک کمتری دارند.	۱
میزان افت آب زیرزمینی (T)	کاهش سطح آب زیرزمینی، چه به دلیل برداشت، تبخیر یا خشکسالی، فشار هیدرولیکی را کاهش می‌دهد و تنش مؤثر وارد بر رسوبات را افزایش می‌دهد که در نهایت باعث فرونشست زمین می‌شود.	۵

جدول ۲. محدوده و کلاس لایه‌های SAWF (ندیری و همکاران، ۲۰۱۸)

SVI		SAWF										محیط آبخوان (A)	
سطح آسیب‌پذیری	باند	افت سطح ایستایی (T)	فاصله از گسل (F)	ضخامت آبخوان (I)	تغذیه (R)	پمپاژ (P)	زمین کاربری (L)	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	محدوده
		رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	محدوده
		رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	محدوده
سطح	باند	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	محدوده
آسیب‌پذیری	باند	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	محدوده
۱ (پایین)	۲۴-۷۸	۱	۱۰	۱	۱۰	۱	۱۰	۱	۱۰	۱	۱۰	۱۰	رس
۲ (متوسط)	۷۸-۱۳۲	۲	۸	۲	۲۵-۵۵	۲	۷-۹	۲	۴-۹	۲	۷-۹	۷-۹	سیلت
۳ (زیاد)	۱۳۲-۱۸۶	۳	۶	۳	۵۵-۹۰	۳	۶-۹	۳	۹-۱۴	۳	۶-۹	۶-۹	رسوبات کارستی
		۴	۴	۴	۹۰-۱۳۰	۴	۴-۸	۴	۱۴-۱۹	۴	۴-۸	۴-۸	ماسه
۴ (بسیار زیاد)	۱۸۶-۲۴۰	۵	۲	۵	۱۳۰-۱۷۵	۵	۳-۴	۵	۱۹-۲۴	۵	۳-۴	۳-۴	شن
		۶	۱	۶	۱۷۵-۲۲۵	۶	۱-۳	۶	۲۴-۲۹	۶	۱-۳	۱-۳	سنگ
		۷	> ۵	۷	۲۲۵-۲۸۰	۷	۱	۷	۲۹-۳۴	۷	۱	۱	خاک
		۸	> ۵	۸	۲۸۰-۳۴۰	۸	> ۲۴	۸	۳۴-۳۹	۸	> ۲۴	> ۲۴	آلی
		۹	> ۵/۴	۹	۳۴۰-۴۰۵	۹	> ۴۰۵	۹	۳۹-۴۴	۹	> ۴۰۵	> ۴۰۵	ارگانیک
		۱۰	> ۵/۴	۱۰	> ۴۰۵	۱۰	> ۴۰۵	۱۰	> ۴۰۵	۱۰	> ۴۰۵	> ۴۰۵	ارگانیک

✓ اگر تمام لایه‌ها در رتبه ۱ قرار داشته باشند، شاخص پتانسیل فرونشست (SVI) برابر ۲۴ خواهد شد.

$$SVI = (1 \times 5) + (1 \times 4) + (1 \times 4) + (1 \times 3) + (1 \times 2) + (1 \times 1) + (1 \times 5) = 24$$

✓ اگر تمام لایه‌ها در رتبه ۱۰ قرار داشته باشند شاخص پتانسیل فرونشست (SVI) برابر ۲۴۰ خواهد شد.

$$SVI = (10 \times 5) + (10 \times 4) + (10 \times 4) + (10 \times 3) + (10 \times 2) + (10 \times 1) + (10 \times 5) = 240$$

۳-۲- روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۱

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به عنوان یکی از رویکردهای مهم تصمیم‌گیری چندمعیاره، کاربرد گسترده‌ای در برنامه‌ریزی فضایی، مدیریت محیط و علوم زمین دارد. این روش در دهه ۱۹۷۰ توسط ساعتی معرفی شد و امکان ساختاربندی مسائل پیچیده در قالب سلسله‌مراتب و ترکیب هم‌زمان عوامل کمی و کیفی را فراهم می‌سازد. فرایند AHP شامل تدوین ساختار سلسله‌مراتبی، انجام مقایسات زوجی و نرمال‌سازی آن‌ها، استخراج وزن معیارها و محاسبه نرخ ناسازگاری است (ساعتی، ۱۹۸۰). روش AHP به دلیل ساختار سلسله‌مراتبی و قابلیت تلفیق معیارهای مختلف، در مطالعات متنوعی در محیط GIS به کار گرفته شده است. برای مثال، این روش در پهنه‌بندی خطر سیل نیز مورد استفاده قرار گرفته است (کاکاوند^۲ و همکاران، ۲۰۲۵).

۳-۳- تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) به عنوان ابزاری دقیق و کارآمد برای پایش تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های آهسته سطح زمین شناخته می‌شود. این روش بر اساس تحلیل اختلاف فاز بین دو تصویر راداری تهیه‌شده در زمان‌های متفاوت و از زاویه دید خاص ماهواره عمل می‌کند. با شناسایی پیکسل‌های متناظر در تصاویر و انجام ضرب مختلط، این اختلاف فاز به یک اینترفروگرام تبدیل می‌شود که حاوی اطلاعات جابه‌جایی قائم است. پس از اعمال فیلتر، تصحیح فاز و حذف نویز و اثرات توپوگرافی باقی‌مانده، نقشه جابه‌جایی دقیق با دقت میلی‌متری حاصل می‌شود. این روش امکان پایش گسترده، نمونه‌برداری مکرر و تحلیل تاریخچه تغییرات سطح زمین را فراهم می‌سازد (اکبری، ۱۳۹۱؛ بوگو و وگملر^۳، ۱۹۹۷؛ هوپر^۴ و همکاران، ۲۰۱۲؛ راسپینی^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ گالووی و هافمن^۶، ۲۰۰۷؛ راکولس^۷ و همکاران، ۲۰۰۷).

در این مطالعه، برای انجام تداخل‌سنجی راداری با روش D-InSAR، از نرم‌افزار SARscape استفاده شده است که شامل چند مرحله اصلی است. ابتدا، دو تصویر راداری (Sentinel-1) در بازه زمانی یک‌ساله (فروردین ۱۴۰۲ و فروردین ۱۴۰۳) و در قالب SLC دریافت و تحت پیش‌پردازش اولیه، شامل حذف نویز و تصحیحات هندسی، قرار می‌گیرند. سپس تصاویر به دقت هم‌راستا می‌شوند تا امکان مقایسه پیکسل‌به‌پیکسل فراهم شود. در مرحله بعد، با محاسبه اختلاف فاز بین دو تصویر هم‌راستا، تداخل‌سنج^۸ ساخته می‌شود که بیانگر تغییرات احتمالی سطح زمین است. این فازها به صورت اولیه در بازه 0 تا 2π قرار دارند و برای تفسیر دقیق، از طریق فرایند حذف آثار فاز ثابت^۹ به مقیاس واقعی تبدیل می‌شوند. سپس، اطلاعات فاز به مقادیر جابه‌جایی سطح زمین در راستای خط دید (LOS) یا به صورت عمودی تبدیل می‌شود. در ادامه، اثرات جوی و خطاهای هندسی احتمالی با استفاده از مدل‌های تصحیح فاز^{۱۰} در نرم‌افزار SARscape اصلاح می‌شوند. پس از این مراحل، نتایج به صورت نقشه‌ها و سری‌های زمانی تحلیل و نمایش داده می‌شوند تا الگوهای فرونشست یا تغییر شکل زمین شناسایی شوند. همچنین، برای افزایش دقت، منابع خطا و عدم قطعیت از جمله اثرات جوی و خطاهای هم‌راستایی ارزیابی می‌شوند. در نهایت، با بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی و تحلیل داده‌ها، گزارش جامعی از جابه‌جایی سطح و تغییرات زمانی تهیه می‌شود (شکل ۴).

1 Analytical Hierarchy Process

2 Kakavand

3 Bogaed & Wegmiller

4 Hooper

5 Raspini

6 Galloway & Hoffmann

7 Raucoules

8 Interferogram

9 Phase Unwrapping

10 Phase Correction



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم تداخل‌سنجی (عشقی و کارزونی، ۱۴۰۱)

۴- پردازش اطلاعات

۴-۱- لایه‌های روش وزن‌دهی ساده (SAWF)

برای تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست، داده‌های هر معیار طی فروردین ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳ جمع‌آوری و مطابق جدول ۲ سازمان‌دهی شدند و پس از ورود به محیط ArcGIS به لایه‌های رستری تبدیل شدند تا امکان همپوشانی و تلفیق آن‌ها فراهم شود. داده‌های زمین‌شناسی مربوط به جنس آبخوان از لاگ‌های حفاری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان از سال ۱۳۵۹ تا ۱۳۹۵ استخراج شد، ترکیب رسوبات آبخوان‌ها مشخص و بر اساس جدول ۲ و رابطه ۲ طبقه‌بندی شد، سپس ضخامت هر واحد نسبت به ضخامت کل لاگ محاسبه و با استفاده از روش درونیابی وزنی معکوس (IDW) به کل محدوده مطالعه تعمیم داده شد.

$$(۲) \quad \text{جنس لایه‌های آبخوان} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{رتبه} \times \text{ضخامت لایه})}{\text{ضخامت کل}}$$

به منظور تهیه داده‌های ورودی برای روش وزن‌دهی ساده، اطلاعات هر معیار طی فروردین ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳ جمع‌آوری و بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۲ سازمان‌دهی شد. داده‌های گردآوری‌شده سپس در محیط ArcGIS وارد شدند. برای امکان‌پذیر شدن همپوشانی و ترکیب لایه‌ها، تولید لایه‌های رستری ضروری بود. در این مطالعه، هر لایه با استفاده از منابع اطلاعاتی متنوع آماده‌سازی شد که فرایند آن در ادامه توضیح داده می‌شود:

کاربری زمین: طبقه‌بندی کاربری‌های مؤثر بر فرونشست در جدول ۲ ارائه شده است. در دشت اصفهان - برخوار پنج نوع کاربری اصلی شامل زمین‌های سبز، مناطق مسکونی، فرودگاه، زمین‌های کشاورزی و بایر شناسایی شد. بیشترین نقش در تشدید فرونشست مربوط به زمین‌های کشاورزی است که برداشت مداوم آب زیرزمینی در آن‌ها صورت می‌گیرد، در حالی که زمین‌های بایر کمترین اثر را دارند. داده‌های کاربری زمین با استفاده از تصاویر Google Earth استخراج و مطابق جدول ۲ طبقه‌بندی شد و در ادامه به لایه رستری تبدیل شد. نقشه حاصل در شکل (۵-ب) نمایش داده شده است.

پمپاژ: اطلاعات مربوط به میزان برداشت سالانه آب از چاه‌های بهره‌برداری سازمان آب منطقه‌ای اصفهان دریافت شد. برای محاسبه حجم تخلیه هر پیزومتر، روش پلیگون تیسن^۱ در محیط ArcGIS به کار رفت. سپس داده‌های برداشت با مختصات چاه‌ها تلفیق و با استفاده از روش درونیابی IDW لایه رستری پمپاژ تولید شد. نقشه نهایی در شکل (۵-پ) آمده است.

تغذیه: لایه تغذیه بر اساس روش پیسکوپو^۲ تهیه شد (جدول ۳). در این روش سه معیار اصلی شامل شیب زمین، میزان بارندگی و نفوذپذیری خاک ابتدا به لایه‌های رستری تبدیل و سپس با یکدیگر ترکیب شدند. خروجی این فرایند، لایه تغذیه منطقه بود که پس از طبقه‌بندی بر اساس جدول ۲ در شکل (۵-ت) نمایش داده شده است.

1 Thiessen Polygons

2 Piscopo

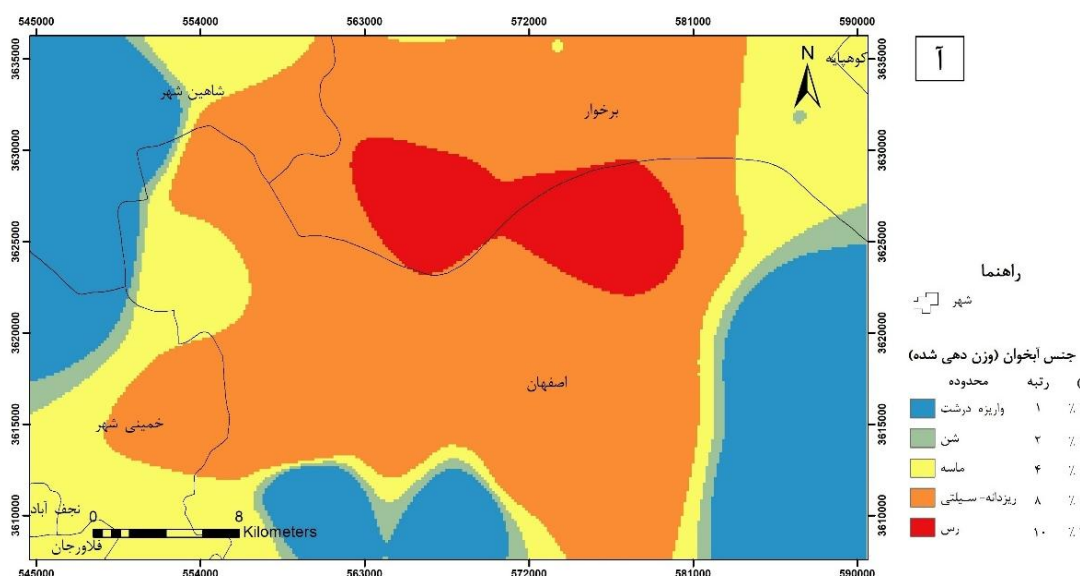
جدول ۳. محدوده و نرخ مربوط به تغذیه بر اساس روش پیسکوپو (پیسکوپو، ۲۰۰۱)

تغذیه		نفوذپذیری		بارش		شیب	
رتبه	نرخ (cm/year)	رتبه	محدوده	رتبه	نرخ (mm)	رتبه	نرخ (%)
۱۰	۱۳-۱۱	۵	زیاد	۴	> ۸۵۰	۴	< ۲
۸	۱۱-۹	۴	متوسط-زیاد	۳	۸۵۰-۷۰۰	۳	۲-۱۰
۵	۹-۷	۳	متوسط	۲	۷۰۰-۵۰۰	۲	۱۰-۳۳
۳	۷-۵	۲	کم	۱	< ۵۰۰	۱	> ۳۳
۱	۵-۳	۱	خیلی کم				

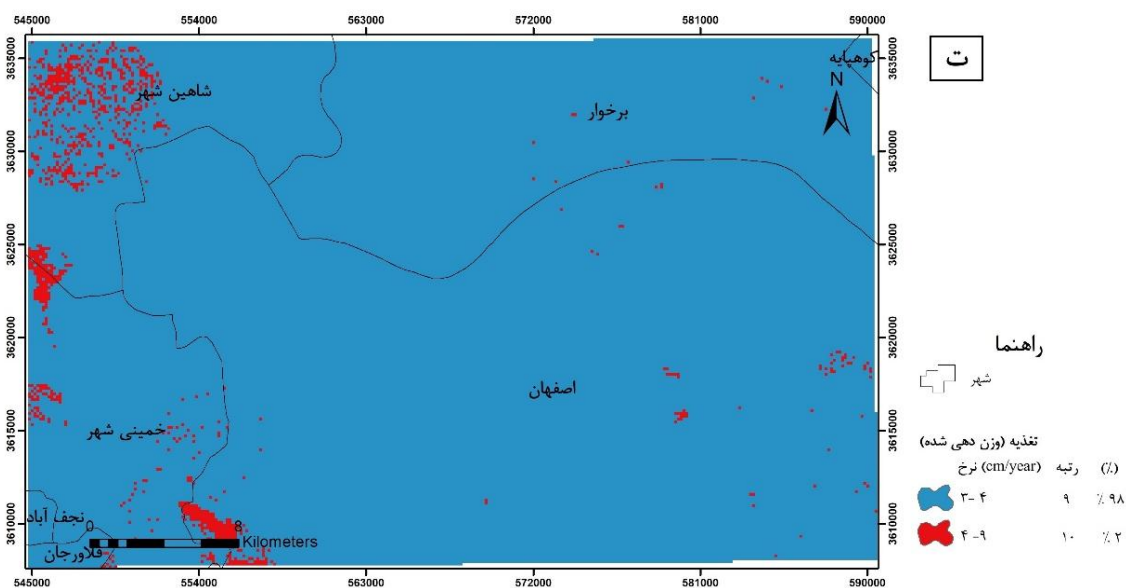
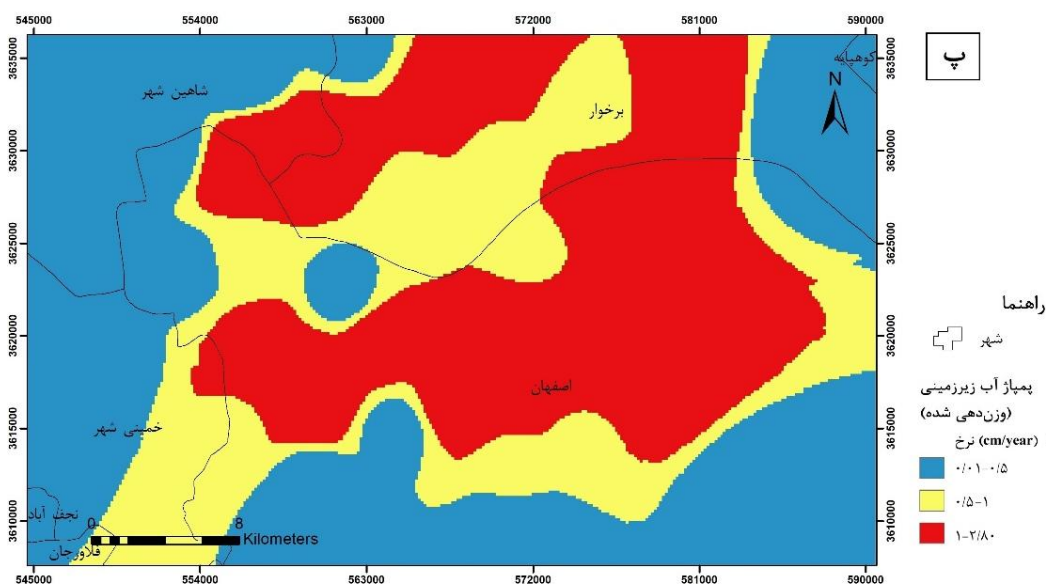
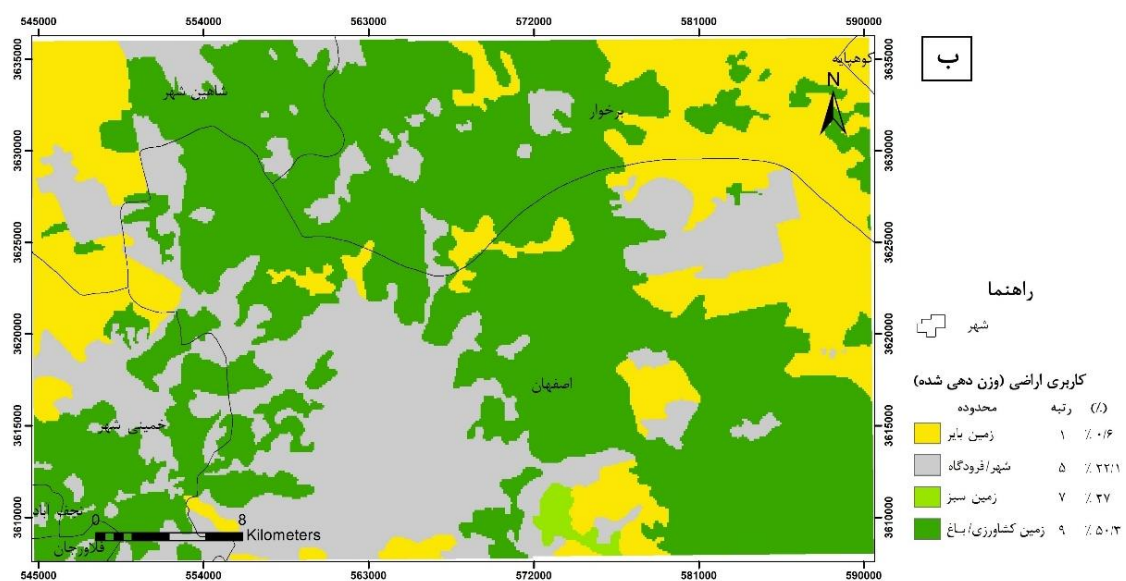
ضخامت آبخوان: تعیین ضخامت زون اشباع با استفاده از داده‌های سنگ کف و سطح ایستابی انجام شد. اطلاعات سنگ کف از گزارش لاگ‌های حفاری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان از سال ۱۳۵۹ تا ۱۳۹۵ استخراج شد. لایه ضخامت آبخوان پس از طبقه‌بندی براساس جدول ۲ به لایه رستری تبدیل شد و در ترکیب با سایر لایه‌ها قرار گرفت. نقشه آن در شکل (۵-ج) نشان داده شده است.

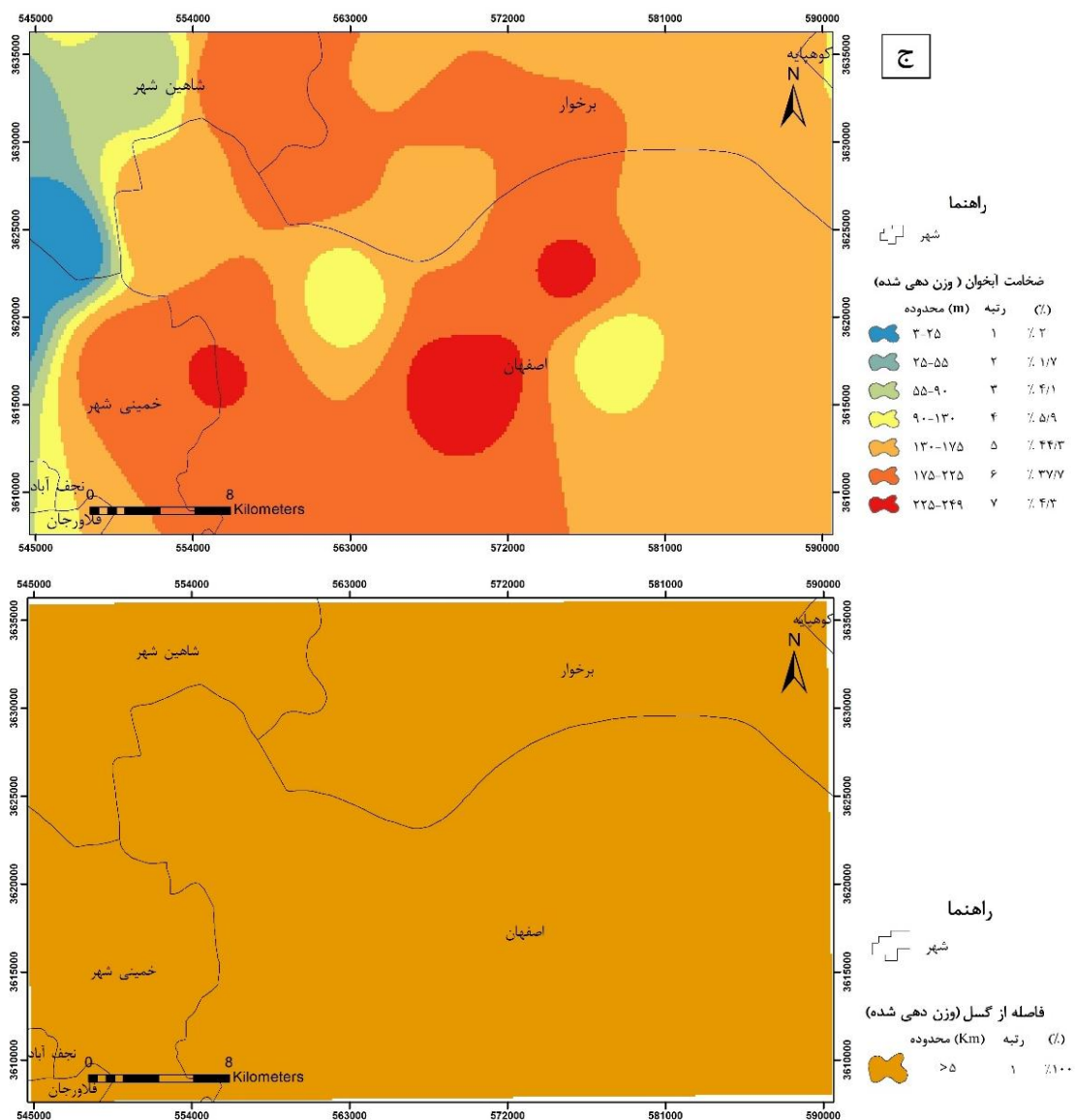
فاصله از گسل: فاصله هر نقطه دشت از گسل‌های منطقه با ابزار فاصله اقلیدسی^۱ در ArcGIS محاسبه شد. لایه حاصل پس از طبقه‌بندی طبق جدول ۲ به رستری تبدیل شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فاصله از گسل‌ها، تأثیر آن‌ها در ایجاد فرونشست کاهش می‌یابد. لایه نهایی در شکل (۵-چ) ارائه شده است.

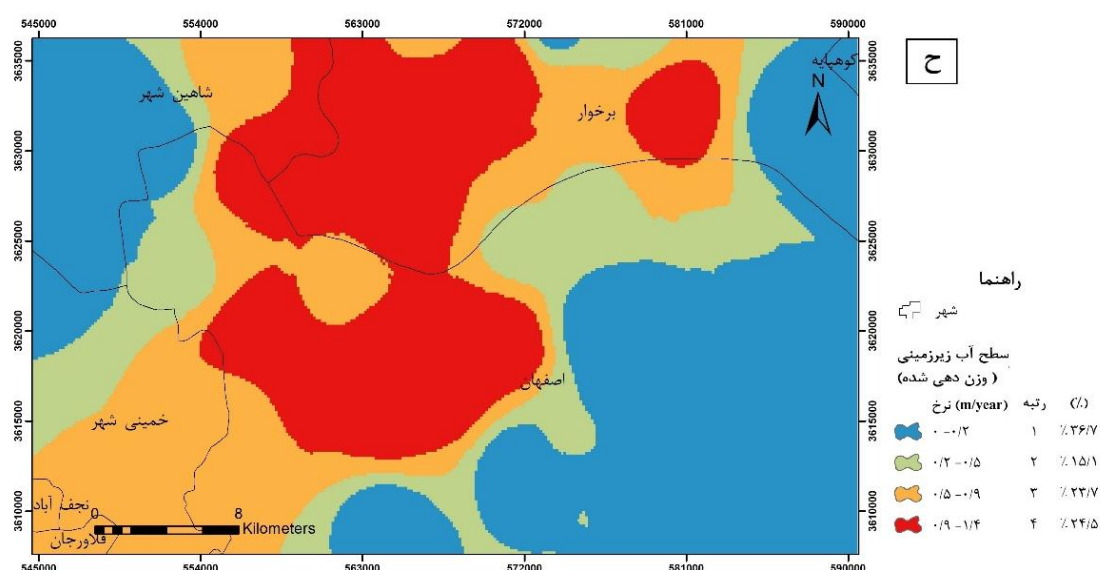
افت سطح آب زیرزمینی: داده‌های مربوط به تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه یک‌ساله (فروردین ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳) از چاه‌های پیژومتری جمع‌آوری و در محیط ArcGIS با روش IDW درون‌یابی شد. خروجی به لایه رستری تبدیل و سپس طبق جدول ۴ طبقه‌بندی شد. نقشه نهایی این معیار در شکل (۵-ح) ارائه شده است.



1 Euclidean Distance







شکل ۵. لایه‌های رستری پردازش شده با روش وزن دهی ساده (SAWF). (آ) جنس آبخوان، (ب) کاربری اراضی، (پ) پمپاژ، (ت) تغذیه، (ج) ضخامت آبخوان، (چ) فاصله از گسل و (ح) سطح آب زیرزمینی

۴-۲- روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

برای تعیین وزن بهینه پارامترهای مؤثر بر پتانسیل فرونشست آبخوان، در این پژوهش از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد که مبتنی بر وزن‌های به‌دست‌آمده در مطالعات هل‌اتائی و همکاران (۱۴۰۴) است. براساس این روش، برای دستیابی به وزن‌های مورد نیاز ابتدا ماتریس مقایسه زوجی تهیه و داده‌ها از طریق آرای جمعی کارشناسان جمع‌آوری شد تا اثرات ناشی از نظرات فردی کاهش یابد. پرسشنامه‌ای طراحی و بین متخصصان توزیع شد تا اهمیت هر پارامتر بر اساس تجربه و دانش آنان ارزیابی شود.

پارامترها ابتدا بر اساس ارزش‌های اختصاص داده‌شده رتبه‌بندی شدند و سپس با استفاده از نرم‌افزار Choice Expert و روش AHP، مقایسه‌ای بین آن‌ها انجام شد تا سهم هر پارامتر در بروز فرونشست مشخص شود. نتایج وارد ماتریس اولیه شده و پس از نرمال‌سازی، ماتریس نرمال ایجاد شد و وزن نسبی هر لایه با روش جمع ستونی محاسبه شد (جدول ۴). برای ارزیابی تخصص و رتبه‌بندی کارشناسان نیز از جدول نرخ خبرگان رنجیس (رنجیس^۱ و همکاران، ۲۰۱۰) استفاده شد که شاخص‌هایی مانند تحصیلات، تجربه کاری، سن و موقعیت سازمانی را شامل می‌شود. پرسشنامه‌ها توسط کارشناسان با ویژگی‌های متنوع تکمیل شد (جدول ۵). حداقل و حداکثر رتبه خبرگان در این مطالعه به ترتیب ۶ و ۱۶ بود، در حالی که طبق جدول رنجیس این مقادیر بین ۴ و ۱۷ قرار دارد و امتیاز هر خبره بر اساس نسبت امتیاز فرد به حداکثر رتبه خبرگان محاسبه شد.

جدول ۳. وزن‌های به‌دست‌آمده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) (هل‌اتائی و همکاران، ۱۴۰۴)

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
0.1743	0.1743	0.1743	0.1743	0.1750	0.1743	0.1750	0.1709	0.1744	0.1743	0.1744	0.1743	0.1729	0.2541	0.1745	0.1611
3414	48916	3414	65805	48029	54425	48029	79141	6129	94946	99179	3414	03533	27126	41016	72882
0.1743	0.1743	0.1741	0.1743	0.1748	0.1745	0.1748	0.1711	0.1739	0.1743	0.1743	0.1741	0.1744	0.1611	0.1741	0.1771
3414	48916	59806	65805	73156	28954	73156	5012	37906	94946	24854	59806	75383	45927	92283	13057
0.1743	0.1743	0.1745	0.1745	0.1748	0.1743	0.1748	0.1744	0.1744	0.1742	0.1743	0.1745	0.1729	0.1609	0.1741	0.1772
3414	48916	08475	40171	73156	54425	73156	73156	6129	20551	24854	08475	03533	84781	92283	9017
0.1743	0.1743	0.1743	0.1741	0.1748	0.1743	0.1748	0.1899	0.1744	0.1742	0.1743	0.1743	0.1729	0.1440	0.1743	0.1769
3414	48916	3414	91439	73156	54425	73156	57825	6129	20551	24854	3414	03533	64458	66649	35944
0.1089	0.1090	0.1089	0.1090	0.1091	0.1089	0.1091	0.1068	0.1089	0.1089	0.1087	0.1089	0.1092	0.1007	0.1088	0.1106
58838	7704	58838	87607	86427	71515	86427	61963	29268	96842	35128	58838	65427	16204	70177	95661
0.0969	0.0966	0.0969	0.0966	0.0970	0.0969	0.0970	0.0949	0.0968	0.0968	0.0968	0.0969	0.0970	0.0895	0.0969	0.0983
49153	66788	49153	76152	54602	6053	54602	88411	26016	86081	47141	49153	27796	25515	67231	96143
0.0967	0.0968	0.0967	0.0967	0.0940	0.0964	0.0940	0.0950	0.0969	0.0968	0.0969	0.0967	0.0970	0.0894	0.0968	0.0983
55448	60509	55448	73022	91473	75727	91473	834	22939	86081	43988	55448	27796	35989	70361	96143

جدول ۴. شاخص و رتبه‌بندی امتیاز خبرگان رنجیس (هلاتائی و همکاران، ۱۴۰۴)

شاخص‌ها	رتبه‌بندی	رتبه	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
تحصیلات	دکتری	۵	✓		✓			✓		✓	✓		✓			✓		
	فوق لیسانس	۴		✓		✓						✓		✓			✓	
	لیسانس	۳					✓		✓									✓
	فوق دیپلم	۲																
	دیپلم	۱																
تجربه	بیش از ۳۰ سال	۴					✓									✓		
	۳۰ تا ۲۰ سال	۳						✓				✓	✓					
	۲۰ تا ۱۰ سال	۲							✓								✓	
	۱۰ تا ۵ سال	۱	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓	✓			✓
	۵ سال																	
سن	بالای ۵۰ سال	۴					✓			✓			✓			✓		
	۵۰ تا ۴۰ سال	۳						✓				✓						
	۴۰ تا ۳۰ سال	۲	✓	✓	✓						✓			✓			✓	
	کمتر از ۳۰ سال	۱							✓						✓			✓
سمت سازمانی	مدیر عامل	۴																
	رئیس / سرپرست	۳						✓					✓			✓		
	کارشناس ارشد	۲		✓						✓				✓			✓	
	کارشناس	۱	✓		✓				✓		✓				✓			✓
جمع			۹	۹	۹	۸	۶	۱۶	۶	۱۳	۱۰	۱۱	۱۵	۹	۷	۱۶	۱۰	۶
رتبه خبرگان			۰/۵۶۲۵	۰/۵۶۲۵	۰/۵۶۲۵	۰/۵۶۲۵	۰/۳۷۵	۱	۰/۳۷۵	۰/۳۷۵	۰/۶۲۵	۰/۶۸۷۵	۰/۹۳۷۵	۰/۵۶۲۵	۰/۴۳۷۵	۱	۰/۶۲۵	۰/۳۷۵

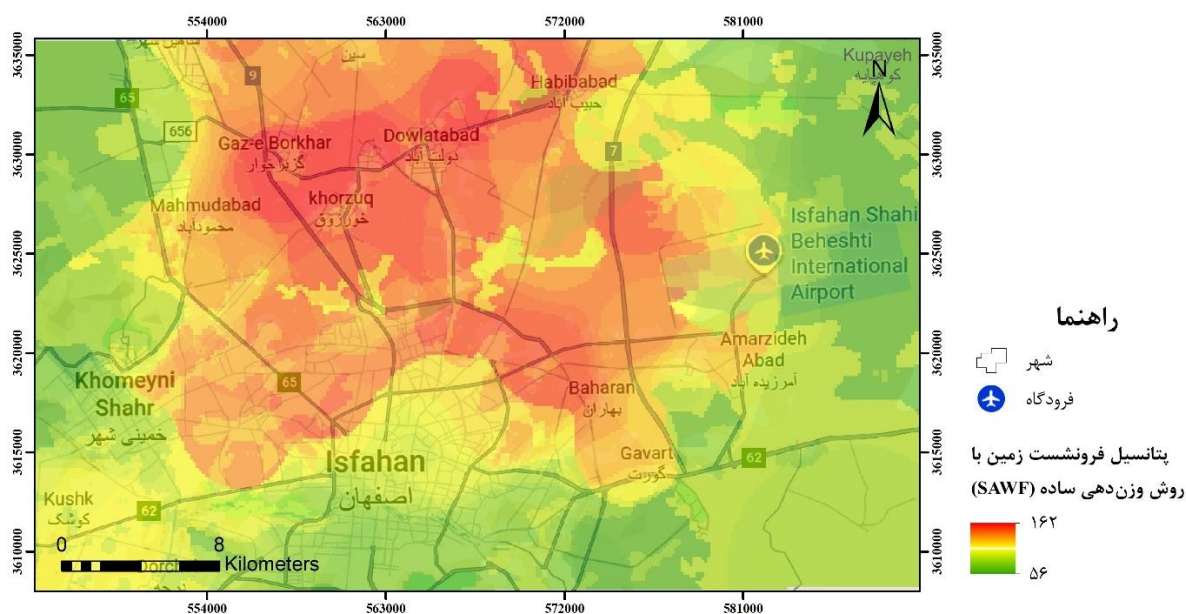
۵- بحث و نتایج

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی پتانسیل فرونشست در دشت و محدوده شهری اصفهان - برخوار، به عنوان یکی از دشتهای مهم کشور (و با نرخ بالای فرونشست)، با بهره‌گیری از روش‌های وزن‌دهی ساده و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است.

۵-۱- نتایج روش وزن‌دهی ساده (SAWF)

پس از تهیه و آماده‌سازی هفت لایه مؤثر بر فرونشست و طبقه‌بندی آن‌ها مطابق جدول ۲، لایه‌ها بر اساس وزن اختصاص‌یافته به هر یک (جدول ۱) تلفیق شدند. در نهایت، نقشه پتانسیل فرونشست دشت اصفهان - برخوار تولید شد و شاخص پتانسیل فرونشست در کل دشت در بازه ۵۶ تا ۱۶۲ برآورد شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مطابق شکل ۶ پرخطرترین نواحی از نظر پتانسیل فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه، شامل بخش گز برخوار، دولت‌آباد، حبیب‌آباد و خورزوق هستند. این مناطق که روی نقشه با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، بیانگر نواحی با بیشترین میزان خطر فرونشست هستند. در مقابل، مناطقی نظیر محمودآباد، بهاران، سین، آمرزیده‌آباد، گورت، فرودگاه شهید بهشتی اصفهان و نواحی مسکونی شمال شهر اصفهان در محدوده‌هایی با پتانسیل بالای فرونشست اما خطر نسبی کمتر قرار دارند؛ این نواحی عمدتاً با رنگ نارنجی یا زرد نمایش داده

شده‌اند. در بخش‌هایی مانند کوشک، شاهین‌شهر و مناطق مرکزی‌تر شهر اصفهان، پتانسیل فرونشست در سطح متوسط تا نسبتاً بالا برآورد شده است.



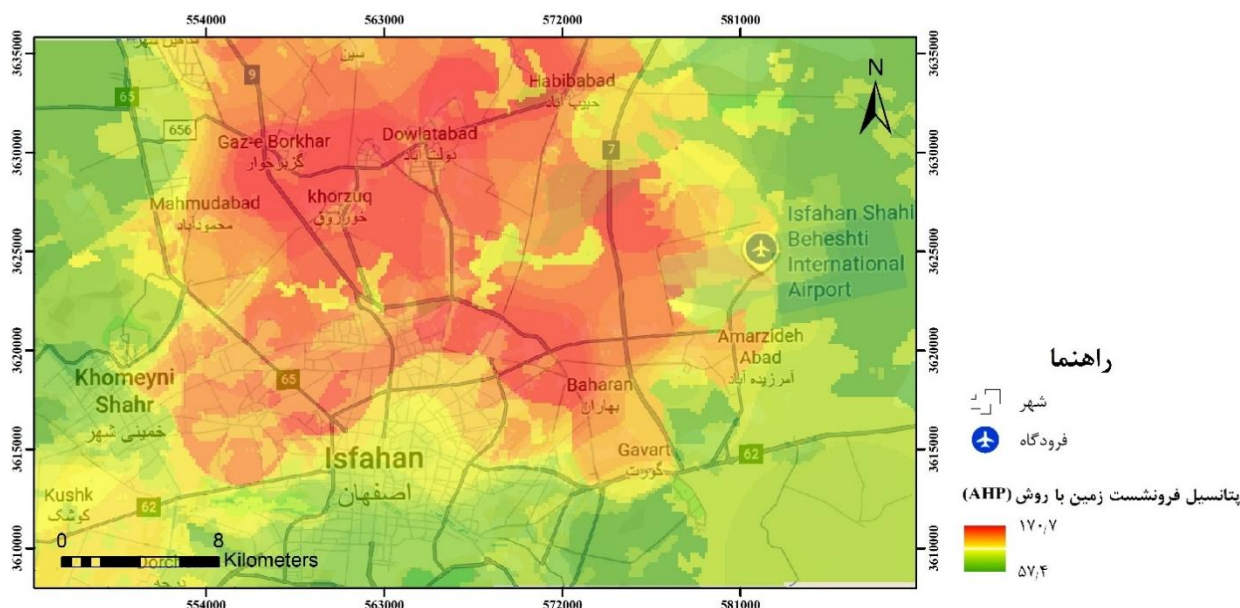
شکل ۶ نقشه پتانسیل فرونشست به‌دست‌آمده از تلفیق لایه‌های روش وزن‌دهی ساده (SAWF) در دشت و محدوده شهری اصفهان - برخوار

۵-۲- نتایج روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

به منظور محاسبه وزن لایه‌های مؤثر بر فرونشست با بهره‌گیری از AHP، ابتدا رتبه‌های ارائه‌شده توسط خبرگان در قالب ماتریس مقایسه‌ای نرمال‌سازی شد و در نتیجه، وزن هر لایه برای هر پرسشنامه در بازه‌ای بین ۰ تا ۱ به دست آمد (جدول ۲). پس از جمع این وزن‌ها، وزن نهایی هر یک از لایه‌های مؤثر بر فرونشست استخراج و در جدول ۴ ارائه شد. در مرحله بعد، وزن‌های محاسبه‌شده به مقیاس عددی بین ۰ تا ۵ تبدیل شدند (جدول ۶). این وزن‌ها در مقادیر متناظر هر لایه ضرب شد و در نهایت، نقشه پتانسیل فرونشست زمین برای دشت اصفهان - برخوار در بازه ۵۷/۴ تا ۱۷۰/۷ محاسبه شد. شکل ۷ نقشه نهایی حاصل از تلفیق لایه‌ها بر اساس روش AHP را نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از روش AHP نیز مؤید آن است که خطر وقوع فرونشست در نواحی یادشده در بخش ۵-۱ (نتایج روش وزن‌دهی ساده)، تا حدودی افزایش یافته است. بر این اساس، منطقه کوشک در جنوب غربی محدوده مورد مطالعه نیز از نظر میزان پتانسیل فرونشست، در سطحی تقریباً مشابه با نواحی محمودآباد، بهاران، سین، آمرزیده‌آباد، گورت، فرودگاه شهید بهشتی اصفهان و بخش‌های مسکونی شمال اصفهان قرار می‌گیرد.

جدول ۵. وزن نهایی لایه‌ها بر حسب امتیاز خبرگان و با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) (هل‌اتائی و همکاران، ۱۴۰۴)

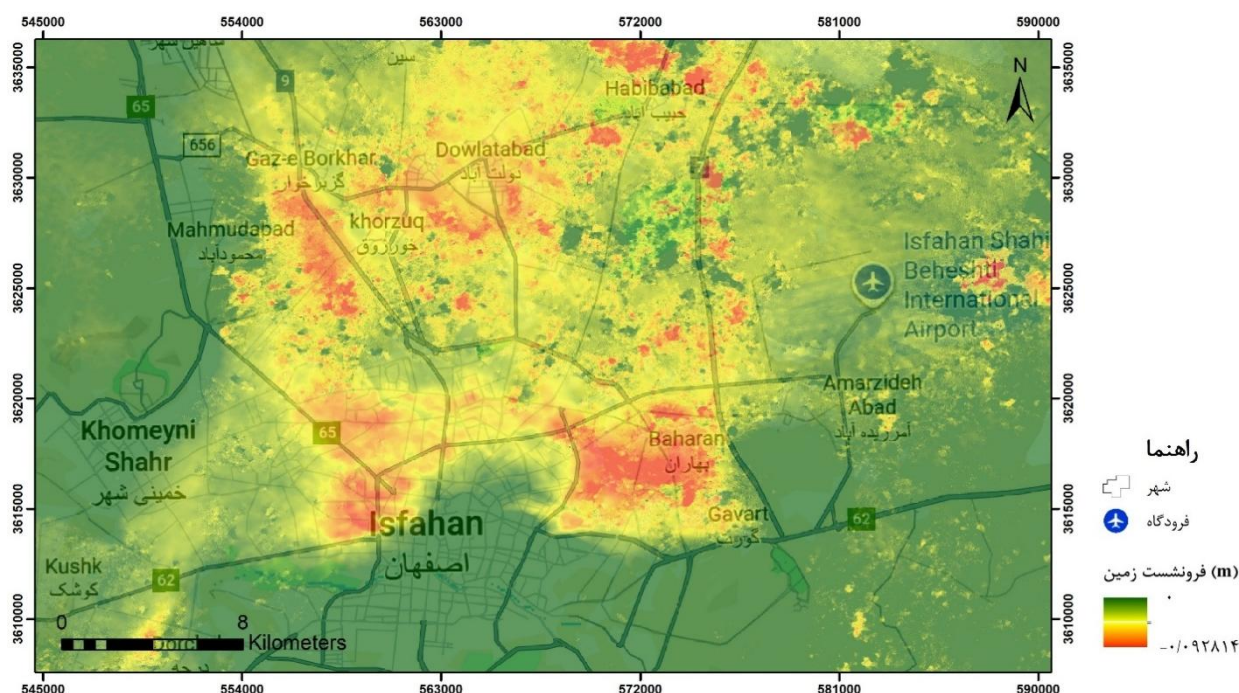
لایه‌ها	سطح آب زیرزمینی	جنس آبخوان	کاربری اراضی	پمپاژ	تغذیه	ضخامت آبخوان	فاصله از گسل
وزن	۱/۸۱۵۸	۱/۷۲۸۷	۱/۷۲۹۱	۱/۶۵۴۷	۱/۰۸۰	۰/۹۶۰۶	۰/۹۵۷۸
وزن نهایی برحسب AHP	۵	۴/۷	۴/۷	۴/۵	۳	۲/۶	۲



شکل ۷. نقشه پتانسیل فرونشست به دست آمده تلفیق لایه‌های مدل AHP در دشت و محدوده شهری اصفهان - برخوار

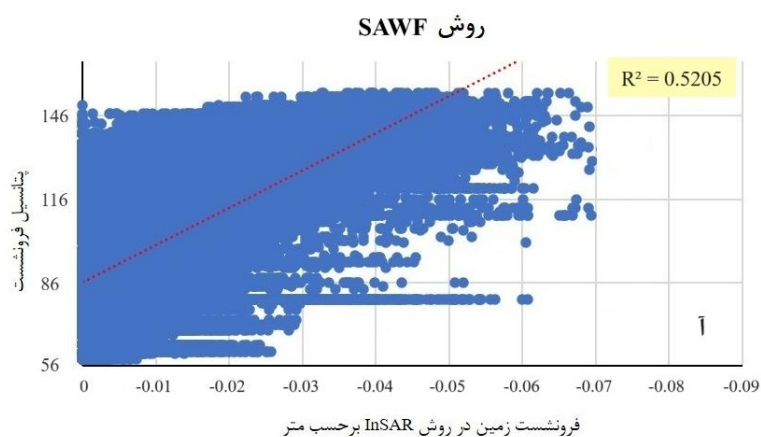
۵-۳- صحت‌سنجی با تصاویر ماهواره‌ای (InSAR)

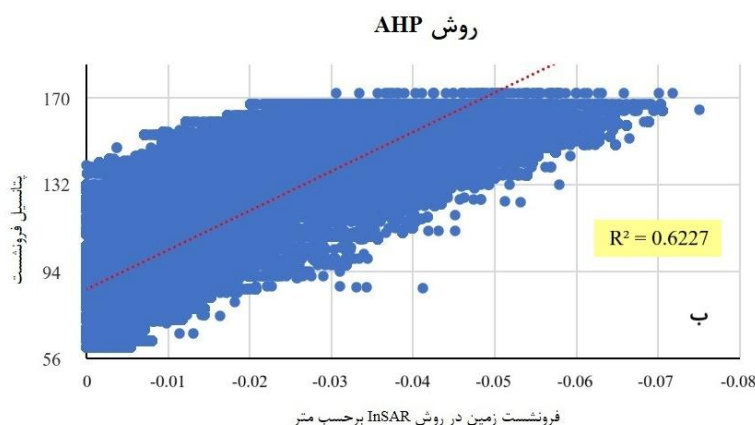
در این پژوهش، از تصاویر راداری (InSAR) پردازش شده ماهواره سنتینل-۱ برای فروردین ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳ استفاده شد تا از طریق این داده‌ها، روش‌های ارائه شده برای ارزیابی پتانسیل فرونشست دشت اصفهان - برخوار شامل روش وزن‌دهی ساده و AHP مورد بررسی قرار گیرند. شکل ۸، تصویر ماهواره‌ای فرونشست دشت مورد مطالعه را برحسب متر برای بازه زمانی ۱۴۰۲ - ۱۴۰۳ نشان می‌دهد حداکثر و حداقل فرونشست در این دشت به ترتیب برابر با ۰/۰۹۲۸ متر و صفر است. مقادیر منفی فرونشست که در شکل ۸ با طیف رنگی قرمز نمایش داده شده‌اند، نمایانگر فرونشست زمین هستند. بر اساس نقشه حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، بیشترین میزان فرونشست زمین در مناطقی نظیر دولت‌آباد، گز برخوار، حبیب‌آباد، بهاران، خورزوق، بخش‌های شمالی شهر اصفهان، نواحی جنوب غربی منطقه مورد مطالعه و همچنین، قسمت‌های شرقی فرودگاه شهید بهشتی اصفهان مشاهده شده است. این مناطق که روی نقشه با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند، بیانگر نواحی با بیشترین شدت و خطر فرونشست زمین هستند. در مقابل، بخش‌هایی از سین، گورت، آمرزیده‌آباد و همچنین، برخی نواحی از خمینی‌شهر نیز در معرض فرونشست قرار دارند، اما شدت آن‌ها در مقایسه با مناطق یادشده پایین‌تر بوده و در نقشه با رنگ‌های زرد مشخص شده‌اند که بیانگر مناطق با خطر متوسط رو به بالا هستند. مقایسه بصری نقشه‌های حاصل از دو روش SAWF و AHP با نقشه پردازش شده ماهواره‌ای نشان می‌دهد تطابق قابل توجهی میان مناطق پرخطر از نظر پتانسیل فرونشست زمین در هر سه نقشه وجود دارد. این همخوانی، تا حدود زیادی صحت تحلیل‌های انجام شده در تعیین نواحی مستعد فرونشست را تأیید می‌کند.



شکل ۸. نقشه به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای طی فروردین ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳

به منظور ارزیابی دقت روش‌های وزن‌دهی ساده و AHP، ضریب همبستگی بین مقادیر فرونشست حاصل از این روش‌ها و داده‌های تصاویر ماهواره‌ای محاسبه شد. در این راستا، ابتدا نقشه پتانسیل فرونشست به‌دست‌آمده از روش وزن‌دهی ساده و مدل AHP، همراه با تصویر تداخل‌سنجی ماهواره، در محیط ArcGIS به فایل رستر با ابعاد پیکسل یکسان (۱۵۰×۱۵۰) تبدیل شد. سپس، فایل رستر به فایل وکتور تبدیل شد و پس از تهیه نقشه وکتوری، تمامی پیکسل‌ها به فایل اکسل منتقل شدند. در نهایت، ضریب همبستگی (R^2) بین روش‌های وزن‌دهی ساده و AHP با میزان فرونشست حاصل از تصاویر راداری محاسبه شد. مطابق شکل ۹، ضریب همبستگی روش وزن‌دهی ساده و AHP با داده‌های ماهواره‌ای به‌ترتیب برابر با ۰/۵۲ و ۰/۶۲ است.





شکل ۹. نمودار همبستگی بین روش‌ها و میزان فرونشست حاصل از تصاویر ماهواره‌ای

مطابق جدول ۲، مقادیر شاخص SVI محاسبه شده برای محدوده مورد مطالعه، در دامنه‌ای از پتانسیل پایین تا بالا برای وقوع فرونشست قرار می‌گیرد. مقایسه صحت‌سنجی روش‌های SAWF و AHP با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد روش AHP، نسبت به روش SAWF، از دقت و کارایی بالاتری برخوردار است.

۶- نتیجه‌گیری

بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب افت سطح ایستابی و افزایش احتمال فرونشست در این ناحیه شده است. با توجه به تمرکز آثار تاریخی ارزشمند در کلان‌شهر اصفهان، شناسایی و پایش مناطق مستعد فرونشست برای حفظ میراث فرهنگی و کاهش خطرات سازه‌ای ضرورت دارد. هدف از این پژوهش، ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین در دشت اصفهان - برخوار با بهره‌گیری از دو روش وزن‌دهی ساده (SAWF) و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است. در روش SAWF، هفت شاخص اصلی شامل جنس آبخوان، کاربری زمین، میزان پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و تغییرات سطح آب زیرزمینی به عنوان عوامل مؤثر شناسایی و در محیط ArcGIS تلفیق شدند. برای بهینه‌سازی وزن‌دهی شاخص‌ها، از روش AHP و نظرات کارشناسان متخصص استفاده شد. نتایج مقایسه دو روش «وزن‌دهی ساده» و «تحلیل سلسله‌مراتبی» نشان می‌دهد روش AHP دقت و همبستگی بیشتری با داده‌های واقعی دارد (۶۲ درصد در مقایسه با ۵۲ درصد). این تفاوت را می‌توان ناشی از دو عامل اصلی دانست. نخست، بازنگری وزن لایه‌ها در روش وزن‌دهی ساده بر اساس نظر کارشناسان بومی منطقه، که به دلیل آشنایی دقیق با شرایط دشت اصفهان توانستند وزن‌ها را به واقعیت‌های میدانی نزدیک‌تر کنند. دوم، ساختار منظم و منطقی روش تحلیل سلسله‌مراتبی است که با استفاده از مقایسات زوجی و تعیین وزن نسبی عوامل بر پایه قضاوت کارشناسان، امکان ارزیابی دقیق‌تر اهمیت هر پارامتر را فراهم می‌کند. در مقابل، روش وزن‌دهی ساده از چنین ساختاری برخوردار نیست و وزن‌ها در آن به صورت کلی و بدون در نظر گرفتن ارتباط میان عوامل تعیین می‌شوند. به همین دلیل، روش تحلیل سلسله‌مراتبی توانسته است نقش واقعی‌تر هر لایه را در پدیده فرونشست نشان دهد و در نتیجه، نقشه‌ای واقع‌بینانه‌تر از پتانسیل وقوع آن ارائه کند.

بر اساس تحلیل‌ها، بیشترین پتانسیل فرونشست در نواحی مرکزی، شمالی و جنوب غربی دشت مشاهده می‌شود. مناطق دولت‌آباد، گز برخوار، حبیب‌آباد و خورزوق به عنوان پرخطرترین نواحی شناسایی شدند. همچنین نواحی محمودآباد، بهاران، سین، آمرزیده‌آباد، گورت و فرودگاه شهید بهشتی در طبقات خطر بالا اما نسبتاً کمتر قرار دارند. در بخش‌هایی از کوشک، شاهین‌شهر و مناطق مرکزی اصفهان نیز پتانسیل متوسط تا زیاد فرونشست گزارش شده است.

مقایسه بصری نقشه‌های حاصل از دو روش SAWF و AHP با نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده همخوانی زیاد الگوهای مکانی فرونشست است که تا حدود زیادی صحت مدل‌ها را تأیید می‌کند. با این حال، وجود خطاهای انسانی در داده‌های آب منطقه‌ای، عدم به‌روزرسانی اطلاعات، محدودیت‌های ذاتی تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی محدود سبب

می‌شود که نقشه خروجی پژوهش‌هایی از این نوع نسبی باشد؛ در نتیجه، بهتر است در تصمیم‌گیری‌های مهندسی و اجرایی با احتیاط مورد استفاده قرار گیرند.

- 1 Azarm, Z., Mehrabi, H., & Nadi, S. (2022). Investigating the correlation between land subsidence and groundwater level changes using radar interferometry time-series analysis (Study area: Isfahan). *Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 173–191. (In Persian).
- 2 Akbari, A. (2012). Investigating the causes of land subsidence in the Damaneh Plain and providing appropriate solutions to prevent it. *Master's thesis in Engineering Geology, University of Isfahan*, p. 163. (In Persian).
- 3 Amini, D., Kafi, M., & Talebi, M. R. (2024). Investigating the effects of land subsidence on historical buildings (District 3 of Isfahan), *8th International Conference on the Development of Technology in Materials Engineering, Mining, and Geology*. (In Persian).
- 4 Talebi-Nia, M., Khosravi, H., Zehtabian, Gh. R., Malekian, A., & Keshtkar, H. R. (2023). Investigating the land subsidence trend of the Isfahan Plain using the differential radar interferometry technique. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, Article 9, Vol. 14, No. 3. (In Persian).
- 5 Abdollahi, M. R., Jafarian, M. B., Goudarzi, E., Pirhadi, Gh. R., & Partoazar, H. (2014). Geological map report 1:25000 of Isfahan. *Geological Survey and Mineral Exploration Organization of the Country*. (In Persian).
- 6 Eshghi, P., & Kazerouni, M. (2022). Extracting the subsidence rate of metro tunnels from the InSAR radar perspective. *Scientific Journal of Radar*, 10(1), 147–162. (In Persian).
- 7 Alizadeh, A. (1988). Principles of Applied Hydrology. *Imam Reza University*. (In Persian).
- 8 Malmiri, M., & Delbari, M. (2014). Investigating the spatial changes of groundwater level in the plain and urban area of Isfahan–Borkhar. *Water and Sustainable Development*, 1(3), 73–82. (In Persian).
- 9 Moghaddam, S., Ahmadi, H., Zeynalzadeh, K., & Hesari, B. (2020). Site selection of renewable groundwater potential in the Urmia Lake watershed using AHP analysis and spatial fuzzy technique (Case study: Urmia Plain). *Hydrogeology*, Year 5, No. 2, Winter 2020, pp. 142–153. (In Persian).
- 10 Manafi-Azar, A., Khamsehchiyan, M., & Nadiri, A. (2018-a). Comparison of subsidence vulnerability of the southwestern Tehran Plain aquifer using the simple weighting model (ALPRIFT) and genetic algorithm. *Kharazmi Earth Sciences*, Vol. 4, No. 2, pp. 199–212. (In Persian).
- 11 Manafi-Azar, A., Khamsehchiyan, M., Nadiri, A., & Sharifi-Kia, M. (2018-b). Optimization of the ALPRIFT method using support vector machine (SVM) for evaluating subsidence vulnerability of the southwestern Tehran Plain. *Journal of the Iranian Association of Engineering Geology*, 11(2), 1–13. https://www.jiraeg.ir/article_83263.html?lang=fa. (In Persian).
- 12 Hol-Atayi, M., Khamsehchiyan, M., Amigh-Pey, M., & Manafi-Azar, A. (2025). Investigating the subsidence potential of the Varamin Plain using the simple weighting method and optimization of the weighting of factors affecting subsidence using hierarchical analysis. *Scientific-Research Quarterly of the Iranian Association of Engineering Geology*, https://www.jiraeg.ir/article_228132.html. (In Persian).
- 13 Adiyaman, I. B. (2012). Land subsidence and earth fissure due to groundwater pumping. PhD thesis. University of Arizona. USA. 199p.
- 14 Aghanabati, A. (2004). Geology of Iran. Geological survey of Iran, Geological Survey & Mineral Explorations of Iran.

- 15 Amighpey, M., and Arabi, S. (2016). Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*.
- 16 Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Tiefenbacher, J., Cerda, A., Biggs, T., Collins, A. (2020). A novel ensemble computational intelligence approach for the spatial prediction of land subsidence susceptibility. *Science of the Total Environment*.
- 17 Bates, R.L., Jackson, J.A. (1980). *Glossary of Geology*. 2nd Edition, American Geological Institute, Virginia.
- 18 Borgeaud, M., Wegmüller, U. (1997). On the Use of ERS SAR Interferometry for the Retrieval of-and Bio-Physical Information. *ERS SAR Interferometry* 406, p. 83.
- 19 Crosetto, M., Tscherning, C., Castillo, C. M. (2002). Subsidence Monitoring Using SAR Interferometry. Reduction of the Atmospheric Effects Using Stochastic Filtering. *Geophysical Research Letters*, 29 (9). 26-29.
- 20 Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J. & Entezam, I. (2013a). Neural Network Modelling of Tehran Land Subsidence Measured by Persistent Scatterer Interferometry. *Photogrammetrie- Fernerkundung- Geoinformation*. 1: 5-17.
- 21 Dehghani, M., Valadan Zoej, M., Hooper, A., Hanssen, R., Entezam, I., and Saatchi, S. (2013b). Hybrid Conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land Subsidence Monitoring in the Tehran Basin, Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. pp. 157-170.
- 22 Dinar, A., Esteban, E., Calvo, E., Herrera, G., Teatini, P., Tomás, R., ..., Albiac, J. (2018). Land Subsidence: The Forgotten Enigma of Groundwater (Over) Extraction. *Natural Resources as Assets*, California.
- 23 Fruneau, B., Sarti, F. (2000). Detection of Ground Subsidence in the City of Paris Using Radar Interferometry. Isolation from Atmospheric Artefacts using correlation. *Geophys Res Lett*, 27 (24), pp. 3981-3984.
- 24 Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebristen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., and Rosen, P. A. (1998). Detection of Aquifer System Compaction and Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar. *Antelope Valley, Mojave Desert*. California. *Water Resources Research*, pp. 2573-2585.
- 25 Galloway, D., & Hoffmann, J. (2007). The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15: 133-154.
- 26 Galloway, D., Bawden, G., Leake, S., & Honegger, D. (2008). *Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines*. USGS.
- 27 Galloway, D., Jones, D., and Ingebristen, S. (1999). *Land Subsidence in the United States*. US Geological Survey.
- 28 Galloway, D.L., Burbey, T.J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J.* 19(8): 1459-1486.
- 29 Goorabi, A., Karimi, M., Yaman, M., Perissin, D. (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations, *Journal of Arid Environments* 181, 17 pages.
- 30 Hidayat, A., Muslihudin, M., & Utami, I. (2017). Sistem Pendukung Keputusan Menentukan Lokasi Cafe Baru Suncafe Sebagai Destinasi Wisata Kuliner Di Kabupaten Pringsewu Menggunakan Metode Simple Additive Weighting (SAW). *J. TAM (Technol. Accept. Model)*, 6: 71–79.
- 31 Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arikian, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics* 7, pp. 514 – 517.

- 32 Hung, W. C., Hwang, J. C., Lin, Y. S., and Yang, H. L. (2012). Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan. *Engineering Geology*, pp. 78-90.
- 33 Hwang, C., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*, Springer Book Archive.
- 34 Jafari, F., Javadi, S., and Karimi, N. (2015). Forecasting of Subsidence due to Groundwater over Exploitation using Modflow and Interferometry Technique in Radar Imagery. The 36th IAHR World Congress.
- 35 Jahangir, M. H., Khosravi, Z., and Sarrafha, H. (2020). Modeling of land subsidence due to groundwater overexploitation using elastoplastic Mohr-Coulomb model in Arak plain (Iran), *Geopersia*.
- 36 Kakavand, m., Haghizadeh, A., Soleimani-Motlagh, m. (2025). Spatio-temporal analysis of trend the hydro-climatic time series and identify factors affecting Flood Hazard. *Earth Science Informatics*, 18: 177. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01577-z>
- 37 Khodaparast, M., Rajabi, A.M., Edalat, A. (2018). Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process (AHP): a case study in Qom city, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77: 52.
- 38 Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Zhang, Y., Wang, W. (2014). Subsidence Monitoring of Tianjin Suburbs by TerraSAR-X Persistent Scatterers Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7: 1642-1650.
- 39 Ma, C.L. (2006). Land subsidence caused by groundwater exploitation in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain. China. *Hydrogeology Journal*. 1652-1665.
- 40 Ma, T., Du, Y., Ma, R., Xiao, C., Liu, Y. (2018). Water-rock interactions and related eco-environmental effects in typical land subsidence zones of China. *Hydrogeol. J.* 26(5): 1339-1349.
- 41 Manafiazar, A., Khamechiyan, M., Allah-Nadiri, A., Sharifikia, M. (2023). Learning simple additive weighting parameters for subsidence vulnerability indices in Tehran plain (Iran) by artificial intelligence methods. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- 42 Manafiazar, A., Khamechiyan, M., Nikudel, M.R., Sharifikia, M. (2024). Prediction of groundwater level in the southwest plain of Tehran-Iran by Multiple Modelling (MM) and treating heterogeneity by self-organizing map (SOM). *Geopersia*.
- 43 Mohammadi, M., Fatemi-Aghda, S.M., Talkhablou, M., Cheshomi, A. (2020). Introducing a Comprehensive Geological and Geotechnical Classification for Urban Planning and Design, Case Study in Isfahan (Iran). *Geotech Geol Eng*, 18 pages.
- 44 Motagh, M., Walter, T.R., Sharifi, M.A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophys. Res. Lett.* 35(16).
- 45 Muslihudin, M., & Gumanti, M. (2017). A System to Support Decision Makings in Selection of Aid Receivers for Classroom Rehabilitation for Senior High Schools by Education Office of Pringsewu District By, *IJISCS*, 1: 1–9.
- 46 Muslihudin, M., Kurniawan, D., Widyaningrum, I. (2017). Implementasi Model Fuzzy SAW Dalam Penilaian Kinerja Penyuluh Agama, *J. TAM (Technol. Accept. Model)*, 8: 39–44.
- 47 Nadiri, A.A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., Dideban, Kh. (2018). Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs). *ALPRIFT" Science of the Total Environment*.
- 48 Piscopo, G. (2001). Groundwater vulnerability map. explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW. 658 Department of Land and Water Conservation.

- 49 Poland, J.F. (1984). Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. In *Studies and Reports in Hydrology*, Unesco, Paris. 305 pp.
- 50 Rahmati, O., Golkarian, A., Biggs, T., Keesstra, S., Mohammadi, F., and Daliakopoulos, I. (2019). Land subsidence hazard modeling: Machine learning to identify predictors and the role of human activities, *Journal of Environmental Management*. 446-480.
- 51 Rajabi, A.M. (2018). A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom-Iran. *Natural Hazards*. pp. 1085-1103.
- 52 Rajabi, A.M., & Ghorbani, E. (2016). Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran. *Arab J Geosci*.
- 53 Rajabi, A.M., Edalat, A., Abolghasemi, Y., et al. (2024). Using neural network modeling to improve the detection accuracy of land subsidence due to groundwater withdrawal. *Journal of Mountain Science*. 21(7).
- 54 Raspini, F., Caleca, F., Del Soldato, M., Festa, D., Confuorto, P., Bianchini, S. (2022). Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews* 235.
- 55 Raucoules, D., Colesanti, C., & Carnec, C. (2007). Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *C. R. Geoscience*, 339: 289-302
- 56 Renjith, V. R., Madhu, G., Nayagam, V. L. G., & Bhasi, A. B. (2010). Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. *Journal of hazardous materials*, 183, 103-110.
- 57 Roszkowska, E. (2013). Rank Ordering Criteria Weighting Methods: A Comparative Overview. *Optimum. Studia Ekonomiczne NR 5* (65).
- 58 Saaty, T. (1980). *The Analytical Hierarchy Process*. Pining Priority, Resource Allocation, RWS Publication, USA, 287.
- 59 Sedaghat, M., Ghazifard, A., Ajalloeian, R., Shirani, K. (2020). Evaluation of the subsidence hazard due to groundwater withdrawal in Isfahan Metropolis. *Geotechnical and Geological Engineering*. 38: 297–318.
- 60 Taravatroy, N., Nikoo, M., Sadegh, M., and Parvinnia, M. (2018). A hybrid clustering-fusion methodology for land subsidence estimation. *Natural Hazards*. 905–926.
- 61 Terzaghi, K. (1925). *Principals of Soil Mechanics*, Settlement and consolidation of Clay. *Engineering News-Record*. 874-878.
- 62 Tomás, R., Romero, R., Mulas, J., Marturià, J.J., Mallorquí, J.J., Lopez-Sanchez, J.M., Herrera, G., Gutiérrez, F., González, P. J., Fernández, J., Duque, S., Concha-Dimas, A., Cocksley, G., Castañeda, C., Carrasco, D., Blanco, P. (2014). Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena. a review of practical issues through cases in Spain, *Environmental Earth Science*, 71: 163–181.
- 63 Zhou, Y., Dong, D., Liu, J., Li, W. (2013). Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain. China. *Geosci. Front. Times* 4, 127–138.