

Spatial zoning of land subsidence in Chaharmahal and Bakhtiari Province using the machine learning model (AdaBoost)

Ahmadreza Karimipour^{1*}, Saleh Yousefi² and Sara Mardanian³

¹ Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shahrekord, Iran

² Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shahrekord, Iran

³ Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shahrekord, Iran

Received: 17 October 2025

Accepted: 15 February 2026

Extended abstract

Introduction

The phenomenon of land subsidence, as a global challenge, has affected many plains and metropolitan areas, including various regions of Iran. This phenomenon is primarily caused by the uncontrolled exploitation of groundwater resources and geological factors, which can lead to serious consequences such as damage to infrastructure and the destruction of agricultural lands. Recent advances in remote sensing have enabled more accurate monitoring of this phenomenon, utilizing various techniques such as PS-InSAR and CPT. In addition to remote sensing, machine learning algorithms have also been used in various studies to predict subsidence. Accordingly, employing a suitable model with high accuracy in this field is of great importance. The AdaBoost model, due to its high capability in addressing the complex nonlinear relationships governing the subsidence phenomenon, can play an effective role in zoning subsidence risk levels, thereby contributing to risk management and land-use planning in a region.

Materials and methods

This study was conducted in Chaharmahal and Bakhtiari province, located in the heart of the Zagros Mountains. Initially, thirty factors related to land subsidence were considered, encompassing topographic (elevation, slope, aspect, curvature, TWI, TPI, TRI), hydrological (distance from rivers, flow accumulation), geological (distance from faults, lithology), environmental (vegetation cover, land moisture index, land use), and climatic parameters (temperature, precipitation, snow depth). To avoid multicollinearity, a correlation matrix analysis was performed, leading to the removal of seven variables with a correlation coefficient greater than 0.7. Subsequently, 23 variables were retained for modeling. The AdaBoost algorithm was trained on 2,352 samples (1,859 subsidence and 493 non-subsidence) and validated on an independent test set of 772 samples (536 subsidence and 236 non-subsidence). The model's performance was assessed using the Area Under the Curve (AUC), Precision, Recall, and Kappa coefficient metrics.

Results and discussion

The data of the obtained statistical indices for the Area Under the Curve (AUC), model accuracy (Precision), Recall index (Recall), and Kappa coefficient (0.974, 0.936, 0.981, and 0.855, respectively) in evaluating the AdaBoost model indicate the model's highly desirable performance in predicting subsidence risk. Based on the classification obtained in the final subsidence risk zoning map, the study area was categorized into five classes: very low risk, low risk, moderate, high, and very high. The results showed that the plains of Boroujen and Shahrekord are at the highest risk, respectively, while limited parts of the Lordegan plain fall into the very high-risk category. Other plains in the province are mainly faced with low to moderate risk levels. Furthermore, the results indicated that 36% of the province is exposed to moderate subsidence risk.

Conclusions

The findings of this study demonstrate that the AdaBoost model is an effective tool for zoning land subsidence risk in Chaharmahal and Bakhtiari Province. According to the SHAP analysis, the three main

* Corresponding author: a.karimipour@areeo.ac.ir

parameters influencing subsidence, in order of importance, are: land slope angle, surface sand percentage, and groundwater level fluctuations. It was further established that an inverse relationship exists between land slope and subsidence intensity, meaning areas with gentler slopes exhibit greater vulnerability to this phenomenon. Conversely, a decline in the groundwater level and its fluctuations have a direct correlation with increased subsidence, while a higher surface sand percentage exerts a mitigating effect on subsidence occurrence. The results underscore the necessity for proper management of groundwater resources. The subsidence risk zoning map and the evaluation charts presented in this study can serve as practical tools for preventing and mitigating damages caused by land subsidence.

Keywords: Groundwater, Groundwater level fluctuations, Machine learning algorithms, Risk, Shahrekord

Cite this article: Karimipour, A., Yousefi, S., Mardanian, S., 2026. Spatial zoning of land subsidence in Chaharmahal and Bakhtiari Province using the machine learning model (AdaBoost). *Watershed. Water. Eng. Manag.*18(2), 257-274.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



پهنه‌بندی مکانی فرونشست زمین در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از مدل AdaBoost

احمدرضا کریمی پور^{۱*}، صالح یوسفی^۲ و سارا مردانیان^۳

^۱ گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران

^۲ گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران

^۳ گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵

چکیده مبسوط

مقدمه

پدیده فرونشست زمین به‌عنوان یک چالش جهانی، بسیاری از دشت‌ها و مناطق کلان‌شهری از جمله مناطق مختلف ایران را تحت تأثیر قرار داده است. این پدیده عمدتاً ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و عوامل زمین‌شناختی است که می‌تواند پیامدهای جدی مانند آسیب به زیرساخت‌ها و تخریب زمین‌های کشاورزی را به دنبال داشته باشد. پیشرفت‌های اخیر در حوزه سنجش از دور، امکان پایش دقیق‌تر این پدیده را فراهم کرده و در این راستا از تکنیک‌های مختلفی از قبیل PS-InSAR و Coherence Pixles Technique استفاده شده است. در کنار سنجش از دور، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز در مطالعات مختلف برای پیش‌بینی فرونشست استفاده شده است. بر این اساس به‌کارگیری مدلی مناسب با دقت بالا در این زمینه حائز اهمیت است. مدل AdaBoost به دلیل قابلیت بالا در پرداختن به روابط غیرخطی پیچیده حاکم بر پدیده فرونشست می‌تواند به پهنه‌بندی میزان خطر فرونشست نقش مؤثری در مدیریت خطر و برنامه‌ریزی کاربری اراضی در یک منطقه ایفا کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در استان چهارمحال و بختیاری در رشته‌کوه‌های زاگرس، انجام شد. در گام اول، ۳۰ عامل مؤثر بر فرونشست زمین در نظر گرفته شد که شامل پارامترهای توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین و شاخص‌های TRI، TPI و TWI)، پارامترهای هیدرولوژیکی (فاصله از رودخانه‌ها، تجمع جریان)، زمین‌شناسی (فاصله از گسل‌ها، لیتولوژی)، محیطی (پوشش گیاهی، شاخص رطوبت زمین، کاربری اراضی) و اقلیمی (دما، بارش، عمق برف) بودند. به‌منظور اجتناب از اثرات هم‌خطی، تحلیل ماتریس همبستگی انجام شد که منجر به حذف هفت متغیر با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۷ شد. پس از آن، ۲۳ متغیر برای مدلسازی نگه داشته شدند. الگوریتم AdaBoost با استفاده از ۲۳۵۲ نمونه (۱۸۵۹ نقطه فرونشست و ۴۹۳ نقطه بدون فرونشست) آموزش داده شد و روی یک مجموعه آزمون مستقل متشکل از ۷۷۲ نمونه (۵۳۶ نقطه فرونشست و ۲۳۶ نقطه بدون فرونشست) اعتبارسنجی شد. لازم به ذکر است که داده‌ها به‌طور تصادفی به دو

* مسئول مکاتبات: a.karimipour@areeo.ac.ir

دسته آموزش و ارزیابی تقسیم بندی شدند و تقریباً ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای ارزیابی استفاده شدند. عملکرد مدل با استفاده از معیارهای سطح زیر منحنی (AUC)، دقت مدل (Precision)، شاخص بازیابی (Recall) و ضریب کاپا مورد ارزیابی شد.

نتایج و بحث

داده‌های شاخص‌های آماری به دست آمده برای سطح زیر منحنی (AUC)، دقت مدل (Precision)، شاخص بازیابی (Recall) و ضریب کاپا (به ترتیب ۰/۹۷۴، ۰/۹۳۶، ۰/۹۸۱ و ۰/۸۵۵) ارزیابی مدل AdaBoost حاکی از عملکرد بسیار مطلوب مدل در پیش‌بینی خطر فرونشست بود. براساس طبقه‌بندی به دست آمده در نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر فرونشست، منطقه مورد مطالعه به منطقه‌ای با پنج طبقه بسیار کم خطر، کم خطر، متوسط، بالا و بسیار بالا طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که دشت‌های بروجن و شهرکرد به ترتیب در معرض بیشترین خطر قرار دارند و بخش‌های محدودی از دشت لردگان در رده‌بندی خطر بسیار زیاد جای می‌گیرد و سایر دشت‌های استان عمدتاً با سطوح خطر کم تا متوسط مواجه هستند. همچنین نتایج نشان داد ۳۶ درصد استان در معرض خطر فرونشست متوسط قرار دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه حاکی از آن است که مدل AdaBoost ابزاری کارآمد برای پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در استان چهارمحال و بختیاری است. براساس آنالیز SHAP، سه پارامتر اصلی مؤثر بر فرونشست به ترتیب اهمیت عبارت از درجه شیب زمین، درصد شن سطحی و تغییرات تراز آب زیرزمینی است. همچنین مشخص شد که رابطه معکوسی بین شیب زمین و شدت فرونشست وجود دارد، به طوری که زمین‌های با شیب کمتر، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر این پدیده نشان می‌دهند. در مقابل، افت سطح آب زیرزمینی و نوسانات آن رابطه مستقیمی با تشدید فرونشست دارد، حال آنکه افزایش درصد شن در سطح زمین تأثیر کاهنده‌ای بر وقوع فرونشست دارد. نتایج بر ضرورت مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی تأکید دارند. نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست و نمودارهای ارزیابی ارائه شده در این مطالعه نیز می‌توانند به عنوان ابزاری کاربردی برای پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از فرونشست زمین مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تغییرات تراز آب زیرزمینی، خطر، شهرکرد

مقدمه

پدیده فرونشست زمین، به عنوان یک چالش جدی در حوزه علوم زمین و محیط زیست، به معضلی جهانی تبدیل شده و دشت‌ها و کلان‌شهرهای متعددی را در سراسر جهان، از ایران و چین گرفته تا اندونزی و ایالات متحده، تحت تأثیر قرار داده است (Taheri et al., 2018; Hidayah et al., 2025; Shi et al., 2020).

این پدیده عمدتاً به دلیل فعالیت‌های انسانی از جمله برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی و شرب، در کنار عوامل طبیعی و زمین‌شناسی مانند ضخامت رسوبات و وجود گسل‌ها رخ می‌دهد (Mehrabani et al., 2023). پیامدهای فرونشست می‌تواند فاجعه بار بوده و شامل آسیب جدی به زیرساخت‌های

حیاتی (مانند جاده‌ها، خطوط راه‌آهن و شبکه‌های آبرسانی)، ایجاد فروچاله‌های ناگهانی، تخریب اراضی کشاورزی حاصلخیز و تشدید چشمگیر خطر سیلاب، به ویژه در مناطق پست و ساحلی شود (Eghrari et al., 2023; Qiao et al., 2024). بنابراین، پیش‌بینی دقیق مناطق مستعد فرونشست و درک مکانیسم‌های کنترل‌کننده آن، گام نخست و ضروری برای تدوین راهبردهای مؤثر مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی هوشمندانه کاربری اراضی و حرکت به سمت توسعه پایدار است.

پیشرفت‌های فناوریانه اخیر در حوزه سنجش از دور و هوش مصنوعی، تحولی شگرف در پایش، تحلیل و مدل‌سازی این پدیده ایجاد کرده است. تکنیک‌های تداخل سنجی راداری پیشرفته، به ویژه PS-InSAR

نسبت به مدل جنگل تصادفی با $R^2=0.84$ و $RMSE=0.49$ سانتی‌متر داشت. این نتایج گویای توانایی بالای این الگوریتم‌ها، به ویژه در مواجهه با روابط غیرخطی پیچیده حاکم بر پدیده فرونشست است.

با این حال، یک چالش اصلی و مشترک در استفاده از این مدل‌های پیشرفته، ماهیت جعبه سیاه بسیاری از آنهاست. این عبارت به این معناست که اگرچه این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی‌های دقیق هستند، اما فرایند داخلی و منطق تصمیم‌گیری آنها برای کاربران نهایی، سیاست‌گذاران و مدیران اراضی قابل درک و تفسیر نیست (Radman et al., 2021). این کمبود شفافیت می‌تواند به بی‌اعتمادی و عدم تمایل به بهره‌گیری از نتایج ارزشمند مدل در تصمیم‌گیری‌های حیاتی مربوط به مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی شهری و کاهش خطر بلایا منجر شود. برای غلبه بر این چالش اساسی، حوزه هوش مصنوعی تفسیرپذیر^۶ و به‌ویژه تکنیک شپلی^۷ پدید آمده و به سرعت در حال گسترش است (Yu et al., 2025; Radman et al., 2021).

این تکنیک‌ها قادرند سهم و اهمیت هر یک از عوامل ورودی (مانند افت سطح آب زیرزمینی، ارتفاع، فاصله از جاده، کاربری اراضی و شاخص‌های پوشش گیاهی) را در پیش‌بینی نهایی مدل به‌صورت کمی شده و شفاف ارائه کنند. برای مثال، Yu et al., (2025) در مطالعه خود در هانگژو با استفاده از SHAP نشان دادند که فعالیت‌های مهندسی و توزیع خاک‌های نرم تأثیرگذارترین عوامل در پیش‌بینی فرونشست هستند. به‌طور مشابه، Su et al., (2024) با بهینه‌سازی ویژگی‌های ورودی مدل شبکه عصبی خود بر اساس مقادیر SHAP، موفق به بهبود ۲۲ درصدی عملکرد مدل در پیش‌بینی فرونشست در شهرهای چونگ‌کینگ و چنگدو شدند. این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که تلفیق XAI نه تنها به درک بهتری از مکانیسم‌های مؤثر در فرونشست منجر می‌شود، بلکه می‌تواند دقت پیش‌بینی را نیز به‌طور مستقیم افزایش دهد. ازجمله پژوهش‌های تحقیقاتی دیگر در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

و SBAS-InSAR که از داده‌های ماهواره‌ای مانند سنتینل-۱ استفاده می‌کنند، این توانایی را فراهم کرده‌اند تا نقشه‌های دقیق، با وضوح بالا و پایش مستمر نرخ فرونشست در مقیاس‌های وسیع منطقه‌ای تهیه شود (Shi et al., 2020; Radman et al., 2021). برای مثال، مطالعه Sh et al., (2020) در دشت پکن از تکنیک PS-InSAR برای شناسایی نرخ فرونشست حداکثر ۱۱۵/۹۶ میلی‌متر در سال در مناطقی مانند چائویانگ و تونگژو استفاده کرد. به‌طور مشابه، Mehrahi et al., (2023) با به‌کارگیری تکنیک CPT روی تصاویر سنتینل-۱، روند افزایشی نرخ فرونشست در دشت جیرفت را از ۱۱ سانتی‌متر در سال ۱۳۹۳ به ۱۳ سانتی‌متر در سال ۱۴۰۲ ثبت و گسترش آن به سمت شمال دشت را نشان دادند. این داده‌های دقیق میدانی، پایه و اساس لازم برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی را فراهم می‌کنند.

در کنار سنجش از دور، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به عنوان ابزارهایی قدرتمند برای تحلیل داده‌های پیچیده چند بعدی و پیش‌بینی مکان وقوع و نرخ فرونشست ارائه شده‌اند. مطالعات متعدد در مناطق مختلف جهان اثربخشی طیف وسیعی از مدل‌ها را تأیید کرده‌اند. این مدل‌ها از الگوریتم‌های سنتی‌تر مانند جنگل تصادفی^۱، XGBoost و ماشین بردار پشتیبان^۲ تا معماری‌های پیچیده یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه^۳ شبکه‌های عصبی کانولوشنی^۴ و حافظه بلندمدت-کوتاهمدت^۵ را در بر می‌گیرند (Rafiei et al., 2022; Azram et al., 2025).

Radman et al., (2021) در اراضی اطراف دریاچه ارومیه، یک مدل ترکیبی وزنی از CNN، MLP و LSTM را ایجاد نمودند که عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های تکی داشت. در این مدل مقادیر خطای $MAE=6.4mm$ و $RMSE=8.2mm$ به‌دست آمد. در مطالعه‌ای دیگر توسط Eghrari et al., (2023) در دشت کاشان، مدل XGBoost با ضریب تعیین ۰/۹۰ و خطای $RMSE=0.37$ سانتی‌متر، عملکرد بهتری را

⁵ Long Short-Term Memory (LSTM)

⁶ Expandable Artificial Intelligence (XAI)

⁷ Shapley (SHAP)

¹ Random Forest (RF)

² Support Vector Machine (SVM)

³ Multi-Layer Perceptron (MLP)

⁴ Convolutional Neural Network (CNN)

مطالعاتی بررسی شد و در مرحله سوم نیز با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی سه ساله، (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰) محاسبه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، محدوده شهری و حاشیه شهری همدان سالانه با حدود یک متر افت منابع آب و ۰/۷ کیلومتر مربع توسعه فیزیکی شهر مواجه شده است.

همچنین میزان فرونشست این محدوده در طی دوره زمانی سه ساله، بین شش تا ۹۸ میلی متر بوده است که مطابق نقشه نهایی تهیه شده، مناطق غربی شهر همدان بین ۶۰ تا ۹۸ میلی متر، مناطق مرکزی بین ۳۰ تا ۶۰ میلی متر و بخش زیادی از مناطق شرقی بین شش تا ۳۰ میلی متر فرونشست داشته است. با توجه به اینکه بیشترین میزان توسعه فیزیکی شهر همدان در طی سال‌های اخیر، در مناطق غربی و حاشیه‌ای این شهر بوده است می‌توان گفت که توسعه فیزیکی شهر همدان به موازات افت منابع زیرزمینی، عامل اصلی این فرونشست بوده است.

Kazemi et al., (2022). به بررسی علل و راهکارهای مهار فرونشست زمین در دشت‌های تهران، مشهد، رفسنجان، کرمان، اصفهان و همدان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (InSAR) مانند تصاویر راداری Sentinel-1 پرداختند و نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست مناطق بحرانی ایران مانند دشت‌های تهران، مشهد، رفسنجان، کرمان، اصفهان و همدان را تهیه کردند. در این تحقیق نشان داده شد که علت اصلی در بیش از ۹۰ درصد وقوع پدیده فرونشست زمین، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی است. راهکارهای ارائه شده به دو دسته تقسیم بندی شدند:

-راهکارهای غیرسازه‌ای (مدیریتی): شامل تغییر الگوی کشت از محصولات پر آب‌بر (مانند گندم آبی و پسته) به محصولات کم‌آب‌بر (مانند زعفران، گیاهان دارویی)، اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار (قطره‌ای و بارانی)، نصب کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌ها، تعیین و تخصیص سهمیه آب و ایجاد بازار محلی آب برای تخصیص بهتر.

-راهکارهای سازه‌ای: شامل پروژه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان (MAR) از طریق هدایت سیلاب‌های فصلی به حوضچه‌های نفوذ، احداث بندهای

Montazeri and Aslani, (2019) در مطالعه‌ای به بررسی پدیده مورفولوژیکی فرونشست در استان‌های البرز و تهران با جمع‌آوری داده‌ها از طریق مطالعه اسناد، کتب و مقالات پرداختند و سه نقشه اصلی مخاطره، آسیب پذیری و ریسک را پس از استنتاج مؤلفه‌های اصلی و وزن‌دهی شاخص‌های فرونشست با به‌کارگیری AHP، در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد و تحلیل کردند. یافته‌های پژوهش نشان داد، آنچه باعث ایجاد خطر و مطرح شدن پدیده فرونشست به‌عنوان مخاطره و تهدید می‌شود، عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع و ذخایر آب‌های زیرزمینی در سطح استان است، همچنین عدم پایش مستمر منابع آب در منطقه و توسعه نامطلوب شهری در حریم فرونشست می‌تواند خسارات جبران ناپذیری به منابع انسانی، اقتصادی، زیرساختی و زیست محیطی وارد کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که سیاست‌گذاری و برنامه ریزی در استان باید متکی بر نقشه‌های خطر و متناسب با تهدیدات و خسارات ناشی از نشست‌های زمین در مناطق مستعد فرونشست باشد. مناطق وسیعی در استان تهران از جمله غرب و جنوب غربی و همچنین دشت ورامین، شهریار، کرج، نظرآباد و ساوجبلاغ در استان البرز از جمله مناطق مستعد وقوع فرونشست هستند. این امر بیانگر آن است که ایجاد و توسعه کانون‌های زیستی و جمعیتی و به‌طور کلی هرگونه فعالیت عمرانی در این مناطق، مستلزم حساسیت ویژه و نیازمند ارزیابی، نظارت، کنترل و پایش مستمر عوامل مؤثر در احتمال وقوع و تشدید پدیده فرونشست در منطقه است.

Ganjaeian et al., (2022) وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان را با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای تحلیل کردند. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل تصاویر راداری سنتینل ۱، تصاویر ماهواره لندست، مدل رقومی ۳۰ متر STRM و اطلاعات مربوط به منابع آب زیرزمینی بود. ابزارهای مهم تحقیق شامل ArcGIS، GMT و ENVI بوده است. این تحقیق به‌طور کلی در سه مرحله انجام شده است که در مرحله اول، نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مربوط به سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰، تهیه و تحلیل شدند. در مرحله دوم وضعیت افت منابع آب زیر زمین در محدوده

توپوگرافی بیشتر از ۱۲، کاربری کشاورزی، انحناء سطح بین ۰/۰۱- تا ۰/۰۱، انحناء نیمرخ بین ۰/۰۱- تا ۰/۰۱، فاصله کمتر از ۱۲۶۰ متر تا جاده، فاصله کمتر از ۷۰۰۰ متر تا گسل، سازندهای کواترنر و فاصله کمتر از ۲۰۰ متر تا آبراهه در نظر گرفته شد. در نهایت با جمع کردن وزن‌ها، نقشه نهایی حساسیت پذیری فرونشست زمین تهیه شد. سطح زیر منحنی برای مدل نسبت فراوانی ۰/۷۶ به دست آمد که نشان می‌دهد این مدل برای تهیه نقشه حساسیت پذیری فرونشست زمین در دشت سمنان مناسب است. نقشه حساسیت پذیری فرونشست زمین تهیه شده در این پژوهش می‌تواند یک ابزار مفید و کاربردی برای برنامه ریزان و سیاستگذاران محلی برای برنامه ریزی سرزمین، مدیریت منابع و کاهش خطرات طبیعی باشد.

Teimorzadeh (2023)، به بررسی پدیده فرونشست زمین و پیامدهای آن در شهرها و روستاها پرداخت و نتایج این مطالعه نشان داد که راهکارهای مواجهه با بحران کم آبی و کاهش خسارت ناشی از برداشت بی رویه منابع آب زیرزمینی و فرونشست زمین عبارت است از تغییر رویکرد در قبال منابع آب موجود، شناسایی و توسعه منابع آب جدید با دیدگاه زمین شناسی، و کیفیت منابع آب است.

Janbaz Ghotemi et al., (2023) در پژوهشی با هدف ارزیابی عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست دشت قزوین، از تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (D-InSAR) و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 در بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰ استفاده کردند. بیشینه فرونشست در جنوب غربی استان و در محدوده بویین زهرا به میزان ۴۷ سانتی‌متر مشاهده شد. جهت تحلیل عوامل مؤثر در پدیده فرونشست، از روش وزن‌دهی شواهد (WOE) در محیط GIS استفاده شد و هشت فاکتور از جمله ضخامت لایه ریزدانه، افت سطح ایستابی، عمق سنگ بستر، شیب، کاربری اراضی و زمین‌شناسی بررسی شد. نتایج نشان داد ضخامت لایه‌های ریزدانه با مقدار وزنی ۳/۷۷ مهم‌ترین عامل در بروز فرونشست است، در حالی که افت سطح ایستابی تنها عامل چهارم بود. در پایان، نقشه پتانسیل خطر فرونشست با دقت ۸۷ درصد ($AUC = 0.87$) ترسیم شد که پیش‌بینی مناسبی از نواحی مستعد را ارائه می‌داد. این مطالعه نشان داد که تنها افت

زیرزمینی و پخش سیلاب در دشتهایی مانند دشت سگری اصفهان.

همچنین این تحقیق نشان داد که راهکارهای سازه‌ای تنها در صورت کاهش برداشت (مدیریت تقاضا) تاثیرگذار خواهند بود.

Emadodin et al., (2023)، فرونشست زمین را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت مشهد مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق برای پیش فرونشست در دشت مشهد، از تکنیک تداخل سنجی راداری با دقت میلی‌متری و از داده‌های ماهواره‌ی Sentinel 1A در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ استفاده شد. نتیجه مطالعات حاصل از تداخل سنجی راداری نشان داد، در طول دوره‌ی آماری ذکر شده در منطقه مورد نظر ۶۴ سانتی‌متر فرونشست اتفاق افتاده است.

بنابراین برای یافتن علت فرونشست، اطلاعات چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه اخذ و تغییرات آنها در طول دوره آماری ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ بررسی شد. سطح آب چاه‌ها در طول بازه زمانی مورد مطالعه به بیشترین حد کاهش خود پیدا کرده بود و نتایج نشان داد بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی در مناطق مرکزی و جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه رخ داده است که متأثر از کاهش بارندگی، خشکسالی و زمین‌های برنج و باغی زیاد در منطقه بود و در نتیجه در طی این سال‌ها فشار بیش از حد به منابع آب‌های زیرزمینی وارد کرده است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت بیشترین نرخ فرونشست با افت شدید سطح آب زیرزمینی، در مناطق با بافت خاک ریزدانه و ضخامت زیاد آبرفت رخ داده است.

Mohammadi et al., (2023)، به ارزیابی حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در دشت سمنان پرداخت. در این پژوهش حساسیت‌پذیری دشت سمنان نسبت به فرونشست زمین با استفاده از مدل نسبت فراوانی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این کار ابتدا موقعیت فرونشست‌ها با استفاده از تصاویر لندست و کار میدانی مشخص شد بعد از طبقه بندی نقشه عوامل مؤثر، وزن هر نقشه با استفاده از مدل نسبت فراوانی محاسبه شد. بیشترین وزن مربوط به تراز آب کمتر از ۴۱ متر، شیب کمتر از دو درجه، شاخص رطوبت

اطلاعات آماری چاه‌های پیرومتری منطقه و لایه‌های رقومی اطلاعاتی به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شد. ابتدا با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نقشه فرونشست منطقه در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ تهیه شد و سپس تأثیر افت منابع آب زیرزمینی و تغییرات کاربری اراضی در فرونشست تحلیل شد. بر اساس نتایج، دشت اسدآباد در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ بین ۱۳۲ تا ۷۰۴ میلی‌متر فرونشست داشته که بیشترین مقدار فرونشست منطبق بر مناطق مرکزی این دشت بوده است. با توجه به اینکه بین فرونشست منطقه و افت سطح آب‌های زیرزمینی ارتباط معناداری برقرار بود (ضریب همبستگی ۰/۷۰۹)، می‌توان گفت که یکی از دلایل اصلی فرونشست دشت اسدآباد، افت منابع آب زیرزمینی بوده است. همچنین نتایج ارزیابی تغییرات کاربری اراضی نشان داد که روند افزایشی اراضی کشاورزی و نواحی انسان ساخت به‌ترتیب با افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و افزایش فشار بر سطح زمین و در نتیجه تشدید فرونشست همراه بوده است. با توجه به تداوم شرایط پدیده فرونشست در این دشت، پایش و بررسی از طریق سنجش از دور، احداث و ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثابت GPS امکان پایش نرخ و دامنه فرونشست را فراهم می‌سازد.

(Cao et al., 2022)، دستاوردهای مهم دو دهه گذشته در زمینه استفاده ترکیبی از فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای مقابله با فرونشست زمین را جمع‌بندی کردند. این پژوهشگران با تحلیل بیش از ۱۵۰ نمونه موفق از نقاط مختلف جهان، دقت و کارایی روش‌های گوناگون را با هم مقایسه کرده‌اند. هسته اصلی این تحقیق، دسته‌بندی و ارزیابی این فناوری‌ها در یک چارچوب منطقی بود. نخست، در بخش پایش نشان داده شد که روش‌های مدرن ماهواره‌ای مانند InSAR (با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مانند سنتینل-۱) چگونه می‌توانند حتی فرونشست‌های میلی‌متری زمین را در سطح یک منطقه گسترده شناسایی و ردیابی کنند. سپس در بخش تحلیل، تأکید می‌کند که کلید موفقیت، ادغام داده‌های ماهواره‌ای با سایر اطلاعات مکانی مانند نقشه‌های سطح آب زیرزمینی، جنس خاک، نوع کاربری زمین، تراکم جمعیت و موقعیت زیر ساخت‌های مهم در

آب زیرزمینی عامل اصلی نیست، بلکه خصوصیات ژئوتکنیکی خاک (مانند ضخامت لایه‌های رسی) تأثیر بیشتری دارند.

Orlandi et al., (2024) در تحقیقات خود نشان دادند فرونشست زمین به‌عنوان یک تهدید جهانی می‌تواند خسارات جبران ناپذیری به محیط زیست و زیرساخت‌ها وارد کند. از این رو، شناسایی و نقشه‌برداری از مناطق مستعد فرونشست با روش‌های دقیق مانند تهیه شاخص حساسیت فرونشست زمین (LSSI) برای کاهش اثرات منفی این مخاطره زمین‌شناسی امری حیاتی است. همچنین، یادگیری ماشین به ابزاری قدرتمند برای تحلیل مجموعه داده‌های حجیم و متنوع از جمله داده‌های مورد نیاز برای تهیه LSSI تبدیل شده است. در این مطالعه، از روش متعارف نسبت فراوانی و مدل‌های یادگیری ماشین برای تولید نقشه‌های LSSI در منطقه مورسیا (اسپانیا) استفاده شد. در این منطقه، فرونشست زمین در گذشته به دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی رخ داده بود. در این مطالعه در ابتدا یک نقشه LSSI با استفاده از روش نسبت فراوانی تهیه شد. سپس عوامل شرطی با وضوح مکانی بالاتر برای آموزش چندین مدل یادگیری ماشین و تولید نقشه LSSI جدید مورد استفاده قرار گرفت. مدل طبقه‌بندی Extra-Trees با دقت وزنی و امتیاز F_1 معادل ۰/۹۶، پس از بهینه‌سازی ابر پارامترها، بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان داد. در ادامه، سومین نقشه LSSI با استفاده از روش نسبت فراوانی و مشاهدات فرونشست زمین از داده‌های InSAR محاسبه شد.

این مطالعه نشان داد که اثربخشی استفاده از چندین عامل شرطی به اطلاعات افزوده شده هر لایه بستگی دارد و علاوه بر این، مقایسه بین نقشه‌های LSSI مختلف و داده‌های InSAR، نقش حیاتی وضوح مکانی را در نقشه‌برداری دقیق و در نتیجه ارتقای ارزیابی خطر فرونشست زمین برجسته می‌سازد.

Akbarian et al., (2023) به بررسی وضعیت فرونشست دشت اسدآباد همدان پرداختند و برخلاف بسیاری از تحقیقات پیشین، اثر عوامل انسانی در وقوع این پدیده را تحلیل کردند. در این پژوهش از تصاویر راداری سنتینل ۱، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸،

شناخته می‌شود که دلیل اصلی آن برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و فشرده شدن لایه‌های رسی است. با استفاده از هشت عامل مؤثر مانند افت سطح آب و بافت خاک، نقشه حساسیت فرونشست تهیه شد. نتایج نشان داد عملکرد گامای ۰/۹ بهترین مدل فازی بوده و ۲۵ درصد مساحت دشت (۹۳ کیلومترمربع) در طبقه حساسیت بسیار بالا قرار دارد. همچنین عمق سنگ‌بستر و ضریب آب‌گذری کم به‌عنوان کلیدی‌ترین شاخص‌های فرونشست شناسایی شدند و هشدار داده شد که ادامه برداشت بی‌رویه آب، این پدیده غیرقابل بازگشت را تشدید خواهد کرد.

در پژوهش Shirani et al., (2026)، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در حوزه‌های آبخیز استان اصفهان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری با پراکنده‌سازهای ماندگار (PSInSAR) انجام شد. این مطالعه در حوزه‌های اصفهان-برخور، نجف‌آباد، مهیار شمالی، مهیار جنوبی و کوهپایه-سجزی با داده‌های ماهواره Sentinel-1 صورت گرفت. نتایج نشان داد فرونشست در منطقه از مقدار ناچیز تا ۵۵ سانتی‌متر در بازه نه ساله متغیر است و نرخ سالیانه فرونشست در برخی مناطق به شش سانتی‌متر در سال می‌رسد. بیشترین فرونشست تجمعی در مناطق شهری و کشاورزی حوضه اصفهان-برخور و همچنین در رسوبات رسی مهیار جنوبی مشاهده شد. پهنه‌بندی خطر نشان داد که حوضه‌های اصفهان-برخور و مهیار جنوبی بیشترین مساحت با خطر بسیار زیاد را دارند و ارتباط مستقیمی بین فرونشست، کاربری اراضی و ویژگی‌های زمین‌شناسی وجود دارد.

پژوهش در مورد پدیده فرونشست زمین در استان چهارمحال و بختیاری از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است، زیرا این استان به‌عنوان یکی از با اهمیت‌ترین مخازن آبی کشور محسوب می‌شود. وقوع پدیده فرونشست زمین و شکل‌گیری شکاف‌های عمیق در دشت‌های مهمی همچون فرادنبه و بروجن و شهرکرد و غیره تهدیدی جدی برای زیر ساخت‌های عمرانی از جمله سدهای بزرگ، شبکه‌های انتقال آب و زمین‌های کشاورزی ایجاد می‌کند و بدون انجام پژوهش‌های جامع و دقیق، ما قادر به درک صحیحی از ابعاد بحران، شناسایی کانون‌های اصلی و پیش‌بینی روند توسعه

یک سامانه GIS است. در نهایت، خروجی عملی این فرایند، تولید نقشه‌های هوشمند پهنه‌بندی خطر است. این نقشه‌ها به مسئولان و شهرسازان کمک می‌کنند تا علاوه بر رصد محدوده‌های درگیر، بتوانند پیامدهای فرونشست را بر روی سازه‌ها، خطوط انتقال انرژی و سوخت، شبکه راه آهن و دیگر تأسیسات حیاتی پیش‌بینی کرده و برای مدیریت آنها برنامه‌ریزی کنند. در پژوهشی توسط Arab Ameri et al., (2019)، میزان فرونشست سالیانه در دشت مهیار با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری برآورد و پارامترهای مؤثر بر آن تحلیل شد. در این تحقیق از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ و هشت زوج تصویر راداری سنجنده ASAR در نوار C استفاده شد. نتایج نشان داد بیشینه نرخ متوسط فرونشست سالانه در منطقه حدود ۶/۴ سانتی‌متر در سال است و بیشترین فرونشست در مناطق کشاورزی به دلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی رخ داده است. همچنین رابطه‌ای مستقیم بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست مشاهده شد، به طوری که به ازای هر دو سانتی‌متر افت سطح چاه پیژومتری، ۰/۳۸۴ سانتی‌متر فرونشست اتفاق افتاده است.

در مطالعه‌ای دیگر توسط Al Sheikh et al., (2022)، فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری بررسی شد. در این پژوهش از روش زمین‌آمار کریجینگ برای تحلیل تغییرات سطح آب و از تصاویر راداری COSMO-SkyMed برای برآورد فرونشست استفاده شد. یافته‌ها نشان داد میانگین افت سالانه آب زیرزمینی ۴۵ سانتی‌متر است و بیشترین میزان فرونشست در منطقه کناره در بازه چهارماهه ۲/۵ سانتی‌متر بوده است. رابطه معنی‌داری بین افت آب و فرونشست مشاهده شد، به طوری که به ازای هر ۴۵ سانتی‌متر افت سطح آب، حدود یک سانتی‌متر فرونشست رخ داده است و مناطق با تراکم چاه‌های بیشتر، فرونشست شدیدتری را تجربه کرده‌اند.

در تحقیق دیگری Karimiasl et al., (2024)، حساسیت فرونشست زمین در آبخوان دشت سلماس را با استفاده از منطق فازی ارزیابی کردند. این دشت به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین مناطق فرونشست کشور

حیاتی را به‌عنوان بام ایران و منبع اصلی رودخانه‌های بزرگی مانند کارون و زاینده‌رود ایفا می‌کند. موقعیت جغرافیایی این استان در شکل ۱ نمایش داده شده است. استان چهارمحال و بختیاری با اقلیم نیمه مرطوب سرد و میانگین بارش سالانه ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر، به‌عنوان یکی از پربارش‌ترین و مهم‌ترین مناطق آبی کشور شناخته می‌شود. این استان نقش کلیدی در تأمین آب رودخانه‌های اصلی مانند کارون، زاینده‌رود و اردکان و بارش در مناطق غربی و شمالی استان مانند لردگان و اردل بیشتر بوده و غالباً به‌صورت برف است، در حالی که مناطق شرقی مانند شهرکرد بارش کمتری را تجربه می‌کنند. با این وجود، وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی و دشت‌های استان در شرایط بسیار نگران‌کننده‌ای قرار دارد. از ۵۴ دشت استان، ۴۷ دشت در وضعیت ممنوعه یا بحرانی هستند و سطح آب‌های زیرزمینی به طور متوسط سالانه حدود ۱/۵ متر افت می‌کند.

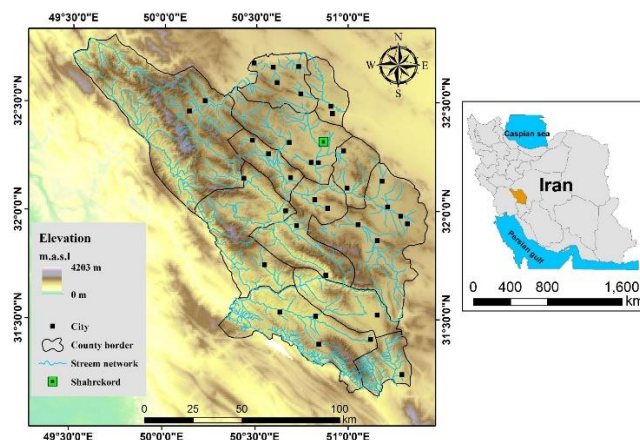
عوامل اصلی این بحران شامل برداشت بی‌رویه از طریق چاه‌های مجاز و غیرمجاز، تغییر الگوی بارش و کاهش بارش برف و گسترش کشاورزی ناپایدار با محصولات پرآب‌بر است. دشت‌های مهمی همچون دشت شهرکرد، بروجن، لردگان، فارسان و سامان همگی در وضعیت ممنوعه یا بحرانی قرار دارند که پیامدهایی مانند افت شدید سطح آب، خشک شدن قنات‌ها و چشمه‌ها و حتی خطر فرونشست زمین را به همراه دارد. این شرایط، وضعیت منابع آبی استان و حتی مناطق پایین‌دست را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

شکاف‌ها در آینده نخواهیم بود و این عدم توجه می‌تواند به فاجعه‌ای غیر قابل جبران از جمله نابودی منابع آب و خاک، تشدید مهاجرت و در نهایت، تهدید امنیت غذایی در منطقه شود. از آنجایی که استان کوهستانی چهارمحال و بختیاری به‌عنوان یکی از استان‌های تأمین و تولید آب شناخته می‌شود.

مطالعه پدیده فرونشست در این استان جهت حفظ حجم ذخایر منابع آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است و از آنجایی که هیچ پژوهش جامع و ویژه‌ای درباره این پدیده در استان چهارمحال و بختیاری انجام نشده است و به پدیده فرونشست به طور جدی پرداخته نشده است. از جمله نوآوری‌های این تحقیق آن است که این تحقیق اولین تحقیق در کشور در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که به بررسی پدیده فرونشست در مقیاس سطح کل استان پرداخته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: استان چهارمحال و بختیاری در رشته‌کوه‌های زاگرس، بین $24^{\circ} 49'$ تا $26^{\circ} 51'$ طول شرقی و $9^{\circ} 31'$ تا $38^{\circ} 32'$ عرض شمالی قرار گرفته است. این استان کاملاً کوهستانی است و مهم‌ترین رشته‌کوه آن، زردکوه بختیاری در غرب استان است که با بلندترین قله ۴۲۲۱ متری، یکی از مرتفع‌ترین و پر برف‌ترین نقاط زاگرس به شمار می‌رود. از نظر همسایگی، این استان از شمال و شرق به استان اصفهان، از جنوب به استان خوزستان و از غرب به استان‌های لرستان و کهگیلویه و بویراحمد منتهی می‌شود و نقش



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی استان چهارمحال و بختیاری

Fig. 1. Geographical location map of Chaharmahal and Bakhtiari Province

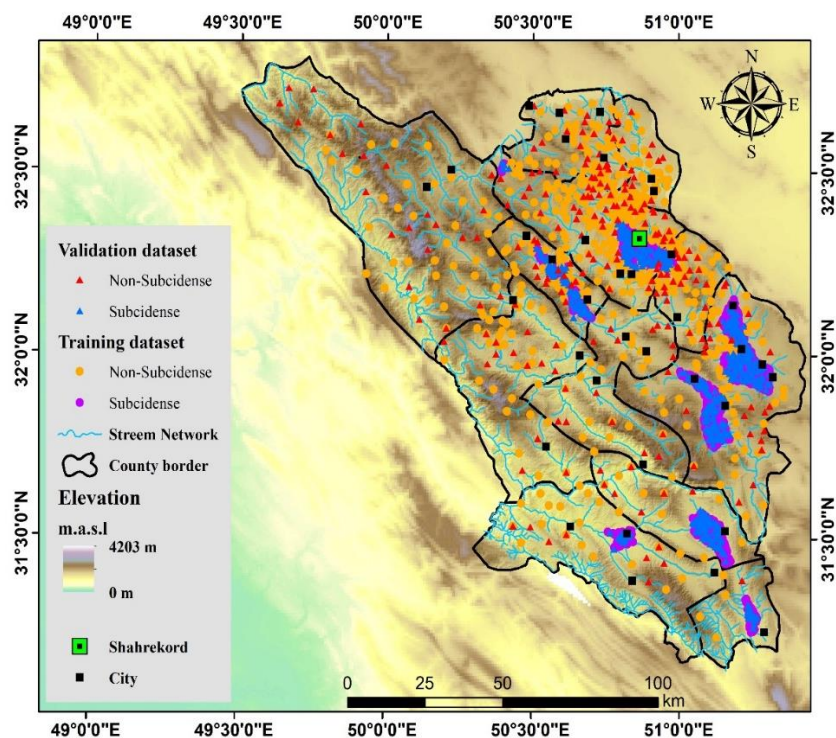
۷۰ درصد داده‌ها برای مرحله آموزش مدل استفاده شدند. سپس داده‌هایی که مدل اولیه در پیش‌بینی آن اشتباه کرده بود، شناسایی می‌شوند و مدل بعدی بیشتر روی این داده‌ها تمرکز می‌کند، این روند تکرار می‌شود و هر مدل جدید، نقاط ضعف مدل‌های قبلی را جبران می‌کند.

هر مدل ویژگی‌های مختلفی را بررسی می‌کند و در نهایت با ترکیب همه این نظرات، تشخیص دقیق‌تری انجام می‌شود. مقادیر داده‌های فرونشست‌ها با استفاده از داده‌های ترازیبی GPS که توسط سازمان (صمت) در سطح دشتهای استان استقرار یافته‌اند. همچنین بازدیدهای میدانی و اندازه‌گیری فرونشست در اطراف کانال‌های آبیاری و تیر برق‌ها و تاسیسات بتنی تهیه شده‌اند. نقشه پراکنش داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی فرونشست در منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای مدلسازی با استفاده از AdaBoost از ۳۰ متغیر به شرح جدول ۱ استفاده شد.

AdaBoost یکی از قدرتمندترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که در دسته مدل‌های Ensemble یا مجموعه‌ای قرار می‌گیرد. این مدل با ترکیب چندین مدل ساده، یک مدل قوی و دقیق می‌سازد. این الگوریتم از چندین مدل ساده (معمولاً درخت تصمیم کوتاه) استفاده می‌کند و شبیه یک تیم کاری عمل می‌کند که هر عضو ضعف‌های عضو قبلی را جبران می‌کند و هر مدل جدید، روی داده‌هایی تمرکز می‌کند که مدل‌های قبلی در پیش‌بینی آن اشتباه کرده‌اند.

داده‌های آموزشی (Training) مورد استفاده در مدلسازی شامل ۴۹۳ داده عدم حضور و ۱۸۵۹ داده حضور است و در مجموع ۲۳۵۲ داده در آموزش مدل استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در آزمون (Test) شامل ۲۳۶، داده عدم حضور و ۵۳۶، داده حضور می‌باشد که در مجموع ۷۷۲ داده آزمون است که برای ارزیابی مدل استفاده شده‌اند. لازم به ذکر است که داده‌ها به صورت تصادفی به دو دسته آموزش و ارزیابی تقسیم بندی شدند که تقریباً ۳۰ درصد برای ارزیابی و



شکل ۲- نقشه پراکنش داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی فرونشست در منطقه مورد مطالعه
Fig. 2. Distribution map of training and validation data for land subsidence in the study area

جدول ۱- متغیرهای مورد استفاده در مدل AdaBoost

Table 1. Variables used in the AdaBoost model

Types of Variables	Dependent Variables	Abbreviation for dependent variables
Topographic Variables	Elevation	dem
	Slope	aspect
	Aspect	Aspect directopn
	Plan Curvature	Plan cur
	Profile Curvature	Profile cur
	Slope Length	SL
	Slope Degree	Slope degree
	Topographic Position Index	TPI
	Topographic Roughness Index	TRI
	Topographic Wetness Index	TWI
Hydrological Variables	Flow Accumulation	Flow accu
	Flow Direction	Flow con
	Flow Density	flowD
	Distance from Stream	Stream dis
Climatic Variables	Aridity	Drough
	24-hour Precipitation	Rain_24 h
	Average Temperature	Temp aver
	Snow Depth	Snow depth
	Rain Average	Rain aver
	Minimum Temperature	Temp min
Environmental Variables	Maximum Temperature	Temp max
	Geology	geo
	Soil Moisture Index	MBI
	Distance from Fault	Fault dis
	Land Cover / Land Use	Land use
	Surface Sandiness	Surface sandclip
Anthropogenic Variables	Vegetation Cover	vegetation
	Distance from Roads and Habitations	Habitation dis
	Distance from Road	Road dis
	Distance from Village	Village dis

ج) محاسبه وزن مدل (خروجی طبقه‌بندی نهایی): پس از T تکرار طبقه‌بندی جدیدی با ترکیب خطی همه طبقه‌بندی‌های ضعیف با ضریب اهمیت (α_t) آنها ساخته می‌شود.

$$\alpha_t = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - \varepsilon(t)}{\varepsilon(t)} \right) \quad (4)$$

د) به‌روزرسانی وزن‌ها:

$$D_{t+1}(i) = \frac{D_t(i) \cdot \exp(-\alpha_t y_i h_t(x_i))}{Z_t} \quad (5)$$

که در این رابطه Z_t عامل نرمال‌سازی بوده و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Z_t = \sum_{i=1}^N D_t(i) \cdot \exp(-\alpha_t y_i h_t(x_i)) \quad (6)$$

در این رابطه α_t نشان دهنده وزن مدل ضعیف در ترکیب نهایی است. در نهایت مدل نهایی براساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$H(x) = \text{sign} \left(\sum_{t=1}^T \alpha_t h_t(x) \right) \quad (7)$$

در این رابطه‌ها، $h_t(x)$ مدل ضعیف در تکرار t ام و α_t نشان دهنده وزن مدل ضعیف در ترکیب نهایی است. روش کار SHAP: برای تعیین اولویت بندی متغیرها و تعیین اهمیت متغیرهای مؤثر بر پدیده فرونشست، از آنالیز SHAP استفاده شد. SHAP یک تکنیک قدرتمند

مراحل الگوریتم AdaBoost: مدل AdaBoost

دارای مزایای مختلفی شامل دقت بسیار بالا، سادگی پیاده‌سازی، مقاومت در برابر سوگیری بیش از حد (overfitting)، توانایی کار با داده‌های پیچیده است. مراحل الگوریتم AdaBoost به شرح زیر است.

۱- مقداردهی اولیه وزن‌ها: وزن همه نمونه‌های آموزشی در ابتدا به یک مقدار یکسان تنظیم می‌شود.

$$D_i = \frac{1}{n} \quad (1)$$

برای $i=1,2,3,\dots,N$

۲- برای هر $t=1$ تا T

الف) آموزش مدل ضعیف یا اولیه: یک مدل اولیه یا در اصطلاح مدل ضعیف ($h(t)$) بر روی داده‌های آموزشی با توزیع وزن‌های جاری آموزش داده می‌شود.

$$h_t(x) = \text{argmin} \sum_{i=1}^N D_t(i) \cdot I(y_i \neq h_t(x_i)) \quad (2)$$

ب) محاسبه خطای وزنی:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^N D_t(i) \cdot I(y_i \neq h_t(x_i)) \quad (3)$$

ε_t نشان دهنده خطای وزنی مدل ضعیف است و باید کمتر از ۰/۵ باشد. $D_t(i)$ وزن نمونه i ام در تکرار t ام است.

تصمیم‌گیری آگاهانه در کاربردهای مبتنی بر داده پشتیبانی می‌کند.

نتایج و بحث

پس از انتخاب متغیرها ماتریس همبستگی بین متغیرها بررسی شد و در این ماتریس، اگر همبستگی بین دو متغیر بیشتر از ۰/۷ بود، نشان‌دهنده رابطه قوی بین آن دو متغیر بود و برای جلوگیری از تداخل در مدلسازی، یکی از آنها حذف شد. در نتیجه هفت متغیر زیر به دلیل همبستگی بالای ۰/۷ حذف شدند و تعداد ۲۳ متغیر برای مدلسازی انتخاب شد. متغیرهای حذف شده با همبستگی بیشتر از ۰/۷ شامل عمق برف (snow depth)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، میانگین بارش (rain_aver)، حداقل دما (temp_min)، شاخص ناهمواری زمین (TRI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و حداکثر دما (temp_max) بودند.

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های مبتنی بر پایه RL در پیش‌بینی حساسیت فرونشست، پنج معیار عملکرد شامل سطح زیر منحنی (AUC)، خصوصیات عملکرد گیرنده (ROC)، مشخصه یا ویژگی (SPEC)، حساسیت (SENS)، Kappa، دقت (PREC)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به کار گرفته شد (Wang et al., 2023؛ Tian et al., 2023؛ Jaafari and Mafi- Choubin et al., 2025؛ Gholami, 2025).

این معیارها با استفاده از داده‌های آموزشی که شامل ۲۳۵۲ نقطه (۴۹۳ نقطه عدم فرونشست و ۱۸۵۹ نقطه دارای فرونشست) بودند محاسبه شدند.

پس از اجرای مدل AdaBoost شاخص $AUC=0.9736$ (نزدیک به یک) به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد عالی این مدل در تشخیص است همچنین دقت مدل (Precision) برابر با ۰/۹۳۶ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالا و صحیح پیش‌بینی است. مقدار شاخص Recall برابر ۰/۹۸۱، نشان‌دهنده توانایی بالای این مدل در پیدا کردن موارد مثبت است. حاصل شد که علاوه بر این مدل سازگاری خیلی زیاد در بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعیت داشت ($Kappa=0.8552$). همچنین ارزیابی دیگر معیارهای عملکرد مدل همچون $LogLoss=0.5052$ و $Specificity=0.8475$

در حوزه XAI است که برای تفسیر مدل‌های پیچیده ML با کمی کردن اهمیت ویژگی/متغیر و شناسایی multicollinearity بالقوه بین متغیرهای ورودی طراحی شده است. SHAP ریشه در نظریه بازی همکارانه دارد و هر ویژگی را یک مقدار Shapley تعیین می‌کند که نشان‌دهنده سهم حاشیه‌ای متوسط آن در پیش‌بینی مدل در تمام ترکیب‌های ممکن مشخصه‌ها است (Shapley, 1953).

در یادگیری ماشین مقادیر Shapley یک روش ریاضی پایه برای درک این که چگونه هر متغیر ورودی بر خروجی مدل تاثیر می‌گذارد، ارائه می‌دهند. برای یک مشخصه داده شده (X_j) سهم آن به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$X_j = \sum_{S \subseteq N \setminus \{j\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{|N|!} (v(S \cup \{j\}) - v(S)) \quad (8)$$

که N مجموعه همه ویژگی‌ها، S زیرمجموعه‌ای از مشخصه‌ها به جز (j)، $v(S)$ خروجی مدل است، زمانی که تنها مشخصه‌ها در S در نظر گرفته می‌شوند.

سپس پیش‌بینی کلی مدل برای یک نمونه به صورت مجموع سهم تمام ویژگی‌ها به اضافه مقدار پایه بیان می‌شود.

$$f(x) = X_0 + \sum_{j=1}^m X_j \quad (9)$$

که m تعداد کل ویژگی‌های ورودی و X_0 خروجی مدل مورد انتظار است زمانی که هیچ ویژگی وجود ندارد.

SHAP هر دو تفسیر موضعی و کلی را فراهم می‌کند. تفسیر جهانی از طریق نمودارهای beeswarm نشان داده می‌شود که چگونه هر ویژگی بر کل مجموعه داده‌ها تاثیر می‌گذارد و نشان می‌دهد که آیا تاثیر آن به طور کلی مثبت یا منفی است. تفسیر محلی از طریق نمودارهای نیرو و آبشار حاصل می‌شود که پیش‌بینی‌های منحصر به فرد را با نشان دادن مقادیر SHAP خاص برای هر ویژگی در یک نمونه ساده توضیح می‌دهد (Choubin et al., 2025).

این امر به کاربران کمک می‌کند تا درک کنند که چرا یک پیش‌بینی خاص انجام شده است و اینکه چگونه هر متغیر به آن کمک می‌کند. با ارائه بینش‌های شفاف، سطح نمونه و گسترده از داده‌ها SHAP اعتماد به مدل‌های یادگیری ماشین را افزایش می‌دهد و از

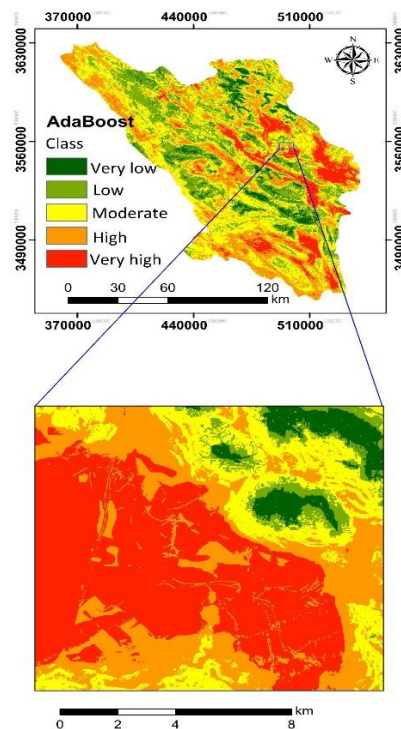
شهرستان‌های استان را تفکیک کرد، می‌توان بیان کرد که قسمت غربی شهرستان بروجن، جنوب شهرکرد، شمال غربی شلمزار، شمال غربی فارسان، غرب لردگان در معرض خطر فرونشست خیلی زیاد و قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی شهرستان کیار، قسمت‌های شمالی و جنوبی شهرستان اردل و شرق شهر بن دارای طبقه بندی خطر خیلی کم و قسمت‌های شمال غربی و غرب شهرستان کوهرنگ و جنوب لردگان در طبقه بندی خطر فرونشست زیاد و مناطق غرب شهرستان اردل و شمال لردگان و جنوب کوهرنگ و منطقه سامان در طبقه با پهنه خطر فرونشست متوسط و قسمت‌های جنوب شرقی شهرستان کیار، جنوب اردل و شمال شرقی و شرق شهرستان کوهرنگ در پهنه بندی خطر فرونشست کم واقع می‌شوند.

شکل ۴ نیز نشان داد که بیشترین مساحت پهنه بندی خطر فرونشست استان چهارمحال و بختیاری به‌ترتیب با مقادیر ۳۶ و ۲۷ درصد در طبقه با خطر فرونشست متوسط و طبقه با خطر زیاد قرار دارد و مناطق با طبقه خطر فرونشست خیلی زیاد و خیلی کم به‌ترتیب نه درصد و پنج درصد مساحت استان را در بر می‌گیرند.

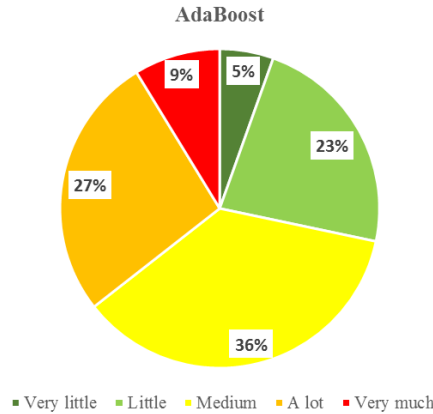
دهنده عملکرد خوب مدل در تهیه نقشه پهنه‌بندی میزان فرونشست منطقه است

در شکل ۳، نقشه پهنه بندی میزان فرونشست استان چهارمحال و بختیاری نمایش داده شده است. در این پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم طبقه بندی Natural Break از نظر سطح خطر به پنج طبقه با خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد، خطر بسیار زیاد تقسیم بندی شده است. در قسمت زوم شده نقشه، جزئیات بسیار بیشتری نمایش داده شده است و مناطق پر خطر فرونشست توسط مدل AdaBoost به‌صورت لکه‌ای و با مرزهای دقیق‌تر مشخص شده‌اند که برای مدیریت اجرا و پیش بینی خطر فرونشست و اجرای اقدامات لازم جهت کاهش خطر بسیار مناسب است.

همچنین نقشه طبقه‌بندی خطر فرونشست (شکل ۳) نشان داد که دشت‌های بروجن و شهرکرد به‌ترتیب در معرض بیشترین خطر قرار دارند و بخش‌های محدودی از دشت لردگان در رده‌بندی خطر بسیار زیاد جای می‌گیرد و سایر دشت‌های استان عمدتاً با سطوح خطر کم تا متوسط مواجه هستند. اگر با جزئیات بیشتری پهنه‌بندی طبقه خطر فرونشست



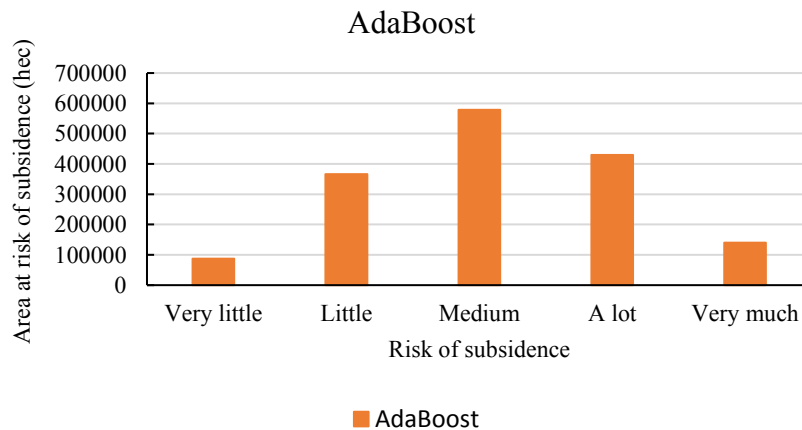
شکل ۳- نمودار طبقه بندی خطر فرونشست استان چهارمحال و بختیاری
 Fig. 3. Land subsidence risk classification chart of Chaharmahal and Bakhtiari Province



شکل ۴- نمودار ارزیابی خطر فرونشست استان چهارمحال و بختیاری
 Fig. 4. Land subsidence risk assessment map of Chaharmahal and Bakhtiari Province

معرض خطر فرونشست خیلی کم، ۳۶۶۲۳۰ هکتار از استان در معرض خطر فرونشست کم، ۵۷۸۴۹۴ هکتار از استان در معرض خطر فرونشست متوسط، ۴۲۹۸۹۸ هکتار از استان در معرض خطر فرونشست زیاد و ۱۳۹۸۶۴ هکتار از استان در معرض خطر فرونشست خیلی زیاد قرار دارد.

نمودار توزیع مساحت نواحی در معرض خطر فرونشست استان چهارمحال و بختیاری در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که این نمودار نشان می‌دهد، مناطق زیادی در طبقه‌های خطر فرونشست متوسط، زیاد و کم طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که ۸۷۲۷۰ هکتار از استان در



شکل ۵- نمودار توزیع مساحت‌های در معرض خطر فرونشست استان چهارمحال و بختیاری
 Fig. 5. Map of subsidence-prone area distribution in Chaharmahal and Bakhtiari Province

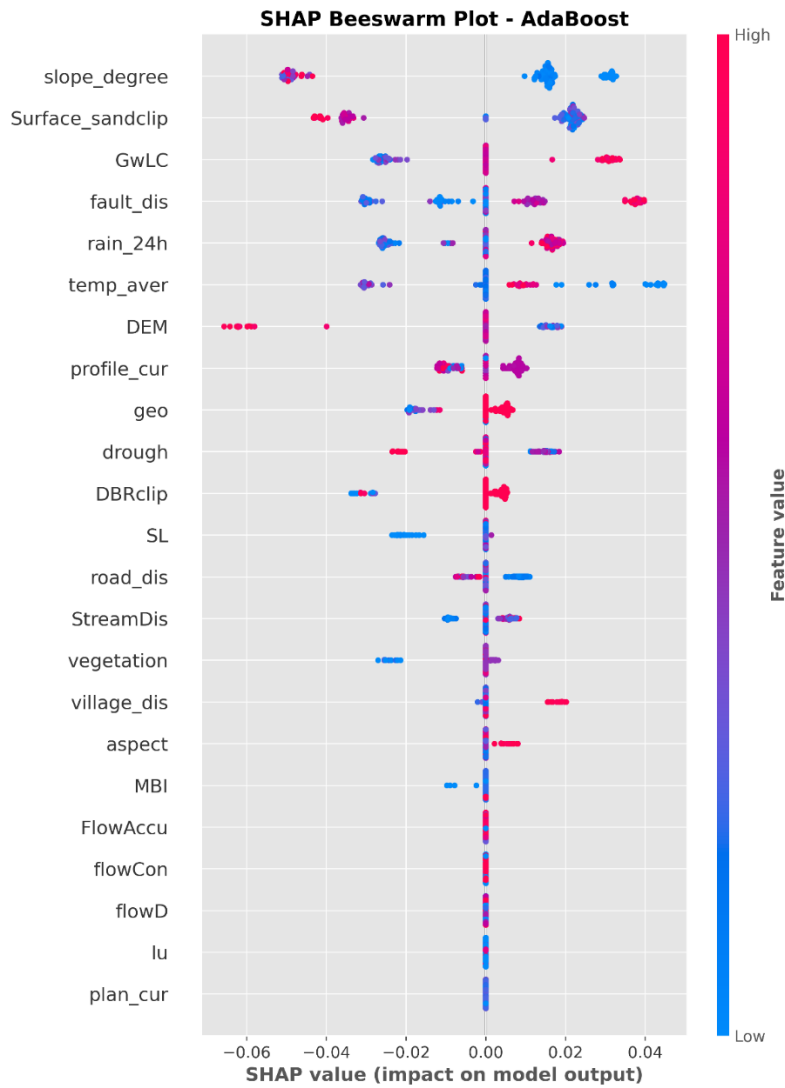
مستقیمی بر تشدید فرونشست دارد. در مقابل، با افزایش درصد شن سطحی، تأثیر این پارامتر بر فرونشست کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه استان چهارمحال و بختیاری یک استان کوهستانی است و غالب دشت‌های این استان در مناطق کم شیب واقع شده‌اند و فعالیت‌های کشاورزی و زراعی استان نیز در این دشت‌ها انجام می‌شود و معمولاً خارج از این دشت‌ها در استان عملیات زراعی که به تبع آن برداشت آب زیرزمینی رخ دهد وجود ندارد. مدل رابطه

برای تعیین پارامترهای مؤثر بر پدیده فرونشست، از آنالیز SHAP استفاده شد. بر اساس نتایج این آنالیز، پارامترهای درجه شیب زمین، درصد شن سطحی و تغییرات تراز آب زیرزمینی، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر پدیده فرونشست دارند.

همان‌طور که نمودار شکل ۶ نشان داده شده است که با کاهش شیب زمین، تأثیر آن بر فرونشست زمین افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش میزان افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات بیشتر تراز آب زیرزمینی، تأثیر

Montazeri and Emadodin, Kazemi et al., (2022), Aslani, (2019) اشاره شده است شامل تحقیقات
Orlandi و Akbarian et al., (2023) et al., (2023) در تناقض نمی‌باشد و این نتیجه با نتایج اکثر
et al., (2024) هستند.

منطقی بین شیب و فرونشست را آشکار کرده است و پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرونشست که افت سطح آب زیرزمینی را عامل اصلی می‌دانند همخوانی دارد که به‌عنوان نمونه برخی از مطالعات که به آنها



شکل ۶- نمودار تحلیل SHAP پارامترهای مؤثر بر پدیده فرونشست
Fig. 6. SHAP analysis diagram of parameters affecting the subsidence phenomenon

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل AdaBoost ابزاری بسیار مؤثر و قدرتمند برای پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در استان چهارمحال و بختیاری است. ارزیابی‌های انجام شده بر روی مدل، عملکرد خوب آن را تأیید می‌کند که مهم‌ترین شاخص‌های آن شامل موارد زیر است:

- شاخص AUC برابر با ۰/۹۷۳۶ که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل در تمایز بین مناطق مستعد و غیر مستعد فرونشست است.
- دقت (Precision) برابر با ۰/۹۳۵۹ که بیانگر صحت پیش‌بینی‌های مدل است.
- Recall برابر با ۰/۹۸۱۳ که نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای مدل در شناسایی مناطق واقعی در معرض خطر فرونشست است.

کاهش خسارات ناشی از خطر فرونشست به کار رود. همچنین مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی می‌تواند از تشدید این پدیده و خسارات ناشی از آن جلوگیری کند. همچنین عدم دسترسی به داده‌های به روز و دقیق از جمله داده‌های توپوگرافی، سطح اراضی زیر کشت، میزان آبیاری، عدم دسترسی به داده‌های به روز هواشناسی و هیدرولوژیکی از جمله محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شود و از جمله پیشنهادات تحقیقاتی و کاربردی این پژوهش آن است که به دشت‌های با افت سطح آب زیرزمینی بیشتر توجه شود زیرا که در آینده ممکن است به کانون‌های فرونشست در استان تبدیل شوند و مدیریت و نظارت بیشتر بر الگوی کشت و میزان برداشت آب‌های زیرزمینی می‌تواند روند فرونشست را کند و یا متوقف کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح بررسی پتانسیل فرونشست زمین در دشت شهرکرد با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی راداری و مدل‌سازی آب زیرزمینی با کد مصوب ۰۴۰۴۲۹-۰۴۱-۰۲۹-۴۲-۲ سازمان تات است

تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تایید همه نویسندگان است.

• ضریب کاپای برابر ۰/۸۵۵۲ که تأیید کننده تطابق قوی بین پیش‌بینی‌های مدل و واقعیت زمینی است.

همچنین نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست در استان چهارمحال و بختیاری نشان داد که دشت‌های بروجن و شهرکرد به ترتیب در معرض بیشترین خطر فرونشست قرار دارند و بخش‌های محدودی از دشت لردگان در رده‌بندی خطر بسیار زیاد جای می‌گیرد و سایر دشت‌های استان عمدتاً در سطوح با رده‌بندی خطر کم تا متوسط قرار می‌گیرند. نتایج آنالیز SHAP نیز نشان داد، پارامترهای زاویه شیب زمین، درصد شن سطحی و تغییرات تراز آب زیرزمینی، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر پدیده فرونشست دارند و نتایج همچنین نشان داد که با کاهش شیب زمین، تأثیر آن بر پدیده فرونشست افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش میزان افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات بیشتر تراز آب زیرزمینی، تأثیر مستقیمی بر تشدید فرونشست زمین دارد.

در مقابل، با افزایش درصد شن سطحی، تأثیر این پارامتر بر پدیده فرونشست کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش اهمیت مدیریت صحیح منابع آب و کنترل برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی را بیش از پیش نشان می‌دهد. نقشه طبقه‌بندی خطر فرونشست و نمودار ارزیابی خطر فرونشست ایجاد شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری علمی و کاربردی برای شناسایی مناطق پرخطر، اقدامات پیشگیرانه برای

منابع مورد استفاده

- Akbarian, M., Ghahroudi tally, M., 2023. Evaluation of land subsidence in Asadabad Hamedan plain and its hazards. *J. Environ. Hazard. Manage.* 10(4), 277 - 290 (in Persian).
- Arab Ameri, A., Rafiei, M., Rezaei, K., Shirani, K., Mohammadi Sabit, N., 2019. Annual subsidence rate estimation in the meyyar plain using radar interferometry method and analysis of effective parameters. *J. Water. Engin. Manage.* 11 (3), 661-675. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.110660.1307> (in Persian).
- Al Sheikh, A., Chatr Simab, Z., Vosoughi, B., Madiri, M., Pakdaman, M.S., 2022. Investigating land subsidence due to excessive groundwater withdrawal using radar interferometry technique: Marvdasht Aquifer. *J. Water. Engin. Manage.* 14(1), 114-125 (in Persian).
- Azarm, Z., Mehrabi, H., Nadi, S., 2025. Enhanced land subsidence interpolation through a hybrid deep convolutional neural network and InSAR time series. *Geosci. Model Develop.* 18(19), 6903-6919. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-6903-2025>, 2025
- Cao, Y., Zhang, W., Wang, J., Zhu, Y., 2022. Monitoring and modelling land subsidence using remote sensing and GIS: A comprehensive review. *Int. J. Appli. Earth Observa. Geoinform.* 114, 103045.
- Deros, S.N.M., Naim, M.R., Din, N.M., 2025. Explainable Artificial Intelligence (XAI) to interpret the contributing factors of land subsidence susceptibility prediction model. *Total Environ. Advance.* 200129. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2025.200129>
- Eghrari, Z., Delavar, M.R., Zare, M., Beitollahi, A., Nazari, B., 2023. Land subsidence susceptibility mapping using machine learning algorithms. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing*

- and Spatial Information Sciences 10, 129-136. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-129-2023>
- Emadodin, S., Nazari Ghazik., Z., 2023. Estimation of subsidence rate using of inSAR and groundwater level changes, case study of mashhad plain. *J. Geograph. Develop.* 73, 221-239 (in Persian).
- Ganjaeian, H., Asadi, M., Menbari, F., Ebrahimi, A., 2022. Analysis of subsidence status in Hamedan urban area using radar and satellite images. *J. Geograph. Environ. Hazard.* 11(4), 221-236. DOI:10.22067/geoh.2022.76383.1217 (in Persian).
- Hidayah, C.N., Pamungkasari, P.D., Ningsih, S., Azhiman, M.F., Widodo, J., Widayaka, E.S., 2025. Land subsidence analysis using machine learning algorithm random forest method in DKI Jakarta. *Green Intelli. Sys. Applica.* 5(1), 106-122. <https://doi.org/10.53623/gisa.v5i1.606>
- Janbaz Ghotemi, M., Khalghi, M., Abdekolahchi, A., Rostaie, M., 2023. The efficiency of the weighting method in gis environment in order to determine the effective factors on subsidence of Qazvin plain. *J. Water Resour. Res. Iran* 19(3), 118-135 (in Persian).
- Kazemi, A., Falahzadeh, H., Ghasemzade, F., 2022. Study of causes and strategies to control land subsidence in the plains of Iran. *Water Resour. Engin.* 15(4), 1-20 (in Persian).
- Karimiasl, S., Hessari, B., Zeinalzadeh, K., Erfanian, M., 2024. Assessment of land subsidence susceptibility in the Salmas Plain Aquifer, Northwestern Lake Urmia, utilizing fuzzy logic. *J. Water. Engin. Manage.* 16(3), 331-353. doi: 10.22092/ijwmse.2024.363148.2031 (in Persian).
- Mehrabi, A., Karimi, S., Khalesi, M., 2023. Spatial analysis of jiroft plain subsidence using the Coherence Pixel Technique (CPT). *Geograph. Environ. Plann.* 34(1), 99-116. doi 10.22108/gep.2022.133667.1525
- Mohammadi, J., 2023. Evaluation of land subsidence susceptibility in Semnan plain. *J. Sci. Engin. Water. Manage.* 17(63), 84-90 (in Persian).
- Montazeri, M., Aslani, F., 2019. Evaluation of land subsidence risk by applying gis in the Tehran and Alborz Provinces. *J. Know. Manage. Crisis Manage.* 9 (1), 35-47 (in Persian).
- Orlandi, D., Diaz, E., Tomas, R., Galatolo, F.A., Cimino, M.G., Pagli, C., Perilli, N., 2024. A machine learning approach for mapping susceptibility to land subsidence caused by ground water extraction. *Appli. Comput. Geosci.* 24, 100207. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2024.100207>
- Qiao, X., Chu, T., Krell, E., Tissot, P., Holland, S., Ahmed, M., Smilovsky, D., 2024. Interpretation and attribution of coastal land subsidence: An InSAR and machine learning perspective. *IEEE J. Selec. Topics Appli. Earth Observ. Remote Sens.* 17, 4768-4783. doi: 10.1109/JSTARS.2024.3361391
- 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. *GISci. Remote Sens.* 58(8), 1413-1433. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1991689>
- Rafiei Sardooi, E., Pourghasemi, H.R., Azareh, A., Soleimani Sardoo, F., Clague, J.J., 2022. Comparison of statistical and machine learning approaches in land subsidence modelling. *Geocart. International* 37(21), 6165-6185. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1933211>
- Shi, L., Gong, H., Chen, B., Zhou, C., 2020. Land subsidence prediction induced by multiple factors using machine learning method. *Remote Sens.* 12(24), 4044. <https://doi.org/10.3390/rs12244044>
- Shirani., K Pasandi., M., 2026. Land subsidence risk assessment and zoning in the watersheds of Isfahan Province using Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR). *J. Water. Engin. Manage.* 17(4), 534-552. doi: 10.22092/ijwmse.2025.367922.2091 (in Persian).
- Su, H., Xu, T., Xion, X., Tian, A., 2024. Optimization of land subsidence prediction features based on machine learning and SHAP value with Sentinel-1 InSAR Data. doi:10.21203/rs.3.rs-3880879/v1.
- Taheri, Z., Barzghari, G., Dideban, K., 2018. A framework to estimation of potential subsidence of the aquifer using algorithm genetic. *Iran-Water Resour. Res.* 14(2), 182-194 (in Persian).
- Teimorzadeh, N., 2023. Land subsidence and its consequences in cities and villages. 12th International Conference, Agricultural, Ecological Environment, Urban and Rural Development, International Academic Organization (in Persian).
- Yu, B., Xing, H., Ge, W., Yan, J., Li, Y.A., 2025. Explainable machine learning-based land subsidence susceptibility mapping: from feature importance to individual model contributions in ensemble system. *Earth Sci. Inform.* 18(2), 407. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01915-9>.