



Land Subsidence Hazard Zoning Using the MaxEnt Model (Case Study: Isfahan Province)

Parivash Alvandi,¹ , Mojgan Entezari² , Mousa Kordvani³

1. Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: alvandi1160330271@gmail.com

2 (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: m.entezari@geo.ui.ac.ir

3. Department of Civil Engineering, Soil and Foundation Mechanics, University of Estahban Branch, Estahban, Iran.

Email: mkordavani88@gmail.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

19 Nov 2025

Received in revised form:

8 Jan 2026

Accepted:

3 Mar 2026

pp.158-179

Keywords:

Land subsidence,

MaxEnt model,

zoning,

Isfahan Province

ABSTRACT

Land subsidence, a significant geohydrological hazard, has posed serious challenges to various regions around the world in recent years—particularly Iran. Due to its geographical position and related conditions, Iran faces high vulnerability to this phenomenon, resulting in extensive damage to vital infrastructure such as irrigation systems, urban structures, wells, and water, gas, and electricity distribution networks, as well as agricultural soils. Given that Isfahan Province is one of the critical regions in Iran regarding subsidence, accurate monitoring and analysis of contributing factors are of high importance. This study aims to predict and spatially zone areas susceptible to subsidence in Isfahan Province using the Maximum Entropy (MaxEnt) model. Initially, subsidence points were identified through satellite image processing (Sentinel-1) and field visits, and then digitized within a GIS environment. Fourteen environmental indicators influencing subsidence were prepared using GIS and SAGA GIS software. These included: Hydrological factors: distance from waterways, soil moisture, and drainage density; Geomorphological factors: slope, elevation, hillshade, relative slope position, slope length, and convergence; Geological factors: geological layers and fault distance; Human factors: land use and road distance. Land use maps were generated using Landsat-8 satellite imagery. (For MaxEnt model implementation, 70% of occurrence data were used for training and 30% for testing the model. The results of the Jackknife test showed that drainage density, elevation, soil moisture, and soil texture had the most significant impacts on subsidence occurrence in the studied region, while the convergence index had the least influence. Model validation was conducted using the ROC curve and the Area Under the Curve (AUC), with an AUC value of 0.807—indicating very good accuracy in subsidence risk zoning. The outcome of this study presents a comprehensive map of subsidence-prone zones, which can serve as an effective tool for land management planning, water resource strategies, and subsidence hazard mitigation in Isfahan Province.

Cite this article: Alvandi, P., Entezari, M. and Kordvani, M. (2026). Land Subsidence Hazard Zoning Using the MaxEnt Model (Case Study: Isfahan Province). *Quantitative Geomorphological Research*, 14(4). 158-179.

Extended Abstract

Introduction

Among destructive natural phenomena, land subsidence—alongside earthquakes, floods, and landslides—is considered one of the most devastating geomorphic hazards caused by tectonic processes and human activities. The main causes of this phenomenon include earthquakes, floods, excessive exploitation of groundwater and its decline, mining activities, tunnel construction, and more. Among all these potential factors, overuse of groundwater is the most critical issue. The gradual and slow decline of groundwater levels is the principal factor driving land subsidence. Overextraction from aquifers—especially in agricultural and residential zones—has made these areas the most susceptible to land subsidence. Land subsidence is considered one of the geomorphic hazards, characterized by slow and gradual movement that reveals its destructive effects over the long term. Among the direct impacts of this hazard, which damages the land itself, are cracking of buildings, roads, and bridges, damage to critical infrastructure such as pipeline networks and sewage systems, and alterations to the region's hydrographic patterns. Its indirect effects include increased maintenance costs for infrastructure, reduced value of land and property, population migration from affected areas, and disruption of economic activities (Kondordehnavi, 2024). Therefore, land subsidence causes such damages globally over spatial and temporal scales. This phenomenon, observed widely across the world and especially in Iran (Jalilini et al., 2017), has become a national crisis. The subsidence rate in Iran is estimated to be alarmingly 34 times higher than the global average of developed countries. Currently, more than 300 plains in Iran are affected by this phenomenon. In some areas, such as Kabootar Ahang Plain in Hamedan, Varamin, Nazarabad, Tehran, Mashhad, Neyshabur, and plains in provinces like Kerman, Isfahan, and Qazvin,

the situation has reached a critical stage with the formation of large sinkholes (Ahmadi, 2022). In arid and semi-arid regions, especially Iran, the main factor contributing to the intensification of subsidence is the excessive extraction of groundwater and the gradual destruction of aquifers (Raitab Abotaleb, 2020; Fasahiyeh et al., 2025). The lowering of the groundwater level results in a decrease in pore pressure in the fine-grained alluvial layers, leading to irreversible compaction and consolidation of these layers, and ultimately, permanent surface subsidence (Moghimi et al., 2021).

Methodology

This study aims to perform subsidence risk zoning in Isfahan Province using influential environmental indicators and the Maximum Entropy (MaxEnt) model. The research is structured into three main stages (Figure 2):

1) Data Identification and Preparation:

The required data include subsidence occurrence points and the environmental indicators affecting them.

a) Identifying Subsidence Locations: Subsidence locations were recorded through field surveys and satellite imagery analysis (Sentinel-1 and Google Earth). These points were digitized as a subsidence layer within GIS software.

b) Preparing Indicator Layers: After generating maps of the influential indicators, subsidence points across the province were digitized and used as input layers for the MaxEnt model.

2) Model Implementation:

The MaxEnt model was executed using the prepared data layers to predict and map subsidence-prone zones.

3) Model Validation:

Two key methods were used to evaluate and validate the final model:

a) Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC): This metric was used to assess the predictive accuracy of the model.

b) Jackknife Test: This test was applied to determine the relative importance and contribution of each indicator as an input variable in the MaxEnt model.

Results and discussion

Model validation using the ROC curve and AUC values confirmed the high accuracy of the MaxEnt model. The AUC value was 0.819 for the training sample and 0.807 for the test sample, both of which fall within the "very good" range. These results indicate the strong predictive capability of the MaxEnt model in identifying and zoning areas susceptible to land subsidence. This suggests that the developed model can serve as a reliable tool for subsidence risk assessment and land management planning in Isfahan Province.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that the MaxEnt model, utilizing 14 environmental indicators, possesses a high capability in identifying areas susceptible to land subsidence.

Among these indicators, drainage network density (41%), elevation (11%), land use (10%), soil moisture (9%), and soil texture (8.5%) were found to have the greatest influence on subsidence occurrence in Isfahan Province. The subsidence hazard map categorizes the province into four risk levels: low, moderate, high, and very high. Low-risk areas exhibit negligible subsidence rates and cover a large portion of the province. High and very high-risk zones, however, experience significantly elevated subsidence rates. Notably, the high-risk zones closely align with the province's major aquifers, including Kohpayeh–Segzi, Borkhar, Najafabad, and Buin–Miandasht aquifers.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

پهنه بندی خطر فرونشست با استفاده از مدل مکسنت (مطالعه موردی استان اصفهان)

پریوش الوندی^۱، مژگان انتظاری^۲✉، موسی کردوانی^۳^۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: alvandi1160330271@gmail.coim^۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: m.entezari@geo.ui.ac.ir^۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: mkordavani88@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرونشست زمین، یک مخاطره ژئوهیدرولوژیکی مهم، در سال‌های اخیر چالش‌های جدی را برای مناطق مختلف جهان، به ویژه ایران، ایجاد کرده است. موقعیت جغرافیایی و شرایط مرتبط با آن، ایران را در معرض آسیب‌پذیری بالایی نسبت به این پدیده قرار داده است که منجر به خسارات گسترده به زیرساخت‌های حیاتی مانند سیستم‌های آبیاری، سازه‌های شهری، چاه‌ها و شبکه‌های آبرسانی، گاز و برق و خاک‌های کشاورزی می‌شود. با توجه به اینکه استان اصفهان یکی از مناطق بحرانی کشور در زمینه فرونشست است، پایش دقیق وضعیت و تحلیل عوامل مؤثر بر آن از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش با هدف پیش‌بینی و پهنه‌بندی فضایی مناطق مستعد فرونشست در استان اصفهان، از مدل حداکثر آنترופی (MaxEnt) بهره گرفته است. در ابتدا، موقعیت نقاط فرونشست از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای (سنجینل-۱) و بازدیدهای میدانی استخراج و در محیط GIS رقومی‌سازی شد. سپس، ۱۴ شاخص محیطی تأثیرگذار بر فرونشست، شامل عوامل هیدرولوژیکی از جمله فاصله از آبراهه، رطوبت خاک، شبکه آبراهه، عوامل ژئومورفولوژیکی مانند شیب، ارتفاع، سایه روشن، شیب نسبی، طول شیب، همگرایی، عوامل زمین‌شناسی شامل لایه‌های زمین‌شناسی و فاصله از گسل و عوامل انسانی مانند کاربری اراضی و فاصله از جاده، با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و SAGA GIS تهیه شدند (نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر لندست-۸ تولید گردید). برای اجرای مدل MaxEnt، ۷۰ درصد از داده‌های حضور برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون مدل تخصیص یافت. نتایج آزمون Jackknife نشان داد که شاخص‌های تراکم شبکه آبراهه، ارتفاع، رطوبت خاک و بافت خاک بیشترین تأثیر را در وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند، در حالی که شاخص همگرایی کمترین سهم را ایفا کرده است. اعتبار سنجی مدل با استفاده از منحنی ROC و مساحت زیر منحنی (AUC) انجام شد که مقدار $AUC = 0.807$ نشان‌دهنده دقت خیلی خوب مدل در پهنه‌بندی خطر فرونشست می‌باشد. نتایج این مطالعه، نقشه‌ای جامع از پهنه‌بندی مناطق مستعد فرونشست ارائه می‌دهد که می‌تواند ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی مدیریت زمین، منابع آب و کاهش خطرات فرونشست در استان اصفهان باشد.

استناد: الوندی، پریوش، انتظاری، مژگان و کردوانی، موسی. (۱۴۰۵). پهنه بندی خطر فرونشست با استفاده از مدل مکسنت (مطالعه موردی استان اصفهان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴ (۴)، ۱۷۹-۱۵۷.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.538310.1572

مقدمه

مخاطرات طبیعی همواره بخش جدایی‌ناپذیری از زندگی بشر بوده و در مقاطع مختلف زمانی، پیامدهای گسترده‌ای بر جوامع انسانی و محیط زیست داشته‌اند. این حوادث غیرمنتظره که منجر به خسارات مالی و جانی فراوان می‌شوند، به عنوان مخاطرات طبیعی شناخته می‌شوند. در میان پدیده‌های طبیعی مخرب، فرونشست زمین در کنار زلزله، سیل و لغزش، از جمله ویرانگرترین مخاطرات ژئومورفیک ناشی از فرآیندهای زمین‌ساخت و فعالیت‌های انسانی به شمار می‌رود (توئیگ، ۱۹۹۸). عوامل اصلی وقوع این پدیده عبارتند از: زلزله، سیل، بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و کاهش آن، فعالیت‌های معدنی، ساخت تونل و غیره (ایرکس وستوسیمه، ۲۰۲۰؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۰). در میان همه این عوامل ممکن، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی مهمترین مسئله در این زمینه است (یو همکاران، ۲۰۲۰). کاهش سطح آب‌های زیرزمینی بصورت یک فرایند کند و تدریجی عامل اصلی فرونشست زمین است (گالووی و باری، ۲۰۱۱) برداشت بیش از حد از آبخوان‌ها به ویژه در مناطق کشاورزی و مسکونی، این مناطق را به مستعدترین مناطق برای وقوع فرونشست زمین تبدیل کرده است (اورهان و همکاران، ۲۰۲۱). فرونشست زمین یکی از مخاطرات ژئومورفیک محسوب می‌شود که دارای حرکتی کند و بطئی بوده و آثار مخرب خود را در بلندمدت نشان می‌دهد از اثرات مخرب این مخاطره که مستقیم بر زمین آسیب می‌زند میتوان به ایجاد ترک در ساختمان‌ها، جاده‌ها و پل‌ها آسیب به زیر ساخت‌های حیاتی مانند خطوط لوله شبکه فاضلاب و تغییر در شبکه الگوهای آب‌شناسی منطقه اشاره و آسیب‌های غیر مستقیم آن عبارت‌اند از افزایش هزینه‌های نگهداری زیر ساخت‌ها، کاهش ارزش زمین و املاک، مهاجرت جمعیت از مناطق آسیب دیده، اختلال در فعالیت‌های اقتصادی (کندر دهنوی، ۱۴۰۳) بنابراین فرونشست زمین در مقیاس فضایی و زمانی باعث چنین خسارت‌هایی در جهان میشود. این پدیده، که در نقاط مختلف جهان و به ویژه در ایران به وفور مشاهده می‌شود (جلینی و همکاران، ۱۳۹۶)، به یک بحران ملی تبدیل شده است. نرخ فرونشست در ایران به طور نگران‌کننده‌ای ۳۴ برابر میانگین جهانی کشورهای توسعه‌یافته برآورد می‌شود. در حال حاضر، بیش از ۳۰۰ دشت کشور درگیر این پدیده هستند که در برخی مناطق، همچون دشت کبوترآهنگ همدان، ورامین، نظرآباد، تهران، مشهد، نیشابور و دشت‌های استان‌های کرمان، اصفهان و قزوین، به مرحله بحرانی و تشکیل چاله‌های وسیع رسیده است (احمدی، ۱۴۰۱).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به ویژه در ایران، اصلی‌ترین عامل تشدید فرونشست، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و نابودی و تدریجی آبخوان‌ها است (ریتب ابوتالیب، ۲۰۲۰) و (فصاحیه و همکاران، ۲۰۲۵). کاهش سطح آب زیرزمینی منجر به کاهش فشار منفذی در لایه‌های ریزدانه آبرفتی، تحکیم و فشردگی غیرقابل برگشت این لایه‌ها، و در نتیجه، نشست دائمی سطح زمین می‌شود (مقیمی و همکاران، ۱۴۰۰). استان اصفهان با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، بارندگی‌های کم، خشکسالی‌های متوالی و فقدان رودخانه‌های دائمی (به جز زاینده‌رود که خود با چالش‌های آبی مواجه است)، برای تأمین نیازهای آبی خود شدیداً به سفره‌های زیرزمینی وابسته است این وابستگی مفرط، نرخ فرونشست را در این استان به شدت افزایش داده و منجر به بروز مشکلات زیست‌محیطی، اقتصاد و اجتماعی فراوانی شده که در صورت عدم کنترل، بحرانی‌تر خواهد شد. (طالب نیا و همکاران، ۱۴۰۲). این چالش‌ها شامل تخریب زیرساخت‌های شهری و روستایی، آسیب به اراضی کشاورزی، و تغییرات هیدرولوژیکی است که مدیریت بحران را ضروری می‌سازد. بنابراین پیش بینی نقشه حساسیت به

فرونشست زمین و پایش دقیق و مدل‌سازی فضایی فرونشست زمین، گامی اساسی در مدیریت و کاهش ریسک این پدیده محسوب می‌شود (انصاری، ۱۴۰۲).

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) امکان بررسی و تحلیل تغییر شکل سطح زمین را در مقیاس‌های مختلف فراهم آورده است. به‌طور خاص، تکنیک تداخل‌سنجی راداری با دیافراگم مصنوعی (InSAR) با روش‌های مختلفی نظیر (PS-InSAR) و (SBAS-InSAR)، به ابزاری قدرتمند برای اندازه‌گیری نرخ فرونشست زمین در بازه‌های زمانی طولانی و با دقت بالا تبدیل شده است. این روش‌ها، در کنار تکنیک‌های زمینی مانند ترازسنجی و GPS، داده‌های ارزشمندی را برای تحلیل و مدل‌سازی این پدیده پیچیده فراهم می‌کنند.

اخیراً، از داده‌های ماهواره‌ای مشاهدات رادار روزنه مصنوعی تداخل‌سنجی (InSAR) برای پایش و شناسایی مناطق فرونشست زمین استفاده شده است (کریم‌زاده و ماتسوکا ۲۰۲۰). تغییر شکل مکانی و زمانی زمین از طریق مشاهدات InSAR اندازه‌گیری می‌شود و یک سیستم سنجش از دور میکروویو است (اورهان و همکاران، ۲۰۲۱). هو و همکاران (۲۰۱۹)، از ۳۴ تصاویر (Sentinel-1A) برای پایش فرونشست زمین با استفاده از فناوری (InSAR) و سامانه ماهواره ناوبری جهانی (GNSS) استفاده کردند. چندین الگوریتم یادگیری ماشین (MLA) در طول زمان برای پیش‌بینی نقشه حساسیت فرونشست زمین استفاده شده‌اند، مانند رگرسیون لجستیک (تین بوی ۲۰۱۸، LR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) (محبی تفرشی و همکاران، ۲۰۲۰) ماشین بردار پشتیبان (SVM) (عرب عامری و همکاران، ۲۰۲۱)، (احمدی و همکاران، ۲۰۲۲)، درخت تصمیم (قاسمی و همکاران، ۲۰۲۵) و غیره. با این حال، جدیدترین مدل ترکیبی، یعنی ترکیبی از چندین MLA، به طور گسترده برای نتایج بهتر و معنادار برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که مدل ترکیبی برای ارائه دقیق طبقه‌بندی‌کننده‌های تکی به همراه دقت بالاتر آن استفاده شده است (فام و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر این، مدل ترکیبی همچنین ظرفیت مقابله با رابطه دشوار بین مقیاس‌های مختلف تأثیر و داده‌های مکانی را دارد (کانفسکی و همکاران، ۲۰۰۴). چندین مطالعه تحقیقاتی در مورد نقشه‌برداری حساسیت فرونشست زمین با استفاده از MLA و گروه آنها توسط محققان مختلف، مانند تین بوی^۱ و همکاران (۲۰۱۸)؛ (عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۹)؛ و بسیاری دیگر انجام شده است. با وجود حجم وسیعی از پژوهش‌های انجام شده، بررسی‌های موجود بیشتر بر پایش فرونشست با استفاده از روش‌های سری زمانی InSAR در بازه‌های زمانی متفاوت و در نواحی خاصی از استان اصفهان متمرکز بوده‌اند. با این حال، یک رویکرد جامع برای پهنه‌بندی مکانی خطر فرونشست در سطح کل استان اصفهان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین مبتنی بر داده‌های محیطی، که امکان شناسایی مناطق مستعد را بر اساس عوامل مؤثر فراهم آورد، همچنان ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، مدل آنتروپی حداکثر (MaxEnt) به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی توزیع پدیده‌ها با استفاده از داده‌های موجود (presence-only)، و عملکرد اثبات‌شده آن در مطالعات مخاطرات طبیعی، به عنوان ابزاری کارآمد برای رفع این شکاف تحقیقاتی مطرح می‌شود. این مدل با مقایسه ویژگی‌های محیطی نقاط وقوع فرونشست با نقاط پس‌زمینه (random background points)، قادر به تعیین احتمال وقوع پدیده در سایر نقاط است و می‌تواند یک نقشه جامع از آسیب‌پذیری فضایی ارائه دهد.

هدف اصلی این پژوهش، پهنه‌بندی فضایی مناطق مستعد فرونشست در کل استان اصفهان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (که داده‌های فرونشست را فراهم می‌کنند) و مدل یادگیری ماشین MaxEnt است. اهداف خاص این مطالعه شامل:

¹ Tien Bui

۱. شناسایی و تحلیل تأثیرگذارترین عوامل محیطی (شامل اشاره به چند نوع متغیر اصلی مانند: هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی و انسانی) بر وقوع فرونشست در استان اصفهان.

۲. تولید نقشه جامع پهنه‌بندی خطر فرونشست برای کل استان اصفهان.

۳. اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل MaxEnt در پیش‌بینی فرونشست.

داشته است. گوته^۱ و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی تکنیک‌های یادگیری ماشین و پیش‌بینی آماری (GLM, GAM, bundling, BPLDA, WOE, SVM, RF) برای مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش در اتریش پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تکنیک‌های RF و bundling در مجموع بهترین عملکرد پیش‌بینی را داشتند. قاسمی و همکاران (۲۰۲۳) از سه مدل آنتروپی حداکثر (ME) مدل خطی تعمیم‌یافته^۲ (GLM) و جنگل تصادفی^۳ (FR) برای ساختن نقشه حساسیت زمین لغزش برای ولایت بدخشان، افغانستان استفاده شد و به این نتیجه رسیدند که مدل RF نسبت به دو مدل دیگر عملکرد بهتری داشته است. جاویدان و همکاران (۲۰۲۴) به توسعه نقشه‌های خطر برای سیل، زمین لغزش و فرسایش خاک با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی (جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان^۴ (SVM)، درخت رگرسیون تقویت‌شده^۵ (BRT)، خطوط رگرسیون تطبیقی چندمتغیره^۶ (MARS)) در حوضه آبخیز گرگان‌رود پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل MARS (AUC=99.1%) بالاترین عملکرد پیش‌بینی را برای خطرات سیل، لغزش زمین و فرسایش خندقی ارائه کرد. با این حال، برای سیل و لغزش، مدل RF به ترتیب عملکرد عالی و خوبی را نشان داد. کانگ^۷ و همکاران (۲۰۲۵) به مطالعه خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی (Random Forest, XGBoost, LightGBM) و مفهوم واحدهای شیب (Slope Units) برای تقسیم‌بندی منطقه و تحلیل‌های دقیق‌تر در شهر ونزو در

مواد و روش‌ها

استان اصفهان با مساحتی حدود ۱۰۷۰۱۹ کیلومتر مربع بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این استان در مرکز ایران و در دشت زاینده رود واقع شده است. این استان از شمال به استان‌های قم، مرکزی و سمنان از جنوب به استان‌های فارس و کهگیلویه و بویراحمد از شرق به استان یزد و از غرب به استان‌های چهارمحال و بختیاری و لرستان محدود می‌شود. آب و هوای استان اصفهان به طور کلی معتدل و خشک است. متوسط میزان بارندگی سالانه ۱۱۶/۹ میلی‌متر، حداکثر درجه حرارت ۴۰/۶ درجه سانتی‌گراد، حداقل درجه حرارت ۱۰/۶ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. دمای هوا در استان از غرب به شرق افزایش می‌یابد. در بین مناطق استان، خور با میانگین دمای سالانه ۲۱ درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین و فریدون شهر با دمای میانگین سالانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد سردترین منطقه استان اصفهان می‌باشد (سلیمی، ۱۴۰۱). از نظر زمین‌شناسی، در استان اصفهان توالی‌های گسترده از نهشته‌های رسوبی، سنگ‌های دگرگونی و آذرین به سن‌های گوناگون رخمون دارد. سنگ‌های دگرگونی منسوب به پرکامبرین-پالئوزوئیک به طور عمده در نواحی خاوری و نهشته‌های مزوزوئیک و سنوسوئیک در دیگر بخش‌های استان برونزد دارند (اقاباتی، ۱۳۸۹) اراضی استان بر اساس شکل ظاهری و نحوه تشکیل، به ۹ تیپ اصلی تقسیم می‌شوند. هر کدام از تیپ‌های اراضی نیز با توجه به نوع خاک، شیب و

1. Goetz et al

2. Generalized Linear Model

3. Random Forest

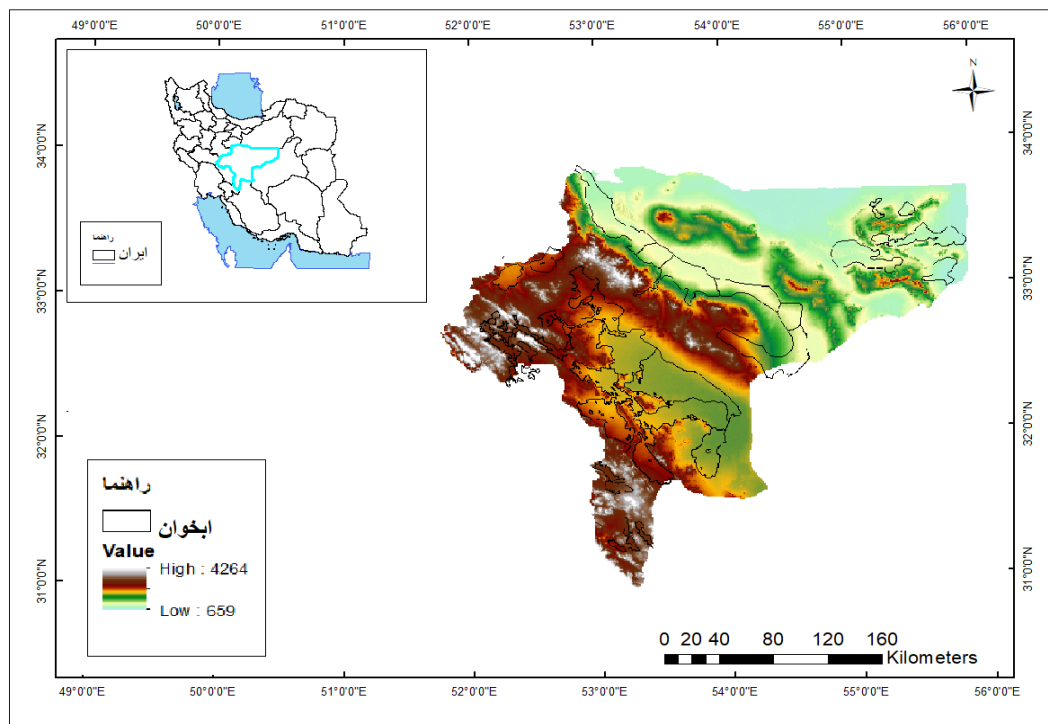
4. Support vector machines

5. Boosted Regression Tree

5. Multivariate adaptive regression splines

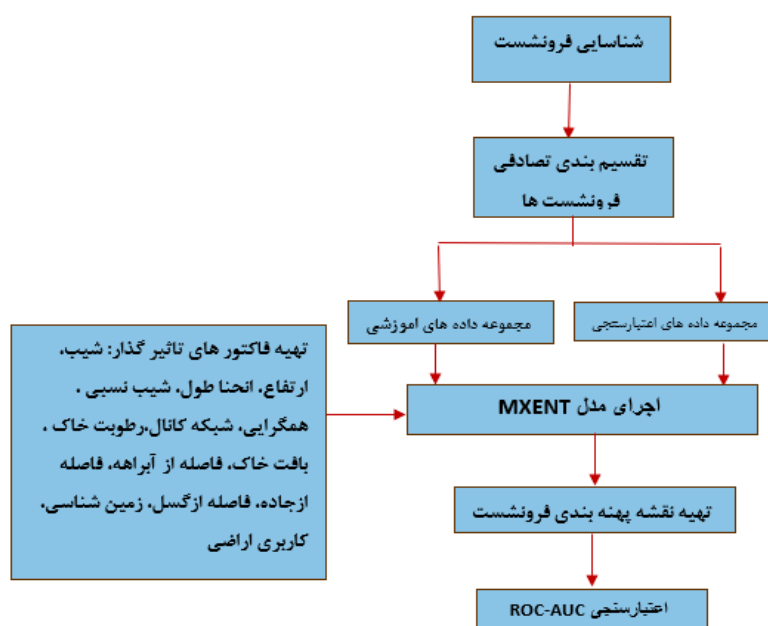
7. Kang et al

پستی و بلندی، نحوه تکامل و تشکیل خاک و افق‌های تشخیصی به چند واحد اراضی تقسیم میشوند این ۹ تیپ عبارتند از کوه‌ها، تپه‌ها، فلات‌ها، دشت‌های آبرفتی، دشتهای آبرفتی دامنه‌ها، دشت آبرفتی رودخانه‌ای، اراضی پست، دشت سیلابی، واریزه‌های بادبزنی شکل ابرفت‌های بادبزنی شکل (سالنامه آماری، ۱۴۰۱)



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (استان اصفهان)

روش دقیق پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. فلوچارت تحقیق در منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، هدف پهنه‌بندی فرونشست با استفاده از شاخص‌های تأثیر گذار بر رخداد فرونشست و مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت) در استان اصفهان است. این پژوهش بر سه مرحله اصلی استوار است (شکل ۲).

۱) شناسایی و آماده‌سازی داده‌ها:

داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش شامل نقاط وقوع فرونشست و شاخص‌های محیطی تأثیرگذار بر آن است. الف) شناسایی موقعیت فرونشست‌ها: موقعیت فرونشست‌ها از طریق بررسی‌های میدانی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و گوگل ارث ثبت گردید. این نقاط به عنوان لایه رقومی فرونشست‌ها در محیط نرم‌افزار GIS تهیه شدند. ب) تهیه لایه‌های اطلاعاتی شاخص‌های تأثیرگذار:

در مجموع ۱۴ شاخص تأثیرگذار در فرونشست شناسایی و تهیه گردید. این شاخص‌ها شامل: کاربری اراضی: نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر لندست ۸ و نرم‌افزار Google Earth Engine تهیه شد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد اراضی کشاورزی بیشترین میزان فرونشست را به دلیل برداشت بیش از حد آب دارند. زمین‌شناسی: لایه زمین‌شناسی از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ هزار سازمان زمین‌شناسی تهیه شد. مطالعات نشان داده‌اند که بیشترین نرخ فرونشست بر روی واحدهای زمین‌شناسی خاصی در حاشیه دشت‌های آبرفتی اصفهان رخ می‌دهد. از این رو مطالعه این شاخص ضروری است.

فاصله از جاده، گسل و آبراهه: این لایه‌ها در نرم‌افزار GIS تهیه شدند. نزدیکی به گسل‌ها و آبراهه‌ها می‌تواند بر میزان فرونشست تأثیرگذار باشد.

بافت خاک و رطوبت خاک: این لایه‌ها از سایت فایل سل (پرفکت دیتا) خریداری شده و در نرم‌افزار GIS طبقه‌بندی شدند. میزان رطوبت و بافت خاک (مانند رس و سیلت) از عوامل مهم در تراکم‌پذیری و فرونشست خاک هستند. شیب، ارتفاع، سایه‌روشن، ناحیه شبکه کانالی، همگرایی، شیب نسبی، فرورفتگی‌های بسته و طول شیب: این شاخص‌ها در نرم‌افزارهای GIS و SAGA GIS تهیه شدند. ارتفاع، شیب و مورفولوژی منطقه بر الگوی جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی و در نتیجه بر فرونشست تأثیر می‌گذارند. ناحیه شبکه کانالی نیز به دلیل ارتباط با زهکشی و سطح آب زیرزمینی حائز اهمیت است. نقشه شاخص‌های تأثیر گذار در شکل های ۳ و ۴ آورده شده است.

پس از تهیه نقشه‌های شاخص‌های تأثیرگذار، نقاط فرونشست در سرتاسر استان رقومی شده و به عنوان لایه‌های ورودی به مدل MaxEnt استفاده گردید.

۲) مدل‌سازی مکسنت:

مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) یکی از فناوری‌های یادگیری ماشین (MLTs) است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد. این مدل بر اساس اصل آنتروپی، شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین می‌کند (رحمتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). به طور کلی، MaxEnt توزیع احتمال هدف را بر اساس اصل حداکثر آنتروپی و توزیع احتمال وقوع فرونشست زمین در این مطالعه تخمین می‌زند. اصول عملکردی این مدل بصورتی است که توزیع

¹ Rahmati

احتمالاتی داده‌های هر یک از لایه‌های رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست را استخراج می‌نماید. این توزیع‌ها بر اساس رابطه (۱) برای محاسبه آنتروپی و رابطه (۲) برای توزیع احتمالاتی گیبس به دست می‌آیند:

$$(1) H(p) = -\sum_{x \in X} p(x) \log(x)$$

$H(p)$ مقدار آنتروپی احتمالاتی متغیرموردنظر، $\ln$ الگاریتم طبیعی، X مقدار ارزش هر سلول و X مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. توزیع احتمالاتی Gibbs برای هریک از متغیرهای مستقل مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$(2) q_{\lambda}(x) = (e^{\lambda \cdot t(x)}) / Z_{\lambda}$$

$q_{\lambda}(x)$ تابع توزیع Gibbs، λ وزن متغیرموردنظر، Z_{λ} ثابت نرمال کننده تابع Gibbs هستند.

برای اجرای مدل MaxEnt و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرونشست، ۷۰ درصد از داده‌های مربوط به موقعیت فرونشست‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای تست مدل استفاده شد. این تقسیم‌بندی تصادفی جهت اطمینان از قابلیت تعمیم مدل صورت گرفت. به منظور تعیین رابطه وقایع فرونشست و هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع آن، از "اصل آنتروپی" و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشین استفاده شد. این منحنی‌ها روابط بین متغیرهای محیطی و احتمال وقوع فرونشست را نشان می‌دهند.

(۳) اعتبار سنجی مدل:

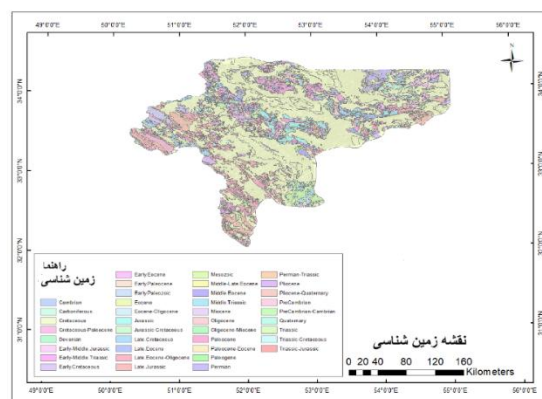
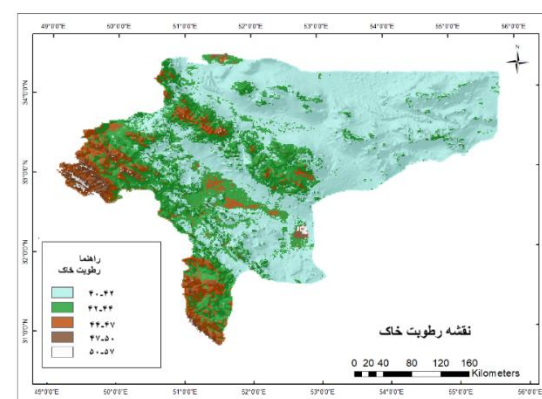
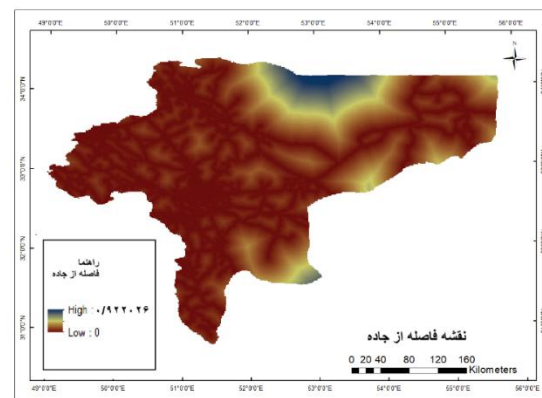
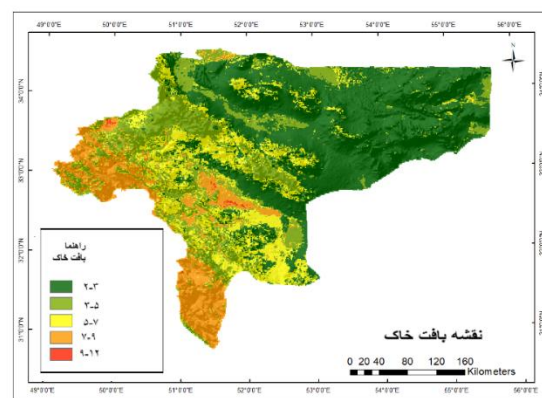
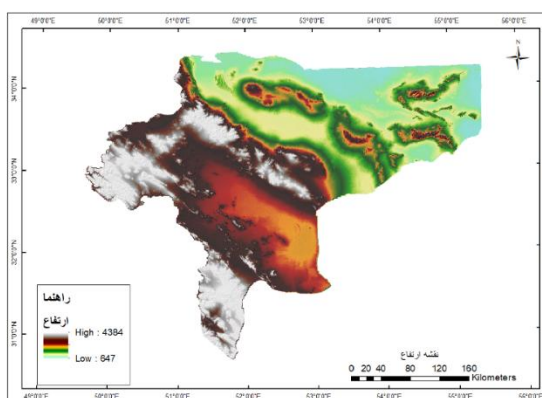
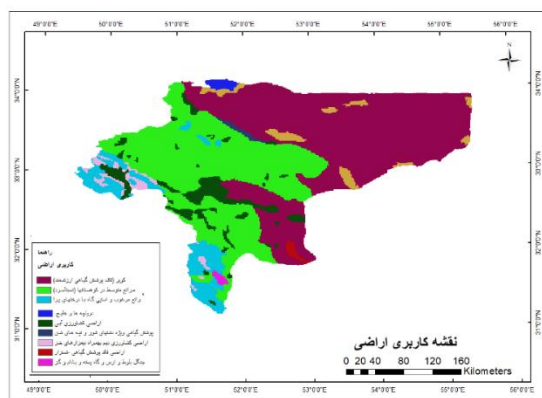
برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل نهایی، از دو روش کلیدی استفاده شد:

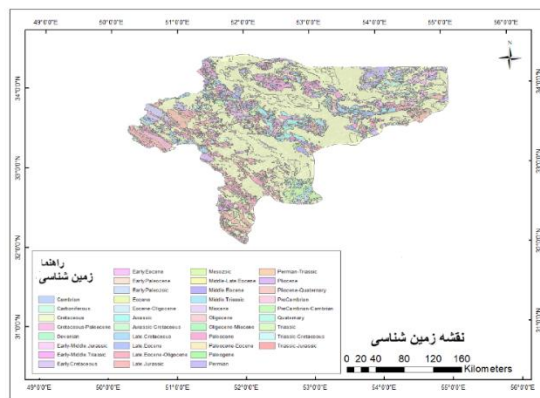
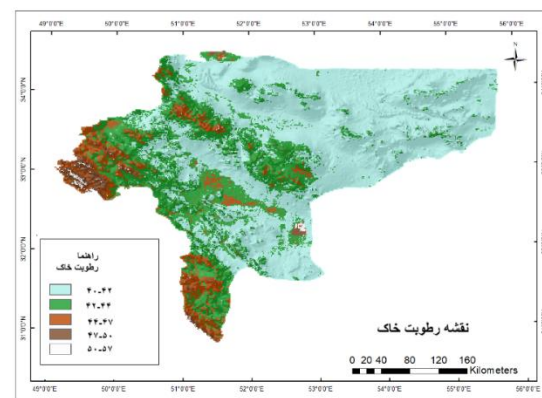
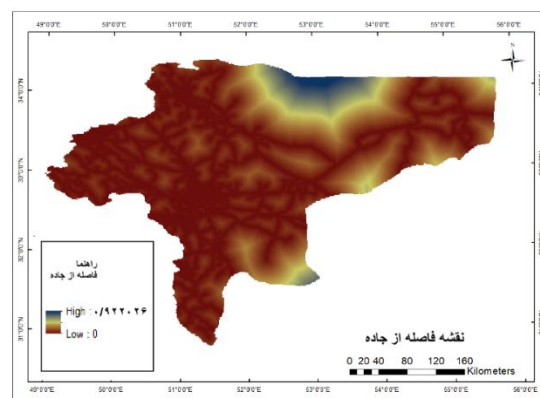
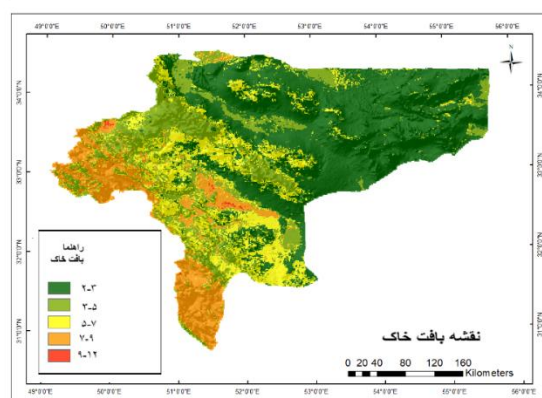
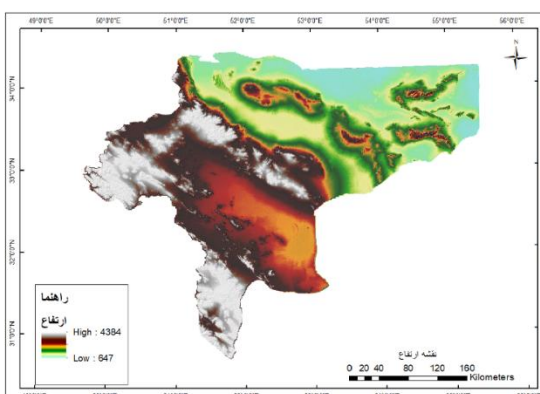
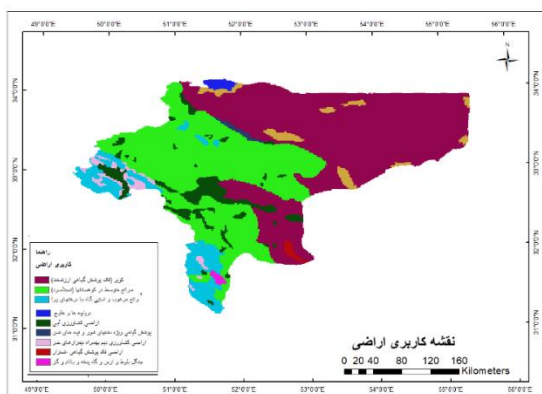
الف) شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای منحنی (ROC): این شاخص برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل به کار رفت. چنانچه سطح زیر منحنی (AUC) بیش از ۰.۹ باشد، قدرت تشخیص مدل بسیار عالی در نظر گرفته می‌شود. منحنی ROC حساسیت مدل (True Positive Rate) را در برابر ویژگی مدل (False Positive Rate) در آستانه‌های مختلف طبقه‌بندی نمایش می‌دهد.

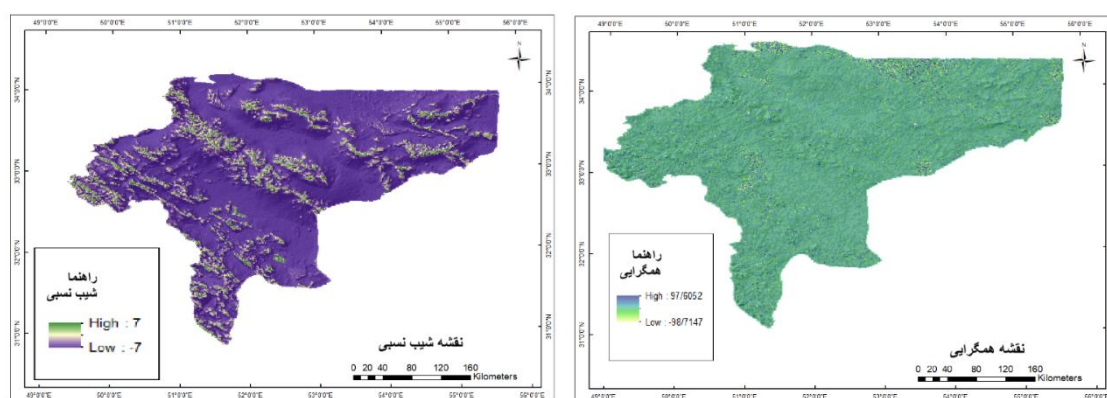
ب) آزمون (Jackknife): این آزمون برای تعیین میزان تأثیر و اهمیت هر یک از شاخص‌ها به عنوان متغیرهای ورودی در مدل MaxEnt استفاده شد. آزمون Jackknife با حذف متوالی هر متغیر و اجرای مدل، تغییر در میزان "گین (gain)" مدل را ارزیابی می‌کند که نشان‌دهنده سهم نسبی آن متغیر است.

جدول ۱: معیارهای تاثیر گذار بر فرونشست استان اصفهان.

ردیف	معیارها	روش مورد استفاده
۱	شیب	زوربرگن وتورن (۳۲)
۲	شیب نسبی	الیا وکنارد (۲۰)
۳	طول شیب	زوربرگن وتورن (۳۲)
۴	شاخص همگرایی	کوته و لحمیر (۱۰)
۵	سایه روشن	زوربرگن وتورن (۳۲)
۶	شبکه کانال	الیا وکنارد (۲۰)
۷	زمین شناسی	نقشه سازمان زمین شناسی تهیه شده در نرم افزار جی ای اس ۱۰/۸
۸	فاصله از آبراهه	تهیه شده در نرم افزار جی ای اس ۱۰/۸
۹	فاصله ازجاده	تهیه شده در نرم افزار جی ای اس ۱۰/۸
۱۰	فاصله از گسل	تهیه شده در نرم افزار جی ای اس ۱۰/۸
۱۱	کاربری اراضی	گوگل ارث انجین
۱۲	بافت خاک	تهیه شده در نرم افزار جی ای اس ۱۰/۸
۱۳	رطوبت خاک	تهیه شده در نرم افزار جی ای اس ۱۰/۸
۱۴	ارتفاع	تهیه شده در نرم افزار جی ای اس ۱۰/۸







شکل ۳: نقشه شاخص‌های تأثیر گذار

یافته‌های پژوهش

این پژوهش با هدف پهنه بندی فرونشست، به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی مهم، در استان اصفهان انجام شده است. برای این منظور، از مدل مکسنت با ۱۴ شاخص تأثیرگذار به عنوان متغیرهای ورودی استفاده گردید. ابتدا، نواحی دارای فرونشست به صورت رقومی شناسایی و ثبت شدند. سپس، داده‌های فرونشست به نسبت ۷۰ درصد برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای صحت سنجی آن تفکیک شدند. برای ارزیابی تأثیر هر متغیر بر میزان فرونشست در استان اصفهان، از دو روش درصد مشارکت هر متغیر با استفاده از خروجی مستقیم مکسنت و آزمون Jackknife استفاده شد.

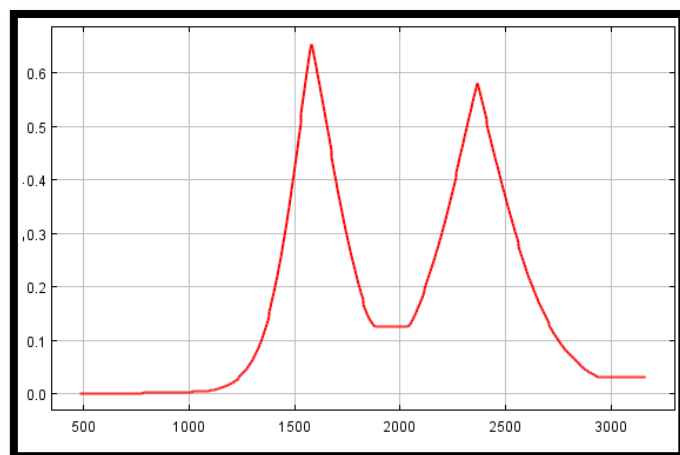
آزمون Jackknife به طور خاص، اهمیت هر یک از شاخص‌ها را به عنوان متغیر وابسته در بروز فرونشست مورد ارزیابی قرار داده است. در مدل مکسنت، از آنجایی که متغیرها به یکدیگر وابسته در نظر گرفته می‌شوند و تأثیر هر شاخص بر دیگری اهمیت دارد، از الگوی مدل‌های متغیرهای جایگزینی تصادفی استفاده شد. در این روش، در هر مرحله از تکرار، میانگین تأثیرات سایر پارامترها به ارزش هر پارامتر اضافه شده و جایگزین ارزش قبلی آن می‌شود.

تحلیل درصد مشارکت متغیرها در مدل نشان داد که شبکه کانالی (۴۱.۵٪) بیشترین تأثیر را بر فرونشست منطقه دارد. پس از آن، ارتفاع (۱۱٪)، کاربری اراضی (۱۰٪)، رطوبت خاک (۹٪) و بافت خاک (۸.۵٪) به ترتیب از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار هستند. شاخص‌های فاصله از جاده (۷.۶٪) و فاصله از گسل (۰.۸٪) نیز مؤثر بوده‌اند، در حالی که همگرایی (۰.۲٪) کمترین تأثیر را نشان داده است.

تأثیر شاخص‌های کلیدی

شبکه آبراهه‌ها به عنوان موثرترین عامل می‌تواند از جنبه‌های مختلف هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی بر فرونشست زمین تأثیرگذار باشد (شکل ۴) یکی از مهم‌ترین عوامل، نوسانات سطح آب زیرزمینی است. رودخانه‌ها و شبکه‌های آبراهه‌ای اغلب نقاط اصلی تخلیه آب زیرزمینی هستند، به‌ویژه در مناطق آبرفتی. برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های زیرزمینی نزدیک به این شبکه‌ها، منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار منفذی در رسوبات دانه ریز می‌شود. این امر به تحکیم و

فشرده شدن لایه‌ها و در نهایت فرونشست سطح زمین می‌انجامد. در مقابل، آبراهه‌ها می‌توانند منابع حیاتی برای شارژ مجدد سفره‌های آب زیرزمینی باشند. بنابراین، هرگونه تغییر در رژیم جریان آن‌ها (مانند سدسازی یا خشکسالی) که منجر به کاهش شارژ شود، پتانسیل فرونشست را تشدید می‌کند. یکی دیگر از اثرات این عامل فرسایش و پدیده لوله زایی^۱ است. جریان آب در آبراهه‌ها، به خصوص در خاک‌های سست و مستعد فرسایش، می‌تواند منجر به فرسایش زیرسطحی شود. پدیده لوله‌زایی، که در آن کانال‌های زیرزمینی توسط جریان آب و حمل ذرات خاک ایجاد می‌شوند، می‌تواند به تدریج گسترش یابد و در نهایت به ریزش و فرونشست ناگهانی زمین منجر شود. در نتیجه نزدیکی به شبکه آبراهه‌ها خطر این پدیده را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. همچنین رسوبات آبرفتی نهشته شده توسط رودخانه‌ها و آبراهه‌ها اغلب شامل لایه‌های رس و سیلت با تخلخل بالا هستند که به شدت مستعد تحکیم ناشی از بارگذاری و تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشند. فعالیت‌های انسانی مرتبط با شبکه‌های آبراهه‌ای، مانند ساخت کانال‌ها، سدها، دیواره‌های رودخانه و تغییر مسیر آن‌ها، می‌توانند مستقیماً بر رژیم آب زیرزمینی و پایداری زمین اثر بگذارند. در منطقه مورد مطالعه به نظر می‌رسد زهکشی برای کشاورزی و موارد مشابه در کنار آبراهه‌ها، منجر به پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و در نتیجه فرونشست شده است (شکل ۵). لازم به ذکر است که مطابق با نتایج پژوهش‌های گسترده در مقیاس ملی و منطقه‌ای، افت سطح آب‌های زیرزمینی ناشی از برداشت‌های بی‌رویه و تداوم دوره‌های خشکسالی، به‌عنوان اصلی‌ترین عامل بروز پدیده فرونشست در کشور ایران شناخته می‌شود. هرچند هدف این پژوهش تمرکز بر تحلیل سایر متغیرهای محیطی و ژئومورفولوژیکی مؤثر بر فرونشست بوده است، یافته‌های حاصل از بررسی نقش شبکه آبراهه‌ها نیز مؤید آن است که تغییرات رژیم هیدرولوژیکی، از طریق تأثیر بر نوسانات سطح آب زیرزمینی، نقشی تعیین‌کننده در فرآیند فرونشست ایفا می‌کند. به بیان دیگر، هرگونه تغییر در شرایط طبیعی یا انسانی مرتبط با جریان‌های سطحی و زیرسطحی، می‌تواند به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم در تشدید افت سطح آب و متعاقب آن، افزایش خطر فرونشست مؤثر باشد.



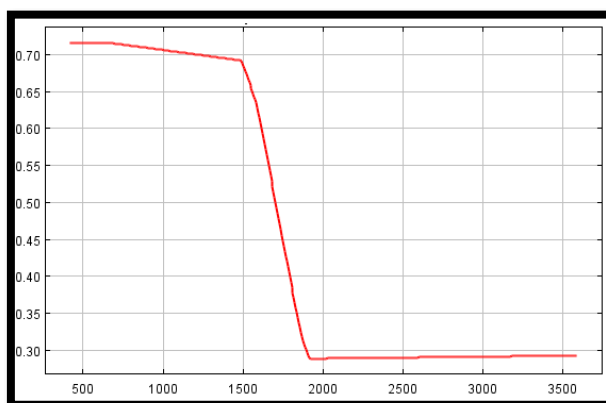
شکل ۴: نمودار شبکه زهکشی

¹ - Piping



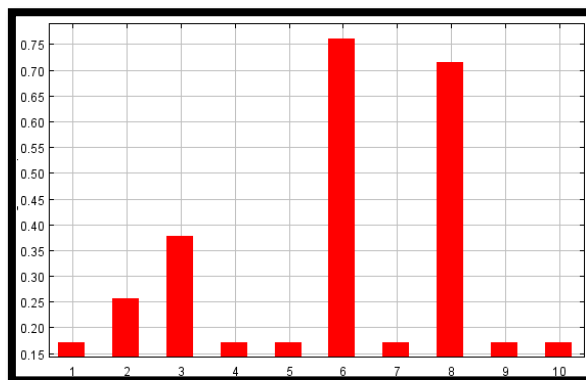
شکل ۵: شبکه زهکشی وزمین های کشاورزی

دومین شاخص تأثیرگذار، ارتفاع است. یافته‌های ما و مطالعات پیشین نشان می‌دهند که بیشترین فرونشست‌ها در دشت‌ها و مناطق با ارتفاع بسیار کم رخ می‌دهند. این پدیده بیانگر رابطه معکوس فرونشست با ارتفاع است؛ به این معنی که هرچه ارتفاع کمتر باشد، احتمال و شدت فرونشست بیشتر است.



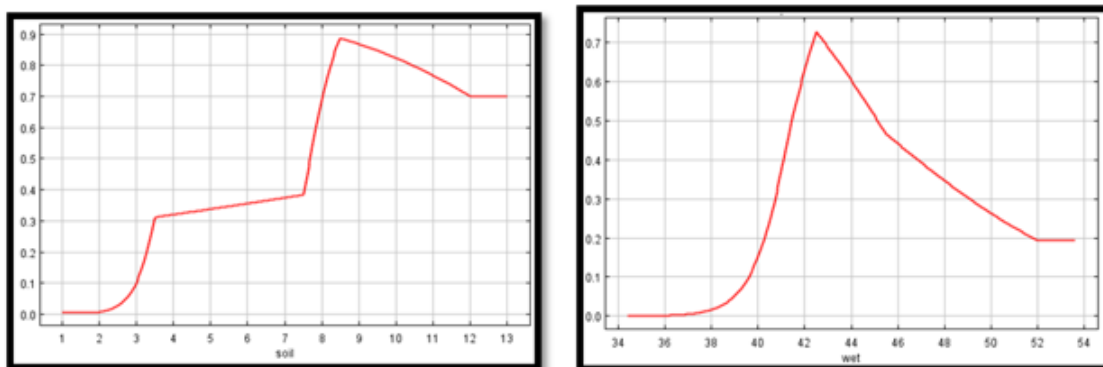
شکل ۶: نمودار ارتفاع

شاخص تأثیرگذار بعدی کاربری اراضی است. فرونشست رابطه مستقیمی با نوع و شدت کاربری اراضی دارد. در مناطقی که زمین به طور گسترده برای کشاورزی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث کاهش شدید سطح سفره‌های آب و در نتیجه تشدید فرونشست می‌شود. همچنین، در کاربری‌های شهری و صنعتی، افزایش بار سازه‌ای و احداث ساختمان‌های سنگین بدون در نظر گرفتن ظرفیت ژئومکانیکی خاک، به تسریع این فرآیند کمک می‌کند.



شکل ۷: نمودار کاربری اراضی

شاخص‌های بافت و رطوبت خاک نیز نقش مؤثری در بروز و شدت فرونشست زمین دارند. خاک‌های ریزدانه مانند رس و سیلت، به دلیل ساختار فیزیکی متراکم و خاصیت تراکم‌پذیری بالا، در برابر کاهش فشار آب منفذی^۴ بسیار آسیب‌پذیر هستند. هنگامی که سطح آب زیرزمینی افت می‌کند، فضای بین ذرات در این نوع خاک‌ها از آب تهی شده و ساختار آن دچار فشردگی می‌شود که در نهایت منجر به فرونشست سطح زمین خواهد شد.



شکل ۸: نمودار رطوبت خاک و بافت خاک

ارزیابی مدل و پهنه‌بندی

جدول ۲ میزان مشارکت هر یک از پارامترها را به تفصیل نشان می‌دهد و شکل ۷ منحنی پاسخ مدل را ارائه کرده است. این منحنی‌ها، تأثیر پارامترهای انتخاب شده بر احتمال وقوع فرونشست در یک مکان خاص را میسر می‌سازند. در این نمودارها، محور X معیار معینی برای پارامتر مورد بررسی را نشان می‌دهد و محور Y، میزان احتمال پیش‌بینی شده (بر اساس خروجی منطقی مدل) را نمایش می‌دهد. گرایش رو به بالا در منحنی، مشخص‌کننده رابطه مثبت و حرکت رو به پایین نشان‌دهنده رابطه منفی است. شدت این حرکات نیز میزان رابطه پارامتر با احتمال فرونشست را مشخص می‌کند.

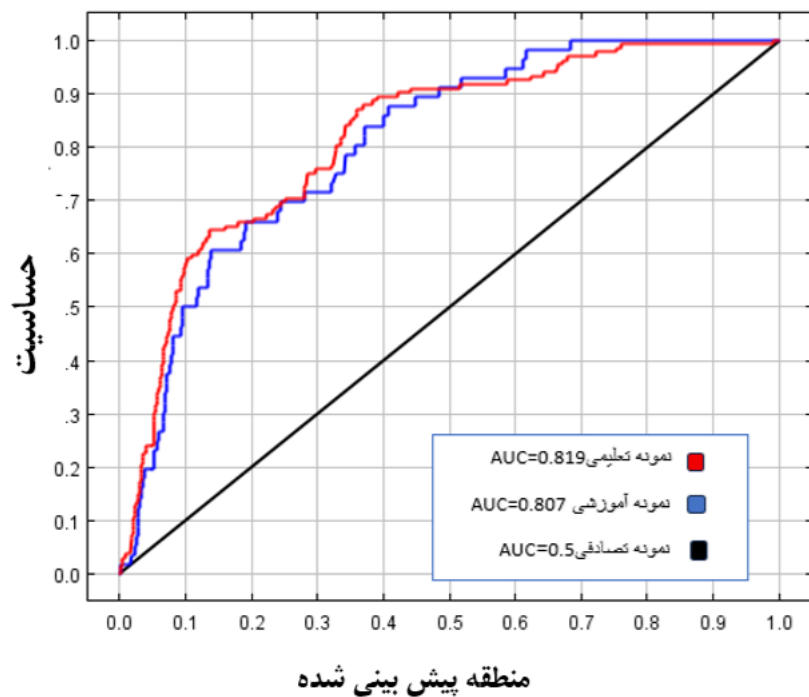
⁴- Pore Water Pressure

مقدار سطح زیر منحنی (AUC) مدل برابر با ۰.۸۰۷ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی فرونشست است.

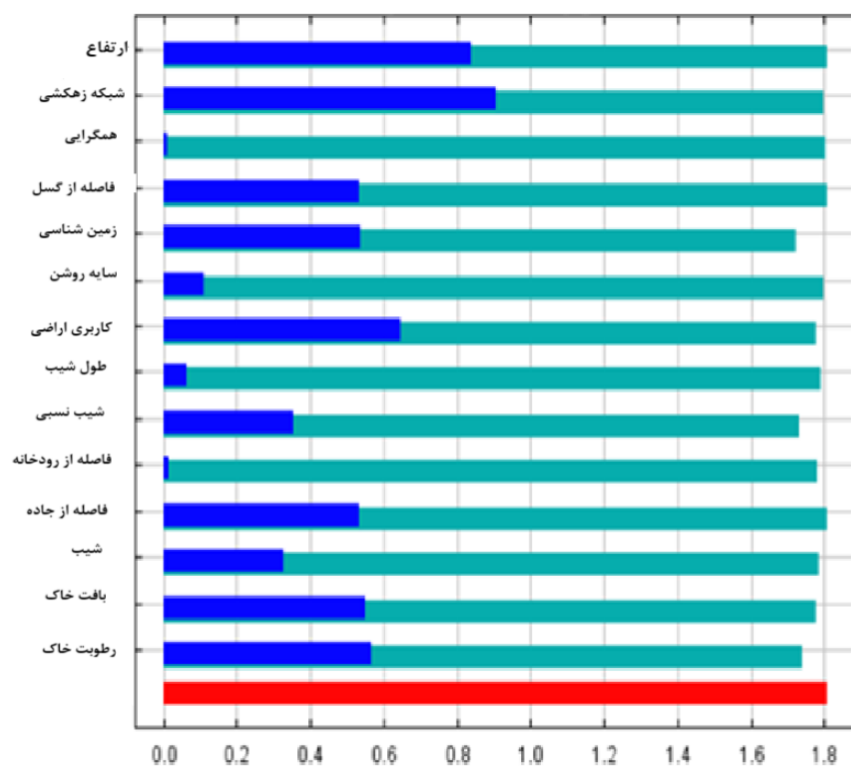
شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی فرونشست استان اصفهان را ارائه می‌دهد. این نقشه، استان را به چهار طبقه خطر شامل کم‌خطر، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم کرده است. مناطق کم‌خطر دارای نرخ فرونشست ناچیز هستند که بخش قابل توجهی از استان را شامل می‌شوند. در مقابل، مناطق پرخطر، نرخ فرونشست بسیار بالایی دارند. لازم به ذکر است که مناطق با خطر زیاد و بسیار زیاد، منطبق بر آبخوان‌های اصلی استان از جمله آبخوان کوهپایه-سگزی، برخوار، نجف‌آباد و بوئین-میاندشت هستند که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم برداشت آب زیرزمینی و نوع رسوبات با پدیده فرونشست در این مناطق است.

جدول ۲: میزان مشارکت هریک از شاخص‌ها در فرونشست استان اصفهان

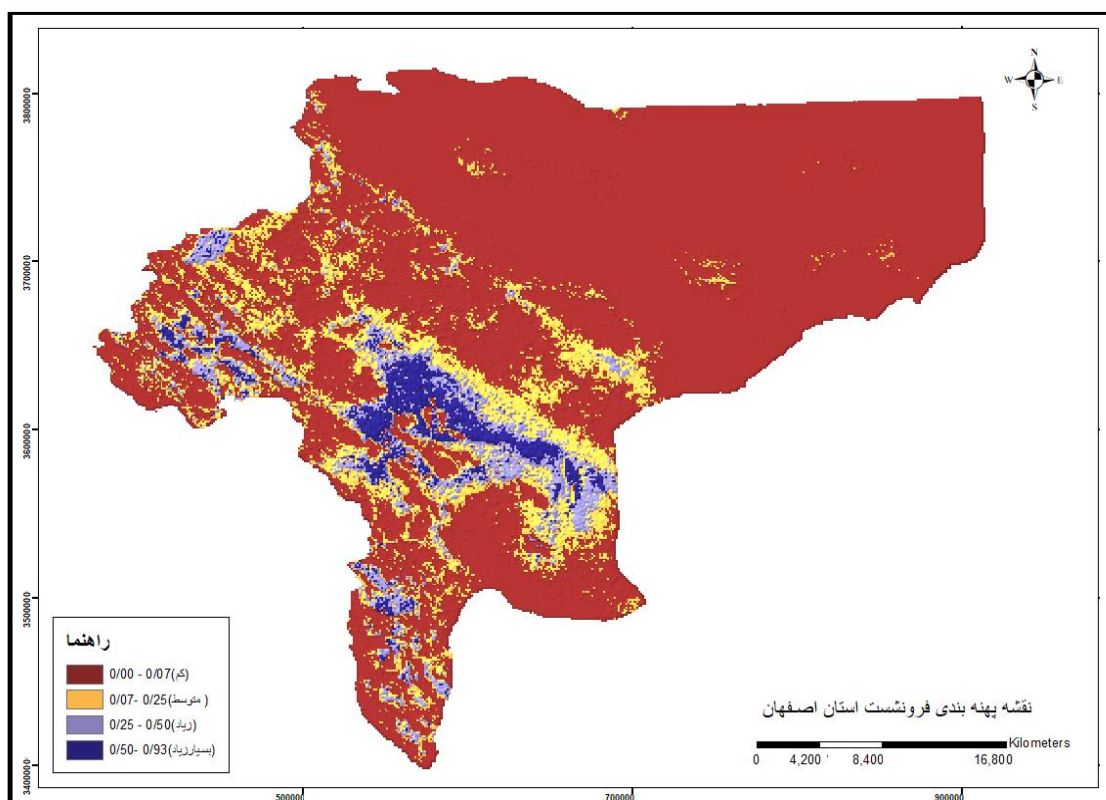
ردیف	شاخص	درصد مشارکت
۱	شبکه کانال	۴۱.۵
۲	ارتفاع	۱۱
۳	کاربری اراضی	۱۰
۴	رطوبت خاک	۹
۵	بافت خاک	۸.۵
۶	فاصله از گسل	۰.۸
۷	فاصله از جاده	۷.۶
۸	زمین‌شناسی	۳.۸
۹	شیب نسبی	۳.۷
۱۰	شیب	۱.۵
۱۱	سایه روشن	۱.۳
۱۲	فاصله از رودخانه	۰.۶
۱۳	طول شیب	۰.۵
۱۴	همگرایی	۰.۲



شکل ۶: منحنی بررسی اعتبار مدل پهنه بندی فرونشست استان اصفهان



شکل ۷: نتایج آزمون جک نایف برای بررسی میزان نقش هریک از پارامترها

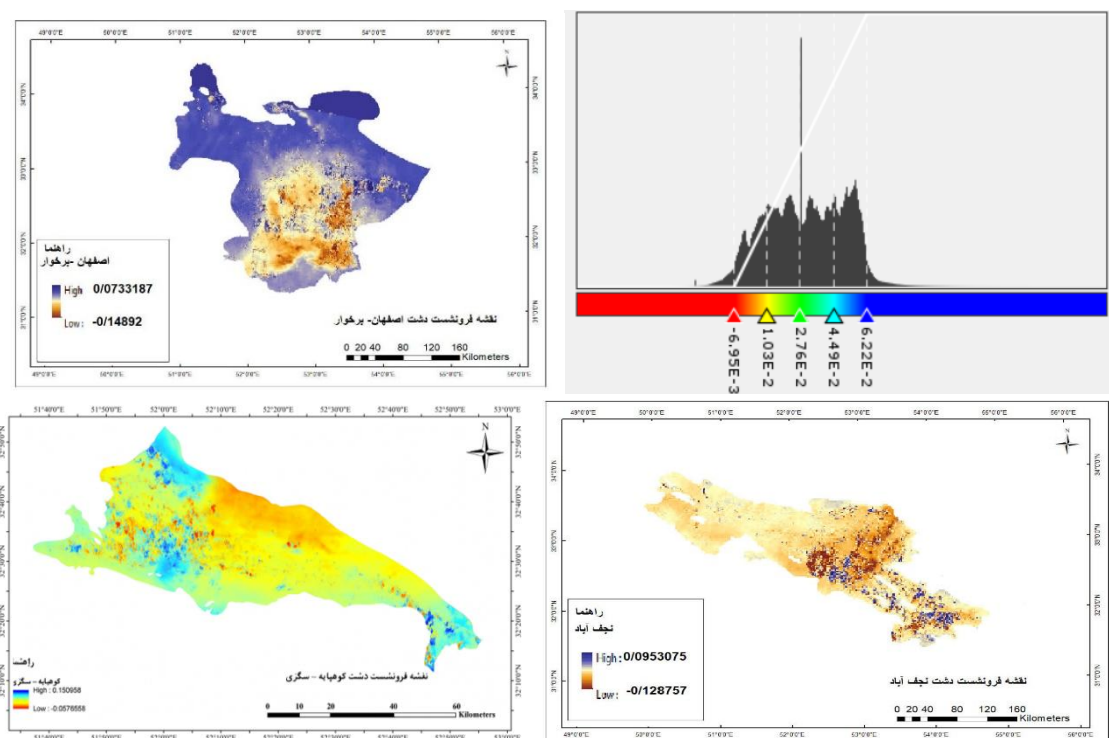


شکل ۸: نقشه پهنه بندی فرونشست استان اصفهان

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج مدل و مقایسه آن با شرایط واقعی، از داده‌های راداری ماهواره Sentinel-1 برای سه آبخوان بحرانی استان شامل آبخوان‌های کوهپایه-سگری، برخوار و نجف‌آباد استفاده گردید. تصاویر راداری حاصل از بازه زمانی اکتبر ۲۰۲۴ تا اکتبر ۲۰۲۵ مورد پردازش قرار گرفت و با به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR)، نقشه جابه‌جایی سطح زمین تولید شد (شکل ۹). مقایسه نقشه حاصل از تداخل‌سنجی با نقشه پهنه‌بندی مدل مکسنت نشان داد که پهنه‌های دارای بیشترین نرخ نشست در داده‌های راداری، هم‌پوشانی بالایی با مناطق با احتمال زیاد فرونشست در خروجی مدل دارند. این انطباق، بیانگر دقت و توانایی مدل مکسنت در شناسایی نواحی مستعد فرونشست در منطقه مورد مطالعه است. براساس داده‌های حاصل از نقشه‌های جابجایی زمین، سه دشت مورد مطالعه شامل دشت نجف‌آباد، دشت اصفهان و دشت کوهپایه، دارای دامنه‌های متفاوتی از جابجایی زمین هستند که بیانگر شدت و گستره‌ی فرونشست در هر پهنه می‌باشد.

در دشت نجف‌آباد، مقادیر جابجایی زمین در بازه‌ی ۰.۱۲۸- تا ۰.۰۹۵ متر قرار دارند. این محدوده نشان‌دهنده‌ی بیشترین میزان نشست زمین حدود ۱۲ سانتی‌متر است. الگوی مشاهده‌شده حاکی از وجود نقاطی با نشست شدید در برخی بخش‌ها و تغییرات جزئی ارتفاع در بخش‌های دیگر می‌باشد. دشت اصفهان-برخوار با دامنه‌ی جابجایی ۰.۱۴۸- تا ۰.۰۷۳ متر، بیشترین مقدار فرونشست را در میان سه دشت داراست و میزانی حدود ۱۴.۹ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. همچنین نواحی با جابجایی مثبت، اگرچه محدود هستند، نمایانگر وجود تغییرات ارتفاع جزئی یا پدیده‌های موضعی بالآمدگی زمین است. مقایسه با دشت نجف‌آباد نشان می‌دهد که دشت اصفهان از نظر شدت نشست، حساسیت بالاتری دارد و تمرکز نقاط فرونشست قابل‌توجه است. در مقابل، دشت کوهپایه دارای دامنه‌ی ۰.۰۵۷۶ تا ۰.۱۵۰ متر است. بیشینه‌ی نشست در این دشت نسبت به دو دشت دیگر کمتر است، مقایسه‌ی کلی سه دشت نشان می‌دهد که شدت فرونشست در دشت اصفهان و دشت نجف‌آباد بیشتر از دشت کوهپایه است و در دشت کوهپایه نواحی پایدار یا با جابجایی جزئی مثبت، سهم بیشتری دارند. الگوهای مکانی نشان می‌دهد که در همه‌ی پهنه‌ها، فرونشست به‌صورت موضعی و پراکنده رخ داده و دامنه جابجایی زمین در هر دشت با توجه به شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و برداشت آب زیرزمینی متفاوت است.

تحلیل توزیع مکانی داده‌ها نشان می‌دهد که فرونشست در این پهنه‌ها به‌صورت موضعی و پراکنده رخ داده است. نواحی دارای بیشترین میزان جابجایی منفی به‌صورت لکه‌هایی مجزا در بخش‌های مشخصی از نقشه پراکنده‌اند. الگوی پیوسته‌ی تغییرات جابجایی مشاهده شده در نقشه بیانگر کاهش تدریجی نرخ نشست از مرکز نواحی فرونشسته به سمت پیرامون آن‌هاست. این ویژگی حاکی از آن است که فرایند فرونشست در منطقه از نوع تدریجی بوده و مرز مشخصی میان نواحی دارای نشست و مناطق پایدار وجود ندارد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که اگرچه بخش عمده‌ای از محدوده‌ی مورد بررسی دارای پایداری نسبی است، اما وجود لکه‌های محدود با نرخ نشست بالا، بیانگر پویایی زمین در مقیاس محلی و ضرورت پایش مستمر تغییرات جابجایی در این نواحی است.



شکل ۹: نقشه فرونشست دشت های پرخطر تهیه شده از تصاویر سنتینل

نتیجه گیری

پدیده فرونشست زمین، به عنوان یک مخاطره ژئومورفیک ناشی از عوامل زمین ساختی و فعالیت‌های انسانی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک نظیر استان اصفهان، به یک چالش جدی تبدیل شده است. نرخ بالای فرونشست در ایران، که ۳۴ برابر میانگین کشورهای توسعه یافته است و وضعیت بحرانی دشت‌های اصفهان، ضرورت پایش دقیق و مدل سازی پیش بینی کننده را دوچندان می سازد. این پژوهش با هدف پهنه بندی و پیش بینی مناطق مستعد فرونشست در استان اصفهان، با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) و داده های سنجش از دور، به ارزیابی عوامل مؤثر و ارائه یک مدل معتبر پرداخته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مدل MaxEnt با استفاده از ۱۴ شاخص محیطی، توانایی بالایی در شناسایی مناطق مستعد فرونشست دارد. شاخص های شبکه کانال ۴۱٪، ارتفاع ۱۱٪، کاربری اراضی ۱۰٪، رطوبت خاک ۹٪ و بافت خاک ۸٫۵٪ به ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع فرونشست در استان اصفهان ایفا می کنند. این یافته ها با مطالعات پیشین همسو هستند که نشان می دهند برداشت بی رویه از آب های زیرزمینی، به ویژه در مناطق کشاورزی (که با کاربری اراضی و رطوبت خاک مرتبط است) و در اراضی دارای رسوبات ریزدانه (بافت خاک) و در ارتفاعات خاص، عامل اصلی فرونشست است. به عنوان مثال، گورابی و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیشترین نرخ فرونشست را در مناطق دارای سیلت، خاک رس و گل در حاشیه دشت آبرفتی اصفهان گزارش کرده بودند که نتیجه برداشت بیش از حد آب های زیرزمینی برای کشاورزی است. قاسمی و همکاران (۲۰۲۵) ارتفاع منطقه نقش مهمی در تعیین پتانسیل فرونشست دشت اصفهان بر خوار دارد و مناطق کم ارتفاع مستعد فرونشست بیشتر هستند. کاظمی و نفرزادگان (۲۰۲۲) مطالعات انجام شده در مناطقی چون دشت میناب، نشان داده اند که مناطقی با بافت خاک سنگین و نوسانات شدید رطوبتی، بیشترین نرخ فرونشست را تجربه

کرده‌اند. بنابراین، پایش پیوسته ویژگی‌های فیزیکی خاک و مدیریت منابع آب زیرزمینی از ارکان مهم در پیشگیری از این پدیده محسوب می‌شود. شیرانی و همکاران (۱۴۰۰) با توجه به نقشه‌کاربری اراضی دشت نجف آباد، مناطق کشاورزی با مناطق افت آب زیر زمینی و فرونشست انطباق خوبی نشان داده است که این خود دلیلی بر افزایش برداشت آب زیر زمینی به منظور مصارف کشاورزی است و همچنین نتایج پژوهش عرب عامری (۲۰۱۹) در دشت مهیار نشان داده که بیشترین میزان فرونشست در مناطق تحت کشت و در نتیجه برداشت بیش از حد آب و فرونشست سطح مخازن آب های زیرزمینی رخ داده است. در مقابل، شاخص همگرایی با تنها ۰.۲٪ مشارکت، کمترین تأثیر را در این پدیده نشان داد. پاینده و چرمی (۱۴۰۳)، در پژوهش که بر روی دشت اصفهان برقرار انجام شده شاخص بافت خاک (لایه های رسی) ارتفاع و کاربری اراضی تأثیر گذارترین شاخص های اعلام شدند. اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی ROC و مقدار AUC، دقت بالای مدل را تأیید کرد، به طوری که مقدار AUC برای نمونه تعلیمی ۰.۸۱۹ و برای نمونه آموزشی ۰.۸۰۷ بود. این مقادیر، که در محدوده "خیلی خوب" قرار می‌گیرند، نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل مکسنت در پیش‌بینی و پهنه‌بندی مناطق مستعد فرونشست هستند. همچنین نتایج حاصل از مقایسه نقشه‌های مدل مکسنت با داده‌های تداخل‌سنجی Sentinel-1 در سه آبخوان بحرانی استان اصفهان نشان داد که بین پهنه‌های با احتمال بالای فرونشست و مناطق دارای بیشترین نرخ فرونشست همپوشانی قابل توجهی وجود دارد و مدل ارائه‌شده توانسته است پهنه‌های با خطر بالای فرونشست را با دقت قابل قبولی شناسایی کند. این تطبیق مکانی بین خروجی مدل و داده‌های واقعی، بیانگر اعتبار و کارایی روش پیشنهادی در ارزیابی حساسیت زمین به فرونشست است. این نتایج حاکی از آن است که مدل توسعه‌یافته می‌تواند به عنوان یک ابزار قابل اعتماد برای ارزیابی ریسک فرونشست و برنامه‌ریزی‌های مدیریت زمین در استان اصفهان مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به بحرانی بودن وضعیت فرونشست در استان اصفهان و تأثیرات مخرب آن بر زیرساخت‌ها و منابع طبیعی، پیشنهاد می‌شود با توجه به نقش برجسته برداشت آب زیرزمینی در این زمینه، سیاست‌های سخت‌گیرانه‌تر در خصوص بهره‌برداری از چاه‌های کشاورزی و صنعتی اجرا شود و همچنین ترویج الگوهای کشت با نیاز آبی کمتر جهت مدیریت جامع منابع آب ضروری است. نقشه پهنه‌بندی فرونشست بدست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد می‌بایست مناطق با خطر بالا اولویت‌بندی شده و برنامه‌های اضطراری و اقدامات پیشگیرانه (مانند تقویت زیرساخت‌ها و کنترل ساخت و ساز) در این مناطق به اجرا درآید. از این رو نتایج این مطالعه اگر منجر به اقدامات مذکور شود می‌تواند به کاهش آسیب‌های ناشی از فرونشست و حفظ پایداری محیطی و توسعه شهری در استان اصفهان کمک شایانی نماید. علاوه بر این، روش‌شناسی این مطالعه را می‌توان در مناطق دیگر برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش اعمال کرد.

منابع

- آقاباتی. س.ع، (۱۳۸۹). زمین شناسی و توان معدنی استان اصفهان. رشد آموزش علوم زمین، ۶۱(۱۵)، ۱۶-۲۱.
- انصاری، ابراهیم، (۱۴۰۲)، پایش و تحلیل نرخ فرونشست زمین در نواحی شهر با استفاده از داده های سری زمانی راداری (مطالعه موردی: کلانشهر اصفهان، استاد راهنما: علی صادقی، استادان مشاور: داریوش رحیمی و هادی عبدالعظیمی.
- پاینده، الف، ع، چرمی، (۱۴۰۳)، ارزیابی پدیده فرونشست آبخوان دشت برقرار استان اصفهان بر اثر برداشت بی رویه آب-های زیرزمینی، پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران.

- سلیمی، ع، ط، مصباح زاده، الف، ملکیان، م، میراکبری (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل اقلیمی منطقه ای REMO و مدل گردش عمومی جو CanESM2 در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی (مطالعه موردی: استان اصفهان). مدیریت جامع حوزه های آبخیز، (۲)، ۱-۱۵. doi: 10.22034/iwm.2022.554926.1033
- شیرانی، ک، م، پسندی، ب، ابراهیمی. (۲۰۲۱). بررسی فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری. علوم آب و خاک (Isfahan University of Technology), 25(1), 105-127.
- قاسمی، ن، ای، خسروی، ع، بهرامی. (۲۰۲۵). تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین با روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر درخت تصمیم (مطالعه موردی: منطقه اصفهان-برخوار). پژوهش‌های چینه نگاری و رسوب شناسی، ۱۷-۴۰.
- کندردهنوی، ع، ک، فرهی قدم، ه، جراحی، (۱۴۰۳)، بررسی اجمالی فرونشست زمین: عوامل مطالعات موردی و راهکارها، پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
- مقیمی، ه، ا، عباس نوین پور، ب، مرشدی، (۱۴۰۰)، بررسی پدیده نشست زمین بر اثرافت سطح آب های زیر زمینی در محدوده شهر ارومیه با استفاده از تغییرات دانه بندی لایه های زمین، مجله اکولوژی
- Ahmadi, Z., Rezaei, M. R., & Naderi, A. (2022). Modeling land subsidence using support vector machine and InSAR data (Case study: Varamin Plain). Iranian Journal of Geospatial Analysis, 14(2), 45–60. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Arab Ameri, A.; rafyi, M.; Rezaei, K.; Shirani, K.; & M. Nasrin, 2019. Estimation of land subsidence rate using InSAR technique and analysis of the effective parameters in Mahyar Plain, Watershed Engineering and Management, 11(3), 661-675. doi: 10.22092/ijwmse.2017.110660.1307. (in Persian)
- Abdollahi, S., Pourghasemi, H. R., Ghanbariyan, G., & Safaeian, R. (2019). Spatial simulation and mapping of land subsidence susceptibility using maximum entropy model. Watershed Management Research Journal, 10(20), 133–144. Available here
- Canfeski, M., et al. (2004). Multiscale spatial data integration for environmental modeling. Environmental Modelling & Software, 19(3), 289–298.
- Erkens, G., and Stouthamer, E. (2020). The 6M approach to land subsidence. Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci. 382, 733–740. doi: 10.5194/piahs-382-733-2020
- Fessahaye, A. K., Xie, Y., Hu, Y., Dai, G., Zheng, H., & Teng, W. (2025). Groundwater over-extraction: Comprehensive review of socio-economic impacts and pathways to sustainable management. European Journal of Theoretical and Applied Sciences, 3(2), 190–211.
- Galloway, D. L., and Burbey, T. J. (2011). Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. Hydrogeol. J. 19, 1459–1486. doi: 10.1007/s10040-011-0775-5
- Jalini, A., et al. (2017). Analysis of land subsidence in Iran: Causes, consequences, and mitigation strategies. Iranian Journal of Environmental Hazards, 9(3), 45–60.
- Karimzadeh, H., & Matsuoka, M. (2020). Monitoring land subsidence using InSAR satellite radar observations. Journal Name, Volume(Issue), pages. <https://doi.org/xxxx>
- Kazemi, M., Nafarzadgan, A., Karami, E., & Ebrahimi Khousfi, M. (2022). Analysis of soil and surface characteristics in predicting land subsidence using remote sensing (Case study: Minab Plain). Environmental Erosion Research Quarterly, 12(2), 82–104. Available on Magiran
- Lyu, H.-M., Shen, S.-L., Zhou, A., and Yang, J. (2020). Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. Sci. Total Environ. 717:135310. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135310
- Mohabbi Tafreshi, G. (2021). Simulation of land subsidence using artificial neural networks in NeuroSolutions software [Video masterclass]. GIRS Academy. <https://girs.ir/product/neuro-solution>
- Orhan, O., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Yalvac, S., and Yakar, M. (2021). Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapınar region, Turkey: a multi-sensor InSAR time series study. Sensors 21:774. doi: 10.3390/s21030774
- Rateb, A., and Abotalib, A. Z. (2020). Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel-1 satellites and GPS between 2015 and 2019. Sci. Total Environ. 729:138868. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138868

- Yu, H., Gong, H., Chen, B., Liu, K., and Gao, M. (2020). Analysis of the influence of groundwater on land subsidence in Beijing based on the geographical weighted regression (GWR) model. *Sci. Total Environ.* 738, 139405. doi: 10.1016/j. scitotenv.2020.139405
- Tien Bui, D., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Pradhan, B., Chen, W., ... & Saro, L. (2018). Land subsidence susceptibility mapping in South Korea using machine learning algorithms. *Sensors*, 18(8), 2464.
- Twigg, J. (1998). *Understanding vulnerability: A framework for analysis and planning*. London: Benfield Greig Hazard Research Centre.