Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

Online ISSN: 2588-5146
Homepage: https://khu.ac.ir

Risk Modeling of Land Subsidence Using the Random Forest Algorithm (Case Study: Eshtehard Plain)

Rana Norouzi [1]✉ | Sayyd Morovat Eftekhari [2] | Ali Ahmadabadi [3]

1. Corresponding Author, Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran. E-mail: ra.norouzi@yahoo.com
2. Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran. E-mail: Eftekhari@khu.ac.ir
3. Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran. E-mail: ahmadabadi@khu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 30 June 2025
Accepted 06 October 2025
Published online 07 January 2025

Keywords:
Random Forest,
Eshtehard Plain,
Modeling,
Land Subsidence.

ABSTRACT

Objective: Over the past two decades, land subsidence has emerged as a significant geomorphological hazard and environmental crisis, inflicting irreversible damage on Iran's plains. Excessive and unregulated groundwater extraction stands as a primary driver of this phenomenon. The Eshtehard Plain, a key industrial and agricultural hub in Alborz Province, has been designated a critically prohibited zone by the Ministry of Energy due to severe groundwater depletion. This study aims to model the subsidence risk in this plain using the Random Forest algorithm and identify its key contributing factors. The primary innovation lies in employing Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) data to generate the dependent layer of subsidence points, offering a cost-effective and time-efficient alternative to field-based methods and enabling modeling in data-scarce regions.

Methods: For modeling, 12 independent layers were utilized, including digital elevation model (DEM), distance to rivers, qanats, wells, faults, groundwater depth, drainage density, soil type, lithology, land use, topographic wetness index (TWI), and solar radiation, alongside a dependent layer of subsidence points derived from D-InSAR data of 2023. The Random Forest algorithm, selected for its high stability, resistance to overfitting, and ability to handle complex and imbalanced data, was implemented in the R software environment. The importance of factors was assessed using Mean Decrease Accuracy and Mean Decrease Gini indices, with model performance evaluated through Accuracy, Kappa coefficient, and Area Under the Curve (AUC) metrics.

Results: Results demonstrated that the Random Forest model exhibited robust performance in zoning subsidence risk, achieving an overall Accuracy of 0.963, a Kappa coefficient of 0.611, and an AUC of 0.955. The most influential variables were identified as groundwater depth, distance to wells, geology, and land use. Over 65% of the study area fell within high- and very-high-risk zones, underscoring the critical condition of the Eshtehard Plain. Notably, urban land use increased steadily from 2011 to 2023, with a significant surge in 2023, exacerbating subsidence intensity due to heightened pressure on groundwater resources.

Conclusions: The Random Forest algorithm successfully modeled the spatial distribution of subsidence risk with high accuracy, positioning it as an effective tool for groundwater resource management, sustainable land-use planning, and geohazard mitigation. However, limitations such as class imbalance in the data may impact the Kappa coefficient. Future studies are recommended to employ sampling techniques like SMOTE to enhance data balance and model precision. This approach holds transferable potential for urban planning and water resource management in similar regions.

Cite this article: Norouzi, R., Eftekhari, M., Ahmadabadi, A. (2025). Risk Modeling of Land Subsidence Using the Random Forest Algorithm (Case Study: Eshtehard Plain). *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (4), 27-46. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.6

© The Author(s)
Publisher: Kharazmi University
DOI: http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.6

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Environmental crisis, inflicting irreversible damage on Iran's plains. Excessive and unregulated groundwater extraction stands as a primary driver of this phenomenon. The Eshtehard Plain, a key industrial and agricultural hub in Alborz Province, has been designated a critically prohibited zone by the Ministry of Energy due to severe groundwater depletion. This study aims to model the subsidence risk in this plain using the Random Forest algorithm and identify its key contributing factors. The primary innovation lies in employing Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) data to generate the dependent layer of subsidence points, offering a cost-effective and time-efficient alternative to field-based methods and enabling modeling in data-scarce regions.

Methods

For modeling, 12 independent layers were utilized, including digital elevation model (DEM), distance to rivers, qanats, wells, faults, groundwater depth, drainage density, soil type, lithology, land use, topographic wetness index (TWI), and solar radiation, alongside a dependent layer of subsidence points derived from D-InSAR data of 2023. The Random Forest algorithm, selected for its high stability, resistance to overfitting, and ability to handle complex and imbalanced data, was implemented in the R software environment. The importance of factors was assessed using Mean Decrease Accuracy and Mean Decrease Gini indices, with model performance evaluated through Accuracy, Kappa coefficient, and Area Under the Curve (AUC) metrics.

Results

Results demonstrated that the Random Forest model exhibited robust performance in zoning subsidence risk, achieving an overall Accuracy of 0.963, a Kappa coefficient of 0.611, and an AUC of 0.955. The most influential variables were identified as groundwater depth, distance to wells, geology, and land use. Over 65% of the study area fell within high- and very-high-risk zones, underscoring the critical condition of the Eshtehard Plain. Notably, urban land use increased steadily from 2011 to 2023, with a significant surge in 2023, exacerbating subsidence intensity due to heightened pressure on groundwater resources.

Conclusion

The Random Forest algorithm successfully modeled the spatial distribution of subsidence risk with high accuracy, positioning it as an effective tool for groundwater resource management, sustainable land-use planning, and geohazard mitigation. However, limitations such as class imbalance in the data may impact the Kappa coefficient. Future studies are recommended to employ sampling techniques like SMOTE to enhance data balance and model precision. This approach holds transferable potential for urban planning and water resource management in similar regions.

Keywords: Random Forest, Eshtehard Plain, Modeling, Land Subsidence.

Author Contributions

First author; Writing-original draft preparation, Visualization, Supervision, Writing-review and editing.

First author, **Second author** and **Third author**; Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Project administration, Funding acquisition, Data curation.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement
Data is available upon request from the authors.

Acknowledgements
The respected referees are thanked for providing structural and scientific comments.

Ethical considerations
The author has observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by them.

Funding
This article has no sponsor.

Conflict of interest
According to the author's declaration, this article has no conflict of interest.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: ۵۱۴۶- ۲۵۸۸

Homepage: https://khu.ac.ir

مدل سازی ریسک خطر وقوع فرونشست با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: دشت اشتهارد)

رعنا نوروزی طیولا [۱]✉| سید مروت افتخاری [۲] | علی احمد آبادی [۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: ra.norouzi@yahoo.com

۲. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: Eftekhari@khu.ac.ir

۳. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: ahmadabadi@khu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

کلیدواژه‌ها:
الگوریتم جنگل تصادفی،
دشت اشتهارد،
مدل سازی،
فرونشست.

هدف: در دو دهه اخیر، فرونشست زمین به‌عنوان یک مخاطره ژئومورفیک و بحران زیست‌محیطی، خسارات جبران‌ناپذیری به دشت‌های ایران وارد کرده است. برداشت بی‌رویه و غیراصولی از منابع آب زیرزمینی یکی از علل اصلی این پدیده است. دشت اشتهارد، یکی از قطب‌های صنعتی و کشاورزی استان البرز، به دلیل افت شدید سطح آب زیرزمینی توسط وزارت نیرو به‌عنوان منطقه ممنوعه بحرانی اعلام شده است. این پژوهش با هدف مدل‌سازی ریسک فرونشست در این دشت با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و شناسایی عوامل کلیدی آن انجام شد. نوآوری اصلی این مطالعه، استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) برای تولید لایه وابسته نقاط فرونشست است که جایگزین روش‌های میدانی پرهزینه و زمان‌بر شده و امکان مدل‌سازی در مناطق با داده‌های محدود را فراهم می‌کند.

روش پژوهش: برای مدل‌سازی، ۱۲ لایه مستقل شامل نقشه ارتفاع، فاصله از آبراهه، قنات، چاه، گسل، عمق آب زیرزمینی، تراکم زهکشی، خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی و تابش خورشیدی، همراه با لایه وابسته نقاط فرونشست (استخراج‌شده از داده‌های D-InSAR سال ۲۰۲۳) استفاده شد. الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل پایداری بالا، مقاومت در برابر بیش‌برازش و توانایی مدیریت داده‌های پیچیده و نامتعادل، در محیط نرم‌افزار R اجرا شد. اهمیت عوامل با استفاده از شاخص‌های میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهش ضریب جینی تعیین شد و عملکرد مدل با معیارهای دقت (Accuracy)، ضریب کاپا (Kappa) و مساحت زیر منحنی ROC (AUC) ارزیابی گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی با دقت کلی (Accuracy) ۰/۹۶۳، ضریب کاپا (Kappa) ۰/۶۱۱ و از نظر قدرت تمایز (AUC) ۰/۹۵۵، عملکرد بسیار خوبی در پهنه‌بندی ریسک فرونشست دارد. متغیرهای عمق آب زیرزمینی، فاصله از چاه‌ها، زمین‌شناسی و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر وقوع فرونشست داشتند. بیش از ۶۵ درصد مساحت منطقه در طبقات ریسک زیاد و بسیار زیاد قرار گرفت که نشان‌دهنده شرایط بحرانی دشت اشتهارد است. افزایش کاربری شهری از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳، به‌ویژه در سال ۲۰۲۳، با تشدید فشار بر منابع آب زیرزمینی، به افزایش شدت فرونشست منجر شده است.

نتیجه‌گیری: الگوریتم جنگل تصادفی با دقت بالا توزیع فضایی ریسک فرونشست را مدل‌سازی کرد. این روش می‌تواند ابزاری مؤثر برای مدیریت منابع آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی توسعه پایدار و کاهش مخاطرات زمین‌ساختی باشد. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر عدم تعادل کلاس‌ها در داده‌ها ممکن است بر ضریب کاپا تأثیر بگذارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از روش‌های نمونه‌گیری مانند SMOTE برای بهبود تعادل داده‌ها و افزایش دقت مدل استفاده شود. این مدل برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع آب در مناطق مشابه قابل‌تعمیم است.

استناد: نوروزی، رعنا؛ افتخاری، مروت؛ و احمدآبادی، علی (۱۴۰۴). مدل سازی ریسک خطر وقوع فرونشست با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: دشت اشتهارد). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۴)، ۲۷-۴۶. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.6

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

مقدمه

فرونشست زمین یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و زیرساختی و یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی است که در دهه‌های اخیر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی و فشارهای انسانی بر محیط‌زیست افزایش یافته است (هررا گارسیا[1] و همکاران،۲۰۲۰). این پدیده به شکل کاهش تدریجی ارتفاع سطح زمین نمایان می‌شود و می‌تواند آسیب‌های جدی به زیرساخت‌ها، منابع آبی، سکونت‌گاه‌های انسانی و فعالیت‌های اقتصادی وارد کند (گالووی و باربری[2]،۲۰۱۱). شناسایی، پیش‌بینی و مدیریت این مخاطره نیازمند روش‌های علمی و سیستماتیک است. مدل‌سازی ریسک فرونشست به‌عنوان ابزاری کلیدی، امکان پهنه‌بندی مناطق پرخطر و کاهش پیامدهای آن را فراهم می‌کند (گوتیرز[3]،۲۰۱۴). این فرآیند نه‌تنها به شناسایی مناطق مستعد فرونشست کمک می‌کند، بلکه سیاست‌گذاری‌های پیشگیرانه و اقدامات کنترلی را برای کاهش خسارات تسهیل می‌نماید (نوروزی و همکاران، ۲۰۲۴).

با وجود پیشرفت در مدل‌سازی فرونشست زمین، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی در مطالعات فرونشست ایران محدود بوده است. بسیاری از پژوهش‌ها به روش‌های میدانی پرهزینه یا مدل‌های سنتی وابسته‌اند که در مناطق وسیع با داده‌های محدود کارایی کمتری دارند. همچنین، بهره‌گیری از داده‌های تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) برای تولید لایه‌های وابسته در مدل‌های یادگیری ماشین تا به امروز بررسی به کار گرفته نشده است. این مطالعه با ترکیب جنگل تصادفی و داده‌های D-InSAR، شکاف موجود در مدل‌سازی دقیق و کارآمد ریسک فرونشست را در شرایط کمبود داده‌های میدانی پر می‌کند. با توجه به اهمیت، گستردگی وقوع و خطرات اقتصادی ناشی از وقوع فرونشست زمین، بررسی جنبه های مختلف این پدیده ضروری به نظر می رسد. ازاین رو محققین مختلفی در سراسر دنیا به بررسی جنبه های مختلف این موضوع پرداخته اند، عمده این مطالعات شامل؛ پایش پدیده فرونشست (آل هالبونی[4] و همکاران، ۲۰۱۷؛ شارما[5] و همکاران، ۲۰۱۶) نحوه شکل گیری و مکانیسم ایجاد (دی وال[6] و همکاران، ۲۰۱۱؛ دِورل[7] و همکاران، ۱۹۹۶) بوده و همچنین محققین مختلفی به روش های مختلف مدل سازی و ارزیابی خطر وقوع فرونشست زمین پرداخته اند (امیر احمدی و همکاران،۱۳۹۲؛ملکی و همکاران،۱۳۹۵ ؛ لی[8] و همکاران، ۲۰۱۲؛ پرادان[9] و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴). تاکنون تکنیک ها و روش های مختلفی برای مدل سازی ریسک وقوع فرونشست زمین مورد استفاده قرار گرفته اند که از میان آن ها می توان مدل های مبتنی بر تحلیل سلسله مراتبی (ژانت[10] و همکاران، ۲۰۲۵) ، روش های فازی مبنا (نقیبی[11] و همکاران، ۲۰۲۴) ، پردازش تصاویر راداری (اوهنهن[12] و همکاران، ۲۰۲۵؛ لناردون سانچز[13] و همکاران، ۲۰۲۴) شبکه عصبی مصنوعی (کو و لیو[14]، ۲۰۲۳؛ رجبی[15] و همکاران، ۲۰۲۴) ، تکنیک وزن واقعه (اوه و لی[16]، ۲۰۱۰) و تصمیم گیری چند معیاره (ژان[17] و همکاران، ۲۰۲۵؛ ریچا [18]و همکاران، ۲۰۲۳) را ذکر کرد.

[1] - Herrera-García
[2] - Galloway & Burbey
[3] - Gutiérrez
[4] - Al-Halbouni
[5] - Sharma
[6] - De Waele
[7] - Deverel
[8] - Lee
[9] - Pradhan
[10] - Zhanet
[11] - Naghibi
[12] - Ohenhen
[13] - Lenardón Sánchez
[14] - Ku & Liu
[15] - Rajabi
[16] - Oh & Lee
[17] - Zhan
[18] - Richa

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

علیرغم وجود تحقیقات متعدد در زمینه مدلسازی ریسک خطر وقوع فرونشست زمین، در تحقیقات خیلی محدودی از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شده است. الگوریتم جنگل تصادفی دارای قابلیت استفاده در مسایل مرتبط با طبقه بندی، رگرسیون و آموزش نظارت نشده است (لیا و وینر[1]، ۲۰۱۶). و به دلیل توانایی در مدیریت داده‌های پیچیده و نامتعادل و مقاومت در برابر بیش‌برازش، در مدل‌سازی فرونشست زمین عملکرد مطلوبی نشان داده است. مکی و همکاران (۱۴۰۱) و رحمتی[2] و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از جنگل تصادفی و دیگر مدل‌های مبتنی بر درخت، ریسک فرونشست روستای فدافن و دشت همدان را مدل‌سازی کردند و دقت بالایی AUC (به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۶) را گزارش نمودند، با تأکید بر نقش کلیدی کاهش سطح آب زیرزمینی. همچنین، مختاری و همکاران (۱۳۹۸) به مدل سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده ازالگوریتم جنگل تصادفی پرداختند و نقشه‌های ریسک فرونشست با دقت (۰/۸۶) تولید کردند و اهمیت افت سطح آب زیرزمینی را برجسته نمودند. پورقاسمی[3] و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از جنگل تصادفی در دشت ورامین ایران، نقشه‌های ریسک فرونشست با دقت بالا تولید کردند و اهمیت کاربری اراضی و زمین‌شناسی را بیان کردند. مطالعه‌ای دیگر توسط ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) در چین، جنگل تصادفی را با مدل‌های دیگر مقایسه کرد و برتری آن را در پهنه‌بندی ریسک فرونشست تأیید کرد. در سطح جهانی وو و همکاران (۲۰۲۴) از جنگل تصادفی برای مدل‌سازی فرونشست در دلتای یانگ‌تسه استفاده کردند و به نقش داده‌های راداری در بهبود دقت اشاره داشتند. این مطالعه با بهره‌گیری از جنگل تصادفی و داده‌های D-InSAR سال ۲۰۲۳، رویکردی نوین برای مدل‌سازی دقیق ریسک فرونشست در دشت اشتهارد ارائه می‌دهد که همگام با پیشرفت‌های جهانی و متناسب با شرایط محلی است.

در این میان دشت اشتهارد در غرب استان تهران، به‌عنوان یکی از قطب‌های صنعتی و کشاورزی استان محسوب می‌شود. این در حالیست که این منطقه کویری از آب‌های سطحی بی‌بهره بوده است و وجود بیش ۳۵۰۰ هکتار اراضی کشاورزی و باغی و بیش از ۲۰۰۰ واحد تولیدی و صنعتی در شهرستان اشتهارد که تقریبا کل آب مصرفی آن از منابع آب زیرزمینی منطقه (۱ درصد برای شرب، ۲ درصد برای صنعت و ۹۷ درصد برای اهداف کشاورزی) استفاده می‌شود (قادری و همکاران، ۱۳۹۹). از این رو علاوه بر میزان آب‌بری بالا در صنایعی مانند ذوب‌آهن و فولاد، تولید محصولات کشاورزی و باغی با آبیاری سنتی و الگوی کشت نامناسب یکی از بزرگ‌ترین فعالیت‌های تولیدی آب‌بر در این منطقه است که بستری فراهم کرده است که میزان دسترسی به آب‌های زیرزمینی اشتهارد از ۱۲۰ متر در ۲ دهه اخیر اکنون به بیش از ۳۰۰ متر برسد که زمینه‌ی تخلیه‌ی آبخوان‌های این شهرستان را فراهم کرده و به مسئله‌ی تنش آبی و پدیده فرونشست زمین در منطقه سرعت بخشیده است. چنین دشت‌هایی مستعدترین مناطق برای وقوع پدیده فرونشست منطقه‌ای سطح زمین می‌باشند. این در حالیست که بیش از ۸۰ درصد از دشت اشتهارد روی رسوبات کواترنری قرار گرفته است، رسوباتی (رس، مارن و ...) که دارای بافت سست و فرسایش پذیر هستند و به علت پوکی و تخلخل زیاد مقدار نشست بیشتری دارند و با کاهش فشار آب منفذی و به نسبت افزایش تنش موثر، میزان فرونشینی افزایش می یابد که به دلیل موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص دشت اشتهارد، تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی و گسل‌های منطقه‌ای هم قرار دارد. وجود و فعالیت گسل‌ها هم می‌تواند نقاط ضعف در ساختار زمین ایجاد کند و باعث تغییرات سطحی و زیر سطحی گردد که ممکن است به ایجاد و شدت این مخاطره بیانجامد (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹؛ رنجبر و جعفری، ۱۳۸۸؛ اکبری و همکاران، ۱۴۰۰؛ کریمی، ۱۳۹۱) که مطالعه آن برای حفاظت از زیرساخت‌ها، منابع آبی و پایداری اقتصادی منطقه ضروری است. این مطالعه با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، ارتباط بین پتانسیل فرونشست و عوامل محیطی را بررسی کرده و نقشه ریسک فرونشست دشت اشتهارد را تولید می‌کند. این نقشه به‌عنوان ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزان و مدیران در شناسایی مناطق پرخطر و اجرای سیاست‌های پیشگیرانه عمل می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

[1] - Liaw & Wiener

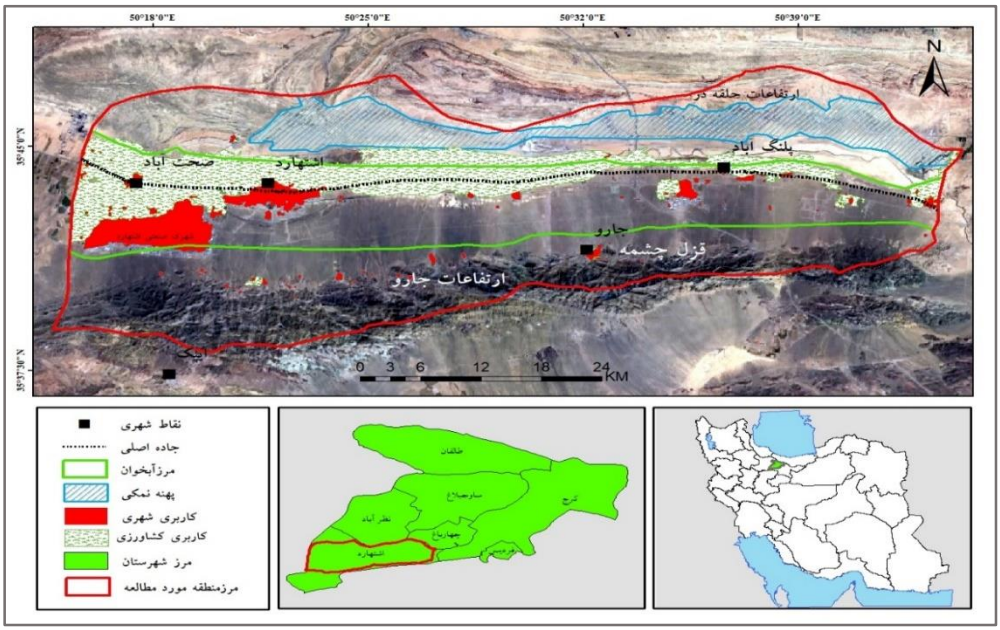
[2] - Rahmati

[3] - Pourghasemi

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

دشت اشتهارد در حوضه آبریز رودخانه شور و در جنوب استان البرز با وسعتی معادل ۴۶۱ کیلومتر مربع در بین عرض جغرافیایی ۳۳ ۳۷ ۳۵ الی ۳۵ ۵۲ ۳۵ شمالی و طول جغرافیایی ۲۶ ۱۸ ۵۰ الی ۵۹ ۲۹ ۵۰ شرقی واقع گردیده است و در هفتاد کیلومتری غرب شهرستان کرج است که از شمال به ارتفاعات حلقه دره و محدوده شهرستان نظرآباد، از جنوب به ارتفاعات جارو و قزل باش، از شرق به رودخانه شور و از غرب به بویین الزهرا منتهی می شود. دشت اشتهارد در منطقه کم ارتفاع که مانند دشتی باریک و کشیده است، میان ارتفاعات شمالی و جنوبی قرار دارد و میانگین ارتفاعی آن از سطح دریای آزاد ۱۱۹۰ متر است. ۷۲ درصد از مساحت منطقه را سازند کواترنر و ۵۰ درصد آن را خاک اریدی سول دربرگفته هست که نسبت به تغییرات رطوبت بشدت حساس هستند. درواقع منطقه اشتهارد یکی از شهرستان های استان البرز می باشد که به دلیل قرارگیری در نزدیکی دو کلان‌شهر تهران و کرج، از چشم‌اندازهای ویژه‌ی ژئومورفولوژیکی برخورداراست و یکی از قطب‌های صنعتی و کشاورزی استان محسوب می‌شود. ازاین‌رو مستعد جمعیت‌پذیری بیش از ظرفیت ازنظر اسکان و متعاقب آن تأمین آب موردنیاز است. با توجه به این‌که این منطقه، در شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی بیابانی واقع‌شده از دیرباز برای تامین منابع آب شرب،کشاورزی، صنعت و شهری وابسته به منابع آب زیرزمینی است چون رودخانه شور به‌عنوان تنها منبع آب سطحی، فصلی و غیرقابل‌استفاده است. این رودخانه با کیفیت آب پایین و شور بودن آن، نمی‌تواند به‌عنوان منبع تأمین آب مورد استفاده قرار گیرد. این در حالیست که ما شاهد بالاترین مساحت کاربری شهری و کشاورزی در محدوده ی آبخوان و قسمت میانی دشت اشتهارد هستیم. شهر اشتهارد مهم‌ترین ناحیه مسکونی در این محدوده مطالعاتی است که مطابق با آخرین سرشماری جمعیت بخش اشتهارد، ۲۳۶۰۱ نفر و دارای یک دهستان بنام رحمانیه است. همچنین دارای ۶۱ آبادی و مزرعه است (شکل۱) (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۴).



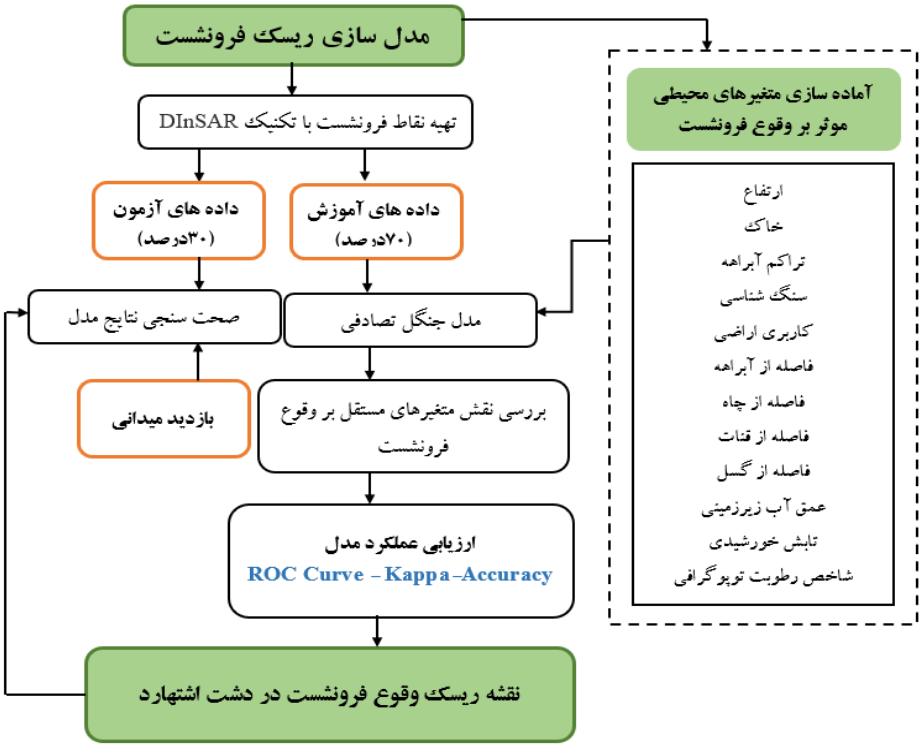
شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

۲. داده‌ها و روش کار

در این پژوهش، به‌منظور مدلسازی و پهنه‌بندی ریسک خطر فرونشست در دشت اشتهارد، از روش جنگل تصادفی در محیط نرم‌افزار R استفاده شد. در این راستا، ۱۲ لایه مستقل شامل نقشه ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از قنات، فاصله از چاه، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی، تراکم زهکشی، خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی و تابش خورشیدی و یک لایه وابسته شامل نقاط فرونشست مورد استفاده قرار گرفت (شکل۳-۱۵ و جدول ۱) که انتخاب معیارها ی مستقل برای مدل‌سازی ریسک فرونشست در دشت اشتهارد بر اساس سه معیار اصلی انجام شده است: تطابق با شرایط

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی منطقه،پشتوانه علمی و منابع معتبر، دسترسی‌پذیری و کیفیت داده‌ها. درواقع این معیارها به‌گونه‌ای طراحی شدند که شاخص‌ها هم جامعیت لازم برای پوشش عوامل محیطی مؤثر (هیدرولوژیکی، زمین‌شناختی، توپوگرافیکی و انسانی) بر فرونشست را داشته باشند و هم با شرایط بحرانی دشت اشتهارد هماهنگ باشند تا مدل جنگل تصادفی بتواند الگوهای پیچیده فرونشست را با دقت بالا پیش‌بینی کند. ابتدا تمامی لایه‌های ورودی مدل، استانداردسازی شده و به فرمت رستری با مختصات و اندازه سلول یکسان تبدیل شدند. لایه‌های مستقل از طریق منابع مختلف، سازمان‌های مرتبط و نرم‌افزارهای تخصصی تهیه گردید که جزئیات آن در ادامه پژوهش ارائه می شود (جدول ۱).لایه وابسته (نقاط فرونشست) با استفاده از نقشه رستری فرونشست که بر اساس روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D_InSAR) در سال ۲۰۲۳ تهیه شد، استخراج گردید (شکل ۱۵). این روش به دلیل دقت بالا، پوشش وسیع و قابلیت تحلیل سری‌های زمانی، ابزاری مناسب برای مطالعه فرونشست زمین محسوب می‌شود، به‌ویژه در شرایطی که برداشت‌های میدانی محدودیت دارند یا امکان‌پذیر نیستند. در این مرحله، داده‌های رستری جابه‌جایی سطح زمین در محیط ArcGIS به نقاط برداری تبدیل شدند. نقاط فرونشست از مناطق دارای جابه‌جایی منفی انتخاب گردیدند. در ادامه، برای آنالیزها،لایه نقاط فرونشست به دو بخش تقسیم شدند: ۷۰ درصد نقاط برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد باقیمانده برای ارزیابی مدل. سپس، لایه نقاط فرونشست با هریک از لایه‌های مستقل قطع داده شد و داده‌های حاصل جهت ورود به مدل‌سازی آماده گردیدند. فرآیند مدل‌سازی از طریق افزونه و بسته های (random Forest، rattle، rgdal، raster، sp، caret، pROC ، ggplot2) در نرم‌افزار R انجام گرفت. در مدل جنگل تصادفی، از دو شاخص مهم میانگین کاهش دقت (Mean Decrease Accuracy) و میانگین کاهش ضریب جینی (Mean Decrease Gini) برای تعیین اولویت، اهمیت و وزن‌دهی عوامل مؤثر بر فرونشست استفاده شد و به منظور ارزیابی عملکرد مدل، از معیارهای دقت (Accuracy)، ضریب کاپا (Kappa) و منحنی ویژگی عملکرد گیرنده (ROC Curve) را مورد استفاده قرار دادیم. در ادامه، با توجه به وزن‌دهی عوامل مؤثر، نقشه خروجی پهنه‌بندی ریسک فرونشست برای دشت اشتهارد در چهار کلاس خطر تهیه گردید و جهت ارزیابی و صحت سنجی نقشه ی پهنه بندی ریسک از نقاط مرحله آزمون یعنی ۳۰ درصد از کل داده ها که برای مرحله اعتبار سنجی کنار گذاشته شده بود، بازدید میدانی (با تهیه پرسش نامه و گزارش افراد محلی با GPS بر روی فرونشست ها پیمایش و نقاط به‌وسیله آن برداشت شد) و مقایسه با مطالعات قبلی دراین منطقه استفاده شد (شکل۲).

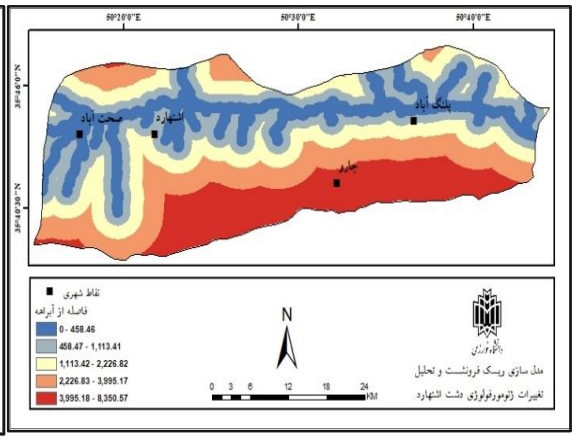


شکل۲. نمودار روش کار مدل سازی ریسک خطروقوع فرونشست با روش جنگل تصادفی

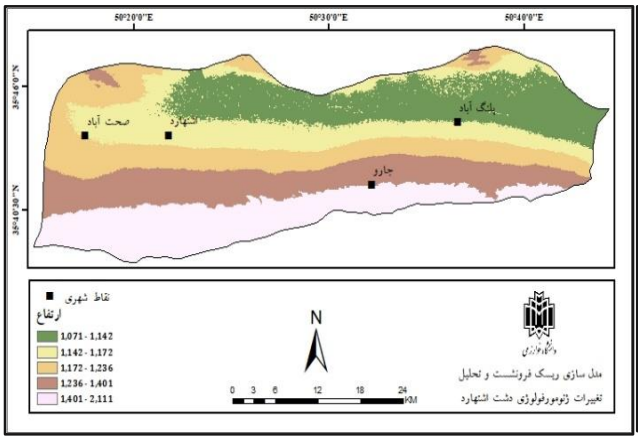
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

جدول۱. لایه های مورد استفاده در مدل سازی ریسک فرونشست با روش جنگل تصادفی و نحوه تهیه آن

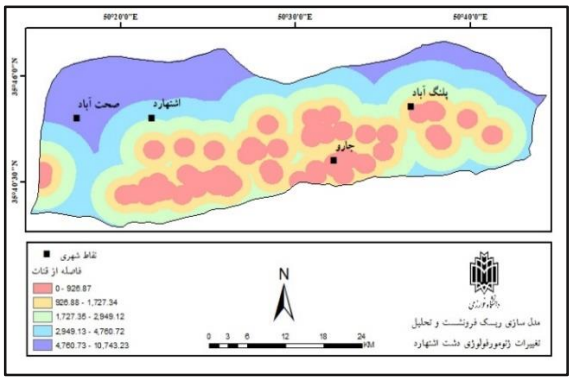
لایه ها	نحوه تهیه	لایه ها	نحوه تهیه
فاصله از رودخانه	لایه آبراهه–وزارت نیرو	فاصله از چاه	لایه چاه– وزارت نیرو
فاصله از قنات	لایه قنات–وزارت نیرو	فاصله از گسل	لایه گسل–وزارت نیرو
زمین شناسی	لایه زمین شناسی–سازمان آبخیزداری استان البرز	خاک	لایه خاک– سازمان آبخیزداری استان البرز
ارتفاع	ASTER با قدرت تفکیک ۱۰	تراکم زهکشی	ASTER با قدرت تفکیک ۱۰
تابش خورشیدی	ASTER با قدرت تفکیک ۱۰	شاخص رطوبت توپوگرافی	ASTER با قدرت تفکیک ۱۰ و با استفاده نرم افزار SAGA-GIS انجام شد.
کاربری اراضی	از سایت (Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Timeseries downloader) برای سال ۲۰۲۳ تهیه شد.	عمق آب زیرزمینی	اکسل موقعیت چاه ها و عمق چاه های پیزومتری–سازمان آب منطقه ای البرز–تهیه نقشه میانگین عمق بازه ۶ ساله (۲۰۱۷–۲۰۲۳) با روش درون یابی (IDW)



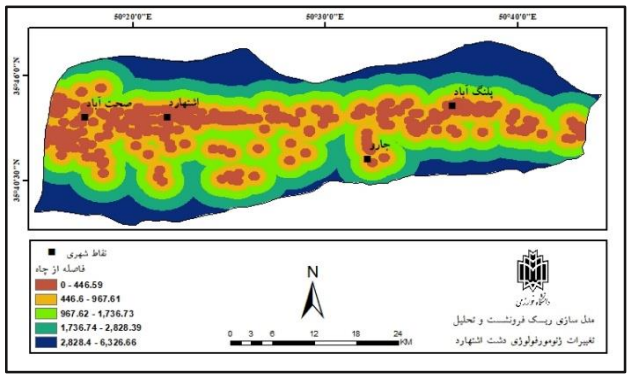
شکل۳. نقشه ارتفاع



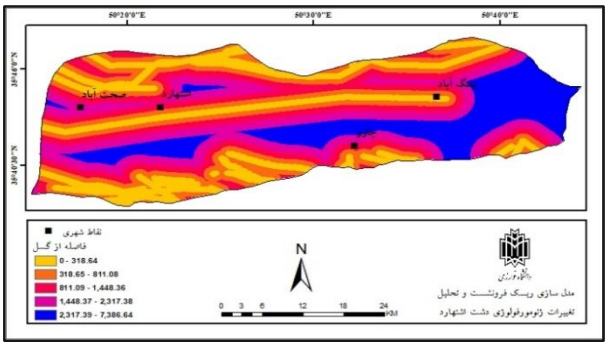
شکل۴. نقشه فاصله از آبراهه



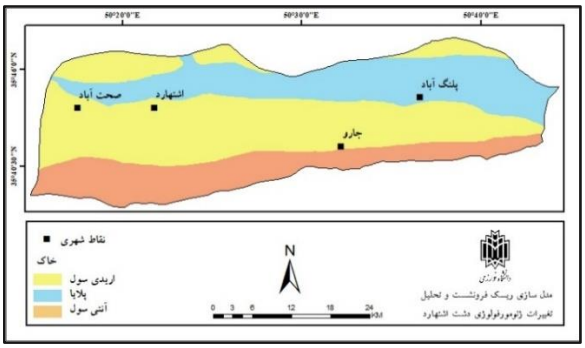
شکل۵. نقشه فاصله از قنات



شکل۶. نقشه فاصله از چاه

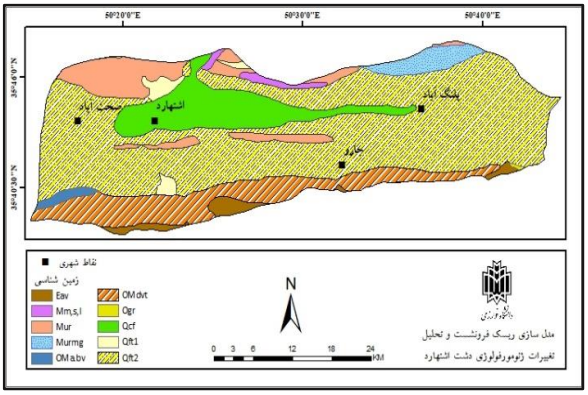


شکل۷. نقشه فاصله ازگسل

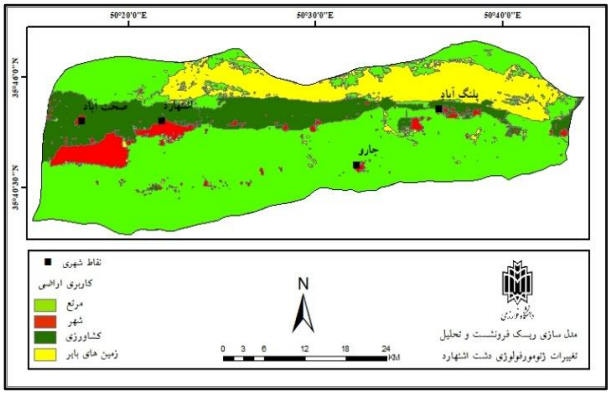


شکل۸. نقشه خاک

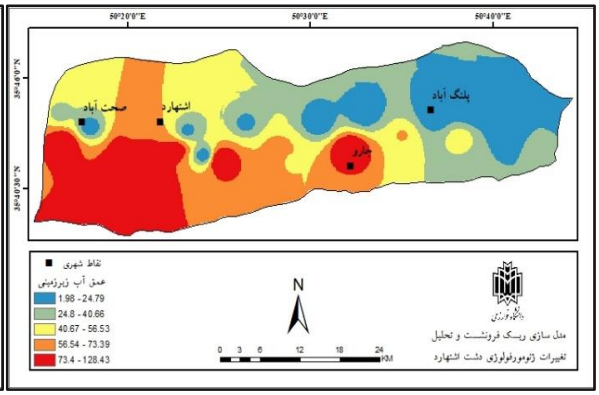
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]



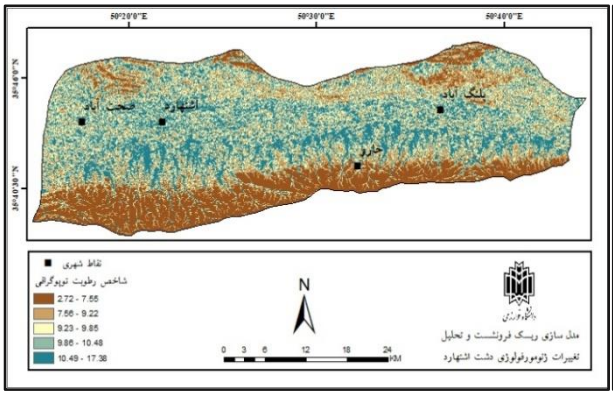
شکل ۹. نقشه زمین شناسی



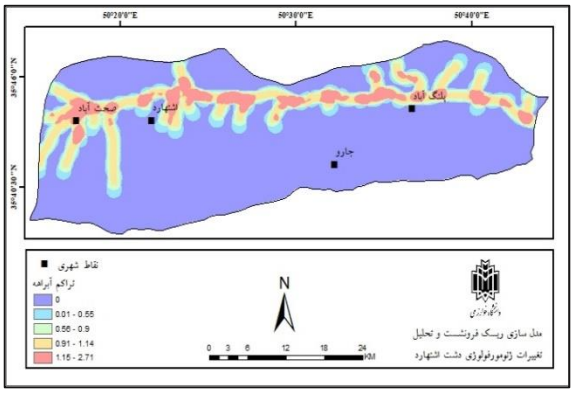
شکل ۱۰. نقشه کاربری اراضی



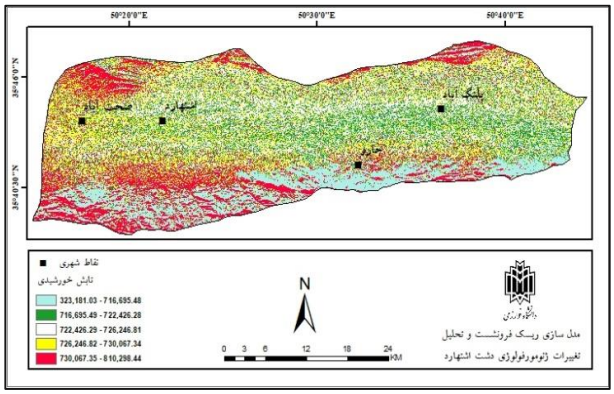
شکل ۱۱. نقشه عمق آب زیرزمینی



شکل ۱۲. نقشه TWI



شکل ۱۳. نقشه تراکم آبراهه



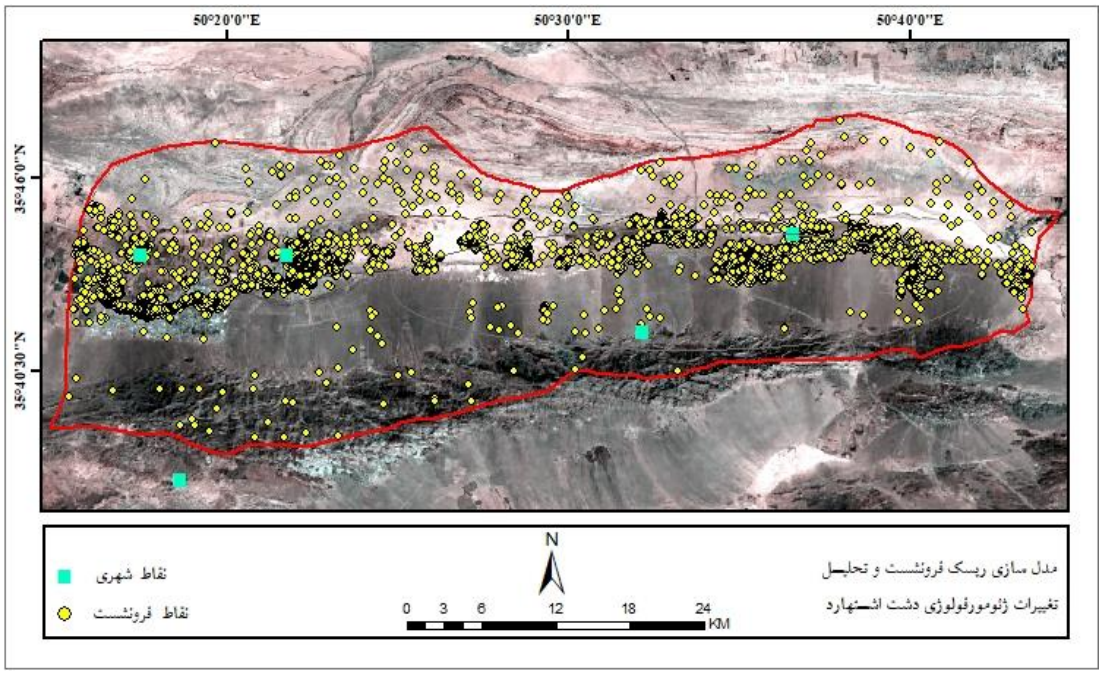
شکل ۱۴. نقشه تابش خورشیدی

۲-۱. اهمیت لایه وابسته (نقاط فرونشست) در مدل سازی ریسک فرونشست دشت اشتهارد با روش جنگل تصادفی

نقاط فرونشست در مدل جنگل تصادفی، داده‌های کلیدی برای آموزش، اعتبارسنجی و پیش‌بینی دقیق خطر فرونشست هستند این نقاط کمک می‌کنند تا مدل الگوهای مکانی را تشخیص دهد، دقت طبقه‌بندی را افزایش دهد، و یک نقشه پیش‌بینی معتبر از مناطق مستعد فرونشست ارائه دهد. بدون داشتن لایه وابسته نقاط فرونشست، مدل قادر به تشخیص روابط بین عوامل محیطی و وقوع فرونشست نخواهد بود .در اغلب مطالعات مرتبط با مدلسازی ریسک فرونشست زمین، تهیه لایه وابسته (نقاط فرونشست) به‌صورت میدانی و از طریق برداشت GPS یا بررسی‌های زمین‌شناسی انجام می‌پذیرد. با این حال، در پژوهش حاضر، از یک رویکرد جایگزین علمی، منطقی و پیشرفته استفاده کردیم که در صورت عدم دسترسی میدانی گسترده، نبود امکانات برداشت دقیق میدانی، و همچنین وسعت زیاد منطقه در بسیاری از پژوهش ها، آیا می توانیم بستر مناسبی برای تهیه لایه های وابسته و پهنه بندی ریسک خطر فرونشست داشته باشیم؟؟ از این رو در پژوهش حاضر، برای اولین بار از نقشه فرونشست زمین تولیدشده در

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

سال ۲۰۲۳ با تکنیک تداخل‌سنجی راداری (D_InSAR) و تصاویر Sentinel-1، به‌عنوان منبع تولید نقاط فرونشست (لایه وابسته) استفاده شد (شکل۱۵). تفاوت حائز اهمیت در اینجاست که این مطالعه به‌جای استفاده مستقیم از داده‌های رستری به‌عنوان متغیر خروجی، با استخراج هوشمندانه‌ی پیکسل‌های با نرخ نشست منفی (مشهود) و تبدیل آن‌ها به نقاط برداری، اقدام به تولید پایگاه داده آموزشی برای مدل Random Forest نمود. نکته حائز اهمیت این است که به‌منظور حفظ یکپارچگی و ضریب اطمینان علمی در تحلیل مدل Random Forest، هیچ‌گونه تغییری عمده‌ای در نقاط استخراج‌شده اعمال نگردید. انتخاب این روش، از یک‌سو امکان بررسی قابلیت استفاده مستقیم از داده‌های D_InSAR برای تولید لایه‌های آموزشی در مدل‌های یادگیری ماشین را فراهم ساخت، و از سوی دیگر نوعی ارزیابی واقع‌گرایانه از عملکرد مدل در شرایط فقدان داده‌های میدانی را میسر کرد، بنابراین، این روش می تواند یک نوآوری هوشمندانه در روش‌شناسی باشد و با توجه به دقت بالا و پوشش وسیع داده‌های راداری، جهت تعیین محدوده کلی ریسک به‌شدت قابل دفاع است.



شکل ۱۵. نقشه نقاط فرونشست استخراج شده از روش تداخل‌سنجی راداری (DInSAR) برای سال ۲۰۲۳

۲-۲. الگوریتم جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest - RF) یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین روش‌های یادگیری ماشین در تحلیل داده‌های پیچیده است که در مسائل طبقه‌بندی (Classification) و رگرسیون (Regression) استفاده می‌شود. این روش یک تکنیک یادگیری گروهی (Ensemble Learning) محسوب می‌شود که مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم‌گیری (Decision Trees) را به‌صورت همزمان به کار می‌گیرد تا خروجی‌های قابل‌اعتمادتر، پایدارتر و دقیق‌تری ارائه دهد. به دلیل پایداری بالا، مقاومت در برابر بیش‌برازش (Overfitting) و توانایی کار با مجموعه داده‌های بزرگ و نامتوازن، جنگل تصادفی در بسیاری از حوزه‌ها مانند مدل‌سازی مخاطرات طبیعی، شناسایی الگوهای پیچیده در داده‌های محیطی و طبقه‌بندی مناطق مستعد خطر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ویژگی‌ها باعث شده است که این الگوریتم به‌عنوان یکی از بهترین روش‌ها برای پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین مطرح شود (علی دوست و عارفی[1]، ۲۰۲۴؛ دانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۵).

[1] - Lidoost & Arefi
[2] - Dong

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

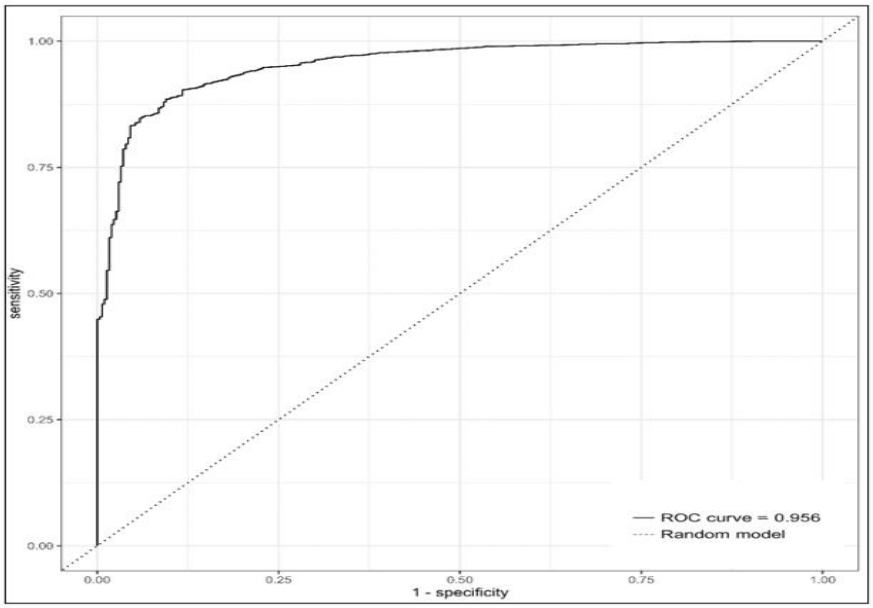
یافته‌های پژوهش

۱. اعتبار سنجی مدل

در مرحله ارزیابی مدل جنگل تصادفی برای پهنه‌بندی ریسک فرونشست در دشت اشتهارد، استفاده از سه شاخص مکمل باعث شده که ارزیابی ما هم از نظر دقت کلی (Accuracy)، هم از نظر توافق واقعی (Kappa)، و هم از نظر قدرت تمایز (AUC) کاملاً علمی و معتبر باشد. این معیارها به‌طور مستقیم به تعیین دقت پیش‌بینی‌ها و قابلیت تعمیم مدل به داده‌های جدید کمک می‌کنند (جدول ۲ و شکل ۱۶). نتایج نشان می‌دهند مدل جنگل تصادفی ما برای پهنه‌بندی ریسک خطر فرونشست عملکرد بسیار خوبی داشته است.

جدول۲. ارزیابی مدل جنگل تصادفی جهت پهنه بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد

مدل ارزیابی	مقدار	تفسیر
دقت (Accuracy)	۰/۹۶۳	مدل به طور کلی ۹۶/۳ درصد از نمونه‌ها را به درستی طبقه‌بندی کرده است. این یک نتیجه بسیار خوب است و نشان می‌دهد که مدل ما به خوبی آموزش دیده است و نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب مدل در تشخیص صحیح مناطق مختلف خطر است.
ضریب کاپا (Kappa)	۰/۶۱۱	توافق بین پیش‌بینی‌های مدل و مقادیر واقعی، "اساسی" است. این بدان معناست که مدل فراتر از یک توافق تصادفی عمل می‌کند و توافق قابل توجهی با واقعیت دارد. اگرچه این مقدار از دقت کمتر است، اما همچنان نشان‌دهنده یک توافق قابل قبول است، به ویژه با در نظر گرفتن این که ضریب کاپا، احتمال توافق تصادفی را نیز در نظر می‌گیرد.
AUC (ROC AUC)	۰/۹۵۵	مدل عملکرد بسیار خوبی در تشخیص بین کلاس‌های مختلف خطر فرونشست دارد. این مقدار نزدیک به ۱ است و تأیید می‌کند که مدل قادر است با دقت بالایی نمونه‌های مثبت (مناطق پرخطر) را از نمونه‌های منفی (مناطق کم‌خطر) تشخیص دهد.



شکل۱۶. منحنی ROC و مساحت سطح زیر منحنی مربوط به صحت سنجی مدل جنگل تصادفی

۲. بررسی نقش متغیرها

در مدل جنگل تصادفی، از دو شاخص مهم میانگین کاهش دقت (Mean Decrease Accuracy) و میانگین کاهش ضریب جینی (Mean Decrease Gini) برای تعیین اولویت، اهمیت و وزن‌دهی عوامل مؤثر بر فرونشست استفاده شد. با توجه به مطالعات و تجربیات موجود، روش میانگین کاهشی دقت معمولاً کاربردی‌تر و مناسب‌تر برای تعیین اولویت و اهمیت ویژگی‌ها در مدل‌های پیش‌بینی ریسک فرونشست است. این روش برای مدل‌هایی که هدف آن‌ها پیش‌بینی دقیق و شبیه‌سازی شرایط خاص است،

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

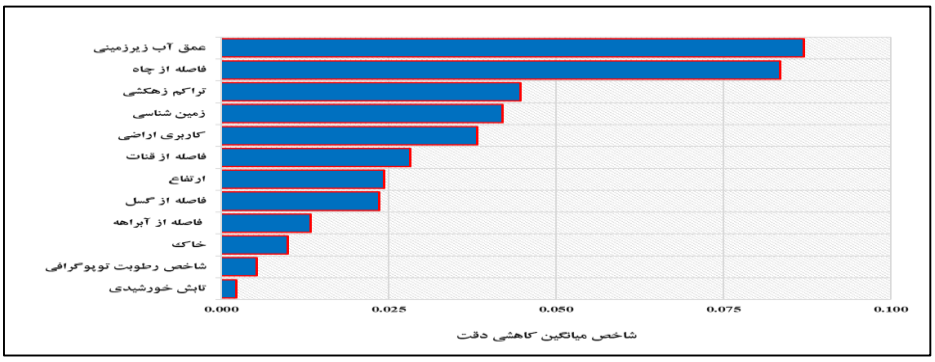
کارآمدتر به نظر می‌رسد (مختاری و همکاران، ۱۳۹۸) که ما در این پژوهش با الویت قرار دادن شاخص میانگین کاهشی دقت از نتایج حاصل از شاخص میانگین کاهشی جینی هم برای دقت عملکرد بیشتر مدل ها استفاده کردیم (جدول ۳ و شکل ۱۷و ۱۸).

- عمق آب زیرزمینی و فاصله از چاه به‌عنوان دو عامل اصلی در هر دو روش شناسایی شده‌اند، که نشان‌دهنده اهمیت بارز منابع آب زیرزمینی در پیش‌بینی فرونشست است. این نتیجه تأکید می‌کند که عمق آب زیرزمینی و فاصله از چاه نه تنها در کاهش دقت مدل بلکه در تقسیم‌بندی دقیق‌تر داده‌ها و شناسایی الگوهای فرونشست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
- زمین‌شناسی و کاربری اراضی در هر دو روش اهمیت بالایی دارند و این می‌تواند به دلیل تأثیر ساختار زمین و نوع استفاده از اراضی در وقوع فرونشست باشد.
- بطور کلی متغیرهای زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از قنات، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و خاک نیز به ترتیب در رده های اهمیت تقریبا مشابه در هردو شاخص قرار می گیرند و بر شرایط فرونشست تأثیرگذار هستند و نقش قابل توجهی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرونشست دارند.
- در نهایت متغیرهایی نظیرتابش خورشیدی و شاخص رطوبت توپوگرافی در هر دو شاخص نسبت به سایر متغیرها تأثیر کمتری در تعیین ریسک فرونشست درمدل ما دارند.

از آنجا که هر دو روش به نتایج مشابهی دست یافته‌اند، می‌توان گفت که مدل جنگل تصادفی به خوبی توانسته است الگوهای واقعی فرونشست را شبیه‌سازی کند. بنابراین، این شباهت‌ها به معنی پایداری و اعتبار نتایج و قابلیت تعمیم‌پذیری مدل و نتایج آن است.

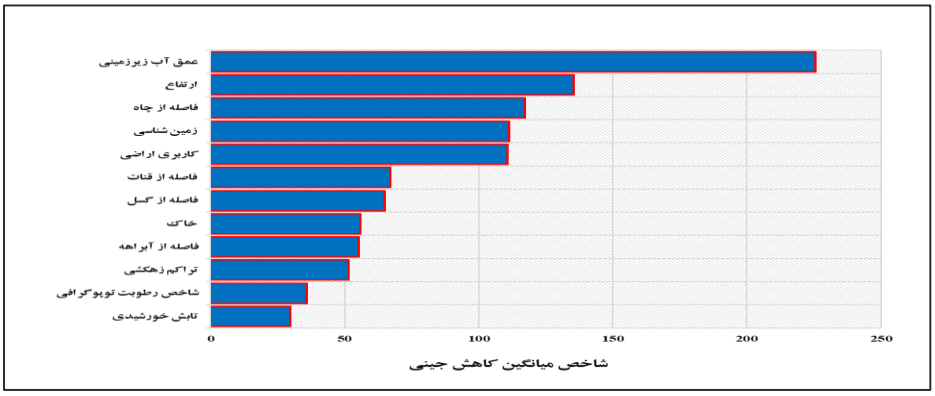
جدول۳. مقادیر شاخص میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهش جینی

متغیر	شاخص میانگین کاهشی دقت	شاخص میانگین کاهش جینی
عمق آب زیرزمینی	۰/۰۸۷	۲۲۵/۴۷
فاصله از چاه	۰/۰۸۴	۱۱۷/۱۶
تراکم زهکشی	۰/۰۴۵	۵۱/۴۹
زمین شناسی	۰/۰۴۲	۱۱۱/۲۴
کاربری اراضی	۰/۰۳۸	۱۱۰/۶۷
فاصله از قنات	۰/۰۲۸	۶۷/۰۹
ارتفاع	۰/۰۲۴	۱۳۵/۵۴
فاصله از گسل	۰/۰۲۳	۶۴/۹۱
فاصله از رودخانه	۰/۰۱۳	۵۵/۲۲
خاک	۰/۰۱۰	۵۵/۸۴
شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۰۰۵	۳۵/۸۶
تابش خورشیدی	۰/۰۰۲	۲۹/۶۶



شکل۱۷. نمودار اهمیت متغیرها براساس شاخص میانگین کاهشی دقت

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]



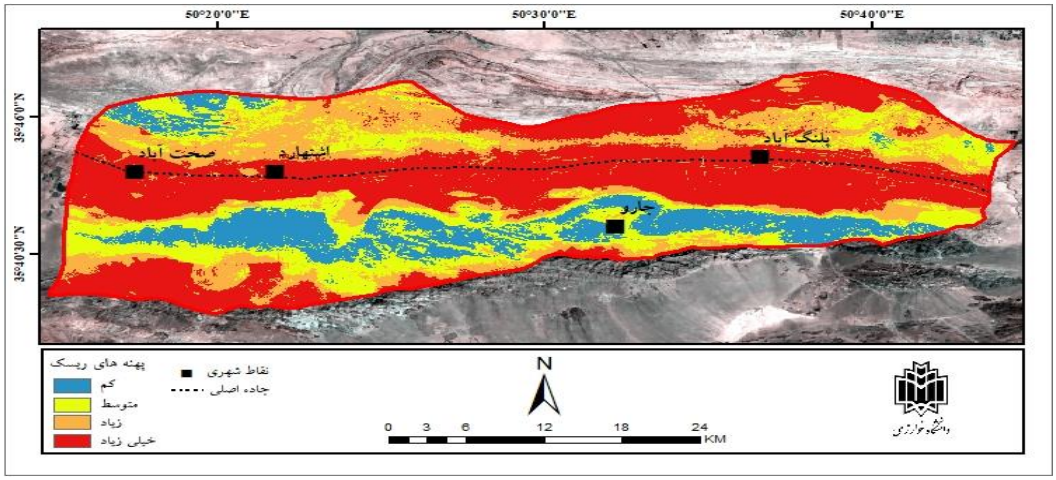
شکل۱۸. نمودار اهمیت متغیرها براساس شاخص میانگین کاهش جینی

۳. تهیه پهنه‌بندی ریسک فرونشست

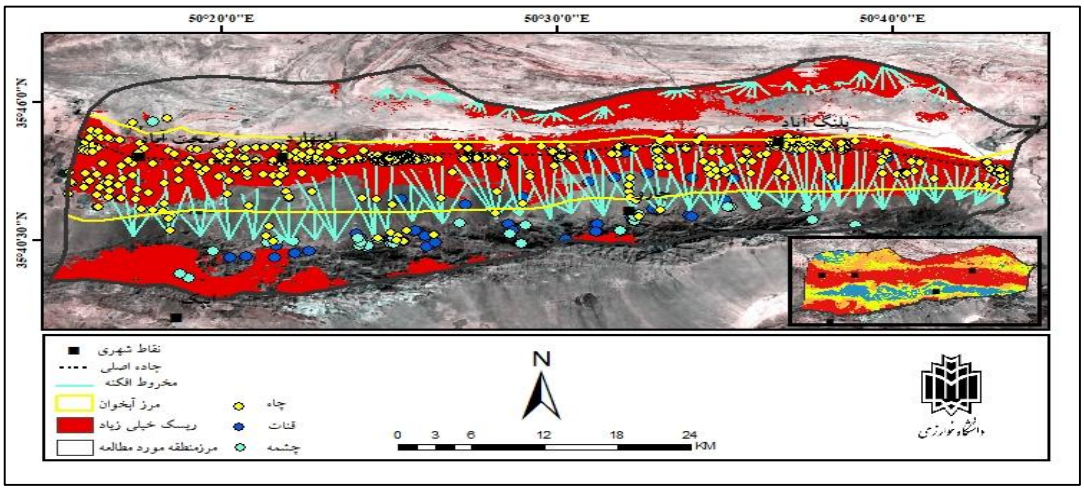
نقشه پهنه‌بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد که با استفاده از مدل جنگل تصادفی ایجاد شده است، نشان‌دهنده توزیع فضایی ریسک فرونشست در این منطقه است. نتایج حاصل از پهنه بندی ریسک وقوع فرونشست به روش جنگل تصادفی با استفاده از تابع شکست طبیعی در چهار کلاس؛ خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی گردید (شکل ۱۹). همانطور که در نقشه مشاهده می‌شود (شکل ۲۰)، طبق جدول اطلاعاتی مربوط به طبقه‌بندی ریسک فرونشست، بیشترین مساحت منطقه به ترتیب در محدوده ریسک بسیار زیاد (۴۱/۴۵ درصد) و ریسک زیاد (۲۳/۳۶) قرار گرفته است (جدول ۴ و شکل ۲۱). بخش عمده ی این طبقه دقیقاً در محدوده‌ی میانی دشت و بر ناحیه‌ی آبخوان اشتهارد منطبق است؛ منطقه‌ای که تمرکز بالایی از فعالیت‌های انسانی نظیر کشاورزی، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و توسعه شهری در آن صورت می‌گیرد. این در حالیست که در راستای اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد، از مجموعه‌ای از نقاط آزمون (۳۰ درصد) تهیه شده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری استفاده گردید. نتایج تحلیل تطبیقی این نقاط با نقشه نهایی ریسک، که به‌وسیله الگوریتم قدرتمند جنگل تصادفی(Random Forest) و بر پایه‌ی پارامترهای ژئومورفولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و کاربری اراضی تهیه شده است، نشان می‌دهد که بیشترین تراکم (۸/۱۵) و فراوانی نسبی (۹۳/۰۴) نقاط آزمون با طبقه‌ی "ریسک خیلی زیاد" هم‌پوشانی دارد (جدول ۴، شکل ۲۳ و ۲۲). این هم‌پوشانی در گستره‌ی میانی دشت اشتهارد و به‌ویژه در محدوده‌ی آبخوان اشتهارد ، به‌وضوح مشهود است. تحلیل مکانی این نقاط نشان داد که بیش از ۸۰ درصدآن‌ها در طبقات با "ریسک زیاد" و "ریسک بسیار زیاد" واقع شده‌اند که خود بیانگردقت بالای مدل در پیش‌بینی نواحی بحرانی است. این هم‌زمانی مکانی بین شدت بالای ریسک فرونشست و نقاط آزمون، ضمن تأیید دقت مدل، به‌خوبی مؤید حساسیت اکوسیستم منطقه نسبت به بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. درواقع این انطباق مکانی و آماری بین خروجی مدل و نقاط آزمون و بعبارتی توزیع فضایی ریسک و نقاط آزمون در طول محور شرقی–غربی دشت، به‌ویژه در محدوده‌ی آبخوان، گویای آن است که ضمن تأیید صحت عملکرد الگوریتم، نشان‌دهنده توان بالای مدل‌سازی در تفکیک سطوح خطر و نیز اولویت‌بندی مناطق حساس برای مداخلات مدیریتی است. بدین ترتیب، نقشه ریسک حاضر می‌تواند به‌عنوان ابزاری علمی و قابل اعتماد در برنامه‌ریزی منابع آب، توسعه پایدار اراضی و اقدامات پیشگیرانه در برابر پدیده‌ی فرونشست زمین در دشت اشتهارد مورد استفاده قرار گیرد. برای صحت‌سنجی نقشه پهنه بندی ریسک فرونشست که با استفاده از مدل جنگل تصادفی تهیه شده بود بازدید میدانی از دو روستای فتح‌آباد و مروت‌آباد در منطقه کشاورزی غرب دشت اشتهارد و محدوده آبخوان اشتهارد انجام شد (شکل ۲۴). این مناطق به‌عنوان نمونه‌های منتخب از نقاط پرریسک فرونشست در نظر گرفته شدند، چرا که فرونشست در این نواحی با شدت بیشتری در ارتباط است. درواقع بازدید میدانی از این نقاط به‌منظور صحت‌سنجی مدل، ارزیابی تطابق پیش‌بینی‌های مدل با وضعیت واقعی زمین است تا مطمئن شویم که روش‌های مورد استفاده توانسته‌اند مناطق پرریسک فرونشست را به درستی شبیه‌سازی کنند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

دشت اشتهارد به‌ویژه در نواحی اطراف فتح‌آباد و مروت‌آباد با بستر خاک‌های رسی و سست و سازندهای کواترنری، شرایط زمین‌شناسی و خاکی مناسبی برای وقوع فرونشست دارد.این در حالیست که تمرکز بالای چاه ها را به دراین مناطق شاهد هستیم. این مناطق به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی و ساخت‌وساز، تحت فشار شدید قرار گرفته‌اند. این فشارها باعث کاهش سطح آب‌های زیرزمینی شده و در نهایت موجب فرونشست زمین در نواحی با خاک‌های ضعیف و بسترهای آبرفتی و سست می‌شود. حاصل از بازدید میدانی به وضوح نشان می‌دهند که روش جنگل تصادفی توانسته است به‌طور قابل قبولی مناطق پرریسک فرونشست را شبیه‌سازی کند. در نتیجه، مدل جنگل تصادفی به‌عنوان ابزار موثری برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی فرونشست در دشت اشتهارد شناخته شد و این تحقیق ثابت کرد که این مدل قادر به شبیه‌سازی الگوهای فرونشست در شرایط واقعی است.



شکل۱۹. نقشه نهایی پهنه بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد با استفاده از مدل جنگل تصادفی

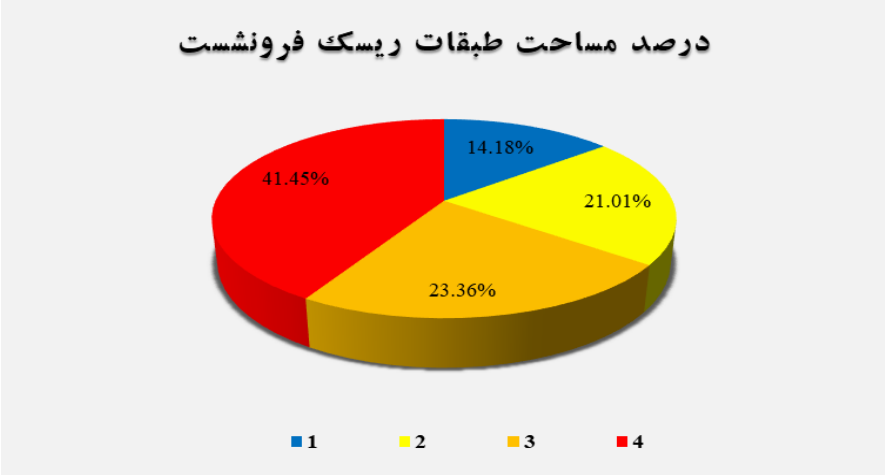


شکل۲۰. نقشه هم پوشانی طبقه ریسک خیلی زیاد فرونشست برنقشه منابع آب منطقه مورد مطالعه

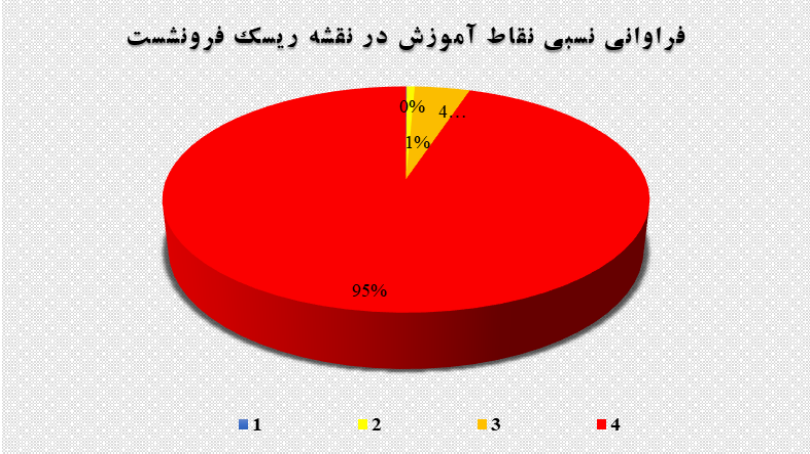
جدول۴. جدول اطلاعاتی نقشه پهنه بندی ریسک خطر فرونشست و صحت سنجی با نقاط مرحله ی آزمون (۳۰ درصد)

طبقات ریسک	مقادیر ریسک	مساحت (KM^2)	درصد مساحت	تراکم فرونشست	فراوانی نسبی
۱	کم	۷۵/۷۶	۱۴/۱۸	۰/۰۴	۰/۱۵
۲	متوسط	۱۱۲/۲۲	۲۱/۰۱	۰/۱۵	۰/۸۸
۳	زیاد	۱۲۴/۷۴	۲۳/۳۶	۰/۹۲	۵/۹۳
۴	بسیار زیاد	۲۲۱/۳۶	۴۱/۴۵	۸/۱۵	۹۳/۰۴

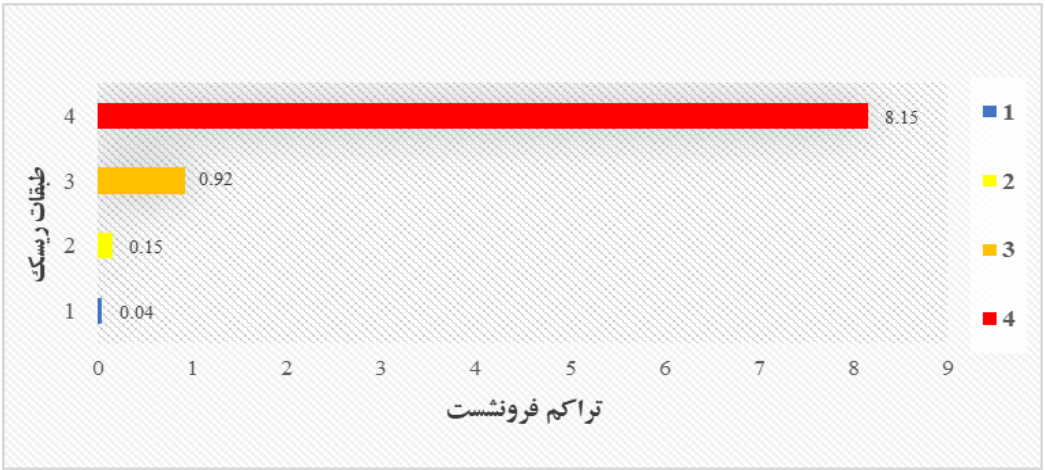
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]



شکل ۲۱. درصد مساحت طبقات ریسک فرونشست

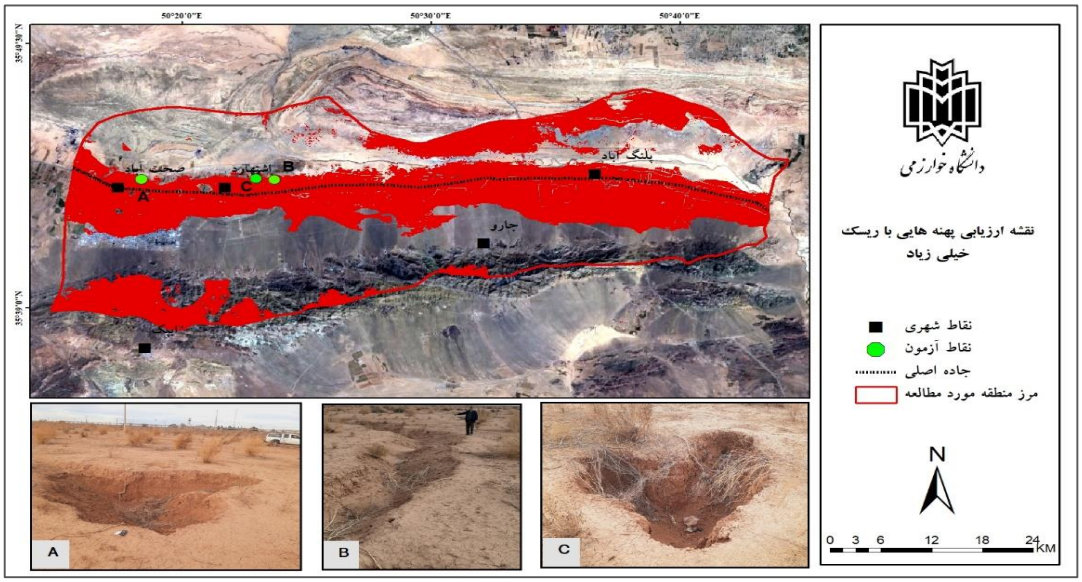


شکل ۲۲. فراوانی نسبی نقاط آزمون در نقشه پهنه بندی ریسک فرونشست



شکل ۲۳. تراکم نقاط آزمون در نقشه پهنه بندی ریسک خطر فرونشست

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]



شکل ۲۴. صحت سنجی نقشه ریسک فرونشست با استفاده از بازدید میدانی

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

فرونشست زمین، به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و اقتصادی در سطح جهانی، در مناطق مختلف، اللخصوص در دشت‌های ایران، تهدیدی برای پایدار ماندن منابع طبیعی و زیرساخت‌های شهری است. در این میان دشت‌های حاصل‌خیزی مانند دشت اشتهارد، که به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی تحت فشار قرار دارند، به طورکلی و در مقایسه با تکنیک های مبتنی بر نظرات کارشناسان و روشهای آماری، الگوریتم های یادگیری ماشینی در مدلسازی بسیاری از پدیده های جهان واقعی عملکرد و دقت بسیار مناسبتری دارند. ازاین رو در این مطالعه با بهره گیری از مدل جنگل تصادفی به تحلیل و مدلسازی ریسک خطر وقوع فرونشست و نقش عوامل مؤثر بر آن در محدوده دشت اشتهاردپرداخته شده است. در این راستا، ۱۲ لایه مستقل شامل نقشه ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از قنات، فاصله از چاه، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی، تراکم زهکشی، خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی و تابش خورشیدی و یک لایه وابسته شامل نقاط فرونشست مورد استفاده قرار گرفت. لایه وابسته (نقاط فرونشست) با استفاده از نقشه رستری فرونشست که بر اساس روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D_InSAR) در سال ۲۰۲۳ تهیه شد، استخراج گردید. این در حالیست که انتخاب این روش (تبدیل مستقیم نقشه فرونشست D_InSAR به لایه وابسته نقطه‌ای برای مدل Random Forest)، از یک‌سو سنجش عینی توانمندی روش D_InSAR در تشخیص و بازنمایی محدوده ی فرونشست زمین در شرایط فقدان مشاهدات زمینی است.از طرفی این روش می تواند یک نوآوری هوشمندانه در روش‌شناسی پژوهش ما باشد این موضوع نه‌تنها گامی به‌سوی بهره‌برداری از فناوری‌های نوین در مطالعات زیست‌محیطی و زمین‌شناسی محسوب می‌شود، بلکه می‌تواند مبنایی برای مطالعات آینده در جهت استانداردسازی استفاده از داده‌های راداری برای تولید لایه‌های وابسته باشد و نقطه قوت پژوهش ما می باشد. این رویکرد نوآورانه نه‌تنها روش‌محور و داده‌محور است، بلکه در حوزه کاربردی‌سازی سنجش‌ازدور در مدلسازی داده‌محور بدون تکیه بر برداشت میدانی، الگویی جدید و قابل تعمیم برای مناطق فاقد داده محسوب می‌شود.

ما با استفاده از ترکیب سه شاخص Accuracy، Kappa و ROC-AUC یک رویکرد علمی و جامع برای ارزیابی مدل جنگل تصادفی در پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین را اعمال کردیم. این ترکیب سه‌گانه ارزیابی، با پوشش نقاط قوت و ضعف یکدیگر، تحلیل دقیق‌تری از عملکرد مدل ارائه می‌دهد. دقت بالا (۰/۹۶۳)، مقدار AUC نزدیک به ۱، ضریب کاپا (۰/۶۱۱) نشان‌دهنده آن است که این مدل قادر است با دقت بالایی مناطق پرخطر را شناسایی کند. این ویژگی‌ها مدل مارا به یک ابزار ارزشمند برای مدیریت خطر فرونشست تبدیل می‌کند.از طرفی در این پژوهش از دو شاخص مهم میانگین کاهش دقت (Mean Decrease

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

Accuracy) و میانگین کاهش ضریب جینی (Mean Decrease Gini) برای تعیین اولویت، اهمیت و وزن‌دهی عوامل مؤثر بر فرونشست استفاده شد. که در نهایت با توجه به اهمیت بالا ی روش میانگین کاهشی دقت در مدل‌سازی دقیق‌تر ریسک فرونشست و پیش‌بینی دقیق‌تری از مناطق پرریسک جهت تهیه نقشه ریسک فرونشست با در نظر گرفتن ماهحصل نتایج شاخص میانگین کاهش جینی مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا عمق آب زیرزمینی و فاصله از چاه به‌عنوان دو عامل اصلی در هر دو روش شناسایی شده‌اند، که نشان‌دهنده اهمیت بارز منابع آب زیرزمینی در پیش‌بینی فرونشست است. بطور کلی متغیرهای زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از قنات، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و خاک نیز به ترتیب در رده های اهمیت تقریبا مشابه در هردو شاخص قرار می گیرند و بر شرایط فرونشست تأثیرگذار هستند این در حالیست که شباهت تقریبی نتایج دو روش میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهشی جینی هم نشان‌دهنده تأثیر قوی و پایدار این متغیرها بر فرونشست است. از طرفی بیانگر پایداری و اعتبار نتایج است و می‌توان از آنها به‌عنوان دلیلی برای قوی بودن مدل و تحلیل‌ها استفاده کرد.

در نهایت نقشه پهنه‌بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد که نشان‌دهنده توزیع فضایی ریسک فرونشست در این منطقه است حاکی از آن است که بیشترین مساحت منطقه به ترتیب در محدوده ریسک بسیار زیاد (۴۱/۴۵ درصد) و ریسک زیاد (۲۳/۳۶) قرار گرفته است بطوری که پهنه‌های اصلی ریسک فرونشست به‌طور عمده در محدوده میانی دشت اشتهارد، از شرق به غرب، کشیده شده‌اند. این منطقه که در محدوده آبخوان اشتهارد قرار دارد، به‌دلیل تمرکز بالای منابع آبی، کاربری‌های شهری و کشاورزی، بیشترین سطح ریسک فرونشست را در خود جای داده است. این در حالیست که بیشترین مساحت این دشت را سازند کواترنر و خاک اریدی سول دربرگرفته است که این سازند از نهشته‌های آبرفتی و خاک‌های ریزدانه‌ای مانند سیلت و رس تشکیل شده است که به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، شامل نفوذپذیری بالا، حساسیت به تغییرات رطوبت و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، مستعد فرونشست است. در نهایت نقشه پهنه بندی ریسک با استفاده از نقاط آزمون (۳۰ درصد)، بازدید میدانی (روستای فتح آباد و مروت آباد) و بررسی مطالعات قبلی (جعفری و همکاران (۱۴۰۰) و حصارکی زاد و همکاران (۱۴۰۱) مورد صحت سنجی قرار گرفت. این هم‌زمانی مکانی بین شدت بالای ریسک فرونشست و نقاط آزمون، ضمن تأیید دقت مدل، به‌خوبی مؤید حساسیت اکوسیستم منطقه نسبت به بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد درواقع این انطباق بین توزیع فضایی ریسک و نقاط آزمون در طول محور شرقی–غربی دشت، به‌ویژه در محدوده‌ی آبخوان، گویای آن است که ضمن تأیید صحت عملکرد الگوریتم، نشان‌دهنده توان بالای مدل‌سازی در تفکیک سطوح خطر و نیز اولویت‌بندی مناطق حساس برای مداخلات مدیریتی است. این در حالیست که دشت اشتهارد که به دلیل برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی جزو دشت‌های ممنوعه بحرانی اعلام‌شده است با رشد جمعیت و توسعه کشاورزی و صنعت در منطقه نیاز بیشتر به آب در آن امری بدیهی هست. افت سطح آب زیرزمینی می‌تواند مشکلات زیادی در کوتاه‌مدت و بلندمدت ایجاد نماید؛ کمبود آب، افزایش هزینه‌های برداشت آب، اثرات مورفولوژیکی فرونشست زمین، برهم خوردن تعادل منطقه، تغییر کاربری و هم‌زمان بر دو چالش اساسی زیست‌محیطی دیگر در این منطقه یعنی بیابان‌زایی و گردوغبار هم تأثیرگذار است و همچنین هیدرولوژی منطقه را تغییر خواهد داد و تغییرات ارتفاعی که به وجود می‌آید هم به‌عنوان عاملی است که خود به‌تنهایی بر تشدید سیلاب‌ها در این منطقه نقش می‌زند و این شرایطی است که در حال حاضر بعضی از مناطق اشتهارد را در برگرفته است. قابل‌ذکر است که با توجه به پویایی دشت اشتهارد به لحاظ تکتونیکی، فرونشست سبب تحریک گسل‌های فعال و افزایش آسیب‌پذیری می‌شود ازآنجاکه نشست زمین دارای تأثیرات مخرب و دائمی است، بررسی ریسک فرونشست، شناسایی عوامل تاثیرگذار برایجاد آن و به‌تبع آن ارزیابی تاثیرات تغییرات مورفولوژیکی ناشی ازآن، می‌تواند دیدی مناسب از خطرات پیش رو را روشن سازد و در راستای پیشگیری از صدمات بیشتر به منطقه برنامه‌ریزی صورت گیرد.

این در حالیست که از نقاط ضعف و محدودیت این مدل می توان به عدم تعادل کلاس‌ها در داده‌های فرونشست دشت اشتهارد اشاره کرد که روی ضریب کاپا تاثیر می گذارد که پدیده‌ای رایج در مدل‌سازی مخاطرات ژئومورفیک و بازتابی از ویژگی ذاتی داده های ژئومورفیک می تواند باشد. خاطرنشان می‌شود که الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل استفاده از bagging (نمونه‌گیری بوت‌استرپ و تجمیع نتایج چندین درخت تصمیم) و انتخاب تصادفی ویژگی‌ها، ذاتاً در برابر عدم تعادل کلاس‌ها مقاوم است. Bagging با ایجاد زیرمجموعه‌های تصادفی از داده‌ها، امکان یادگیری بهتر کلاس اقلیت را فراهم می‌کند، که در AUC بالای

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

۰,۹۵۵ مطالعه ما منعکس شده است. از این رو در راستای پیشنهادات مدیریتی، عملیاتی و پیشنهاد اتی برای مطالعات آینده به موارد ذیل می توان اشاره کرد:

۱. برای بهبود احتمالی در مطالعات آینده می‌توان از روش‌های استاندارد مانند نمونه‌گیری مصنوعی اقلیت (SMOTE) برای کاهش اثر عدم تعادل کلاس‌ها و بهبود Kappa یا وزن‌دهی کلاس‌ها در مدل استفاده کرد تا ضریب کاپا را به محدوده‌های بالاتر (مثلاً بالای ۰,۷) ارتقا داد (زنگ[1] و همکاران، ۲۰۲۳).

۲. انجام تحلیل حساسیت (مثلاً با Grid Search) و مدل‌های ترکیبی (جنگل تصادفی با شبکه‌های عصبی) برای بهینه‌سازی پارامترها.

۳. پایش چندبعدی و سیاست‌محور: توسعه سیستم‌های یکپارچه پایش با ترکیب داده‌های اقلیمی (مانند TRMM یا ERA5، ۲۰۲۴) و سنسورهای ماهواره‌ای (Sentinel-1/2/3) برای پیش‌بینی بلندمدت فرونشست و اثرات آن (مثل بیابان‌زایی، سیلاب)، که با مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (مثل SWAT_ModFlow) برای برنامه‌ریزی پایدار ادغام شود.

۴. بازسازی آبخوان با تزریق هوشمند: اجرای پروژه‌های بازسازی آبخوان با تزریق آب تصفیه‌شده و مدیریت‌شده به لایه‌های آبرفتی (سازند کواترنر) برای افزایش سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار هیدرودینامیکی.

۵. ترویج کشاورزی پایدار: بازطراحی الگوی کشت با تأکید بر گونه‌های کم‌آب‌بر و کاهش ۳۰–۵۰ درصد برداشت آب زیرزمینی از طریق نصب کنتورهای هوشمند روی چاه‌ها و پیاده‌سازی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای پیشرفته، که کارایی مصرف را بهینه می‌کند .

۶. حفاظت اکولوژیکی آبخوان:تقویت پایداری خاک‌های اریدی‌سول با کاشت پوشش گیاهی بومی ریزدانه (مانند گندمیان و سداب شورپسند) با ریشه‌های متراکم، که رطوبت را تثبیت کرده و فرسایش را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد (فائو[2]، ۲۰۲۳). این امر با کنترل گسترش شهری و احیای پوشش گیاهی طبیعی در مناطق پرریسک همراه شود .

۷. آموزش و نظارت پویا: طراحی برنامه‌های آموزشی جامع برای جوامع محلی جهت شناسایی علائم فرونشست (مثل ترک‌ها) و اجرای نظارت منظم با تیم‌های مجهز به GPS در مناطق بحرانی برای پایش مداوم اثربخشی اقدامات.

۸. تشکیل کمیته منطقه‌ای با وزارت نیرو و سازمان آبخیزداری برای نظارت بر چاه‌ها و اجرای قوانین در مناطق ممنوعه بحرانی.

۹. اولویت‌بندی بودجه برای مناطق میانی دشت (آبخوان اشتهارد) در برنامه‌های توسعه پایدار و آموزش محلی برای گزارش ترک‌ها.

از این رو این تحقیق به‌منظور تحلیل و پیش‌بینی ریسک فرونشست در دشت اشتهارد، با استفاده از مدل جنگل تصادفی انجام شد و هدف اصلی آن، ارزیابی دقت مدل و شبیه‌سازی دقیق مناطق پرریسک فرونشست بود. نتایج حاصل از این تحقیق، ضمن تأیید صحت مدل، نشان‌دهنده آن است که روش جنگل تصادفی توانسته است به‌طور قابل قبولی مناطق پرریسک فرونشست را شبیه‌سازی کند و می‌تواند ابزاری علمی، قابل اعتماد و ارزشمندی در برنامه ریزی مدیریت منابع آب، توسعه پایدار اراضی و پیش‌بینی ریسک فرونشست و اقدامات پیشگیرانه در برابر پدیده‌ی فرونشست زمین در این منطقه و دیگر مناطق مشابه باشد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان در انجام و انتشار این پژوهش علمی، اصول اخلاقی را رعایت کرده‌اند و این امر مورد تأیید آنهاست.

مشارکت نویسندگان

این مقاله حاصل رساله دکترا می باشد.

[1] - Zeng

[2] - FAO

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

نویسنده سوم: استاد راهنمای دوم پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله، بررسی و کنترل نتایج.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر بدون حمایت مالی انجام شده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

امیراحمدی، ابوالقاسم؛ معالی اهری، نسیم و احمدی، طیبه (۱۳۹۲). تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۷(۴۶)، ۱-۲۳. https://doi.org/10.22059/jpl.2014.203708

جعفری، فرهاد و صفاری، امیر (۱۳۹۵). سنجش مقدار و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کرج-شهریار). *انجمن جغرافیای ایران*، ۱۴(۴۸)، ۱-۱۶. https://doi.org/10.22059/jgi.2016.189497

حصارکی‌زاد، عاطفه (۱۴۰۲). ارتباط توسعه زمانی فعالیت‌های انسانی و دامنه فرونشست با یافته‌های تکنیک تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی دشت اشتهارد). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران، ۱-۲۶۸.

رنجبر، محسن و جعفری، نسرین (۱۳۸۸). بررسی عوامل موثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد. *فصلنامه جغرافیا*، ۶ (۱۹)، ۱۵۵-۱۶۶. https://doi.org/10.22059/jgeo.2009.189498

سازمان زمین شناسی (۱۳۸۴). بررسی علت فرونشست زمین و آسیب های وارده به ساختمانهای مسکونی شهرک طالقانی - شهر اشتهارد. سازمان زمین شناسی کشور.

قاسمی، اکبر؛ فلاح، اصغر؛ و شتایی جویباری، شعبان (۱۳۹۵). ارزیابی چهار الگوریتم پیش بینی سطح تاج پوشش جنگل های مانگرو با استفاده از تصاویر دوربین هوایی. *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)*. ۷(۲)، ۱-۱۵. https://sid.ir/paper/189545/fa

کریمی، حشمت الله (۱۳۹۱)، پایان نامه بررسی وضعیت کمی وکیفی آبهای زیرزمینی دشت اشتهارد و طراحی شبکه بهینه پایش. دانشگاه تربیت معلم، ۱-۱۹۵.

مختاری، داوود؛ ابراهیمی، حمید و سلمانی، سعید (۱۳۹۸). مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبریز دشت تسوج). *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)*، ۱۰(۳)، ۹۳-۱۰۵. https://sid.ir/paper/189497/fa

ملکی، امجد و رضایی، پیمان (۱۳۹۵). پیش بینی مکانهای درمعرض خطر فرونشست دشت کرمانشاه با استفاده از مدل فازی. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۲۰ (۱)، ۲۳۵ – ۲۵۱. http://hsmsp.modares.ac.ir/article-21-4935-fa.html

نوروزی، رعنا؛ افتخاری، سید مروت؛ و احمدآبادی، علی (۱۴۰۴). فرونشست دشت‌های ممنوعه بحرانی (منطقه مورد مطالعه دشت اشتهارد). *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۴(۵۷)، ۶۶-۸۹. https://doi.org/10.61186/jgs.25.78.24

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

References

Al-Halbouni, D., Holohan, E. P., Saberi, L., Alrshdan, H., Sawarieh, A., Closson, D., Walter, T. R., & Dahm, T. (2017). Sinkholes, subsidence and subrosion on the eastern shore of the Dead Sea as revealed by a close-range photogrammetric survey. *Geomorphology*, 285, 305-324. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.006

Alidoost, F., & Arefi, H. (2024). Vertical Accuracy Assessment and Improvement of Five High-Resolution Open-Source Digital Elevation Models Using ICESat-2 Data and Random Forest: Case Study on Chongqing, China. *Remote Sensing*, 16(11), 1903. https://doi.org/10.3390/rs16111903

Arpaci, A., Malowerschnig, B., Sass, O., & Vacik, H. (2014). Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. *Applied Geography*, 53, 258-270. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.015

Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, DT., Duan, Z., & Ma, J. (2017). A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, 151, 147-160. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.002

De Waele, J., Gutiérrez, F., Parise, M. &, Plan, L. (2011). Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. *Geomorphology*, 134(1-2), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.001

Deverel, SJ., & Rojstaczer, S. (1996). Subsidence of agricultural lands in the Sacramento-San Joaquin Delta, California: Role of aqueous and gaseous carbon fluxes. *Water Resources Research*, 32(8), 2359-2367. https://doi.org/10.1029/96WR01439

Dong, X., Zhang, Q., & Yan, J. (2025). *Evaluating Machine Learning-Based Approaches in Land Subsidence Susceptibility Mapping*. Land, 13(3), 322. https://doi.org/10.3390/land13030322

FAO. (2025). Sustainable Land Management Practices for Arid and Semi-Arid Regions: Enhancing Soil Stability and Erosion Control. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. https://www.fao.org/land-water/land/sustainable-land-management/en/

Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5

Gutiérrez F, Parise M, De Waele J, Jourde H. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, 61-88. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002

Herrera-García, G., et al. (2021). The global risk of land subsidence. *Nature Sustainability*, 4(7), 671–679. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00690-1

Ku, C.-Y., & Liu, C.-Y. (2023). Land subsidence modeling using an artificial neural network with GIS in Yunlin County, Taiwan. *Scientific Reports*, 13, 4207. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31390-5

Lenardón Sánchez, G., Rossi, M., Ezquerro, P., & Tomás, R. (2024). Advanced Radar Interferometry for Subsidence Monitoring in Arid Environments. *Remote Sensing*, 16(13), 2456. https://doi.org/10.3390/rs16132456

Li, Z., Zhou, H. & Xu, Y. 2013. Research on prediction model of support vector machine-based 2012.Application of an adaptive neuro fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. *Computers & Geosciences*, 48: 228–238. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.012

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R news, 2(3), 18-22. mapping. *Computers & Geosciences*, 48, 228–238. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.012

Maki, A., Hosseini, S. M., & Ahmadi, H. (2022). Land Subsidence Risk Modeling Using Random Forest in Fadafan Village, Iran. *Journal of Arid Environments*, 198, 104678. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104678

Naghibi, S. A., Ahmadi, K., & Kalantar, B. (2024). Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83(2), 115. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11532-4

Oh H-J, Lee S. (2010). Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. *Engineering Geology*, 115(1-2), 36-48. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.007

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

Ohenhen, L. O., Zhai, G., Lucy, J., Lee, J.-C., Zehsaz, S., & Shirzaei, M. (2025). Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nature Cities*. https://doi.org/10.1038/s44284-025-00240-y

Pal M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217-222. https://doi.org/10.1080/01431160412331269630

Pourghasemi, H. R., Gayen, A., Panahi, S., Rezaie, F., & Lee, S. (2020). Land subsidence susceptibility mapping using random forest machine learning algorithm along the Caspian Sea coastline, Iran. *Forests*, 11(4), 421. https://doi.org/10.3390/f11040421

Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H.R., Aretano, R., & Semeraro, T. (2016). Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological Indicators*, 64, 72-84. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.028

Pradhan B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350-365. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.017

Pradhan, B., Abokharima, M.H., Jebur, M.N., & Tehrany, M.S. (2014). Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Natural Hazards*, 73(2), 1019-1042. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1136-1

Qadri, M., Karimi, H., & Rezaei, A. (2020). Assessment of Groundwater Utilization by Industrial and Agricultural Sectors in Eshtehard County, Iran. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(5), 345-359. https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.125021

Rahmati, O., Pourghasemi, H.R., & Melesse, A.M. (2016). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372.

Rajabi, A. M., Edalat, A., Abolghasemi, Y., & Khodaparast, M. (2024). Ground subsidence modeling using Sentinel-1A SAR data and artificial neural network in Aliabad Plain, Iran. *Journal of Mountain Science*, 21(3), 589–603. https://doi.org/10.1007/s11629-023-8470-2

Richa, A., Sharma, P., Gupta, R., & Singh, V. (2023). Multi-Criteria Decision Analysis for Land Subsidence Risk Modeling Using Machine Learning Techniques. *Environmental Modelling & Software*, 165, 105742. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105742

Sharma, P., Jones, C.E., Dudas, J., Bawden, G.W., & Deverel, S. (2016). Monitoring of subsidence with UAVSAR on Sherman Island in California's Sacramento–San Joaquin Delta. *Remote Sensing of Environment*, 181, 218-236. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.010

Trigila, A., Iadanza, C., Esposito, C., & ScarasciaMugnozza, G. (2015). Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). Geomorphology, 249, 119-136. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.019

Wu, J., Wang, L., Zhang, Y., & Chen, X. (2024). Integrating SBAS-InSAR and Machine Learning for Land Subsidence Monitoring in the Yangtze River Delta. *Journal of Hydrology*, 630, 130789. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130789

Zhan, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Xu, J., Chen, H., Liu, G., & Wan, Z. (2025). Ground subsidence risk assessment using AHP and entropy weight method in Shanghai Municipality. *Scientific Reports*, 15(1), 7339. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91109-6

Zhanet, L., Zhang, Y., Chen, H., & Liu, J. (2025). Hierarchical Analysis for Land Subsidence Risk Assessment Using Multi-Criteria Decision Making. *Journal of Environmental Management*, 350, 119456. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.119456

Zhang, S., Li, H., Wang, J., & Liu, Y. (2024). Spatial Modeling of Land Subsidence Using Random Forest and Remote Sensing Data in Urban Areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(15), 32075-32089. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32075-w

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.2.5]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]