

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)

DOI: <http://doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.6>

Publisher: Kharazmi University

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.

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.

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 به عنوان یک مخاطره ژئومورفیک و بحران زیست محیطی، خسارات جبران ناپذیری 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 به عنوان منطقه ممنوعه بحرانی اعلام شده است. این پژوهش با هدف مدل سازی 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 تداخل سنجی راداری (D-InSAR) برای تولید لایه وابسته نقاط فرونشست است که جایگزین روش‌های میدانی پرهزینه و زمان‌بر شده و امکان مدل سازی در مناطق با داده‌های محدود را فراهم می‌کند.

روش پژوهش: برای مدل سازی، ۱۲ لایه مستقل شامل نقشه ارتفاع، فاصله از آبراهه، قنات، چاه، گسل، عمق آب زیرزمینی، تراکم زهکشی، خاک شناسی، سنگ شناسی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی و تابش خورشیدی، همراه با لایه وابسته نقاط فرونشست (استخراج شده 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 نرم افزار 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 پهنه بندی ریسک فرونشست دارد. متغیرهای عمق آب زیرزمینی، فاصله از چاه‌ها، زمین شناسی 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 نشان دهنده شرایط بحرانی دشت اشتهارد است. افزایش کاربری شهری از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳، به ویژه در سال ۲۰۲۳، با تشدید فشار بر منابع آب زیرزمینی، به افزایش شدت فرونشست منجر شده است.

نتیجه گیری: الگوریتم جنگل تصادفی با دقت بالا توزیع فضایی ریسک فرونشست را مدل سازی کرد. این روش می‌تواند ابزاری مؤثر برای مدیریت منابع آب زیرزمینی، برنامه ریزی توسعه پایدار و کاهش مخاطرات زمین ساختی 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 نمونه گیری مانند SMOTE برای بهبود تعادل داده‌ها و افزایش دقت مدل استفاده شود. این مدل برای برنامه ریزی شهری و مدیریت منابع آب در مناطق مشابه قابل تعمیم 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>



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^۱ 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^۲، 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^۳، 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 جنبه‌های مختلف این پدیده ضروری به نظر می‌رسد. از این رو محققین مختلفی در سراسر دنیا به بررسی جنبه‌های مختلف این موضوع پرداخته‌اند، عمده این مطالعات شامل؛ پایش پدیده فرونشست (آل هالبونی^۴ و همکاران، ۲۰۱۷؛ شارما^۵ و همکاران، ۲۰۱۶) نحوه شکل‌گیری و مکانیسم ایجاد (دی‌وال^۶ و همکاران، ۲۰۱۱؛ دورل^۷ و همکاران، ۱۹۹۶) بوده و همچنین محققین مختلفی به روش‌های مختلف مدل‌سازی و ارزیابی خطر وقوع فرونشست زمین پرداخته‌اند (امیر احمدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ ملکی و همکاران، ۱۳۹۵؛ لی^۸ و همکاران، ۲۰۱۲؛ پرادان^۹ و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴). تاکنون تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی ریسک وقوع فرونشست زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از میان آن‌ها می‌توان مدل‌های مبتنی بر تحلیل سلسله‌مراتبی (ژانت^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۵)، روش‌های فازی مبنا (نقیبی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۴)، پردازش تصاویر راداری (اوهنهن^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۵؛ لناردون سانچز^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۴) شبکه عصبی مصنوعی (کو و لیو^{۱۴}، ۲۰۲۳؛ رجبی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۴)، تکنیک وزن واقعه (اوه و لی^{۱۶}، ۲۰۱۰) و تصمیم‌گیری چند معیاره (ژان^{۱۷} و همکاران، ۲۰۲۵؛ ریچا^{۱۸} 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

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^۱، 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^۲ 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 مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی پرداختند و نقشه‌های ریسک فرونشست با دقت (۰/۸۶) تولید کردند و اهمیت افت سطح آب زیرزمینی را برجسته نمودند. پورقاسمی^۳ 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 حالیکه این منطقه کویری از آب‌های سطحی بی‌بهره بوده است و وجود بیش از ۳۵۰۰ هکتار اراضی کشاورزی و باغی و بیش از ۲۰۰۰ واحد تولیدی و صنعتی در شهرستان اشتهارد که تقریباً 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 آبربری بالا در صنایعی مانند ذوب‌آهن و فولاد، تولید محصولات کشاورزی و باغی با آبیاری سنتی و الگوی کشت نامناسب یکی از بزرگ‌ترین فعالیتهای تولیدی آبربر 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 حالیکه 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 فرونشست افزایش می‌یابد 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 زمین‌شناسی 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

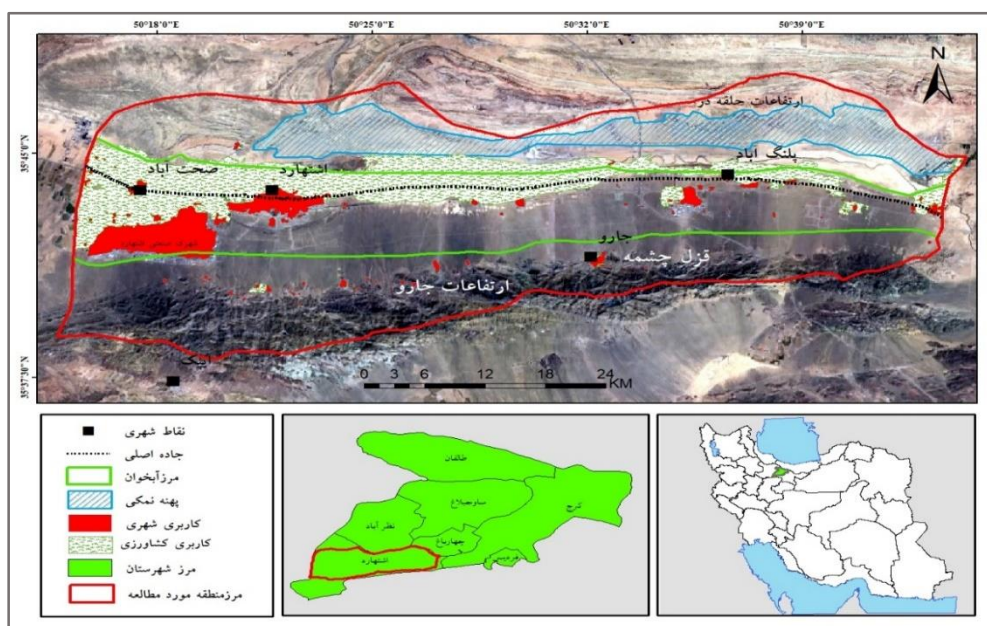
^۱ - Liaw & Wiener

^۲ - Rahmati

^۳ - Pourghasemi

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° ۳۵' ۳۵" الی ۳۵° ۵۲' ۳۵" شمالی و طول جغرافیایی ۵۰° ۱۸' ۲۶" الی ۵۰° ۲۹' ۵۹" 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 بومین 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 کواترن و ۵۰ درصد آن را خاک آریدی سول دربرگرفته 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 کلان شهر تهران و کرج، از چشم اندازهای ویژه ی ژئومورفولوژیکی برخوردار است و یکی از قطب های صنعتی و کشاورزی استان محسوب می شود. ازاین رو مستعد جمعیت پذیری بیش از ظرفیت از نظر اسکان و متعاقب آن تأمین آب مورد نیاز است. با توجه به این که این منطقه، در شرایط اقلیمی و آب و هوایی بیابانی واقع شده از دیرباز برای تأمین منابع آب شرب، کشاورزی، صنعت و شهری وابسته به منابع آب زیرزمینی است چون رودخانه شور به عنوان تنها منبع آب سطحی، فصلی و غیرقابل استفاده است. این رودخانه با کیفیت آب پایین و شور بودن آن، نمی تواند به عنوان 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 مهم ترین 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 (شکل ۱) (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۴).

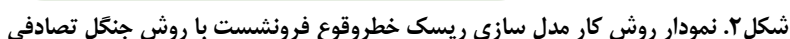


شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

۲. داده ها و روش کار

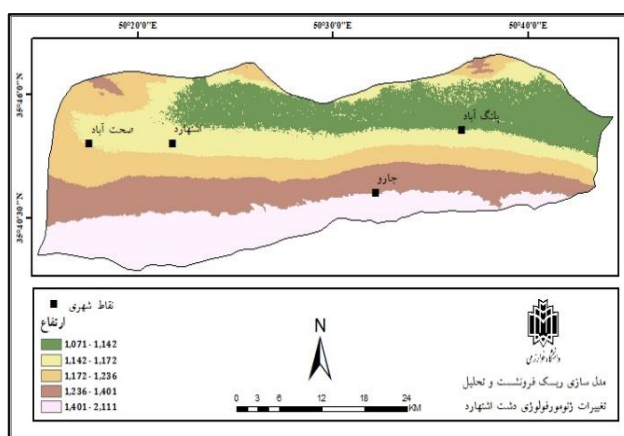
در این پژوهش، به منظور مدل سازی و پهنه بندی ریسک فرونشست در دشت اشتهارد، از روش جنگل تصادفی در محیط نرم افزار R استفاده شد. در این راستا، ۱۲ لایه مستقل شامل نقشه ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از قنات، فاصله از چاه، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی، تراکم زهکشی، خاک شناسی، سنگ شناسی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی و تابش خورشیدی و یک لایه وابسته شامل نقاط فرونشست مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳-۱۵ و جدول ۱) که انتخاب معیارهای مستقل برای مدل سازی ریسک فرونشست در دشت اشتهارد بر اساس سه معیار اصلی انجام شده است: تطابق با شرایط

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.6]

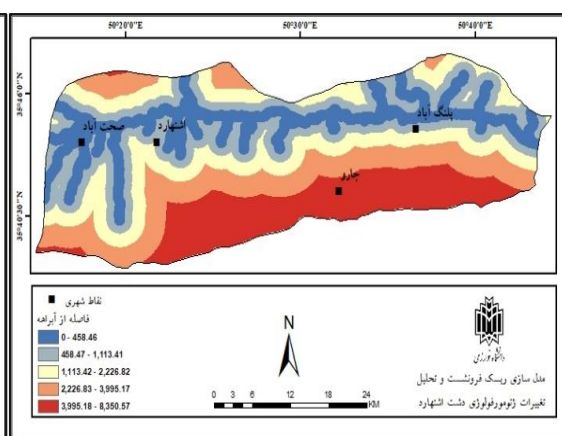


جدول ۱. لایه های مورد استفاده در مدل سازی ریسک فرونشست با روش جنگل تصادفی و نحوه تهیه آن

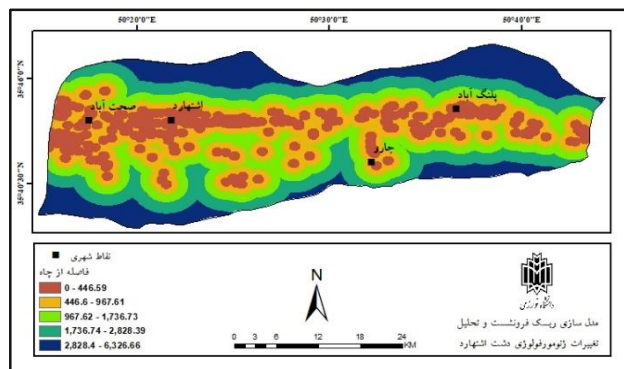
لایه ها	نحوه تهیه	لایه ها	نحوه تهیه
فاصله از رودخانه	لایه آبراهه-وزارت نیرو	فاصله از چاه	لایه چاه-وزارت نیرو
فاصله از قنات	لایه قنات-وزارت نیرو	فاصله از گسل	لایه گسل-وزارت نیرو
زمین شناسی	لایه زمین شناسی-سازمان آبخیزداری استان البرز	خاک	لایه خاک-سازمان آبخیزداری استان البرز
ارتفاع	ASTER با قدرت تفکیک 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)



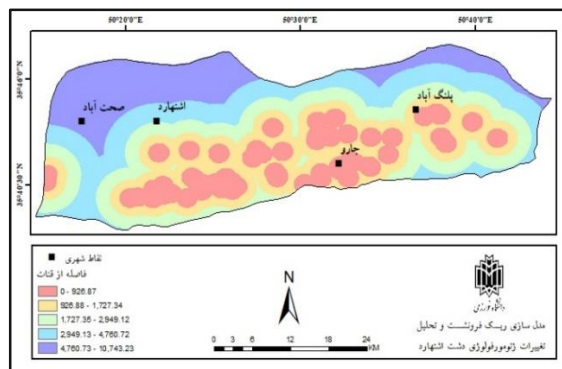
شکل ۴. نقشه فاصله از آبراهه



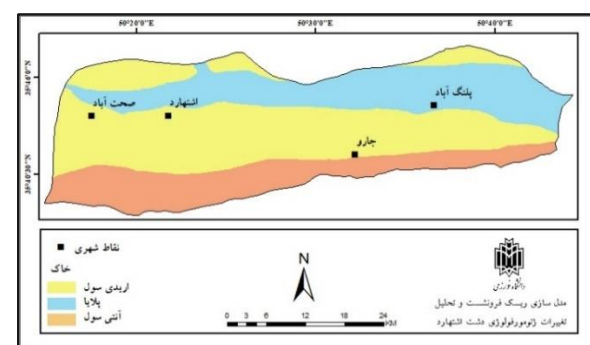
شکل ۳. نقشه ارتفاع



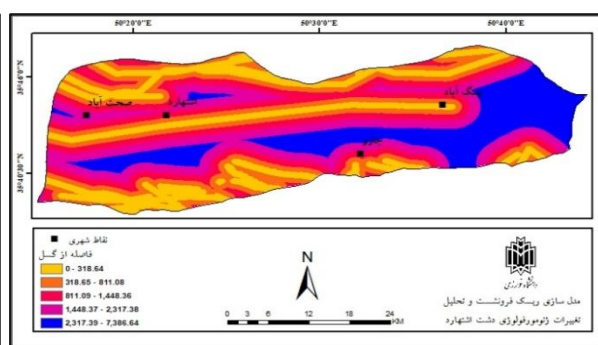
شکل ۶. نقشه فاصله از چاه



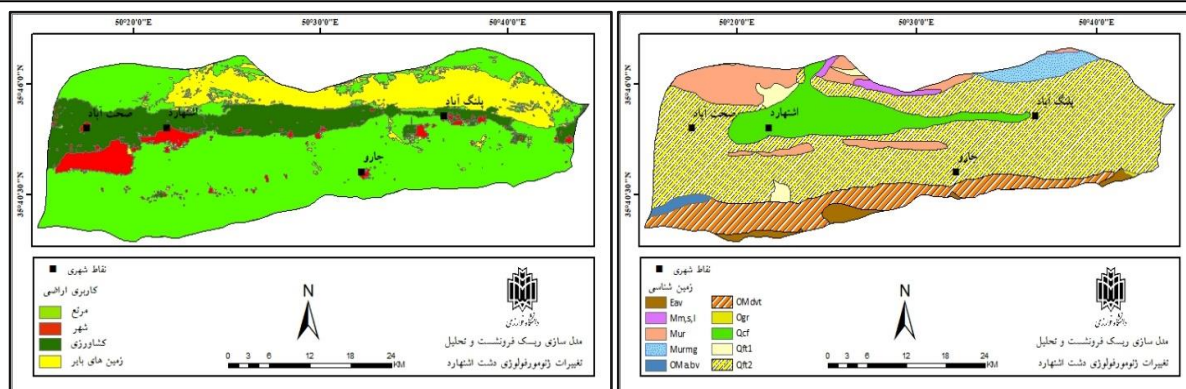
شکل ۵. نقشه فاصله از قنات



شکل ۸. نقشه خاک

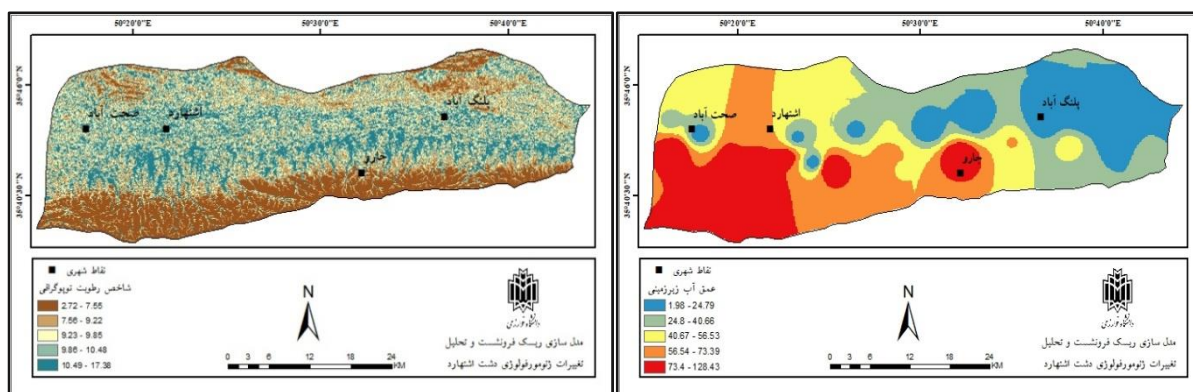


شکل ۷. نقشه فاصله از گسل



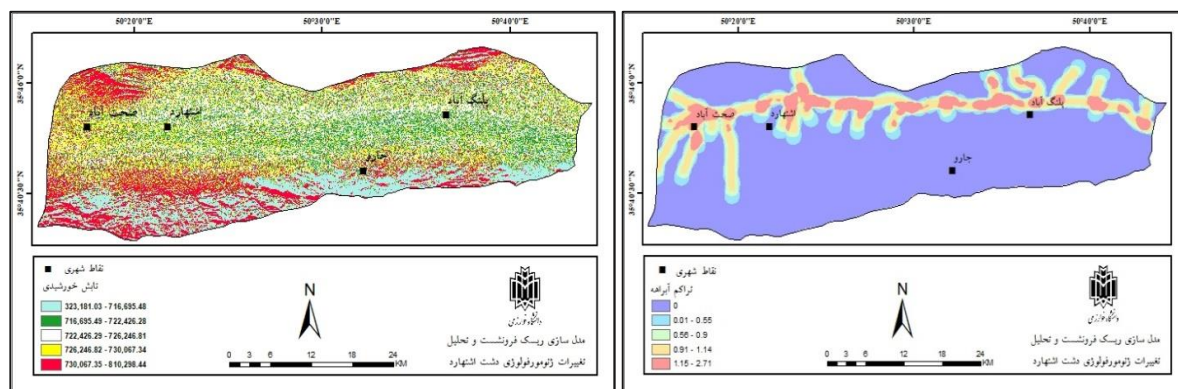
شکل ۹. نقشه زمین شناسی

شکل ۱۰. نقشه کاربری اراضی



شکل ۱۱. نقشه عمق آب زیرزمینی

شکل ۱۲. نقشه TWI



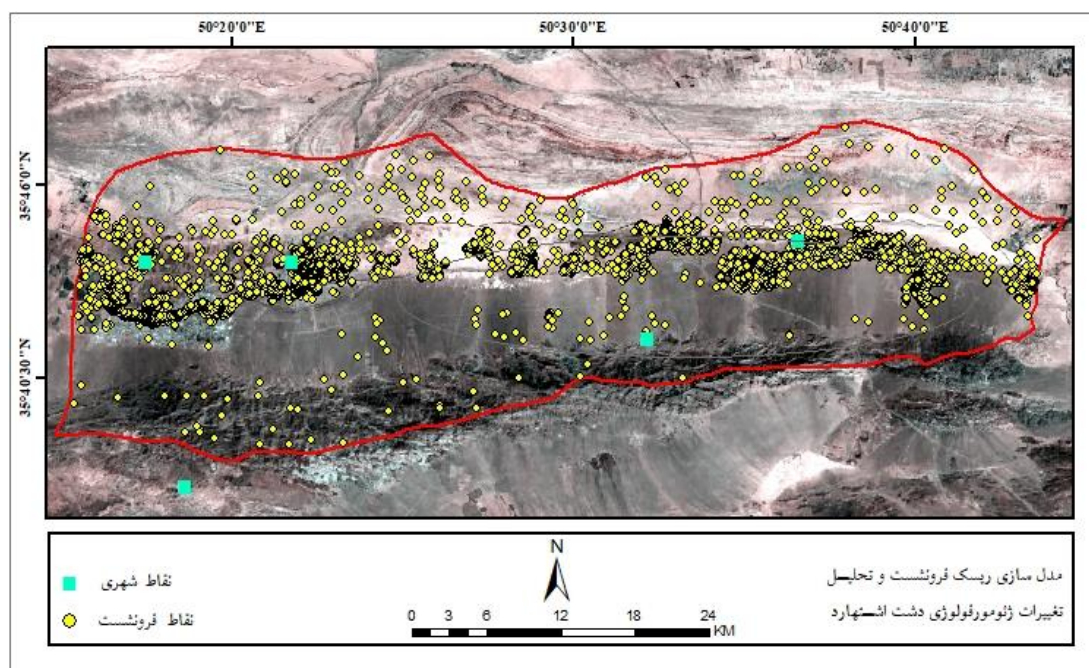
شکل ۱۳. نقشه تراکم آبراهه

شکل ۱۴. نقشه تابش خورشیدی

۱-۲. 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 پژوهش‌ها، آیا می‌توانیم بستر مناسبی برای تهیه لایه وابسته و پهنه بندی ریسک خطر فرونشست داشته باشیم؟ از این رو در پژوهش حاضر، برای اولین بار از نقشه فرونشست زمین تولیدشده در

سال ۲۰۲۳ با تکنیک تداخل سنجی راداری (D_InSAR) و تصاویر Sentinel-1، به عنوان منبع تولید نقاط فرونشست (لایه وابسته) استفاده شد (شکل ۱۵). تفاوت حائز اهمیت در اینجاست که این مطالعه به جای استفاده مستقیم از داده های رستری به عنوان متغیر خروجی، با استخراج هوشمندانه ی پیکسل های با نرخ نشست منفی (مشهود) و تبدیل آن ها به نقاط برداری، اقدام به تولید پایگاه داده آموزشی برای مدل Random Forest نمود. نکته حائز اهمیت این است که به منظور حفظ یکپارچگی و ضریب اطمینان علمی در تحلیل مدل Random Forest، هیچ گونه تغییری عمده ای در نقاط استخراج شده اعمال نگردید. انتخاب این روش، از یک سو امکان بررسی قابلیت استفاده مستقیم از داده های D_InSAR برای تولید لایه های آموزشی در مدل های یادگیری ماشین را فراهم ساخت، و از سوی دیگر نوعی ارزیابی واقع گرایانه از عملکرد مدل در شرایط فقدان داده های میدانی را میسر کرد، بنابراین، این روش می تواند یک نوآوری هوشمندانه در روش شناسی باشد و با توجه به دقت بالا و پوشش وسیع داده های راداری، جهت تعیین محدوده کلی ریسک به شدت قابل دفاع است.



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

۲-۲. الگوریتم جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest - RF) یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین روش های یادگیری ماشین در تحلیل داده های پیچیده است که در مسائل طبقه بندی (Classification) و رگرسیون (Regression) استفاده می شود. این روش یک تکنیک یادگیری گروهی (Ensemble Learning) محسوب می شود که مجموعه ای از درخت های تصمیم گیری (Decision Trees) را به صورت همزمان به کار می گیرد تا خروجی های قابل اعتمادتر، پایدارتر و دقیق تری ارائه دهد. به دلیل پایداری بالا، مقاومت در برابر بیش برآزش (Overfitting) و توانایی کار با مجموعه داده های بزرگ و نامتوازن، جنگل تصادفی در بسیاری از حوزه ها مانند مدل سازی مخاطرات طبیعی، شناسایی الگوهای پیچیده در داده های محیطی و طبقه بندی مناطق مستعد خطر مورد استفاده قرار می گیرد. این ویژگی ها باعث شده است که این الگوریتم به عنوان یکی از بهترین روش ها برای پهنه بندی ریسک فرونشست زمین مطرح شود (علی دوست و عارفی^۱؛ دانگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۵).

^۱ - Lidoost & Arefi

^۲ - Dong

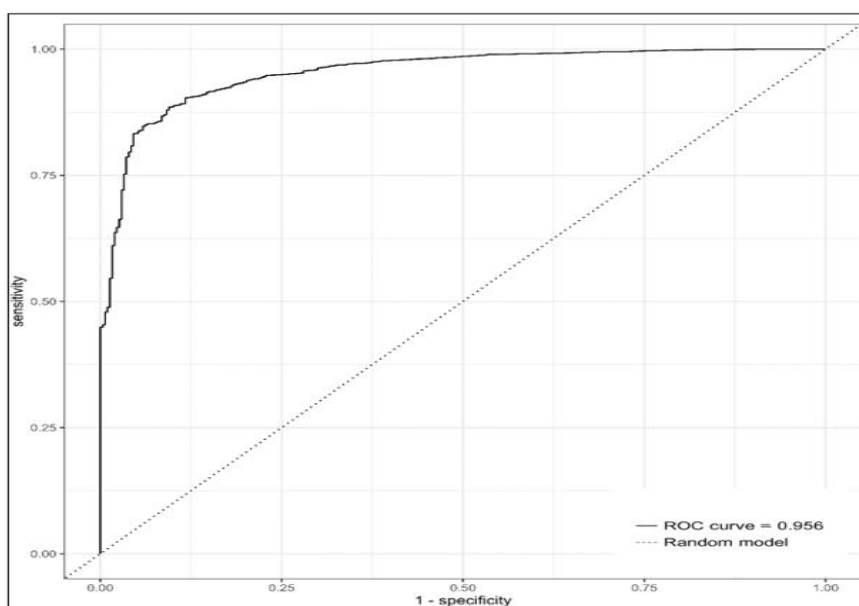
یافته‌های پژوهش

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.

جدول ۲. 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.



شکل ۱۶. 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 وزن دهی 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،

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 مدل‌ها استفاده کردیم (جدول ۳ و شکل ۱۷ و 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.

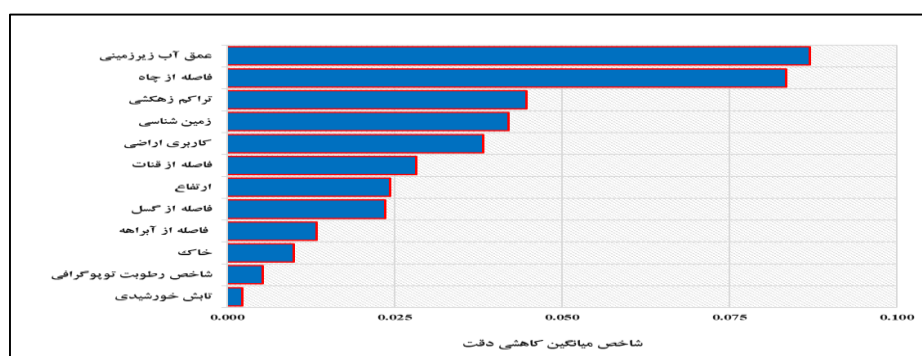
➤ بطور کلی متغیرهای زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از قنات، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و خاک نیز به ترتیب در رده‌های اهمیت تقریباً مشابه در هر دو شاخص قرار می‌گیرند و بر شرایط فرونشست تأثیرگذار هستند و نقش قابل توجهی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرونشست دارند.

➤ در نهایت متغیرهایی نظیر تابش خورشیدی و شاخص رطوبت توپوگرافی در هر دو شاخص نسبت به سایر متغیرها تأثیر کمتری در تعیین ریسک فرونشست در مدل ما دارند.

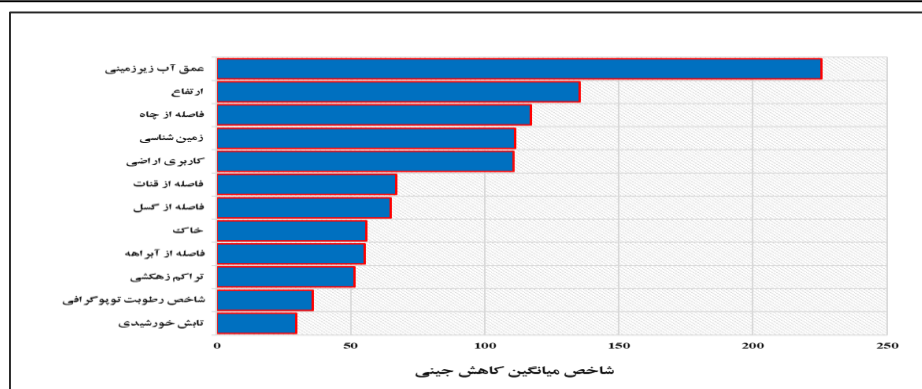
از آنجا که هر دو روش به نتایج مشابهی دست یافته‌اند، می‌توان گفت که مدل جنگل تصادفی به خوبی توانسته است الگوهای واقعی فرونشست را شبیه‌سازی کند. بنابراین، این شباهت‌ها به معنی پایداری و اعتبار نتایج و قابلیت تعمیم‌پذیری مدل و نتایج آن است.

جدول ۳. مقادیر شاخص میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهشی جینی

متغیر	شاخص میانگین کاهشی دقت	شاخص میانگین کاهشی جینی
عمق آب زیرزمینی	۰/۰۸۷	۲۲۵/۴۷
فاصله از چاه	۰/۰۸۴	۱۱۷/۱۶
تراکم زهکشی	۰/۰۴۵	۵۱/۴۹
زمین‌شناسی	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



شکل ۱۷. نمودار اهمیت متغیرها براساس شاخص میانگین کاهشی دقت

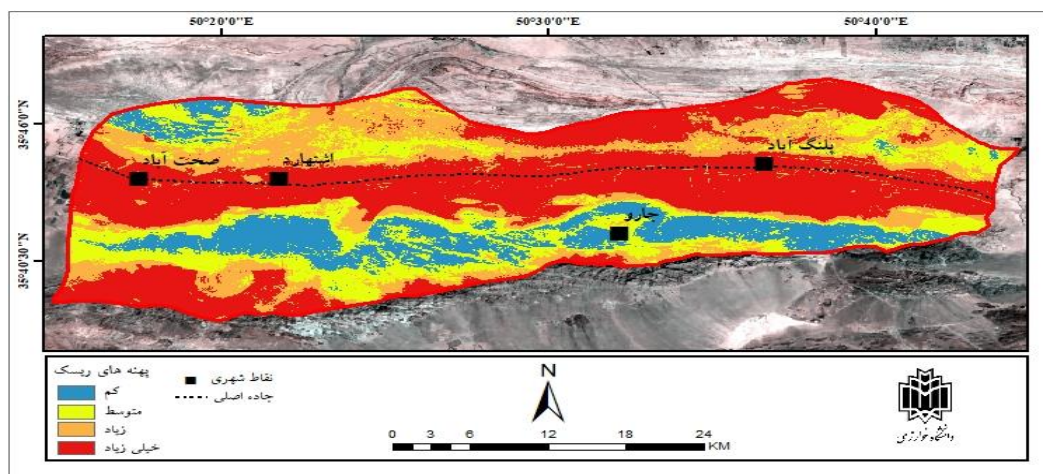


شکل ۱۸. نمودار اهمیت متغیرها براساس شاخص میانگین کاهش جینی

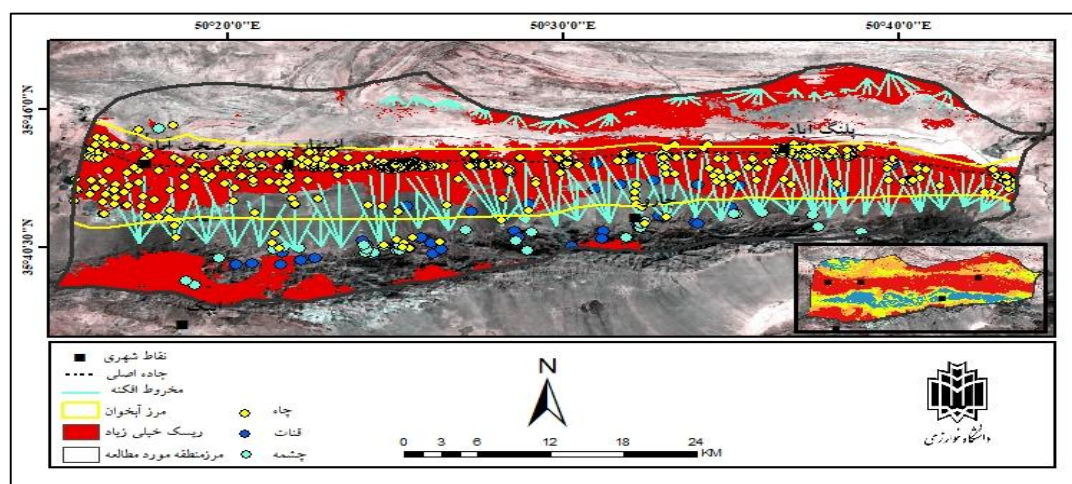
۳. تهیه پهنه بندی ریسک فرونشست

نقشه پهنه بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد که با استفاده از مدل جنگل تصادفی ایجاد شده است، نشان دهنده 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 می شود (شکل ۲۰)، طبق جدول اطلاعاتی مربوط به طبقه بندی 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 محدوده ی میانی دشت و بر ناحیه ی آبخوان اشتهارد منطبق است؛ منطقه ای که تمرکز بالایی از فعالیت های انسانی نظیر کشاورزی، بهره برداری از منابع آب زیرزمینی و توسعه شهری در آن صورت می گیرد. این در حالیست که در راستای اعتبارسنجی نقشه پهنه بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد، از مجموعه ای 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 به وسیله الگوریتم قدرتمند جنگل تصادفی (Random Forest) و بر پایه ی پارامترهای ژئومورفولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و کاربری اراضی تهیه شده است، نشان می دهد که بیشترین تراکم (۸/۱۵) و فراوانی نسبی (۹۳/۰۴) نقاط آزمون با طبقه ی "ریسک خیلی زیاد" هم پوشانی دارد (جدول ۴، شکل ۲۳ و ۲۲). این هم پوشانی در گستره ی میانی دشت اشتهارد و به ویژه در محدوده ی آبخوان اشتهارد، به وضوح مشهود است. تحلیل مکانی این نقاط نشان داد که بیش از ۸۰ درصد آن ها در طبقات با "ریسک زیاد" و "ریسک بسیار زیاد" واقع شده اند که خود بیانگر دقت بالای مدل در پیش بینی نواحی بحرانی است. این هم زمانی مکانی بین شدت بالای ریسک فرونشست و نقاط آزمون، ضمن تأیید دقت مدل، به خوبی مؤید حساسیت اکوسیستم منطقه نسبت به بهره برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی می باشد. در واقع این انطباق مکانی و آماری بین خروجی مدل و نقاط آزمون و عبارتی توزیع فضایی ریسک و نقاط آزمون در طول محور شرقی-غربی دشت، به ویژه در محدوده ی آبخوان، گویای آن است که ضمن تأیید صحت عملکرد الگوریتم، نشان دهنده توان بالای مدل سازی در تفکیک سطوح خطر و نیز اولویت بندی مناطق حساس برای مداخلات مدیریتی است. بدین ترتیب، نقشه ریسک حاضر می تواند به عنوان ابزاری علمی و قابل اعتماد در برنامه ریزی منابع آب، توسعه پایدار اراضی و اقدامات پیشگیرانه در برابر پدیده ی فرونشست زمین در دشت اشتهارد مورد استفاده قرار گیرد. برای صحت سنجی نقشه پهنه بندی ریسک فرونشست که با استفاده از مدل جنگل تصادفی تهیه شده بود بازدید میدانی از دو روستای فتح آباد و مروت آباد در منطقه کشاورزی غرب دشت اشتهارد و محدوده آبخوان اشتهارد انجام شد (شکل ۲۴). این مناطق به عنوان نمونه های منتخب از نقاط پرریسک فرونشست در نظر گرفته شدند، چرا که فرونشست در این نواحی با شدت بیشتری در ارتباط است. در واقع بازدید میدانی از این نقاط به منظور صحت سنجی مدل، ارزیابی تطابق پیش بینی های مدل با وضعیت واقعی زمین است تا مطمئن شویم که روش های مورد استفاده توانسته اند مناطق پرریسک فرونشست را به درستی شبیه سازی کنند.

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 چاه‌ها 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.



شکل ۱۹. نقشه نهایی پهنه بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد با استفاده از مدل جنگل تصادفی

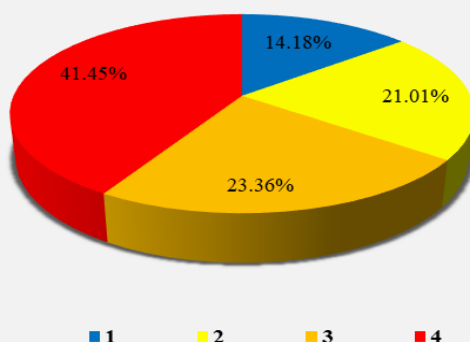


شکل ۲۰. نقشه هم پوشانی طبقه ریسک خیلی زیاد فرونشست بر نقشه منابع آب منطقه مورد مطالعه

جدول ۴. جدول اطلاعاتی نقشه پهنه بندی ریسک خطر فرونشست و صحت سنجی با نقاط مرحله ی آزمون (۳۰ درصد)

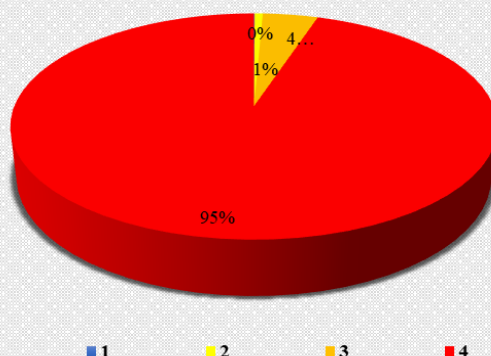
طبقات ریسک	مقادیر ریسک	مساحت (KM ²)	درصد مساحت	تراکم فرونشست	فراوانی نسبی
۱	کم	۷۵/۷۶	۱۴/۱۸	۰/۰۴	۰/۱۵
۲	متوسط	۱۱۲/۲۲	۲۱/۰۱	۰/۱۵	۰/۸۸
۳	زیاد	۱۲۴/۷۴	۲۳/۳۶	۰/۹۲	۵/۹۳
۴	بسیار زیاد	۲۲۱/۳۶	۴۱/۴۵	۸/۱۵	۹۳/۰۴

درصد مساحت طبقات ریسک فرونشست

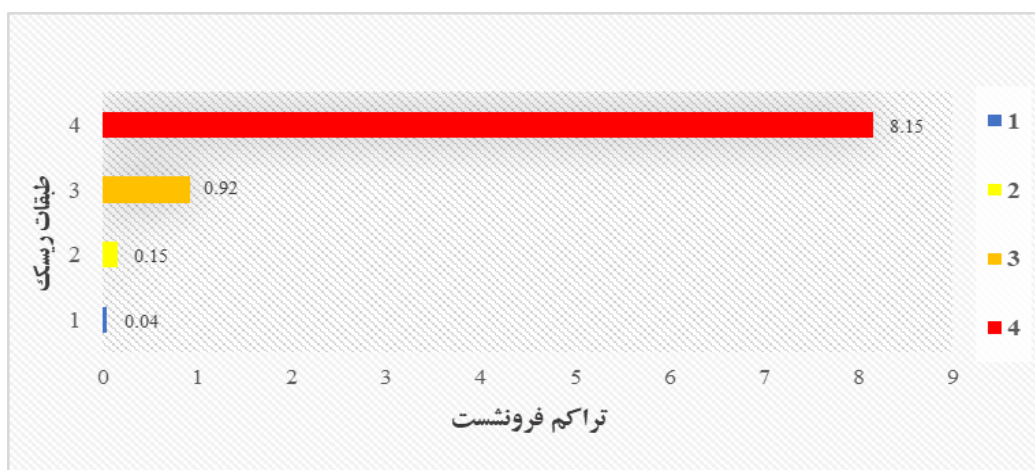


شکل ۲۱. درصد مساحت طبقات ریسک فرونشست

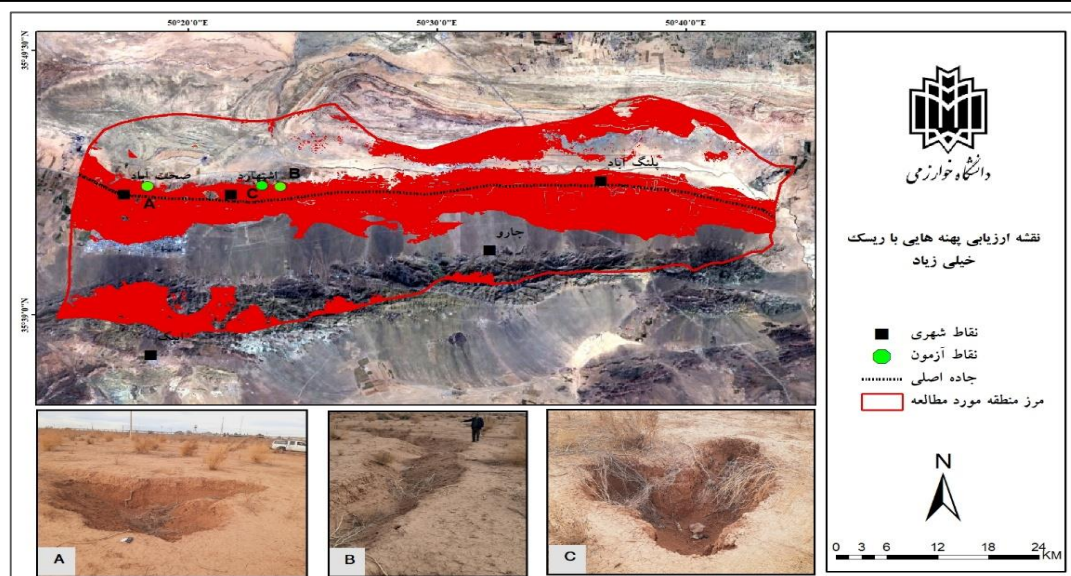
فراوانی نسبی نقاط آموزش در نقشه ریسک فرونشست



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



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



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، الی‌خصوص 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 طور کلی و در مقایسه با تکنیک‌های مبتنی بر نظرات کارشناسان و روش‌های آماری، الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در مدلسازی بسیاری از پدیده‌های جهان واقعی عملکرد و دقت بسیار مناسب‌تری دارند. از این رو در این مطالعه با بهره‌گیری از مدل جنگل تصادفی به تحلیل و مدلسازی ریسک خطر وقوع فرونشست و نقش عوامل مؤثر بر آن در محدوده دشت اشتهارد پرداخته 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 محدوده‌ی فرونشست زمین در شرایط فقدان مشاهدات زمینی است. از طرفی این روش می‌تواند یک نوآوری هوشمندانه در روش‌شناسی پژوهش ما باشد این موضوع نه تنها 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 می‌باشد. این رویکرد نوآورانه نه تنها روش محور داده محور 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 ما را به یک ابزار ارزشمند برای مدیریت خطر فرونشست تبدیل می‌کند. از طرفی در این پژوهش از دو شاخص مهم میانگین کاهش دقت (Mean Decrease

(Accuracy) و میانگین کاهش ضریب جینی (Mean Decrease Gini) برای تعیین اولویت، اهمیت و وزن دهی عوامل مؤثر بر فرونشست استفاده شد. که در نهایت با توجه به اهمیت بالای روش میانگین کاهشی دقت در مدل سازی دقیق تر ریسک فرونشست و پیش بینی دقیق تری از مناطق پرریسک جهت تهیه نقشه ریسک فرونشست با در نظر گرفتن ماحصل نتایج شاخص میانگین کاهش جینی مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا عمق آب زیرزمینی و فاصله از چاه به عنوان دو عامل اصلی در هر دو روش شناسایی شده اند، که نشان دهنده اهمیت بارز منابع آب زیرزمینی در پیش بینی 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 تقریباً 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 نشان دهنده تأثیر قوی و پایدار این متغیرها بر فرونشست است. از طرفی بیانگر پایداری و اعتبار نتایج است و می توان از آنها به عنوان دلیلی برای قوی بودن مدل و تحلیل ها استفاده کرد.

در نهایت نقشه پهنه بندی ریسک فرونشست دشت اشتهارد که نشان دهنده 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 پهنه های اصلی ریسک فرونشست به طور عمده در محدوده میانی دشت اشتهارد، از شرق به غرب، کشیده شده اند. این منطقه که در محدوده آبخوان اشتهارد قرار دارد، به دلیل تمرکز بالای منابع آبی، کاربری های 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 دربر گرفته است که این سازند از نهشته های آبرفتی و خاک های ریزدانه ای مانند سیلت و رس تشکیل شده است که به دلیل ویژگی های خاص خود، شامل نفوذپذیری بالا، حساسیت به تغییرات رطوبت و تغییرات سطح آب های 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 هم زمانی مکانی بین شدت بالای ریسک فرونشست و نقاط آزمون، ضمن تأیید دقت مدل، به خوبی مؤید حساسیت اکوسیستم منطقه نسبت به بهره برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی می باشد درواقع این انطباق بین توزیع فضایی ریسک و نقاط آزمون در طول محور شرقی-غربی دشت، به ویژه در محدوده آبخوان، گویای آن است که ضمن تأیید صحت عملکرد الگوریتم، نشان دهنده توان بالای مدل سازی در تفکیک سطوح خطر و نیز اولویت بندی مناطق حساس برای مداخلات مدیریتی است. این در حالیست که دشت اشتهارد که به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی جزو دشت های ممنوعه بحرانی اعلام شده است با رشد جمعیت و توسعه کشاورزی و صنعت در منطقه نیاز بیشتر به آب در آن امری بدیهی هست. افت سطح آب زیرزمینی می تواند مشکلات زیادی در کوتاه مدت و بلندمدت ایجاد نماید؛ کمبود آب، افزایش هزینه های برداشت آب، اثرات مورفولوژیکی فرونشست زمین، برهم خوردن تعادل منطقه، تغییر کاربری و هم زمان بر دو چالش اساسی زیست محیطی دیگر در این منطقه یعنی بیابان زایی و گردوغبار هم تأثیرگذار است و همچنین هیدرولوژی منطقه را تغییر خواهد داد و تغییرات ارتفاعی که به وجود می آید هم به عنوان عاملی است که خود به تنهایی بر تشدید سیلاب ها در این منطقه نقش می زند و این شرایطی است که در حال حاضر بعضی از مناطق اشتهارد را در بر گرفته است. قابل ذکر است که با توجه به پویایی دشت اشتهارد به لحاظ تکتونیکی، فرونشست سبب تحریک گسل های فعال و افزایش آسیب پذیری می شود از آنجا که نشست زمین دارای تأثیرات مخرب و دائمی است، بررسی ریسک فرونشست، شناسایی عوامل تأثیرگذار بر ایجاد آن و به تبع آن ارزیابی تأثیرات تغییرات مورفولوژیکی ناشی از آن، می تواند دیدی مناسب از خطرات پیش رو را روشن سازد و در راستای پیشگیری از صدمات بیشتر به منطقه برنامه ریزی صورت گیرد.

این در حالیست که از نقاط ضعف و محدودیت این مدل می توان به عدم تعادل کلاس ها در داده های فرونشست دشت اشتهارد اشاره کرد که روی ضریب کاپا تأثیر می گذارد که پدیده ای رایج در مدل سازی مخاطرات ژئومورفیک و بازتابی از ویژگی ذاتی داده های ژئومورفیک می تواند باشد. خاطرنشان می شود که الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل استفاده از bagging (نمونه گیری بوت استرپ و تجمیع نتایج چندین درخت تصمیم) و انتخاب تصادفی ویژگی ها، ذاتاً در برابر عدم تعادل کلاس ها مقاوم است. Bagging با ایجاد زیرمجموعه های تصادفی از داده ها، امکان یادگیری بهتر کلاس اقلیت را فراهم می کند، که در AUC بالای

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

۱. برای بهبود احتمالی در مطالعات آینده می توان از روش های استاندارد مانند نمونه گیری مصنوعی اقلیت (SMOTE) برای کاهش اثر عدم تعادل کلاس ها و بهبود Kappa یا وزن دهی کلاس ها در مدل استفاده کرد تا ضریب کاپا را به محدوده های بالاتر (مثلاً بالای ۰،۷) ارتقا داد (زنگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۳).

۲. انجام تحلیل حساسیت (مثلاً با Grid Search) و مدل های ترکیبی (جنگل تصادفی با شبکه های عصبی) برای بهینه سازی پارامترها.

۳. پایش چندبعدی و سیاست محور: توسعه سیستم های یکپارچه پایش با ترکیب داده های اقلیمی (مانند TRMM یا ERA5، ۲۰۲۴) و سنسورهای ماهواره ای (Sentinel-1/2/3) برای پیش بینی بلندمدت فرونشست و اثرات آن (مثل بیابان زایی، سیلاب)، که با مدل های شبیه سازی هیدرولوژیکی (مثل SWAT_ModFlow) برای برنامه ریزی پایدار ادغام شود.

۴. بازسازی آبخوان با تزریق هوشمند: اجرای پروژه های بازسازی آبخوان با تزریق آب تصفیه شده و مدیریت شده به لایه های آبرفتی (سازند کواترنر)، برای افزایش سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار هیدرونیامیکی.

۵. ترویج کشاورزی پایدار: بازطراحی الگوی کشت با تأکید بر گونه های کم آب بر و کاهش ۳۰-۵۰ درصد برداشت آب زیرزمینی از طریق نصب کنتورهای هوشمند روی چاه ها و پیاده سازی سیستم های آبیاری قطره ای پیشرفته، که کارایی مصرف را بهینه می کند.

۶. حفاظت اکولوژیکی آبخوان: تقویت پایداری خاک های اریدی سول با کاشت پوشش گیاهی بومی ریزدانه (مانند گندمیان و سداب شورپسند) با ریشه های متراکم، که رطوبت را تثبیت کرده و فرسایش را تا ۴۰ درصد کاهش می دهد (فائو^۲، ۲۰۲۳). این امر با کنترل گسترش شهری و احیای پوشش گیاهی طبیعی در مناطق پرریسک همراه شود.

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

۸. تشکیل کمیته منطقه ای با وزارت نیرو و سازمان آبخیزداری برای نظارت بر چاه ها و اجرای قوانین در مناطق ممنوعه بحرانی.

۹. اولویت بندی بودجه برای مناطق میانی دشت (آبخوان اشتهارد) در برنامه های توسعه پایدار و آموزش محلی برای گزارش ترک ها.

از این رو این تحقیق به منظور تحلیل و پیش بینی ریسک فرونشست در دشت اشتهارد، با استفاده از مدل جنگل تصادفی انجام شد و هدف اصلی آن، ارزیابی دقت مدل و شبیه سازی دقیق مناطق پرریسک فرونشست بود. نتایج حاصل از این تحقیق، ضمن تأیید صحت مدل، نشان دهنده آن است که روش جنگل تصادفی توانسته است به طور قابل قبولی مناطق پرریسک فرونشست را شبیه سازی کند و می تواند ابزاری علمی، قابل اعتماد و ارزشمندی در برنامه ریزی مدیریت منابع آب، توسعه پایدار اراضی و پیش بینی ریسک فرونشست و اقدامات پیشگیرانه در برابر پدیده ی فرونشست زمین در این منطقه و دیگر مناطق مشابه باشد.

ملاحظات اخلاقی

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

مشارکت نویسندگان

این مقاله حاصل رساله دکترا می باشد.

^۱ - Zeng

^۲ - FAO

نویسنده اول: تهیه و آماده سازی نمونه ها، انجام آزمایش و گردآوری داده ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله.

نویسنده سوم: استاد راهنمای دوم پایان نامه، 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 می شود.

منابع

- امیراحمدی، ابوالقاسم؛ معالی اهری، نسیم و احمدی، طیبه (۱۳۹۲). تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS. *جغرافیا و برنامه ریزی*، ۱۷(۴۶)، ۱-۲۳. <https://doi.org/10.22059/jpl.2014.203708>
- جعفری، فرهاد و صفاری، امیر (۱۳۹۵). سنجش مقدار و پهنه بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کرج-شهریار). *انجمن جغرافیای ایران*، ۱۴(۴۸)، ۱-۱۶. <https://doi.org/10.22059/jgi.2016.189497>
- حصارکی زاد، عاطفه (۱۴۰۲). ارتباط توسعه زمانی فعالیت های انسانی و دامنه فرونشست با یافته های تکنیک تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی دشت اشتهارد). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران، ۱-۲۶۸.
- رنجبر، محسن و جعفری، نسرين (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 و کیفی آبهای زیرزمینی دشت اشتهارد و طراحی شبکه بهینه پایش. دانشگاه تربیت معلم، ۱-۱۹۵.
- مختاری، داوود؛ ابراهیمی، حمید و سلمانی، سعید (۱۳۹۸). مدل سازی 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 در معرض خطر فرونشست دشت کرمانشاه با استفاده از مدل فازی. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۲۰(۱)، ۲۳۵-۲۵۱. <http://hsm.spm.modares.ac.ir/article-21-4935-fa.html>
- نوروزی، رعنا؛ افتخاری، سید مروت؛ و احمدآبادی، علی (۱۴۰۴). فرونشست دشت های 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>

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>
- Naghbi, 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>

- 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>

