Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

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

Assessment of Subsidence Risk in Eyvanakey Plain Using Environmental Factors and Radar Images

Amir Saffari [1]✉ | Ali Ahmadabadi [2] | Amir Ali Abbaszadeh [3]

1. Corresponding Author, Department of Geomorphology, University of Kharazmi, Tehran, Iran. E-mail: saffari@khu.ac.ir
2. Department of Geomorphology, University of Kharazmi, Tehran, Iran. E-mail: ahmadabadi@khu.ac.ir
3. Department of Geomorphology, University of Kharazmi, Tehran, Iran. E-mail: amirali.abbaszadeh@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 April 2025
Accepted 22 December 2025
Published online 29 June 2026

Keywords:
Eyvanakey Plain,
Subsidence Risk,
SBAS Time Series.

ABSTRACT

Objective: Subsidence is one of the most important natural hazards that has affected many plains of the country in recent years. Eyvanakey plain in Semnan province is among the plains that have faced this danger. Due to the importance of the subject, in this research, the evaluation of the subsidence risk and the estimation of the subsidence rate in this plain have been done.

Methods: In this research, Sentinel 1 radar images, Landsat satellite images and SRTM 30 meters high digital layer are used as the most important research data. The most important research tools are GMT, ArcGIS and Super Decisions. Also, Fuzzy-ANP logic and SBAS time series models have been used in this research. This research has been done in two stages, in the first stage, the assessment of the subsidence risk and in the second stage, the estimation of the rate of subsidence in Eyvanakey Plain.

Results: Based on the results, 251 square kilometers of the study area (equivalent to 58.5% of the area) has a high and very high risk of subsidence, which mainly corresponds to the southern areas of the Eyvanakey Plain. Also, the results of the SBAS time series method have shown that the Eyvanakey plain has subsided between 28 and 533 mm during a period of 6 years.

Conclusions: Considering that, the high risk class has the highest amount of subsidence in the study area, so it can be said that there is a strong relationship between the subsidence risk classes with radar images and the accuracy of the results of the subsidence risk classes is confirmed.

Amirali

Cite this article: Saffari, A., Ahmadabadi, A., & Abbaszadeh, A.A. (2026). Assessment of Subsidence Risk in Eyvanakey Plain Using Environmental Factors and Radar Images. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 13 (1), 97-110. http//doi.org/10.22034/jsaeh.2026.7370

© The Author(s)
Publisher: Kharazmi University
DOI: http//doi.org/10.22034/jsaeh.2026.7370

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Subsidence is one of the most important natural hazards that has many consequences. But due to the few human casualties compared to other natural disasters, it has received less attention. Eyvanakey plain in Semnan province is one of the areas that is at risk of subsidence, but unfortunately, no special attention has been paid to this issue. In fact, the natural situation as well as human activities in this plain have created the ground for the occurrence of subsidence risks in this plain, which requires special attention. Due to the imperceptibility of the subsidence process, it is necessary to continuously evaluate the process of this phenomenon. In fact, by evaluating and calculating the amount of subsidence in the Eyvanakey Plain and also assessing the risk of subsidence in this area, it is possible to identify the areas exposed to risks due to the occurrence of subsidence, and then its relationship with other natural and human factors (including the loss of water resources) underground and land use changes) analyzed. Today, the progress made in the field of remote sensing has made it possible to evaluate the process of subsidence in the shortest possible time and with the highest accuracy. One of the best methods for continuous subsidence monitoring is the use of radar interferometry. Considering the mentioned cases, it is necessary to evaluate the subsidence process of Eyvanakey plain during recent years and then analyze its relationship with natural and human factors. It is also necessary to evaluate the risk of subsidence in the study area and to identify high-risk areas, which has been addressed in this research.

Methods

In this research, Sentinel 1 radar images, Landsat satellite images and SRTM 30 meters high digital layer are used as the most important research data. The most important research tools are GMT (to prepare the subsidence map), ArcGIS (to prepare the desired maps) and Super Decisions (to implement the ANP model). Also, in this research, Fary logic-ANP (regional subsidence risk map preparation) and SBAS time series (regional subsidence map preparation) models have been used. According to the topic and objectives, this research has been done in two stages. In the first stage, in order to identify areas with high risk of subsidence, 6 parameters of height, slope, geomorphological units, loss of underground water resources, land use and lithology as well as the integrated model of fuzzy logic and ANP have been used. In the second step, using Sentinel 1 images for a period of 6 years (January 2016 to January 2022) and using the SBAS time series method, the subsidence rate of Eyvanakey Plain has been calculated.

Results

Based on the results, 251 square kilometers of the study area (equivalent to 58.5% of the area) has a high and very high risk of subsidence. These strata, which correspond to the Eyvanakey Plain, have a high subsidence potential due to the large drop in underground water resources, low altitude and slope, as well as being in the Plain and Alluvial Cone. Also, based on the results, the study area has subsided between 28 and 533 mm during the 6-year period, which is a significant figure. Based on this, it can be said that the Eyvanakey plain has an annual subsidence of about 8 cm, which indicates that this plain is critical and endangered. Also, the results of investigating the spatial distribution of the subsidence that occurred show that the highest amount of subsidence was related to the southern areas of I Eyvanakey Plain and mostly between the villages of Jant Abad and Cheshme Naderi.

Conclusion

The location of Eyvanakey plain has caused this plain to have a high subsidence potential. Due to the importance of the issue, in this research, a map of the subsidence risk areas in this plain has been prepared. Based on the results, a large part of the study area has a high subsidence risk. These areas, which correspond to the Eyvanakey Plain, have a high potential for subsidence due to the large drop in underground water resources, low altitude and slope, as well as being in the Plain and Alluvial Cone. In this research, after preparing the subsidence risk map, in order to validate the results and estimate the subsidence rate of the area, radar images and SBAS time series method have been used. Based on the results, the study area has subsided between 28 and 533 mm during the period of 6 years, which is a significant figure. Based on this, it can be said that the Eyvanakey plain has an annual subsidence of about 8 cm, which indicates that this plain is critical and endangered. Also, the results of investigating the spatial distribution of the subsidence that occurred show that the highest amount of subsidence was related to the southern areas of Eyvanakey Plain and mostly between the villages of Jant Abad and Cheshme Naderi. Considering that, the high risk class has the highest amount of subsidence in the study area, so it can be said that there is a strong relationship between the subsidence risk classes with radar images and the accuracy of the results of the subsidence risk classes is confirmed.

Keywords: Eyvanakey Plain, Subsidence Risk, SBAS Time Series.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

“Not applicable”.

Acknowledgements

The esteemed reviewers are thanked for their structural and scientific comments.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by them.

Funding

This article has received no financial support.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: **۵۱۴۶- ۲۵۸۸**

Homepage: https://khu.ac.ir

ارزیابی ریسک فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از عوامل محیطی و تصاویر راداری

امیر صفاری[۱]✉| علی احمدآبادی[۲] | امیرعلی عباس زاده[۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: saffari@khu.ac.ir

۲. گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: ahmadabadi@khu.ac.ir

۳. گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: amirali.abbaszadeh@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

کلیدواژه‌ها:
دشت ایوانکی،
ریسک فرونشست،
سری زمانی SBAS.

چکیده

هدف: فرونشست یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که در طی سال‌های اخیر بسیاری از دشت‌های کشور را دربرگرفته است. از جمله دشت‌هایی که با این مخاطره مواجه شده است، دشت ایوانکی در استان سمنان است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به ارزیابی ریسک فرونشست و برآورد نرخ فرونشست در این دشت پرداخته شده است.

روش پژوهش: این در این تحقیق از تصاویر راداری سنتینل ۱، تصاویر ماهواره لندست و لایه رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM به عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای پژوهش، GMT، ArcGIS و Super Decisions بوده است. همچنین در این پژوهش از مدل‌های تلفیقی منطق فازی ANP و سری زمانی SBAS استفاده شده است. این پژوهش در دو مرحله انجام شده است که در مرحله اول به ارزیابی ریسک فرونشست و در مرحله دوم به برآورد نرخ فرونشست در دشت ایوانکی پرداخته شده است.

یافته‌ها: بر اساس نتایج حاصله، ۲۵۱ کیلومترمربع از وسعت منطقه مورد مطالعه (معادل ۵۸/۵ درصد از وسعت منطقه) دارای میزان ریسک فرونشست زیاد و خیلی زیادی است که عمدتا منطبق بر مناطق جنوبی دشت ایوانکی است. همچنین نتایج روش سری زمانی SBAS نشان داده است که دشت ایوانکی در طی دوره زمانی ۶ سال بین ۲۸ تا ۵۳۳ میلی‌متر فرونشست داشته است.

نتیجه‌گیری: با توجه به اینکه، طبقه ریسک زیاد دارای بیش‌ترین میزان فرونشست در محدوده مطالعاتی بوده است، بنابراین می‌توان گفت که بین طبقات ریسک فرونشست با تصاویر راداری ارتباط قوی برقرار است و صحت نتایج طبقات ریسک فرونشست مورد تایید است.

استناد: صفاری، امیر؛ احمدآبادی، علی؛ و عباس زاده، امیرعلی(۱۴۰۵). ارزیابی ریسک فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از عوامل محیطی و تصاویر راداری. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۳ (۱). ۹۷-۱۱۰. http//doi.org/10.22034/jsaeh.2026.7370

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

مقدمه

فرونشست از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که پیامدهای فراوانی به همراه دارد (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸) اما به علت تلفات کم انسانی در مقایسه با سایر سوانح طبیعی، کم‌تر مورد توجه قرارگرفته است (لی[۱] و همکاران، ۲۰۰۷). وقوع این پدیده در دشت‌ها و خصوصاً مناطق شهری سبب خسارات زیادی می‌شود (خرسندی‌آقایی[۲]، ۲۰۱۵؛ آگراول[۳]، ۲۰۲۱). یکی از پیامدهای فرونشست، ترک‌خوردگی، کج شدگی و در نهایت تخریب نواحی سکونتگاهی است (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱؛ کائو[۴]، ۲۰۲۴). روند افزایشی فرونشست در نقاط شهری به مرور زمان سبب می‌شود تا پایه ساختمان‌ها با تخریب مواجه شود که این مسئله در بلندمدت شرایط را برای تخریب ساختمان فراهم می‌آورد. همچنین فرونشست زمین سبب تخریب اراضی کشاورزی و ایجاد فروچاله‌های مختلفی می‌شود که می‌تواند تهدیدی جدی برای جوامع انسانی باشد (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸؛ بهارا[۵]، ۲۰۲۳). فرونشست زمین وابسته به وضعیت زمین‌شناسی، اقلیمی و هیدروژئومورفولوژی مناطق است و عوامل انسانی مانند برداشت از منابع آب زیرزمینی و سازه‌های انسانی نقش تشدیدکننده دارند (لی[۶] و همکاران، ۲۰۲۳؛ هاسیبان[۷] و همکاران، ۲۰۲۳).

دشت ایوانکی در استان سمنان از جمله مناطقی است که در معرض مخاطره فرونشست قرار دارد ولی متاسفانه تاکنون به این مسئله توجه ویژه‌ای نشده است. در واقع، وضعیت طبیعی و همچنین فعالیت‌های انسانی در این دشت، زمینه را برای وقوع مخاطرات ناشی از فرونشست در این دشت فراهم آورده است که این مسئله نیازمند توجه ویژه است. با توجه به نامحسوس بودن روند فرونشست، لازم است که روند این پدیده به‌طور مداوم مورد ارزیابی قرار گیرد. درواقع، با ارزیابی و محاسبه میزان فرونشست در دشت ایوانکی و همچنین ارزیابی ریسک فرونشست در این منطقه می‌توان نواحی در معرض مخاطرات ناشی از وقوع فرونشست را شناسایی کرد و سپس ارتباط آن را با سایر عوامل طبیعی و انسانی (از جمله افت منابع آب زیرزمینی و تغییرات کاربری اراضی) تحلیل کرد. امروز پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه سنجش‌ازدور سبب شده است تا بتوان روند فرونشست را در کم‌ترین زمان ممکن و با بالاترین دقت ارزیابی کرد. یکی از بهترین روش‌های جهت پایش مداوم فرونشست، استفاده از روش تداخل سنجی راداری است. با توجه به موارد مذکور، ضروری است تا روند فرونشست دشت ایوانکی در طی سال‌های اخیر ارزیابی و سپس ارتباط آن با عوامل طبیعی و انسانی تحلیل شود. همچنین ضروری است تا ریسک فرونشست در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود و مناطق پر خطر شناسایی شود که در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است.

پیشینه پژوهش

۱. پیشینه تجربی

در ارتباط با موضوع مورد مطالعه تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به راکولس[۸] و همکاران (۲۰۰۳) اشاره کرد که با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست زمین در شهر پراتو ایتالیا را حدود ۸/۳ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. حسیه[۹] و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از همان روش، میزان فرونشست زمین در دشت پینگ‌تونگ[۱۰] در جنوب تایوان را در فصل مرطوب ۰/۳۱ سانتی‌متر در سال و در فصل خشک ۳/۳۷ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. سامسونو[۱۱] و

---

[1]. Li
[2]. Khorsandi Aghai
[3]. Agarwal
[4]. Cao
[5]. Behera
[6]. Li
[7]. Hasibuan
[8]. Raucoules
[9]. Hsieh
[10]. Pingtung
[11]. Samsonov

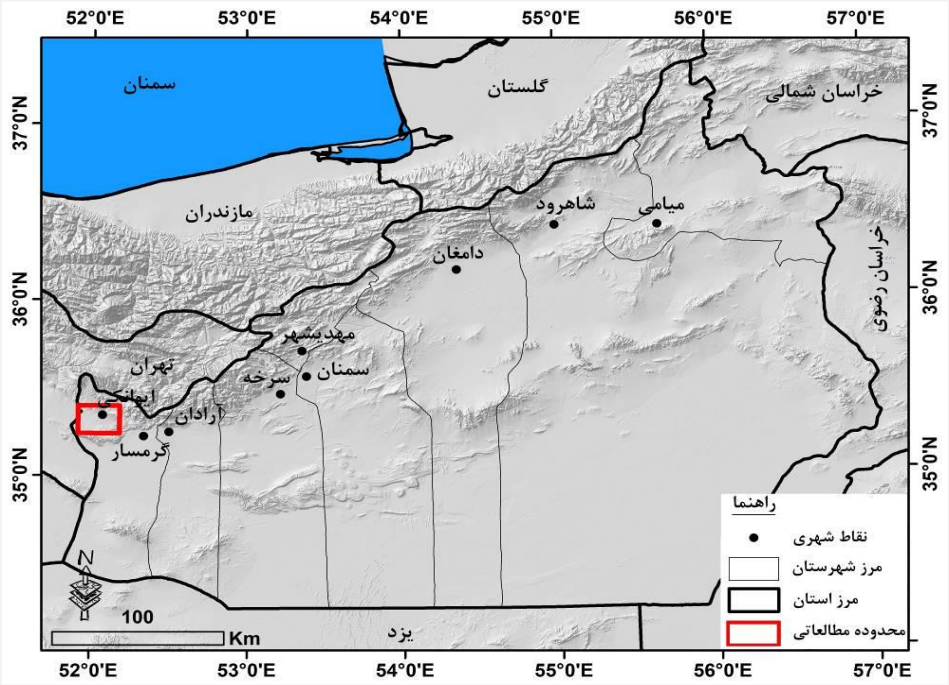
همکاران (۲۰۱۶) نیز با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست زمین در مرکز شهر سیاتل را بین ۲/۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. راسپینی[1] و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی کاربرد تصاویر راداری و روش تداخل‌سنجی راداری در ارزیابی مخاطره فرونشست پرداخته‌اند. بوخاری[2] و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از روش سری زمانی PSI، میزان فرونشست زمین در شهر گوادار[3] پاکستان را در طی دوره زمانی ۲ ساله بین ۳۲ تا ۹۲ میلی‌متر فرونشست برآورد کرده‌اند. خان[4] و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست در حوضه پیشاور پاکستان را حدود ۳/۲۳ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. در ایران نیز صفاری و جعفری (۱۳۹۵) با استفاده از روش سری زمانی SBAS، فرونشست سالانه دشت شهریار–کرج را در طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰، ۱۳۶ میلی‌متر برآورد کرده‌اند. شایان و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از پارامترهای طبیعی و انسانی، به پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبریز قره‌چای همدان پرداختند. مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش تداخل-سنجی راداری مبتی بر پراکنش‌گرهای دائمی، ماکزیمم فرونشست دشت شهریار را ۱۵ سانتی‌متر در سال برآورده کرده‌اند. رنجبرباروق و فتح‌الله‌زاده (۱۴۰۱) با استفاده از روش سری زمانی SBAS، ماکزیمم فرونشست سالانه شهر کرج را ۱۴۵ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. ایمانی و جعفرزاده (۱۴۰۱) با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای و منطق فازی، به شناسایی روستاهای در معرض خطر فرونشست در دشت اردبیل پرداختند. مهرابی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری نشان دادند که میزان فرونشست دشت جیرفت از ۱۱ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۴ به ۱۳ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است. روستایی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از روش Fuzzy-ANP به شناسایی مناطق مستعد وقوع فرونشست در دشت شبستر–صوفیان پرداختند. گنجائیان (۱۴۰۳) با استفاده از روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست دشت قروه را در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲، حدود ۳۷۹ میلی‌متر محاسبه کرده است. در راستای تحقیقات پیشین صورت گرفته، هدف از پژوهش تهیه نقشه ریسک فرونشست در دشت ایوانکی و سپس ارزیابی نرخ فرونشست این دشت با استفاده از تصاویر راداری است.

روش‌شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر شامل دشت ایوانکی در غرب استان سمنان است. دشت ایوانکی با حدود ۴۰۰ کیلومترمربع وسعت، از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان گرمسار قرار دارد و مهم‌ترین شهر این دشت، شهر ایوانکی است (شکل ۱). دشت ایوانکی از سمت شمال به دامنه‌های جنوبی البرز و از سمت جنوب به واحد تپه‌ماهور منتهی می‌شود. دشت ایوانکی از نظر ارتفاعی در بین طبقه ارتفاعی حدود ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. همچنین این دشت از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک تا نیمه خشک محسوب می‌شود به طوری که متوسط بارندگی ایستگاه باران‌سنجی ایوانکی در طی دوره ۲۳ ساله، ۱۴۵ میلی‌متر بوده است (عبادتی، ۱۳۹۴).

[1]. Raspini
[2]. Bokhari
[3]. Gwadar
[4]. Khan



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲.داده‌ها و روش کار

در این تحقیق از تصاویر راداری سنتینل ۱، تصاویر ماهواره لندست و لایه رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای پژوهش، GMT[۱] (به‌منظور تهیه نقشه فرونشست)، ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر) و Super Decisions (به‌منظور اجرای مدل ANP) بوده است. همچنین در این پژوهش از مدل‌های تلفیقی منطق فازی–ANP (تهیه نقشه ریسک فرونشست منطقه) و سری زمانی SBAS (تهیه نقشه فرونشست منطقه) استفاده شده است. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این پژوهش در دو مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

۱. مرحله اول (شناسایی مناطق با ریسک فرونشست بالا)

در این پژوهش به‌منظور شناسایی مناطق با ریسک بالای فرونشست از ۶ پارامتر ارتفاع، شیب، واحدهای ژئومورفولوژی، افت منابع آب زیرزمینی، کاربری اراضی و لیتولوژی استفاده شده است. در این مرحله ابتدا لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده است و پس از فازی‌سازی آن‌ها با استفاده از مدل ANP به آن‌ها وزن داده شده است. پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن‌ها بر لایه‌های اطلاعاتی، لایه‌ها با استفاده از عملگر گامای فازی با هم ترکیب شده و در نهایت نقشه مناطق دارای ریسک بالای فرونشست تهیه شده است. پس از شناسایی مناطق دارای ریسک بالای فرونشست، ارتباط نقشه تهیه شده با نقشه بدست آمده از طریق تصاویر راداری بررسی و تحلیل شده است.

۲. مرحله دوم (ارزیابی میزان فرونشست منطقه)

در این مرحله با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ مربوط به دوره زمانی ۶ ساله (ژانویه ۲۰۱۶ تا ژانویه ۲۰۲۲) و با استفاده روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست دشت ایوانکی محاسبه شده است. در این مرحله از ۶۱ تصاویر راداری استفاده شده است (جدول ۱). تصاویر مورد استفاده دارای حالت مداری صعودی، نوع IW، فرمت SLC و پولاریزاسیون VV هستند پس از تهیه تصاویر، به‌منظور پردازش تصاویر از سیستم عامل لینوکس[۲] و نرم‌افزار GMT استفاده شده است که برای این منظور در مرحله اول

۱. Generic Mapping Tools
۲. Linux

پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر شامل تصحیحات مداری، حذف خطای توپوگرافی و فیلتر تصاویر انجام شده است، همچنین در این مرحله آستانه همبستگی تصاویر ۰/۲ تعریف شده است. پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، بر مبنای بیس‌لاین زمانی تصاویر نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است. در این پژوهش ابتدا میزان جابجایی سالانه محاسبه شده است و در نهایت جابجایی کلی صورت گرفته از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ محاسبه شده است.

جدول ۱: تاریخ تصاویر راداری مورد استفاده

ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ
۱	۲۰۱۶/۰۱/۰۶	۱۷	۲۰۱۷/۱۰/۱۵	۳۲	۲۰۱۹/۰۳/۲۷	۴۷	۲۰۲۰/۰۹/۱۷
۲	۲۰۱۶/۰۲/۲۳	۱۸	۲۰۱۷/۱۱/۲۰	۳۳	۲۰۱۹/۰۵/۰۲	۴۸	۲۰۲۰/۱۰/۲۳
۳	۲۰۱۶/۰۳/۱۸	۱۹	۲۰۱۷/۱۲/۲۶	۳۴	۲۰۱۹/۰۶/۰۷	۴۹	۲۰۲۰/۱۱/۲۸
۴	۲۰۱۶/۰۴/۱۱	۲۰	۲۰۱۸/۰۱/۱۹	۳۵	۲۰۱۹/۰۷/۱۳	۵۰	۲۰۲۱/۰۱/۰۳
۵	۲۰۱۶/۰۵/۲۹	۲۱	۲۰۱۸/۰۲/۲۴	۳۶	۲۰۱۹/۰۸/۱۸	۵۱	۲۰۲۱/۰۲/۰۸
۶	۲۰۱۶/۰۷/۰۴	۲۲	۲۰۱۸/۰۴/۰۱	۳۷	۲۰۱۹/۰۹/۲۳	۵۲	۲۰۲۱/۰۳/۱۶
۷	۲۰۱۶/۰۹/۰۲	۲۳	۲۰۱۸/۰۵/۰۷	۳۸	۲۰۱۹/۱۰/۲۹	۵۳	۲۰۲۱/۰۴/۲۱
۸	۲۰۱۶/۱۰/۲۰	۲۴	۲۰۱۸/۰۶/۱۲	۳۹	۲۰۱۹/۱۲/۰۴	۵۴	۲۰۲۱/۰۵/۲۷
۹	۲۰۱۶/۱۲/۰۷	۲۵	۲۰۱۸/۰۷/۱۸	۴۰	۲۰۲۰/۰۱/۰۹	۵۵	۲۰۲۱/۰۷/۰۲
۱۰	۲۰۱۷/۰۱/۲۴	۲۶	۲۰۱۸/۰۸/۲۳	۴۱	۲۰۲۰/۰۲/۱۴	۵۶	۲۰۲۱/۰۸/۰۷
۱۱	۲۰۱۷/۰۳/۰۱	۲۷	۲۰۱۸/۰۹/۲۸	۴۲	۲۰۲۰/۰۳/۲۱	۵۷	۲۰۲۱/۰۹/۱۲
۱۲	۲۰۱۷/۰۴/۰۶	۲۸	۲۰۱۸/۱۱/۰۳	۴۳	۲۰۲۰/۰۴/۲۶	۵۸	۲۰۲۱/۱۰/۱۸
۱۳	۲۰۱۷/۰۵/۱۲	۲۹	۲۰۱۸/۱۲/۰۹	۴۴	۲۰۲۰/۰۶/۰۱	۵۹	۲۰۲۱/۱۱/۲۳
۱۴	۲۰۱۷/۰۶/۲۹	۳۰	۲۰۱۹/۰۱/۱۴	۴۵	۲۰۲۰/۰۷/۰۷	۶۰	۲۰۲۱/۱۲/۱۷
۱۵	۲۰۱۷/۰۸/۰۴	۳۱	۲۰۱۹/۰۲/۱۹	۴۶	۲۰۲۰/۰۸/۱۲	۶۱	۲۰۲۲/۰۱/۱۰
۱۶	۲۰۱۷/۰۹/۰۹						

یافته‌های پژوهش

۱. شناسایی مناطق با ریسک فرونشست بالا

در این پژوهش به‌منظور شناسایی مناطق با ریسک بالای فرونشست از ۶ پارامتر ارتفاع، شیب، واحدهای ژئومورفولوژی، افت منابع آب زیرزمینی، کاربری اراضی و لیتولوژی استفاده شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

ارتفاع: ارتفاع به‌طور غیرمستقیم بر میزان فرونشست منطقه موثر است. مناطق مرتفع به دلیل اینکه تناسب زیادی برای ساخت‌وساز و توسعه اراضی کشاورزی ندارند، کم‌تر تحت فشار هستند و پتانسیل فرونشست کمی دارند. بررسی وضعیت ارتفاعی منطقه مورد مطالعه نشان داده است که مناطق جنوبی دشت ایوانکی دارای کم‌ترین ارتفاع است و از نظر این پارامتر دارای ریسک فرونشست بالایی است. باتوجه به موارد مذکور، به‌منظور فازی‌سازی لایه ارتفاعی، به مناطق کم ارتفاع ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق مرتفع ارزش نزدیک به صفر داده شده است (شکل ۲: A).

شیب: میزان شیب تعیین‌کننده نوع کاربری و استفاده از زمین است. مناطق کم شیب به دلیل پتانسیل بالایی که جهت توسعه اراضی کشاورزی و ساخت‌وسازها دارند، بیش‌تر در معرض مخاطره فرونشست هستند. بررسی وضعیت شیب منطقه مورد مطالعه نشان داده است که بخش زیادی از محدوده مطالعاتی دارای شیب کم‌تر از ۵ درصد است و همین مسئله سبب شده این منطقه

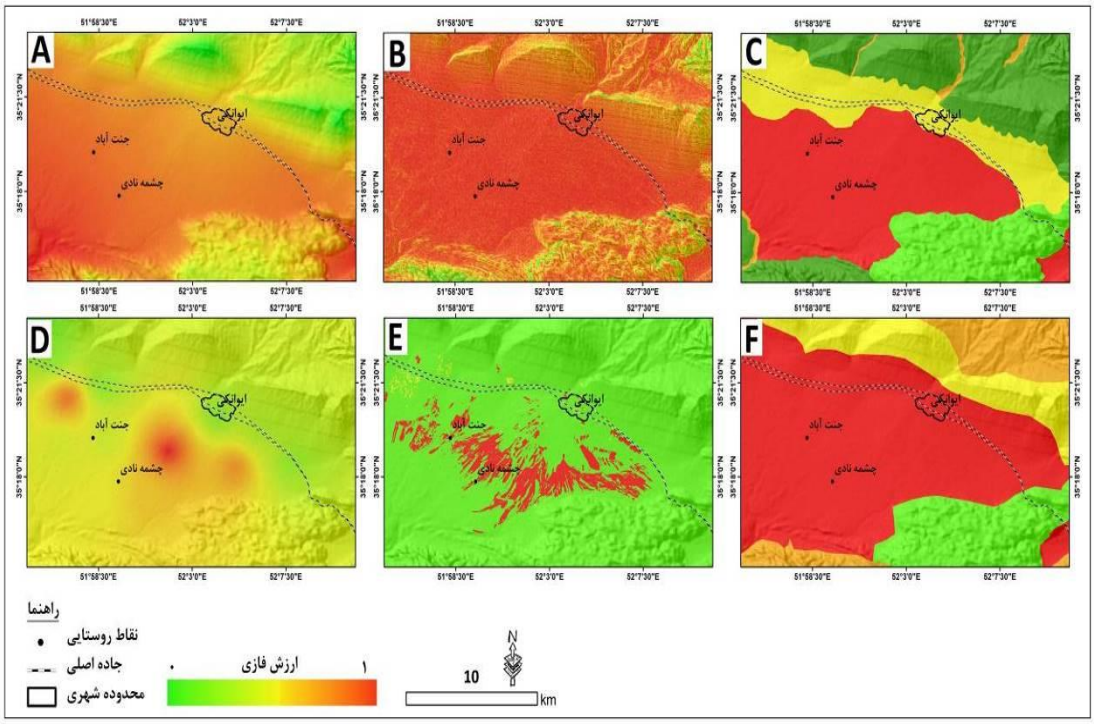
دارای ریسک فرونشست بالایی باشد. بر این اساس، به‌منظور فازی‌سازی لایه شیب، به مناطق کم شیب ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق پرشیب ارزش نزدیک به صفر داده شده است (شکل ۲: B).

واحدهای ژئومورفولوژی: پتانسیل وقوع فرونشست در واحدهای مختلف ژئومورفولوژی متفاوت است، به همین دلیل از این پارامتر به عنوان یکی از پارامترهای موثر استفاده شده است. به طور معمول واحدهای دشت و مخروطه افکنه نسبت به واحد کوهستان، ریسک فرونشست بالاتری دارند. در واقع با توجه به اینکه بخش زیادی از اراضی کشاورزی و همچنین ساخت و سازها در واحدهای دشت و مخروطه‌افکنه صورت می‌گیرد، بنابراین این واحدها پتانسیل فرونشست بالایی دارند (شکل ۲: C).

افت منابع آب زیرزمینی: یکی از عوامل اصلی وقوع فرونشست، افت منابع آب زیرزمینی است. مناطقی که دارای افت آب زیرزمینی زیادی است، دارای ریسک فرونشست بالایی هستند. در این پژوهش به‌منظور وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، از اطلاعات ۱۳ چاه پیزومتری استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصله، مناطق جنوبی دشت ایوانکی دارای افت آب زیرزمینی بیش‌تری بوده است. بر این اساس، به‌منظور فازی‌سازی لایه افت منابع آب زیرزمینی، به مناطق دارای افت آب بیش‌تر، ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق دارای افت آب کم‌تر، ارزش نزدیک به صفر داده شده است (شکل ۲: D).

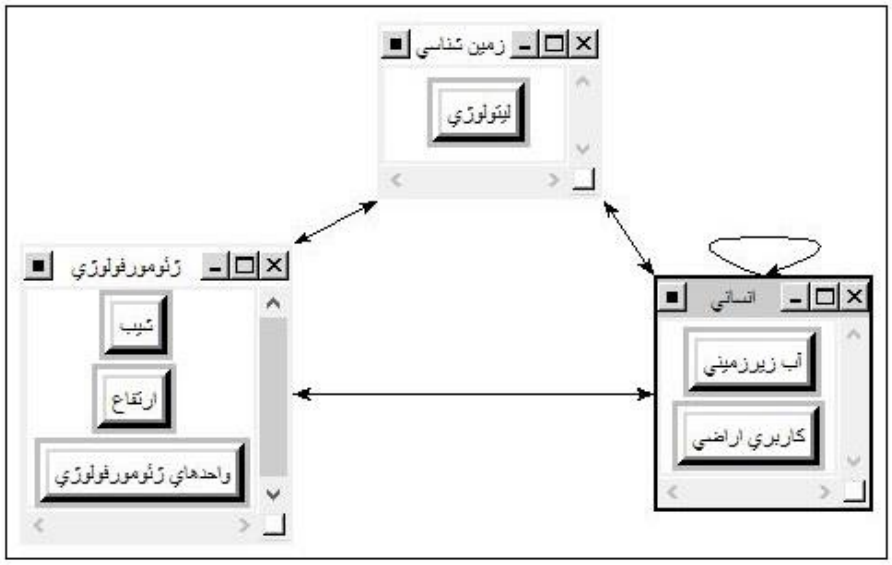
کاربری اراضی: نوع کاربری اراضی از عوامل انسانی مهم در تشدید وقوع فرونشست است. در واقع، بهره‌برداری‌های انسان یکی از عوامل موثر در وقوع فرونشست محسوب می‌شود، به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونتگاهی نیز به دلیل ساخت-وسازها، مستعد وقوع فرونشست هستند. با توجه به موارد مذکور، به مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی، ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق دارای کاربری مراتع و اراضی بایر، ارزش نزدیک به صفر داده شده است (شکل ۲: E).

لیتولوژی: نوع لیتولوژی از دیگر عوامل موثر در وقوع فرونشست است. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه از نظر نوع لیتولوژی دارای تنوع زیادی است، بنابراین پتانسیل فرونشست در این منطقه نیز متفاوت خواهد بود. به‌طور معمول مناطقی که دارای لیتولوژی آبرفتی هستند به دلیل اینکه بیشتر مورد توجه اراضی کشاورزی هستند، ریسک فرونشست بالایی دارند. بر این اساس، به‌منظور فازی‌سازی واحد لیتولوژی، به واحدهای آبرفتی ارزش نزدیک به ۱ و به واحد کنگلومرا و ماسه‌سنگ ارزش نزدیک به صفر داده شده است (شکل ۲: F).

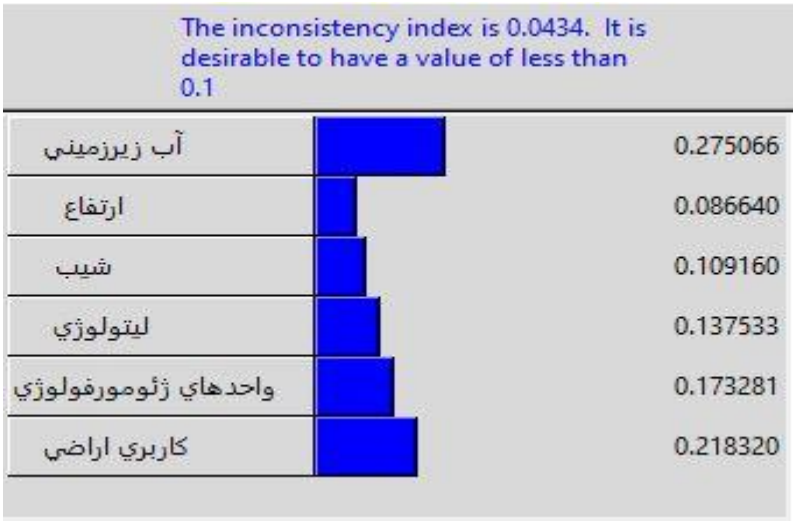


شکل ۲: نقشه فازی‌سازی شده لایه‌های اطلاعاتی

پس از بدست آوردن لایه‌های اطلاعاتی برای وزن‌دهی به آن‌ها از مدل تحلیل شبکه‌ای (ANP) استفاده شده است. برای این منظور پس از تشکیل ساختار شبکه‌ای (شکل ۳) و با توجه به رابطه دورنی و بیرونی معیارها، از ماتریس مقایسه‌ای شامل ۶ سطر و ۶ ستون برای تعیین رابطه و میزان اهمیت هر یک از این معیارها و زیرمعیارها استفاده شده است. به‌منظور امتیازدهی به معیارها از طریق پرسش‌نامه و دیدگاه‌های کارشناسان امر (۵ کارشناس ژئومورفولوژی) استفاده شده است. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار Super Decisions استفاده شده و پس از بدست آوردن وزن‌های نهایی هر کدام از معیارها (شکل ۴)، در نرم‌افزار Arc GIS بر روی لایه‌های نقشه‌ای اعمال شده است.

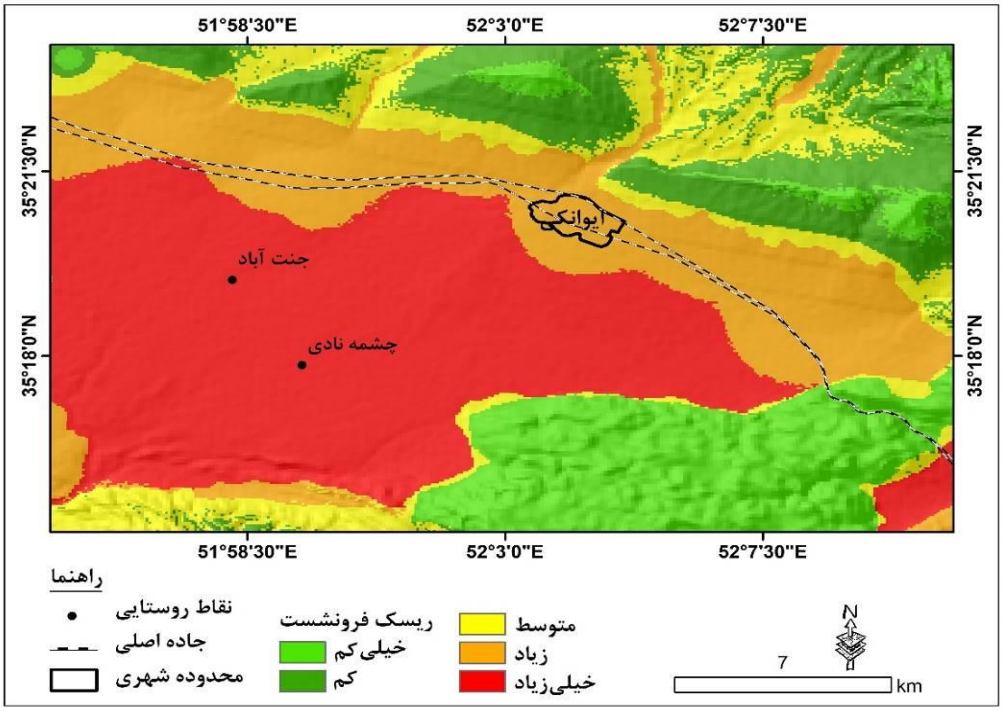


شکل ۳: ساختار شبکه‌ای معیارها



شکل ۴: وزن نهایی معیارها

پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن بدست آمده بر روی هر لایه، لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از عملگر گامای فازی با هم ترکیب شده و در نهایت نقشه نهایی ریسک فرونشست در منطقه مورد مطالعه تهیه شده است (شکل ۵). بر اساس نتایج حاصله، بخش زیادی از محدوده مطالعاتی دارای ریسک فرونشست زیادی است. این مناطق که عمدتا شامل نواحی جنوبی شهر ایوانکی و منطبق بر واحد دشت است.

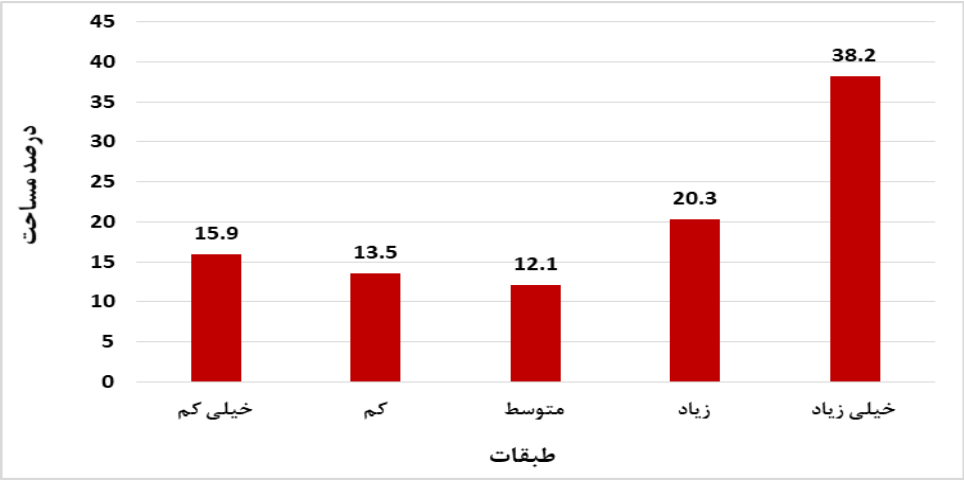


شکل ۵: نقشه نهایی میزان ریسک فرونشست در منطقه مورد مطالعه

در جدول ۲ و شکل ۶ مساحت و درصد مساحت طبقات نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصله، ۲۵۱ کیلومترمربع از وسعت منطقه مورد مطالعه (معادل ۵۸/۵ درصد از وسعت منطقه) دارای میزان ریسک فرونشست زیاد و خیلی زیادی است. این طبقات که منطبق بر دشت ایوانکی است به دلیل افت زیادی منابع آب زیرزمینی، ارتفاع و شیب کم و همچنین قرار گرفتن در واحد دشت و مخروطه افکنه، پتانسیل فرونشست بالایی دارند.

جدول ۲: مساحت و درصد مساحت طبقات

ردیف	میزان ریسک	مساحت	درصد مساحت
۱	خیلی کم	۶۸	۱۵/۹
۲	کم	۵۸	۱۳/۵
۳	متوسط	۵۲	۱۲/۱
۴	زیاد	۸۷	۲۰/۳
۵	خیلی زیاد	۱۶۴	۳۸/۲



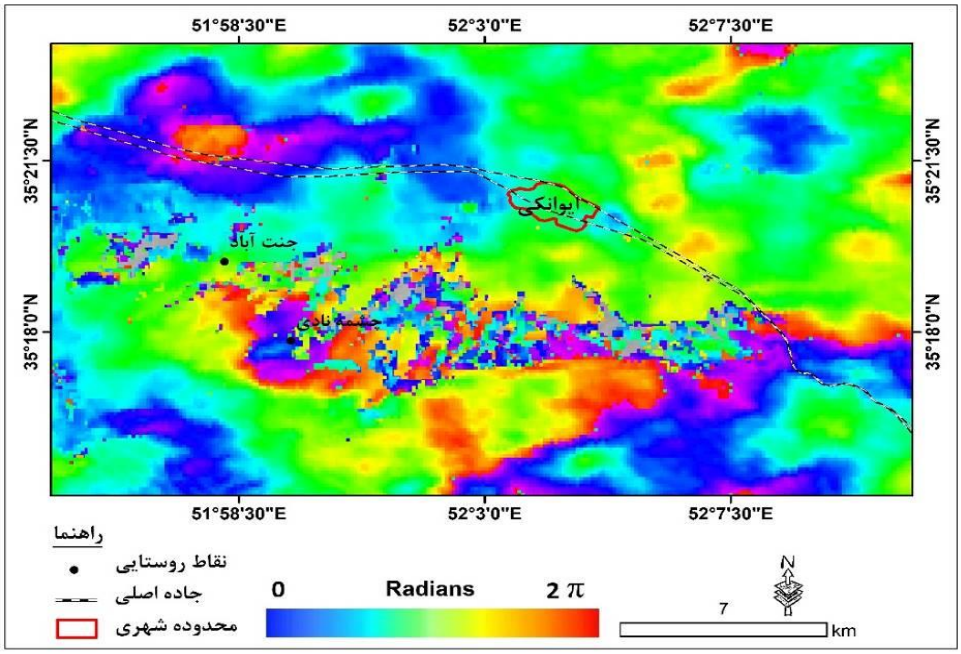
شکل ۶: نمودار درصد مساحت طبقات

۲. ارزیابی میزان فرونشست منطقه در طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰ از ۶۱ تصویر راداری استفاده شده است و بر اساس بیس‌لاین زمانی، ۶۰ زوج تصویر به‌منظور تهیه نقشه‌های اینترفروگرام انتخاب شده است (جدول ۳). پس از انتخاب زوج تصاویر، اینترفروگرام‌های مورد نظر در این بازه زمانی تهیه شده است (شکل ۷).

جدول ۳: زوج تصاویر انتخاب شده جهت تهیه نقشه‌های اینترفروگرام

ردیف	زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر
۱	۲۰۱۶/۰۲/۲۳ - ۲۰۱۶/۰۱/۰۶	۲۱	۲۰۱۸/۰۴/۰۱ - ۲۰۱۸/۰۲/۲۴	۴۱	۲۰۲۰/۰۳/۲۱ - ۲۰۲۰/۰۲/۱۴
۲	۲۰۱۶/۰۳/۱۸ - ۲۰۱۶/۰۲/۲۳	۲۲	۲۰۱۸/۰۵/۰۷ - ۲۰۱۸/۰۴/۰۱	۴۲	۲۰۲۰/۰۴/۲۶ - ۲۰۲۰/۰۳/۲۱
۳	۲۰۱۶/۰۴/۱۱ - ۲۰۱۶/۰۳/۱۸	۲۳	۲۰۱۸/۰۶/۱۲ - ۲۰۱۸/۰۵/۰۷	۴۳	۲۰۲۰/۰۶/۰۱ - ۲۰۲۰/۰۴/۲۶
۴	۲۰۱۶/۰۵/۲۹ - ۲۰۱۶/۰۴/۱۱	۲۴	۲۰۱۸/۰۷/۱۸ - ۲۰۱۸/۰۶/۱۲	۴۴	۲۰۲۰/۰۷/۰۷ - ۲۰۲۰/۰۶/۰۱
۵	۲۰۱۶/۰۷/۰۴ - ۲۰۱۶/۰۵/۲۹	۲۵	۲۰۱۸/۰۸/۲۳ - ۲۰۱۸/۰۷/۱۸	۴۵	۲۰۲۰/۰۸/۱۲ - ۲۰۲۰/۰۷/۰۷
۶	۲۰۱۶/۰۹/۰۲ - ۲۰۱۶/۰۷/۰۴	۲۶	۲۰۱۸/۰۹/۲۸ - ۲۰۱۸/۰۸/۲۳	۴۶	۲۰۲۰/۰۹/۱۷ - ۲۰۲۰/۰۸/۱۲
۷	۲۰۱۶/۱۰/۲۰ - ۲۰۱۶/۰۹/۰۲	۲۷	۲۰۱۸/۱۱/۰۳ - ۲۰۱۸/۰۹/۲۸	۴۷	۲۰۲۰/۱۰/۲۳ - ۲۰۲۰/۰۹/۱۷
۸	۲۰۱۶/۱۲/۰۷ - ۲۰۱۶/۱۰/۲۰	۲۸	۲۰۱۸/۱۲/۰۹ - ۲۰۱۸/۱۱/۰۳	۴۸	۲۰۲۰/۱۱/۲۸ - ۲۰۲۰/۱۰/۲۳
۹	۲۰۱۷/۰۱/۲۴ - ۲۰۱۶/۱۲/۰۷	۲۹	۲۰۱۹/۰۱/۱۴ - ۲۰۱۸/۱۲/۰۹	۴۹	۲۰۲۱/۰۱/۰۳ - ۲۰۲۰/۱۱/۲۸
۱۰	۲۰۱۷/۰۳/۰۱ - ۲۰۱۷/۰۱/۲۴	۳۰	۲۰۱۹/۰۲/۱۹ - ۲۰۱۹/۰۱/۱۴	۵۰	۲۰۲۱/۰۱/۰۳ - ۲۰۲۰/۱۱/۲۸
۱۱	۲۰۱۷/۰۴/۰۶ - ۲۰۱۷/۰۳/۰۱	۳۱	۲۰۱۹/۰۳/۲۷ - ۲۰۱۹/۰۲/۱۹	۵۱	۲۰۲۱/۰۲/۰۸ - ۲۰۲۱/۰۱/۰۳
۱۲	۲۰۱۷/۰۵/۱۲ - ۲۰۱۷/۰۴/۰۶	۳۲	۲۰۱۹/۰۵/۰۲ - ۲۰۱۹/۰۳/۲۷	۵۲	۲۰۲۱/۰۳/۱۶ - ۲۰۲۱/۰۲/۰۸
۱۳	۲۰۱۷/۰۶/۲۹ - ۲۰۱۷/۰۵/۱۲	۳۳	۲۰۱۹/۰۶/۰۷ - ۲۰۱۹/۰۵/۰۲	۵۳	۲۰۲۱/۰۴/۲۱ - ۲۰۲۱/۰۳/۱۶
۱۴	۲۰۱۷/۰۸/۰۴ - ۲۰۱۷/۰۶/۲۹	۳۴	۲۰۱۹/۰۷/۱۳ - ۲۰۱۹/۰۶/۰۷	۵۴	۲۰۲۱/۰۵/۲۷ - ۲۰۲۱/۰۴/۲۱
۱۵	۲۰۱۷/۰۹/۰۹ - ۲۰۱۷/۰۸/۰۴	۳۵	۲۰۱۹/۰۸/۱۸ - ۲۰۱۹/۰۷/۱۳	۵۵	۲۰۲۱/۰۷/۰۲ - ۲۰۲۱/۰۵/۲۷
۱۶	۲۰۱۷/۱۰/۱۵ - ۲۰۱۷/۰۹/۰۹	۳۶	۲۰۱۹/۰۹/۲۳ - ۲۰۱۹/۰۸/۱۸	۵۶	۲۰۲۱/۰۹/۱۲ - ۲۰۲۱/۰۸/۰۷
۱۷	۲۰۱۷/۱۱/۲۰ - ۲۰۱۷/۱۰/۱۵	۳۷	۲۰۱۹/۱۰/۲۹ - ۲۰۱۹/۰۹/۲۳	۵۷	۲۰۲۱/۱۰/۱۸ - ۲۰۲۱/۰۹/۱۲
۱۸	۲۰۱۷/۱۲/۲۶ - ۲۰۱۷/۱۱/۲۰	۳۸	۲۰۱۹/۱۲/۰۴ - ۲۰۱۹/۱۰/۲۹	۵۸	۲۰۲۱/۱۱/۲۳ - ۲۰۲۱/۱۰/۱۸
۱۹	۲۰۱۸/۰۱/۱۹ - ۲۰۱۷/۱۲/۲۶	۳۹	۲۰۲۰/۰۱/۰۹ - ۲۰۱۹/۱۲/۰۴	۵۹	۲۰۲۱/۱۲/۱۷ - ۲۰۲۱/۱۱/۲۳
۲۰	۲۰۱۸/۰۲/۲۴ - ۲۰۱۸/۰۱/۱۹	۴۰	۲۰۲۰/۰۲/۱۴ - ۲۰۲۰/۰۱/۰۹	۶۰	۲۰۲۲/۰۱/۱۰ - ۲۰۲۱/۱۲/۱۷

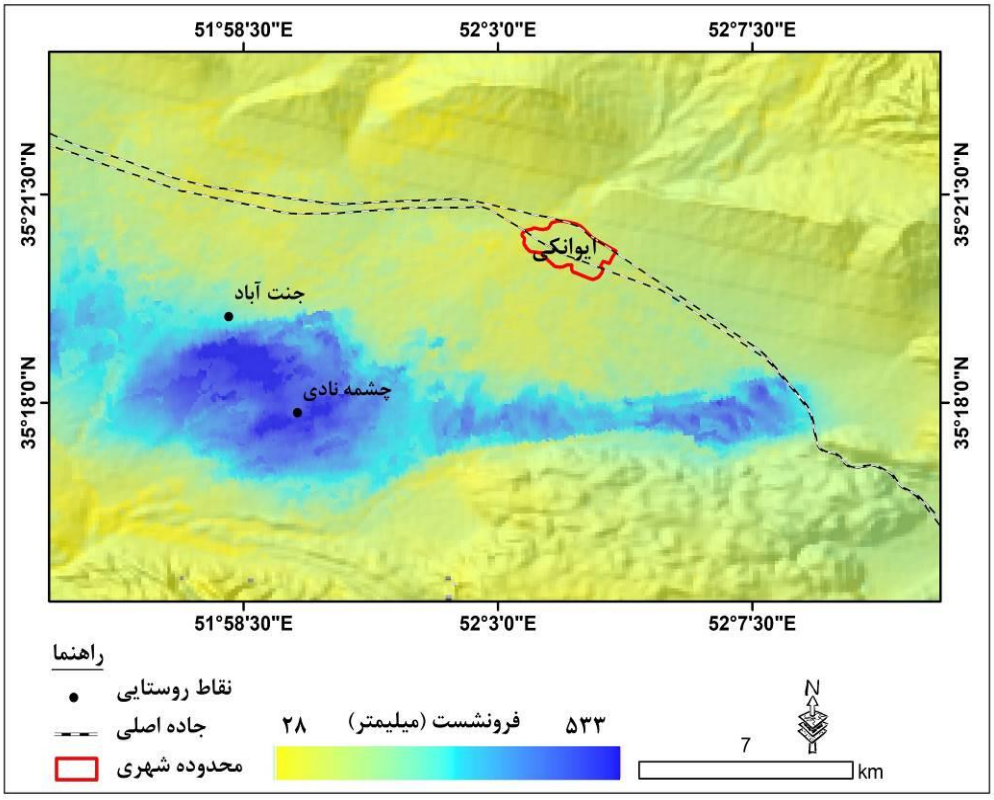


شکل ۷: نمونه‌ای از نقشه اینترفروگرام‌های منطقه (زوج تصویر ۲۰۱۶/۰۷/۰۴ - ۲۰۱۶/۰۵/۲۹)

پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام منطقه، با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نقشه میزان فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰ تهیه شده است. بر اساس نتایج حاصله، محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی ۶ ساله بین ۲۸ تا ۵۳۳ میلی‌متر فرونشست داشته که رقم قابل توجهی است. بر این اساس می‌توان گفت که دشت ایوانکی به‌طور متوسط سالانه حدود ۸ سانتی‌متر فرونشست دارد که این مسئله بیانگر بحرانی بودن و در معرض مخاطره بوده این دشت است و همین مسئله سبب بروز مخاطراتی در دشت ایوانکی شده است (شکل ۸). همچنین نتایج بررسی وضعیت پراکنش مکانی فرونشست رخ داده بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به مناطق جنوبی دشت ایوانکی و بیش‌تر در حدفاصل روستاهای جنت‌آباد و چشمه نادری بوده است (شکل ۹).



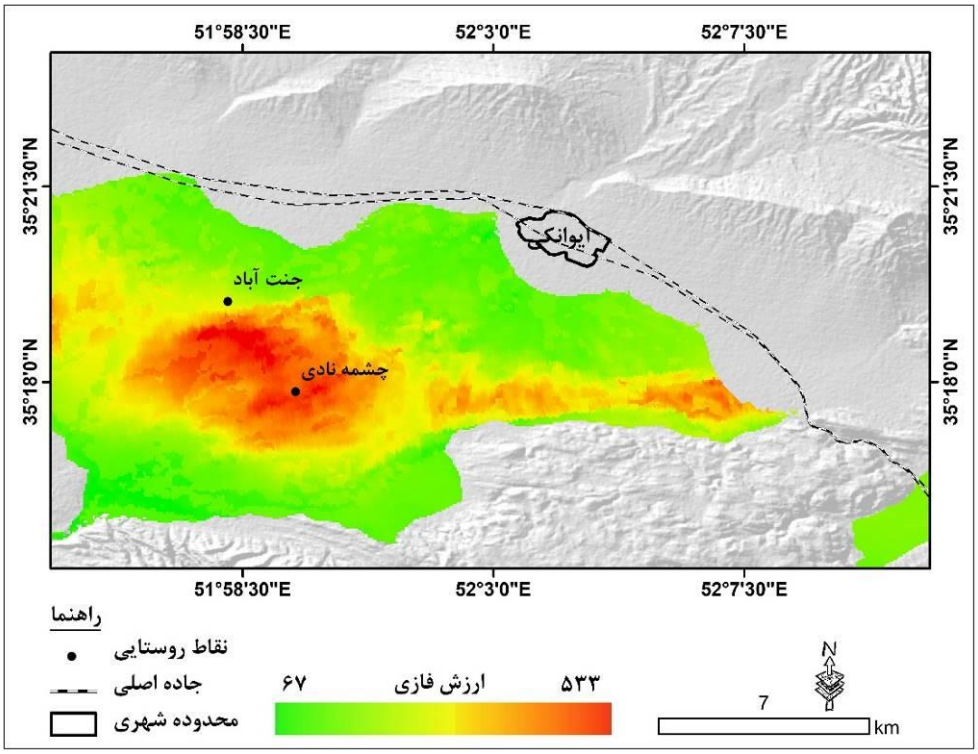
شکل ۸: نمایی از اثرات فرونشست در دشت ایوانکی (منبع: سازمان آب و منطقه‌ای استان سمنان)



شکل ۹: نقشه فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰

۳. تحلیل ارتباط طبقات ریسک فرونشست با تصاویر راداری

در این پژوهش پس از تهیه نقشه ریسک فرونشست منطقه مورد مطالعه، به تحلیل ارتباط طبقات ریسک فرونشست با تصاویر راداری پرداخته شده است که برای این منظور، وضعیت فرونشست منطقه (در طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲) در طبقه ریسک زیاد ارزیابی شده است (شکل ۱۰). بر اساس نتایج حاصله، طبقه ریسک زیاد دارای بیش‌ترین میزان فرونشست در محدوده مطالعاتی بوده است، بنابراین می‌توان گفت که بین طبقات ریسک فرونشست با تصاویر راداری ارتباط قوی برقرار است و صحت نتایج طبقات ریسک فرونشست مورد تایید است.



شکل ۱۰: نقشه میزان فرونشست منطقه در طبقه ریسک خیلی‌زیاد

نتیجه‌گیری

موقعیت قرارگیری دشت ایوانکی سبب شده است تا این دشت دارای پتانسیل فرونشست بالایی باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش نقشه مناطق ریسک فرونشست در این دشت تهیه شده است. بر اساس نتایج حاصله، بخش زیادی از محدوده مطالعاتی دارای ریسک فرونشست زیادی است. به‌طوری‌که، ۲۵۱ کیلومترمربع از وسعت منطقه مورد مطالعه (معادل ۵۸/۵ درصد از وسعت منطقه) دارای میزان ریسک فرونشست زیاد و خیلی زیادی است. این طبقات که منطبق بر دشت ایوانکی است به دلیل افت زیادی منابع آب زیرزمینی، ارتفاع و شیب کم و همچنین قرار گرفتن در واحد دشت و مخروطه افکنه، پتانسیل فرونشست بالایی دارند. در این پژوهش پس از تهیه نقشه ریسک فرونشست، به‌منظور صحت‌سنجی نتایج و برآورد نرخ فرونشست منطقه، از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصله، محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی ۶ سال بین ۲۸ تا ۵۳۳ میلی‌متر فرونشست داشته که رقم قابل توجهی است. بر این اساس می‌توان گفت که دشت ایوانکی همانند دشت‌های جیرفت (مهرابی و همکاران، ۱۴۰۲) و قروه (گنجائیان، ۱۴۰۳)، دارای فرونشست سالانه بیش از ۸ سانتی‌متر در سال است که این مسئله بیانگر بحرانی بودن و در معرض مخاطره بوده این دشت است. همچنین نتایج بررسی وضعیت پراکنش مکانی فرونشست رخ داده بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به مناطق جنوبی دشت ایوانکی و بیش‌تر در حدفاصل روستاهای جنت‌آباد و چشمه نادری بوده است. با توجه به اینکه، طبقه ریسک زیاد دارای بیش‌ترین میزان فرونشست در محدوده

مطالعاتی بوده است، بنابراین می‌توان گفت که بین طبقات ریسک فرونشست با تصاویر راداری ارتباط قوی برقرار است و صحت نتایج طبقات ریسک فرونشست مورد تایید است. مجموع نتایج حاصله از این پژوهش نشان داده است که در آینده شاهد بروز مخاطرات زیادی، خصوصا تخریب اراضی کشاورزی در دشت ایوانکی خواهیم بود. بنابراین جهت کنترل این مخاطره لازم است تا بر وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، نظارت بیش‌تری صورت گیرد و همچنین الگوی کشت منطقه متناسب با توان هیدرواقلیمی منطقه تنظیم شود.

ملاحظات اخلاقی

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

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در جمع‌آوری داده‌ها، تهیه گزارش پژوهش و تحلیل داده‌ها مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر از حمایت مالی هیچ سازمان و یا موسسه‌ای برخوردار نبوده است.

سپاسگزاری

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

منابع

ایمانی، بهرام؛ و جعفرزاده، جعفر. (۱۴۰۱). شناسایی روستاهای در معرض خطر فرونشست در دشت اردبیل با استفاده از تحلیل شبکه‌ای–فازی در سیستم اطلاعات جغرافیایی، *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱۳ (۲)، ۸۳–۶۲.

رنجبرباروق، زهرا؛ و فتح‌الهزاده، محمد. (۱۴۰۱). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان شهر کرج). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۰ (۴)، ۱۵۵–۱۳۸.

روستایی، شهرام؛ رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ یاراحمدی، جمشید؛ و نجف‌وند، سمیرا. (۱۴۰۲). بررسی مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش FUZZY-AHP (مطالعه موردی: دشت شبستر–صوفیان). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*، ۱۲ (۳)، ۵۸–۳۵.

شایان، سیاوش؛ یمانی، مجتبی؛ و یادگاری، منیژه. (۱۳۹۵). پهنه‌بندی فرونشست در حوضه آبریز قره‌چای. *هیدروژئومورفولوژی*، ۳ (۹)، ۱۵۸–۱۳۹.

شریفی‌کیا، محمد. (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق – بهرمان. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۶ (۳)، ۷۷–۵۵.

صفاری، امیر؛ جعفری، فرهاد؛ و توکلی صبور، سیدمحمد. (۱۳۹۵). پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت کرج–شهریار). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۵ (۲)، ۹۳–۸۲.

عبادتی، ناصر. (۱۳۹۴). بررسی روند تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی دشت ایوانکی. *اکوهیدرولوژی*، ۲ (۴)، ۳۹۴–۳۸۳.

گنجائیان، حمید. (۱۴۰۳). شناسایی مناطق در معرض ایجاد فروچاله با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: دشت قروه). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۴ (۲)، ۱۰۵–۸۷.

محمدخان، شیرین؛ گنجائیان، حمید؛ گروسی، لیلا؛ و زنگنه‌تبار، زهرا. (۱۳۹۸). ارزیابی تاثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ (محدوده مورد مطالعه: دشت قروه). *سپهر*، ۲۸ (۱۱۲)، ۲۲۹–۲۱۹.

مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ و احمدی، حسن. (۱۳۹۸). بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵ (۱)، ۳۱۳-۲۹۹.

منتظریون، مریم؛ و اصلانی، فرشته. (۱۳۹۸). ارزیابی خطر فرونشست زمین با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۹ (۱)، ۴۷-۳۵.

مهرابی، علی؛ کریمی، صادق؛ و خالصی، مهران. (۱۴۰۲). تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس (CPT). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۴ (۱)، ۱۱۶-۹۹.

References

Agarwal, V., Kumar, A., Gee, D., Grebby, S., Gomes, R. L., & Marsh, S. (2021). Comparative Study of Groundwater-Induced Subsidence for London and Delhi Using PSInSAR. *Remote Sens*, 13 (23).

Behera, A., & Rawat, K. S. (2023). A brief review paper on mining subsidence and its geo-environmental impact. *Materialstoday*, 4.

Bokhari, R., Shu, H., Tariq, A., Al-Ansari, N., Guluzade, R., Chen, T., Jamil, A., & Aslam, M. (2023). Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. *Heliyon*, 9 (3).

Cao, Q., Zhang, Y., Yang, L., Chen, J., & Hou, C. (2024). Unveiling the driving factors of urban land subsidence in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 916.

Hasibuan, H. S., Tambunan, R.P ., Permana, C. T., Elizandri, B. N., Aswin, G., Putra, G. Y., Wahidah, A. N., & Ristya, Y. (2023). Policymaking and the Spatial Characteristics of Land Subsidence in North Jakarta. *City and Environment Interactions*, 18(2).

Hsieh, C., Shih, T., Hu, J., Tung, H., Huang, M., & Angelier, J. (2011). Using differential SAR interferometry to map land subsidence: A case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. Natural Hazards, 58, 1311–1332.

Khan, S. D., Faiz, M. I., Gadea, C. A., & Ahmad, A. (2023). Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakista, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26 (1), 173-184.

Khorsandi Aghai, A. (2015). Survey of land subsidence– case study: The land subsidence formation in artificial recharge ponds at South Hamadan Power Plant, northwest of Iran. *Indian Academy of Sciences, J. Earth Syst*, 1, 261–268.

Li, S., Zhang, Q., Xue, Y., Ding, W., Zhong, S., & Lin, Y. (2007). Forecast of Karst-fractured groundwater and defective geological conditions. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26, 217-225.

Li, W., Wang, Y., Wang, G., Liang, Y., Li, C., & Svenning, J.C. (2023). How do rotifer communities respond to floating photovoltaic systems in the subsidence wetlands created by underground coal mining in China? *Journal of Environmental Management*, 339.

Raspini, E., Caleca, F., Del Soldato, M., Festa, D., Confuorto, P., & Bianchini, S. (2022). Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews*, 235.

Raucoules, D., le Mouelic, S., Carnec, C., Maisons, C., & King, C. (2003). Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry. *Remote Sens*, 24 (4), 891–897.

Samsonov, S.V., Tiampo, K.F., & Feng, W. (2016). Fast subsidence in downtown of Seattle observed with satellite radar. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 179-187.