

Evaluating Land Subsidence with SAR Interferometric Time Series and Spatial Analyses

Mansoureh Sadrykia^{✉1}, Neda Kazemipour²

1. Corresponding author , Assistant Professor, Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: m.sadrykia@tabrizu.ac.ir
2. MSc, Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran,. E-mail: neda8800@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received : 21 October 2023 Revised : 10 January 2024 Accepted : 14 January 2024 Published: 18 February 2025 Keywords: Land subsidence, Time series, SAR interferometry, AHP, Spatial Analyses, Shabestar plain	Land subsidence is an environmental phenomenon of the gradual or sudden subsidence of the land. The purpose of the present study is to evaluate the land subsidence in Shabestar plain of East Azerbaijan province. Using Small Baseline Subset (SBAS) time series analysis method, the crust surface displacement rate between 2018 and 2021 is investigated. The maximum subsidence is seen in the southern and southeastern parts of the plain with a maximum rate of about 8 cm per year in the direction of the satellite line of sight. Also, using AHP the conditioning factors are weighted and the land subsidence susceptibility (LSS) is modeled using spatial analyses. Thereupon, Shabstar plain was classified into five regions with the LSS: "Very High": 3%, "High": 20%, "Moderate": 25%, "Low": 33% and "Very Low": 19% of the total area of the plain. To verify the accuracy of the subsidence susceptibility model, the displacement map obtained from radar interferometry was utilized, the area under the ROC curve of 86% confirmed the good prediction accuracy of the model. Also, the model was assessed by performing sensitivity analysis for most important conditioning factors. The introduced model can provide useful and reliable information for managers and decision-makers of the region for the effective and timely 'prevention' and 'mitigation' planning with low cost and time.
Cite this article: Sadrykia, M., Kazemipour, N.,. (2025). Evaluating Land Subsidence with SAR Interferometric Time Series and Spatial Analyses. <i>Journal of Geography and Planning</i> , 28 (90), 177-195. http://doi.org/10.22034/gp.2024.58713.3194	
 © The Author(s). DOI: http://doi.org/10.22034/gp.2024.58713.3194 Publisher: University of Tabriz.	

Introduction

The phenomenon of subsidence is defined as the displacement of the earth's surface in the vertical direction, which can be caused by human activities or natural phenomena. According to UNESCO, land subsidence is the collapse or subsidence of the Earth's surface that occurs on a large scale for different reasons, which occurs either gradually or suddenly (Poland, 1984). Land subsidence can cause certain physical and social damages. Therefore, it is necessary to evaluate the phenomenon in vulnerable areas timely and reliably. In the present study, Shabstar Plain as one of the high risk plains located in East Azarbaijan Province has been selected as the study area.

Data and Method

In this paper, using SBAS time series analysis method, a map of the crust surface displacement rate of Shabaster Plain between 2018 and 2021 was prepared. The plain is located approximately in longitude of $45^{\circ} 11'$ to $46^{\circ} 3'$ and latitude of $38^{\circ} 7'$ to $38^{\circ} 23'$. As the first step of preparation of displacement map using SAR interferometry is to select appropriate set of SAR images. Sentinel-1A images are used in this study. Small baseline subset algorithm (SBAS) was used. 143 interferograms were created for 46 Sentinel-1A images using GMTSAR software, with the criteria that the time baselines are less than 100 days and the spatial baselines are less than 100 meters. The land displacement map of Shabestar Plain showing the annual displacement rate was obtained.

For modeling land subsidence susceptibility of the study area conditioning factors influencing ground subsidence were selected considering previous studies. The factors were weighted using the Analytical Hierarchy (AHP) method. The maps of the factors were classified and the sub-classes were ranked based on the experts' opinions. Weighted overlay was used to integrate all the factors considering weights of each factor and the rank of the sub-classes of in GIS environment. By weighted combination of the criteria and sub-criteria that were obtained in the previous stages, the land subsidence susceptibility map was prepared.

Results and Discussion

The maximum land subsidence rate of about -79 mm per year in the direction of line of sight of the sensor is seen using SBAS time series method. The maximum subsidence is seen in the southern and southeastern parts of the plain. The obtained land subsidence susceptibility map was classified into 5 classes; namely the areas with the highest sensitivity to subsidence (Very High: 3%), areas with high probability of land subsidence (High: 20%), areas with moderate probability of land subsidence (Medium: 25%) and areas with low and very low susceptibility to land subsidence: (Low: 33%) and (Very low: 19%) classes in the land subsidence susceptibility map.

In this article, two methods have been used to verify the accuracy of the land subsidence sensitivity map that follows: a) Using displacement map produced by InSAR time series analysis method. The area under ROC curve showed the prediction accuracy of 86% b) Sensitivity analysis to the conditioning factors with highest weights. According to the performed validations, the effectiveness of the proposed method for evaluating land subsidence in Shabstar Plain was confirmed.

Conclusion

According to the InSAR time series results, land subsidence is more visible in the southern areas of Shabastar Plain. In the generated land subsidence susceptibility map, these areas were mainly located in the class 'very high' sensitivity to land subsidence too. Based on AHP method applied for weighing conditioning factors, among the selected factors, 'underground water level changes', 'geology' and 'land use' were the factors with highest weights; 36.8 %, 22.6% and 18.7% accordingly. The important role of the three factors in causing land subsidence was investigated and the existence of a direct and significant relationship between the important conditioning factors and land subsidence that occurred in the Shabstar plain in the period from 2018 to 2021 was confirmed.

By using the proposed method, it is possible to get a correct understanding of the region in terms of land subsidence occurred and prediction of land subsidence occurrence according to a set of conditioning factors and concerning their weights. This paper showed that the combination of SAR interferometry time series and spatial analysis can be an efficient and low-cost method to evaluate land subsidence in land subsidence prone areas. The method used in this paper can be useful for other areas where there is lack of enough field data about the occurred land subsidence or its preparation is time consuming and expensive. The results of this study can help managers and related authorities plan for necessary actions accurately and timely in the prevention and mitigation phase.

ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تداخل سنجی راداری و تحلیل های مکانی

منصوره صدری کیا^۱ | ندا کاظمی پور^۲ |

۱. استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز. رایانامه: m.sadrykia@tabrizu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، کارشناس ارشد مهندسی نقشه برداری، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز رایانامه: neda8800@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ کلیدواژه ها: فرونشست زمین، سری زمانی، تداخل سنجی راداری، تحلیل سلسله مراتبی، تحلیل های مکانی، دشت شبستر	فرونشست زمین یک پدیده زیست محیطی است و به نشست تدریجی یا ناگهانی زمین گفته می شود. هدف پژوهش حاضر، مطالعه فرونشست زمین در دشت شبستر استان آذربایجان شرقی می باشد. برای بررسی نرخ تغییر شکل سطح زمین، از روش تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه مبتنی بر تداخل سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. بیشینه فرونشست، در قسمت های جنوبی و جنوب شرقی دشت با حداکثر نرخ حدود ۸ سانتی متر در سال در جهت خط دید ماهواره دیده می شود. همچنین با روش تحلیل سلسله مراتبی وزندهی معیارهای موثر بر فرونشست انجام شده و حساسیت به فرونشست، با استفاده از تحلیل های مکانی مدل سازی شده است. بر این اساس دشت شبستر به پنج منطقه با احتمال وقوع فرونشست «خیلی زیاد»: ۳٪، «زیاد»: ۲۰٪، «متوسط»: ۲۵٪، «کم»: ۳۳٪ و «خیلی کم»: ۱۹٪ مساحت کل دشت، طبقه بندی شد. برای صحت سنجی مدل پیش بینی فرونشست، از نقشه جابه جایی به دست آمده از تداخل سنجی راداری استفاده شد. با توجه به سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد^۱ ۸۶٪، صحت خوب پیش بینی مدل تایید شد. همچنین مدل پیشنهادی، با انجام تحلیل حساسیت نسبت به معیارهای با بیشترین اهمیت، مورد ارزیابی قرار گرفته و اهمیت بالای آن ها در ایجاد فرونشست در منطقه، مورد تأیید قرار گرفت. مدل معرفی شده می تواند اطلاعات مفید و قابل اعتمادی برای مدیران و تصمیم گیرندگان منطقه، جهت برنامه ریزی های موثر و بهنگام پیشگیری و کاهش اثرات پدیده فرونشست با هزینه و زمان کم فراهم سازد.

استناد: صدری کیا، منصوره؛ کاظمی پور، ندا؛ (۱۴۰۳). ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تداخل سنجی راداری و تحلیل های مکانی. *جغرافیا و برنامه ریزی*، ۲۸ (۹۰)، ۱۷۷-۱۹۵.



<http://doi.org/10.22034/gp.2024.58713.3194>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

¹ Receiver Operating Characteristic

مقدمه

پدیده فرونشست به صورت جابه‌جایی سطح زمین در راستای قائم تعریف می‌شود که می‌تواند در اثر فعالیت‌های بشری از جمله استخراج مایعات مانند آب‌های زیرزمینی و نفت، حفر معادن زیرزمینی و یا پدیده‌های طبیعی مانند زلزله ایجاد شود. پدیده فرونشست زمین از نظر یونسکو به فروریزش یا نشست سطح زمین که در مقیاس‌های بزرگ و به علت‌های متفاوت روی می‌دهد گفته می‌شود، که به دو شکل تدریجی و ناگهانی رخ می‌دهد (پولند^۱، ۱۹۸۴). با توجه به اطلاعات انجمن فرونشست زمین در سازمان یونسکو، قدیمی‌ترین فرونشست شناخته‌شده در ایالت آلاباما ایالات متحده در سال ۱۹۰۰ میلادی اتفاق افتاده است (عابدینی، ۱۳۹۶). فرونشست زمین در ایران تاریخ نسبتاً طولانی سی و چند ساله دارد که علت اصلی آن شرایط اقلیمی و نیز عوامل مختلف منجر به افزایش تقاضا برای آب، نظیر افزایش جمعیت، خشکسالی در نتیجه کاهش بارندگی، تغییرات الگوی کشت محصولات کشاورزی، مصارف صنعتی، حفر چاه‌های غیر مجاز و افزایش میانگین درجه حرارت هوا می‌باشد که منجر به برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی شده است. به طوری که در برخی از مناطق، نرخ فرونشست بسیار سریع و نگران‌کننده بوده است (بابایی، ۱۳۹۴). بنابراین مطالعه و پیش‌بینی مخاطره فرونشست در مناطق آسیب‌پذیر کشور ضرورت دارد. در پژوهش حاضر دشت شبستر از دشت‌های تحت تاثیر فرونشست^۲ در استان آذربایجان شرقی به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است.

تاکنون از روش‌های مختلفی برای تعیین میزان فرونشست زمین استفاده شده است. لیکن با توجه به محدودیت‌های روش‌هایی مثل ترازیابی دقیق، جی پی اس^۳ و داده‌های چاه‌های پی‌زومتری از جمله هزینه بالا، عدم وجود داده‌های کافی در همه مناطق، نقطه‌ای بودن داده‌ها و عدم پوشش مناسب منطقه از یک سو و با در نظر گرفتن پوشش زمینی وسیع و پیوسته، جمع‌آوری مکرر داده‌ها، هزینه و زمان کم و توان تفکیک مناسب روش تداخل‌سنجی راداری و نیز دقت بالای تحلیل سری‌های زمانی مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری از سوی دیگر، روش تداخل‌سنجی راداری جزو روش‌های کارآمد و کم‌هزینه برای پایش فرونشست زمین شناخته شده است.

در ادامه برخی از مطالعات در مورد تعیین میزان فرونشست با روش تداخل‌سنجی راداری و پیش‌بینی این پدیده در بستر سیستم‌های اطلاعات مکانی در ایران و مناطق دیگر جهان معرفی می‌شوند.

رجبی و همکاران (۱۴۰۲) میزان فرونشست دشت کرمانشاه را در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ برای چهار دوره یک ساله با روش تداخل‌سنجی تفاضلی تعیین کردند. همچنین در این تحقیق پیش‌بینی فرونشست با استفاده از عوامل موثر و روش تحلیل سلسله مراتبی انجام شده است و انطباق مناطق دارای بیشینه فرونشست به دست‌آمده از تداخل‌سنجی راداری و مناطق با احتمال فرونشست خیلی زیاد در نقشه پیش‌بینی فرونشست، نشان داده شده است. اصغری و همکاران (۱۴۰۲) فرونشست زمین برای بخشی از شهرستان سراب را در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ با روش سری زمانی تداخل‌سنجی خط مبنای کوتاه مورد بررسی قرار داده و میزان فرونشست برای کاربری‌های اراضی مختلف را در منطقه مورد مطالعه تعیین نمودند. صدری کیا (۱۴۰۱) فرونشست دشت سراب را در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ با روش سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی تداخل‌سنجی راداری به دست آورده و نشان داده است که در مناطق دارای فرونشست این دشت همبستگی معنی‌داری بین افت سطح آب زیرزمینی و متوسط جابه‌جایی سطح زمین وجود دارد. خسروانی و همکاران (۱۴۰۱) فرونشست دشت ابرکوه را با روش تداخل‌سنجی راداری و هوش مصنوعی مدل‌سازی کرده‌اند. با تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه، نقشه جابه‌جایی بر اساس متوسط نرخ فرونشست سالانه برای بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ تهیه شده است. جهت آموزش شبکه عصبی از متوسط نرخ فرونشست به دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. همچنین مهرنور و همکاران (۱۴۰۱) احتمال وقوع فرونشست دشت هشتگرد را با وزندهی و همپوشانی عوامل موثر انجام داده‌اند. جهت صحت‌سنجی، نمونه‌برداری از فرونشست چند نقطه انجام شده است. عابدینی و همکاران (۱۴۰۰) محدوده‌های فرونشست دشت ماهیدشت کرمانشاه را با روش تداخل‌سنجی تفاضلی با استفاده از دو تصویر سنتینل ۱-

^۱ Poland

^۲ <https://fa.ncc.gov.ir/vdcb.abaurhbawipr.html>

^۳ Global Positioning System (GPS)

مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ تعیین کردند و وضعیت افت آب زیرزمینی منطقه را در بازه زمانی مورد مطالعه بررسی نمودند. در تحقیق دیگری توسط عرب‌عامری^۱ و همکاران (۲۰۲۱) رویکردهای مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی برای بررسی فرونشست زمین، ارزیابی شده و از تکنیک یادگیری ماشین برای تهیه نقشه حساسیت به فرونشست^۲ استفاده شده است. صحت‌سنجی مدل، توسط مشاهدات زمینی انجام شده است. کریم‌زاده و ماتسوکا^۳ (۲۰۲۰) از تصاویر راداری باند L^۴ و روش خط مبنای کوتاه برای بررسی میزان فرونشست استان آذربایجان شرقی استفاده کردند. صحت‌سنجی نیز با مقایسه نتایج با سه تصویر راداری باند C^۵ و مشاهدات میدانی انجام شده است. در تحقیق محمد فولکی^۶ و همکاران (۲۰۲۰) آنالیز خطر فرونشست زمین در سئول کره جنوبی با ادغام داده‌های سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی تداخل‌سنجی راداری و مدل‌های یادگیری ماشین انجام شده است. رجبی و همکاران (۱۳۹۹) فرونشست زمین در شهرهای غربی استان همدان را در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با روش سری زمانی تداخل-سنجی راداری به دست آورده و همبستگی بین میزان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در چاه‌های پیژومتری مورد مطالعه را نشان دادند. مختاری و همکاران (۲۰۱۹) حساسیت به فرونشست زمین در دشت تسوج را با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی مدل‌سازی کرده‌اند. صحت‌سنجی با استفاده از نقاط محدود ثبت شده فرونشست و به کمک منحنی مشخصه عملکرد انجام شده است. کوه‌بنانی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش کوتاه‌ترین خط مبنای مکانی، فرونشست دشت کاشمر و خلیل‌آباد را در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ با استفاده از تصاویر سنتینل-۱^۷ مورد مطالعه قرار داده‌اند. ارتباط افت آب زیرزمینی با نقشه جابه‌جایی جابه‌جایی تهیه شده بررسی شده است. طاهری (۱۳۹۶) محدوده‌های محتمل فرونشست در دشت شبستر را با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی تعیین کرده است. برای صحت‌سنجی نتایج نیز از دو تصویر سنتینل-۱ در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ استفاده شده است.

در مقاله حاضر از تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه مبتنی بر روش تداخل‌سنجی راداری جهت تعیین نرخ جابه‌جایی‌های سطح زمین استفاده شده است و از تحلیل‌های مکانی جهت تهیه نقشه حساسیت به فرونشست و پیش‌بینی احتمال وقوع فرونشست با وزندهی عوامل موثر، به روش تحلیل سلسله‌مراتبی، استفاده شده است. ابتدا فرونشست زمین در بازه زمانی سه ساله ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ با استفاده از ۴۶ تصویر راداری سنتینل-۱، در منطقه دشت شبستر با تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه مورد بررسی قرار گرفته و نقشه جابه‌جایی سطح پوسته زمین تولید می‌شود. سپس عوامل موثر بر فرونشست با روش تحلیل سلسله‌مراتبی وزندهی شده و با استفاده از قابلیت‌های تحلیلی محیط جی‌آی‌اس^۸، حساسیت به فرونشست منطقه مورد مطالعه مدل‌سازی می‌شود. نقشه حاصل با استفاده از نقشه جابه‌جایی سطح زمین که در پژوهش حاضر به دست آمده، صحت‌سنجی می‌شود. در نهایت با توجه به این که در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، با توجه به استفاده از نظرات افراد خبره در تعیین وزن‌ها، درجه‌ای از ذهنیت وارد مدل می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۱۳)^۹ برای بررسی استحکام و قابلیت اعتماد مدل، تحلیل حساسیت بر روی معیارهای مهم اجرا شده است.

در این پژوهش کارایی استفاده از نقشه جابه‌جایی به‌دست‌آمده از تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری جهت صحت‌سنجی پیش‌بینی فرونشست زمین نشان داده شده است. استحکام مدل پیش‌بینی فرونشست نیز با انجام تحلیل حساسیت مورد مطالعه قرار گرفته است که بر اساس مطالعات نویسندگان، روش ارائه شده جهت ارزیابی و صحت‌سنجی مدل پیش‌بینی فرونشست زمین در این مقاله در تحقیقات قبلی مورد استفاده قرار نگرفته است.

شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

¹ Arabameri

² land subsidence susceptibility mapping (LSSM)

³ Matsuoka

⁴ PALSAR-2

⁵ Sentinel-1

⁶ Fulki Fadhilah

⁷ Sentinel-1A

⁸ Geographic Information System (GIS)

⁹ Chen



شکل (۱). نقشه موقعیت منطقه: الف) استان‌های کشور ایران ب) دشت شبستر

روش تحقیق

الف) تکنیک تداخل‌سنجی راداری

تداخل‌سنجی راداری تکنیک استفاده از امواج الکترومغناطیسی به منظور به‌دست آوردن اطلاعات از زمین است. تداخل‌سنجی راداری با استفاده از اختلاف فاز یک زوج تصویر راداری به دنبال برآورد میزان تغییر شکل و جابه‌جایی پوسته زمین با حد تفکیک مکانی بالا است. در واقع تداخل‌سنجی راداری با درجه مصنوعی^۱ براساس پردازش‌های تفاضلی بین تصاویر راداری می‌باشد. این تکنیک اولین بار در سال ۱۹۸۶ برای تولید نقشه توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفت (مقصودی و مهدوی، ۱۳۹۹). با تداخل-سنجی راداری چند زمانه بر روی سری زمانی تصاویر راداری یک منطقه امکان تشخیص جابه‌جایی‌های سطح زمین و نرخ حرکت آن، با دقتی کوچک‌تر از میلیمتر، فراهم می‌شود (سوسا^۲ و همکاران، ۲۰۱۶).

الگوریتم سری زمانی خط مبنای کوتاه برای اولین بار توسط براردینو و همکاران پیشنهاد شد (براردینو^۳ و همکاران، ۲۰۰۲). روش خط مبنای کوتاه استفاده از تداخل‌نماهایی با طول خط مبنای مکانی و زمانی کوتاه‌تر نسبت به خط مبنای بحرانی، برای استخراج مقدار جابه‌جایی هر پیکسل، با استفاده از روش کمترین مربعات می‌باشد. این روش با دخالت دادن شرط نرم‌کنندگی، نوسانات ناشی از اتمسفر را در برآورد مقدار جابه‌جایی پیکسل‌ها کاهش می‌دهد. در شبکه تشکیل شده بایستی هر تصویر حداقل با دو تصویر دیگر تداخل داشته باشد، در غیر اینصورت در حل معادلات سرشکنی به منظور برآورد فاز، کمبود مرتبه به وجود می‌آید. سندول^۴ و همکاران (۲۰۱۱) نرم افزار جی ام تی سار^۵ را با امکان انجام تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه ارائه دادند. این نرم-نرم افزار تحت سیستم عامل لینوکس می‌باشد و مزیت سرعت بالا در پردازش و رایگان بودن را برای انجام تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه دارد که به همین دلایل در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

^۱ Intrferometric Synthetic Aperture Radar

^۲ Sousa

^۳ Berardino

^۴ Sandwell

^۵ GMTSAR

ب) پردازش سری زمانی خط مبنای کوتاه

ب-۱) انتخاب تصاویر مناسب؛ اولین مرحله، انجام عملیات تداخل سنجی راداری است که برای رسیدن به نتایج صحیح تداخل-سنجی لازم است عواملی همچون طول موج سنجنده، خط مبنای مکانی عمودی، خط مبنای زمانی، همپوشانی مکانی و طیفی بین تصاویر مورد توجه قرار گیرد.

ب-۲) ثبت هندسی تصاویر؛ در این مرحله یکسان نمودن نظیر به نظیر موقعیت پیکسل‌ها در تصاویر جهت تولید تداخل‌نماها انجام می‌شود.

ب-۳) تشکیل شبکه تداخل‌نماها؛ هر تداخل‌نما از حاصل ضرب تصویر اصلی یا پایه در مختلط مزدوج تصویر پیرو به دست می‌آید. تداخل‌نما یا اینترفروگرام اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر را شامل می‌شود. در اختلاف فاز دو تصویر درگیر در تداخل‌نما، علاوه بر اثر تغییرات ارتفاعی، اثر عواملی مثل زمین مسطح، خطای اتمسفر و ... نیز وجود دارد (پاپی و همکاران، ۲۰۲۰؛ سند ول^۱ و همکاران، ۲۰۱۱).

برای انتخاب تداخل‌نماهای مناسب برای تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه از دامنه همدوسی استفاده می‌شود. تعیین خط مبنای زمانی و مکانی مناسب بین تصاویر موجب حفظ همدوسی بین تصاویر می‌شود. همچنین در شبکه تشکیل شده باید پیوستگی بین تمامی تداخل‌نماها وجود داشته باشد، زیرا در صورت وجود گسستگی بین تداخل‌نماهای شبکه، حل معادلات سرشکنی دچار کمبود مرتبه خواهد شد و منجر به منفرد شدن دستگاه معادلات خواهد شد.

ب-۴) تولید تصاویر همدوسی؛ در این مرحله، همزمان با مرحله قبل، همدوسی بین دو تصویر محاسبه شده و به صورت یک تصویر ایجاد می‌شود. تصاویر همدوسی مقادیری بین ۰ و ۱ دارند. مقدار ۱ به معنی همبستگی کامل دو تصویر و مقدار ۰ به معنی عدم همبستگی می‌باشد.

ب-۵) بازیابی فاز؛ تصحیح مقادیر فازی یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مراحل تهیه نقشه جابه‌جایی با استفاده از تداخل سنجی راداری است. فازهای موجود در یک تداخل‌نما در محدوده ۰ تا 2π مدوله می‌شوند، اما درباره جابه‌جایی سطح زمین امکان دارد که تغییر فاز بیشتر از 2π باشد. در این مواقع نیز در تداخل‌نمای حاصل مقادیر بیشتر از 2π مجدداً به صورت یک چرخه تکرار خواهند شد که الگوریتم‌های اصلاح فازی سعی در حل این ابهام می‌کنند. تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای تصحیح فاز توسط محققین ارائه شده است که با توجه به نوع داده و منطقه مطالعاتی، هر کدام مزیت‌های خاص خود را دارا هستند.

ب-۶) تعیین جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره؛ بعد از بازیابی فاز، جابه‌جایی با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\Delta\phi_d = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{Los} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه $\Delta\phi_d$ فاز ناشی از جابه‌جایی سطح زمین، λ طول موج و Δr_{Los} جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره^۲ می‌باشد. با استفاده از رابطه (۲) جابه‌جایی در راستای قائم به دست می‌آید (بابایی، ۱۳۹۴).

$$\Delta r_{vert} = \frac{\Delta r_{Los}}{\cos\theta} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه Δr_{vert} جابه‌جایی در راستای قائم و θ زاویه دید سنجنده می‌باشد.

ب-۷) استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین خط مبنا با استفاده از نرم‌افزار جی‌ام‌تی‌سار^۳؛ در روش خط مبنای کوتاه تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مولفه‌های قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنای زمانی آن‌ها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌نماهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند جی‌ام‌تی‌سار، پردازش سری زمانی خط مبنای کوتاه را در یک فرایند واحد برای همه‌ی تداخل‌نماهای ایجاد شده انجام می‌دهد.

^۱ Sandwell

^۲ Line Of Sight

^۳ GMTSAR

ب-۸) انتقال سیستم مختصات؛ در این مرحله، نقشه جابه‌جایی از سیستم مختصات تصویربرداری به سیستم مختصات یوتی‌ام^۱ منتقل می‌شود.

ج) مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین

مراحل کلی مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین در این پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است. بعد از جمع‌آوری داده‌ها از سازمان‌های ذیربط و آماده‌سازی داده‌ها و کلاس‌بندی هر لایه، وزندهی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شده و در نهایت تلفیق وزن‌دار لایه‌های موثر بر فرونشست با استفاده از تحلیل‌های مکان‌مبنا در محیط آرک‌مپ^۲ انجام شده است.



شکل (۲). مراحل کلی به کار رفته برای مدل‌سازی حساسیت به فرونشست

ج-۱) در این پژوهش برای وزندهی عوامل موثر از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است (ساعتی^۳، ۱۹۷۷). در این روش، مسأله مورد بررسی به تصمیم‌های کوچک‌تر و ساده‌تر تقسیم‌بندی می‌شود و از کارشناسان خواسته می‌شود که با روش مقایسه زوجی رتبه‌بندی کنند. پیاده‌سازی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در یک تصمیم‌گیری شامل سه مرحله اصلی است:

- عواملی که در تصمیم‌گیری مهم می‌باشند به صورت سلسله‌مراتبی بیان می‌شوند.
- گزینه‌ها دو به دو با یکدیگر مقایسه می‌شوند و عددی ما بین ۱ تا ۹ تخصیص داده می‌شود (ساعتی^۴، ۱۹۸۰) (جدول ۱). اگر ترجیح عنصر A بر عنصر B برابر n باشد، ترجیح عنصر B بر عنصر A برابر ۱/n خواهد بود.

¹ UTM

² Arc Map

³ Saaty

⁴ Saaty

جدول (۱). وزن دهی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

ترجیحات	مقدار عددی
کاملاً مهم‌تر	۹
کاملاً مهم‌تر تا مهم‌تر	۸
مهم‌تر	۷
مهم‌تر تا مهم	۶
مهم	۵
مهم تا کمی مهم	۴
کمی مهم	۳
کمی مهم تا یکسان	۲
یکسان	۱

- جدولی براساس وزن تخصیص داده شده به هر عامل در مقایسه با سایر عوامل تشکیل می‌شود. نتیجه نهایی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی شامل وزن هر معیار و میزان سازگاری قضاوت‌های کارشناسان است. زمانی که کارشناسان در مورد اهمیت معیارها اطمینان ندارند یا مساله را به خوبی درک نکرده‌اند، ارجحیت‌های اعلام شده توسط آنها ممکن است استحکام کافی را نداشته باشند. حداکثر میزان ناسازگاری قابل قبول در این موارد عدد ۰/۱ است که توسط ساعتی تعیین شده است (ساعتی، ۱۹۸۰). میزان ناسازگاری با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$CR = CI / RI \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۳) RI، سازگاری محاسبه شده برای حالت اتفاقی در مورد ماتریس‌های با ابعاد مختلف است و CI با رابطه (۴) محاسبه می‌شود، که در آن $\lambda_{\max}$ بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه و n بعد ماتریس می‌باشد. اگر مقدار ناسازگاری بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد لازم است وزندهی مجدد انجام شود (ساعتی، ۱۹۸۰).

ج-۲) در این مقاله انتخاب عوامل موثر بر فرونشست با توجه به مطالعات پیشین انجام شده است. در شکل (۳) هشت لایه تهیه شده به عنوان عوامل موثر، نشان داده شده‌اند.



شکل (۳). داده‌های آماده‌سازی شده برای مدل‌سازی حساسیت به فرونشست

در این پژوهش با کمک نظرات کارشناسی، برای هر یک از کلاس‌های لایه‌های آماده‌سازی شده، عددی از ۱ تا ۵ اختصاص داده شده است. به این ترتیب که رتبه ۱ نشان‌دهنده کمترین تأثیرگذاری بر فرونشست زمین و رتبه ۵ نشان‌دهنده بیشترین تأثیرگذاری بر وقوع فرونشست در نظر گرفته شده است. در ادامه به معرفی لایه‌های آماده‌سازی شده برای مدل‌سازی حساسیت فرونشست و چگونگی رتبه‌بندی آن‌ها پرداخته می‌شود.

- کاربری زمین: برای تهیه‌ی لایه کاربری زمین، در این پژوهش از نقشه کاربری اراضی سازمان منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی استفاده شده است. رتبه‌بندی اعمال‌شده برای کلاس‌های این لایه طبق نظرات کارشناسی در جدول (الف پیوست) نشان داده شده است.

- ارتفاع: دسترسی به منابع آب‌های سطحی به ارتفاع بستگی دارد و با کاهش دسترسی به آب‌های سطحی استخراج آب-های زیرزمینی افزایش می‌یابد. همچنین جنس زمین در مناطق مرتفع سخت‌تر می‌باشد. بنابراین احتمال وقوع فرونشست کمتر خواهد بود (آیتو^۱، ۱۹۸۲). به کلاس‌هایی که ارتفاع پایین‌تری دارند، رتبه بیشتری اختصاص داده شده است (جدول ب پیوست).

- افت سطح آب زیرزمینی: این لایه با استفاده از اطلاعات سطح آب در چاه‌های پیزومتری در بازه سال ۱۳۸۷ تا سال ۱۴۰۰ شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی آماده شده است. برای تهیه لایه‌ی سطح آب‌های زیرزمینی از روش درون‌یابی معکوس وزنی فاصله^۲ استفاده شده است. برای مناطق دارای افت سطح آب زیرزمینی بیشتر، رتبه بیشتر و برای مناطق دارای افت سطح آب زیرزمینی کمتر و یا افزایش سطح آب زیرزمینی رتبه کمتر اختصاص داده شده است (جدول پ پیوست).

- شیب: لایه‌ی شیب با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری تهیه شده است. با توجه به اینکه وقوع فرونشست اغلب در سطوح دشت و شیب‌های ملایم اتفاق می‌افتد، بنابراین میزان شیب کم‌تر نشان‌دهنده احتمال وقوع فرونشست بیشتر می‌باشد. لایه شیب طبق جدول (ت پیوست) رتبه‌بندی شده است.

- جهت شیب: برای ایجاد لایه جهت شیب از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد. تحقیقات نشان می‌دهد که در نیمکره شمالی، دامنه و زمین‌های رو به جنوب و شرق بیشترین مقدار دریافت تابش خورشید را نسبت به بقیه جهات دارند، که همین مسئله باعث افزایش دما و در نتیجه کم شدن رطوبت و ضخامت خاک می‌شود. برعکس در دامنه‌های شمالی و غربی تابش خورشید کمتر بوده و آب و رطوبت تجمع بیشتری خواهد داشت. با توجه به این دلایل احتمالاً بیشترین فرونشست‌ها در مناطق مسطح و جهت شیب جنوبی و شرقی اتفاق می‌افتند. در جدول (ث پیوست) کلاس‌های لایه‌ی جهت شیب و رتبه اختصاص داده‌شده به هر یک از کلاس‌ها نشان داده شده است. با این وجود، جهت شیب تحت تاثیر عوامل دیگری قرار می‌گیرد، بنابراین این وضعیت در همه مناطق ممکن است صدق نکند، از این رو کمترین رتبه‌ها برای کلاس‌های این لایه اختصاص داده شده است (پرادهان^۳ و همکاران، ۲۰۱۴).

- زمین‌شناسی: در لایه جنس زمین‌شناسی طبق نظرات کارشناسی، در مناطق دارای رسوبات آبرفتی و پادگانه و آهک احتمال وقوع فرونشست بیشتر است. سازندهای شیل و کنگلومرا و ماسه سنگی حساسیت متوسطی نسبت به فرونشست داشته و مناطق شامل بازالت و سنگ‌های آذرین و آتشفشانی جزو مناطق سخت و حساسیت کمتر نسبت به فرونشست به شمار می‌روند. تراس‌های^۴ جوان و قدیمی سازندهای رسوبی شامل پادگانه هستند که بیشترین رتبه را به خود اختصاص داده‌اند. تراس به زمین افقی و تقریباً همواری گفته می‌شود که در کنار یک رودخانه یا لبه یک دره واقع شده باشد. همچنین جنس زمین‌شناسی نهشته (رسوبات) آبرفتی یا رودخانه‌ای اخیر، از مناطق حساس به فرونشست محسوب می‌شوند. جدول (ج پیوست) رتبه‌های اختصاص داده شده به هر یک از کلاس‌های این لایه را نشان می‌دهد.

- فاصله از رودخانه‌ها: در منطقه مورد مطالعه رودخانه‌های فصلی و دائمی وجود دارند. رودخانه‌ها و آب‌های سطحی به عنوان یکی از منابع تامین‌کننده نیازهای آبی هستند که در صورت وجود، استفاده از منابع آب زیرزمینی در منطقه کمتر خواهد شد. برای تهیه‌ی لایه‌ی فاصله از رودخانه‌ها نقشه‌ی رودخانه‌ها از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی تهیه شد. فرونشست زمین می‌تواند از ضخامت لایه آبرفتی منطقه یا لایه نفوذپذیر منطقه تبعیت کند که در کنار رودخانه‌ها ضخامت آن کم و با دور شدن از

¹ Itoh

² Inverse distance weighting (IDW)

³ Pradhan

⁴ terraces

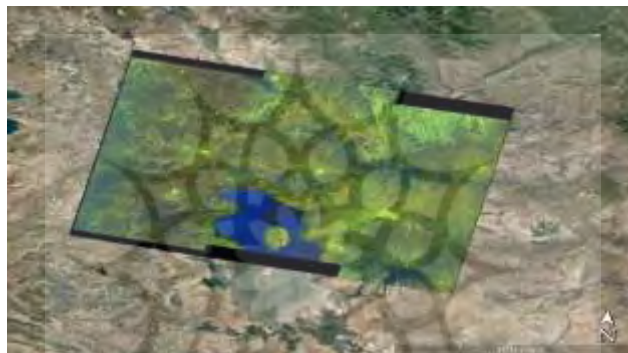
رودخانه ضخامت بیشتر و مجدداً با اتمام محدوده لایه آبرفتی ضخامت آن کم می‌شود. بر این اساس رتبه‌بندی برای کلاس‌های لایه فاصله از رودخانه‌ها انجام شده است (جدول چ پیوست).
- فاصله از گسل‌ها: جدول (ح پیوست) رتبه‌بندی انجام شده برای کلاس‌های این لایه را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا روند تهیه نقشه جابه‌جایی سطح زمین، سپس نحوه مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین و نهایتاً صحت-سنجی‌های انجام شده توضیح داده می‌شود.

الف) تعیین جابه‌جایی سطح زمین با پردازش سری زمانی خط مبنای کوتاه

- در این پژوهش تصاویر سنتینل-۱^۱ از وبسایت آلاسکا^۲ تهیه شده‌اند. پس از ثبت نام در وبسایت جهت دانلود تصاویر، محدوده‌ی مورد مطالعه معرفی شده است (شکل ۴). داده‌های سار^۳ سنجنده سنتینل-۱ برای منطقه شبستر و در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۲۱ انتخاب و دریافت شدند. بازه زمانی بین تصاویر ۲۴ روزه انتخاب شده است. اطلاعات مربوط به تصاویر مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۴). یک نمونه از تصاویر اخذ شده Sentinel-1A از محدوده مورد مطالعه

جدول (۲). مشخصات داده‌های مورد استفاده

Sentinel-1A	تصاویر مورد استفاده
اکتبر ۲۰۱۸-سپتامبر ۲۰۲۱	بازه زمانی پژوهش
۴۶	تعداد تصاویر
SLC	نوع فایل
IW	حالت تصویربرداری
~۳۶	زاویه فرود (درجه)
Descending	گذر
VV	پلاریزاسیون

با توجه به اینکه محدوده دشت شبستر بخش کوچکی از یک تصویر سنتینل-۱ را شامل می‌شود، جهت تسریع در انجام پردازش‌ها و افزایش کوه‌رنسی، بخشی از تصاویر تهیه شده که منطقه دشت شبستر در آن واقع شده است برش داده شدند.

¹ Sentinel-1A

² search.asf.alaska.edu/

³ SAR

- در ادامه انجام پردازش‌ها، از بین تصاویر موجود، تصویر اصلی با این شرط که کمترین ناهمبستگی را با سایر تصاویر داشته باشد، انتخاب می‌شود. در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط کمترین مقدار خط مبنای مکانی، زمانی و داپلر نسبت به سایر تصاویر توسط نرم‌افزار تصویر تاریخ ۲۰۲۰/۰۳/۱۳ انتخاب شد.

- تعداد ۱۴۳ تداخل‌نما برای ۴۶ تصویر، با شرط خط مبنای زمانی کمتر از ۱۰۰ روز و خط مبنای مکانی کمتر از ۱۰۰ متر ایجاد شد.

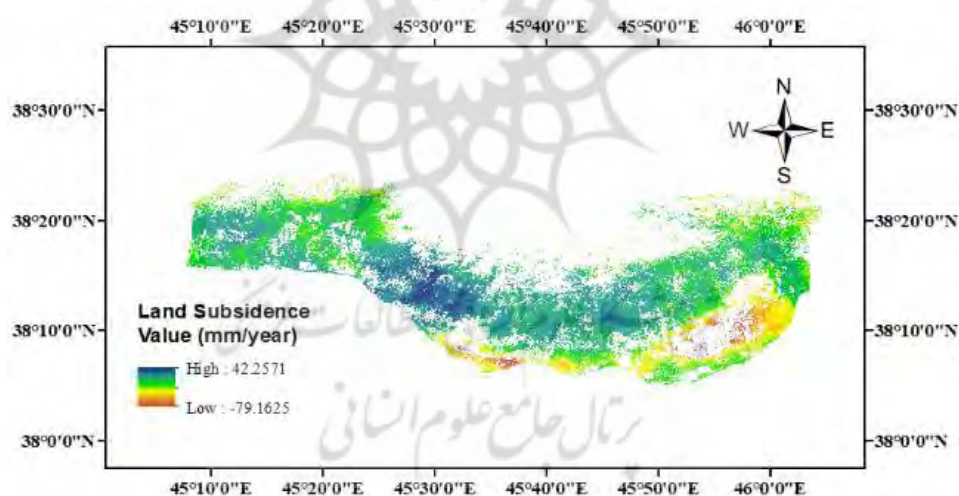
- در این پژوهش اثر زمین مسطح با استفاده از داده‌های مداری از تداخل‌نماها حذف شده است. مولفه توپوگرافی نیز با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی^۱ با قدرت تفکیک ۹۰ متری محاسبه شده و از تداخل‌نماها کم شده است که جهت تسریع در پردازش، این قدرت تفکیک مکانی انتخاب شده است.

- همچنین حذف اثر مداری با کمک اطلاعات مداری دقیق انجام گرفته است. اثر اتمسفری برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از فیلتر طول موج‌های پایین، تصحیح شد.

- برای ماسک کردن نقاط همدوسی پایین و کاهش خطای بازیابی فاز از یک فایل ماسک با میزان آستانه همدوسی ۰/۱ استفاده شد.

- در این مطالعه بازیابی فاز با نرم افزار اسنفو^۲ و با روش آستانه‌گذاری انجام شده است.

- تداخل‌نماها وارد الگوریتم کوتاه‌ترین خط مبنا شدند. خروجی نهایی مطابق شکل (۵) به دست آمد. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، بیشینه نرخ فرونشست سالانه حدود ۷۹- میلی‌متر در سال در راستای خط دید سنجنده در دشت شبستر دیده می‌شود و بیشترین فرونشست‌ها در مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی دشت رخ داده است. همچنین با توجه به نتایج مربوط به نرخ فرونشست سالانه، در بازه زمانی سه ساله مورد مطالعه، بیشینه فرونشستی حدود ۲۴ سانتی‌متر در دشت شبستر رخ داده است.



شکل (۵). نقشه جابه‌جایی به‌دست آمده با روش خط مبنای کوتاه

ب) مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین

عوامل موثر بر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی وزن‌دهی شدند. در این پژوهش مقایسه زوجی بین عوامل تاثیرگذار با استفاده از نرم‌افزار Expert choice انجام گرفت. نتیجه مقایسه‌های زوجی اهمیت معیارها و وزن نهایی تخصیص یافته برای هر معیار به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است. میزان ناسازگاری نیز برابر ۰/۰۸ به دست آمد.

¹ Digital Elevation Model

² SNAPHU

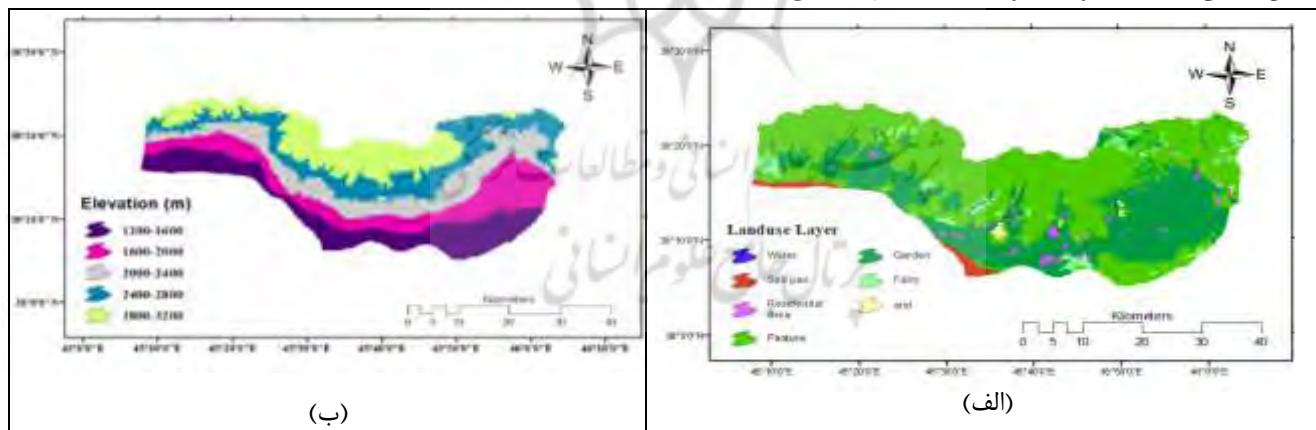
جدول (۳). مقایسه زوجی معیارهای انتخابی

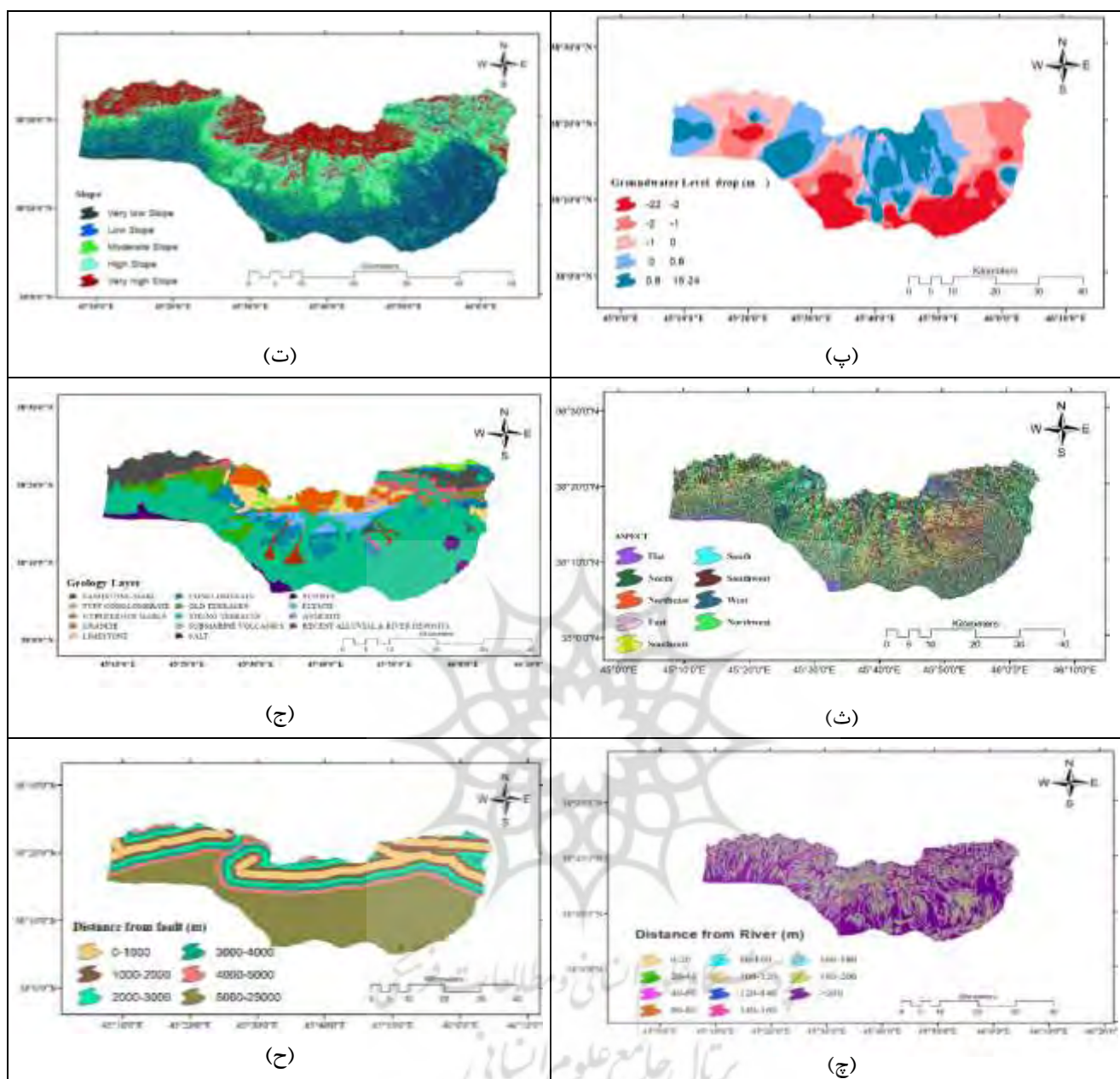
فاصله از گسل	فاصله از رودخانه	ارتفاع	شیب	زمین شناسی	سطح آب زیرزمینی	کاربری زمین	جهت شیب	
۴	۷	۷	۵	۸	۹	۸	۱	جهت شیب
۱/۸	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۲	۳	۱	۱/۸	کاربری زمین
۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۸	۱/۳	۱	۱/۳	۱/۹	سطح آب زیرزمینی
۱/۸	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۱	۳	۱/۲	۱/۸	زمین شناسی
۱/۳	۲	۲	۱	۶	۸	۵	۱/۵	شیب
۱/۴	۱	۱	۱/۲	۵	۷	۵	۱/۷	ارتفاع
۱/۴	۱	۱	۱/۲	۵	۷	۵	۱/۷	فاصله از رودخانه
۱	۴	۴	۳	۸	۸	۸	۱/۴	فاصله از گسل

جدول (۴). وزن اختصاص یافته برای عوامل موثر با روش تحلیل سلسله مراتبی

وزن (%)	عامل موثر
۲۶/۸٪	افت سطح آب زیرزمینی
۲۲/۶٪	ژئولوژی
۱۸/۷٪	کاربری زمین
۶/۶٪	ارتفاع
۶/۶٪	فاصله از رودخانه
۴/۵٪	شیب
۲/۷٪	فاصله از گسل
۱/۶٪	جهت شیب

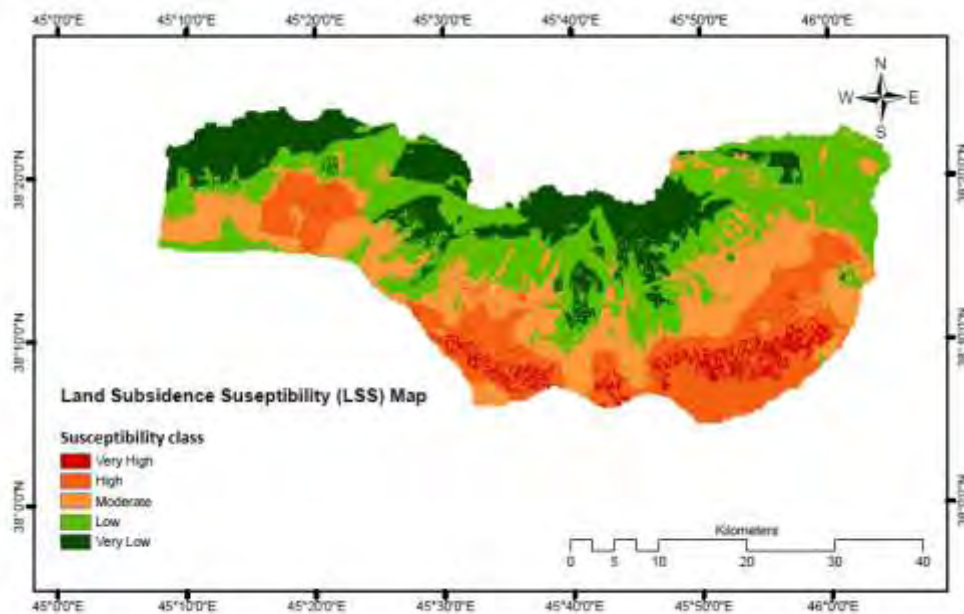
در شکل (۶) به ترتیب لایه های آماده سازی شده کاربری اراضی، ارتفاع، افت سطح آب زیرزمینی، شیب، جهت شیب، جنس زمین شناسی، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل ها نشان داده شده است.





شکل (۶). لایه‌های آماده‌سازی شده (الف) کاربری، (ب) ارتفاع، (پ) افت سطح آب زیرزمینی، (ت) شیب، (ث) جهت شیب، (ج) زمین‌شناسی، (چ) فاصله از رودخانه، (ح) فاصله از گسل

جهت مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین، تلفیق وزن‌دار لایه‌های کلاس‌بندی‌شده بر اساس وزن لایه‌ها و رتبه‌های کلاس‌های لایه‌ها (زیرمعیارها) انجام شد. هم‌پوشانی وزن‌دار روشی برای تبدیل ارزش داده‌ها در مقیاس و اندازه‌های مختلف به مقیاس واحد برای تحلیل‌های ترکیبی است. نقشه به دست آمده بعد از تلفیق وزن‌دار معیارها و زیرمعیارها در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷). نقشه حساسیت به فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه

در شکل (۷) منطقه مورد مطالعه با روش شکست طبیعی^۱ به پنج کلاس طبقه‌بندی شده است؛ در نقشه حساسیت نهایی، مناطق با بیشترین حساسیت نسبت به فرونشست یا کلاس با احتمال خطر فرونشست "خیلی زیاد" حدود ۳ درصد مساحت کل منطقه، مناطق با احتمال فرونشست "زیاد"، حدود ۲۰ درصد مساحت کل منطقه، مناطق با احتمال فرونشست "متوسط" حدود ۲۵ درصد منطقه و مناطق با احتمال فرونشست "کم" حدود ۳۳ درصد و مناطق با احتمال فرونشست "خیلی کم" حدود ۱۹ درصد مساحت کل منطقه را شامل می‌شود. در جدول (۵) مساحت هر یک از کلاس‌های حساسیت به فرونشست نشان داده شده است.

جدول (۵). مساحت هر یک از کلاس‌های نقشه حساسیت به فرونشست

کلاس حساسیت به فرونشست	مساحت (km^2)	درصد مساحت
خیلی زیاد	۶۳۹۲۰۰	۳/۳۷٪
زیاد	۳۷۹۶۰۰۰	۲۰/۰۳٪
متوسط	۴۷۳۸۰۰۰	۲۴/۹۹٪
کم	۶۲۳۰۰۰۰	۳۲/۸۷٪
خیلی کم	۳۵۵۳۲۰۰	۱۸/۷۴٪

ج) صحت‌سنجی مدل حساسیت به فرونشست

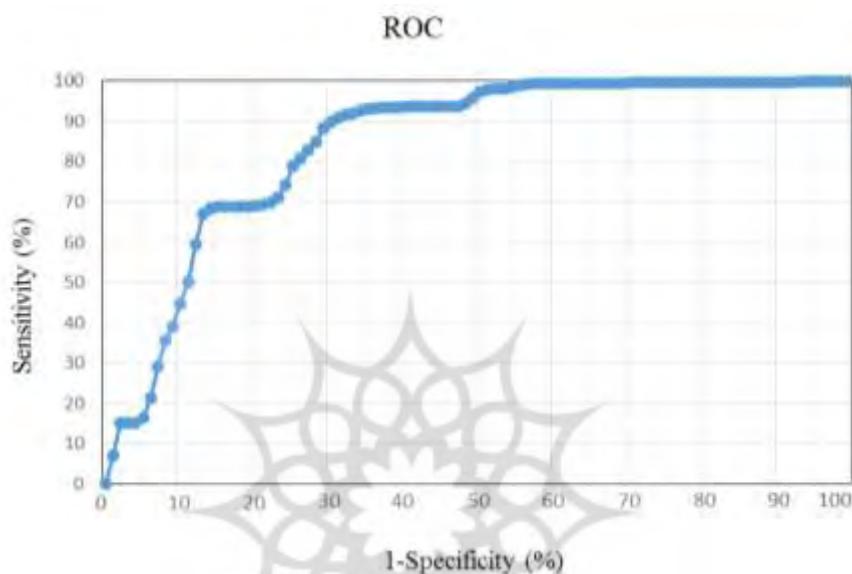
برای صحت‌سنجی حساسیت به فرونشست مدلسازی شده در این مقاله از دو روش استفاده شده است، که در ادامه توضیح داده می‌شود.

ج-۱) صحت‌سنجی با استفاده از نقشه جابه‌جایی تولید شده به روش خط مبنای کوتاه مبتنی بر تداخل سنجی راداری؛ برای این منظور ابتدا نقشه جابه‌جایی سطح زمین تهیه شده به نقشه باینری (صفر و یک) تبدیل شده است. به این ترتیب که پیکسل‌های با نرخ فرونشست بیشتر از ۴.۲۵ میلی‌متر به عنوان مناطق دارای فرونشست با ارزش یک و پیکسل‌های با نرخ

¹ Natural Breaks

فرونشست کمتر از این مقدار به عنوان پیکسل فاقد فرونشست با ارزش صفر در نظر گرفته شده است. جهت صحت‌سنجی، نقشه جابه‌جایی مذکور با نقشه حساسیت فرونشست از طریق منحنی مشخصه عملکرد سیستم به صورت کمی مقایسه شد.

سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سیستم^۱ نشان‌دهنده میزان توانایی پیش‌بینی مدل در تخمین وقوع یا عدم وقوع یک پدیده است. به طوری که هر چه سطح زیر منحنی به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد مدل ایده‌آل‌تر بوده است. عدم صحت پیش‌بینی مدل زمانی است که سطح زیر منحنی برابر ۰/۵ باشد. شکل (۸) منحنی مشخصه عملکرد سیستم حاصل را نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی در این پژوهش عدد ۰/۸۵۹۸ به دست آمد که بیان‌گر صحت خوب پیش‌بینی مدل حساسیت به فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.



شکل (۸). منحنی مشخصه عملکرد سیستم

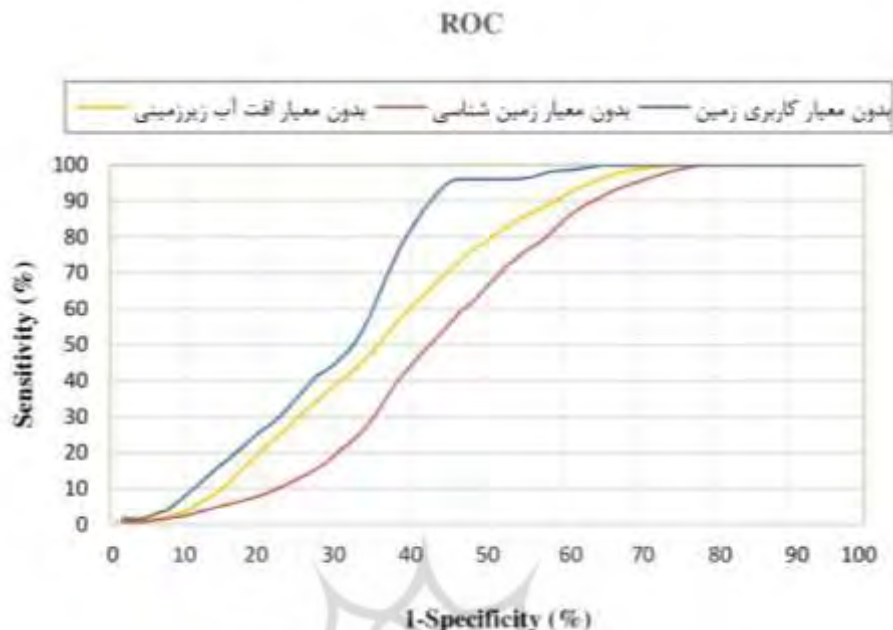
ج-۲) صحت‌سنجی استحکام مدل؛

جهت بررسی استحکام و قابلیت اعتماد مدل، از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به این که وزندهی معیارها با فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و با نظر کارشناسان انجام گرفته است، به منظور بررسی استحکام مدل، سه معیار دارای بالاترین وزن (به ترتیب افت سطح آب زیرزمینی، زمین‌شناسی و کاربری زمین) در نظر گرفته شده و هر بار یکی از معیارها حذف شدند و نقشه حساسیت فرونشست تولید شده و صحت نقشه به دست آمده تعیین شد.

نتایج ارزیابی نشان داد که با حذف معیار افت سطح آب زیرزمینی، صحت مدل (قدرت پیش‌بینی فرونشست توسط مدل) از ۸۶ درصد به ۷۲ درصد تغییر یافت. همچنین صحت مدل با حذف معیار زمین‌شناسی به ۵۶ درصد کاهش یافت. قدرت پیش‌بینی مدل بعد از حذف معیار کاربری زمین نیز به ۷۷ درصد رسید (شکل ۹). به عبارت دیگر سطح زیر منحنی بعد از حذف معیارهای پراهمیت، نشان داد که صحت مدل پیش‌بینی با حذف معیار افت سطح آب زیرزمینی، ۱۴ درصد کاهش یافته و با حذف معیار کاربری زمین، ۹ درصد کاهش داشته است. همچنین با حذف معیار زمین‌شناسی، صحت مدل ۳۰ درصد کاسته شده است. این نتایج نشان می‌دهند که هر سه معیار افت سطح آب زیرزمینی، زمین‌شناسی و کاربری زمین، اهمیت قابل توجهی در پیش‌بینی صحیح فرونشست زمین داشته‌اند، که با توجه به مدل حساسیت به فرونشست پیشنهادی، این معیارها وزن‌های بالاتر را به خود اختصاص داده بودند. ارزیابی انجام شده همچنین نشان‌دهنده اهمیت خیلی زیاد «جنس زمین‌شناسی» در پدیده فرونشست در دشت شبستر می‌باشد. به طوری که علیرغم تصویری که اغلب در مورد اهمیت بالای افت آب‌های زیرزمینی به عنوان عامل مهم

¹ Area Under Curve: AUC

وقوع فرونشست‌ها وجود دارد، نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد جنس زمین‌شناسی منطقه تأثیر بیشتری در فرونشست‌ها داشته است.



شکل (۹). منحنی‌های مشخصه عملکرد سیستم در بررسی صحت مدل

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی مبتنی بر تکنیک تداخل سنجی راداری، نقشه نرخ فرونشست دشت شبستر تهیه شد. همچنین حساسیت به فرونشست منطقه مورد مطالعه با استفاده از تحلیل‌های مکان‌مبنا مدلسازی شد. با روش ارائه شده وضعیت منطقه از نظر فرونشست‌های اتفاق افتاده با دقت بالا تعیین شد، همچنین تخمین صحیحی از احتمال وقوع این پدیده در آینده با توجه به عوامل تأثیرگذار، انجام شد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

میزان فرونشست حدود ۸ سانتی‌متر در سال، اهمیت پیش‌بینی فرونشست زمین را در دشت شبستر به خوبی نشان می‌دهد، تا برای کم کردن خسارت‌های ناشی از پدیده فرونشست در مناطق با حساسیت به فرونشست خیلی زیاد و زیاد، برنامه‌ریزی‌های بهنگام انجام شود. بر اساس نتایج حاصل از سری زمانی تداخل سنجی راداری، فرونشست زمین در مناطق جنوبی دشت شبستر بیشتر دیده شد که در نقشه حساسیت فرونشست حاصل نیز مناطق جنوبی دشت عمدتاً در کلاس‌های دارای حساسیت «خیلی زیاد» و «زیاد» نسبت به فرونشست قرار گرفتند. سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سیستم نیز توانایی خوب پیش‌بینی مدل ارائه شده در تخمین وقوع فرونشست را تأیید کرد. بر اساس وزندهی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی، از بین عوامل موثر مورد بررسی، تغییر سطح آب زیرزمینی، جنس زمین‌شناسی و کاربری زمین سه معیار با بالاترین وزن بین عوامل موثر بودند. طبق ارزیابی‌های انجام شده با استفاده از نقشه جابه‌جایی زمین نیز وجود ارتباط مستقیم و قابل توجه این عوامل با فرونشست‌های رخ داده در دشت شبستر در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ تأیید شد. نتایج به دست آمده در این پژوهش همچنین نشان می‌دهد با وجود تأثیر قابل توجه افت سطح آب زیرزمینی، جنس زمین‌شناسی تأثیر بیشتری در فرونشست‌های منطقه داشته است.

در مقایسه با تحقیق‌های قبلی در مقاله حاضر صحت سنجی نقشه حساسیت فرونشست با نقشه جابه‌جایی حاصل از تحلیل سری زمانی مبتنی بر تداخل سنجی راداری و به صورت عددی انجام شده است که در تحقیقات مشابه در این منطقه، انجام نشده بود. همچنین با توجه به این که بازه زمانی مورد مطالعه برای تعیین نرخ سالیانه فرونشست زمین در دشت شبستر با تحقیقات دیگر در

این منطقه یکسان نبود، مقایسه دقیق نتایج عددی نرخ فرونشست انجام نشده است. با این حال وجود فرونشست قابل توجه در بخش‌های جنوبی دشت و پرخطر بودن این بخش‌ها از نظر حساسیت به فرونشست، در تحقیقات مشابه نیز نشان داده شده است. این پژوهش نشان داد که تلفیق تداخل‌سنجی راداری و تحلیل‌های مکانی می‌تواند روشی کارآمد و کم‌هزینه برای ارزیابی فرونشست زمین در مناطق مستعد فرونشست می‌باشد. روش به کار رفته در این مقاله می‌تواند برای مناطق دیگری که داده‌های میدانی کافی در مورد فرونشست‌های منطقه موجود نیست و یا تهیه آن نیازمند صرف زمان یا هزینه زیادی می‌باشد مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این مطالعه می‌تواند جهت کمک به برنامه‌ریزی‌ها در جهت پیشگیری و کاهش اثرات بهنگام، به مدیران و مسئولان ذیربط کمک کند.



منابع

- 0 اصغری سراسکانرود، ص.، صفری، ش.، ملانوری، ا. (۱۴۰۲)، بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS در بخشی از شهرستان سراب، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، doi: 10.22034/gp.2023.55307.3099.
- 0 بابایی، سید ساسان. «بررسی فرونشست دشت قزوین با استفاده از تداخل سنجی راداری»، کارشناسی ارشد، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان، ۱۳۹۴.
- 0 پاپی، ر.، عطارچی، س.، سلیمانی، م. (۱۳۹۹)، تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری، جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)، ۱۰(۱)، ۱۰۹-۱۲۸.
- 0 خسروانی، ز.، اخوان قالیباف، م.، دهقانی، م.، درهمی، و.، بولک، م. (۱۴۰۱)، مدل سازی فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و هوش مصنوعی، نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۷۵(۳)، ۴۲۹-۴۴۸.
- 0 رجبی، م.، روستایی، ش.، جوادی، س. (۱۳۹۹)، ارزیابی میزان فرونشست در شهرهای غربی استان همدان با استفاده از تصاویر راداری، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۶(۸۱)، ۸۱-۹۶.
- 0 رجبی، م.، روستایی، ش.، مطاعی، س. (۱۴۰۲)، ارزیابی خطر فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، doi: 10.22034/gp.2023.55693.3111.
- 0 صدری کیا، م. (۱۴۰۱)، پایش فرونشست زمین با تحلیل سری زمانی پراکنش گرهای دائمی و تغییرات تراز آب زیرزمینی؛ (مطالعه موردی دشت سراب)، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۸(۲)، ۱-۱۸.
- 0 طاهری، زینب. «تعیین محدوده های محتمل فرونشست در آبخوان دشت شبستر با استفاده از مدل های هوش مصنوعی»، کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶.
- 0 عابدینی، م.، عبادی، ا.، قلعه، ا. (۱۴۰۰)، بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۶(۷۹)، ۲۲۰-۲۰۷.
- 0 عابدینی، موسی (۱۳۹۶). **مبانی فرونشست زمین (مخاطرات هیدروژئومورفولوژی فرونشست و مدیریت محیط)**. اردبیل: دانشگاه محقق اردبیلی.
- 0 کوه بنانی، ح.، یزدانی، م.، حسینی، س. (۱۳۹۸)، پهنه بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره گیری از تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل آباد)، مدیریت بیابان، ۷(۱۳)، ۶۵-۷۶.
- 0 مختاری، د.، ابراهیمی، ح.، سلمانی، س. (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، ۱۰(۳)، ۹۳-۱۰۵.
- مقصودی، یاسر و مهدوی، ساحل (۱۳۹۹). **مبانی سنجش از دور راداری**. تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- 0 مهرنور، ش.، رباطی، م.، خیرخواه زرکش، م.، فرساد، ف.، بیک پور، ش. (۱۴۰۱)، پهنه بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم گیری چند معیار: WOI-BWM، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴)، ۱۲۷-۱۴۸.
- 0 Arabameri, A., Lee, S., Rezaie, F., Chandra Pal, S., Asadi Nalivan, O., Saha, A., Chowdhuri, I., Moayed, H. (2021), **Performance Evaluation of GIS-Based Novel Ensemble Approaches for Land Subsidence Susceptibility Mapping**, *Frontiers in Earth Science*, 9.
- 0 Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002), **A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms**, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11): 2375-2383.

- 0 Fadhilah, M. F., Achmad, A. R., Lee, C.-W. (2020), **Integration of insar time-series data and GIS to assess land subsidence along subway lines in the Seoul metropolitan area, South Korea**, *Remote Sensing*, 12(21): 3505.
- 0 Itoh, K. (1982), **Analysis of the phase unwrapping algorithm**, *Applied optics*, 21(14), 2470-2470.
- 0 Karimzadeh, S., Matsuoka, M. (2020), **Ground Displacement in East Azerbaijan Province, Iran, Revealed by L-band and C-band InSAR Analyses**, *Sensors*, 20(23): 6913.
- 0 Poland, J. F. (1984), **Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal**, Unesco, 323 p.
- 0 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.
- 0 Saaty, T. L. (1977), **A scaling method for priorities in hierarchical structures**, *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.
- 0 Saaty, T. L. (1980), **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**, McGraw-Hill International Book Company, 287 p.
- 0 Sousa, J. J., Ruiz, A. M., Bakoň, M., Lazecky, M., Hlaváčová, I., Patrício, G., Delgado, J. M., Perissin, D. (2016), **Potential of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring**, *Procedia Computer Science*, 100: 1103-1114.

رتبه کلاس	متر(ارتفاع	ب) کلاس های ارتفاع
۵	۱۲۰۰-۱۶۰۰	خیلی کم
۳	۱۶۰۰-۲۰۰۰	کم
۱	۲۰۰۰-۲۴۰۰	متوسط
۱	۲۴۰۰-۲۸۰۰	زیاد
۱	۲۸۰۰-۳۲۰۰	خیلی زیاد

پیوست

جداول کلاس‌بندی و رتبه‌بندی هر یک از عوامل موثر

رتبه کلاس ها	الف) کلاس های کاربری زمین
۱	مرتج
۲	مزارع دیم
۵	باغ
۱	بایر
۳	منطقه مسکونی
۲	مناطق آبی
۱	نمک
رتبه کلاس	ج) کلاس های جنس زمین شناسی
۱	Sandstone-Marl
۲	Tuff Conglomeate
۲	Gypsiferous Marls
۱	Granite
۲	Limestone
۳	Conglomerate
۳	Old Terraces
۵	Young Terraces
۱	Submarine Volcanics
۱	Salt
۱	Schists

۳	Flysch
۱	Andesite
۵	Recent Alluvial & River Deposits
رتبه کلاس	چ) کلاس‌های فاصله از رودخانه (متر)
۱	۰-۲۰
۱	۲۰-۴۰
۱	۴۰-۶۰
۲	۶۰-۸۰
۲	۸۰-۱۰۰
۳	۱۰۰-۱۲۰
۳	۱۲۰-۱۴۰
۲	۱۴۰-۱۶۰
۱	۱۶۰-۱۸۰
۱	۱۸۰-۲۰۰
۱	۲۰۰ <
رتبه کلاس	ح) کلاس‌های فاصله از گسل (متر)
۱	۰-۱۰۰۰
۱	۱۰۰۰-۲۰۰۰
۱	۲۰۰۰-۳۰۰۰
۱	۳۰۰۰-۴۰۰۰
۲	۴۰۰۰-۵۰۰۰
۵	۲۵۰۰۰ <
رتبه کلاس	ت) کلاس‌های شیب
۵	خیلی کم
۳	کم
۱	متوسط
۱	زیاد
۱	خیلی زیاد
رتبه کلاس	پ) کلاس‌های افت آب زیرزمینی (متر)
۵	-۲۲ - -۲
۳	-۲ - -۱
۲	-۱ - ۰
۲	۰ - ۰/۸
۱	۰/۸ - ۱۵/۲۴
رتبه کلاس	ث) کلاس‌های جهت شیب
۱	مسطح
۱	شمال
۱	شمال شرقی
۱	شرق
۲	جنوب شرقی
۲	جنوب
۱	جنوب غربی
۱	غرب
۱	شمال غربی