



Modeling uncertainty of land subsidence susceptibility assessment, using Dempster-Shafer evidence theory

Mansoureh Sadrykia¹ , Ahmad Shamkahrizi² 

1. (Corresponding Author) Geomatics Engineering Department, Faculty of civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: m.sadrykia@tabrizu.ac.ir

2. Geomatics Engineering Department, Faculty of civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: ahmadkahrizi0300@gmail.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

7 Jan 2026

Received in revised form:

7 May 2026

Accepted:

14 May 2026

pp. 54-71

Keywords:

Evidence theory,
Shabestar Plain,
Dempster-Shafer,
Uncertainty,
Land subsidence.

ABSTRACT

Land subsidence occurs naturally and as a result of human activities. One of the consequences of land subsidence is damage to infrastructure structures and agricultural lands. Given that land subsidence is often not detectable before damages occur, it is essential to accurately predict and identify areas prone to subsidence before the hazard occurs. Modeling land subsidence susceptibility of Shabestar Plain, one of the high-risk plains of East Azerbaijan Province, using Dempster-Shafer evidence theory. Eight factors affecting land subsidence were selected. Using the land subsidence inventory map and the Dempster-Shafer evidence theory, the degree of belief, disbelief, and uncertainty of land subsidence occurrence are determined, and finally a zoning map of land subsidence susceptibility is prepared. The southern part of Shabestar Plain is very sensitive to land subsidence. The percentage of areas with "very low", "low", "medium", "high" and "very high" sensitivity to subsidence is 41.86, 26.8, 24.72, 4.6 and 2.02, respectively. Model evaluation showed that the presented method for predicting land subsidence sensitivity is efficient. In addition to modeling the sensitivity to land subsidence, the presented method also provides the uncertainty range of the estimates, which leads to greater reliability of the results compared to other methods such as machine learning methods or neural networks. This method can be used for more timely and accurate decision-making and, as a result, appropriate measures in the prevention and mitigation phases both in the study area and other subsidence-prone areas.

Cite this article: Sadrykia, M. and Shamkahrizi, A. (2026). Modeling uncertainty of land subsidence susceptibility assessment, using Dempster-Shafer evidence theory. *Quantitative Geomorphological Research*, 15(1). 54-71.

Doi: [10.22034/gmpj.2026.570434.1598](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.570434.1598)

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence refers to the vertical, downward movement of the Earth's surface. This phenomenon can occur naturally or as a result of human activities. The consequences of subsidence, could damage existing infrastructure such as road networks, facilities, buildings, and even agricultural lands. Land subsidence is not always visible, especially in the early stages. For this reason, it is essential to identify and identify areas prone to subsidence before they endanger lives and the environment.

In Iran, due to the lack of rainfall in the past few years in order to supply the water needed in the agricultural, industrial, and drinking water sectors, water withdrawal from underground aquifers has increased, which has led to the depletion of groundwater resources and soil loosening, resulting in land subsidence. This phenomenon has occurred as a serious crisis in many fertile plains of Iran in recent years. In this study, Shabestar Plain, as one of the high-risk plains of East Azerbaijan Province, has been selected as the study area. Dempster-Shafer evidence theory has been used as a statistical method to determine the sensitivity to land subsidence in the Shabestar Plain. In most relevant research, only the probability of land subsidence occurrence has been obtained. However, appropriate and more accurate decision-makings require that in addition to the estimated probabilities, the uncertainties of the estimates is also provided.

Methodology

Dempster-Shafer evidence theory is a mathematical framework for modeling uncertainty while combining evidence from different sources. It was introduced by Dempster in 1967, and its mathematical structure was further developed by Shafer in 1976. This theory is based on the belief that results from evidence and is useful in situations where data is incomplete or ambiguous helping make better decisions. Shabestar Plain is one of the important and at risk plains of East Azarbaijan which has been selected as study area. Eight spatial

data layers as land subsidence influencing factors were gathered, including groundwater level, geology, slope, elevation, distance from faults, distance from rivers, aspect, and land use. Relevant raster maps of each factor were generated with pixel size of 20×20 meters. In the next step, using the Dempster-Shafer theory, the data were combined and study area susceptibility to land subsidence was prepared. The general steps of conducting this study include:

- selecting a set of influencing factors and preparing related maps
- gathering land subsidence inventory map of the study area
- combining input data using evidence theory to prepare 'belief', 'disbelief', and 'uncertainty' maps
- Producing land subsidence susceptibility map for the study area
- Validating results using independent data

Results and discussion

The produced maps; belief, disbelief and uncertainty were classified into five classes. The belief map indicates the five degrees of belief to which each region on the map has priority for mitigation and preparedness programs. The disbelief map indicates the five degrees to which each region of the map has not priority for mitigation and preparedness programs. The uncertainty map shows the degree of uncertainty whether each of the regions on the map have priority for mitigation and preparedness programs or not. The final land subsidence susceptibility map was classified into five subsidence susceptibility classes: "very low", "low", "medium", "high", and "very high". It was shown that the southern part of the Shabestar Plain is highly susceptible to land subsidence, which needs to be considered by authorities and regional managers.

To examine the accuracy of the prediction results using the Dempster-Shafer method, five piezometric wells of the study area, which field observations reported land subsidence occurrence for them, were selected. The subsidence rate of the selected points were calculated using the Shabestar Plain subsidence inventory map by utilizing GIS analyses tools. We compared

subsidence rates of the points with the predicted land subsidence susceptibility classes. The results confirmed a very good agreement between the predictions made by the proposed Dempster-Shafer model and the subsidence rates obtained from the radar interferometry method.

Conclusion

Dempster-Shafer evidence theory presents the degree of belief, disbelief and uncertainty, beside the prediction results. This ability is not supported with other common prediction methods such as machine learning or artificial neural networks. In this paper using Dempster-Shafer theory, we obtained maps of belief, disbelief and uncertainty of land subsidence susceptibility, as well as a land subsidence susceptibility map based on the provided belief, disbelief and uncertainty. The zoning map was classified into five categories using quantile method. The area belonging to the "very low" susceptibility was 41.86 % of the total area of the Shabestar Plain, which has the largest area among other classes of land subsidence susceptibility. The classes of "low", "medium", "high" and "very high" land subsidence susceptibility covered 26.8 %, 24.72 %, 4.6 % and 2.02 % of the whole study area respectively. The results also showed that the southern part of the study area is very sensitive to land subsidence. In this study, an existing land subsidence inventory map was used to validate land subsidence sensitivity modeling. It was shown that the method used for modeling land subsidence susceptibility had good predictive power. Therefore it can be concluded that the introduced model can provide reliable land subsidence predictions of areas at risk and can be utilized in other study areas as well. The results can help urban authorities with proper planning for construction developments in time to prevent and/or reduce damages caused by land subsidence.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Mansoureh Sadrykia: Supervision, Software, Conceptualization, Control, Manuscript editing.
Ahmad Shamkahrizi: Analysis and investigation, Original draft preparation.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

مدلسازی عدم قطعیت در ارزیابی حساسیت به فرونشست زمین با استفاده از تئوری شواهد دمپستر شافر

منصوره صدری کیا^۱✉، احمد شام کهریزی^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه m.sadrykia@tabrizu.ac.ir

۲- گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه ahmadkahrizi0300@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴	
صص: ۵۴-۷۱	
واژگان کلیدی: تئوری شواهد، دشت شبستر دمپستر- شافر، عدم قطعیت، فرونشست زمین.	فرونشست زمین به صورت طبیعی و نیز در اثر فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد. از پیامدهای فرونشست زمین، خسارت به ساختارهای زیربنایی و زمین‌های کشاورزی می‌باشد. با توجه به این‌که فرونشست زمین معمولاً پیش از وقوع خسارت‌های آن قابل تشخیص نیست، پیش‌بینی و نمایان‌سازی دقیق نواحی دارای حساسیت به فرونشست قبل از ایجاد مخاطره امری ضروری است. مدلسازی حساسیت به فرونشست زمین با استفاده از تئوری شواهد دمپستر-شافر در دشت شبستر، یکی از دشت‌های پرخطر استان آذربایجان شرقی می‌باشد. هشت عامل موثر بر فرونشست انتخاب می‌شوند. با استفاده از نقشه موجودی فرونشست زمین و تئوری شواهد دمپستر-شافر، میزان باور، عدم باور و نایقینی وقوع فرونشست و نهایتاً نقشه پهنه‌بندی تهیه می‌شود. قسمت جنوبی دشت شبستر دارای حساسیت بسیار زیاد نسبت به فرونشست زمین می‌باشد. درصد مساحت مناطق با حساسیت «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» فرونشست به ترتیب ۴۱/۸۶، ۲۶/۸، ۲۴/۷۲، ۴/۶ و ۲/۰۲ به دست آمدند. ارزیابی مدل نشان داد که روش مورد استفاده کارایی خوبی در پیش‌بینی حساسیت به فرونشست زمین داشته است. در این روش علاوه بر مدلسازی حساسیت به فرونشست زمین، دامنه عدم قطعیت برآوردها نیز ارائه شد که منجر به اعتمادپذیری بیشتر نتایج در مقایسه با روش‌های دیگر نظیر روش‌های یادگیری ماشین یا شبکه‌های عصبی می‌شود. این روش می‌تواند در جهت تصمیم‌گیری‌های بهنگام و دقیق‌تر و در نتیجه اقدامات مناسب در مرحله پیشگیری و کاهش اثرات در منطقه مورد مطالعه و نیز سایر مناطق مستعد فرونشست به کار رود.
استناد: صدری کیا، منصوره و شام کهریزی، احمد. (۱۴۰۵). مدلسازی عدم قطعیت در ارزیابی حساسیت به فرونشست زمین با استفاده از تئوری شواهد دمپستر شافر. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۵(۱)، ۵۴-۷۱.	

مقدمه

مخاطرات طبیعی از جمله عواملی هستند که سالیانه باعث ایجاد خسارت های جانی و مالی در بیشتر مناطق جهان از جمله ایران می شوند. تقریباً ۱۵۰ شهر در سراسر جهان فرونشست زمین را با نرخ ده ها سانتی متر در سال تجربه کرده اند (چن و همکاران، ۲۰۱۷). طبق تعریف سازمان زمین شناسی ایالات متحده^۱، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست تدریجی و رو به پایین سطح زمین است که می تواند دارای بردار جابجایی افقی اندک باشد که به خاطر تغییرات استرس خاک می باشد (آدیامن^۲، ۲۰۱۲). فرونشست زمین یک پدیده برگشت ناپذیر است. وقتی خطر فرونشست زمین جدی باشد، مجموعه ای از بحران های زمین شناسی زیست محیطی را ایجاد می کند و زنجیره ای از بحران های طبیعی شکل می گیرد (چو و همکاران، ۲۰۱۹). این حرکت ناگهانی یا تدریجی زمانی اتفاق می افتد که لایه های زیرزمینی نتوانند در برابر فشار لایه های بالایی مقاومت کنند (قربان زاده و همکاران، ۲۰۱۸). فرونشست زمین ممکن است به صورت طبیعی بر اثر عواملی نظیر زلزله یا فرسایش زمین و نیز در اثر فعالیت های انسانی مانند پمپاژ آب، استخراج نفت و گاز یا معدن کاری رخ دهد. خسارت ناشی از فرونشست معمولاً ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب می باشد نظیر تخریب سازه های مهندسی، ایجاد شکاف در ساختمان ها، تخریب سیستم های آبیاری، شکستگی خطوط لوله زیرزمینی، تخریب خاک های حاصل خیز کشاورزی و مرگ تدریجی آبخوان های آبرفتی. رخداد فرونشست در چند سال اخیر به عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشت های حاصل خیز ایران اتفاق افتاده و نگرانی های قابل توجهی را به وجود آورده است. در ایران به دلیل کمبود بارندگی در طول چند سال گذشته و کاهش آب پشت سدها، برداشت آب از سفره های زیرزمینی افزایش یافته است که منجر به از بین رفتن منابع آب زیرزمینی و سست شدن خاک و فرونشست زمین شده است (عباس نژاد و همکاران، ۲۰۱۶). برخلاف فرونشست ناشی از عوامل طبیعی که اغلب به صورت تدریجی و در مدت زمان طولانی رخ می دهد و اثرات ناشی از آن چندان خطر جدی محسوب نمی شوند، فرونشست ایجاد شده تحت تاثیر عوامل انسانی معمولاً به صورت ناگهانی رخ داده و در مدت زمان کمتر، اثرات زیان باری به جای می گذارند. خسارات قابل توجه ناشی از فرونشست زمین اهمیت مطالعات فرونشست قبل از وقوع این پدیده را آشکار می کند تا اقدامات پیشگیرانه و به موقع جهت بهره برداری و توسعه دشت ها در آینده امکان پذیر شود (حصارکی زاد و همکاران، ۱۴۰۳).

مطالعات مربوط به فرونشست را می توان به سه دسته کلی تقسیم بندی نمود: الف) مطالعات برای شناسایی محدوده و نرخ فرونشست که با روش های ترازبایی دقیق، استفاده از سامانه های تعیین موقعیت مکانی یا تداخل سنجی راداری انجام می شوند. ب) شناسایی عواملی که سبب فرونشست شده اند. بطور کلی در مناطقی که فرونشست رخ می دهد یک یا چند عامل نقش اساسی دارند که هدف این مطالعات شناسایی مهم ترین عوامل مؤثر در وقوع پدیده فرونشست می باشد. ج) مدل سازی حساسیت به فرونشست به منظور ارائه راهکارهای مناسب جهت کاهش میزان فرونشست و پیشگیری از خسارات ناشی از آن. برای این منظور لازم است نقشه های پتانسیل فرونشست با دقت و صحت بالا تهیه گردند. برای مدل سازی و تهیه نقشه های حساسیت فرونشست زمین تاکنون روش های آماری، الگوریتم های یادگیری ماشین و نیز شبکه های عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفته اند (صدری کیا و شام کهریزی، ۱۴۰۳؛ قربان زاده و همکاران، ۲۰۱۸).

در ادامه برخی از تحقیقات که به بررسی و مدل سازی پدیده فرونشست زمین با روش های آماری و یادگیری ماشین پرداخته اند

¹ USGS: United States Geological Survey

² Adyaman

معرفی می‌شوند؛

چن و همکاران (۲۰۲۵) ارزیابی حساسیت فرونشست زمین در منطقه شیان چین، را با ادغام تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری و روش‌های یادگیری ماشین انجام داده‌اند. در این مطالعه، چهار مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی MLP، Extra Tree و Ada Boost برای پیش‌بینی و ارزیابی حساسیت فرونشست زمین به کار برده شده است. نتایج نشان داده است که قابلیت اطمینان مدل RF بهتر از سایر مدل‌ها بوده است. سپس، نقشه حساسیت فرونشست را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و با ترکیب چند عامل مؤثر به دست آورده‌اند. اصغری و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده از دو الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره به نام‌های ماباک (MABAC) و کوداس (CODAS) و با در نظر گرفتن ۸ عامل مؤثر، به پهنه‌بندی حساسیت به فرونشست زمین در استان البرز پرداخته‌اند. به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ماباک صحت بهتری نسبت به الگوریتم کوداس در پیش‌بینی فرونشست منطقه مورد مطالعه داشته است. لی و همکاران (۲۰۲۳) از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری کوتاه‌ترین خط مبنا (SBAS-InSAR) و پراکنش‌گرهای دائمی (PS-InSAR) برای پایش فرونشست زمین استفاده کردند. در نهایت با ترکیب عوامل مؤثر بر فرونشست زمین و چهار روش یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان (SVM)، درخت تصمیم‌گیری گزاردیان‌افزا (GBDT)، جنگل تصادفی (RF) و درختان به‌شدت تصادفی (ERT) مدل‌های ارزیابی حساسیت فرونشست زمین را برای شهرستان دچنگ در چین ارائه نمودند. روستایی و همکاران (۱۴۰۳) مناطق مستعد فرونشست زمین را با فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در دشت شبستر-صوفیان مدل‌سازی نمودند. در این پژوهش ۷ عامل به عنوان عوامل مؤثر اصلی فرونشست تعیین شده و نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرونشست زمین تهیه شده است. اطهری و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و رگرسیون درجه ۳ و استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به بررسی میزان حرکت عمودی سطح زمین در دشت ورامین بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ پرداختند. در این تحقیق تصاویر SAR ماهواره Sentinel-1 به صورت بالاکدر مورد استفاده قرار گرفت و نشان داده شد که مدل رگرسیون خطی، دارای قدرت پیش‌بینی مطلوب‌تری نسبت به مدل رگرسیون درجه ۳ بوده است. پرادان^۱ و همکاران (۲۰۱۴) حساسیت به فرونشست زمین در دره کیتا مالزی را با استفاده از مدل‌های شواهد و نسبت فراوانی ارزیابی کردند. در این تحقیق ۱۱ عامل به عنوان عوامل تاثیرگذار در فرونشست زمین در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل شواهد، پیش‌بینی بهتری نسبت به روش نسبت فراوانی داشته است.

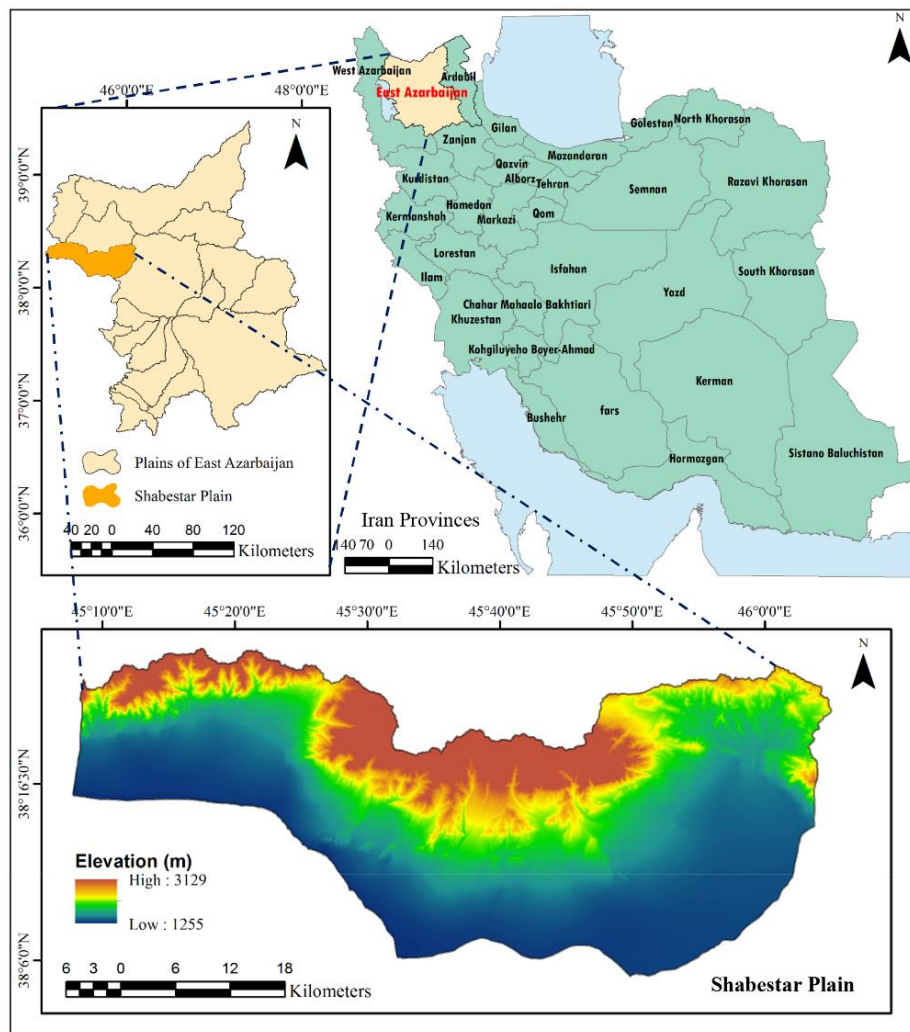
همان‌گونه که گفته شد در چند سال اخیر پدیده فرونشست به عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشت‌های حاصل‌خیز ایران اتفاق افتاده است و نگرانی‌های قابل‌توجهی را به‌وجود آورده است. برای پیش‌بینی وقوع این پدیده و شناسایی و پهنه‌بندی مناطق در معرض خطر فرونشست، نقشه‌های حساسیت به فرونشست زمین تهیه می‌شوند. برای تولید نقشه حساسیت فرونشست زمین، در تحقیقات قبلی از روش‌های مختلف آماری استفاده شده است و اخیراً هم برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها، مدل‌های یادگیری ماشین به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. لیکن در روش‌های یاد شده امکان مدل‌سازی عدم قطعیت پیش‌بینی‌های انجام شده وجود ندارد. در تحقیق حاضر استفاده از تئوری شواهد دمپستر شافر به عنوان یک روش پیشرفته که در دسته تحلیل‌های آماری چند متغیره قرار می‌گیرد و قابلیت مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها را نیز دارد، برای ارزیابی حساسیت به فرونشست زمین ارائه شده است. در مقاله حاضر حساسیت به فرونشست در دشت شبستر، یکی از دشت‌های مهم و پرخطر آذربایجان شرقی، با استفاده از تئوری شواهد دمپستر شافر پهنه‌بندی می‌شود و عدم قطعیت‌های مدل نیز تعیین و به صورت مکانی بر روی نقشه نمایش داده می‌شوند. نتایج ارزیابی حساسیت به فرونشست زمین با استفاده از نقشه موجود نرخ فرونشست دشت شبستر، تهیه شده با تکنیک کوتاه‌ترین خط مبنای تداخل‌سنجی راداری^۲، به صورت کمی اعتبارسنجی می‌شوند.

¹Pradhan

² SBAS: Small Baseline Subset

مواد و روش ها

دشت شبستر از مهم ترین دشت های استان آذربایجان شرقی با کاربری عمده ی کشاورزی، واقع در شمال غربی استان آذربایجان شرقی در موقعیت ۳۸ درجه، ۴ دقیقه و ۴۸ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه، ۱۷ دقیقه و ۳۱ ثانیه شرقی در ارتفاع حدود ۱۴۰۰ متری از سطح دریا در ۶۰ کیلومتری غرب شهرستان تبریز واقع شده است. وسعت آن ۱۲۹۳ کیلومترمربع است. میانگین بارش سالیانه دشت شبستر حدود ۳۰۰ میلیمتر و میانگین دمای سالیانه دشت در حدود ۱۱ درجه سانتیگراد است. این محدوده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار گرفته است که بخشی از پهنه زمین ساخت البرز غربی - آذربایجان است. قدیمی ترین واحد چینه شناسی آن مربوط به پرکامبرین (سازند کهر) است و عمده ترین عناصر ساختاری، گسل ها و درزها هستند. چهار حوضه آبخیز شامل صوفیان چای، علی چای، سیس و دریان چای نقش موثری در تغییرات ژئومورفولوژی این منطقه دارند. دشت شبستر در سال های اخیر به علت برداشت زیاد آب های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه شده است و فرونشست زمین یکی از مشکلات زیست محیطی مهم این منطقه است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی دشت شبستر را نشان می دهد.



شکل ۱- موقعیت مکانی دشت شبستر

تعیین عوامل موثر بر وقوع فرونشست و تهیه لایه‌های مورد نیاز

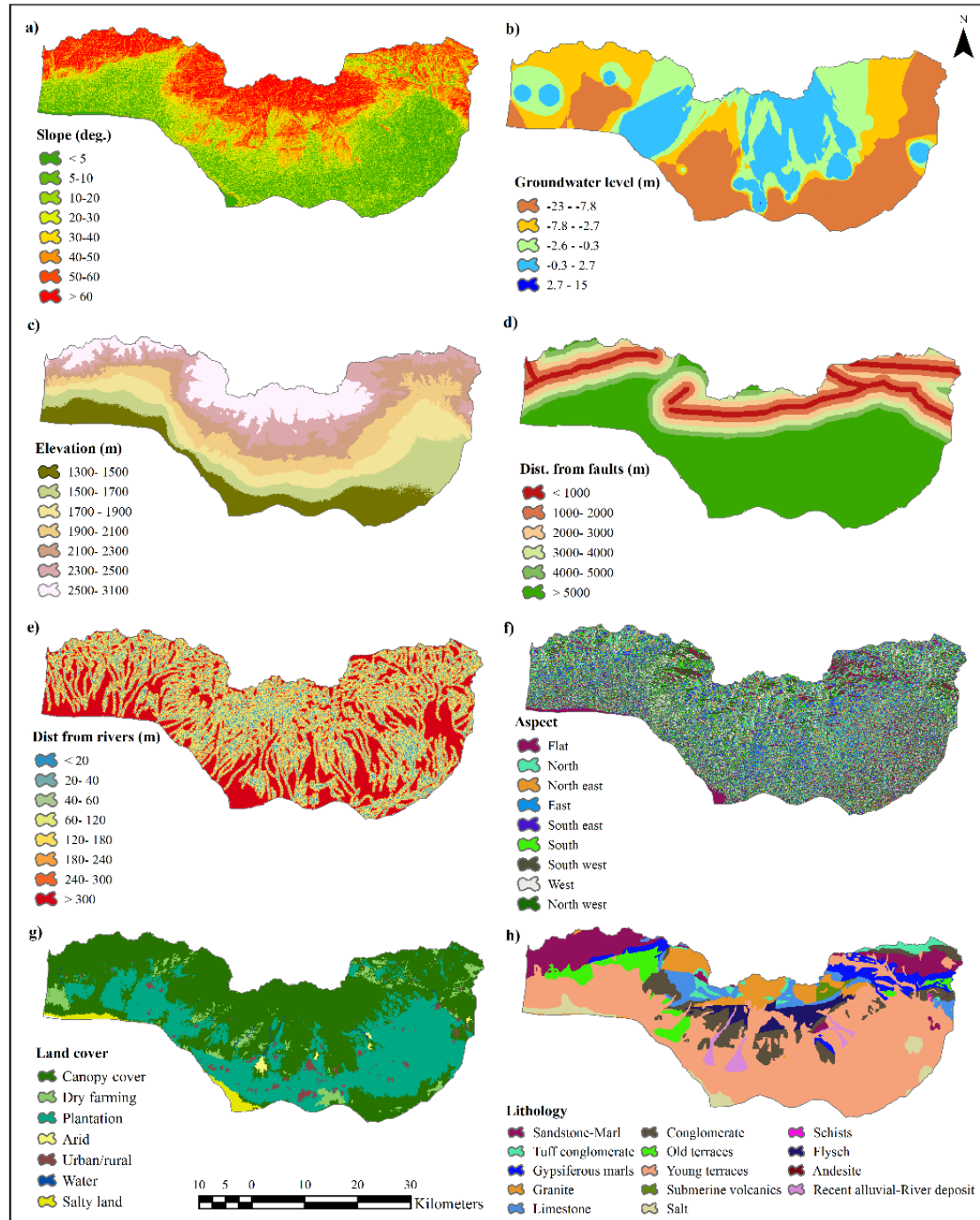
اولین مرحله در پیش‌بینی و پهنه‌بندی خطر فرونشست، شناخت و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به عوامل موثر می‌باشد. در این پژوهش با بررسی عوامل تاثیرگذار معرفی شده در تحقیقات پیشین و در نظر گرفتن امکان دسترسی به داده‌ها، تعداد هشت لایه مکانی به عنوان عوامل موثر بر وقوع فرونشست دشت شبستر انتخاب شدند که شامل سطح آب‌های زیرزمینی، جنس زمین‌شناسی، شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، جهت شیب و کاربری اراضی می‌باشند. نقشه‌های رستری مربوط به هر عامل برای منطقه مورد مطالعه با ابعاد پیکسل ۲۰ متر در ۲۰ متر آماده‌سازی شده و در مرحله بعدی با استفاده از تئوری دمپستر شافر، نقشه حساسیت به فرونشست دشت شبستر تهیه می‌شود. نقشه‌های مورد استفاده در ادامه این بخش معرفی می‌شوند.

جهت ایجاد نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی استفاده شد. بیشترین مساحت منطقه را زمین‌های با شیب کم تشکیل می‌دهد که فرونشست‌های منطقه عمدتاً در این بخش‌ها رخ داده است. شکل (۲-۱) نقشه آماده‌سازی شده شیب و طبقه‌بندی انجام‌شده برای آن را نشان می‌دهد. در ایران با توجه به بارندگی نامناسب، وقوع خشکسالی‌های درازمدت و کمبود رودخانه‌های دائمی بیش از ۹۰ درصد نیاز آبی از طریق سفره‌های آب زیرزمینی تامین می‌گردد. با رشد روزافزون جمعیت و توسعه کشاورزی و صنعت بهره‌برداری از این منابع تشدید شده که این امر باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی شده است. در نتیجه سفره آب زیرزمینی از حالت دینامیک خارج شده و دشت مورد نظر مستعد وقوع فرونشست زمین خواهد بود. در این تحقیق نقشه سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های چاه‌های پی‌زومتری و با روش درونیابی^۱ تهیه شده است. این روش با توجه به سادگی آن در مقایسه با روش‌های ژئواستاتیکی مانند کریجینگ، انتخاب شده است. شکل (۲-۲) نقشه آماده‌سازی شده سطح آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. ارتفاع زمین یکی دیگر از عوامل موثر بر وقوع فرونشست می‌باشد. شکل (۲-۳) چگونگی طبقه‌بندی نقشه ارتفاع در این تحقیق را نشان می‌دهد. فاصله از گسل به عنوان یکی دیگر از عوامل موثر بر فرونشست در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. نقشه فاصله از گسل که از نقشه گسل‌های فعال منطقه استخراج شده است در شکل (۲-۴) نمایش داده شده است. رودخانه‌ها از منابع آب‌های سطحی هستند که در تعدیل سفره‌های آب زیرزمینی و در نتیجه فرونشست زمین نقش موثری دارند. شکل (۲-۵) نقشه آماده‌سازی شده فاصله از رودخانه و طبقه‌بندی آن را نشان می‌دهد. جهت شیب با عواملی از قبیل میزان دریافت نور خورشید، بادهای خشک‌کننده و بارندگی (درجه اشباع) در ارتباط است که می‌تواند بر وقوع فرونشست تاثیر بگذارد. جهت شیب می‌تواند منعکس‌کننده میزان پوشش گیاهی و رطوبت خاک باشد که به نوبه خود می‌تواند در مقاومت خاک و حساسیت به فرونشست موثر باشند. شکل (۲-۶) نقشه آماده‌سازی شده جهت شیب را نشان می‌دهد. کاربری‌های زمین یا نحوه استفاده از زمین و فعالیت‌های استقرار یافته در آن اثرات مختلفی بر وقوع فرونشست زمین دارند. به عنوان مثال، در محلی با کاربری کشاورزی، (منافی آذر و همکاران، ۱۳۹۷). شکل (۲-۷) نقشه آماده‌سازی شده کاربری اراضی در این تحقیق را نشان می‌دهد. زمین‌شناسی یکی از عوامل مهم در مطالعات فرونشست می‌باشد، چون واحدهای زمین‌شناسی مختلف درجه حساسیت متفاوتی نسبت به وقوع فرونشست دارند و تغییرات سنگ‌شناسی منجر به تفاوت در مقاومت و نفوذپذیری سنگ‌ها و خاک‌ها می‌شود. نقشه جنس زمین‌شناسی منطقه که از نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است در شکل (۲-۸) نشان داده شده است.

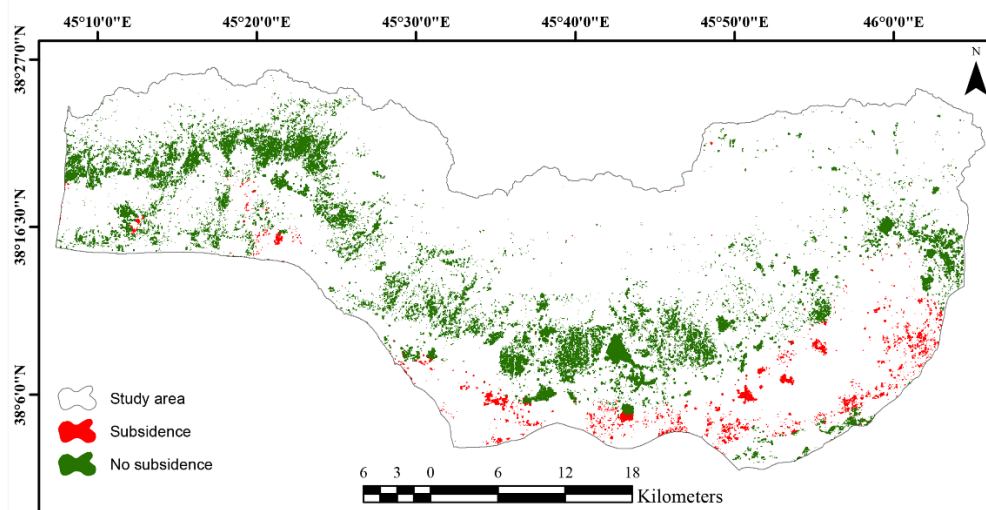
برای آموزش مدل و صحت‌سنجی نتایج، نقشه موجودی فرونشست که صدری‌کیا و کاظمی‌پور (۱۴۰۳) با روش تداخل-سنجی راداری و بر اساس الگوریتم کوتاه‌ترین خط مبنا برای تصاویر SAR، در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ تهیه نموده بودند، استفاده شده است. در نقشه مبنای مورد استفاده نقاط دارای نرخ فرونشست بیش از ۳/۵- میلی‌متر جابه‌جایی سالانه در

¹ Inverse Distance Weighting

جهت قائم به عنوان نقاط دارای فرونشست و کمتر از این میزان به عنوان نقاط فاقد فرونشست زمین در نظر گرفته شده‌اند. نقشه موجودی فرونشست مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲- نقشه‌های عوامل موثر بر فرونشست



شکل ۳- نقشه موجودی فرونشست زمین در دشت شبستر (منبع: صدری کیا و کاظمی پور (۱۴۰۳))

روش پژوهش

تاکنون روش‌های زیادی برای پهنه‌بندی انواع فرونشست ارائه شده است که در دو دسته اصلی روش‌های کیفی و کمی قابل تقسیم‌بندی هستند. در روش‌های کیفی عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست به صورت موضوعی و توصیفی مورد توجه قرار می‌گیرند. در این روش‌ها، بر اساس قضاوت کارشناسان به ارزیابی خطر فرونشست پرداخته می‌شود. در روش‌های کمی، نظر متخصصین کمتر دخالت داده می‌شود و تاکید بیشتر بر روی مقادیر عددی حاصل از تجزیه و تحلیل لایه‌های داده‌ای می‌باشد. تئوری شواهد یکی از روش‌های کمی در این زمینه می‌باشد.

تئوری شواهد دمپستر شافر

تئوری شواهد دمپستر شافر که به آن تئوری توابع باور نیز گفته می‌شود، یک چارچوب ریاضی برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ترکیب شواهد از منابع مختلف است که توسط دمپستر^۱ (۱۹۶۷) معرفی شده است و در ادامه ساختار ریاضی آن توسط شافر^۲ (۱۹۷۶) بسط داده شده است. این تئوری براساس باوری است که از شواهد نتیجه می‌شود و در شرایطی که داده‌ها ناقص یا مبهم هستند، مفید است و می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهتر کمک کند.

تئوری احتمال و تئوری دمپستر شافر هر دو برای مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده می‌شوند، اما تفاوت‌های مهمی دارند. تئوری احتمال به بررسی و مدل‌سازی احتمال وقوع رویدادها می‌پردازد، مجموع احتمال‌های وقوع و عدم وقوع یک پدیده همیشه برابر با یک (یا ۱۰۰ درصد) است. در تئوری احتمال فرض می‌شود که داده‌ها کامل و بدون نقص هستند، بنابراین بیشتر در شرایطی که داده‌های کامل و دقیق وجود دارد می‌توان از آن استفاده کرد. اما تئوری شواهد دمپستر شافر به ترکیب شواهد به دست آمده از منابع مختلف در مورد یک پدیده و مدل‌سازی عدم قطعیت می‌پردازد. در تئوری شواهد مجموع احتمال وقوع و عدم وقوع یک رویداد ممکن است کمتر از یک باشد چرا که داده‌های مفقود یا ناقص هم در نظر گرفته می‌شوند. این تئوری تاکنون در زمینه‌های مختلف پیش‌بینی‌های مکانی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مانند پیش‌بینی سیل (رضایی مقدم و رحیم‌پور، ۱۴۰۳؛ یاریان و همکاران، ۲۰۲۴)، آسیب‌پذیری لرزه‌ای (دلاور و صدری کیا، ۲۰۲۰) و پتانسیل یابی آب‌های زیرزمینی (عزیزی و همکاران، ۲۰۲۵) به کار رفته است.

¹ Dempster

² Shafer

اگر فرض شود چندین لایه از داده‌های مکانی موثر بر وقوع فرونشست در یک منطقه حساس به فرونشست موجود باشد، هر لایه به عنوان یک شاهد E_i ($i=1,2,\dots,L$) که L تعداد لایه‌ها یا عوامل موثر می‌باشد در نظر گرفته می‌شود. داده E_{ij} هم بیانگر طبقه یا ویژگی j ام از شاهد (یا لایه E_i) خواهد بود. همچنین T_P به مفهوم گزاره هدف یا نشان دهنده وقوع فرونشست است، $\bar{T}_P$ هم به مفهوم متضاد گزاره هدف و نشان دهنده عدم وقوع فرونشست است.

در تئوری شواهد دمپستر شافر چند پارامتر معرفی شده است، از جمله باور، عدم باور و نایقینی یا عدم قطعیت که مقدار هر یک از این پارامترها در محدوده بین صفر تا یک بوده و مجموع آنها همواره برابر یک است. در این مقاله وقوع مثبت یا «باور» وقوع فرونشست با علامت $\lambda(T_P)$ نشان داده شده است و به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$\lambda(T_P)_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (۱)$$

وقوع منفی یا «عدم باور» وقوع فرونشست با علامت $\lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}}$ نشان داده شده است و به صورت معادله (۲) تعریف می‌گردد:

$$\lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L) - N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(A) - N(L) - N(E_{ij}) + N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (۲)$$

که در روابط فوق $N(L \cap E_{ij})$ تعداد فرونشست در هر طبقه از لایه‌ها، $N(L)$ تعداد کل فرونشست منطقه، $N(E_{ij})$ تعداد پیکسل‌های فاقد فرونشست هر طبقه و $N(A)$ تعداد کل پیکسل‌های فاقد فرونشست منطقه می‌باشد. مقدار به‌دست آمده از معادلات (۱) و (۲) در محدوده صفر تا بی‌نهایت متغیر می‌باشد. از این رو به مرحله دیگری برای استانداردسازی نیاز است که به صورت توابع باور و عدم باور تعریف می‌شود (معادلات ۳ و ۴):

$$m\lambda(T_P)_{E_{ij}} = \frac{\lambda(T_P)_{E_{ij}}}{\sum_j \lambda(T_P)_{E_{ij}}} \quad (۳)$$

$$m\lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}} = \frac{\lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}}}{\sum_j \lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}}} \quad (۴)$$

تابع نایقینی یا مقبولیت نیز به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$m(\theta)_{E_{ij}} = 1 - (m\lambda(T_P)_{E_{ij}} + m\lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}}) \quad (۵)$$

در انجام محاسبات با معادلات (۳) تا (۵) به ازای مجموع طبقات هر لایه معادلات (۶) و (۷) باید برقرار باشند:

$$\sum_{i=1}^j m\lambda(T_P)_{E_{ij}} = 1 \quad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^j m\lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}} = 1 \quad (۷)$$

و به ازای هر طبقه از لایه‌ها معادله (۸) صادق می‌باشد:

$$m\lambda(T_P)_{E_{ij}} + m\lambda(\bar{T}_P)_{E_{ij}} + m(\theta)_{E_{ij}} = 1 \quad (۸)$$

از معادلات (۳) تا (۵) برای وزن‌دهی تمامی طبقه‌های هر کدام از عوامل استفاده خواهد شد. سپس در محیط نرم افزار ArcGIS تمامی وزن‌های به‌دست آمده (که به آنها جرم احتمال نیز گفته می‌شود) به نقشه اعمال شده و نقشه وزنی هر عامل به‌دست می‌آید. در نهایت نقشه حساسیت به فرونشست کلی با استفاده از پارامتر 'Bet' (صدری کیا و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۰۱۷) به دست می‌آید (رابطه ۹). این نقشه بر اساس مقادیر Bet به پنج کلاس حساسیت خیلی کم، حساسیت کم، حساسیت متوسط، حساسیت زیاد و حساسیت خیلی زیاد به فرونشست پهنه‌بندی می‌شود.

$$BET = m\lambda(T_P) + \frac{m(\theta)}{2} \quad (9)$$

مراحل کلی انجام این پژوهش عبارتند از:

۱. انتخاب مجموعه‌ای از عوامل موثر بر فرونشست زمین و آماده‌سازی نقشه‌ها
 ۲. آماده‌سازی نقشه موجودی فرونشست منطقه مورد مطالعه
 ۳. استفاده از تئوری شواهد برای تهیه نقشه‌های باور، عدم باور و نایقینی
 ۴. تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرونشست زمین
 ۵. اعتبارسنجی نتایج
- در این پژوهش آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، تحلیل‌های مکانی و تهیه نقشه‌ها در محیط ArcMap انجام شده و تجزیه و تحلیل‌های آماری و نمایش ارزیابی نتایج با کمک محیط Excel انجام گرفته است.

نتایج

همان‌گونه که در جداول (۱) الی (۸) دیده می‌شود، هر یک از لایه‌ها که در ستون‌های اول جداول مذکور قرار دارند، شامل چندین طبقه بودند (ستون دوم جداول) که نقشه‌های کلاس‌بندی شده بر اساس طبقات لایه‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است. تعداد و درصد پیکسل‌های موجود در هر طبقه در محیط نرم‌افزار Arc GIS محاسبه شد که این مقادیر به ترتیب در ستون‌های سوم و چهارم جداول (۱) الی (۸) نوشته شده‌اند. تعداد پیکسل‌های فرونشست و درصد آن‌ها در هر طبقه نیز با توجه به نقشه فرونشست موجود و نقشه‌های عوامل موثر هشت گانه، در محیط ArcMap محاسبه شد که در ستون‌های پنجم و ششم جداول مذکور نمایش داده شده است. سپس بر اساس معادلات (۳)، (۴)، (۵) و (۹) پارامترهای $m\lambda(T_P)_{Eij}$ و $m(\theta)_{Eij}$ و BET برای هر طبقه از هر لایه (هر سطر از جداول مذکور) محاسبه شده است. نتایج به تفکیک در جداول (۱) الی (۸) قابل مشاهده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی عامل شیب و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر شافر برای مدل‌سازی فرونشست زمین

لایه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_P)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_P)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
شیب	$< 5^\circ$	۶۳۴۳۱۰	۱۴/۲۵	۲۱۹۴۴	۳۶/۳۶	۰/۳۴۴۱	۰/۰۹۲۲	۰/۵۶۳۷	۰/۶۲۶۰
	$5^\circ - 10^\circ$	۵۷۲۵۵۶	۱۲/۸۶	۱۷۲۸۴	۲۸/۶۴	۰/۲۹۷۴	۰/۱۰۱۹	۰/۶۰۰۷	۰/۵۹۷۸
	$10^\circ - 20^\circ$	۵۸۷۸۷۹	۱۳/۲۰	۱۳۰۶۹	۲۱/۶۵	۰/۲۱۵۴	۰/۱۱۲۶	۰/۶۷۲۰	۰/۵۵۱۴
	$20^\circ - 30^\circ$	۵۳۲۱۳۱	۱۱/۹۵	۶۴۳۳	۱۰/۶۶	۰/۱۱۴۷	۰/۱۲۷۰	۰/۷۵۸۳	۰/۴۹۳۹
	$30^\circ - 40^\circ$	۵۳۲۶۰۳	۱۱/۹۶	۱۴۰۰	۲/۳۲	۰/۰۲۴۵	۰/۱۳۹۲	۰/۸۳۶۳	۰/۴۴۲۶
	$40^\circ - 50^\circ$	۵۳۱۶۶۱	۱۱/۹۴	۱۳۶	۰/۲۲	۰/۰۰۲۴	۰/۱۴۲۳	۰/۸۵۵۴	۰/۴۳۰۱
	$50^\circ - 60^\circ$	۵۳۰۸۳۰	۱۱/۹۲	۶۴	۰/۱۲	۰/۰۰۱۱	۰/۱۴۲۴	۰/۸۵۶۵	۰/۴۲۹۴
	$> 60^\circ$	۵۳۰۱۴۴	۱۱/۹۱	۲۷	۰/۰۴	۰/۰۰۰۵	۰/۱۴۲۵	۰/۸۵۷۱	۰/۴۲۹۰

جدول ۲ - طبقه بندی عامل سطح آب های زیرزمینی و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر شافر برای مدل سازی فرونشست زمین

لایه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_p)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_p)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
سطح آب های زیرزمینی	-۷/۸ - ۲۳	۱۵۲۵۵۸۰	۳۴/۲۲	۴۹۲۲۴	۸۱/۸۴	-۰/۷۵۱۸	-۰/۰۵۵۲	-۰/۱۹۳۰	-۰/۸۴۸۳
	-۲/۷ - ۷/۷	۹۲۵۱۸۱	۲۲/۹۵	۵۱۹۹	۸/۶۴	-۰/۱۲۳۹	-۰/۲۳۶۲	-۰/۶۳۹۹	-۰/۴۴۳۸
	-۰/۳ - ۲/۶	۹۸۱۴۴۵	۲۲/۰۳	۱۷۹۹	۲/۹۹	-۰/۰۴۰۱	-۰/۲۵۵۶	-۰/۷۰۴۳	-۰/۳۹۲۳
	-۰/۷ - ۲/۲۹	۱۰۲۲۵۷۹	۲۰/۷۷	۳۹۲۳	۶/۵۲	-۰/۰۸۴۳	-۰/۲۴۹۰	-۰/۶۶۶۸	-۰/۴۱۷۶
	۲/۸ - ۱۵	۲۲۵	-۰/۰۱	۰	۰	۰	-۰/۲۰۴۰	-۰/۷۹۶۰	-۰/۳۹۸۰

جدول ۳ - طبقه بندی عامل ارتفاع و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر-شافر برای مدل سازی فرونشست زمین

لایه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_p)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_p)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
ارتفاع	۱۳۰۰ - ۱۵۰۰	۶۴۴۵۱۶	۱۴/۴۸	۲۹۷۲۳	۴۹/۲۵	-۰/۴۹۱۹	-۰/۰۸۳۷	-۰/۴۲۴۴	-۰/۷۰۴۱
	۱۵۰۰ - ۱۷۰۰	۶۳۷۲۱۱	۱۴/۳۱	۲۸۴۷۳	۴۷/۱۷	-۰/۴۷۵۱	-۰/۰۸۷۰	-۰/۴۳۷۹	-۰/۶۹۴۱
	۱۷۰۰ - ۱۹۰۰	۶۳۷۶۶۳	۱۴/۳۲	۱۷۳۸	۲/۸۸	-۰/۰۲۶۵	-۰/۱۶۲۳	-۰/۸۱۱۲	-۰/۴۳۲۱
	۱۹۰۰ - ۲۱۰۰	۶۳۴۰۰۷	۱۴/۲۴	۱۱۸	۰/۱۹	-۰/۰۰۱۸	-۰/۱۶۶۸	-۰/۸۳۱۴	-۰/۴۱۷۵
	۲۱۰۰ - ۲۳۰۰	۶۳۳۴۵۰	۱۴/۲۳	۴۰	۰/۰۷	-۰/۰۰۰۶	-۰/۱۶۷۰	-۰/۸۳۲۴	-۰/۴۱۶۸
	۲۳۰۰ - ۲۵۰۰	۶۳۳۰۰۲	۱۴/۲۱	۱۹۶	۰/۳۲	-۰/۰۰۳۰	-۰/۱۶۶۵	-۰/۸۳۰۵	-۰/۴۱۸۳
	۲۵۰۰ - ۳۱۰۰	۶۳۲۲۶۵	۱۴/۲۰	۶۹	۰/۱۱	-۰/۰۰۱۱	-۰/۱۶۶۸	-۰/۸۳۲۱	-۰/۴۱۷۱

جدول ۴ - طبقه بندی عامل فاصله از گسل و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر-شافر برای مدل سازی فرونشست زمین

لایه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_p)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_p)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
فاصله از گسل	< ۱۰۰۰	۳۰۲۳۴۳	۶/۷۹	۱۶۷	۰/۲۸	-۰/۰۱۹۷	-۰/۱۹۳۶	-۰/۷۸۶۷	-۰/۴۱۳۱
	۱۰۰۰ - ۲۰۰۰	۵۷۹۲۰۱	۱۳/۰۱	۲۴۸	۰/۴۱	-۰/۰۱۵۳	-۰/۲۰۷۶	-۰/۷۷۷۱	-۰/۴۰۳۹
	۲۰۰۰ - ۳۰۰۰	۴۶۸۴۵۱	۱۰/۵۲	۵۶	۰/۰۹	-۰/۰۰۴۳	-۰/۲۰۲۳	-۰/۷۹۳۵	-۰/۴۰۱۰
	۳۰۰۰ - ۴۰۰۰	۳۶۹۹۵۰	۸/۳۱	۱۸۵	۰/۳۱	-۰/۰۱۷۹	-۰/۱۹۶۸	-۰/۷۸۵۳	-۰/۴۱۰۵
	۴۰۰۰ - ۵۰۰۰	۳۲۱۹۳۳	۷/۲۳	۱۶۵	۰/۲۷	-۰/۰۱۸۳	-۰/۱۹۴۵	-۰/۷۸۷۲	-۰/۴۱۱۹
	> ۵۰۰۰	۲۴۱۰۷۵۳	۵۴/۱۴	۵۹۴۰۸	۹۸/۶۶	-۰/۹۲۴۶	-۰/۰۰۵۲	-۰/۷۰۰۲	-۰/۹۵۹۷

جدول ۵ - طبقه بندی عامل فاصله از رودخانه و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر شافر برای مدل سازی فرونشست زمین

لایه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_p)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_p)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
فاصله از رودخانه	< ۲۰	۱۵۱۱۸۹	۶/۵۰	۳۷۷۱	۵/۳۵	-۰/۱۱۲۰	-۰/۱۲۷۱	-۰/۷۶۰۹	-۰/۴۹۲۵
	۲۰ - ۴۰	۱۵۳۱۱۳	۶/۵۸	۳۳۷۳	۴/۷۸	-۰/۰۹۸۳	-۰/۱۲۸۰	-۰/۷۷۳۶	-۰/۴۸۵۲
	۴۰ - ۶۰	۱۴۲۷۴۶	۶/۱۴	۳۰۱۵	۴/۲۷	-۰/۰۹۴۱	-۰/۱۲۸۱	-۰/۷۷۷۸	-۰/۴۸۳۰
	۶۰ - ۱۲۰	۴۰۹۶۲۸	۱۷/۶۲	۹۲۱۲	۱۴/۰۶	-۰/۱۰۰۵	-۰/۱۳۲۹	-۰/۷۶۶۷	-۰/۴۸۳۸
	۱۲۰ - ۱۸۰	۳۴۳۴۶۴	۱۴/۷۷	۸۲۰۵	۱۱/۶۳	-۰/۱۰۷۱	-۰/۱۳۰۴	-۰/۷۶۲۶	-۰/۴۸۸۳
	۱۸۰ - ۲۴۰	۲۶۹۸۲۱	۱۱/۶۰	۷۱۷۰	۱۰/۱۷	-۰/۱۱۹۸	-۰/۱۲۷۶	-۰/۷۵۲۶	-۰/۴۹۶۱
	۲۴۰ - ۳۰۰	۲۰۵۲۲۹	۸/۸۲	۷۲۹۶	۱۰/۳۵	-۰/۱۶۳۳	-۰/۱۲۳۲	-۰/۷۱۳۵	-۰/۵۲۰۰
	> ۳۰۰	۶۴۹۹۴۷	۲۷/۹۵	۲۸۴۷۲	۴۰/۳۸	-۰/۲۰۴۹	-۰/۱۰۲۷	-۰/۶۹۲۴	-۰/۵۵۱۱

جدول ۶ - طبقه‌بندی عامل جهت شیب و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر شافر برای مدل‌سازی فرونشست زمین

لايه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_p)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_p)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
جهت شیب	مسطح	۵۰۲۶۴۳	۱۱/۲۹	۱۰۰۶۴	۱۶/۶۷	۰/۱۶۶۰	۰/۱۰۴۲	۰/۷۲۹۸	۰/۵۳۰۹
	شمالی	۴۹۵۷۵۵	۱۱/۱۳	۶۷۷۲	۱۱/۲۲	۰/۱۱۱۸	۰/۱۱۱۰	۰/۷۷۷۲	۰/۵۰۰۴
	شمال شرقی	۴۹۶۷۰۲	۱۱/۱۵	۶۲۱۷	۱۰/۳۰	۰/۱۰۲۲	۰/۱۱۲۲	۰/۷۸۵۶	۰/۴۹۵۰
	شرقی	۵۰۳۵۶۲	۱۱/۳۱	۵۷۱۱	۹/۴۶	۰/۰۹۳۳	۰/۱۱۳۵	۰/۷۹۴۲	۰/۴۸۹۴
	جنوب شرقی	۵۰۰۴۵۲	۱۱/۲۴	۵۷۳۱	۹/۴۹	۰/۰۹۳۳	۰/۱۱۳۴	۰/۷۹۳۴	۰/۴۹۰۰
	جنوبی	۴۸۸۳۵۹	۱۰/۹۷	۴۹۹۸	۸/۲۸	۰/۰۸۳۱	۰/۱۱۴۶	۰/۸۰۲۳	۰/۴۸۴۳
	جنوب غربی	۴۸۸۳۱۴	۱۰/۹۷	۵۷۹۹	۹/۶۱	۰/۰۹۶۸	۰/۱۱۲۹	۰/۷۹۰۳	۰/۴۹۲۰
	غربی	۵۱۰۵۴۲	۱۱/۴۷	۷۲۱۱	۱۱/۹۵	۰/۱۱۵۷	۰/۱۱۰۵	۰/۷۷۳۸	۰/۵۰۲۶
	شمال غربی	۴۶۵۷۸۵	۱۰/۴۶	۷۸۵۴	۱۳/۰۱	۰/۱۳۸۹	۰/۱۰۷۹	۰/۷۵۳۲	۰/۵۱۵۵

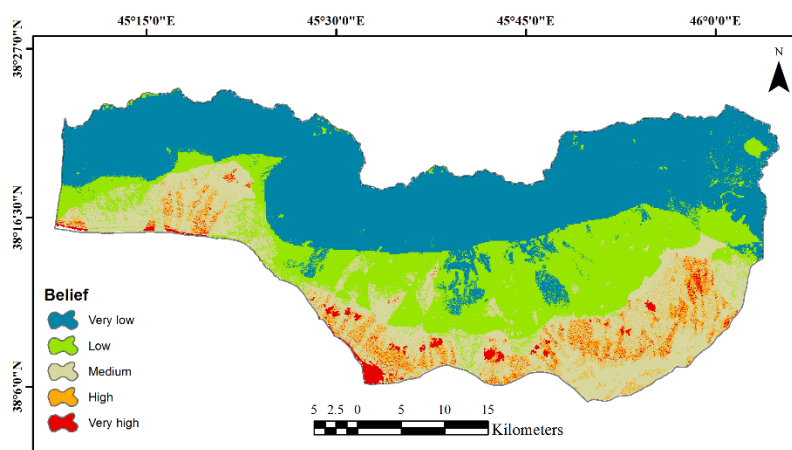
جدول ۷ - طبقه‌بندی عامل کاربری اراضی و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر شافر برای مدل‌سازی فرونشست زمین

لايه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_p)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_p)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
کاربری اراضی	تاج پوشش	۳۹۵۴۷۸۹	۵۶/۵۴	۱۹۱۷۸	۲۷/۲۹	۰/۰۳۶۴	۰/۲۳۳۵	۰/۷۳۰۱	۰/۴۰۱۴
	زمین‌های دیم	۲۲۰۵۸۲	۴/۲۲	۲۹۴۹	۴/۲۰	۰/۰۷۶	۰/۱۳۷۰	۰/۷۸۷۰	۰/۴۶۹۵
	درختکاری	۱۸۴۳۲۱۸	۳۵/۲۷	۳۷۷۹۵	۵۳/۷۸	۰/۱۱۸۲	۰/۰۹۷۰	۰/۷۸۴۷	۰/۵۱۰۶
	اراضی فاقد پوشش گیاهی	۲۱۱۷۷	۰/۴۰	۶۳	۰/۰۹	۰/۰۱۶۵	۰/۱۳۷۴	۰/۸۴۶۰	۰/۴۲۵۳
	محیط‌های شهری و روستایی	۹۳۳۳۶	۱/۷۹	۹۱۱۹	۱۲/۹۷	۰/۶۷۱۴	۰/۱۲۱۰	۰/۲۰۷۶	۰/۷۷۵۲
	زراعت آبی	۱۱۰۵۰	۰/۲۱	۰	۰	۰	۰/۱۳۷۳	۰/۸۶۲۷	۰/۴۳۱۴
	شوره‌زار	۸۱۶۳۰	۱/۵۶	۱۱۶۹	۱/۶۶	۰/۰۸۱۵	۰/۱۳۶۸	۰/۷۸۱۷	۰/۴۷۲۳

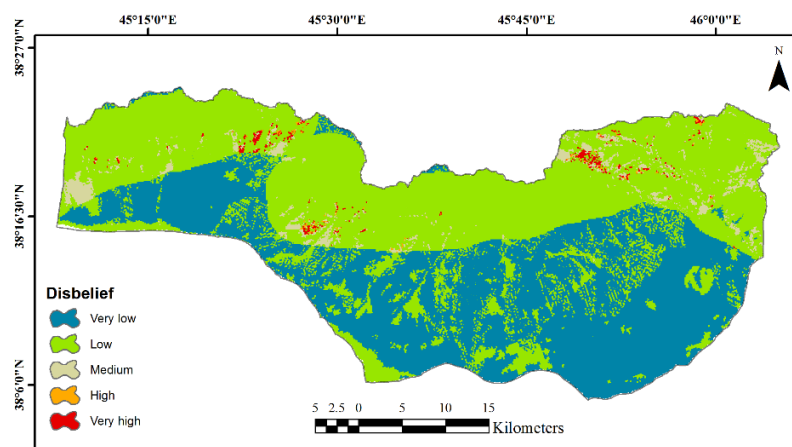
جدول ۸ - طبقه‌بندی عامل جنس زمین‌شناسی و محاسبه پارامترهای تئوری دمپستر شافر برای مدل‌سازی فرونشست زمین

لايه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد فرونشست	درصد فرونشست	$m\lambda(T_p)_{Eij}$	$m\lambda(\bar{T}_p)_{Eij}$	$m(\theta)_{Eij}$	BET
زمین‌شناسی	سنگ مارون رسی	۴۱۳۱۸۲	۹/۲۷	۴۸	۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۸۱۳	۰/۹۱۶۶	۰/۴۶۰۴
	سنگ آتشفشانی کنگلومرا	۹۲۱۳۰	۲/۰۷	۰	۰	۰	۰/۰۷۵۲	۰/۹۲۴۸	۰/۴۶۲۴
	رسوبات کوارتزرزی	۲۰۲۱۴۵	۴/۵۴	۵۷	۰/۰۹۴۷۷۱	۰/۰۰۵۰	۰/۰۷۷۲	۰/۹۱۷۸	۰/۴۶۳۹
	سنگ گرانیت	۳۷۰۷۷۸	۶/۰۸	۱۴	۰/۰۲۳۲۷۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۷۸۵	۰/۹۲۰۶	۰/۴۶۱۲
	سنگ لایم استون	۱۸۹۹۱۵	۴/۲۶	۴	۰/۰۰۶۶۵۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۷۷۰	۰/۹۲۲۶	۰/۴۶۱۷
	سنگ کنگلومرا	۳۶۶۲۴۴	۸/۲۲	۳	۰/۰۰۴۹۸۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۸۰۴	۰/۹۱۹۴	۰/۴۵۹۹
	تخته سنگ قدیمی	۲۰۶۰۸۷	۴/۶۲	۲۲	۰/۰۳۶۵۷۸	۰/۰۰۱۹	۰/۰۷۷۳	۰/۹۲۰۸	۰/۴۶۲۳
	تخته سنگ جدید	۲۳۴۸۸۵۴	۵۲/۷۲	۵۶۴۰۵	۹۳/۷۸۱۶۹۴	۰/۴۴۸۷	۰/۰۰۹۵	۰/۵۴۱۸	۰/۷۱۹۶
	سنگ بازالتی	۲۵۷۸۱	۰/۵۸	۰	۰	۰	۰/۰۷۴۱	۰/۹۲۵۹	۰/۴۶۳۰
	نمکزار	۱۲۴۸۳۲	۲/۸۰	۳۵۲۸	۵/۸۶۵۸۲۴	۰/۵۳۲۹	۰/۰۷۱۳	۰/۳۹۵۹	۰/۷۳۰۸
	سنگ شیستی	۱۹۴۷	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰/۰۷۳۷	۰/۹۲۶۳	۰/۴۶۳۲
	سنگ فلیش	۱۴۳۰۴۶	۳/۲۱	۶۴	۰/۱۰۶۴۱	۰/۰۰۸۰	۰/۰۷۶۱	۰/۹۱۶۰	۰/۴۶۵۹
	سنگ آندزیت	۱۵۴	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰/۰۷۳۶	۰/۹۲۶۴	۰/۴۶۳۲
	سنگ آبرفتی	۶۹۹۱۵	۱/۵۷	۰	۰	۰	۰/۰۷۴۸	۰/۹۲۵۲	۰/۴۶۲۶

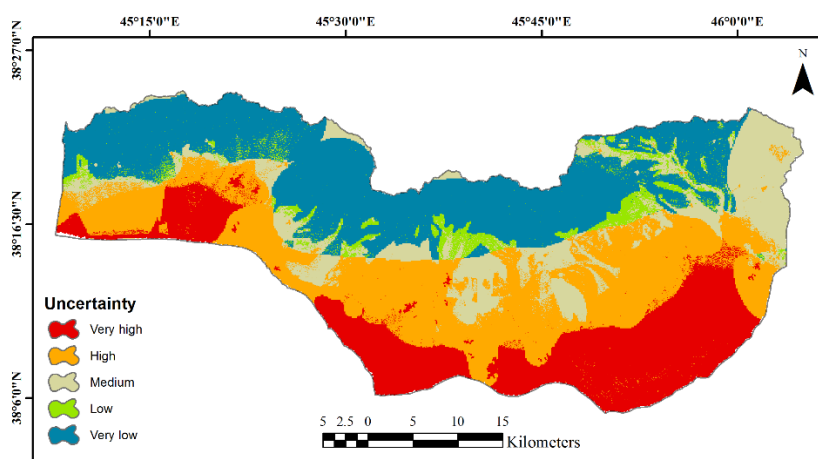
پس از محاسبه پارامترهای باور، عدم باور و نایقینی برای تمامی کلاس‌های هر لایه، این پارامترها به محیط ArcMap اضافه شدند. لایه‌های عوامل موثر بر اساس هر کدام از ستون‌های باور، عدم باور و نایقینی، با ابزار تحلیلی جمع وزندار (weighted sum) در ArcMap با هم ترکیب شدند. در نتیجه نقشه باور فرونشست (شکل ۴)، نقشه عدم باور فرونشست (شکل ۵) و نقشه نایقینی یا مقبولیت (شکل ۶) به دست آمدند. نقشه‌های حاصل به پنج کلاس حساسیت «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» طبقه‌بندی شدند. برای تهیه نقشه نهایی حساسیت به فرونشست نیز از اطلاعات ستون BET به عنوان وزن طبقات استفاده شده و با روش weighted sum همه لایه‌ها با هم تلفیق شدند (شکل ۷). نقشه باور در شکل (۴) نشان‌دهنده میزان این باور است که هر بخش از منطقه که در نقشه نشان داده شده است چقدر در اولویت برنامه‌های پیشگیری و کاهش اثرات فرونشست هست. نقشه عدم باور (شکل ۵) بیان‌گر این است که هر بخش از نقشه منطقه به چه میزان در اولویت برنامه‌های پیشگیری و کاهش اثرات فرونشست نیست. نقشه مقبولیت که در شکل (۶) نشان داده شده است نیز میزان عدم قطعیت در مورد در اولویت بودن یا نبودن بخش‌های مختلف منطقه را برای برنامه‌های پیشگیری و کاهش اثرات فرونشست زمین نشان می‌دهد.



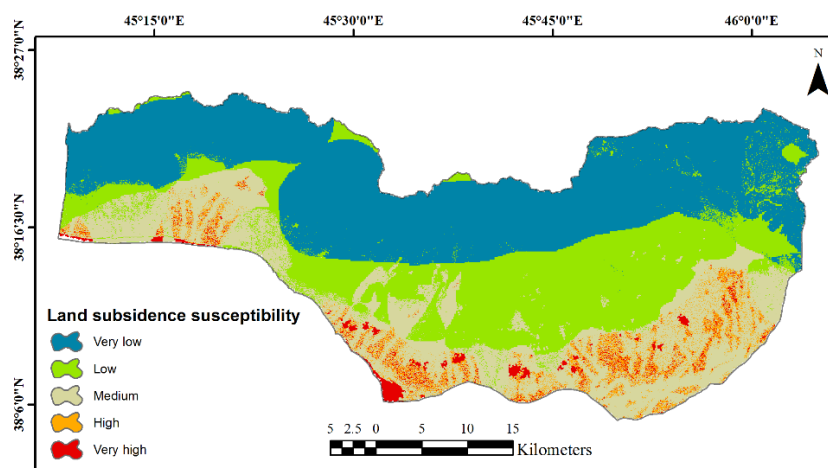
شکل ۴- نقشه باور در مورد احتمال وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵- نقشه عدم باور در مورد احتمال وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶- نقشه نایقینی در مورد احتمال وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه



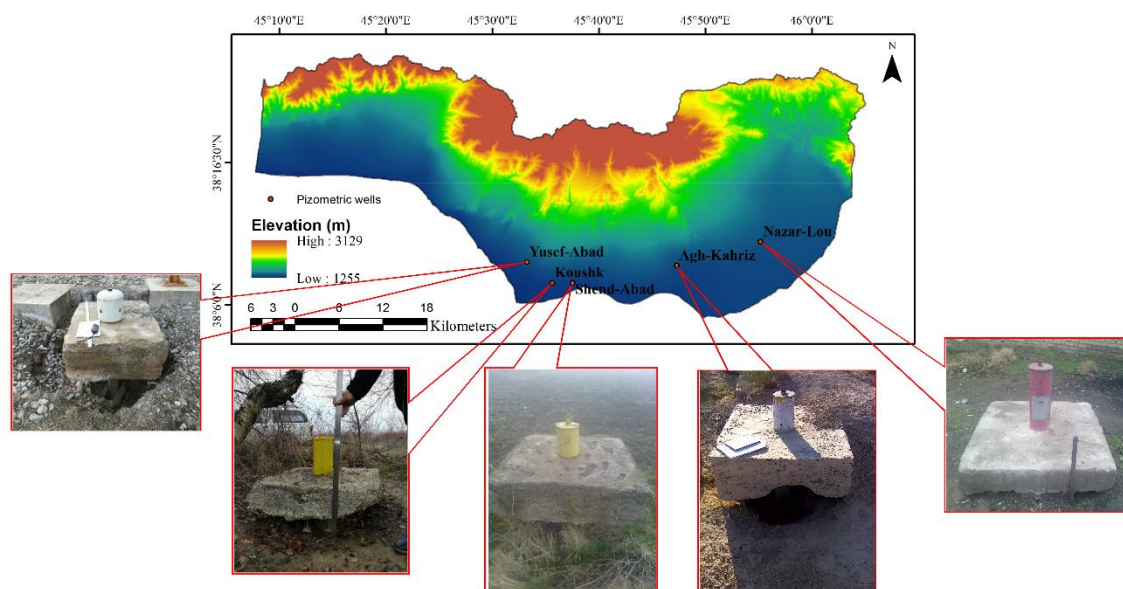
شکل ۷- نقشه نهایی حساسیت به فرونشست زمین

نقشه نهایی پهنه‌بندی فرونشست زمین (شکل ۷) با روش quantile به پنج کلاس حساسیت به فرونشست «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» طبقه‌بندی شده است.

بررسی نقشه حساسیت به فرونشست زمین حاصل نشان می‌دهد که از نظر ارتفاعی، مناطق با حساسیت خیلی زیاد و زیاد به فرونشست اکثراً در طبقات ارتفاعی کم (۱۵۰۰ - ۱۳۰۰ متر و ۱۷۰۰ - ۱۵۰۰ متر) قرار دارند. به عبارت دیگر افزایش ارتفاع در منطقه با کاهش میزان حساسیت به فرونشست همراه است. همچنین از نظر شیب، مناطق با شیب زیاد حساسیت به فرونشست بسیار کمی داشته‌اند و اغلب نواحی با حساسیت زیاد و خیلی زیاد فرونشست در مناطق با شیب بسیار کم قرار دارند. همچنین نتایج پهنه‌بندی حساسیت به فرونشست، رابطه عکس بین فاصله از گسل‌ها و مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد فرونشست را نشان می‌دهد، به طوری که اکثر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد، بیشترین فاصله را نسبت به گسل‌ها دارا بوده‌اند. از نظر جنس زمین‌شناسی نیز بخش زیادی از مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در طبقات تخته سنگ جدید و نمکزار واقع بوده‌اند. از نظر متوسط سطح آب‌های زیرزمینی هم نتایج نشان می‌دهد که اکثریت مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد فرونشست در طبقات با کم‌ترین تراز آب زیرزمینی یعنی $7/8 -$ تا $23 -$ متر واقع شده‌اند.

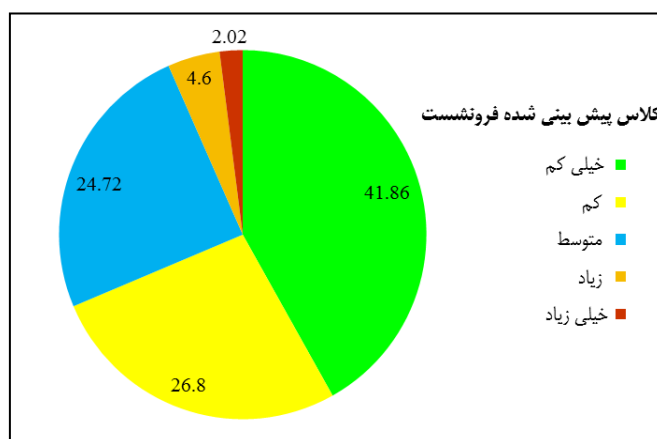
بحث

همان گونه که در شکل (۷) دیده می شود، در قسمت جنوبی دشت شبستر حساسیت زیاد به فرونشست زمین وجود دارد که لازم است در برنامه ریزی ها مورد توجه قرار گیرد. در تحقیقات قبلی در مورد مطالعات حساسیت به فرونشست منطقه مورد مطالعه نیز بخش های جنوب و جنوب شرقی دشت شبستر به عنوان مناطق با بیشترین حساسیت نسبت به فرونشست زمین شناخته شده اند (روستایی و همکاران، ۱۴۰۳؛ صدری کیا و کاظمی پور، ۱۴۰۳؛ صدری کیا و شام کهریزی، ۱۴۰۳). شکل (۸) موقعیت مکانی و تصاویر چند چاه پیزومتریک در بخش هایی از مناطق جنوبی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه (شامل نظرلو-جنب مدرسه، آق کهریز-کنار راه آهن، شندآباد-راه ناخربولی، کوشک و یوسف آباد) که طبق مشاهدات میدانی دچار فرونشست زمین شده بودند را نشان می دهد. مشاهدات میدانی مذکور، انطباق محل چاه های پیزومتریک دارای فرونشست را با پهنه های حساسیت خیلی زیاد و زیاد فرونشست پیش بینی شده توسط مدل دمپستر-شافر تایید می نمایند.



شکل ۸- برخی از چاه های پیزومتریک دارای فرونشست در منطقه مطالعه (منبع عکس ها: شرکت آب منطقه ای آذربایجان شرقی)

شکل (۹) نمایش دهنده مساحت هر یک از کلاس های حساسیت به فرونشست در منطقه مورد مطالعه با تئوری شواهد دمپستر-شافر می باشد. همان گونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، مساحت متعلق به حساسیت «خیلی کم» به فرونشست، ۴۱/۸۶ درصد مساحت کل دشت شبستر بوده که بیشترین مساحت بین سایر کلاس های حساسیت به فرونشست را به خود اختصاص داده است، پس از آن به ترتیب کلاس های با حساسیت «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» با مساحت های ۲۶/۸ درصد، ۲۴/۷۲ درصد، ۴/۶ درصد و ۲/۰۲ درصد قرار دارند.



شکل ۹- درصد مساحت هر یک از کلاس‌های فرونشست

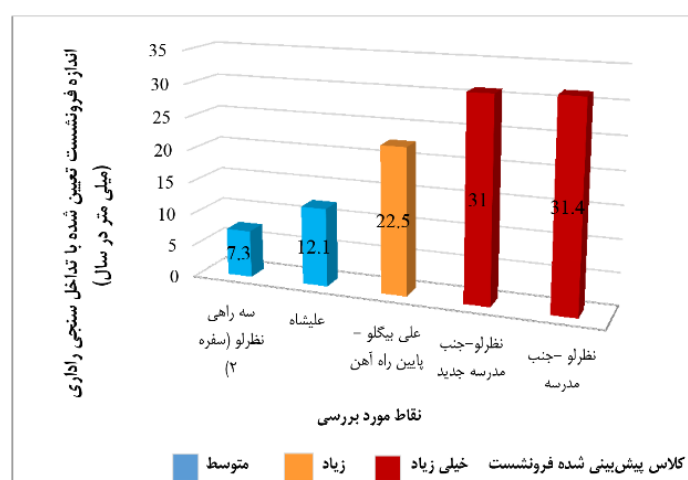
اعتبارسنجی مدل

جهت ارزیابی نتایج مدل ارائه شده، تعداد ۵ نقطه واقع در بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه به صورت تصادفی از بین چاه‌های پیژومتری منطقه که مختصات آن‌ها مشخص و در دسترس بودند انتخاب شدند (جدول ۹).

جدول ۹- نقاط انتخابی برای اعتبارسنجی مدل

نام چاه پیژومتری	X (utm)	Y (utm)
سه‌راهی نظولو (سفره ۲)	۵۷۸۷۱۱	۴۲۲۷۳۳۱
علیشاه	۵۷۳۰۶۴	۴۲۲۲۴۳۲
علی بیگلر - پایین راه آهن	۵۴۴۶۱۲	۴۲۲۳۲۴۳
نظولو - جنب مدرسه جدید	۵۸۰۲۶۸	۴۲۲۵۵۴۷
نظولو - جنب مدرسه	۵۸۰۲۸۵	۴۲۲۵۵۴۴

برای بررسی صحت پیش‌بینی مدل، نرخ فرونشست برای نقاط انتخاب شده از نقشه فرونشست تهیه شده برای دشت شبستر با روش کوتاه‌ترین خط مبنا تداخل‌سنجی راداری (صدری کیا و کاظمی پور، ۱۴۰۳: ۱۸۶) استخراج شد. اعداد مربوط به نرخ فرونشست سالانه هر نقطه و نیز کلاس پیش‌بینی شده برای فرونشست این نقاط در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- نرخ فرونشست نقاط منتخب و کلاس فرونشست پیش‌بینی شده برای آن‌ها

اعداد درج شده بر روی میله‌ها در شکل (۹) مربوط به نرخ فرونشست نقاط مورد بررسی و رنگ آن‌ها نشان‌دهنده کلاس پیش‌بینی شده با تئوری دمپستر شافر است. این ارزیابی کمی مطابقت خیلی خوب پیش‌بینی‌های انجام شده توسط مدل با میزان فرونشست نقاط، که از روش کوتاه‌ترین خط مبنای تداخل سنجی راداری به دست آمده بود، را تایید کرد.

نتیجه‌گیری

به منظور مدیریت و کاهش خطرات ناشی از فرونشست نیاز به شناسایی منطقه‌های مستعد فرونشست با دقت بالا و پیش از وقوع فرونشست می‌باشد تا متناسب با میزان حساسیت هر منطقه به فرونشست، اقدامات مدیریتی پیشگیرانه صورت گیرد. بنابراین روش‌های جدید و قابل اعتماد برای پیش‌بینی و مدلسازی حساسیت به فرونشست برای ارزیابی صحیح و به موقع خطرات، امری ضروری می‌باشد. در این تحقیق از روش تئوری شواهد برای پیش‌بینی فرونشست استفاده شد و با تلفیق داده‌های موثر بر فرونشست، نقشه‌های میزان باور، عدم باور و نیز نایقینی نسبت به احتمال وقوع فرونشست ارائه شدند. نهایتاً با توجه به مقادیر به دست آمده، حساسیت به فرونشست به صورت یک نقشه پهنه‌بندی ارائه شد. از مزیت‌های استفاده از تئوری دمپستر-شافر این است که علاوه بر انجام پیش‌بینی، عدم قطعیت آن پیش‌بینی را نیز مدلسازی می‌کند که در روش‌های متداول دیگر نظیر یادگیری ماشین یا شبکه عصبی امکانپذیر نمی‌باشد.

در این مقاله نقشه‌های مربوط به عوامل موثر شامل لایه‌های سطح آب‌های زیرزمینی، شیب، ارتفاعات، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، جهت شیب، کاربری اراضی و زمین‌شناسی تهیه و به صورت داده‌های رستری آماده‌سازی شدند. مدل-سازی‌های انجام شده به شکل نقشه‌های طبقه‌بندی شده در پنج کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم ارائه شدند. نتایج مطالعه نشان داد که مناطق جنوبی دشت شبستر در معرض خطر جدی پدیده فرونشست قرار دارند. نتایج بررسی حساسیت به فرونشست زمین نشان داد که ۴۱/۸۶ درصد از مساحت دشت شبستر در منطقه خطر خیلی کم قرار دارد و ۲۶/۸۰ درصد از مساحت منطقه در ناحیه خطر کم، ۲۴/۷۲ درصد از مساحت منطقه در ناحیه خطر متوسط و ۴/۶ درصد از منطقه در ناحیه خطر زیاد قرار دارند و ۲/۰۲ درصد از مساحت منطقه نیز در کلاس خطر خیلی زیاد قرار دارد. برای بررسی صحت پیش‌بینی انجام شده، پنج نقطه از بین چاه‌های پیژومتری در جنوب منطقه انتخاب شد و از نقشه فرونشست موجود تهیه شده به روش کوتاه‌ترین خط مبنای تداخل سنجی راداری، نرخ فرونشست نقاط انتخابی تعیین شد. اعداد مربوط به نرخ فرونشست سالانه هر نقطه با کلاس پیش‌بینی شده برای فرونشست آن نقطه مقایسه شد و مطابقت خیلی خوبی را نشان داد.

با توجه به نتایج این مطالعه می‌توان در تحقیقات بعدی، شناسایی دقیق‌تر طبقات هر یک از عوامل موثر بر فرونشست که بیشترین نقش را در نواحی با حساسیت زیاد داشته‌اند انجام شود. همچنین برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر می‌توان علاوه بر هشت عامل مورد استفاده در این تحقیق عوامل موثر بیشتری نظیر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده، شاخص فرسایش رودخانه و شاخص رطوبت توپوگرافی را نیز در مدلسازی حساسیت به فرونشست مورد استفاده قرار داد. روش‌های مختلف وزندهی نظیر آنتروپی شانون نیز می‌توانند برای انتخاب مهم‌ترین عوامل موثر بر فرونشست، در مدلسازی حساسیت به فرونشست مورد استفاده قرار گیرند. می‌توان در تحقیقات بعدی از روش به کار رفته در این مقاله برای مناطق دیگری که دارای خطر فرونشست هستند استفاده کرد. همچنین می‌توان حساسیت فرونشست منطقه مورد مطالعه را با سایر روش‌های آماری و یادگیری ماشین نظیر نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک، ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار داده و نتایج روش‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود.

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد؛ اسفندیاری درآباد، فریبا؛ فعال نذیری، مهدی و زینالی، بتول (۱۴۰۴). مقایسه تطبیقی عملکرد الگوریتم‌های MABAC، CODAS در پهنه بندی خطر فرونشست زمین با بهره گیری از شاخص های زیست محیطی (مطالعه موردی: محدوده حریم شهرهای استان البرز). پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱۳(۴)، ۵۸-۸۱.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.458189.1504>
- اطهری، محمد علی عزیزی؛ سیدهاشمی، حمیدرضا و شهاب هنری، حمیدرضا (۱۴۰۱). بررسی رابطه بین میزان تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست و آب زیرزمینی با استفاده از تصاویر ماهواره ای Sentinel-1 و مدل های آماری (منطقه مورد مطالعه: دشت ورامین). علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۷(۱)، ۳۴-۴۳.
<https://doi.org/10.22112/jwwse.2021.261650.1232>
- حصارکی زاد، عاطفه؛ یمانی، مجتبی و گورابی، ابوالقاسم (۱۴۰۳). تحلیل جامع فرونشست زمین در ایران: مروری سیستماتیک به وضعیت فعلی. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱۳(۳)، ۲۳-۴۵.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.401286.1441>
- رضایی مقدم، محمد حسین و رحیم پور، توحید (۱۴۰۳). ارزیابی پتانسیل خطر وقوع سیلاب با استفاده از روش تحلیل آماری دو متغیره (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی چای). پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱۲(۴)، ۹۱-۱۰۷.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.429929.1473>
- روستایی، شهرام؛ رضایی مقدم، محمد حسین؛ یاراحمدی، جمشید و نجف وند، سمیرا (۱۴۰۳). 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 کمی، ۱۲(۳)، ۳۵-۵۸.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.329254.1334>
- صدری کیا، منصوره و شام کهریزی، احمد (۱۴۰۳). مدلسازی حساسیت به فرونشست زمین و تحلیل عوامل موثر بر آن در دشت شبستر با بهره‌گیری از جنگل تصادفی. جغرافیا و روابط انسانی، ۷(۳)، ۶۰۳-۶۲۶.
<https://doi.org/10.22034/gahr.2025.506801.2396>
- صدری کیا، منصوره و کاظمی پور، ندا (۱۴۰۳). ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تداخل سنجی راداری و تحلیل‌های مکانی. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸(۹۰)، ۱۸۸-۲۰۹.
<https://doi.org/10.22034/gp.2024.58713.3194>
- منافی‌آذر، علی؛ خامه‌چیان، ماشاءاله و ندیری، عطاءاله (۱۳۹۷). مقایسه آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت جنوب‌غربی تهران با مدل وزن‌دهی ساده (مدل ALPRIFT) و الگوریتم ژنتیک (GA). علوم زمین خوارزمی، ۴(۲)، ۱۹۹-۲۱۲.
<https://doi.org/10.29252/gnf.4.2.199>
- Abbasnejad, A., Abbasnejad, B., Derakhshani, R., Hemmati Sarapardeh, A. (2016). Qanat hazard in Iranian urban areas: explanation and remedies. *Environmental Earth Sciences*, 75 (2016): 1-14, doi: 10.1007/s12665-016-6067-6
- Adiyaman, I. B. (2012). Land Subsidence and Earth Fissures Due to Groundwater Pumping. Ph.D. Thesis, the University of Arizona, US,
- Azizi, A., Pahlavani, P., Nakhaei, M. (2025). Integrating Dempster-Shafer theory and clustering algorithms for enhanced groundwater potential assessment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39(11): 5115-5129, doi: 10.1007/s00477-025-03064-3
- Chen, B., Gong, H., Li, X., Lei, K., Zhu, L., Gao, M., Zhou, C. (2017). Characterization and causes of land subsidence in Beijing, China. *International Journal of Remote Sensing*, 38(3): 808-826, doi:10.1080/01431161.2016.1259674
- Chen, C., Peng, M., Motagh, M., Guo, X., Xing, M., Quan, Y. (2025). Mapping Susceptibility and Risk of Land Subsidence by Integrating InSAR and Hybrid Machine Learning Models: A Case Study in Xi'an, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18 (2025): 3625-3639, doi:10.1109/JSTARS.2024.3522995
- Delavar, M. R., Sadrykia, M. (2020). Assessment of Enhanced Dempster-Shafer Theory for Uncertainty Modeling in a GIS-Based Seismic Vulnerability Assessment Model, Case Study—Tabriz City. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4): 195,
- Dempster, A. P. (1967). Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*, 38(2): 325-339,

- Ghorbanzadeh, O., Rostamzadeh, H., Blaschke, T., Gholaminia, K., Aryal, J. (2018). A new GIS-based data mining technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and k-fold cross-validation approach for land subsidence susceptibility mapping. *Natural Hazards*, 94(2018): 497-517, [doi:10.1007/s11069-018-3449-y](https://doi.org/10.1007/s11069-018-3449-y)
- Li, F., Liu, G., Tao, Q., Zhai, M. (2023). Land subsidence prediction model based on its influencing factors and machine learning methods. *Natural Hazards*, 116(3): 3015-3041, [doi:10.1007/s11069-022-05796-9](https://doi.org/10.1007/s11069-022-05796-9)
- 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 (2014): 1019-1042,
- Sadrykia, M., Delavar, M. R., Zare, M. (2017). A GIS-based decision making model using fuzzy sets and theory of evidence for seismic vulnerability assessment under uncertainty (case study: Tabriz). *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(3): 1969-1981,
- Shafer, G. (1976). *A Mathematical Theory of Evidence*: Princeton University Press, [doi:10.2307/j.ctv10vm1qb](https://doi.org/10.2307/j.ctv10vm1qb)
- Yariyan, P., Avand, M., Abbaspour, R. A., Torabi Haghighi, A., Costache, R., Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping using an improved analytic network process with statistical models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1): 2282-2314, [doi:10.1080/19475705.2020.1836036](https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836036)
- Zhou ,C., Gong, H., Chen, B., Li, X., Li, J., Wang, X., . . . Duan, G. (2019). Quantifying the contribution of multiple factors to land subsidence in the Beijing Plain, China with machine learning technology. *Geomorphology*, 335 (2019): 48-61, [doi:10.1016/j.geomorph.2019.03.017](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.017)