



Risk assessment land subsidence in Kermanshah plain using remote sensing and geographic information system

Masoumeh Rajabi^{1✉} | Shahram Roostaei² | Sara Mataee³

1. Corresponding author, Professor, Department of Geomorphology, Tabriz University, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz, Iran. E-mail: mrjabi@tabrizu.ac.ir
2. Professor, Department of Geomorphology, Tabriz University, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz, Iran. E-mail: roostaei@tabrizu.ac.ir
3. Doctoral student of Geomorphology, Tabriz University, Faculty of Planning and Environmental, Tabriz, Iran. E-mail: saramataee69@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 8 March 2023

Received in revised form 19 April 2023

Accepted 23 May 2023

Published online 21 July 2024

Keywords:

Landsubsidence, Kermanshah plain, differential interferometry, hierarchical analysis, Sentinel.

ABSTRACT

Land subsidence as a geological and geomorphological disaster has serious negative effects in many countries and regions of the world. In this research, it was tried to use 5 images of Sentinel 1 satellite for the period of 27/02/2017 to 01/01/2021 in order to measure and calculate the land subsidence. For this purpose, the land subsidence was investigated in four time periods, and the results of these four periods show the maximum amount of subsidence in the first period of 17 cm, in the second period of 8 cm, in the third period of 5 cm, and in The last period was 12 cm. In terms of the spatial distribution of subsidence in all periods, the maximum subsidence corresponds to the western and northwestern parts of the plain. In order to measure the land subsidence potential in the Kermanshah plain, a possible subsidence map was prepared using a hierarchical analysis model. In order to do this, eight factors affecting land subsidence were used, including water level drop, land use, well density, land slope, well geological log, slope direction, soil geology, distance from the river. The final map of the risk of land subsidence shows that 50% of the area of the plain is in the area with a very high and high probability of subsidence, with the highest level of water level drop and the thickness of sediments, the high density of the number of wells and the type of agricultural use that in It is located in the western and northwestern part of the plain. Due to the fact that this part of the plain is also in the maximum range of land subsidence. Therefore, the comparison of the maximum subsidence in both mentioned methods shows the complete matching of the results.

Cite this article: Rajabi, M.; Roostaei, Sh. & Mataee, S. (2024). Risk assessment land subsidence in Kermanshah plain using remote sensing and geographic information system. *Journal of Geography and Planning*, 28 (88), 153-169. <http://doi.org/10.22034/GP.2023.55693.3111>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/GP.2023.55693.3111>

Publisher: University of Tabriz.

Extended Abstract

Introduction

Natural hazards threaten the lives of many people across the world. Included in these hazards is land subsidence. According to the US Geological Survey, land subsidence refers to the settlement or downward sinking of the earth's surface with little horizontal displacement vector (Khorshid-Doust et al. 2017:82). In recent decades, subsidence has caused horrific damages driven by its climatic, morphological, and geological conditions, on the one hand, and the uncontrolled expansion of cities and mass construction sites, and the rising industrial and mining activities, on the other hand. In the meantime, Iran, together with Egypt, China, and India are the four countries that have suffered the highest damages in this regard (Fakharzadeh-Torbati, 2017:3). For this, this study aimed to use the D-InSAR technique within a four-year interval (from 2017/02/27 to 2021/01/01) to calculate the level of subsidence using four interferometers. Then, to measure the potentiality of the land subsidence risk, Kermanshah's plain capability map of the subsidence peril was prepared and evaluated. To elicit the said map, the hierarchical analysis zoning model was used.

Data and Method

To survey the subsidence, the main step was to identify the area and measure the rate of this phenomenon. This is nowadays possible by using radar image processing. To do this measurement, five images of the Sentinel-1 sensors in the ascending and transit 174 orbits were used. The processing stages of these images were carried out in the SNAP/9 software environment. Then, to measure the potentiality of the land subsidence, the possible risk zoning of the subsidence in Kermanshah's plain was performed using eight factors affecting the subsidence sensitivity, including the drop of groundwater levels, land use, the density of the number of wells, distance from faults, the geological log of piezometric wells, soil science, slope, and the slope direction. According to this method, layers of the data intended, having been provided, were converted into a raster file with a system of similar coordinates. Then, after classifying them in a GIS software environment and determining the value of each effective factor, the hierarchical analysis technique in the Expert Choice environment was used to provide the final map.

Results and Discussion

This study used the remote sensing method to calculate and measure the level of land subsidence for 4 years in Kermanshah's plain. To do this, five Sentinel-1 images in the ascending orbit within the four-year interval were used. The results indicated that the rates of subsidence for the first period (from 2017/02/27 to 2018/01/05), the second period (from 2018/01/05 to 2019/01/12), the third period (from 2019/01/12 to 2020/01/05), and the fourth period (from 2020/01/19 to 2021/01/01) were 17, 8, 5, and 12 cm, respectively. The spatial distribution of the maximum subsidence in each period was noted in the western and northwestern parts of the plain. Later, to measure the potentiality of the land subsidence and determine the factor affecting it in the region, the zoning of the plain's subsidence risk possibility was conducted. For this, the eight factors affecting subsidence, including water level drops, fine-grain deposit thickness, slope, land use, well density, distance from rivers, and slope direction were used to zone the plain. After weighing each layer, expert views were used to provide the final risk zoning map, which was divided into five classes very highly-likely, highly-likely, moderately-likely, less-likely, and very less-likely.

Conclusion

Land subsidence is a globally-recognized phenomenon, and many studies worldwide have begun identifying and monitoring its risks. For this, the present study used five Sentinel-1 images from 2017/02/27 to 2021/01/01 to measure and calculate it. Thus, the phenomenon of subsidence was investigated for the four above-mentioned periods, with the maximum subsidence rates being 17, 8, 5, and 12 cm for the first, second, third, and fourth periods, respectively. In terms of spatial distribution, the maximum subsidence was noted in the western and northwestern parts of the plain. To measure the potentiality of the subsidence in the plain, the possible subsidence map using the hierarchical analysis model was provided. To provide this map, the eight factors of water level drops, land uses, well numbers, the earth's slope, wells' geological log, slope direction, soil, and distance from faults were used. The map revealed that 21.9% of the plain's area had a very highly-likely risk possibility, while 27.2% had a highly-likely risk possibility in the western and northwestern parts. This part of the plain is characterized by agricultural use and suffers from the highest water drop rates, thick fine-grain deposits, and a dense number of wells. Thirty-two percent of the plain's area includes a class of low and very low-likely rates of subsidence, covering the eastern and southeastern parts, where water levels are the lowest, and the fine-grain deposits are less thick with few numbers of wells. A comparison of both measurement and zoning methods suggests they are fully consistent, suggesting the validity of the D-InSAR method. In both

methods, the maximum level of subsidence was in the western and northwestern parts, while the minimum level was in the eastern and southeastern parts.

References

- Ali Mohammad, KH., Robabh, R., Nasim, M., Karim, A, (2016), study of the effect of groundwater level fluctuations on the subsidence phenomenon in Qala area (East Azerbaijan, Tasuj), *Geography and Planning Journal*, year 21, number 60, pp. 73-93.
- Amirreza, F., investigation and evaluation of Sabzevar Plain subsidence using InSAR radar interferometric technique and its comparison with GPS data and geodetic trend alignment, master's thesis, Islamic Azad University, 2016.
- Andriani, I., Dinar, D.A.P. & Azhar, K.A., (2018), Evaluation of Land Subsidence Impact at Lowland Areas Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Method, *E3S Web of Conferences* 68, 04017(2018)1st SRICOENV 2018 .
- Bhattarai, R., Kondoh. A.,(2017), Risk Assessment of Land Subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, Using Remote Sensing and GIS, *Advances in Remote Sensing*, 2017, 6, 132-146.
- Deros, S., Din, N., Norzeli, S., Omar, R., Usman, F., Hamim, S.,(2022), Land Subsidence Susceptibility Projection for PalembangSlum Area by Complex MCDM-AHP Technique, *J. Eng. Technol. Sci.*, Vol. 54, No. 1, 2022, 220104.
- Hu, B., Yang, B., Zhang, X., Chen, X., Wo, Y.,(2019), Time-Series Displacement of Land Subsidence in Fuzhou Downtown, Monitored by SBAS-InSAR Technique. *Journal of Sensors* Volume 2019, Article ID 3162652, 12 pages.
- Hu, R.L , Yue ,Z.Q, Wang, L.C, & Wang, S.J.,(2004), Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76: 65- 77
- Liu, L., Yu, J., Chen, B., Wang, Y.,(2020), Urban subsidence monitoring by SBAS-InSAR technique with multi-platform SAR images: a case study of Beijing Plain, China, *European Journal of Remote Sensing*.
- Massonnet, D. & Feigl, K. L.,(1998), Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.* 36, 441-500.
- Yastika, P., Shimizu, N., Pujianiki, N., Temaja, I., Antara, I, Osawa, T.,(2019), Detection of silent subsidence over extensive area by SBAS DInSAR: a case study of Southern Bali, Indonesia, *E3S Web of Conferences* 153, 02003, 2020, 530 CORECT-IJJSS 2019.



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرہنگی
پرتال جامع علوم انسانی

ارزیابی خطر فرورانشت زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی

معصومه رجبی^۱ | شهرام روستایی^۲ | سارا مطاعی^۳

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، تبریز، ایران. رایانامه: mrajabi@tabrizu.ac.ir
۲. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، تبریز، ایران. رایانامه: roostaei@tabrizu.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، تبریز، ایران. رایانامه: saramataee69@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: فرورانشت زمین، دشت کرمانشاه، تداخل سنجی تفاضلی، تحلیل سلسله مراتبی، سنتینل.</p>	<p>فرورانشت زمین به عنوان یک پدیده و رخداد زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی اثرات منفی جدی در بسیاری از کشورها و مناطق جهان دارد. در چند دهه اخیر خشکسالی‌های پیاپی و افزایش بهره‌برداری از سطح چاه‌ها سبب شده دشت کرمانشاه در معرض مخاطره فرورانشت زمین قرار گیرد. بدین منظور در این پژوهش سعی شد که از ۵ تصویر ماهواره سنتینل ۱ برای بازه زمانی ۲۷/۰۲/۲۰۱۷ تا ۲۱/۰۱/۲۰۲۱ جهت اندازه‌گیری و محاسبه فرورانشت زمین استفاده شود. بدین سبب فرورانشت زمین در چهار دوره زمانی بررسی شد که نتایج این چهار دوره نشان دهنده‌ی بیشینه میزان فرورانشتی به ترتیب در دوره اول ۱۷ سانتی‌متر، برای دوره زمانی دوم ۸ سانتی‌متر، برای دوره سوم ۵ سانتی‌متر و در دوره‌ی آخر ۱۲ سانتی‌متر بوده است. از نظر توزیع مکانی فرورانشت در تمامی دوره‌ها بیشینه فرورانشت منطبق بر بخش‌های غربی و شمال غربی دشت می‌باشد. جهت انجام پتانسیل سنجی فرورانشت زمین در دشت کرمانشاه، نقشه فرورانشت احتمالی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی تهیه شد. برای تهیه این نقشه از هشت فاکتور مؤثر بر فرورانشت زمین شامل افت سطح تراز آب، کاربری اراضی، تراکم تعداد چاه، شیب زمین، لاگ زمین‌شناسی چاه، جهت شیب، خاک، فاصله از رودخانه استفاده شد. نقشه نهایی احتمال خطر فرورانشت زمین نشان دهنده‌ی این موضوع است که، ۵۰ درصد از مساحت دشت در محدوده‌ی با احتمال فرورانشت خیلی زیاد و زیاد با افت سطح تراز آب و ضخامت زیاد رسوبات توامان، تراکم بالای چاه و نزدیکی به رودخانه همراه با شیب کم همچنین نوع کاربری کشاورزی در بخش غربی و شمال غربی دشت واقع شده است. با توجه به اینکه این بخش از دشت نیز در ارزیابی میزان فرورانشت زمین در محدوده بیشینه فرورانشت قرار دارد. بنابراین مقایسه بیشینه فرورانشت در هر دو روش مذکور نشان دهنده‌ی تطبیق کامل نتایج می‌باشد.</p>

استناد: رجبی، معصومه؛ روستایی، شهرام و سارا مطاعی (۱۴۰۳). ارزیابی خطر فرورانشت زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات

جغرافیایی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۸ (۸۸)، ۱۶۹-۱۵۳.

<http://doi.org/10.22034/GP.2023.55693.3111>



© نویسنده‌گان

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

مخاطرات طبیعی سالانه جان مردم را در سراسر جهان تهدید می‌کند. از جمله‌ی این مخاطرات فرونشست‌زمین است. طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی آمریکا، فرونشست زمین، شامل فروریزش یا نشست روبه پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندک باشد (خورشید دوست و همکاران، ۱۳۹۶، ۸۲). در واقع فرونشست‌زمین، یک پدیده زمین‌شناسی است که در اثر فعالیت‌های طبیعی یا انسانی ایجاد می‌شود، فرونشست طبیعی زمین نتیجه‌ی رسوبات و مواد معدنی زیرزمینی تجمع شده و همچنین انحلال کربنات است. فرونشست ناشی از عوامل انسانی نیز شامل ساخت و سازهای انسانی مرتبط به استفاده از زمین و آب است که بر روند فرونشست زمین تأثیر می‌گذارد (دروس^۱ و همکاران، ۲۰۲۲، ۴۳). اهمیت بررسی و پیش‌بینی فرونشست بدین علت است که این مخاطره تا زمانی که به ساختمان‌ها، خانه‌ها و یا زیرساخت‌ها آسیب جدی وارد نکند، بدون توجه باقی می‌ماند (یاستیکا^۲ و همکاران، ۲۰۲۱، ۲). متأسفانه فرونشست و پیامدهای ناخوشایند آن، سرشتی بازگشت‌ناپذیر دارند و به سختی می‌توان آنها را کند و مهار نمود (اکبری، ۱۴۰۰، ۱۱۶). بنابراین کشف وجود فرونشست قبل از اینکه منجر به آسیب شدید شود در اولویت است. آگاهی از فرونشست در یک منطقه برای انتخاب اقدامات متقابل برای جلوگیری از آسیب، بسیار مهم است (باهاتاری^۳ و همکاران، ۲۰۱۷، ۱۳۳). بدین سبب سالانه مطالعات فشرده‌ی زیادی به منظور پایش و بررسی فرونشست‌زمین انجام می‌شود. پدیده فرونشست‌زمین، در بیش از ۱۵۰ کشور جهان مانند؛ انگلیس، آمریکا، ونزوئلا، فرانسه، ایتالیا، چین، لهستان، مکزیک، اسپانیا، اندونزی گزارش شده است (هو^۴ و همکاران، ۲۰۰۴، ۶۷).

در دهه‌های اخیر نیز به سبب شرایط اقلیمی، ریخت‌شناسی و زمین‌شناسی از یک سو و رشد جمعیت از سوی دیگر گسترش بی‌رویه شهرها و ساخت و سازهای انبوه و افزایش فعالیت‌های صنعتی و معدنی، سبب خسارت و تکرار رخدادهای مهلک گردیده است. به گونه‌ای که ایران به همراه مصر، چین، هندوستان، چهار کشوری است که بیشترین خسارت‌های را از این بابت دیده‌اند (فخارزاده تربتی، ۱۳۹۶، ۳). در نتیجه با توجه به اهمیت موضوع فرونشست در سطح جهانی، مقالات متعددی توسط پژوهشگران داخلی و خارجی به رشته تحریر در آمده است که در زیر به چند مورد از آن اشاره خواهد شد:

(دروس و همکاران، ۲۰۲۲، ۴۲-۵۶) خطر احتمالی فرونشست زمین را در منطقه فقیرنشین پالمبانگ با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی^۵ پهنه‌بندی نمودند (یاستیکا و همکاران، ۲۰۲۱، ۱-۹). فرونشست سطح زمین را در شهر بالی (اندونزی) بررسی کردند.

(لیو^۶ و همکاران، ۲۰۲۰، ۱۴۱-۱۵۳) فرونشست ناشی از بهره‌برداری بیش از حد در شهر پکن (چین) را مورد بررسی قرار دادند (هو همکاران، ۲۰۱۹، ۱-۱۲). واکنش ساختارهای مهندسی زیرزمینی را به فرونشست سطح زمین در شهر چین بررسی نمودند (آندریانی^۷ و همکاران، ۲۰۱۸، ۱-۶). فرونشست سطح زمین را در ناحیه آپی آپی^۸ با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۹ بررسی و ارزیابی نمودند (باهاتاری و همکاران، ۲۰۱۷، ۱۳۲-۱۴۶). از روش تحلیل سلسله مراتبی و به همراه سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی فرونشست سطح زمین در دره کاتماندو (نپال) استفاده نمودند. در ایران نیز فرونشست‌زمین سابقه بیش از چند دهه دارد (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۰۸). از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه: (شادفر و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۰۱-۱۰۶).

^۱ Deros

^۲ Yastika

^۳ Bahattarai

^۴ Hu

^۵ AHP

^۶ Liu

^۷ Andriani

^۸ Api-Api

^۹ AHP

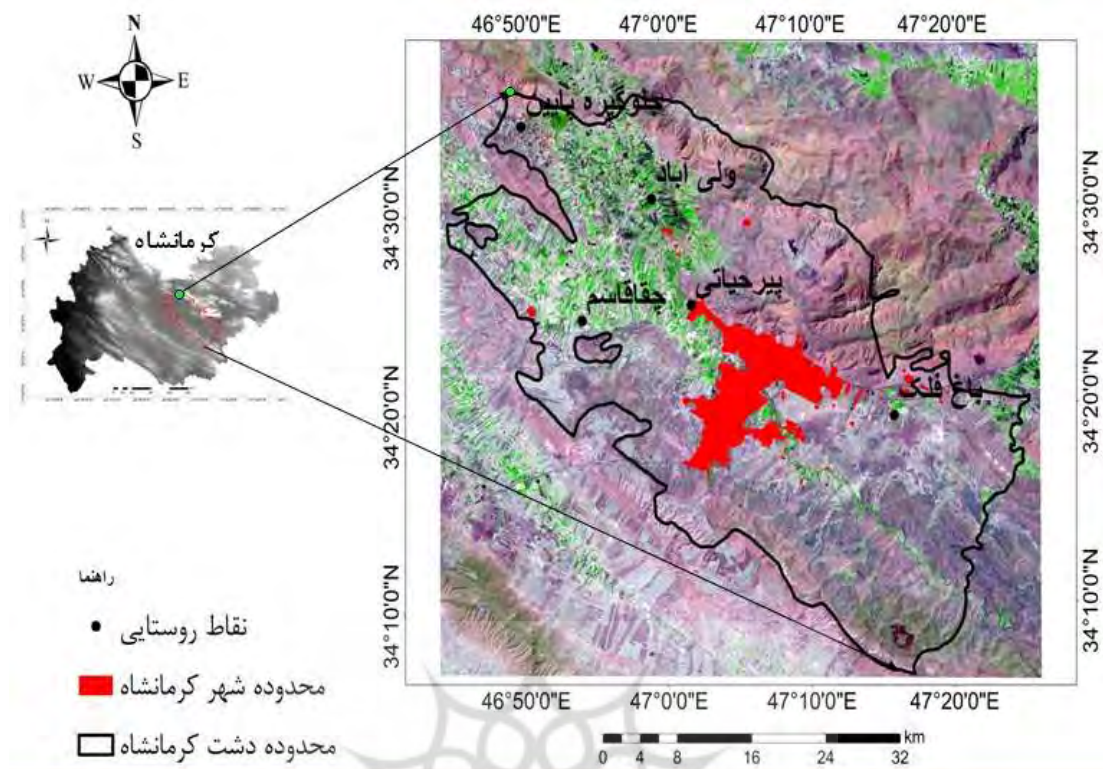
۱۱۶) خطر فرونشست زمین را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در ناحیه بوئین زهرا بررسی نمودند (رجی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۸۸-۱۷۵). دشت بهار همدان را از نظر میزان فرونشست رخداده در محدوده ارزیابی کردند و پارامترهای موثر بر آن را بررسی کردند (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۰۷-۲۲۰). فرونشست دشت ماهیدشت را در استان کرمانشاه با استفاده از تداخل-سنجی راداری ارزیابی کردند (رجی و همکاران، ۱۳۹۹: ۸۱-۹۶). میزان فرونشست را در شهرهای غربی استان همدان با استفاده از تصاویر راداری اندازه‌گیری کردند (گلی و همکاران، ۱۳۹۸: ۹۱-۱۰۶). پدیده فرونشست زمین را در استان فارس که ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است، بررسی نمودند.

طی سالیان اخیر با توجه به خشکسالی‌های مکرر و افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی، صنعتی شدن، افزایش بهره‌برداری از سطح چاه‌های منطقه سبب شد با بررسی این موضوع در سطح دشت، نشانه‌های از وقوع این مخاطره از جمله افت آب‌های زیرزمینی، کج شدگی تیرهای چراغ برق، تخریب و فروریزش دیواره چاه‌ها، ترک خوردگی در ابنیه و سازه‌های انسان ساخت در محدوده مورد نظر مشاهده شود. بدین سبب در این پژوهش سعی شده است که ابتدا میزان فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی^۱ در بازه زمانی چهار سال (۲۰۱۷/۰۲/۲۷ تا ۲۰۲۱/۰۱/۰۱) با استفاده از چهار اینترفروگرام محاسبه شود. سپس به منظور پتانسیل‌سنجی خطر فرونشست زمین نقشه استعداد دشت کرمانشاه نسبت به مخاطره فرونشست تهیه و ارزیابی شود. جهت استخراج نقشه مذکور از مدل پهنه‌بندی تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد.

داده و روش‌ها

مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مختصات ۱۰/۴۷ درجه ۴۰/۳۴ درجه، طول و عرض جغرافیایی در شمال و ۴۷/۵۰ درجه و ۳۴ درجه در جنوب، دارای مساحتی در حدود ۱۶۵۳ کیلومتر مربع است. دشت کرمانشاه با مورفولوژی کشیده در میان مجموعه‌ای از کوهستان-ها کشیده شده است. شمال منطقه سیستم کوهستانی پرآو- بیستون است که جنس این سیستم از آهک توده‌ای یکپارچه متعلق به ژوراستیک و کرتاسه است که مملو از درز و شکاف و شکستگی است (علائی، ۱۳۸۲: ۱۴۴). این توده کوهستانی دارای شیب عمومی ۵۰ درصد و نقاط ارتفاعی بالای ۲۰۰۰ متر می‌باشد. در جنوب منطقه رشته کوهستانی کوه سفید واقع است جنس این توده در قسمت‌هایی از آن رادیولاریت‌های ناحیه عمیق دریایی و در برخی از نقاط از ماسه سنگ، شیل، آهک تشکیل شده است. دشت کرمانشاه در بین ارتفاعات یاد شده واقع شده، جنس کف دشت از رادیولاریت است که به وسیله رسوبات دوره کواترنر که ضخامت آن در شمال دشت به ۲۰۰ متر می‌رسد پوشیده شده است. طول دشت با ساختاری آبرفتی و تقریباً مسطح در حدود ۴۰ کیلومتر با روندی شمال غرب به جنوب شرقی کشیده شده است (علائی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۲). در سطح دشت دو رودخانه قره‌سو در بخش مرکزی و رودخانه رازآور در بخش شمال غربی واقع شده است. ارتفاع متوسط دشت ۱۳۱۳ متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. از لحاظ زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی در زون ساختاری زاگرس رورانده و تا حدودی در بخش جنوبی در زاگرس چین‌خورده قرار گرفته است. بخش شمالی عمدتاً از آهک‌های موسوم به سازند بیستون تشکیل شده است و جزو زاگرس رورانده محسوب می‌گردد. بخش جنوبی منطقه در بخش زاگرس چین‌خورده قرار دارد (غلامی، ۱۳۹۴: ۱۶) (شکل ۱).



شکل (۱). محدوده مورد مطالعه

مواد و روش

در بررسی فرونشست گام اصلی تشخیص محدوده و نرخ این پدیده است که امروزه این امکان با استفاده از پردازش تصاویر راداری فراهم شده است. بدین سبب جهت اندازه‌گیری میزان فرونشست رویداده در محدوده مطالعاتی از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی برای بازه زمانی (۲۰۱۷/۰۲/۲۷ تا ۲۰۲۱/۰۱/۰۱) استفاده شد. جهت انجام این اندازه‌گیری پنج تصویر سنجنده سنتینل ۱ در مدار سعودی و گذر ۱۷۴ به کار گرفته شد (جدول ۱). مراحل پردازش این تصاویر در محیط نرم افزاری اسنپ ورژن ۱۹ انجام شده است. سپس به منظور پتانسیل سنجی فرونشست زمین اقدام به پهنه‌بندی خطر احتمالی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با هشت عامل موثر بر حساسیت فرونشست شامل افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاربری اراضی، تراکم تعداد چاه، فاصله از گسل، لاگ زمین‌شناسی چاه پیژومتر، خاک‌شناسی، شیب و جهت شیب شد. در زیر روش‌های مذکور شرح داده خواهد شد:

جدول (۱). اطلاعات زوج تصاویر

اینترفروگرام	بیس لاین مکانی (متر)	بیس لاین زمانی (روز)
۲۰۱۷/۰۲/۲۷-۲۰۱۸/۰۱/۰۵	۱۷,۰۴	-۳۴۸
۲۰۱۸/۰۱/۰۵-۲۰۱۹/۰۱/۱۲	۲۶,۸۵	-۳۷۲
۲۰۱۹/۰۱/۱۲-۲۰۲۰/۰۱/۱۹	-۶۵,۵۲	-۳۷۲
۲۰۲۰/۰۱/۱۹-۲۰۲۱/۰۱/۰۱	-۱۳,۶۱	-۳۱۲

تداخل سنجی تفاضلی

این تکنیک به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و توانایی به دست آوردن اطلاعات از راه دور، یک تکنیک ارزشمند برای اندازه-گیری تغییر شکل زمین می‌باشد. تکنیک تداخل سنجی راداری تفاضلی با درجه مصنوعی^۱ که اولین کارکرد آن به اواخر ۱۹۸۰ برمی‌گردد، اختلاف فاز محاسبه شده را، به عنوان یک تداخل نگار نمایش می‌دهد که از دو تصویر سار^۲ از یک منطقه مشترک در زمان‌های مختلف به دست آمده، استفاده می‌کند (ماسونت و فیگل^۳، ۱۹۹۸، ۴۴۳). تداخل سنج‌های ایجاد شده شامل مؤلفه‌های ناشی از توپوگرافی، اثر کرویت زمین، تغییر شکل سطح زمین و خطاهای موجود هستند:

$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{def} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱) φ_{flat} مؤلفه فاز زمین مسطح، φ_{topo} سهم فاز توپوگرافی و φ_{def} اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل زمین است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). در حالت ایده‌آل، هر اینترفروگرام باید فقط دارای اختلاف فاز ناشی از جابه‌جایی زمین باشد. بنابراین هدف نهایی یک رویکرد تداخل سنجی تخمین صحیح فاز جابه‌جایی با حذف کامل یا محدود کردن تا حد امکان سایر اجزاء است. بدین سبب جهت اندازه‌گیری میزان فرونشست رویداده در سطح دشت پس از تهیه تصاویر راداری مورد نیاز از سنجنده سنتینل ۱ و با استفاده از محیط نرم افزاری اسنپ پردازش مورد نظر انجام شد. این پردازش در طی چند مرحله انجام شده است. این مراحل مختصر شرح داده می‌شود.

تصاویر خام سنتینل شامل چندین برست^۴ و سه نوع حالت تصویربرداری می‌باشد که در مرحله ابتدایی بایستی به منظور کاهش زمان پردازش و همچنین تعیین برست‌های که در محدوده مطالعاتی قرار دارد و تعیین نوع قبضش^۵؛ عملیات اسپالیت^۶ بر روی هر دو تصویر اصلی^۷ و فرعی^۸ با ویژگی‌های یکسان اعمال گردد. در این پژوهش جهت انجام مراحل پردازش از ۴ برست و نوع تصویربرداری IW و نوع قبضش VV استفاده شد. از آنجاییکه تصاویر سنتینل دارای خطای مداری است به منظور حذف یا کسر این خطا در مرحله اپلای اوربیت^۹ اطلاعات مربوط به موقعیت و سرعت ماهواره را در زمان تصویربرداری دانلود کرده و معلوم می‌کند. سپس بایستی دو تصویر اخذ شده در زمان‌های مختلف با یکدیگر ترکیب^{۱۰} شود. خروجی این مرحله به صورت یک تصویر ترکیب شده است، بدون اینکه هیچ گونه تغییر در آن ایجاد شود. اختلاف فاز بین دو تصویر سار از حاصل ضرب تصویر اول در مزدوج تصویر دوم حاصل می‌شود. به تصویر حاصل از این ضرب مختلط تصویر اینترفروگرام گفته می‌شود. تصویر اینترفروگرام تولید شده به دلیل اینکه حاصل چند برست می‌باشد در حد فاصل بین این برست‌ها مقادیری به صورت رنگ سیاه دیده می‌شود به همین سبب بایستی اقدام به یکپارچه‌سازی تصویر نمود (شکل ۲).

^۱ D-InSAR

^۲ SAR

^۳ Massonnet and Feigl

^۴ Bursts

^۵ Polarisations

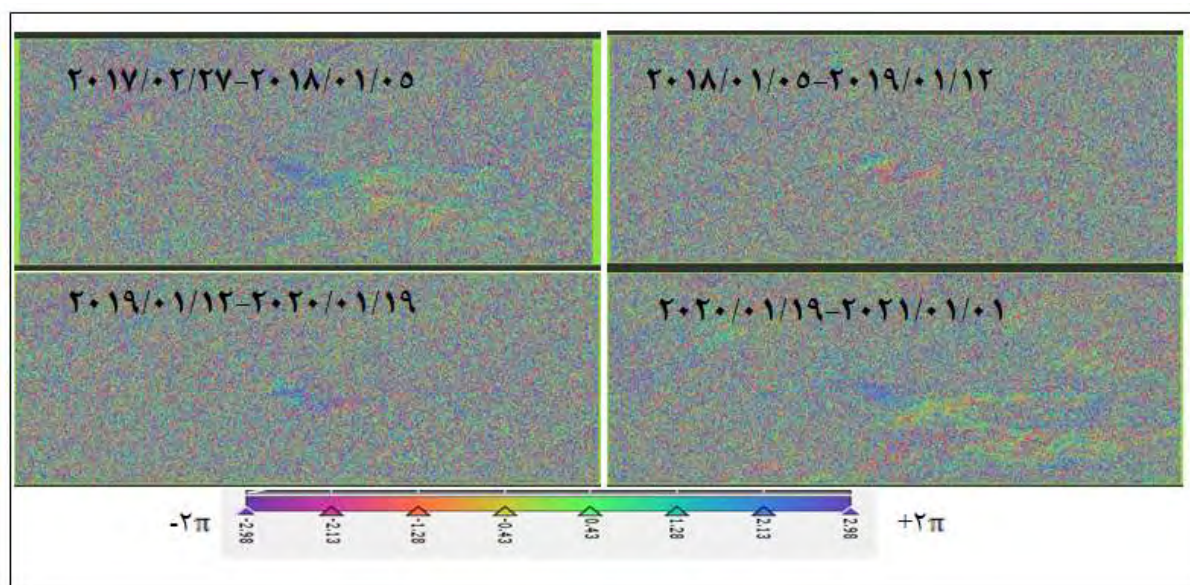
^۶ Split

^۷ Master

^۸ Slave

^۹ Apply orbit

^{۱۰} stack



شکل (۲). نقشه اینترفروگرام‌های اصلاح شده

یکی دیگر از خطاها یا مؤلفه‌های تصاویر اینترفروگرام، مؤلفه توپوگرافی می‌باشد که باید این مؤلفه حذف یا کسر گردد که تصویر حاصله تنها ناشی از مؤلفه فاز جابه‌جایی باشد. این مؤلفه توپوگرافی بدین دلیل می‌باشد که ماهواره از دو موقعیت متفاوت با اختلاف ناچیز، توپوگرافی زمین را تصویربرداری می‌کند، در نتیجه در تصویر اثر استریوسکوپی ایجاد می‌شود. به همین سبب جهت رفع این ابهام از عملیات حذف فاز توپوگرافی^۱ استفاده می‌شود (زندى و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۰۸). با حذف اثر توپوگرافی، اینترفروگرام‌ها تا حدودی اصلاح فاز شده اما هنوز مؤلفه فاز نویز بر روی آن‌ها باقی مانده و حذف نشده است. به همین دلیل با اعمال فیلتر گلدشتاین که فیلتر تطبیقی است اقدام به کاهش اثر نویز می‌کنیم که این فیلتر ماهیت داده‌ها و مقادیر فاز را تغییر نمی‌دهد و صرفاً درونیابی انجام می‌دهد. در حقیقت فرینچ‌ها را قابل رویت می‌کند و نویزهای مربوط به دوره‌های زمانی خط مبنا را کاهش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین اقدامات قبل از اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی فرآیند اصلاح فاز^۲ می‌باشد. بازیابی فاز فرآیندی است که طی آن مقدار فاز مطلق با بیشترین دقت از مقدار اصلی فاز بازیابی می‌شود در واقع مشاهدات اصلی به صورت فاز نسبی است که ضرب 2π از فاز مطلق مجهول است و فاز اینترفروگرام تنها می‌تواند به صورت 2π باشد. به این دلیل هر زمان تغییر فاز بزرگتر از 2π باشد، بازیابی فاز دوباره شروع می‌شود و چرخه خود را تکرار می‌کند. به زبان ساده بازیابی فاز ابهام فاز را به 2π می‌رساند که از الگوریتم جریان با کمترین هزینه^۳ به منظور بازیابی فاز استفاده شد. سپس اختلاف فاز نهایی تبدیل به جابه‌جایی عمودی می‌شود. در واقع تمام تصاویر تا به این مرحله فاقد سیستم مختصات بوده اند بدین سبب نیازمند سیستم مختصات می‌باشد سپس با تبدیل به فرمت قابل خواندن در محیط جی آی اس تصویر نهایی حاصل می‌شود.

کاربرد فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

تهیه ساختار سلسله مراتبی اولین قدم در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است. در این پژوهش با بهره‌گیری از تکنیک AHP و تصمیم‌گیری گروهی، عامل‌های هشت‌گانه موثر بر فرونشست‌زمین مورد مقایسه قرار گرفته است. در نهایت اهمیت نسبی یا وزن هر یک از عامل‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسپرت‌چویس برآورد خواهد شد. در ابتدا نقشه‌های رقومی مربوط به هر یک از عامل‌ها تهیه و سپس براساس شرایط موجود در منطقه به طبقات مختلفی طبقه‌بندی شدند که سطح بعدی ساختار سلسله مراتبی

^۱ Topographic phase removal

^۲ Phase unwrapping

^۳ MCF

را تشکیل می‌دهند. در مرحله بعد با تهیه پرسش نامه و ارسال آن به کارشناسان صاحب نظر، معیارهای اصلی مورد مقایسه زوجی قرار خواهد گرفت و پس از دریافت و جمع آوری پرسشنامه‌ها، پرسش نامه‌هایی که سازگاری آن‌ها کمتر از ۰/۱ است مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

نقشه عوامل موثر

لایه های مورد نظر در محیط جی آی اس تهیه شده سپس هر کدام از این شاخص‌های موثر بر حسب فلو چارت زیر شکل (۳) به پنج کلاس طبقه‌بندی می‌شوند.

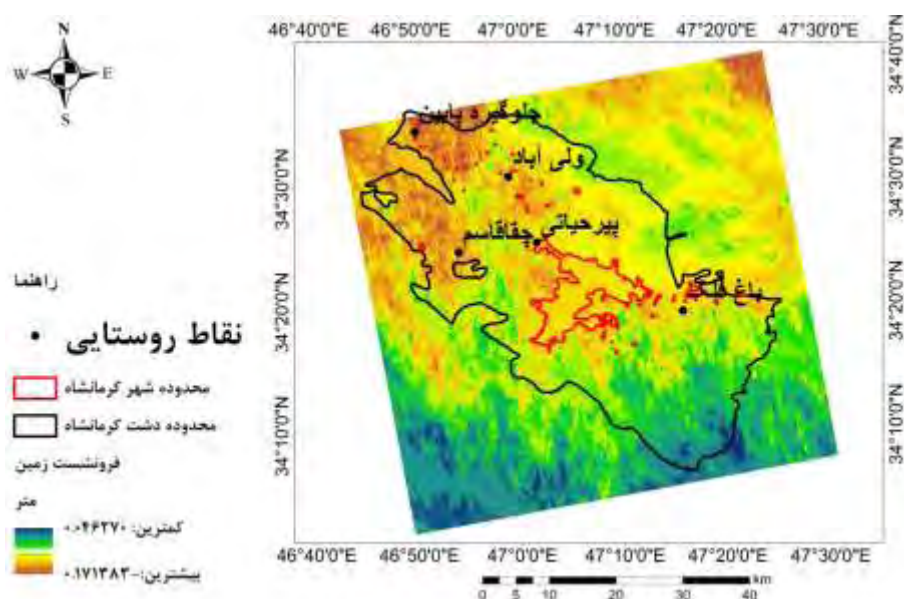
خطر وقوع فرونشست زمین							
جهت شیب	شیب (درجه)	خاک شناسی	تراکم چاه	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	ضخامت رسوبات	افت سطح آب
مسطح	۰-۵	کالکریک	۰-۱۲۰۰	مرتع	۰-۲	۵-۱۱	۳۱-۱۱
شرق	۵-۱۲	کمبیسول	۱۲۰۰-۳۰۰۰	جنگل	۲-۴	۱۱-۱۵	۵-۱۱
جنوب	۱۲-۲۴	یوتریک	۳۰۰۰-۷۰۰۰	محدوده شهری	۴-۶	۱۱-۱۹	۱-۵
غرب	۲۴-۲۷	لیتوسل	۷۰۰۰-۹۰۰۰	آبی و نیم هور و تالاب	۶-۸	۱۹-۲۵	۱-۴
شمال	۲۷<	ریگوسل	۹۰۰۰<		۸<	۲۵-۳۶	۴<

شکل (۳). ساختار سلسله مراتبی عوامل موثر بر فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه در روش تحلیل سلسله مراتبی

بحث و نتایج

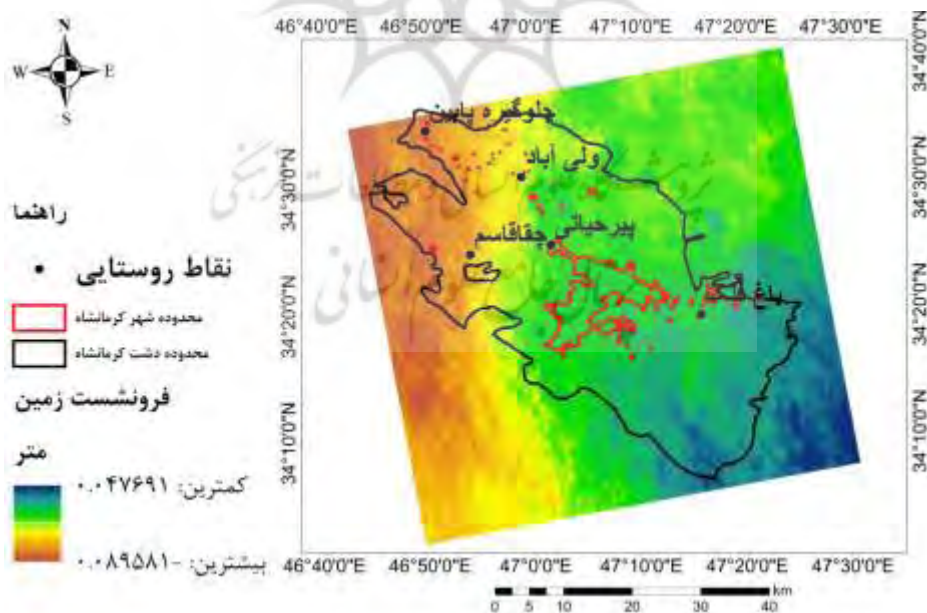
فرونشست زمین یک رویداد ژئومورفولوژیکی است که بر ساختار و مورفولوژی زمین تأثیر می‌گذارد. مطالعات متعددی برای شناسایی علل یا عوامل اصلی که ممکن است منجر به فرونشست زمین شود، انجام شده است. نتایج این مطالعات تأکید کننده‌ی این موضوع است که شدت فرونشست زمین تحت تأثیر عوامل متعددی است. بدین سبب در این پژوهش سعی شد ابتدا با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی و با بهره‌گیری از ۵ تصویر سنجنده سنتینل ۱ و چهار اینترفروگرام میزان فرونشست زمین، برای بازه چهار سال اندازه‌گیری شود. سپس جهت پتانسیل سنجی فرونشست زمین و همچنین تعیین عوامل مؤثر بر فرونشست رویداده در سطح دشت اقدام به پهنه‌بندی احتمال فرونشست زمین با توجه به فاکتورهای موثر بر آن شود. جهت بررسی فرونشست زمین در سطح دشت چند موقعیت جغرافیایی به صورت پراکنده انتخاب شده است که تحت عنوان نقاط روستایی در نقشه‌ها مشخص شده است.

نتایج میزان جابه‌جایی در دوره زمانی اول: اولین نتیجه میزان جابه‌جایی برای دوره زمانی اول در یک بازه زمانی ۳۴۸ روزه (۲۷/۰۱/۰۵-۲۰۱۸/۰۲/۲۰۱۷) محاسبه گردید. در این نقشه (شکل ۴) علامت منفی نشان دهنده‌ی فرونشست زمین است. میزان جابه‌جایی در این دوره‌ی زمانی ۴ سانتی‌متر تا ۱۷- سانتی‌متر به دست آمده است. بیشینه فرونشست در این دوره‌ی زمانی منطبق بر بخش‌های غربی و شمال غربی (جلوگیره پایین و چقاواسم) دشت می‌باشد با این وجود میزانی از فرونشست در بخش‌های شرقی دشت نیز مشاهده می‌شود. اما به طور کلی روند کاهشی میزان فرونشست به بخش‌های شرقی (باغ فلک) دشت در این نقشه به خوبی مشهود می‌باشد.



شکل (۴). میزان فرونشست زمین برای دوره زمانی ۲۰۱۷/۰۲/۲۷-۲۰۱۸/۰۱/۰۵

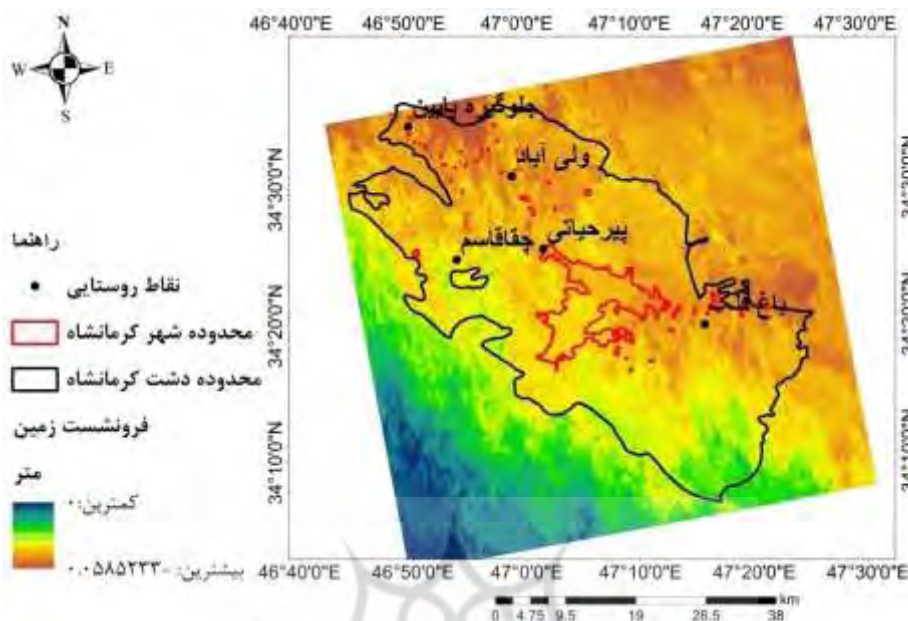
نتایج میزان جابه‌جایی برای دوره زمانی دوم: دومین دوره زمانی مورد نظر یک بازه ۳۷۲ روزه (۲۰۱۹/۰۱/۱۲-۲۰۱۸/۰۱/۰۵) که جهت اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵). نتایج این بررسی‌ها نشان دهنده‌ی میزان جابه‌جایی بین ۴ سانتی‌متر تا ۸- سانتی‌متر در این دوره زمانی می‌باشد. بیشینه میزان فرونشست رویداده در سطح دشت نیز مربوط به بخش‌های غربی دشت (جلوگیره پایین و چقاقاسم) می‌باشد. همچنین این میزان فرونشست از غرب دشت به سمت شرق (باغ فلک) دشت کاهش می‌یابد.



شکل (۵). میزان فرونشست زمین دوره زمانی ۲۰۱۸/۰۱/۰۵-۲۰۱۹/۰۱/۱۲

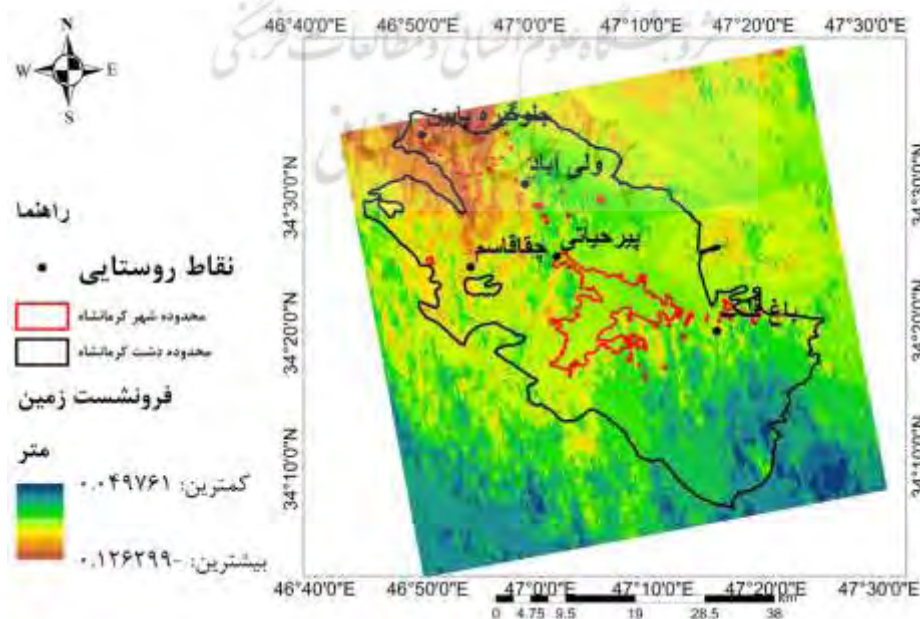
نتایج میزان جابه‌جایی برای دوره زمانی سوم: محاسبه میزان جابه‌جایی زمین در سطح دشت در دوره‌ی زمانی سوم که برای یک بازه زمانی ۳۷۲ روزه (۲۰۲۰/۰۱/۱۹-۲۰۱۹/۰۱/۱۲) می‌باشد (شکل ۶). این بررسی نشان دهنده‌ی میزان جابه‌جایی بین ۰ تا ۵- سانتی‌متر می‌باشد. بیشینه فرونشست در این دوره زمانی در سطح دشت نیز منطبق بر بخش‌های غربی و شمال غربی (جلوگیره

پایین و چقاقاسم و پیر حیاتی) دشت می‌باشد که روند کاهش میزان فرونشست به سمت شرقی دشت نیز در این نقشه مشهود است با این تفاوت که در این دوره میزانی از فرونشست در بخش‌های شرقی دشت نیز مشاهده می‌شود.



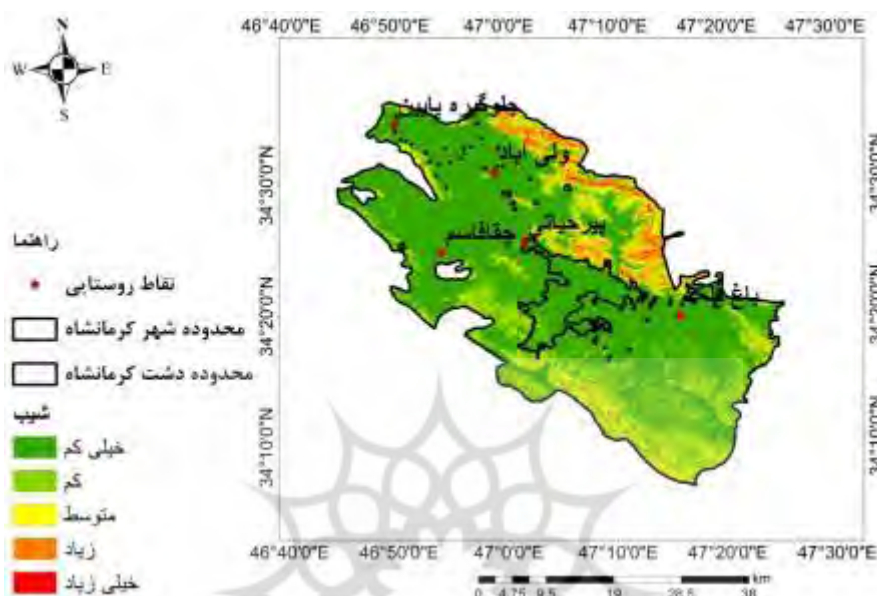
شکل (۶). میزان فرونشست زمین برای دوره ۲۰۱۹/۰۱/۱۲-۲۰۲۰/۰۱/۱۹

نتایج میزان جابه‌جایی برای دوره زمانی چهارم: آخرین دوره زمانی مورد بررسی برای یک بازه زمانی ۳۱۲ روزه (۲۰۲۱/۰۱/۰۱-۲۰۲۰/۰۱/۱۹) می‌باشد. میزان جابه‌جایی محاسبه شده برای این دوره زمانی در محدوده مورد مطالعه ۴ تا ۱۲- سانتی متر می‌باشد (شکل ۷). بیشینه میزان فرونشست در این نقشه نیز در بخش‌های شمال‌غربی (جلوگیره پایین) دشت می‌باشد. به طوری که از بخش‌های غربی به سمت بخش‌های شرقی دشت این میزان فرونشست روندی کاهشی را دنبال می‌کند.



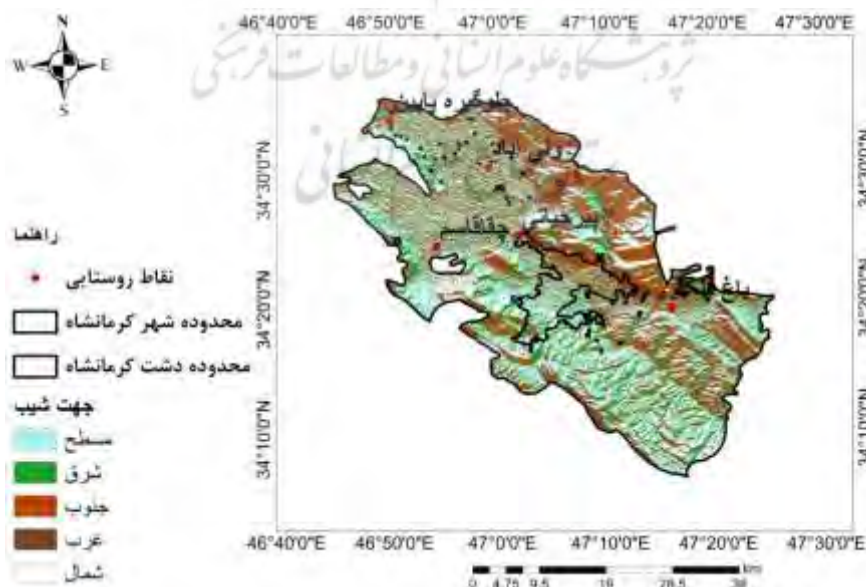
شکل (۷). میزان فرونشست زمین برای دوره ۰۱ زمانی ۲۰۲۱/۰۱/۱۹-۲۰۲۰/۰۱/۱۹

نتایج تحلیل سلسله مراتبی فرونشست زمین: در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد فرونشست زمین در دشت کرمانشاه از ۸ فاکتور مؤثر بر فرونشست جهت استعداد یابی این مخاطره استفاده شد. از عوامل مورد استفاده به منظور پهنه‌بندی میزان فرونشست رویداده در سطح دشت فاکتور شیب و جهت شیب می‌باشد. شیب زمین در ارتباط با نیروی گرانشی زمین است. در واقع مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده سرعت جریان سطحی و میزان نفوذ، رطوبت خاک، میزان آب زیرزمینی حوضه است. در نتیجه سطوح صاف در مقایسه با شیب‌های تند از نظر فرونشست زمین پایداری کمتری دارند (شکل ۸).



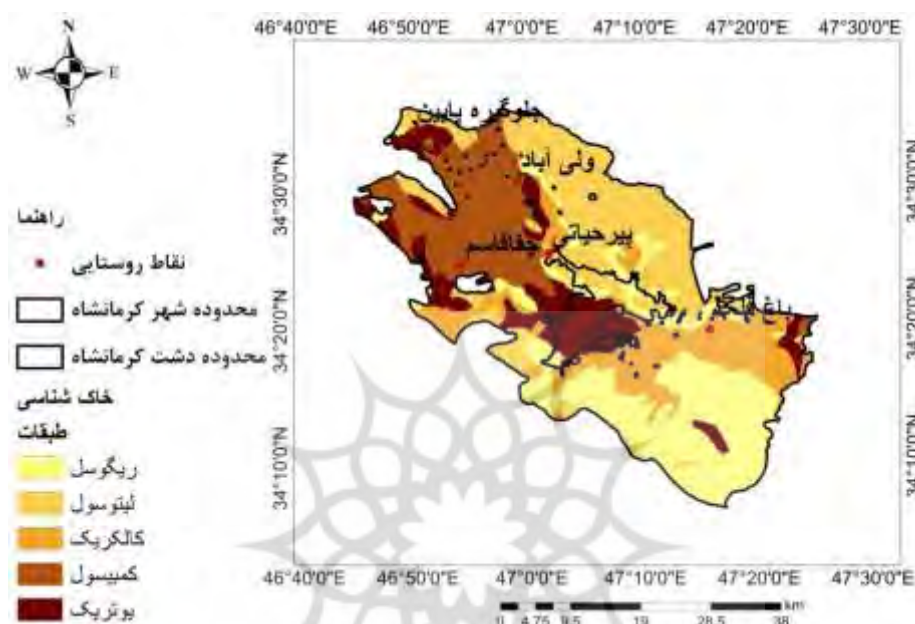
شکل (۸). نقشه شیب منطقه مورد مطالعه

جهت شیب در واقع زاویه زمین است که سطح زمین را در معرض باران و باد و خورشید قرار می‌دهد. جهت تهیه لایه شیب و جهت شیب زمین از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استفاده شد. سپس در محیط جی آی اس به کلاس بندی شد (شکل ۹).



شکل (۹). نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه

عامل دیگری که در میزان فرورانشست رویداده در سطح دشت موثر می‌باشد خاک شناسی و ضخامت رسوبات ریزدانه است. بعد از تهیه لایه خاک شناسی از سازمان آب و خاک لایه های مورد نظر براساس میزان تاثیر که بر فرورانشست دارند کلاس بندی شدند. از میان لایه های خاک شناسی خاک کمبیسول که جز خاک های عمیق با رسوبات سنگین است از نظر میزان فرورانشست منطقه را مستعد تر می‌کند چرا که حاوی مقدار زیادی خاک رس می‌باشد. این خاک بافت متراکمی دارد و به سبب خاصیت ارتجاعی زیاد با جذب آب قابلیت نگهداری آب را در زمان طولانی دارد. سایر رده های خاک جز خاک های کم عمق و سنگریزه دار با بافت سبک تا متوسط هستند که در رده های بعدی اهمیت از نظر فرورانشست قرار می‌گیرند (شکل ۱۰).

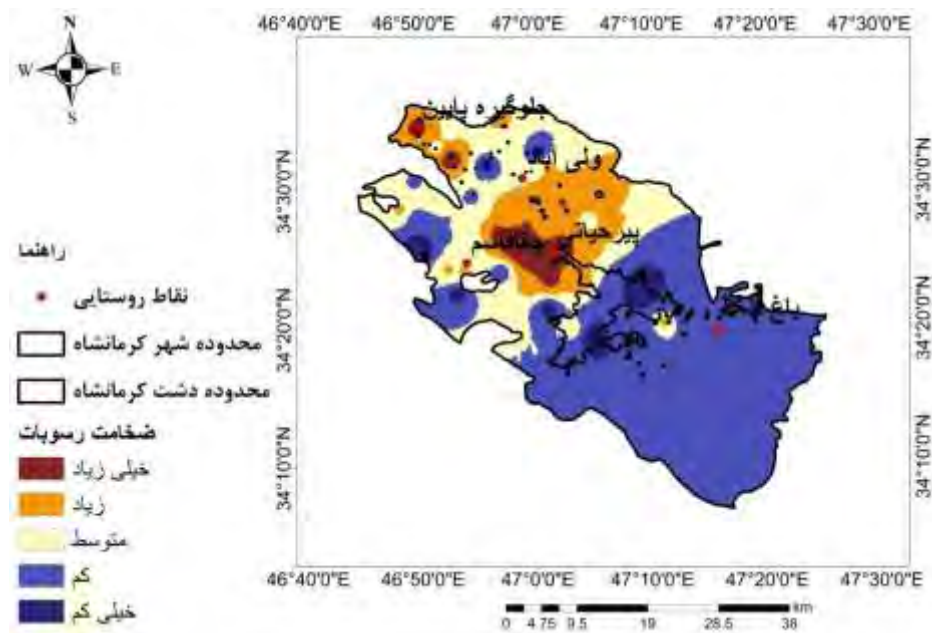


شکل (۱۰). نقشه خاک شناسی منطقه مورد مطالعه

با توجه به اهمیت ضخامت رسوبات ریزدانه در میزان فرورانشست اقدام به تهیه لوگ زمین شناسی چاه‌های پیژومتر در سطح منطقه شد. با تهیه لوگ زمین شناسی، چاه‌های پیژومتر موجود در سطح دشت مورد بررسی قرار گرفت و با به دست آوردن ضخامت لایه‌های ریزدانه (رس و سیلت) هر چاه اقدام به پهنه‌بندی این داده‌ها در سطح دشت شد که با استفاده از معیار کمترین مقدار آر ام اس ای^۱ روش وزن‌دهی معکوس فاصله^۲ با توان ۲ (آر ام اس ای: ۶,۴۹) به عنوان بهترین روش جهت درون‌یابی انتخاب شده است. در نهایت نقشه مورد نظر کلاس بندی شد (شکل ۱۱).

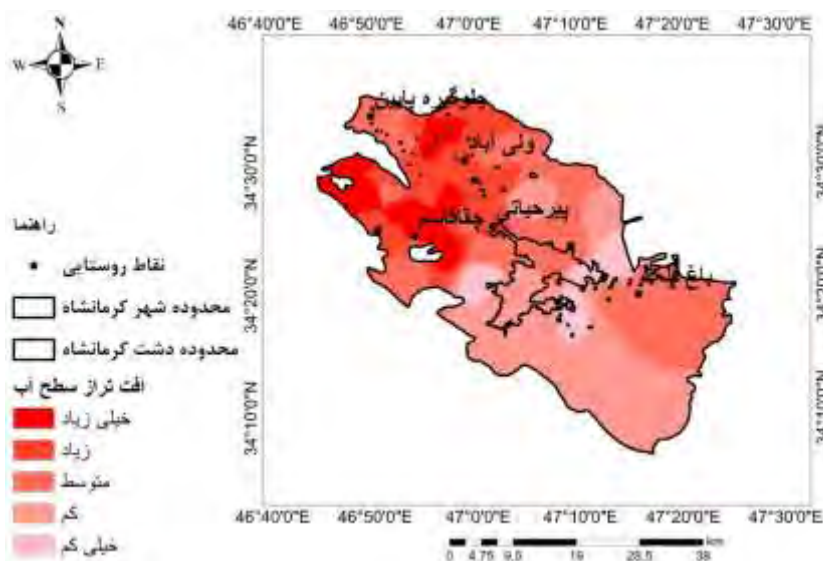
^۱ RMSE

^۲ IDW



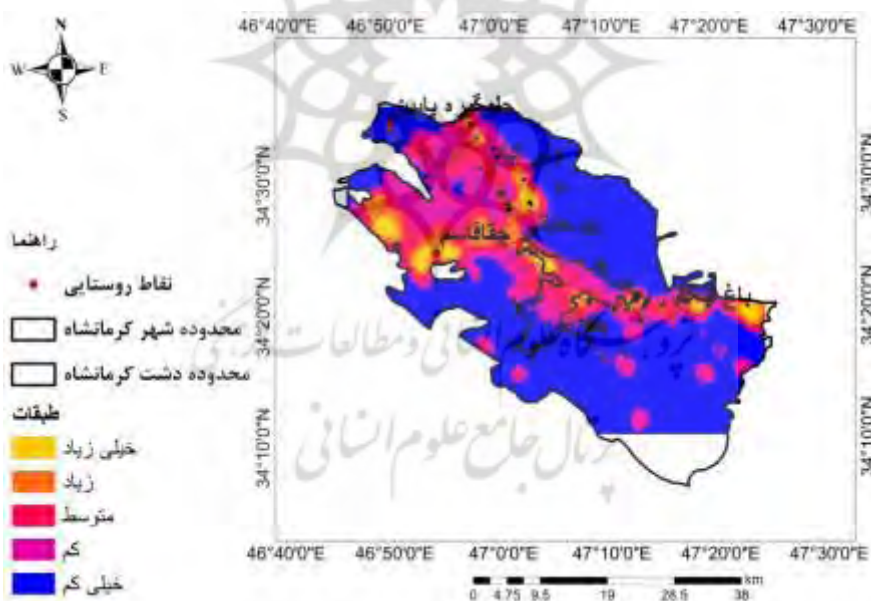
شکل (۱۱). نقشه ضخامت رسوبات ریزدانه منطقه مورد مطالعه

براساس نتایج ارائه شده توسط محققان اعمال فشار زیاد بر آبخوان ممکن است موجب پدیده‌ی فرونشست شود. از این رو به بررسی وضعیت سفره آب‌های زیرزمینی پرداخته شد. بدین منظور دو عامل مهم، میزان افت سطح تراز آب و میزان تراکم تعداد چاه‌های موجود در سطح دشت بررسی شد. کل بار ژئواستاتیکی بر روی یک آبخوان، توسط فشار آب منفذی و تنش‌های رسوبی زیرسطحی متعادل می‌شود. با کاهش سطح سیال، فشار کاهش می‌یابد و توانایی سنگ‌ها برای تحمل بار رسوب شکسته می‌شود. این منجر به تخلیه سیال می‌شود که سپس تشکیلات و رسوبات را در زیر زمین فشرده و متراکم می‌کند. فشردگی لایه‌های زیرسطحی بر سطح زمین تأثیر می‌گذارد و منجر به فرونشست می‌شود (دروس و همکاران، ۲۰۲۲، ۴۳). بدین منظور داده‌های سطح تراز آب ۵۳ چاه پیزومتر موجود در سطح دشت از سازمان آب منطقه‌ای اخذ شد. جهت تهیه نقشه افت سطح تراز آب در بازه زمانی بیست ساله (۱۳۸۰-۱۴۰۰) ابتدا نقشه تراز سطح آب برای سال ۱۳۸۰ با استفاده مدل کرجینگ ساده (آرام اس ای: ۱،۰۶) و نقشه تراز سطح آب سال ۱۴۰۰ با استفاده از وزن دهی معکوس فاصله با توان ۵ (آرام اس ایی: ۹،۱۲) درون‌یابی شده است و در نهایت با تفاضل بین این دو نقشه در محیط جی‌آی‌اس نقشه میزان افت سطح تراز آب برای بازه زمانی ۲۰ ساله تهیه شد (شکل ۱۲).



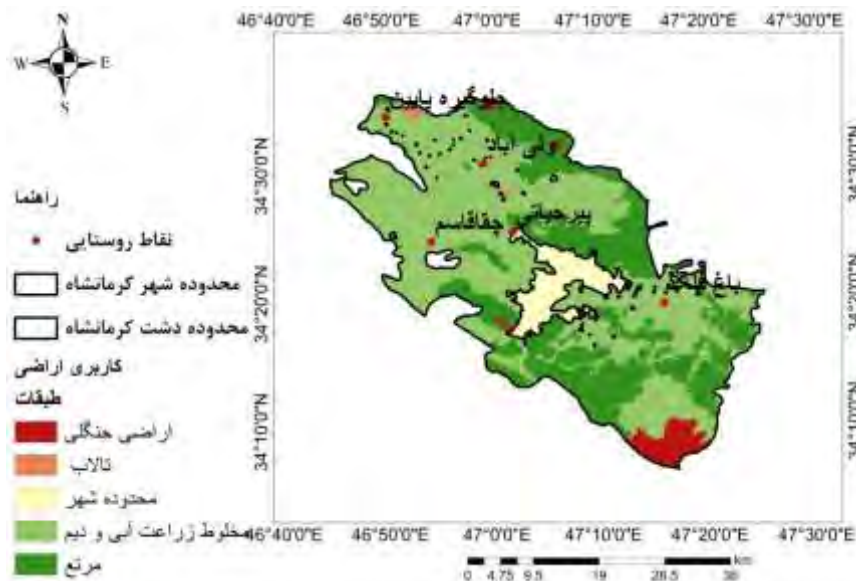
شکل (۱۲). نقشه افت سطح تراز آب منطقه مورد مطالعه

همچنین با توجه به اینکه میزان افت سطح آب رابطه مستقیمی با میزان چاه‌های حفر شده و میزان برداشت از این چاه‌ها دارد. با اخذ داده‌های تعداد چاه‌های مجاز موجود در سطح دشت، نقشه تراکم تعداد چاه‌ها تهیه شد و سپس کلاس بندی شد (شکل ۱۳).



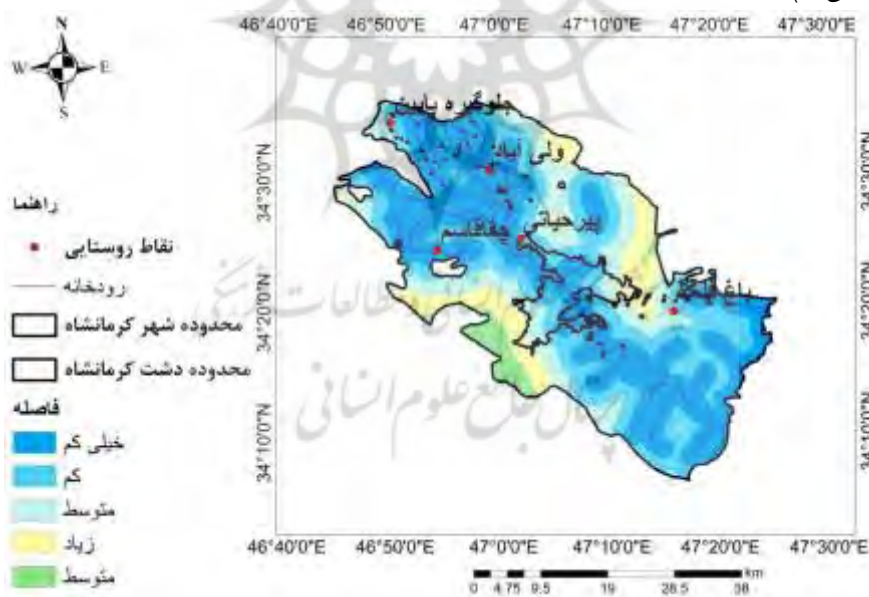
شکل (۱۳). نقشه تراکم چاه منطقه مورد مطالعه

همچنین علاوه بر موارد ذکر شده دو عامل کاربری زمین و فاصله از رودخانه، نیز میزان فرونشست را در سطح دشت تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. کاربری اراضی از جمله عامل انسان‌زایی است که بر میزان فرونشست زمین تاثیر می‌گذارد. نقشه کاربری اراضی دشت نشان دهنده این موضوع است که بخش‌های زیر کشت محصولات کشاورزی به دلیل تراکم تعداد چاه‌ها و فشار به سطح آبخوان‌ها مناطق را مستعد فرونشست می‌کند که در نواحی مرکزی دشت در حاشیه ناحیه شهری پراکنده شده است و کمترین میزان آن در محدوده تالاب در نظر گرفته شده است (شکل ۱۴).



شکل (۱۴). نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

از جمله عامل موثر دیگر که بر میزان فروروشست‌زمین تاثیر می‌گذارد، دوری و نزدیکی به رودخانه و جریان‌های سطحی می‌باشد. تاثیرپذیری این عامل بدین صورت می‌باشد، مناطق نزدیک به یک رودخانه با فروروشست و رانش زمین به دلیل فرسایش خاک ناشی از جریان آب مواجه می‌شوند. از این رو، هر چه منطقه به رودخانه نزدیکتر باشد، احتمال وقوع فروروشست زمین بیشتر می‌شود (شکل ۱۵).



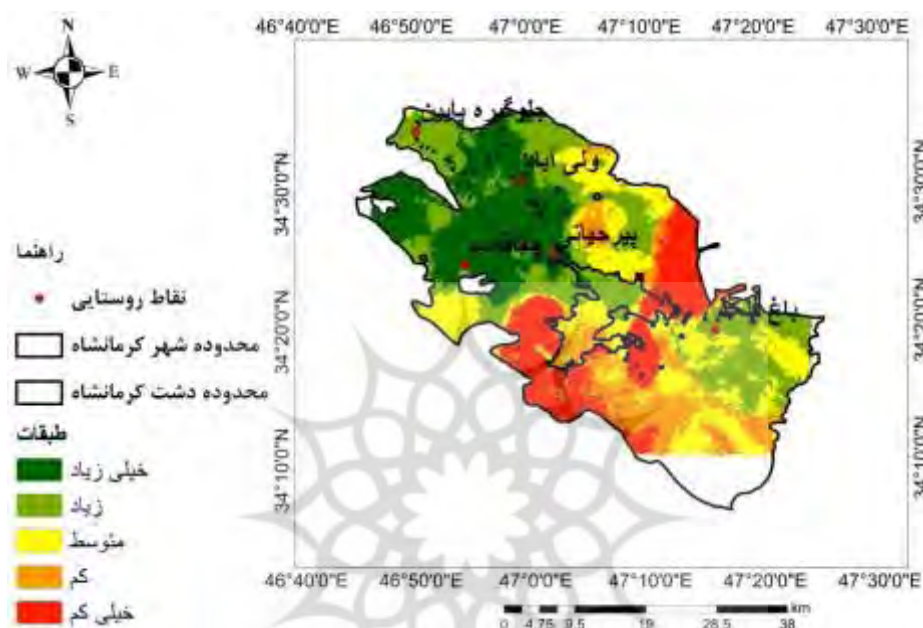
نقشه (۱۵). نقشه فاصله از رودخانه منطقه مورد مطالعه

سپس با توجه به نتایج پرسشنامه‌ای که توسط کارشناس مربوطه تکمیل شده بود هر لایه اطلاعاتی با توجه به میزان تاثیر و اهمیتی که در میزان فروروشست رویداده در سطح دشت دارند ارزش گذاری شد. از میان پرسشنامه‌های تکمیل شده تنها از پرسشنامه‌هایی که شاخص سازگاری آن‌ها کمتر از ۰٫۱ بود در محاسبات استفاده شد. شاخص سازگاری به دست آمده برای ارزش متغیرهای در نظر گرفته شده 0.075294 می‌باشد و نسبت سازگاری به دست آمده 0.054083 است که مقدار حاصل کمتر از ۰٫۱ می‌باشد که نشان دهنده سازگاری ارزش‌ها و تعداد متغیرها می‌باشد. در نهایت ارزش هر معیار با بهره‌گیری از نرم‌افزار اکسپرت چویس و با توجه به مقایسات زوجی معیارها به دست آمد (جدول ۲).

جدول (۲). مقادیر وزنی معیارها

معیار	افت سطح آب	ضخامت رسوبات	فاصله از رودخانه	کاربری اراضی	تراکم چاه	خاک شناسی	شیب	جهت شیب
وزن اصلی	۰,۴۳۲۹۰۴	۰,۱۳۴۲۰۵	۰,۱۱۴	۰,۱۵۱۵۳۳	۰,۰۶۰۴۴۶	۰,۰۴۴۹۶۱	۰,۰۳۵۸۰۴	۰,۰۲۶۱۴

همچنین جهت به دست آوردن نقشه نهایی پهنه بندی خطر فرونشست زمین ارزش وزنی هر معیار در محیط جی آی اس در نقشه به دست آمده از هر لایه ضرب و در آخر تمامی معیارها با هم جمع می شوند. نقشه نهایی با توجه به میزان ارزش به دست آمده از هر پیکسل به پنج کلاس (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، خیلی کم) طبقه بندی شد (شکل ۱۶).



شکل (۱۶). نقشه پهنه بندی فرونشست زمین

با توجه به نقشه نهایی به دست آمده در روش تحلیل سلسه مراتبی و با استفاده از فاکتورهای موثر در میزان فرونشست زمین، بخش های غربی و شمال غربی (جلوگیره پایین و چقاقاسم) دشت احتمال فرونشست خیلی زیاد تا زیاد را نشان می دهد که تحت تاثیر ضخامت زیاد رسوبات ریزدانه، نزدیکی به رودخانه، کاربری کشاورزی، شیب کم و خاک کمبیسول منطقه را به طور ذاتی مستعد فرونشست کرده است. با بررسی و مقایسه بین دو نقشه میزان افت سطح آب های زیرزمینی و میزان فرونشست زمین محاسبه شده با استفاده از روش تداخل سنجی راداری این نتیجه حاصل شد که بیشینه فرونشست زمین در مناطقی رخ داده است که علاوه بر میزان افت سطح آب، ضخامت رسوبات ریزدانه در آن نواحی نیز زیاد باشد. از نظر احتمال فرونشست زمین در بخش های غربی دشت به سمت شرق دشت میزان فرونشست زمین روندی کاهش پیدا می کند. به طور کلی ۲۱,۹ درصد از مساحت کل دشت در منطقه با احتمال فرونشست خیلی زیاد و ۲۷,۲ درصد با احتمال فرونشست زیاد قرار دارد (جدول ۳).

جدول (۳). مساحت و درصد طبقات فرونشست زمین

طبقه بندی	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)
خیلی زیاد	۲۱,۹	۳۳۶,۵۷
زیاد	۲۷,۲	۴۲۱,۹
متوسط	۲۱,۴	۳۳۱,۱۱
کم	۱۳,۴۶	۲۰۸,۱۳
خیلی کم	۱۶,۰۴	۲۴۸,۰۳

نتیجه‌گیری

فرونشست زمین به عنوان یک مشکل جهانی شناخته شده است و مطالعات فشرده در سراسر جهان برای شناسایی و پایش خطر مشکل در حال انجام است. در این پژوهش نیز سعی شده است که با بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور میزان فرونشست زمین برای یک بازه زمانی ۴ سال در دشت کرمانشاه محاسبه و اندازه‌گیری شود. جهت انجام این ارزیابی از ۵ تصویر سنتینل ۱ در مدار صعودی در ۴ دوره زمانی استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان دهنده‌ی میزان فرونشست برای دوره زمانی اول (۲۰۱۸/۰۱/۰۵-۲۰۱۸/۰۱/۰۵) ۱۷ سانتی‌متر، برای دوره زمانی دوم (۲۰۱۸/۰۱/۰۵-۲۰۱۹/۰۱/۱۲) ۸ سانتی‌متر، برای دوره زمانی سوم (۲۰۱۹/۰۱/۱۲-۲۰۲۰/۰۱/۱۹) ۵ سانتی‌متر و در دوره آخر (۲۰۲۰/۰۱/۱۹-۲۰۲۰/۰۱/۱۹) ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. توزیع مکانی بیشینه فرونشست زمین در بخش غربی و شمال غربی دشت می‌باشد. سپس جهت پتانسیل‌سنجی فرونشست زمین و تعیین عوامل موثر بر آن در منطقه اقدام به پهنه‌بندی احتمال خطر فرونشست در دشت شد. بدین منظور از هشت فاکتور موثر بر میزان فرونشست شامل: میزان افت سطح آب، ضخامت رسوبات ریزدانه، شیب، کاربری اراضی، تراکم چاه، فاصله از رودخانه، جهت شیب به منظور پهنه‌بندی سطح دشت استفاده شد. پس از وزن‌دهی به هر لایه براساس نظر کارشناسان نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر به پنج کلاس با احتمال خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، خیلی کم طبقه‌بندی شد. نتایج حاصل از این نقشه نشان دهنده‌ی این موضوع است که ۲۱٫۹ درصد از مساحت دشت در محدوده خطر خیلی زیاد و ۲۷٫۲ درصد دشت در محدوده با احتمال خطر زیاد در بخش‌های غربی و شمال غربی دشت است. این بخش از دشت با کاربری کشاورزی و منطبق بر افت تراز سطح آب و ضخامت رسوبات ریزدانه زیاد توامان، با تراکم زیاد تعداد چاه و نزدیکی به رودخانه همراه با شیب کم و نوع کاربری کشاورزی می‌باشد. ۳۰ درصد از مساحت دشت شامل طبقه با احتمال فرونشست کم و خیلی کم می‌باشد. این محدوده شامل بخش‌های شرقی و جنوب شرقی است با کمترین میزان افت آب و ضخامت کم رسوبات ریزدانه و کمترین میزان تراکم تعداد چاه می‌باشد. مقایسه نتایج هر دو روش اندازه‌گیری و پهنه‌بندی کاملاً برهم منطبق است بدین صورت که نشان‌دهنده‌ی صحت نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی تفاضلی می‌باشد. در هر دو روش بیشینه میزان فرونشست در بخش‌های غربی و شمال غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که برداشت بی‌رویه آب‌های زیر زمینی در کنار ویژگی‌های زمین‌شناسی عامل اصلی فرونشست در سطح دشت می‌باشد. با توجه به روند فرونشست زمین در سطح دشت نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی جهت پیشگیری از تشدید این مخاطره در سطح منطقه می‌باشد.

منابع

- احمدی، نعیمه؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره (۱۳۹۷). مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن، *سنجش از دور و GIS*، سال دهم، شماره سوم.
- اکبری، محمود؛ (۱۴۰۰). پایش فرونشست زمین تحت تاثیر عوامل زمین‌شناسی و منابع آب با روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: شهر اراک)، *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*، سال دهم، شماره ۳، بهار ۱۴۰۰: ۱۱۶-۱۳۱.
- خورشید دوست، علی محمد؛ رزمی، ربابه؛ معالی اهری، نسیم؛ عباس زاده، کریم (۱۳۹۶). مطالعه تاثیر نوسات سطح آب زیرزمینی بر پدیده فرونشست در منطقه قلعه (آذربایجان شرقی، تسوج)، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۱، شماره ۶۰: ۹۳-۷۳.
- رجبی، معصومه؛ روستایی، شهرام؛ جوادی، سیدمحمد رضا (۱۳۹۹). ارزیابی میزان فرونشست در شهرهای غربی استان همدان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۶، شماره ۸۱: ۸۱-۹۶.
- رجبی، معصومه؛ روستایی، شهرام؛ جوادی، سیدمحمد رضا (۱۴۰۰). ارزیابی نرخ فرونشست همدان-بهار و ارتباط آن با پارامترهای محیطی، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، سال دهم، شماره ۳: ۱۷۵-۱۸۸.
- زندى، رحمان؛ فرزین کیا، فرزانه؛ شفیعی، نجمه (۱۳۹۸). *فرونشست زمین و تداخل سنج راداری*، انتشارات ماهواره، چاپ اول: ۸۲.
- شادفر، صمد؛ نصیری، اسماعیل؛ چیتگر، سکینه؛ احمدی، علی (۱۴۰۱). پهنه بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) شهر بوئین زهرا، *فصلنامه جغرافیای سرزمین*، سال دوازدهم، شماره ۴۸.

عابدینی، موسی (۱۳۹۶). مبانی فرونشست زمین مخاطرات هیدروژئومورفوزی و مدیریت محیط، انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی، چاپ یکم، صص ۱-۲۳۰.

عابدینی، موسی؛ عبادی، الهام؛ قلیعه، احسان (۱۴۰۰). بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۲۶، شماره ۷۹: ۲۲۰-۲۰۷.

علایی طالقانی، محمود؛ سنجر، فرشید و جلیلیان، آذر (۱۳۸۹). مکانیابی بهینه برای دفع بهداشتی پسماندهای جامد شهری کرمانشاه به روش تجربی براساس روش ژئومورفولوژی منطقه، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، سال دوم، شماره ۶.

علایی طالقانی، محمود (۱۳۸۲) ژئومورفولوژی/ایران، تهران، نشر قوس، چاپ اول، صص ۱۴۴.

غلامی، محمدعلی. پیش بینی مکان‌های فرونشست احتمالی در دشت کرمانشاه، ژئومورفولوژی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، سال ۱۳۹۴.

فخارزاده تربتی، امیررضا. بررسی و ارزیابی فرونشست دشت سبزوار با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری InSAR و مقایسه آن با داده‌های GPS و ترازابی گرایش ژئودزی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، سال ۱۳۹۶.

گلی، علی؛ مرادی، مریم؛ دهقانی، مریم (۱۳۹۸). ارزیابی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی ناشی از فرونشست زمین در استان فارس، مجله پژوهش و برنامه ریزی روستایی، سال ۸، شماره ۴، پاییز ۱۳۹۸، شماره پیاپی ۲۷.

- Andriani, I., Dinar, D.A.P. & Azhar, K.A., (2018), **Evaluation of Land Subsidence Impact at Lowland Areas Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Method**, E3S Web of Conferences 68, 04017(2018) *1st SRICOENV 2018*.
- Bhattacharai, R., Kondoh. A.,(2017), **Risk Assessment of Land Subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, Using Remote Sensing and GIS**, Advances in Remote Sensing, 2017, 6, 132-146.
- Deros, S., Din, N., Norzeli, S., Omar, R., Usman, F., Hamim, S.,(2022), **Land Subsidence Susceptibility Projection for Palembang Slum Area by Complex MCDM-AHP Technique**, J. Eng. Technol. Sci., Vol. 54, No. 1, 2022, 220104.
- Hu, B., Yang, B., Zhang, X., Chen, X., Wo, Y.,(2019), **Time-Series Displacement of Land Subsidence in Fuzhou Downtown, Monitored by SBAS-InSAR Technique**. Journal of Sensors Volume 2019, Article ID 3162652, 12 pages.
- Hu, R.L, Yue, Z.Q, Wang, L.C, & Wang, S.J.,(2004), **Review on current status and challenging issues of land subsidence in China**. Engineering Geology, 76: 65- 77
- Liu, L., Yu, J., Chen, B., Wang, Y.,(2020), **Urban subsidence monitoring by SBAS-InSAR technique with multi-platform SAR images: a case study of Beijing Plain, China**, European Journal of Remote Sensing.
- Massonnet, D. & Feigl, K. L.,(1998), **Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface**. Rev. Geophys. 36, 441-500.
- Yastika, P., Shimizu, N., Pujianiki, N., Temaja, I., Antara, I, Osawa, T.,(2019), **Detection of silent subsidence over extensive area by SBAS DInSAR: a case study of Southern Bali, Indonesia**, E3S Web of Conferences 153, 02003, 2020, 530 CORECT-IJSS 2019.