

## Research Paper



## Estimation and evaluation of land subsidence risk in the urban area of Alborz province



Sayad Asghari Saraskanroud,<sup>1\*</sup> Fariba Esfandiari,<sup>2</sup> Mehdi Faal Naziri,<sup>3</sup> Batool Zinali<sup>4</sup>

1. Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. [sayyad.asghari21@gmail.com](mailto:sayyad.asghari21@gmail.com)
2. Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. [esfandyari@uma.ac.ir](mailto:esfandyari@uma.ac.ir)
3. Ph.D student, Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, [Iran.mehdifn1373@gmail.com](mailto:Iran.mehdifn1373@gmail.com).
4. Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. [Zeynali.b@uma.ac.ir](mailto:Zeynali.b@uma.ac.ir)

## Keywords

**Fronshest, radar interferometry, zoning, Alborz province.**

**Receive: 2024/07/20**

**Accept: 2024/08/31**

**Available: 2025/01/19**

## ABSTRACT

Land subsidence refers to the gradual or sudden lowering of the earth's surface as a result of various factors such as tectonic activities, mining, oil and gas fields, and illegal extraction of underground water. In Alborz province, the growing trend of population and migration in recent years has added to the increase in demand and the amount of water withdrawal from the underground water table, so it is subject to subsidence due to the sharp drop in the level of underground water. In this research, subsidence was first evaluated using the radar interferometric technique, and then, prone areas were zoned with a multi-criteria algorithm in the time frame of 2016 and 2023. The results of information extraction with interferometric technique showed that the average amount of subsidence in the urban boundaries of Saujblag, Karaj, Nazarabad, Chaharbagh and Fardis is between 15 and 320 mm. According to observations, the highest amount of subsidence is in the eastern part and then in the southern and southwestern parts. According to the estimated results of subsidence risk zoning; The parameters of water level drop, land use, slope and geology, respectively, with weight coefficients of 0.16127, 0.141875, 0.130145 and 0.128474, are the most important factors in creating the risk of subsidence in the study area, which are 31 and 23%, respectively. From the range, it has a very high and high probability of danger. Finally, it can be said that the most important factor in subsidence in the studied area is excessive use of underground water and the drop in water level. In some urban areas, such as Hew and Goch Hesar, Malekabad-Mehrshahr-Mehrtila-Kamalshahr, and Mohammadshahr, the highest risk of subsidence can be seen.

\* Corresponding Author: Sayyad Asghary Saraskanroud E-mail: [sayyad.asghari21@gmail.com](mailto:sayyad.asghari21@gmail.com)

How to cite this article: (2025). Estimation and evaluation of land subsidence risk in the urban area of Alborz province.

Hydrogeomorphology, 11(40): 135 – 161.

DOI:10.22034/HYD.2024.62570.1751



Copyright: © 2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

## Introduction

According to the definition of the Geological Institute of the United States of America, the phenomenon of land subsidence includes the collapse or downward subsidence of the earth's surface, which can have a small displacement vector and occurs gradually and instantaneously on a large scale (US Geological Survey, 2011). The most important cause of the regional subsidence of the land surface in the sedimentary basins of arid and semi-arid regions is the condensation and compaction of sediments due to excessive extraction of underground water table resources (Zhou et al., 2015). If the watery clay layers are placed between the sand layers, this phenomenon will be observed more widely and more acutely (Liu et al., 2006). With the decrease in the underground water level, the increase in effective stress caused by the decrease in pore water pressure causes subsidence. Usually, it takes time to reduce the pore water pressure and increase the effective stress; Therefore, following the reduction of the piezometric water level, subsidence will occur with a time delay (Peter et al., 2017). Subsidence caused by the drop in fluid level mainly takes place in unconsolidated or semi-consolidated sediments that are adjacent to sand layers (Salehi et al., 2013).

## Methodology

In this research, for the convenience of investigation and study, the materials and methods section is divided into two sections: radar interferometry and the estimation section of high-risk points zoning, which is provided in the following.

First stage (radar interferometry)

The current research is of an applied type and its research method is an analysis based on the integration of data analysis, geographic information system and the use of multi-criteria analysis techniques. GIS Arc, Ecognition, ENVI, Idrisi and Excel software have been used for image processing and data analysis. In this research, the images of Sentinel 1, which is located in the C band of microwave waves, were taken. In the current research, two SLC images related to the years 2016 and 2023 were downloaded from the site and used. Next, Snap software was used for the necessary processing.

The second stage (estimation of the zoning of high-risk points)

In this research, in order to investigate the relationship between the subsidence of the study area and the state of underground water sources, the groundwater loss was investigated. For this purpose, the information related to 36 wells of observation wells of the piezometric level of the city boundary was prepared from the regional water organization of Alborz province. Also in order; It is related to the water depth and water level map of the studied area. After examining the fluctuation of the level of the urban area of Alborz province, in the last six years, the annual drop of underground water was calculated and then a zoning map of the fluctuations of the piezometric level was prepared using the kriging method.

## Results and Discussion

After the interferometry steps, the phase difference was converted to vertical displacement and it has been converted to vertical displacement in the metric system. It also indicates the final output resulting from the estimation of the subsidence amount using the radar interferometric technique, which according to the output map, the positive values and in brown color are the displacement related to the movement of the earth towards the radar sight (uplift) and the negative values to The white and purple colors indicate that the earth's surface is moving away from the sensor in the direction of the radar sight (subsidence). The result of the study of the amount of subsidence between zero and 300 mm during the last 6 years shows that according to the above map, the highest amount of subsidence is in the urban area of Alborz province (in the area of Mehrshahr (Hossein Abad region)-Golshahr-Rajai Shahr). , Khormadasht, Mohammad Shahr) in the amount of 100 to 300 mm and in the southwestern part of the area (Mahadasht) in the amount of 20 to 80 mm, and in the western area of Alborz province of Nazarabad city in the amount of 30 to 90 mm, which is in the form

of lands agriculture and south of Karaj-Qazvin highway in the area of Haji Abad village in the amount of approximately 250 to 300 mm and in the area of Kamalshahr in Zafar region in the amount of 40 to 480 mm per year and in the urban area of Saujblag in Hashtgerd district in the amount of 100 to 230 mm meter is concentrated. In zoning the risk of subsidence, according to the results, the criteria of water level drop, land use, slope and geology received the most weight and importance, and considering that in CRITIC weighting, the weight of the criteria, According to the criteria maps and the degree of correlation, contrast and standard deviation between the used information layers, the use of this method in the weighting of the criteria in the present research can solve the problem of the independence of traits from to resolve each other that exists during pairwise comparison within the framework of hierarchical analysis process and network analysis process. According to the result of using the Aras method, 14.302 square kilometers of the range area is in the very high risk class and 192.09 square kilometers is in the high risk class. Examining the relationship between the ground water level drop with subsidence and matching the areas with high subsidence rate with the location of the wells also shows that there is a direct relationship between the drop in the water level of the wells and the amount of subsidence in the area and their correlation coefficient is 0.89. be And the correlation value between the subsidence risk zoning map and the water level drop map of the wells showed their correlation coefficient of 0.98. As a result, the more the underground water is withdrawn; The empty space in the basement will also increase, which will lead to subsidence

## Conclusions

The results of the present study with the presented technique, with the results of the research of people such as; Abedini et al. (1401), Asghari et al. (1401), Asghari et al. (1401), Barouq et al. In this way, they also believe that multi-criteria analysis methods are highly effective for identifying subsidence areas. According to the obtained results, it can be said that the most important factor involved in increasing the amount and potential of subsidence in the study area is the excessive exploitation of underground water and the drop in the water level, and therefore, the results of the present study with the results of the studies conducted by; Torani et al. (2017), Yazdani et al. (2018), Montazerion and Aslani (2018), Ebrahimi et al. (2019), Asghari and Mohammadzadeh (2014), Bhattarai (2017), Tang Min et al. colleagues (2020), Ranjbar et al. (2021), based on the lack of proper control and management of underground water resources and reserves and the drop in the underground water level and, following that, the increase in subsidence, it is consistent. Due to the fact that land subsidence can cause irreparable financial and human losses and damage many surface and subsurface structures in urban areas and its suburbs, in the urban area of Alborz province, therefore, it should be Long-term solutions in the form of reforming water resources management methods and short-term solutions in the form of preventing the extraction of underground water tables in various forms and continuous monitoring of areas prone to this phenomenon, creating underground dams in order to increase the water level and reduce subsidence, water containment surface water and implementation of artificial feeding plans, confiscation of unauthorized drilling equipment, provision and installation of smart meter devices, establishment of water collection organizations and support of these organizations, creation and establishment of local water market and organization of drilling companies, strict control of water consumption and change of consumption pattern, It should be taken into consideration by relevant authorities and local residents. According to the mentioned cases, it is necessary to deal with the phenomenon of subsidence by optimal management of the water source and preventing the drilling of unauthorized wells in the region, which definitely requires the cooperation of various institutions and organizations in order to preserve and maintain the water resources. According to Mr. Dr. Pour Khosravani's article and the graphs in the research, if the cause of subsidence can be attributed to soft crustal movements, but the decrease in the amount of underground water and underground resources in general is definitely not ineffective in the subsidence of the region. The management of underground water resources is definitely an important issue in the field of preventing the occurrence of such natural phenomena on the surface of the earth, because in case of non-management of water resources, competent organizations must bear higher costs to cover the damages caused. In this research, according to the follow-up carried out by the country's mapping organization

and the Ministry of Roads and Urban Development, the amount of subsidence in Alborz province was announced as approximately 100 to 400 mm, which was confirmed by checking the sites and reports available in reliable news agencies. And the announcement of the regional water department of Alborz province, as well as the subsidence that took place during the past years in the announced areas (Figures 2, 3, 4 and 5), as well as previous articles and records worked in Alborz province in the mentioned areas, as well as studies (Muntzariyoun and Aslani, 2018) and (Barouq and Fathullah Zadeh, 1401) in Alborz province, it can be said that the results estimated in this research are acceptable.

## مقاله پژوهشی



## برآورد و ارزیابی خطر فرونشست زمین در محدوده حریم شهری استان البرز



صیاد اصغری سراسکانرود<sup>\*</sup>، فریبا اسفندیاری<sup>۱</sup>، مهدی فعال نذیری<sup>۲</sup>، بتول زینالی<sup>۳</sup>

1- استادگروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

2- استاد گروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران [esfandyari@uma.ac.ir](mailto:esfandyari@uma.ac.ir)

3- دانشجوی ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران [Iran.mehdify1373@gmail.com](mailto:Iran.mehdify1373@gmail.com)

4- استادگروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

## کلیدواژه‌ها

فرونشست، تداخل سنجی راداری، پهنه بندی، استان البرز.

## چکیده

فرونشست زمین به پایین رفتن تدریجی یا ناگهانی سطح زمین در اثر عوامل مختلفی از قبیل فعالیت های تکتونیکی، استخراج معادن، میادین نفت و گاز و برداشت بی رویه آب زیرزمینی اطلاق می شود. در استان البرز نیز روند رو به رشد جمعیت و مهاجرت در سال های اخیر بر افزایش تقاضا و حجم برداشت آب از سفره های آب زیرزمینی افزوده، لذا با افت شدید سطح آب های زیرزمینی در معرض فرونشست می باشد. در این پژوهش ابتدا ارزیابی فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و در ادامه، نسبت به پهنه بندی مناطق مستعد با الگوریتم چند معیاره در بازه زمانی ۲۰۱۶ و ۲۰۲۳ اقدام گردید. نتایج استخراج اطلاعات با تکنیک تداخل سنجی نشان داد میانگین میزان فرونشست در محدوده حریم شهری شهرستان های ساوجبلاغ و کرج و نظرآباد و چهارباغ و فردیس، مقدار بین ۱۵ الی ۳۲۰ میلی متر می باشد. که با مشاهدات صورت گرفته بیشترین میزان فرونشست در بخش شرقی و سپس در بخش جنوبی و جنوب غرب است. با توجه به نتایج برآورد شده از پهنه بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین شناسی، به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۶۱۲۷، ۰/۱۴۱۸۷۵، ۰/۱۳۰۱۴۵ و ۰/۱۲۸۴۷۴ مهم ترین عوامل در ایجاد خطر فرونشست در محدوده مطالعاتی بوده که به ترتیب ۳۱ و ۲۳ درصد از محدوده، دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد می باشد. نهایتاً می توان گفت مهمترین عامل اصلی در فرونشست در محدوده مورد مطالعه مصرف بی رویه از آب های زیرزمینی و افت سطح آب می باشد. که در برخی مناطق شهری مانند هیو و قوچ حصار و ملک آباد-مهرشهر-مهرویلا-کمالشهر و محمدشهر بیشترین میزان خطر فرونشست نیز قابل مشاهده است

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

\*نویسنده مسئول: صیاد اصغری سراسکانرود [S.asghari@uma.ac.ir](mailto:S.asghari@uma.ac.ir) | ارجاع به این مقاله: اصغری سراسکانرود، صیاد، اسفندیاری، فریبا، فعال نذیری، مهدی، زینالی، بتول (۱۴۰۳). برآورد و ارزیابی خطر فرونشست زمین در محدوده حریم شهری استان البرز. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۴۱): ۱۶۱-۱۳۵.

DOI:10.22034/HYD.2024.62570.1751



Copyright: © 2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

طبق تعریف انستیتو زمین شناسی ایالت متحده آمریکا<sup>۱</sup> پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش<sup>۲</sup> یا فرونشست رو به پایین سطح زمین است که می تواند دارای بردار جابجایی اندکی باشد و در مقیاس بزرگ به صورت تدریجی و آنی رخ می دهد (سازمان زمین شناسی آمریکا، ۲۰۱۱: ۳۴). مهمترین علت فرونشست منطقه ای سطح زمین در حوضه های رسوبی مناطق خشک و نیمه خشک، متراکم شدن و فشرده گی رسوبات در اثر برداشت بی رویه از منابع سفره های آب زیرزمینی است (ژو و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۲). چنانچه لایه های رسی آبدار بین لایه های ماسه ای قرار گرفته باشند، این پدیده به صورت گسترده تر و حادث تر مشاهده خواهد شد (لیو و همکاران، ۲۰۰۶: ۴۴). با کاهش تراز آب زیرزمینی، افزایش تنش موثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی موجب ایجاد فرونشست می شود. معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش موثر زمان بر است؛ بنابراین به دنبال کاهش سطح آب پیژومتری، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد (پیتر و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۲۹). فرونشست ناشی از افت سطح سیال عمدتاً در رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته که در مجاورت لایه های شن و ماسه قرار دارد صورت می گیرد (صالحی و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۹). در مناطقی که رسوبات ضخامت چندانی ندارد و برداشت آب زیرزمینی به صورت بی رویه ادامه دارد، خطواره ها و شکاف ها در سطح اراضی مخصوصاً اراضی کشاورزی مشاهده می شود که به نام پدیده شق شناخته شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶: ۷۸). نتایج حاصل از فرونشست زمین ممکن است سبب ضرر اقتصادی چشمگیر و خسارت گسترده های در ساختمان ها، جاده ها و زیرساخت ها شود (علیپور، ۲۰۰۸: ۲۳، چاترجی، ۲۰۱۵). پوشش سراسری و قدرت تفکیکی مکانی خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول، این روش را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه و اندازه گیری تغییرات سطح زمین در اثر پدیده های مختلف زمین شناسی همچون زلزله، فرونشست زمین، زمین لغزش و ... مطرح کرده است (شیرانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۱۲). و همچنین، برای کشف طیف وسیعی از گزینه ها از نظر درگیری های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM استفاده می شود (اهر<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۵). در این روش های تصمیم گیری برای بهینه سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می شود (جورجیو و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۳) (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۶: ۶۱۴). لذا می توان گفت، استفاده از سیستم های اطلاعات جغرافیایی و روش های تصمیم گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می تواند باعث تسریع در روند برنامه ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد. با توجه به اهمیت موضوع در سال های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه فرونشست صورت گرفته است. کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، به بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت آب های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS پرداختند و نتیجه این پژوهش نشان داد بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فرونشست در مناطق با برداشت زیاد، آبرفت های ضخیم و مناطق پست دشت مشاهده می شود. باروق و فتح اله زاده (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آبهای زیر زمینی در کلان شهر کرج در بازه زمانی (۲۰۱۴ و ۲۰۲۱) پرداختند. نتایج مطالعه آن ها نشان داد در کلان شهر کرج حداقل مقدار تغییرات سطح زمین بین ۱۴۵- تا ۱۵ میلی متر بوده است و بیشترین میزان فرونشست در بخش غربی منطقه مورد مطالعه یعنی مهرشهر رخ داده است که مقدار آن ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی متر است. عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی ارزیابی و پهنه بندی فرونشست شهرستان نمین در بازه زمانی سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ با استفاده از تداخل سنجی راداری و تکنیک چند معیاره آراس پرداختند نتایج مطالعه آن ها نشان داد، در بازه زمانی مورد بررسی ۰/۳۷ میلی متر فرونشست در شهرستان نمین ایجاد گردیده که بیشترین مقدار فرونشست در بخش مرکزی و شمال غرب و شمال شرق شهرستان متمرکز است. باروق و فتح اله زاده (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی ارتباط فرونشست زمین و تغییرات تراز آب های زیر زمینی با استفاده از تداخل سنجی راداری در شهر مشهد در بازه زمانی ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱ پرداختند که نتایج پژوهش آن ها نشان داد بیشترین میزان جابه جایی زمین بین ۷۷- میلی متر تا ۸+ میلی متر بوده که مناطق دارای فرونشست در بخش های شمالی شهر مشهد قرار گرفته اند. متدین و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به ارزیابی فرونشست زمین در دشت گرگان پرداختند که نتایج پژوهش آن ها نشان داد که بیشترین میزان فرونشست زمین در مناطقی قرار دارد که تقاضای آب برای کشاورزی و تراکم چاه های کشاورزی جهت پمپاژ آب زیرزمینی بیشترین میزان را دارد. که نهایتاً نتیجه گرفتند مهمترین عامل در ایجاد فرونشست این منطقه، مصرف بی رویه آب های زیرزمینی و به تبع آن افت سطح آب زیرزمینی است که در طی سال های متوالی باعث بروز پدیده فرونشست گردیده است. مین و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام، از طریق تکنیک تداخل سنجی راداری در بازه سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ پرداختند و با توجه به نتایج حاصله، افت سطح آب زیرزمینی مهم ترین عامل موثر در فرونشست محدوده شناخته شده

<sup>1</sup> United States Geological Survey (USGS)

<sup>2</sup> collapse

<sup>3</sup> Aher



است. هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS در بازه سال های ۲۰۱۴ الی ۲۰۱۶ پرداختند. بررسی ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می دهد که مرکز فرونشست بخش های شرقی و شمال شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی متری می باشد و این فرونشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب های زیرزمینی دارد. هیوسین و همکاران (۲۰۲۲) در کراچی در بخش جنوبی پاکستان، در امتداد ساحل دریای عرب، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی SAR به پایش میزان فرونشست پرداختند که به این نتیجه دست یافتند که میزان فرونشست در محدوده بین ۶۷/۶۶ تا ۷۴/۶۸ میلی متر در سال بوده و استخراج آب های زیرزمینی برای مقاصد تجاری و خانگی علت اصلی فرونشست در منطقه مورد مطالعه است. لیو و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی فرونشست زمین در دلتای رودخانه مروارید غربی چین با استفاده از روش insar و تصاویر Sentinel-1 بین سال های ۲۰۱۶-۲۰۲۱ پرداختند. نتایج نشان داد فرونشست زمین در نواحی با کاربری آبی پروری، کاربری شهری و کشاورزی رخ داده است. بخاری و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر ماهواره ای Sentinel-1 پرداختند. نتایج نشان داد میزان فرونشست در شهر گوادر و بلوچستان (پاکستان) در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ برابر با ۹۲ میلی متر در سال می باشد. با توجه به روند رو به رشد جمعیت و مهاجرت به استان البرز، حجم برداشت از سفره های زیرزمینی افزوده ولذا کل آب مورد نیاز بخش کشاورزی و همچنین ۷۰ درصد از آب شرب استان البرز از منابع زیرزمینی و چاه های عمیق تأمین می شود<sup>۱</sup> (شکل ۱) نمایی از فرونشست دشت سعید آباد و نظرآباد را نشان می دهد.



شکل (۱): نمایی از فرونشست دشت سعید آباد در شهرستان ساوجبلاغ و نظرآباد در سال ۱۳۸۴

Figure 1: A view of the subsidence of Saeed Abad plain in Saujblag and Nazarabad cities in 2014

فرونشست می تواند به تأسیسات و زیرساخت های استان البرز مثل فرودگاهها، راهها، شبکه های ریلی و نیروگاه های خسارت وارد کرده و حتی آنها را از انتفاع خارج کند و علاوه بر آن منجر به خسارت دیدن منازل مردم شود. از جمله این موارد می توان به درز و ترک های روی دیوار منازل و ترک و نشست جاده ها و خیابان های و ترک هایی که در روی زمین های کشاورزی و در سطح شهر شکل گرفته اشاره کرد (شکل ۲ و ۳ و ۴ و ۵).

<sup>1</sup><https://qudsonline.ir/x79br>



شکل (۲): فرونشست زمین در تاریخ ۱۴۰۰/۰۹/۱۲ در ساعت ۲ بامداد در منطقه شهری و تجاری شهرستان کرج - رجایی شهر

Figure 2: The left side of the land subsidence on 3/12/2021 at 2 am in the urban and commercial area of Karaj-Rajai Shahr city.



شکل (۳): فرونشست زمین در تاریخ ۱۴۰۱/۰۳/۱۴ در ساعت ۱۸ غروب در منطقه شهری و مرکزی کرج - میدان سپاه

Figure 3: The right side of the land subsidence on 04/06/2022 at 18:00 in the urban and central area of Karaj-Midan Sepah



شکل (۴): فرونشست زمین در تاریخ ۱۴۰۲/۰۲/۰۶ در ساعت ۱۴ بعد از ظهر در منطقه شهری مهرشهر و گلشهر

Figure 4: The left side of the land subsidence on 26/04/2023 at 14:00 in the urban area of Mehrshahr and Golshahr.



شکل (۵): فرونشست زمین در تاریخ ۱۴۰۲/۰۶/۱۸ در ساعت ۸ صبح در منطقه شهری مهرشهر خیابان چهارباندی

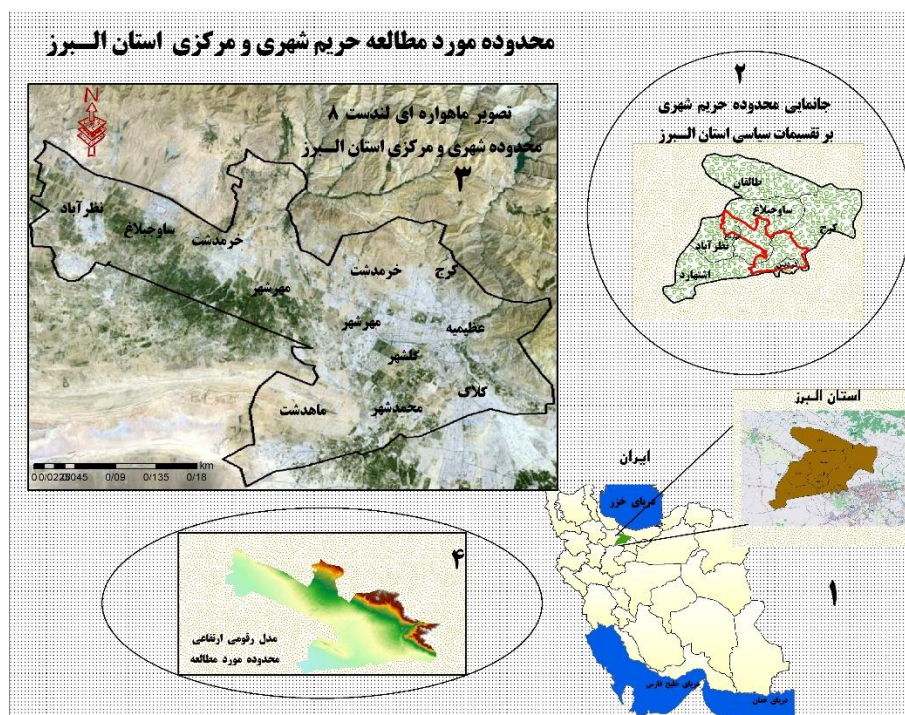
Figure 5: The right side of the land subsidence on 09/09/2023 at 8 o'clock in the Mehrshahr urban area, Chaharbandi Street



تاکنون تحقیقات گوناگونی در خصوص فرونشست (روش های تداخل سنجی و پهنه بندی) در سطح کشور صورت پذیرفته است. اما بررسی تلفیقی و برآورد این روش ها با دیتاهای راداری پژوهش های بسیار کمی صورت گرفته است. لازم به ذکر است از این روش به صورت توامان در سطح استان تهران و استان البرز هیچ تحقیق و پژوهشی صورت نگرفته است. در پژوهش حاضر از تکنیک های مختلف راداری، سری های زمانی، آشکارسازی تصاویر ماهواره ای ؛ ... استفاده گردیده. ضمن اینکه در بحث پهنه بندی به نقش عوامل محیطی (آب های زیرزمینی، کاربری اراضی، افت آب، سطح آب، عمق آب ...) توجه ویژه ای شده است.

### منطقه مورد مطالعه

استان البرز یکی از استان های بزرگ ایران از لحاظ جمعیت و مهاجرپذیری محسوب می شود. جمعیت استان البرز طبق اعلام مرکز ملی آمار ایران در سال ۱۳۹۵ برابر با ۵،۵۹۵،۴۹۲ نفر بوده است که شهرستان کرج مرکز استان می باشد که پس از استان های تهران، مشهد به عنوان سومین شهر پرجمعیت ایران به شمار می رود. در میان کلان شهرهای ایران با رشد جمعیت سالانه ی ۱۴/۳ درصد بالاترین رشد جمعیت را دارد. از این جهت بررسی مخاطرات پیش روی این شهر بسیار حائز اهمیت است. حریم شهری استان البرز، از شمال به کوه های البرز، از جنوب به رشته کوه های مرکزی، از غرب به دشت هشتگرد و از شرق به دشت تهران محدود می باشد. که در دامنه های جنوبی البرز میانی و شمال غرب شهر تهران با وسعتی حدود ۶۵۶ کیلومتر مربع از نظر ژئومورفولوژی به واحدهای کوهستان، تپه، دشت سر و مخروط افکنه تقسیم می شود. مساحت محدوده مورد مطالعه ۲۰۱۹/۷۵ کیلومتر مربع بوده و بین طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۷۰ درجه تا ۵۱ درجه و ۱۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۶۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۹۵ دقیقه واقع شده است. بخش کوهستانی منطقه بیشتر در مناطق شمالی، شمال شرقی و شرق محدوده و بخش های کوچکتر و کم ارتفاع تری در قسمت غرب (ارتفاعات حلقه دره) و جنوب، دامنه های شمالی کوه آق داغ واقع شده است. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۱۳۲۵ متر و به ترتیب بیشترین و کمترین ارتفاع آن ۲۵۵۵ و ۱۱۲۸ متر می باشد. از نظر آب وهوایی کرج تحت تأثیر ارتفاعات البرز و دره چالوس و رودخانه کرج قرار دارد که موجب خنک و مرطوب تر شدن این منطقه نسبت به تهران می گردد و این تمایز تقریباً در تمام طول سال مشاهده می شود. طبق بررسی های انجام شده بر روی آمار بلند مدت ایستگاه هواشناسی کرج، کلانشهر کرج با بارندگی سالیانه ۲۴۷ میلی متر دارای اقلیم نیمه خشک با زمستان نسبتاً سرد و تابستان معتدل می باشد. (شکل ۶) محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل (۶): نقشه موقعیت حریم شهری استان البرز  
Figure6: Alborz province city boundary location map

مواد و روش:

در این پژوهش جهت سهولت در بررسی و مطالعه، قسمت مواد و روش به دو بخش تداخل سنجی راداری و بخش برآورد پهنا بندی نقاط پر خطر تقسیم گردیده که در ادامه توضیحات لازم ارائه گردیده است.  
مرحله اول:

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چند معیاره است. جهت پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده ها نیز از نرم های ابزار ENVI, ArcGIS, Idrisi و Excel، بهره گیری شده است. در این پژوهش از تصاویر سنتینل که در محدوده باند C امواج مایکروویو واقع گردیده، نسبت به داندلود و اخذ تصاویر سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۳ از سایت آقدام گردید (جدول ۱) (شکل ۷). در ادامه جهت پردازش های لازم از نرم افزار اسنپ بهره گرفته شد.

جدول ۱: اطلاعات تصاویر مورد استفاده در پژوهش

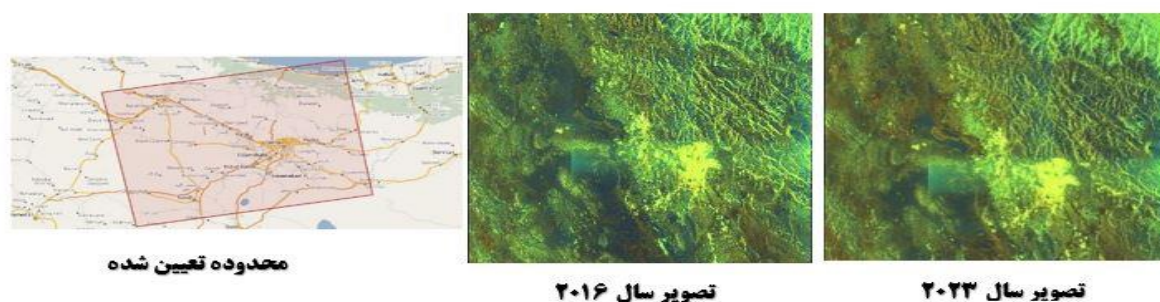
Table1: Information about the images used in the research

year	Sensor name	Sub-image	Original image
2016	Sentinel 1	S1A_OPER_AUX_20151101	S1A_IW_SLC_1SDV_20161113T143538
2023	Sentinel 1	S1A_OPER_AUX_2020012 7	S1A_IW_SLC_1SDV_20231205T143608

1 Sentinel-1A

2 www.scihub.copernicus

3 SNAP



شکل (۷): تصاویر و محدوده اخذ شده  
Figure7: Images and range obtained

در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، از روش تداخل سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیر مکرر استفاده گردید. مقدار آن به کمک (رابطه ۱) به دست می آید. که در آن  $SP$  فاز تصویر اول و  $MP$  فاز تصویر دوم و عدد پی با مقدار ثابت  $3/14$  و  $\lambda$  طول موج می باشد.

(کانواتی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۰).

$$\Delta\phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda} \quad (1)$$

با توجه به (رابطه ۲)، تعیین مقدار فرونشست در فاصله زمانی دو تصویر ( $Dt$ ) تابع اختلاف فاز دو تصویر به همراه فاز ناشی از توپوگرافی و فاز ناشی از اتمسفر خواهد بود (کانواتی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۰).

$$\Delta\phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda} = \phi_{Top} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} \quad (2)$$

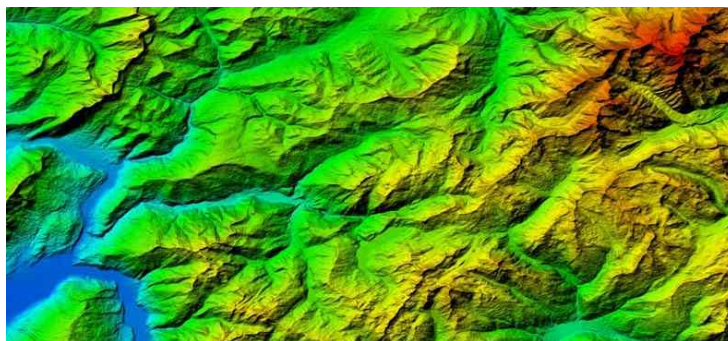
در ادامه جهت پیش پردازش و تولید، تصویر فاز و کوهرنسی آماده گردید (شکل ۸). در تصویر کوهرنسی مقدار پیکسل ها بین ۰ و ۱ بوده و هرچقدر کوهرنسی به عدد ۱ نزدیک باشد، دقت محاسبات در آن پیکسل بیشتر بوده است و اطلاعات اصلی برای ارزیابی فرونشست و برآمدگی از تصویر فاز و کوهرنسی به دست می آید (عبدالمالکی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۱۲). پس از به دست آمدن تصویر فاز و کوهرنسی برای حذف و کاهش نویزها از عمل فیلترینگ استفاده شده است. در این پژوهش از فیلتر گلدستاین<sup>۳</sup> استفاده شده است (شکل ۹). در منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود زمین های کشاورزی و باغات جز عوامل ایجاد نویز در تصاویر است. فاز اینترفروگرام حاوی اثر توپوگرافی، خطای مداری و اثرات اتمسفر می باشد. برای به دست آوردن جابه جایی سطح زمین در یک بازه زمانی، می بایست خطاهای مداری، اثرات توپوگرافی و نویز اتمسفر از اینترفروگرام ها حذف گردند (ماسونت و فیگل، ۱۹۹۸: ۲۲) برای حذف اثر توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاعی<sup>۴</sup> با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۰).

<sup>1</sup> Qanvati

<sup>2</sup> Qanvati

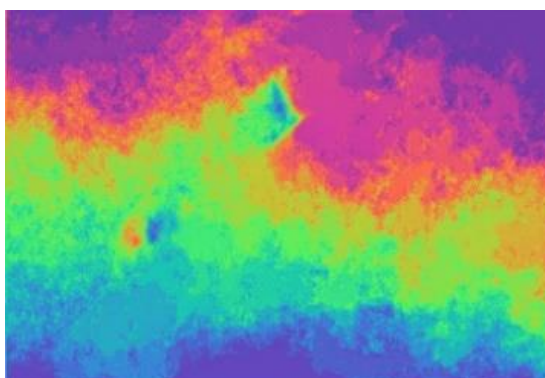
<sup>3</sup> Goldstein

<sup>4</sup> SRTM



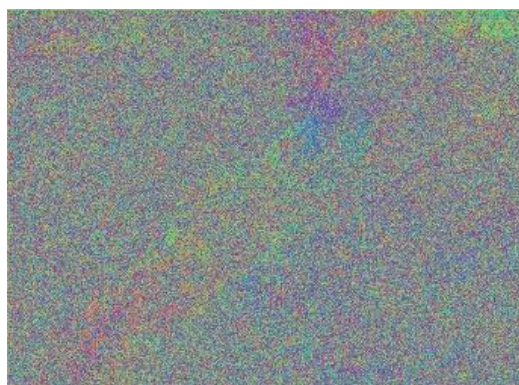
شکل (۸): سمت چپ تصویر همدوسی

Figure8: The left side of the harmony image



شکل (۹): تصویر میانی وضعیت فیلتر و مقادیر محلی بالا رفتگی و فرورفتگی

Figure9: The state of the filter and the local values of rise and fall



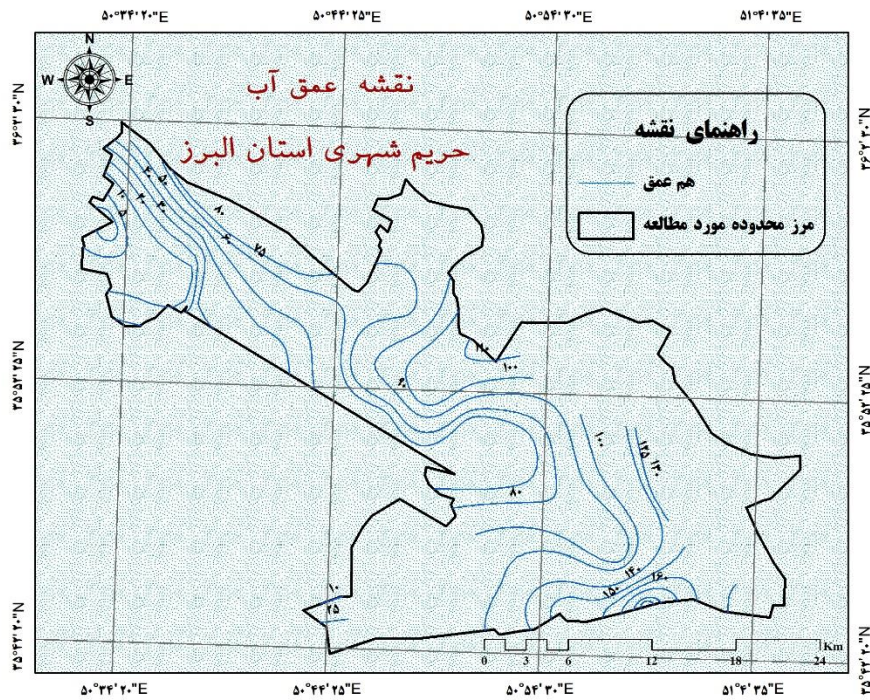
شکل (۱۰): تصویر سمت راست قسمتی از مدل رقومی ارتفاعی SRTM محدوده مورد مطالعه

Figure10: A part of the SRTM elevation digital model of the studied area

مرحله دوم (برآورد پهنه بندی نقاط پر خطر)

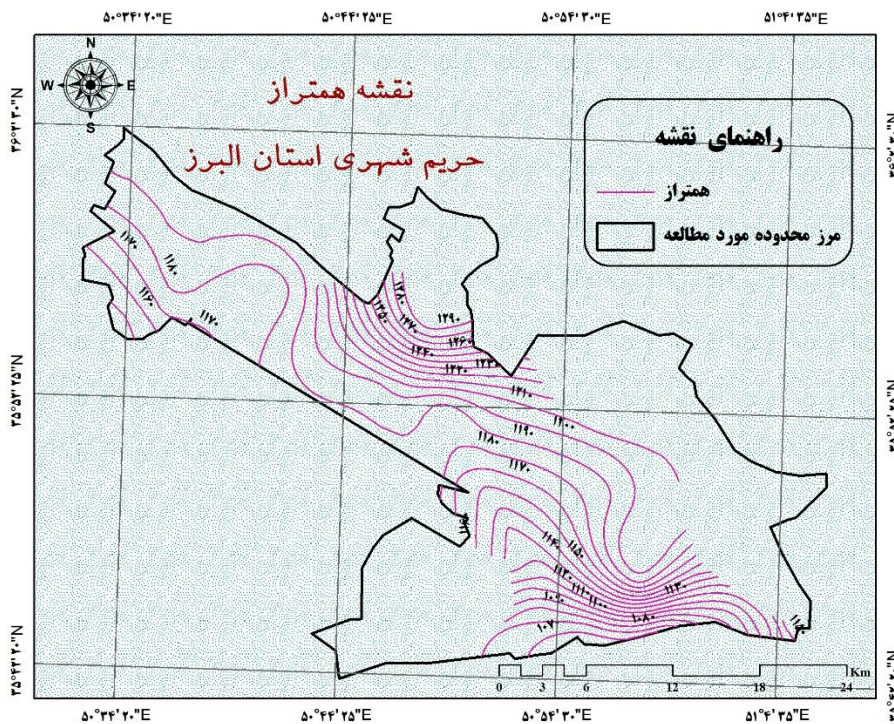
در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط فرونشست منطقه مورد مطالعه و وضعیت منابع آب زیرزمینی اقدام به بررسی افت آب زیرزمینی گردید. بدین منظور اطلاعات مربوط به ۳۶ چاه از چاه های مشاهده ای سطح تراز پیزومتری محدوده حریم شهری از سازمان آب منطقه ای استان البرز تهیه شد. همچنین به ترتیب؛ (شکل ۱۱ و ۱۲) مربوط به نقشه هم عمق آب و هم تراز آب محدوده مورد مطالعه می باشد. پس از بررسی نوسان تراز محدوده شهری استان البرز، در شش سال اخیر، مقدار افت سالانه آب زیرزمینی (شکل ۱۳) بدست آمد.





شکل (۱۱): نقشه عمق آب محدوده شهری استان البرز

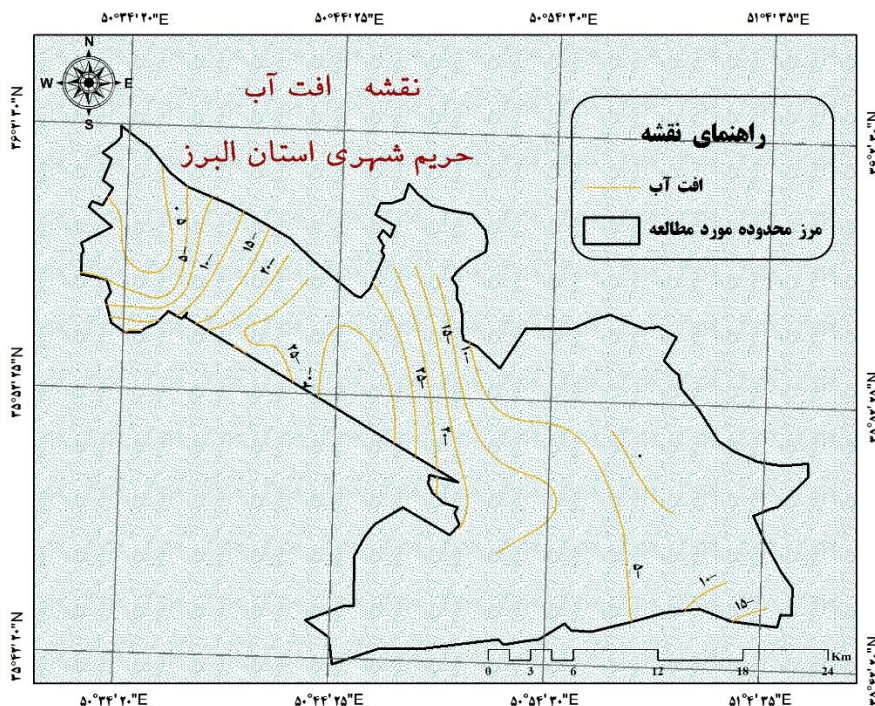
Figure11: Water depth map of the urban area of Alborz province



شکل (۱۲): نقشه هم تراز محدوده شهری استان البرز

Figure12: Level map of the urban area of Alborz province





شکل (۱۳): نقشه افت آب محدوده شهری استان البرز

Figure13: Water drop map of the urban area of Alborz province

جهت پهنه بندی، خطر فرونشست، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از شهر و روستا، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی شد. سپس در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه‌ی رودخانه‌های استان البرز، استخراج شد. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، دانلود شده از سایت<sup>۱</sup>، تهیه و لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. نقشه بارش محدوده نیز، با استفاده از نقشه هم بارش استان البرز، ترسیم و سپس با اجرای تکنیک آراس نسبت به تهیه نقشه پهنه بندی خطر فرونشست اقدام گردید. برای استخراج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده<sup>۲</sup> اخذ شده از سایت<sup>۳</sup> استفاده گردید. برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا در نرم افزار ۶۴ Developer Ecognition استفاده گردید. در روش طبقه‌بندی شیء‌گرا، پیکسل‌ها براساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه‌بندی شده و طبقه‌بندی تصویر براساس این قطعه‌ها انجام گردید. با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان‌دهنده اشیاء با ابعاد مختلف می‌باشند، تعیین شد. در این پژوهش تصویر قطعه‌بندی شده دارای مقیاس ۴۵ درصد، شکل ۰/۵، ضریب فشردگی ۰/۵ انجام گردید. بعد از مشخص کردن تعداد طبقات موردنظر در طبقه‌بندی تعیین شیء نمونه‌های آموزشی انجام و در نرم افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از صحت و درستی آن است. دقت طبقه‌بندی در سال ۲۰۲۳ با صحت کلی ۹۲ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۹ صورت پذیرفت. روش آراس یکی از بهترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب بهترین گزینه است. بهترین گزینه آن است که بیشترین فاصله را از عوامل منفی و کمترین فاصله را از عوامل مثبت داشته باشد. در این پژوهش، جهت وزندهی عوامل از روش CRITIC استفاده شده است.

مراحل الگوریتم پیاده‌سازی آراس شامل موارد ذیل می باشد:

- ۱- تشکیل ماتریس تصمیم ۲- نرمال کردن ماتریس تصمیم یا استانداردسازی ۳- وزن دار کردن ماتریس نرمال ۴- محاسبه مطلوبیت کل هر گزینه
- ۵- محاسبه مطلوبیت نسبی هر گزینه و رتبه‌بندی گزینه ها

با تعیین پارامترهای بالا، تضاد موجود بین معیار  $Z$  با معیارهای دیگر با استفاده از (رابطه ۳)، محاسبه می‌گردد (علینژاد و خلیلی، ۱۳۹۷: ۲۷۷).

$$C_{jk} = \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (3)$$

که در آن  $C_{jk}$  معرف مجموع تضاد معیار  $Z$  با معیارهای  $k$  است که از  $k = 1$  شروع شده و تا  $k = m$  ادامه دارد و  $r_{jk}$  همبستگی بین دو معیار  $k$  و  $Z$  را نشان می‌دهد. میزان اطلاعات عامل  $Z$  را می‌توان با استفاده از (رابطه ۴)، محاسبه نمود (علینژاد و خلیلی، ۱۳۹۷: ۲۷۷)

$$C_j = \delta_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (4)$$

که در آن  $C_j$ ، معرف میزان اطلاعات معیار  $Z$  و انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار  $Z$  را نشان می‌دهد. با توجه به روابط یادشده، معیارهایی که دارای  $C_j$  بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد.

وزن هر عامل مانند  $Z$  از (رابطه ۵)، تعیین می‌گردد (توس و ادالی، ۲۰۱۹: ۵۳۰).

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad (5)$$

که در آن  $W_j$  معرف وزن معیار  $Z$  و  $C_k$  نشانگر میزان اطلاعات مجموع معیارهای  $k$  است که از  $k = 1$  شروع شده و تا  $k = m$  ادامه دارد. معادله مورد استفاده برای محاسبه درجه  $i$  مطلوبیت  $K_i$  از یک گزینه  $a_i$  به صورت (رابطه ۶) است.

(اوتدسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰: ۱۶۹).

$$K_i = \frac{S_i}{S_0}; i = \overline{0.m} \quad (6)$$

## بحث

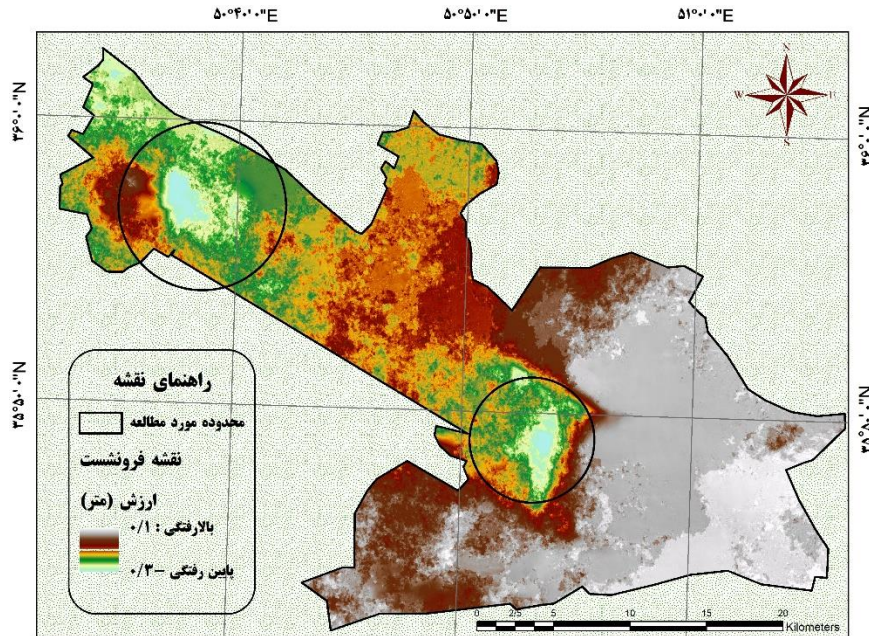
نتایج برآورد شده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری

پس از انجام اقدامات لازم و نتایج بدست آمده از نرم افزار اسنپ و روش ها و الگوریتم های استفاده شده در بخش مواد و روش، جهت استخراج نقشه نهایی فرونشست توسط تکنیک تداخل سنجی، تبدیل اختلاف فازها به جابجایی عمودی انجام و به جابجایی عمودی در سیستم متریک تبدیل گردید. (شکل ۱۴)، نیز نشانگر خروجی نهایی حاصل از برآورد مقدار فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی رادار می باشد که با توجه به نقشه خروجی، مقادیر مثبت و به رنگ قهوه ای جابه‌جایی مربوط به حرکت زمین به سمت دید راداری (بالاآمدگی) و مقادیر منفی به رنگ سفید و بنفش بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری (فرونشست) است. نتیجه مطالعه میزان فرونشست بین ۱۵ تا ۳۲۰ میلی متر را در طی ۶ سال اخیر، نشان می‌دهد که با توجه به نقشه مزبور، بیشترین میزان فرونشست در محدوده شرقی و جنوبی و مرکزی استان البرز (در محدوده مهرشهر (منطقه حسین آباد) - گلشهر - جایی شهر، خرم‌دشت، محمد شهر) به مقدار ۱۰۰ تا ۳۴۰ میلی متر و در بخش جنوب غرب محدوده (ماه‌دشت) به مقدار ۲۰ تا ۸۰ میلی متر، و در محدوده غربی استان البرز شهرستان نظرآباد به مقدار ۳۰ تا ۹۰ میلی متر که به صورت زمین های زراعی و کشاورزی و جنوب اتوبان کرج - قزوین در محدوده روستای حاجی آباد به مقدار تقریبی ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر و در محدوده کمالشهر

<sup>1</sup> Tuş & Aytay Adali

<sup>2</sup> Zavadskas & Turskis

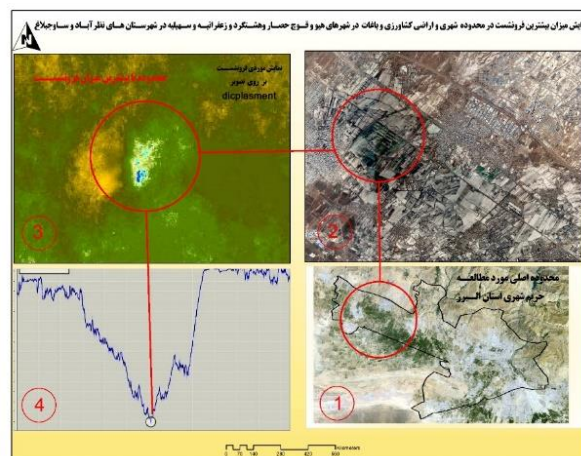
منطقه ظفر به میزان ۴۰ الی ۴۸۰ میلی متر در سال و در محدوده شهری ساوجبلاغ بخش هشتگرد به میزان ۱۰۰ تا ۲۳۰ میلی متر می باشد، متمرکز است برای اعتبار سنجی دقت پیکسل ها در تداخل سنجی به صورت موردی محدوده های دارای بیشترین میزان فرونشست در طی بازه زمانی مطالعه با تصویر کوهرنسی مورد ارزیابی قرار گرفت و دقت محاسبات در پیکسل های مورد نظر دارای کوهرنسی بین ۰/۶ تا ۰/۸ بوده که دقت بسیار بالای محاسبات در پیکسل را نشان می دهد (شکل ۱۵ و ۱۶).



شکل(۱۴):نقشه فرونشست و بالا آمدگی حریم شهری استان البرز

Figure14: Subsidence and uplift map of urban area of Alborz province

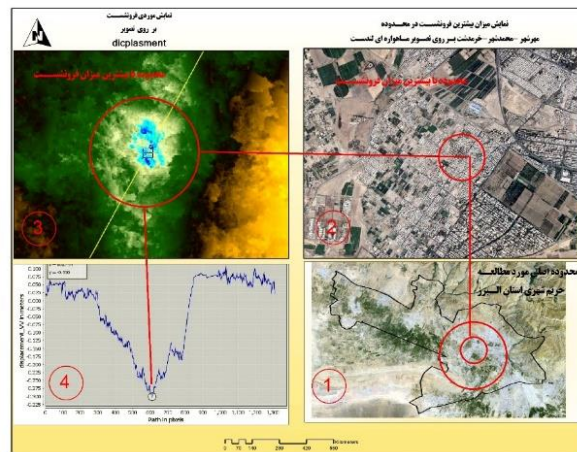
در این مناطق به سبب تامین نیازهای آبی جامعه سکونت گاهی و مناطق اطراف و همچنین تامین نیازهای آبی بخش صنعت از جمله کارخانه ها و فعالیت های کشاورزی، دست اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و استحصال آب های زیرزمینی بسیار بالاست به همین دلیل میزان افت نیز بالا بوده است که این عوامل با دخالت اقلیم خشک این منطقه باعث استعداد بالای این مناطق در بحث فرونشست شده است.



شکل(۱۵):نمایش واضح تر بیشترین مقدار فرونشست به صورت موردی در محدوده نظرآباد-هیو-موسکول چمبورک و عرب آباد

Figure14: Right side. A clearer display of the largest amount of subsidence case by case in the area of Nazarabad-Hyu-Muskul, Chambork and Arababad.





شکل (۱۶): سمت چپ .نمایش واضح تر بیشترین مقدار فرونشست به صورت موردی در محدوده مهرشهر، گلشهر، رجایی شهر ، محمد شهر و خرمداشت

**Figure14: Left side. A clearer display of the largest amount of subsidence case by case in the area of Mehrshahr, Golshahr, Rajaeeshahr, Mohammadshahr and Khormadasht.**

با بررسی نقشه کاربری اراضی و فرونشست با تکنیک تداخل سنجی راداری و مطالعات صورت گرفته نشان از فرونشست به ترتیب در مناطق کشاورزی و محدوده شهری و روستایی می‌باشد. به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد و رابطه بین توسعه شهری و فرونشست زمین رابطه ای دوجانبه می باشد که هر دو بر هم تأثیر گذاشته و تأثیر می پذیرند. تراکم جمعیت و نیاز آبی و غذایی منجر به بهره برداری از منابع آب زیرزمینی می گردد و همچنین افزایش باغ‌ها و ویلاها در استان باعث شده تعدادچاه‌ها افزایش پیدا کنند. لذا افزایش بهره برداری از یک سو و توسعه مناطق شهری و عدم تغذیه به آبخوان از طرف دیگه منجر به ایجاد نشانه های فرونشست مانند درز و ترک‌های روی دیوار منازل و ترک و فرونشست در خیابان های اصلی ... (شکل ۱۷) در بسیاری از نقاط محدوده حریم شهری استان البرز، شده است. نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده براساس روش تداخل سنجی راداری تفاضلی از طریق اطلاعات چاه‌های پیژومتری مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. بررسی وضعیت موقعیت مکانی چاه ها و میزان افت سطح آب در آن ها نیز، بیانگر این است که در یک روند کلی میزان افت سطح آب از جنوب محدوده به سمت شمال محدوده و همچنین از شرق به سمت غرب محدوده بیشتر می‌شود. به طور کلی، داده‌های مکانی چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه‌های خطوط هم افت و هم عمق، در حریم شهری استان البرز با مناطق فرونشست حاصل از پردازش راداری در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، مطابقت دارد و مناطق با فرونشست زیاد، در مناطقی با بیشترین مقدار افت آب (به طور عمده با ۱۵ تا ۳۰ متر افت آب در طی بازه زمانی مورد مطالعه) و در مناطقی با عمق کم آب (به طور عمده با عمق ۶۹ تا ۱۰۰ متر)، قرار دارد. به علت مساعد بودن شرایط کشاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا در استان البرز، برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و همچنین به منظور تأمین بخش اعظمی از آب بخش شرب، بهره برداری از چاه‌های منطقه افزایش یافته، به طوری که این میزان از بهره‌برداری در بعضی موارد بیشتر از توان احیای چاه ها بوده است و به همین دلیل میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن مقدار فرونشست زمین، بالا می‌باشد.

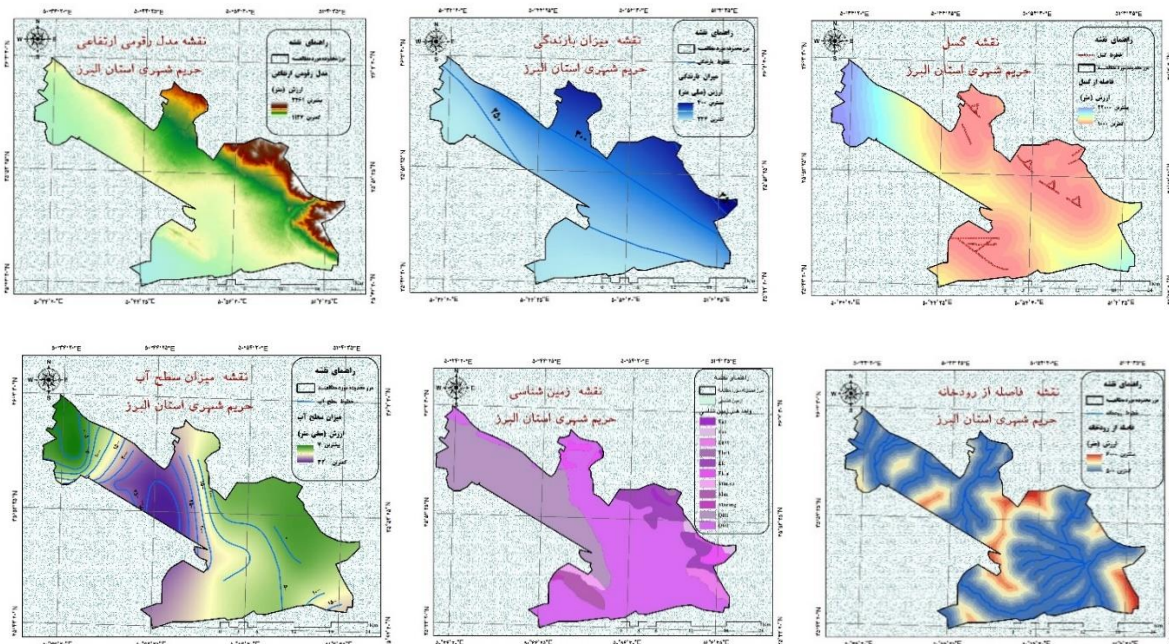


شکل (۱۷): تصویر سمت چپ ترک ساختمان در محدوده حصار کرج - تصویر میانی فرونشست در خیابان جمهوری به سمت میدان سپاه ضلع شمال شرقی باغ فاتح - تصویر سمت راست ترک بر روی ساختمان نوساز در حصارک پایین کرج

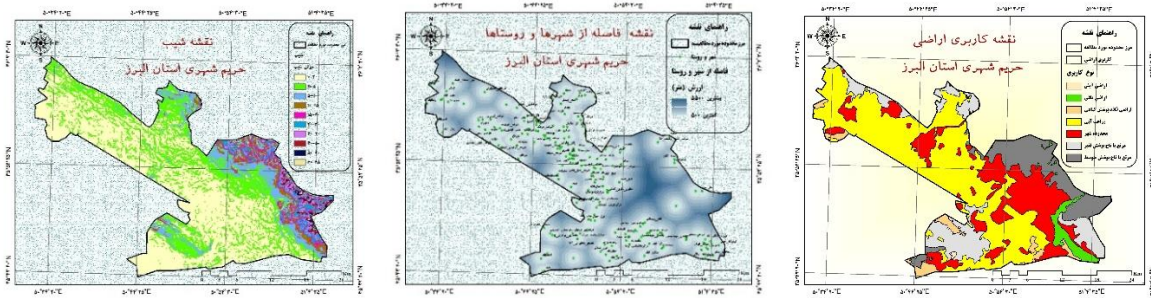
Figure (17): The left image of the crack in the building in the Hesar of Karaj - the middle image of the subsidence on Jomhori Street towards Sepah Square on the northeast side of Bagh Fateh - the right image of the crack on the newly constructed building in the lower Hesarak of Karaj

نتایج برآورد شده از پهنه بندی خطر فرونشست

پس از استخراج نقشه های معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر (شکل ۱۸) و فازی نمودن نقشه‌های هر یک از معیارها (شکل ۱۹) و اعمال کردن وزن‌های مربوطه‌ی حاصل از روش کرتیک (جدول ۳ و ۴ و ۵ و ۶) و با اعمال مراحل مختلف تکنیک آراس، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست در ۵ طبقه‌ی بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، بدست آمد (شکل ۲۰). با توجه به نتایج حاصله، به ترتیب معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین شناسی، بیشترین وزن و اهمیت را دریافت کردند و با توجه به اینکه در وزن‌دهی CRITIC، وزن معیارها، با توجه به نقشه‌های معیار و میزان همبستگی، تضاد و انحراف معیار بین لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده، تعیین می‌گردد، استفاده از این روش، در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند معضل استقلال صفات از یکدیگر که به هنگام مقایسه‌ی زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فرآیند تحلیل شبکه‌ای وجود دارد را برطرف نماید. با توجه به خروجی حاصل از به کارگیری روش آراس، ۳۰۲/۱۴ کیلومترمربع از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و ۱۹۲/۰۹ کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد (جدول ۷).

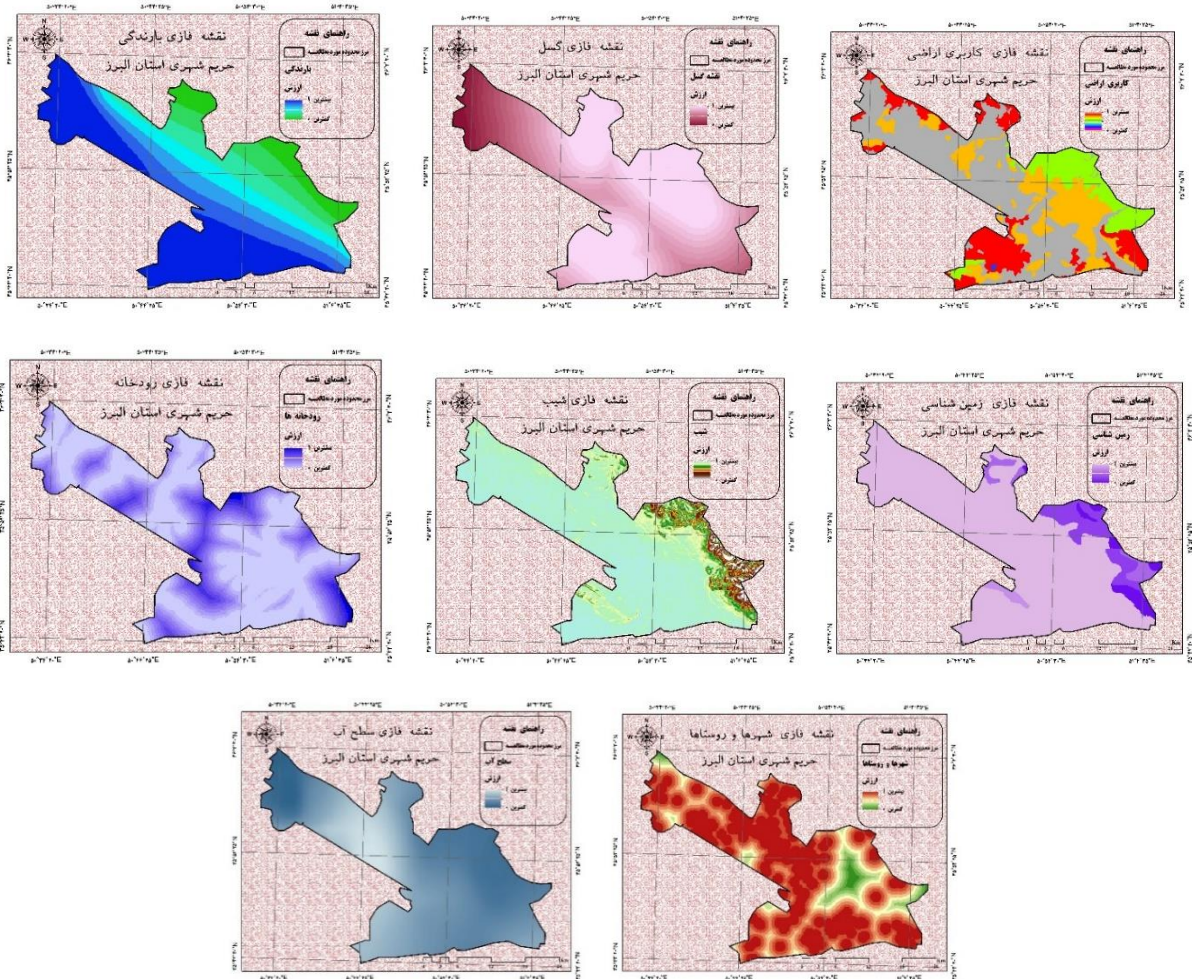






شکل (۱۸): نقشه های معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه

Figure14: Maps of the proposed criteria in the zoning of the subsidence risk of the study area



شکل (۱۹): نقشه های فازی معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه

Figure19: Fuzzy maps of the proposed criteria in zoning the risk of subsidence of the study area

جدول ۳: ماتریس همبستگی معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست حریم شهری استان البرز

Table3: Correlation matrix of the proposed criteria in the zoning of the urban boundary of Alborz province

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
افت سطح آب	۱	-۰/۲۷۴۱	-۰/۳۲۵۴	-۰/۳۱۲۳	-۰/۳۸۸۷	-۰/۴۲۵۴	-۰/۳۹۶۵	-۰/۳۹۸۶
زمین شناسی	-۰/۲۷۴۱	۱	-۰/۵۲۱۳	-۰/۶۳۵۶	-۰/۴۴۵۳	-۰/۶۵۳۵	-۰/۸۴۲۱	-۰/۵۸۷۱
شیب	-۰/۳۲۵۴	-۰/۵۲۱۳	۱	-۰/۵۷۸۱	-۰/۴۸۷۶	-۰/۷۹۸۴	-۰/۷۰۱۲	-۰/۸۷۷۶
کاربری اراضی	-۰/۳۱۲۳	-۰/۶۳۵۶	-۰/۵۷۸۱	۱	-۰/۵۶۷۴	-۰/۴۸۶۵	-۰/۷۵۵۳	-۰/۵۱۵۶
فاصله از رودخانه	-۰/۳۸۸۷	-۰/۴۴۵۳	-۰/۴۸۷۶	-۰/۵۶۷۴	۱	-۰/۶۱۰۳	-۰/۶۲۴۳	-۰/۶۸۷۳
فاصله از شهر و روستا	-۰/۴۲۵۴	-۰/۶۵۳۵	-۰/۷۹۸۴	-۰/۴۸۶۵	-۰/۶۱۰۳	۱	-۰/۶۹۸۶	-۰/۸۸۷۴
بارش	-۰/۳۹۶۵	-۰/۸۴۲۱	-۰/۷۰۱۲	-۰/۷۵۵۳	-۰/۶۲۴۳	-۰/۶۹۸۶	۱	-۰/۶۲۴۳
فاصله از گسل	-۰/۳۹۸۶	-۰/۵۸۷۱	-۰/۸۷۷۶	-۰/۵۱۵۶	-۰/۶۸۷۳	-۰/۸۸۷۴	-۰/۶۲۴۳	۱

جدول ۴: ماتریس تضاد معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست حریم شهری استان البرز

Table4: The contrast matrix of the proposed criteria in the subsidence zoning of the urban boundary of Alborz province

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
افت سطح آب	۰	-۰/۷۲۵۹	-۰/۶۷۴۶	-۰/۶۸۷۷	-۰/۶۱۱۳	-۰/۵۷۴۶	-۰/۶۰۳۵	-۰/۶۰۱۴
زمین شناسی	-۰/۷۲۵۹	۰	-۰/۴۷۸۷	-۰/۳۶۴۴	-۰/۵۵۴۷	-۰/۳۴۶۵	-۰/۱۵۷۹	-۰/۴۱۲۹
شیب	-۰/۶۷۴۶	-۰/۴۷۸۷	۰	-۰/۴۲۱۹	-۰/۴۳۲۶	-۰/۵۱۳۵	-۰/۲۴۴۷	-۰/۴۸۴۴
کاربری اراضی	-۰/۶۸۷۷	-۰/۳۶۴۴	-۰/۴۲۱۹	۰	-۰/۴۳۲۶	-۰/۵۱۳۵	-۰/۲۴۴۷	-۰/۴۸۴۴
فاصله از رودخانه	-۰/۶۱۱۳	-۰/۵۵۴۷	-۰/۵۱۲۴	-۰/۴۳۲۶	۰	-۰/۳۸۹۷	-۰/۳۷۵۷	-۰/۳۱۲۷
فاصله از شهر و روستا	-۰/۵۷۴۶	-۰/۳۴۶۵	-۰/۲۰۱۶	-۰/۵۱۳۵	-۰/۳۸۹۷	۰	-۰/۳۰۱۴	-۰/۱۱۲۶
بارش	-۰/۶۰۳۵	-۰/۱۵۷۹	-۰/۲۹۸۸	-۰/۲۴۴۷	-۰/۳۷۵۷	-۰/۳۰۱۴	۰	-۰/۳۷۵۷
فاصله از گسل	-۰/۶۰۱۴	-۰/۴۱۲۹	-۰/۱۲۲۴	-۰/۴۸۴۴	-۰/۳۱۲۷	-۰/۱۱۲۶	-۰/۳۷۵۷	۰
مجموع تضاد	۴/۴۷۹	۳/۰۴۱	۲/۷۱۰۴	۳/۱۴۹۲	۳/۱۸۹۱	۲/۴۳۹۹	۲/۳۵۷۷	۲/۴۲۲۱

جدول ۵. انحراف معیار، میزان اطلاعات معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست حریم شهری استان البرز

Table5: The standard deviation is the amount of information of the criteria mentioned in the zoning of the urban area of Alborz province

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
انحراف معیار	۰/۲۶۷۱	۰/۳۱۳۴	۰/۳۵۶۲	۰/۳۳۴۲	۰/۲۴۶۵	۰/۳۸۷۵	۰/۲۸۲۲	۰/۳۵۲۶
میزان اطلاعات	۱/۱۹۶۳۴۱	۰/۹۵۳۰۴۹	۰/۹۶۵۴۴۴	۱/۰۵۲۴۶۳	۰/۷۸۶۱۱۳	۰/۹۴۵۴۶۱	۰/۶۶۵۳۴۳	۰/۸۵۴۰۳۲۴۶

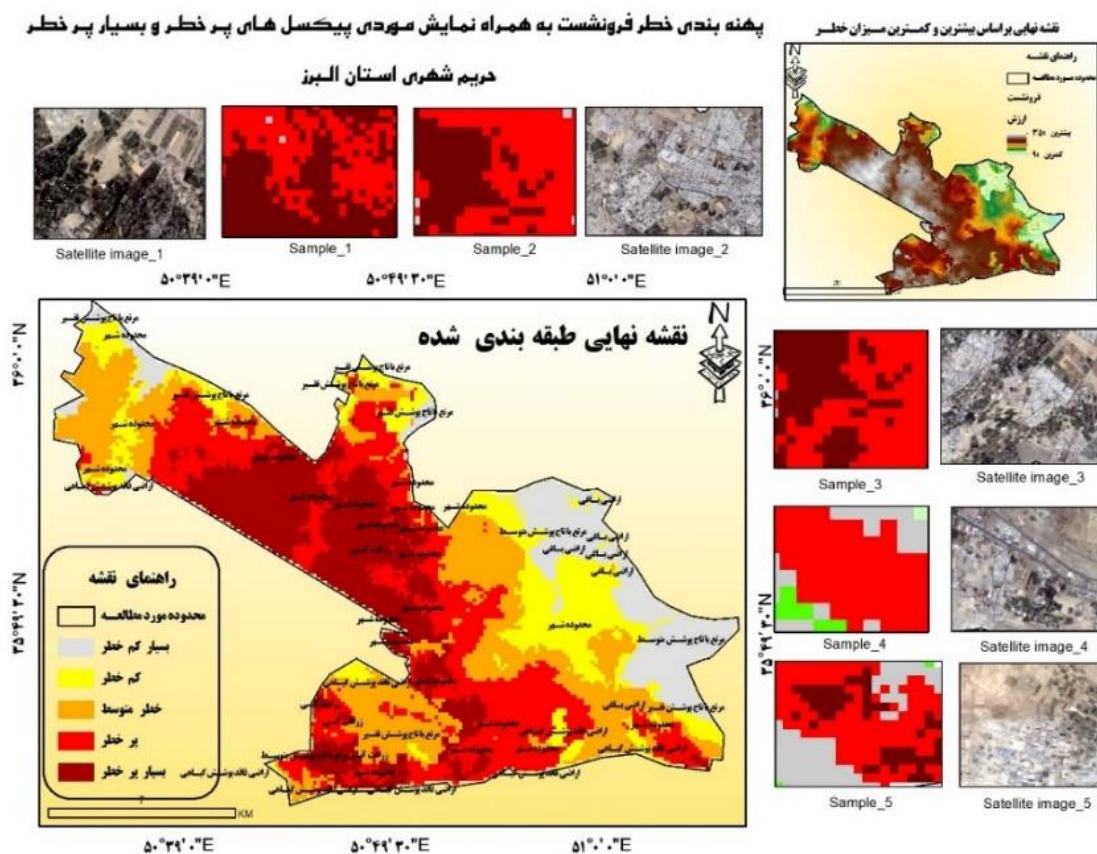
جدول ۶. وزن نهایی معیارهای مطرح در پهنه بندی فرونشست حریم شهری استان البرز

Table6: The final weight of the proposed criteria in the zoning of the urban area of Alborz province

معیار	افت سطح آب	زمین شناسی	شیب	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از شهر و روستا	بارش	فاصله از گسل
وزن نهایی	۰/۱۶۱۲۷	۰/۱۲۸۴۷۴	۰/۱۳۰۱۴۵	۰/۱۴۱۸۷۵	۰/۱۰۵۹۷	۰/۱۲۷۴۵۱	۰/۰۸۹۶۹	۰/۱۱۵۱۲۵۹۱

بخش اعظمی از کلاس بسیار پرخطر و پرخطر محدوده شهرستان های کرج و ساوجبلاغ و نظرآباد از لحاظ احتمال وقوع فرونشست در بخش شمال محدوده (شهرک افشاریه، حکیمیه، مزرعه حمیدیه و سهیلیه)، شمال غرب (لشکرآباد، قوهه و رامچین، محمدآباد افشار، سنقرآباد) و بخش مرکزی (مهرشهر، گلشهر، رجایی شهر و خرم دشت و کمالآباد(کمالشهر)) قرار گرفته است. به علاوه، با توجه به نقشه پهنه بندی پتانسیل خطر فرونشست در قسمت جنوب و جنوب غربی محدوده در محدوده شهری ماهدشت راشته، سردارآباد، احمدآباد، مشکین آباد و عباس آباد، سردارآباد، شهرک بعثت و محمدآباد زیاد می باشد. بخشی از قسمت جنوب شرقی محدوده دشت کرج شامل امیرآباد، کوهک، شهرک ابوذر و گرمدره نیز در طبقه با احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارند.





شکل (۲۰): نقشه پهنه بندی خطر فرونشست حریم شهری استان البرز

Figure20: Subsidence risk zoning map of Alborz province

جدول ۷. اطلاعات طبقات خطر فرونشست

Table6: Subsidence risk classes information

بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پر خطر	بسیار پر خطر	طبقه خطر
۶۶/۴۲	۸۲/۷۱	۱۸۵/۸۲	۱۹۲/۱۴	۳۰۲/۰۹	مساحت به کیلومترمربع
% ۱۳	% ۱۳	% ۲۰	% ۲۳	% ۳۱	مساحت به درصد

بررسی نقاط بسیار پر خطر و پر خطر معرفی شده توسط الگوریتم آراس نشان می دهد؛ از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری زراعی و مناطق شهری، بیشترین درصد از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده است. محدوده مطالعاتی به دلیل وضعیت توپوگرافی هموار مناسب، محدودیت کمی جهت توسعه فعالیت های کشاورزی دارد. در واقع نداشتن اختلاف ارتفاع، نداشتن شیب زیاد و وجود رسوبات آبرفتی مناسب در کنار عوامل اقتصادی منطقه سبب شده است تا فعالیت های کشاورزی این منطقه با گسترش زیادی همراه باشد، به طوری که بر اساس نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی بخش عمده ای از دشت به اراضی کشاورزی اختصاص داده شده است که همین عامل سبب بهره برداری بیش از حد از سفره آب های زیرزمینی در طی سال های اخیر شده است. به علاوه بخش اعظمی از آب مورد نیاز جهت شرب نیز از منابع آب زیرزمینی تأمین می گردد و این امر نیز به نوبه خود در کاهش سطح آب به دنبال آن، در افزایش پتانسیل خطر فرونشست در محدوده مورد مطالعه دخیل می باشد.

از لحاظ معیار فاصله از مناطق شهری و روستایی، مناطق بسیارپرخطر در فاصله صفر تا ۴۵۰ متری از نقاط شهری و روستایی قرار دارند و لذا می‌توان گفت که عوامل انسان‌ساخت، مانند: زمین‌های کشاورزی، تاسیسات زیرزمینی مانند سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل و نقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین میزان آسیب پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست شده‌اند. از منظر لیتولوژیکی، به طور کلی شهرهای موجود در محدوده حریم شهری استان البرز، بر روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته‌اند و رسوبات آبرفتی گستره کرج حاصل فعالیت رودخانه کرج و همچنین رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشاء گرفته از دره‌های موجود در ارتفاعات شمالی است و مستعد برای ایجاد فرونشست، می‌باشند. به علاوه، رسوبات آبرفتی قدیمی هزاردره و نهشته‌های تبخیری نئوژن (رس و مارن) به دلیل پوکی و تخلخل زیاد مقدار نشست بیشتری دارند و با کاهش فشار آب منفذی و به نسبت افزایش تنش موثر، میزان فرونشینی افزایش می‌یابد. شیب نقش موثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد. از لحاظ معیار شیب، مناطق دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد، بین شیب‌های صفر تا ۵ درصد قرار دارند و به طور عمده بیشترین مقدار پیکسل‌های با احتمال خطر، دارای شیب کمتر از یک درصد، هستند. گسل‌ها به نوبه خود نقش موثر و مهمی در میزان توسعه فرونشست در سطح دشت دارد. از دیدگاه زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه در مجاورت زون فعالی و تکتونیزه البرز قرار گرفته و از حرکات زمین‌ساختی این زون متاثر است. از مهم‌ترین گسل‌ها، در محدوده می‌توان به گسل ماهدشت-کرج (از نوع گسل فشاری همراه با مولفه راست لغز و درازای دست کم ۳۰ کیلومتر، راستای شرقی، شمال شرقی، غربی- جنوب غربی و شیب تند عمدتاً رو به جنوب- جنوب شرقی)، گسله کردان-کرج (گسل تراستی کوتاه‌تر)، اشاره نمود. با بررسی معیار فاصله از گسل نتایج مشخص شد که طبق نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست، به طور عمده؛ نقاط پرخطر واقع در بخش شمال و شمال غربی محدوده در فاصله ۴۰۰ تا ۸۰۰۰ متری و مناطق دارای احتمال خطر بخش جنوب غربی، در فواصل ۵۰ تا ۵۰۰۰ فواصل متری، از گسل واقع شده‌اند. با افزایش فاصله از آبراه‌ها نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. با انطباق نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با نقشه معیار فاصله از رودخانه، می‌توان گفته که به طور عمده مناطق دارای احتمال خطر در فاصله ۷۰۰ تا ۵۵۰۰ متری از رودخانه قرار دارند. فرونشست‌ها با میزان بارندگی ارتباط دارند و هر چه میزان بارندگی کمتر باشد، فرونشست‌ها نیز بیشتر خواهد شد. می‌توان گفت که مناطق پرخطر و بسیار پرخطر از نظر عامل بارش، در محدوده‌هایی با مقدار متوسط بارش سالیانه ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر قرار دارند. اگر چه گروهی از عوامل در ایجاد خطر فرونشست موثر بوده‌اند، ولی مهم‌ترین آن‌ها در حریم شهری استان البرز، عامل برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی می‌باشد و مناطق دارای احتمال خطر زیاد در بخش‌هایی با افت سطح آب ۱۵ تا ۳۰ متر قرار دارند.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری در حریم شهری شهرستان‌های فردیس و نظرآباد و ساوجبلاغ و کرج پرداخته شد. سپس جهت شناسایی مناطق با خطر بالا از الگوریتم چند معیاره اراس استفاده گردید. به طور کلی روند افزایش افت سطح آب در محدوده مطالعاتی از سمت جنوب به سمت مناطق شمالی محدوده بوده است. همچنین با بررسی میزان فرونشست نقشه تداخل سنجی راداری (شکل ۱۴) می‌توان گفت که بیشترین میزان فرونشست در مناطق شرقی بخش مرکزی کرج (مهرویلا و مهرشهر و حصارک و حصار و...) بخش شمال غربی ساوجبلاغ- نظرآباد هیو و عرب‌آباد و قوچ حصار و... چهارباغ (ملک‌آباد و سعیدآباد) است. نتایج برآورد شده نشان می‌دهد روند افت سطح آب‌های زیرزمینی با میزان فرونشست رابطه مستقیم دارد. به طوری‌که هر میزان از آب‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد میزان فرونشست در آن منطقه افزایش پیدا می‌کند و باعث فرونشست رسوبات و کاهش تخلخل آن‌ها شده است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میزان آب‌های زیرزمینی خسارت‌های خطر فرونشست کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی، به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۶۱۲۷، ۰/۱۴۱۸۷۵، ۰/۱۳۰۱۴۵ و ۰/۱۲۸۴۷۴ مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی می‌باشند. هم‌چنین طبق نتایج به دست آمده، به ترتیب ۳۱



و ۲۳ درصد از مساحت محدوده، در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد و ریسک بالای فرونشست زمین بیشتر در مناطق مرکزی و شمالی و جنوب غربی منطقه قابل مشاهده است. نتایج برآورد شده در این مقاله با بررسی و مقایسه نتایج پژوهشگرانی چون؛ عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، اصغری و همکاران (۱۴۰۱)، اصغری و همکاران (۱۴۰۱)، باروق و همکاران (۱۴۰۱)، منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، مطابقت دارد؛ بدین صورت که آن‌ها نیز معتقدند که روش‌های تحلیل چند معیاره و تداخل سنجی راداری برای شناسایی مناطق دارای فرونشست، از کارایی بالایی برخوردار بوده و مهمترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار فرونشست بهره برداری بی رویه از آب زیرزمینی و افت سطح آب می باشند. همچنین با مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج دیگر مطالعات صورت گرفته در ایران و جهان، تورانی و همکاران (۱۳۹۷)، یزدانی و همکاران (۱۳۹۸)، منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، اصغری و محمدزاده (۱۴۰۰)، بهاتارای (۲۰۱۷)، تانگ مین و همکاران (۲۰۱۹)، هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، رنجبر و همکاران (۲۰۲۱)، مبنی بر عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع و ذخایر آب های زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن، افزایش فرونشست، مطابقت دارد. با توجه به مقاله آقای دکتر پور خسروانی و نمودارها و جداول موجود و بررسی های صورت گرفته از ارگان های ذی ربط (اب منطقه و راه و شهرسازی استان) یکی دیگر از عواملی که می تواند بر فرونشست تاثیر گذار باشد حرکات نرم پوسته ای است ولی کاهش میزان آب های زیر زمینی و بطور کلی منابع زیر زمینی قطعاً بی تاثیر در فرونشست منطقه نمی باشد. در پایان می توان گفت مدیریت منابع زیر زمینی آب، قطعاً امری مهم در زمینه جلوگیری از بوجود آمدن فرونشست است که در صورت عدم پیشگیری وعدم انجام موارد بالا، سازمان های ذیصلاح می بایست هزینه های بالاتری را جهت تامین خسارات بوجود آمده متحمل گردند. در این پژوهش با توجه به پیگیری های صورت گرفته از سازمان نقشه برداری کشور و وزارت راه و شهرسازی، میزان فرونشست را در سطح استان البرز به صورت تقریبی ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی متر اعلام نمودند که با بررسی سایت ها و گزارشات موجود در خیرگزاری های معتبر و و اعلام اداره اب منطقه ای استان البرز و همچنین فرونشست های صورت گرفته طی سال های گذشته در مناطق اعلام شده در مقاله و همچنین مقالات و سوابق پیشین کار شده در استان البرز و همچنین مطالعات (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸) و (باروق و فتح اله زاده، ۱۴۰۱) در استان البرز می توان گفت نتایج برآورد شده در این پژوهش قابل قبول می باشند. در نهایت می توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می تواند خسارت‌های جبران ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه ی آن، در حریم شهری استان البرز آسیب برساند اشکال (۱) و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۱۷)، لذا پیشنهاداتی به شرح ذیل به مسئولان ذی ربط و همچنین ساکنان محلی جهت جلوگیری از فرونشست در محدوده حریم شهری استان البرز ارائه می گردد :

- اصلاح روش های مدیریت منابع آب و راهکارهای کوتاه مدت به صورت
- جلوگیری از برداشت سفره های آب زیرزمینی به اشکال مختلف
- پایش مستمر مناطق مستعد این پدیده
- ایجاد سدهای زیرزمینی به منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست
- مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح های تغذیه مصنوعی
- توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز
- تهیه و نصب دستگاه‌های کنتور هوشمند
- ایجاد تشکلهای آب‌بران و حمایت از این تشکلهای
- ایجاد و استقرار بازار محلی آب و ساماندهی شرکت‌های حفاری
- کنترل شدید مصرف آب و تغییر الگوی مصرف،
- مقابله و جلوگیری از حفر چاه های غیر مجاز در منطقه

## References

- Abdul Maleki, Ali, Maleki, Amjad, Khazaei, Ali (2021). Monitoring the elevation of the earth and analyzing its geomorphological effects using telemetry data. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 12 (4), pp. 118-95.
- Abedini, M., Aghaari, L. Victory, A, (2023). Evaluation and zoning of the subsidence of Namin city using radar interferometric method and Aras multi-criteria technique, quantitative geomorphology researches, twelfth year, number 2, pp. 40-58.
- Abidin H. Z., Andreas H., Gumilar I., and Brinkman J. J. (2015), On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta, *Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities (HS01 – IUGG2015)*. Published by Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences.
- Aghayary, Leila; Abedini, Mousa;. (2023). Investigating and zoning land subsidence using the Aras multi-criteria model analysis, case study: Ardabil Plain. *Hydrogeomorphology*, 10(36): 94–112.
- Aher P, Adinarayana J, Gorantiwar SD (2013) Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. *Agric Eng Int CIGR J* 15(1):11–18.
- Alinezhad A., Khalili J. (2019) *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. International Series in Operations Research & Management Science, vol 277, Springer, Cham.
- Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M. A. & Walter, T. R. (2008). InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. 2008 Second Workshop.
- Arab Ameri, A., Pourghasemi, H.R., Cerda. A., (2018), Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models, *Science of The Total Environment*, 613-614:1385 1400 .
- Asghari Saraskanrood, Sayad, Mohammadzadeh Shishegran, Maryam. (2021). Estimation of subsidence using radar interferometry technique and groundwater parameters and land use (Case study: Shahriar plain. *Quantitative geomorphological research*, 10 (1), pp. 54-40.
- Bokhari, R., & et al. (2023). Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. *Heliyon*, 9.
- Bou kheir, R., Cerdan, O & Abdelah, C. (2006). Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82, 347-359.
- Chatterjee R S, Shailaja Thapa K B, Singh G,Varunakumar E, Raju V R (2015) Detecting,mapping and monitoring of land subsidence in Jharia Coalfield, Jharkhand, India by spaceborne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques. *Journal of Earth System Science*124(6):1359-1376.
- Georgiou, D., Mohammed, E.S., Rozakis, S., (2015). Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. *Renew. Energy* 75, 459–467.
- Huang, G. Fan, H. Lu, L. Yu, W. 2020, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLIII-B3-pp 1-6.
- Hussain, M.A., Chen, Z., Shoaib, M., Ullah Shah, S., Khan, J., & Ying, Z., 2022. Sentinel1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique.,*Sci Rep*, 12, 5294.

- Kiani, F., Abedini, M., and Ahmadzadeh, G.R. 2017. Investigating the relationship between land subsidence and groundwater level drop in Karaj city using weighted integration method in GIS environment, Civil, Architecture and Urban Planning Conference of Islamic World Countries, Tabriz, pp. 1-8.
- Liu, C.W., Lin, W.S., & Cheng, L.H. (2006). Estimation of land subsidence caused by loss of smectiteinterlayer water in shallow aquifer systems. *Hydrogeology*, 14(4), 508-525.
- Malchevski, Yachek. 2015. Parhizgar, Akbar. Ghaffari, Atta. Geographic information system and multi-criteria decision analysis, first edition, Semit Publications, 597 pages.
- Minh, D. H. T. Tran., Q. C. Pham, Q.N, Dang, T, Nguyen, D.A, El-Moussaw, A. 2019. "Measuring Ground Subsidence in Ha Noi Through the Radar Interferometry Technique Using TerraSAR-X and Cosmos SkyMed Data," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, no. 10, pp. 3874-3884.
- Montazeriun, Maryam; Aslani, Fereshteh. (2019). Landslide risk assessment using GIS in Tehran and Alborz provinces. *Crisis Prevention and Management Knowledge Quarterly*, Volume 9, Number 1, pp. 13-1.
- Motedayen, MH; Esfandiari, M; Moeini, A; Mohammadi Torkashvand, A (2023). Evaluation of Land Subsidence in the Gorgan Plain. *Hydrogeomorphology*, 10(35): 102-119
- Peter, H., Jaggi, A., Fernandez, J., Escobar, D., Ayuga, F., Arnold, D., Wermuth, M., Hackel, S., Otten, M., Simons, W., Visser, P., Hugentobler, U., & Femenias, P. (2017). Sentinel-1A – First precise orbit determination results. *Advances in Space Research*, 60(5), 879–892.
- Pontius, R.G. and L.C. Schneider. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1): 239-248.
- Qanvati, Ezatullah, Sharifi Kia, Mohammad, Hosseini, Seyed Ibrahim. (2019). Explaining the effect and geomorphological process of subsidence phenomenon in changing the land pattern of geomorphological forms Case study of Yazd-Ardakan plain. *Quantitative Geomorphological Research*, 8 (3), 1-16.
- Ranjbar, Babak, Seyed V. Razavi-Termeh, Fatemeh Foroughnia, Abolghasem Sadeghi-Niaraki, and Daniele Perissin. 2021. "Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms" *Remote Sensing* 13, no. 7: 1326. <https://doi.org/10.3390/rs13071326>
- Ranjgar B, Razavi V, Foroughnia T, Sadeghi-Niarak A, & Perissin D., 2021. Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms, *Remote Sensing*, VOL 13, No 7: 1326.
- Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., & Dehghani, M. (2013). Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry. *Irrigation and Water Engineering*, 3(11), 47-57 (In Farsi).
- Shirani Kourosh, Pasandi Mehrdad, Ebrahimi Babak(2021). Investigation of land subsidence in Najafabad plain of Isfahan using radar differential interferometry technique. *Journal of Soil and Water Sciences*. 25 (1): 127-105.
- Turani, Marjan, Aq Atabay, Maryam, Rustaei, Meh Asa. (2019). Study of subsidence in Gorgan city using radar interferometry method. *Journal of Spatial Planning*, 8 (27), 117-128.

- Tuş A, Aytaç Adalı E. 2019. The new combination with CRITIC and WASPAS methods for the time and attendance software selection problem, *opsearch*, 56: 528–538.
- USGS (United States Geological Survey), Research and Review Information Located, Assess on September 2011:<http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165>.
- Zavadskas, E.; Turskis, Z. (2010). a new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making, *Technological and Economic Development of Economy*, 16, 2, pp. 159-172.
- Zhang, Y., Wang, Z., Xue, Y., Wu, J., & Yu, J. (2016). Mechanisms for earth fissure formation due to groundwater extraction in the Su-Xi-Chang area, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 745-760.
- Zhu, L., Gong, H., LI,X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193, 243–255.