

Research Paper



Investigating and zoning land subsidence using the Aras multi-criteria model analysis case study: Ardabil Plain



Leila Aghayary, Mousa Abedini



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/hyd.2023.56609.1695

Reference to this article: 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.

Keywords

Subsidence, zoning, Aras, Ardabil plain, Iran

Receive Date: 2023/05/14

Accept Date: 2022/07/25

Available: 2023/00/00

ABSTRACT

One of the risks that has occurred in many parts of the world, especially in Iran, in recent years is the risk of subsidence. Ardabil plain has also been faced with a sharp drop in the underground water level in the last few years, which has caused this area to be exposed to the risk of subsidence. Therefore, the purpose of this research is to investigate and analyze the most important factors involved in creating the risk of subsidence in the Ardabil plain and to identify the susceptible surfaces that are likely to be involved in subsidence in the near future. The purpose of this research in the first stage is to evaluate the subsidence using radar interferometric technique in the environment of Sarscape software, using the capabilities of A1 Sentinel images in the time frame of 2016 and 2021, and also in the following, regarding the zoning of susceptible areas with the algorithm Aras multi-criteria was implemented in the Edrisi software environment. The results of the present study showed that between zero and 22 mm of subsidence has been created in the studied area, and the highest amount of subsidence is concentrated in the central part and then in the eastern and north-eastern parts. According to the results of subsidence risk zoning; The criteria of water level drop, distance from the river, geology, land use are the most important factors involved in creating the risk of subsidence of the study area with weight coefficients of 0.221, 0.166, 0.152 and 0.147 respectively, and respectively 41 267/21 and 403/21 square kilometers of the range have a very high probability of danger. Finally, it can be said that the most important main factor involved in increasing the amount and potential of subsidence in the Ardabil plain is the excessive use of underground water and the drop in the water level.

This article is derived from the research project under the contract number 401/109 from the funds of the Research and Technology Vice-Chancellor of Mohaghegh Ardabili University.

*** Corresponding Author: Mousa Abedini**

E-mail: abedini@uma.ac.ir

1. Graduated from Mohaghegh Ardabili University with a PhD in Geomorphology, Geomorphic Hazards

2. Professor in Geomorphology of Department of Physiscal Geography, Mohaghegh Ardabili University

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence as a morphological phenomenon is a change in the shape of the earth's surface, which is associated with a vertical change or downward movement of the earth's surface, as well as the gradual removal or settlement of surface materials. The occurrence of subsidence as a morphological phenomenon can be influenced by natural factors (changes in the shape due to tectonic and volcanic factors, imposition of heavy loads, disturbance of isostasis, etc.), human factors (removal of liquids and compression due to imposition, heavy loads, compaction due to land drainage, etc.), although the focus of the event is on two main cases, namely factors of underground water extraction and karstization of soluble rocks.

Methodology

The current applied research is based on an analysis of the integration of data analysis, the geographic information system, and the use of multi-criteria analysis techniques. Zoning the risk of subsidence in the data collection stage requires identifying the influential components, which are the basis for the collection and classification of the required data and information. For this purpose, the affecting factors (including slope, lithology, land use, distance from the city and village, distance from the river, distance from the fault, and drop in the underground water level) were changed in this research according to the natural conditions. The human conditions of the region and then information layers related to each environmental factor of the geographic information system were prepared in the next step. The ARAS method is based on the argument that the complex phenomena of the world can be understood using simple relative comparisons.

Results and Discussion

The result of investigating the rate of subsidence between 0 and 22 mm in the last 6 years shows that the highest rate of subsidence (10-22 mm) is concentrated in the central and eastern parts. The analysis of the land use map, subsidence, and conducted studies confirms that the most occurrence of subsidence is in agricultural, urban, and rural areas, respectively. The areas with agricultural use have a high potential for subsidence due to the utilization of underground water fields, and there is a two-way relationship between urban development and land subsidence in which both influence and are influenced by each other. The results obtained from the Aras zoning method according to the criteria of water level drop, distance from the river, geology, and land use were assigned the most weight and importance.

Conclusions

The results of the assessment of the underground water situation in the region indicate that the study area has experienced an increasing trend of underground water level drop in recent years. The water level drop in some wells has reached 9 m, and subsidence occurs with the decrease in the underground water level and the increase in effective stress caused by the decrease in pore water pressure. In general, the water level drop has increased from the west to the east of the study area. The evaluation of the rate of subsidence in the region shows that the highest rate of subsidence occurred in the central and eastern areas of the study area, with an increase from the south to the north and west to the east of the study area. According to the results of zoning the risk of sales, the criteria of water level drop, distance from the river, lithology, and land use (with the weight coefficients of 0.221, 0.166, 0.152, and 0.147, respectively) are the most important factors involved in creating the risk of subsidence in the study area. According to the results, 267.41 and 403.21 km of the range area are in the categories, respectively, and there is a high risk of land subsidence in the central, eastern, and northern regions. According to the obtained results, it can be concluded that the excessive utilization of underground water and the drop in the water level are the most important factors involved in increasing the rate and potential of subsidence in the study area.

مقاله پژوهشی



بررسی و پهنه‌بندی فرونشست زمین در دشت اردبیل با استفاده از تحلیل مدل چند معیاره آراس

لیلا آقایی^۱، موسی عابدینی^{۲*}

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کرییتیو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: آقایی، لیلا؛ عابدینی، موسی؛ (۱۴۰۲). بررسی و پهنه‌بندی فرونشست زمین در دشت اردبیل با استفاده از تحلیل مدل چند معیاره آراس. هیدروژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۶): ۹۴-۱۱۲.

DOI:10.22034/hyd.2023.56609.1695



چکیده

کلیدواژه‌ها

یکی از مخاطراتی که طی سال‌های اخیر در بسیار از مناطق دنیا به خصوص ایران رخ داده، مخاطرات ناشی از فرونشست است. دشت اردبیل نیز، در طی چند سال اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه بوده که این عامل سبب گردیده تا این منطقه در معرض وقوع مخاطره فرونشست قرار گیرد. لذا، هدف این پژوهش بررسی و تحلیل مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست دشت اردبیل و مشخص کردن سطوح مستعد که احتمالاً در آینده نزدیک درگیر فرونشست خواهند شد. هدف از این پژوهش در مرحله اول ارزیابی فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری در محیط نرم افزار Sarscape، با بهره از قابلیت تصاویر Sentinel-A1 در بازه زمانی ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ و همچنین در ادامه، نسبت به پهنه‌بندی مناطق مستعد با الگوریتم چند معیاره Aras در محیط نرم افزار Edrisi اقدام گردید. نتایج مطالعه حاضر نشان داد مقدار بین صفر تا ۲۲ میلی متر فرونشست در محدوده مورد مطالعه ایجاد شده است که بیشترین میزان فرونشست در بخش مرکزی و سپس در بخش شرقی و شمال شرقی متمرکز است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، فاصله از رودخانه، زمین شناسی، کاربری اراضی به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۲۲۱، ۰/۱۶۶، ۰/۱۵۲ و ۰/۱۴۷، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی بوده و به ترتیب ۲۶۷/۴۱ و ۴۰۳/۲۱ کیلومتر مربع از محدوده دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد می باشد. در نهایت می توان گفت مهم‌ترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست دشت اردبیل، بهره ی بی رویه از آب های زیرزمینی و افت سطح آب است.

فرونشست، پهنه‌بندی، ARAS،
دشت اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۰/۰۰

- این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره قرارداد (۴۰۱/۱۰۹) از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی می باشد.

* نویسنده مسئول: موسی عابدینی

رایانامه: abedini@uma.ac.ir

۱- فارغ التحصیل دکتری در رشته ژئومورفولوژی (گرایش مخاطرات ژئومورفیک)، از دانشگاه محقق اردبیلی

۲- استاد گروه جغرافیای طبیعی (گرایش ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی

مقدمه

فرونشست زمین به عنوان پدیده‌ای مورفولوژیک، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی یا دفعی مواد سطحی همراه است (شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۴). هر چند محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی‌شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر است (شریفی کیا، ۱۳۹۱: ۷۴) پیامدهای محیطی پدیده فرونشست ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب بوده و اساساً شامل ایجاد شکاف روی سطح زمین، آسیب رساندن به سازه‌های انسانی مانند پی ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها، راه‌ها و خطوط انتقال نیرو و فاضلاب، تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی و ایجاد خسارت به چاه‌ها است. همچنین پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز سیلاب شود. فرونشست زمین یکی از مخاطرات محیطی کشورمان هست که در بلند مدت پیامدهای مخربی بر شهرها، تأسیسات، خطوط ارتباطی و اراضی کشاورزی دارد (عابدینی و سرایی، ۱۴۰۰). مهم‌ترین عامل فرونشست اغلب دشتهای ایران، برداشت بی‌رویه و از منابع آبهای زیرزمینی به موازات حاکمیت خشکسالی‌ها در چند دهه اخیر، توسعه بخش صنعت و کشت‌های عموماً با نیاز آبی بیشتر به همراه غالب بودن سیستم آبیاری سنتی می‌باشد (عابدینی، ۱۳۹۲: ۷۱). این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در جهت، سرعت جریان و توازن آب زیرزمینی نیز مخاطرات جبران ناپذیری در پی داشته است. فرونشست زمین در ایران سابقه‌ای طولانی دارد، در گذشته تنها بعضی از استان‌ها از جمله کرمان و یزد با این مسئله مواجه بودند ولی در حال حاضر بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی سبب شده تا بسیاری از دشتهای ایران با مسئله فرونشست مواجه باشند. بر اساس آمار اعلام شده در کشور ایران، اثرات سوء و ناخوشایند ناشی از رخداد فرونشست رقم پائینی نیست و به سرعت در حال ایجاد و بسط و گسترش در دشتهای مختلف سراسر کشور می‌باشد که عدم مدیریت و کنترل به موقع عوامل آن می‌تواند خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری بر جای بگذارد (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸: ۱۲). رخداد پدیده مورفولوژیکی فرونشست می‌تواند متأثر از عوامل طبیعی (تغییر شکل‌های ناشی از عوامل تکتونیکی و آتشفشانی، تحمیل بارهای سنگین، به هم خوردن ایزوستازی، فشردگی حاصل از ارتعاشات در اثنای زلزله، خشک شدن رسوبات ریزدانه، اکسیداسیون خاک‌های آلی، ذوب پرمافروست، انحلال مواد و عناصر قابل حل) و عوامل انسانی (برداشت مایعات، فشردگی ناشی از تحمیل بارهای سنگین، فشردگی به علت زهکشی زمین و...) شکل گیرد (عابدینی، ۱۳۹۶: ۳۷).

باید توجه داشت که از یک سو، یکی از مهم‌ترین راهکارهای کنترل فرونشست در مناطق بر اساس تجارب جهانی، روش‌های غیرسازه‌ای کاهش دهنده و تطبیق دهنده می‌باشد (آبیدین و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۰) و از سوی دیگر، اندازه‌گیری میزان رخداد فرونشست در مقیاس وسیع به دلیل نرخ کند و بطئی آن چالش برانگیز است و نیاز به فناوری‌های پیشرفته دارد. امروزه؛ سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات مدیریت ریسک هستند (بوخیر و همکاران، ۲۰۰۶: ۴۲) و همچنین، برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش ARAS استفاده می‌شود (آهر و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۱). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران، ۲۰۱۵؛ عرب عامری و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین می‌توان گفت، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد.

با توجه به اهمیت موضوع در طی سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه فرونشست صورت گرفته است. تورانی و همکاران (۱۳۹۷)، به مطالعه فرونشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداخته و برداشت بیش از حد و افت سطح آب زیرزمینی را مهم‌ترین علت فرونشست در منطقه عنوان کردند. کوه بنانی و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی به بررسی فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری در دشت کاشمر و خلیل آباد (سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷)، پرداختند. نتایج نشان داد این منطقه در بیشترین حالت ۱۱ سانتیمتر در سال فرونشست دارد و به طور تقریبی هر ۱ متر افت آب زیرزمینی منجر به فرونشست حداکثر ۱۳ سانتیمتر زمین می‌گردد. منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی به ارزیابی خطر فرونشست زمین در پهنه استان‌های تهران و البرز پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان داد، مناطق وسیعی در استان تهران از جمله غرب و جنوب غربی و همچنین

دشت ورامین، شهریار، کرج، نظرآباد و ساوجبلاغ در استان البرز از جمله مناطق مستعد وقوع فرونشست هستند و آنچه باعث ایجاد خطر فرونشست می‌گردد، عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع و ذخایر آب‌های زیرزمینی در سطح استان است. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل‌سنجی پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه، در طی بازه زمانی یک ساله بین ۱۵ تا ۸۵ میلی‌متر فرونشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و موثرترین عامل در فرونشست را هم‌افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. فرزین کیا و همکاران (۱۴۰۰)، پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جویین را با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای - فازی مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به نتایج مطالعه حدود ۵۶ درصد از مساحت محدود و به طور شامل قسمت مرکزی دشت دارای احتمال خطر زیاد تا خیلی زیاد می‌باشد و تراکم بالای چاه‌های عمیق و نیمه عمیق و افت بالای آب‌های زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه، به عنوان دلیل اصلی استعداد بالای فرونشست محدوده مشخص شد. اصغری و محمدزاده (۱۴۰۰)، به پایش فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی در دشت شهریار پرداخته‌اند و طبق نتایج حاصله، بیشترین میزان فرونشست ۱۱ سانتیمتر می‌باشد و در طی شش سال ۷ متر افت آب زیرزمینی در منطقه وجود داشته و برداشت بیش از حد و افت سطح آب زیرزمینی را مهم‌ترین علت محدوده مطالعاتی می‌باشد. روستایی و همکاران (۱۴۰۱)، مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش FUZZY-AHP، در دشت شبستر- صوفیان، مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج مطالعه، مناطق جنوبی و غربی دشت شبستر- صوفیان مستعد فرونشست زیاد تا خیلی زیاد بوده است و این مناطق منطبق بر کاربری‌های کشاورزی و مراتع می‌باشند.

متدین و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی میزان فرونشست در دشت گرگان پرداختند و میزان آهنگ فرونشست در این دشت را ۱۶ میلی‌متر برای هر ماه را برآورد کردند. فرزین کیا و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی فعالیت‌های تکتونیکی و تاثیر آن بر فرونشست زمین در حوضه آبریز جویین پرداختند و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که از لحاظ زمین ساختی این حوضه در حالت فعال قرار دارد و دامنه فرونشست در راستای ارتفاعات به صورت شرقی- غربی می‌باشد. گامبولاتی و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی به مطالعه تاثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرونشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشست در مناطق مسکونی بیان کردند. مین و همکاران^۱ (۲۰۱۹)، در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام، از طریق تکنیک تداخل سنجی راداری پرداختند و با توجه به نتایج حاصله، افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل موثر در فرونشست محدوده شناخته شده است. هوانگ و همکاران^۲ (۲۰۲۰)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری می‌باشد و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. رنجبر و همکاران^۳ (۲۰۲۱)، به بررسی حساسیت فرونشست زمین، در شهرستان شهریار با استفاده از تکنیک تداخل سنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین بردار پرداختند و به این نتیجه رسیدند، در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت و برداشت بیشتر از آب‌های زیرزمینی؛ نرخ فرونشست افزایش یافته است. گرج و همکاران^۴ (۲۰۲۲)، در پژوهشی، با استفاده از تکنیک InSAR، به مطالعه خطر فرونشست زمین در شهر دهلی هند، در طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، پرداختند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، به طور تقریبی، ۱۰۰ کیلومترمربع از مساحت منطقه در معرض خطر فرونشست زمین قرار دارد و گسترش و برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، به عنوان علت اصلی فرونشست زمین، در منطقه می‌باشد.

در نهایت می‌توان اظهار داشت، نظر به توان بالای دشت اردبیل، از لحاظ رخداد فرونشست، بایستی اقدامات حفاظتی، مدیریتی در سطح دشت اردبیل مورد توجه مسئولان و دستگاه‌های ذیربط قرار گیرد. دشت اردبیل، از دشت‌های حاصل‌خیز استان اردبیل است. در این دشت به دلیل شرایط خشک حاکم بر منطقه و بارش دریافتی کم، کشاورزان علاوه بر آب‌های سطحی، از آب‌های زیرزمینی به عنوان مکمل برای آبیاری مزارع و باغات استفاده می‌کنند. لذا، در سال‌های اخیر این دشت با مشکل برداشت بی‌رویه آب و در نتیجه فقر

¹ Minh et al

² Huang et al

³ Ranjgar et al

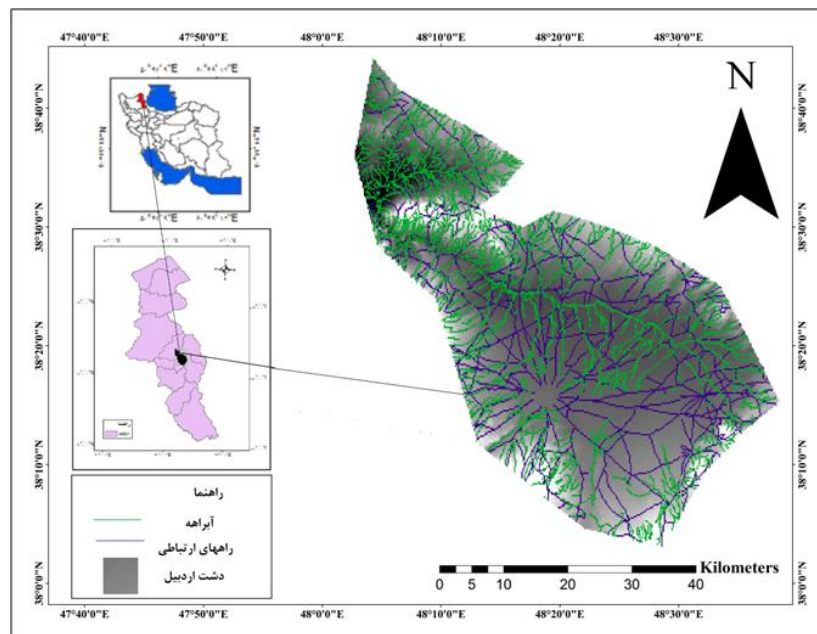
⁴ Garg et al

سفره‌های آب زیرزمینی و فرونشست زمین روبه‌رو شده است. فرونشست می‌تواند به تأسیسات و زیرساخت‌های استان مثل فرودگاه‌ها، راه‌ها، شبکه‌های ریلی و نیروگاه‌های استان خسارت وارد کند و حتی آنها را از ارتفاع خارج کند و علاوه بر آن منجر به خسارت دیدن منازل مردم شود و نیز موید وجود تعداد کثیری شواهد و رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی و نشست زمین در دشت اردبیل، می‌باشد. از جمله این موارد می‌توان به درز و ترک‌های روی دیوار منازل و ترک و نشست جاده‌ها و خیابان‌های و ترک‌هایی که در روی زمین‌های کشاورزی و در سطح شهر شکل گرفته اشاره کرد. در پژوهش حاضر به ارزیابی مقدار فرونشست محدوده دشت اردبیل در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری پرداخته شده است. یکی دیگر از اهداف این مطالعه تهیه و ارائه نقشه پهنه‌بندی خطر نشست زمین با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاری آراس و با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی است تا بر اساس آن هم محدوده فعلی وجود مشکل مشخص شود و هم سایر سطوح مستعد که احتمالاً در آینده درگیر این مشکل خواهند شد، شناسایی گردند.

۲- مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

دشت اردبیل یک دشت میانکوهی است که در شمال غربی ایران و در شرق آذربایجان بین عرض شمالی ۳۸ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه و طول شرقی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه واقع شده است. ارتفاع متوسط اراضی کشاورزی حدود ۱۳۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد است (شکل ۱). وسعت آن حدود ۹۹۰ کیلومترمربع است و جزئی از حوضه آبریز رود قره‌سو به شمار می‌رود. دشت اردبیل متشکل از ۸۸ واحد روستایی، ده واحد دهستان و ۲ واحد شهری (اردبیل و آبی بیگلر) است. شهر اردبیل مرکز استان اردبیل در غرب این دشت واقع شده است. در غرب آن توده‌ی آتشفشانی سبلان در شرق آن رشته‌کوه تالش (باغ‌وداغ)، از طرف شمال به ادامه کوه‌های تالش و از طرف جنوب به کوه‌های کم ارتفاع که در حقیقت ادامه ارتفاعات بزغوش به شمار می‌آیند، محدود می‌گردد. تنها راه خروجی دشت از طرف شمال غربی است که به وسیله آن به طرف رودخانه دره رود که شاخه‌ای از ارس است، باز می‌شود. از این نظر یک دشت نیمه‌باز و یا یک دشت نیمه بسته به شمار می‌آید.



شکل (۱): موقعیت منطقه (محدوده) مورد مطالعه

Fig (1): The study area

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چند معیاره است. در این پژوهش از تصاویر سنتینل ۱ که در محدوده باند C امواج میکروویو اخذ تصویر می‌کند، استفاده

شده است. سپس پردازش های لازم از طریق افزونه SARSCAPE 5.2 در نرم افزار ENVI 5.3 انجام شد و تکنیک مورد استفاده در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، روش تداخل سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیر مکرر می باشد. از اساسی ترین مراحل در پردازش تداخل سنجی راداری انتخاب مناسب زوج تصویر مناسب است که چند عامل همچون فرکانس سنجنده، خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی و همچنین همپوشانی فضایی در راستای حرکت سنجنده در انتخاب زوج تصاویر موثر می باشند. در پژوهش حاضر از دو تصویر Sentinel-1-A از نوع SLC مربوط به سال ۲۰۱۶ و سال ۲۰۲۱ استفاده گردید. مشخصات تصاویر راداری در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده
Table(1) Specifications of images used

Year	Sensor name	Sub-image	Original image	Number
2016	Sentinel1	S1A_OPER_AUX_20151101	S1A_IW_SLC__1SDV_160330	1
2021	Sentinel1	S1A_OPER_AUX_20200127	S1A_IW_SLC__1SDV_200618	2

یک سیگنال راداری با درجه مصنوعی از دو بخش دامنه و فاز تشکیل شده است. دامنه، قدرت سیگنال برگشتی است و فاز کسری از یک سیگنال کامل موج سینوسی است. فاز در تصویر راداری از طریق فاصله بین آنتن سنجنده و عارضه زمینی مشخص می گردد. اگر چه فاز یک تصویر منفرد به سختی اطلاعات مفیدی در اختیار قرار می دهد اما تفاوت فاز یک زوج تصویر هم مرجع و همدوس اطلاعات ذی قیمتی در اختیار محققان قرار می دهد. در تداخل سنجی راداری تفاوت فاز دو تصویر از یک منطقه زمانی و خط مبنای مشخص تعیین می گردد (دهقانی بیدگلی و همکاران، ۱۳۹۹:۱۷۸). روش تداخل سنجی راداری (InSAR) امکان تولید مدل رقومی ناهمواری های زمین را فراهم می آورد که دقت ارتفاع بهینه آن برای داده های نوار C با طول موج ۵/۶ سانتیمتر حدود پنج متر است (چاترجی و همکاران، ۲۰۰۶:۱۷۹). این روش را برای اولین بار توسط گلدشتاین^۱ و زیکر^۲ در سال ۱۹۸۹ ارائه شد. این اصطلاح به روش اندازه گیری پاره ای از پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابجایی سطح زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصاویر راداری با روزنه مجازی (SAR) اخذ شده از منطقه مشابه اطلاق شده است. این روش قادر است با استفاده از دست کم دو تصویر DEM یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه های متفاوت با دقت های میلی متری آشکار سازی می کند. اصول بنیادین نحوه اندازه گیری تغییرات سطحی پوسته زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست (تصویر اصلی) T0 ثبت و مقدار فاز را (Φ_m) آن را اندازه گیری می کند. مقدار نشست عبارت اند از فاصله P تا P1 که طی زمان مشخصی صورت گرفته است (Dt). برای اندازه گیری این مقدار، سنجنده تصویر دومی (تصویر فرعی) در زمان t و با هندسه ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز (Φ_m) را برای آن اندازه گیری می کند. روش تداخل سنجی تفاضلی، تفاضل فاز Φ_s و Φ_m را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می دهد ($\Delta\Phi_{int}$). در صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده و مقدار آن به کمک رابطه (۱) به دست می آید.

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

که در آن SP فاز تصویر اول، MP فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت ۳/۱۴ و λ طول موج می باشد. در اندازه گیری مقدار فرونشست در این روش، سطح ناپایدار تصور شده، به طوری که سطح از P به P1 تنزل یافته است. تعیین مقدار نشست در فاصله زمانی دو تصویر

¹ Goldstein
2.zebeker

(۲)

در روش طبقه‌بندی شیء‌گرا، اطلاعات طیفی با اطلاعات مکانی ادغام گردیده و پیکسل‌ها براساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه‌بندی شده و طبقه‌بندی تصویر براساس این قطعه‌ها انجام می‌شود. در قطعه‌بندی پیکسل‌ها توسط الگوریتم‌های مختلف، با نسبت‌های مختلف طیفی و شکلی طبقه‌بندی و براساس ویژگی‌های طیفی و فضایی در قالب اشیا گوناگون دسته‌بندی شده‌اند. طی این فرآیند شیء‌های تصویری متناسب با همگن بودن یا ناهمگن بودن براساس پارامترهای

هيدرورثومورفولوزي، دوره ۱۰، شماره ۳۶، پائيز ۱۴۰۲

مقیاس، رنگ، شکل، ضریب نرمی و شکل فشردگی ایجاد شد (فیضی زاده و هیلالی، ۲۰۱۰: ۷۶). با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان دهنده اشیاء با ابعاد مختلف می باشند تعیین شد. در این پژوهش تصویر قطعه بندی شده دارای مقیاس ۴۵، شکل ۵/۰، ضریب فشردگی ۵/۰۱ انجام گردید. بعد از مشخص کردن تعداد و کلاس های مورد نظر در طبقه بندی تعیین شی های نمونه های آموزشی انجام و در نرم افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. سپس طبقه بندی با استفاده از نزدیک ترین همسایه و روش درخت تصمیم گیری صورت گرفت. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از صحت و درستی آن است. دقت طبقه بندی در سال ۲۰۲۱ با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۶ است.

در مطالعه مربوط به علل فرونشست زمین، بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی دارد. به همین دلیل اطلاعات مربوط به تغییرات سطح آب زیرزمینی در طی سال ۶۶ تا ۹۹ که از چاه پیرومتر واقع در دشت اردبیل برداشته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور انتخاب بهترین و دقیق ترین مدل درون یابی از بین مدل های مختلف، تمامی مدل ها مورد ارزیابی قرار گرفتند و تنها مدل هایی انتخاب شدند که دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل ها بودند. به منظور پایش سطح آب های زیرزمینی نقشه سطح آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای هر دو سال (۶۶ و ۹۹) با روش مدل های کریجینگ که نتایج بیانگر دقت بالای این روش است مورد استفاده قرار گرفت.

جهت پهنه بندی، خطر فرونشست، در مرحله جمع آوری داده ها، ابتدا باید مؤلفه های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن ها داده ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، 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 لایه های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه های اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه رودخانه های استان اردبیل، استخراج شد. لایه های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، دانلود شده از سایت (vertex.daac.asf.alaska.edu)، تهیه و لایه های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ ها) و گسل ها، با رقومی سازی از روی نقشه زمین شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر سنجنده لندست ۸ سنجنده (OLI)، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov) استفاده شده است. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر با استفاده از روش Flaash، در نرم افزار Envi، انجام شد. سپس طبقه بندی با روش شیء گرا و الگوریتم نزدیک ترین همسایگی در نرم افزار Ecognition Developer، صورت گرفت و نتایج حاصله از طبقه بندی کاربری ها در مطالعه حاضر، چه از نظر تک تک کاربری ها و چه از نظر مجموع صحت و آمار کاپا، از صحت قابل قبولی (بزرگ تر از ۸۵ درصد)، در ارتباط با اطلاعات تولید شده برخوردار می باشد.

فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP): روش (ANP) شکل توسعه یافته ای از روش (AHP) است که قادر است همبستگی و بازخوردهای موجود بین عناصر در یک تصمیم گیری را مدل سازی نموده و تمامی تأثیرات درونی اجزای مؤثر در تصمیم گیری را منظور و وارد محاسبات نماید. در مدل AHP، تنها معیارها با معیار بالایی خود ارتباط داشتند؛ یعنی معیارها به هدفها، زیرمعیارها به معیارها و گزینه ها هم به زیرمعیارها وابسته بودند، حتی خود معیارها هم به همدیگر وابسته نبودند. ولی در مدل ANP، نه تنها خوشه ها بر عناصر و عناصر بر گزینه، گزینه بر عناصر تأثیر می گذارند، بلکه حتی عناصر بر خودشان و بر دیگر خوشه ها نیز اثرگذارند. به طور کلی، روش (ANP) دارای مراحل زیر می باشد که شامل، ۱- تعیین معیارها و شاخص ها ۲- تعیین روابط و ارتباطات بین عناصر و خوشه ها: در این گام، مسأله ای تصمیم گیری به ساختار شبکه ای تجزیه می گردد. ۳- مقایسات زوجی بین عناصر و خوشه ها: ماتریس های مقایسات زوجی مشابه با روش (AHP) می باشد و زوج های عناصر تصمیم گیری در هر خوشه به نسبت اهمیت شان در جهت شرط های کنترلی آن ها مقایسه می شوند ۴- تشکیل سوپرماتریس ها: الف- تشکیل سوپرماتریس اولیه یا غیر وزنی ب- تشکیل سوپرماتریس وزنی ج- تشکیل سوپرماتریس حدی: سوپرماتریس وزنی، به توان حدی می رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند ۵- نتایج ماتریس خوشه ها ۶- نتیجه ی نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه ها نرمال شده و در نهایت، نتیجه ی نهایی عناصر و اولویت آن ها مشخص می گردد (فرجی سبکبار و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۵۲).

مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش ARAS¹ (ارزیابی نسبت جمعی) روش ARAS مبتنی بر این استدلال است که با استفاده از مقایسه‌های ساده نسبی می‌توان پدیده‌های دنیای پیچیده را درک کرد. این تکنیک، روشی قدرتمند در ارائه نرخ عملکرد و درجه مطلوبیت گزینه‌های مختلف نسبت به وضع بهینه است و از سهولت کاربرد نسبی نیز برخوردار است. مراحل الگوریتم پیاده‌سازی آراس به شرح ذیل می‌باشد:

۱: تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش به صورت معیار-گزینه است. یعنی یک ماتریسی که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. ۲: نرمال کردن ماتریس تصمیم یا استانداردسازی: در پیاده‌سازی تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر فرونشست، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی صورت پذیرفت (جدول ۲). استاندارد نمودن داده‌ها به معنی همسان کردن دامنه تغییرات داده‌ها بین صفر و یک و یا یک دامنه مشخص دیگر است. در مجموعه‌های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلق می‌گیرد.

جدول ۲. نوع توابع فازی‌ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه

Table(2): The type of fuzzifier functions of thematic layers affecting the risk of selling the studied area

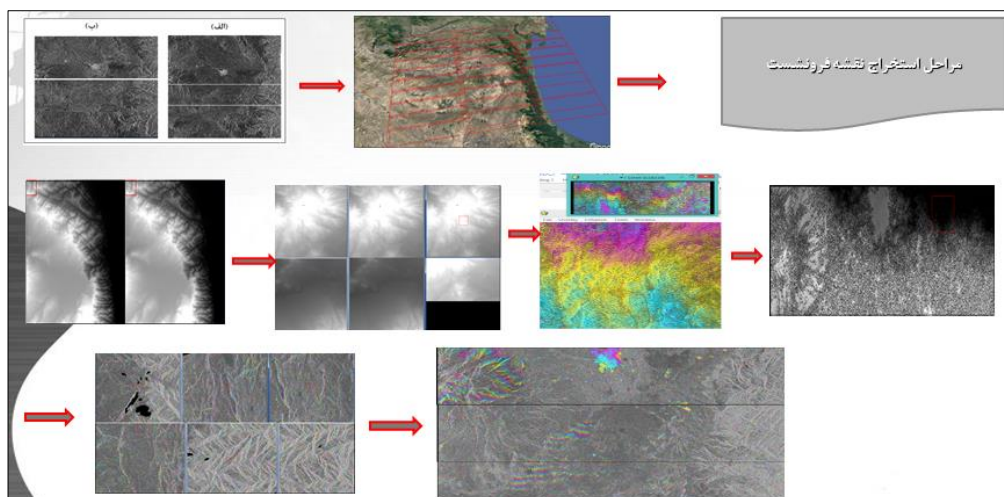
متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	با کاهش مقدار شیب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور از شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور خطوط گسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
افت سطح آب	با کاهش مقدار افت سطح آب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- برآورد مقدار فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری

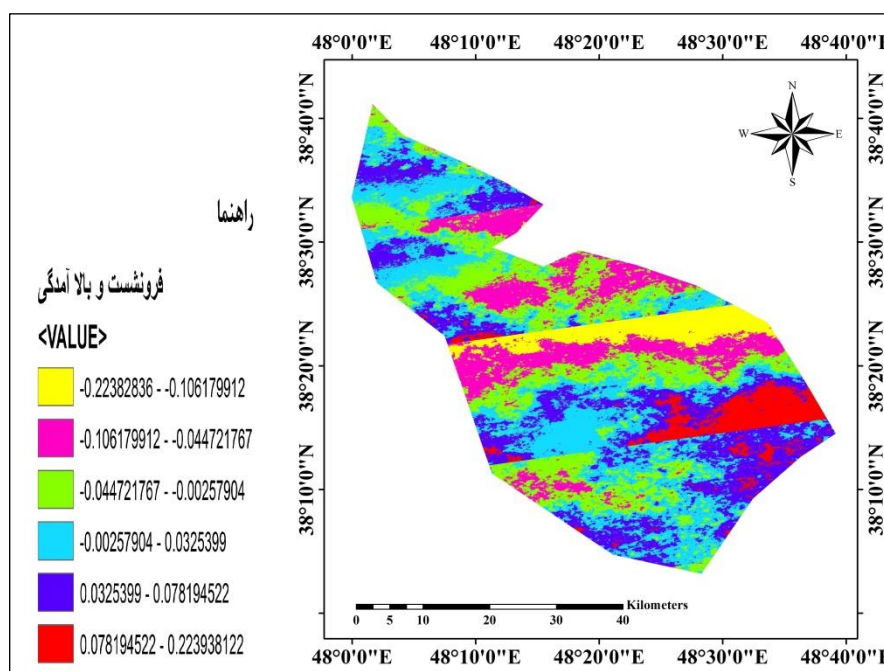
پس از انجام مراحل تداخل سنجی تبدیل اختلاف فازها به جابجایی عمودی انجام شد و به جابجایی عمودی در سیستم متریک تبدیل شده است. تصویر جابجایی و جابه‌جایی اصلاح شده در شکل (۲)، نمایش داده شده است خروجی نهایی حاصل از برآورد مقدار فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری می‌باشد که با توجه به نقشه خروجی، مقادیر مثبت و به رنگ قرمز و آبی جابه‌جایی مربوط به حرکت زمین به سمت دید راداری (بالا آمدگی) و مقادیر منفی به رنگ زرد و بنفش بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری (فرونشست) است. نتیجه مطالعه میزان فرونشست بین صفر تا ۲۲ میلی متر را در طی ۶ سال اخیر، نشان می‌دهد که با توجه به نقشه مزبور، بیشترین میزان فرونشست در بخش مرکزی و شرق به مقدار ۱۰ تا ۲۲ میلی متر، متمرکز است. در این مناطق به سبب تامین نیازهای آبی جامعه سکونت گاهی و مناطق اطراف و همچنین تامین نیازهای آبی بخش صنعت از جمله کارخانه‌ها و فعالیت‌های کشاورزی، دست اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و استحصال آب‌های 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 ۳). برای اعتبار سنجی دقت پیکسل‌ها در تداخل سنجی به صورت موردی محدوده‌های دارای بیشترین میزان فرونشست در طی بازه زمانی مطالعه با تصویر کوه‌رنسی مورد ارزیابی قرار گرفت و دقت محاسبات در پیکسل‌های مورد نظر دارای کوه‌رنسی بین ۰/۸ تا ۰/۶ بوده که دقت بسیار بالای محاسبات در پیکسل را نشان می‌دهد.

¹ Additive Ratio Assessment



شکل ۲. تصویر مراحل استخراج نقشه فرونشست به روش تداخل سنجی راداری

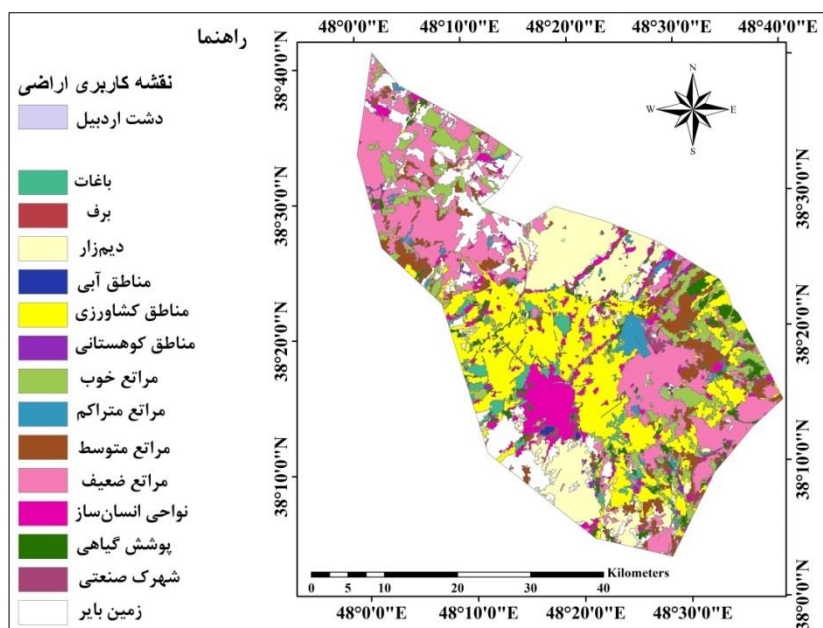
Fig (2): Image of the steps of extracting the subsidence map using the radar interferometric method



شکل ۳. نقشه فرونشست و بالا آمدگی دشت اردبیل

Fig (3): Map of subsidence and uplift of Ardabil plain

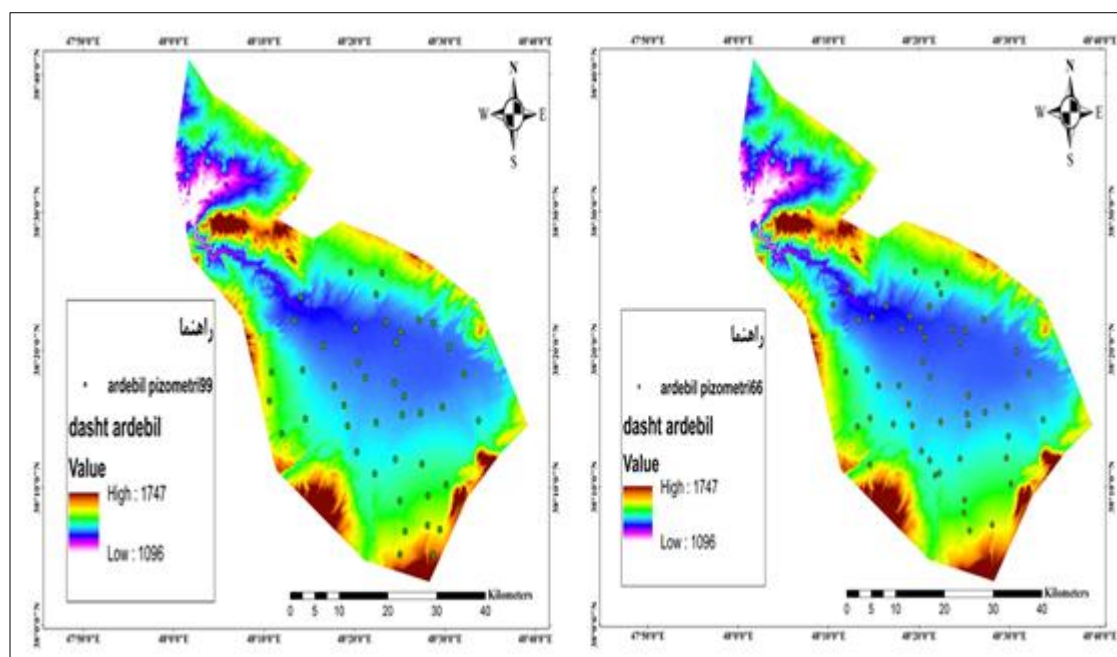
بررسی و تحلیل نقشه کاربری اراضی (شکل ۴) و فرونشست و مطالعات صورت گرفته موید رخداد بیشینه عرصه فرونشست به ترتیب در مناطق کشاورزی و محدوده شهری و روستایی می باشد. به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی به دلیل بهره برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد و رابطه بین توسعه 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 باغ ها و ویلاها در استان باعث شده تعدادچاه ها افزایش پیدا کنند. لذا افزایش بهره برداری از یک سو و توسعه مناطق شهری و عدم تغذیه به آبخوان از طرف دیگر منجر به ایجاد نشانه های فرونشست در بسیاری از نقاط دشت اردبیل، شده است.



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی (روش شی گرا) محدوده مورد مطالعه

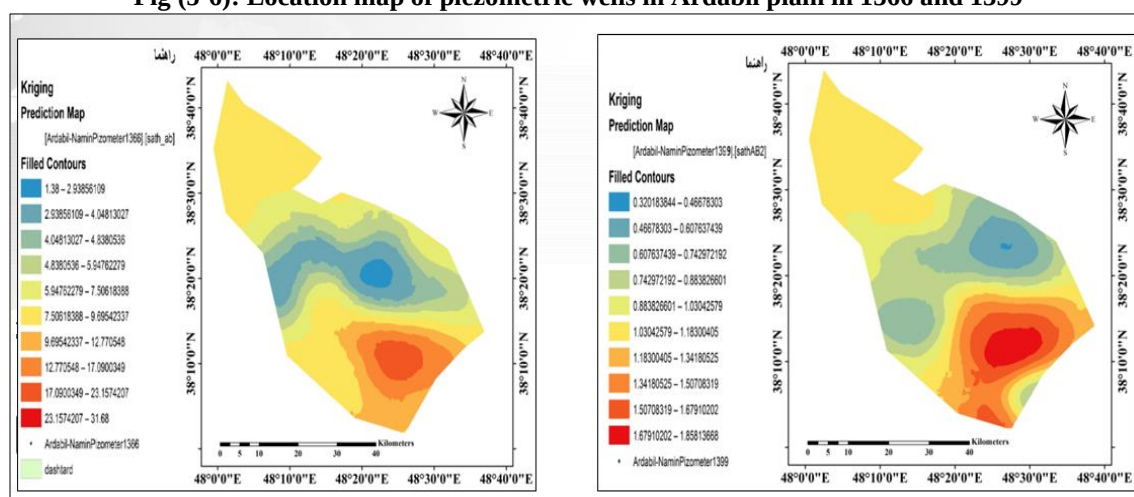
Fig (4): Land use map (object oriented method) of the study area

نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده براساس روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی از طریق اطلاعات چاه‌های پی‌زومتری مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. بررسی وضعیت و تاثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی و تاثیر آن بر میزان فرونشست به طور میانگین کاهش ۹/۵ متری سطح ایستابی را در سال ۱۳۹۹ نسبت به سال ۱۳۶۶ نشان می‌دهد (شکل ۶ و ۷). بررسی وضعیت موقعیت مکانی چاه‌ها و میزان افت سطح آب در آن‌ها نیز، بیانگر این است که در یک روند کلی میزان افت سطح آب از غرب محدوده به سمت شرق محدوده و همچنین از شمال به سمت جنوب محدوده بیشتر می‌شود. به طور کلی، داده‌های مکانی چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه‌های خطوط هم‌افت و هم‌عمق، در دشت اردبیل با مناطق نشست حاصل از پردازش راداری در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، مطابقت دارد و مناطق با فرونشست زیاد، در مناطقی با بیشترین مقدار افت آب و در مناطقی با عمق کم آب قرار دارد. به علاوه بیش‌ترین میزان فرونشست زمین در مجاورت چاه‌های پی‌زومتری مشاهده می‌گردد. به علت مساعد بودن شرایط کشاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا در محدوده دشت اردبیل، برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و همچنین به منظور تأمین بخش اعظمی از آب بخش شرب، بهره‌برداری از چاه‌های منطقه افزایش یافته، به طوری که این میزان از بهره‌برداری در بعضی موارد بیشتر از توان احیای چاه‌ها بوده است و به همین دلیل میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن مقدار نشست زمین، بالا می‌باشد. بررسی ارتباط بین معیار افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست و منطبق نمودن مناطق با نرخ بالای فرونشست با موقعیت چاه‌ها نیز بیانگر این است که بین افت سطح آب چاه‌ها و میزان فرونشست منطقه رابطه تنگاتنگی برقرار است (شکل ۷ و ۸).



شکل ۵ و ۶: نقشه موقعیت چاههای پیزمتری دشت اردبیل سال ۱۳۶۶ و ۱۳۹۹

Fig (5-6): Location map of piezometric wells in Ardabil plain in 1366 and 1399



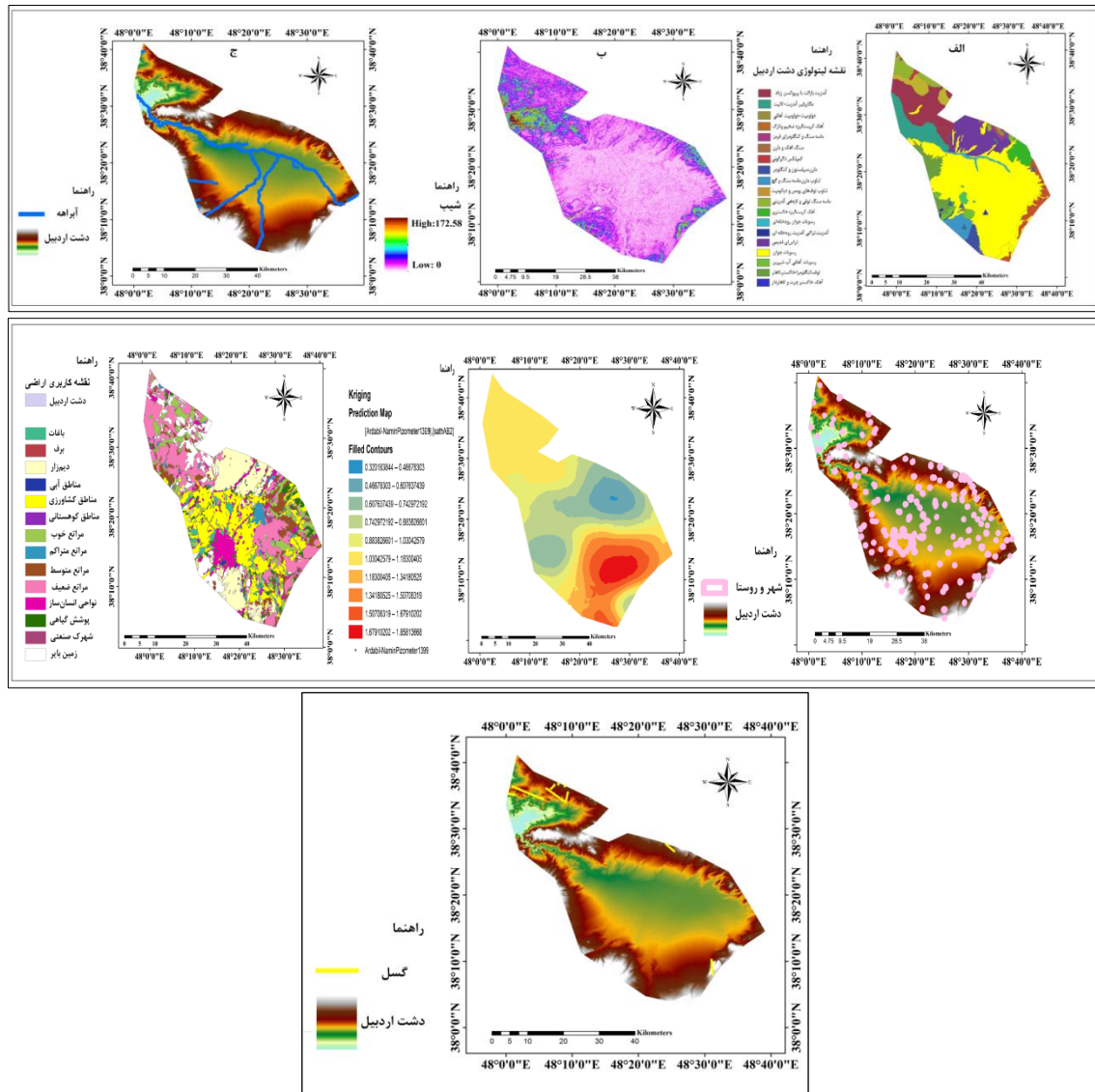
شکل ۷ و ۸: نقشه درونیابی به روش کریجینگ سال آبی ۱۳۶۶ و ۱۳۹۹

Fig (7-8): Interpolation map using Kriging method for the water year 2019 and 2018

۲-۳- پهنه بندی خطر فرونشست

به منظور پهنه‌بندی خطر فرونشست، ابتدا استانداردسازی معیارها انجام شد (شکل ۹). سپس با استفاده از مراحل وزن‌دهی ANP نسبت به تعیین ضریب وزنی عوامل دخیل در فرونشست محدوده‌ی مطالعاتی، اقدام شده است و با اعمال مراحل مختلف تکنیک آراس، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست در ۵ طبقه‌ی بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، بدست آمد (شکل ۱۰). با توجه به نتایج حاصله، به ترتیب معیارهای افت سطح آب، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی و کاربری اراضی، بیشترین وزن و اهمیت را دریافت کردند (جدول ۳) و با توجه به اینکه در وزن‌دهی، 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 مقایسه زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فرایند تحلیل شبکه‌ای وجود دارد را برطرف نماید. با توجه به

خروجی حاصل از به کارگیری روش آراس، ۲۶۷/۴۱ کیلومترمربع از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و ۴۰۳/۲۱ کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد (جدول ۴).



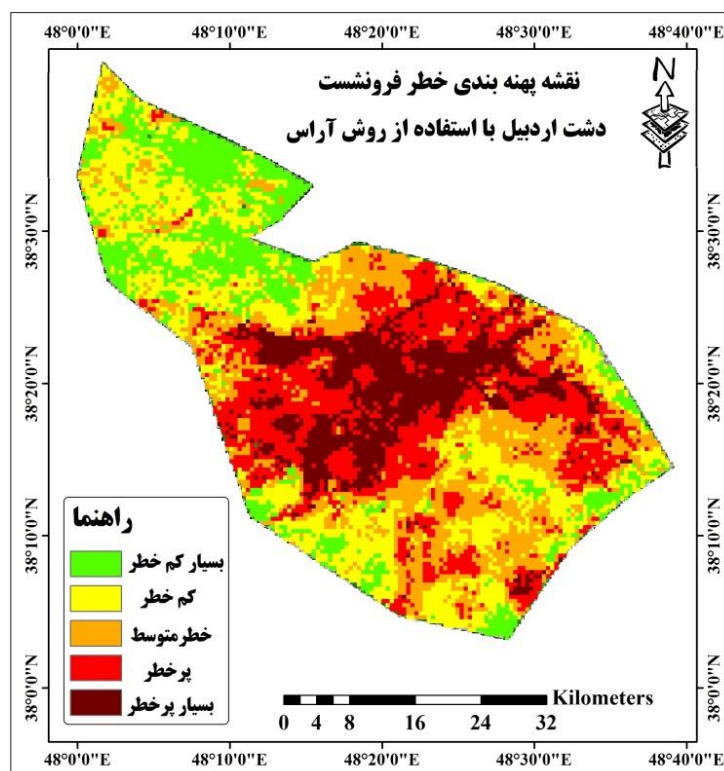
شکل ۹. نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه

Fig (9): The map of the proposed criteria in zoning the risk of subsidence of the study area

جدول ۳: وزن نهایی حاصل از روش ANP

Table(3): The final weight obtained from the ANP method

معیار	فاصله از شهر و روستا	کاربری اراضی	فاصله از گسل	لیتولوژی	شیب	افت سطح آب رودخانه	فاصله از رودخانه
وزن نهایی	۰/۱۲۷	۰/۱۴۷	۰/۱۲۳	۰/۱۵۲	۰/۰۶۱	۰/۲۲۱	۰/۱۶۶



شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت اردبیل

Fig (10): Ardabil plain subsidence risk zoning map

جدول ۴. اطلاعات طبقات خطر فرونشست

Table(3): The final weight obtained from the ANP method

بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	طبقه خطر
۲۶۴/۲۰	۴۴۴/۲۶	۳۹۷/۶۲	۴۰۳/۲۱	۲۶۷/۴۱	مساحت به کیلومتر مربع

۴- بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست زمین در طی سال‌های اخیر به دلایل مختلف از جمله افزایش بی‌رویه جمعیت، برداشت و استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و تغییر کاربری اراضی به همراه عوامل دیگر سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان به زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و ... شده است. پایش میزان نرخ فرونشست و نیز پرداختن به علت یا علل تاثیرگذار آن جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. در این پژوهش به منظور بررسی میزان فرونشست از تصاویر A1-Sentinel در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ و روش تداخل سنجی راداری استفاده شده است. به علاوه، در راستای تهیه نقشه فرونشست زمین در دشت اردبیل از تکنیک چندمعیاره آراس استفاده گردید و به منظور اجرای مدل آراس، بر اساس مطالب ارائه شده در بخش روش تحقیق، وزن دهی با روش ANP انجام شده است.

نتایج ارزیابی وضعیت آب زیرزمینی منطقه بیانگر این است که محدوده مطالعاتی در طی سال‌های اخیر با روند افزایشی افت سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است. به طوری که میزان افت سطح آب در بعضی از چاه‌ها به ۹ متر رسیده است و با کاهش تراز آب زیرزمینی،

افزایش تنش مؤثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی موجب ایجاد مخاطره فرونشست می‌شود. به طور کلی روند افزایشی افت سطح آب در محدوده مطالعاتی از سمت غرب به سمت مناطق شرق محدوده مورد مطالعه بوده است. همچنین ارزیابی میزان فرونشست منطقه نیز بیانگر این است که بیشترین میزان فرونشست در مناطق مرکزی و شرقی محدوده بوده است و روند افزایش آن از سمت جنوب به سمت مناطق شمالی و غرب به سمت شرق محدوده مطالعاتی است. در واقع نتایج حاصله بیانگر انطباق روند افت سطح آب‌های زیرزمینی با میزان فرونشست است و در مناطقی که بیشترین افت سطح آب وجود داشته است، میزان فرونشست نیز بیشتر بوده است و افت سطح آب زیرزمینی در منطقه ی مورد مطالعه، باعث نشست رسوبات و کاهش تخلخل آن‌ها شده است و بنابراین حتی اگر سطح آب زیرزمینی مجدد بالا آید، جبران این خسارات را نخواهد کرد. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و کاربری اراضی، به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۲۲۱، ۰/۱۶۶، ۰/۱۵۲ و ۰/۱۴۷، مهم ترین عوامل دخیل و تاثیرگذار در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی می باشند. هم چنین طبق نتایج به دست آمده، به ترتیب ۲۶۷/۴۱ و ۴۰۳/۲۱ کیلومتر از مساحت محدوده، در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد و ریسک بالای فرونشست زمین بیشتر در مناطق مرکزی و شرقی و شمالی منطقه وجود دارد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که مهمترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست محدوده مطالعاتی بهره برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی و افت سطح آب می باشد و لذا، نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات انجام شده توسط؛ 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، همخوانی دارد.

در نهایت می‌توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می تواند خسارت‌های جبران ناپذیر مالی و جانی به همراه داشته باشد و به بسیاری از سازه های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه ی آن، در محدوده دشت اردبیل آسیب برساند، از این رو، بایستی راهکارهای بلندمدت به صورت اصلاح روش های مدیریت استفاده از منابع آب و راهکارهای کوتاه مدت به صورت، جلوگیری از برداشت سفره های آب زیرزمینی به اشکال مختلف و پایش مستمر مناطق مستعد این پدیده، ایجاد سدهای زیرزمینی به منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست و ... مورد توجه مسئولان ذی ربط و مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد.

بررسی نقاط بسیار پرخطر و پرخطر معرفی شده توسط الگوریتم آراس نشان می‌دهد؛ 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 بسیار پرخطر در فاصله صفر تا ۵۰۰ متری از نقاط شهری و روستایی قرار دارند و لذا می‌توان گفت که عوامل انسان‌ساخت، مانند: زمین‌های کشاورزی، تاسیسات زیرزمینی مانند سکونت‌گاه های شهری و روستایی و شبکه های حمل و نقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین میزان آسیب پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست شده‌اند.

از منظر لیتولوژیکی، قدیمی‌ترین سازندهای شناخته شده در دشت اردبیل دولومیت و دولومیت آهکی متعلق به ژوراسیک است. رخساره‌های کرتاسه، ماسه سنگ و کنگلومرای قرمز می‌باشد. رخساره‌های دوران سوم شامل ماسه‌سنگ‌های توفی و توفی برشی با میان لایه‌های گدازه آندزیتی، آهک کریستالیزه، آندزیت بازالت با پیروکسن زیاد مربوط به پالئوژن می‌باشد. آبرفت‌های کواترنر که شامل

تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیشترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیش‌ترین میزان تمرکز چاهها و قنات‌ها را دارد، از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است که در مرکز و قسمت شرقی دشت بیشترین میزان فرونشست دیده می‌شود و در سایر بخش‌ها به واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کمتر از سایر بخش‌ها است.

شیب نقش موثری در جمع آوری 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. به گونه‌ای که هر چه میزان فاصله از خطوط گسل بیش‌تر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرونشست زمین را دارا بوده و هر چه میزان فاصله به خطوط گسل نزدیک‌تر شود احتمال وقوع فرونشست بیش‌تر می‌شود. در دشت اردبیل گسل‌های نظیر اردبیل، بزغوش، آستارا و... که دارای روند شمال خاوری - جنوب باختری می‌باشد و به همین دلیل ضریب آسیب‌پذیری بالایی دارد.

با افزایش فاصله از آبراهه‌ها 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 پهنه بندی خطر فرونشست با نقشه معیار فاصله از رودخانه، می‌توان گفته که به طور عمده مناطق دارای احتمال خطر در فاصله ۷۰۰ تا ۵۵۰ متری از رودخانه قرار دارند.

براساس نتایج ارائه شده از مطالعات محققان، به نظر می‌رسد که اعمال فشار بیش از حد بر آبخوان ممکن است موجب بروز پدیده‌ی فرونشست شود. از این رو به بررسی وضعیت سفره‌ی آب زیرزمینی در محدوده‌ی مورد مطالعه پرداخته شد. به منظور بررسی و ارزیابی نوسانات سطح آب زیرزمینی، از آمار چاههای پیرومتری موجود در دشت، میزان افت سطح آب زیرزمینی طی سالهای ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۹ محاسبه شد. طبق بررسی‌های انجام شده مشخص است که سطح آب دشت، رو به پایین رفتن است. به طوریکه کمترین افت سطح آب ۱/۳ متر و بیشترین ۲۳ متر می‌باشد. علت این افت، برداشت‌های غیراصولی به دلیل افزایش حفر چاههای عمیق و نیمه عمیق به صورت مجاز و غیرمجاز، کاهش بارندگی در سالهای اخیر و به تبع آن کاهش آبهای سطحی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. براین اساس بیش‌ترین افت در بخش‌های مرکزی و شرقی دشت مشاهده می‌شود. که احتمال وقوع فرونشست در این قسمت از دشت افزایش می‌یابد.

۵- منابع

- .Abedini, M.(2016) Fundamental of land subsidence (risks of hydrogeomorphology and environmental management), Publications of Mohaghegh Ardabili University, 1st edition, 230 pages.
- Abedini, M.(2018). Investigating the problems of hydrogeomorphology and subsidence caused by the drop in the level of underground water in the Ardabil plain and solutions. Mohaghegh Ardabili University. Researches.
- Abedini, M., and Saraei, B.(1402). Investigating the evolution of the geomorphology of accumulation plains, through the granulometry of formations, log results and tectonic effects, a case study: (Harzandat, Hadishehr and Golfarj plains), Environmental Science Studies, 8th period , the third issue, autumn season, pp. 6825-6837
- , Ali, Maleki, Amjad, Khazaei, Ali (2021). Monitoring the elevation of the earth and Abdul Maleki analyzing its geomorphological effects using telemetry data. Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources, 12 (4), pp. 118-95.
- 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.
- 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.
- Alizadeh, Reza., Izadi Hassan., Arasteh Mojtaba.(2021). Ranking of nature-based tourism capacity in mountainous areas, case study: Eastern region of Lorestan province. *Planning and arranging space*. 25 (1): 117-142.
- Anamradnejad, Rahim., Bardi, Nikpour, Amer, Hassani, Zohreh. (2019). Physical-Spatial Analysis of Urban Areas Based on Intelligent Urban Growth Indicators (Case Study: Babol), *Journal of Urban Research and Planning*, 9 (34), pp. 19-30.
- 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 .
- Bhattarai, R., Alifu, H. Maitiniyazi, A. Kondoh.(2017). Detection of Land Subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, Using DInSAR Technique, *Land* 2017, 6(2, 1-178).
- Bou kheir, R., Cerdan, O & Abdelah, C. (2006). Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82, 347-359.
- Diani ,Leila., Portaheri Mehdi, Rakanuddin Eftekhari Abdolreza, Ahmadi Hassan. (2019). Ranking of the main structures of organizing the worn-out structures of the villages around the metropolises using the cumulative ratio evaluation method (ARAS) (Case study: around the metropolis of Tehran), *Planning and arranging space*; 22 (3): 145-181.
- Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., & Ao, M. (2018). Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiayu landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 205,180–198.
- Ebrahimi, Atrin., Ghasemi, Afshan, Ganjaeian, Hamid. (2020). Monitoring the subsidence of Pakdasht urban area using radar interferometry method, *Geography and Human Relations*, 2 (4), pp. 29-41.
- Rababe Farzinkia., Mohammad Ali Zanganeh Asadi., Abolqasem Amir Ahmadi., Rahman Zandi. (2018). *Journal of Hydrogeomorphology*, Volume 6, Number 20, Pages 165-185.
- 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.
- Hoseini ,H.(2019). Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, *Information Processing in Agriculture*, 6 (1): 11-19.
- (2020). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Huang, G., Fan, H. Lu, L. Yu, W. .Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-pp 1-6
- Kooh Banani, Hamid., Yazdani, Mohammad Reza, Hosseini, Seyed Keyvan. (2019). Zoning of land subsidence risk using radar interference (Case study: Kashmar and Khalilabad plains. *Desert Management*, 7 (13), pp. 76-65.
- Mohammad Hossein Mutadeen., Mehrdad Esfandiari; Abolfazl Moeini., Ali Mohammadi torkashvand.(2024). *Journal of Hydrogeomorphology*, Online Publications,<http://dx.doi.org/10.22034/hyd.2023.55996.1688>
- 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

- 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.
- Qara Cheloo, Saeed., Akbari Quchani, Hesam, Glian, Saeed, Ganji, Kamran. (2021). Assessment of land subsidence in relation to groundwater with the help of Sentinel-1 and Alus-1 radar satellites (study area: Mashhad plain). *Remote Sensing and GIS in Natural Resources*, 12 (3), 40-61.
- Ranjgar, 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>.
- Shafiee, Najmeh., Mokhtari, Leilagli, Amir Ahmadi, Abolghasem, Zandi, Rahman. (2020). Investigation of aquifer subsidence in Nurabad plain using radar interferometry method. *Quantitative Geomorphological Research*, 8 (4), pp. 93-111.
- Sharifi Kia, Mohammad., (2012). Determining the extent and amplitude of land subsidence using radar interference method in Nogh-Bahraman plain, *Journal of Spatial Planning and Planning*, Volume 16, Number 3, pp. 73-55.
- 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.
- Tuğ 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.
- 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.