



## Research Article

# Numerical simulation and zoning of land subsidence caused by Solution Mining in the Northwest of Golestan Province

Hossein Bour<sup>1</sup>, Aziz Rahimi<sup>1\*</sup> , Mostafa Raghimi<sup>1</sup>, Mujtaba Mahmoud Lou<sup>2</sup>

1-Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Golestan, Gorgan, Iran

2-Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources Management, University of Gonbad, Gonbad, Iran

Received: 07 Aug 2025 Accepted: 25 May 2026

## Extended Abstract

### Introduction

Land subsidence is one of the geological hazards that leads to the collapse or lowering of the earth's surface. The deformations on the earth's surface are mostly in the vertical direction and displacement may also be observed in the horizontal direction. Subsidence can be affected by human activities such as tunneling, mineral production, groundwater extraction and fault activity, which cause abundant morphological outcrops on the earth's surface (Sharifikia, 2012). In some cases, land subsidence is caused by the extraction of underground reserves and valuable mineral materials. One of the methods used to produce useful minerals is mineral solutions. If the mineral is solid and soluble in water, the mineral is dissolved in water by injecting water through wells containing the mineral layer, and then pumping and extracting the mineral solution through the extraction wells is carried out. In the extraction cycle, water injection operations are carried out on the one hand and the production of water-soluble materials is carried out in a controlled manner. The United States, Kazakhstan, China, and Uzbekistan use this method to extract potash ore. The Belle Plaine Potash Mine, located in Canada, is the world's first and largest solution mine (Mark et al, 2010). In the case of deep mineral brines that contain valuable elements such as iodine and bromine, the mineral solution extraction method can be used. In this case, due to the nature of the mineral, which is in the form of a mineral solution, the minerals are exploited by drilling deep wells. In order to reduce the effects of subsidence in such conditions, the wastewater from the extraction should be injected into deep layers after processing and separating the mineral. Currently, the mineral solution extraction method is used in our country and in the northwest of Golestan Province. In the northwest of Golestan Province and near the city of Aq Qala, the exploitation of iodized brines at depths of more than 1000 meters is underway, and the exploitation of iodine minerals by extracting deep brines by the private sector has begun since 2008. The purpose of this research is to investigate the numerical values and zoning of land subsidence due to the extraction of iodized brines in the study area. Although subsidence has a relatively high frequency and sequence, it is often difficult to detect and measure accurately due to the very slow and shallow motion of the Earth. Also, the amount of subsidence is usually very small and occurs in an area of one to several kilometers. Such a large area with very little subsidence cannot be analyzed by methods such as geophysical surveys, seismic waves, electromagnetic waves, soil resistivity, and other methods. One promising technology is high-frequency radar. Remote sensing with high-frequency radar can provide the penetration depth and resolution required for accurate detection and identification of such facilities (Klar et al, 2009).

**Citation:** Bour, H. et al, 2026. Numerical simulation and zoning of land subsidence caused by Solution Mining, *Res. Earth. Sci.* 17(1), (155-168) DOI: 10.48308/esrj.2026.240841.1291

\* Corresponding author E-mail address: a.rahimi@gu.ac.ir



## Materials and Methods

In order to investigate the issue of subsidence in the north of the city of Aq Qala in the northwest of Golestan province, remote sensing tools have been used in the first stage. The study area is located 27 kilometers from the city of Aq Qala and in the northwest of Golestan province. In this area, withdrawal from surface and deep aquifers has caused subsidence on the ground surface. Further, through investigations conducted on the wells in the study area, it was determined that the wells drilled by the Ministry of Energy did not extend to the bedrock and in two cases did not even reach the water surface, but the exploration wells for iodine mines and wells drilled by the oil company did extend to the bedrock. By looking at the geological columns prepared in the exploration wells, in other words, the well logging conducted in the area, it is clear that from the south to the north of the studied area, the depth of the bedrock decreases and the water table rises. Also, from the south to the north in the direction of drilling the exploration wells, the thickness of the layers decreases significantly.

Geologically, this area is located on the border between the three tectonic zones of the southern Caspian basin, the southwestern part of the Kopeh Dagh folded belt, and the northern ridge of the Eastern Alborz. The conditions of the study area are influenced by the tectonic history and stratigraphy of these three tectonic zones, and due to the alluvial covers and insignificant outcrops of formations in the study area, information from the exploration wells of the Oil Company and the iodine exploration wells was used. In this study, in addition to monitoring the subsidence phenomenon using radar interferometry, a numerical simulation method with Plaxis 3D software was used to better understand the subsidence problem and the mechanism of related deformations. Plaxis 3D is a 3D finite element program that was specifically designed to investigate and calculate the settlement of offshore foundations, but in version 1.6, with the addition of consolidation settlement, it gained the ability to investigate settlements resulting from water withdrawal and groundwater level reduction. This program receives simple inputs from the user, combines simple graphics, and automatically creates complex finite element models with advanced output and high flexibility.

## Results and Discussion

For modeling the settlement behavior, the Mohr-Coulomb behavioral model has been used according to the geological conditions of the rock layers and the results of rock mechanics tests. The Mohr-Coulomb elasto-plastic model requires five input parameters, namely Young's modulus, Poisson's ratio for soil elasticity, internal shear angle, cohesion for soil ductility, and as the expansion angle. The Mohr-Coulomb model represents an approximate first-order equation of soil or rock behavior. It is recommended to use this model for initial analysis of soil behavior and compare it with other models. For each layer, an average stiffness estimate is constant, and given this constant stiffness, an initial estimate of deformation is obtained with relatively fast calculations. In addition to the model parameters mentioned above, initial soil conditions, such as preconsolidation, play an important role in many soil deformation problems. This method is the simplest method for calculating the consolidated settlement of soil with the most basic available data, which has acceptable accuracy.

In the present study, the extent of land subsidence due to the extraction of deep brines for the production of iodine in the northeast of Aq Qala city - northern Golestan province was investigated by combining radar interferometry and numerical modeling methods. Numerical simulation was performed using Plaxis 3D software and the possible subsidence values were predicted if deep brine extraction continued in the study area. Then, subsidence zoning maps were prepared for the study area using radar images and the actual subsidence values were calculated.

Comparing the results of the simulation with radar zoning maps was able to clearly show the conceptual relationship between subsidence and brine exploitation in a quantitative manner in the study area. Using geological data of the region and Mohr-Coulomb numerical simulation, the range of subsidence changes in the study area is between 0 and 9 centimeters. The above numbers show acceptable agreement with the settlement values obtained from radar images.

Using subsurface geological information, a geometric model of the structure of the formations in the region was formed, and the mechanical and behavioral characteristics of the formations were defined based on the Mohr-Coulomb model, and other model requirements were also considered based on the daily pumping rates from the well and the groundwater level. In this model, the settlement of the formations due to brine withdrawal in a one-year period was calculated to be 9 cm, and in order to compare the model results with the actual settlement values, the radar interferometry technique was

used and subsidence zoning maps were prepared. The settlement value in the exploitation area was calculated to be a maximum of 0.135 m, equivalent to 13.5 cm, which is slightly different from the settlement value obtained in the numerical model. Also, in the case of the settlements observed in the study area, the changes in the settlement value are a function of the withdrawal and recharge of shallow aquifers in water years, and for this reason, in the subsidence zoning maps, we see different values in terms of space and time for the settlements calculated in different water years.

### **Conclusion**

Periodic subsidence monitoring in the study area shows that geological and lithological factors of the formations play a decisive role in the rate of subsidence and surface deformations, and accurate assessment of subsidence is highly sensitive to the geomechanical parameters of the formations.

The calculated values for subsidence based on numerical modeling and remote sensing maps are relatively close to each other, indicating that the mechanical parameters and behavioral model of the formations are close to reality.

Given the continued exploitation in this area and the expansion of exploitation in other areas of the plain and the irrenewability of the deep aquifer, the trend of piezometric level decline in these areas is ongoing and will intensify with increased exploitation.

**Keywords:** Subsidence, Extraction, Iodized brines, Plaxis 3D, Numerical simulation, Radar interferometry.

## شبیه‌سازی عددی و پهنه‌بندی فرونشست زمین ناشی از استخراج محلول‌های معدنی در شمال غرب استان گلستان

حسین بور<sup>۱</sup>، عزیز رحیمی<sup>۱\*</sup> , مصطفی رقیمی<sup>۱</sup>، مجتبی محمودلو<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

۲- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد، گنبد، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴

### چکیده گسترده

#### مقدمه

فرونشست زمین به عنوان یکی از مخاطرات زمین‌شناسی است که منجر به فروریزش یا پایین رفتن سطح زمین می‌گردد. تغییر شکل‌های بوجود آمده در سطح زمین غالباً در جهت عمودی است و به ندرت ممکن است در جهت افقی نیز جابه‌جایی‌هایی مشاهده گردد. فرونشست می‌تواند متاثر از اثر فعالیت‌های انسانی مانند تونل‌سازی، استخراج مواد معدنی، استخراج آب‌های زیرزمینی و فعالیت گسل‌ها باشد که سبب رخنمون‌های فراوان مورفولوژیکی در سطح زمین می‌شود (Sharifi Kia, 2012). در برخی از موارد فرونشست زمین در اثر برداشت ذخایر زیرزمینی و مواد با ارزش معدنی به وقوع می‌پیوندد. یکی از روش‌هایی که برای استخراج مواد معدنی عمیق استفاده می‌شود استخراج محلول‌های معدنی است. در صورتیکه ماده معدنی جامد و قابل حل در آب باشد با تزریق آب از طریق چاه‌های عمیق به لایه معدنی، ماده معدنی در آب حل شده و سپس پمپاژ و استخراج محلول معدنی از طریق چاه‌های بهره‌برداری، انجام می‌شود. در چرخه استخراج، عملیات تزریق آب از یک سو و استخراج مواد محلول در آب به صورت کنترل شده انجام می‌شود. کشورهای ایالات متحده آمریکا، قزاقستان، چین و ازبکستان از این روش برای استخراج پتاس معدنی استفاده می‌کنند. معدن پتاس بل پلین (Belle Plaine) که در کانادا واقع شده است، اولین و بزرگترین معدن محلول در جهان است (Mark et al, 2010). در مورد شورابه‌های عمیق معدنی که حاوی عناصر ارزشمندی از قبیل ید و بروم هستند می‌توان از روش استخراج محلول معدنی بهره‌برداری کرد. در این حالت با توجه به طبیعت ماده معدنی که به صورت یک محلول معدنی است با حفاری چاه‌های عمیق اقدام به بهره‌برداری از مواد معدنی می‌گردد. به منظور کاهش اثرات ناشی از فرونشست در چنین شرایطی بایستی پس از فرآوری و جداسازی ماده معدنی، پساب حاصل از استخراج به لایه‌های عمیق تزریق شود. در حال حاضر استفاده از روش استخراج محلول معدنی در کشور ما و در شمال غرب استان گلستان انجام می‌گیرد. در شمال غرب استان گلستان و در نزدیکی شهر آق قلا عملیات بهره‌برداری از شورابه‌های یددار در اعماق بیش از ۱۰۰۰ متری در حال انجام است و بهره‌برداری از ماده معدنی ید با استخراج شورابه‌های عمیق توسط بخش خصوصی از سال ۱۳۸۷ آغاز شده است و هدف از این پژوهش بررسی مقادیر عددی و پهنه‌بندی فرونشست زمین بر اثر استخراج شورابه‌های ید دار در محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

استناد: بور، ح. و همکاران، ۱۴۰۵. شبیه‌سازی عددی و پهنه‌بندی فرونشست زمین ناشی از استخراج محلول‌های معدنی، پژوهشهای دانش

زمین: ۱۷(۱)، (۱۶۸-۱۵۵)، DOI: 10.48308/esrj.2026.240841.1291

E-mail: a.rahimi@gu.ac.ir

\* نویسنده مسئول:



هر چند رخداد پدیده فرونشست از فرکانس و توالی نسبتاً زیادی برخوردار است، لیکن به واسطه حرکت بسیار کند و بطنی زمین در اغلب مواقع درک و اندازه‌گیری آن بدرستی میسر نیست. همچنین مقدار فرونشست معمولاً خیلی کوچک و در منطقه‌ای با گستره یک تا چندین کیلومتری حادث می‌شود، چنین پهنه گسترده با فرونشست‌های خیلی کم نمی‌تواند از طریق روش‌هایی چون اکتشافات ژئوفیزیکی، امواج لرزه‌ای، امواج الکترومغناطیسی، مقاومت ویژه زمین و دیگر روش‌ها تحلیل شود. یکی از تکنولوژی‌های امید بخش، رادار فرکانس بالا است. سنجش از دور با رادار فرکانس بالا می‌تواند عمق نفوذ و قدرت تفکیک مورد نیاز را برای تشخیص و شناسایی دقیق چنین تسهیلاتی فراهم کند (Klar et al, 2009).

### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی مساله فرونشست در شمال شهر آق قلا در شمال غرب استان گلستان در مرحله اول از ابزارهای سنجش از دور استفاده شده است. محدوده مورد مطالعه در فاصله ۲۷ کیلومتری شهر آق قلا و در شمال غرب استان گلستان قرار دارد. در این محدوده برداشت از آبخوان‌های سطحی و آبخوان‌های عمیق باعث بروز نشست‌هایی در سطح زمین شده است. در ادامه با بررسی‌های صورت گرفته بر روی چاه‌های محدوده مورد مطالعه مشخص گردید که چاه‌های حفر شده توسط وزارت نیرو تا سنگ کف ادامه نیافته و حتی در دو مورد به سطح آب نیز برخوردی نداشته است، ولی چاه‌های اکتشافی معادن ید و همچنین چاه‌های حفاری شده توسط شرکت نفت تا سنگ کف ادامه یافته است. با نگاه کلی به ستون‌های زمین‌شناسی تهیه شده در چاه‌های اکتشافی و به عبارت دیگر چاه پیمایی انجام شده در محدوده مشخص می‌شود که از جنوب به شمال محدوده مورد مطالعه عمق سنگ کف کاهش می‌یابد و سطح ایستایی بالاتر می‌آید و همچنین از جنوب به شمال در جهت حفر چاه‌های اکتشافی ضخامت لایه‌ها به مراتب کاهش می‌یابد. این منطقه از لحاظ زمین‌شناسی در مرز بین سه پهنه زمین ساختی حوضه خزر جنوبی، بخش جنوب غربی کمربند چین خورده کپه داغ و یال شمالی البرز شرقی واقع شده است. شرایط منطقه مورد مطالعه متأثر از تاریخچه زمین‌ساختی و چینه‌شناسی این سه پهنه زمین ساختی است و به دلیل پوشش‌های آبرفتی و رخنمون ناچیز سازندها در منطقه مورد مطالعه از اطلاعات چاه‌های اکتشافی شرکت نفت و چاه‌های اکتشاف ید استفاده شده است. در این پژوهش علاوه بر پایش پدیده فرونشست با استفاده از تداخل سنجی راداری، از یک روش شبیه‌سازی عددی با نرم افزار Plaxis 3D برای درک بهتر مساله فرونشست و سازوکار تغییر شکل‌های مرتبط استفاده شده است. Plaxis 3D یک برنامه اجزای محدود سه بعدی است که اختصاصاً جهت بررسی و محاسبه نشست پی‌های دور از ساحل طراحی شده است اما در نسخه ۶/۱ با اضافه شدن نشست تحکیمی این قابلیت را پیدا نمود تا نشست‌های حاصل از خروج آب و کم شدن سطح آب زیرزمینی را بررسی نماید. این برنامه ورودی‌های ساده را از کاربر دریافت می‌کند، گرافیک ساده را ترکیب می‌کند و به طور خودکار مدل‌های پیچیده اجزای محدود را با خروجی پیشرفته و انعطاف پذیری بالا ایجاد می‌نماید.

### نتایج و بحث

برای مدل‌سازی رفتاری نشست با توجه به شرایط زمین‌شناسی لایه‌های سنگی و نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده است. مدل الاستو پلاستیک موهر-کولمب شامل پنج پارامترهای ورودی، یعنی مدول یانگ، ضریب پواسون برای کشش خاک، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای شکل‌پذیری خاک و زاویه اتساع می‌خواهد. مدل موهر-کولمب نشان دهنده یک معادله مرتبه اول تقریبی از رفتار خاک یا سنگ می‌باشد. توصیه می‌شود برای استفاده از این مدل برای تجزیه و تحلیل اولیه رفتار خاک استفاده شود و با مدل‌های دیگر مقایسه شود. برای هر لایه یک برآورد متوسط سختی ثابت می‌باشد و با توجه به این سختی ثابت، با محاسبات نسبتاً سریع، یک برآورد اولیه تغییر شکل به دست می‌آید. علاوه بر پارامترهای مدل ذکر شده در بالا، شرایط خاک اولیه، مانند پیش تحکیمی، نقش مهمی در بسیاری از مشکلات تغییر شکل خاک بازی می‌کند. این روش ساده‌ترین روش برای محاسبه نشست تحکیمی خاک با ابتدایی‌ترین داده‌های موجود می‌باشد که از دقت قابل قبولی برخوردار است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی به همراه نقشه‌های پهنه‌بندی راداری توانست ارتباط مفهومی فرونشست و بهره‌برداری از شورابه‌ها را به صورت کمی در منطقه مورد مطالعه بطور واضح نشان دهد. با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی منطقه و شبیه‌سازی عددی موهر کولمب، دامنه تغییرات فرونشست در محدوده مورد مطالعه بین صفر تا ۹ سانتیمتر می‌باشد. اعداد فوق با مقدار نشست بدست آمده توسط عکس‌های راداری همخوانی قابل قبولی را نشان می‌دهند.

با استفاده از اطلاعات زیرسطحی زمین‌شناسی یک مدل هندسی از ساختار سازندهای منطقه تشکیل گردید و ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری سازندها بر اساس مدل مور- کولمب تعریف شد و بر اساس مقادیر پمپاژ روزانه از چاه و سطح آب زیر زمینی، سایر نیازمندی‌های مدل نیز در نظر گرفته شد. در این مدل میزان نشست سازندها در اثر برداشت شورابه‌ها در یک دوره یک ساله ۹ سانتیمتر محاسبه گردید و به منظور مقایسه نتایج مدل با مقادیر واقعی فرونشست، از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد و نقشه‌های پهنه‌بندی فرونشست تهیه گردید. مقدار فرونشست در محدوده بهره‌برداری حداکثر ۰/۱۳۵ متر معادل ۱۳/۵ سانتیمتر محاسبه شده است که با مقدار نشست بدست آمده در مدل عددی اختلاف کمی دارد. همچنین در مورد نشست‌های مشاهده شده در محدوده مورد مطالعه، تغییرات مقدار فرونشست تابعی از برداشت و تغذیه آبخوان‌های کم عمق در سال‌های آبی است و به همین دلیل در نقشه‌های پهنه‌بندی فرونشست، از لحاظ مکانی و زمانی شاهد مقادیر متفاوتی برای نشست‌های محاسبه شده در سال‌های مختلف آبی هستیم.

### نتیجه‌گیری

بررسی دوره‌ای فرونشست در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که عوامل زمین‌شناسی و لیتولوژی سازندها نقش تعیین کننده‌ای در میزان فرونشست و تغییر شکل‌های سطحی دارد و ارزیابی دقیق فرونشست حساسیت زیادی به پارامترهای ژئومکانیکی سازندها دارد. مقادیر محاسبه شده برای فرونشست براساس مدل‌سازی عددی و نقشه‌های سنجش از دور نسبتاً به هم نزدیک است و این مساله نشان می‌دهد که پارامترهای مکانیکی و مدل رفتاری سازندها به واقعیت نزدیک است. با توجه به تداوم بهره‌برداری در این محدوده و توسعه بهره‌برداری در سایر مناطق دشت و تجدید ناپذیر بودن آبخوان ژرف، روند افت سطح پی‌زومتریک در این مناطق ادامه دار است و با افزایش بهره‌برداری تشدید می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** فرونشست، استخراج، شورابه‌های یدار، Plaxis 3D، شبیه‌سازی عددی، تداخل سنجی راداری.

### مقدمه

ازبکستان از این روش برای استخراج پتاس معدنی استفاده می‌کنند. معدن پتاس بل پلین (Belle Plaine) که در کانادا واقع شده است، اولین و بزرگترین معدن محلول در جهان است (Mark et al, 2010). سازوکار فرونشست زمین در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی، موجب تغییر در توزیع تنش در ساختار خاک و مصالح دربرگیرنده آبخوان می‌گردد. افزایش تنش حاکم بر این سامانه، موجب فشردگی به صورت افقی یا عمودی در لایه‌های زمین می‌شود. از جمله ویژگی‌های تاثیرگذار مصالح دربرگیرنده آبخوان در این فرآیند، بار ژئواستاتیکی دانسیته و گرانشی سیال، نفوذپذیری، تخلخل و تراکم پذیری<sup>۲</sup> خاک است. بار ژئواستاتیکی بر روی مخزن آبخوان در اثر کاهش سطح ایستابی (خالی شدن فضاهای موجود در مصالح خاک ناشی از برداشت آب و خلل و فرج موجود در خاک) موجب فشردگی لایه‌های خاک و تراکم آنها خواهد گردید. با برداشت آب زیرزمینی، میزان تنش‌های مؤثر عمودی و افقی افزایش خواهند یافت. هنگامی که سطح آب زیرزمینی به اندازه ۱ متر کاهش می‌یابد، اسکلت خاک افزایش تنشی به میزان ۱۱ کیلوپاسکال را متحمل خواهد گردید. این

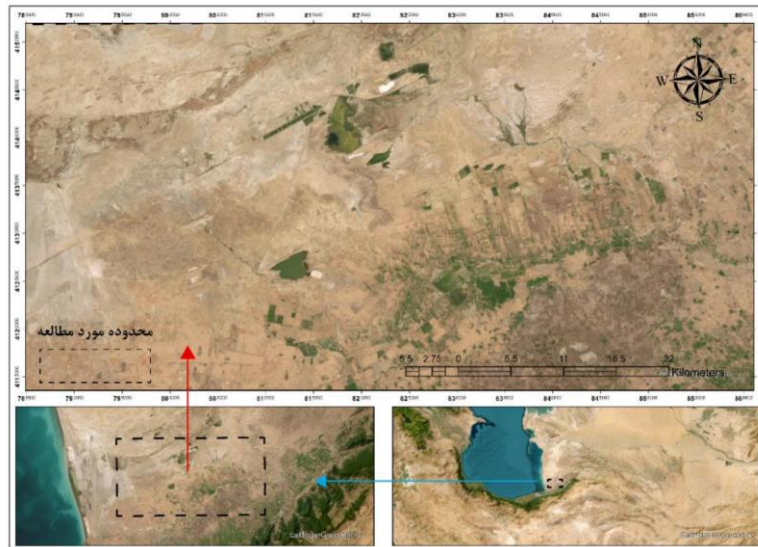
پدیده فرونشست زمین یکی از پنج مخاطره اصلی زمین شناختی کشور محسوب می‌گردد و آثار و شواهد آن در بیشتر دشت‌های اصلی کشور مشاهده و گزارش شده است. زبان‌های وارده ناشی از آن به زمین‌های کشاورزی، سازه‌ها و ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی مانند خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی، آب و فاضلاب بحدی است که هزینه‌های هنگفتی را می‌بایست صرف بهبود دهی آثار زیانبار آن نمود و در خیلی از موارد به دلیل برگشت ناپذیر بودن سرشت طبیعی آن این کار ناممکن است (Eskani Kozazi et al, 2000). یکی از روش‌هایی که برای استخراج مواد معدنی عمیق استفاده می‌شود استخراج محلول‌های معدنی<sup>۱</sup> است. در صورتی که ماده معدنی جامد و قابل حل در آب باشد با تزریق آب از طریق چاه‌های عمیق به لایه معدنی، ماده معدنی در آب حل شده و سپس پمپاژ و استخراج محلول معدنی از طریق چاه‌های بهره‌برداری، انجام می‌شود. در چرخه استخراج، عملیات تزریق آب از یک سو و استخراج مواد محلول در آب به صورت کنترل شده انجام می‌شود. کشورهای ایالات متحده آمریکا، قزاقستان، چین و

می‌شود. هنگامی که فشار آب منفذی به زیر سطح فشار پیش تحکیمی خود می‌رسد، فشردگی غیرالاستیک و دائمی است (Smith et al, 2017). در مناطقی که به شدت به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند، مانند تهران (Haghshenas Haghghi et al, 2019)، رفسنجان (Motagh et al, 2017)، مرکز کشاورزی و شهر پرجمعیت مشهد (Motagh et al, 2007)، فرونشست زمین به نگرانی تبدیل شده است و نشان دهنده یک بحران اساسی در آب‌های زیرزمینی است (Haghshenas Haghghi and Motagh, 2024). اولین دشتی که در آن نشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی گزارش گردیده است، دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ بوده است که به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی، حدود ۴۲ سانتیمتر نشست سطح زمین گزارش شده است (Abbas Nejad, 1999). دشت مهیار در استان اصفهان از دیگر دشت‌های دارای فرونشست است. در این دشت در طول ۱۰ سال گذشته یک رشته شکاف به طول ۱۰ کیلومتر و به عرض ۵ تا ۵۰ سانتیمتر بوجود آمده است که هر ساله، ۵ سانتیمتر بازتر می‌شود (Ajalouei, 1999). سطح آب زیرزمینی آبخوان این دشت سالانه ۱/۱ متر افت داشته است. مساله فرونشست در استان گلستان در سال‌های اخیر از جنبه‌های متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است و ارتباط پدیده فرونشست با استخراج آب‌های زیرزمینی در مناطقی از دشت گرگان بررسی شده است. در این پژوهش به طور ویژه به بررسی فرونشست در شمال غرب استان گلستان و بخش شمال شرقی شهر آق قلا که تحت‌تاثیر استخراج شورابه‌های عمیق به منظور استخراج ماده معدنی ید قرار دارد، پرداخته شده است.

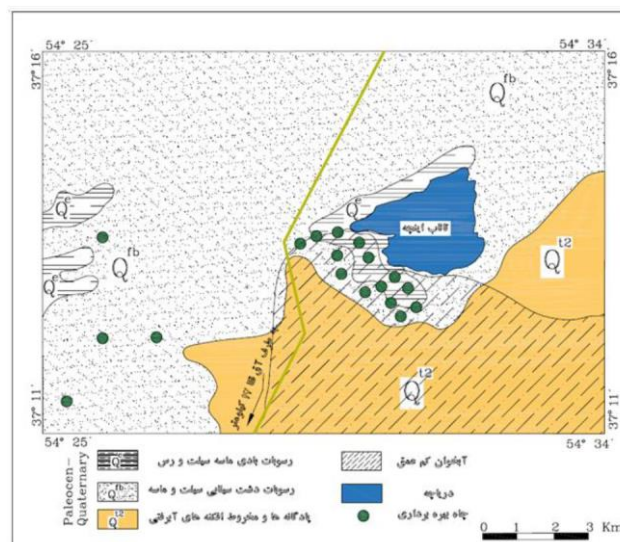
### منطقه‌ی مورد مطالعه

استان گلستان جزو مناطق پرخطر از نظر مخاطرات طبیعی است. زلزله، سیل، رانش زمین و فرونشست زمین از جمله بلایایی است که این منطقه را تحت‌تاثیر قرار داده است. در شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه در شمال غرب استان گلستان نشان داده شده است.

افزایش تنش، ساختار خاک را جهت سازگاری با وضعیت جدید تنش‌ها تغییر می‌دهد. با تغییر ساختار خاک، نسبت تخلخل و حجم رسوبات کاهش می‌یابد و فرونشست زمین را در پی خواهد داشت. باید در نظر داشت که تراکم مصالح مورد نظر، موجب کاهش ذخیره آینده آبخوان (Bell, and de Bruyn, 1999) و بهره‌وری آن را به شدت پایین خواهد آورد. عوامل موثر در فرونشست زمین شامل ضخامت لایه آبدار، نوع آبخوان، جنس خاک، تخلخل و نفوذپذیری آبخوان، میزان افت سطح آب زیرزمینی، قابلیت تراکم پذیری و فشار موثر در آبخوان است (Bouwer, 1977). فرونشست به دلیل خروج آب از سازندهای آبدار کم تراوانه ریز در مجاورت آبخوان‌ها رخ می‌دهد زیرا رس‌ها دارای تخلخل بیشتر و مقاومت کمتری نسبت به رسوبات دانه درشت می‌باشند. افزایش تنش موثر ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در خاک‌های ریزدانه باعث زهکشی آب از این خاک‌ها و آرایش جدید دانه‌بندی خاک و در نهایت این امر باعث کاهش ضخامت این خاک‌ها و فرونشست در سطح زمین می‌گردد (Haaf et al, 2024). در حال حاضر از روش‌های جدیدی مانند سامانه‌های مکانیایی جغرافیایی پیشرفته<sup>۴</sup> و روش تداخل سنجی امواج راداری برای مکانیابی فرونشست‌ها به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود. امروزه رخداد فرونشست زمین در بیش از ۱۵۰ شهر مهم جهان گزارش شده است و در بسیاری از نقاط جهان مانند مکزیک، استرالیا، کلمبیا، چین، آمریکا، تایلند، هند، ژاپن، ایران، ایتالیا، هلند، ونزوئلا، مصر، عربستان سعودی، انگلستان، فرانسه، فلسطین اشغالی، لهستان و سوئد روی داده است (Hu, 2006; Hu et al, 2004). در ایران نیز به جهت برداشت و بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین همراه با افت سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از آبخوان‌های کشور گزارش شده است. فرونشست زمین یک شاخص ملموس از وضعیت نامناسب سفره‌های آب زیرزمینی ایران است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که برداشت بیش از حد آب منجر به افت فشار آب منفذی شده و باعث فشردگی ساختار خاک، عمدتاً در لایه‌های ریزدانه مانند رس و سیلت



(الف)



(ب)

شکل ۱: الف: موقعیت محدوده مورد مطالعه با کادر مستطیل در تصویر نشان داده شده است (تهیه شده توسط نرم افزار گوگل ارث و آرک مپ). ب: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

Fig.1: A: The location of the study area is shown with a rectangular box in the image (prepared by Google Earth and ArcMap software). B: Geological map of the study area

بوده و ترکمنستان از سال‌های گذشته نسبت به استخراج ید به روش فوق اقدام نموده، بهره‌برداری از آن ضروری بنظر می‌رسد. شواهد زمین‌شناسی و چینه‌نگاری در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده وجود واحدهای کواترنری و سازندهای آپشرون، آگچاگیل و چلکن تا عمق ۱۳۳۰ متری از سطح زمین است. این سازندها را می‌توان بخشی از رسوبات پیشرونده حاشیه شرقی حوضه خزر جنوبی در نظر گرفت (Mousavi Rouh Bakhsh, 2001) که به طرف شرق از ضخامت آنها کاسته می‌شود. سازندهای خزر، باکو، آپشرون و

بر اساس گزارش‌های تخصصی (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۹) عملیات اکتشاف ماده معدنی ید در سطح مناطق شمالی استان گلستان (محدوده داشلی برون- اینچه برون) از سال ۱۳۸۳ شروع شد و در سال ۱۳۸۷ عملیات بهره‌برداری از آب‌های ژرف با حفر چاه و استحصال آب بسیار شور فسیلی از اعماق ۶۵۰ تا ۱۰۰۰ متر و استخراج ماده معدنی ید توسط شرکت کانسار خزر به عنوان اولین سرمایه‌گذار بخش خصوصی آغاز گردید (شکل ۱). با توجه به اینکه این آبخوان سازندی بین ایران و ترکمنستان مشترک

رابطه ۲)

$$A = \sqrt{\beta_4^2 + \beta_5^2}$$

رابطه ۳)

$$\tau = \frac{365}{2\pi} \tan^{-1} \left( \frac{\beta_4}{\beta_5} \right)$$

پس از محاسبه مؤلفه‌های مختلف تغییر شکل در هر مسیر از داده‌های Sentinel-1، نتایج را از خط دید ماهواره به جهت عمودی تصویر می‌کنیم، با این فرض که مؤلفه افقی تغییر شکل، همانطور که در مطالعات دیگر (Haghshenas Haghshenas, 2017; Motagh et al, 2019; Haghghi et al, 2019) گزارش شده است، یک مرتبه کوچکتر از مؤلفه عمودی است و بنابراین ناچیز است. در نهایت، نتایج را برای ایجاد یک نقشه سراسری برای هر مؤلفه، ژئوکد و موزاییک می‌کنیم. یک سیگنال راداری در سنجنده‌های راداری با دریچه مصنوعی<sup>۵</sup> از دو بخش دامنه و فاز تشکیل شده است. دامنه، قدرت سیگنال برگشتی است و فاز کسری از یک سیکل کامل موج سینوسی است. اساساً فاز در تصویر راداری از طریق فاصله بین آنتن سنجنده و عارضه زمینی مشخص می‌گردد. اگرچه فاز یک تصویر منفرد به سختی اطلاعات مفیدی در اختیار قرار می‌دهد. شکل ۲، به اختصار هندسه فن تداخل سنجی راداری را نشان می‌دهد (Bamler and Hartl, 1998).

آگچاگیل مهمترین سازندهای محدوده مورد مطالعه هستند. بر اساس شواهد سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی، سازندهای آپشرون و آگچاگیل دارای بیشترین مقدار مواد آلی، پیریت و کانی‌های رسی بوده و شورآب‌های آنها از بیشترین مقدار ید برخوردارند (Bibak et al, 2014).

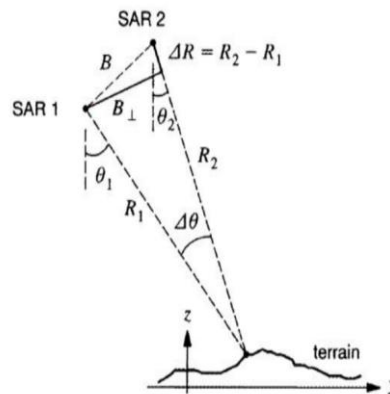
## مواد و روش‌ها

برای مدل‌سازی سیگنال فرونشست، فرض می‌کنیم که شامل یک روند بلندمدت، دارای شتاب و تغییرات فصلی است. ما از یک چندجمله‌ای درجه دوم و یک مؤلفه فصلی برای یافتن بهترین مدل برای سری زمانی  $X(t)$  به عنوان تابعی از زمان  $t$  استفاده می‌کنیم (Haghshenas Haghghi and Motagh, 2024).

رابطه ۱)

$$X(t) = \beta_1 + \beta_2 t + \beta_3 t^2 + \beta_4 \sin\left(\frac{2\pi}{365} t\right) + \beta_5 \cos\left(\frac{2\pi}{365} t\right) + \epsilon$$

در اینجا،  $\beta$  پارامترهای مدل و  $\epsilon$  خطای داده است. ما دامنه سیگنال فصلی  $A$  و تأخیر آن  $\tau$  را به صورت زیر تخمین می‌زنیم.

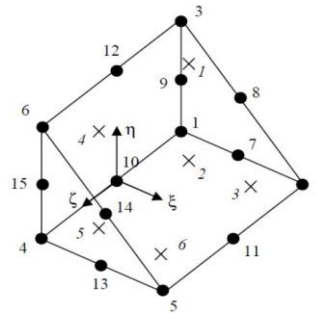


شکل ۲: طرح هندسی از تداخل سنجی رادار (Bamler and Hartl, 1998)

Fig. 2: Geometrical scheme of radar interferometry (Bamler and Hartl, 1998)

کانسار خزر و شورابه ید) و حفر یک حلقه چاه اکتشافی در محدوده شجری، بررسی زمین‌شناسی تحت الارضی مناطق فعال بهره‌برداری ید امکان‌پذیر شده است. براساس بررسی‌های اکتشافی صورت گرفته مساحت اکتشاف ید حدود ۵۰۲۰ کیلومترمربع گسترش یافته است (IMPASCO, 2020).

اجزای سه گوش که در Plaxis 3D foundation استفاده می‌شود شامل ۱۵ گره هستند (Khosh Akhlagh, 2015) توزیع گره‌ها بر روی هر جزء در شکل ۳، نشان داده شده است. با استفاده از نتایج چاه‌های اکتشافی قدیمی حفر شده شرکت ملی نفت ایران (۱۱ حلقه چاه) و ۳۳ حلقه چاه‌های اکتشافی - بهره‌برداری حفر شده در معادن ید اینچه (شرکت‌های



شکل ۳: طرح ساده‌ای از مدل اجزا و گره سه بعدی (Khosh Akhlagh, 2015)

Fig. 3: A simple diagram of a 3D component and node model (Khosh Akhlagh, 2015)

طبق گزارش‌های موجود ۴۰ لیتر بر ثانیه است این چاه در غرب محدوده شرکت کانسار خزر واقع شده است. به منظور شبیه‌سازی عددی اطلاعات ژئومکانیکی سازندها مطابق جدول ۱ در نرم‌افزار Plaxis 3D وارد شده است.

آبخوان سازندی دارای شورابه های یددار در بخش تحتانی سازند آپشرون و سازند آقچاگیل در دشت گرگان-گنبد وجود دارد که ضخامت آن در دشت گرگان -گنبد از غرب به شرق کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی عددی رفتار سازندها برای یکی از چاه‌های بهره‌برداری انجام شده است و میزان استخراج شورابه

جدول ۱: اطلاعات وروددی به نرم افزار Plaxis 3D جهت شبیه‌سازی (IMPASCO, 2020; Khakzad, 2019)

Table 1: Input data for Plaxis 3D simulation (IMPASCO, 2020; Khakzad, 2019)

| نام سازند  | لیتولوژی                                 | ضخامت<br>سازند(متر) | دانسیته<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | تخلخل (%) | مقاومت تراکمی تک<br>محوری (Mpa) | مدول یانگ<br>(Gpa) |
|------------|--|---------------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|--------------------|
| نئوکاسپین  | ماسه نرم و رس                            | 120                 | 1.65                            | 33        | 4.1                             | 0.035              |
| خاولینسکین | رس و سیلت و خرده‌های<br>فسیل             | 105                 | 1.72                            | 20        | 4.7                             | 0.031              |
| خزر        | رس و ماسه و خرده‌های<br>فسیل             | 80                  | 1.74                            | 21        | 4.1                             | 0.028              |
| باکو       | رس و پوسته‌های صدف<br>نرم تنان           | 125                 | 1.8                             | 5         | 5.2                             | 0.038              |
| آپشرون     | مارن و ماسه و گراول و<br>خاکستر آتشفشانی | 415                 | 1.87                            | 25        | 9.5                             | 0.182              |
| آقچاگیل    | توف، شیل و آهک                           | 180                 | 1.93                            | 19        | 11.3                            | 0.186              |
| چلکن       | مارن و ماسه سنگ                          | 750                 | 1.95                            | 24        | 13.5                            | 0.197              |

شرایط ذاتی سازندهای منطقه به عنوان تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ارائه شده (جدول ۱) در فرآیند گسسته-سازنی محیط مورد استفاده قرار گرفت و برای شبیه‌سازی عددی فرونشست از مدل رفتاری مور-کولمب برای تحلیل تغییر شک سازندها استفاده شد. به منظور افزایش دقت شبیه-سازنی عددی، از روش دوگانه جریان - تغییر شکل لایه‌ها<sup>۶</sup> استفاده شد و تغییر شکل سطح زمین، متأثر از تغییرات فشار آب منفذی در دوره زمانی یک ساله محاسبه گردید. مولفه‌های اصلی در شبیه‌سازی، تحت فشار بودن آبخوان عمیق در مراحل اولیه بهره‌برداری و نقش سازند باکو به عنوان لایه

نفوذناپذیر فوقانی و سنگ پوشش است. بنابراین یکی از پارامترهای تعیین کننده مدل، شامل ویژگی‌های نفوذناپذیری سازند باکو و میزان برداشت از سفره آب شور هستند. با توجه به محصور بودن آبخوان ژرف یددار در سطح منطقه و رخنمون بسیار کم سازندهای تشکیل دهنده این آبخوان (بخش تحتانی سازند آپشرون و سازند آقچاگیل) در شرق دشت گرگان-گنبد امکان تغذیه طبیعی آبخوان توسط بارش‌های جوی وجود نداشته و این آبخوان تجدید ناپذیر بوده و از نوع آب‌های فسیل می‌باشد. به منظور کالیبره کردن مدل و صحت سنجی آن از تصاویر ماهواره‌ای و روش تداخل سنجی راداری استفاده شد.

(Khakzad, 2019). پس از ایجاد مدل هندسی، ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری سازندها بر اساس مدل مور-کولمب تعریف شد و براساس مقادیر پمپاژ روزانه از چاه و سطح آب زیرزمینی سایر نیازمندی‌های مدل نیز در نظر گرفته شده و در نهایت میزان فرونشست بر اثر برداشت در یک دوره یک ساله مطابق شکل ۴ محاسبه شد. رفتار مکانیکی سازندها ممکن است با درجات مختلفی از دقت مدل شده باشند. به عنوان مثال قانون هوک خطی، کشش ایزوتروپیک، ممکن است به عنوان ساده-ترین رابطه موجود تنش-کرنش فرض شود. به عنوان مثال این رابطه تنها شامل دو پارامتر ورودی، مدول یانگ،  $E$ ، و نسبت پواسون،  $\nu$ ، است که به طور کلی برای به دست آوردن ویژگی‌های اساسی از رفتار خاک و سنگ بیش از حد خام است. با این حال برای مدل‌سازی عناصر ساختاری گسترده و لایه‌های سنگ بسترکشش خطی بسیار مناسب می‌باشد. بر اساس خروجی مدل عددی (شکل ۴) مقدار فرونشست ۹ سانتیمتر محاسبه شده است که در یک دوره یک ساله بهره برداری می‌تواند به وقوع بپیوندد. بررسی رفتار هیدرولیکی آب زیرزمینی استحصال از این چاه‌ها نشان می‌دهد که در حین حفاری و پس از آن، تمامی چاه‌ها از نوع آرتزین بوده و پس از اتمام حفاری نیاز به مهار چاه‌ها است. در شکل ۵ وضعیت یکی از چاه‌های حفر شده پس از حفاری و قبل از مهار آن نشان داده شده است. با وجود آرتزین بودن چاه‌های حفاری شده به منظور افزایش آبدهی، در مرحله بهره‌برداری در عمق ۶۰ متری هر یک از چاه‌ها پمپ شناور نصب شده است. نحوه انتقال آب نیز به وسیله پمپ‌های انتقال، به صورت خطی و از طریق لوله‌های پلی اتیلن به واحد فرآوری انجام می‌شود.

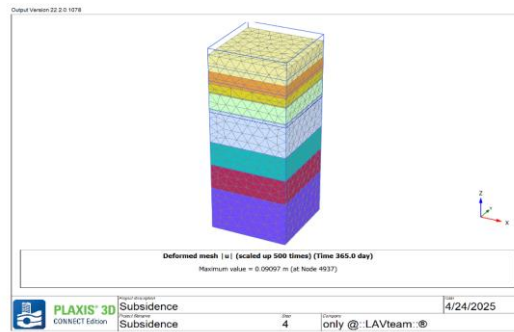
پس از انجام شبیه‌سازی عددی، نقشه پهنه‌بندی فرونشست منطقه با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور تهیه شد. در این راستا پس از شناخت و تحلیل منطقه مطالعه با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای؛ به جمع‌آوری داده‌ها، مستندات و مدارک از سازمان‌ها و ادارات مختلف و سایت ناسا پرداخته شد. ابتدا برای محاسبه‌ی میزان فرونشست از روش تداخل سنجی راداری استفاده شد که به این منظور تصاویر راداری سنتینل ۱ در قالب تک منظر با قطبش عمودی<sup>۷</sup> و در فرایند تداخل سنجی<sup>۸</sup> به کار گرفته شد.

## بحث و نتایج

### نتایج مدل‌سازی عددی

با توجه به ویژگی‌های سازندهای تحت الارضی و ستون چینه-شناسی منطقه مورد مطالعه و داده‌های هیدروژئولوژی از سفره‌های آب زیرزمینی و همچنین اطلاعات ژئومکانیکی سازندها امکان تهیه و تحلیل یک مدل عددی بر مبنای فرضیات قابل قبول، فراهم گردید. در ابتدا مدل هندسی برای ساختار زمین‌شناسی و شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه بر مبنای تغییرات سنگ‌شناسی در عمق زمین همراه با ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها و شرایط اشباع‌شدگی سازندهای مختلف در نرم افزار سه بعدی Plaxis با در نظر گرفتن ستون زمین‌شناسی در یکی از چاه‌های بهره‌برداری به عمق ۱۱۰۰ متر، ایجاد شد و مشخصات مکانیکی سازندها براساس اطلاعات بدست آمده از چاه‌های حفاری شده و آزمایش‌های مکانیک سنگ بر روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده، در شبیه‌سازی رفتار لایه‌های زمین، استفاده شده‌اند

| # | Layers<br>Material | Borehole_1 |        |
|---|--------------------|------------|--------|
|   |                    | Top        | Bottom |
| 1 | Neo caspian        | 0.000      | -120.0 |
| 2 | Khavelyniscian     | -120.0     | -225.0 |
| 3 | Khazar             | -225.0     | -305.0 |
| 4 | Baku               | -305.0     | -425.0 |
| 5 | Upper Apsheron     | -425.0     | -670.0 |
| 6 | Lower Apsheron     | -670.0     | -840.0 |
| 7 | Aghchagil          | -840.0     | -1020  |
| 8 | Chelken            | -1020      | -1330  |



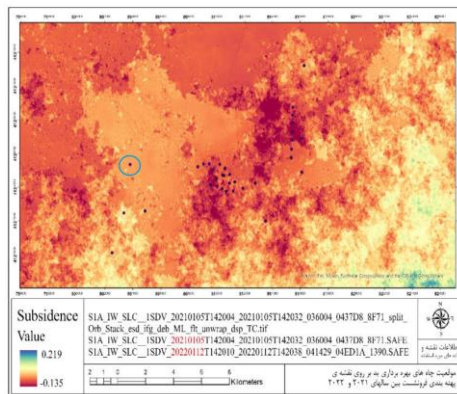
شکل ۴: میزان فرونشست ۹ سانتیمتر بر اساس مدل عددی برداشت از چاه عمیق در دوره یک ساله با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D  
 Fig. 4: 9 cm subsidence based on a numerical model of deep well extraction over a one-year period using Plaxis 3D software



شکل ۵: وضعیت چاه بهره‌برداری حفر شده پس از حفاری و قبل از مهار آن در منطقه مورد مطالعه  
 Fig. 5: Status of the drilled production well after drilling and before its containment in the study area

حاصل از پهنه‌بندی فرونشست نشان داده شده است. با توجه به ارزیابی‌های انجام شده مقدار فرونشست در محدوده بهره‌برداری از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰، حداکثر ۰/۱۳۵ متر معادل ۱۳/۵ سانتیمتر محاسبه شده است.

بررسی فرونشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ براساس تکنیک تداخل سنجی راداری میزان فرونشست در محدوده مورد مطالعه محاسبه شده و در شکل ۶ نتایج



شکل ۶: موقعیت چاه‌های بهره‌برداری ید بر روی نقشه پهنه‌بندی فرونشست در محدوده مورد مطالعه  
 Fig. 6: Location of iodine exploitation wells on the subsidence zoning map in the study area

محدوده و توسعه بهره‌برداری در سایر مناطق دشت و تجدید ناپذیر بودن آبخوان ژرف، روند افت سطح پیژومتریک در این مناطق ادامه دار و با افزایش بهره‌برداری تشدید خواهد شد. با توجه به شرایط خاص آبخوان ژرف و عدم طراحی شبکه رفتار سنجی در دو معدن فعال موجود پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی آبخوان ژرف به طور دقیق

بررسی چاه‌های بهره‌برداری حفر شده نشان می‌دهد که تمامی آنها در زمان حفر به صورت آرتزین بوده و در هنگام اندازه‌گیری سطح پیژومتریک در اردیبهشت ۱۳۹۸، حالت آرتزین خود را از دست داده‌اند، بررسی سطح آب آبخوان در طول دوره بهره‌برداری می‌تواند نقش مهمی در برآورد فرونشست داشته باشد. با توجه به تداوم بهره‌برداری در این

سنجش از دور نسبتاً به هم نزدیک است و این مساله نشان می‌دهد که پارامترهای مکانیکی و مدل رفتاری سازندها به واقعیت نزدیک است. اختلاف ۴ سانتیمتری فرونشست به دست آمده از مدل عددی ساخته شده و نقشه‌های تداخل سنجی راداری قابل بحث و بررسی است. گستره مورد مطالعه در نقشه‌های تداخل سنجی راداری محدوده بسیار وسیع‌تری را نسبت به مدل در نظر می‌گیرد که شامل بخشی از زمین‌های زراعی و چاه‌های کشاورزی نیز می‌شود و فرونشست ناشی از افت آبخوان‌های کم عمق با تغییر شکل‌های بوجود آمده در اثر برداشت شورابه‌های عمیق تجمیع شده و مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد. بنابراین لازم است که در مطالعات تکمیلی فرونشست‌های آبخوان کم عمق نیز در شبیه‌سازی عددی لحاظ شود.

### سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از رساله دکتری نویسنده اول نوشتار فوق است. در انجام این پژوهش برخی اطلاعات مورد نیاز از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان و سازمان نقشه برداری کشور و سازمان زمین‌شناسی و همچنین منابع دانشگاهی استفاده شده است که نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از سازمان‌های مذکور اعلام می‌دارند. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند زحمات سردبیر محترم و همکارانش در فصلنامه و همچنین از داوران محترم که با حسن دقت و نظر به مطالعه و ارزیابی نسخه پیش نویس این مقاله پرداخته و کاستی‌ها و ایرادات موجود را متذکر شده‌اند صمیمانه سپاسگزاری نمایند.

امکان‌پذیر نیست. بر اساس مدل‌سازی انجام شده در یک دوره بهره‌برداری یک ساله برای یکی از چاه‌های محدوده که در شکل ۶ نشان داده شده است حداکثر مقدار نشست ۹ سانتیمتر محاسبه شده است. با توجه به شرایط مشابه زمین‌شناسی چاه‌ها، مقدار به دست آمده برای سال‌های آتی بهره‌برداری نیز قابل تعمیم است.

### نتیجه‌گیری

با توجه به سختی سازندهای مخزن جهت ارزیابی درازمدت تغییرشکل‌های سطح زمین، نیاز به محاسبات عددی و مدل‌سازی سازندهای آبدار در استخراج و بهره‌برداری از شورابه‌ها ضروری است که در این پژوهش با روش مدل‌سازی عددی ۳ بعدی این مساله ارزیابی شد. تغییرات جنس و ترکیب سنگ‌شناسی سازندها عامل اصلی تغییر مقاومت و سختی لایه‌های تحت‌الارضی است. ترکیب سنگ‌شناسی سازند آپشرون و آچاگیل باعث ناهمگنی‌های مقاومتی در توده سنگ می‌شود با توجه به اینکه شورابه‌های آبدار به صورت آب‌های بین‌سازندی ذخیره شده‌اند، فرونشست لایه‌های آبدار به سختی و صلبیت سازندها وابسته است و تغییرات مدول یانگ سازندهای آپشرون و آچاگیل نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر شکل دارند. بررسی دوره‌ای فرونشست در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که عوامل زمین‌شناسی و لیتولوژی سازندها نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان فرونشست و تغییر شکل‌های سطحی دارد و ارزیابی دقیق فرونشست حساسیت زیادی به پارامترهای ژئومکانیکی سازندها دارد. مقادیر محاسبه شده برای فرونشست براساس مدل‌سازی عددی و نقشه‌های

### پانویس

1-Solution Mining

2-Compressibility

3-Aquitard

4-Global Positioning System (GPS)

5-Synthetic Aperture Radar (SAR)

6- Fully coupled flow-deformation

7-Vertical Vibration polarization

8-Interferometric wide swath (IW)

### References

- Abbas Nejad, A., 1999. Study of geological conditions and environmental issues of the Rafsanjan Plain, Pro. of 2th conference of the Geological Society of Iran. p. 303-310 (In Persian).
- Ajalouelian, R., 1999. Investigation the Reasons for the creation of Fractures in the Mahyar Plain of Isfahan, 3th congeress of Iranian Geology and Environment (In Persian).

- Bahreyni, R. and Ettehad, K., 2014. Geology of the South Caspian Basin from Another Perspective. Publication of Sargol. 276 p.
- Bamler, R. and Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry: Inverse Problems, v. 14, p. 1-54.
- Bell, F.G. and de Bruyn, I.A., 1999. Subsidence problems due to abandoned pillar workings in coal seams, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 57, p. 225-237.

- Bibak, F., Shamanian, Gh., Khajeh, M. and Mirnejad, H., 2014. Petrography and Mineralogy of Apsheron and Aghchagil Formations in the mine of Inche and influencing on the chemical properties of brine waters, proceeding of 18 th conference of Geological society of Iran. University of Tarbiat Modares (In Persian).
- Bouwer, H., 1977. Land subsidence and cracking due to ground water depletion. *Groundwater*, v. 15, p. 358-364.
- Cocker, M.D., Orris, G.J., Pamela Dunlap, P., Yang, C. and Bliss, J.D., 2010. Geology and Undiscovered Resource Assessment of the Potash-Bearing, Middle Devonian (Givetian), Prairie Evaporite, Elk Point Basin, Canada and United States Scientific Investigations Report 2010-5090-CC, doi.org/10.3133/sir20105090CC.
- Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J. and 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*, v. 205, p. 180-198.
- Eskani Kozazi, Gh., Hamedi, M. and Laleh Siyah Pirani, M., 2000. Land subsidence, crisis, risk and its management, Proceedings of the National Conference on Geography and Urban Planning, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, v. 12.
- Haaf, E., Wikby, P., Abed, A., Sundell, J., McGivney, E., Rosen, L. and Karstunen, M., 2024. metamodel for estimating time-dependent groundwater-induced subsidence at large scales. *Engineering Geology*, v. 341, 107705.
- Haghshenas Haghghi, M. and Motagh, M., 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sens. Environ.*, v. 221, p. 534-550.
- Haghshenas Haghghi, M. and Motagh, M., 2024. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran, *Science Advances*
- Hu, R.L., 2006. Urbanland subsidence in china. Pro of 10th IAEG congerass Nottingham, UK., Paper, v. 786, 8 p.
- Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C. and Wang, S.J., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, v. 76, p. 65-77.
- IMPASCO (Iran Mines and Mineral Industries Renovation and Development Organization), 2020. Final Report of the iodine prospecting and exploration project in the Golestan exploration zone, 250 p. (In Persian).
- Khakzad, H., 2019. Evaluation of geomechanical properties of Aghchagil Formation based on laboratory tests and petrophysical data from three exploration wells in Golestan Province. Thesis for MsC degree in faculty of Science of Ferdowsi University. (In Persian)
- Khajeh, M., Rahmati, M. and Esmaeili, N., 2016. Exploration of iodine mineral in brine water of Apsheron, Aghchagil and Chelken Formations in the north of Gorgan. 25th conference of Earth Science, Theran (In Persian).
- Khosh Akhlagh, A., 2015. Investigation of land subsidence due to exploitation of groudwater resources in the Qom Plain. Thesis for MsC degree in Technical faculty of Qom University (In Persian).
- Klar, A. and Linker, R., 2009. Feasibility study of the auto mated detection and localization of underground tunnel excavation using Brillouin optical time domain reflectometer. Haifa, Israel.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghghi, M., Wetzel, H.U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. and Arabi, S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Eng. Geol.*, v. 218, p. 134-151.
- Mousavi Rouh Bakhsh, S.M., 2001. Geology of Caspian Sea, published by Geological Survey of Iran.
- Rajabi, A., 2018. A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom-Iran, *Natural Hazards* (2018), v. 93, p. 1085-1103.
- Rucci, A., Ferretti, A., Monti Guarnieri, A. and Rocca, F., 2012. Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements, *Remote Sensing of Environment*, v. 120, p. 156-169.
- Sharifi Kia, M., 2012. Determining the rate and extent of land subsidence using radar interferometry (D-InSAR) in the Nogh-Bahraman Plain, *Journal of Spatial Planning*, v. 16, p. 55-77.
- Smith, R.G., Knight, R., Chen, J., Reeves, A., Zebker, H.A. Farr, T. and Liu, Z., 2017. Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California. *Water Resour. Res.*, v. 53, p. 2133-2148.
- Zhang, A.G. and Wie, Z.X., 2005. Land subsidence in China. Shanghai Science and Technology Press, *Natural Science*, v. 6, p. 45-58.