



Evaluating climatic periods in predicting subsidence rates using numerical modeling (Case study: Najafabad aquifer)

Hamid Kardan moghadam^{1*} , Abbas Akbarzadeh² 

1. Assistant Research Professor, Department of Water resources studies and research, Water Research Institute, Tehran, Iran. Email: h.kardan@wri.ac.ir

2. Assistant Research Professor, Water and Wastewater research Center (WWRC), Water Research Institute (WRI), Tehran, Iran. Email: a.akbarzadeh@wri.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: October 29, 2024

Received in revised form:

November 18, 2024

Accepted: December 05, 2024

Available online: December 21,
2024

Keywords:

Subsidence,
groundwater depth,
climatic fluctuations,
SUB package,
Najafabad.

ABSTRACT

Objective: The management approach is one of the most strategic principles in the discussion of water resources management, considering the conditions of water scarcity and climatic stresses. This issue has led to the emergence of various approaches to evaluate and identify the dimensions of the issue.

Method: One of the challenges created by the issue of groundwater resource management is the overexploitation of the aquifer, which has caused land subsidence in clay layers in alluvial aquifers. Accordingly, the approach of using numerical models to identify and zone areas prone to subsidence is very efficient due to its predictability. In this regard, the simulation of the Najafabad aquifer, which was carried out using the SUB package in the MODFLOW model due to the high aquifer drawdown in recent years, was carried out.

Results: Based on the results obtained, the aquifer is affected by over-abstraction due to the lack of water supply and demand management, and the developments made due to the reduction in surface flow have caused a significant increase in pressure on groundwater resources, causing aquifer drawdown from a quantitative perspective and land subsidence in parts of the aquifer. The results showed that the rate of land subsidence in the central and outlet parts of the aquifer was higher due to the high concentration of exploitation wells and reached a maximum of more than 30 centimeters per year.

Conclusions: These changes in land subsidence were also analyzed according to the conditions affected by the depth of groundwater about climatic fluctuations, and the model results showed that the highest amount of subsidence occurred during drought periods.

Cite this article: Kardan moghadam, H., Akbarzadeh, A. (2024). Evaluating climatic periods in predicting subsidence rates using numerical modeling (Case study: Najafabad aquifer). *Journal of Ecohydrology*, 11 (4), 511-526. <https://doi.org/10.22059/ije.2025.386827.1855>



© Hamid Kardan moghadam, Abbas Akbarzadeh.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2025.386827.1855>

Introduction

Unplanned exploitation and lack of proper management of groundwater resources have caused, in addition to quantitative and qualitative problems, the creation of subsidence as irreparable damage to natural resources(1). Subsidence is a morphological phenomenon that occurs under the influence of ground subsidence(2). The occurrence of this phenomenon has a relatively high frequency and sequence, but due to the slow and sluggish movement of the ground, it is often not possible to understand and measure it. The uneven decrease of groundwater in different parts of the aquifer leads to heterogeneous compaction of alluvium and, as a result, uneven subsidence of the ground surface and the creation of cracks or fissures in the ground surface, which gradually lead to various damages to structures, buildings, and pipelines(3). The most important risk created in this regard is the cutting of vital arteries, including oil, gas, gasoline, and water lines. On the other hand, sensitive structures will also be deformed, which will greatly increase the possibility of creating irreparable risks in them. In some cases, subsidence will also lead to the creation of huge sinkholes in the area and a feeling of insecurity among residents. According to the definition of the Geological Institute, the phenomenon of land subsidence includes the collapse or downward settlement of the earth's surface, which can also have a slight horizontal displacement.

It covers various important factors of land subsidence such as elevation, slope, lithological direction, distance from the fault, distance from the river, normal vegetation difference index, soil type, flow strength index, topographic moisture index, and land use(4). Groundwater resource management and providing remedial solutions make it possible to control this phenomenon. One of the appropriate tools to study this phenomenon is the simulation process using a numerical model. The mathematical model of groundwater provides a simulation of a hydrogeological system that obeys physical and mathematical laws.

Investigating the potential for subsidence at the aquifer level can affect the performance of groundwater resource exploitation. Therefore, using numerical simulation of aquifers to predict the rate of subsidence using numerical models can be considered as one of the components of comprehensive and sustainable water resources management.

Method

Case study

The Najafabad study area is one of the main areas of the Gavkhoni watershed in central Iran, which has an area of 1711.6 square kilometers. The volume of groundwater resources discharged in the region is 850 million cubic meters per year, and according to the sources of supply of this aquifer, there is an annual groundwater loss of about 80 centimeters. Due to the high exploitation and lack of management in this aquifer, the condition of this aquifer is very critical and parts of this aquifer have cracks in the ground surface. Geologically, the main part of the aquifer is formed by alluvium, and the southern and northern parts of the aquifer, which are limited to the heights, are formed by limestone formations, which play an important role in supplying water to the underground fronts entering the aquifer.

Simulation

Considering the purpose of this research, which is to simulate the subsidence phenomenon and evaluate the level of exploitation of groundwater resources in this phenomenon, the MODFLOW numerical model is used for quantitative simulation and then the SUB package is used to determine the level of land subsidence. The first step in simulating the groundwater model is to prepare a conceptual model of the aquifer. This model actually represents the parameters of the water balance of the region and is the main input to MODFLOW. The finite difference method was used to solve the groundwater equation, so on this basis, the spatial division of the aquifer into a series of square or rectangular grids or cells with dimensions of 500 x 500 meters was carried out. Observation wells as control points, exploitation wells, underground aquifer outlet fronts and evaporation from groundwater as parameters of aquifer discharge and return water from the exploitation of wells, infiltration due to runoff and precipitation, and groundwater inlet fronts were entered as parameters of aquifer recharge in the conceptual model. After preparing the conceptual model of the aquifer, the aquifer structure including

the topography of the land, the initial groundwater level, and the bedrock were entered into the model. The hydrodynamic parameters of the aquifer including the hydraulic conductivity, storage coefficient, and specific water yield of the aquifer were also extracted based on the results of pumping tests in the area and entered into the model as initial values.

After a quantitative simulation of the aquifer, the SUB package was used to simulate the amount of ground settlement due to water withdrawal. The SUB package actually simulates subsidence modeling for aquifers with compressible layers. The head or pre-consolidation stress, elastic storage, inelastic storage, and initial compaction should be applied to the model as the main parameters for the subsidence simulation.

Results

In order to calibrate the model, the results of the geological formations of the region and the results of pumping tests were also used. Accordingly, the initial parts of the aquifer are coarser-grained and have higher values of hydraulic conductivity, and the middle and end parts of the aquifer are finer-grained and have lower hydraulic conductivity. Also, the specific water yield in this aquifer is consistent with the hydraulic conductivity, and as a general trend, the specific water yield has decreased from the inlets to the outlet of the aquifer. After validating the quantitative aquifer model and evaluating the appropriate correlation between the observed and simulated groundwater levels, the future state of the aquifer was predicted, considering the continuation of the current state for 6 years. In these conditions, the climatic conditions were considered in three climatic conditions: dry, normal, and wet, and the level of exploitation of groundwater resources was considered based on the current trend. Accordingly, the highest level of groundwater stress and loss was related to the dry period of the region, with the highest loss in the outlet section of the aquifer at 40.6 meters. Under the same conditions, the drop rate in wet conditions in the same observation well was predicted to be 13.8 meters.

The aquifer outlet areas and areas with the most exploitation wells will also have the highest amount of subsidence due to water withdrawal. Compressible layers are usually made of clay and, by absorbing water, gain a higher specific gravity, causing the aquifer to drop and the groundwater level to decrease. In the model, two sections of compressible layers were defined, called No Delay Interbeds and Delay Interbeds. The No Delay Interbeds section is used to express the drainage speed and does not show the delay in water transfer. In this case, the flow speed is calculated using a conceptual model in the unsteady state of the model. Pre-consolidation head is also very important and significant in the aquifer area, which in this study was divided into aquifers using interpolation and raw data and estimation of pre-consolidation head coefficients and entered into the subsidence model. After entering this information and using the information of the aquifer quantitative model (hydraulic conductivity and initial groundwater level), a ground subsidence simulation was performed.

The results show that the outlet sections of the aquifer, especially in the northeastern region of the aquifer, have the highest rate of subsidence. The study of the model and behavior of the aquifer shows that this part of the aquifer has the highest number of exploitation wells and the highest volume of water is extracted from this part. Therefore, the continuation of exploitation without planning will indicate aquifer subsidence and an increase in land subsidence up to a maximum of 23 centimeters in normal climatic conditions. The study of the relationship between density and exploitation of water wells in the region showed that the outlet section of the aquifer, which has a large number of exploitation wells, has the highest damage due to aquifer subsidence. Also, the study of land subsidence in other parts of the aquifer shows that the central and southeastern parts of the aquifer will also be affected if the current trend continues, and this will increase the damage.

Conclusions

The results of the groundwater level prediction in three climate scenarios indicated a decrease in the aquifer and an uncertainty range of about 8 meters at the end of the period. Considering the quantitative status of the aquifer, a subsidence simulation was performed according to the time period of the quantitative model by activating the Sub software package. The results obtained from the subsidence rate simulation showed that the maximum subsidence rate of the Najafabad aquifer over

the next 6 years is 23 centimeters in the outlet section of the aquifer. Also, the average subsidence rate in the entire aquifer was 3 centimeters. Considering the results obtained from the current and future status of the Najafabad aquifer, it is necessary to implement the solutions presented in the region so that this problem does not cause irreparable damage to the infrastructure of the region. The results of this study showed that the relationship between the aquifer subsidence rate and excessive exploitation is direct and the greatest effect of subsidence is in parts of the aquifer where the density of exploitation wells is high and the exploitation rate is high.

Authors Contributions

Hamid Kardan Moghaddam: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Writing-Original Draft.

Abbas Akbarzadeh: Writing-Review & Editing, Formal analysis, Supervision.

Data Availability Statement

Authors have no restrictions on sharing data.

Acknowledgments

--

Ethical considerations

Ethics Approval

Relevant research content in this study was in accordance with the ethical standards of the institutional and national research committees.

Consent to Participate

All of the authors consent to participate in the relevant research content in this paper.

Consent for Publication

All of the authors consent to publish the paper, and it has not been published previously nor is it being considered by any other peer-reviewed journal.

Funding

The authors did not receive support from any organization for the submitted work.

Conflict of interest

All Authors declare that they have no conflict of interest.

ارزیابی دوره‌های اقلیمی در پیش‌بینی میزان فرونشست با استفاده از مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی: آبخوان نجف‌آباد)

حمید کاردان مقدم^{۱*} ، عباس اکبرزاده^۲

۱. استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: h.kardan@wri.ac.ir

۲. استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: a.akbarzadeh@wri.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: رویکرد مدیریت یکی از راهبردی‌ترین اصول در بحث مدیریت منابع آب با توجه به شرایط کم‌آبی و تنش‌های اقلیمی است. این موضوع سبب شده تا رویکردهای مختلفی برای ارزیابی و شناسایی ابعاد موضوع مطرح گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸	هدف: یکی از چالش‌های ایجادشده در موضوع مدیریت منابع آب زیرزمینی، بهره‌برداری بیش از توان آبخوان بوده که سبب شده تا نشست زمین در لایه‌های رسی در آبخوان‌های آبرفتی انجام گیرد. بر این اساس، رویکرد استفاده از مدل‌های عددی برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد فرونشست با توجه به قابلیت پیش‌بینی بسیار کاراست.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸	روش تحقیق: در این راستا شبیه‌سازی آبخوان نجف‌آباد که با توجه به افت بالای آبخوان در سال‌های اخیر، با استفاده از پکیج SUB در مدل MODFLOW انجام گرفت. براساس نتایج به‌دست‌آمده آبخوان تحت‌تأثیر اضافه‌برداشت ناشی از عدم مدیریت عرضه و تقاضای آب بوده و توسعه‌های انجام‌گرفته با توجه به کاهش جریان سطحی سبب شده تا فشار بر منابع آب زیرزمینی افزایش چشمگیری داشته باشد و سبب افت آبخوان از دیدگاه کمی و نشست زمین در بخش‌هایی از آبخوان شود.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵	یافته‌ها: نتایج نشان داد که میزان نشست زمین در بخش‌های مرکزی و خروجی آبخوان با توجه به تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری بیشتر بوده و حداکثر به بیش از ۳۰ سانتی‌متر در سال می‌رسد. این تغییرات نشست زمین با توجه به شرایط تحت‌تأثیر عمق آب زیرزمینی نسبت به نوسانات اقلیمی نیز مورد آنالیز قرار گرفت.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱	نتیجه‌گیری: نتایج مدل نشان داد که در دوره‌های خشکسالی بیشترین میزان نشست ایجاد شده است.
کلیدواژه‌ها: فرونشست، عمق آب زیرزمینی، نوسانات اقلیمی، پکیج SUB نجف‌آباد.	
استناد: کاردان مقدم، حمید؛ اکبرزاده، عباس. ارزیابی دوره‌های اقلیمی در پیش‌بینی میزان فرونشست با استفاده از مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی: آبخوان نجف‌آباد). مجله اکوهیدرولوژی، ۱۱(۴)، ۵۱۱-۵۲۶.	
ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.	© حمید کاردان مقدم، عباس اکبرزاده

<https://doi.org/10.22059/ije.2025.386827.1855>



مقدمه

بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی و عدم مدیریت صحیح در منابع آب زیرزمینی باعث شده تا علاوه بر مشکلات کمی و کیفی، ایجاد فرونشست به‌عنوان یک خسارت جبران‌ناپذیر به منابع طبیعی وارد شود (باقری گاوکش، ۱۳۹۹). در واقع نشست زمین به‌دنبال تراکم رسوبات غیرمترام ناشی از کاهش سطح ایستابی اتفاق می‌افتد. فرونشست (پدیده‌ای مورفولوژیکی است که تحت تأثیر حرکت فرورو زمین پدید می‌آید. رخداد این پدیده از فرکانس و توالی نسبتاً زیادی برخوردار است، اما به‌واسطه حرکت کند و آهسته زمین در اغلب موارد، درک و اندازه‌گیری آن میسر نیست (معماریان سرخابی و همکاران، ۱۴۰۰). لذا این رویداد اغلب در مناطقی قابل شناسایی است که در مورفولوژی سطح زمین و به‌خصوص تأسیسات و تجهیزات اثر گذاشته، تخریب و خسارتی به بار آورد. افت غیریکنواخت آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف آبخوان منجر به تراکم ناهمگن آبرفت و در نتیجه نشست غیریکنواخت سطح زمین و ایجاد ترک و یا شکاف‌هایی در سطح زمین می‌گردد که به تدریج به وجود آمدن این شکاف‌ها منجر به خسارت‌های مختلف به سازه‌ها، ساختمان‌ها و خطوط لوله‌کشی می‌شود (گالاردو^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). مهم‌ترین خطر ایجادشده در این خصوص قطع شریان‌های حیاتی از جمله خطوط نفت، گاز، بنزین و آب است. از طرفی، سازه‌های حساس نیز دچار تغییر شکل خواهند شد که این موضوع احتمال ایجاد خطرات جبران‌ناپذیر در آن‌ها را به شدت افزایش خواهد داد. در مواردی نیز فرونشست منجر به ایجاد فروچاله‌های عظیم در منطقه و احساس ناامنی ساکنان نیز می‌شود. براساس تعریف انستیتو زمین‌شناسی، پدیده نشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند جابه‌جایی افقی اندکی هم داشته باشد. حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر محدود نیست و نشست می‌تواند بر اثر پدیده‌های طبیعی زمین‌شناختی مانند انحلال، ذوب یخ‌ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، برداشت آب‌های زیرزمینی یا نفت ایجاد شود. این عمدتاً ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب است. بر اثر برداشت آب زیرزمینی و خارج شدن آب از منافذ امکان مترام شدن مواد تا عمق ۳۰۰ متر فراهم می‌گردد و هرچه بیشتر برداشت شود، تراکم مواد بیشتر خواهد بود. نشست زمین باعث ایجاد شکاف‌های عمیق در سطح زمین، کج شدن لوله‌های چاه، خرابی ساختمان‌ها و لوله‌زایی چاه‌ها می‌گردد. نشست نتیجه دو عامل ماهیت زمین و خروج آب‌های زیرزمینی است (پردو^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). عوامل مهم و مختلف نشست زمین از قبیل ارتفاع، شیب، جهت سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، نرمال شاخص تفاوت پوشش گیاهی، نوع خاک، شاخص قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی و کاربری زمین را پوشش می‌دهد (پردان^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). مدیریت منابع آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای علاج‌بخشی امکان کنترل این پدیده را ایجاد می‌کند. یکی از ابزارهای مناسب بررسی این پدیده، فرایند شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی است. مدل ریاضی آب زیرزمینی شبیه‌سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی را ارائه می‌دهد که از قوانین فیزیکی و ریاضی تبعیت می‌کند.

پیشینه پژوهش

محمودپور و همکاران (۲۰۱۶)، فرونشست محلی زمین را که ناشی از برداشت آب زیرزمینی است، در دشت جنوب غربی تهران ایران مدل‌سازی عددی نموده و براساس داده‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۲، روند را تا سال ۲۰۱۸ پیش‌بینی کردند. مدل مورد استفاده در این پژوهش، مدل‌سازی PMWIN است که با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت قابل قبولی دارد. براساس نتایج عددی این پژوهش، با فرض ثابت بودن نرخ پمپاژ در آینده، تا سال ۲۰۱۸ فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران به ۳۳ سانتی‌متر خواهد رسید و فرونشست ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی تهدیدی جدی برای دشت جنوب غربی تهران محسوب می‌شود (محمودپور و همکاران و همکاران، ۱۳۹۴). جعفری و همکاران در سال ۲۰۱۶ با مدل‌سازی فرونشست در آبخوان ساوه، شن و همکاران (۲۰۱۷)، شبیه‌سازی را با استفاده از مدل الاستیک، جیانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ شبیه‌سازی فرونشست را در اثر بهره‌برداری از مخازن گاز، اکسی و همکاران در سال ۲۰۱۹ شبیه‌سازی فرونشست را با استفاده از مدل CLM5، یو و همکاران در سال ۲۰۲۰، لیو و همکاران در سال

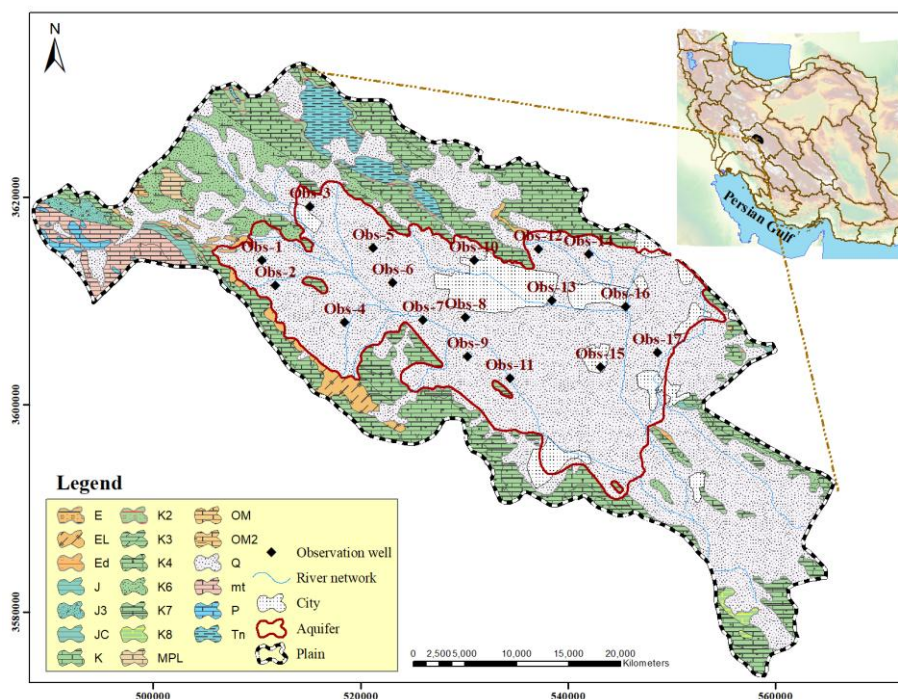
۲۰۲۲ و خاجه‌الی و همکاران در سال ۲۰۲۳ با استفاده از پکیج sub شبیه‌سازی را با تأثیرات سناریوهای مختلف برداشت از آبخوان مورد بررسی قرار دادند (اکیسی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیانی^۲ و همکاران، ۲۰۱۸؛ جعفری و همکاران، ۱۳۹۴؛ خاجه‌حالی، صفوی و ایران‌پور، ۱۴۰۱؛ لیو^۳ و همکاران، ۲۰۲۲؛ شن، وو و ژانگ^۴، ۲۰۱۷؛ یو^۵ و همکاران، ۲۰۲۰).

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که این پدیده یک هشدار جدی بوده و نقش رفتار یک آبخوان در شکل‌گیری آن بسیار حائز اهمیت است. به‌طور کلی بررسی پتانسیل فرونشست در سطح آبخوان می‌تواند عملکرد وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار دهد. لذا استفاده از شبیه‌سازی عددی آبخوان برای پیش‌بینی میزان فرونشست با استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند به‌عنوان یکی از اجزای مدیریت جامع و پایدار منابع آب مطرح باشد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی نجف‌آباد یکی از محدوده‌های اصلی حوضه آبریز گاوخونی در مرکز ایران است که دارای مساحتی بالغ بر ۱۷۱۱/۶ کیلومتر مربع است. این محدوده بین طول‌های جغرافیایی $53^{\circ} 50'$ تا $51^{\circ} 42'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ} 18'$ تا $33^{\circ} 50'$ شمالی گسترده شده است. حجم عمده منابع تأمین آب در این منطقه، منابع آب زیرزمینی است که با استفاده از چاه‌های منطقه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. حجم تخلیه منابع آب زیرزمینی منطقه بالغ بر ۸۵۰ میلیون متر مکعب در سال است که با توجه به منابع تغذیه این آبخوان سالانه حدود ۸۰ سانتی‌متر افت آب زیرزمینی وجود دارد. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از بخش شمالی آبخوان به‌طرف جنوب و جنوب شرق است. با توجه به بهره‌برداری زیاد و بدون مدیریت در این آبخوان، وضعیت این آبخوان بسیار بحرانی بوده و بخش‌هایی از این آبخوان دچار شکاف‌هایی در سطح زمین شده است. از نظر زمین‌شناسی بخش اصلی آبخوان را آبرفت تشکیل داده و بخش‌های جنوبی و شمالی آبخوان که محدود به ارتفاعات است، از سازندهای آهکی تشکیل شده که این سازندها در تأمین آب جبهه‌های زیرزمینی ورودی به آبخوان نقش مهمی را دارند. شکل (۱) موقعیت آبخوان نجف‌آباد را نمایش می‌دهد.



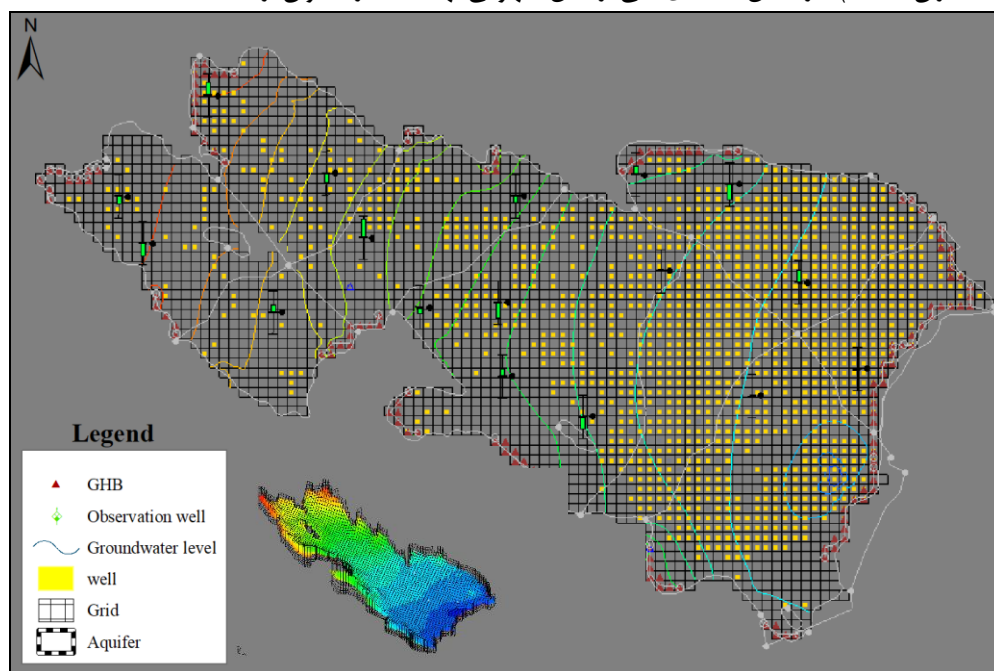
شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

1. Ekici
2. Giani
3. Liu
4. Shen, Wu & Zhang
5. Yu

شبیه‌سازی آبخوان

با توجه به هدف این پژوهش که شبیه‌سازی پدیده فرونشست و ارزیابی میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در این پدیده است، از مدل عددی MODFLOW برای شبیه‌سازی کمی و سپس از پکیج SUB برای تعیین میزان نشست زمین استفاده می‌شود. برای استفاده از مدل فرونشست از پکیج SUB در اینترفاز GMS 10 شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. اولین گام برای شبیه‌سازی، تهیه مدل مفهومی آبخوان بوده و براساس آن، مدل ماندگار و غیرماندگار جریان شبیه‌سازی می‌شود. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان، میزان نشست مورد بررسی و در نهایت براساس پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان با استفاده از مدل کمی، میزان نشست زمین نیز پیش‌بینی می‌گردد. بر این اساس هدف از مدل‌سازی، بررسی گزینه‌های چگونگی به تعادل رساندن بیلان، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و دنباله‌روی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی توأم با ارائه واسنجی است.

اولین گام در شبیه‌سازی مدل آب زیرزمینی تهیه مدل مفهومی آبخوان است. این مدل در واقع بیانگر پارامترهای بیلان منابع آب منطقه بوده و اصلی‌ترین ورودی به MODFLOW است. برای حل معادله آب زیرزمینی از روش تفاضل‌های محدود استفاده شد؛ لذا بر این اساس تقسیم‌بندی مکانی آبخوان به یکسری شبکه یا سلول مربعی و یا مستطیلی با ابعاد 500×500 متر انجام گرفت. چاه‌های مشاهده‌ای به‌عنوان نقاط شاهد، چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های زیرزمینی خروجی آبخوان و تبخیر از آب زیرزمینی به‌عنوان پارامترهای تخلیه آبخوان و آب برگشتی از بهره‌برداری از چاه‌ها، نفوذ ناشی از رواناب و بارش و جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی به‌عنوان پارامترهای تغذیه آبخوان در مدل مفهومی وارد گردید. پس از تهیه مدل مفهومی آبخوان ساختار آبخوان شامل توپوگرافی زمین، تراز اولیه آب زیرزمینی و سنگ بستر در مدل وارد گردید. پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و آب‌دهی ویژه آبخوان نیز براساس نتایج آزمایش‌های پمپاژ منطقه استخراج و به‌صورت مقادیر اولیه در مدل وارد گردید (مقدم و همکاران، ۱۳۹۷). در شکل ۲، نمای کلی از مدل مفهومی تهیه‌شده در آبخوان نجف‌آباد



شکل ۲. مدل مفهومی آبخوان نجف‌آباد

پس از تهیه مدل مفهومی آبخوان برای شبیه‌سازی آبخوان، ابتدا از مدل ماندگار برای شبیه‌سازی استفاده شد. در این حالت، رژیم جریان آب در آبخوان به‌صورت پایدار فرض شده و از تغییرات حجم آب در مخزن زیرزمینی صرف‌نظر می‌شود. در حالت پایدار با وجود داشتن تغذیه و تخلیه در سیستم، معادله اساسی آب‌های زیرزمینی، به‌صورت معادله پواسن درمی‌آید. در رژیم پایدار و در مرحله تطبیق، تصحیح قابلیت انتقال سفره یا هدایت هیدرولیکی آن و میزان تغذیه و تخلیه طبیعی مدل مد نظر است. بر

این اساس، مهرماه ۱۳۹۵ به عنوان اولین گام و شروع شبیه‌سازی در حالت ماندگار در نظر گرفته شد. پس از تطبیق و واسنجی مدل ماندگار آب زیرزمینی، شبیه‌سازی غیرماندگار جریان آب زیرزمینی انجام می‌گیرد. بدین منظور با انتخاب دوره ۵ساله و شامل ۶۰ گام زمانی ماهانه تا شهریور ۱۴۰۰ دوره شبیه‌سازی غیرماندگار در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی فرونشست

پس از شبیه‌سازی کمی آبخوان از بسته SUB برای شبیه‌سازی میزان نشست زمین بر اثر برداشت آب استفاده شد. بسته SUB درحقیقت مدل‌سازی فرونشست را برای آبخوان‌های دارای لایه‌های تراکم‌پذیری شبیه‌سازی می‌کند. این برنامه کامپیوتری به منظور شبیه‌سازی تراکم عمودی در یک سفره آب زیرزمینی طراحی شده است و تغییرات ضریب ذخیره و همچنین تراکم در لایه‌های ناپیوسته (Interbed) و یا پیوسته تحت فشار را که قابلیت تراکم‌پذیری ناشی از تغییرات فشار در آبخوان را دارند، شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل‌سازی، فشار ژئواستاتیک تابعی از تراز آب زیرزمینی و مقدار تراکم تابعی از تغییرات فشار مؤثر در کف آبخوان در نظر گرفته می‌شود (USGS chapter 23 Book6, 2007). آب زیرزمینی بر اثر کاهش هد هیدرولیکی از آبخوان خارج می‌شود. حجم آب خارج‌شده از آبخوان متناسب با تراکم‌پذیری خاک و آب است، زیرا کاهش هد هیدرولیکی سبب افزایش تنش مؤثر در بافت جامد خاک یا اسکلت خاک شده و نیز کاهش فشار آب موجود در آبخوان می‌گردد. افزایش تنش مؤثر بر بافت جامد خاک سبب تراکم بافت خاک می‌شود. بسته SUB حجم آب خارج‌شده از ذخیره آبخوان را محاسبه کرده و تراکم الاستیک و غیرالاستیک بسترهای ریزدانه تراکم‌پذیر موجود در آبخوان را بر اثر استخراج آب زیرزمینی شبیه‌سازی می‌کند.

هد یا تنش پیش‌تحکیمی، ذخیره الاستیک، ذخیره غیرالاستیک و تراکم اولیه به عنوان پارامترهای اصلی شبیه‌سازی فرونشست می‌بایست در مدل اعمال شود.

هد پیش‌تحکیمی: هد پیش‌تحکیمی مقدار حداقل هدی است که با آن آبخوان دچار فرونشست نخواهد شد. برای هریک از سلول‌های مدل که هد پیش‌تحکیمی تعیین شده بیشتر از هد هیدرولیکی اولیه باشد، مقدار هد پیش‌تحکیمی همان مقدار هد هیدرولیکی اولیه در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر تحت تنش فراتر از حداکثر تنش پیشین آبخوان (تنش پیش‌تحکیمی) قرار گیرند، تراکم غیرالاستیک خواهد بود.

فاکتور ذخیره الاستیک: برای آبخوان محبوس، تراکم یا تورم الاستیک رسوبات متناسب یا حدوداً متناسب با مقادیر هد هیدرولیکی آبخوان است. بسته SUB از معادله زیر برای محاسبه تغییر ضخامت لایه‌ها (مثبت برای تراکم و منفی برای تورم لایه‌ها) استفاده می‌کند.

$$\Delta b = -\Delta h \cdot S_{fe} = -\Delta h \cdot S_{ske} \cdot b_0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، Δb [L] تغییر ضخامت لایه‌ها، Δh [L] تغییر در هد هیدرولیکی است؛ S_{ske} [L⁻¹] مؤلفه بافتی ذخیره ویژه الاستیک و b_0 [L] ضخامت اولیه میان لایه‌هاست. برای آبخوان آزاد، مؤلفه الاستیک تراکم یا انبساط رسوبات به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta b = -\Delta h \cdot S_{fe} = -\Delta h \cdot (1 - n + n_w) \cdot S_{ske} \cdot b_0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن n تخلخل است و n_w محتوای رطوبت در خاک بالای تراز سطح آب زیرزمینی (ناحیه غیراشباع) است که کسری از حجم کل محیط متخلخل است.

فاکتور ذخیره غیرالاستیک: برای آبخوان محبوس، بسته فرونشست از معادله زیر برای محاسبه تقریبی تراکم غیرالاستیک Δb^* [L] استفاده می‌کند:

$$\Delta b^* = -\Delta h \cdot S_{fv} = -\Delta h \cdot S_{skv} \cdot b_0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، S_{skv} [L⁻¹] مؤلفه بافتی ذخیره ویژه غیرالاستیک است. برای آبخوان آزاد، تراکم غیرالاستیک رسوبات را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\Delta b^* = -\Delta h \cdot S_{fv} = -\Delta h \cdot (1 - n + n_w) \cdot S_{skv} \cdot b_0 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که n تخلخل است و n_w محتوای رطوبت خاک در بالای تراز سطح آب زیرزمینی است که کسری از حجم کل محیط متخلخل است.

تراکم اولیه: مقادیر تراکم محاسبه‌شده توسط بسته SUB به تراکم اولیه اضافه می‌شود تا مقادیر ذخیره‌شده تراکم و نشست زمین شامل مقادیر اولیه باشد. تراکم اولیه، محاسبه تغییرات ذخیره یا تراکم را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

یافته‌های پژوهش

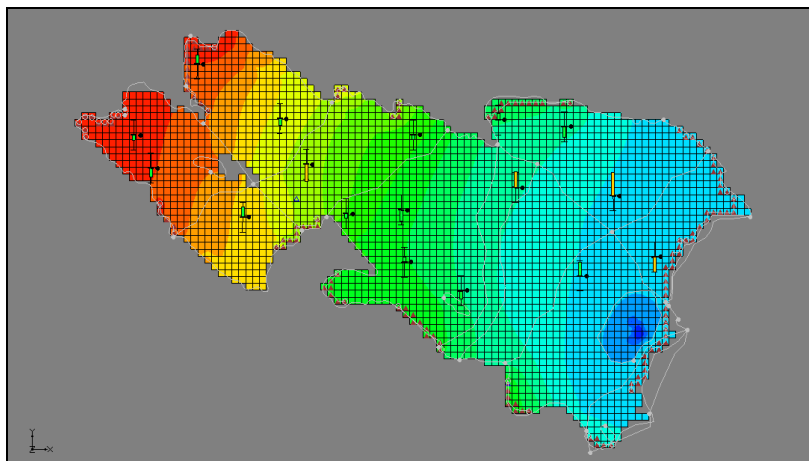
ارزیابی مدل کمی آبخوان

به منظور ارزیابی مدل کمی آبخوان برای شبیه‌سازی میزان فرونشست که هدف اصلی این پژوهش است، ابتدا آنالیز حساسیت پارامترهای مدل‌سازی آب زیرزمینی انجام گرفت. بر این اساس با تغییر در پارامترهای ورودی به مدل ماندگار جریان آب زیرزمینی با در نظر گرفتن بازه ۵ تا ۲۰ درصد افزایش یا کاهش پارامتر، سه پارامتر هدایت هیدرولیکی، ارتفاع سنگ بستر و تغذیه آبخوان به عنوان پارامترهای حساس شناسایی شدند. نتایج استخراجی در مقایسه با سایر مطالعات شبیه‌سازی عددی حاکی از صحت موضوع داشته و پارامتر هدایت هیدرولیکی به عنوان حساس‌ترین پارامتر برای واسنجی انتخاب گردید. بر این اساس، واسنجی مدل انجام و مبنای توقف واسنجی رسیدن به میانگین مجذور خطای (RMSE) کمتر از یک متر به عنوان هدف واسنجی تعیین شد. پس از واسنجی جریان ماندگار آب زیرزمینی، شبیه‌سازی غیرماندگار برای دوره شبیه‌سازی انجام و پارامتر آب‌دهی ویژه مورد واسنجی قرار گرفت. در انتها برای یک سال پایانی نیز صحت‌سنجی مدل انجام گرفت که نتایج حاکی از دقت مناسب نتایج بوده است. تحلیل آنالیز خطای مدل کمی در سه حالت ماندگار، غیرماندگار و صحت‌سنجی در جدول ۱ ارائه شده است.

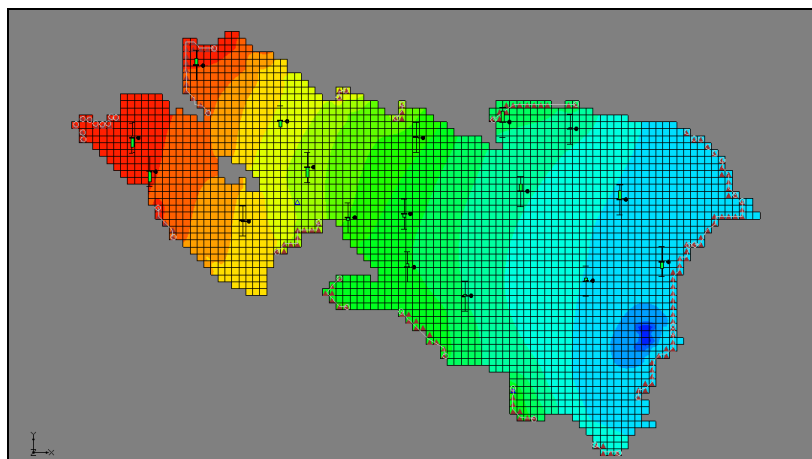
جدول ۱. آنالیز خطای شبیه‌سازی کمی آبخوان

پارامتر خطا	مدل کمی-متر	
	مدل ماندگار	مدل غیرماندگار
میانگین خطا	-۰/۰۳	۰/۳۷
میانگین مطلق خطا	۰/۶۸	۰/۸۱
میانگین مجذور خطا	۰/۷۷	۰/۹۶

به منظور واسنجی مدل از تطبیق نتایج حاصل از نوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه و نتایج آزمایش‌های پمپاژ نیز استفاده شد. بر این اساس بخش‌های ابتدایی آبخوان که دانه‌درشت‌تر بوده و دارای مقادیر بالاتر هدایت هیدرولیکی و بخش‌های میانی و انتهایی آبخوان ریزدانه‌تر و دارای هدایت هیدرولیکی کمتر است. همچنین مطابقت میزان آب‌دهی ویژه در این آبخوان با هدایت هیدرولیکی زیاد بوده و به صورت یک روند کلی از ورودی‌ها به طرف خروجی آبخوان میزان آب‌دهی ویژه کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف در سه چاه مشاهده‌ای شماره ۱۶، ۱۳ و ۱۵ است. بر این اساس تحلیل نهایی مدل ماندگار و غیرماندگار جریان آب زیرزمینی در آبخوان پس از واسنجی به صورت شکل ۳ ارائه شده است.



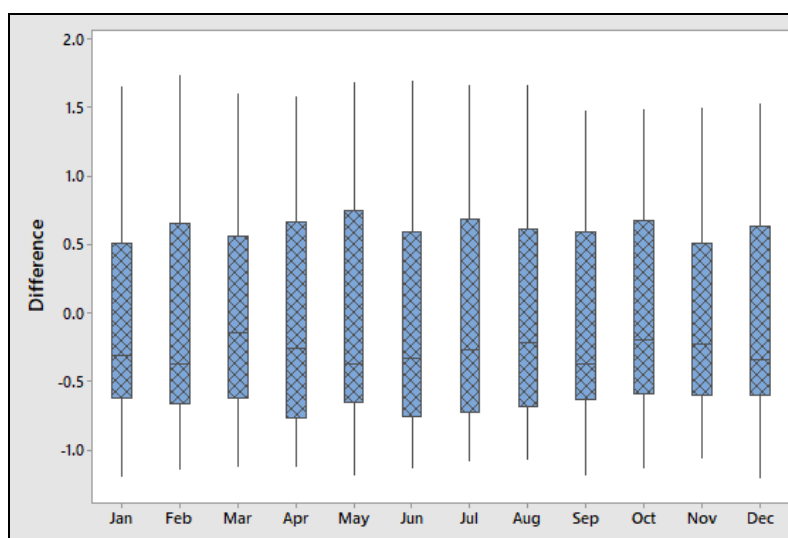
a: Steady model



b: Transient Model

شکل ۳. مدل نهایی حالت کمی در آبخوان نجفآباد

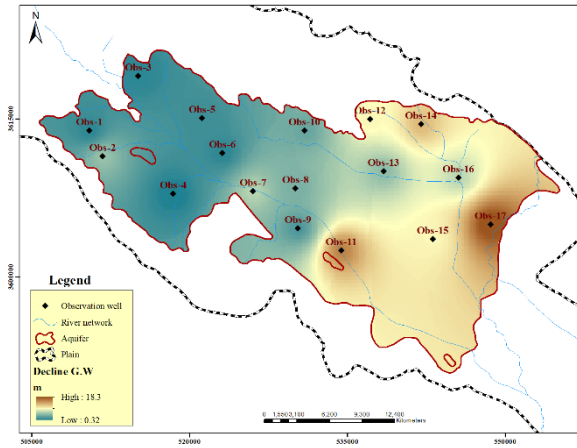
با توجه به پیچیدگی سیستم آب زیرزمینی و نقش عوامل طبیعی در رفتارسنجی آن، به منظور شناخت یک مدل مناسب برای پیش‌بینی می‌بایست صحت‌سنجی مدل انجام گیرد. بر این اساس با توجه به نوع آبخوان و روند تغییرات پارامترهای بیلان منابع آب منطقه، صحت‌سنجی برای سال پایانی دوره شبیه‌سازی انجام گرفت. بر این اساس برای ۱۲ ماه نمودار میزان خطا در سال انتهایی به صورت شکل ۴ ترسیم شد که نتایج حاکی از دقت مناسب مرحله صحت‌سنجی است. همان‌طور که مشخص است، اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دارای یک توزیع نرمال با میانگین نزدیک به صفر است.



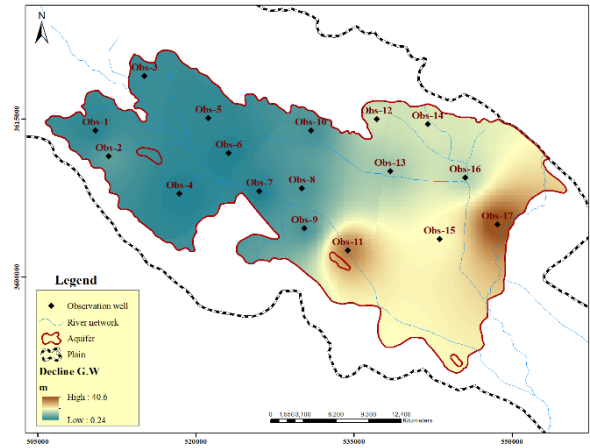
شکل ۴. همبستگی بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان

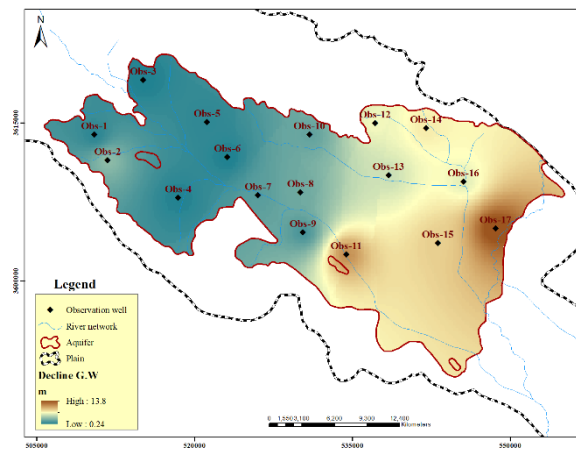
پس از صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان و ارزیابی همبستگی مناسب بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان با در نظر گرفتن ادامه وضعیت موجود به مدت ۶ سال انجام گرفت. در این شرایط وضعیت اقلیمی در سه شرایط خشک، نرمال و ترسالی از نظر اقلیمی و میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی براساس روند فعلی در نظر گرفته شد. بر این اساس، بیشترین میزان تنش و افت آب زیرزمینی مربوط به دوره خشک منطقه بوده، به طوری که بیشترین میزان افت در بخش خروجی آبخوان و به میزان ۴۰/۶ متر است. در همین شرایط میزان افت در شرایط ترسالی در همین چاه مشاهده‌ای ۱۳/۸ متر پیش‌بینی شد. تحلیل وضعیت افت آبخوان به صورت مکانی در این سه شرایط اقلیمی به صورت شکل (۵) ترسیم شده است.



ب) شرایط نرمال



الف) شرایط خشک

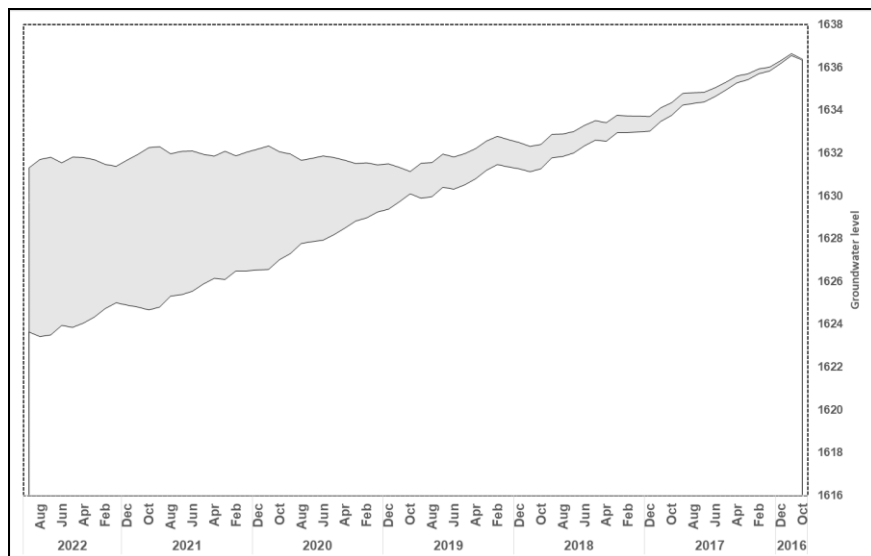


ج) شرایط ترسالی

شکل ۵. پیش‌بینی میزان افت آبخوان نجف‌آباد در سه حالت اقلیمی

همچنین در شکل ۶ باند عدم قطعیت نتایج پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان تحت سه شرایط اقلیمی نمایش داده شده است.

نتایج هیدروگراف آبخوان نشان می‌دهد که سناریوی خشکسالی باعث تشدید کاهش حجم منابع آب زیرزمینی می‌گردد.



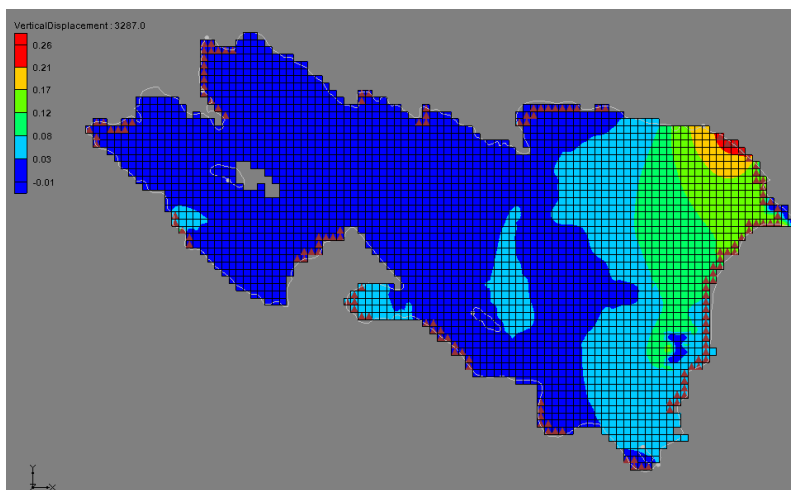
شکل ۶. میزان عدم قطعیت در پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان تحت سه شرایط اقلیمی

شبیه‌سازی میزان نشست زمین

نشست زمین ناشی از بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بر اثر افزایش فشار بین ذره‌ای در آبرفت شکل می‌گیرد. این افزایش فشار در سفره‌های آزاد، نتیجه از بین رفتن شناوری ذرات جامد در بخشی از سفره است که سطح آب در آن پایین افتاده است. افت ناموزون سطح آب زیرزمینی و ناهمگنی تراکم آبرفت موجب نشست ناموزون سطح زمین و ایجاد شکاف‌هایی در پوسته زمین می‌گردد. به‌منظور مدل‌سازی فرونشست در منطقه مورد مطالعه پس از آماده شدن مدل کمی آبخوان، از Sub Package به‌منظور وارد کردن اطلاعات مربوط به ساختار محیط اشباع و غیراشباع استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز شبیه‌سازی فرونشست شامل ذخیره الاستیک، غیرالاستیک، تراکم اولیه و هد پیش‌تحکیمی است. ضریب غیرالاستیک مطابق با رنج ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS 2010, 6-A23) معادل 0.001 تا 0.1 و ضریب الاستیک نیز معادل 0.2 در نظر گرفته شد.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی تعریف لایه‌های تراکم‌پذیر در محدوده آبخوان است که معمولاً این اطلاعات براساس لوگ‌های حفاری به دست می‌آید. در این شرایط، محدوده‌های خروجی آبخوان و محدوده‌هایی که بیشترین چاه‌های بهره‌برداری را دارد، بیشترین میزان فرونشست را در نیز بر اثر برداشت آب خواهد داشت. لایه‌های تراکم‌پذیر معمولاً از جنس رس بوده و با جذب آب، وزن مخصوص بالاتری پیدا کرده و سبب افت آبخوان و کاهش تراز آب زیرزمینی می‌شود. در مدل، دو بخش لایه‌های تراکم‌پذیر به نام‌های No Delay Interbeds و Delay Interbeds تعریف شد. بخش No Delay Interbeds برای بیان سرعت زهکشی بوده و تأخیر در انتقال آب را نشان نمی‌دهد. سرعت جریان در این حالت با استفاده از مدل مفهومی در حالت غیرماندگار مدل محاسبه می‌شود. هد پیش‌تحکیمی نیز در محدوده آبخوان بسیار مهم و حائز اهمیت است که در این مطالعه با روش درون‌یابی و اطلاعات خام و برآورد ضرایب هد پیش‌تحکیمی تقسیم‌بندی آبخوان انجام و در مدل فرونشست وارد گردید. پس از ورود این اطلاعات و استفاده از اطلاعات مدل کمی آبخوان (هدایت هیدرولیکی و تراز اولیه آب زیرزمینی) شبیه‌سازی فرونشست زمین انجام گرفت. پس از شبیه‌سازی مدل فرونشست، برای یک دوره ۶ ساله میزان نشست زمین با ادامه شرایط موجود در سه حالت اقلیمی ترسالی، نرمال و خشکسالی پیش‌بینی گردید.

بر این اساس مطابق شکل (۷) میزان نشست زمین در انتهای دوره پیش‌بینی در سه حالت اقلیمی نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های خروجی آبخوان به‌خصوص در منطقه شمال شرقی آبخوان بیشترین میزان فرونشست وجود دارد. بررسی مدل و رفتار آبخوان نشان می‌دهد که این بخش از آبخوان دارای بیشترین تعداد چاه بهره‌برداری بوده و بیشترین میزان حجم آب از این بخش استخراج می‌گردد. لذا ادامه بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی حاکی از افت آبخوان و افزایش نشست زمین تا میزان حداکثر ۲۳ سانتی‌متر در حالت نرمال اقلیمی خواهد بود. بررسی ارتباط بین تراکم و بهره‌برداری از چاه‌های آب منطقه نشان داد که بخش خروجی آبخوان که دارای تعداد چاه‌های بهره‌برداری است، بیشترین خسارت را با توجه به افت آبخوان دارد. همچنین بررسی میزان نشست زمین در سایر بخش‌های آبخوان نیز نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و جنوب شرقی آبخوان نیز با ادامه روند کنونی تحت تأثیر بوده و این موضوع باعث افزایش خسارات خواهد شد.



شکل ۷. نتایج مدل‌سازی فرونشست در انتهای دوره پیش‌بینی در شرایط نرمال اقلیمی

بحث

بررسی شرایط اقلیمی و تأثیر آن بر وضعیت کمی آبخوان نشان می‌دهد که در دوره اقلیمی خشک، بیشترین میزان افت در انتهای دوره ۶ ساله در بخش خروجی آبخوان و مقدار ۴۰/۶ متر پیش‌بینی شده است. در بخش شمالی و ابتدایی آبخوان با توجه به عدم تمرکز چاه‌های بهره‌برداری میزان افت ناچیز است. در شرایط اقلیمی نرمال، بیشترین میزان افت در انتهای دوره ۶ ساله در بخش خروجی آبخوان و مقدار ۱۸/۳ متر پیش‌بینی شده است. کمترین میزان افت در بخش شمالی آبخوان بوده و مقدار آن ۳۲ سانتی‌متر است. در شرایط اقلیمی تر، حداقل میزان افت نسبت به دو حالت خشک و نرمال، تغییر خاصی نداشته اما میزان حداکثر افت آبخوان در بخش خروجی به ۱۳/۸ متر در طی ۶ سال می‌رسد. از طرفی نیز شبیه‌سازی نشست نشان داد که همبستگی بالایی بین تمرکز چاه‌های بهره‌برداری و میزان نشست زمین وجود دارد. این موضوع لزوم مدیریت منابع آب زیرزمینی از نقطه‌نظر بهره‌برداری با افزایش بهره‌وری با کاهش حجم بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی و عدم توجه به پتانسیل قابلیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی باعث شده تا پدیده فرونشست زمین ایجاد و گسترش داشته باشد. این مطالعه به بررسی پدیده فرونشست زمین و پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان تحت این شرایط در سه حالت اقلیمی خشک، نرمال و تر پرداخته است. با توجه به تأثیرگذاری برداشت بی‌رویه از آبخوان بر فرونشست زمین، شبیه‌سازی آبخوان نجف‌آباد در حالت کمی انجام و براساس شبیه‌سازی اولیه، واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام گرفت. پس از ارزیابی و دقت مناسب مدل کمی آبخوان، برای یک دوره ۶ ساله، پیش‌بینی وضعیت کمی آبخوان تحت سه سناریوی اقلیمی انجام گرفت. نتایج پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در سه حالت اقلیمی حاکی از افت آبخوان و بازه عدم قطعیت حدود ۸ متری در انتهای دوره را نشان داد. با توجه به وضعیت کمی آبخوان، با فعال‌سازی بسته نرم‌افزاری Sub شبیه‌سازی فرونشست مطابق دوره زمانی مدل کمی انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی میزان فرونشست نشان داد که حداکثر میزان فرونشست آبخوان نجف‌آباد در طی ۶ سال آینده ۲۳ سانتی‌متر در بخش خروجی آبخوان است. همچنین متوسط میزان فرونشست در کل آبخوان میزان ۳ سانتی‌متر به دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از وضعیت کنونی و آینده آبخوان نجف‌آباد، ضروری است راهکارهای ارائه‌شده در منطقه پیاده‌سازی شود تا این مشکل خسارات جبران‌ناپذیری به زیرساخت‌های منطقه وارد نکند. نتایج این مطالعه نشان داد که ارتباط بین میزان نشست آبخوان و بهره‌برداری بی‌رویه به‌صورت مستقیم بوده و بیشترین اثر فرونشست در بخش‌هایی از آبخوان است که تراکم چاه‌های بهره‌برداری بالا و میزان بهره‌برداری زیاد است.

References

- Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 778, 146193. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146193>
- Ekici, A., Lee, H., Lawrence, D. M., Swenson, S. C., & Prigent, C. (2019). Ground subsidence effects on simulating dynamic high-latitude surface inundation under permafrost thaw using CLM5. *Geoscientific Model Development*, 12(12), 5291–5300. <https://doi.org/10.5194/GMD-12-5291-2019>
- Gallardo, A. H., Marui, A., Takeda, S., & Okuda, F. (2009). Groundwater supply under land subsidence constrains in the Nobi Plain. *Geosciences Journal*, 13(2), 151–159. <https://doi.org/10.1007/S12303-009-0014-4>
- Giani, G., Orsatti, S., Peter, C., & Rocca, V. (2018). A Coupled Fluid Flow—Geomechanical Approach for Subsidence Numerical Simulation. *Energies* 2018, Vol. 11, Page 1804, 11(7), 1804. <https://doi.org/10.3390/EN11071804>
- Jafari, F., Javadi, S., Golmohammadi, G., Karimi, N., & Mohammadi, K. (2016). Numerical simulation of groundwater flow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR technique: Saveh basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S12665-016-5654-X/METRICS>
- khajehali, M., Safavi, H. R., & Iran Pour, S. (2023). Evaluation of management scenarios for land subsidence reduction and groundwater rehabilitation in Damane-Daran plain, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100995. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2023.100995>
- Liu, R., Zhao, Y., Cao, G., Wang, Q., Ma, M., Li, E., & Deng, H. (2022). Threat of land subsidence to the groundwater supply capacity of a multi-layer aquifer system. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101240. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2022.101240>
- Mahmoudpour, M., Khamchian, M., Nikudel, M. R., & Ghassemi, M. R. (2016). Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 201, 6–28. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2015.12.004>
- Memarian Sorkhabi, O., Kurdpour, I., & Esmaeili Sarteshnizi, R. (2022). Land subsidence and groundwater storage investigation with multi sensor and extended Kalman filter. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, 100859. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2022.100859>
- Moghaddam, H. K., Moghaddam, H. K., Kivi, Z. R., Bahreinimotlagh, M., & Alizadeh, M. J. (2019). Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(June), 100237. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100237>
- Pardo, J. M., Lozano, A., Herrera, G., Mulas, J., & Rodríguez, Á. (2013). Instrumental monitoring of the subsidence due to groundwater withdrawal in the city of Murcia (Spain). *Environmental Earth Sciences*, 70(5), 1957–1963. <https://doi.org/10.1007/S12665-013-2710-7/METRICS>
- Pradhan, B., Abokharima, M. H., Jebur, M. N., & Tehrany, M. S. (2014). Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Natural Hazards*, 73(2), 1019–1042. <https://doi.org/10.1007/S11069-014-1128-1/METRICS>
- Shen, J., Wu, H., & Zhang, Y. (2017). Subsidence estimation of breakwater built on loosely deposited sandy seabed foundation: Elastic model or elasto-plastic model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(4), 418–428. <https://doi.org/10.1016/J.IJNAOE.2016.11.006>

Yu, H., Gong, H., Chen, B., Liu, K., & Gao, M. (2020). Analysis of the influence of groundwater on land subsidence in Beijing based on the geographical weighted regression (GWR) model. *Science of The Total Environment*, 738, 139405. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139405>