



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Investigating the subsidence phenomenon of the Karat Plain using the MODFLOW mathematical model and based on the development of GMS numerical package

Samira Bakhtiari¹, Houshang Khairy^{2*}, Mahin Eatemadifar³, Hojat Mirani Moghadam⁴, Reza Barati⁵

1. School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran.

2. School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran.

3. Department of geology, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

4. Khorasan Razavi Regional Water Authority, Mashhad, Iran.

5. Khorasan Razavi Regional Water Authority, Mashhad, Iran.

Article info

Article history

Received: 5 November 2024

Accepted: 16 December 2024

Keywords:

land subsidence; groundwater model; Karat plain aquifer; MODFLOW.



Abstract

This study investigates the subsidence of the Karat Plain aquifer using numerical modeling and satellite remote sensing techniques. A groundwater flow model was developed using MODFLOW to simulate the hydraulic behavior of the aquifer system. The model was calibrated against observed groundwater levels and subsidence rates derived from radar interferometry data. The calibrated model exhibited a good fit, with a Root Mean Square Error (RMSE) of approximately 80 cm. The minimum Root Mean Square Error (RMSE) values in the calibration mode were about 80 cm, which show that the accuracy of the model was adequate. Examining the modeling balance as well as the balance in the existing reports have a difference of less than 20%, which is an acceptable value in groundwater modeling. The results of the sensitivity analysis also show that the aquifer has the highest sensitivity to surface water recharge and hydraulic conductivity values, respectively. Subsequently, the subsidence of the aquifer was modeled by the subpackage in GMS, in which the simulation results were also controlled with satellite images to calculate the subsidence. The results obtained from the radar interferometry method from 2015 to 2019 indicate a subsidence zone with an area of 20 square kilometers with a maximum subsidence rate of 48 mm per year. The groundwater of the Karat Plain has been in a downward trend for 20 years and the aquifer level has dropped by about 35 meters from 1370 to 1390, an average of 175 cm per year. The modeling results showed that the southern parts of the watershed are the most prone to land subsidence. The largest number of agricultural wells are also observed in these places. Comparing the results of subsidence obtained from satellite images as well as numerical modeling showed that Interbed Package is capable of simulating land subsidence under the condition of basic aquifer data.

Introduction

In the last two decades, excessive population growth, limited surface water resources, and over-extraction from aquifers have severely impacted the quality and quantity of water resources in Khorasan Razavi province (Khairy and Sarfi, 2024). Groundwater consumption management has thus become a primary goal for experts. Declining groundwater levels can cause land subsidence, primarily due to excessive extraction. Various methods exist for groundwater management, with mathematical

models being cost-effective tools for studying groundwater. These models, such as MODFLOW, simulate the impact of management scenarios on aquifers, offering insights into current and future groundwater conditions (El Yaouti et al., 2008). Radar interferometry can validate these models by measuring annual subsidence rates. For example, the SBAS method estimated subsidence rates of Sicily Island's coast between 5-18 cm annually (Motagh et al., 2007). Numerical models and data-driven algorithms provide

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.102291>

*Corresponding author: Houshang Khairy; E-mail: h.khairy@du.ac.ir

How to cite this article: Bakhtiari, S., Khairy, H., Eatemadifar, M., Mirani Moghadam, H., Barati, R., 2024. Investigating the subsidence phenomenon of the Karat Plain using the MODFLOW mathematical model and based on the development of GMS numerical package. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(2), 376- 396. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.102291>



BY NC

robust and rapid predictions, with MODFLOW determining groundwater fluctuations' effects on subsidence. Despite their limitations, models like MODFLOW, which uses governing aquifer equations, are preferred for optimal groundwater management. These models assess long-term exploitation periods and provide valuable hydraulic data (drawdown rates, flow directions). In regions where the data accessibility is limited, models simulate and predict groundwater behavior, essential for managing aquifers in dry eastern regions.

Theoretical Foundations of the MODFLOW Model

The MODFLOW code, developed by the United States Geological Survey (USGS), is designed to simulate three-dimensional groundwater flow in porous media (Mcdonald and Harbaugh, 1988). This code simulates both steady-state and transient flow conditions using finite-difference methods. The governing equation for groundwater flow and the GMS software package, which acts as a pre- and post-processor for MODFLOW, will be examined. To derive the governing equations for groundwater flow, Darcy's Law (Hubbert, 1957) is extended to three dimensions, utilizing the continuity equation (expanded by Slichter, 1906), Jacob's equation (1996), Laplace's equation, and Dupuit-Forchheimer assumptions (for unconfined aquifers). Groundwater flow follows the fundamental hydrodynamic equation for porous media. Using Darcy's empirical formula (Equation 1) and the law of mass conservation (Equation 2), the flow equation in porous media is written and solved numerically using the finite-difference method in the MODFLOW model.

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1)$$

Where Q is the water flow rate, A is the cross-sectional area, h is hydraulic conductivity, and L is the distance between two cross-sections.

$$\left[\left[(Q\rho)_{x\Delta x} + (Q\rho)_{y\Delta y} + (Q\rho)_{z\Delta z} \right] - \left[(Q\rho)_x + (Q\rho)_y + (Q\rho)_z + R\Delta x\Delta y\Delta z \right] \right] \times \Delta t \dots \\ \dots + \left[(\alpha\rho)_{t\Delta t} + (\alpha\rho)_t \right] \Delta x\Delta y\Delta z = 0 \quad (2)$$

Where R is the aquifer recharge rate, ρ is the density, $\Delta x\Delta y\Delta z$ is the volume, α is the porosity, and Δt is the time interval.

The GMS interface for MODFLOW allows for grid creation using both cell-centered and block-centered approaches. Input data for MODFLOW are prepared by GMS and stored in files that are called upon by MODFLOW during its execution.

Implementation and Development of the Numerical Model

In this study, the Interbed Storage package (Harbaugh, 2005), linked with MODFLOW, is utilized to estimate and model land subsidence. This package can be used in various software like GMS to estimate subsidence. To simulate the groundwater level, the model is first constructed and calibrated in a steady-state condition. The model is then prepared, calibrated, and validated for transient conditions with a specified number of steps depending on the simulation type and objectives. The cell size for model grid creation depends on the aquifer area. Figure 2a illustrates that the aquifer has a cell size of 250 by 250 meters. In Figure 2b, the specifications of the grid for the aquifer are displayed, consisting of 124 rows and 100 columns, which results in a total of 5777 active cells.

Results and Discussion

Hydrogeology of the Kerat Aquifer

The groundwater level in the Karat aquifer has been monitored in 8 piezometer wells from 1993 to 2016. The water table has dropped by 38.5 meters due to decreased rainfall, reduced recharge, and over-extraction. A ten-year hydrograph indicates an average decline of 10 meters, with significant drops since 2006.

Groundwater Decline and Depth

The most significant decline in the aquifer occurs in the central region, which is affected by high extraction rates. In contrast, the eastern and southern areas are experiencing the least decline. The central region reaches a maximum depth of approximately 200 meters, while the eastern side has a depth ranging between 40 to 60 meters.

Groundwater Balance

The water balance, calculated by input-output analysis, indicates an annual rainfall of about 150 mm, contributing approximately 5.35 million cubic meters to the aquifer's recharge. The average annual water extraction is 57.5 million cubic meters, mainly for agricultural purposes, with a 25% return flow. Total inflow and outflow were estimated at 22.78 and 2.44 million cubic meters, respectively, showing a deficit of 15.55 million cubic meters annually.

Groundwater Modeling

A conceptual model of the Kerat aquifer was developed, incorporating input-output data, topography, and bedrock. The groundwater flow generally moves from northeast and northwest to the south. Recharge comes from input fronts, surface water, and rainfall, contributing 17-25% to the aquifer. The model was calibrated using the topography, exploratory wells, and hydraulic parameters. After calibration, the model was used to estimate land subsidence.

Simulation Results

The groundwater model was run in both steady-state and transient conditions. Observations from 2009 were used for initial calibration. Monthly water level changes were evaluated, with 24 time steps used for calibration. The findings indicated notable subsidence in both the eastern and western regions of the aquifer after two years.

Land Subsidence Modeling

The Interbed Storage package in MODFLOW was used to estimate subsidence. Calibration was enhanced using radar satellite images, which provide broader

surface displacement data compared to geodetic methods. Results indicated a maximum subsidence of 50 cm from 2006 to 2019, with the highest rates in the eastern part of the aquifer.

Conclusion

The Kerat Plain, located in southeast Khorasan Razavi province, faces significant geological challenges due to population growth and agricultural development. This study analyzed land subsidence using aquifer modeling and radar interferometry. Results show a 20 sq km subsidence area with a maximum rate of 48 mm per year from 2006 to 2010. Groundwater levels dropped by 35 meters over 20 years, averaging 175 cm annually. The subsidence, mainly in the eastern plain, is influenced by pumping rates, aquifer heterogeneity, and thickness variations. Groundwater flow follows the north-south slope, with levels between 754 and 854 meters. Hydraulic conductivity and recharge are highly sensitive factors. The study observed surface deformation, such as cracks in agricultural lands and well casing issues, aligning with high extraction areas. Continued groundwater extraction and subsidence modeling indicate significant risks to infrastructure if current trends continue.

References

- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D. and Kaufmann, O., 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research* 2(3), 192-209.
- Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (Vol. 6). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hubbert, M. K., 1957. Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids. *Hydrological Sciences Journal* 2(1), 23-59.
- Khairy, H., Sarfi, M., 2024. Land subsidence in Iran: an omnipresent geohazard. *Geology Today* 40(5), 187–196.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.

U.S. Geological Survey: Techniques of Water-Resources Investigation.

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzels, H.- U., Zschau, J., Arabi, S., 2007. land subsidence in Mashhad valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. Journal of Geophysical Research 112 (2), 518-526.

Slichter, C. S., 1906. The underflow in Arkansas valley in Western Kansas (No. 153). Govt. Print. Off.

CRediT authorship contribution statement

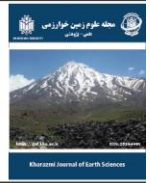
 Samira Bakhtiari	Software, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing - Original Draft
 Houshang Khairi	Conceptualization, Methodology, Validation, Supervision, Writing - Review & Editing, Project administration,
 Mahin Eatemadifar	Investigation, Formal analysis, Methodology, Conceptualization, Writing - Original Draft
 Hojat Mirani Moghadam	Data Curation, Supervision, Funding acquisition, Project administration
 Reza Barati	Data Curation, Supervision, Funding acquisition, Project administration



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

بررسی پدیده فرونشست دشت کرات با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW و بر مبنای توسعه بسته عددی GMS

سمیرا بختیاری^۱، هوشنگ خیری^{۲*}، مهین اعتمادی فر^۳، حجت میرانی مقدم^۴، رضا براتی^۵

۱. دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران.

۲. دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران.

۳. گروه زمین شناسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.

۴. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ایران.

۵. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ایران.

چکیده

در این مطالعه، فرونشست دشت کرات با استفاده از مدل‌سازی عددی به کمک نرم افزار GMS و کد MODFLOW شبیه سازی شده است. واسنجی مدل بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره ای راداری فرونشست آبخوان، در یک دوره هشت ساله انجام شده است. مقادیر خطای حداقل مربعات میانگین خطا (RMSE) در حالت واسنجی حدود ۸۰ سانتی متر بود که نشان دهنده دقت مناسب مدل است. بررسی بیلان مدل سازی و همچنین بیلان موجود در گزارشات موجود قبلی، نشان دهنده اختلاف کمتر از ۲۰ درصدی نتایج می باشد که در مدل سازی آب زیرزمینی مقدار قابل قبولی می باشد. نتایج آنالیز حساسیت نیز نشان می دهد آبخوان کرات بیشترین حساسیت را به ترتیب به تغذیه سطحی و مقادیر هدایت هیدرولیکی دارد. در ادامه توسط بسته Interbed در GMS فرونشست آبخوان مدل سازی گردید که در آن نتایج شبیه سازی همچنین با تصاویر ماهواره ای محاسبه فرونشست کنترل گردید. نتایج به دست آمده از روش تداخل سنجی راداری از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۸۹ نشان دهنده یک پهنه فرونشستی به مساحت ۲۰ کیلومتر مربع با بیشینه نرخ فرونشست ۴۸ میلی متر در سال می باشد. آب زیرزمینی دشت کرات در بازه ۲۰ ساله دارای روندی نزولی بوده و سطح آبخوان از سال ۱۳۷۰ تا سال ۱۳۹۰ حدوداً ۳۵ متر، به طور متوسط سالانه ۱۷۵ سانتی متر، افت نموده است. نتایج مدل سازی نشان داد که قسمت های جنوبی آبخوان بیشترین مکان هایی هست که مستعد فرونشست زمین است. در این مکان ها همچنین بیشترین تعداد چاه های کشاورزی نیز مشاهده می شود. مقایسه نتایج حاصل از فرونشست به دست آمده از تصاویر ماهواره ای و همچنین مدل سازی عددی نشان داد که بسته Interbed قادر به شبیه سازی فرونشست زمین به شرط وجود داده های اساسی آبخوان است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

واژه های کلیدی

فرونشست زمین، مدل

آب زیرزمینی، آبخوان

دشت کرات،

MODFLOW



مقدمه

افزایش بی رویه جمعیت در دو دهه اخیر، محدودیت منابع آب های سطحی و برداشت بیش از حد از آبخوان ها باعث وارد شدن خسارات قابل ملاحظه از نظر کیفی و کمی به منابع ارزشمند آب در اکثر مناطق ایران از جمله استان خراسان رضوی گردیده است. بنابراین مدیریت مصرف آب های زیرزمینی به عنوان یکی از اهداف اصلی کارشناسان آب زیرزمینی قرار گرفته است. افت تراز آب های زیرزمینی می تواند باعث

بروز آسیب های نظیر پدیده فرونشست در این مناطق شود. این پدیده تحت تأثیر عوامل مختلفی به وقوع می پیوندد که در میان آن ها استخراج بی رویه آب زیرزمینی از نقش مهم تری برخوردار است (Khairy and Sarfi, 2024). برای مدیریت و مطالعه آب زیرزمینی روش های مختلفی وجود دارد. مطالعات مستقیم صحرایی آب زیرزمینی در حوضه های بزرگ نیازمند حفر تعداد زیادی چاه و انجام آزمایش های پمپاژ دارد که این کار مستلزم هزینه های بسیار زیادی می باشد. تهیه

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.102291>*نویسنده مسئول: هوشنگ خیری h.khairy@du.ac.ir

استناد به این مقاله: بختیاری، س.، خیری، ه.، اعتمادی فر، م.، میرانی مقدم، ح.، براتی، ر. (۱۴۰۳). بررسی پدیده فرونشست دشت کرات با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW و بر مبنای توسعه بسته عددی GMS. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۲، صفحه ۳۷۶ تا ۳۹۶. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.102291>



مدل ریاضی یکی از مناسب ترین و با صرفه ترین ابزار جهت مطالعه آب های زیرزمینی می باشد (Khairy et al., 2013). با استفاده از مدل ریاضی می توان تاثیر سناریوهای مختلف مدیریتی را بر وضعیت آبخوان بررسی کرد. امروزه استفاده از مدل های ریاضی به منظور شبیه سازی آبخوان و شرایط حاکم بر آن به امری متداول در مبحث آب های زیرزمینی تبدیل شده است (Chitsazan et al., 2012).

مدل های ریاضی، بررسی تغییرات وضعیت موجود و آینده سفره های آب زیرزمینی را با در نظر گرفتن عوامل متعدد مؤثر در آن، امکان پذیر ساخته اند (Yaouti et al., 2008)، لذا با استفاده از آنها می توان با صرف کمترین هزینه و زمان، تنها با جمع آوری اطلاعاتی نظیر ورودی ها و خروجی های سیستم آب زیرزمینی وضعیت آبخوان را شبیه سازی کرد. این نوع مدل های شبیه ساز قادرند اثرات متقابل آب های سطحی و زیرزمینی را در دوره های کوتاه و بلند مدت ارائه دهند. به عنوان نمونه به یکی از مهم ترین این مدل ها می توان به MODFLOW اشاره کرد (Lachaal et al., 2012). همچنین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری می توان میزان فرونشست سالانه دشت را محاسبه و از آن به عنوان روشی برای صحت سنجی و اعتبار سنجی مدل استفاده کرد (Haghshenas Haghighi and motagh, 2024). به طور مثال در ایتالیا با استفاده از روش سری زمانی SBAS میزان فرونشست سالانه سواحل جزیره سیسیل را بین ۵ تا ۱۸ سانتی متر تخمین زدند (Motagh et al., 2007).

در مناطقی از ایران که به شدت به مصرف آب زیرزمینی وابسته هستند، مانند تهران (Haghshenas Haghighi and motagh, 2019)، دشت رفسنجان (Motagh et al., 2017) و شهر پرجمعیت مشهد (Motagh et al., 2007)، فرونشست زمین به دغدغه اساسی تبدیل شده است و نشانگر وجود بحران جدی است (Haghshenas Haghighi and motagh, 2024).

رنجبر و احتشامی (Ranjbar and Ehteshami, 2019) در پژوهشی بیان کردند در دشت تهران استخراج بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در سال های اخیر باعث نشست زمین در سطح وسیع شده

است. هدف از مطالعه آنها، استفاده از توانایی مدل عددی و الگوریتمهای داده محور برای پیش بینی قوی و سریع فرونشست زمین بوده است. به این ترتیب با استفاده از MODFLOW برای تعیین اثر نوسانات آب زیرزمینی بر میزان فرونشست دشت تهران استفاده شد. اما در مورد این مدل ها این نکته را همیشه باید مورد توجه داشت که از معادلات حاکم بر آبخوان استفاده نشده و صرفاً بر اساس ایجاد رابطه بین بار هیدرولیک و چند پارامتر از پارامترهای مؤثر بر آن به علت نقص داده تنظیم می گردند. لذا بر اساس دستورالعمل مدل سازی استفاده از مدلهایی مانند MODFLOW که معادلات حاکم بر آبخوان را به کار می برند از ارجحیت نسبی برخوردار است. بدین ترتیب استفاده از روش های عددی و مدل های ریاضی برای ارائه طرح های مدیریتی و استفاده بهینه از آب های زیرزمینی، حل مشکلات و مسائل مربوط به منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با آب های سطحی و پارامترهای هیدرولوژیک، همچنین شناخت ویژگی های سیستم هیدرولوژیک آبخوان ها و پیش بینی وضعیت آن ها متداول و به تدریج کامل تر گردید. مدل های آب زیرزمینی اغلب در ارزیابی منابع آبی جهت تعیین دوره طولانی مدت بهره برداری از آبخوان های ناحیه ای یا محلی به کار می روند. مدل جریان می تواند اطلاعات مفیدی از عوامل هیدرولیکی از قبیل نرخ افت جریان و جهت جریان ارائه دهد. علاوه بر آن شرایط زیرسطحی به آسانی قابل دسترس و قابل مشاهده نبوده و به همین جهت مدل ها به عنوان ابزاری کاربردی برای درک سیستم های آب زیرزمینی، شبیه سازی و پیش بینی رفتارشان درآمده اند. امروزه بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی و تجزیه و تحلیل آن با استفاده از مدل سازی و پیش بینی تأثیر توسعه بهره برداری از آبخوان، به ویژه برای مناطق شرقی کشور که از اقلیم نسبتاً خشکی برخوردار هستند به شدت احساس می شود.

در سال های اخیر، در تعداد کمی از مطالعات تلاش شده تا با روش اجرای مدل، شرایط آبخوان را شبیه سازی نموده و سپس از بسته interbed، برای نگاشت یا پیش بینی فرونشست در مقیاس یک دشت استفاده گردد، لذا در این پژوهش برای اولین بار در دشت کرات

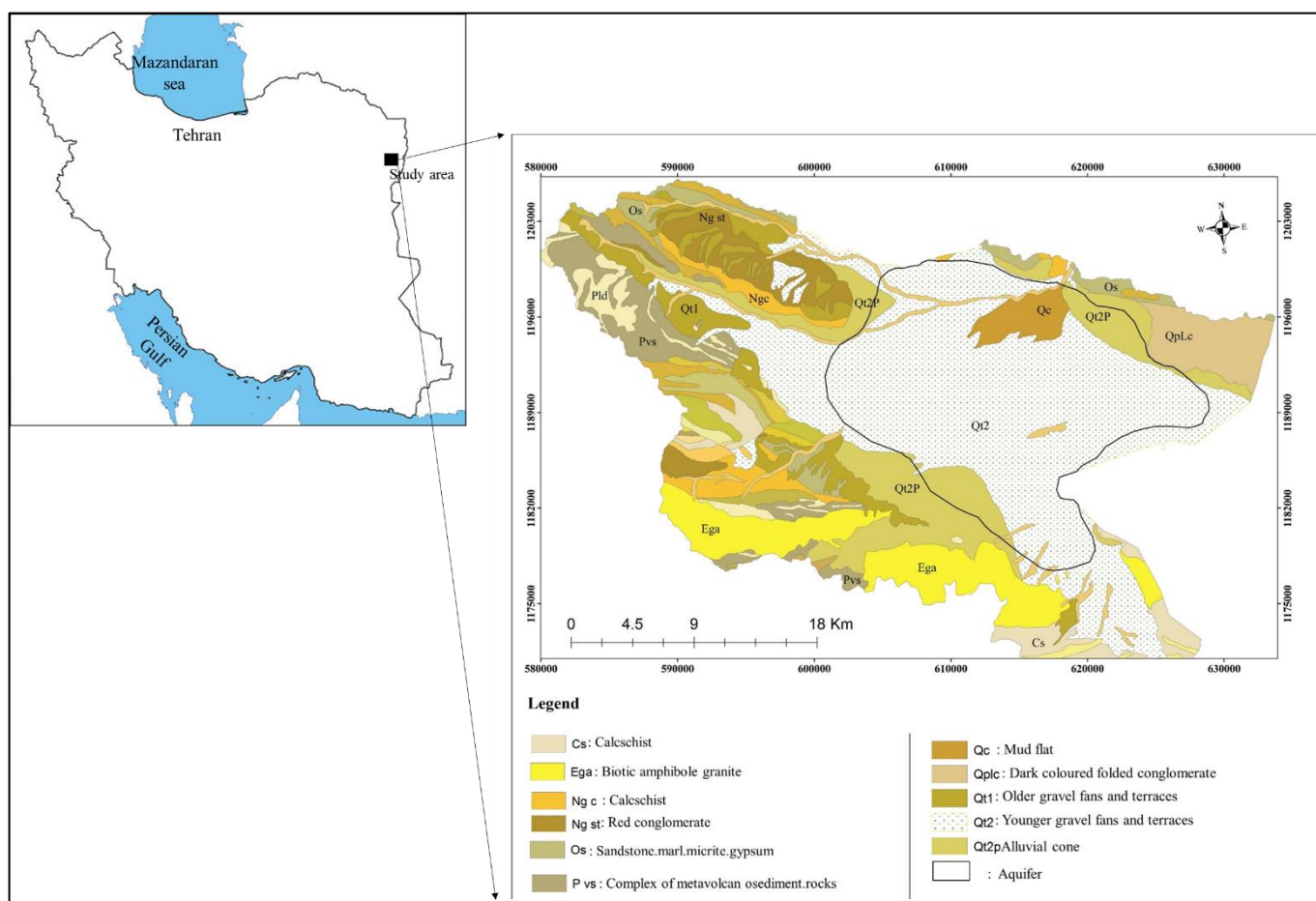
دشت‌های ممنوعه اعلام شده است. محدوده مطالعاتی کرات با وسعت ۱۰۶۸/۴۶ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱۰۸۰ متر از سطح دریا، در جنوب شرق حوضه قره‌قوم استان خراسان رضوی واقع شده و بخشی از شهرستان‌های خواف و کرات را شامل می‌شود. این محدوده در حد فاصل جغرافیایی ۲۰° ۶۰' تا ۵۵° ۵۵' طول شرقی و ۳۴° ۲۲' تا ۴۴° ۴۴' عرض شمالی واقع شده است. به طور کلی حدود ۵۵۸/۴۷ کیلومترمربع از مساحت محدوده را دشت و ۵۰۹/۹۹ کیلومترمربع را ارتفاعات در برمی‌گیرد (شکل ۱).

مطالعات به این روش انجام گرفته به نحوی که با اجرای مدل شرایط آبخوان شبیه سازی شده و سپس برای اندازه گیری فرونشست، از بسته Interbed درمدل استفاده گردید. از این روش بندرت در پژوهش‌های صورت گرفته در ایران و جهان استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت عمومی و جغرافیایی منطقه

دشت کرات یکی از دشت‌های واقع در استان خراسان رضوی می‌باشد که به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی جزء



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت کرات

Fig. 1. Geographical location of the Karat Plain.

کد MODFLOW توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده و به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به شکل سه‌بعدی و در محیط

مبانی تئوری مدل MODFLOW

از آنجایی که ورود داده‌ها در کد MODFLOW بسیار سخت است معمولاً از نرم افزار واسط برای ورود داده‌ها و آماده‌سازی مدل استفاده می‌گردد. در این پژوهش از سامانه مدل‌سازی آب‌زیرزمینی (GMS) برای آماده‌سازی مدل استفاده شده است. GMS قابلیت تهیه شبکه با هر دو روش مرکز شبکه‌ای و مرکز بلوکی را دارد. داده‌های ورودی برای MODFLOW توسط GMS تهیه و در فایل‌هایی ذخیره می‌شوند که این فایل‌ها توسط MODFLOW به هنگام راه‌اندازی از GMS فراخوانی می‌شوند. در پژوهش حاضر برای برآورد میزان نشست و مدل‌سازی آن از بسته ای به نام Interbed package (Harbaugh, 2005) استفاده شده است. این بسته با کد MODFLOW قابلیت لینک را در محیط GMS داشته و می‌توان از آن به‌منظور برآورد فرونشست استفاده کرد. به‌منظور شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی ابتدا مدل در حالت ماندگار ساخته و واسنجی می‌شود. در ادامه مدل با تعداد گام‌های مشخص برای حالت ناماندگار آماده و مورد واسنجی قرار می‌گیرد. در این حالت بسته به نوع شبیه‌سازی و هدف آن‌ها تعداد گام‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شود. اندازه سلول‌ها برای شبکه‌بندی مدل به مساحت آبخوان بستگی دارد. مطابق شکل ۲-ا، اندازه سلول‌های آبخوان 250×250 متر در نظر گرفته شده است. همچنین شکل ۲-ب، مشخصات سلول‌بندی آبخوان را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور تعداد ردیف‌ها و ستون‌های این سلول به ترتیب ۱۲۴ و ۱۰۰ می‌باشد که جمعاً شامل ۵۷۷۷ سلول فعال می‌شود.

متخلخل توسعه داده شده است (Mcdonald and Harbaugh, 1988). این کد، شبیه‌سازی به روش تفاضل محدود را پشتیبانی می‌کند و قابلیت تحلیل و آنالیز جریان پایدار و ناپایدار را دارد. در این کد به منظور استخراج معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی، از قانون داریسی و تعمیم آن به حالت سه‌بعدی، معادله پیوستگی معادله لاپلاس و فرضیات دوپویی- فورس‌هایمر (برای آبخوان‌های آزاد) استفاده شده است. جریان آب زیرزمینی از معادله اساسی هیدرودینامیک محیط‌های متخلخل پیروی می‌کند. در این قسمت با استفاده از فرمول تجربی داریسی (رابطه ۱) و قانون بقای ماده (رابطه ۲)، معادله جریان در محیط‌های متخلخل را نوشته و سپس حل عددی آن توسط روش تفاضل محدود در مدل MODFLOW ارائه می‌شود.

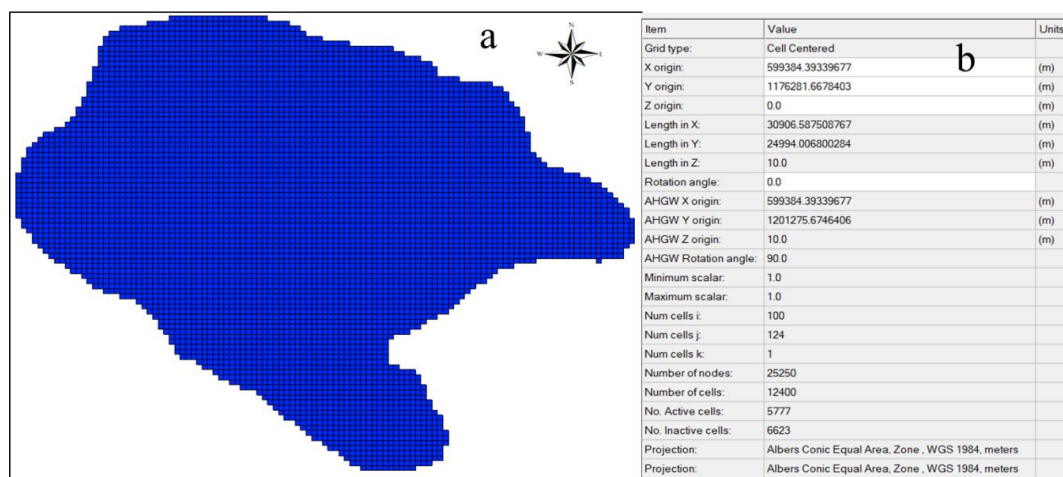
$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1)$$

که در آن Q مقدار جریان آب، A سطح مقطع جریان، h هدایت هیدرولیکی و L فاصله بین دو سطح مقطع ورودی و خروجی است.

$$\left[\left[(Q\rho)_{x\Delta x} + (Q\rho)_{y\Delta y} + (Q\rho)_{z\Delta z} \right] - \left[(Q\rho)_x + (Q\rho)_y + (Q\rho)_z + R\Delta x\Delta y\Delta z \right] \right] \times \Delta t \dots + \left[(\alpha\rho)_{t\Delta t} + (\alpha\rho)_t \right] \Delta x\Delta y\Delta z = 0 \quad (2)$$

که در این رابطه R مقدار تغذیه آبخوان، ρ چگالی، $\Delta x\Delta y\Delta z$ حجم، α تخلخل و Δt بازه زمانی می‌باشد.

اجرا و توسعه مدل عددی



شکل ۲- (a) سلول بندی آبخوان دشت کرات، (b) مشخصات سلول بندی دشت کرات

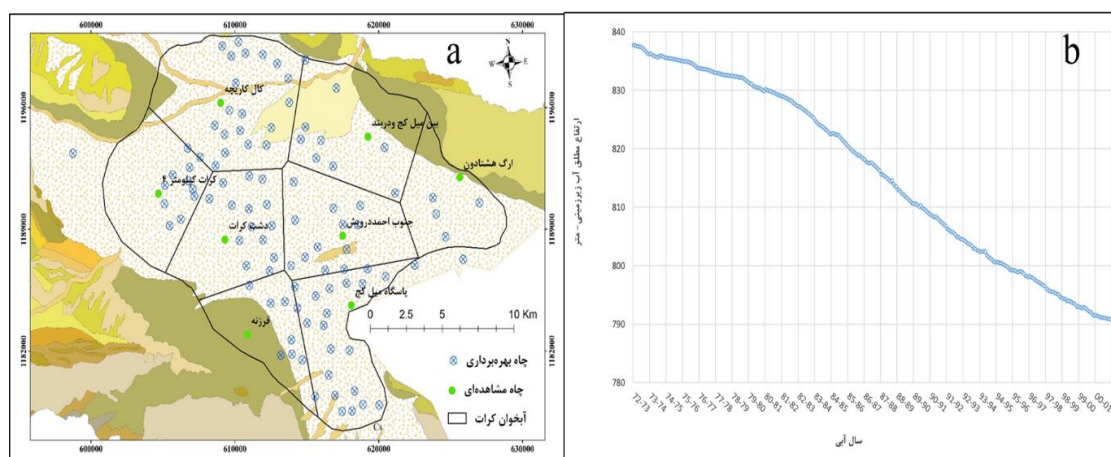
Fig. 2. a) Aquifer cell structure of the Karat Plain, b) Specifications of the cell structure in the Karat Plain.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در آبخوان کرات ۳۸/۵ متر افت داشته است. کاهش بارندگی، کاهش منابع تغذیه کننده آبخوان و خصوصاً بهره‌برداری بیش از حد، از دلایل اصلی کاهش سطح آب زیرزمینی می‌باشد. تراز آب زیرزمینی بر اساس هیدروگراف ده‌ساله آبخوان حدود ۱۰ متر افت داشته است که این مقدار معادل متوسط افت سالانه حدود ۱ متر می‌باشد (شکل ۳-ب). از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ هیدروگراف آبخوان دارای نوسانات بوده است اما از سال ۱۳۸۵ به بعد سیر نزولی هیدروگراف به گونه‌ای است که در پنج سال آخر در حدود ۱۱ متر تراز آب زیرزمینی افت کرده است.

نتایج و بحث

هیدروژئولوژی آبخوان

تراز آب زیرزمینی در آبخوان کرات از سال آبی ۱۳۷۲-۱۳۷۳ تا سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ در ۸ حلقه پیزومتر اندازه‌گیری شده است. بنابراین جهت تهیه هیدروگراف واحد آب زیرزمینی در محدوده آبخوان آبرفتی کرات از آمار و اطلاعات ۸ حلقه چاه پیزومتری استفاده گردید و چند ضلعی‌های تیسن شکل (۳-ا) برای آن‌ها تهیه گردید. نتایج

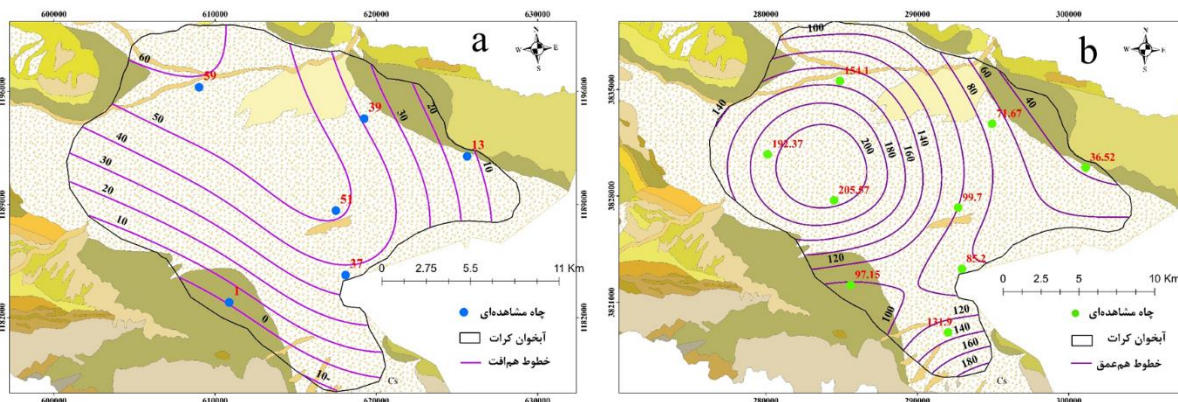


شکل ۳- (a) چند ضلعی‌های تیسن آبخوان کرات، (b) هیدروگراف معرف آبخوان کرات

Fig. 3. a) Thiessen polygons of the Karat aquifer, b) Hydrograph representative of the Karat aquifer.

افت و عمق سطح آب در آبخوان کرات

شکل ۴-ا، نقشه هم‌افت آب زیرزمینی دشت کرات را نشان می‌دهد که در آن خطوط هم‌افت بیانگر افت آب زیرزمینی تا ۶۰ متر در ناحیه‌های مختلف آبخوان هستند. بیشترین افت در ناحیه مرکزی آبخوان اتفاق افتاده است جایی که در آن چاه‌های بهره‌برداری موجب برداشت بیشتر از آبخوان شده است. همچنین در ناحیه شرقی و جنوبی



شکل ۴-ا) نقشه هم‌افت آب زیرزمینی دشت کرات. (ب) نقشه هم‌عمق آبخوان کرات

Fig. 4. a) Contour map of groundwater drawdown in the Karat Plain, b) Contour map of the depth of the Karat aquifer.

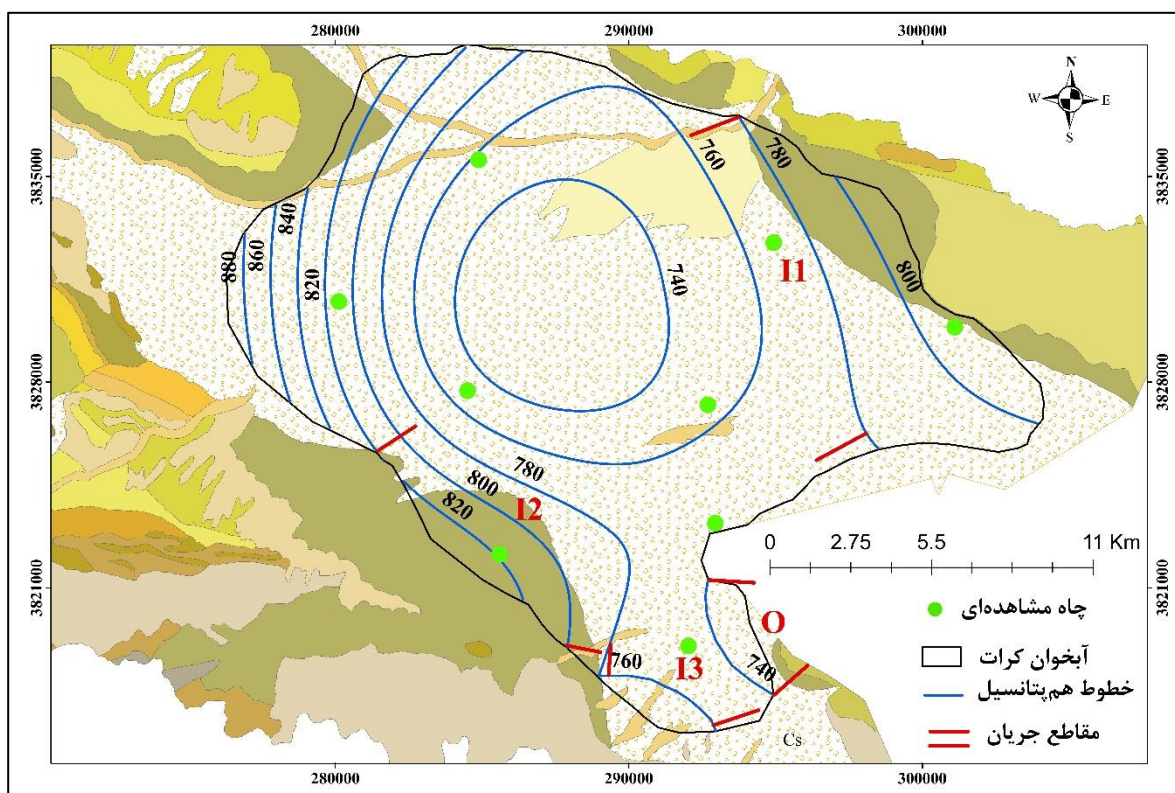
بیان آب زیرزمینی در آبخوان کرات

بیان آب زیرزمینی در آبخوان کرات بر اساس جمع جبری ورودی-ها و خروجی‌ها در آبخوان محاسبه شد. پارامترهای اصلی در بیان آبخوان کرات شامل تغذیه، برداشت آب از طریق چاه‌ها و قنات، ورودی زیرزمینی و خروجی زیرزمینی می‌باشد. بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی میزان بارش سالیانه در آبخوان کرات حدود ۱۵۰ میلی‌متر در سال می‌باشد که با توجه به مساحت ۳۵۷ کیلومتری آبخوان، حجم کل بارش در محدوده آبخوان ۵۳/۵۵ میلیون متر مکعب برآورد می‌گردد. بر اساس مطالعات انجام شده در نواحی خشک و نیمه‌خشک، تقریباً ۵ تا ۱۰ درصد بارندگی در سطح آبخوان، به سطح ایستابی می‌رسد. با این حساب، مقدار تغذیه سالیانه در آبخوان کرات حدود ۵/۳۵ میلیون متر مکعب تخمین زده می‌شود. علاوه بر این به طور متوسط

کمترین افت آب زیرزمینی مشاهده می‌گردد که در آن برخی ناحیه‌ها افتی کمتر از پنج متر را نیز تجربه می‌کنند. نقشه هم‌عمق آبخوان کرات نیز در شکل ۴-ب ترسیم شده است. بر اساس این نقشه، بیشترین عمق آبخوان در ناحیه مرکزی آبخوان مشاهده می‌گردد. عمق آب در این نواحی به حدود ۲۰۰ متر نیز می‌رسد. ناحیه‌های کناری آبخوان از عمق کمتری برخوردار هستند. عمق آب زیرزمینی در قسمت شرقی آبخوان در محدوده ۴۰ تا ۶۰ متر مشاهده می‌شود.

۵۷/۵ میلیون متر مکعب سالیانه از آبخوان برداشت انجام می‌شود که ۴/۲ میلیون متر مکعب آن مربوط به شرب و مابقی برای کشاورزی استفاده می‌شود. با فرض برگشت حدود ۲۵ درصدی آب کشاورزی و ۷۰ درصدی آب شرب به آبخوان، مجموع تغذیه ناشی از این مصارف حدود ۱۶/۲۶ میلیون متر مکعب در سال برآورد گردید. بر اساس نقشه‌ی هم‌پتانسیل ترسیم شده در شکل ۵ مجموع ورودی زیرزمینی و نیز خروجی زیرزمینی در آبخوان کرات به ترتیب ۲۲/۷۸ و ۲/۴۴ میلیون متر مکعب تخمین زده شد. اگر چه خطوط هم‌پتانسیل ترسیم شده در آبخوان ورودی بسیار بیشتری را به آبخوان نشان می‌دهند. این موضوع می‌تواند به دلیل افت ایجاد شده در مرکز آبخوان باشد که در نتیجه‌ی آن، جهت جریان به سمت مرکز آبخوان متمایل شده است. بر اساس محاسبات انجام شده در فوق، کسری سالیانه مخزن در آبخوان کرات

حدود ۱۵/۵۵ میلیون متر مکعب در سال برآورد می‌گردد. در جدول ۱ اجزای مختلف بیلان محاسبه شده است.



شکل ۵- مقاطع جریان ورودی و خروجی زیرزمینی در آبخوان کرات

Fig. 5. Cross-sections of groundwater inflow and outflow in the Karat aquifer.

جدول ۱- مولفه‌های ورودی و خروجی در آبخوان کرات

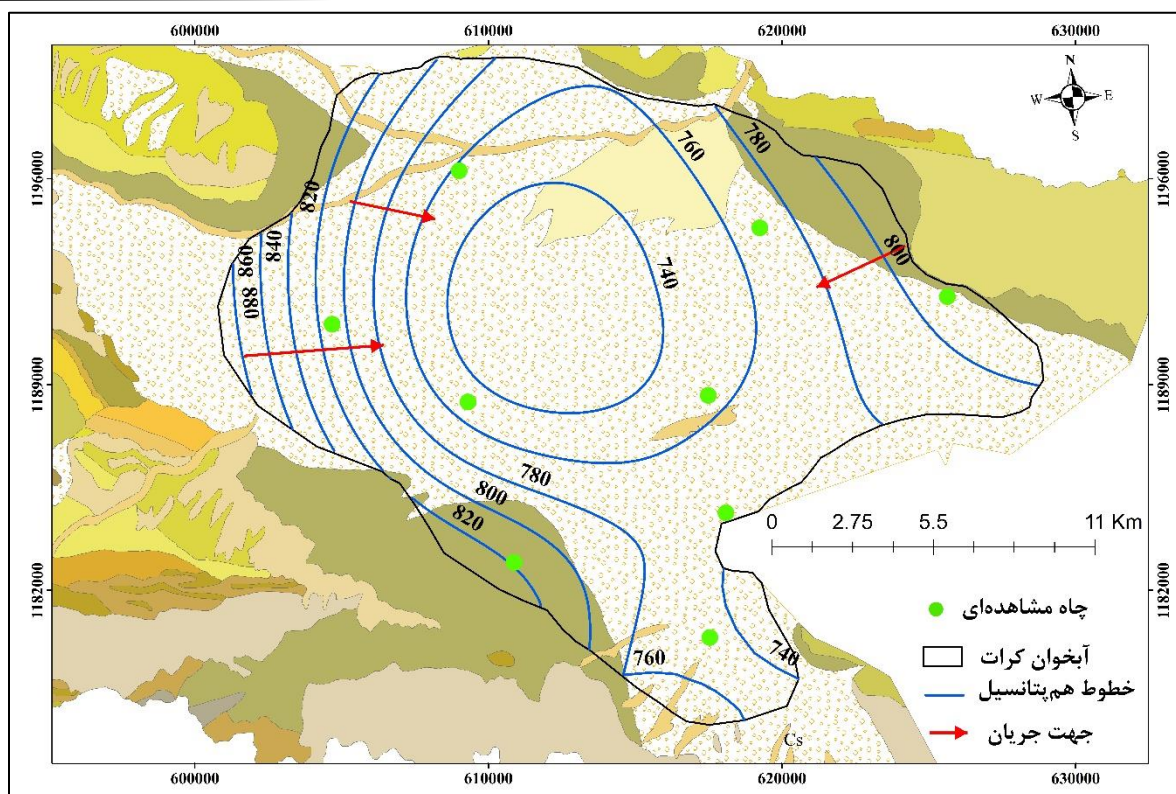
Table 1. Components of groundwater inflow and outflow in the Karat aquifer.

Water Balance Component	Recharge (million cubic meters per year)	Discharge (million cubic meters per year)
Groundwater Inflow to aquifer	22.78	
Recharge from precipitation	5.35	
Recharge from return Flow	16.26	
Groundwater outflow from aquifer		2.44
Withdrawal from aquifer		57.5
Evapotranspiration from water table		
Total sum	44.39	59.94
Changes in aquifer storage volume		-15.55

مدل سازی آب زیرزمینی

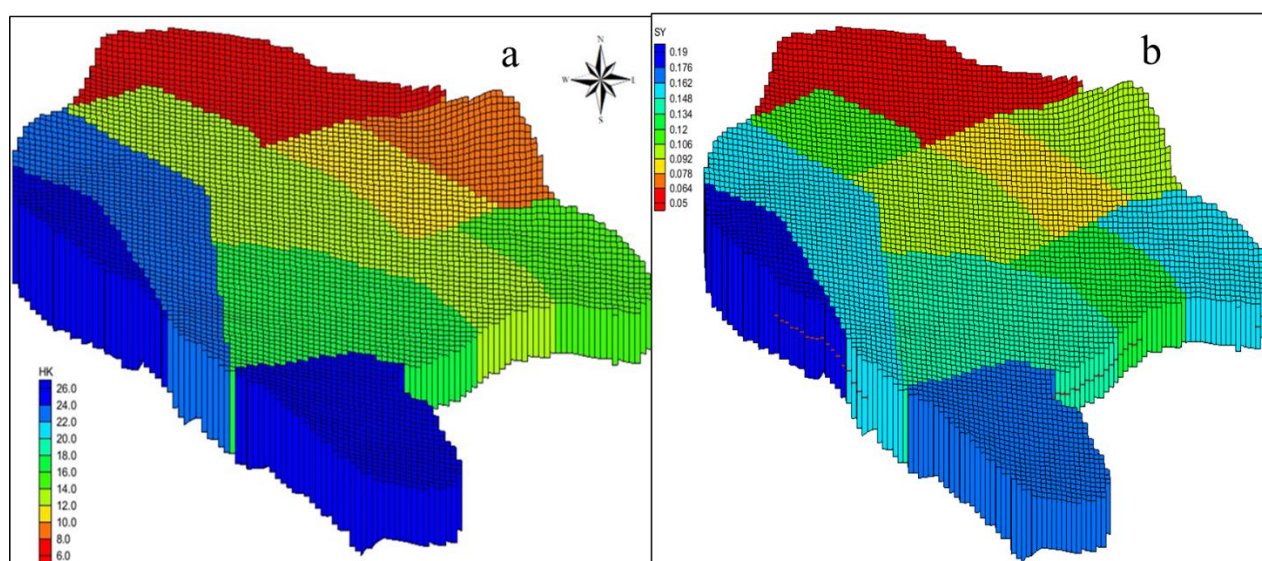
در این پژوهش برای شبیه سازی آب زیرزمینی ابتدا مدل مفهومی آبخوان کرات شامل مقادیر ورودی و خروجی آب زیرزمینی، توپوگرافی و سنگ بستر ساخته شد و تنش های تغذیه و تخلیه نیز به مدل اعمال گردید. با توجه به داده های موجود، شیب کلی جریان آب زیرزمینی از سمت شمال شرق و شمال غرب به سمت جنوب است که در نهایت از محدوده آبخوان خارج می شود. به این ترتیب مطابق شکل ۶ جبهه های ورودی آب زیرزمینی را می توان قسمت های شمال شرق و غرب آبخوان و محل تخلیه را قسمت جنوب آن در نظر گرفت. سایر مرزهای آبخوان نیز جزء مرزهای نفوذناپذیر می باشد. تراز آب زیرزمینی کرات نیز توسط ۸ چاه مشاهداتی با توزیع مکانی مناسب کنترل می گردد (شکل ۶). تغذیه آبخوان علاوه بر جبهه های ورودی و آب های برگشتی از منابع آب سطحی و بارندگی نیز انجام می شود. در واقع تغذیه بخش عمده آبخوان ها از طریق نفوذ از بارندگی انجام می شود. مقدار بارندگی در سطح آبخوان موجب تغذیه حدود ۱۷ تا ۲۵ درصدی آبخوان می شود که این مقدار محاسبه و در مدل اعمال گردید. با توجه به اطلاعات و گزارش بیلان آب زیرزمینی حدود ۵ میلیون مترمکعب حجم بارندگی در

محدوده مطالعاتی کرات موجب تغذیه آبخوان می گردد. تراز سطح بالای مخزن با توجه به اینکه آبخوان کرات از یک لایه آبدار آزاد تشکیل شده تراز سطح زمین (آبرفت منطقه) است و توپوگرافی سطح زمین به عنوان مرز فوقانی آبخوان برای مدل تعریف شده است. با استفاده از نقشه های ۱:۲۵۰۰۰ توپوگرافی دشت و بهره گیری از نرم افزارهای GIS متوسط ارتفاع در نقاط مختلف آبخوان استخراج و سپس درون یابی گردید و خطوط هم ارتفاع سطح زمین حاصل شد. مقادیر سنگ بستر آبخوان نیز از طریق اطلاعات چاه های اکتشافی، لاگ حفاری و عمق چاه های بهره برداری بدست آمد. در ابتدا از اطلاعات مذکور سنگ بستر اولیه ساخته شد، در ادامه نیز در محیط نرم افزاری GMS و با توجه به نتایج شبیه سازی مقادیر تخمینی آن اصلاح و سنگ بستر آبخوان نهایی گردید. علاوه بر این، ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان و آبدهی ویژه آبخوان به مدل اعمال شد. مقدار اولیه ضریب هدایت هیدرولیکی در شکل ۶-a برحسب متر در روز و مقدار آبدهی ویژه نیز بر اساس لاگ های حفاری موجود در دشت در شکل ۶-b نشان داده شده است. پس از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار و نیز صحت سنجی و آنالیز حساسیت آن، مدل جهت برآورد فرونشست در آبخوان کرات اجرا گردید.



شکل ۶- موقعیت جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان کرات

Fig. 6. Positions of groundwater inflow and outflow fronts in the Karat aquifer.



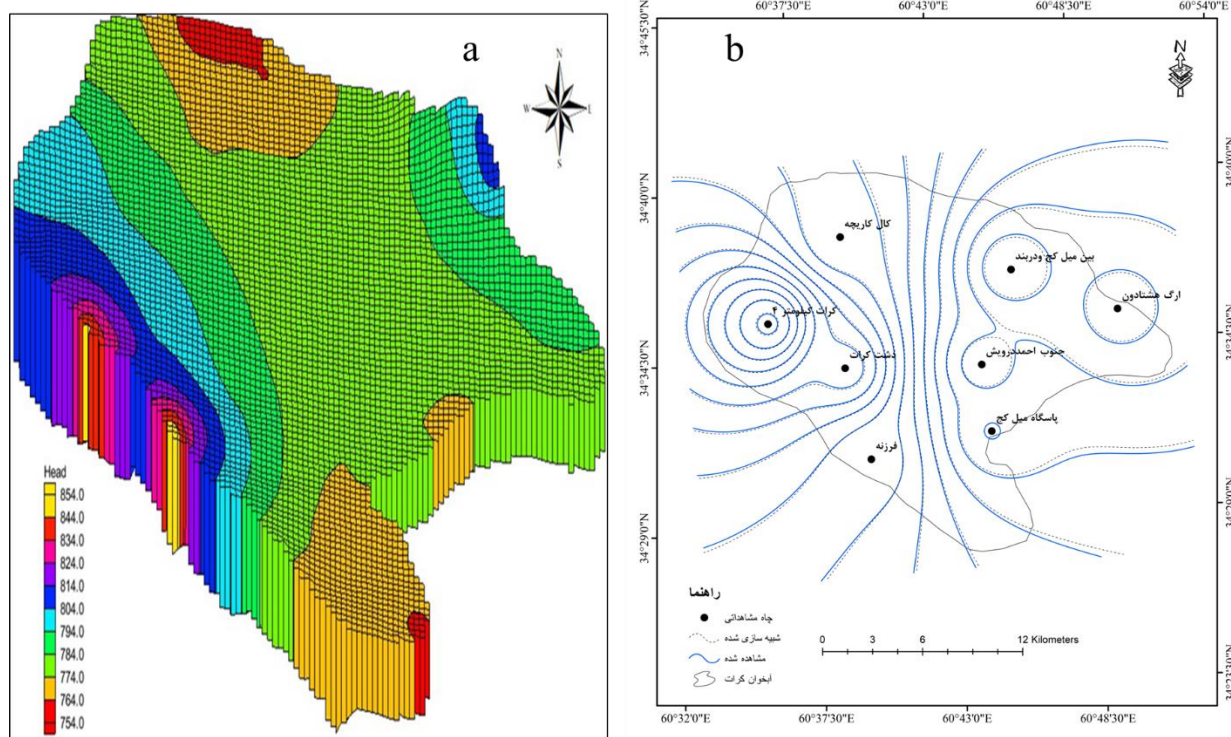
شکل ۷- (a) مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان (متر در روز)، (b) مقادیر آبدهی ویژه (%)

Fig. 7. a) Hydraulic conductivity values of the aquifer (meters per day), b) Specific yield values (%).

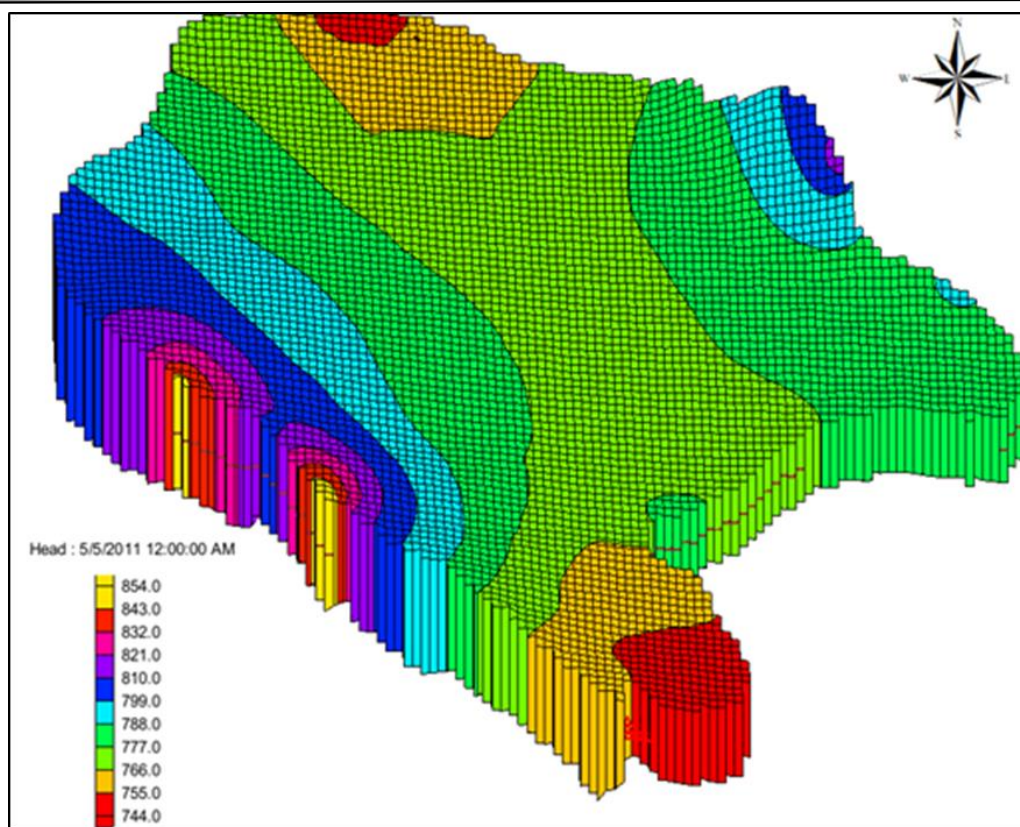
شده واقعی یک عارضه یا سیستم است، بنابراین نسبت به حالت واقعی خود دارای ساده سازی و همراه با اختلافاتی می باشد. در این حالت سعی شده است تغییرات ماهانه آبخوان در طول یک دوره مشخص مورد ارزیابی قرار گیرد. در نتیجه در حالت ناماندگار تغییرات تراز آب زیرزمینی نسبت به ماه های مختلف و تحت تأثیر عوامل مختلف متغیر خواهد بود. در این حالت گام های مختلفی جهت واسنجی مدل در نظر گرفته می شود که به آن گام های زمانی گفته می شود. در این تحقیق برای واسنجی مدل از ۲۴ گام زمانی ماهانه، از آبان سال ۸۹ استفاده شده است. بعد از اجرای مدل با استفاده از مقادیر جریان های زیرزمینی ورودی و خروجی تمام گام های مدل کالیبره شدند. تراز شبیه سازی شده در گام ۱۲ به عنوان نمونه در شکل ۹ آورده شده است.

نتایج شبیه سازی تراز آب زیرزمینی در حالت ماندگار و ناماندگار

به منظور تهیه تراز سطح آب در زمان صفر از آمار تراز سطح آب چاه های مشاهده ای در مهر سال ۱۳۸۹ استفاده شده است. شکل ۸- a تراز شبیه سازی شده در حالت ماندگار و شکل ۸- b منحنی های تراز آب محاسباتی و مشاهداتی را نشان می دهد. نوسانات سطح ایستابی آبخوان کرات توسط تعدادی نقاط کنترل (چاه های مشاهده ای) تعیین می شود. چاه های مشاهده ای آبخوان ۸ حلقه چاه هستند که در تمام محدوده آبخوان پراکنده شده اند. در حالت ناماندگار شرایط واقعی و طبیعی آبخوان ها در نظر گرفته می شود. از آنجایی که مدل حالت ساده



شکل ۸- a) تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در حالت ماندگار (متر)، b) منحنی های تراز آب محاسباتی و مشاهداتی (متر)
 Fig. 8. a) Simulated steady-state groundwater levels (in meters), b) Calculated and observed water level curves (in meters).



شکل ۹- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در حالت ناماندگار (متر)

Fig. 9. Simulated transient-state groundwater levels (in meters).

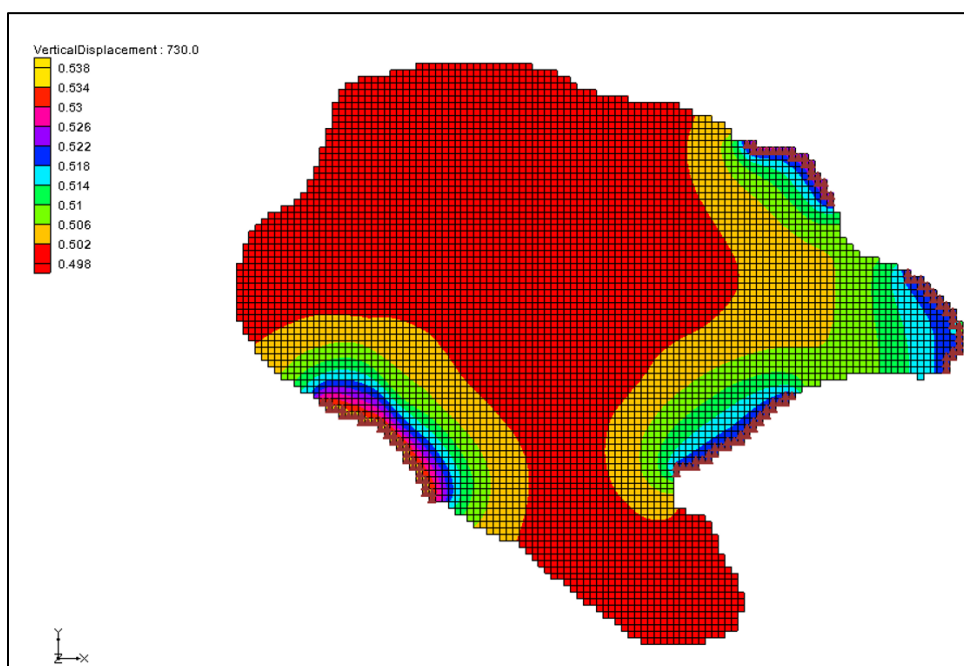
محدوده ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (Leake et al., 2010) معادل 0.02 الی 0.4 و ضریب الاستیک نیز معادل 0.02 در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به مقدار فرونشست زمین در این دشت نیز محدود به اندازه‌گیری مقدار نشست زمین در پیزومترهای دشت است. بعد از اجرای مدل برای محاسبه میزان فرونشست (با بسته Interbed) خروجی نقشه میزان فرونشست می‌باشد (شکل ۱۱) که واسنجی آن نیاز به یک معیار مناسب می‌باشد به این منظور از نتایج فرونشست محاسبه شده از پردازش تصاویر ماهواره ای برای این مهم استفاده شده است (شکل ۱۲).

برآورد فرونشست زمین با استفاده از مدل‌سازی

به منظور مدل‌سازی فرونشست در منطقه مورد مطالعه پس از آماده شدن مدل کمی دشت در شرایط پایدار و غیر پایدار از بسته Interbed به منظور وارد کردن اطلاعات مربوط به فرونشست دشت استفاده گردید. اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی فرونشست شامل ذخیره الاستیک، غیرالاستیک، تراکم اولیه و هد پیش تحکیمی می‌باشد که مطابق پنجره ارائه شده در شکل ۱۰ به مدل داده شده است. هد پیش تحکیمی معادل تراز اولیه آب زیرزمینی که توسط نرم افزار بصورت پیش فرض تنظیم شده، در نظر گرفته شده است. ضریب الاستیک مطابق با

شکل ۱۰- اطلاعات ورودی به بسته Interbed در مدل سازی فرونشست دشت کرات

Fig. 10. Input data for the Interbed package in the subsidence modeling of the Karat Plain.



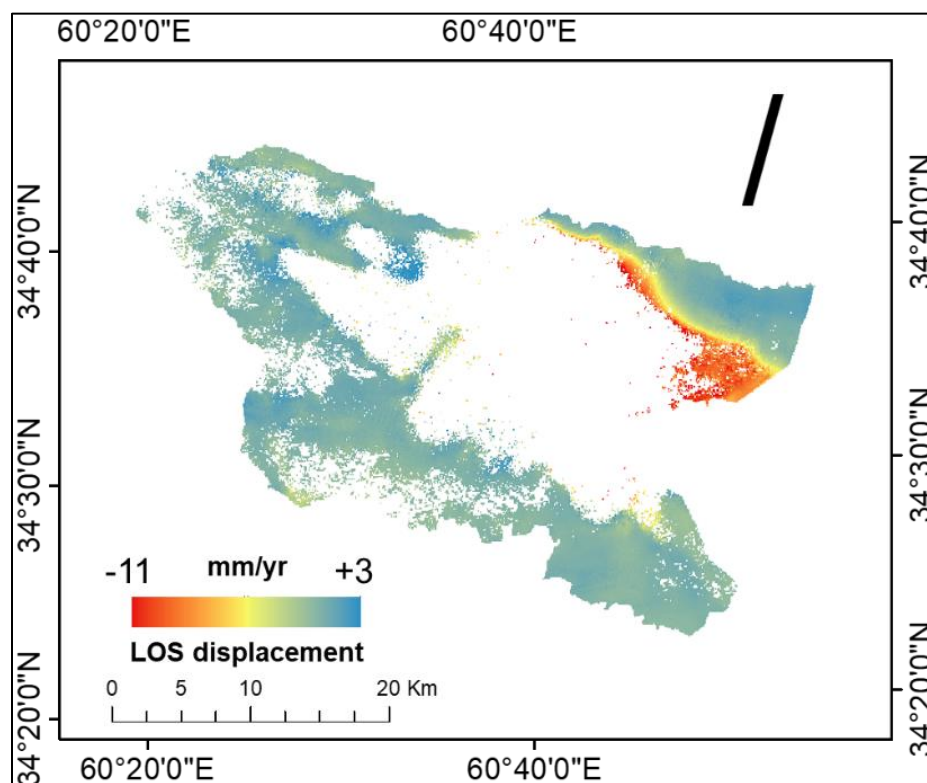
شکل ۱۱- ناحیه های فرونشست ایجاد شده و مقادیر آن از طریق مدل سازی آب زیرزمینی (متر)

Fig. 11. Subsidence areas generated and their amounts through groundwater modeling (in meters).

واسنجی مدل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری

عدم وجود اطلاعات کافی و دقیق از میزان فرونشست منطقه و نبود اطلاعات مناسب برای واسنجی مدل سازی فرونشست قطعاً نمی‌تواند دید صحیحی از رفتار آبخوان و میزان فرونشست در آینده به ما بدهد. به همین دلیل در این مطالعات از تصاویر ماهواره‌ای راداری برای واسنجی مدل فرونشست استفاده شده است. به این ترتیب که به جای استفاده از روش‌های ژئودتیکی اندازه‌گیری جابه‌جایی پوسته زمین، از قبیل مثلث‌بندی، سه پهلوی بندی، ترازبایی، VLBI و سامانه موقعیت‌یاب جهانی، که به نقشه‌برداری‌های مکرر زمینی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی پوسته زمین نیازمند است که البته در کشور ما به ندرت صورت گرفته

است از تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردد. در روش برآورد میزان فرونشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای که مبتنی بر شیوه تداخل-سنجی راداری است احتیاجی به نقشه‌برداری زمینی نخواهد بود. همچنین در مقایسه با فنون مبتنی بر اندازه‌گیری‌های زمینی که به صورت نقطه‌ای انجام می‌شوند، این روش تغییرات سطح زمین را نیز به صورت وسیع (سه بعدی) تحلیل می‌کند. نتایج بدست آمده از این بخش از مطالعات بصورت نقشه پهنه‌بندی فرونشست می‌باشد که در آن میزان فرونشست در بازه زمانی مورد نظر در هر یک از سلول‌های مدل برآورد شده است. شکل ۱۲ در حقیقت مقدار فرونشست بدست آمده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در طول دوره مدل‌سازی برای بازه سال ۱۳۸۵-۱۳۹۸ می‌باشد.



شکل ۱۲- مقادیر فرونشست دشت کرات حاصل از تصاویر ماهواره‌ای (1385-1398) ASAR

Fig. 12. Subsidence values of the Karat Plain derived from ASAR satellite images (2006-2019).

کل بازه زمانی مورد مطالعه بود (از سال ۱۳۸۵ الی ۱۳۹۸). این در حالی است که کمترین مقدار فرونشست نیز در مناطق حاشیه‌ای و

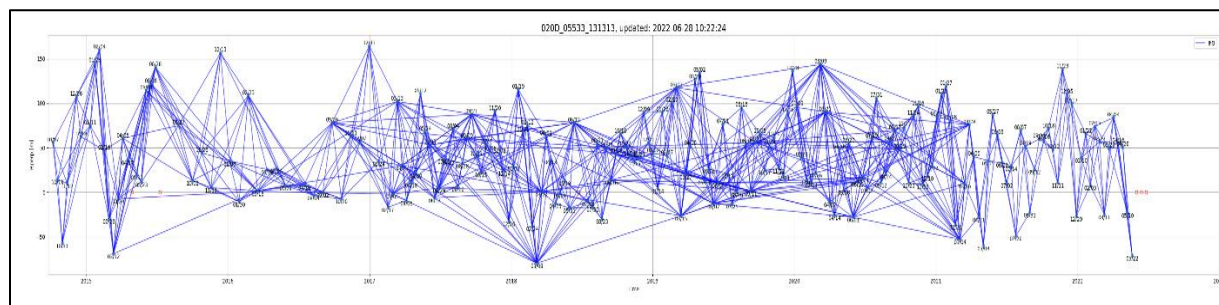
در مجموع بر اساس میزان فرونشست محاسبه شده از داده‌های ماهواره‌ای ASAR، حداکثر نشست منطقه در حدود ۵۰ سانتی‌متر در

برای انجام تجزیه و تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری با استفاده از محصولات راداری است (Morishita et al., 2020). در طرح پردازش LiCSBAS، تداخل نماها با بازیابی فاز به طور خودکار با بسته شدن لوپ شناسایی و حذف می شوند. سری زمانی و سرعت قابل اطمینان با کمک ماسک شدن با استفاده از چندین شاخص نویز به دست می آیند. برای کاهش تأثیر خطاهای بازیابی فاز در دشت کرات قبل از تحلیل سری زمانی، پیکسل هایی با همدوسی ۰/۰۶ ماسک شدند و سپس داده ها به طور خودکار با استفاده از SNAPHU بازیابی فاز می شوند (Chen et al., 2002). تداخل نماهای بازیابی فاز با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی توپوگرافی (SRTM DEM 30) نمونه برداری و ژئوکدگذاری شدند. سپس کل شبکه های تداخل سنجی بین تاریخ های اکتسابی با استفاده از روش حداقل مربعات معکوس می شوند (Morishita et al., 2020)، تا مقدار جابجایی هر پیکسل در دشت کرات برآورد شود. به طور کلی شبکه های به دست آمده از تصاویر Sentinel-1 به تعداد ۹۷۰ تداخل نما هستند (شکل ۱۳). شکل ۱۴ نقشه جابجایی در راستای خط دید ماهواره در مسیر پایین رو را نشان می دهد. حداکثر نرخ فرونشست در راستای دور شدن از ماهواره در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ به مقدار ۴۸ میلی متر در سال است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بیشترین پتانسیل فرونشست در شرق دشت کرات متمرکز شده است.

کوهپایه ای ثبت گردیده است که برابر با صفر است. در سطح منطقه مورد مطالعه مقدار فرونشست در چند چاه محدود پیژومتر مورد اندازه گیری قرار گرفته است. در این مرحله از مطالعات با توجه به در دسترس بودن میزان فرونشست برای هر نقطه در آبخوان، فرونشست اولیه که توسط مدل محاسبه شده بود مورد واسنجی قرار گرفت، به این صورت که مطابق آنچه در مورد واسنجی ضرایب آبخوان برای مدل سازی تراز آب زیرزمینی در مراحل قبلی انجام گرفت در اینجا در مورد فرونشست نیز صورت گرفت. پس از واسنجی خروجی نهایی مدل فرونشست به صورت (شکل ۱۱) بدست آمد. مطابق شکل مذکور بیشترین فرونشست زمین پس از دو سال از شروع مدل سازی در ناحیه های شرق و غرب آبخوان بوده است و نتایج حاصله به میزان قابل قبولی با خروجی فرونشست محاسبه شده از روش پردازش تصاویر ماهواره ای مطابقت دارد.

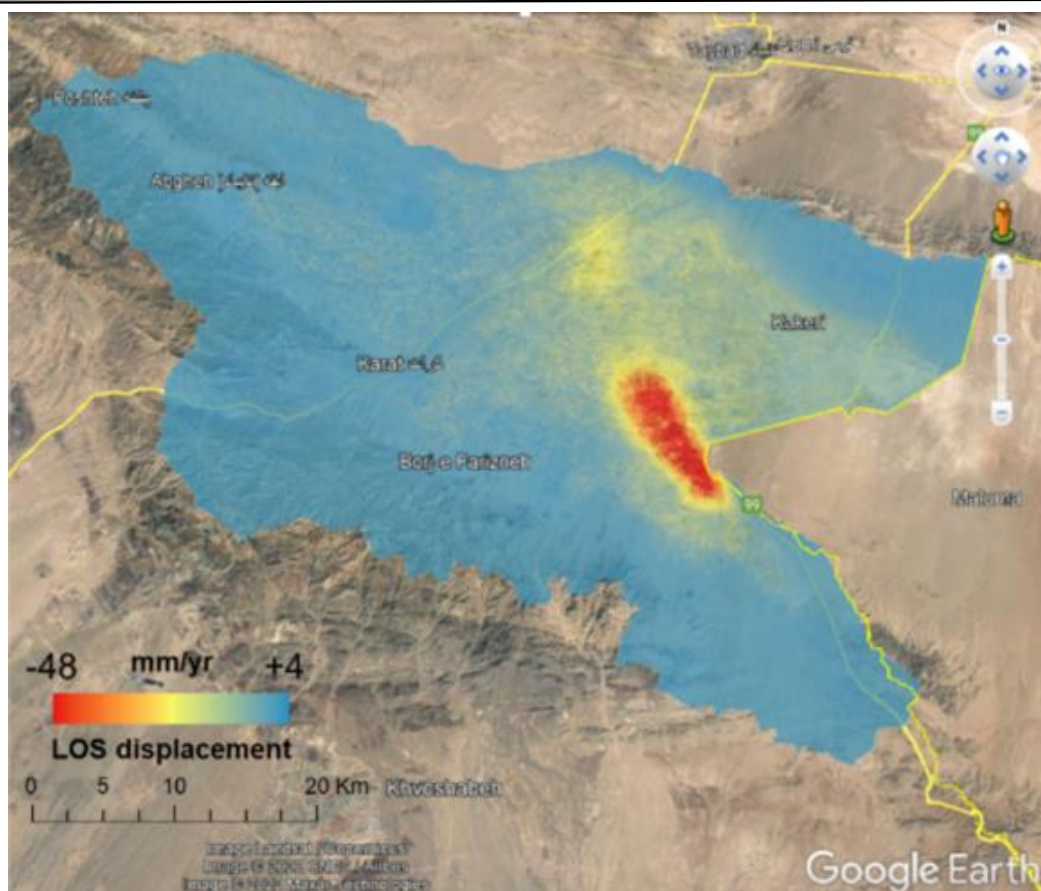
آنالیز سری زمانی و نقشه جابجایی

در این پژوهش، پردازشی از یک رویکرد NSBAS با طول پایه کوتاه اصلاح شده (Lopez-Quiroz et al., 2009) و (Doin et al., 2011) برای آنالیز سری زمانی استفاده شده است. برای این منظور از یک بسته نرم افزاری تحلیل سری تداخل سنجی منبع آزاد LiCSBAS استفاده شده است که با پردازنده خودکار Sentinel-1 InSAR (LiCSAR) ادغام می شود. LiCSBAS یک بسته منبع باز در پایتون



شکل ۱۳- پیکربندی شبکه تداخل نمای تصاویر استفاده شده در منطقه مورد مطالعه

Fig. 13. Configuration of the interferometric network of images used in the study area.



شکل ۱۴- مناطق مستعد فرونشست زمین در منطقه دشت کرات و در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲

Fig. 14. Susceptible subsidence areas in the Karat Plain during the period 2014 to 2022.

نتیجه گیری

۱۳۹۰ حدوداً ۳۵ متر به طور متوسط سالانه ۱۷۵ سانتی متر افت نموده است. با توجه به آبنمود دشت کرات نرخ افت در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ نسبت به ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۵۰ بیشتر بوده است. منطقه فرونشستی شرق دشت کرات از لایه‌های متناوب ماسه و رس تشکیل شده است که می‌تواند نشان‌دهنده این موضوع باشد که علاوه بر نرخ پمپاژ آب، ناهمگنی واحدهای سازنده آبخوان و تغییر ضخامت آن‌ها می‌تواند عوامل تأثیرگذار بر فرونشست زیاد این ناحیه باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مدل آبخوان جهت جریان در محدوده دشت کرات هم با شیب عمومی دشت از شمال به جنوب است. کمینه آب زیرزمینی دشت ۷۵۴ متر و بیشینه آن ۸۵۴ متر می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد هدایت هیدرولیکی و تغذیه حساسیت بالاتری نسبت به آبدهی وبژه

دشت کرات در جنوب شرق حوضه قره‌قوم استان خراسان رضوی واقع شده و یکی از مناطقی است که از لحاظ جمعیتی و کشاورزی همواره با رشد جمعیت و توسعه کشاورزی همراه است بنابراین از نظر بررسی مخاطرات زمین‌شناسی اهمیت ویژه‌ای دارد در این مطالعه فرونشست دشت کرات با دو روش مدل‌سازی آبخوان و تداخل‌سنجی راداری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۸۹ نشان‌دهنده یک پهنه فرونشستی به مساحت ۲۰ کیلومتر مربع با بیشینه نرخ فرونشست ۴۸ میلی متر در سال می‌باشد. آب زیرزمینی دشت کرات در بازه ۲۰ ساله دارای روندی نزولی بوده و سطح آبخوان از سال ۱۳۷۰ تا سال

همچنین مدل کمی کالیبره شده آبخوان جهت شبیه سازی فرونشست مورد استفاده قرار گرفته است. با مقایسه نتایج فرونشست مستخرجه از مدل سازی عددی و خروجی های پردازش تصاویر ماهواره ای کارایی مدل سازی عددی در محاسبه میزان فرونشست بررسی گردید. نتایج حاکی از کارایی مدل در محاسبه فرونشست بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده می توان چنین بیان کرد که در ناحیه های جنوبی آبخوان بیشتر در معرض فرونشست زمین قرار دارد. از این رو نیاز هست تا اقدامات عملی مناسبی اتخاذ گردد.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی انجام پذیرفته که بدینوسیله نویسندگان مقاله از آب منطقه ای خراسان و اعضای محترم گروه تحقیقات کاربردی آن شرکت صمیمانه تشکر می کنند.

References

- Chen, C.W., Zebker, H.A., 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* 40 (8), 1709–1719.
- Chitsazan, M., Heidari, M., Ghobadi, M. H., Torabi-Kaveh, M., Mohammadi-Behzad, H. R., Kavousi, A. R., 2012. The study of the hydrogeological setting of the Chamshir Dam site with special emphasis on the cause of water salinity in the Zohreh River downstream from the Chamshir Dam (southwest of Iran). *Environmental Earth Sciences* 67, 1605-1617.
- Cooper Jr, H.H., 1966. The equation of groundwater flow in fixed and deforming coordinates. *Journal of Geophysical Research* 71(20), 4785-4790.

دارند. دگر شکلی های سطح زمین در اثر برداشت آب زیرزمینی در ناحیه مطالعاتی به صورت ترک و شکاف در زمین های کشاورزی و لوله زایی در چاه های شرق دشت کرات مشاهده می شود. این عوارض به طور عمده بر مناطق با تراکم چاه های برداشت آب کشاورزی منطبق است. نتایج پژوهش حاضر نشان می دهد که میزان فرونشست به دست آمده از تصاویر راداری در حداکثر میزان خود در سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ در حدود ۴/۸ سانتی متر بوده که این میزان فرونشست بیشتر در نواحی شرق دشت اتفاق افتاده است. در ادامه کار با استفاده از مدل سازی آب زیرزمینی و مدل سازی فرونشست زمین (چنانچه وضع به همین منوال ادامه یابد) مخاطرات زیادی را برای تأسیسات موجود در آبخوان ایجاد خواهد نمود.

نتایج نشان داد که عملکرد کد MODFLOW در شبیه سازی کمیت آب زیرزمینی در هر دو حالت پایدار و ناپایدار مناسب بوده است و توانایی شبیه سازی تراز آب زیرزمینی در این آبخوان را دارد که همسو با بسیاری از تحقیقات مشابه در زمینه مدل سازی آب زیرزمینی می باشد.

- Doin, M.P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., 2011. Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In *Proceedings of the ESA Fringe 2011 workshop* (pp. 19–23).
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Kaufmann, O., 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research* 2 (3), 192-209.
- Haghighi, M.H., 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 Sensing of Environment* 221, 534-550.
- Haghshenas Haghighi, M., Motagh, M., 2024. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis

- of land subsidence in Iran. *Science Advances* 10 (19), p.eadk3039.DOI:10.1126/sciadv.adk3039.
- Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (Vol. 6). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hubbert, M. K., 1957. Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids. *Hydrological Sciences Journal* 2 (1), 23-59.
- Khairy, H., Janardhana, M.R., Etebari, B., 2013. Conceptualization of the hydrogeological system of southern Caspian coastal aquifer of Amol - Ghaemshahr plain, Mazandaran province, Iran. *International Journal of Earth Sciences and Engineering* 6 (5), 1222-1235.
- Khairy, H., Sarfi, M., 2024. Land subsidence in Iran: an omnipresent geohazard. *Geology Today* 40 (5), 187-196.
- Lachaal, F., Mlayah, A., Bédir, M., Tarhouni, J., Leduc, C., 2012. Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine-Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia). *Computers and Geosciences* 48, 187-198.
- Leake, S.A., Galloway, D.L., 2010. Use of the SUB-WT Package for MODFLOW to simulate aquifer-system compaction in Antelope Valley, California, USA. In *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development: Proceedings of the Eighth International Symposium on Land Subsidence: Queretaro, Mexico, International Association of Hydraulic Sciences* (pp. 61-67).
- López-Quiroz, P., Doin, M.P., Tupin, F., Briole, P., Nicolas, J.M., 2009. Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics* 69 (1), 1-15.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey: Techniques of Water-Resources Investigation.
- Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T. J., Weiss, J. R., Elliott, J. R., Hooper, A., 2020. LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor. *Remote Sensing* 12 (3), p.424.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzel, H.-U., Zschau, J., Arabi, S., 2007. Land subsidence in Mashhad valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International* 168 (2), 518-526.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghighi, M., Wetzel, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., Arabi, S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering geology* 218, 134-151.
- Ranjbar, A. Ehteshami, M., 2019. Development of an Uncertainty Based Model to Predict Land Subsidence Caused by Groundwater Extraction (Case Study: Tehran Basin). *Geotechnical and Geological Engineering* 37 (4), 3205-3219.
- Slichter, C. S., 1906. The underflow in Arkansas valley in Western Kansas (No. 153). Govt. Print. Off.