

Research Article**Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and analytical models**Gholamreza Rahmani^{1*}, Manouchehr Chitsazan¹, Hamidreza Ghafouri²

1- Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: Damaneh-Daran plain, Alluvial Aquifer, Land subsidence, numerical approach, Lohman formula**1- Introduction**

Land subsidence is the downward displacement of the earth's surface due to stress changes in the soil (Adiyaman, 2012). This phenomenon is affected by several factors, the most important and most common of which is over-extraction of groundwater from alluvial aquifers on the one hand and the reduction of aquifer recharging as a result of climate change and drought. In recent years, several studies have been conducted on the assessment of subsidence in alluvial aquifers, including the Rafsanjan plain in Kerman Province (Solaimani and Mortazavi, 2008) and the Mashhad plain in Khorasan Razavi Province (Lashkaripour et al., 2014). According to the study conducted on the Tehran plain's subsidence, the subsidence rate is 36 cm per year, which includes about 530 square kilometers of plain area (Mahmoudpour et al., 2016).

In recent years, the alluvial aquifer of Damaneh-Daran plain, one of the sub-basins of Gavkhoni wetland, faces several problems, including subsidence. The problem of land subsidence in Damaneh city in the middle part of this plain has become very prominent and has caused numerous seams and cracks in residential houses. Therefore, the subsidence rate in the whole aquifer is measured, and then by modelling the aquifer and obtaining the aquifer's hydraulic parameters, the relationship between the drop in the aquifer water level and the subsidence rate is analyzed. Therefore, in this paper, the subsidence rate in the whole aquifer is measured, and then by modelling the aquifer and obtaining the aquifer's hydraulic parameters, the relationship between the drop in the aquifer water level and the subsidence rate is analyzed. Damaneh-Daran plain is located in the west of Isfahan province and in the catchment area of Gavkhooni swamp and Zayandehrood tributaries. This area is located about 140 to 180 km west of Isfahan.

2- Materials and methods**2-1- Interferometry synthetic aperture radar**

The term interference is derived from the word interference, meaning two waves' interference on the earth's surface. In the Interferometry synthetic aperture radar (InSAR) technique, a series of images are used from one side of the radar mounted on the satellite to estimate the earth's surface's vertical displacements. In this study, radar data from SLC type with Sentinel.1 imaging system have been used to use the radar interferometer method in preparing the amount and trend of subsidence of the Damaneh Daran plain aquifer. Radar image processing is also done in the Snap software environment.

2-2- Finite difference modeling

Before starting to build the model, the model's objectives must first be identified so that the necessary data for the code of choice for numerical modelling of the study area is the MODFLOW program. MODFLOW is a three-dimensional finite-difference groundwater flow model developed by the United States Geological Survey (USGS)

* Corresponding author: gholamreza90@yahoo.com

DOI: 10.22055/AAG.2021.36217.2190

Received 2020-12-29

Accepted 2021-03-14

(McDonald and Harbaugh, 1988). The software used in this project is the GMS10 Groundwater Modeling System.

2-3- Analysis of the relationship between groundwater level drop and subsidence in the aquifer with analytical model

Subsidence is affected by several factors, the most important and most common: the over-extraction of groundwater from alluvial aquifers. For this purpose, due to the lithological diversity of alluvium and its layering sequence, part of the region's unconfined aquifer, which acts like a confined aquifer due to the impermeable clay layer and has subsided according to radar images, has been considered separately. Then, with the help of Lohman (1972) relation, first, the compaction parameter in the studied aquifer is estimated and then with the help of the model results in obtaining the optimal values of hydraulic conductivity and aquifer storage coefficient, logs of existing wells and water level changes in the section. The aquifer's selection, the amount of subsidence in a certain period during the management scenarios were obtained and compared with the results of radar images and the region's reality.

$$\Delta b = \gamma_w \cdot h \cdot (S / \gamma_w - n \beta_w) \quad \text{eq. 1}$$

In this formula, b is the rate of subsidence (meter), p is the groundwater level fluctuations in the aquifer (meter), S is the aquifer storage coefficient, γ_w : specific gravity of water (Newtons per cubic meter), n is decimal porosity, b is the thickness of the aquifer (Meters) and β_w : water compressibility coefficient (square meters per Newton).

3- Results and discussion

3-1- Determining the rate of subsidence in the aquifer

This study's first step is to determine the subsidence rate at the alluvial aquifer level in the domain range studies - a 6 - month selection period from January to June 2017 estimated aquifer subsidence.

The results show that subsidence has affected most of the aquifer's southeastern part and around the city of Damneh and has occurred at a maximum of 6.38 cm. These results are consistent with the area's natural conditions, which appeared as fractures and cracks in residential areas and well piping.

3-2- Quantitative analysis of aquifers with the help of modeling

The purpose of modelling in the first place is to determine the hydraulic parameters of the aquifer and then use the above parameters to manage problems such as subsidence that has affected the aquifer in recent years. Thus, first, the data required to prepare the aquifer's concept were prepared with ArcGIS10 software and Microsoft Excel, and to prepare each general framework of the aquifer and the layers related to its balance factors. According to the aquifer's hydrogeological conditions and the available data, the monthly time step and the network with 107 by 194 cells with dimensions of 200 meters have been considered.

To prepare the steady-state model, October 1994 was selected, and during the water year 2015-2016, the model was prepared and calibrated in the unstable state. Therefore, first, the conceptual model of preparation has been transformed into a numerical model, and by implementing it under initial conditions in a stable state, optimal values of hydraulic conductivity at the aquifer level have been obtained. In order to achieve these values and to achieve the minimum model error during the calibration stage, the available hydraulic guidance information from some parts of the aquifer and also according to the type of alluvial components, the pilot point method is used and by changing the input values of hydraulic conductivity at the surface Aquifer in several stages of implementation. After reaching the minimum possible error, the spatial map of optimal hydraulic conductivity values in the aquifer has been obtained. The boundaries of the alluvial aquifer have also been checked.

Therefore, at this stage, the conceptual model parameters have been introduced and calibrated to the model in the unstable period's time steps. For unstable state and obtaining optimal values of specific discharge, the aquifer zoning method is used, and by changing it at each stage of the model, this work has continued until the minimum error is reached. The next step in modelling is to validate the calibrated model. Thus, the model has been run,

introducing new groundwater level of 2016-2017 and 2017-17. Then, the model's calculated groundwater levels in each of the piezometers have been compared with the actual values.

3-3- Relationship between subsidence rate in aquifer and groundwater level changes

In order to analyze the drop-in groundwater level in alluvial aquifers and by applying Equation 1 in the GIS environment, the following steps have been performed:

A) By examining the logos of 119 exploitation wells and preparing the geological section of the southeastern part of the aquifer, which has a great variety of lithology and acts as a pressure aquifer, it has been considered a separate section.

B) At this stage, according to the amount of pressure bar changes in the aquifer during the period of six months from January 2017 to June 2017, the subsidence rate in the aquifer was determined by radar interferometer method and by applying Equation 1 in Arc Map environment and using tools Raster Calculator. The value of the aquifer storage coefficient is calculated as the only unknown of the mentioned relation. The results show an almost constant value of 0.00007 for the entire southeastern area of the aquifer. In this formula, the compressibility coefficient is equal to $4.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{N}$, and the specific density is $9810 \text{ N} / \text{m}^3$, the visa porosity is equal to 8%, and the average aquifer thickness is equal to 50 meters.

C) In the last step, according to the groundwater level change map obtained from the previous step and the storage coefficient obtained from step (B) and by applying Equation 1 in the Arc Map environment and using the Raster Calculator tool, the subsidence rate in the southeastern part of the aquifer under each condition The scenario is calculated.

4- Conclusions

This study aimed to determine the subsidence rate in an alluvial aquifer and the effect of groundwater level fluctuations on the aquifer. Aquifer subsidence was estimated during the selected 6-month period from January to June 2017. The results confirm that subsidence mostly has affected the aquifer's southeastern part around the Damaneh city and has occurred at a maximum rate of 6.38 cm. These results are consistent with the area's natural conditions, which appeared as seams and gaps in residential areas and well piping. During the water year 2015-2016, the aquifer model was prepared and calibrated using the finite differences method and the MODFLOW program in the GMS software environment. The model has been validated in 1395 and 1397-97. The model results confirm the negative balance and the severe reservoir deficit of the alluvial plain of Damaneh-Daran plain, with a significant amount of 33.8 million cubic meters at the end of the unstable period.

Then, in the southeastern part of the aquifer, during the period of 6 months from January to June 2017, with the help of hydraulic conductivity and specific yield values, groundwater level changes and the amount of subsidence obtained by radar interference method, the aquifer storage coefficient is calculated and equal to 0.00007 Square meters per Newton.

Finally, by applying the management scenario in the aquifer's mathematical model and reducing the water withdrawal from the aquifer by 50%, changes in the groundwater level have been obtained. Then, in the same period of 6 months, the amount of subsidence in the aquifer's southeastern part has been obtained. The results show that with a 50% reduction in aquifer abstraction, the aquifer reservoir deficit decreases from 43.5 million cubic meters at the end of the two-year validation period to 31.1 million cubic meters, and on the other hand, the process of aquifer subsidence occurs. Therefore, considering the high use of plain groundwater resources in the agricultural sector, one of the essential solutions to control the current status of the aquifer, reduce the use of groundwater resources by correcting and modifying well extraction justifications and then closely monitoring the discharges and the optimal use of water in the agricultural sector by changing the cultivation pattern of the region and implementing new irrigation projects.

References

- Adiyaman, I. B., 2012. Land subsidence and earth fissure due to groundwater pumping, PhD thesis. University of Arizona.
- Lashkaripour, Gh. R., Ghafouri, M., Mosavi Maddah, M., 2014. An investigation on the mechanism of land subsidence in the northwest of Mashhad city, NE Iran. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)* 5(3), 321-327.

- Lohman, S.W., 1972. Ground water hydraulics. U.S. Geological Survey, 708p.
- Mahmoudpour, M., Khamehchiyan, 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.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. MODFLOW, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, U. S. Geological Survey, Open-File Report.
- Solaimani, K., Mortazavi, S. M., 2008. Investigation of the Land Subsidence and its Consequences of Large Groundwater Withdrawal in Rafsanjan, Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 11(2), 265-269.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Rahmani, G.H., Chitsazan, M., Ghafouri, H., 2022. Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and Analytical models. *Adv. Appl. Geol.* 12(2), 259-275.

DOI: 10.22055/AAG.2021.36217.2190

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16818.html?lang=en

تعیین ارتباط افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در آبخوان دشت دامنه - داران با ترکیب مدل‌های عددی و تحلیلی

غلامرضا رحمانی*

دانشجوی دکتری زمین‌شناسی آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

منوچهر چیت سازان

دکتری مدیریت منابع آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

حمیدرضا غفوری

دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز

*Gholamreza90@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

چکیده

فرونشست متاثر از عوامل متعددی است که از جمله مهم‌ترین و شایع‌ترین آن برداشت بیش از حد آب زیرزمینی از آبخوان‌های آبرفتی است. فرونشست در دشت دامنه - داران نیز همانند بسیاری از دشت‌های کشور اخیراً گسترش یافته است. آبخوان آبرفتی دشت، آزاد است اما بخش‌های آن به دلیل تنوع لیتولوژیکی تحت فشار عمل می‌کند و استعداد رخداد فرونشست را دارد. در این راستا ابتدا نرخ فرونشست در آبخوان به روش تداخل سنج راداری تعیین شد. نتایج نشان داد که تقریباً فرونشست در بیشتر بخش جنوب‌شرقی دشت گسترش یافته است و میزان آن حداکثر حدود ۶/۳۸ سانتی‌متر است. جهت ارتباط افت سطح آب در آبخوان با فرونشست زمین مدل آبخوان به روش تفاضلات محدود تهیه گردید که بیانگر کسری مخزن آبخوان آبرفتی به میزان ۳۳/۸ میلیون مترمکعب است. پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی ناشی از کاهش ۵۰ درصدی پمپاژ از آبخوان نسبت به پمپاژهای کنونی نشان داد که سطح آب پیش‌بینی شده همبستگی بیش از ۷۰ درصد را در بخش جنوب شرقی آبخوان که شرایط مشابه آبخوان تحت فشار دارد با فرونشست زمین نشان می‌دهد و بیانگر تاثیر قابل توجه آن در کاهش فرونشست در آبخوان است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای پیشنهادی جهت کنترل وضعیت موجود، کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی است که این امر مهم می‌تواند با اصلاح و تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری چاه‌ها به میزان حداقل ۵۰ درصد و سپس نظارت دقیق بر پمپاژها از طریق نصب کنتورهای هوشمند و استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی میسر گردد.

کلمات کلیدی: آبخوان، دشت دامنه - داران، فرونشست زمین، مدل عددی تفاضلات محدود، فرمول *Lohman*

مقدمه

آبرفتی اشاره کرد. فرونشست‌ها و پیامدهای ناخوشایند آن متأسفانه سرشتی بازگشت ناپذیر دارند و به سختی می‌توان آنها را کند یا مهار کرد. این پدیده متاثر از عوامل متعددی است که از جمله مهم‌ترین و شایع‌ترین آن برداشت بیش از حد آب زیرزمینی از آبخوان‌های آبرفتی از یک طرف و از طرف دیگر کاهش تغذیه آبخوان در نتیجه تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های متعدد است (Niekirk and Walt 2006; Galloway and Burbey, 2011; Martínez et al., 2013; Chaussard et al., 2014; Chen et al., 2015; Yin et al., 2016; Othman and Abotalib, 2020; Guzy and Malinowska, 2020).

دیگر عوامل موثر بر فرونشست مرتبط با خصوصیات هندسی، زمین‌شناسی و تکتونیک آبخوان آبرفتی و همچنین فعالیت‌های انسانی مانند توسعه بیش از حد کشاورزی در منطقه است. پژوهش‌های علمی

طبق تعاریف بین‌المللی، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست تدریجی رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی افقی اندک باشد. به عبارتی فرونشست زمین جابجایی رو به پایین سطح زمین به خاطر تغییرات استرس در خاک می‌باشد (Adiyaman, 2012).

این پدیده به عنوان یک مخاطره طبیعی، ممکن است به صورت طبیعی یا در اثر فعالیت بشر ایجاد شود و تعادل طبیعی را از بین ببرد؛ به همین لحاظ بررسی این پدیده از اهمیت خاصی برخوردار است. خسارات ناشی از فرونشست معمولاً ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب می‌باشند که از آن جمله می‌توان به تخریب سازه‌های مهندسی، سیستم‌های آبیاری، خاک‌های حاصل‌خیز کشاورزی و مرگ تدریجی آبخوان‌های

ارتباط بین افت در سطح ایستایی آبخوان با نرخ فرونشست در آن تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

روش تداخل سنج راداری

اصطلاح تداخل سنجی بر گرفته از واژه تداخل به معنی تداخل دو موج روی سطح زمین می‌باشد. در تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) Interferometry Synthetic Aperture Radar از تصاویر متوالی، از یک سمت دید راداری که بر روی ماهواره نصب شده، استفاده می‌شود تا جابجایی‌های قائم سطح زمین تخمین زده شود. یک سمت دید رادار ماهواره، سلسله پالس‌های میکروویو را از آنتن ارسال می‌کند. امواج منعکس شده از سطح زمین توسط همان آنتن دریافت می‌شود و تحت عنوان یک تصویر که به طور پیوسته در امتداد گذر ماهواره است، ثبت می‌گردد. برای هر چرخه تکرار مداری ماهواره مناطق مشابهی از زمین دوباره تصویربرداری می‌شوند. اینترفروگرام حاصل تفاضل فازی بین دو تصویر راداری با دقت بالا که از یک منطقه گرفته شده است، جهت تخمین جابجایی‌های قائم سطح زمین استفاده می‌شود (Galloway and Hoffmann, 2007).

در این مطالعه برای بکارگیری روش تداخل سنج راداری در تهیه میزان و روند فرونشست آبخوان دشت دامنه - داران از داده‌های راداری نوع SLC با سیستم تصویربرداری IW ماهواره Sentinel.1 استفاده شده است. قدرت مکانی این نوع داده‌ها، مشخصات فنی ماهواره و تصاویر راداری حاصل از آن جدول ۱ آورده شده است. پردازش تصاویر راداری نیز در محیط نرم افزار Snap انجام شده است.

جدول ۱- خصوصیات ماهواره Sentinel.1 و داده‌های راداری مورد استفاده.

Table 1. Characteristics of the Sentinel.1 satellite and the radar data used.

Operator	Imaging Band	Imaging Format	Spatial resolution
TAS-I	C-SAR	Interferometric Wide Swath Mode, 250 Km Swath	5m*20m

شود و مطابق با آن یک مدل مفهومی از آبخوان تهیه شود. ساخت مدل مفهومی مستلزم دستیابی به شناخت خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان می‌باشد.

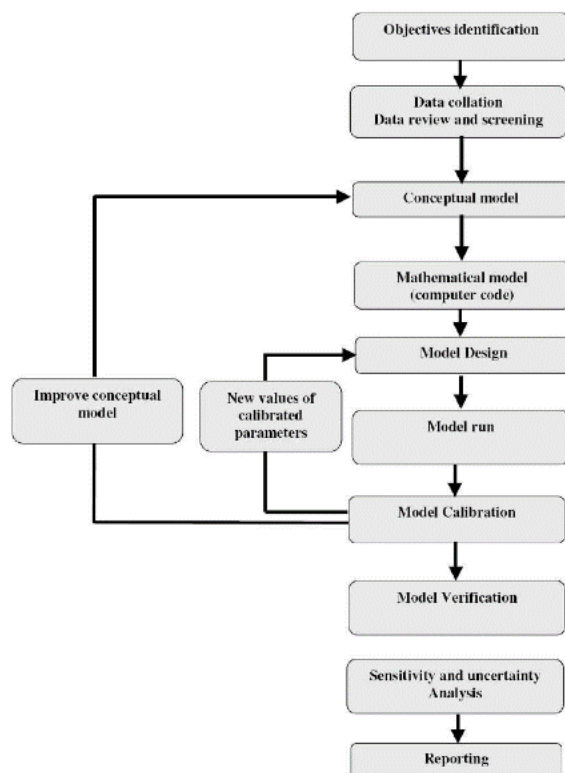
بعد از شناخت خصوصیات هیدروژئولوژیکی و تهیه مدل توصیفی، یک کد عددی باید انتخاب شود. کد انتخاب شده باید قادر به شبیه سازی شرایط طبیعی باشد. کد شامل برنامه کامپیوتری است که حاوی الگوریتمی برای حل معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی به صورت عددی می‌باشد. هم معادله حاکم بر جریان و هم برنامه کامپیوتری باید مورد تأیید قرار گیرند.

دوباره فرونشست زمین نخستین بار در سال ۱۷۲۵ در بلژیک انجام شد (Handbook, 1975). ایالات آریزونا و کالیفرنیا در آمریکا، توکیو و اوساگا ژاپن، بانکوک در تایلند، جاکارتا در اندونزی، هانوی در ویتنام و مکزیکو در مکزیک از جمله مناطق مهم دنیا هستند که با پدیده فرونشست زمین مواجه‌اند (Fredlund and Trinh, 2000). تفسیر پیشرفته فرونشست در شمال یونان توسط روش تداخل سنج راداری انجام شده است (Raspini et al., 2013). در مناطقی از ایران نیز پدیده فرونشست زمین در درجات مختلف در حال بروز است. گروه بلاای طبیعی و مدیریت بحران پایگاه ملی داده‌های علوم زمین در سال ۱۳۸۵، بانک اطلاعات فرونشست زمین در ایران را تهیه کرد. طی سال‌های اخیر نیز مطالعات متعددی در مورد ارزیابی فرونشست در آبخوان‌های آبرفتی انجام شده که از جمله می‌توان به دشت رفسنجان در استان کرمان (Solaimani and Mortazavi, 2008) و دشت مشهد در استان خراسان رضوی (Lashkaripour et al., 2014) اشاره کرد. طبق بررسی که بر روی فرونشست دشت تهران انجام شده، نرخ فرونشست ۳۶ سانتی‌متر در سال تعیین شده که حدود ۵۳۰ کیلومتر مربع از مساحت دشت را شامل می‌شود (Mahmoudpour et al., 2016).

طی سال‌های اخیر آبخوان آبرفتی دشت دامنه - داران که از جزء زیر حوضه‌های تالاب گاوخونی است با معضلات متعددی از جمله فرونشست مواجه است. مشکل فرونشست زمین در محدوده شهر دامنه در بخش میانی این دشت بشدت نمایان شده و موجب ایجاد درز و شکاف‌های متعددی در منازل مسکونی گردیده است. لذا در این مقاله ابتدا نرخ فرونشست در کل آبخوان مورد سنجش قرار گرفته و سپس با مدل سازی آبخوان و بدست آوردن پارامترهای هیدرولیکی آبخوان،

روش مدل سازی تفاضلات محدود

به طور کلی در اجرای یک مدل مراحل مختلفی باید انجام شود تا نتایج به دست آمده دقیق و قابل اطمینان باشد. این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است. یک مدل آب زیرزمینی می‌تواند برای فهم مکانیسم‌های مؤثر بر جریان آب زیرزمینی، انتقال محلول، پیش‌بینی حساسیت آب زیرزمینی نسبت به تنش‌های متحمل، پیش‌بینی آینده، شناخت مسیر حرکت، تخمین زمان آلودگی، ارزیابی خطرات محیطی و به کار رود. بنابراین قبل از شروع ساخت مدل ابتدا باید اهداف مدل مشخص شود تا داده‌های لازم برای هدف، مشخص شده و جمع‌آوری



شکل ۱- مراحل مدل سازی (Baalousha, 2015).

Fig. 1. Steps of modeling (Baalousha, 2015).

بررسی رابطه بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست در آبخوان به کمک مدل تحلیلی

فرونشست متاثر از عوامل متعددی است که از جمله مهمترین و شایع ترین آن برداشت بیش از حد آب زیرزمینی از آبخوان های آبرفتی است. بدین منظور با توجه تنوع لیتولوژیکی آبرفت و توالی لایه بندی آن بخشی از آبخوان آزاد منطقه که به سبب وجود لایه نفوذ ناپذیر رسی شبیه آبخوان تحت فشار عمل می کند و از طرفی طبق بررسی تصاویر راداری دچار فرونشست شده است، بصورت مجزا در نظر گرفته شده است. سپس به کمک رابطه Lohman (۱۹۷۲)، ابتدا پارامتر تراکم پذیری در آبخوان مورد مطالعه برآورد شده سپس به کمک نتایج مدل در بدست آوردن مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان، لوگ های چاه های موجود و تغییرات سطح ایستابی در بخش انتخابی از آبخوان، میزان فرونشست در بازه زمانی مشخصی طی انجام سناریوهای مدیریتی بدست آمده و با نتایج تصاویر راداری و واقعیت منطقه مقایسه و تحلیل شده است.

$$\Delta b = \gamma w \cdot h \left(\frac{S}{\gamma w} - nb\beta w \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این فرمول Δb میزان فرونشست (متر)، h تغییر بار فشار در آبخوان (متر)، S ضریب ذخیره آبخوان، γw وزن مخصوص آب (نیوتن بر متر مکعب)، n : تخلخل بصورت اعشاری، b : ضخامت آبخوان (متر) و βw : ضریب تراکم پذیری آب (مترمربع بر نیوتن) می باشد.

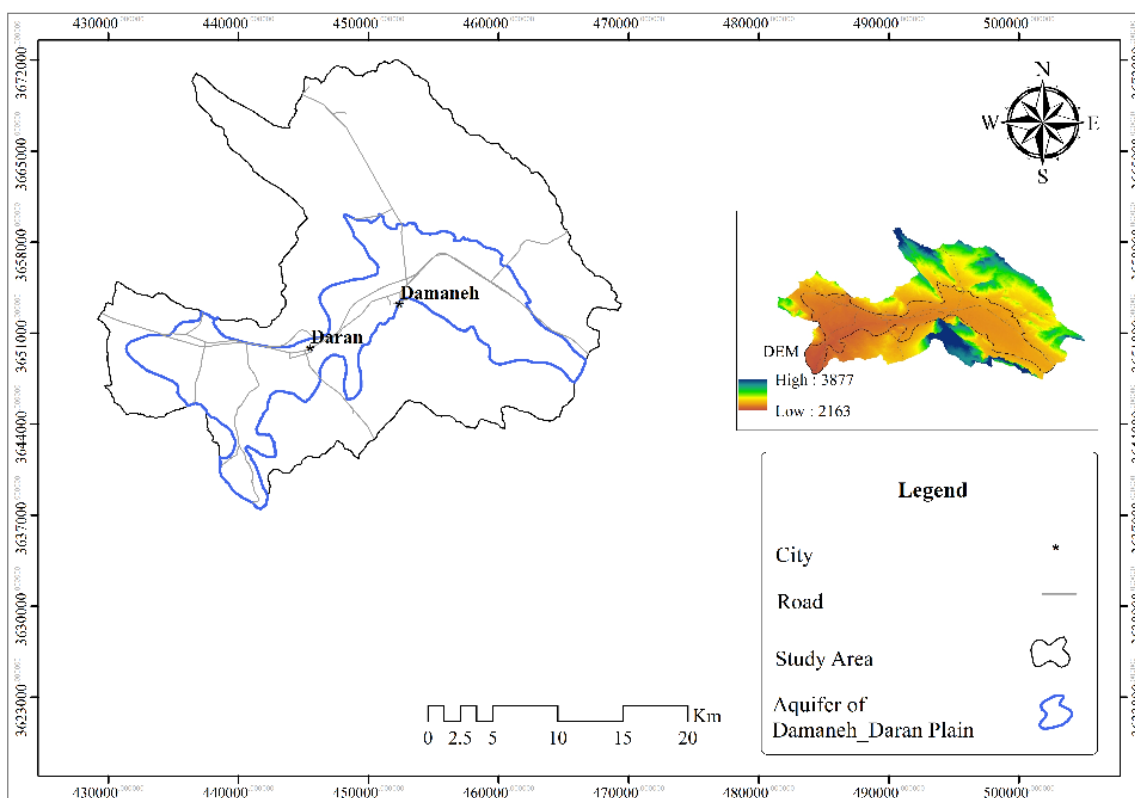
کد انتخابی برای مدل سازی عددی منطقه مورد مطالعه برنامه MODFLOW می باشد. MODFLOW یک ماژول سه بعدی مدل جریان آب زیرزمینی تفاضلات محدود است که توسط سازمان زمین شناسی ایالت متحده (USGS) تهیه شده است (McDonald and Harbaugh, 1988) نرم افزار مورد استفاده در این پروژه سیستم مدل سازی آب زیرزمینی GMS10 می باشد.

در این مرحله، مدل تفهیمی به شکل مناسب برای تهیه مدل ریاضی در می آید. این مرحله شامل طراحی شبکه، انتخاب گام های زمانی، مشخص کردن شرایط مرزی و شرایط اولیه و انتخاب مقدماتی پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان و تنش های هیدرولوژیکی است. مرحله بعدی واسنجی مدل بوده که این فرایند شامل تغییر پارامترهای ورودی به مدل می باشد، به طوری که بیشترین انطباق بین شرایط شبیه سازی شده و صحرایی ایجاد شود. واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار صورت می گیرد، که در حالت پایدار هدایت هیدرولیکی آبخوان و در حالت ناپایدار ضریب ذخیره بهینه می شود. مرحله بعدی مدل سازی صحت سنجی است که هدف از آن اثبات این موضوع بوده که مدل می تواند برخی حوادث گذشته را که داده های صحرایی در مورد آنها وجود دارد، نظیرسازی و بازسازی نماید. پس از تایید صحت نتایج مدل، می توان از آن جهت پیش بینی هریک از پارامترهای آبخوان با تغییر در دیگر پارامترها بهره برد. بدین ترتیب در این تحقیق با تغییر در میزان پمپاژها میزان تغییرات در افت سطح آب زیرزمینی بدست آمده و در مرحله بعدی ارتباط آن با فرونشست در آبخوان تحلیل شده است.

منطقه مورد مطالعه

دشت دامنه - داران در غرب استان اصفهان و در حوضه آبریز باتلاق گاوخونی و سرشاخه‌های زاینده‌رود واقع است. این گستره در فاصله حدود ۱۴۰ تا ۱۸۰ کیلومتری غرب شهر اصفهان واقع شده است (شکل ۲). این دشت به ترتیب درصد مساحت تحت پوشش توسط ارتفاعات آهکی و آهک مارنی کرتاسه، سنگ‌های شیلی ژوراسیک، سنگ‌های دگرگونی تفکیک نشده و آهک‌ها و شیل‌های پرمین احاطه شده است. آبخوان آبرفتی با مساحت ۲۲۰/۳ کیلومتر در ۷۵ درصد از مساحت کل دشت (۲۹۳/۷ کیلومترمربع) را شامل شده است. با توجه مطالعاتی گذشته نوع آبخوان در حالت کلی آزاد است ولیکن تنوع میان لایه‌های رسی در بخش‌های متعدد بویژه بخش‌های شرقی، آبخوان در مقیاس محلی

بصورت آبخوان تحت فشار و نیمه تحت فشار عمل می‌کند. جهت اصلی جریان آب زیرزمینی از شرق، شمال‌شرق و شمال‌غربی دشت به سمت جنوب‌غربی است. شیب هیدرولیکی در سطح آبخوان از حاشیه‌ها به سمت مرکز آبخوان به تدریج کاهش پیدا می‌کند. بر اساس مطالعات گذشته ضخامت آبرفت در بخش‌های شرقی شهر دامنه حداکثر تا حدود ۱۱۰ متر و در بخش‌های غربی و بویژه نواحی شرقی دشت حد فاصل روستای نماگرد تا غرغن تا بالای ۱۵۰ متر هم می‌رسد. ولیکن در بخش‌های مرکزی (حوالی بخش‌های شمالی شهر دامنه) بدلیل بالآمدگی سنگ کف ضخامت آبرفت در برخی از بخش‌ها به کمتر از ۹۰ متر می‌رسد و در کل دشت به سمت حاشیه‌های آن از ضخامت آبرفت کاسته می‌شود.



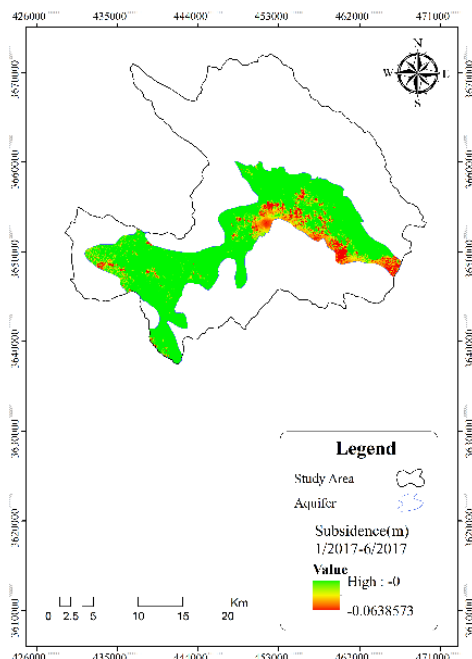
شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Fig. 2. Study area situation.

نتایج و بحث
تعیین نرخ فرونشست در آبخوان

اولین قدم در این مطالعه تعیین نرخ فرونشست در سطح آبخوان آبرفتی در محدوده مطالعاتی دامنه - داران است. بر این اساس با بکارگیری روش تداخل سنج راداری، در تهیه میزان و روند فرونشست آبخوان دشت مذکور از داده‌های راداری نوع SLC با سیستم تصویر برداری IW ماهواره Sentinel-1 استفاده شده است. پردازش تصاویر راداری در محیط نرم افزار Snap انجام شده است. بازه زمانی انتخابی ۶

ماهه از دی ماه ۱۳۹۵ تا خرداد ماه ۱۳۹۶ (ژانویه تا ژوئن سال ۲۰۱۷) میزان فرونشست در آبخوان برآورد شده است (شکل ۳). تصاویر از سایت Sentinel Scientific Data Hub دانلود شده است. این داده‌ها در دو قطبش VV و VH تهیه شده است و از آنجایی که داده در سطح ۱ (SLC) قرار دارد در نتیجه پیش پردازش‌های اولیه ای تقریباً زیادی نیاز دارد تا آن را به حالت مناسب جهت انجام پردازش‌های بعدی تبدیل شوند.



شکل ۳- مقادیر فرونشست در آبخوان آبرفتی دامنه-داران در بازه زمانی دی ماه ۱۳۹۵ تا خرداد ماه سال ۱۳۹۶.
 Fig. 3. Rate of subsidence in Damaneh-Daran Aquifer in January 2017- June2017 range.

شده است. در آبخوان آبرفتی دشت دامنه - داران ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای حفر شده است که ۷ حلقه از این چاه‌ها خشک شده و یا دارای داده کاملی نیستند. لذا از داده‌های مربوط به ۱۰ حلقه چاه مشاهده‌ای که توسط دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع آوری شده برای مدل‌سازی آبخوان استفاده شده است (شکل ۶). هدف از مدل‌سازی آبخوان دشت دامنه‌داران بهره‌گیری از مدل جهت ارائه راهکارهای مدیریتی جهت حل مشکل فرونشست است که آبخوان را طی سالیان اخیر درگیر کرده است. در همین راستا ابتدا داده‌های موردنیاز جهت تهیه مدل مفهومی آبخوان به کمک نرم افزار ArcGIS10 و Microsoft Excel جمع‌آوری و چارچوب کلی آبخوان و لایه‌های مربوط به عوامل بیان آن، تهیه شد. با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان و داده‌های موجود گام زمانی ماهانه و شبکه با تعداد سلول ۱۰۷ در ۱۹۴ با ابعاد ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است. مدل آبخوان در دو حالت پایدار در مهر ماه ۹۴ و حالت ناپایدار طی سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ تهیه و واسنجی شده است. بنابراین ابتدا مدل مفهومی تهیه به مدل عددی تبدیل شده و با اجرای آن در حالت پایدار مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی در سطح آبخوان تعیین گردید. به منظور دستیابی به این مقادیر و رسیدن به حداقل خطای مدل طی مرحله واسنجی، از اطلاعات هدایت هیدرولیکی موجود از برخی نقاط آبخوان و همچنین با توجه نوع مواد تشکیل دهنده آبرفت، از روش پابلوت پوینت (Pilot point) استفاده شد و با تغییر مقادیر ورودی هدایت هیدرولیکی در سطح آبخوان، مدل در مراحل متعدد اجرا و پس از رسیدن به حداقل خطای ممکن، نقشه مکانی مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی در آبخوان تعیین شد (شکل ۷a).

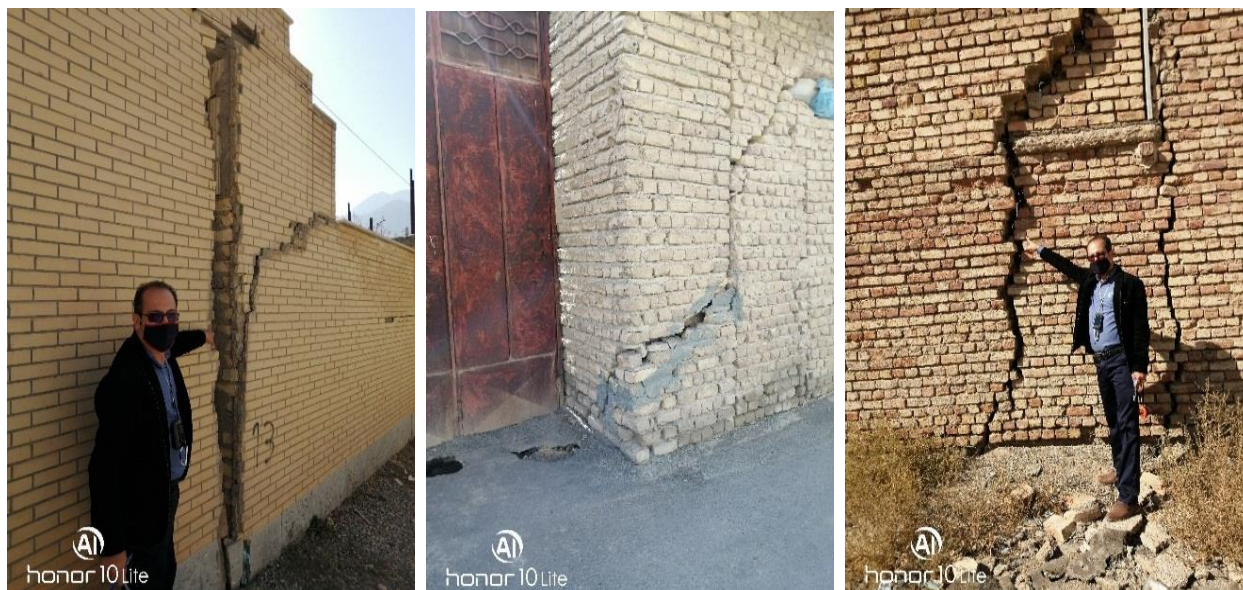
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده فرونشست بیشتر بخش جنوب شرقی آبخوان و حوالی شهر دامنه را درگیر کرده و به میزان حداکثر ۶/۳۸ سانتی متر رخ داده است. این نتایج با شرایط واقعی منطقه که بصورت درز و شکاف در مناطق مسکونی و لوله زایی چاه‌ها ظاهر شده، انطباق دارد (شکل ۴).

برداشت‌های صحرائی از شواهد فرونشست که بیشتر بصورت شکستگی در ساختمان‌های مسکونی بخش شمالی شهر دامنه (مجاور رودخانه فصلی داران) نمود یافته نیز طی فاصله زمانی پنج ساله برداشت شده که همگی مویب توسعه نرخ فرونشست و تداوم آن طی سال‌های اخیر دارد (جدول ۲). بر این اساس بیشترین تغییر در بازشدگی‌ها به میزان ۵/۶۶ سانتی متر بوده است.

فرونشست در آبخوان آبرفتی دامنه - داران دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد که از شایع‌ترین آن را می‌توان به افت شدید سطح آب زیرزمینی در نتیجه برداشت بیش از حد از آبخوان و از طرفی کاهش تغذیه ناشی از خشکسالی‌های متعدد اشاره کرد. بررسی افت دراز مدت آبخوان و تغییرات آن در سطح دشت نیز انطباق معنی‌داری با رخداد فرونشست در آبخوان نشان می‌دهد (شکل ۵). تنوع شدید لیتولوژیکی آبرفت در بخش‌های مختلف آبخوان و بویژه در اعماق مختلف، موجب پاسخ متفاوت آن به از دست دادن آب طی گذشت زمان می‌شود و حاصل آن می‌تواند به فرونشست در آبخوان منجر شود.

تجزیه و تحلیل کمی آبخوان به کمک مدل‌سازی

به منظور شناخت وضعیت کمی آبخوان آبرفتی دامنه - داران طی سالیان گذشته تاکنون، مدل‌سازی آن به روش تفاضلات محدود و به کمک برنامه MODFLOW و در محیط نرم افزار GMS10 انجام



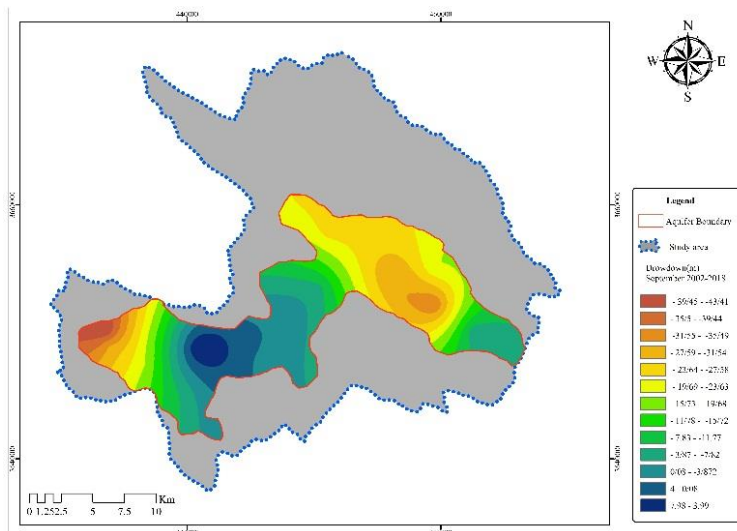
شکل ۴- تصاویری از شواهد واقعی فرونشست در مناطق مسکونی شهر دامنه و شرق دشت دامنه داران.

Fig. 4. Images of real occurring subsidence phenomena in vicinity of Damaneh city and east of Damaneh-Daran plain.

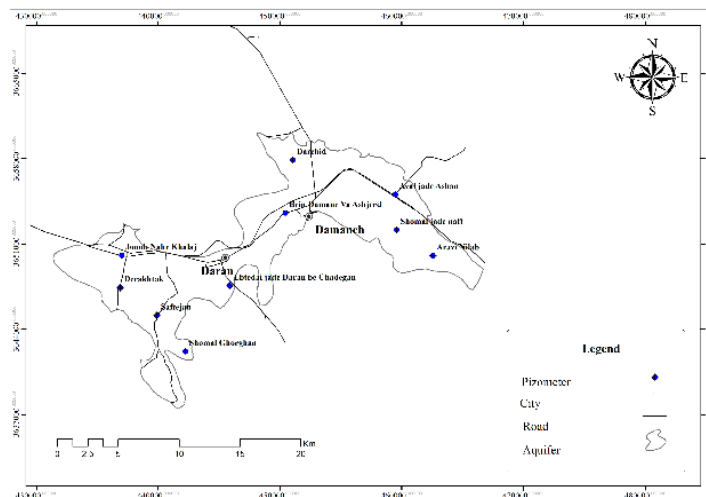
جدول ۲- داده‌های صحرایی شکاف‌های نواحی مسکونی شمال شهر دامنه.

Table 2. Field data of fractures in residential area of north Damaneh city.

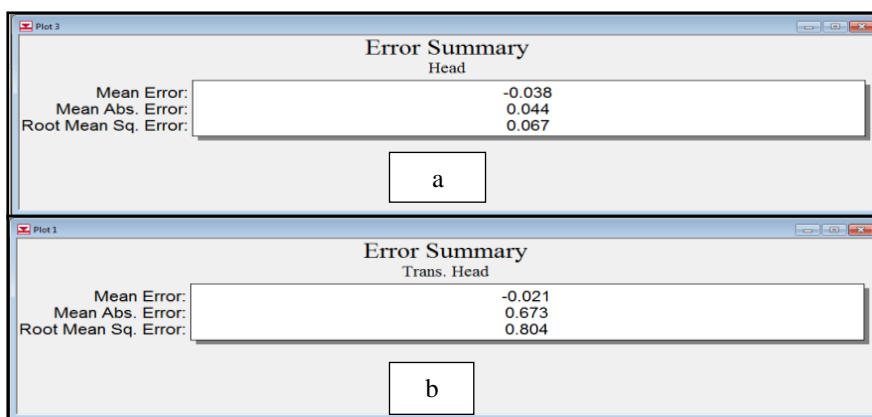
UTMx	UTMy	Opening rates in 12May2015	Opening rates in 30October 2020	Opening rates in 5 year period	Range in the northern half of the Damaneh city
452381	3654043	3.33	4.8	1.47	North
452347	3654048	9.09	13.02	3.93	North
452350	3654024	0.85	4	3.15	North
452319	3654061	5.51	7.2	1.69	North
452276	3654051	3.33	7	3.67	North
452444	3654084	4.22	9.88	5.66	North
452503	3654059	-	5	-	North
452466	3654043	-	8	-	North
452720	3653616	2.36	6.7	5.24	East
452682	3653602	-	5	-	East
452648	3653592	4.6	10.4	5.8	West
452723	3653644	-	3	-	West
452091	3653556	3.8	5	1.2	West
452123	3653562	1.65	2	0.35	West
452122	3653529	3.43	3.5	0.07	West
452011	3653486	-	2	-	West



شکل ۵- تغییرات افت سطح ایستابی طی بازه زمانی مهر ۱۳۸۱-۱۳۹۷.
 Fig. 5. Variations of water table drawdown in December 2002-2018.



شکل ۶- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان دشت دامنه - داران.
 Fig. 6. Piezometric wells situation in Damaneh-Daran Plain.



شکل ۷- میزان خطای مدل پایدار (a) و ناپایدار (b).
 Fig. 7. Error rate in steady (a) and unsteady (b) states of model.

ارتباط بین میزان فرونشست در آبخوان و تغییرات تراز آب زیرزمینی

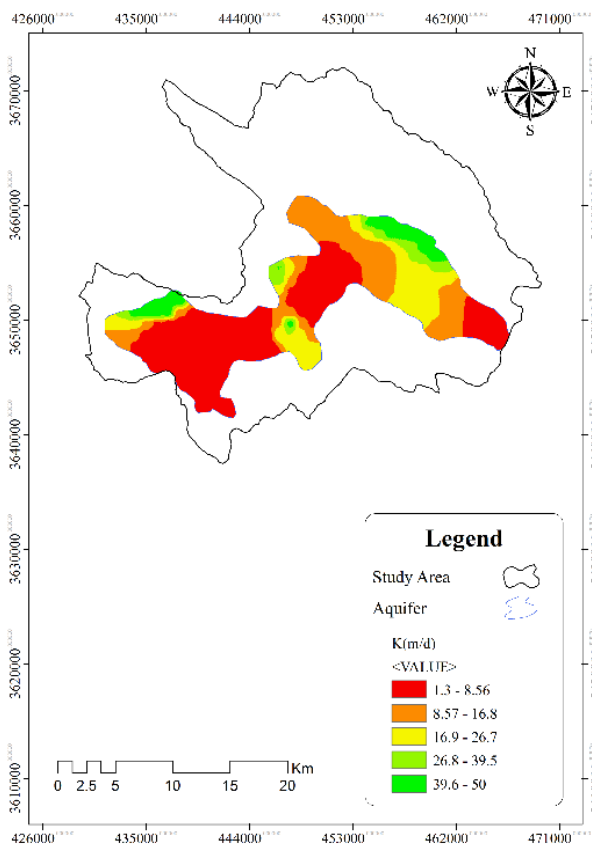
به منظور تجزیه و تحلیل افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی و با اعمال رابطه ۱ در محیط GIS طبق مراحل زیر عمل شده است:

الف) با بررسی لوگ‌های حدود ۱۱۹ حلقه چاه بهره‌برداری و تهیه مقاطع زمین‌شناسی بخش جنوبی شرقی آبخوان که دارای تنوع لیتولوژی فراوان است و مشابه آبخوان تحت فشار عمل می‌کند، بصورت بخشی مجزا در نظر گرفته شد (شکل ۱۱).

ب) در این مرحله با توجه به میزان تغییرات بار فشار در آبخوان طی بازه زمانی شش ماهه دی ماه ۱۳۹۵ تا خرداد ماه ۱۳۹۶ که نرخ فرونشست در آبخوان به کمک روش تداخل سنج راداری تعیین شده و با اعمال رابطه ۱ در محیط Arc Map و به کمک ابزار Raster Calculator مقدار ضریب ذخیره آبخوان به عنوان تنها مجهول رابطه مذکور محاسبه شده است. نتایج حاصله میزان تقریباً ثابت 0.00007 را برای کل محدوده جنوبی شرقی آبخوان بدست داده است. در این فرمول ضریب تراکم پذیری به معادل $10^{-1} * 4/76$ ، چگالی مخصوص به میزان 9810 N/m^3 ، تخلخل ویژه معادل ۸ درصد و ضخامت متوسط آبخوان معادل ۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

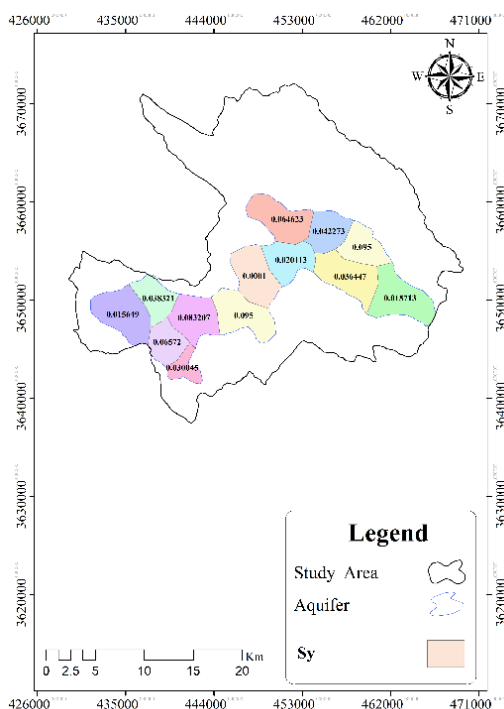
پس از این مرحله پارامترهای مدل مفهومی در گام‌های زمانی دوره ناپایدار طی دوره زمانی یک‌ساله مهرماه ۱۳۹۴ تا شهریور ماه ۱۳۹۵ به مدل معرفی و واسنجی شده است. برای حالت ناپایدار و بدست آوردن مقادیر بهینه آبدهی ویژه از روش پهنه‌بندی (Zonation) آبخوان استفاده و با تغییر آن در هر مرحله مدل اجرا و تا رسیدن به حداقل خطا این کار ادامه پیدا کرده است (شکل ۷b). شکل ۸ پهنه‌بندی نهایی هدایت هیدرولیکی و شکل ۹ مقادیر بهینه آبدهی ویژه در سطح آبخوان را نشان می‌دهد.

در نهایت مدل در بازه زمانی دو سال آبی ۱۳۹۵-۹۶ و ۹۷-۹۶ سحت سنجی شد. خطای کل طی این بازه زمانی حدود $1/4$ متر بدست آمد که با توجه تفاوت تراز سطح ایستایی بسیار بالا مابین بالا دست و پایین دست آبخوان و تغییرات زیاد شیب هیدرولیکی آبخوان در بخش‌های مختلف آبخوان مطلوب بوده و حاکی از دقت مناسب و واسنجی خوب مدل آبخوان دامنه - داران می‌باشد. بدین ترتیب مدل فوق با معرفی اطلاعات جدید سطح آب زیرزمینی طی دو سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ و ۹۷-۱۳۹۶ به آن اجرا و مقادیر تراز آب زیرزمینی محاسباتی توسط مدل در هرکدام از پیژومترها با مقادیر واقعی مقایسه شده است (شکل ۱۰). جدول‌های ۳ و ۴ نیز بیلان آبخوان در انتهای دوره مدل ناپایدار را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نقشه تغییرات هدایت هیدرولیکی بدست آمده از مدل.

Fig. 8. Value of hydraulic conductivity calculated by model.



شکل ۹- پهنه‌بندی نهایی از مقادیر آبدهی ویژه بدست آمده از مدل ریاضی.
 Fig. 9. Zonation of the optimum values of specific yield in the aquifer.

جدول ۳- بیان دشت در گام زمانی ۱۲ حالت ناپایدار.

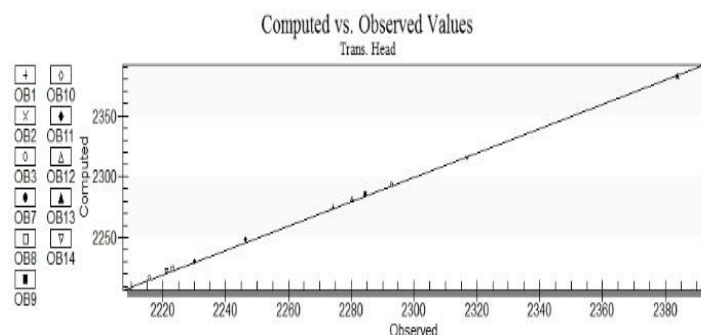
Table 3. Water budget of Damaneh-Daran plain at the end of the unsteady state.

Balance parameter	Volumetric Water Budget in 2016-2017 water year (m ³)	
	Input	Output
Constant Head	0	0
Wells	0	120288056
Groundwater inflow	53013996	0
Groundwater Outflow	0	15439786
Recharge	48901648	0
Sum	101915644	135727842
Input - Output	-33812198	

جدول ۴- بیان دشت در گام زمانی آخر مرحله صحت‌سنجی.

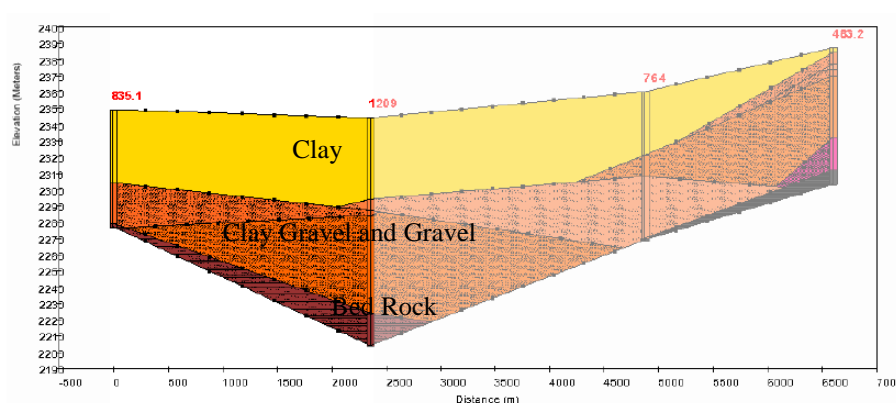
Table 4. Water budget of the plain at the end of the verification period.

Balance parameter	Volumetric Water Budget in 2016-2017 water year (m ³)	
	Input	Output
Constant Head	0	0
Wells	0	234118448
Groundwater inflow	110230136	0
Groundwater Outflow	0	22283814
Recharge	102634648	0
Sum	212864784	256402262
Input - Output	-43537478	



شکل ۱۰- نمودار مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در مرحله صحت سنجی مدل.

Fig. 10. Graph of observational versus computational values in model validation.



شکل ۱۱- مقطع زمین شناسی در بخش جنوب شرقی آبخوان (در جهت شرقی- غربی).

Fig. 11. Cross section in the south part of aquifer (in E-W direction).

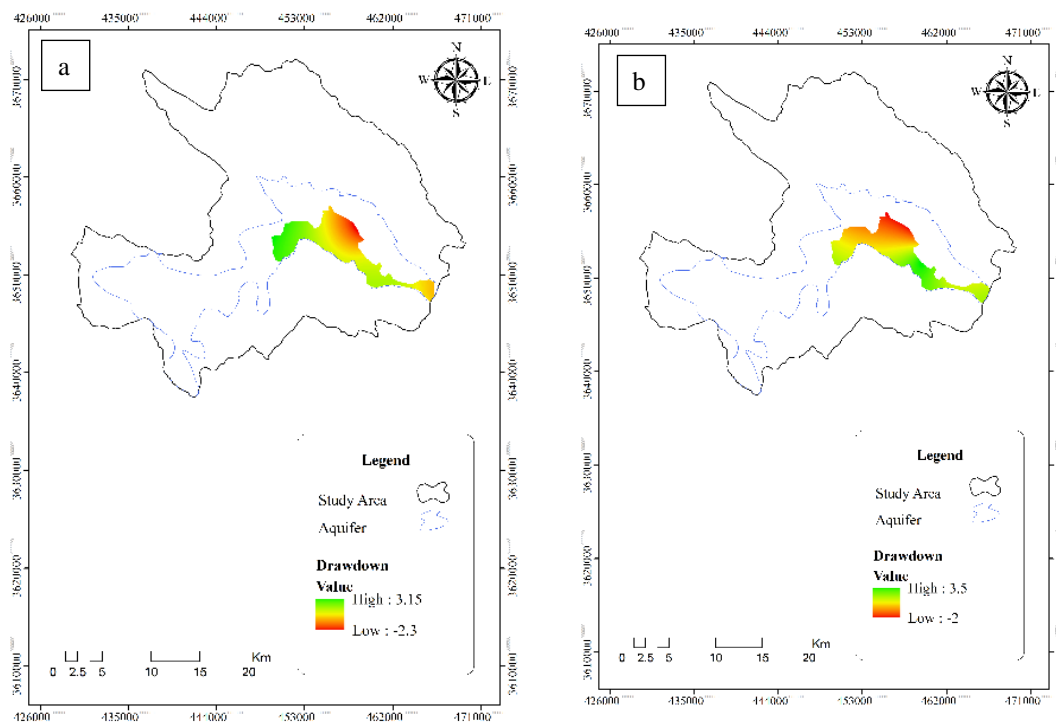
میزان ۵۰ درصد برای کاهش پروانه بهره برداری چاه‌های فوق (به منظور کاهش برداشت‌ها از آبخوان) در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب ابتدا با کاهش ۳۰ و ۵۰ درصدی پمپاژهای صورت گرفته از آبخوان و اعمال آن در مدل ریاضی، تغییرات تراز آب زیرزمینی هر چاه مشاهده ای در طی بازه زمانی شش ماه فوق بدست آمده و با درون یابی آنها به کمک روش Kriging در محیط Arc Map نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی در سطح بخش جنوب شرقی آبخوان بدست آمده است.

در مرحله بعدی با اعمال سناریوهای مدیریتی در مدل ریاضی و بدست آمدن تغییرات سطح آب زیرزمینی (بار فشار در آبخوان) در بازه زمانی شش ماهه فوق الذکر و تغییرات بیلان آبخوان بدست آمده است (جدول ۴ و شکل ۱۲). سناریوهای مدیریتی شامل کاهش ۳۰ و ۵۰ درصدی برداشت‌ها از آبخوان می‌باشد. مبنای انتخاب سناریوهای مدیریتی طرح مدیریتی احیا و تعادل بخشی آبخوان است. در این طرح با توجه به میزان آب قابل برنامه‌ریزی در دشت دامنه - داران و میزان مجموع دبی مجاز چاه‌های بهره برداری این دشت، یک ضریب تعدیل به

جدول ۵- بیلان آبخوان پس از کاهش ۵۰ درصدی برداشت از آبخوان.

Table 5. Aquifer balance after 50% reduction of aquifer discharge.

Balance parameter	Volumetric Water Budget in 2016-2017 water year (m ³)	
	Input	Output
Constant Head	0	0
Wells	0	236766544
Groundwater inflow	124349672	0
Groundwater Outflow	0	21446804
Recharge	102762352	0
Sum	227112024	258213348
Input - Output	-31101324	



شکل ۱۲- نقشه میزان تغییرات تراز سطح ایستابی طی بازه زمانی ژانویه تا ژوئن ۲۰۱۷ در آبخوان تحت های سناریو مدیریتی کاهش ۳۰ درصدی (a) و ۵۰ درصدی (b) برداشت ها.

Fig. 12. Map of water table variation rate from January to June 2017 in the aquifer under management scenario reduction of 30% (a) and 50% (b) discharge.

تصاویر راداری در محیط نرم افزار Snap انجام شد. بر این اساس میزان فرونشست در آبخوان طی بازه زمانی انتخابی ۶ ماهه از ژانویه تا ژوئن سال ۲۰۱۷ برآورد شد. نتایج موید این است که فرونشست در بیشتر بخش مرکزی و جنوب شرقی آبخوان و حوالی شهر دامنه گسترش یافته است که حداکثر آن ۶/۳۸ سانتی متر است. این نتایج با شرایط واقعی منطقه که بصورت درز و شکاف در مناطق مسکونی و لوله‌زایی چاه‌ها ظاهر شده، انطباق دارد.

با توجه به این‌که فرونشست در منطقه مورد مطالعه همراه با افت شدید سطح آب زیرزمینی همراه است جهت بررسی سناریوهای مدیریتی فرونشست مدل عددی آبخوان به روش تفاضل محدود و بهره‌گیری از فرمول تحلیلی لوهمن تهیه گردید.

مدل آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت دامنه داران طی دوره یک‌ساله سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ به روش تفاضلات محدود و برنامه MODFLOW در محیط نرم افزار GMS تهیه و واسنجی و سپس مدل طی دوره ۲ ساله سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ و ۹۷-۱۳۹۶ صحت‌سنجی شد. نتایج مدل موید بیلان منفی و کسری مخزن شدید آبخوان آبرفتی دشت دامنه - داران، به میزان قابل توجه ۳۳/۸ میلیون متر مکعب در انتهای دوره ناپایدار می‌باشد.

سپس با استفاده از کاربرد مدل تحلیلی لوهمن در بخش جنوب شرقی آبخوان و طی بازه زمانی شش ماهه دی ماه ۱۳۹۵ تا خرداد ماه ۱۳۹۶ و با کمک پارامترهای آبخوان، تغییرات سطح آب زیرزمینی و

در مرحله آخر با توجه به نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی حاصل از مرحله قبل و ضریب ذخیره حاصل از مرحله (ب) و با اعمال رابطه ۱ در محیط Arc Map و به کمک ابزار Raster Calculator، نرخ فرونشست در بخش جنوبی شرقی آبخوان تحت شرایط هر سناریو محاسبه شده است (شکل ۱۳).

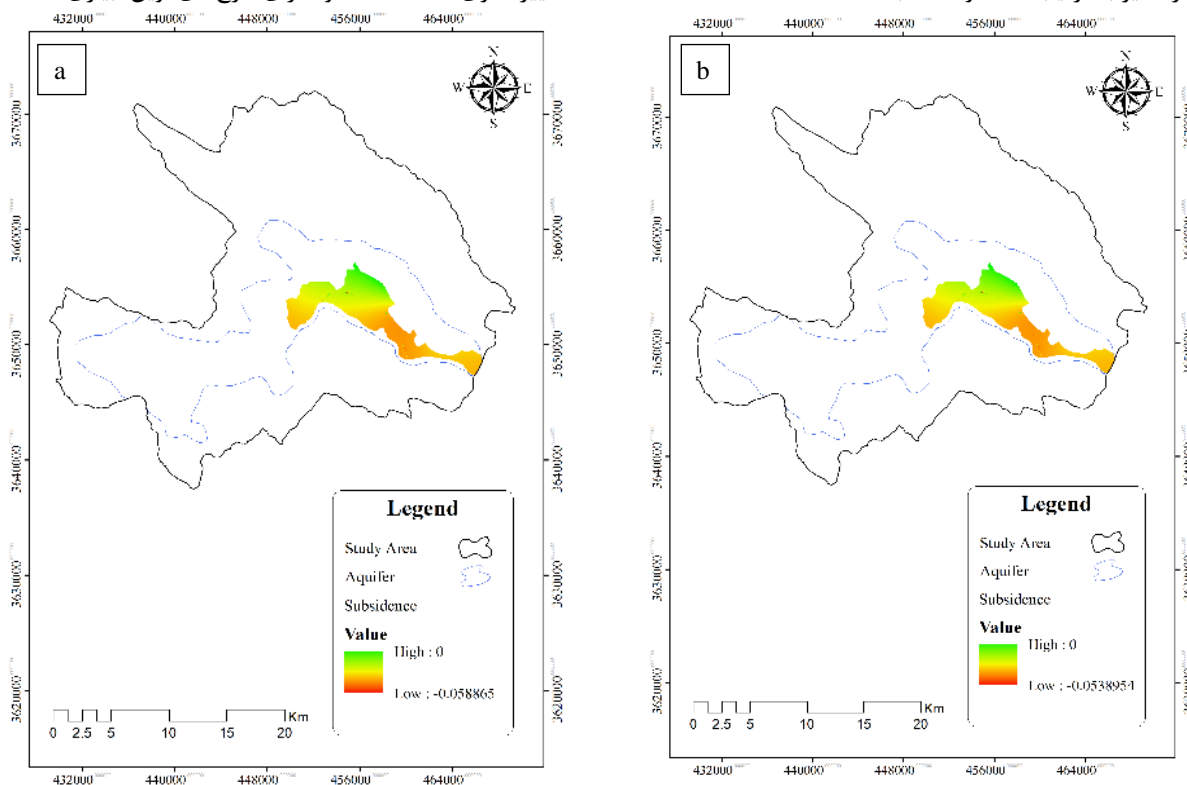
مقایسه نتایج بدست آمده نشانگر این است که در صورت کاهش برداشت آب زیرزمینی تاکنون و به تبع آن کاهش کسری مخزن آبخوان، میزان فرونشست رخ داده آبخوان نیز می‌تواند به میزان قابل توجهی کاهش یافته و پیامدهای مخرب آن را نیز دنبال نداشته باشد. انجام همبستگی بین نقشه تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی با فرونشست طی سناریوهای فوق نیز به کمک SDM Toolbox نسخه ۲/۴ در محیط Arc Map انجام شد. بر این اساس ضریب همبستگی مابین تغییرات تراز آب زیرزمینی در حالت کاهش ۳۰ و ۵۰ درصدی پمپاژها و فرونشست در آبخوان به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۸ بدست آمده است.

نتیجه‌گیری

پژوهش فوق با هدف تعیین ارتباط فرونشست با افت سطح آب زیرزمینی در دشت دامنه - داران و ارائه راهکاری جهت کنترل آن، با استفاده از روش عددی تفاضلات محدود و روش تحلیلی لوهمن صورت گرفته است. ابتدا بررسی فرونشست با بهره‌گیری از روش تداخل‌سنج راداری و به کمک داده‌های راداری نوع SLC با سیستم تصویربرداری IW ماهواره Sentinel.1، بازدیدهای میدانی و پردازش

نتیجه این تحقیق نشان دهنده اثر قابل توجه پمپاژ آبخوان بر رخداد فرونشست است و موید آن است که ضریب تعدیل در نظر گرفته شده برای پروانه بهره‌برداری چاه‌ها در جهت کاهش برداشت‌ها از آبخوان مناسب به نظر می‌رسد. لذا با توجه استفاده بالای منابع آب زیرزمینی دشت در بخش کشاورزی، یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای پیشنهادی جهت کنترل وضعیت فعلی آبخوان و جلوگیری از ادامه روند مخرب فرونشست، کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با اصلاح و تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری چاه‌ها و سپس نظارت دقیق بر برداشت مجاز از طریق نصب کنتورهای هوشمند و استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی از طریق تغییر الگوی کشت منطقه و اجرای طرح‌های نوین آبیاری است.

میزان فرونشست حاصل از روش تداخل‌سنج راداری، میزان ضریب ذخیره آبخوان محاسبه و برابر $0/00007$ متر مربع بر نیوتن بدست آمد. در نهایت با اعمال سناریوی مدیریتی در مدل ریاضی آبخوان، تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی پیش بینی شد که نتایج حاصله موید این است که با انجام سناریوی کاهش ۵۰ درصدی برداشت از آبخوان، کسری مخزن آبخوان از میزان $43/5$ میلیون مترمکعب در انتهای دوره دو ساله صحت سنجی به $31/1$ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد و از طرفی روند رخداد فرونشست آبخوان را نیز به طرز معناداری کاهش می‌دهد. ضریب همبستگی تغییرات تراز آب و فرونشست در حالت کاهش ۳۰ و ۵۰ درصدی پمپاژها نیز به ترتیب $0/73$ و $0/78$ بدست آمد.



شکل ۱۳- نقشه میزان فرونشست طی بازه زمانی ژانویه تا ژوئن ۲۰۱۷ در آبخوان تحت‌های سناریو مدیریتی کاهش ۳۰ درصدی (a) و ۵۰ درصدی (b) برداشت‌ها.

Fig. 13. Map of subsidence rate from January to June 2017 in the aquifer under management scenario reduction of 30% (a) and 50% (b) discharge.

منابع

- Adiyaman, I.B., 2012. Land subsidence and earth fissure due to groundwater pumping, PhD thesis, University of Arizona.
- Baalousha, H., 2015. Fundamentals of Groundwater Modelling, Nova Science Publishers, Inc 113-130p.
- Chaussard, E., Wdowski, Sh., Cano, E.C., Amelunga, F., 2014. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. Remote Sensing of Environment 140, 94-106.
- Chen, B., Gong, H., Li, X., Lei, K., Ke, Y., Duan, G., Zhou, Ch., 2014. Spatial correlation between land subsidence and urbanization in Beijing, China. Natural Hazards 75, 2637-2652.

- Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal* 19(8), 1459–1486.
- Galloway, D.L., Hoffmann, J.R., 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal* 15, 133-154.
- Guzy, A., Malinowska A.A., 2020. State of the Art and Recent Advancements in the Modelling of Land Subsidence Induced by Groundwater Withdrawal. *Water* 12, 2051.
- Handbook, S.E., 1975. Subsidence engineering. National Coal Board. Production department. London.
- Lashkaripour, G.H.R., Ghafoori, M., Mosavi Maddah, M., 2014. An investigation on the mechanism of land subsidence in the northwest of Mashhad city, NE Iran. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)* 5(3), 321-327.
- Lohman, S.W., 1972. Ground water hydraulics. U.S. Geological Survey, 708, 70p.
- Mahmoudpour, M., Khamchiyan, 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.
- Martínez, J.P., Marín, M.H., Burbey, J.T., Cervantes, N –Lozano., José, Á .O., De-Leon, M. E., Pintoc, A .S., 2013. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology* 164, 172-186.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. MODFLOW, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, U. S. Geological Survey, Open-File Report.
- Niekerk, V., Walt, V.D., 2006. Dewatering of the Far West Rand dolomitic area by gold mining activities and subsequent ground instability. *Land Degradation and Development* 17(4), 441 – 452.
- Othman, A., Abotalib, A.Z., 2019. Land subsidence triggered by groundwater withdrawal under hyper-arid conditions: case study from Central Saudi Arabia. *Environmental Earth Scienc* 78, 243.
- Poland, J.F., Davis, G.H., 1969. Land subsidence due to withdrawn of fluids. *Engineering Geology* 2, 187-269.
- Solaimani, K., Mortazavi, S.M., 2008. Investigation of the Land Subsidence and its Consequences of Large Groundwater Withdrawal in Rafsanjan, Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 11(2), 265-269.
- Trinh, M.T., Fredlund, D.G., 2000. Modeling subsidence due to groundwater extraction in the Hanoi city area. *Journal of Geology Technology* 37, 621-637.
- Yin, J., Yu, D., Wilby, R., 2016. Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding: A case study of downtown Shanghai, China. *Science of The Total Environment* 544, 744-753.



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.