Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2025, Vol. 15(2): 39 - 67

Research Article

Determining the quantitative protection zone of water wells in alluvial unconfined aquifer

Amin Ahmadi[1]*, Sesed Yahya Mirzaee[2] , Gholamreza Mirzavand[1], Manouchehr Chitsazan[2], Arash Nadri[3]

1-Department of Civil Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
2-Department of Geology, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3- Arizona Department of Water Resources, Phoenix, USA

Keywords: *Quantitative protection zone, Influence zone, Capture zone, Water wells, Alluvial unconfined aquifer*

1-Introduction

The quantitative protection zone of a water well is a three-dimensional area around the well, where water extraction from this area is allowed only through this well. According to this definition, each well has an aquifer area around it, and the boundary of this area is defined in the plane as the quantitative protection zone around the well. Unfortunately, despite the great importance of the determination of the quantitative zone of water wells, this issue has been less studied in particular, and the researches conducted on the determination of the protection zone of the well are mainly focused on the influence and capture zones (Ahmadi et al., 2022, 2023; IGNSL, 2014; UKEA, 2019; USEPA, 2008; USGS, 1991; WRC, 2023). Although some of the characteristics of the mentioned areas play a role in determining the well's quantitative and qualitative protection zones, none of which is equivalent to the quantitative and qualitative protection zones, it is necessary to conduct more research. In this research, various criteria related to the quantitative protection zone of water wells have been investigated, including recharge, discharge, influence zone, capture zone, recharge zone, and subsidence phenomenon in alluvial unconfined aquifers. For this purpose, an aquifer has been studied using the Modflow and Modpath models included in the GMS program, and the results can be used to prepare a suitable guideline for determining the quantitative protection zone of water wells.

2-Material and methods

Especially in an alluvial basin, the water dividing line coincides with the surface boundary of the basin, and the river naturally drains the aquifer downstream. A part of this aquifer between two flow lines can be selected and studied as a suitable conceptual model according to Fig.1a and 1b. The well is placed in the center of the aquifer, and wells are placed at the desired positions in the aquifer to study the effects of the well in the case of a single-well system according to Fig.1b (In Persian text), to study the effects of the well in the multi-well system. The aquifer was studied in single-well and multi-well systems for hydraulic conductivity equal to 10m/d, specific yield equal to 10%, surface recharge from 40 to 240 mm per year, and wells with 2000 to 4000 m3/d. The Modflow numerical model was used to simulate flow and determine the water level in the desired aquifer. The Modpath model was used to simulate and track particles and display flow lines. The boundary conditions of the aquifer under study are shown in Fig.1a and 1b (In Persian text), and for the grid, as shown in Fig.1c (In Persian text), the grid is made such that the mesh size is equal to the diameter of the well and enlarged by a factor of 1.2. The stress periods started at 0.001 days and gradually increased to a dry period, and then, with the repetition of wet and dry periods of simulation in unstable conditions, it sometimes lasted up to 400 years.

* Corresponding author: aminahmadi349@gmail.com
DOI: 10.22055/aag.2024.46034.2434
Received: 2024-02-11
Accepted: 2024-04-29

ISSN: 2717-0764

3-Results and discussions

The accuracy of the results of the numerical models for estimating the drawdown cone of the influence zone and also for the estimation of the plan of the capture zone has already been proved (Ahmadi, 2023; Barrash, 1997). After ensuring the accuracy of the model outputs, the results of the effects of different parameters and possible areas on the quantitative protection zone, including recharge, discharge, pumping time, influence zone, capture zone, etc., were extracted and discussed. In aquifers with similar characteristics, as the amount of average annual recharge increases, the natural or normal water level reaches a higher level, the saturation thickness and hydraulic gradient increase, and the actual transmissivity of the aquifer increases (Fig. 2 in Persian text). With the beginning of the activity of a well in the center of the studied aquifer, the cone of depression gradually expanded. Finally, after an extended period, it reached the boundaries of the aquifer and then continued to expand in depth. After a very long period, it reached stability. This situation is almost the same in single-well and multi-well systems (Fig.3, Fig.4, Fig.5). Simultaneously with the expansion of the influence zone, the size of the capture zone has also increased, but the time to reach stability is short (Fig.7, Fig.8, Fig.9 in Persian text). Due to both the large area and the uncertainty (Fig.10, Fig.11 in Persian text), the radius of the influence zone and the plan of the capture zones cannot be a suitable basis for determining the quantitative protection zone and the distance between water wells. Investigation of the results showed that after selecting the maximum allowable drawdown in the aquifer, a small percentage of the annual recharge can be allocated to discharge through wells. Therefore, the radius of the quantitative protection zone of each well is estimated so that the discharge volume of the well is equal to its surface recharge volume (Fig.12, Fig.13 in Persian text). In cases where the wells are installed only in the downstream part of the aquifer, a part of the well's discharge is compensated by lateral recharge and included in the calculations, so the radius of their quantitative protection zone is estimated to be smaller (Fig.14 in Persian text).

4-Conclusion

This study was carried out to investigate the quantitative protection zone of water wells in a type of alluvial unconfined aquifer. This type of study mainly requires numerical models; for this purpose, Modflow and Modpath models were used. After ensuring the correct functioning of the model, the effect of different parameters was extracted. The results showed that pumping part of the recharge through water wells decreases the water level in the aquifer. The recharge amount creates a new water level resulting from the difference between the initial recharge and the discharge through the wells. The results showed no significant difference in the drawdown cone in single-well and multi-well systems. It was found that reducing recharge or increasing the ratio of discharge to recharge increases the size of the capture zone. It was found that the drawdown cone of the influence zone will continue to expand until the water level in the aquifer reaches a new stable level. Eventually, the radius of the influence zone will reach the aquifer's boundaries. It was found that although the time to reach the stability of the drawdown cone in the influence zone is very long, the time to reach the stability in the capture zone is much shorter. Investigations showed that neither the radius of the influence zone nor the plan of the capture zone could be a suitable basis for determining the quantitative protection zone of water wells. Instead, the appropriate basis is the balance of recharge and discharge and the allocation of a circular area to each well so that the volume of a part of its recharge is equal to the volume of the discharge of the well. It is necessary to conduct subsidence studies and determine the allowable drawdown of the water level after the operation of the wells compared to the normal water level in the aquifer to determine the ratio of discharge to recharge in calculating the radius of the quantitative protection zone.

5-References

Ahmadi, A., Chitsazan, M., Mirzaee, S. Y., Nadri, A., 2022., The effects of aquifer and well parameters on Capture Zone and Discharge Zone in alluvial unconfined aquifers. Journal of Engineering Geology 16(2), 180-207. http://jeg.khu.ac.ir/article-1-3070-en.html

ISSN: 2717-0764
CC BY

Ahmadi, A., Chitsazan, M., Mirzaee, S. Y., Nadri, A., 2023., The effects of influence radius and drawdown cone on the areas related to the protection of water wells. Journal of Hydrology 617, 129001. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129001

Barrash, W., Dougherty, M. E., 1997. Modeling axially symmetric and nonsymmetric flow to a well with MODFLOW, and application to Goddard2 well test, Boise, Idaho. Groundwater 35(4), 602-611. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00125.x

IGNSL, 2014., Capture-Zone-Delineation-Technical-Report (Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited, Issue GNS Science Report 2013/57). www.gns.cri.nz

UKEA, 2019., Manual for the production of Groundwater Source Protection Zones (U.K.Environment Agency, Issue Report March 2019). www.gov.uk/environment-agency

USEPA, 2008., Systematic approach for evaluation of capture zones at pump and treat systems (U.S. Environmental Protection Agency, Issue Report EPA/600/R-08/003). http://www.epa.gov/ada/

USGS, 1991., Description and evaluation of selected methods used to delineate wellhead-protection areas around public-supply wells near Mt. Hope, Kansas (U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Issue Report 90-4102). https://books.google.com/books?id=WlGITJCoakUC

WRC, 2023., Guidance document on Protection Zones (Delineation and Protection). www.wrc.org.za

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Ahmadi, A., Mirzaee, sY., Mirzavand, GH., Chitsazan, M., Nadri, A,. 2025. Determining the quantitative protection zone of water wells in alluvial unconfined aquifer. Adv. Appl. Geol. 15 (2), 39-67.

DOI: 10.22055/aag.2024.46034.2434
https://aag.scu.ac.ir/article_19244.html

©2025 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

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب در آبخوان آزاد آبرفتی

امین احمدی
گروه مهندسی عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
سید یحیی میرزایی
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
غلامرضا میرزاوند
گروه مهندسی عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
منوچهر چیت سازان
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
آرش ندری
گروه منابع آب آریزونا، فونیکس، آمریکا
aminahmadi349@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

چکیده
حریم حفاظت کمّی هر چاه منطقه‌ای در اطراف چاه است که برداشت آب از آن فقط از طریق آن چاه مجاز باشد؛ اما هنوز دستورالعمل مناسبی ندارد. در این پژوهش به منظور تسهیل دستیابی به یک دستورالعمل، معیارهای محتملی که تاکنون مورد توجه نبوده، در یک آبخوان آزاد آبرفتی با مدل‌های Modflow و Modpath مطالعه شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که مخروط‌های افت نظری و حقیقی در این آبخوان نامتقارن بوده و با کاهش تغذیه یا با افزایش نسبت تخلیه به تغذیه، افت سطح آب در حریم تأثیر به‌شدت زیاد شده و بر وسعت حریم آبگیر افزوده می‌شود. نتایج مشخص کرد که مخروطِ افتِ هر چاه تا زمانی که سطح آب به یک تراز پایدار برسد به گسترش خود ادامه خواهد داد و شعاع نفوذ نهایتاً به مرزهای آبخوان خواهد رسید. نشان داده شد که اگرچه زمانِ رسیدن به پایداری در مخروطِ افتِ حریمِ تأثیر خیلی طولانی است، اما زمانِ رسیدن به پایداری در پلانِ حریمِ آبگیر خیلی کمتر است. نتایج نشان داد که هم شعاعِ حریمِ تأثیر و هم پلانِ حریمِ آبگیر نمی‌توانند مبنای مناسبی برای تعیین حریمِ حفاظتِ کمّی چاه‌های آب باشند، چراکه وسعت آن‌ها خیلی زیاد و متغیر است. نتایج این پژوهش موید آن است که اختصاص مساحتی دایره‌ای از سطح آبخوان به هر چاه می‌تواند مبنای مناسبی باشد؛ به‌گونه‌ای که حجم درصد کمی از تغذیه‌ی آبخوان با حجم تخلیه‌ی چاه‌ها برابر شود؛ اما انتخاب نسبت تخلیه به تغذیه نیازمند مطالعات فرونشست و تعیین افت مجاز سطح آب نسبت به سطح آب نرمال است.

واژه‌های کلیدی: *حریمِ حفاظتِ کمّی، حریمِ تأثیر، حریمِ آبگیر، چاه‌های آب، آبخوانِ آزادِ آبرفتی*

۱-مقدمه
حریم حفاظت کمّی چاه آب منطقه‌ای سه‌بعدی در اطراف چاه است که برداشت آب از آن منطقه فقط از طریق آن چاه مجاز باشد. با این تعریف هر چاه در پیرامون خود منطقه‌ای از آبخوان را به خود اختصاص داده و محیط آن منطقه در پلان مشخص‌کننده‌ی حریم حفاظت کمّی در اطراف چاه خواهد بود. به این ترتیب فاصله‌ی چاه‌ها از یکدیگر می‌بایست برابر با مجموع شعاع حریم کمی آن‌ها در خط واصل بین آن‌ها در نظر گرفته شود. اگر تعیین حریم حفاظت کمّی بر اساس مبنای مناسبی صورت نگیرد، این احتمال وجود خواهد داشت که فاصله بین چاه‌ها خیلی کمتر از مقدار بهینه در نظر گرفته‌شده و موجبات زیان‌های جبران‌ناپذیری بر آبخوان شود. فقط در صورت مدیریت و برداشت بهینه از آبخوان است که سطح تراز آب در نقاط مختلف آبخوان در یک حد مشخصی که عمدتاً تابع مقدار تغذیه و هدایت هیدرولیکی است، تثبیت شده و فقط مقدار کمی در دوره‌های تر و خشک نوسان خواهد داشت که این مقدار هم تابع آبدهی ویژه‌ی آبخوان است (Ahmadi et al., 2022). جوامع بشری به دلایل مختلف ناچار به برداشت آب از آبخوان به‌صورت

مصنوعی شده‌اند که یکی از این روش‌ها حفر چاه آب است. طبیعتاً برداشت بی‌رویه از آبخوان از این طریق موجب اخلال در روند تخلیه‌ی طبیعی آبخوان خواهد شد، و کاهش سطح تراز طبیعی و کاهش ضخامت اشباع و احتمالاً تراکم بخش غیراشباع و ایجاد پدیده‌ی فرونشست و نهایتاً کاهش شدید عملکرد و یا به عبارتی مرگ آبخوان از اثرات آن خواهد بود. متأسفانه علی‌رغم اهمیت بالایِ تعیین حریم کمّی چاه‌های آب، این موضوع به‌طور خاص کمتر موردمطالعه قرارگرفته و تحقیقات انجام‌شده در مورد تعیین حریم حفاظت از چاه عمدتاً معطوف به حریم‌های تأثیر و آبگیر است. این در حالی است که اگرچه برخی از مشخصات حریم‌های مذکور به‌گونه‌ای در تعیین حریم‌های حفاظت کمّی و کیفی چاه نقش دارند اما هیچ‌کدام از آن‌ها معادل حریم‌های حفاظت کمّی و کیفی نبوده و لازم است در این خصوص تحقیقات بیشتری انجام شود.

حریم تأثیر منطقه‌ای سه‌بعدی و اشباع در اطراف چاه است که برداشت آب از چاه باعث تغییر تراز و سرعت حرکت آب در آن می‌شود. مخروط افت و شعاع تأثیر دو مشخصه از این منطقه است و در مورد آن‌ها تحقیقات زیادی انجام‌شده است (Ahmadi et al., 2023; Bresciani et al., 2020; Louwyck et al., 2022; Motyka and d'Obyrn, 2022; Zhai et al., 2021). روابط تحلیلی مختلفی برای برآورد مخروط افت و شعاع تأثیر در آبخوان‌های آبرفتی محبوس و آزاد در شرایط پایدار و ناپایدار و به‌شرط افقی بودن سطح آب و سطح بستر ارائه‌شده و ازجمله‌ی آن‌ها روابط تیم، دوپویی، تایس، بیر و ژاکوب، چاو، نیومن و مونچ است (Chu, 1994; Cooper Jr and Jacob, 1946; Moench, 1997; Neuman, 1974; Theis, 1935; Thiem, 1906). در مورد آبخوان‌های آبرفتی دارای شیب بستر و سطح آب نیز این امکان فراهم‌شده است که با استفاده از مدل‌های عددی مبتنی بر تفاضلات محدود، المان‌های محدود و حجم کنترل، بتوان مخروط افت و شعاع تأثیر را استخراج کرد، که ازجمله‌ی آن‌ها مدل Modflow است که در برنامه‌هایی نظیر GMS و ModelMuse گنجانده‌شده است (Langevin et al., 2017; Winston, 2019). در مورد اعتبار و اهمیت مشخصات حریم تأثیر ازجمله شعاع تأثیر، تحقیقات زیادی انجام‌شده و برخی از پژوهشگران آن را در مدیریت آبخوان فاقد اهمیت و اعتبار و برخی دیگر آن‌ها دارای اهمیت و اعتبار می‌دانند (Louwyck et al., 2022; Zhai et al., 2021).

حریم آبگیر منطقه‌ای سه‌بعدی و اشباع در اطراف چاه است که خطوط جریان آن به سمت چاه منحرف شده و در تأمین آب چاه نقش دارد. بخش غیراشباع در بالای حریم آبگیر که در پلان منطبق بر حریم آبگیر است و موجب تغذیه‌ی سطحی حریم آبگیر می‌شود، تحت عنوان حریم تغذیه شناخته می‌شود، و عملاً با تعیین حریم آبگیر وسعت این حریم هم مشخص می‌شود (Ahmadi et al., 2023). تاکنون روابط تحلیلی و نیمه‌تحلیلی متعددی برای برآورد حریم آبگیر در آبخوان‌های آبرفتی محبوس و آزاد ارائه شده که عمدتاً برای شرایط پایدار کاربرد دارند، که ازجمله‌ی آن‌ها روابط بیر و ژاکوب، جواندل و تسانگ، گروب، سامانی و زارعی، ناقلی و همکاران و غیره را می‌توان نام برد (Bear and Jacobs, 1965; Grubb, 1993;Chitsazan et al. 2018; Javandel and Tsang, 1986; Nagheli et al., 2020; Samani and Zarei-Doudeji, 2015). در روشهای عددی نیز با به‌کارگیری ذرات ردیاب این امکان فراهم‌شده است که در آبخوان‌های آبرفتی چه در شرایط پایدار و چه در شرایط ناپایدار بتوان حریم آبگیر چاه را استخراج کرد. مدل Modpath ازجمله مدل‌های ردیاب است که در برنامه‌هایی نظیر GMS و ModelMuse گنجانده‌شده و پس از شبیه‌سازی جریان توسط مدل مادفلو می‌تواند حریم آبگیر چاه را مشخص نماید. در مورد اهمیت و اعتبار حریم آبگیر نیز تحقیقات متعددی انجام‌شده و همچنان موردتوجه پژوهشگران است (Ahmadi et al., 2022; Rodriguez-Pretelin et al., 2022; Zeferino et al., 2022).

پدیده‌ی فرونشست یکی دیگر از جنبه‌های تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب است. برداشت بی‌رویه از آبخوان باعث افت بیشتر از حد سطح آب در آبخوان شده و منجر به کاهش فشار آب منفذی و افزایش تراکم و کاهش تخلخل مؤثر شده و نهایتاً باعث فرونشست در سطح آبخوان می‌شود. برای جلوگیری از این پدیده لازم است حداکثر افت مجاز در بخش‌های مختلف هر آبخوان برآورد شده و جانمایی چاه‌ها و مقدار برداشت و فاصله‌گذاری بین آن‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شود که افت سطح آب در آبخوان بعد از فعالیت طولانی‌مدت چاه‌ها از حد مجاز فراتر نرود. متأسفانه تاکنون تحقیقات موثری در خصوص تعیین افت مجاز انجام‌نشده و آنچه تاکنون در این مورد به آن پرداخته‌شده، برآورد مقدار فرونشست با توجه به سنجش‌های ماهواره‌ای بوده است (Asghari Saraskanrood and Mohamadzadeh Shishegaran, 2023; Azarma et al., 2023;

Chatrsimab et al., 2021; Rahmani et al., 2022). بنابراین برای دستیابی به روابطی که بتواند افت مجاز سطح آب در آبخوان‌ها را نسبت به سطح آب نرمال برآورد کند، تحقیقات بیشتری لازم است.

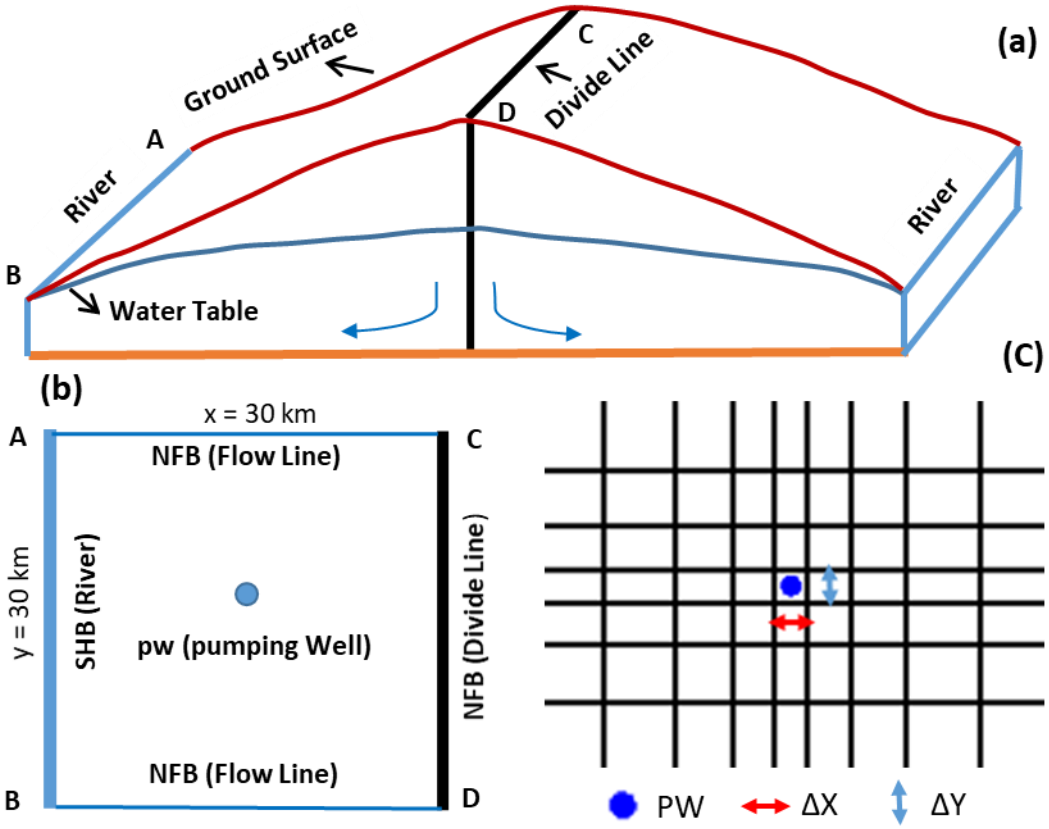
به‌منظور حفاظت از چاه‌های آب دستورالعمل‌های متعددی توسط سازمان‌های مسئول در کشورهای مختلف ارائه‌شده است. ازجمله‌ی آن‌ها دستورالعمل دفتر حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده (USEPA)، دستورالعمل نمایندگی محیط‌زیست انگلستان (UKEA)، دستورالعمل مؤسسه علوم هسته‌ای و زمین‌شناسی (IGNSL)، دستورالعمل سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، دستورالعمل کمیته تحقیقات آب وابسته به آژانس حفاظت از محیط‌زیست دانمارک (WRC)، دستورالعمل تعیین حریم کمّی چاه‌ها و قنوات در ایران (نشریه ۴۱۹-الف)، دستورالعمل تعیین حریم کیفی چاه‌ها در ایران (نشریه ۶۲۱) و غیره را می‌توان نام برد (IGNSL, 2014; ITES, 2013, 2014; UKEA, 2019; USEPA, 2008; USGS, 1991; WRC, 2023). به‌غیراز نشریه‌ی ۴۱۹-الف، سایر دستورالعمل‌ها عمدتاً بر موضوع تعیین حریم حفاظت کیفی تمرکز کرده و اساساً به موضوع حریم حفاظت کمّی اشاره‌ای نکرده‌اند. از طرفی در نشریه‌ی ۴۱۹-لف فقط به تعدادی از روش‌های تجربی و تحلیلی برای تعیین شعاع تأثیر در شرایط افقی بودن سطح آب اولیه در آبخوان اشاره شده، و آن را بدون بیان چگونگی تعیین معیارهای برآورد شعاع تأثیر ازجمله افت معیار و زمان معیار، به‌عنوان حریم حفاظت کمّی معرفی کرده است، این در حالی است که حریم حفاظت کمّی در چاه‌های آب مفهومی فراتر از شعاع تأثیر دارد و نیازمند تحقیقات بیشتر برای دست‌یابی به یک دستورالعمل جامع است.

اگرچه در برخی از پژوهش‌ها از جمله احمدی و همکاران حریم تاثیر و حریم آبگیرِ چاه‌های آب به خوبی بررسی شده است (Ahmadi et al., 2022, 2023)، اما این دو منطقه نمی‌توانند معادل حریم حفاظت کمّی در نظر گرفته شوند. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی برخی از معیارهای مختلف مرتبط با حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب در انواعی از آبخوان‌های آزاد آبرفتی است که از این نظر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به این منظور نقش مناطق و پارامترهایی ازجمله حریم تأثیر، حریم آبگیر، حریم تغذیه، مقدار تغذیه، مقدار تخلیه، مقدار افت سطح آب و غیره با استفاده از مدل‌های Modflow و Modpath در برنامه GMS مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه همراه با نتایج حاصل از پژوهش‌های مستقل در مورد پدیده فرونشست، می‌تواند در تهیه‌ی یک دستورالعمل مناسب برای تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب مورد استفاده قرار گیرد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-معرفی آبخوان موردمطالعه

عمدتاً در یک حوضه‌ی آبریز آبرفتی خط تقسیم آب منطبق بر مرز سطحی حوضه است و آبخوان در پایین‌دست به‌طور طبیعی از طریق رودخانه زهکشی می‌شود. بنابراین سطح آب در آبخوان متناسب با مقدار تغذیه‌ی متوسط سالانه و متناسب با هدایت هیدرولیکی آبخوان، در یک تراز مشخص تثبیت‌شده و اگر بارش در دوره‌ی خاصی از سال رخ دهد در آن دوره‌ی تر مقداری سطح تراز آن بالاآمده و در دوره‌ی خشک مقداری سطح تراز آن پایین می‌افتد، ولی نسبتاً در یک موقعیت پایدار است. سطح آب طبیعی در آبخوان درواقع یک سطح آب نرمال است و می‌توان آن را در پایان فصل‌تر و در پایان فصل خشک و یا در حالت پایدار که حد واسط این دو حالت است استخراج کرد؛ و برای استخراج حالت پایدار کافی است که مقدار تغذیه به‌جای آنکه فقط در دوره‌ی‌تر به آبخوان داده شود به‌طور متوسط در طول کل سال به آبخوان داده شود. اگر مرز رودخانه در چنین حوضه‌ای به‌صورت یک مرز با بار ثابت در نظر گرفته شود، بخشی از این آبخوان که حد واسط بین دو خط جریان باشد را می‌توان مطابق شکل۱ قسمت‌های a و b به‌عنوان یک مدل مفهومی مناسب انتخاب کرده و مورد مطالعه قرارداد. برای مطالعه‌ی اثرات چاه در حالت تک چاهی مطابق شکل۱ چاه در مرکز آبخوان اعمال‌شده و برای بررسی اثرات چاه در سیستم چندچاهی، چاه‌ها در موقعیت‌های موردنظر به آبخوان اعمال شده‌اند. هدایت هیدرولیکی آبخوان ۱۰ متر بر روز و آبدهی ویژه‌ی آبخوان ۱۰ درصد در نظر گرفته شده و آبخوان برای مقادیر مختلفی از تغذیه سطحی از ۴۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر در سال و چاه‌هایی با برداشت مختلف از ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمکعب در روز در سیستم تک چاهی و چند چاهی مورد مطالعه قرارگرفته است.



شکل ۱- (a) مدل مفهومی آبخوان مورد مطالعه ، (b) شرایط مرزی (NFB مرز بدون جریان و SHB مرز با بار مشخص است.) و (c) شبکه‌بندی در موقعیت چاه‌ها.

Fig 1. (a) Conceptual model of the studied aquifer, (b) Boundary conditions (NFB is no flow boundary and SHB is specific head boundary) and (c) Gridding at the location of wells.

۲-۲-معرفی مدل‌های مورداستفاده

برای شبیه‌سازی جریان و تعیین سطح تراز آب در آبخوان مورد نظر با استفاده از روش‌های ریاضی عددی از مدل Modflow تعبیه شده در برنامه‌ی GMS استفاده‌شده است. مدل مادفلو با توجه به بسته‌های متعددی که به آن افزوده شده است قابلیت بسیار مناسبی برای شبیه‌سازی جریان در آبخوان تحت شرایط مرزی مختلف و در شرایط پایدار و ناپایدار و در حالت‌های سه‌بعدی و در چندین لایه فراهم کرده است (Langevin, 2017). با مشخص شدن تراز سطح آب در آبخوان می‌توان مخروط افت چاه را استخراج و حریم تأثیر چاه را مورد مطالعه قرار داد. برای شبیه‌سازی و ردیابی ذرات و نمایش خطوط جریان از مدل Modpath تعبیه‌شده در برنامه‌ی GMS استفاده شده است. مدل Modpath با توجه به امکان استفاده از تعداد ذرات زیاد و ردیابی در حالت پیشرو و پسرو این قابلیت را فراهم کرده است که با دقت مناسب موقعیت خطوط جریان منتهی به چاه مشخص گردد (Pollock, 2016). با مشخص شدن خطوط جریان منتهی به چاه می‌توان حریم آبگیر چاه را استخراج کرده و آن را مورد مطالعه قرار داد.

۲-۳-معرفی شرایط مرزی، شبکه‌بندی و دوره‌های تنش

شرایط مرزی آبخوان مورد مطالعه در شکل ۱در قسمت ABCD نشان داده شده است. آبخوان در بخش CD دارای مرز بدون جریان خط تقسیم و در بخش AB دارای مرز جریان با بار مشخص ۱۰۰ متری رودخانه است، مرزهای بدون جریان AC و BD خط جریان هستند. برای شبکه‌بندی مطابق شکل ۱ در محل چاه‌ها ریزسازی به‌گونه‌ای انجام شده که اندازه شبکه برابر با قطر چاه بوده و به اطراف با ضریب ۱.۲ ابعاد آن‌ها بزرگ‌تر شده است. دوره‌های تنش در ابتدا از ۰.۰۰۱ روز شروع‌شده و به‌تدریج تا یک دوره‌ی خشک افزایش یافته و سپس با تکرار دوره‌های تر و خشک شبیه‌سازی در شرایط ناپایدار بعضاً تا ۴۰۰ سال ادامه یافته است. مدت شبیه‌سازی به این دلیل طولانی در

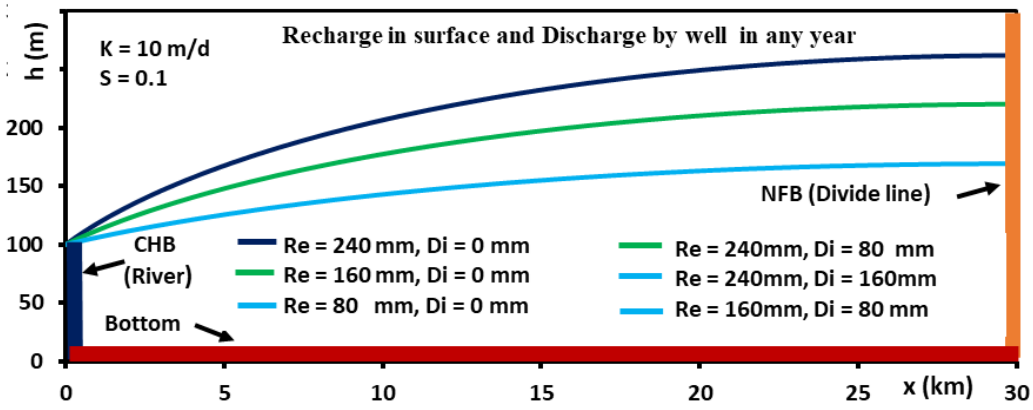
نظر گرفته شده است که در سیستم چند چاهی برای رسیدن سطح تراز آب به حالت پایدار حدود ۴۰۰ سال زمان لازم بوده است.

۳-نتایج و بحث

دقت نتایج مدل‌های عددی برای برآورد مخروط افتِ حریم تأثیر و نیز برآورد پلان حریم آبگیر که معادل حریم تغذیه هم هست قبلاً اثبات شده است (Ahmadi et al., 2022, 2023). لازم به ذکر است که برای افزایش دقت می‌بایست شبکه‌بندی، گام‌های زمانی و تعداد ذرات ردیاب به‌گونه‌ای انتخاب شوند که با ریزسازیِ بیشتر آن‌ها، تغییر محسوسی در موقعیت مخروط افتِ حریم تأثیر و در موقعیت پلانِ حریم آبگیر ایجاد نشود. پس از اطمینان از دقت خروجی‌های مدل، در ادامه نتایج اثر پارامترها و مناطق مختلف محتمل مؤثر بر حریم حفاظت کمّی ازجمله مقدار تغذیه، مقدار تخلیه، زمان پمپاژ، حریم تأثیر، حریم آبگیر و غیره استخراج شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است:

۳-۱- بررسی اثر تغذیه و تخلیه بر سطح تراز آب در آبخوان

سطح تراز نرمال آب در هر آبخوان سطح ترازی در آبخوان است که قبل از فعالیت هرگونه منبع تخلیه کننده‌ی مصنوعی ازجمله چاه، در آبخوان شکل گرفته باشد. برای شبیه‌سازی اثر چاه بر آبخوان، استخراج این سطح تراز و اعمال آن به‌عنوان سطح آب اولیه لازم و ضروری است. موقعیت این سطح آب نرمال در هر شرایطی تابع مقدار تغذیه و مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان است (Ahmadi et al., 2022). در آبخوان مورد مطالعه برای مقادیر مختلف تغذیه‌ی سطحی و پس از رسیدن به حالت پایدار، سطح آب نرمال شبیه‌سازی شده و نتایج در شکل۲ نشان داده شده است.



شکل۲- سطح تراز نرمال و غیر نرمال آب در آبخوان برای مقادیر مختلف تغذیه و تخلیه. تغذیه به‌صورت سطحی و تخلیه معادل عمق برداشت از طریق چاه‌های پراکنده در آبخوان است. Re و Di به ترتیب معرف تغذیه و تخلیه هستند.

Fig 2. Normal and abnormal level of water in the aquifer for different amounts of recharge and discharge. Surface recharge and discharge is equivalent to the extraction depth through scattered wells in the aquifer. Re and Di represent recharge and discharge respectively.

همچنان که مشاهده می‌شود سطح آب نرمال در مقدار تغذیه‌ی بیشتر، بالاتر از مقدار تغذیه‌ی کمتر است و علت آن ایجاد شیب هیدرولیکی بیشتر برای تخلیه‌ی طبیعی حجم آب تغذیه‌شده در آبخوان است. در شرایطی که بخشی از تغذیه با استفاده از چاه‌های پراکنده شده در آبخوان استخراج شود، سطح آب غیر نرمالی که در آبخوان تشکیل می‌شود، پایین‌تر از سطح آب نرمال برای همان تغذیه بوده و معادل سطح آب نرمالی خواهد شد که به ازای مقداری از تغذیه تشکیل می‌شود که برابر با اختلاف مقدار تغذیه‌ی اعمال‌شده به آبخوان و مقدار تخلیه از طریق چاه‌ها است. همچنان که در شکل۲ مشاهده می‌شود سطح آب آبخوان در تغذیه‌ی ۲۴۰ میلی‌متری که از طریق چاه‌های موجود در آن معادل ۸۰ میلی‌متر از تغذیه‌ی آن تخلیه شده باشد، معادل سطح تراز نرمال آب در مقدار تغذیه‌ی ۱۶۰ میلی‌متری است که مقدار برداشت از طریق چاه در آن صفر بوده است.

۳-۲- بررسی اثر تغذیه و تخلیه بر حریم تأثیر و مخروط افت در سیستم تک‌چاهی و چندچاهی

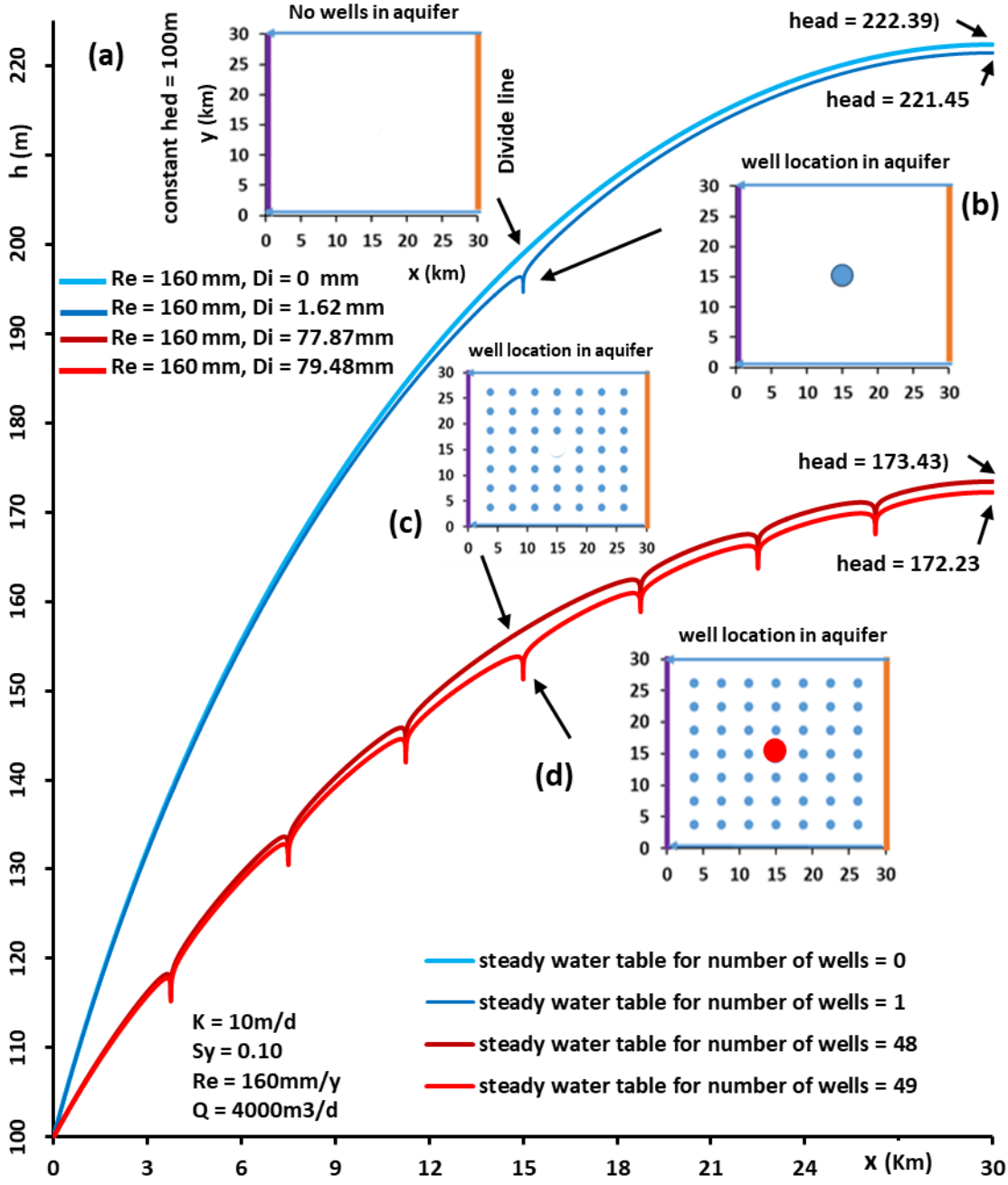
تا زمانی که چاهی در آبخوان فعال نشده باشد، سطح آب در آبخوان در حالت نرمال خواهد بود. اگر در آبخوان یک یا چند چاه فعال شود به‌تدریج سطح تراز آب در آبخوان افت کرده و نهایتاً پس از یک مدت نسبتاً طولانی به یک سطح تراز پایدار جدیدی می‌رسد که دیگر نمی‌توان به آن سطح نرمال گفت. هر سطح تراز جدید نسبت به سطح تراز قبل از خود مقداری افت دارد که در اطراف چاه‌های جدید این افت بیشتر است و درواقع معرف یک مخروط افت است. برای آبخوان مورد مطالعه در شکل۱ به ازای ۱۶۰ میلی‌متر تغذیه‌ی سطحی، در حالت‌های مختلف سطح تراز آب در شکل۳ نشان داده شده است. شکل۳ قسمت a معرف سطح تراز نرمال برای ۱۶۰ میلی‌متر تغذیه و بدون اعمال چاه یا به عبارتی با مقدار تخلیه‌ی صفر است. شکل۳ قسمت b معرف سطح تراز برای ۱۶۰ میلی‌متر تغذیه و با اعمال یک چاه در مرکز آبخوان با دبی ۴۰۰۰ مترمکعب در روز است که معادل با مقدار تخلیه‌ای معادل ۱/۶۲ میلی‌متر در سطح کل آبخوان است. شکل۳ قسمت c معرف سطح تراز برای ۱۶۰ میلی‌متر تغذیه و با اعمال ۴۸ چاه با دبی ۴۰۰۰ مترمکعب در روز است که به‌طور مناسب در کل آبخوان پراکنده شده‌اند و تخلیه‌ی آن‌ها معادل ۷۷/۸۷ میلی‌متر است. در سیستم ۴۸ چاهی در موقعیت مرکز آبخوان چاهی اعمال نشده‌است تا بتوان مخروط افت چاه مرکزی را در حالت چند چاهی استخراج کرده و با حالت تک چاهی مقایسه کرد. شکل۳ قسمت d معرف سطح تراز برای ۱۶۰ میلی‌متر تغذیه و با اعمال ۴۹ چاه با دبی ۴۰۰۰ مترمکعب در روز است که به‌طور مناسب در کل آبخوان پراکنده شده‌اند و تخلیه‌ی آن‌ها معادل ۷۹/۴۸ میلی‌متر است و در این حالت چاه مرکزی آبخوان فعال بوده است. از مقایسه‌ی شکل۳ قسمت a و شکل۳ قسمت b مخروط افت چاه در این آبخوان در سیستم تک‌چاهی و از مقایسه‌ی شکل۳ قسمت c و شکل۳ قسمت d مخروط افت چاه در این آبخوان در سیستم چندچاهی استخراج شده و در شکل۴ نشان داده شده است. همچنان که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، مخروط افت دو نوع است؛ مخروط اول حاصل تفاضل سطح آب قبل از فعالیت چاه و بعد از فعالیت چاه است و با نام مخروط افت نظری یا ظاهری قابل‌ذکر است چراکه قابل مشاهده نیست. این مخروط افت با ترسیم منحنی‌های هم‌افت نمایش داده می‌شود (شکل۴).

مخروط دوم حاصل تفاضل سطح تراز آب قبل از فعالیت چاه و مقدار افت ناشی از چاه است و با نام مخروط افت حقیقی قابل ذکر است چراکه قابل‌مشاهده است. این مخروط افت با ترسیم منحنی‌های هم‌تراز نشان داده می‌شود (شکل۵).

متأسفانه محدودیت‌ها در سنجش و نمایش باعث شده است که پس از چند روز پمپاژ از یک چاه، مخروط افت آن تقریباً تثبیت‌شده در نظر گرفته شود، اما همچنان که در شکل۳ مشاهده می‌شود در شرایط پایدار که پس از یک زمان خیلی طولانی حاصل شده است، سطح آب در بالادستِ آبخوانی با این وسعتِ زیاد، فقط براثر ایجاد یک چاه در مرکز آن حدود یک متر در هر دو سیستم تک‌چاهی و چندچاهی کاهش یافته است (زمان رسیدن به پایداری در بخش بررسی اثر زمان توضیح داده شده است). مقدار افت در سیستم چندچاهی همچنان که در شکل۳ و در شکل۴ قابل‌مشاهده است، مقداری بیشتر از سیستم تک چاهی است و دلیل آن کاهش ضخامت آبخوان در سیستم چندچاهی است.

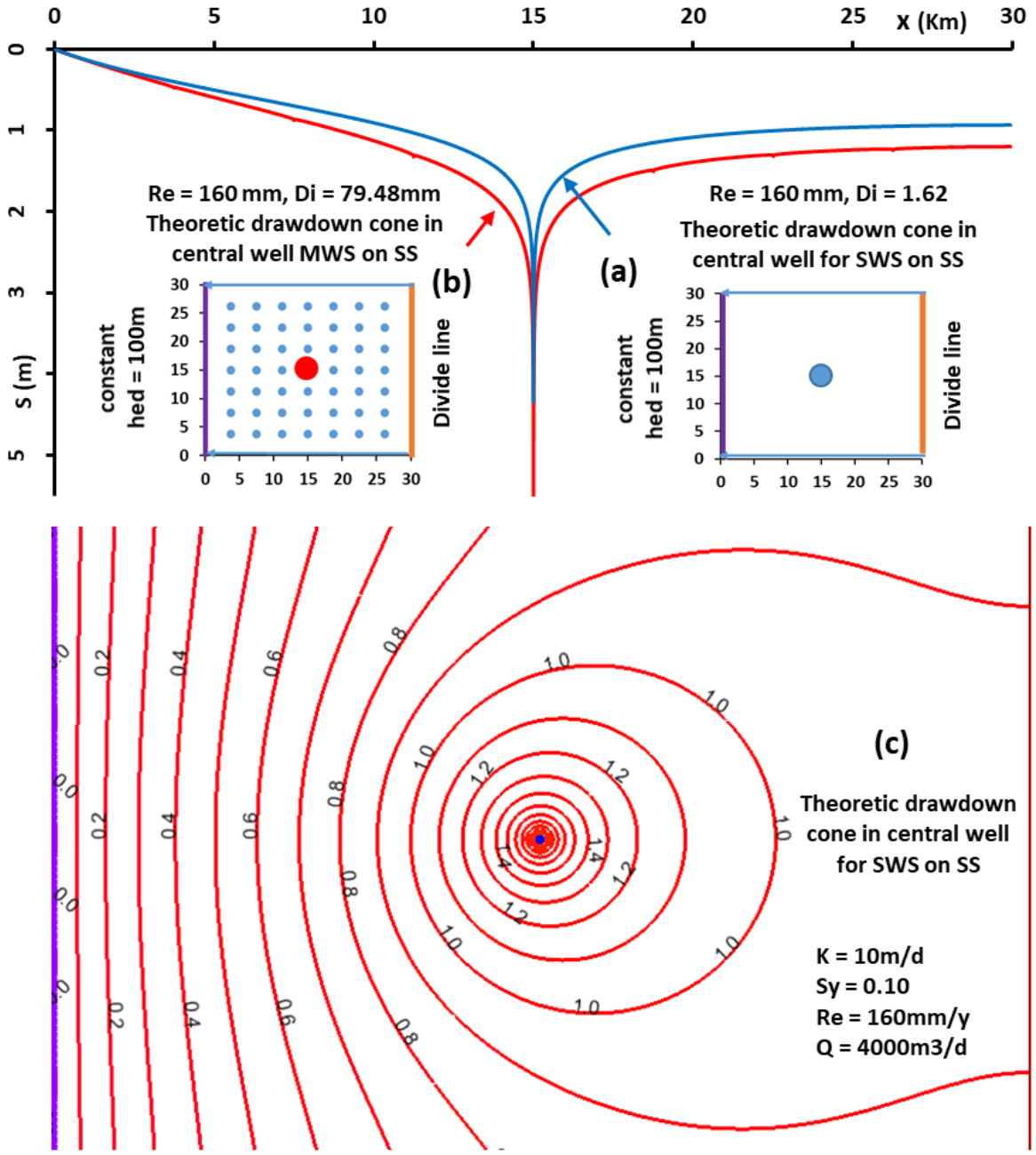
متأسفانه عدم توجه به سطح آب نرمال و از طرفی توجه و اعتماد بیش‌ازحد به مخروط افت باعث درک نادرستی از اثرات واقعی چاه بر آبخوان شده و موجبات برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها شده است. مقایسه‌ی مخروط افت چاه واقع در مرکز آبخوان در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان می‌دهد که مخروط افتِ چاهِ واقع در مرکز آبخوان در سیستم‌های تک‌چاهی و چندچاهی اختلاف چندانی باهم ندارند، اما در سیستم تک چاهی سطح آب نرمال در مرز بالادست آبخوان حدود ۱ متر کاهش یافته ولی در سیستم چندچاهی نهایتاً سطح آب نرمال در بالادست آبخوان حدود ۵۰ متر کاهش یافته است. افتِ ۵۰ متری در بالادست آبخوان در سیستم چندچاهی حاصل فعالیت ۴۹ چاه با دبی ۴۰۰۰ مترمکعب در روز است که در ۳۶۵ روز از سال فعالیت داشته‌اند و چاه واقع در مرکز آبخوان یکی از آن‌ها است. این مقدار برداشت معادل حدود ۸۰ میلی‌متر تخلیه از مقدار تغذیه‌ی ۱۶۰ میلی‌متری در سال است. طبیعی است با توجه به شکل۳ هرچه نسبت تخلیه به تغذیه بیشتر شود افت سطح آب نرمال بیشتر شده و درنهایت اگر تخلیه از طریق چاه با مقدار تغذیه در آبخوان نزدیک شود سطح تراز آب در آبخوان به سطح تراز آب در رودخانه نزدیک شده و زهکشی به رودخانه متوقف می‌شود. طبیعتاً چنین وضعیتی موجب افت بسیار زیاد سطح

تراز و ایجاد پدیده‌ی فرونشست و آسیب جدی بر آبخوان خواهد شد.



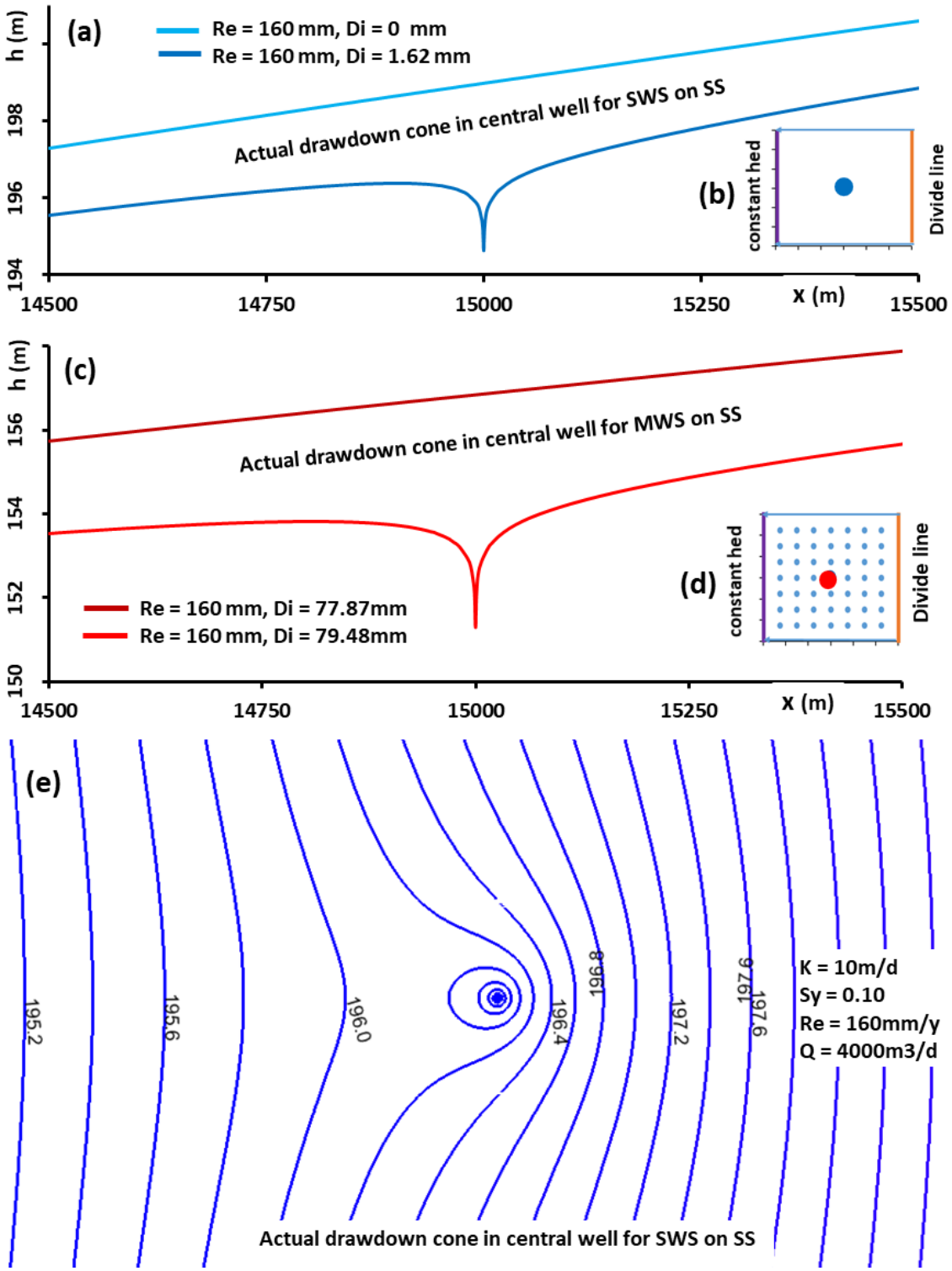
شکل ۳- پروفیل سطح آب در عرض ۱۵ کیلومتر و نمایش مخروط افت چاه مرکزی آبخوان در سیستم تک‌چاهی و چندچاهی پس از رسیدن به حالت پایدار ((a) سطح نرمال آب در آبخوان بدون چاه، (b) سطح غیر نرمال آب در آبخوان برای اعمال فقط یک چاه در مرکز آبخوان، (c) سطح غیر نرمال آب در آبخوان پس از اعمال ۴۸ چاه در قسمت‌های مختلف آبخوان غیر از مرکز آبخوان و (d) سطح غیر نرمال آب در آبخوان پس از اعمال ۴۹ چاه در قسمت‌های مختلف آبخوان و در مرکز آبخوان).

Fig 3. Water level profile within 15 km and showing the drawdown cone of the central well of the aquifer in the single-well and multi-well system after reaching the steady state ((a) Normal water level in an aquifer without a well, (b) Abnormal water level in the aquifer for applying only one well in the center of the aquifer, (c) Abnormal water level in the aquifer after applying 48 wells in different parts of the aquifer other than the center of the aquifer and (d) Abnormal water level in the aquifer after 49 wells were applied in different parts of the aquifer and in the center of the aquifer).



شکل۴- مخروط افت ظاهری یا تئوریک چاه مرکزی آبخوان پس از رسیدن به حالت پایدار((a) پرفیل مخروط افت در سیستم تک‌چاهی، (b) پرفیل مخروط افت در سیستم چندچاهی و (c) منحنی‌های هم‌افت معرف مخروط افت ظاهری).

Fig 4. The apparent or theoretic drawdown cone of the central well of the aquifer after reaching the steady state, ((a) Drawdown cone profile in single well system, (b) Drawdown cone profile in multi-well system and (c) Drawdown contour lines representative of the theoretic drawdown cone).

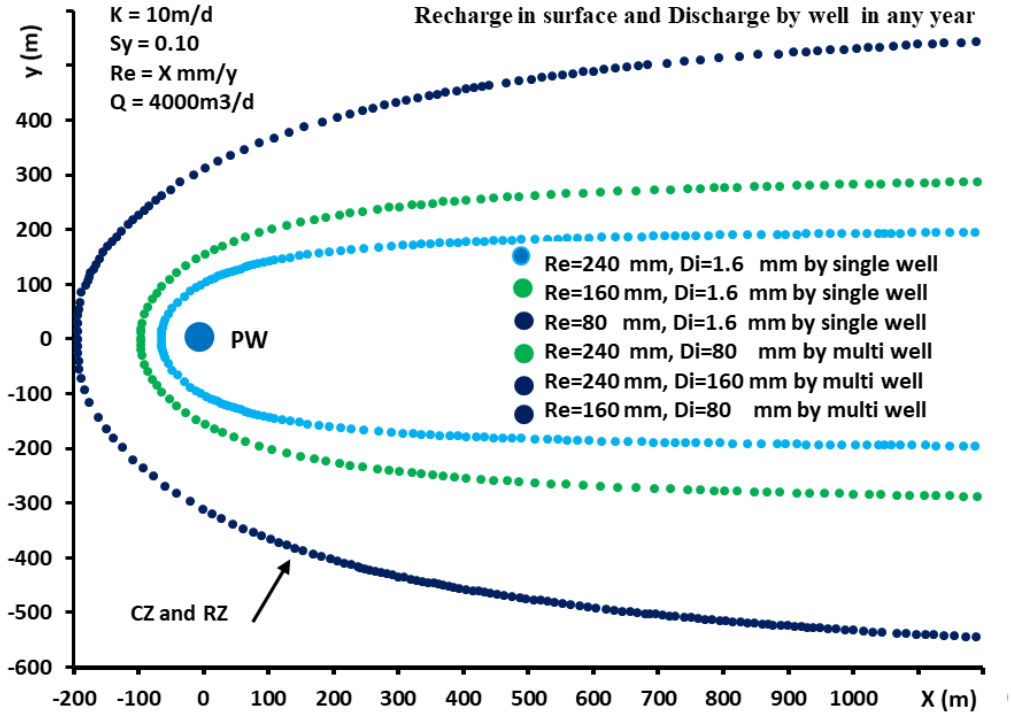


شکل ۵- مخروط افت حقیقی یا قابل دید چاه مرکزی آبخوان پس از رسیدن به حالت پایدار ((a) پرفیل مخروط افت در سیستم تک‌چاهی، (c) پرفیل مخروط افت در سیستم چندچاهی، (e) منحنی‌های هم‌تراز معرف مخروط افت حقیقی، (b) و (d) موقعیت چاه مرکزی را نشان می‌دهند).

Fig 5. The actual or visible drawdown cone of the central well of the aquifer after reaching steady state ((a) Drawdown cone profile in a single-well system, (c) Drawdown cone profile in a multi-well system, (e) Head contour lines representing the actual drawdown cone, (b) and (d) show the location of the central well).

۳-۳- بررسی اثر تغذیه و تخلیه بر حریم آبگیر و حریم تغذیه در سیستم تک‌چاهی و چندچاهی

حریم آبگیر در پلان و حریم تغذیه در آبخوان آزاد بر هم منطبق هستند و وسعت آن‌ها برای هر چاه در هرجای آبخوان عمدتاً تابع قابلیت انتقال واقعی آبخوان است (حاصل‌ضرب هدایت هیدرولیکی و ضخامت و گرادیان هیدرولیکی (q=kbi) و چون در نزدیک مرز حوضه در بالادست آبخوان شیب هیدرولیکی کم است، لذا وسعت این مناطق در بالادست آبخوان بیشتر از پایین‌دست آبخوان است (Ahmadi et al., 2022). در شکل۶ حریم آبگیر برای چاه واقع در مرکز آبخوانِ مورد مطالعه در شکل۱ به ازای مقادیر مختلف تغذیه و تخلیه در سیستم‌های تک‌چاهی و چندچاهی نشان داده شده است. در سیستم تک‌چاهی فقط یک چاه در مرکز آبخوان با دبی ۴۰۰۰ مترمکعب در روز اعمال شده است که مقدار تخلیه‌ی آن معادل ۱/۶۲ میلی‌متر از تغذیه در سطح کل آبخوان است. در سیستم چندچاهی حریم آبگیر چاه مرکزی برای حالتی استخراج شده است که علاوه بر چاه مرکزی تعداد زیادی چاه در نقاط دیگری از آبخوان به‌گونه‌ای پراکنده شده‌اند که فاصله مناسبی از هم داشته باشند. همچنان که در شکل۶ مشاهده می‌شود با کاهش تغذیه در سیستم تک‌چاهی یا با افزایش نسبت تخلیه به تغذیه در سیستم چندچاهی به‌شدت وسعت حریم آبگیر افزایش یافته است. بررسی اثر تغذیه و تخلیه بر حریم آبگیر نشان می‌دهد که وسعت این منطقه در اطراف چاه، پارامتر نسبتاً ثابتی نیست و به‌شدت با کاهش تغذیه و یا با افزایش نسبت تخلیه به تغذیه گسترش یافته و خطوط جریان مناطق دورتری از اطراف چاه را به سمت چاه منحرف می‌کند. موضوع قابل‌توجه این است که هرگونه افزایش بهره‌برداری از آبخوان با حفر چاه جدید یا با افزایش برداشت چاه‌های قدیمی باعث کاهش بیشتر سطح آب در آبخوان نسبت به حالت نرمال شده و زمان رسیدن به سطح پایدار جدید معمولاً بسیار طولانی است و این بدان معنی است که در این صورت حریم آبگیر مدام در حال گسترش است تا اینکه پس از یک مدت طولانی به حالت پایدار می‌رسد. البته لازم به ذکر است همچنان که در بحث بررسی اثر زمان گفته می‌شود، زمان رسیدن حریم آبگیر به حالت پایدار نسبتاً کمتر از زمان رسیدن حریم تأثیر به حالت پایدار است.



شکل ۶- حریم آبگیر در مجاورت چاه مرکزی آبخوان پس از رسیدن به حالت پایدار در سیستم تک‌چاهی و چندچاهی در مقادیر مختلف تغذیه و تخلیه.

Fig 6. The capture zone in the vicinity of the central well of the aquifer after reaching a steady state in the single-well and multi-well system in different amounts of recharge and discharge.

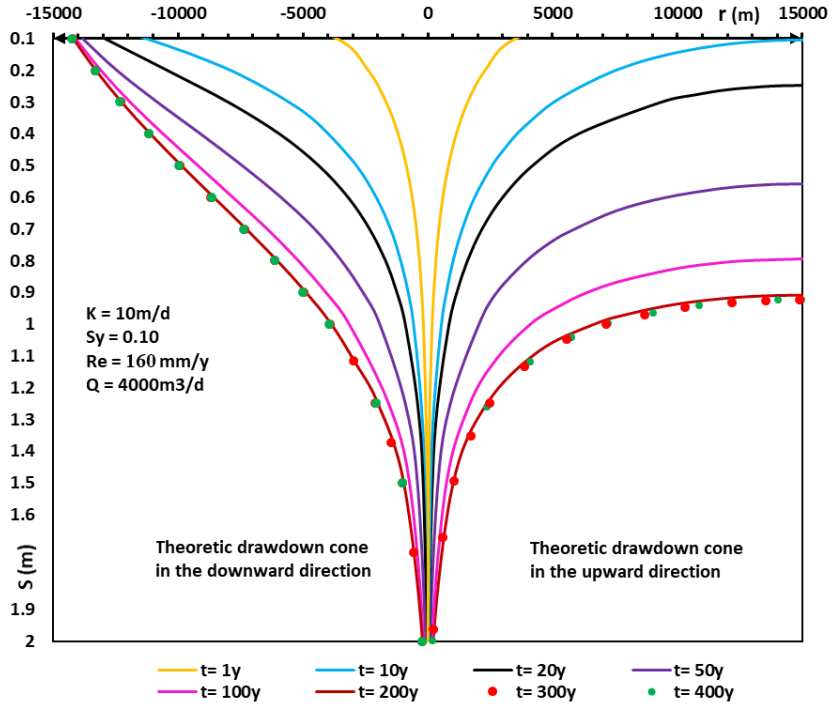
۳-۴- بررسی اثر زمان بر حریم تأثیر و مخروط افت در سیستم‌های تک‌چاهی و چندچاهی

در آبخوان‌های آزاد همانند آبخوان مورد مطالعه در شکل۱ با توجه به مخروط‌های افت نمایش داده شده در شکل‌های ۳ تا ۵ عمدتاً شیب هیدرولیکی در آبخوان قابل توجه بوده و لذا مخروط افت متقارن نیست. گرچه برای زمان‌های اندک در حد زمان چندروزه در آزمایش پمپاژ ممکن است بتوان از شیب سطح آب صرف‌نظر کرده و ضخامت آبخوان در اطراف چاه را یکسان در نظر گرفت، اما برای زمان‌های طولانی چندین ساله برای رسیدن به شرایط پایدار، نمی‌توان از شیب سطح آب صرف‌نظر کرد و لذا مخروط افت محاسبه شده نامتقارن خواهد بود. در آبخوان آزاد معمولاً همانند شکل۱ نهایتاً آبخوان از یک طرف به یک مرز آبی و از طرف دیگر به خط تقسیم آب ختم می‌شود. در این صورت برای هر چاه واقع در این آبخوان نهایتاً مخروط افت پس از مدتی طولانی که به مشخصات آبخوان و چاه بستگی دارد به مرزها خواهد رسید و درواقع کل آبخوان حریم تأثیر چاه خواهد شد. پس از رسیدن مخروط افت به مرزها، نحوه‌ی گسترش عمقی آن در مرز به نوع مرز بستگی دارد و گسترش عمقی مخروط افت در جهت مرز آبی کمتر و گسترش عمقی مخروط افت در جهت مرز بدون جریانِ خط تقسیم بیشتر است. حریم تأثیر معمولاً با دو مشخصه معرفی می‌شود که یکی برش عرضی یا پروفیل افت در اطراف چاه است و از آن به مخروط افت یاد می‌شود و دیگری شعاع تأثیر یا فاصله‌ی چاه از پلان منحنی‌های هم افت است. محاسبه و ترسیم حریم تأثیر چه در برش و چه در پلان نیازمند تعیین دو معیار اساسی است که یکی معیار زمان و دیگری معیار افت است. طبیعتاً هرچه زمان پمپاژ کمتر در نظر گرفته شود مخروط افت چاه کوچک‌تر خواهد بود و هرچه افتِ معیار بیشتر در نظر گرفته شود شعاع تأثیر آن کوچک‌تر خواهد شد. ازنظر زمانِ معیار در مدیریت آبخوان، می‌بایست اثر هر چاه بر آبخوان تا رسیدن به حالت پایدار در نظر گرفته شود (که زمانی نسبتاً طولانی خواهد بود)، چراکه در غیر این صورت بررسی اثر چاه در زمان‌های کم موجب می‌شود که اثر چاه بر آبخوان به صورتی غیرواقعی و ناچیز برآورد شده و موجب مدیریت نادرست شود. در مورد افت معیار، مبنای مشخصی وجود ندارد چراکه محدودیت ما در سنجش و نمایش مانع اندازه‌گیری و نمایش شعاع تأثیر درافت‌های خیلی کم می‌شود و اساساً شعاع تأثیر پشتوانه‌ی استواری برای مدیریت آبخوان ندارد. البته شعاع تأثیر در پروژه‌های مهندسی برای کاهش سطح آب در زمان اجرای پروژه، موضوع ویژه‌ی دیگری است و در آن مورد افت معیار معمولاً عمق پی در نظر گرفته می‌شود.

در شکل۷ مخروط افت نظری چاهِ واقع در مرکز آبخوان در سیستم تک‌چاهی با دبی ۴۰۰۰ مترمکعب بر روز برای زمان‌های مختلفِ پمپاژ نشان داده شده است. همچنان که دیده می‌شود مخروط افت برای افت ۰/۱ متر یا ۱۰ سانتیمتری پس از ۱ سال به شعاع حدود ۴۰۰۰ متری از چاه رسیده است. طبیعتاً شعاع تأثیر افت‌های کمتر خیلی بیشتر از این مقدار خواهد بود. همچنان که مشاهده می‌شود، افتِ ۱۰ سانتیمتری پس از ۱۰ سال به مرز بالادست رسیده است. اگرچه بررسی افت‌های روزانه در چاه ممکن است در همان سال‌های اولیه رسیدن به پایداری را تداعی کند، اما بررسی افت‌های بلندمدت در فواصل دورتر از چاه نشان داده است که فقط همین یک چاه تا حدود ۳۰۰ سال می‌تواند باعث گسترش مخروط افت گردد. لازم به ذکر است که امکان نمایش مخروط افت حقیقی در این حالت وجود ندارد، چراکه عمق مخروط افت نسبت به اختلاف تراز کل آبخوان از مرز بالادست تا مرز پایین‌دست ناچیز بوده و با مقیاس مناسبی نمی‌توان آن را به‌خوبی نمایش داد. مخروط افت چاه مرکزیِ آبخوان در سیستم چندچاهی نیز همانند شکل۷ بوده و تفاوت چندانی با آن ندارد، در سیستم چندچاهی به دلیل افت ناشی از کل چاه‌ها در آبخوان، ضخامت اشباع کاهش یافته و مقداری باعث گسترش مخروط افت هر چاه نسبت به حالت تک‌چاهی می‌شود که این موضوع را می‌توان در شکل۱ مشاهده کرد.

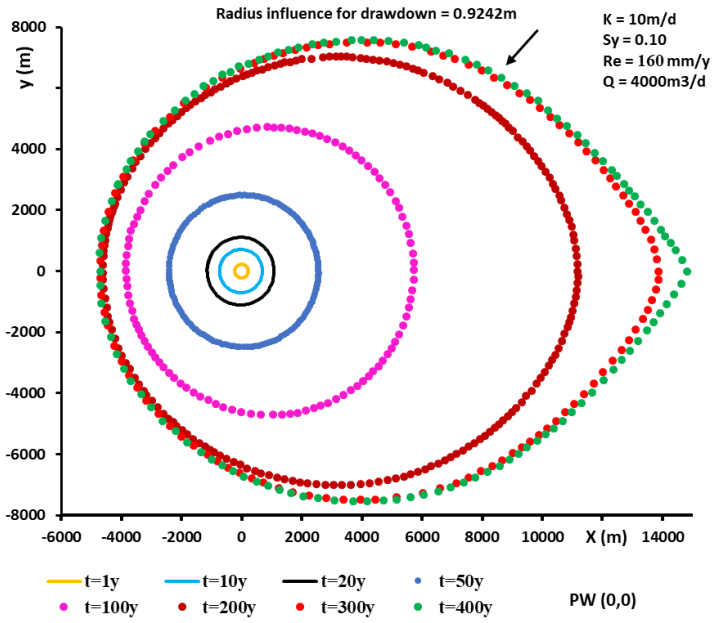
برای هر مقدار افتِ معیار، منحنی‌های هم افت شعاع تأثیر را می‌توان در پلان نشان داد. در شکل۸ پلان شعاع تأثیر چاه مرکزی آبخوان در سیستم تک‌چاهی برای حداکثر افتِ ایجاد شده در مرز تقسیم یعنی افتِ ۰/۹۲۴۲ متری برای هر زمان پمپاژ نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود، در بلندمدت اثر این یک چاه بر سطح تراز آب در آبخوان به‌اندازه‌ای زیاد است که توانسته است در بالادست آبخوان در فاصله‌ی ۱۵ کیلومتری از چاه این مقدار افت را ایجاد کند. طبیعی است که اگر افت موردنظر کمتر و در حد ۱ سانتیمتر یا ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شد، شعاع تأثیر این افت‌های کم در زمان‌های خیلی کمتری به مرز بالادست می‌رسید. شعاع تأثیر چاه مرکزی آبخوان در سیستم چندچاهی نیز همانند شکل۸ بوده و تفاوت

چندانی با آن ندارد، در سیستم چندچاهی به دلیل افت ناشی از کل چاه‌ها در آبخوان، ضخامت اشباع کاهش یافته و مقداری باعث گسترش مخروط افت هر چاه نسبت به حالت تک‌چاهی می‌شود که این موضوع را می‌توان در شکل۱ مشاهده کرد.



شکل ۷- پروفیل مخروط‌های افت تئوریک چاه مرکزی آبخوان در سیستم تک چاهی برای زمانهای مختلف پمپاژ تا زمان رسیدن به حالت پایدار.

Fig 7. The profile of the theoretical drawdown cones of the central well in the single well system for different pumping times until reaching the steady state.



شکل ۸- شعاع تاثیر چاه مرکزی آبخوان برای افت ۰/۹۲۴۲ متری در سیستم تک چاهی برای زمانهای مختلف پمپاژ تا زمان رسیدن به حالت پایدار.

Fig 8. The radius of influence of the central well of the aquifer for a drawdown of 0.9242 meters in a single well system for different pumping times until reaching a steady state.

۳-۵- بررسی اثر زمان بر حریم آبگیر و حریم تغذیه در سیستم‌های تک‌چاهی و چندچاهی

حریم آبگیر و تغذیه برای چاه‌های آب در موضوع حفاظت از چاه خصوصاً در مورد حریم حفاظت کیفی اهمیت ویژه‌ای دارد. در مورد حریم حفاظت کمّی برآورد مقدار تغذیه به‌منظور ایجاد تعادل بین تغذیه و تخلیه نیازمند مشخص شدن حریم آبگیر و تغذیه است. به‌منظور استخراج اثر زمان پمپاژ بر حریم‌های مذکور در آبخوان موردمطالعه با هدایت هیدرولیکی ۱۰ متر بر روز، آبدهی ویژه ۰/۱۰ و تغذیه‌ی سطحی ۱۶۰ میلی‌متر در سال، برای چاه مرکزی آبخوان با دبی ۴۰۰۰ متر مکعب در روز هم در سیستم تک‌چاهی و هم در سیستم چندچاهی شبیه‌سازی انجام شده و نتیجه در شکل۹ نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود در سیستم تک‌چاهی با شروع فعالیت چاه، خطوط جریان نزدیک چاه به سمت آن منحرف شده و آب چاه را تأمین می‌کنند، با ادامه‌ی فعالیت چاه خطوط جریان مناطق دورتر به سمت چاه منحرف می‌شوند و حریم آبگیر و تغذیه بزرگ‌تر می‌شود. اما پس از مدت کوتاهی که بستگی به مقدار تغذیه‌ی سطحی دارد، رشد حریم‌های مذکور متوقف شده و در یک سطح مشخصی تثبیت می‌شود. توقف گسترش حریم آبگیر و تغذیه در حالی رخ می‌دهد که همچنان که در بخش بررسی مخروط افت بیان شد، مخروط افت چاه همچنان در حال گسترش است و حدود ۳۰۰ سال طول می‌کشد تا به تثبیت برسد. این نتایج نشان می‌دهد که گرچه حریم آبگیر براثر ایجاد مخروط افت ظاهر می‌شود، اما وابستگی حریم آبگیر به حریم تأثیر دائمی نیست و مدت مشخصی پس از پمپاژ گسترش آن متوقف شده و از گسترش مخروط افت تبعیت نمی‌کند.

همچنان که در شکل۹ قسمت a مشاهده می‌شود در سیستم تک چاهی و برای مقدار تغذیه‌ی ۱۶۰ میلیمتر در سال، حداکثر پس از ۱۰ روز پمپاژ، حریم آبگیر تثبیت شده و گسترش آن متوقف می‌شود. در تغذیه‌های بیشتر این مدت کمتر هم خواهد بود به‌گونه‌ای که در تغذیه‌ی ۳۲۰ میلیمتر در سال حریم آبگیر حداکثر پس از ۱ روز پمپاژ تثبیت می‌شود. در شکل۹ قسمت b چگونگی گسترش حریم آبگیر با افزایش زمان پمپاژ در سیستم چندچاهی نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود زمان پایداری حریم آبگیر به ۲۵۰ سال افزایش یافته است. علت آنکه در سیستم چندچاهی حریم آبگیر تا مدت خیلی بیشتری همچنان در حال گسترش است و پس از آن تثبیت می‌شود آن است که در این سیستم براثر فعالیت همزمان کل چاه‌های موجود در آبخوان سطح تراز نرمال آب در آبخوان تا مدت‌های طولانی در حال کاهش بوده و براثر کاهش تراز و نهایتاً کاهش ضخامت اشباع و گرادیان هیدرولیکی، مقدار قابلیت انتقال واقعی آبخوان یعنی مقدار q کاهش می‌یابد (q=kbi). این پدیده در شکل۳ قابل روئیت است. لازم به ذکر است که در حالت چندچاهی نیز، زمان رسیدن به پایداری در حریم آبگیر خیلی کمتر از زمان رسیدن به پایداری در مخروط افت است. از نتایج نشان داده شده در شکل۹ می‌توان استنباط کرد که تصمیم‌گیری در مورد حریم حفاظت از چاه می‌بایست بر اساس نتایج حاصل از شرایط پایدار در آبخوان انجام شود، چراکه در زمانهای کمتر از زمان رسیدن به پایداری، حریم‌های مرتبط با حفاظت از چاه واقعی نبوده و گسترش آن‌ها کمتر از اندازه‌های واقعی است.

۳-۶- بررسی نقش حریم تأثیر و مخروط افت در تعیین حریم حفاظت کمی چاه‌های آب

بررسی مخروط افت موید آن است که در آبخوان‌های آزاد شیب‌دار حریم تأثیر هر چاه نهایتاً به مرزهای فیزیکی خواهد رسید و فقط زمان رسیدن آن به مرزها در چاه‌های موجود در موقعیت‌های مختلف متفاوت است. از آنجایی که سطح آب در آبخوان فقط پس از رسیدن به شرایط پایدار جدید در یک تراز مشخص ثابت شده و فقط در دوره‌هایتر و خشک اندکی نوسان خواهد داشت، لذا لازم است در مدیریت از آبخوان، حریم تأثیر و مشخصه‌های آن یعنی مخروط افت و شعاع تأثیر فقط در شرایط پایدار مورد توجه قرار گیرد. در غیر این صورت با در نظر گرفت زمان معیار کم و افت معیار بالا، مخروط افتی حاصل خواهد شد که به مراتب از مخروط افت شرایط پایدار کوچکتر بوده و در این حالت اثر چاه بر آبخوان به صورتی غیر واقعی به گونه‌ای بسیار ناچیز جلوه داده شده و در مدیریت آبخوان گمراه کننده است.

بررسی اثر زمان بر مخروط افت و شعاع تاثیر نشان داد که در آبخوان‌های آزاد نهایتاً تاثیر هر چاه در آبخوان در نهایت کل آبخوان را در بر خواهد گرفت. بنابراین نمی‌توان حریم تاثیر را مبنایی برای فاصله‌گذاری بین چاه‌های آب دانست چراکه اگر حریم تاثیر مبنای فاصله‌گذاری بین چاه‌های آب باشد در هر آبخوان فقط یک چاه مجاز خواهد بود. از طرفی اگر شعاع تاثیر

برای افت‌های زیاد ملاک عمل قرار گیرد، اثر تداخل مخروط افت چاه‌های دورتر می‌تواند سطح تراز آب در آبخوان را در نهایت به مقدار خیلی زیادی کاهش دهد و موجب پدیده‌ی فرو نشست گردد. همچنانکه در شکل۳ قسمت d نشان داده شده است فاصله‌ی چاه‌ها از هم حدود ۴۰۰۰ متر است و افت هر چاه در نصف این فاصله یعنی در شعاع ۲۰۰۰ متری حدود ۱ متر است. اگر حریم حفاظت کمّی هر چاه برای شعاع تاثیر ۱ متری تعریف شود، به این ترتیب دو چاه مجاور به مقدار ۴۰۰۰ متر از هم فاصله‌گذاری خواهند شد. اما همچنانکه در شکل۳ قسمت d نشان داده شده است اثر تداخل چاه‌ها باعث شده است که سطح تراز نرمال آب در آبخوان حدود ۵۰ متر در بالادست آبخوان افت داشته باشد. این مقدار افت زیاد می‌تواند خسارات جبران ناپذیری بر آبخوان ایجاد کند. بنابراین نمی‌توان بدون توجه به بحث بیلان و نسبت تخلیه به تغذیه و بدون توجه به پدیده فرونشست یک شعاع تاثیر را ملاکی برای فاصله گذاری بین چاه‌های آب دانست.

شکل۱۰ مخروط افت دو چاه و ترکیب مخروط افت آن‌ها را در آبخوان مورد مطالعه در موقعیت‌های مختلف نشان داده است. همچنانکه در شکل۱۰ قسمت a دیده می‌شود اگر در بحرانی ترین حالت دو چاه کاملاً در کنار هم و در مرکز آبخوان حفر شده باشند، مخروط افت این دو چاه با هم ترکیب شده و مخروط افت ترکیبی آن‌ها دو برابر عمیق‌تر می‌شود. در این حالت حداکثر افت آب در محل چاه‌ها حدود ۴/۵ متر است. این مقدار افت نسبت به ضخامت اشباع زیاد آبخوان مقدار قابل توجهی نیست و از نظر هیدرولیکی و هزینه پمپاژ، تغییر قابل توجهی برای هر چاه ایجاد نمی‌کند. در شکل۱۰ قسمت‌های b تا f دو چاه در موقعیتهای مختلف از هم فاصله داده شده‌اند و مشخص شده است که در هر حالت مخروط افت دو چاه و ترکیب آن‌ها چگونه است. در هر حالت افت ترکیبی آن‌ها کمتر از ۲/۵ متر حاصل شده است. افت ۲/۵ متر با افت ۴/۵ متر تفاوت قابل توجهی نسبت به ضخامت اشباع آبخوان نداشته و نمی‌توان از این طریق مبنایی برای حریم حفاظت کمّی و فاصله گذاری بین چاه‌های آب پیدا کرد.

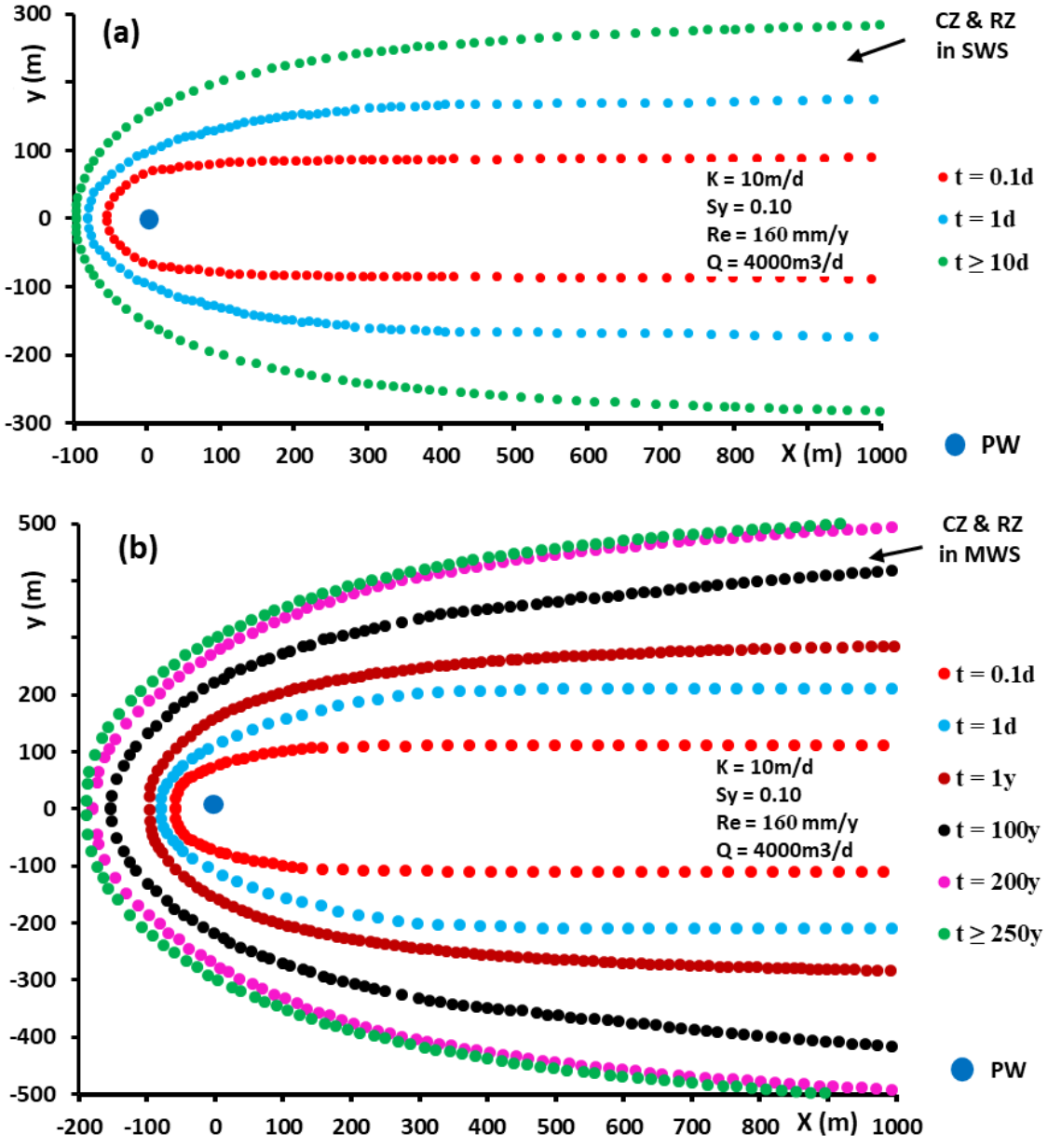
اگرچه از طریق شعاع تاثیر نمی‌توان به مبنای مناسبی برای تعیین حریم کمّی هر چاه دست یافت، اما شبیه‌سازی و استخراج سطح آب آبخوان برای چاه‌هایی که در موقعیت‌های مختلفی از آبخوان جانمایی شده‌اند لازم و ضروری است تا بتوان این سطح آب را با سطح آب نرمال مقایسه کرده و حداکثر افت تراز آبخوان را در هر شرایط برآورد کرد. سطح آب آبخوان پس از شبیه‌سازی چاه‌ها در واقع همان مخروط افت حقیقی مرکب چاه‌ها در آبخوان است. نهایتاً آنچه در این مورد اهمیت دارد مجموع افت کل چاه‌های موجود در آبخوان و اختلاف تراز سطح آب نهایی پس از پمپاژ در حالت پایدار و سطح آب نرمال است و آن هم نیازمند تعادل بین تغذیه و تخلیه و اختصاص درصد کمی از تغذیه به تخلیه از طریق چاه‌هایی است که به طور مناسب در آبخوان پراکنده شده باشند.

۳-۷- بررسی نقش حریم آبگیر و حریم تغذیه در تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب

در آبخوان‌های آبرفتی آزاد که دارای سطح آب شیب‌دار هستند، چون وسعت حریم آبگیر به شدت تابع تغذیه و تابع تنش‌های جدید نظیر افزایش چاه‌ها است، لذا حریم آبگیر متغیر است. در این آبخوان‌ها هرچاه از حریم آبگیر خود آب را دریافت می‌کند و اگر تعداد چاه‌ها کم باشد، حریم آبگیر هر چاه به صورت یک یا دو نوار باریک تا مرز تداوم یافته و بخش قابل توجهی از وسعت آبخوان بدون گسترش حریم آبگیر چاه‌ها باقی مانده و آب ذخیره شده در خود را به تدریج به پایین دست منتقل می‌کند. چون با افزایش تعداد چاه‌ها یا با کاهش تغذیه، موقعیت حریم آبگیر چاه‌های مجاور تغییر می‌کند، بنابراین نمی‌توان از حریم آبگیر به عنوان حریم حفاظت کمّی استفاده کرد.

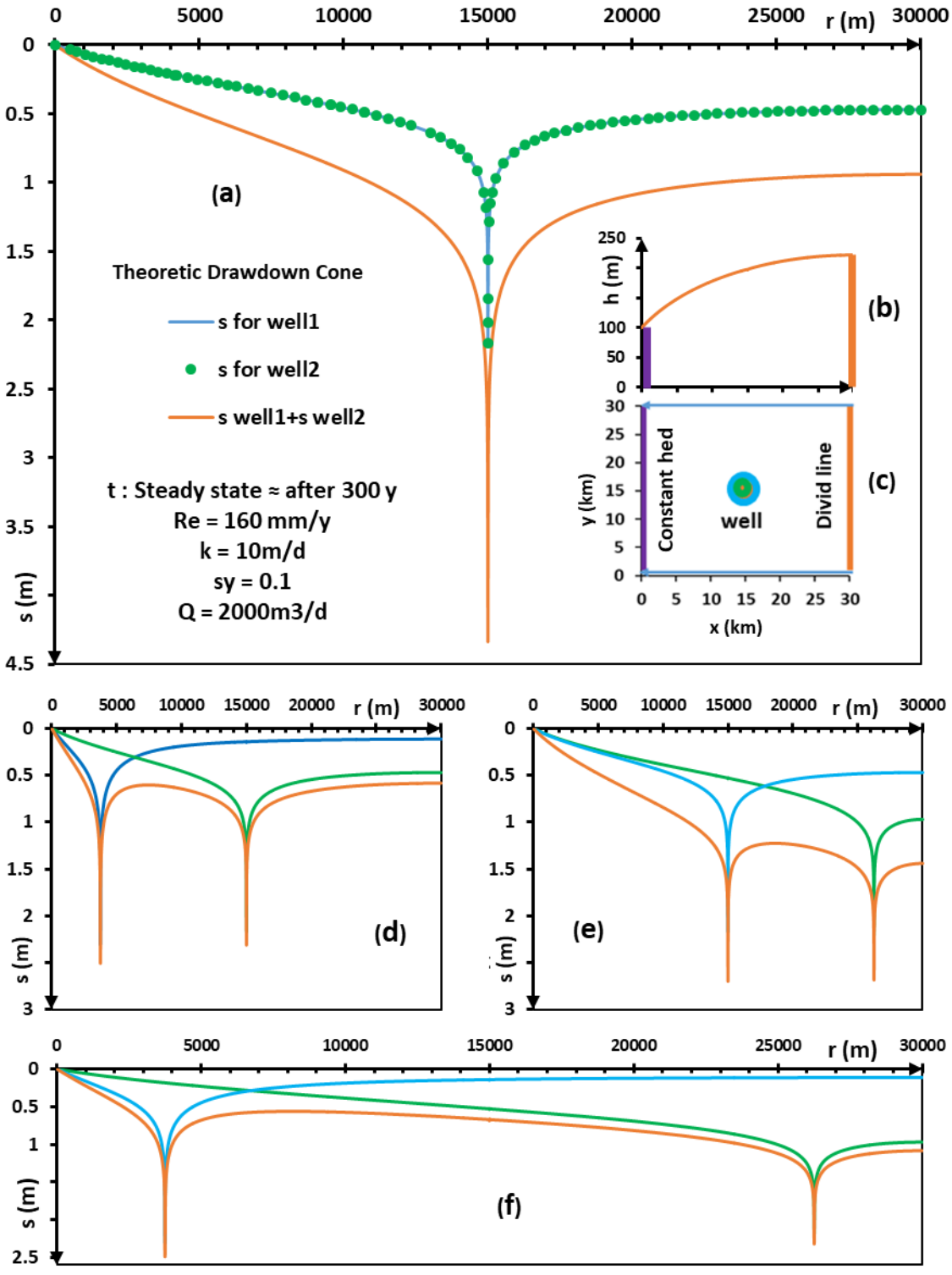
شکل۱۱ وضعیت متغیر حریم آبگیر یک چاه را در یک آبخوان آبرفتی آزاد نشان می‌دهد. همچنان که دیده می‌شود وقتی چاه شماره ۱ حفر می‌شود حریم آبگیر آن به‌صورت یک نوار باریک تا مرز بالادست ادامه پیدا می‌کند. اگر از این منطقه به‌عنوان حریم حفاظت کمّی استفاده شود، به این مفهوم است که دیگر نباید چاهی در آن حفر شود که این تصمیم پذیرفتنی نیست زیرا در این صورت در یک آبخوان، در جهت جریان از بالادست تا پایین‌دست فقط یک چاه مجوز خواهد گرفت. با حفر چاه شماره ۲ در بالادست چاه شماره ۱، بخشی از حریم آبگیر اولیه‌ی چاه شماره۱ به چاه شماره۲ اختصاص داده شده و حریم آبگیر جدید چاه شماره۱ به صورت دو نوار باریک در اطراف آن ظاهر می‌شود. این وضعیت به همین صورت با حفر چاه‌های جدید در بالادست چاه‌های قبلی ادامه می‌یابد. این توصیف به‌خوبی نشان می‌دهد که حریم آبگیر مبنای قابل اعتمادی برای تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب نیست ولی برای ایجاد

یک مدل مفهومی و درک شرایط واقعی آبخوان و برآورد حریم تغذیه برای مجموعه‌ای از چاه‌ها، برآورد آن در طول مطالعات آبخوان لازم و ضروری است. اگرچه حریم آبگیر به طور مستقیم نمی‌تواند مبنای مناسبی برای تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب باشد، اما چون حریم تغذیه در آبخوان آزاد منطبق بر پلانِ حریم آبگیر است، لذا برای برآورد مقدار تغذیه در هر بخش از آبخوان می‌بایست حریم آبگیر هر بخش از آبخوان با هر ترکیبی از جانمایی چاه‌ها مشخص شود.



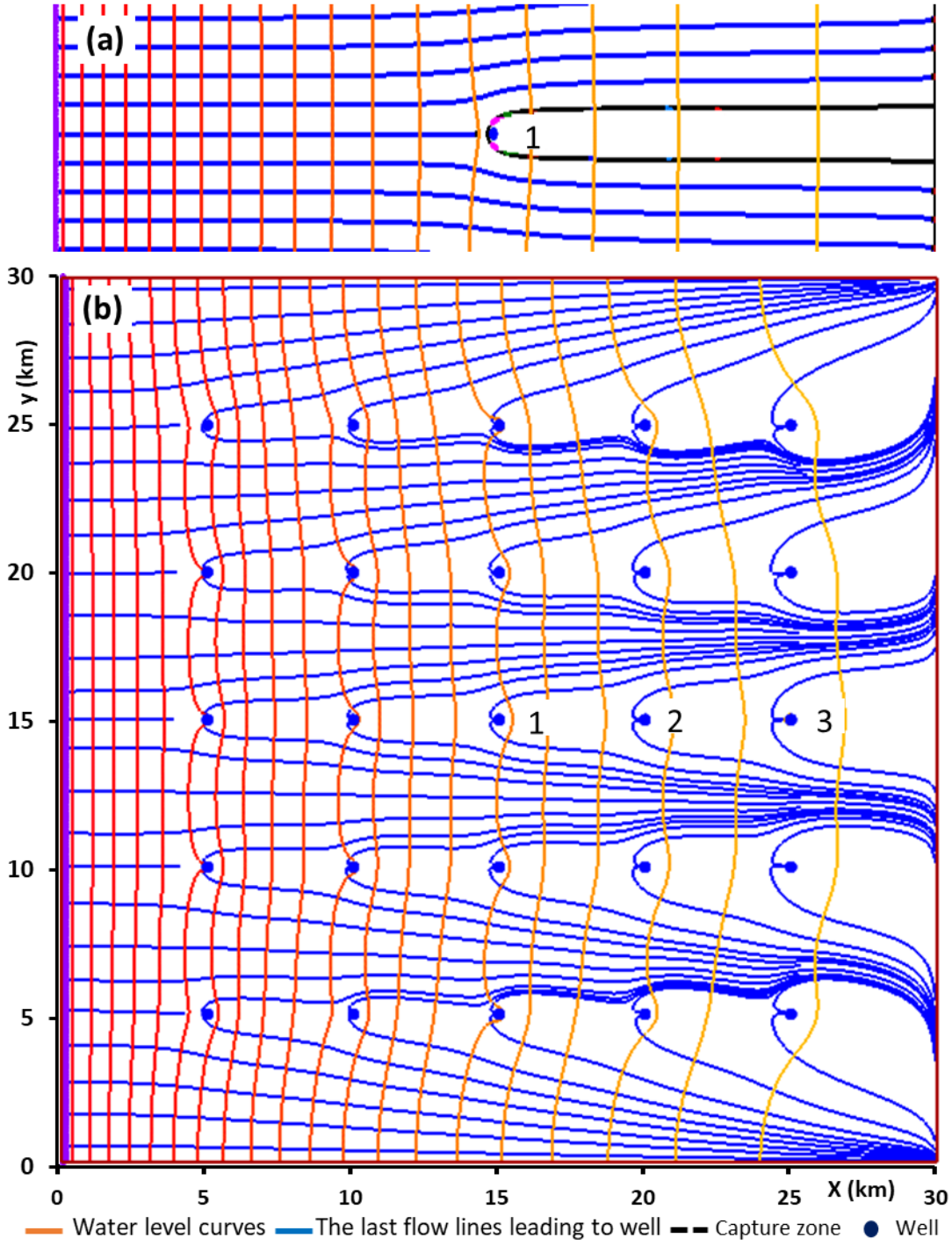
شکل ۹- گسترش حریم آبگیر چاه مرکزی آبخوان با افزایش زمان پمپاژ ((a) در سیستم تک‌چاهی و (b) در سیستم چندچاهی).

Fig 9. Expanding the capture zone of the central well of the aquifer by increasing the pumping time ((a) In single well system and (b) In multi-well system).



شکل ۱۰- نمایش بزرگی شعاع حریم تاثیر هر چاه و تداخل مخروط افت تئوریک دو چاه در عرض ۱۵ کیلومتری در موقعیت‌های مختلف پس از رسیدن به حالت پایدار ((b) سطح آب نرمال، (c) شرایط مرزی، (a)، (d)، (e) و (f) ترکیب مخروط‌های افت).

Fig 10. Showing the large size of the radius of influence zone in any well and the interference of the theoretical drawdown cone of two wells within latitude 15 kilometers in different situations after reaching steady state ((b) Normal water table, (c) Boundary conditions, (a), (d), (e) and (f) combination of drawdown cones).



شکل ۱۱- نمایش بزرگی و عدم قطعیت حریم آبگیر چاه ((a) حریم آبگیر چاه شماره ۱ در مرکز آبخوان در سیستم تک‌چاهی و (b) تغییر حریم آبگیر چاه شماره ۱ در مرکز آبخوان با حفر چاه‌هایی در بالادست آن در سیستم چندچاهی).

Fig 11. Showing the large size and uncertainty of the well capture zone ((a) Capture zone of well No. 1 in the center of the aquifer in a single-well system and (b) Changing the capture zone of well No. 1 in the center of the aquifer by drilling wells upstream of it in a multi-well system).

۳-۸- بررسی نقش تعادل تغذیه و تخلیه در تعیین حریم حفاظت کمی چاه‌های آب

یکی از مسائل مهم در تعیین حریم کمّی چاه‌های آب در آبخوان آبرفتی آزاد ایجاد توازن آبی در آبخوان است. بر این اساس، ایده‌آل آن است که حریم کمّی چاه را بخشی از مخروط افت در نظر گرفت که بتواند از طریق تغذیه از سطح، آبدهی سالانه چاه را تأمین کند. بنابراین از این نظر حریم کمّی چاه دایره‌ای به شعاع r و به مرکز چاه خواهد بود و از رابطه زیر قابل برآورد است:

$$V_w = V_{Re} \rightarrow Q * t = \pi r^2 Re \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

Vw و VRe به ترتیب حجم تخلیه‌ی چاه و حجم تغذیه از سطح، Q و t به ترتیب دبی و زمان پمپاژ، Re تغذیه سطحی و r شعاع حریم کمّی است. از این نظر اگر در یک آبخوان آبرفتی آزاد با سطح آب اولیه افقی که تا مرزهای بدون جریان تداوم دارد، تغذیه‌ی سطحی سالانه ۸۰ میلی‌متر، دبی چاه‌ها ۲۰۰۰ متر مکعب در روز و مدت پمپاژ در سال ۳۶۵ روز باشد، بر این اساس حریم حفاظت کمّی هر چاه دایره‌ای به شعاع تقریباً ۱۷۰۴ متر خواهد بود. این به آن معنی است که در این آبخوان در این فاصله هیچ تنش آبی جدیدی نباید وارد شود. مفهوم دقیق‌تر این عبارت آن است که اگر چاه‌های دیگری قرار است در اطراف این چاه حفر شوند باید آن‌ها هم حریم کمّی خود را حفظ کنند. به‌این‌ترتیب اگر دبی چاه‌ها برابر با ۲۰۰۰ متر مکعب در روز باشد، حداقل فاصله بین دو چاه ۲×۱۷۰۴ یعنی ۳۴۰۸ متر خواهد بود. به این ترتیب امکان حفر حدود ۹۸ چاه با مشخصات فوق در این آبخوان وجود دارد. لازم به ذکر است که با رعایت این مقدار فاصله بین چاه‌ها، هنوز هم مخروط‌های افت باهم تداخل دارند ولی ازنظر هیدرولیکی و با توجه به این فاصله‌ی زیاد، اثر تداخل باعث افزایش اندکی در افت هر دو چاه خواهد شد. اثر این افت اندک در ضخامت اشباع آبخوان، باعث کاهش اندکی از دبی واقعی چاه نسبت به دبی طراحی خواهد شد و اتفاقی اجتناب ناپذیر است. در شکل۱۲ قسمت b برای یک آبخوان آبرفتی آزاد با سطح آب اولیه افقی و با مشخصات معلوم موقعیت حریم حفاظت کمّی چند چاه بر این اساس نشان‌داده شده است. آبخوان آزاد با سطح آب افقی در طبیعت به ندرت وجود دارد، اما می‌توان یک آبخوان را تصور کرد که خروجی طبیعی نداشته و چاه‌ها به طور مناسب در کل آبخوان پراکنده شده باشند. در این صورت سالانه می‌توان معادل مقدار تغذیه‌ی سطحی را از طریق چاه‌ها برداشت کرد و سطح آب در آبخوان تقریباً همچنان افقی و ثابت باقی بماند.

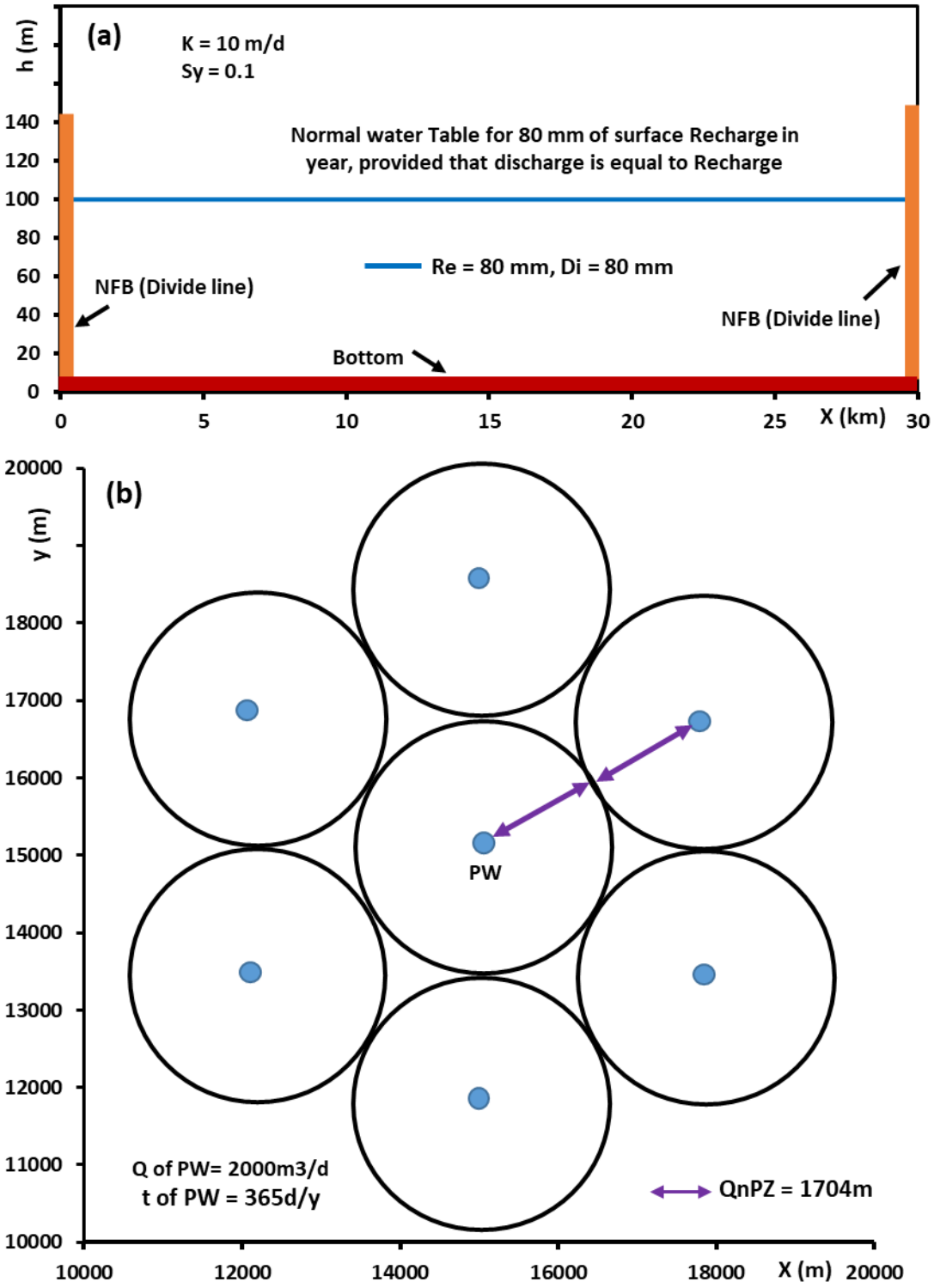
در مورد آبخوان‌های آبرفتی آزاد شیبدار که تا خط تقسیم آب ادامه داشته و چاه‌ها به‌طور مناسب در آبخوان توزیع گردند، وضعیت مانند حالت قبل است با این تفاوت که عدد مورد استفاده برای تغذیه در رابطه‌ی۱ مقدار کل تغذیه نخواهد بود. در این حالت بخشی از تغذیه برای حفظ جریان طبیعی آبخوان لازم است و نمی‌توان کل آن را به برداشت از چاه اختصاص داد. این‌که چه مقدار از تغذیه قابل برداشت بوده و چه مقدار باید برای جریان طبیعی آبخوان و حقآبه‌ی رودخانه در نظر گرفته شود، نیازمند بررسی تغییرات سطح آب نرمال آبخوان بعد از فعالیت چاه‌ها و بررسی پدیده‌ی فرونشست است (در آبخوان مورد نظر در شکل۱۳ برداشت ۴۰ میلیمتر از تغذیه‌ی ۸۰ میلیمتری توسط چاه‌های توزیع شده در آبخوان، می‌تواند سطح آب نرمال آبخوان را تا حدود ۳۱ متر کاهش دهد). اگر فرض کنیم که بررسی‌ها ثابت کرده باشد که امکان برداشت ۴۰ میلیمتر از تغذیه وجود دارد، در این صورت در رابطه‌ی۱ به جای Re مقدار ۴۰ میلیمتر از تغذیه منظور می‌گردد. به‌این ترتیب اگر در یک آبخوان آبرفتی آزاد با سطح آب اولیه شیبدار که تا مرزهای بدون جریان تقسیم آب تداوم دارد، تغذیه سطحی سالانه ۸۰ میلی‌متر، تغذیه قابل برداشت از طریق چاه معادل ۴۰ میلیمتر، دبی چاه ۲۰۰۰ متر مکعب در روز و مدت پمپاژ در سال ۳۶۵ روز باشد، بر این اساس حریم حفاظت کمّی هر چاه دایره‌ای به شعاع تقریباً ۲۴۱۰ متر خواهد بود. این به‌آن معنی است که در این آبخوان در این فاصله اعمال هیچ تنش آبی جدید مجاز نیست. به‌عبارتی دیگر ،اگر چاه‌های دیگری قرار است در اطراف این چاه حفر شوند باید آن‌ها هم حریم کمّی خود را حفظ کنند. به‌این‌ترتیب اگر دبی دو چاه مجاور مساوی و برابر با ۲۰۰۰ متر مکعب در روز باشد، حداقل فاصله بین دو

چاه ۲۴۱۰×۲ یعنی ۴۸۲۰ متر خواهد بود. به این ترتیب امکان حفر حدود ۴۹ چاه با مشخصات فوق در این آبخوان وجود دارد.

حالت دیگر و متداول‌تر در آبخوان‌های آبرفتی آزاد وضعیتی است که در سمت بالادست آبخوان، سازندهای سخت آبداری وجود داشته باشد که باعث تغذیه‌ی جانبی آبخوان آبرفتی گردند. در این حالت آبخوان آبرفتی علاوه بر دریافت تغذیه سطحی از مساحت خود، مقدار قابل توجهی هم از تغذیه‌ی سطحی سازند سختِ بالادست خود را به‌صورت جریان جانبی زیرزمینی دریافت می‌کند. طبیعی است که در این صورت این مقدار جریان باعث افزایش ورودی‌های رابطه‌ی بیلان شده و امکان برداشت بیشتر آب از آبخوان را فراهم می‌کند. در مورد نسبت مقدار برداشت نهایی آب از آبخوان به مقدار کل تغذیه سطحی و جانبی همانند موارد قبل لازم است که اثر پدیده نشست مشخص شده و بر اساس آن عمل شود. در مورد حریم کمّی هر چاه در این حالت، مشخص است که وسعت در نظر گرفته شده برای هر چاه، کمتر از مورد قبل است، اما برآورد دقیق آن نیازمند شبیه‌سازی عددی است. قاعدتا در این مورد، شبیه‌سازی قابل اعتمادی که بتوان همواره آن را به‌روز کرده و برای آینده از آن استفاده کرد، حالتی است که کل حوضه آبریز هم برای سازندهای سخت و هم برای آبرفت و هم برای جریان سطحی به عنوان یک مجموعه‌ی یک جا در نظر گرفته شده باشد. به‌نظر می‌رسد که با توجه به پیشرفت‌های اخیر در شبیه‌سازی، تا رسیدن به این نرم‌افزارهای ایده‌آل زمان زیادی باقی نمانده است. اما تا آن زمان تقریباً می‌توان سازندهای سخت آبدار مجاور آبرفت‌ها را همانند آبرفتی با ضرایب هیدرودینامیک قابل برآورد در نظر گرفته و همراه با آبرفت با مدل‌های متداول مانند مادفلو شبیه‌سازی کرد.

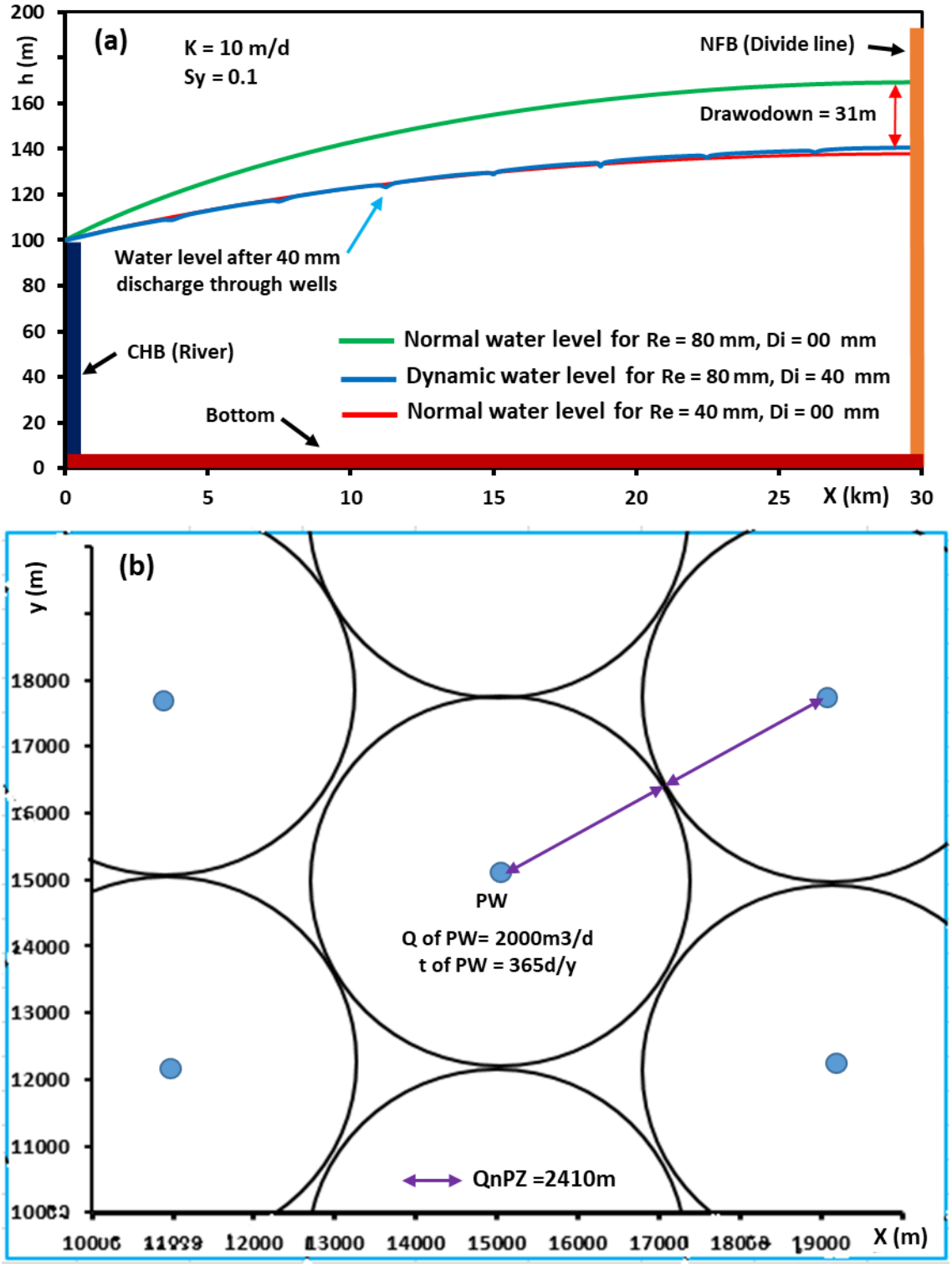
همان گونه که در شکل۱۴ نشان داده شده است ، اگر کل آبخوان آبرفتی بوده و سالانه ۸۰ میلیمتر تغذیه سطحی دریافت کرده و فاقد چاه باشد، نهایتا سطح آب در آبخوان ترازی خواهد داشت که با رنگ سبز نشان داده شده است. سطح آبی که با رنگ قرمز نشان داده شده است معرف آن است که اگر چاه‌های آب با فاصله مناسب در کل آبخوان پراکنده شوند و برداشت آن‌ها معادل ۴۰ میلی‌متر تغذیه باشد، در این صورت سطح آب آبخوان پس از چند سال به تراز جدیدی خواهد رسید که باز هم تقریباً معادل تراز آب برای تغذیه‌ی ۴۰ میلیمتری است که فاقد چاه بوده باشد. در این قسمت برای شبیه‌سازی آبخوان آبرفتی که در مجاورت سازند سخت آبدار است، فرض می‌شود که آبخوان، از مرز رودخانه تا طول ۱۵ کیلومتری در جهت خط تقسیم، آبرفتی بوده و چاه‌ها فقط در این بخش حفر می‌شوند؛ و از ۱۵ کیلومتری تا مرز بالادست در فاصله ۳۰ کیلومتری، سازند سخت ولی با همان ضرایب هیدرودینامیک آبرفت بوده باشد. در این حالت نیز فرض می‌شود که افت ایجاد شده برای برداشت نیمی از تغذیه‌ی ۸۰ میلیمتری، یعنی معادل ۴۰ میلیمتر مجاز است. بنابراین از حاصلضرب ۴۰ میلیمتر در وسعت ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر آبخوان مقدار ۳۶ میلیون متر مکعب آبِ قابل برداشت وجود دارد. این مقدار آب معادل ۴۹ حلقه چاه با دبی ۲۰۰۰ متر مکعب در روز است که در ۳۶۵ روز سال فعال باشند. چون این چاه‌ها قرار است در بخش آبرفت به وسعت ۱۵ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر حفر شوند، بنابراین چاه‌ها از رودخانه تا سازند سخت هر کدام به فاصله‌ی تقریبی ۳۰۰۰ متر بین مرز آبرفت و سازند سخت تا مرز رودخانه در پایین‌دست جانمایی می‌شوند. با شروع فعالیت چاه‌ها سطح آب نرمال آبخوان، شروع به کاهش کرده و پس از چند سال سطح تراز آب به حالت دینامیک-استاتیک جدیدی می‌رسد که با حالت قبل که آبخوان به‌طور کامل آبرفتی بود و چاه‌ها در کل آبخوان پراکنده شده بودند متفاوت است. این سطح آب دینامیک – استاتیک جدید در صورت عدم افزایش تنش مجدد، طبیعتاً در فصلِ‌تر مقدار محدودی افزایش تراز داشته و در فصل خشک به همان مقدار افت خواهد داشت. همچنان که در شکل۱۴ قسمت a مشاهده می‌شود افت کلی سطح آب نسبت به حالت نرمال در بخش سازند حداکثر به حدود ۱۵ متر و در بخش آبرفت که محل برداشت از طریق چاه‌ها است به حداکثر حدود ۲۰ متر رسیده است. به این ترتیب برای آبخوان مذکور به فرض مجاز

بودن این مقدار افت، حریم حفاظت کمّی هر چاه با دبی ۲۰۰۰ متر مکعب در روز، تقریبا دایره‌ای به شعاع ۱۵۰۰ متر است و در این منطقه ایجاد تنش‌های جدید مجاز نیست (شکل۱۴ قسمت b).



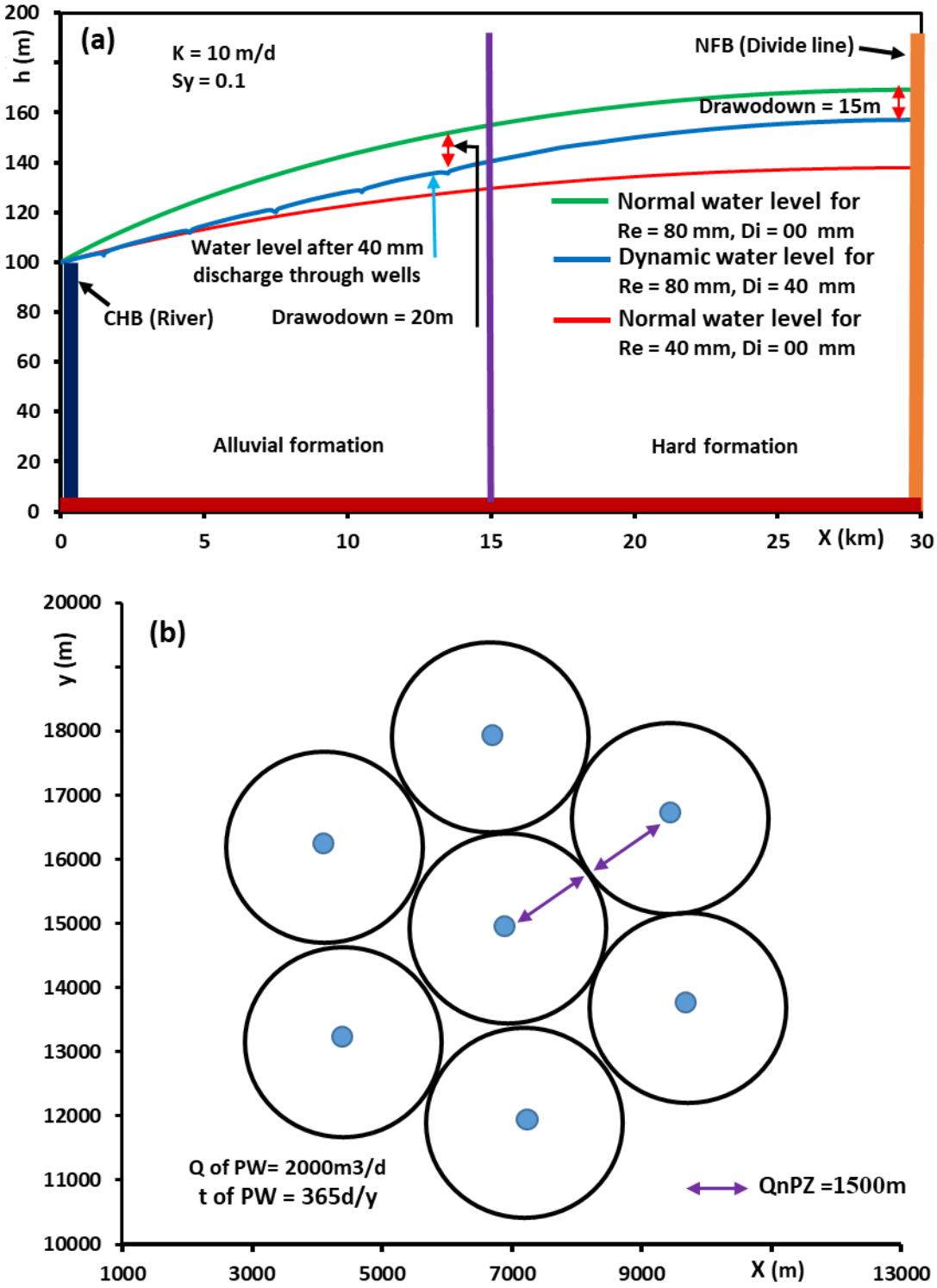
شکل ۱۲- نمایش تعیین حریم حفاظت کمّی (QnPZ) هر چاه در آبخوان آزاد با سطح آب افقی بر اساس رابطه بیلان.

Fig 12. Illustration of the determination of the quantitative protection zone of each well in an unconfined alluvial aquifer with a horizontal water table based on the equilibrium relationship.



شکل ۱۳- نمایش تعیین حریم حفاظت کمّی (QnPZ) هر چاه در آبخوان آزاد با سطح آب شیبدار بر اساس رابطه بیلان در حالتی که چاه‌ها در کل آبخوان پراکنده شده باشند.

Fig 13. Illustration of the determination of the quantitative protection zone of each well in an unconfined alluvial aquifer with a gradient water table, based on the equilibrium relationship in the case where the wells are scattered throughout the aquifer.



شکل ۱۴- نمایش تعیین حریم حفاظت کمّی (QnPZ) هر چاه در آبخوان آزاد با سطح آب شیبدار بر اساس رابطه بیلان در حالتی که چاه‌ها فقط در بخش پایین دست آبخوان پراکنده شده باشند.

Fig 14. Illustration of the determination of the quantitative protection zone of each well in an unconfined alluvial aquifer with a gradient water table based on the equilibrium relationship in the case where the wells are distributed only in the downstream part of the aquifer.

۳-۹- بررسی اثرات عدم رعایت حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب بر پدیده‌ی فرونشست

پدیده‌ی فرونشست یکی از اثرات زیانبار برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها محسوب می‌شود. با برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، سطح تراز آب در آبخوان به تدریج افت کرده و در دوره‌های‌تر جبران نمی‌شود. همین موضوع باعث افزایش وزن بخش غیر اشباع بالای سطح آب زیرزمینی و افزایش فشار بر بخش‌های پایین‌تر آبخوان شده و موجب تراکم و کاهش تخلخل مفید و نهایتاً باعث کاهش دائم آبدهی ویژه در لایه‌های آبدار می‌شود. طبیعتاً تراکم تدریجی لایه‌های آبدار باعث فرونشست در سطح زمین خواهد شد. آنچه که در مرحله‌ی اول برای تعیین حد مجاز برداشت از هر آبخوان لازم است، تعیین سطح آب نرمال برای حالت بدون چاه و سطح آب غیر نرمال برای نسبت‌های مختلف تخلیه از طریق چاه به تغذیه در آبخوان است. در شکل۲ برای ترکیبی از حالتهای مختلف تغذیه و تخلیه، سطح آب نرمال و غیر نرمال در آبخوان مورد نظر استخراج شده و نشان داده شد. همچنان که مشاهده شد سطح آب نرمال برای مقدار تغذیه‌ای برابر با ۲۴۰ میلیمتر در بالادست در تراز ۲۶۲ متری قرار می‌گیرد. اگر از این مقدار تغذیه‌ی ۲۴۰ میلیمتری به اندازه‌ی ۸۰ میلیمتر به تخلیه از طریق چاه‌هایی اختصاص داده شود که به طور مناسب در کل آبخوان پراکنده شده باشند، در آن صورت یک سطح آب غیر نرمال در آبخوان ایجاد خواهد شد که در بالادست آبخوان دارای تراز ۲۲۰ متری است. در این صورت افت ایجاد شده در بالادست آبخوان حدود ۴۲ متر است. اگر از این مقدار تغذیه‌ی ۲۴۰ میلیمتری به اندازه‌ی ۱۶۰ میلیمتر به تخلیه از طریق چاه‌هایی اختصاص داده شود که به طور مناسب در کل آبخوان پراکنده شده باشند، در آن صورت یک سطح آب غیر نرمال در آبخوان ایجاد خواهد شد که در بالادست آبخوان دارای تراز ۱۶۹ متری است. در این صورت افت ایجاد شده در بالادست آبخوان حدود ۹۳ متر است. در مرحله‌ی دوم باید برآورد شود که به ازای هر متر کاهش تراز آب در آبخوان چه مقدار بر وزن ضخامت غیر اشباع بالای سطح آب افزوده شده و می‌تواند باعث چه مقدار کاهش ضخامت و کاهش تخلخل و ایجاد فرونشست گردد. در مرحله‌ی سوم می‌بایست با ایجاد رابطه بین افت سطح آب و فرونشست، مقدار حداکثر افت مجازِ سطح تراز آب را برآورد کرد. در مرحله چهارم برای افت مجازِ سطح آب، مقدار نسبت تخلیه به تغذیه استخراج شده و باید با مدیریت آبخوان، جانمایی و فاصله‌گذاری چاه‌ها و برداشت سالانه از آبخوان به‌گونه‌ای تنظیم شود که افتِ سطحِ آبِ ناشی از تخلیه از طریق چاه، از حداکثر افت مجاز سطح آب در آبخوان تجاوز نکند. بررسی مراحل دو به بعد نیازمند مطالعاتی مستقل است و در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است.

۴-نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی معیارهای مختلف مرتبط با حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب از جمله حریم تأثیر، حریم آبگیر، حریم تغذیه، پدیده‌ی فرونشست و نسبت تخلیه به تغذیه در یک نوع از آبخوان‌های آزاد آبرفتی دارای گرادیان هیدرولیکی انجام شده است. برآورد مناطق مربوط به حفاظت از چاه‌های آب عمدتاً نیازمند مدل‌های عددی است و به این منظور از مدل‌های Modflow و Modpath در برنامه GMS استفاده شده است. دقت نتایج مدل عددی به دقت در شبکه‌بندی، شرایط مرزی، گام‌های زمانی و حد تقارب بستگی دارد که با انتخاب ترکیب مناسبی از آن‌ها از صحت نتایج مدل اطمینان حاصل شده و پس‌ازآن اثر پارامترهای مختلف مرتبط با حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج نشان داد که در مقادیر بیشتر تغذیه، سطح تراز نرمال آب در آبخوان بالاتر از مقادیر کم تغذیه بوده و با برداشت بخشی از آن از طریق چاه‌های آب، سطح تراز آب در آبخوان به اندازه‌ای کاهش می‌یابد که معادل سطح ترازی از آبخوان به ازای مقداری از تغذیه است که معادل اختلاف تغذیه‌ی اولیه و تخلیه از طریق چاه‌هایی باشد که به طور مناسب در آبخوان پراکنده شده باشند.

مشخص شد که در آبخوان آزاد مورد مطالعه مخروط‌های افت نظری و حقیقیِ حریم تأثیر نامتقارن بوده و این عدم تقارن در منحنی‌های هم‌افت و هم‌تراز که به ترتیب معرف مخروط‌های افت نظری و حقیقی هستند، نمایان است. نتایج نشان داد که مخروط افت نظری در سیستم‌های تک‌چاهی و چندچاهی تفاوت قابل ملاحضه‌ای ندارد و تفاوت آن‌ها متاثر از اختلاف تراز سطح آب در آن‌هاست. همچنین مشخص شد که با کاهش تغذیه یا با افزایش نسبت تخلیه به تغذیه، به شدت بر وسعت حریم آبگیر افزوده می‌شود.

از بررسی اثر زمان پمپاژ معلوم شد که مخروط افتِ حریم تأثیر تا زمانی که سطح تراز آب در آبخوان به سطح پایدار جدیدی برسد، همچنان در حال گسترش بوده و نهایتاً شعاع حریم تأثیر به مرزهای آبخوان خواهد رسید، اگرچه ممکن است

این زمان طولانی بوده و تا چند صد سال به درازا بکشد. مشخص شد که اگرچه زمان رسیدن به پایداریِ مخروط افتِ حریم تأثیر خیلی طولانی است، اما زمان رسیدن به پایداری در پلانِ حریم آبگیر خیلی کمتر است، به‌گونه‌ای که در این آبخوان در سیستم تک‌چاهی، زمان پایداری مخروط افت حدود ۳۰۰ سال ولی زمان پایداری حریم آبگیر حدود ۱۰ روز بوده است. نشان داده شد که در سیستم چندچاهی زمان رسیدن سطحِ آبِ جدید به حالت پایدار خیلی بیشتر و لذا حریم تأثیر و حریم آبگیر خیلی دیرتر از حالت تک‌چاهی به تثبیت می‌رسند.

بررسی نقش عوامل و مناطق مختلف مرتبط با حریم حفاظت کمّی نشان داد که هم شعاعِ حریم تأثیر و هم پلانِ حریم آبگیر نمی‌توانند مبنای مناسبی برای تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب باشند. بلکه مبنای مناسب برای تعیین حریم حفاظت کمّی چاه‌های آب، بیلان تغذیه و تخلیه و اختصاص مساحتی دایره‌ای شکل از سطح آبخوان به هر چاه است به گونه‌ای که حجم بخشی از تغذیه‌ی آن با حجم تخلیه‌ی چاه برابر شود؛ اینکه نسبت تخلیه به تغذیه در محاسبه‌ی شعاع حریم حفاظت کمّی چه مقدار باشد؟ نیازمند مطالعات فرونشست و تعیین افت مجاز سطح آب پس از فعالیت چاه‌ها، نسبت به سطح آب نرمال در آبخوان است.

مراجع

Ahmadi, A., Chitsazan, M., Mirzaee, S.Y., Nadri, A., 2022. The effects of aquifer and well parameters on Capture Zone and Discharge Zone in alluvial unconfined aquifers [Original Research]. Journal of Engineering Geology 16(2), 180-207. https://doi.org/10.22034/jeg.2023.16.2.1019241

Ahmadi, A., Chitsazan, M., Mirzaee, S.Y., Nadri, A., 2023. The effects of influence radius and drawdown cone on the areas related to the protection of water wells. Journal of Hydrology 617, 129001. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129001

Asghari Saraskanrood, S., Mohamadzadeh Shishegaran, M., 2023. Estimation of subsidence using radar interferometry technique and groundwater parameters and land use (Case study: Pakdasht plain). Advanced Applied Geology 13(1), 320-336 . DOI: 10.22055/aag.2021.38696.2251

Azarma, Z., Mehrabib, H., Nadic, S., 2023. Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area). Journal of Geography and Environmental Hazards 11(4), 173-192 . DOI:10.22067/geoeh.2022.75774.1199

Bear, J., Jacobs, M., 1965. On the movement of water bodies injected into aquifers. Journal of Hydrology 3(1), 37-57 .

Bresciani, E., Shandilya, R.N., Kang, P.K., Lee, S., 2020. Well radius of influence and radius of investigation: What exactly are they and how to estimate them? Journal of Hydrology 583, 124646. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124646

Chatrsimab, Z., Alesheikh, A., Voosoghi, B., Behzadi, S., Modiri, M., 2021. Investigating the effect of aquifer type and groundwater level drop on subsidence rate using radar interference technique and field data (Case study: Tehran-Karaj-Shahriar aquifer area). Advanced Applied Geology 10(4), 683-689. DOI: 10.22055/AAG.2020.30557.2028

Chitsazan, M., Nadri, A., Mizban, Y., 2018. Groundwater contamination modeling by municipal solid waste using MODPATH numerical code: Case Study in Lour Andimeshk Plain unconfined Aquifer, Khuzestan, Iran. Advanced Applied Geology 8(2), 73-85. https://doi.org/10.22055/aag.2019.24818.1826

Chu, S.T., 1994. Transient Radius of influence model. Journal of irrigation and drainage engineering 120(5), 964-969.

Cooper, J.R., H., Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Eos, Transactions American Geophysical Union 27(4), 526-534. https://doi.org/10.1029/TR027i004p00526

Grubb, S., 1993. Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers. Groundwater 31(1), 27-32. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00824.x

IGNSL, 2014. Capture-Zone-Delineation-Technical-Report (Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited, Issue GNS Science Report 2013/57). www.gns.cri.nz

ITES, 2013. Guideline for determining the qualitative zone of groundwaters (Iran's technical and executive system, Issue 621). https://sama.mporg.ir/sites/publish/SitePages/Home.aspx

ITES, 2014. Guideline for determining the quantitative zone of wells and qanats (Iran's technical and executive system, Issue 419). https://sama.mporg.ir/sites/publish/SitePages/Home.aspx

Javandel, I., Tsang, C.F., 1986. Capture-zone type curves: A tool for aquifer cleanup. Groundwater 24(5), 616-625 .

Langevin, C.D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, S., Provost, A.M., 2017. Documentation for the MODFLOW 6 groundwater flow model (2328-7055). https://doi.org/10.3133/tm6A55

Louwyck, A., Vandenbohede, A., Libbrecht, D., Van Camp, M., Walraevens, K., 2022. The Radius of Influence Myth. Water 14(2), 149. https://doi.org/10.3390/w14020149

Moench, A.F., 1997. Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer. Water Resources Research 33(6), 1397-1407. https://doi.org/10.1029/97WR00651

Motyka, J., d'Obyrn, K., 2022. The radius of influence of mine drainage – Definitions, methods of determination, and practical issues. Journal of Hydrology 613, 128422. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.1284 ۲۲

Nagheli, S., Samani, N., Barry, D.A., 2020. Capture zone models of a multi-well system in aquifers bounded with regular and irregular inflow boundaries. Journal of Hydrology X 7, 100053. https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.10005 ۳

Neuman, S.P., 1974. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. Water Resources Research 10(2), 303-312. https://doi.org/10.1029/WR010i002p00303

Pollock, D., 2016. User Guide for MODPATH Verison 7–a Particle Tracking Model for MODFLOW. Open-file Report 2016–1086. US Geol Surv Washington, DC MODPATH, 7. https://doi.org/10.3133/ofr20161086

Rahmani, G., Chitsazan, M., Ghafouri, H., 2022. Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and analytical models. Advanced Applied Geology 12(2), 259-275. DOI: 10.22055/AAG.2021.36217.2190

Rodriguez-Pretelin, A., Nowak, W., Morales-Casique, E., 2022. Optimization-based clustering of random fields for computationally efficient and goal-oriented uncertainty quantification: Concept and demonstration for delineation of wellhead protection areas in transient aquifers. Advances in Water Resources 162, 104146. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104146

Samani, N., Zarei-Doudeji, S., 2015. A General Analytical Capture Zone model: A Tool for Groundwater Remediation. IFAC-PapersOnLine 48(1), 234-239. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.065

Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Eos, Transactions American Geophysical Union 16(2), 519-524. https://doi.org/10.102/۹TR016i002p00519

Thiem, G., 1906. Hydrologische Methoden: Leipzig, Germany. JM Gebhardt, P. 56.

UKEA, 2019. Manual for the production of Groundwater Source Protection Zones (U.K.Environment Agency, Issue Report March 2019). www.gov.uk/environment-agency

USEPA, 2008. Systematic approach for evaluation of capture zones at pump and treat systems (U.S. Environmental Protection Agency, Issue Report EPA/600/R-08/003). http://www.epa.gov/ada/

USGS, 1991. Description and evaluation of selected methods used to delineate wellhead-protection areas around public-supply wells near Mt. Hope, Kansas (U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Issue Report 90-4102). https://books.google.com/books?id=WlGITJCoakUC

Winston, R.B., 2019. ModelMuse Version 4: A graphical user interface for MODFLOW 6 [Report](2019-5036). (Scientific Investigations Report, Issue. U.S.G. Survey. http://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20195036

WRC, 2023. Guidance document on Protection Zones (Delineation and Protection) . https://doi.org/www.wrc.org.za

Zeferino, J., Paiva, M., Carvalho, M.d.R., Carvalho, J.M., Almeida, C., 2022. Long Term Effectiveness of Wellhead Protection Areas. Water 14(7), 1063. https://doi.org/10.3390/w14071063

Zhai, Y., Cao, X., Jiang, Y., Sun, K., Hu, L., Teng, Y., Wang, J., Li, J., 2021. Further discussion on the influence radius of a pumping well: A parameter with little scientific and practical significance that can easily be misleading. Water 13(15), 2050. https://doi.org/10.3390/w13152050