Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Influence of well physical parameters on the cone of depression in the zone of influence of water wells in unconfined alluvial aquifers

Amin Ahmadi [1]✉, Maryam Zebarjad [2], Gholamreza Mirzavand [3]

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran. E-mail: aminahmadi349@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of physics, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran. E-mail: zebarjad.m@gmail.com
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran. E-mail: mirzavand1088@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 21 March 2024
Received in revised form 4 June 2024
Accepted 10 June 2024

Keywords:
Drawdown cone, Groundwater, Influence Zone, Radius Influence, Water wells, Modflow.

ABSTRACT

The zone of influence is the area where water withdrawal from the well causes the water level to fall. The drawdown cone is a conical shape of the water level in the zone of influence, and it is necessary to know the effect of the factors influencing it. Previous studies have mainly investigated aquifers with horizontal water levels and less realistic conditions. The purpose of this study is to investigate the effect of well physical parameters on the drawdown cone in one of the unconfined aquifers with a sloping water surface. In this aquifer, a normal discharge well was simulated using the Modflow program and the effect of the target parameters was studied. The results showed that: the drawdown cone is symmetrical up to long pumping and relatively long distances; the zone of influence will eventually extend to the entire aquifer and significant drawdown will occur at long distances. A significant part of the drawdown in the well is recovered in the first moments of pump shutdown, but at long distances the drawdown continues to increase for a long time. An inflection point can be extracted from the drawdown cone which represents the minimum drawdown that does not increase after the pump is stopped and can be introduced as a unique value. By increasing the flow several times, the depth of the cone increases, but the width of the cone increases only slightly. If the pump is turned on and off successively, the general shape of the cone does not depend on the nominal discharge of the well, but mainly on the average discharge of the aquifer. Relative infiltration increases the depth of the cone only near the well and has no significant effect on its shape further away.

Introduction

The zone of influence of a well in the groundwater is a three-dimensional area around the well where the activity of the well changes the level and velocity of water movement in it. The zone of influence is introduced with two characteristics; one is the cone of depression and the other is the radius of influence. After Darcy's equations (Darcy, 1856) and determining the relationship between groundwater flow and hydraulic conductivity coefficient, Dupuit, assuming the existence of a well in the center of a round island, presented the equation of water level around the well or the same shape as the drawdown cone (Dupuit, 1863). After Dupuy, Thiem replaced the infinite aquifer assumption with the round island assumption (Thiem, 1906). Theis formulated the transient radial flow toward the well (Theis, 1935). Neuman and Moench presented relationships for transient radial flow toward the well in an unconfined aquifer (Neuman, 1972, 1974; Moench, 1997).

Cite this article: Amin Ahmadi, A., Zebarjad, M., & Mirzavand, G. (2024). Influence of well physical parameters on the cone of depression in the zone of influence of water wells in unconfined alluvial aquifers. Journal of Engineering Geology, 18 (1), 89-108. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1019243

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1019243

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]

[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

Analytical relationships have simplifying assumptions, so it is inevitable to use numerical mathematical models (Langvine, 2017) to calculate and draw a real drawdown cone. Previous studies on the zone of influence were mainly conducted in confined aquifers, where the thickness of the aquifer was assumed to be constant (Ahmadi, et.al., 2023; Bresciani et al., 2020; Zhai et al., 2021; Louwyck et al., 2022). In unconfined aquifers, the thickness of the aquifer is not constant and a more accurate description of the drawdown cone requires further research. In this study, the effect of independent well parameters on the zone of influence in an unconfined aquifer with a sloping water surface was investigated using the numerical mathematical model Modflow. Since such a study has not been reported so far, the results of this research can be an effective help to know more about the drawdown cone and the radius of the influence zone in this type of aquifers.

Materials and Methods

The aquifer under study according to the conceptual model of Fig.1 is of unconfined alluvial type in an area of 30 x 30 km with a sloping water surface and the boundary between a water dividing line and a river with a saturated thickness of 100 meters in the river bed, specific yield 0.1, specific storage 0.00001, hydraulic conductivity 10 meters per day and surface recharge 80 millimeters per year have been selected. In the center of the aquifer, a well with a normal discharge of about 4000 to 10000 cubic meters per day was pumped and the effect of the well parameters was evaluated after a long period of one year. In order to simulate and study the effect of the well parameters on the cone of depression and the radius of influence, an irregular grid (Voronoi) was used in the Modflow program. The accuracy of the results of the numerical model depends on the type of meshing, the assurance of the boundary conditions, the size of the time steps, the value of the convergence limit in the iteration process, etc. The refinement of the grid was done in such a way that the size of the cells at the well site was equal to the diameter of the well and was gradually increased until it reached about 50 meters by 50 meters at the boundaries of the aquifer (Fig.1). The time steps in the simulation with transient conditions first started from a very small value and from 10 to the negative power of 6 days and gradually increased to a dry period of 205 days, then by continuously repeating wet periods of 160 days and dry periods of 205 days. It was continued until the relative stability of the level in the whole aquifer was reached. In the simulation for stable conditions, the average amount of recharge is considered in the whole length and the water level in this state is extracted and used. The comparison of the results in time shows that from the time of one day, the calculated drawdown value of the analytical relations and the output of the numerical model in the upstream direction, where the boundary is without current, are very close to each other and do not differ much. The comparison of the results of the numerical model with the analytical equations shows that the estimated drawdown values are in agreement with the analytical equations and the Modflow numerical model for very long distances and very small drawdowns (Ahmadi et al., 2023).

Results and Discussion

The amount of discharge pumping appears in the form of coefficient W(u) in the relation of Theis, and with its increase, the amount of drawdown and the amount of influence radius increase. The ratio of the increase in drawdown is proportional to the ratio of the increase in discharge, and if the discharge doubles, the amount of drawdown at all points of the drawdown cone will double. Since the drawdown around the well is high, as the discharge increases, the amount of drawdown around the well increases sharply, but the amount of drawdown at distances away from the well increases with less intensity (Fig.2). The time of pumping duration appears in the Theis equation in the value of u and is denoted by t. With the increase of t, the value of u decreases and the value of W(u) increases. As W(u)

increases, the drawdown (s) and the radius of the influence zone (r) increase. Finally, with the increase of time, the drawdown cone expands both in the surface direction and in the depth direction, but according to the relationship between u and W(u), which is of the integral type, the surface expansion of the drawdown cone will be much larger than its depth expansion (Fig.3). In the well that is being pumped, loss recovery starts immediately after the pump is turned off, without any time delay. In the initial moments after the pump are turned off, a significant part of the loss is compensated, but it takes a long time to compensate the entire loss. At a distance from the well, the loss recovery does not start immediately after the pump is turned off. At the moment when the pump is switched off, the points located in the vicinity of the maximum radius of influence corresponding to the duration of pumping receive the first effects of pumping, and the process of lowering the water level in them has just started, and the lowering in these points increases for a long time (Fig. 4). Examining the process of changing the shape of the drawdown cone shows that it is possible to extract an inflection point that for drawdowns less than that, the radius of influence gradually increases after the pump is turned off, and for drawdowns greater than that, the radius of influence gradually decreases. Therefore, if it is inevitable to mention a number for the radius of influence in studies related to wells, it seems that the appropriate choice is the number related to the drawdown in the inflection point, because the radius related to this drawdown is the maximum radius that can reduce this amount of drawdown. It experiences pumping at the last moment and does not increase after the pump is turned off (Fig.5). In order to study the effect of successive activation and deactivation, the target aquifer was simulated for 1 year with a well with a discharge of 10,000 cubic meters per day, both continuously and 12 hours on and 12 hours off. Since the amount of water coming out of the aquifer is reduced by half due to the continuous 12-hour on/off during this 1-year period, the well was simulated with a continuous discharge of 5000 cubic meters per day. Continuous operation of the well for all hours with discharges of 5,000 and 10,000 each will create a drawdown cone, the latter being slightly wider but twice as deep as the former. However, a well with a flow rate of 10,000 in successive on-off cycles creates a drawdown cone that is almost equivalent to a well with a flow rate of 5,000 cubic meters per day in continuous operation (Fig. 6). By creating a 4-layer grid and placing a screen at different levels, the effect of relative penetration on the calculation of the drawdown cone and the position of the water level in one of the cases where the relative penetration length is 40 meters is shown in Fig.7, and its drawdown cone is compared with the position of the drawdown cone with full penetration. As it can be seen, the relative penetration has a significant effect only up to a short distance from the well, and after that the drawdown cone resulting from a small percentage of relative penetration (25%) matches the drawdown cone resulting from full penetration and has no difference from it.

Conclusions

The zone of influence of a water well is the area around the well in which the water level is lowered by water withdrawal from the well. Drawdown cone is a relatively virtual or real conical shape around the well, which in the virtual state represents the position of water level drawdown in the aquifer, and in the real state, it represents the position of water level around the well, which is relative It has been drawn down to the original state due to the activity of the well. In the studies related to groundwater, it is necessary to know the effect of various factors affecting the drawdown cone, including the study of the effect of the physical parameters of the well. In previous studies, this issue has been investigated in aquifers with the same thickness and more realistic conditions have not been considered. The purpose of this research is to investigate more precisely the effect of well physical parameters on the drawdown cone and radius of influence in an unconfined aquifer with

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

a sloping water surface. The aquifer in this study is the area between the upstream water divide boundary and the downstream river boundary. A well with normal discharge in the aquifer is simulated using the Modflow program and the effect of the target parameters is studied. It was shown that despite the non-uniform thickness of the saturated layer in the aquifer, the drawdown cone is symmetrical up to a pumping period of 1 year and the radius of influence is 5 kilometers. It was found that the radius of influence of a well eventually reaches the entire aquifer and can cause large drawdowns at distances far from the well. It was found that a significant part of the drawdown in the well is compensated in the initial moments and less than a day, but the amount of drawdown increases at distances far from the well, for a long time after the pump is turned off. From the study of the drawdown cone after the pump is turned off, it was found that an inflection point can be extracted that represents the minimum drawdown value that does not increase after the pump is turned off. Since the radius of influence for this minimum drawdown is a unique value, it can be used to define a reliable radius of influence. It was shown that although the depth of the drawdown cone increases with increasing flow rate, this increase in depth is significant near the well location and not significant at distances away from the well. It was found that the overall shape of the drawdown cone does not depend on the nominal flow rate of the well when the well is successively turned on and off. It is equivalent to the drawdown cone that depends on the average flow rate. The results of the study of the effect of relative penetration indicate that this parameter increases the depth of the drawdown cone only in the vicinity of the well.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

تأثیر پارامترهای فیزیکی چاه بر مخروط افت در حریم تأثیر چاه‌های آب در آبخوان‌های آزاد آبرفتی

امین احمدی[۱]✉، مریم زبرجد[۲]، غلامرضا میرزاوند[۳]

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. رایانامه: aminahmadi349@gmail.com
۲. استادیار، گروه فیزیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. رایانامه: zebarjad.m@gmail.com
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. رایانامه: mirzavand1088@gmail.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

کلیدواژه‌ها:
آب‌های زیرزمینی، چاه‌های آب، حریم تأثیر، شعاع تأثیر، مخروط افت، مادفلو.

چکیده

حریم تأثیر منطقه‌ای است که برداشت آب از چاه باعث کاهش تراز در آن می‌شود. مخروط افت یک شکل مخروطی از سطح آب در حریم تأثیر است و شناخت اثر عوامل مؤثر بر آن ضروری است. در مطالعات گذشته عمدتاً آبخوان‌هایی با سطح آب افقی بررسی شده و کمتر شرایط واقعی‌تر بررسی شده است. هدف از این پژوهش مطالعه‌ی دقیق‌تر اثر پارامترهای فیزیکی چاه بر مخروط افت در یکی از آبخوان‌های آزاد با سطح آب شیبدار است. در آبخوان مذکور یک چاه با دبی معمولی با استفاده از برنامه مادفلو شبیه‌سازی شده و اثر پارامترهای هدف، مطالعه شده است. نتایج نشان داد که: مخروط افت تا پمپاژهای طولانی و فواصل نسبتاً دور متقارن است؛ حریم تأثیر نهایتاً به کل آبخوان سرایت کرده و در فاصله‌های دور نیز افتِ قابل توجه ایجاد می‌شود؛ بخش قابل توجهی از افتِ چاه در لحظات اولیه‌ی خاموشی پمپ جبران شده اما در فواصل دور، تا مدت‌ها همچنان بر افت افزوده می‌شود؛ بر روی مخروط افت، نقطه عطفی قابل استخراج است که معرف حداقل افتی است که پس از خاموشی پمپ افزایش نمی‌یابد و می‌تواند به عنوان یک مقدار منحصربه‌فرد معرفی شود؛ با افزایش چند برابری دبی، عمق مخروط چند برابر می‌شود اما وسعت مخروط با نسبت اندکی افزایش می‌یابد؛ در روشن و خاموش شدن‌های متوالی شکل کلی مخروط تابع مقدار دبی اسمی چاه نبوده و عمدتاً تابع دبی متوسط برداشت از آبخوان است؛ نفوذ نسبی فقط در نزدیکی چاه باعث افزایش عمق مخروط شده و در فواصل دور تأثیر قابل توجهی بر شکل آن ندارد.

مقدمه

حریم تأثیر چاه (Influence zone of well) در آب‌های زیرزمینی (Groundwater) منطقه‌ای سه بعدی در اطراف چاه است که فعالیت چاه باعث تغییر تراز و سرعت حرکت آب در آن می‌شود. حریم تأثیر معمولاً با دو مشخصه معرفی می‌شود؛ یکی مخروط افت (Drawdown cone or Cone of depression) و دیگری شعاع تأثیر (Influence Radius) است. مخروط افت خود به دو صورت در پلان و پروفیل قابل محاسبه و نمایش است. حالت اول محاسبه و نمایش افت سطح آب نسبت به سطح آب اولیه است که در پلان با منحنی‌های هم افت (Drawdown contour line) نمایش داده می‌شود. حالت دوم محاسبه و نمایش سطح آب پس از فعالیت چاه است که در پلان با منحنی‌های هم‌تراز (water level contour line) نمایش داده می‌شود. مخروط افت در حالت اول مجازی (Virtual) و تئوریک (Theoretical) بوده و قابل روئیت (Visible) نیست، اما در

استناد: احمدی، ا.، زبرجد، م.، میرزاوند، غ. ر. (۱۴۰۳). تاثیر پارامترهای فیزیکی چاه بر مخروط افت در حریم تاثیر چاه‌های آب در آبخوان‌های آزاد آبرفتی. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۱)، ۸۹-۱۰۸. https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1019243

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

حالت دوم واقعی (Actual) و عینی (Objective) بوده و قابل مشاهده (Visible) است. شعاع تأثیر (Influence Radius) فاصله‌ای شعاعی (Radial distance) از چاه است که افت سطح آب در آن فاصله برای یک زمان مشخص از پمپاژ، عدد مشخصی شده باشد. در مورد مقدار افت معیار (Criterion drawdown) و مقدار زمان معیار (Criterion time) جای بحث و بررسی بیشتری وجود دارد و در آبخوان‌های مختلف و شرایط مختلف آبخوان می‌توان این موضوع را بررسی کرد. مخروط افت همواره در جهات مختلف متقارن نیست و لذا شعاع تأثیر در جهات مختلف نمی‌تواند عدد ثابتی باشد. به عبارتی دقیق‌تر می‌توان گفت که شعاع تأثیر فاصله‌ی شعاعی چاه از منحنی بسته‌ای در اطراف چاه است که حاصل برش افقی مخروط افت مجازی برای یک زمان معیار و برای یک افت معیار است.

دانش اندازه‌گیری و برآورد کاهش سطح تراز آب‌های زیرزمینی در جهت جریان و در حریم تأثیر چاه‌ها و قنوات احتمالاً به هزاران سال قبل برمی‌گردد چرا که بدون شک حفر چاه‌های عمیق و طراحی و احداث قنوات در هزاران سال پیش بدون دانش فنی امکان‌پذیر نبوده است (Remini et al., 2014)، اما آنچه به صورت روابطِ ریاضیِ مرسوم در دسترس قرار دارد نتیجه‌ی تحقیقات دارسی جهت طراحی سیستم آبرسانی شهر پاریس در فرانسه است (Darcy, 1856). به طور کلی تعیین حریم‌های حفاظت از چاه‌های آب به شکل سطح تراز آب در آبخوان قبل از فعالیت چاه و به شکل مخروط افت ناشی از فعالیت چاه وابسته است. بعد از روابط دارسی و تعیین ارتباط جریان آب زیرزمینی با ضریب هدایت هیدرولیکی، دوپویی با فرض وجود چاه در مرکز جزیره‌ای گرد، معادله‌ی سطح تراز آب در اطراف چاه یا همان شکل مخروط افت را ارائه داد (Dupuit, 1863). چند دهه بعد از دوپویی، تیم فرض آبخوان نامحدود را جایگزین فرض جزیره گرد کرده و به استفاده از رابطه‌ی دوپویی برای محاسبه‌ی مخروط افت در آبخوان‌های نامحدود اعتبار بخشید (Thiem, 1906). تایس با اقتباس از جریان انتقال حرارت، جریان شعاعی گذرا به سمت چاه را فرموله کرد و رابطه‌ی او تحول بزرگی در هیدرولیک چاه پدید آورد (Theis, 1935). گرچه رابطه تایس برای آبخوان تحت فشار ارائه شده است اما اگر افت سطح آب در اطراف چاه کم باشد، برای آبخوان آزاد هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. چندین دهه بعد از ارائه‌ی روابط برای آبخوان محبوس، نیومن و مونچ هرکدام روابطی برای جریان شعاعی گذرا به سمت چاه در آبخوان آزاد ارائه کردند که جزئیات بیشتری از شرایط چاه و آبخوان را در بر می‌گیرد (Neuman 1972, 1974; Moench, 1997). معادلاتی از قبیل روابط مونچ، نیومن و تایس گرچه بر اساس ریاضیات تحلیلی استخراج شده‌اند، اما دارای پارامترهایی هستند که برآورد آن‌ها نیازمند استفاده از روش‌های تکرار است. روش تایس محدودیت بیشتری برای تطابق با شرایط واقعی چاه و آبخوان دارد اما ساده‌تر بوده و با تکنیک‌هایی به یک روش حل کاملاً جبری تبدیل شده است (Cooper Jr and Jacob, 1946; Barry et al., 2000; Vatankhah, 2014). در موارد متعددی فرضیات ساده کننده در رابطه‌ی تایس قابل پذیرش بوده و به دلیل امکان تبدیل شدن آن به رابطه‌ای جبری، بیشتر مورد توجه بوده و بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. افراد مختلف دیگری هم برای شبیه‌سازی جریان در اطراف چاه یا برای برآورد شعاع تأثیر چاه تلاش کرده و معادلات مختلف و متعددی را بر اساس فرض جریان پایدار و یا بر اساس جریان ناپایدار ولی با فرضیات ساده کننده ارائه نموده‌اند؛ ازجمله لمکِ (Lemke)، شولتز (Schultze)، سیچارت و کریلیس (Siechart and Kyrieleis)، دگلی (De Glee)، وِبِر (Weber)، ون پولن(Vanpoolen)، لی (Lee)، ویلبور (Wilbur)، کوساکین (Kusakin) و غیره

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

(Bear, 2012; ITES, 2014). در این پیشینه از ذکر معادلات اخیر خودداری می‌شود، چراکه اکثراً از دقت خوبی برخوردار نبوده و عدم قطعیت آن‌ها به اثبات رسیده است (Ahmadi et al. 2023; Louwyck et al., 2022; Bresciani et al., 2020; Zhai et al., 2021; Dragoni, 1998).

اصولاً روابط تحلیلی (Analytic) ، حتی آن‌هایی که دارای دقت بالایی در شبیه‌سازی سطح آب در اطراف چاه‌های آب هستند، دارای فرضیات ساده کننده بوده، لذا برای محاسبه و ترسیم یک مخروط افت سه‌بعدی که با شرایط واقعی آبخوان مطابقت بیشتری داشته باشد، استفاده از مدل‌های ریاضی عددی (Numerical) اجتناب‌ناپذیر است و مخروط افت و حریم تأثیری که بر این اساس محاسبه می‌شود، به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود (Langevin, 2017; Winston, 2019).

تحقیقات گذشته در مورد مخروط افت و شعاع تأثیر و یا به طور کلی در مورد حریم تأثیر عمدتاً در آبخوان‌هایی انجام شده است که سطح آب در آبخوان موازی با سطح بستر در نظر گرفته شده و عمدتاً هر دو سطح افقی فرض شده‌اند، بنابراین در هر صورت ضخامت اشباع آبخوان ثابت فرض شده است. اما سطح تراز آب در آبخوان‌های آزاد (Unconfined aquifer) تابع دیگر مشخصات فیزیکی آبخوان بوده و یک متغیر وابسته است، بنابراین ضخامت آبخوان عمدتاً ثابت نبوده و توصیف دقیق‌تر مخروط افت و شعاع تأثیر در این آبخوان‌ها نیازمند پژوهش بیشتر است. این مطالعه با استفاده از مدل ریاضی عددی مادفلو اثر پارامترهای مستقل چاه بر حریم تأثیر در یک آبخوان آزاد با سطح آب شیبدار را مورد مطالعه قرار داده است. ازآنجایی‌که تاکنون چنین مطالعه‌ای گزارش نشده است، نتایج این تحقیق می‌تواند کمک مؤثری برای شناخت بیشتر مخروط افت و شعاع حریم تأثیر در این نوع از آبخوان‌ها باشد. طبیعتاً شناخت دقیق‌تر اثرات پارامترهای مستقل و مختلف چاه بر آبخوان می‌تواند در مدیریت آبخوان مفید باشد.

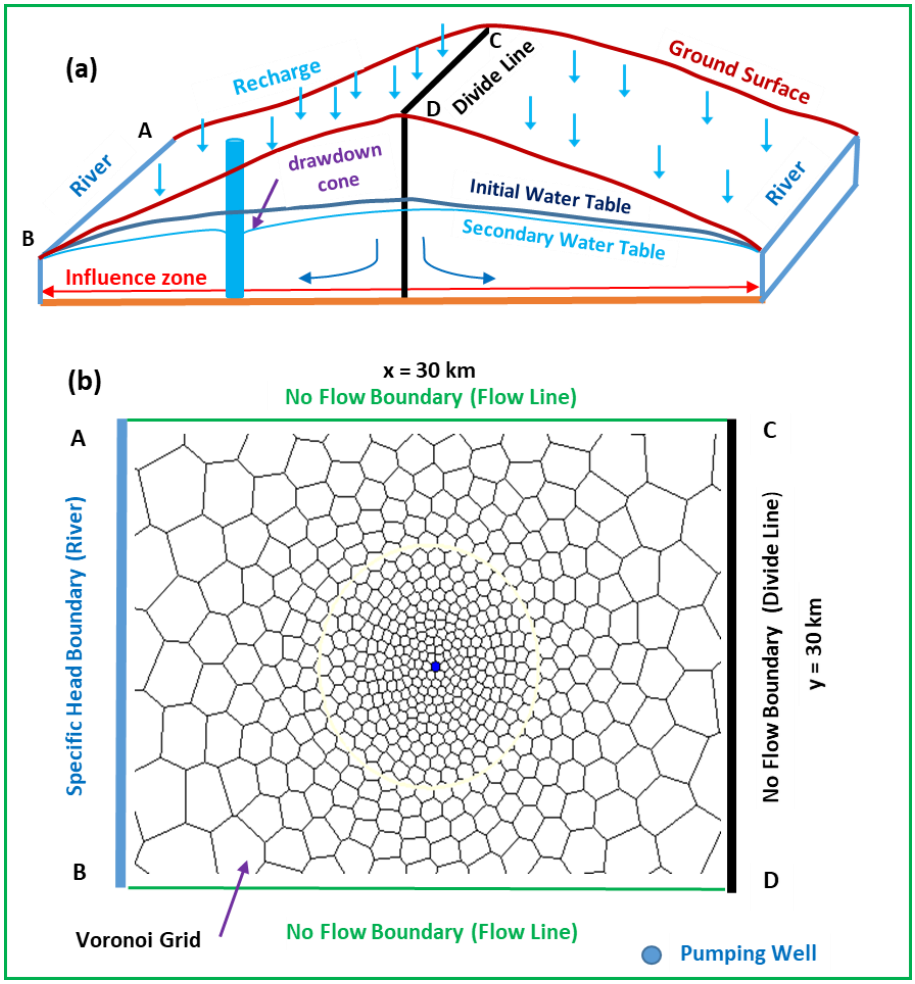
مواد و روش‌ها

مدل مفهومی آبخوان در مادفلو (Modflow)

آبخوان تحت بررسی مطابق مدل مفهومی شکل۱ از نوع آزاد آبرفتی در وسعتی به ابعاد ۳۰ در ۳۰ کیلومتر با سطح آب شیبدار و حد واصل بین یک خط تقسیم آب و یک رودخانه به ضخامت اشباعِ آبخوانِ ۱۰۰ متری در بستر رودخانه، آبدهی ویژه ۰/۱ ، ذخیره ویژه ۰/۰۰۰۰۱ ، هدایت هیدرولیکی ۱۰ متر در روز و تغذیه سطحی ۸۰ میلی‌متر در سال انتخاب شده است. چاهی با دبی معمولی در حدود ۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مترمکعب در روز در مرکز آبخوان تحت پمپاژ قرار گرفته و اثر پارامترهای چاه پس از یک مدت طولانی یک ساله مورد ارزیابی قرار گرفته است (در برخی موارد تا چند صد سال و تا وقتی که سطح آب به حالت پایدار برسد). در این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی و بررسی اثر عوامل تأثیرگذار چاه بر مخروط افت و شعاع تأثیر، از یک شبکه‌بندی نامنظم (Voronoi) در برنامه Modflow استفاده شده است. نسخه‌ی اولیه مدل Modflow در سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده در سال ۱۹۸۴ توسط مک‌دونال و هارباق بر اساس ریاضیات تفاضلات محدود (Finite differences) تهیه‌شده و از آن زمان تاکنون نسخه‌های جدیدتری از آن و بر اساس المان‌های محدود (Finite elements) و یا حجم کنترل (Control volume) ایجاد شده است (McDonald and Harbaugh, 1988; Langevin, 2017). امروزه این نرم‌افزار معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را به روش‌های مختلف عددی حل می‌کند. دقت نتایج مدل عددی به نوع شبکه‌بندی، اطمینان از شرایط مرزی، اندازه‌ی گام‌های زمانی، مقدار حد تقارب در فرایند

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

تکرار و غیره بستگی دارد. ریزسازی در شبکه‌بندی به گونه‌ای انجام شده که در محل چاه اندازه‌ی سلول‌ها در حد قطر چاه بوده و به تدریج افزایش داده شده تا اینکه در مرزهای آبخوان به حدود ۵۰ متر در ۵۰ متر رسیده است (شکل ۱ که در آن نمایش شبکه در قسمت b به صورت اغراق‌آمیز نمایش داده شده است). گام‌های زمانی در شبیه‌سازی با شرایط ناپایدار ابتدا از مقدار خیلی کم و از ۱۰ به توان منفی ۶ روز شروع شده و به تدریج تا یک دوره‌ی خشک ۲۰۵ روزه افزایش داده شده است، سپس با تکرار مداوم دوره‌های تر ۱۶۰ روزه و خشک ۲۰۵ روزه شبیه‌سازی تا رسیدن به پایداری نسبی سطح تراز در کل آبخوان ادامه یافته است. در شبیه‌سازی برای شرایط پایدار، مقدار متوسط تغذیه در طول کل در نظر گرفته شده و سطح آب در این حالت استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱. مدل مفهومی، شرایط مرزی و شبکه‌بندی استفاده شده در مادفلو برای شبیه‌سازی چاهی در مرکز آبخوان.

Fig.1. Conceptual model, boundary conditions and gridding used in Modflow to simulate the well in the center of the aquifer.

بررسی صحت عملکرد سامانه و مقایسه‌ی خروجی‌های مدل عددی با روابط تحلیلی

از جمله روابطی تحلیلی که تاکنون برای برآورد مقدار افت سطح آب در هر فاصله از چاه و در هر زمان پس از پمپاژ در

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

آبخوان‌های آزاد ارائه شده است، یکی رابطه مونچ و دیگری رابطه‌ی نیومن است. رابطه‌ی مونچ به صورت معادله‌ی (۱) است و در مراحل حل شامل تابع بِسِل نوع دو و مرتبه صفر است. این رابطه بر اساس بار هیدرولیکی بدون بعد در فضای لاپلاس تنظیم‌شده و پس از حل آن، افت سطح آب برای عمق متوسط سطح باز پیزومتر در هر فاصله از چاه و در هر زمان مشخص می‌شود (Moench, 1997). رابطه‌ی نیومن به صورت معادله‌ی (۲) است که شامل تابع بِسِل نوع یک و مرتبه صفر است و پس از حل آن، افت سطح آب برای عمق باز پیزومتر در هر فاصله از چاه و در هر زمان مشخص می‌شود (Neuman, 1972, 1974). از جمله روابطی تحلیلی که تاکنون برای برآورد مقدار افت سطح آب در هر فاصله از چاه و در هر زمان پس از پمپاژ در آبخوان‌های محبوس ارائه شده، روش حل تایس است که در آبخوان آزاد با افتِ کمِ سطح آب هم قابل استفاده بوده و رابطه‌ی آن به صورت معادله‌ی (۳) است. رابطه مذکور شامل یک تابع انتگرال نمایی است و پس از حل، افت متوسط سطح آب را در هر فاصله از چاه و در هر زمان مشخص می‌کند (Theis, 1935). رابطه‌ی تایس با استفاده از تقریب باری و همکاران که توسط وطنخواه به صورت رابطه (۴) بازنویسی شده به یک روش حل کاملاً جبری تبدیل شده است (Vatankhah, 2014; Barry et al., 2000).

$$\bar{h}_D(r_D, z_{D1}, z_{D2}, p) = \frac{1}{z_{D2}-z_{D1}} \int_{z_{D1}}^{z_{D2}} \bar{h}_D(r_D, z_D, p) dz_D \quad (۱)$$

$$s(r,z,t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^{\infty} 4y J_0(y\beta^{1/2})[u_0(y) + \sum_{n=1}^{\infty} u_n(y)]dy \quad (۲)$$

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \rightarrow s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad , \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (۳)$$

$$W = \left(\frac{EXP(-u)}{0.5616+0.4385EXP(-2.2803u)}\right) \times ln\left[1 + \left(\frac{0.5615}{u}\right) - 0.4385(A)^{-2}\right] \quad (۴)$$

$$A = 1.0421u + (1+u^{1.5})^{-1} + 1.0801(1+2.35u^{-1.0919})^{-1}$$

روابط ۱ تا ۳ گرچه تحلیلی هستند اما جبری نبوده و برای حل نیازمند استفاده از روش‌های تکرار و برنامه‌نویسی هستند (Ahmadi et al., 2023). روابط مذکور برای آبخوان نامحدود و ضخامت یکسان ارائه شده‌اند اما اساساً آبخوان آزاد با ضخامت ثابت در طبیعت به ندرت ایجاد می‌شود. با توجه به آنکه در پمپاژهای کوتاه مدت گسترش مخروط افت کم است، می‌توان از تغییرات ضخامت صرف‌نظر کرده و نتایج مدل عددی و تحلیلی را با هم مقایسه کرد. مقایسه نتایج از نظر زمانی نشان می‌دهد که از زمان یک روز به بعد مقدار افت محاسباتی روابط تحلیلی و خروجی مدل عددی در جهت بالادست که مرز بدون جریان است، خیلی به هم نزدیک بوده و تفاوت چندانی ندارد. فقط در زمان‌های کمتر از یک روز است که مقادیر افت محاسباتی در روش‌های مادفلو و تایس بر نتایج مونچ و نیومن منطبق نیست و علت آن عدم لحاظ شدن جریان تأخیری در این روش‌ها است. مقایسه نتایج مدل عددی با روابط تحلیلی از نظر مکانی هم نشان می‌دهد که تا فواصل خیلی دور و افت‌های خیلی کم مقادیر افتِ برآورد شده با روابط تحلیلی و مدل عددی مادفلو بر هم منطبق است (Ahmadi et al., 2023).

نتایج و بحث

چگونگی تشکیل سطح آب نرمال در یک آبخوان آزاد در شرایط پایدار و ناپایدار

سطح آب نرمال (Normal water table) سطح آب اولیه‌ای از آبخوان است که به طور طبیعی قبل از شروع هرگونه پمپاژ شکل گرفته است. این سطح آب در شرایط گذرا در انتهای دوره‌ی تر حداکثر تراز را دارد و در انتهای دوره‌ی خشک به حداقل تراز می‌رسد این سطح آب در صورت دریافت تغذیه‌ای

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

نسبتاً برابر در سال‌های متوالی، در دامنه‌ی کوچکی نوسان داشته و نسبتاً پایدار است، و اگر شرایط پایدار در نظر گرفته شود در یک تراز مشخص تثبیت می‌شود (در شرایط پایدار فرض می‌شود مقدار تغذیه مربوط به دوره‌ی تر به تدریج در طول کل سال رخ خواهد داد). برای استخراج سطح آب نرمال برای هر مقدار از مشخصات آبخوان، فقط آن مشخصه تغییر داده شده و مدل با سطح آب اولیه‌ی افقی ۱۰۰ متری که معادل سطح تراز رودخانه است، اجرا شده و تا زمانی که مقادیر فراز و فرود سطح آب در دوره‌های تر و خشک برابر شود، تداوم یافته است. در سال‌های آغازین به طور مداوم سطح آب در آبخوان افزایش می‌یابد و مقدار فراز آن در دوره‌ی تر بیشتر از مقدار فرود آن در دوره‌ی خشک است و این به آن معنی است که شیب هیدرولیکی آبخوان هنوز به مقدار مناسب نرسیده است. پس از یک مدت طولانی، سطح آب آبخوان به حالت نرمال رسیده و در انتهای دوره‌ی تر به مقدار مشخصی بالا آمده و در انتهای دوره‌ی خشک به همان مقدار پایین آمده است. پس از رسیدن به حالت تعادل، این سطح آب در پایان دوره‌ی تر، در پایان دوره خشک و یا در حالت پایدار (حد واسط این دو سطح) ذخیره شده و بعداً در شبیه‌سازی چاه به عنوان سطح آب اولیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طبیعی است که با افزایش تغذیه، سطح تراز آب در آبخوان افزایش و ضخامت اشباع آبخوان بیشتر خواهد شد (Ahmadi, et al., 2023).

فرم‌های مختلف سنجش و نمایش مخروط در اطراف چاه

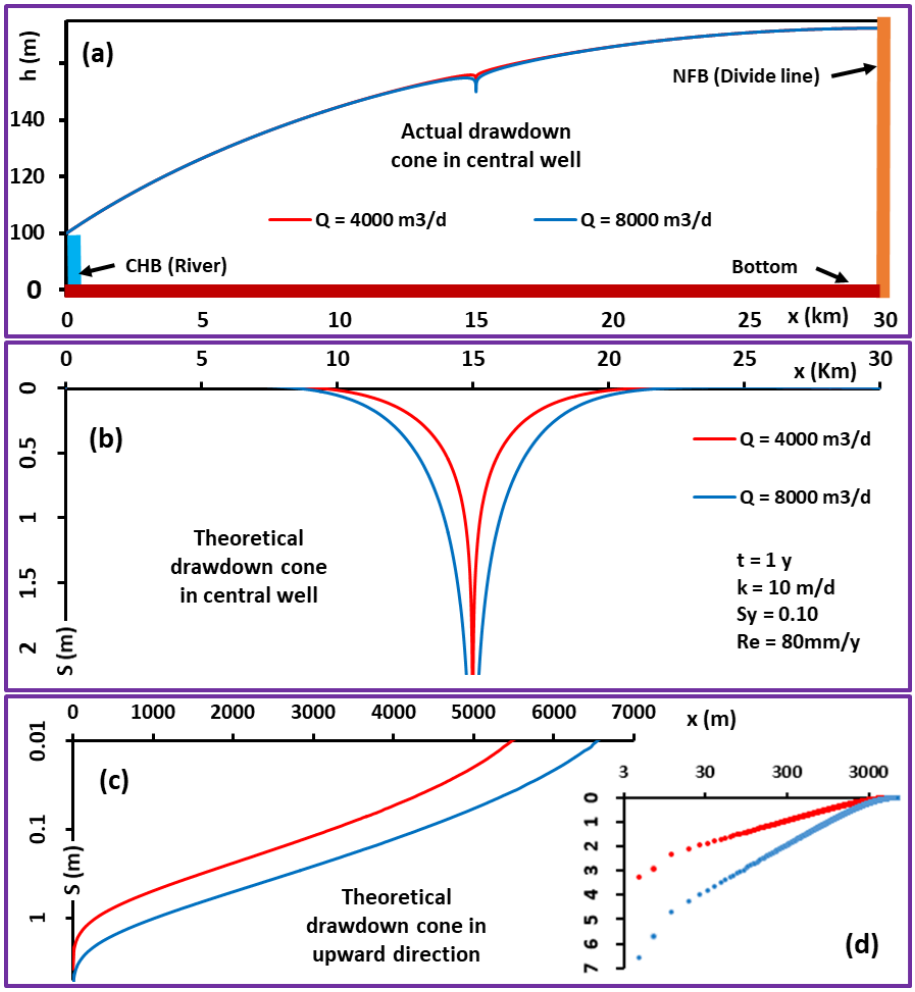
مخروط افت در چاه آب عملاً دو گونه است. یک مخروط افت معرف افت سطح آب در اطراف چاه نسبت به سطح تراز اولیه است؛ این مخروط نظری و مجازی بوده و قابل مشاهده نیست و با منحنی‌های هم افت نمایش داده می‌شود. مخروط افت دوم معرف سطح تراز آب پس از فعالیت چاه است؛ این مخروط عینی و واقعی بوده و قابل مشاهده است و در عمل با ترسیم منحنی‌های همتراز سطح آب نمایش داده می‌شود(Ahmadi, et al., 2023). با استخراج مخروط افت نظری، عملاً افت طبیعی سطح آب در آبخوان که ناشی از جریان منطقه‌ای است حذف شده و فقط اثر چاه ظاهر می‌شود؛ لذا در بررسی اثر پارامترهای مؤثر چاه بر مخروط افت، عملاً مخروط‌های افت نظری نمایش داده و مقایسه می‌شوند. با استخراج مخروط افت حقیقی عملاً مجموع افت ناشی از چاه و جریان منطقه‌ای استخراج می‌شود؛ لذا در بررسی خطوط جریان و حریم آبگیر چاه، عملاً مخروط‌های افت عینی نمایش داده شده و مقایسه‌ی آن‌ها ضرورت پیدا می‌کند. از آنجایی که در این پژوهش بررسی حریم تأثیر مورد نظر بوده است، عمدتاً مخروط‌های افت نظری استخراج شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی اثر دبی پمپاژ (Q) بر مخروط افت چاه

مقدار دبی پمپاژ (Discharge pumping) در رابطه تایس در معادله۳ به شکل ضریب W ظاهر می‌شود و با افزایش آن مقدار افت (Drawdown) و مقدار شعاع تأثیر (Influence radius) افزایش می‌یابد. نسبت افزایش افت، متناسب با نسبت افزایش دبی است و اگر دبی دو برابر شود، مقدار افت در تمام نقاط مخروط افت دو برابر می‌شود. از آنجایی که افت در اطراف چاه زیاد است با افزایش دبی مقدار افت اطراف چاه به‌شدت افزایش می‌یابد ولی مقدار افت فاصله‌های دور از چاه با شدت کمتری افزایش پیدا می‌کند. شکل۲ اثرات افزایش دبی بر مخروط افت و شعاع تأثیر را نشان می‌دهد. همچنان که مشخص است افزایش دبی باعث گسترش سطحی و عمقی مخروط افت می‌شود اما گسترش عمقی خیلی قابل‌توجه‌تر از گسترش سطحی است. در این مورد با افزایش دو برابری دبی از ۴۰۰۰ به ۸۰۰۰ مترمکعب در روز، مقدار شعاع تأثیر از حدود ۵۵۰۰ متر فقط به حدود ۶۵۰۰ متر رسیده است،

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

درحالی‌که برای فاصله‌ای به‌اندازه ۱۰ متر از چاه، مقدار افت از حدود ۳ متر به حدود ۶ متر رسیده است. بنابراین افزایش دبی عمدتاً باعث گسترش عمقی مخروط افت در مجاورت چاه می‌شود. و تأثیر چندانی بر گسترش سطحی مخروط افت در فواصل دور از چاه ندارد.



شکل ۲. اثر دبی پمپاژ بر مخروط افت و شعاع تأثیر چاه‌های آب.

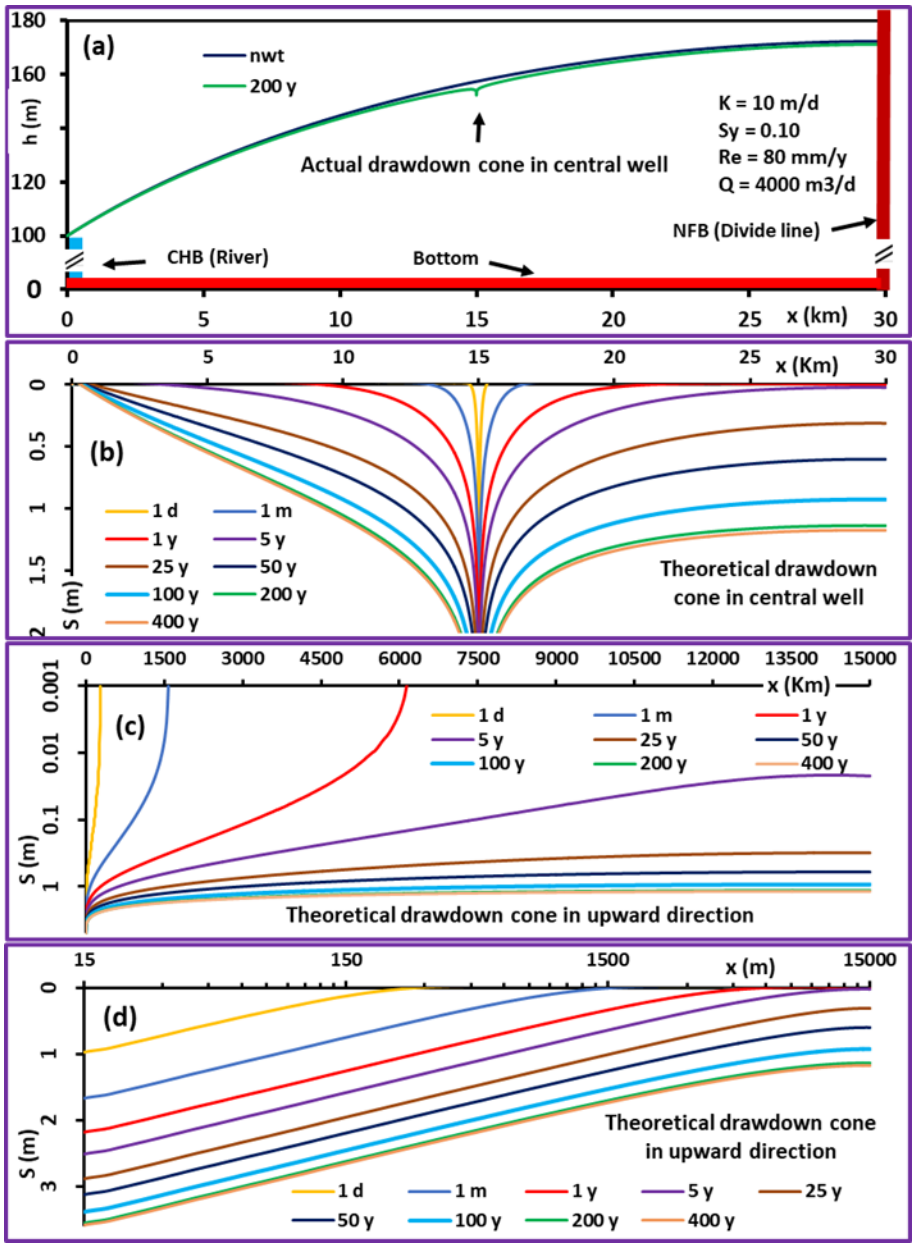
Fig.2. The effect of pumping discharge on drawdown cone and radius of influence in water wells.

بررسی اثر زمان تداوم پمپاژ (t) بر مخروط افت چاه

زمان تداوم پمپاژ (Time of pumping duration) در رابطه تایس در معادله شماره۳ در مقدار u ظاهر شده و با t نشان داده می‌شود. با افزایش t مقدار u کاهش یافته و مقدار W افزایش می‌یابد. با افزایش W مقدار افت (s) و مقدار شعاع حریم تأثیر مرتبط با آن (r) افزایش خواهد یافت. نهایتاً با افزایش زمان، مخروط افت هم در جهت سطحی و هم در جهت عمقی گسترش می‌یابد اما با توجه به رابطه‌ی u و W که از نوع انتگرال نمایی است، گسترش سطحی مخروط افت به مراتب بیشتر از گسترش عمقی آن خواهد بود. در شکل۳ اثر زمان بر گسترش سطحی و عمقی مخروط افت نشان داده شده است. چنانکه دیده می‌شود در زمان‌های کم، رشد مخروط افت سریع‌تر و در زمان‌های زیاد رشد مخروط افت

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

کندتر است. در زمان‌های طولانی، افزایش مجددِ زمان، باعث ایجاد افت خیلی کمی در آبخوان می‌شود و این موضوع در پایش عمق آب چاه مشهود است. به دلیل همین افزایش ناچیز افت در زمان‌های بعد از پمپاژ طولانی است که فرض جریان پایدار مطرح می‌شود، اما واقعیت آن است که این موضوع به محدودیت ما در سنجش و نمایشِ افت در پمپاژهای طولانی برمی‌گردد.



شکل ۳. اثر زمان پمپاژ بر مخروط افت و شعاع تأثیر چاه‌های آب.

Fig.3. The effect of pumping time on drawdown cone and radius of influence in water wells.

در افزایش زمان‌های بعد از پمپاژهای طولانی، همان مقدار افتِ خیلی اندک که در چاه غیرقابل‌اندازه‌گیری یا قابل صرف‌نظر است، باعث گسترش قابل‌توجه مخروط افت در دوردست می‌شود. همین افت‌های خیلی کم در فواصل دور از

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

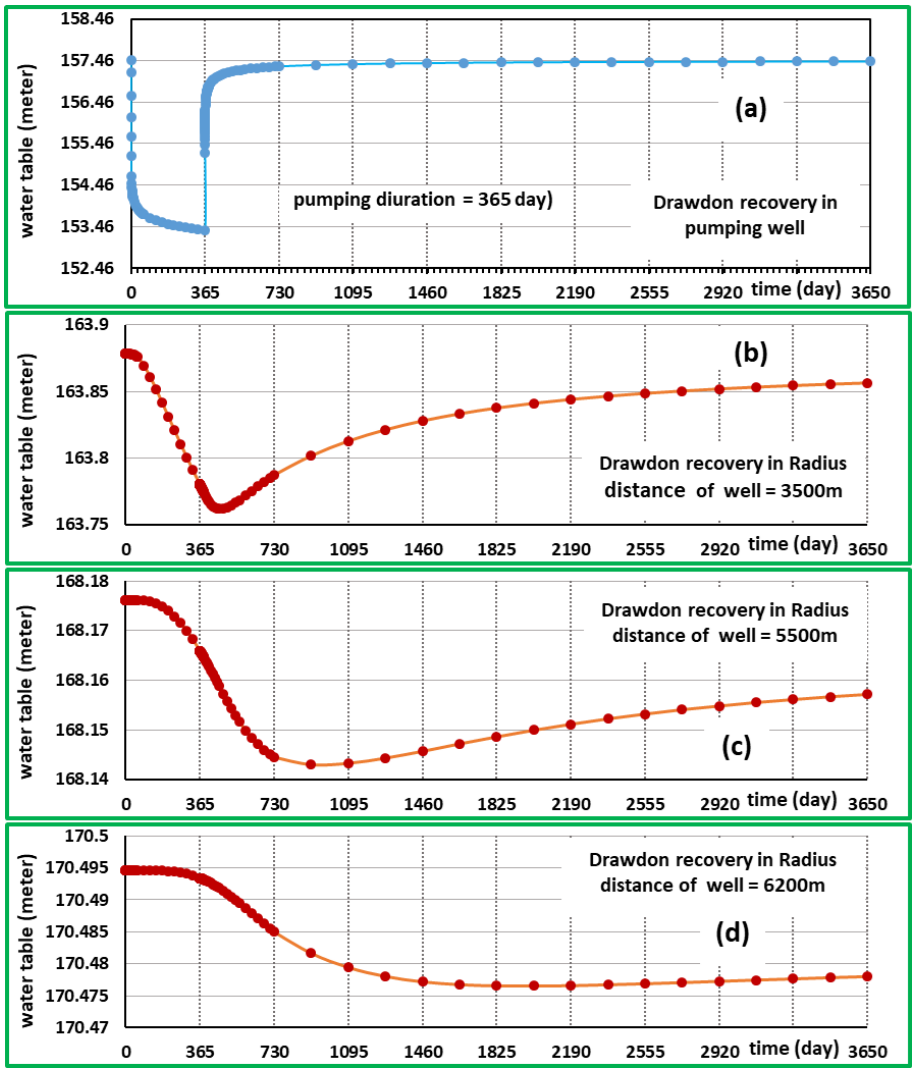
چاه می‌تواند بخش قابل توجهی از جریان چاه را تأمین کند و این موضوع در آبخوان‌های با سطح آب تقریباً افقی مشهود-تر است (Ahmadi, et al., 2023). شکل۳ به خوبی معرف آن است که اثر یک چاه در یک آبخوان تا چه حد می‌تواند باعث تغییر تراز سطح آب در آن شود. همچنان که دیده می-شود فقط یک چاه با دبی نسبتاً متوسط و معمولی توانسته است تا حدود ۴۰۰ سال باعث کاهش سطح تراز آب در کل آبخوان شده و فقط پس از این مدت زمان خیلی طولانی است که شرایط نسبتاً پایداری در آبخوان ایجاد می‌شود. همچنان که دیده می‌شود فقط این یک چاه، در مرکز آبخوانی با این وسعت، توانسته است در مرز بالادست در فاصله ۱۵ کیلومتری از چاه، نهایتاً بیش از ۱ متر باعث کاهش سطح تراز آب گردد. شکل مخروط افت در آبخوان‌های با سطح آب نسبتاً افقی در صورت عدم وجود ناهمگنی (Nonhomogenity) و ناهمسانگردی (Nonisotropy) تقریباً متقارن است اما در آبخوان آزاد با مقدار تغذیه سالانه قابل توجه به دلیل تغییرات زیاد ضخامت و همچنین به خاطر وجود مرز آبی رودخانه، متغیر است؛ به گونه‌ای که در زمان‌های کم و قبل از رسیدن به مرزهای آبی تقریباً متقارن و پس از رسیدن به مرز آبی از حالت تقارن خارج می‌شود. در قسمت b از شکل۳ چگونگی تغییر مخروط افت از حالت تقارن به حالت عدم تقارن نشان داده شده و همچنان که مشاهده می‌شود پس از حدود ۵ سال پمپاژِ مداوم، مخروط افت در پایین دست به مرز آبی رسیده و از آن پس غیر متقارن شده است. لازم به ذکر است که با توجه به قسمت a از شکل۳ بعد از زمان ۵ سال پمپاژ مداوم هنوز هم آبخوان باعث تغذیه‌ی رودخانه می‌شود اما در مخروط افت نظری یا مجازی در قسمت b از شکل۳ این واقعیت کمتر قابل تصور است. بنابراین توجه به هر دو فرم مجازی و واقعی مخروط افت لازم است.

بررسی اثر زمانِ جبرانِ افت بر مخروط افت چاه

زمان جبران افت (Time of drawdown recovery) مدت زمانی است که پس از خاموشی پمپ افت ایجاد شده در آبخوان بر اثر فعالیت چاه جبران شده و سطح تراز آب به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد. در چاهِ آب در حال پمپاژ، بلافاصله پس از خاموشی پمپ و بدون تأخیر زمانی، جبران افت آغاز می‌شود. در زمان‌های اولیه پس از خاموشی پمپ، بخش قابل‌توجهی از افت جبران شده ولی مدت زمان خیلی زیادی لازم است تا کل افت جبران شود (مدت زمانی که چند برابر زمان پمپاژ است). در فاصله‌های دور از چاه، بلافاصله پس از خاموشی پمپ جبران افت آغاز نمی‌شود، چراکه، هنوز اثر خاموشی پمپ به آن نرسیده است، به عبارتی پس از خاموشی پمپ هنوز مخروط افت و شعاع تأثیر در فواصل دور از چاه در حال گسترش است. در لحظه‌ی خاموشی پمپ نقاط واقع در محیط حداکثر شعاع تأثیر (شعاع متناظر با مدت زمان پمپاژ)، اولین اثرات پمپاژ را دریافت کرده و فرایند افتِ سطح آب در آن‌ها به تازگی شروع شده و تا مدتِ زیادی که چند برابر مدت پمپاژ است، افت در آن نقاط افزایش می‌یابد، بعد از این مدتِ طولانی است که فرایند افزایش افت در آن‌ها متوقف شده و فرایند جبرانِ افت در آن‌ها شروع می‌شود؛ و مدت زمان بسیار طولانی‌تری لازم است تا کل افت آن نقاط جبران شود. در آبخوان مورد نظر در این پژوهش، جبران افت برای چاه اصلی و برای سه چاه مشاهده‌ای در حداکثر شعاع تأثیر برای سه افت معیارِ ۱ دسی‌متر، ۱ سانتی‌متر و ۱ میلی‌متر (در زمان پمپاژ ۱ ساله) در شکل۴ نشان داده شده است. در فاصله ۳۵۰۰ متر از چاه که افت در مدتِ پمپاژِ ۳۶۵ روزهِ حدود ۱ دسی‌متر بوده، در زمان خاموشی پمپ و تا حدود ۱۰۰ روز پس از آن همچنان کاهش سطح آب رخ داده و پس از این مدتِ طولانی، جبران افتِ آن آغاز شده و تا بیش از ۱۰ سال طول می‌کشد تا افت یک ساله‌ی آن جبران شود

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

(قسمت b شکل۴). در فواصل دورترِ ۵۰۰۰ و ۶۲۰۰ متری از چاه، به همین ترتیب تا مدت خیلی طولانی‌تری پس از خاموشی پمپ، همچنان سطح آب کاهش یافته و بعد از آن است که جبران افت شروع می‌شود (قسمت‌های c و d شکل۴). این موضوع نشان خواهد داد که اثر یک چاه بر سطح آب تا چه اندازه قابل توجه بوده و در صورت برداشت بی‌رویه، جبران آسیب‌های وارد شده بر آبخوان تا چه حد به زمان زیادتری نیاز دارد.



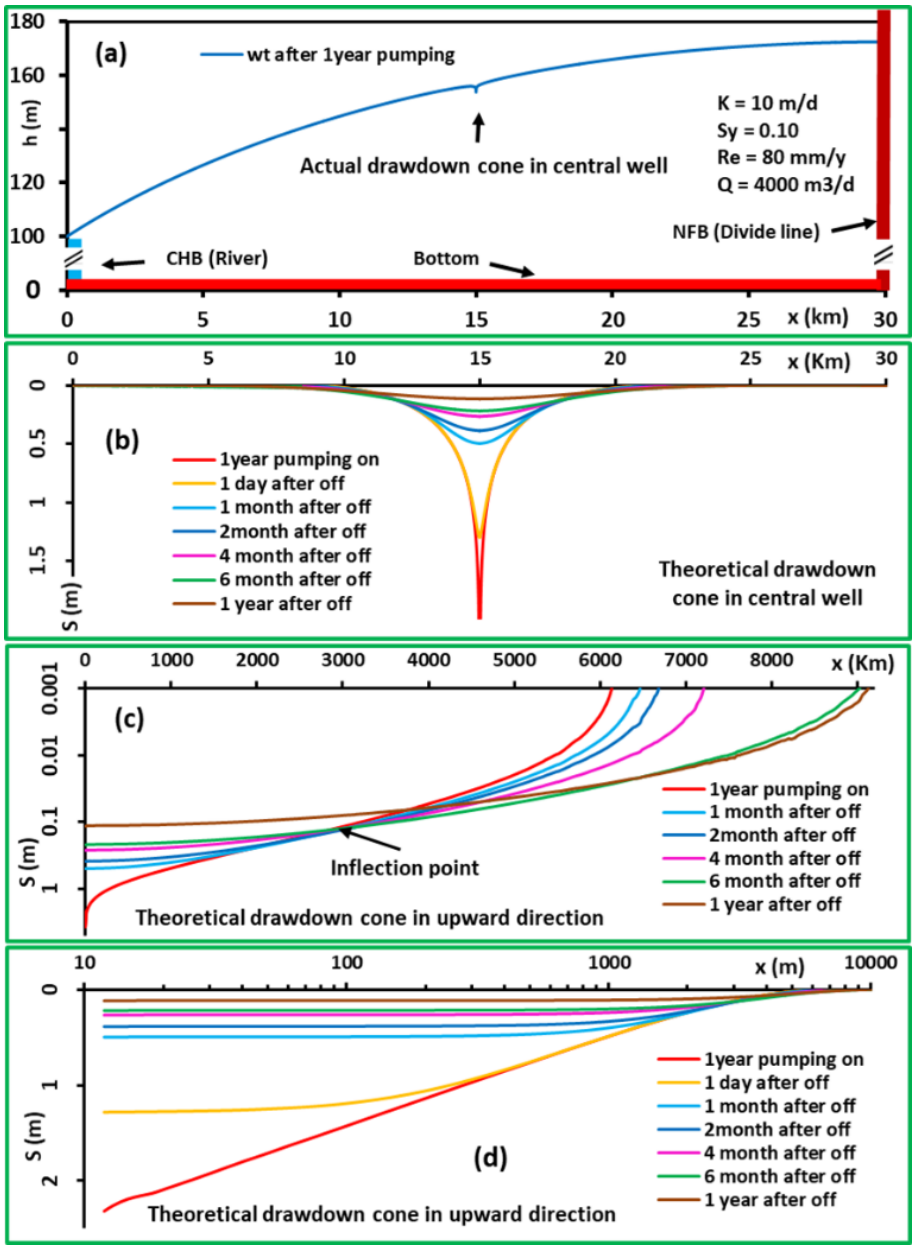
شکل ۴. اثر زمان پمپاژ و گذر زمان پس از خاموشی پمپ بر سطح آب آبخوان در چاه و در فواصل دور از چاه.

Fig.4. The effect of pumping time and the passage of time after pump shutdown on water table of the aquifer in the well and at distances far from the well.

همچنان که در شکل۵ مشاهده می‌شود پس از خاموشی پمپ مخروط افت در نزدیک چاه به‌تدریج کوچک و در انتها به‌تدریج گسترده‌تر می‌شود. بررسی روند تغییر شکل مخروط افت نشان می‌دهد که می‌توان یک نقطه عطف (Infelection point) بر روی مخروط افت استخراج کرد که برای افت‌های کمتر از این مقدار، شعاع تأثیر پس از خاموشی پمپ به‌تدریج بیشتر می‌شود و برای افت‌های بیشتر از آن شعاع تأثیر به‌تدریج کوچک می‌شود. بنابراین چنانچه در

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

مطالعات مربوط به چاه‌ها ذکر یک عدد برای شعاع تأثیر اجتناب‌ناپذیر باشد، به نظر می‌رسد که گزینه مناسب عدد مربوط به افت در نقطه عطف (Infelection point) است چراکه شعاع مربوط به این افت، حداکثر شعاعی است که این مقدار از افت را در آخرین لحظه پمپاژ تجربه کرده و پس از خاموشی پمپ افزایش نمی‌یابد. در چاه و آبخوان موردنظر ما چنانکه در شکل۵ دیده می‌شود افت در این نقطه¬یِ عطف حدود ۱۰ سانتیمتر و شعاع تأثیر مرتبط با آن حدود ۳۰۰۰ متر است، بنابراین حداکثر شعاعی در اطراف چاه که براثر فعالیت ۱ ساله با دبی ۴۰۰۰ متر مکعب در روز، مقدار افت ۱۰ سانتیمتری را تجربه می‌کند حدود ۳۰۰۰ متر است.



شکل ۵. اثر گذر زمان پس از خاموشی پمپ بر مخروط افت و شعاع تأثیر چاه.

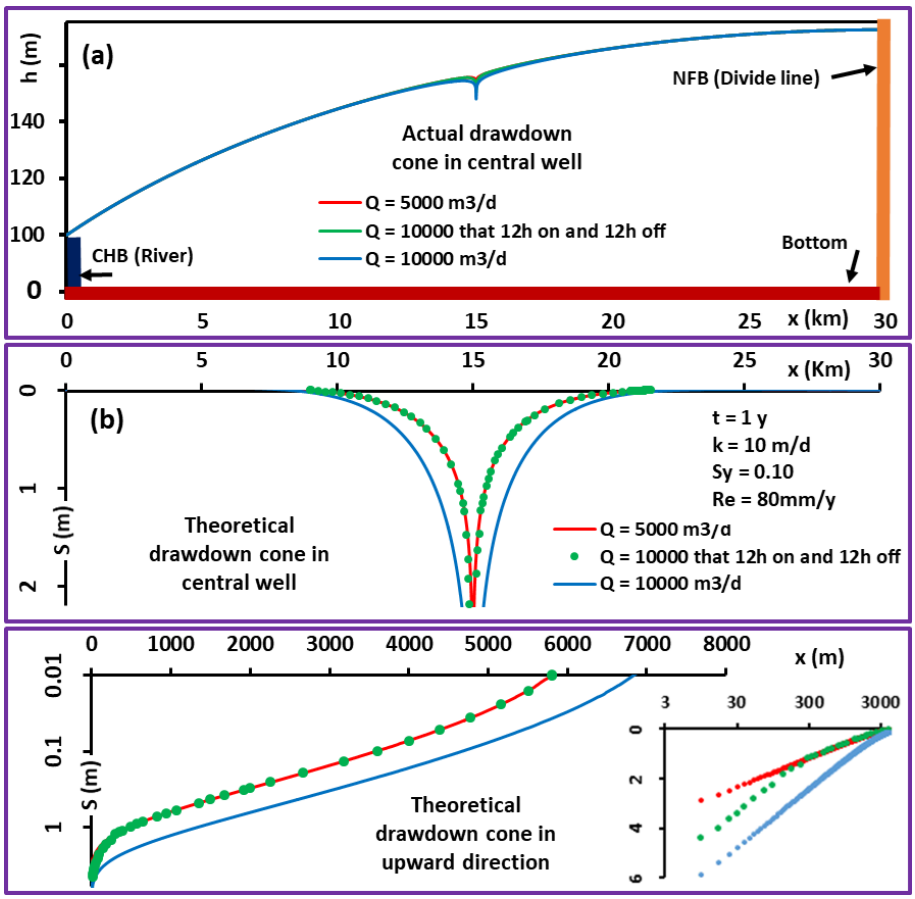
Fig.5. The effect of time passing after pump shutdown on the drawdown cone and influence radius of the well.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

بررسی اثر تناوب پمپاژ بر مخروط افت چاه

ازجمله دیگر عوامل مؤثر بر مخروط افت، تناوب پمپاژ (Pumping frequency) یا به عبارتی تناوب روشن و خاموش کردن پمپ در دوره برداشت آب از آبخوان است. در ظاهر به نظر می‌رسد که چنانچه چاه برای مدت چند ساعته‌ای خاموش شود، بخش عمده‌ی مخروط افت آن جبران خواهد شد، با این تصور ممکن است مدت مورد نظر برای تعیین شعاع حریم تأثیر چاه مقداری در حد همان تعداد ساعات فعالیت ممتد در نظر گرفته شود!. برای بررسی اثر خاموش و روشن شدن‌های متوالی، آبخوان مورد نظر برای ۱ سال با چاهی به دبی ۱۰۰۰۰ مترمکعب در روز هم به‌صورت ممتد و هم به‌صورت ۱۲ ساعت روشن و ۱۲ ساعت خاموش شبیه‌سازی گردیده است. بر اثر روشن و خاموش‌هایِ متوالی ۱۲ ساعته نهایتاً حجم آب خروجی از آبخوان در این مدتِ ۱ ساله به نصف کاهش پیدا می‌کند، لذا چاه را با دبی ممتد ۵۰۰۰ مترمکعب در روز هم شبیه‌سازی کرده و نتایج آن در شکل۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. اثر تناوب پمپاژ بر مخروط افت و شعاع تأثیر چاه‌های آب.

Fig.6. The effect of Pumping frequency on the drawdown cone and radius of influence in water wells.

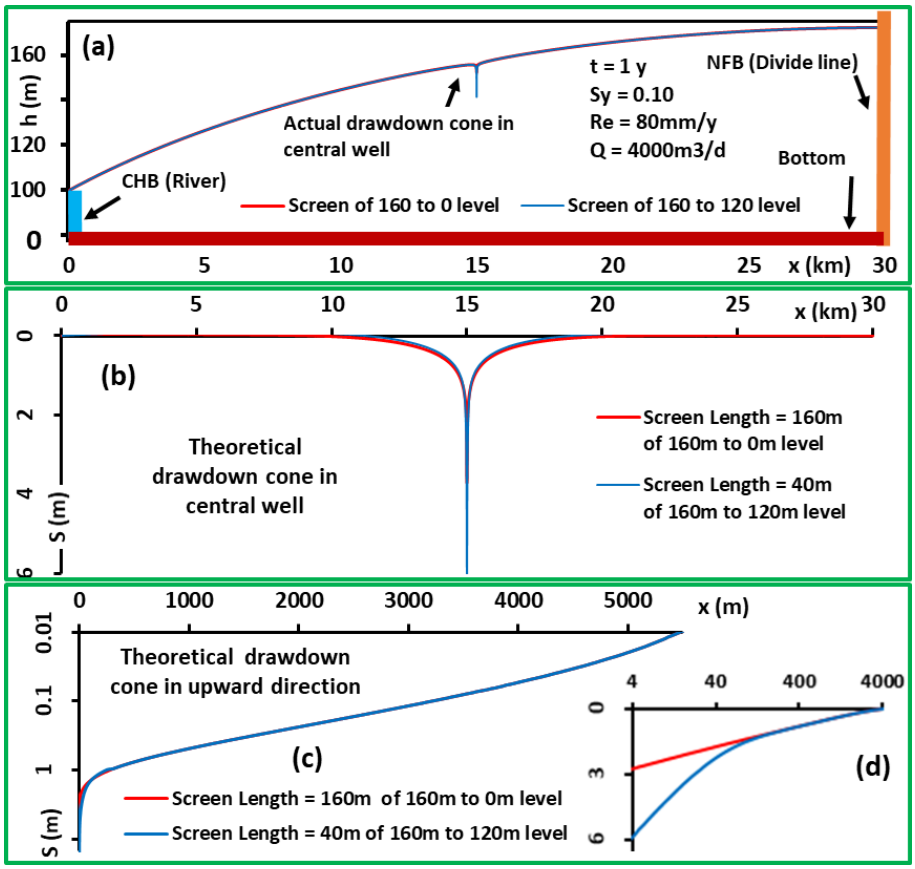
همچنان که مشاهده می‌شود فعالیت ممتد چاه در تمام ساعات با دبی‌های ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ هرکدام مخروط افتی ایجاد خواهند کرد که دومی اندکی وسیع‌تر ولی دو برابر عمیق‌تر از اولی است. اما چاه با دبی ۱۰۰۰۰ در روشن و

خاموش شدن‌های متوالی، مخروط افتی تقریباً معادل با چاهی به دبی ۵۰۰۰ مترمکعب در روز ایجاد می‌کند که به طور ممتد فعال باشد. همچنان که دیده می‌شود اثر خاموش و روشن شدن، فقط تا فاصله نزدیکی از چاه که در این مورد کمتر از ۲۰۰ متر است، مشاهده می‌شود و از این فاصله به بعد شکل کلی مخروط افت منطبق بر کل زمان پمپاژ یعنی ۱ سال است. این موضوع نشان می‌دهد که زمان جبران افت برای فاصله‌های دور، خیلی بیشتر از زمان پمپاژ است و لذا در خاموشی‌های متوالی جبران نمی‌شود. بنابراین در بحث تعیین شعاع حریم تأثیر می‌بایست کل مدت پمپاژ ملاک عمل قرار گیرد که در این مورد ۱ سال است (نه ۱۲ ساعت ممتد و نه ۶ ماهِ ممتد که معادل نصفی از سال است که در مجموع پمپ روشن بوده است). در ارتباط با دبی مورد نیاز برای بررسی حریم تأثیر می‌بایست متناسب با نسبت زمان روشن بودنِ پمپ به کل زمان عمل شود، در این مورد چون در مجموع پمپ در نصفی از کل سال روشن بوده، لذا در محاسبه‌ی مقدار افت در روابط تحلیلی می‌بایست از نصفی از دبی پمپاژ چاه که ۱۰۰۰۰ بوده است استفاده شود (یعنی ۵۰۰۰ متر مکعب در روز).

بررسی اثر نفوذ نسبی بر مخروط افت چاه

نفوذ نسبی (Relative penetration) باعث افزایش طول جریان در اطراف چاه شده و طبیعتاً باعث افزایش افت آب در چاه می‌شود و اگر انیزوتروپی عمودی زیاد باشد، اثر نفوذ نسبی بر افت آب در چاه و اطراف آن به مراتب بیشتر خواهد بود. در Modflow در شبکه‌بندی چندلایه امکان اعمال نفوذ نسبی وجود دارد. با ایجاد یک شبکه‌بندی ۴ لایه و توری (Screen) گذاری در ترازهای مختلف اثر نفوذ نسبی بر مخروط افت محاسبه و موقعیت سطح تراز آب در یکی از حالت‌ها که در آن طول نفوذ نسبی ۴۰ متر و از تراز ۱۶۰متر تا تراز ۱۲۰ متری بوده است در شکل۷ نشان داده شده؛ و مخروط افت آن با موقعیت مخروط افت در نفوذ کامل (Full penetration) یعنی توری گذاری در کل عمق ۱۶۰ متر چاه از تراز ۱۶۰ متری تا تراز صفر در کف آبخوان، مقایسه شده است. همچنان که دیده می‌شود نفوذ نسبی فقط تا فاصله کمی از چاه اثرات قابل‌توجه دارد (در این مورد کمتر از ۱۰۰ متر) و بعد از آن مخروطِ افتِ حاصل از درصدِ کمِ نفوذ نسبی (۲۵ درصد) بر مخروط افت حاصل از نفوذ کامل منطبق بوده و تفاوتی با آن ندارد. گرچه اثر نفوذ نسبی بر شکل کلی مخروط افت در پیرامون چاه و در فواصل دورتر بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر است اما در فواصل خیلی نزدیک و در چاه می‌تواند افت را به بیش از دو برابر حالت نفوذ کامل افزایش دهد و از نظر هزینه‌ی استخراج آب موضوعی قابل توجه است. از آنجایی که در نفوذ نسبی و یا در توری گذاری در عمق خاصی از چاه، چه در قسمت بالای آبخوان همانند نفوذ نسبی و یا چه در قسمت پایین آبخوان برای جلوگیری از ورود آب‌های سطحی و فیلتر نشده به داخل چاه، جریان در مجاورت چاه غالباً عمودی است، لذا بررسی این وضعیت نیازمند ایجاد شبکه‌بندی سه‌بعدی است و تعداد لایه‌ها در دقت برآورد سطح تراز آب در هر عمق از آبخوان مؤثر خواهد بود. طبیعی است که هرچه در جهت قائم شبکه‌بندی فشرده‌تر انتخاب شود برآورد سطح آب در جهت عمق لایه دقیق‌تر خواهد بود (این موضوع حاوی جزئیات بیشتری بوده و نیازمند یک پژوهش مستقل است).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]



شکل ۷. اثر نفوذ نسبی بر مخروط افت و شعاع تأثیر چاه‌های آب.

Fig.7. The effect of relative penetration on the drawdown cone and radius of influence in water wells.

نتیجه‌گیری

حریم تأثیر چاه آب (Influence zone of water well) منطقه‌ای در اطراف آن است که برداشت آب از چاه باعث کاهش سطح تراز و همچنین باعث تغییر سرعت حرکت آب در آن می‌شود. مخروط افت (Drawdown cone) یک شکل نسبتاً مخروطی مجازی (Virtual) یا حقیقی (Actual) در اطراف چاه است که در حالت مجازی معرف موقعیت مقدار افت سطح آب در آبخوان بوده و در حالت حقیقی معرف موقعیت سطح آب در اطراف چاه است که نسبت به حالت اولیه بر اثر فعالیت چاه به سمت پایین کشیده شده است. در مطالعات مربوط به آب‌های زیرزمینی و بهره‌برداری بهینه از آبخوان و مدیریت و حفاظت از کمیت و کیفیت آن، شناخت هرچه بیشتر اثر عوامل مختلف مؤثر بر مخروط افت از جمله بررسی اثر پارامترهای فیزیکی چاه، لازم و ضروری است. در مطالعات گذشته این موضوع عمدتاً در آبخوان‌هایی با سطح آب افقی و ضخامت یکسان بررسی شده و کمتر شرایط واقعی‌تر ازجمله آبخوان آزاد با سطح آب شیبدار مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی دقیق‌تر اثر پارامترهای فیزیکی چاه بر مخروط افت و شعاع تأثیر در یکی از حالت‌های ممکن این نوع از آبخوان‌های آزاد با سطح آب شیبدار است. آبخوان مذکور حد واصل بین یک مرز تقسیم آب در بالادست و یک مرز رودخانه در پایین دست است و دو طرف آن نیز از نوع خطوط جریان انتخاب شده که فاقد جریان هستند. یک چاه با دبی معمولی در آبخوان مورد نظر

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

با استفاده از برنامه Modflow شبیه‌سازی شده و پس از اطمینان از کارکرد درست سامانه‌ی طراحی شده، اثر پارامترهای هدف مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی اثر زمان پمپاژ نشان داد که علی‌رغم یکسان نبودن ضخامت اشباع در بالادست و پایین دست چاه، مخروط افت تا مدت پمپاژ یک ساله که شعاع اثر آن به حدود ۵ کیلومتر می‌رسد، تقریباً متقارن بوده و نسبتاً مخروطی شکل است. همچنین مشخص شد که شعاع تأثیر یک چاه در نهایت به کل آبخوان سرایت کرده و می‌تواند باعث ایجاد افت‌های بزرگ در حد چند متر در مرزهای خارجی بدون جریانی شود که در فاصله‌ای بسیار دور از چاه قرار دارند (در این مثال ۱۵ کیلومتر در بالادست). بررسی اثر زمان جبران افت نشان داد که بخش قابل توجهی از افت چاه و نقاط نزدیک و مجاور آن در همان لحظات اولیه و کمتر از یک روز جبران می‌شود اما در فواصل دور از چاه، نه تنها بلافاصله بعد از خاموشی پمپ جبران افت آغاز نمی‌شود بلکه همچنان تا مدت‌های طولانی بعد از خاموشی پمپ، مقدارِ افت در آن‌ها افزایش خواهد یافت. از بررسی تغییر شکل مخروط افت پس از خاموشی پمپ مشخص شد که می‌توان یک نقطه عطفی (Inflection point) استخراج کرد که معرف مقدار حداقل افتی است که پس از خاموشی پمپ افزایش نمی‌یابد. از آنجایی که شعاع تأثیر این حداقل افت، مقداری منحصر به فرد است شاید بتوان از آن برای تعریف یک شعاع تأثیر قابل اعتماد استفاده کرد. از مطالعه‌ی اثر دبی مشخص شد که اگرچه با افزایش چند برابری دبی چاه، عمق مخروط افت به همان نسبت چند برابر می‌شود اما این افزایش عمق در نزدیک چاه قابل توجه و در فواصل دور از چاه غیرقابل توجه است به گونه‌ای که در نهایت گسترش سطحی مخروط افت درصد اندکی از وسعت اولیه‌ی آن خواهد بود. بررسی تناوب پمپاژ نشان داد که در روشن و خاموش شدن‌های متوالی، شکل کلی مخروط افت تابع مقدار دبی اسمی چاه نبوده و معادل مخروط افتی است که از دبی کمتری که متناسب با متوسط برداشت از آبخوان است تبعیت می‌کند؛ در این حالت، فقط در مجاورت چاه، مقدار افت ایجاد شده بیشتر از افت ناشی از دبی متوسط بوده و به افت ناشی از دبی اسمی نزدیک است. نتایج بررسی اثر نفوذ نسبی معرف آن است که این پارامتر فقط در نزدیکی چاه باعث افزایش عمق مخروط افت شده و در فواصل دور از چاه تأثیر قابل توجهی بر شکل مخروط افت ندارد.

قدردانی

از اساتید ارجمند آقایان دکتر منوچهر چیت‌سازان استاد دانشگاه شهید چمران اهواز و دکتر آرش ندری کارشناس پژوهشگر منابع آب آریزونا برای راهنمایی‌های ارزنده و در اختیار قرار دادن نرم افزارهای تخصصی قدردانی می‌شود.

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 [Original Research]. Journal of Engineering Geology, 16(2), 180-207.

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.

Ahmadi, A., Mirzavand, G., & Zebarjad, M. (2023). The drawdown cone of influence zone in water wells in unconfined alluvial aquifers and the influence of physical parameters of the aquifer on it [Original Research]. Journal of Engineering Geology, 17(3), 299-320.

Barry, D., Parlange, J.-Y., & Li, L. (2000). Approximation for the exponential integral (Theis

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]

well function). Journal of Hydrology, 227, 287 - 291.

Bear, J. (2012). Hydraulics of groundwater. Courier Corporation.

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.

Cooper Jr, 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.

Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau (Vol. 2). V. Dalmont.

Dragoni, W. (1998). Some considerations regarding the radius of influence of a pumping well. Hydrogéologie (Orléans)(3), 21-25.

Dupuit, J. E. (1863). Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. Dunod, Paris, 352 pp.

ITES. (2014). Guideline for determining the quantitative zone of wells and qanats (Iran's technical and executive system, Issue 419).

Langevin, C. D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, Sorab, and Provost, A.M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A55, 197 p.

Louwyck, A., Vandenbohede, A., Libbrecht, D., Van Camp, M., & Walraevens, K. (2022). The Radius of Influence Myth. Water, 14(2), 149.

McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model (Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey Issue book 6, chap. A1).

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.

Neuman, S. P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. Water Resources Research, 8(4), 1031-1045.

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

Remini, B., Kechad, R., & Achour, B. (2014). The collecting of groundwater by the qanats: a millennium technique decaying. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782(20).

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.

Thiem, G. (1906). Hydrologische Methoden: Leipzig, Germany. JM Gebhardt, 56p.

Vatankhah, A. R. (2014). Full-range solution for the Theis well function. Journal of Hydrologic Engineering, 19(3), 649-653.

Winston, R. B. (2019). ModelMuse Version 4: a graphical user interface for MODFLOW 6. Scientific Investigations Report-US Geological Survey(2019-5036).

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.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.5.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1019243]