



Quantitative Protection Zone for Water Wells: A Critical Review of Iranian Guidelines (Regulation 747)

Amin Ahmadi^{1,✉}, Ghoramreza Mirzavand¹, Maryam Zebarjad²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Physics, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran.

✉Corresponding Author: aminahmadi349@gmail.com

Submit Date
18 September 2025

Revise Date
10 November 2025

Accept Date
10 November 2025

Keywords:

*Quantitative Protection Zone,
Influence Zone,
Influence Radius,
Unconfined Aquifer,
Numerical Modeling.*

Extended abstract

Introduction

Determining the optimal spacing between water wells is a fundamental challenge in groundwater management, as improper spacing can lead to hydraulic interference, severe water level decline, reduced well efficiency, land subsidence, and ultimately, shortened aquifer lifespan. The solution lies in defining a "quantitative protection zone" for each well—an area exclusive to its water extraction—where the safe distance between two wells equals the sum of their protection radii. Despite extensive research in well hydraulics (e.g., methods by Theim, Dupuit, Theis, Neuman, and Moench) and the availability of advanced numerical tools (e.g., MODFLOW and MODPATH), no reliable and independent guidelines for determining this zone exist. Iran's Regulation 747, which claims to provide such guidelines, erroneously equates the "radius of influence" (the area where the well causes drawdown) with the quantitative protection zone, rendering it fundamentally inadequate for its purpose. This pioneering study employs numerical modeling (MODFLOW) to demonstrate the inefficacy of the methods proposed by Regulation 747.

Cite this article: Ahmadi, A., Mirzavand, Gh., & Zebarjad, M. (2025). Quantitative Protection Zone for Water Wells: A Critical Review of Iranian Guidelines (Regulation 747). *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (2), 97-126. DOI: 10.22077/jaaq.2025.10113.1127.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

It argues that the quantitative protection zone must be defined based on the well's long-term impact on the aquifer under steady-state conditions, rather than short-term criteria like the radius of influence. The findings provide a scientific basis for revising this regulation and can serve as a valuable resource for policymakers and water resource managers.

Materials and Methods

This study utilized the Modflow numerical model (within GMS or ModelMuse software) to simulate a well in an unconfined alluvial aquifer. Two main scenarios were investigated: 1- Simplified Scenario: Aligned with the assumptions of Regulation 747, featuring an aquifer with constant saturated thickness (100 m), an initial horizontal water table, hydraulic conductivity of 10 m/day, and no areal recharge. The well was pumped at 4000 m³/day for 180 days (Fig.1 of the main text). 2- Realistic Scenario: The same aquifer but incorporating annual areal recharge and a sloping (parabolic) initial water table, better representing natural conditions for an unconfined aquifer (Fig. 2 of the main text). Model accuracy was validated through optimal grid discretization, time-step selection, and by comparing results with standard analytical methods (Theis, Neuman, and Moench). To critique Regulation 747, the various empirical formulas it proposes for estimating the "radius of influence" (e.g., Schultze, Kusakin, and Kozoni methods) were rewritten using consistent units. The results from these formulas were then compared against those from the precise numerical modeling (Modflow) and reputable analytical methods. This comparison revealed that these regulatory formulas are fundamentally flawed: they either lack a time parameter, are intended for steady-state conditions (rarely achieved), or significantly underestimate the true extent of the cone of depression. In fact, these relationships are unable to accurately predict the actual extent of the cone of depression, even for a 180-day pumping period, and cannot provide a correct estimate of the radius of influence. Furthermore, the radius of influence of a well is fundamentally not equivalent to the quantitative protection zone of a water well and cannot be estimated on this basis.

Results and Discussion

This study demonstrated that the concept of "radius of influence," used in Iran's Regulation 747 as the basis for defining the "quantitative protection zone" of wells, lacks scientific validity. Numerical simulations using Modflow in both simplified and realistic scenarios revealed that the cone of depression from a well in an unconfined aquifer ultimately affects the entire aquifer, only stabilizing if an unlimited constant-head boundary is present. Thus, the radius of influence is not a fixed, limited parameter suitable for defining protection zones. The results clearly showed the incorrectness of assuming "stability" after a short pumping period, implicit in Regulation 747. Under realistic conditions, even after 200 years of continuous pumping, the system reaches a new equilibrium with significant drawdown across the entire aquifer. The study concludes that the quantitative protection zone cannot be equated with the radius of influence. Instead, a new water-balance-based method is proposed: the protection zone for each well should be defined as a circular area around it where the well's annual pumping volume equals a specified percentage (e.g., 25%) of the annual recharge within that circle. Consequently, the safe distance between two wells becomes the sum of their protection radii. Determining this critical percentage requires further hydrological studies, assessment of permissible land subsidence, and legal and management considerations. If, considering all considerations in Aquifer Scenario 2 of the main text, allocating 50% of areal recharge to discharge through wells is deemed acceptable, then the quantitative protection zone for wells pumping continuously at a rate of 4000 cubic meters per day could be a square with a half-side length of approximately 2100 meters or a circle with a radius of about 2400 meters. The aquifer's water level would eventually experience a significant decline, reaching approximately 50 meters upstream (as shown in Fig.7 of the main text).

Conclusion

This study critically evaluated Iran's Regulation 747 as a guideline for determining the quantitative protection zone of water wells. Findings revealed that the regulation erroneously equates the "radius of influence" with the "quantitative protection zone," while these are distinct concepts. Numerical simulations using the Modflow model in two scenarios (simplified and realistic) demonstrated that the cone of depression from a well ultimately affects the entire aquifer. Thus, the radius of influence cannot serve as a basis for defining the quantitative protection zone. The study proposes an alternative water-balance-based method: the protection zone is defined as a circular area around the well where the annual pumping volume equals a specified percentage of the annual recharge within that circle. Implementing this method requires further studies in hydrology, land subsidence, and legal aspects.



حریم حفاظت کمی چاه‌های آب و ارزیابی دستورالعمل ایران (ضابطه ۷۴۷)

امین احمدی^۱ | غلامرضا میرزاوند^۱ | مریم زبرجد^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۲. استادیار، گروه فیزیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

✉ نویسنده مسئول: Aminahmadi349@gmail.com

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی انتقادی ضابطه ۷۴۷ به‌عنوان دستورالعمل تعیین حریم کمی چاه‌های آب در ایران و بیان نقاط ضعف آن است. این ضابطه شعاع تأثیر را معادل حریم کمی در نظر گرفته است، در حالی که این دو مفهوم کاملاً متمایز هستند. برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی در ضابطه مذکور، چاهی در آبخوان آزاد با استفاده از مدل مادفلو در دو سناریو شبیه‌سازی شد: (۱) یک سناریوی ساده‌شده منطبق بر فرضیات ساده‌انگارانه ضابطه و (۲) یک سناریوی نزدیک‌تر به شرایط واقعی. نتایج نشان داد که در سناریوی اول، مخروط افت هرگز به‌حالت پایدار نمی‌رسد ولی در سناریوی دوم پس از مدتی طولانی پایدار می‌شود و در هر دو حالت حریم تأثیر نهایی کل آبخوان است. یافته‌ها آشکار ساخت که تلقی تغییرات ناچیز سطح آب در چاه به‌عنوان شرایط پایدار (همان‌گونه که در ضابطه ۷۴۷ آمده) از دو جهت نادرست است: اولاً تعیین حریم باید پیش از حفاری چاه انجام شود و ثانیاً تغییرات کم سطح آب در چاه به معنی شرایط پایدار نیست. این پژوهش نشان داد که ضابطه ۷۴۷ نه تنها برآورد قابل قبولی از شعاع تأثیر ارائه نمی‌دهد، بلکه اساساً استفاده از مفهوم «شعاع تأثیر» به‌عنوان «حریم کمی» فاقد اعتبار علمی است. پیشنهاد می‌شود حریم کمی هر چاه به‌صورت دایره‌ای حول آن در نظر گرفته شود که در آن محدوده، حجم برداشت سالانه‌ی چاه با درصدی از حجم تغذیه سطحی سالانه برابر باشد. بر این اساس، فاصله مناسب بین دو چاه جمع جبری شعاع حریم کمی آن‌ها خواهد بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

کلیدواژه‌ها:

حریم کمی چاه،

حریم تأثیر چاه،

شعاع تأثیر چاه،

آبخوان آزاد،

مدل‌سازی عددی.

مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت آب‌های زیرزمینی تعیین فاصله مناسب بین چاه‌های آب است. فاصله‌گذاری نامناسب می‌تواند منجر به پدیده‌هایی همچون تداخل هیدرولیکی، افت شدید سطح آب در آبخوان، کاهش بازدهی چاه‌ها، فرونشست زمین و در نهایت کاهش طول عمر سفره‌های آب زیرزمینی شود. حریم حفاظت کمی هر چاه در واقع مساحتی از سطح آبخوان در اطراف چاه است که برداشت آب از آن منحصر به آن چاه است و در این محدوده هیچ عامل مصرف دیگری مجاز به برداشت آب از آبخوان نیست. به این ترتیب بخشی از وسعت آبخوان در اطراف هر چاه به آن اختصاص داده شده و فاصله‌ی مناسب بین دو چاه برابر با جمع جبری شعاع حریم حفاظت کمی آنها خواهد بود (Ahmadi et al., 2023, 2024, 2025). علی‌رغم مطالعات متعدد در هیدرولیک چاه‌های آب، تاکنون برای تعیین حریم حفاظت کمی چاه‌های آب و یا به عبارتی تعیین فاصله مناسب بین آنها دستورالعمل‌های مناسب و قابل اعتمادی تدوین نشده و در دسترس کارشناسان قرار ندارد. متأسفانه آنچه که در ایران به نام ضابطه ۷۴۷ و تحت عنوان دستورالعمل تعیین حریم کمی چاه‌ها و قنات توسط وزارت نیرو منتشر شده (DTIPA, 2018)، در تعیین حریم حفاظت کمی چاه‌های آب ناتوان بوده و نمی‌تواند راهگشای کارشناسان مدیریت منابع آب زیرزمینی باشد، چراکه این ضابطه فقط روش‌های نامطمئنی برای برآورد شعاع تأثیر ارائه داده و نه تنها در برآورد مقدار واقعی شعاع تأثیر ناتوان است، بلکه برخلاف عنوان آن، به حریم حفاظت کمی چاه‌های آب هیچ‌گونه اشاره‌ای نکرده است، درحالی که حریم حفاظت کمی موضوعی کاملاً مجزا از حریم تأثیر است.

در سال‌های گذشته، پژوهشگران با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی، تلاش کرده‌اند تا روابط معتبری را برای شبیه‌سازی سطح آب در اطراف چاه ارائه

کنند اما این روابط عمدتاً معرف حریم تأثیر (Influence zone) چاه بوده و به‌تنهایی نمی‌توانند معرف حریم کمی (Quantitative protection zone) چاه‌های آب باشند (حریم تأثیر هر چاه محدوده‌ای در اطراف آن است که فعالیت چاه باعث تغییر سطح و سرعت حرکت آب در آن می‌شود و به عبارتی حریم تأثیر هر چاه محدوده‌ای در اطراف آن است که افت سطح آب ناشی از فعالیت چاه در آن قابل توجه باشد و اینکه عبارت قابل توجه چگونه تعبیر شود نیازمند توجه به موضوعات متعددی است (Ahmadi et al., 2023, 2024, 2025). دوپویی با فرض وجود چاه در مرکز جزیره‌ای گرد معادله‌ی سطح آب در اطراف چاه یا همان شکل مخروط افت را ارائه داد (Dupuit, 1863). 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). تاپس جریان شعاعی گذرا به سمت چاه را فرموله کرد و رابطه‌ی او تحول بزرگی در هیدرولیک چاه پدید آورد (Theis, 1935). رابطه تاپس برای آبخوان تحت فشار ارائه شد ولی برای آبخوان آزاد هم مورد استفاده قرار می‌گیرد، به شرطی که افت سطح آب در چاه پمپاژ کم باشد. نیومن و مونچ روابطی را برای جریان شعاعی گذرا در آبخوان آزاد ارائه کرده‌اند که جزئیات بیشتری از شرایط چاه و آبخوان را در بر می‌گیرد (Neuman, 1974; Moench, 1997). افراد مختلف دیگری برای برآورد شعاع تأثیر تلاش کرده و معادلاتی را به صورت تجربی یا بر اساس فرض جریان پایدار و یا بر اساس جریان ناپایدار و با فرضیات ساده‌کننده ارائه کرده‌اند. در منابع متعدد به تعدادی از آن معادلات اشاره شده که از جمله روش لمک (Lemke)، روش شولتز (Schultze)، روش زیشارد (Sichard)، روش کریلیس (Kyrieleis)، روش دگلی (De Glee)، روش موسکات (Muskat)، روش وبر (Weber)، روش هورست (Hurst)، روش ونپولن (Vanpoolen)، روش

شده است که بتوان حریم آبیگر چاه را استخراج کرد. مدل مادپس (Modpath) از جمله مدل‌های ردیاب است که در برنامه‌هایی نظیر جی‌ام‌اس (GMS) و مدل‌موس (ModelMuse) گنجانده شده و پس از شبیه‌سازی جریان توسط مدل مادفلو (Modflow) می‌تواند حریم آبیگر چاه را مشخص نماید (Pollock, 2012).

آنچه از مطالعات گذشته برداشت می‌شود این است که به‌صورت ویژه تعیین حریم حفاظت کمی چاه‌های آب کمتر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته و دستورالعمل‌های مناسبی به این منظور فراهم نشده است (Ahmadi et al., 2025). آنچه در دستورالعمل‌های موجود در کشورهای مختلف برای حفاظت از چاه‌های آب ارائه شده عمدتاً مربوط به تعیین حریم آبیگر و حریم حفاظت کیفی در چاه‌های شرب است (IGNSL, 2014; UKEA, 2019; USEPA, 2008; USGS, 1991; WRC, 2023). آنچه در مطالعات گذشته در مورد حریم حفاظت کمی وجود دارد عمدتاً مطالعاتی در مورد اثر فاصله‌گذاری بین چاه‌های آب بر سطح آب و پدیده‌هایی از قبیل افت زیاد و فرونشست است. سوفوکلئوس در پژوهشی به بررسی تأثیر مدیریت برداشت آب بر فاصله بهینه بین چاه‌ها پرداخت و تأکید کرد که مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی می‌تواند به کاهش تداخل بین چاه‌ها و افزایش پایداری منابع کمک کند (Sophocleous, 2002). آشتیانی مقدم و همکاران برای تعیین حریم برداشت چاه‌های آب در دشت دامغان در ایران از منطق فازی استفاده کردند و اعدادی را برای حریم چاه در بخش‌های مختلف دشت معرفی کرده‌اند و نشان دادند که حتی با رعایت این حریم‌ها باز هم افت مداوم و سالانه در تراز آب رخ خواهد داد (Ashtianimoghadam et al., 2017). فرمانی‌فرد و همکاران برای بررسی حریم کمی چاه‌های آب در یکی از آبخوان‌های کرمانشاه در ایران از رابطه تایس و برای مدت متوسط پمپاژ سالانه‌ی ۲۱۷۰ ساعته و افت معیار در

ویلبور (Wilbur)، روش کوساکین (Kousakine)، روش کمبفورت (Combefort)، روش شنیبلی (Shneebeli)، روش کوزنی (Kozoni)، روش بوگومولف (Bogomolof) و غیره است (Ahmadi et al., 2023; Bresciani et al., 2020; Zhai et al., 2021; DTIPA, 2018; Bear, 2012). در بحث شعاع تأثیر، عدم دقت روابط مبتنی بر فرض جریان پایدار و هر رابطه‌ای که فاقد متغیر زمان باشد و همچنین عدم دقت کافی در روابط مبتنی بر معادله‌ی کوپر و ژاکوب در مقالات متعدد نشان داده شده است (Dragoni, 1998; Bresciani et al., 2020; Zhai et al., 2022; Louwyck et al., 2021). امروزه علاوه بر روش‌های تحلیلی و تجربی، با استفاده از روش‌های عددی و برنامه‌های رایانه‌ای به‌راحتی می‌توان سطح آب اطراف هر چاه را شبیه‌سازی و حریم تأثیر آن را برای هر مدت پمپاژ و هر مقدار افت مشاهده کرد. مدل‌هایی نظیر مادفلو (Modflow) گنجانده شده در برنامه‌هایی نظیر جی‌ام‌اس (GMS) و مدل‌موس (ModelMuse) از جمله مناسب‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی برای برآورد حریم تأثیر چاه‌های آب هستند (Langevin 2017; Winston, 2019). همچنین پژوهشگران در سال‌های گذشته با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی، تلاش کرده‌اند تا روابط معتبری را هم برای شبیه‌سازی خطوط جریان در اطراف چاه ارائه کنند، اما این روابط نیز عمدتاً معرف حریم آبیگر (Capture zone) چاه بوده و به‌تنهایی نمی‌توانند معرف حریم کمی چاه‌های آب باشند (حریم آبیگر هر چاه محدوده‌ای در اطراف چاه است که خطوط جریان آن به چاه ختم شده و در تأمین آب چاه نقش دارد). روابط بیر و ژاکوب، جواندل و تسانگ، گروب، سامانی و زارعی، ناقلی و همکاران و غیره از جمله این روابط هستند (Bear and Jacobs, 1965; Grubb, 1993; Javandel and Tsang, 1986; Nagheli et al., 2020; Samani and Zarei-Doudeji, 2015). در روش‌های عددی نیز با به‌کارگیری ذرات ردیاب این امکان فراهم

قضاوت نادرست است و این برای کشوری با سابقه چندین هزار ساله در مهندسی آب، دور از انتظار است. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجعی مفید برای قانون‌گذاران و کارشناسان در حوزه مدیریت منابع آب، مورد استفاده قرار گیرد و گامی مؤثر برای اصلاح ضابطه ۷۴۷ در ایران باشد.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار شبیه‌سازی و آبخوان مورد مطالعه

نسخه‌های اولیه مدل مادفلو (Modflow) در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده تهیه شده و امروزه نسخه‌های جدیدتر آن موجود است. این نرم‌افزار معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را بر اساس روش تفاضل محدود حل می‌کند. به‌همراه این مدل برنامه‌های مسیر یاب برای ردیابی ذرات به کار گرفته می‌شود تا از طریق آن بتوان مسیر حرکت آب‌های زیرزمینی را از محل تغذیه تا محل تخلیه در آبخوان دنبال کرد. یکی از این برنامه‌ها، مدل ردیابی ذرات به نام مادپس (Modpath) است که در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا تهیه شده و امروزه نسخه‌های جدیدتر آن موجود است. دو مدل مذکور معمولاً به‌همراه برنامه‌های جانبی دیگری در بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی تجمع و در اختیار کاربران قرار داده شده است. نرم‌افزار مدل‌موس (ModelMuse) ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) و نرم‌افزار جی‌ام‌اس (Groundwater Modeling System (GMS)) ارائه شده توسط آکوآو (Aquaveo) از نرم‌افزارهای قدرتمند شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی هستند که مدل‌های مذکور را پشتیبانی می‌کنند (Winston, 2019; Langevin 2017; Pollock, 2012). در این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی یک چاه و بررسی حریم تأثیر و حریم حفاظت کمی آن، یک آبخوان آزاد آبرفتی در دو وضعیت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن با

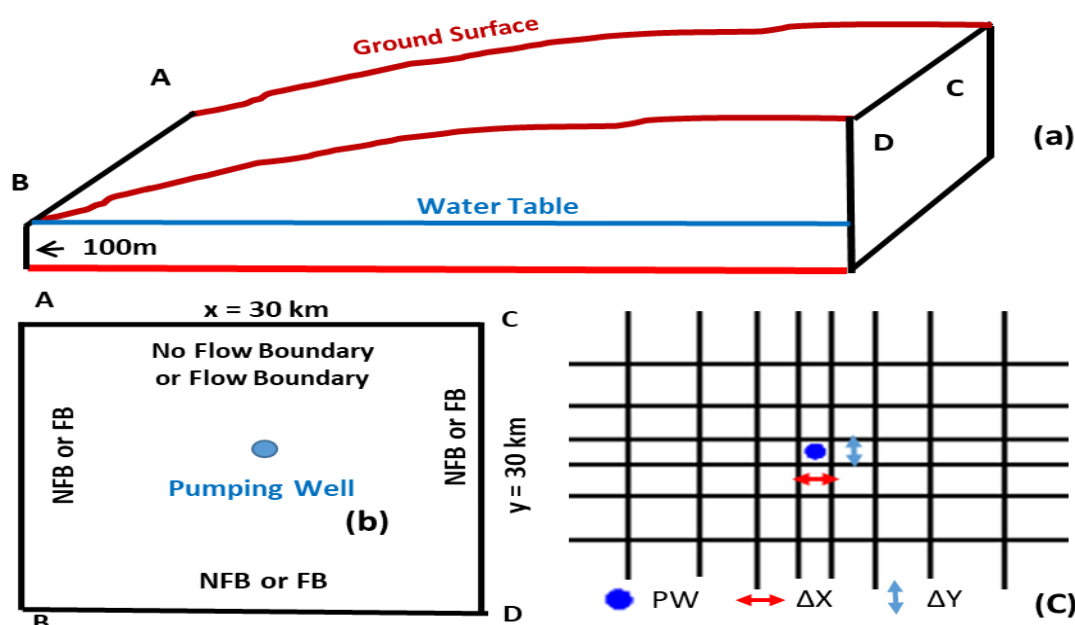
پیرامون مخروط افت به مقدار ۲۰ سانتی‌متر استفاده کردند و نشان دادند که حتی برای برداشت یک ساله و با این افت معیار بالا، همچنان حدود ۲۰ درصد از آبخوان با تداخل حریم تأثیر مواجه است (Farmanifard et al., 2022). افراد متعدد دیگری در ایران از جمله بهرامی و رجبی، زندی گوهر ریزی و همکاران، نوحانی و همکاران به اهمیت حفاظت از چاه‌ها و قنات و جلوگیری از افت سطح تراز آب در آبخوان‌ها پرداخته و بعضاً از روابط ضابطه ۷۴۷ در ارزیابی حریم استفاده کرده‌اند که نیازمند بازنگری است (Zand Goharrizi et al., 2025; Bahrami and Rajabi, 2026; Nohani et al., 2022). احمدی و همکاران در چندین مقاله موضوعات مختلف مرتبط با حریم تأثیر (Influence zone)، حریم آبیگر (Capture zone)، حریم حفاظت کمی (Quantitative protection zone) و حریم حفاظت کیفی (Qualitative protection zone) را بررسی کرده و نشان دادند که حریم حفاظت کمی هر چاه موضوعی فراتر از حریم تأثیر و حریم آبیگری است که برای مدت‌های محدود پمپاژ در یک دوره یک ساله استخراج می‌شود، و نشان دادند که لازم است اثر نهایی چاه بر آبخوان تا ایجاد تعادل و شرایط پایدار که ممکن است تا صدها سال تداوم داشته باشد مورد توجه قرار گرفته و بر اساس آن حریم حفاظت کمی هر چاه مشخص شود. (Ahmadi et al., 2023, 2024, 2025).

با توجه به اهمیت موضوع، این پژوهش به‌عنوان نخستین تحقیق مبتنی بر شبیه‌سازی، روش‌های ارائه شده در ضابطه ۷۴۷ که دستورالعملی برای تعیین حریم کمی چاه‌های آب در ایران است را با نتایج حاصل از محاسبات عددی یک آبخوان با استفاده از مدل مادفلو (Modflow) بررسی کرده و نشان داده است که این دستورالعمل تا چه حد در اهداف خود ناتوان بوده و نه تنها نمی‌تواند کارشناسان و قضات دادگستری را در مناقشات مرتبط با فاصله‌گذاری بین چاه‌های آب کمک نماید، بلکه موجبات

مجاورت رودخانه زیاد خواهد شد. با این حال چون ضابطه ۷۴۷ بر این مبنا است لذا در این پژوهش در ابتدا این حالت شبیه‌سازی شده است. در این حالت از یک شبکه‌بندی مستطیلی در مادفلو استفاده شده و آبخوان تحت بررسی از نوع آزاد آبرفتی به ضخامت اشباع ۱۰۰ متر، هدایت هیدرولیکی ۱۰ متر در روز، آبدهی ویژه ۰.۱ و وسعتی تقریباً نامحدود به ابعاد ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر است. چاهی با دبی ۴۰۰۰ متر مکعب در روز در مرکز آبخوان برای مدت ۱۸۰ روز در یک دوره خشک فاقد تغذیه سطحی مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۱). دقت نتایج مدل مادفلو به‌دقت در انتخاب شبکه‌بندی و دقت در انتخاب گام‌های زمانی بستگی دارد و با تغییرات مکرر در این دو پارامتر و از مقایسه نتایج با روش‌های تحلیلی مونیچ (Moench)، نیومن (Neuman) و تایس (Theis) مقادیر بهینه انتخاب شده است.

نتایج روش‌های مطرح شده در ضابطه ۷۴۷ مقایسه شده است:

الف - وضعیت اول شرایط خیلی ساده شده‌ای است که در ضابطه ۷۴۷ مورد نظر است و محاسبات روش‌های پیشنهادی این ضابطه با این فرضیات قابل تفسیر است. در این شرایط فرض بر این است که آبخوان دارای ضخامت اشباع ثابت و سطح آب اولیه افقی و همزمان با فعالیت چاه، فاقد تغذیه سطحی است و مرزهای آن یا آبی (Flow Boundary) است (فرض جزیره گردِ دوپویی) و یا اگر بدون جریان (Boundary No Flow) هستند آن‌قدر دور بوده که هرگز افت چاه به آنها نمی‌رسد (فرض آبخوان نامحدود تیم). این شرایط هرگز در یک آبخوان آزاد رخ نمی‌دهد، چرا که در آبخوان آزاد و در مرزهای بدون جریان، سطح آب در سالیان متمادی و بر اثر تغذیه‌ی سطحی به تدریج افزایش یافته تا اینکه نهایتاً به فرم سهموی خواهد شد و شیب هیدرولیکی آن در بالادست در مجاورت خط تقسیم آب اندک و در پایین دست در

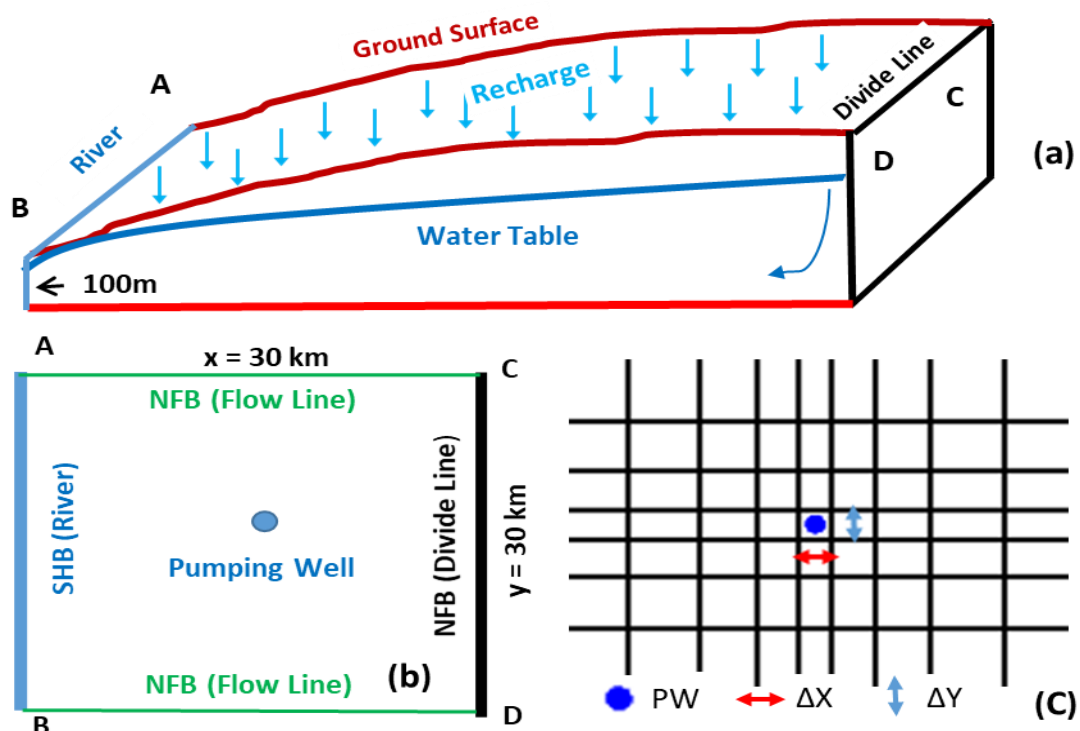


شکل ۱. شبکه‌بندی استفاده‌شده در مادفلو برای شبیه‌سازی یک چاه در آبخوان آزاد با سطح آب اولیه افقی و به ضخامت اشباع ثابت و با فرضیات ساده‌کننده و مورد نظر ضابطه ۷۴۷ ایران.

Fig 1. Discretization grid used in MODFLOW for simulating a well in an unconfined aquifer with an initial horizontal water table and constant saturated thickness, using the simplifying assumptions per Iran's Regulation 747.

مکعب در روز در مرکز آبخوان برای مدت ۱۸۰ روز در یک دوره‌ی تر که دارای تغذیه‌ای سطحی معادل تغذیه متوسط سالانه در آبخوان است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به عبارتی به همان آبخوان وضعیت الف، تغذیه سالانه داده شده تا اینکه بعد از مدت زمانی بسیار طولانی (حدود ۲۰۰ سال) سطح آبی در آبخوان شکل گرفته که تقریباً ثابت بوده و فقط دارای نوسانات اندک در دوره‌های تر و خشک است و سطح آب متوسط آن تقریباً ثابت و معادل سطح آبی با تغذیه‌ی سطحی مداوم و برابر با مقدار متوسط سالانه در آبخوان است. طبیعی است که در این حالت سطح آب در بالادست و در مرز تقسیم آب بالاتر از سطح آب در پایین دست و در مجاورت رودخانه است و این وضعیت معرف سطح آب سهموی در آبخوان‌های آزاد است (شکل ۲).

ب - وضعیت دوم شرایط واقعی‌تری از همان آبخوان آزاد است که در این شرایط بر اثر تغذیه سطحی سالانه، ضخامت آبخوان در بالادست افزایش یافته و سطح آب اولیه شیب‌دار خواهد شد. این شرایط همواره در یک آبخوان آزاد رخ می‌دهد چراکه سطح آب در آبخوان آزاد سهموی است و شیب هیدرولیکی در بالادست و در مجاورت خط تقسیم آب اندک و در پایین دست در مجاورت رودخانه زیاد است. در این حالت از یک شبکه‌بندی مستطیلی در مادفلو استفاده‌شده و آبخوان تحت بررسی از نوع آزاد آبرفتی با یک مرز آبی از نوع رودخانه‌ای با بار ثابت ۱۰۰ متر و ضخامتی متغیر و متناسب با مقدار تغذیه‌ی سطحی از رودخانه به سمت بالادست در مرز تقسیم آب است، هدایت هیدرولیکی ۱۰ متر در روز، آبدهی ویژه ۰/۱ و وسعت آبخوان به ابعاد ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر است. چاهی با دبی ۴۰۰۰ متر



شکل ۲. شبکه‌بندی استفاده‌شده در مادفلو برای شبیه‌سازی یک چاه در آبخوانی آزاد با وجود تغذیه سطحی سالانه و سطح آب اولیه شیب‌دار و سهموی و با شرایط واقعی‌تر نسبت به شکل ۱.

Fig 2. Discretization grid used in MODFLOW for simulating a well in an unconfined aquifer incorporating annual areal recharge and a sloping parabolic initial water table, under more realistic conditions compared to Fig.1

روش‌های شبیه سازی چاه و روش‌های بیان‌شده در

ضابطه ۷۴۷

برخی از روش‌های شبیه‌سازی چاه‌های آب برای برآورد مخروط افت و برخی روش‌ها فقط برای برآورد مفهوم نامعتبری به نام شعاع تأثیر ارائه شده‌اند. متأسفانه ضابطه ۷۴۷ مفهوم نامعتبر شعاع تأثیر را معادل حریم کمی در نظر گرفته است و روش‌های ارائه شده برای شعاع تأثیر را به همان شکل اولیه و با واحدهای متفاوت و بدون ذکر نحوه انتخاب زمان پمپاژ و بدون ذکر مقدار افت معیار، معرفی کرده است. در این پژوهش برای سادگی و امکان مقایسه، روابط مذکور بازنویسی شده و ضریب بدون بعد آنها بر حسب واحدهای مرسوم استخراج شده است. در این بخش روش‌های شناخته‌شده‌ای که تاکنون برای استخراج شکل کامل مخروط افت و یا برای برآورد عددی، برای مفهوم نامعتبر شعاع تأثیر استفاده شده، مورد توجه قرار گرفته و بیان شده است. قبل از معرفی این روش‌ها پارامترهای ذکر شده در آنها و واحد مرسوم آنها به این ترتیب معرفی می‌شود: T قابلیت انتقال ظاهری آبخوان بر حسب متر مربع در روز، t زمان پمپاژ بر حسب روز، S بزرگ ضریب قابلیت ذخیره‌ی آبخوان، s کوچک افت سطح آب بر حسب متر در هر فاصله از چاه، R_s شعاع تأثیر مخروط افت بر حسب متر برای هر مقدار افت معیار بر حسب متر و هر مدت پمپاژ بر حسب روز، H سطح تراز آب بر حسب متر در هر فاصله از چاه، k هدایت هیدرولیکی آبخوان بر حسب متر در روز، Q دبی چاه بر حسب متر مکعب در روز، I شیب هیدرولیکی و C ضریب بدون بعدی برای برآورد شعاع تأثیر است. از جمله این روش‌ها موارد زیر است:

روش حل مونچ (Moench) برای برآورد مخروط افت چاه روشی تحلیلی است که برای آبخوان آزاد با ضخامت ثابت و سطح آب افقی و بدون تغذیه‌ی سطحی (شکل ۱) ارائه شده و شامل تابع بسل (Bessel) نوع دو مرتبه صفر است.

این رابطه بر اساس بار هیدرولیکی بدون بعد در فضای لاپلاس تنظیم شده و حل جبری ندارد و استفاده از آن نیازمند برنامه‌های کامپیوتری است. پس از حل، افت سطح آب برای عمق متوسط سطح باز پیژومتر در هر فاصله از چاه و در هر مدت پمپاژ مشخص می‌گردد و رابطه آن به صورت معادله (۱) است. طبیعی است که برای مدت پمپاژ خیلی طولانی و بین‌هایت شعاع تأثیر چاه به مرزهای خارجی آبخوان خواهد رسید و کل آبخوان حریم تأثیر چاه خواهد بود. در این روش برای زمان محدودی مانند یک دوره خشک ۱۸۰ روزه مخروط افت قابل محاسبه و ترسیم بوده و از دقت کافی برخوردار است.

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

روش حل نیومن (Neuman) برای برآورد مخروط افت چاه یک روش تحلیلی است که برای آبخوان آزاد با ضخامت ثابت و سطح آب افقی و بدون تغذیه‌ی سطحی (شکل ۱) ارائه شده و شامل تابع بسل (Bessel) نوع یک مرتبه صفر است. این رابطه حل جبری ندارد و استفاده از آن نیازمند برنامه‌های کامپیوتری است. این رابطه نهایتاً افت سطح آب را برای عمق باز پیژومتر در هر فاصله از چاه و در هر زمان ارائه می‌دهد و رابطه آن به صورت معادله (۲) است. طبیعی است که برای مدت پمپاژ خیلی طولانی و بین‌هایت شعاع تأثیر چاه به مرزهای خارجی آبخوان خواهد رسید و کل آبخوان حریم تأثیر چاه خواهد بود. در این روش برای زمان محدودی مانند یک دوره خشک ۱۸۰ روزه مخروط افت قابل محاسبه و ترسیم بوده و از دقت کافی برخوردار است.

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

روش حل تایس (Theis) برای برآورد مخروط افت چاه روشی تحلیلی است که برای آبخوان محبوس با ضخامت

چاه به مرزهای خارجی آبخوان خواهد رسید و کل آبخوان حریم تأثیر چاه خواهد بود. این رابطه در فاصله نه چندان دوری از چاه افتِ صفر را برآورد می‌کند که نشانی از عدم دقت آن در محاسبه مخروط افت کامل چاه است. در این روش برای زمان محدودی مانند یک دوره خشک ۱۸۰ روزه، مخروط افت قابل محاسبه و ترسیم بوده ولی از دقت کافی برخوردار نیست و در فاصله کمی از چاه، افت در آبخوان را صفر برآورد می‌کند.

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (5)$$

روش حل تیم-دوپویی (Thiem-Dupuit) برای برآورد مخروط افتِ چاه در یک آبخوان آزاد با ضخامت ثابت و سطح آب افقی و بدون تغذیه‌ی سطحی (شکل ۱) درواقع همان رابطه‌ی با فرض جزیره‌ی گرد دوپویی است که توسط تیم با فرض آبخوان نامحدود جایگزین شده و رابطه‌ی آن معادله ۶ و فاقد پارامتر زمان بوده و معرف شرایطی است که پس از مدت پمپاژ بسیار طولانی مخروط افت به مرزهای آبی پایدار در پیرامون آبخوان رسیده و افت مخروط اطراف در چاه متوقف شده باشد و البته چنین شرایطی هیچ‌وقت در یک آبخوان آزاد معمولی رخ نخواهد داد، مگر همان شرایط جزیره‌ی گرد دوپویی. در این روش برای شرایطی غیر از جزیره گرد و در صورت معلوم بودن تراز آب در آبخوان و دقیقاً در مجاورت چاه، برای زمان محدودی مانند یک دوره خشک ۱۸۰ روزه، مخروط افت قابل محاسبه و ترسیم بوده ولی از دقت کافی برخوردار نیست و در فاصله کمی از چاه افت سطح آب در آبخوان را صفر برآورد می‌کند که با فرضیات دوپویی سازگار نیست.

$$H_r^2 - H_w^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r}{r_w} \quad (6)$$

ثابت و سطح تراز افقی و بدون تغذیه‌ی سطحی ارائه شده و در آبخوان آزاد با افت کم سطح آب معتبر بوده و شامل یک تابع انتگرال نمایی است (رابطه ۳) و محاسبه مقدار آن اگرچه نیازمند برنامه کامپیوتری است اما روش‌های جبری هم برای برآورد آن ارائه شده است که با دقت خوبی مقدار آن را برآورد می‌کند. این رابطه نهایتاً افت متوسط سطح آب را در هر فاصله از چاه و در هر مدت پمپاژ ارائه می‌دهد. روش تقریب باری و همکاران (Barry et al. 2000) و یا روش تقریب وطن‌خواه (Vatankhah, 2014) به‌راحتی در برنامه‌هایی مانند اکسل (Exell) قابلیت استفاده دارند و برای هر مقدار از u مقدار تابع انتگرال نمایی یا تابع w را برآورد می‌کنند (رابطه ۴). طبیعی است که برای مدت پمپاژ خیلی طولانی و بین‌هایت شعاع تأثیر چاه به مرزهای خارجی آبخوان خواهد رسید و کل آبخوان حریم تأثیر چاه خواهد بود. در این روش برای زمان محدودی مانند یک دوره خشک ۱۸۰ روزه مخروط افت قابل محاسبه و ترسیم بوده و از دقت کافی برخوردار است.

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \rightarrow \quad (3)$$

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad , \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$W = \left(\frac{\text{EXP}(-u)}{0.5616 + 0.4385 \text{EXP}(-2.2803u)} \right) \times \ln \left[1 + \left(\frac{0.5615}{u} \right) - 0.4385(A)^{-2} \right] \quad (4)$$

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

روش حل کوپر-ژاکوب (Cooper-Jacob) برای برآورد مخروط افتِ چاه یک تقریب از رابطه تایس (Theis) و برای فواصل کم از چاه و برای زمان‌های زیاد پمپاژ است و مقدار افت را برای هر فاصله از چاه از رابطه ۵ برآورد می‌کند (Cooper and Jacob, 1946). طبیعی است که برای مدت پمپاژ خیلی طولانی و بین‌هایت، شعاع تأثیر

روش حل با مدل مادفلو (Modflow) برای برآورد مخروط افت چاه در یک آبخوان آزاد که دارای ضخامت ثابت و سطح آب افقی و بدون تغذیه‌ی سطحی است (شکل ۱)، همانند سایر روش‌های عددی دستگاه معادلات جریان آب در محیط متخلخل به روش‌های تکرار و با در نظر گرفتن یک مقدار اولیه برای سطح آب هر بلوک حل شده و نهایتاً سطح آب در هر نقطه از آبخوان و در هر فاصله از چاه محاسبه می‌شود. در آبخوان مورد نظر مخروط افت چاه مذکور برای پمپاژ طولانی نهایتاً به مرزهای خارجی آبخوان رسیده و پس از آن در مرزهای بدون جریان با کاهش مداوم سطح آب در کل آبخوان آب مورد نیاز چاه تأمین خواهد شد و در مرزهای جریان با تأمین آب از مرز آبی افت سطح آب در مخروط افت متوقف خواهد شد. اما برای مدت پمپاژ محدودی مانند ۱۸۰ روزه در دوره خشک و بدون تغذیه سطحی، مخروط افت به شعاع کمتری خواهد رسید که تقریباً معادل روش‌های مونچ، نیومن و تایس است اما قطعاً وسعت آن به مراتب بیشتر از روش‌های کوپر-ژاکوب و تیم-دوپویی است.

روش حل با مدل مادفلو (Modflow) برای برآورد مخروط افت چاه در یک آبخوان آزاد در شرایط واقعی‌تر که دارای فرضیات کمتر و مقدار تغذیه‌ای برابر با تغذیه متوسط سالانه است (شکل ۲)، همانند سایر روش‌های عددی دستگاه معادلات جریان آب در محیط متخلخل به روش‌های تکرار و با در نظر گرفتن یک مقدار اولیه برای سطح آب هر بلوک حل شده و نهایتاً سطح آب در هر نقطه از آبخوان و در هر فاصله از چاه محاسبه می‌گردد. در آبخوان مورد نظر در شکل ۲ مخروط افت چاه مذکور برای پمپاژ طولانی، نهایتاً به مرزهای خارجی آبخوان رسیده و پس از آن با کاهش مداوم سطح آب در کل آبخوان، آب مورد نیاز چاه تأمین خواهد شد تا اینکه بین مقدار تغذیه از سطح و تخلیه از چاه و تخلیه طبیعی از آبخوان تعادل برقرار شود، پس از تعادل، سطح آب در آبخوان ثابت

خواهد شد و اگر برای تغذیه سطحی، مقدار متوسط سالانه به مدل داده نشده و فقط در دوره‌تر اعمال شود، در این صورت سطح آب در آبخوان بین دو سطح در پایان دوره‌تر و پایان دوره خشک نوسان اندکی خواهد داشت اما مقدار متوسط این دو سطح نسبتاً پایدار است. برای مدت پمپاژ محدودی مانند ۱۸۰ روزه و با تغذیه‌ای متناسب با تغذیه متوسط سالانه به میزان مشخص، مخروط افت به شعاع کمتری خواهد رسید و البته متقارن نیست و در پمپاژ مداوم و طولانی نهایتاً مخروط افت به مرزها خواهد رسید (در آبخوان شکل ۲ در مدت یکسال). پس از رسیدن مخروط افت به مرزها، همچنان افت سطح آب در آبخوان افزایش خواهد یافت تا اینکه در مدت زمانی بسیار طولانی به تعادل رسیده و پس از ایجاد یک افت قابل توجه در مرز بالادست، متوقف خواهد شد (در آبخوان شکل ۲ در مدت ۲۰۰ سال و افت در مرز به یک متر خواهد رسید).

رابطه کلی شعاع تأثیر در یک آبخوان با سطح آب اولیه افقی و بدون تغذیه سطحی (شکل ۱) به صورت رابطه ۷ است (Bresciani et al. 2020) و تقریباً می‌توان اکثر روابط ارائه شده برای شعاع تأثیر را در قالب این رابطه بازنویسی کرد. این رابطه حاوی پارامتر زمان بوده و مقدار افت معیار به نوعی در ضریب ثابت C لحاظ شده است. متأسفانه در ضابطه ۷۴۷ به نحوه‌ی انتخاب زمان برای استفاده در روابط اشاره نشده اما به نظر می‌رسد که زمان را مدت پایداری سطح آب در چاه در نظر گرفته که به هیچ وجه نمی‌تواند درست باشد، چراکه اولاً پایداری نسبی سطح آب در چاه در چند روز پمپاژ متوالی نمی‌تواند مؤید رسیدن به شرایط پایدار باشد و ثانیاً تعیین حریم کمی می‌بایست قبل از تعیین محل چاه انجام شود. در ضابطه ۷۴۷ قاعداً روش‌های فاقد پارامتر زمان برای شرایط پایدار ارائه شده‌اند، در حالی که شرایط پایدار به ندرت رخ می‌دهد و اگر ایجاد شود برای آبخوانی با مرزهای آبی پایدار نظیر دریا است و در آن صورت شعاع تأثیر فاصله چاه تا مرز

$$R_{(s=x)} = C\sqrt{Tt/S} ; C = 2\sqrt{u} \quad (8)$$

روش جونز (Jones) برای برآورد شعاع تأثیر چاه پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۹ در خواهد آمد که مقدار C در آن برابر با ۴ خواهد شد.

$$R_{(s=0)} = 4\sqrt{(Tt/S)} \quad (9)$$

روش ویلبور (Wilbur) برای برآورد شعاع تأثیر چاه پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۱۰ در خواهد آمد که مقدار C در آن برابر با ۳ خواهد شد.

$$R_{(s=0)} = 3\sqrt{(Tt/S)} \quad (10)$$

روش هورست (Hurst) برای برآورد شعاع تأثیر چاه پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۱۱ در خواهد آمد که مقدار C در آن برابر با ۲/۸۳ خواهد شد.

$$R_{(s=0)} = 2.83\sqrt{(Tt/S)} \quad (11)$$

روش شولتز (Schultz) در ضابطه ۷۴۷ و روش وبر (Veber) برای برآورد شعاع تأثیر چاه پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۱۲ در خواهند آمد که مقدار C در آنها برابر با ۲/۴۵ خواهد شد.

$$R_{(s=0)} = 2.45\sqrt{(Tt/S)} \quad (12)$$

روش‌های موسکات (Muskat)، ون‌پولن (Vanpoolen)، ولا-مکینلی (Vela-Mckinley) و لی (Lee) برای برآورد شعاع تأثیر چاه همگی پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۱۳ در خواهند آمد که مقدار C در آنها برابر با ۲ خواهد شد.

$$R_{(s=0)} = 2\sqrt{(Tt/S)} \quad (13)$$

بوده و از قبل معلوم و نیازی به محاسبه ندارد. همچنین در ضابطه ۷۴۷ اشاره‌ای به افت معیار در پیرامون مخروط افت نشده اما می‌توان تصور کرد که منظور این بوده که افت از این فاصله به بعد آن قدر کم است که قابل صرف‌نظر است (یعنی افت صفر).

$$R_{(s=x)} = C\sqrt{Tt/S} \quad (7)$$

روش‌های مونچ (Moench)، نیومن (Neuman) و تاپس (Theis) برای برآورد شعاع تأثیر چاه، همان معادلات ۱ تا ۴ است که حل آنها نیازمند برنامه رایانه‌ای و استفاده از روش‌های تکرار است و نهایتاً برای هر مدت پمپاژ و هر مقدار افت سطح آب در اطراف چاه، شعاع اثر آن محاسبه شده و می‌توان برای هر زمان پمپاژ و هر مقدار افت، یک شعاع تأثیر تعریف کرد (به عنوان مثال شعاع تأثیر پمپاژ ۱۸۰ روزه برای یک میلی‌متر افت سطح آب در پیرامون مخروط افت). به این ترتیب روشن است که شعاع تأثیر یک چاه در اصل یک پارامتر ویژه از چاه و آبخوان نیست و نمی‌توان عدد منحصر به فرد و قابل اعتمادی برای آن معرفی کرد. لازم به ذکر است که روابط این سه روش را ممکن است بتوان به صورت معادله ۷ بازنویسی کرد اما ضرورتی نداشته و کمکی به حل مسئله نخواهد کرد. به عنوان مثال برای رابطه تاپس مقدار C برابر خواهد شد با دو برابر رادیكال u و برای محاسبه u ابتدا باید مقدار W که تابعی از Q، T و s است محاسبه شده و سپس از تابع W مقدار u به روش تکرار برآورد شود (رابطه ۴). مقدار u در فواصل نزدیک چاه یعنی برای افت‌های زیاد، مقداری بسیار کوچک و برای فواصل دور از چاه یعنی افت‌های کم، مقداری بزرگ است. دامنه u در آبخوان شکل ۱ برای افت‌های یک سانتی‌متر، یک میلی‌متر و یک میکرومتر به ترتیب حدوداً ۲ و ۴ و ۹ است. بنابراین مقدار C در رابطه ۸ بین ۲ تا ۹ متغیر است و برای افت قابل سنجش یک میلی‌متری می‌توان آن را برابر با ۴ در نظر گرفت.

مرزهای آبی نامتناهی برسد و در این صورت فاصله چاه از مرز همان شعاع تأثیر است و از قبل معلوم است.

$$R_{(s=0)} = 10.2 s_w \sqrt{k} \quad (18)$$

روش دوپویی-تیم (Dupuit-Thiem) برای برآورد شعاع تأثیر چاه بیان شده در ضابطه ۷۴۷ همان رابطه ۶ است که به صورت رابطه ۱۹ قابل بازنویسی است. این رابطه اساساً برای برآورد شعاع تأثیر معتبر نیست چراکه حاوی شرط پایداری است و این شرط در صورتی محقق می‌شود که شعاع تأثیر به مرزهای آبی نامتناهی برسد و در این صورت فاصله چاه از مرز همان شعاع تأثیر است و از قبل معلوم است.

$$R_{(s=x)} = r_w \exp(\pi k (H_r^2 - H_w^2)/Q) \quad (19)$$

$$\text{in } s = 0, \quad H_r^2 = H_0^2$$

روش کمفورت (Combeft) برای برآورد شعاع تأثیر چاه که در ضابطه ۷۴۷ بیان شده است، پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۲۰ در خواهد آمد. از آنجایی که مشخص نشده گرادیان هیدرولیکی مربوط به شرایط اولیه است یا در زمان پمپاژ و اگر زمان پمپاژ باشد قید نشده برای چه فاصله‌ای از چاه، بنابراین غیر قابل استفاده است چراکه این پارامتر در فواصل مختلف چاه متغیر است.

$$R_{(s=0)} = 32 \sqrt[4]{HKI} \quad (20)$$

روش بوگومولف (Bogomolof) برای برآورد شعاع تأثیر چاه که در ضابطه ۷۴۷ بیان شده است، دارای جدولی بر حسب اندازه غالب دانه‌بندی آبخوان، هدایت هیدرولیکی و آبدی چاه است که حداکثر شعاع تأثیر را ۱۵۰ متر در نظر گرفته و این مقدار به مراتب کمتر از وسعت مخروط افت برای چند روز پمپاژ است چه رسد به مخروط افتی در شرایط نسبتاً پایدار. از طرفی اساساً آبدی معرفی شده در

روش کوساکین (Kusakin) برای برآورد شعاع تأثیر چاه در ضابطه ۷۴۷ پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۱۴ در خواهد آمد که مقدار C در آن برابر با ۱/۹ خواهد شد.

$$R_{(s=0)} = 1.9 \sqrt{(Tt/S)} \quad (14)$$

روش شنیبلی (Sheneebeli) برای برآورد شعاع تأثیر چاه در ضابطه ۷۴۷ پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به فرم رابطه ۱۵ در خواهد آمد که مقدار C در آن برابر با ۱/۵ خواهد شد.

$$R_{(s=0)} = 1.5 \sqrt{(Tt/S)} \quad (15)$$

روش کوپر-ژاکوب (Cooper-Jacob) برای برآورد شعاع تأثیر چاه در ضابطه ۷۴۷ همان معادله ۵ است که به صورت معادله ۱۶ قابل بازنویسی است و برای افت صفر مقدار C در آن برابر با ۱/۵ خواهد شد.

$$R_{(s=x)} = c \sqrt{(Tt/S)}, \quad c = \sqrt{2.25 / \exp(4\pi Ts/Q)} \quad (16)$$

روش کوزنی (Kozoni) برای برآورد شعاع تأثیر چاه بیان شده در ضابطه ۷۴۷ پس از بازنویسی بر حسب واحدهای مرسوم به صورت رابطه ۱۷ قابل بازنویسی است و نمی‌توان آن را به فرم رابطه ۷ تبدیل کرد.

$$R_{(s=0)} = 2.6 \sqrt{\frac{t}{S}} \sqrt{Qk} \quad (17)$$

روش زیشارد-کریلیس (Siechard-Kyrieleis) برای برآورد شعاع تأثیر چاه بیان شده در ضابطه ۷۴۷ به صورت رابطه ۱۸ قابل بازنویسی است. این رابطه اساساً برای برآورد شعاع تأثیر معتبر نیست چراکه حاوی شرط پایداری است و این شرط در صورتی محقق می‌شود که شعاع تأثیر به

این روش به مراتب کمتر از آبدهی چاه‌های عمیق امروزی است.

روش منحنی تراز (Contour Line) برای برآورد شعاع تأثیر چاه بیان شده در ضابطه ۷۴۷ به عنوان روشی با دقت بالا اما پرهزینه معرفی شده است درحالی که این روش حتی با داشتن تعداد زیادی چاه مشاهده‌ای در اطراف چاه پمپاژ، حداکثر می‌تواند برای مدت پمپاژ، مخروط افت را شبیه سازی کند در حالی که تثبیت مخروط افت واقعی هر چاه ممکن است ده‌ها و بلکه صدها سال زمان لازم داشته باشد و از طریق پایش عملی امکان‌پذیر نیست خصوصاً آنکه اثر تداخل چاه‌های مجاور هم مانع برداشت و ثبت اثرات یک چاه در آبخوان است.

نتایج و بحث

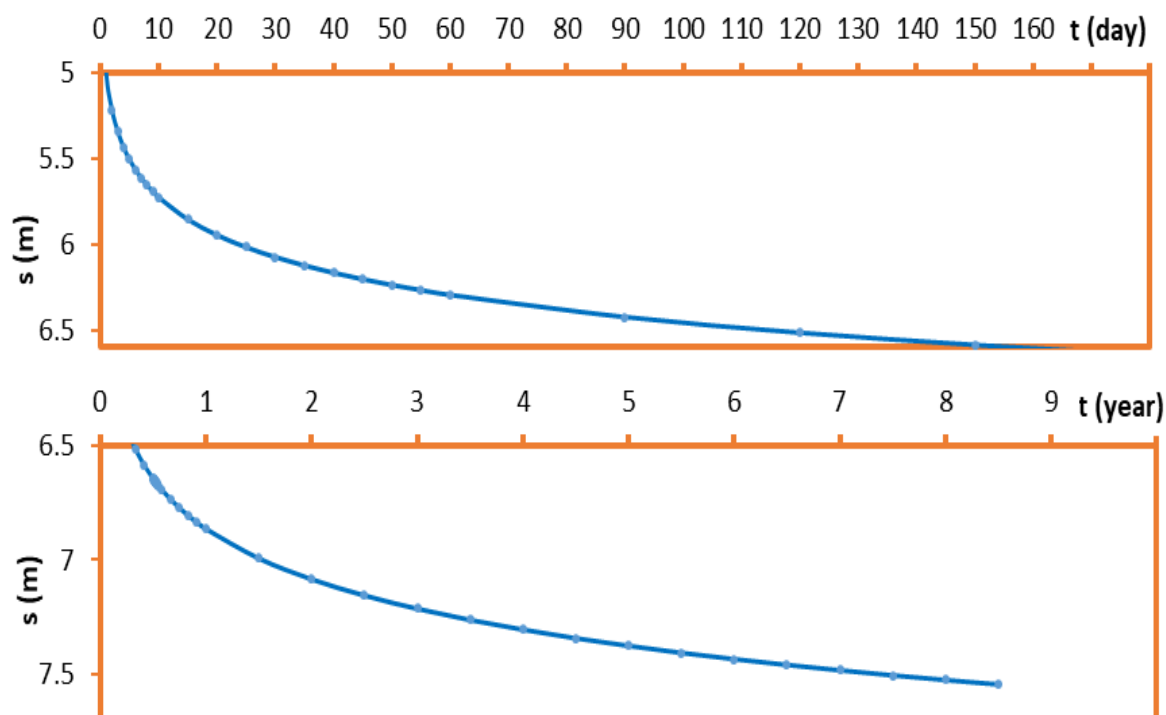
ارزیابی مخروط افت در زمان پمپاژ

آبخوان مورد نظر در شکل ۱ معرف فرضیات ساده کننده‌ی زیادی بوده و عملاً چنین شرایطی در آبخوان آزاد رخ نمی‌دهد، اما عملاً ضابطه ۷۴۷ این فرضیات را مد نظر داشته است. ضابطه مذکور شعاع تأثیر را معادل حریم کمی در نظر گرفته و آن را ((مقداری از اراضی پیرامون چاه تعریف کرده که چنانچه چاه با آبدهی مجاز قید شده در پروانه‌ی بهره‌برداری پمپاژ نماید، با حد نهایی مخروط افت در چاه منطبق باشد)). اولاً معادل دانستن حریم کمی با شعاع تأثیر هیچ‌گونه مبنای علمی ندارد و ثانیاً شعاع تأثیر اساساً یک مقدار محدود و پارامتری منحصربه‌فرد از چاه و آبخوان نیست که مبنایی برای تعیین حریم کمی چاه باشد. به عبارتی اثر هر چاه در آبخوان نهایتاً به کل آبخوان خواهد رسید مگر آنکه به یک مرز آبی پایدار و نامحدود منتهی شود که بسیار نادر است. بنابراین از نظر تئوری، شعاع تأثیر هر چاه تقریباً کل آبخوان است. با این حال، چون ضابطه ۷۴۷ از مفهوم شعاع تأثیر برای حریم کمی استفاده کرده، لذا در این پژوهش ابتدا برای آبخوان

مورد نظر، به روش‌های مطرح شده برای یک زمان محدود ۱۸۰ روزه و افت‌های معیار مختلف، مقدار شعاع تأثیر محاسبه و سپس تحلیل خواهد شد. در این آبخوان اگر هدایت هیدرولیکی برابر با ۱۰ متر بر روز و ضخامت اشباع برابر با ۱۰۰ متر باشد، مقدار قابلیت انتقال برابر با ۱۰۰۰ مترمربع در روز خواهد شد. باوجود قابلیت ذخیره‌ای برابر با آبدهی ویژه و برابر با ۰/۱ و برای مدت پمپاژی برابر با ۱۸۰ روز، و چاهی با دبی ۴۰۰۰ متر مکعب در روز، مقدار افت برای هر فاصله از چاه از روش‌های مختلف قابل محاسبه است. در این آبخوان برای شعاع مؤثر چاه (r_w) به مقدار ۰/۲۹۴ متر، مقدار افت آبخوان در مجاورت چاه (s_w) برابر با ۵/۷۲۶۴ متر خواهد شد. با توجه به ضخامت ۱۰۰ متری آبخوان، مقدار تراز آب در چاه (H_w) برابر با ۹۴/۲۷۳۵ متر خواهد شد و بر این اساس مقدار افت سطح آب (S_r) برای هر فاصله از چاه (r) و سپس سطح تراز آب در هر فاصله از چاه (H_r) از روش‌های مختلف قابل محاسبه است.

بررسی افت در چاه مورد نظر در شکل ۱ در مقیاس یک روزه و پس از چند روز پمپاژ، نشان می‌دهد که تفاوت افت یک روزه‌ی روزهای متوالی، کمتر از یک میلی‌متر است (نتایج منطبق مادفلو و تاپس و نیومن)، و ممکن است با ابزار سنجش معمولی قابل تشخیص نباشد ولی این مقدار افت ناچیز در چاه را نباید به پایداری جریان مرتبط دانست مگر آنکه شرایط جزیره گرد دوپویی برقرار بوده و یا چاه در نزدیک یک منبع آب نامحدود قرار داشته باشد. متأسفانه آنچه از ضابطه ۷۴۷ برداشت می‌شود آن است که پایداری نسبی سطح آب در چاه در آزمایش پمپاژ پس از چند ساعت محدود را معادل ایجاد شرایط پایدار در نظر گرفته و به همین دلیل در روش تاپس زمان مورد نظر را معادل همین مقدار محدود در نظر گرفته و در روش‌های بدون زمان، سطح آب در چاه را پس از این مدت محدود به عنوان سطح آب پایدار در نظر گرفته است. این درحالی

است که این پایداری نسبی به‌دلیل محدودیت ما در
 یک آبخوان با چنین فرضیاتی، هرگز به پایداری نخواهد
 رسید مگر آنکه شرایط جزیره گرد برقرار باشد. (شکل ۳).

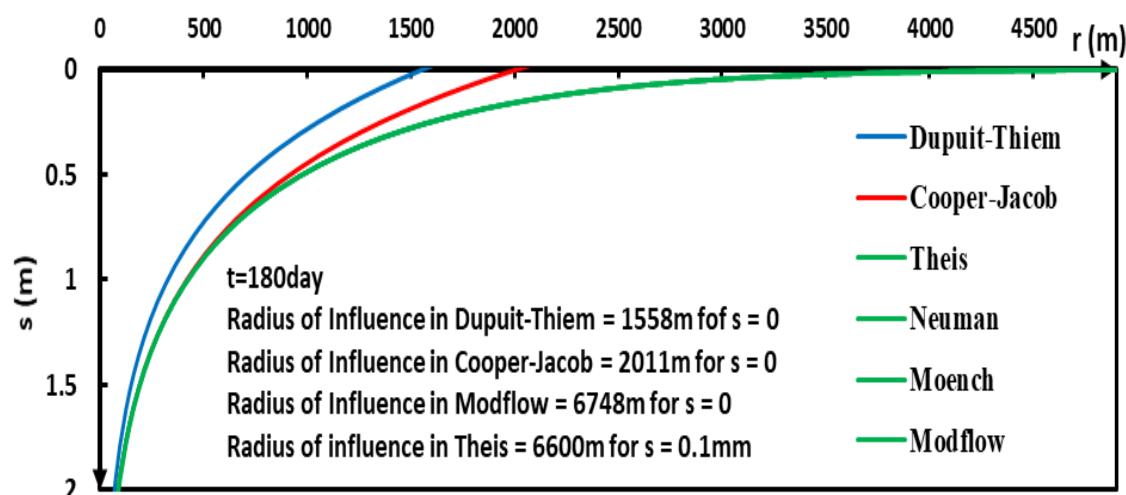


شکل ۳. افت در چاه در آبخوان شکل ۱ در روزهای اول پمپاژ قابل توجه و قابل سنجش است اما پس از چند روز، تفاوت افت روزهای متوالی به کمتر از یک میلی‌متر می‌رسد که به راحتی قابل سنجش نیست و نباید با فرض جریان پایدار اشتباه گرفته شود (نتایج منطبق مادفلو، نیومن و تایس).

Fig 3. Drawdown in the well within the aquifer of Figure 1 is significant and measurable during the initial days of pumping. However, after several days, the difference in daily drawdown decreases to less than one millimeter, making it difficult to measure accurately. This should not be mistaken for an assumption of steady-state flow (Results are consistent with MODFLOW, Neuman, and Theis).

تایس نزدیک باشد اما مخروط افت شبیه‌سازی شده به این روش در فاصله نزدیکی از چاه و در شعاع ۲۰۱۱ متری به صفر رسیده و این نشانه‌ای از عدم دقت فرضیات کوپر و ژاکوب برای فواصل دور از چاه است (شکل ۴). در روش تیم-دوپویی افت محاسبه شده به این روش در فاصله خیلی نزدیکی از چاه و در شعاع ۱۵۵۸ متری به صفر رسیده و این نشانه‌ای از عدم برقراری فرضیات این روش‌ها و عدم برقراری شرط پایداری و نهایتاً عدم دقت فرضیات تیم-دوپویی برای فواصل دور از چاه است (شکل ۴).

در روش‌های تحلیلی مونچ، نیومن و تایس و از روابط ۱ تا ۴ برای آبخوان شکل ۱ و با فرضیات ساده کننده، مخروط افت و به عبارتی حریم تأثیر چاه برای هر مدت پمپاژ با دقت قابل قبولی قابل محاسبه و ترسیم است که برای ۱۸۰ روز نتایج این سه روش با روش حل عددی مادفلو تقریباً بر هم منطبق و شعاع تأثیر برای افت نزدیک به صفر و حدود ۰/۱ میلی‌متری به فاصله حدود ۶۷۰۰ متری از چاه رسیده است (شکل ۴). در روش کوپر-ژاکوب شعاع تأثیر مخروط افت می‌بایست به شعاع تأثیر حاصل از رابطه

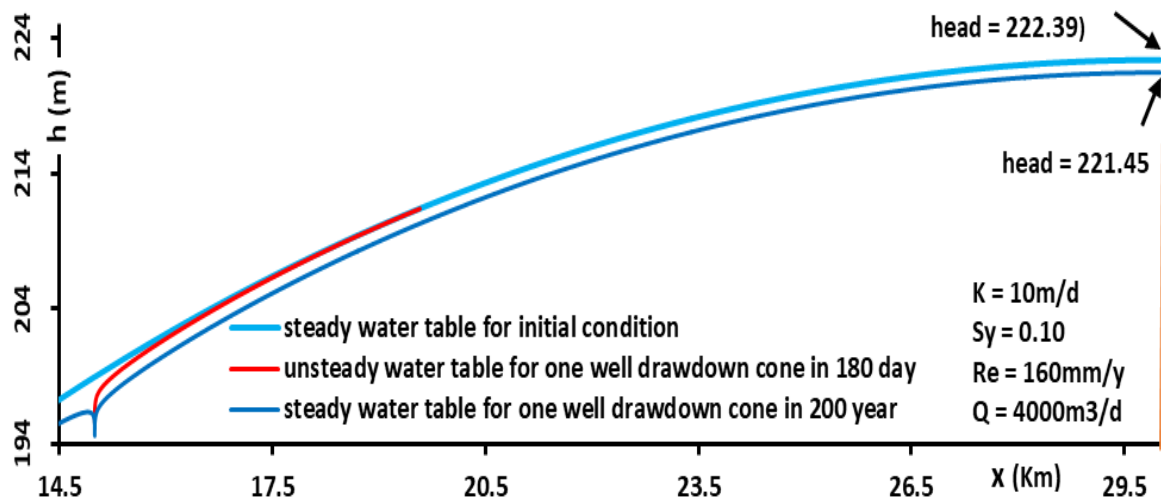


شکل ۴. در برآورد مخروط افت و شعاع تأثیر در آبخوان شکل ۱ برای مدت ۱۸۰ روز پمپاژ در یک دوره خشک بدون تغذیه سطحی به روش‌های تیم و دوپویی، کوپر و ژاکوب، مونچ، نیومن، تاپس و مادفلو. در چنین آبخوانی مخروط افت هرگز پایدار نخواهد شد و همچنان با تداوم پمپاژ گسترده‌تر و عمیق‌تر خواهد شد، مگر آنکه به مرزهای آبی نامحدود ختم شود.

Fig 4. Estimation of the cone of depression and radius of influence in the aquifer of Figure 1 after 180 days of pumping during a dry period without areal recharge, using the methods of Theim and Dupuit, Cooper and Jacob, Moench, Neuman, Theis, and MODFLOW. In such an aquifer, the cone of depression will never stabilize and will continue to expand both laterally and deepen with continued pumping, unless it intercepts unlimited water boundaries.

کاهش مداوم سطح آب در آبخوان خواهد شد و پس از حدود یک متر افت در مرز بالادست، به تعادل رسیده و از آن پس تغییر نخواهد کرد مگر آنکه تنش دیگری مانند حفر یک چاه جدید بر آبخوان وارد شود. مخروط افت در این حالت متقارن نیست و به سمت پایین دست که مرز آبی است به تدریج کوچک‌تر شده و افت آن در مرز رودخانه به صفر خواهد رسید (شکل ۵). در این حالت استفاده از روش‌های تحلیلی مونچ، نیومن و تاپس با فرضیات آنها سازگار نیست اما در زمان‌های محدود و با فرض عدم تغذیه در دوره خشک و جایگزینی ضخامت اشباع متوسط در محل چاه، می‌توان افت در اطراف چاه که همان مخروط افت ظاهری است را حساب کرده و از سطح آب شیب‌دار اولیه کسر نمود و برآوردی از مخروط افت واقعی چاه به دست آورد، حتی در این حالت هم مخروط افت برآورد شده به مراتب از روش‌های پیشنهادی ضابطه ۷۴۷ به واقعیت نزدیک‌تر است.

در روش حل عددی با مدل مادفلو (Modflow) در آبخوان مورد نظر در شکل ۲ مخروط افت چاه مذکور برای پمپاژ طولانی نهایتاً به مرزهای خارجی آبخوان رسیده و پس از آن با کاهش مداوم سطح آب در کل آبخوان، آب مورد نیاز چاه تأمین خواهد شد تا اینکه بین مقدار تغذیه از سطح و تخلیه از چاه و تخلیه طبیعی از آبخوان تعادل برقرار شود، پس از تعادل، سطح آب در آبخوان ثابت خواهد شد و اگر برای تغذیه سطحی مقدار متوسط سالانه در نظر گرفته نشود و فقط در دوره‌تر اعمال شود در این صورت سطح آب در آبخوان بین دو سطح در پایان دوره‌تر و پایان دوره خشک نوسان اندکی خواهد داشت اما مقدار متوسط این دو سطح نسبتاً پایدار است. برای مدت پمپاژ ۱۸۰ روزه در دوره خشک و با تغذیه‌ای متناسب با تغذیه متوسط سالانه به میزان ۱۶۰ میلی‌متر، مخروط افت در بالادست به شعاع حدود ۷ هزار متری خواهد رسید. در پمپاژ مداوم و طولانی نهایتاً بعد از حدود یک سال مخروط افت به مرزها خواهد رسید و حدود ۲۰۰ سال همچنان اثر این چاه باعث



شکل ۵. برآورد مخروط افت و شعاع تأثیر در آبخوان شکل ۲ برای پمپاژ به مدت ۱۸۰ روز پمپاژ با وجود تغذیه متوسط سالانه و برای پمپاژ خیلی طولانی تا ایجاد شرایط پایدار با وجود تغذیه متوسط سالانه و به‌روش عددی با مدل مادفلو (مخروط افت پس از یک سال به مرز رسیده و پس از ۲۰۰ سال پایدار می‌شود).

Fig 5. Estimation of the cone of depression and radius of influence in the aquifer of Figure 2 after 180 days of pumping with average annual recharge, and for extended pumping until reaching steady-state conditions with average annual recharge, using the numerical model MODFLOW (drawdown reached the boundary after one year and stabilized after 200 years).

جریان اولیه (شکل ۲)، مقداری از آب آزاد شده از مخروط افت هرگز به سمت چاه جریان نمی‌یابد و همراه با جریان اولیه به مسیر خود ادامه می‌دهد و این مسئله نشان می‌دهد که اهمیت بررسی شعاع تأثیر بیشتر معطوف به آبخوان‌های بدون جریان اولیه (شکل ۱) است. برای آبخوان و چاه مورد نظر (شکل ۱) در این پژوهش فقط افت مطلق مورد نظر است در حالی که بر اساس معیارها و روش‌های مختلف دیگری هم می‌توان شعاع تأثیر را محاسبه و بررسی کرد (Ahmadi et al., 2023). برای روش‌های مختلف برای آبخوان شکل ۱ و برای چندین افت مشخص، مقدار شعاع تأثیر چاه برای مدت ۱۸۰ روز پمپاژ مداوم محاسبه شده و در جدول ۱ نشان داده شده و با مقادیر روش‌های دقیق‌تر مقایسه شده است. همچنان که مشاهده می‌شود روش‌های عددی مادفلو و تحلیلی مونچ، نیومن و تایس از دقت بالایی برخوردار بوده و تقریباً برای افت مطلق یک میلیمتر و بیشتر از آن بر هم منطبق هستند اما سایر روش‌هایی که تاکنون ارائه شده و شعاع

ارزیابی شعاع تأثیر در زمان پمپاژ

بدیهی است که شعاع تأثیر در آبخوان مفروض در شکل ۱ پس از خاموشی پمپ و علی‌رغم شروع جبران افت در مجاورت چاه، اما در پیرامون مخروط افت همچنان توسعه می‌یابد و توجه به آن در مدیریت بهره‌برداری از آبخوان لازم است (Ahmadi et al., 2023). از آنجایی که هدف پژوهش در این بخش بررسی مقدار شعاع تأثیر چاه برای یک افت معیار مطلق و فقط برای مخروط افت ایجاد شده در مدت پمپاژ است، لذا اثر توسعه‌ی مخروط افت پس از خاموشی پمپ نادیده گرفته شده و از آن صرف‌نظر می‌شود.

در رابطه ۷ پارامترهای T و S و t به ترتیب قابلیت انتقال، قابلیت ذخیره و زمان بوده و ضریب بدون بعد C متناسب با نوع معیار (افت مطلق، افت نسبی، حجم نسبی، جریان نسبی) و روش محاسبه، خود تابعی از مقدار دبی و مقدار پارامتر معیار و بعضاً برخی از مشخصات آبخوان است. نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است در آبخوان با

تأثیر را به فرض افت نزدیک به صفر و قابل صرف نظر برآورد می‌کنند مقادیر آنها به مراتب کمتر از مقدار شعاع تأثیر واقعی برای مدت پمپاژ ۱۸۰ روزه و افت یک دهم میلی‌متری است. از بین روش‌های مذکور آنهایی که فاقد پارامتر زمان هستند اساساً استفاده از آن‌ها برای برآورد شعاع تأثیر چاه بی‌معنی است چراکه حاوی شرط پایداری بوده و شرط پایداری تنها وقتی حاصل می‌شود که اثر چاه به مرزهای آبی نامحدود برسد و در این حالت حریم تأثیر چاه همان فاصله‌ی مرز آبی از چاه است و از قبل مشخص است و نیازی به برآورد ندارد. از بین سایر روش‌ها که دارای پارامتر زمان هستند، باید بررسی شود که افت معیار مورد نظر آنها برای برآورد ضریب بدون بعد C در رابطه ۷ چه مقدار بوده است. بیشتر روش‌های برآورد شعاع تأثیر برای پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در زمان اجرای پروژه‌های مهندسی از قبیل سازه‌هایی نظیر پایه پل، حفر تونل، پی ساختمان و استخراج معادن ارائه شده و افت معیار در آنها بیشتر از یک سانتی‌متر مورد نظر بوده و لذا

ضریب C در آنها کمتر از ۴ انتخاب شده و شعاع تأثیر را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. اصولاً با وجود روابط ساده‌ای مانند تاپس یا با وجود امکان مدل‌سازی عددی آبخوان‌ها، ضرورتی به معرفی روش‌های ساده‌تر با فرضیات نادرست برای برآورد شعاع تأثیر نیست و این روابط کم دقت باید کنار گذاشته شوند. بدیهی است که استفاده از این روش‌ها برای برآورد شعاع تأثیر چاه و تعمیم آن به حریم حفاظت کمی چاه و استفاده از آن در مدیریت و بهره‌برداری از آبخوان‌ها انتخابی نادرست بوده و همین بی‌توجهی موجبات فاصله‌گذاری نامناسب و مقدار مجوز نامناسب حجم برداشت از چاه‌های آب و نهایتاً برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها و افت مداوم سطح آب در آن‌ها و کاهش تخلیه طبیعی آن‌ها و خشک شدن تدریجی رودخانه‌ها در بسیاری از کشورها از جمله ایران شده و اثرات آن در سال‌های آتی به مراتب هویدا تر شده و غیر قابل جبران خواهد بود.

جدول ۱. مقدار شعاع تأثیر (R) بر حسب متر در آبخوان شکل ۱ برای چندین افت مطلق (S) و برای ۱۸۰ روز پمپاژ (t).

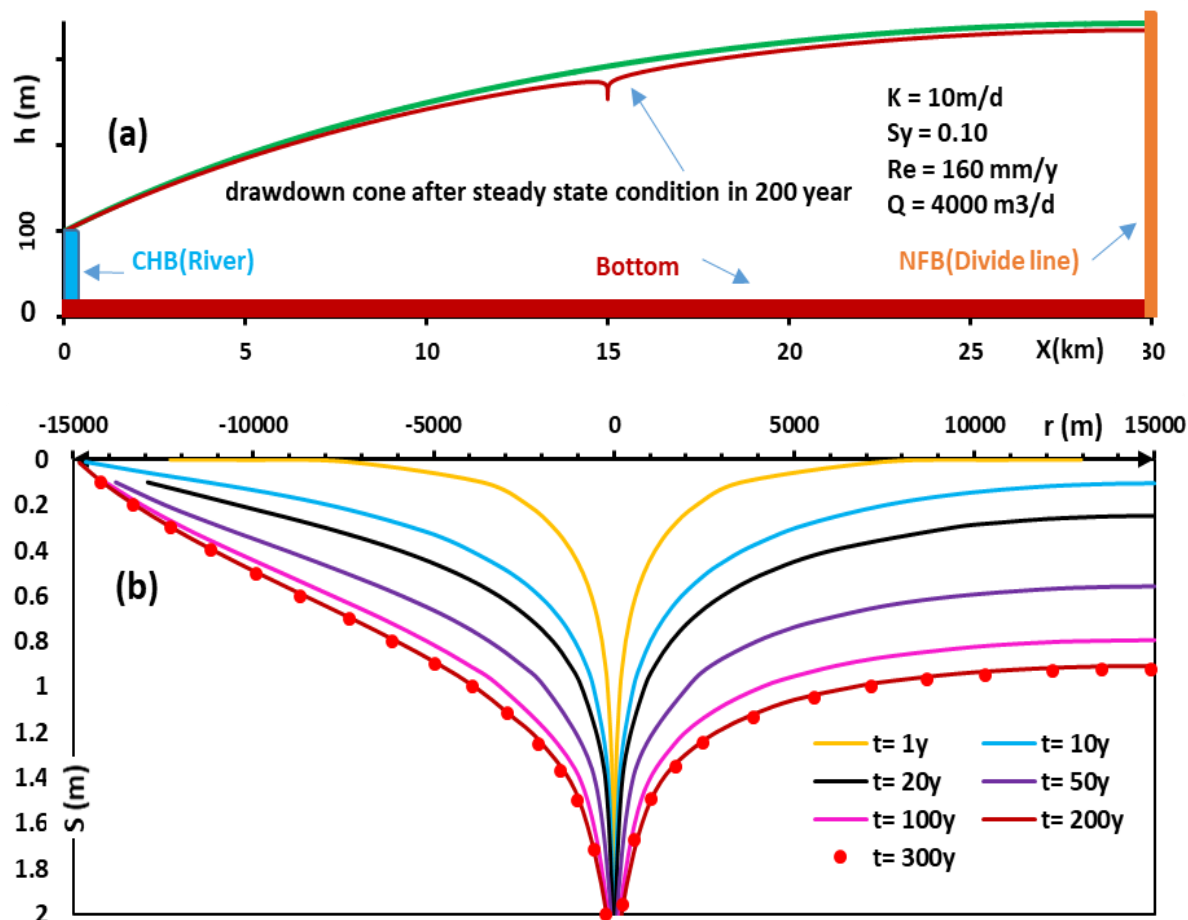
Table 1. Radius of Influence (R) in Meters For The Aquifer in Figure 1 at Various Absolute Drawdown Values (S) After 180 Days of Pumping (T), Calculated Using Different Methods.

Method	S = 0 or $\cong 0.1\text{mm}$	S = 1mm	S = 1cm	S = 10cm
R in Modflow	6700	5458	4089	2386
R in Moench	6356	5400	4099	2392
R in Neuman	6356	5400	4098	2392
R in Theis	6600	5465	4090	2388
R in Cooper-Jacob	2011	2008	1980	1719
R in Dupuit-Thiem	1558	1555	1533	1331
R in Jones	5364	-	-	-
R in Wilbur	4023	-	-	-
R in Hurest	3795	-	-	-
R in Schultz-Weber	3287	-	-	-
R in Muskat -	2682	-	-	-

R in Kusakin	2548	-	-	-
R in Sheneebeli	2012	-	-	-
R in Kozoni	1560	-	-	-
R in Siechart-Kyrieleis	185	-	-	-

همچنان که قبلاً گفته شد آبخوان مفروض شکل ۱ عملاً در طبیعت ایجاد نمی‌شود و آنچه به واقعیت نزدیک‌تر است آبخوان مفروض شکل ۲ است. در این حالت همچنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود سطح آب اولیه در آبخوان دارای مقداری شیب طبیعی است و در مرز تقسیم آب که عمدتاً از نوع بدون جریان است، شیب آن در بالادست خیلی کم و به سمت پایین دست و در مجاورت محل تخلیه به رودخانه یا زهکش زیاد است. از طرفی مقدار کلی شیب هیدرولیکی در آبخوان و ضخامت اشباع آن از مرز آبی تا مرز بدون جریان به مقدار تغذیه سطحی بستگی دارد و در تغذیه‌ی بالاتر شیب هیدرولیکی و ضخامت اشباع بیشتر است (Ahmadi, 2023, 2024, 2025). در این حالت شبیه‌سازی مخروط افت یک چاه و تعیین شعاع تأثیر آن برای هر مدت پمپاژ و هر مقدار افت معیار و شبیه‌سازی مخروط افت پایدار چاه در آبخوان، نیازمند مدل‌سازی عددی است. البته این امکان وجود دارد که برای دوره‌های زمانی محدود، خصوصاً در دوره خشک و بدون تغذیه، با جایگزینی ضخامت متوسطی برای آبخوان در محل چاه از روشی مانند تاپس افت ناشی از چاه را در فواصل مختلف چاه برآورد و از سطح تراز اولیه کم کرده و از این طریق مخروط افت حقیقی اطراف چاه را شبیه‌سازی کرد که خالی از اشکال نیست اما تقریب مناسب‌تری از روش‌های مطرح شده در ضابطه ۷۴۷ است. در شکل ۶ مخروط‌های افت حاصل از شبیه‌سازی عددی با

مادفلو در چاهی در مرکز آبخوان مذکور (شکل ۲) برای مدت‌های مختلف پمپاژ نشان داده شده است (قسمت b شکل ۶). نتایج نشان داده است که پس از یکسال پمپاژ مداوم، شعاع تأثیر چاه به کل آبخوان که وسعتی برابر با ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر است خواهد رسید و از آن پس برداشت آب از آبخوان باعث ایجاد افت در کل آبخوان خواهد شد و این تداوم افت حداقل تا ۲۰۰ سال ادامه خواهد داشت و بعد از این مدت طولانی، مقدار تغذیه از سطح و مقدار تخلیه از طریق چاه و رودخانه به تعادل رسیده و شرایط پایدار حاصل می‌شود و سطح آب پایداری ایجاد خواهد شد که در بالادست حدود یک متر نسبت به سطح آب اولیه افت دارد (قسمت a شکل ۶). نتایج این شبیه‌سازی که با پارامترهای نزدیک به واقع برای اکثر آبخوان‌های آزاد استخراج شده به‌خوبی نشان می‌دهد که کل آبخوان نهایتاً از فعالیت یک چاه متأثر خواهد شد مگر آنکه اثر چاه به یک منبع آبی نامحدود در داخل آبخوان رسیده و از آن پس تمام آب مورد نیاز چاه از آن منبع تأمین شود. این نتایج نشان می‌دهد که هرگز نباید پایداری نسبی سطح آب در یک چاه به‌عنوان رسیدن به شرایط پایدار تلقی شده و زمان مربوط به آن در روابط شعاع تأثیر به‌عنوان پارامتری برای محاسبه شعاع تأثیر استفاده شود. بدیهی است که شعاع تأثیر واقعی هر چاه خیلی وسیع و تقریباً کل آبخوان خواهد شد و نمی‌تواند معادل حریم کمی چاه در نظر گرفته شود.



شکل ۶. برآورد مخروط افت و شعاع تأثیر در آبخوان شکل ۲ برای زمان‌ها مختلفی از پمپاژ تا رسیدن به شرایط پایدار. قسمت a سطح تراز آب اولیه و پس از رسیدن به شرایط پایدار (h) و به عبارتی مخروط افت حقیقی است و قسمت b افت ایجاد شده در آبخوان ناشی از فعالیت چاه در مدت زمان‌های مختلف پمپاژ (s) و به عبارتی مخروط افت ظاهری است.

Fig 6. Estimation of the cone of depression and radius of influence in the aquifer of Figure 2 for various pumping durations until reaching steady-state conditions. Part (a) shows the initial water table elevation and the elevation after reaching steady-state conditions (h), representing the true cone of depression. Part (b) illustrates the drawdown in the aquifer (s) caused by well operation at different pumping times, representing the apparent cone of depression

از آن‌ها یاد شده است. مخروط افت (drawdown cone or radius of influence) و شعاع تأثیر (cone of depression or influence radius) دو مفهوم شناخته شده از این منطقه هستند. در مورد مخروط افت می‌بایست مدت پمپاژ و نوع ظاهری و یا حقیقی آن و در مورد شعاع تأثیر می‌بایست مدت پمپاژ و افت معیار مورد نظر، ذکر شود. در خصوص مخروط افت، خط قهوه‌ای در شکل ۶ در قسمت‌های a و b معرف مخروط افت برای مدت ۲۰۰ سال پمپاژ مداوم چاهی در مرکز آبخوان است و قسمت a

بحث و بررسی

حریم تأثیر (Influence zone)

حریم تأثیر هر چاه منطقه‌ای سه بعدی در اطراف آن است که در آن بر اثر فعالیت چاه، تغییر سطح تراز آب و تغییر سرعت حرکت آب رخ می‌دهد. این منطقه اگرچه سه بعدی است اما عمدتاً در پلان به صورت خطوط هم‌پتانسیل و یا به صورت خطوط هم افت نشان داده می‌شود (مخروط‌های افت حقیقی و ظاهری). در پژوهش‌ها مفاهیم خاصی از این منطقه مطالعه شده و تحت عناوین مختلف

معرف مخروط افت حقیقی و قسمت b معرف مخروط افت ظاهری این چاه در این مدت است. در مورد شعاع تأثیر برای مدت یک سال پمپاژ مداوم، از مشاهده خط زرد رنگ در شکل ۶ قسمت b می‌توان نشان داد که شعاع تأثیر یک ساله به سمت بالادست آبخوان برای افت‌های معیار ۰/۶، ۰/۲، ۰/۱ و ۰ متر به ترتیب حدود ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ متر است و این معرف آن است که شعاع تأثیر یک پارامتر منحصر به فرد نیست و معرفی آن به عنوان یک پارامتر برای چاه معتبر نیست. در مورد حریم کمی چاه حتی اگر شعاع تأثیر همراه با ذکر مدت پمپاژ و افت معیار هم معرفی شود باز هم نمی‌تواند مبنای مناسبی برای تعیین حریم حفاظت کمی در نظر گرفته شود. ضابطه ۷۴۷ به عنوان دستورالعملی برای تعیین حریم کمی چاه‌های آب و قنات (Manual on Estimation of Influence Radius for Groundwater Resources (Water wells and Qanats)) توسط بخشی از سازمان برنامه بودجه‌ی جمهوری اسلامی ایران تحت عنوان معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی (DTIPA Deputy) و تحت نظر وزارت نیروی جمهوری اسلامی ایران تهیه شده و متأسفانه در تعریفی که از حریم کمی ارائه نموده، دچار اشتباه شده و شعاع تأثیر را معادل حریم کمی در نظر گرفته و از طرفی در محاسبه‌ی شعاع تأثیر هم ناتوان است و در روش‌هایی که معرفی کرده، نه مدت مشخصی را برای انتخاب زمان پمپاژ تعریف نموده و نه افت مشخصی را برای افت معیار معرفی کرده است. در مجموع مشخص نکرده است که یک کارشناس چگونه باید از بین روش‌های متعدد و متفاوت، به نتیجه‌ی یکی از آنها اعتماد نموده و با دلایلی محکمه‌پسند به آن استناد نماید و در تناقضات بین اصحاب ذینفع فصل الخطاب باشد. این ضابطه حریم کمی را ((آن مقدار از اراضی پیرامون چاه تعریف نموده که چنانچه چاه با آبدهی مجاز قید شده در پروانه‌ی بهره‌برداری پمپاژ نماید، با حد نهایی مخروط افت

در چاه منطبق باشد))، اما روش‌های معرفی شده در آن حد نهایی مخروط افت را برآورد نمی‌کند و این درحالی است که اساساً حد نهایی مخروط افت نمی‌تواند معادل حریم کمی چاه باشد.

این پژوهش نشان داد که حد نهایی مخروط افت در آبخوان‌های آبرفتی آزاد که عمدتاً مدل مفهومی آنها همانند شکل ۲ است در نهایت کل آبخوان خواهد بود (شکل ۵ و شکل ۶). بنابراین در آبخوان‌های آزاد، حریم کمی هر چاه نمی‌تواند معادل حریم تأثیر آن باشد چراکه با این تعریف در هر آبخوان بیشتر از یک چاه مجاز نخواهد شد. همچنین این پژوهش نشان داد که حتی اگر سطح آب در یک آبخوان آزاد تقریباً افقی باشد (شکل ۱) باز هم حریم تأثیر چاه موجود در آن نهایتاً تا مرزهای خارجی بدون جریان گسترش یافته و همچنان به گسترش عمقی خود ادامه خواهد داد و اگر آبخوان دارای مرزهای آبی با منبع آب نامتناهی باشد حریم تأثیر چاه تا آن مرز آبی گسترش یافته و سپس به شرایط پایدار خواهد رسید. بنابراین در این حالت هم حریم کمی هر چاه نمی‌تواند معادل حریم تأثیر آن باشد.

اگرچه ضابطه ۷۴۷ به‌طور مشخص زمان معیار و افت معیاری برای محاسبه‌ی شعاع تأثیر را معرفی نکرده و این یک ایراد اساسی وارد بر این دستورالعمل است اما به نظر می‌رسد زمان معیار را مدت زمان لازم برای پایداری سطح آب در چاه در آزمایش پمپاژ در نظر گرفته و افت معیار را مقدار افت قابل صرف‌نظر و نزدیک صفر پنداشته‌است. در مورد زمان، نتایج این پژوهش در شکل ۴ نشان داد که تصور رسیدن سطح آب در چاه به شرایط پایدار یک تصور نادرست است که از محدودیت ما در سنجش و نمایش اختلافات کم افت سطح آب در چاه و پس از چند روز پمپاژ متوالی ناشی می‌شود. بدیهی است که اگر برای یک مدت بسیار طولانی و مداوم پمپاژ، سطح آب در چاه در دسترس باشد، این حقیقت آشکار خواهد شد که سطح آب

به آن اشاره نشده و نویسندگان این پژوهش از آن غافل باشند، در آن صورت موضوع حریم تأثیر ممکن است برای زمانی مشخص و افتی مشخص قابل توجیه باشد اما همچنان معادل دانستن حریم کمی با حریم تأثیر غیر قابل قبول و غیر قابل پذیرش است.

حریم حفاظت کمی (Quantitative protection zone)

حریم حفاظت کمی یک چاه را می‌توان منطقه‌ای سه بعدی در اطراف آن دانست که برداشت آب از آن منطقه فقط از طریق آن چاه مجاز باشد. این منطقه در پژوهش‌ها به‌طور خاص و با این تعریف کمتر مورد توجه قرار گرفته و بعضاً به‌اشتباه معادل شعاع تأثیر در نظر گرفته شده است (DTIPA, 2018). حریم حفاظت کمی یک چاه به آن معنی نیست که بلافاصله در خارج از این منطقه، حفر چاه‌های جدید مجاز باشد، بلکه با این تعریف هر چاه برای خود یک حریم حفاظت کمی خواهد داشت و فاصله بین دو چاه برابر با جمع جبری شعاع حریم کمی آن‌ها در خط واصل بین آن‌ها خواهد بود. متأسفانه در سال‌های اخیر به‌دلیل کم‌توجهی به این موضوع، از آبخوان‌ها برداشت بی‌رویه صورت گرفته و مشکلات زیست‌محیطی عدیده‌ای ایجاد شده است. از نظر هیدرولیکی اگر ظرفیت آبدی آبخوان بالا باشد می‌توان حداکثر دبی بهینه را برای هر چاه مجاز دانست، اما از نظر بیلان آب در آبخوان و از نظر افت مجاز نهایی در آبخوان و از نظر حقوق مالکیت، محدودیت‌هایی منطقی برای حجم برداشت سالانه از هر چاه وجود دارد که می‌بایست رعایت آنها لازم و ضروری باشد. قاعدتاً هر ملکی در یک آبخوان دارای مالکی است که برای بهره‌مندی از ملک خود نیازمند آب است و اگر به چاه‌های اولیه در آبخوان اجازه برداشتی بیش از سهم منطقی مالکان آنها داده شود، مالکان سایر املاک مجاور، با تنش آبی مواجه خواهند شد. بنابراین لازم است با تصویب قوانین مناسب در کشورها به هر مالک اجازه داده

در چاه پایدار نخواهد شد مگر آنکه مخروط افت به یک مرز آبی نامتناهی رسیده باشد. از طرفی قاعدتاً می‌بایست قبل از حفر چاه و به‌منظور تعیین فاصله بین چاه‌ها حریم کمی چاه درخواستی برآورد شود و بر اساس آن فاصله محل چاه تا چاه‌های مجاور مشخص شود نه اینکه اول چاه حفر شده و آزمایش پمپاژ انجام شده و سپس حریم کمی آن تعیین گردد.

نتایج این پژوهش حاکی از آن است که قطعاً ضابطه ۷۴۷ با این متن و این روابط نمی‌تواند در تعیین حریم کمی چاه‌های آب راهنمای کارشناسان باشد و اگر از صدها کارشناس خواسته شده باشد که در یک آبخوان آزاد آبرفتی برای تعیین محل یک چاه درخواستی از طرف یک ذینفع، نتیجه‌ی کارشناسی خود را برای شعاع تأثیر احتمالی چاه ارائه کنند، هرکدام عددی معرفی خواهند کرد که ممکن است تا صدها برابر با هم اختلاف داشته باشند. اصولاً در مدیریت آب‌های زیرزمینی و مدیریت آبخوان‌ها شعاع تأثیر به مفهوم شناخته شده‌ی آن اهمیت چندانی ندارد و نباید بیش از ارزش واقعی این عدد به آن توجه شود. معمولاً منظور از عدد شعاع تأثیر، فاصله‌ی آخرین منحنی هم افت در پیرامون مخروط افت تا چاه پمپاژ است، به‌گونه‌ای که بتوان از افت آن منحنی به‌دلیل کوچکی صرف نظر کرد. این مفهوم همچنان که قبلاً بیان شد عمدتاً در اجرای پروژه‌های مهندسی برای پایین انداختن سطح آب زیرزمینی و اجرای پی سازه‌ها کاربرد دارد و معمولاً مقدار افت معیار در این موارد عددی بزرگ و بیش از یک سانتی‌متر است و از این جهت برای برآورد پارامترهای مورد نیاز طراح از جمله تعیین دبی پمپاژ پمپ برای پایین آوردن سطح آب تا تراز مورد نظر برای اجرای پروژه، اشکالی ایجاد نمی‌کند. اما در مدیریت آب‌های زیرزمینی، تعیین حریم حفاظت کمی چاه بر اساس شعاع تأثیر توجیه علمی ندارد. لازم به ذکر است که اگر این ضابطه پیوست‌های دیگری داشته باشد که در متن ضابطه

تأثیر برای افت خاصی در زمان خاصی از پمپاژ به‌تنهایی نمی‌تواند به‌عنوان معیاری برای تعیین حریم حفاظت کمی و در نهایت برای فاصله‌گذاری بین چاه‌های آب مورد توجه قرار گیرد. در آبخوان شکل ۱ و تقریباً در شکل ۲ برای مدت ۱۸۰ روز پمپاژ و در فواصل ۶۶۰۰ و ۴۱۰۰ و ۲۴۰۰ متر از چاه مقدار افت به‌ترتیب ۰ و ۱ و ۱۰ سانتی‌متر است و برای هر فاصله‌ی دیگری از چاه مقدار افت قابل محاسبه است و این اعداد اگرچه برای درک مدلی مفهومی مناسبی از چاه مفید و لازم است اما تعیین حریم حفاظت کمی از طریق آن پشته‌ی هیدرولیکی ندارد.

مطالعات حریم آبخیز: در هر آبخوان هر چاه از حریم آبخیز خود آب مورد نیاز خود را دریافت و برداشت می‌کند. در آبخوان‌های آزاد معمولی که دارای سطح آب شیب‌دار هستند، اگر تعداد چاه‌ها کم باشد، حریم آبخیز هر چاه به‌صورت یک نوار باریک تا مرز تداوم یافته و در بخش قابل توجهی از وسعت آبخوان حریم آبخیز چاه‌ها گسترش نخواهد یافت و آب ذخیره شده در فصل تغذیه در این بخش، به‌تدریج به پایین دست و به رودخانه‌های زهکش منتقل می‌شود. اگر تعداد چاه‌ها زیاد باشد حریم آبخیز چاه‌های پایین دست قرار گرفته و حریم آبخیز هر چاه به‌صورت دو نوار باریک تا مرز بالادست ادامه خواهد یافت (Ahmadi et al., 2022; 2025). با حفر چاه‌های جدید یا حذف چاه‌های موجود یا با افزایش یا کاهش تغذیه‌ی متوسط سالانه بر اثر تغییرات اقلیم، موقعیت حریم آبخیز چاه‌های مجاور تغییر می‌کند، بنابراین نمی‌توان از حریم آبخیز به‌عنوان حریم حفاظت کمی استفاده کرد اما برای درک مدل مفهومی اثر چاه‌های آب بر آبخوان تعیین حریم آبخیز به‌عنوان مقدمه‌ای برای تعیین حریم کمی لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

مطالعات بیلان: مسئله‌ی بسیار مهم در تعیین حریم حفاظت کمی چاه‌های آب برقراری نوعی از توازن آبی در

شود که فقط به نسبت مساحت ملک خود در آبخوان، از منابع آبی آن بهره‌برداری نماید یا با تزریق مصنوعی در فصل‌های بارش، حق برداشت سالانه‌ی خود را بالا ببرد. اینکه سهم هر مالک از آبخوان چه مقدار باید باشد! نیازمند مطالعات ویژه‌ای است و تصمیم منطقی این است که بخش عمده‌ای از جریان طبیعی آبخوان برای حق‌آبه‌ی محیط‌زیست و تخلیه طبیعی به رودخانه‌ها منظور شده و به هر مالک اجازه داده شود که درصد محدودی از حجم آبی که از طریق ملک او به آبخوان تزریق می‌شود را از طرق مختلف از جمله چاه‌های آب برداشت نماید. بنابراین به نظر می‌رسد که تعیین حریم حفاظت کمی هر چاه حداقل نیازمند چندین بررسی دقیق است:

مطالعات حریم تأثیر: بررسی اثر افزایش دبی بر مخروط افت نشان می‌دهد که در نزدیکی چاه با شدت بیشتری بر عمق مخروط افت افزوده شده و در فاصله‌های دورتر، مخروط افت به آرامی گسترش می‌یابد. به این معنی که اگر چاهی با دبی ۲۰۰۰ مترمکعب در آبخوان شکل ۱ وجود داشته و دبی آن به ۴۰۰۰ مترمکعب در روز افزایش یابد، افت آن در چاه برای یک پمپاژ ۱۸۰ روزه دو برابر شده و برای مثال از حدود ۳ متر به حدود ۶ متر خواهد رسید، اما حداکثر شعاع حریم تأثیر سطحی آن از حدود ۶۲۰۰ متر به ۶۷۴۸ متر خواهد رسید. این به آن معنی است که اگر در بحرانی‌ترین حالت دو چاه دقیقاً در کنار هم حفر شوند، مخروط افت آن‌ها با هم تجميع شده و در پیرامون کمی گسترده‌تر و در موقعیت دو چاه به‌اندازه دو برابر عمیق‌تر می‌شود (Ahmadi, 2023, 2024). افزایش دو برابری افت در موقعیت چاه برای مثال از ۳ متر به ۶ متر، فقط باعث افزایش محدودی در هزینه پمپاژ می‌شود و بعيد به نظر می‌رسد که این مقدار افزایش افت به‌تنهایی موجبات پدیده فرونشست گردد. بنابراین حفظ حریم حفاظت کمی از نظر هیدرولیکی با محدودیت جدی مواجه نیست و بر خلاف آنچه در ضابطه ۷۴۷ بیان شده، شعاع

برداری صحرایی یا بر اساس اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای است و هنوز امکان تعیین افت مجاز از طریق آنها گزارش نشده است. از مطالعات گذشته چنین برمی‌آید که تاکنون در تعیین حداکثر افت مجاز در آبخوان‌ها پژوهش‌های مؤثری انجام نشده و لذا پژوهش‌های ویژه‌ای در این خصوص لازم و ضروری است و به نظر می‌رسد که یکی دیگر از کلیدهای حل معمای حریم حفاظت کمی چاه‌های آب همین موضوع باشد.

مطالعات بهره‌وری: برداشت آب از چاه و انتقال آن مستلزم صرف هزینه است. با افزایش دبی یا با افزایش زمان پمپاژ سالانه، مقدار حجم برداشت سالانه افزایش یافته و نهایتاً مقدار افت در چاه و هزینه‌ی پمپاژ بیشتر می‌شود. از طرفی حفر چند چاه با حجم برداشت کمتر و افت کمتر و در فواصل مناسب از هم به جای یک چاه با حجم برداشت بالا، هزینه‌ی اولیه‌ی حفر و تجهیزات را افزایش می‌دهد. اینکه هر مالک برای خود یک چاه حفر و متناسب با مقدار اراضی خود حق برداشت داشته باشد و یا اینکه چندین مالک با هم از یک چاه استفاده کنند و یا اینکه مالکیت چاه‌ها با سازمان‌های آب بوده و آب را با قیمت مصوب به مصرف کنندگان تحویل نمایند، موضوعات مهمی است که هم در مدیریت آبخوان و هم در تعیین دبی و حجم برداشت و هم در تعیین حریم حفاظت کمی چاه‌ها نقش مؤثری داشته و لازم است از این نظر مقدار دبی و مدت پمپاژ سالانه‌ی هر چاه و برداشت سالانه و مطلوب آن برآورد گردد.

مطالعات حقوقی: همچنان که در ضابطه ۷۴۷ بیان شده است، عموم فقهای دین مبین اسلام در اصل وجود حریم برای منابع آب و خصوصاً برای چاه‌های آب اتفاق نظر دارند و این موضوع مورد توافق عموم حقوق‌دانان هم هست و منظور کلی آنها از حریم چاه‌های آب، ((آن مقدار از اراضی اطراف چاه است که برای کمال انتفاع از چاه ضرورت دارد)). در ایام قدیم که سازمان‌های متولی امور

آبخوان است که تا حد امکان پس از فعالیت چاه‌های آب تا مدت زمانی بسیار طولانی و ایجاد شرایط پایدار، سطح متوسط آب در آبخوان فقط به اندازه‌ای کاهش یابد که مانع تخلیه طبیعی آب به رودخانه‌ها نشود. بر این اساس، ایده‌آل آن است که علاوه بر مقدار جریانی که از مرزهای بالادست آبخوان و از سازنده‌ای سخت وارد آبخوان آبرفتی می‌شود، مقداری از تغذیه سطحی در آبخوان آبرفتی را هم برای محیط‌زیست و تخلیه طبیعی به رودخانه در نظر گرفته و حریم حفاظت کمی هر چاه را فقط بخشی از اراضی اطراف چاه در نظر گرفت که بتواند از طریق درصد کمی از تغذیه‌ی سطحی خود، آبدهی سالانه چاه را تأمین کند. اینکه چه درصدی از تغذیه‌ی سطحی می‌تواند به تخلیه از طریق چاه اختصاص یابد موضوع مهمی است که تاکنون به آن پرداخته نشده و به نظر می‌رسد که یکی از کلیدهای حل معمای حریم حفاظت کمی چاه‌های آب همین موضوع باشد.

مطالعات فرونشست: اگر در انتخاب حجم برداشت سالانه از چاه‌ها بر اساس میزان مالکیت ذی‌نفعان و در برآورد مقدار تغذیه سطحی و اختصاص درصد کمی از آن برای برداشت از طریق چاه، توجه کافی صورت گرفته و شبیه‌سازی توسط مدل‌های عددی برای تأمین حق‌آبه محیط زیست انجام شده باشد، در آن صورت احتمال افت زیاد سطح آب و احتمال کاهش تدریجی تخلخل و احتمال وقوع پدیده‌ی فرونشست کم خواهد بود. با این وجود، نوسانات زیاد سالانه‌ی سطح آب در آبخوان هم ممکن است موجب کاهش تخلخل و ایجاد پدیده‌ی فرونشست باشد. بنابراین لازم است از این نظر ماکزیمم افت مجاز در سطح تراز متوسط آبخوان تعیین شده و بر اساس آن حجم برداشت سالانه از آبخوان و توزیع آن در محل چاه‌های موجود و محل‌های قابل پیش‌بینی مشخص شود. آنچه تاکنون در خصوص پدیده فرونشست بررسی شده فقط مقدار فرونشست در دشت‌ها و آبخوان‌ها بر اساس نقشه

آب وجود نداشته است، فقها براساس علم خود که قطعاً از آگاهی افراد خبره کسب اطلاع کرده‌اند، برای حریم چاه‌های آب اعدادی مرقوم نموده‌اند. ولی در حال حاضر تعیین حریم بر عهده سازمان‌های متولی است و در ایران در تبصره‌ی ماده ۳۸ قانون آب و نحوه ملی شدن آن و در تبصره ۲ ماده ۲ و تبصره‌ی ماده ۱۷ قانون توزیع عادلانه آب، تشخیص حریم چاه با وزارت نیرو است. آنچه تاکنون وزارت نیرو در مورد تعیین حریم کمی ارائه کرده، همین دستورالعمل تعیین حریم کمی چاه‌ها و قنوات تحت عنوان ضابطه ۷۴۷ است، که متأسفانه اعداد حاصل از آن هیچ تفوقی بر ارقام سنتی مرقوم شده توسط فقها ندارد و نه تنها کمکی به تعیین حریم حفاظت کمی نمی‌کند، بلکه موجبات گمراهی کارشناسان و وکلا و قضات است. متأسفانه از تعریف فقهی و حقوقی حریم، استنباط نادرستی در ذهن جامعه و کارشناسان و حقوق‌دانان نقش بسته است و این گونه تصور می‌شود که صاحب هر چاه حق دارد به بهانه‌ی کمال انتفاع از چاه خود، از حفر چاه توسط دیگر مالکان مجاور خود جلوگیری نماید. این استنباط نادرست از تعریف درست فقهی و حقوقی حریم، باعث ایجاد یک حق نانوشته برای مالکانی شده است که زودتر از دیگر مالکان مجاور، اقدام به حفر چاه کرده‌اند و این استنباط نادرست از تعریف فقهی حریم، نوعی ظلم آشکار در حق منطقی دیگر مالکان است. با هیچ دین و علم و عقل و منطقی سازگار نیست که از بین دو مالک مجاور که هر کدام دارای بخشی از اراضی یک آبخوان هستند، به اولی که زودتر درخواست حفر چاه داده مجوز داده شود و به دومی که دیرتر درخواست داده باشد به بهانه‌ی عدم امکان کمال انتفاع اولی، مجوز حفر چاه داده نشود. بدیهی است که استنباط کنونی از تعریف فقهی و حقوقی حریم یک سویه است، به این معنی که گویا صاحبان املاک مجاور یک چاه باید از دخل و تصرف در شش‌دانگ ملک خود محروم شوند تا به کمال انتفاع صاحب

چاه مجاور خدش‌های وارد نشود، درحالی که چاهی که در نزدیکی املاک همسایگان حفر شده باشد، اثراتی بر املاک مجاور خود ایجاد کند که صاحبان آنها را از کمال انتفاع از شش‌دانگ ملک خود محروم می‌کند. امروزه برداشت‌های بی‌رویه از برخی چاه‌ها نه تنها باعث نابودی آبخوان در زیر اراضی مالکان مجاور خود شده بلکه باعث فرونشست و تخریب اراضی و سازه‌های سطحی و زیرزمینی آنها شده و به نوعی چاه یک مالک باعث جلوگیری کمال انتفاع مالکان مجاور از ملک خود شده است. روشن است که حل این استنباط نادرست نیازمند قانون و رفع موانع حقوقی است و این خود نیازمند تعاریف علمی و جامعی از حریم‌های مختلفی است که می‌تواند در مورد چاه‌های آب مطرح شود و حریم حفاظت کمی یکی از آنهاست. استدلال منطقی آن است که همه‌ی صاحبان اراضی یک آبخوان که آب زیرزمینی آبخوان از طریق تغذیه سطحی از اراضی آنها تأمین می‌شود، این حق را داشته باشند که از آب آبخوان در زیر اراضی خود استفاده نمایند؛ و هیچ قانونی نباید آنها را از این حق منطقی محروم کند، اما اینکه چه مقدار برداشت کنند! امری است که نیازمند قانون حقوقی و قاعده‌ی علمی است. براساس نتایج این پژوهش قاعده علمی کلی باید این باشد که برداشت از آب زیرزمینی به اندازه‌ای باشد که موجب افت بحرانی در بلند مدت نشود. قانون حقوقی کلی هم باید این باشد که هر مالک فقط مجاز به برداشت درصد ناچیزی از آب تغذیه شده از طریق ملک خود باشد تا جریان طبیعی به رودخانه‌ها متوقف نشده و حق آبه محیط زیست حفظ شود. اینکه افت بحرانی چه مقدار و تغذیه سطحی چه مقدار و درصد تخلیه از طریق چاه به تغذیه سطحی چه مقدار باشد، نیازمند پژوهش‌های بنیادین و شبیه‌سازی آبخوان‌ها توسط سازمان‌های مسئول است.

تجميع مطالعات قبلی و تعيين حریم کمی:

پس از انجام مطالعات فوق، دبی بهینه بر اساس آزمایش پمپاژ و تحلیل هزینه و همچنین حجم برداشت سالانه بر اساس مقدار تغذیه و مقدار افت مجاز و مقدار سهم قانونی هر ذینفع مشخص خواهد شد. نهایتاً برای دبی بهینه و مدت پمپاژ تجویز شده، حجم برداشت سالانه محاسبه و بر اساس آن شعاع حریم حفاظت کمی برآورد می‌گردد. به این ترتیب حریم حفاظت کمی هر چاه را می‌توان بخشی از اراضی اطراف آن در نظر گرفت که معادل درصد ناچیزی از حریم تأثیر آن است، به گونه‌ای که بتواند از طریق درصد کمی از تغذیه‌ی سطحی، آبدهی سالانه چاه را تأمین کند. بنابراین از این نظر می‌توان حریم کمی چاه را دایره‌ای به شعاع r و به مرکز چاه در نظر گرفت و از رابطه ۲۱ برآورد کرد یا می‌توان حریم کمی چاه را مربعی به نصف ضلع a و به مرکز چاه در نظر گرفت و از رابطه ۲۲ برآورد کرد:

$$V_w = C V_{Re} \rightarrow Q \times t = C \pi R^2 Re \quad (21)$$

$$V_w = C V_{Re} \rightarrow Q \times t = C 4a^2 Re \quad (22)$$

که در آن‌ها V_w حجم برداشت سالانه از چاه، C نسبت تخلیه از طریق چاه به تغذیه سطحی، V_{Re} حجم تغذیه سطحی آبخوان در اطراف چاه، Q دبی بهینه چاه، t زمان پمپاژ در سال، R شعاع حریم حفاظت کمی چاه، a نصف ضلع حریم حفاظت کمی چاه و Re مقدار عمق یا ارتفاع تغذیه سطحی است که خود درصدی از عمق بارش سالانه است. از آنجا که مشخصات آبخوان در قسمت‌های مختلف یک آبخوان متفاوت بوده و حجم برداشت چاه‌ها متفاوت است استفاده از رابطه ۲۲ به‌ندرت میسر است اما رابطه ۲۱ می‌تواند در هر شرایطی استفاده شود.

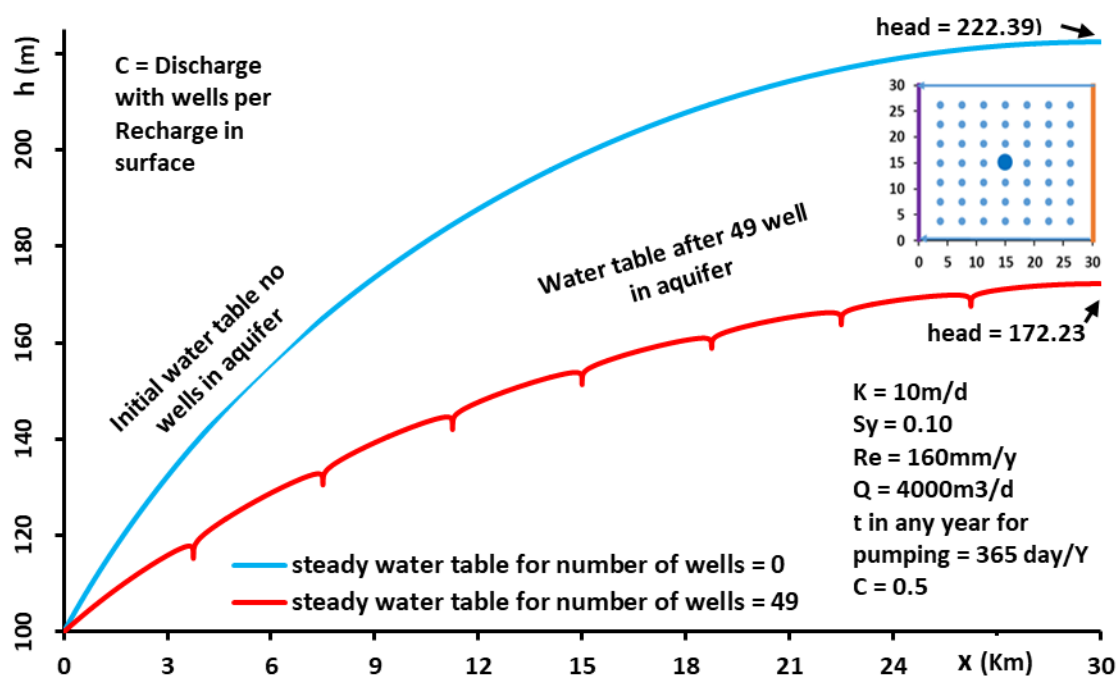
از این منظر در آبخوان شکل ۲ اگر تغذیه سالانه سطحی در مجاورت چاه ۴۰۰ میلی‌متر، دبی بهینه چاه ۴۰۰۰ متر مکعب در روز، مدت پمپاژ سالانه‌ی چاه ۱۸۰ روز و نسبت

تخلیه از طریق چاه به تخلیه سطحی ۲۵ درصد باشد. بر این اساس حریم حفاظت کمی آن دایره‌ای به شعاع تقریبی ۱۵۱۴ متر خواهد بود. یعنی این میزان از سطح آبخوان و در اطراف چاه می‌بایست برای تأمین آب این چاه در نظر گرفته شده و در این اراضی هیچ‌گونه برداشت دیگری از آبخوان انجام نشود. مفهوم دقیق‌تر این عبارت این است که برای تأمین آب هر چاه باید حجمی از آبخوان با مساحت سطحی دایره‌ای با شعاع حریم حفاظت کمی (R_i) به آن چاه اختصاص داده شود. به این ترتیب حداقل فاصله بین دو چاه، مجموع شعاع حریم حفاظت کمی آنها (R_1+R_2) یا مجموع نصف ضلع حریم حفاظت کمی آنها (a_1+a_2) خواهد بود.

شکل ۷ اثر ۴۹ چاه پراکنده در آبخوان شکل ۲ را بر سطح آب نهایی آبخوان پس از ایجاد شرایط پایدار نشان می‌دهد. دبی چاه‌ها هر کدام ۴۰۰۰ متر مکعب در روز و در طول کل سال در حال پمپاژ فرض شده‌اند. سطح آب اولیه در این شکل مختص تغذیه‌ی سطحی سالانه به مقدار ۱۶۰ میلی‌متر است و فرض بر این بوده که اگر حدود ۵۰ درصد از این تغذیه از طریق چاه‌ها تخلیه شود مابقی موجب جریان طبیعی به رودخانه شده و حبابه محیط زیست حفظ شده و از طرفی مقدار کاهش سطح آب در بالادست به مقدار حدود ۵۰ متر، کمتر از حد مجاز برای ایجاد فرونشست باشد؛ در این حالت حریم حفاظت کمی هر چاه بر اساس رابطه ۲۲ تقریباً مربعی به نصف ضلعی برابر با ۲۱۳۶ متر و فاصله چاه‌ها از هم تقریباً ۴۲۷۲ متر خواهد شد (اگر از رابطه ۲۱ استفاده شود حریم کمی، بیشتر و تعداد چاه کمتری برآورد شده و مناسب‌تر است). اینکه این مقدار افت در بالادست قابل قبول است یا نه؟، اینکه اختصاص این درصد از تغذیه به تخلیه از طریق چاه مناسب است یا نه؟ و اینکه این‌گونه فاصله‌گذاری بین چاه‌های آب از نظر حقوقی و شیوه اجرا مناسب است یا نه؟ هم وابسته به شناخت حداکثر افت مجاز نهایی در

وجود دارد که بتوان به جای یک چاه در یک منطقه از چند چاه در فواصل نه چندان دور از هم و در قالب یک حوضه‌چاه (Well Field) استفاده کرد به گونه‌ای که مجموع برداشت آن‌ها در سال برابر با برداشت همان یک چاه باشد.

آبخوان برای جلوگیری از پدیده فرونشست و شناخت حق‌آبه‌ی محیط زیست است و هم مستلزم تصویب قوانین مناسب برای ساماندهی برداشت از آبخوان‌ها است. از آنجایی که مقدار حجم برداشت در یک بخش از آبخوان مهمتر از موقعیت دقیق برداشت است، احتمالاً این امکان



شکل ۷. اثر برداشت ۵۰ درصد از تغذیه سطحی آبخوان شکل ۲ از طریق ۴۹ چاه که به طور مناسب در آبخوان پراکنده شده باشند. سطح آب اولیه و ثانویه در آبخوان آزاد خود تابع مقدار تغذیه سطحی سالانه در آبخوان است.

Fig. 7. Effect of extracting 50% of the annual areal recharge in the aquifer of Figure 2 through 49 wells appropriately distributed across the aquifer. The initial and secondary water table elevations in the unconfined aquifer are dependent on the magnitude of annual areal recharge.

تأثیر یک چاه ((بخشی از اراضی اطراف چاه است که برداشت آب از چاه باعث تغییر سطح تراز آب در آن می‌شود)). علی‌رغم پژوهش‌های متعددی که در مورد حریم تأثیر انجام شده اما در مورد حریم کمی تحقیقات مؤثری انجام نشده و منابع قابل توجهی در دسترس نیست. به منظور بررسی صحت و سقم روش‌های مطرح شده در ضابطه مذکور، ابتدا روش‌های مطرح شده در ضابطه مذکور و دیگر روش‌های مشابه معرفی و بر حسب واحدهای مرسوم بازنویسی شده است. سپس یک چاه در یک آبخوان آزاد آبرفتی وسیع و با پارامترهایی در حد

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی حریم حفاظت کمی چاه‌های آب و بیان نقاط ضعف دستورالعمل تعیین حریم کمی چاه‌ها و قنوت در ایران تحت عنوان ضابطه ۷۴۷ است. ضابطه مذکور روش‌هایی که برای برآورد شعاع تأثیر ارائه شده‌اند را به عنوان روش‌هایی برای برآورد حریم کمی چاه معرفی کرده است، در حالی که حریم کمی موضوعی متفاوت از حریم تأثیر است. منظور از حریم کمی یک چاه ((بخشی از اراضی آبخوان در اطراف چاه است که برداشت آب از آن مختص به آن چاه باشد))، ولی منظور از حریم

برابری حجم برداشت سالانه‌ی چاه با درصدی از حجم تغذیه‌ی سطحی سالانه در اطراف چاه، شعاع حریم کمی چاه را برآورد کرد و به این ترتیب فاصله مناسب بین دو چاه، جمع جبری شعاع حریم کمی آنها خواهد شد، اما به این منظور انجام مطالعات حریم تأثیر، حریم آگیر، بیلان، فرونشست، بهره‌وری و حقوقی ضروری است تا بتوان بر اساس آن حداکثر افت مجاز در آبخوان و نسبت تخلیه از طریق چاه به تغذیه‌ی سطحی را برآورد کرد.

منابع

- 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), 1-28. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.22034/JEG.2022.16.2.1019241>
- 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>
- Ahmadi, A., Mirzaee, S. Y., Mirzavand, G., Chitsazan, M., & Nadri, A. (2025). Determining the quantitative protection zone of water wells in alluvial unconfined aquifer. *Advanced Applied Geology*, 15(2), 21-49. [In Persian] <https://doi.org/10.22055/aag.2024.46034.2434>
- 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. *Journal of Engineering Geology*, 17(3), 299-320. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jeg.2023.17.3.1019242>
- 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), 90. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jeg.2024.18.1.1019243>
- Ashtianimoghaddam, Ghodsieh, Mahdavy, M., Malekian, A., & Motamedvaziri, B., (2017). Estimation of Well Field by using Fuzzy Logic in Damghan Plain, Iran. *Hydrogeology*, 2(1), 20-30. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hydro.2017.5349>
- Bahrami, M. & rajabi, S. (2022). Investigation and Comparison of Different Methods for Calculating the Well Radius of Influence in Kavar County of Fars Province. *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(2),

مقادیر مناسب، در دو حالت یکی ساده شده و منطبق با فرضیات ضابطه مذکور و دیگری در شرایط واقعی‌تر، با استفاده از مدل عددی مادفلو شبیه‌سازی شد. در هر دو حالت مخروط افت هم برای زمان‌های محدود و هم برای زمان‌های طولانی استخراج شد. در حالت اول که منطبق با شرایط ضابطه بود، امکان اعمال تغذیه سطحی وجود نداشت و لذا بعد از پمپاژی طولانی در حد یک سال مخروط افت به مرزها رسید و از آن پس با برداشت آب از آبخوان به‌طور مداوم سطح آب در آبخوان کاهش یافت و هیچ‌وقت به پایداری نرسید. در حالت دوم که شرایط واقعی‌تری از آبخوان را نشان می‌دهد امکان تغذیه سطحی وجود داشت و پس از حدود یک سال پمپاژ، مخروط افت به مرزها رسید و از آن پس با برداشت آب از آبخوان به‌طور مداوم سطح آب در آبخوان کاهش یافت ولی پس از یک مدت خیلی طولانی چند صد ساله، بین تغذیه سطحی و تخلیه از طریق چاه و رودخانه تعادل برقرار و شرایط پایدار فراهم شد. متأسفانه ضابطه مذکور تغییرات اندک سطح آب در چاه را پس از مدت محدودی پمپاژ، به‌عنوان رسیدن به شرایط پایدار تلقی کرده و زمان مورد نظر در روابط خود را این مدت معرفی کرده است. این انتخاب از دو جهت نادرست است، اول آنکه تعیین حریم می‌بایست قبل از تعیین محل چاه انجام شود نه بعد از آن و دوم آنکه تغییرات اندک سطح آب در چاه در آزمایش پمپاژ هرگز به معنی ایجاد شرایط پایدار در یک آبخوان آزاد با مرزهای بدون جریان نیست. نتایج نشان داد که در هر دو حالت مخروط افت چاه نهایتاً کل آبخوان را در بر خواهد گرفت و لذا اولاً روش‌های مطرح شده در ضابطه‌ی مذکور با توصیفی که در این ضابطه از آنها شده، نمی‌توانند برآورد قابل قبولی از شعاع تأثیر ارائه نمایند و ثانیاً شعاع تأثیر نمی‌تواند به‌عنوان حریم کمی مورد توجه قرار گیرد. نتایج نشان داد که می‌توان بخشی از اراضی اطراف هر چاه را در قالب یک دایره برای حریم کمی هر چاه در نظر گرفت و از

- Nuclear Sciences Limited*, Issue GNS Science Report 2013/57). www.gns.cri.nz
- Langevin, C. D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, Sorab, & 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. <https://doi.org/10.3133/tm6A55>
- Louwyck, A., A. Vandenbohede, D. Libbrecht, M. Van Camp & K. Walraevens (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>
- 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.2020.100053>
- Neuman, S. P. (1972). "Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table." *Water Resources Research* 8(4): 1031-1045. <https://doi.org/10.1029/WR008i004p01031>
- Nohani, E., Babaali, H. & Dehghani, R. (2026). Evaluation of metaheuristic models in groundwater level analysis of Delfan Plain, Lorestan. *Journal of Aquifer and Qanat*, 5(2), 79-98. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8834.1096>
- Pollock, D. (2016). *User Guide for MODPATH Version 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>
- 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>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology journal*, 10(1), 52-67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
- 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/10.1029/TR016i002p00519>
- Thiem, G. (1906). *Hydrologische Methoden: Leipzig, Germany*. JM Gebhardt, 56p. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA5401947X>
- UKEA (2019). *Manual for the production of Groundwater Source Protection Zones U.K.Environment Agency*. Environment Agency Horizon House, Deanery Road, Bristol BS1 5AH. www.gov.uk/environment-agency
- 14-23. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jaaq.2022.2193>
- Barry, D., J.-Y. Parlange & L. Li (2000). Approximation for the exponential integral (Theis well function). *Journal of Hydrology*, 227, 287-291. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00184-5)
- Bear, J., & Jacobs, M. (1965). On the movement of water bodies injected into aquifers. *Journal of Hydrology*, 3(1), 37-57. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(65\)90065-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(65)90065-X)
- Bear, J. (2012). *Hydraulics of groundwater*, Courier Corporation. <https://books.google.com/books?id=yQogKirZWM>
- C
- Bresciani, E., R. N. Shandilya, P. K. Kang & S. Lee (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>
- Cooper Jr, H. & C. E. Jacob (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>
- Dragoni, W. (1998). Some considerations regarding the radius of influence of a pumping well. *Hydrogéologie (Orléans)*(3), 21-25. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6218986>
- 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. <https://books.google.com/books?id=m-DNAAAAMAAJ>
- DTIPA (2018). *Manual on Estimation of Influence Radius for Groundwater Resources (Water wells and Qanats)*, No 747. [In Persian] <https://doi.org/nezamfanni.ir>
- Farmanifard, M., Najafi, B. M., Mohamadi, F., & Fathollah M. F., (2022). Estimation and study of privacy interference of exploitation wells to identify vulnerable areas of the aquifer (Case study: Ravansar-Sanjabi aquifer in Kermanshah). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2, 85-102. <https://doi.org/10.22126/ATWE.2022.7582.1016>
- Javandel, I., & Tsang, C. F. (1986). Capture-zone type curves: A tool for aquifer cleanup. *Groundwater*, 24(5), 616-625. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1986.tb03710.x>
- 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*

- USEPA (2008). *Systematic approach for evaluation of capture zones at pump and treat systems*. U.S. Environmental Protection Agency. <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=WIGITJCoakUC>
- Vatankhah, A. R. (2014). Full-range solution for the Theis well function. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(3): 649-653. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000833](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000833)
- 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. <https://doi.org/10.3133/sir20195036>
- WRC (2023). *Guidance document on Protection Zones (Delineation and Protection)*
- Zand Goharrizi, F., Karimi, H., Karami, A., Mirzaie Badizi, F. & Pourchangiz, R. (2025). Evaluation of some Qanat protection zone determination methods. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6(1), 167-180. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9107.1107>
- Zhai, Y., X. Cao, Y. Jiang, K. Sun, L. Hu, Y. Teng, J. Wang & J. Li (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>