



Evaluation of Some Qanat Protection Zone Determination Methods

Fatema Zandi Goharrizi¹ | Haji Karimi², ✉ | Amirhosein Karami¹ | Fateme Mirzaie Badizi¹ | Rezvan Pourchangiz¹

1. Regional Water Company of Kerman, Kerman, Iran

2. Professor, Range and Watershed Management Department, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran.

✉Corresponding Author: H.karimi@ilam.ac.ir

Received:
13 March 2025

Accepted:
24 August 2025

Published:
22 September 2025

Keywords:

Pollution,
Water Production Zone,
Water Resources
Protection,
Transient Time,
Transmissivity.

Extended abstract

Introduction

Water resources are among the fundamental factors for the survival and sustainable development of human societies, holding significant importance. With the increase in global population and the decline in precipitation, water resources have become more limited, especially in arid and semi-arid regions such as Iran. In Iran, water extraction primarily relies on groundwater resources, which are accessed through qanats and deep wells. Qanats are ancient and sustainable systems for extracting water from deep underground, transferring water from elevated areas to lower regions without the need for energy. However, with the expansion of deep well usage, groundwater levels have declined, and strategic water reserves are being depleted.

Groundwater resources are replenished by rainfall and surface water, and due to their subterranean location, they are less exposed to environmental pollution. Nevertheless, the reduction in quantity and the increase in natural and human-made pollutants threaten the quality of these resources. Chemical, microbial, and organic pollutants can render water unsuitable for drinking, industrial, and agricultural purposes. Therefore, protecting the quality of groundwater resources through the establishment of quality protection zones and preventing contamination is essential.

Cite this article: Zandi 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. DOI: <http://10.22077/jaaq.2025.9107.1107>.



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/>).

Qanats are among the oldest methods of water extraction in Iran, consisting of several vertical shafts and an underground channel that transports water from aquifers to the surface. Qanats are divided into two types: mountainous and plain. Mountainous qanats typically have shorter lengths, shallower depths, and significant seasonal variations in water flow, while plain qanats are longer and deeper. The hydraulics of qanats depend on the groundwater hydraulic regime, and water moves naturally under the influence of gravity.

Materials and Methods

To protect the quality of groundwater resources, two main approaches exist: qualitative vulnerability and the establishment of quality protection zones. Qualitative vulnerability assesses the likelihood of pollutants reaching groundwater resources, while quality protection zones define areas to prevent contamination. Methods for determining quality protection zones include fixed arbitrary radius, calculated fixed radius, variable radius, numerical modeling, and analytical techniques. Each of these methods has its own advantages and disadvantages, and the choice of method depends on regional conditions and the type of pollution.

For determining the quality protection zones of groundwater resources, various empirical relationships such as those of Zischard, Comfort, Schultz, Kosakin, and Kozeny have been proposed. These relationships are calculated based on parameters such as hydraulic conductivity, aquifer thickness, soil porosity, and the duration of pumping. Each of these relationships has different levels of simplicity and accuracy, and their selection depends on available data and regional conditions.

Result and Discussion

In this study, considering the characteristics of the relationships and the parameters that are generally easier to obtain or calculate for each qanat, three relationships—Zischard, Comfort, and a simple volumetric method—were used, taking into account three transit times considered for different types of pollution. The Zischard and Comfort relationships provide relatively similar results, while the volumetric relationship, even with a transit time of 50 days, yields significantly larger values. It should be noted that in the Comfort and volumetric relationships, the thickness of the aquifer layer is considered as the sum of the length of the qanat gallery in the wetland for water supply.

After calculating and selecting a protection radius for the first water-producing well (mother_well), two approaches can be taken to delineate the quality protection zone for the rest of the qanat. First, a fixed protection zone can be considered for the dryland, and a diagonal line can be drawn from the calculated protection radius of the mother well to define the quality protection zone for the wetland. If the lengths of the wetland and dryland of the qanat are not considered, or if the quality protection zone in the dryland is not subject to specific considerations, it can be directly connected from the mother well to the qanat outlet.

Given the calculated values from the examined methods, if immediate calculations for the rapid protection of a water source are not feasible, a fixed value, such as 500 meters for the protection radius of the mother well, and a value between 10 to 50 meters for the protection zone of the dryland can be proposed. These values can later be adjusted based on detailed calculations and the specific conditions of the qanat.

Due to the technical and geological differences of each qanat, it is recommended that the relationships and methods for determining quality protection zones be reviewed and adapted by experts and researchers. For mountainous qanats or qanats with specific conditions, all hydraulic and geological factors should be considered. Additionally, it is suggested that other methods for determining quality protection zones be reviewed and improved to enhance their accuracy and efficiency.

Conclusion

This research demonstrates that determining the quality protection zones of qanats

requires a detailed examination of the hydraulic and geological characteristics of the region, and the use of empirical relationships can aid in better protection of groundwater resources. Given the importance of qanats in water supply, it is essential to scientifically and accurately determine their quality protection zones to prevent contamination and degradation of water quality. This requires collaboration between government institutions, researchers, and local communities to ensure the sustainable management of groundwater resources.



بررسی برخی روش‌های تعیین حریم کیفی قنات

فاطمه زندی گوهرریزی^۱ | حاجی کریمی^۲ | امیر حسین کرمی^۱ | فاطمه میرزایی بادیزی^۱ | رضوان پورچنگیز^۱

۱. شرکت آب منطقه‌ای کرمان، کرمان، ایران.

۲. استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

✉ نویسنده مسئول: H.karimi@ilam.ac.ir

چکیده

با توجه به اهمیت آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش تخلیه متعادل قنات در استفاده از آب زیرزمینی که برخلاف پمپاژ به مخزن آسیب نرسانده و باعث کسری مخزن نمی‌گردد و در جهت حفظ این منابع ارزشمند مهندسی قدیمی ایران و حفظ کیفیت آب آن‌ها، به‌ویژه در مناطقی که برای مصرف آب آشامیدنی و کشاورزی استفاده می‌شود و همچنین با توجه به اینکه تعیین حریم کمی و کیفی این منابع آبی به دلیل نادیده‌گرفته‌شدن، صرفاً بر اساس دستورالعمل‌های تعیین حریم چاه انجام می‌شود که به‌صورت کاربردی هنگام پیاده‌سازی برای قنات ایرادات فنی زیادی ایجاد می‌کند؛ از این رو لازم است اقداماتی در زمینه ایجاد رویه مناسب و انتخاب روشی کاربردی در زمینه تعیین حریم کمی و کیفی قنات انجام گیرد. به همین منظور، این تحقیق قصد دارد تا برای بهره‌برداران، کارشناسان و پژوهشگران این حوزه، پیشنهادهایی برای تعیین حریم کیفی مناسب ارائه نماید. این مهم با مرور تمامی تحقیقات و سندهای موجود در این زمینه و مطالعه روش‌های تعیین حریم کیفی دیگر منابع آب زیرزمینی و با در نظر داشتن تره‌کار، خشکه‌کار، زمان گذر، قابلیت انتقال و دیگر خصوصیات فنی قنات انجام‌گرفته است که در ادامه تشریح می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:

آلاینده‌گی،

تره‌کار،

حفاظت از منابع آب،

زمان گذر،

قابلیت انتقال.

مقدمه

منابع آب به عنوان یکی از عوامل اساسی برای ادامه بقا و توسعه پایدار جوامع انسانی، از اهمیت بسیاری برخوردارند و تأمین آب شرب سالم، در صدر نیازهای هر جامعه‌ای قرار دارد. در حالی که جمعیت جهان رو به افزایش است، در چند دهه اخیر منابع آب به علت افزایش تقاضا و کاهش نزولات جوی بسیار محدودتر شده است. این کاهش خصوصاً در بارش برف به عنوان یکی از منابع مهم تغذیه کننده منابع آب بسیار زیاد است. (Ansari and Maroufi, 2016).

در کشور ما به خصوص در استان‌های شرقی و جنوب شرقی میزان بارندگی بسیار کمتر از میانگین بارندگی جهانی است و استحصال آب عمدتاً متکی بر منابع آب زیرزمینی است. از قرن‌های پیش نیاکان ما جهت استحصال منابع آب زیرزمینی مبدع حفر قنات شده‌اند. سازه‌هایی که از آب تجدیدپذیر و مازاد آبخوان‌ها تغذیه می‌شوند. از دهه ۱۳۳۰ با ورود تکنولوژی دستگاه حفاری حفر چاه‌های عمیق رواج پیدا نمود که به تدریج موجب افت سطح آب و کاهش ذخایر منابع آب زیرزمینی گردید به طوری که در اکثر دشت‌ها ذخایر آب راهبردی نیز در حال اتمام است.

منشأ منابع آب زیرزمینی از بارندگی‌ها و آب‌های سطحی است که از محل ارتفاعات و دشت‌ها تغذیه و در آبرفت‌ها و سنگ‌های زیر سطح زمین ذخیره می‌شوند. این منابع به علت موقعیت قرارگیری، کمتر تحت تأثیر آلودگی‌های زیست محیطی قرار می‌گیرند و به طور معمول کیفیت بهتری نسبت به منابع آب سطحی دارند. با این حال کیفیت این منابع نیز به دلایل کاهش کمیت از یک سوء و آلاینده‌های طبیعی و آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی در حال تغییر هستند.

حفظ کیفیت منابع آب بسیار حائز اهمیت است. آلاینده‌های منابع آب می‌تواند شیمیایی، میکروبی و آلی باشد. آب آلوده می‌تواند بنا به نوع و وضعیت آلاینده‌ها برای مصارف شرب، صنعت و حتی کشاورزی غیر قابل

استفاده گردد و به سلامت جامعه و محیط زیست آسیب برساند؛ بنابراین لزوم انجام اقدامات پیشگیرانه جهت حفاظت از کیفیت منابع آب روشن و قطعی است. یکی از راهکارهای حفظ کیفیت منابع آب تعیین محدوده‌ای تحت عنوان حریم در اطراف هر منبع آبی است تا علاوه بر شناسایی عوامل آلاینده‌ها، از استقرار واحدهای آلاینده در آن محدوده جلوگیری شود و عملاً ریسک ورود آلودگی به آب کاهش یابد.

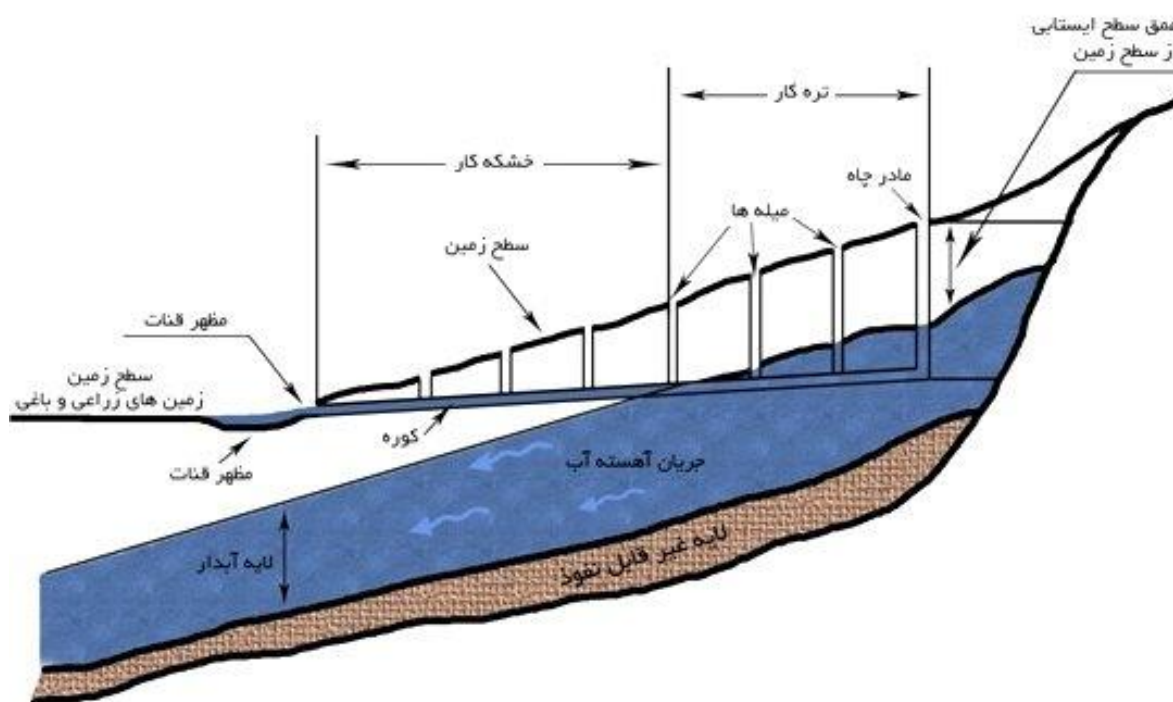
رعایت حریم تعیین شده و به طور کلی حفاظت از کیفیت منابع آب و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها نیازمند همکاری و هماهنگی بین نهادها و سازمان‌های مختلف، اعم از عموم جامعه و دولت، محققان، متخصصان محیط زیست است. برنامه‌ریزی دقیق و اجرای صحیح اقدامات حفاظتی، آموزش و اطلاع‌رسانی مناسب و روش‌های تشویقی و بازدارنده، استفاده از فناوری‌های کارآمد و بروز در کشاورزی و صنعت از جمله اقداماتی هستند که باید انجام شوند.

برای تعیین حریم کیفی منابع آب زیرزمینی، نیاز به اطلاعات دقیقی از مشخصات هیدروژئولوژی منطقه (جنس آبخوان، میزان تخلخل لایه‌های زمین، عمق سطح ایستابی، شیب یا گرادیان سطح آب زیرزمینی، ضرایب هیدروژئولوژی و غیره) است.

سامانه قنات

قدیمی‌ترین روش استحصال آب از اعماق زمین قنات است که در ایران از دیرباز جایگاه ویژه‌ای داشته است. قنات مجموعه‌ای از چند میله و یک کوره (کوره‌های) زیرزمینی است که با شیبی کمتر از شیب سطح زمین آب موجود در لایه آبدار مناطق مرتفع زمین یا رودخانه‌ها یا مرداب‌ها و برکه‌ها را به کمک نیروی ثقل و بدون کاربرد نیروی کشش و هیچ نوع انرژی الکتریکی یا حرارتی جمع‌آوری می‌کند و به نقاط پست‌تر می‌رساند (Papoli Yazdi, and Sarvghad, 2010; Azari Rad and Ziayi, 2012; Moghadam, 2010).

(شکل ۱).



شکل ۱. سامانه قنات

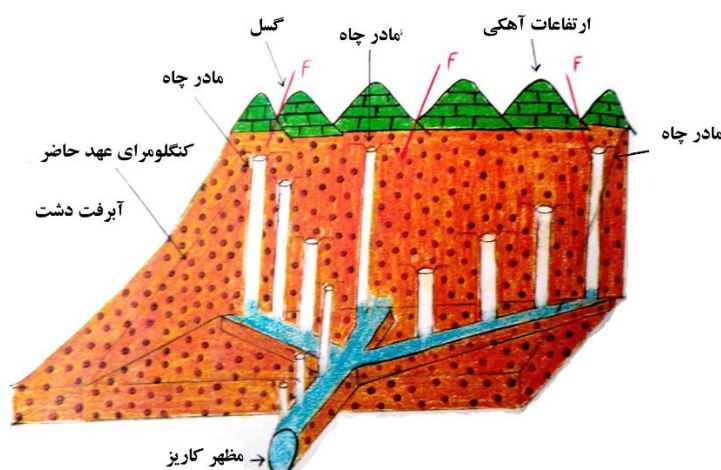
Fig 1. Qanat System

ویژگی‌های قنات

در زمینه بررسی ویژگی‌های فنی قنات با توجه به گستردگی موضوعات زمین‌شناسی محیط دربرگیرنده این سازه‌ها و خصوصیات هیدرولیکی متفاوت و نوع تأمین آب پیچیدگی‌هایی وجود دارد.

قنات از نظر خصوصیات جنس لایه‌های زمین، شیب محل، عمق میله چاه‌ها و منشأ تغذیه به دو نوع قنات کوهستانی و قنات دشت تقسیم می‌شوند. از مهم‌ترین مشخصات بارز قنات کوهستانی می‌توان به طول کم، عمق میله چاه‌های کم و تغییرات زیاد آبدی طی فصول مختلف نام برد. در قنات واقع در دشت‌ها مشخصات مزبور بر عکس است، همچنین به لحاظ نحوه تأمین آب قنات می‌تواند از آبرفت تغذیه گردد که عمده قنات چنین هستند و بعضاً تأمین آب آن‌ها می‌تواند از مسیر گسل و درز و شکاف سنگ‌های زیرزمین و یا مخازن کارستی صورت گیرد که در مورد اخیر معمولاً طول روال قنات کوتاه‌تر از نوع آبرفتی است؛ از این رو بررسی و شناخت نوع قنات از لزومات تعیین حریم کیفی است (شکل ۲).

با توجه به سابقه قدیمی بودن این سامانه آبیاری و ویژگی عدم گستردگی آن در جهان و غفلت نسبی در متون به‌روز به خصوصیات فنی مربوط به این سازه مهندسی آبی (Safinejad, 2016)، تاکنون بررسی‌های صورت‌گرفته در خصوص حفاظت کیفی از حریم قنات بسیار محدود بوده است از آن جمله می‌توان به تحقیق (Gholamnejad, and Kargar, 2006) اشاره کرد که درباره حریم کیفی آب‌های زیرزمینی انجام شده‌است و در قسمتی از آن به حریم کیفی قنات پرداخته شده‌است. در این مطالعه از دستورالعمل‌هایی کمک گرفته است که در این زمینه به قنات مانند چاه‌های آب نگاه کرده است. ولیکن با توجه به خصوصیات فنی متفاوت اجزای قنات (قسمت‌های تره‌کار (زهکان)، خشکه‌کار و گالری افقی (کوره)) و تراوش و حرکت ثقلی آب با شرایط چاه که به‌صورت نقطه‌ای و از لایه‌های عمودی زمین در حال پمپاژ است (شکل ۱)؛ لذا این نوع تعیین حریم نیاز به بازنگری، اصلاح، تکمیل و یا ترکیب دارد (Center For Strategic Studies, 2004). به‌منظور حفظ کیفیت منابع آب زیرزمینی لازم است حرایمی برای کنترل و جلوگیری از ورود آلودگی به قنات تعیین گردد که هدف اصلی این تحقیق است.



شکل ۲. طرح‌واره مقطع قنات گوهرریز جویار در کرمان (Shojaee and Nikpour, 2005)

Fig 2. Schematic section of Goharriz Qanat in Jupar, Kerman, Iran (Shojaee and Nikpour, 2005)

تعاریف ارائه شده برای آسیب‌پذیری، انواع آسیب‌پذیری و محدودیت‌های موجود برای آن بررسی می‌شود. پس از تعیین نواحی بر اساس آسیب‌پذیری از توسعه بی‌رویه در مناطق بحرانی و پرخطر جلوگیری می‌شود و یا فعالیت‌های کاربری آلوده‌کننده در واحد سطح آبخوان کاهش داده می‌شود که این دیدگاه مد نظر تحقیق پیش رو نمی‌باشد (Center For Strategic Studies, 2013).

دیدگاه دوم، حریم کیفی؛ در نظر گرفتن یک محدوده برای کاربری‌های متفاوت است که خود بر چندین روش است: - روش شعاع ثابت دلخواه: که بر اساس یک مقدار مصوب مدیریتی است، ساده و ارزان بوده و انجام آن به مهارت فنی چندانی نیاز ندارد. انتخاب شعاع ثابت بزرگ در این روش، می‌تواند اثرات حفاظتی آن را بر روی آبخوان افزایش داده و نقطه‌ضعف‌های تکنیکی این روش را جبران کند. همچنین استفاده از این روش به‌عنوان یک روش سریع ولی موقتی معمول است. البته این روش به‌ویژه زمانی مفید است که خطر آلودگی قریب‌الوقوعی منطقه را تهدید کند و اقدامات فوری ضروری باشد. از معایب این روش این است که اساس این روش بر پایه اصول هیدروژئولوژیکی استوار نیست و ممکن است اطلاعات کافی برای تعیین شعاع آستانه موجود نباشد؛ بنابراین این روش به‌تنهایی ممکن است برای حفاظت منطقه تغذیه آبخوان ناکافی باشد. همچنین کاربرد این روش ممکن است هزینه‌های اضافی را برای مدیریت اراضی تحمیل کند به‌ویژه در مناطقی با زمین‌شناسی پیچیده که دارای

هیدرولیک قنات تابع رژیم هیدرولیکی آب زیرزمینی است که در آن تغییرات پتانسیل سطح آب زیرزمینی تابع زمان نبوده و از مختصات مکانی سه‌گانه طول، عرض و ارتفاع پیروی می‌نمایند این نوع رژیم هیدرولیکی را ماندگار نامیده‌اند که خصوصیات آن بسیار مشابه خصوصیات جریان آب زیرزمینی به‌صورت طبیعی است و آب زیرزمینی در آن تحت تأثیر نیروی ثقل حرکت می‌کند و به خروجی قنات می‌رسد (Behnia, 2000).

رویکرد تعیین حریم محافظتی کیفی در این تحقیق

در خصوص حفاظت کیفی منابع آب زیرزمینی دو دیدگاه مفهوم آسیب‌پذیری کیفی و تعیین حریم کیفی وجود دارد؛

در دیدگاه اول، بر اساس نظر کمیته ملی تحقیق آمریکا آسیب‌پذیری عبارت است از احتمال رسیدن آلاینده‌ها به آب زیر زمینی بعد از به‌وجود آمدن آلودگی در قسمتی از سطح زمین (Center For Strategic Studies, 2013).

این روش نیازمند دریافت اطلاعات و لایه‌های اطلاعاتی مختلف از محیط و شرایط منطقه مورد نظر است که به نسبت دیدگاه دیگر بسیار پرهزینه و زمان‌بر است و البته از دقت بالاتری برخوردار بوده و چنانچه درست تحلیل شود برای مدت معینی قابل استفاده است و مجدد باید بروز گردد (Center For Strategic Studies, 2013).

در این روش پهنه‌های آسیب‌پذیری تعیین می‌گردد. در این روش بسط مفهوم آسیب‌پذیری اهمیت زیادی دارد که

زمین‌شناسی زیاد است و متغیرهای هیدرولوژیکی متعددی باشد مقداری خطا در آن بالا می‌رود.

- مدل‌سازی عددی روابط تحلیلی و یا دیگر مدل‌سازی‌های جریان آب زیرزمینی: پیشرفته‌ترین و بهترین روش‌ها، روش‌هایی است که از مباحث تحلیلی و یا از مدل‌سازی کامپیوتری و ترکیبی از آن دو استفاده کند که در این صورت اگر برداشت‌های دقیق و کاملی از متغیرهای آبخوان مورد نیاز باشد، ممکن است حتی از همکاری مشاورین فنی نیز در این زمینه استفاده گردد (Center For Strategic Studies, 2017).

روش‌های محاسبه حریم کیفی منابع آب زیرزمینی که در دستورالعمل‌های مورد استفاده وزارت نیرو آورده شده‌است، عمدتاً برای چاه است (Center For Strategic Studies, 1966; 1982; 2013; 2014; 2017).

به‌طور کلی با توجه به‌شکل و نوع آلاینده‌ها و مسافت طی شده توسط آلاینده‌ها و خواص زمین‌شناسی خاک می‌توان حریم‌های حفاظتی متفاوتی مانند سه حریم حفاظت فوری، حریم حمایت اجباری، حریم احتمال آلودگی را معین کرده و نسبت به استقرار کاربری‌ها با توجه به مکان منبع آب زیرزمینی بررسی را انجام داد.

حریم حفاظتی فوری شعاعی در اطراف منبع آبی است که آلودگی قادر است به‌سهولت وارد آب گردد. این حریم مرتبط با آلودگی میکروبی و شیمیایی است و با توجه به اینکه طبقات خاک یک چاه از دانه‌بندی یکسان و با ضریب قابلیت انتقال آب یکسانی تشکیل نشده‌اند، حداقل حریم حفاظتی از چاه (محور روال قنات) ۴ به‌طور تقریبی بین ۱۰ تا ۵۰ متر از طرف استانداردها پیشنهاد شده‌است. هرگونه کاربری در این حریم ممنوع است.

برای حریم کیفی اجباری، حفاظت از ورود ویروس‌ها، فعالیت بیولوژیکی باکتری‌ها، بالا رفتن میزان ازت آمونیاکی، نیتريت، نیترات فسفات‌ها و شوینده‌ها است. باکتری‌های بیماری‌زا پس از ۵۰ روز در آب زیرزمینی از بین خواهد رفت، درحالی‌که ذرات درشت‌تر و کیست‌های انگلی کاملاً در حریم حفاظت فوری از آب گرفته می‌شود؛ لذا از نقطه‌نظرات بهداشتی این حریم طوری تعیین می‌گردد که هر قطره آب حاوی باکتری مضر باید ۵۰ روز طول بکشد تا از نقطه آلودگی وارد منبع آب زیرزمینی گردد. پس از این مدت باکتری زنده نیست و آب قادر به

مرزهای هیدرولوژیکی واقعی هستند. مضاف بر این‌ها پایه علمی محدود این روش در مقایسه با سایر روش‌ها از قابلیت دفاع کمتری برخوردار است.

- شعاع ثابت محاسبه‌شده: که بر اساس استفاده از روابط تجربی و تحلیلی از معادلات مربوط به شعاع ثابت بر حسب روابط حجمی و غیره است. این معادلات شامل متغیرهای هیدرولوژیک پایه است و حسن آن در سادگی کاربرد، کم‌هزینه‌بودن و تا حدودی عدم نیاز به تکنسین ماهر است. از این‌رو می‌توان از آن برای تعداد زیادتری از چاه‌ها و دیگر منابع آب زیرزمینی در مدت‌زمان معین جهت تعیین حریم کیفی بهره برد. از محدودیت‌های این روش نسبت به دیگر روش‌های اشکال ساده تحلیلی و یا محاسبات عددی دقت و اطمینان کمتر است ولیکن نسبت به روش شعاع ثابت مدیریتی دقت بیشتر و هزینه کمتری دارد.

- شعاع متغیر: که بر اساس روابط تجربی و برهم‌نهی دیگر خصوصیات فنی زمین‌شناسی و یا هیدرولیکی، خصوصیات آلودگی و غیره در این روش علاوه بر مراحل قسمت قبل مرزهای هیدرولوژیکی جریان (مرزهای جریان برای تعیین محل خطوط تقسیم آب زیرزمینی یا عوارض فیزیکی هیدرولوژیکی دیگر که جریان آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند، به کار می‌رود) و یا دیگر خصوصیات هیدرولیکی محل در آن اضافه می‌گردد. تا بر واقعیت هر مورد انطباق بیشتری یابد. در خصوص استفاده از روابط تجربی برای حرایم کیفی؛ از روابط حرایم کمی در چاه‌های تحت پمپاژ هم می‌توان استفاده کرد؛ چون حداکثر حریم کیفی عموماً برابر با حریم کمی در این چاه‌ها است. این موضوع به‌دلیل شعاع تأثیر و درنظرگرفتن آن در حریم کمی است که در چاه‌های با پمپاژ این شعاع بیشتر از حالت خروج آب به‌صورت ثقلی است.

- روش اشکال مختلف ساده‌شده: که از مدل‌های تحلیلی که با توجه به معیارهای هیدروژئولوژیکی، زمان گذر، مرز جریان و عوارض فیزیکی، بهترین شکل برای حریم کیفی که بر شرایط هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه دقیقاً هماهنگ باشد، را به‌دست می‌دهد. این روش احتیاج به داده‌های صحرایی کمی دارد و از نظر قیمت تمام شده با افزایش اندکی نسبت به شعاع ثابت نتایج جامع‌تری و قابل دفاع‌تری به‌دست می‌دهد. البته در شرایطی که تغییرات

R : حریم چاه بر حسب متر، H : ضخامت آبخوان بر حسب متر (طول اسکرین برای چاه‌ها)، K : قابلیت هدایت هیدرولیکی آبخوان بر حسب متر بر ثانیه و I : گرادیان هیدرولیکی. عدم اطلاع دقیق از مقدار K در آبخوان‌ها و عدم دسترسی آسان به میزان گرادیان هیدرولیکی آب زیرزمینی و از طرفی مد نظر قرار ندادن دبی از ضعف‌های فرمول فوق است.

رابطه شولتز، رابطه کوساکین و رابطه شنیلی نیز برای تعیین حریم کمی چاه پیشنهاد شده‌است.

$$R = A \times \sqrt{\frac{H \times K \times t}{m_e}} \quad (3)$$

R : حریم چاه بر حسب متر، A : ضریبی است که برای هر فرمول تجربی بالا متفاوت است (شولتز $= \sqrt{6}$ ، کوساکین $= 47\sqrt{6}$ و شنیلی $= 1.5$)، K : قابلیت هدایت هیدرولیکی آبخوان بر حسب متر بر ثانیه، H : ضخامت آبخوان بر حسب متر (طول اسکرین برای چاه‌ها)، m_e : تخلخل مؤثر یا مفید آبخوان و t : مدت زمان پمپاژ بر حسب ثانیه. عدم اطلاع دقیق از مقدار K در آبخوان‌ها و عدم دسترسی آسان به میزان گرادیان هیدرولیکی آب زیرزمینی و از طرفی مد نظر قرار ندادن دبی از ضعف‌های فرمول فوق است.

رابطه کوزنی

$$R = \sqrt{\frac{12t}{m_e}} \times \sqrt{\frac{Q \times K}{\pi}} \quad (4)$$

R : حریم چاه بر حسب متر، Q : آبدهی چاه بر حسب مترمکعب در ساعت، K : قابلیت هدایت هیدرولیکی آبخوان بر حسب متر بر ثانیه، m_e : تخلخل مؤثر یا مفید آبخوان و t : مدت زمان پمپاژ بر حسب ثانیه. این رابطه با توجه به در نظر گرفتن دبی و دیگر متغیرها، رابطه نسبتاً جامع‌تری است ولیکن ممکن است دستیابی به همه متغیرهای آن دشوار باشد.

رابطه حجمی (ساده) که این رابطه و روابط بعدی از هم برای حرایم کمی و کیفی پیشنهاد شده‌است.

شیوع بیماری نخواهد بود با توجه به موارد ذکر شده. هرگونه کاربری با آلودگی‌های فوق در این حریم ممنوع است. محاسبه این مدت ۵۰ روز با تعیین سرعت حقیقی جریان آب زیرزمینی امکان‌پذیر است. در زمینه‌ای آبرفتی که سرعت حقیقی جریان آب به‌کندی انجام می‌گیرد می‌توان با استفاده از سامانه‌های ردیاب نظیر مواد رادیواکتیو رودامین نمک طعام انواع مواد رنگی مجاز و مواد معطر حریم را محاسبه نمود.

حریم احتمال آلودگی که در برابر آلوده‌سازی درازمدت شامل مواد رادیواکتیو، فلزات سنگین، نیترات فسفات و برخی از سموم در نظر گرفته می‌شود که با توجه به فرمول‌های تجربی قابل انجام است (Center For Strategic Studies, 2014).

در این تحقیق با بررسی روابط تجربی، تعیین یک شعاع اصلاح شده برای قسمت‌های مختلف قنات، با توجه به خصوصیات هیدرولیکی، زمین‌شناسی و نوع آلودگی مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش‌ها برای قنات تعمیم داده می‌شود.

فرمول‌های تجربی تعیین حریم چاه

رابطه زیشارد که معمولاً برای تعیین حریم کمی به کار می‌رود.

$$R = 3000 \times S \times \sqrt{K} \quad (1)$$

R : شعاع تأثیر چاه بر حسب متر، S : افت سطح آب در زمان پمپاژ در داخل چاه بر حسب متر و K : قابلیت هدایت هیدرولیکی آبخوان بر حسب متر بر ثانیه. از محدودیت‌های این رابطه در نظر نگرفتن عمق سطح آب در چاه و همچنین دبی است، ولیکن سادگی آن و همچنین حریم نسبتاً بزرگی که محاسبه می‌شود کار را برای مناطقی که کمبود داده وجود دارد آسان‌تر می‌کند و مابقی حریم‌ها را پوشش می‌دهد.

رابطه کمفورت نیز معمولاً برای تعیین حریم کمی به کار می‌رود.

$$R = 550 \times \sqrt[4]{H \times K \times I} \quad (2)$$

می‌گیرد. برای کاربرد روابط مورد اشاره به‌منظور به‌دست‌آوردن حریم کیفی قنات می‌توان از زمان گذر به‌جای مدت‌زمان پمپاژ استفاده کرد.

در موارد بررسی شده و مورد تحقیق گذشته در خصوص قنات، این سازه به‌صورت رشته چاه‌های مجزا در نظر گرفته شده‌است که حریم هر چاه جداگانه تعیین و سپس یا به‌صورت مجزا یا با اتصال آنها به یکدیگر به‌عنوان حریم قنات استفاده می‌شد ولیکن میله‌های قنات و روال آن و به‌طورکلی سازه قنات متفاوت از رشته چاه‌های به‌هم‌پیوسته است. زیرا مادر چاه‌ها و روال قنات، بدون هیچ پمپاژی با کمک نیروی ثقلی در تأمین آب آن نقش دارند و قسمت خشکه‌کار قنات و میله‌ها و روال واقع در این محدوده به‌صورت کانال انتقال آب البته با مقداری نفوذپذیری عمل می‌کند و می‌بایست برای تعیین حریم آن، موارد فوق را در نظر گرفت.

با توجه به موارد مذکور؛ برای قسمت خشکه‌کار قنات حریمی با یک شعاع ثابت از محور روال قنات به اطراف با توجه به شیب سطحی و نوع خاک از لحاظ دانه‌بندی که می‌تواند عددی مابین ۱ تا ۵۰ متر در نظر گرفته شود که می‌بایست به‌طور کامل حفاظت و دسترسی به آن قطع گردد و همچنین درپوش ویژه برای هر میله چاه در نظر گرفته شود.

با درنظرگرفتن انواع آلودگی قابل نفوذ در آب‌های زیرزمینی و درنظرداشتن این‌که در قسمت تره‌کار و محل تأمین آب قنات قابلیت نفوذ وجود دارد، بایستی با استفاده از روابطی که در قسمت قبل ذکر گردید، حریمی برای ورود میکروارگانیسم‌ها یا آلودگی‌های شیمیایی مثل نیترات‌ها، فسفات‌ها و شوینده‌ها در نظر گرفت. این آلودگی‌ها بعد از گذر مدتی معلوم، مثلاً ۵۰ روز به منبع آب می‌رسند و یا در برخی موارد مانند فلزات سنگین، مواد رادیواکتیو، سموم و نیترات‌ها می‌تواند پس از چندین سال از طریق انتقال از طریق آب زیرزمینی به منبع آبی برسد. با استفاده از این زمان گذر می‌توان از فرمول‌های ذکر شده در قسمت قبل حریم را به‌دست آورد. (Center For Strategic Studies, 2014)

هرچند با استفاده از روابط و جای‌گذاری زمان گذر هر نوع آلودگی، امکان محاسبه این ناحیه از حریم کیفی قنات وجود دارد. ولیکن نظر به کمبود اطلاعات در مورد نوع

$$R = \sqrt{\frac{Q \times t}{\pi \times n \times H}} \quad (5)$$

R : حریم چاه بر حسب متر، Q : آبدهی چاه بر حسب مترمکعب در ساعت، H : ارتفاع ستون آب در چاه پمپاژ بر حسب متر (طول اسکرین برای چاه‌ها)، n : تخلخل خاک و t : زمان مد نظر برای رسیدن آلودگی به چاه که بر اساس هیدروژئولوژی و موقعیت منبع آلاینده است؛

رابطه حجمی تغذیه

$$R = \sqrt{\frac{Q \times t}{\pi \times N \times t + \pi \times n \times H}} \quad (6)$$

R : حریم چاه بر حسب متر، Q : آبدهی چاه بر حسب مترمکعب در ساعت، H : ارتفاع ستون آب در چاه پمپاژ بر حسب متر (طول اسکرین برای چاه‌ها)، n : تخلخل خاک، t : مدت زمان پمپاژ بر حسب ثانیه و N : میزان تغذیه بر حسب متر بر ثانیه. که اگر زمان سیر به‌سمت بی‌نهایت میل کند به رابطه زیر کاهش می‌یابد (Guideline for Determining Quality Protection Zones of Groundwater, 2013).

$$R \simeq \sqrt{\frac{Q}{\pi \times N}} \quad (7)$$

نتایج تحقیق

درنظرگرفتن هندسه قنات برای تحلیل و بررسی و اعمال روابط تجربی که مرور گردید مورد نیاز و الزامی است. بر اساس انواع روش‌های انتقال آلودگی به منابع آب، یک منبع آب زیرزمینی مانند قنات می‌تواند از محل رواناب‌های سطحی و جریان‌های نفوذی زیر سطحی کم‌عمق از محل میله چاه‌ها آلوده گردد. قنات با درنظرگرفتن شرایط زمین‌شناسی و هیدرو دینامیکی می‌تواند از طریق نفوذ آلاینده‌ها به سفره و آبخوان از زیر زمین نیز آلوده گردد که این آلاینده‌ها نظر به خصوصیات هیدروژئولوژیکی می‌تواند با گذر زمان مشخص از منبع آلاینده به محیط آبخوان و به قنات انتقال یابد. معیار زمان گذر برای نشان‌دادن مدت حرکت آب زیرزمینی یا آلاینده از یک نقطه در حریم چاه تا خود چاه مورد استفاده قرار

از این رو ارتفاع آبگیر، محدود به ارتفاع خیس آبخوان است ولیکن از آن رو که کل گالری در قسمت تره کار مانند اسکرین عمل می‌نماید، می‌باید کل مقدار آن را در رابطه به عنوان طول اسکرین در روابط استفاده کرد.

برای محاسبه ضریب تخلخل مؤثر، جدول شماره ۱ و ضریب نفوذپذیری یا قابلیت هیدرولیکی جدول شماره ۲ برگرفته از متون فنی (Center For Strategic Studies, 2014) پیشنهاد شده‌است.

آلاینده‌ها و خصوصیات مختص هر قنات دستیابی به آن آسان نمی‌باشد. از این رو حریم قنات را می‌توان با متصل نمودن حریم مادرچاه به حریم قسمت خشکه کار این ناحیه مشخص کرد.

مادر چاه عموماً در قسمتی از منطقه واقع می‌گردد که تغذیه‌ای خوب از آب زیرزمینی دارد و بر خلاف چاه‌های معمول که پمپاژ می‌گردند دارای مخروط افت کوچک‌تری است و شیب هیدرولیکی در ناحیه آبد قنات تقریباً برابر با همان شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی در منطقه است.

جدول ۱. ضریب تخلخل مؤثر

Table 1. Soil Effective Porosity Factor

NO.	نوع خاک Soil Type	تخلخل (درصد) %. Porosity
1	سیلت و رس	50-60
2	ماسه ریز	40-50
3	ماسه متوسط	35-40
4	ماسه درشت	35-45
5	سنگ‌ریزه (شن)	20-30
6	مخلوط ماسه و سنگ‌ریزه	10-30
7	رسوبات یخچالی	25-45
8	سنگ سخت و متراکم	<۱
9	سنگ آذرین شکافدار و متلاشی	3-10
10	بازالت‌های جدید قابل نفوذ	2-5
11	گدازه‌های آتشفشانی خلل و فرج دار	10-50
12	توف	30
13	ماسه سنگ	5-30
14	سنگ کربناته با تخلخل اولیه و ثانویه	10-20

جدول ۲. ضریب نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی

Table 2. Coefficient of Permeability or Basin Hydraulic Conductivity

NO.	نوع خاک Soil Type	ضریب نفوذپذیری خاک (متر بر ثانیه) Soil Permeability Coefficient (m/s)
1	سنگ‌ریزه با دانه‌بندی همگن	10-4_10-2
2	شن با دانه‌بندی همگن	10-5_10-3
3	شنی - شنی، شن‌ریزه	10-7_10-5
4	شنی، سیلتی - شنی، شنی - رسی، رسوبات یخچالی	10-8_10-6
5	رس	10-11_10-8

در قنات آبرفتی ترسیم و تهیه گردیده است (شکل ۳ الف).

در این بخش یک طرح‌واره از قنات به منظور کاربرد روش‌ها و روابط برای به دست آوردن طرح کلی حریم کیفی

متغیرها بر اساس فراوانی مقادیر مشاهده شده در نمونه قنات‌ها و شرایط در منطقه انتخاب شده‌است.

متغیرهای دیگر مانند $H =$ عمق آب در مادرچاه، $H^* =$ ضخامت لایه آبد، $n =$ ضریب تخلخل مؤثر، $K =$ نفوذپذیری و در آخر $R =$ شعاع محاسباتی در جدول مذکور درج گردیده است.

باید ذکر گردد که در دو رابطه کمفورت و حجمی برای محاسبه ضخامت لایه آبدار با توجه به طول گالری قنات در قسمت تره‌کار برای تأمین آب، مجموع مقدار عمق آب و طول گالری به‌عنوان ضخامت لایه آبد H^* در نظر گرفته شده‌است.

به‌عنوان مثال قناتی با یک رشته به طول $X = 500$ متر و ۲۴ چاه تا مظهر با فاصله تقریبی $Y = 20$ متر و آبدی $Q = 50$ لیتر بر ثانیه بدون نوسان فصلی که در آبرفت و با شیب سطحی زمین $S_1 = 4\%$ درصد، شیب سطح آب زیرزمینی $S_2 = 2\%$ درصد و شیب سطح کف قنات حدود 0.5% تا $S_3 = 1\%$ درصد و عمق مادر چاه $h = 20$ متر که به تناسب این عمق کم می‌شود. ۵ حلقه چاه اول به‌عنوان آبد و سطح ایستابی در مادر چاه در عمق $h - H = 18$ متری است. البته پس از محاسبه برای این مثال چند حالت با اختلاف در یکی از متغیرها برای بررسی روابط و به‌دست‌آوردن دید وسیع‌تر نسبت به روابط انتخابی محاسبه و در جدول ۳ آورده شده‌است. این مقادیر از

جدول ۳. مثال‌های حل‌شده

Table 3. Different Solved Examples

شعاع به‌دست‌آمده R					عمق آب در مادرچاه Water Depth in Water Producing Well H		ضخامت آبدی Watering Thickness *H		Row No.	
رابطه رابطه رابطه	رابطه رابطه رابطه	رابطه رابطه رابطه	رابطه رابطه رابطه	رابطه رابطه رابطه	ضریب تخلخل مؤثر Effective Porosity Coefficient N	نفوذپذیری Permeability K	آبدی Discharge Q	ضخامت آبدی Watering Thickness *H	Row No.	Row No.
رابطه حجمی ۵۰ روز Volumetric Relationship 50 Days	رابطه حجمی یک سال Volumetric Relationship 1 Year	رابطه حجمی ۶ ماه Volumetric Relationship 6 Month	رابطه کمفورت Combefort Relationship ship	رابطه زیشارد Sichard Relationship ship	0.001	0.3	50	102	2	1
771.74	2085.13	1472.39	101.39	142.30	0.001	0.3	10	77	1.5	2
664.05	1794.16	12.92	83.05	94.87	0.001	0.3	5	102	1	3
2596.94	7016.55	4954.65	116.89	189.74	0.001	0.1	50	102	2	4
1161.39	3137.89	2215.79	116.89	189.74	0.001	0.5	50	102	2	5
1499.34	4051.00	2860.57	36.86	18.97	0.00001	0.3	50	102	2	6
1499.34	4051.00	2860.57	207.86	600.00	0.01	0.3	50	102	2	7

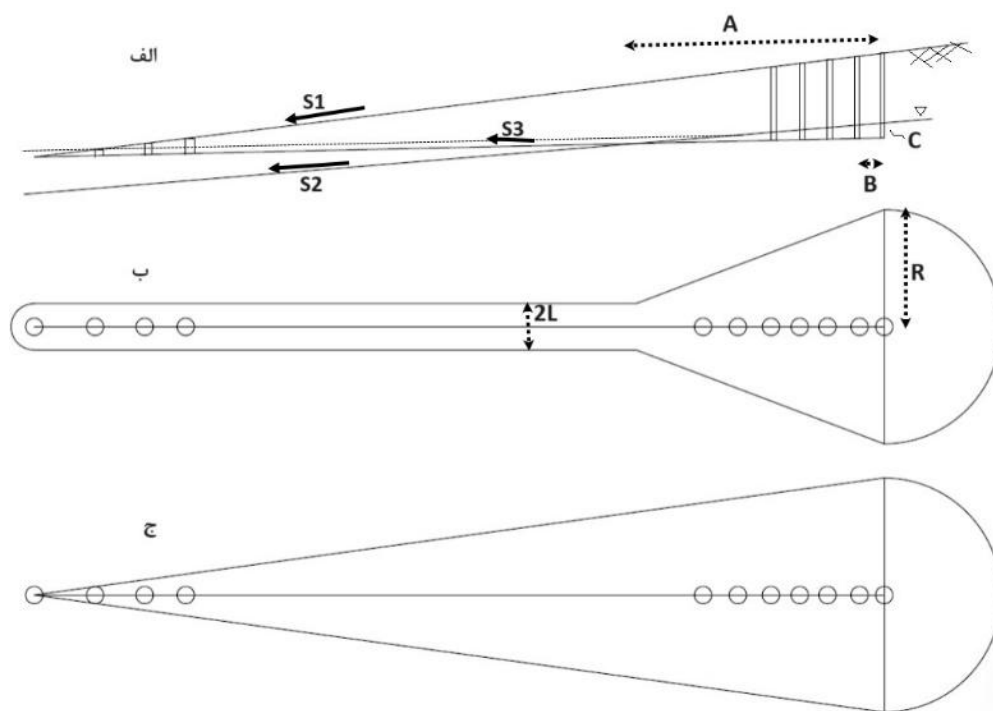
شده در هر نوع فرمول است که شاید برای چاه و قنات در یک منطقه مناسب و منطقه دیگر نامناسب باشد.

بعد از محاسبه و انتخاب یک شعاع حفاظتی برای مادر چاه (R) می‌توان با دو رویکرد به ترسیم حریم کیفی مابقی قنات پرداخت. ابتدا اینکه یک حریم ثابت برای قسمت خشکه‌کار (L) در نظر گرفت و یک خط مورب از شعاع ترسیم شده به‌عنوان حریم کیفی مادرچاه به آن وصل کرد تا حریم کیفی تره‌کار مشخص گردد (شکل ۳ ب). و چنانچه طول تره‌کار و خشکه‌کار قنات مد نظر نباشد و یا حریم کیفی در قسمت خشکه‌کار با ملاحظات همراه

در این بررسی با توجه به ویژگی‌های روابط و همچنین متغیرهایی که عموماً می‌توان آسان‌تر در مورد هر قنات دست یافت و یا محاسبه کرد، سه رابطه زیشارد، کمفورت و حجمی ساده با در نظر گرفتن سه زمان گذر که برای آلودگی‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود، استفاده گردید. دو رابطه زیشارد و کمفورت اعداد نسبتاً مشابهی را ارائه می‌دهد در حالی که رابطه حجمی حتی با در نظر گرفتن زمان گذر ۵۰ روز با اختلاف زیاد مقادیر بزرگ‌تری را به‌دست می‌دهد. این اختلاف می‌تواند به‌دلیل انطباق و ساده سازی رابطه‌ها بر اساس متغیرهای در نظر گرفته

متصل نمود (شکل ۳ ج).

نباشد می‌توان آن را از مادرچاه مستقیم به مظهر قنات



شکل ۳. الف) پروفایل و مقطع طولی قنات ب) نمای قنات از بالا و حریم کیفی با در نظر گرفتن تره‌کار و خشکه‌کار و قسمت ثابت برای خشکه‌کار ج) نمای قنات از بالا و حریم کیفی با در نظر گرفتن تره‌کار و خشکه‌کار و کم شدن تدریجی حریم تا مظهر قنات.

Fig 3. a Longitude Profile, b Qanat and the Protection Zone Plan Considering Wetland (water production zone) and Dryland (water transport zone), and its Consistent protection zone, c Qanat and the Protection Zone Plan Considering Wetland and Dryland, and its Declined protection zone up to Qanat Outlet.

به صورت فوری مقدور نباشد می‌توان عدد ثابتی به طور مثال ۵۰۰ متر برای شعاع حفاظتی مادرچاه و در صورت در نظر گرفتن حریم حفاظتی خشکه‌کار مقداری بین ۱۰ تا ۵۰ متر را پیشنهاد داده تا بعداً در موقعیت مناسب محاسبات صورت گرفته و اعداد پیشنهادی حریم کیفی قنات اصلاح گردد.

برای قنات کوهستانی یا قنات‌هایی با شرایط خاص از جمله قنات کارستی و یا قنات‌های واقع در یک سمت گسل یا دره که از طریق یک مانع طبیعی، دامنه تأمین آب آنها محدود یا دارای شرایط هیدرولیکی متفاوتی است؛ کلیه مسائل موجود باید جهت تعیین حریم کیفی مورد ملاحظه قرار گیرد.

پیشنهاد می‌گردد دیگر روش‌ها و یا با نظر گرفتن موارد عینی و واقعی مثال‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج و روش تعیین حریم کیفی قنات توسط ردیابی آب‌های زیرزمینی بررسی و بهبود بخشیده شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به نتایج به دست آمده اگر بخواهیم مقادیر کاربردی‌تری با در نظر گرفتن عدم تنش اجتماعی داشته باشیم به نظر می‌رسد روش کمفورت از مقادیر بهتری نسبت به دیگر روش‌های استفاده شده در این تحقیق می‌دهد. ولیکن اگر آزادی بیشتری برای در نظر گرفتن حریم داشته باشیم با توجه به در بر گرفتن مقدار دبی خروجی قنات و همچنین زمان گذر ۵۰ روز که برای از بین رفتن آلودگی‌های میکروبی مناسب است رابطه حجمی ۵۰ روز از بهترین مقادیر برخوردار است برخوردار است. هر چند که برخی از روش‌های دیگر با توجه به اینکه قنات‌ها دارای انواع اقسام و ویژگی‌های متفاوت هستند، برتری‌های خود را ممکن است داشته باشند که تأیید قطعی روش‌ها نیازمند ردیابی آب‌های زیرزمینی است. نظر به اعداد محاسبه شده روش‌های مورد بررسی چنانچه به منظور حفاظت سریع یک منبع آبی محاسبات فوق

منابع

- Center For Strategic Studies. (1982). *Law On Fair Distribution Of Water*, Islamic Council. (In Persian).
- Center For Strategic Studies. (2004). *Legal Protection Of Qanats And Underground Water Sources*, Kerman International Watershed Management Conference, Bahonar University. (In Persian).
- Madanian, G. (2004). *Legal Protection Of Qanats And Underground Water Sources*, Kerman International Aqueduct Conference, Bahonar University. (In Persian) <https://civilica.com/doc/33152/>
- Papoli Yazdi, M.H. & Sarvghad Moghadam, A. (2010). *Qanats: A Technique For Obtaining Water*, Translated By The Cultural Vice-Chancellor Of Astan Quds. (In Persian) Book.
- Preservation Law and Groundwater Resources of the Country*, (1966), National Assembly. (In Persian).
- Safinejad., J. (2016). *Kariz in Iran and The Traditional Ways Of Using It*, Tehran: Mehr Eshraq Cultural and Artistic Institute, Iran Water Resources Management Company. (In Persian) Book.
- Shojaee, M.R. & Nikpour, M.R. (2005). *How Faults Affect Water Resources*, Kerman: Report, Kerman Regional Water Company. (In Persian) Report.
- Ansari, H., & Marofi, S. (2017). Snow water equivalent estimation using AMSR-E and GLDAS model (case study: basins of northwestern Iran). *Water and Soil*, 31(5), 1497-1510. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i5.58484>
- Azari Rad, M., & Ziayi, A. (2012). *Hydraulic Study Of Water Flow In Qanat Using Numerical Modeling*, 12th Iran Hydraulics Conference. (In Persian). <https://civilica.com/doc/379386>
- Behnia, A. (2000). *Qanat Making and Qanat Maintenance*. Tehran University Center Press, Tehran, Iran (In Persian).
- Gholamnejad, N., and Kargar, M. (2006). *Determining The Qualitative Boundary Of Underground Water Resources*, The Second Iranian Water Resources Management Conference. (In Persian) <https://civilica.com/doc/13397>
- Center For Strategic Studies. (2013). *Instructions For Determining The Qualitative Protection Zone Of Underground Water*, Publication Number 621. (In Persian).
- Center For Strategic Studies. (2017). *Instructions For Determining The Quantitative Boundaries Of Wells And Canals*, Program And Budget Organization, Regulation No. 747. (In Persian).
- Center For Strategic Studies. (2014). *Instructions On How To Issue A License For Water Packaging For Drinking Purposes*, Tehran: Iran Resources Management Company Publications. (In Persian).