



Evaluation of the Hydraulic Fence System for Groundwater Remediation near a Stream Using Analytical Method

A. Ramezani-Charmahineh¹, M. Asadi-Aghbolaghi^{2*},
R. Mirabbasi Najafabadi², and S.H. Tabatabaei²

Abstract

The protection of groundwater resources against pollution is an important and essential issue. One of the effective methods in the treatment of aquifers is the utilization of the injection-extraction well pair system (hydraulic fence system). In this study, the remediation system of a pair of injection and extraction wells near a stream was analytically analyzed. The potential and stream functions were analyzed together with the capture and release zones of the wells in three configurations. The base flow rate (i.e. the minimum flow rate to initiate the circulation cell between the recharge and pumping wells) was calculated and analyzed in different modes. The critical flow rate (i.e. the allowable maximum flow rate for the extraction region of the pumping well without intercepting the stream) was also specified and interpreted in the configurations for the problem. In the first configuration and when the wells were located at the dimensionless distance of 2×0.4 from each other, the critical flow rate ($Q_{CR}=1.07$) was more than the base flow rate ($Q_{BS}=0.22$). In the second configuration, equality of base and critical flow rates causes a common stream line passed through the stagnation points of the recharge and pumping wells, while the stagnation point of the pumping well was tangential to the stream. In such a situation, the dimensionless value of the distance between the injection-extraction well pair and the dimensionless value of the critical flow rate (which in this case is also equal to the base flow rate) were achieved as 2×1.04 and 0.61 , respectively. In the third configuration and when the dimensionless distance between the wells was equal to 2×1.2 , the critical flow rate ($Q_{CR}=0.59$) was less than the base flow rate ($Q_{BS}=0.70$). According to the results, the flow rate was determined while the remediation system captured stream's water and the conditions of entrance of the pollution into the stream from the aquifer were created. Also, the minimum flow rate was determined for the well pair system which can have full and gapless coverage against pollution.

Keywords: Hydraulic Fence, Analytical Solution, Stream, Aquifer Remediation, Well Pair System.

Received: November 13, 2023

Accepted: January 28, 2024

ارزیابی سیستم فنس هیدرولیکی برای احیاء آب‌های زیرزمینی در کنار یک آبراهه دائمی با روش تحلیلی

عبدالله رضانی چرمهینه^۱، مهدی اسدی آقبلاغی^{۲*}، رسول میرعباسی نجف‌آبادی^۲ و سیدحسین طباطبائی^۲

چکیده

حفاظت از منابع آب زیرزمینی در مقابل آلودگی، امری مهم و ضروری است. یکی از روش‌های مؤثر در تصفیه آبخوان‌ها، استفاده از سیستم جفت‌چاه تغذیه-تخلیه (سیستم فنس هیدرولیکی) است. در این پژوهش، سیستم احیاء جفت‌چاه تغذیه-تخلیه در کنار یک آبراهه دائمی به طور تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. توابع پتانسیل و جریان به همراه ناحیه‌های گیرش و رهاسازی چاه‌ها در سه پیکربندی آنالیز شدند. دبی پایه (که حداقل دبی برای آغاز سلول گردشی بین چاه‌های تغذیه و پمپاژ است)، در حالت‌های مختلف محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت. دبی بحرانی (که حداکثر دبی مجاز برای عدم برخورد حوضه آبیگری چاه پمپاژ با آبراهه است) نیز در پیکربندی‌های مربوط به مسئله، مشخص و تفسیر شد. در اولین پیکربندی و در موقعی که چاه‌ها در فاصله بی‌بعد 2×0.4 از همدیگر قرار گرفتند، دبی بحرانی ($Q_{CR}=1.07$) مقدار بیشتری از دبی پایه ($Q_{BS}=0.22$) به دست آورد. در دومین پیکربندی با برابر شدن مقدار دبی‌های پایه و بحرانی، خط جریان مشترکی از نقاط سکون چاه‌های تغذیه و پمپاژ عبور کرد، در حالی که نقطه سکون چاه پمپاژ بر آبراهه مماس بود. در چنین وضعیتی، مقدار بی‌بعد فاصله جفت‌چاه تغذیه-تخلیه از یکدیگر و مقدار بی‌بعد دبی بحرانی (که در این حالت برابر با دبی پایه نیز هست) به ترتیب برابر با 2×1.04 و 0.61 به دست آمدند. در سومین پیکربندی و در هنگامی که فاصله بدون بعد میان چاه‌ها مساوی با 2×1.2 بود، دبی بحرانی ($Q_{CR}=0.59$) مقدار کمتری از دبی پایه ($Q_{BS}=0.70$) کسب کرد. با توجه به نتایج، مشخص شد که در چه نرخی از دبی، آب از آبراهه توسط سیستم احیاء جذب و شرایط ورود آلودگی از آبخوان به آبراهه ایجاد شده است. همچنین، مقدار حداقل دبی که به ازای آن، سیستم جفت‌چاهی بتواند یک پوشش کامل و بدون شکاف در مقابل آلودگی داشته باشد، تعیین شد.

کلمات کلیدی: فنس هیدرولیکی، راه‌حل تحلیلی، آبراهه دائمی، احیاء آبخوان، سیستم جفت‌چاهی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۱۸

1- Ph.D. Student of Water Resources, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: ramezaniwater@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: mahdi.asadi.a@gmail.com

*. Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.189233](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.189233)

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

* نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۳ امکانپذیر است.



آبخوان از آلودگی را میسر می‌نماید (North et al., 2012; Chu et al., 2018; Suk et al., 2021). در شکل ۱، آرایش تک جفتی از چاه‌های تغذیه-تخلیه به تصویر کشیده شده است. سیستم جفت چاهی با تغییر شیب هیدرولیکی به منظور کنترل و خارج ساختن ابر آلودگی^۵ از آب‌های زیرزمینی، بر مبنای کنترل هیدرودینامیکی^۶ عمل می‌کند. این فرآیند، راه موثری برای حفاظت از چاه‌های بهره‌بردار (با مصارف مختلف)، در مقابل ورود آلودگی آبخوان به آن‌هاست. هزینه‌های اجرای چنین سیستم پالایشی، نسبتاً پایین است و اگر میدان چاه‌های اولیه برای کنترل آلودگی کافی نباشد، امکان بیشتر کردن چاه‌های جذب و تزریق نیز وجود دارد (Masters and Ela, 2014). از یک سو، این جفت‌چاه‌ها قابلیت استفاده در چینش‌های مختلف را دارند. از سوی دیگر، ناحیه گیرش^۷ و ناحیه رهاسازی^۸ از مسائل مهم و اساسی در نحوه جانمایی چاه‌های جذب و تزریق در سیستم فنس هیدرولیکی هستند. ناحیه گیرش، محدوده آگیری در چاه جذب را مشخص می‌نماید و ناحیه رهاسازی، محدوده افزایش بار هیدرولیکی توسط چاه تزریق را تعیین می‌کند (Luo and Kitanidis, 2004; Suk et al., 2021). می‌توان گفت که در هنگام استفاده از روش جفت‌چاهی، چینش و آرایش چاه‌ها بر شکل ناحیه‌های گیرش و رهاسازی در سیستم احیاء مؤثر هستند؛ به طوری که مطابق شکل ۱، آلودگی بتواند به طور کامل وارد چرخه تصفیه گردد. در واقع، در صورتی که آرایش چاه‌ها (و در نتیجه، سلول گردش) پوشش مناسبی نسبت به ابر آلودگی نداشته باشند، آب آلوده وارد جریان گردش نمی‌شود و در آبخوان باقی می‌ماند. بنابراین عملکرد صحیح سیستم احیاء، بستگی به چگونگی قرارگیری چاه‌ها و موقعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر دارد.

آب‌های زیرزمینی با توجه به کیفیت مناسب، جایگاه ویژه‌ای در مصارف مختلف دارند. این منابع آبی در معرض ورود انواع آلودگی‌ها (از جمله آلودگی‌های صنعتی و کشاورزی) قرار دارند. این موضوع از چالش‌های اساسی در زمینه حفاظت آبخوان‌ها و سلامت بشر است (Guo et al., 2019). روش پمپ-پالایش^۱ از شیوه‌های متداول و پر کاربرد در مبحث احیاء آب‌های زیرزمینی است (Teramoto et al., 2020; Ciampi et al., 2021) که با به دام انداختن آب آلوده و پمپاژ آن به سطح زمین، امکان پالایش آن را فراهم می‌نماید. در این صورت، آب تصفیه‌شده مصرف می‌شود یا با چاه‌های تغذیه به آبخوان تزریق می‌شود. در تکنیک پمپ-پالایش می‌توان با برگشت دادن آب به آبخوان و ایجاد گردش آب، یک سیستم تصفیه درجا تشکیل داد (Antelmi et al., 2020; Casasso et al., 2020). در روش مرسوم پمپ-پالایش، سیستم فقط از چاه‌های پمپاژ تشکیل می‌شود؛ در حالی که روش جفت‌چاه‌های تغذیه-تخلیه^۲، علاوه بر چاه‌های پمپاژ از چاه‌های تزریق نیز برخوردار است. تکنیک جفت‌چاهی، اصطلاحاً به فنس هیدرولیکی^۳ مشهور است. در حقیقت، جفت‌چاه تغذیه-تخلیه مانند یک فنس هیدرولیکی عمل می‌کند تا آب آلوده از آبخوان برداشت گردد و آب تصفیه شده توسط چاه دیگر تزریق شود (Christ et al., 1999). به عبارت دیگر، در این روش به تله‌اندازی آلودگی و تصفیه آن مبادرت می‌شود و مواد مغذی و سایر مواد لازم برای احیاء، به آب پمپاژ شده اضافه می‌گردد. فرآیند تصفیه در روش جفت‌چاهی، سبب ایجاد سلول گردش آب زیرزمینی^۴ در بین دو چاه می‌شود که پالایش

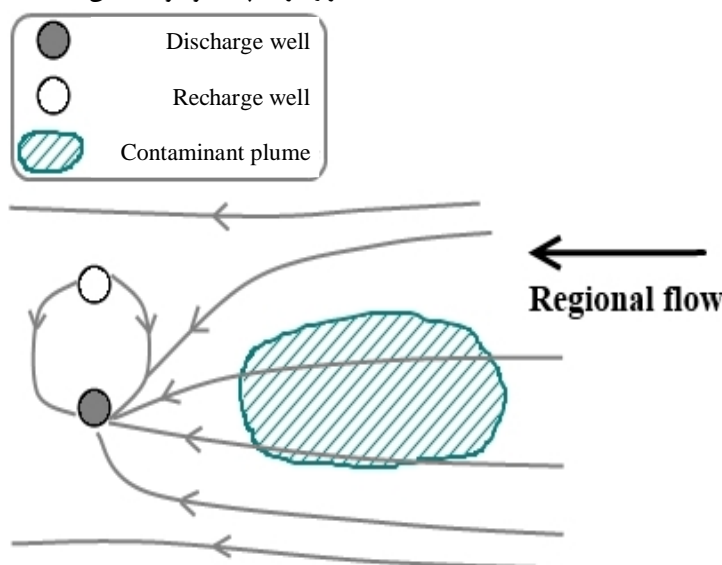


Fig. 1- Schematic of the hydraulic fence system including an injection-extraction well pair (plan view)

شکل ۱- شماتیک از سیستم فنس هیدرولیکی با یک جفت‌چاه تغذیه-تخلیه (نمای بالا)

که با این روش می‌توان حالت‌های گوناگونی از ضرایب و پارامترها را در مسئله استفاده کرد (Bear, 2018). در سیستم جفت‌چاه‌های تغذیه-تخلیه، دبی پمپاژ و فاصله چاه‌ها از یکدیگر، بر هیدرودینامیک و مقدار جریان گردشی مؤثر هستند (Gandhi et al., 2002; Suk et al., 2021) که نیاز به ارزیابی دقیق این موضوع، بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین در این مقاله، با طرح سه پیکربندی بر اساس فاصله چاه‌ها و تعریف دبی‌های پایه و بحرانی، به همراه به دست آوردن مقادیر جریان گردشی در سیستم فنس هیدرولیکی و محاسبه مقادیر دبی برداشتی از آبراهه، شیوه جدیدی در واکاوی مسئله ارائه شد. قابل توجه است که در تحقیق Christ et al. (1999) با وجود مطرح شدن فنس هیدرولیکی، مقدار جریان گردشی برقرار شده در آبخوان برای جفت‌چاه تغذیه-تخلیه مورد بررسی قرار نگرفته است. در مسائل تحلیلی با موضوع احیاء آبخوان‌ها، حتی تغییر مختصات چاه‌ها در ارزیابی مسئله و نتایج آن، تفاوت زیادی ایجاد می‌کند. از این رو در مقاله حاضر، اضافه کردن مؤلفه آبراهه به مسئله، در وهله اول شاید ساده به نظر برسد اما این مؤلفه اثرات زیادی بر میدان جریان سیستم جفت‌چاهی و عملکرد آن داشته است. همچنین، روش تحلیلی به تغییرات داده شده در فضای مسئله و عناصر آن واکنش می‌دهد و اثر این تغییرات را بر شکل و موقعیت ناحیه‌های گیرش و رهاسازی نمایان می‌سازد. در مطالعه حاضر، با وارد کردن یک مؤلفه جدید (آبراهه دائمی) به فضای مورد بحث، ضمن ایجاد تفاوت ساختاری (از رویکرد ریاضی و تحلیلی)، تفاوت مفهومی نیز در مسئله ظاهر شد؛ چراکه قرار گرفتن آبراهه در کنار آبخوان، شرایط کنترل آلودگی در آب‌های زیرزمینی به منظور جلوگیری از انتقال آن آلودگی به آب‌های سطحی را فراهم می‌کند و در واقع از نقطه‌نظر منابع آبی، به مدیریت جامع و هم‌زمان آب‌های زیرزمینی-سطحی کمک می‌نماید. در این مطالعه با ترسیم میدان جریان در پیکربندی‌های مختلف، ناحیه‌های گیرش و رهاسازی در اطراف سیستم جفت‌چاهی مشخص شدند. با تعریف دبی‌های پایه و بحرانی، این موضوع قابل تعیین شد که به ازای چه میزان دبی در چاه‌ها، سیستم احیاء از پوشش کامل نسبت به آلودگی برخوردار است و به آب آلوده اجازه عبور نمی‌دهد. همچنین، در چه مقادیری از دبی، آب از آبراهه وارد سیستم احیاء شده و آلودگی از آبخوان به آب‌های سطحی انتقال می‌یابد.

۲- مواد و روش‌ها

در این قسمت، روابط آب زیرزمینی درباره مسئله مورد بررسی (سیستم فنس هیدرولیکی در کنار یک آبراهه دائمی) بر مبنای تئوری‌های پتانسیل مختلط و چاه مجازی نگارش یافتند تا با ایجاد یک مدل ریاضی بتوان مسئله را حل و توابع پتانسیل و جریان را تعیین کرد. از

سیستم فنس هیدرولیکی در آب‌های زیرزمینی، نخستین بار در مطالعه Christ et al. (1999) به صورت تحلیلی ارزیابی شد. Asadi-Rakhshandehroo (2016) ناحیه گیرش یک چاه پمپاژ را (که از طریق یک لایه نشتی با یک آبراهه مرتبط است) با استفاده از راه‌حل‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی مشخص کردند. Bica et al. (2019) با استفاده از تئوری پتانسیل مختلط برای چاه‌های پمپاژ یا تغذیه، یک راه‌حل نیمه‌تحلیلی برای مشخص نمودن میدان جریان آب زیرزمینی ارائه کردند. Guo et al. (2019) با شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و بررسی عملکرد سیستم پمپ-پالایش نشان دادند که با بهره‌برداری این سیستم در یک زمان کافی، می‌توان غلظت آلاینده‌ها را تا سطح مناسب پایین آورد. Antelmi et al. (2020) با ارزیابی زمان احیاء در سیستم پمپ-پالایش مشخص کردند که در این زمینه، روش‌های تحلیلی بدون نیاز به استفاده از مدل‌های عددی، قادر به کسب نتایج مطلوب هستند. Suk et al. (2021) با ایجاد تغییرات سینوسی برای مقادیر تخلیه و تغذیه در یک سیستم جفت‌چاهی، عملیات احیاء را بهبود دادند. Nagheli et al. (2020) میدان جریان چاه‌های پمپاژ و تزریق در آبخوان را با روش تحلیلی بررسی کردند. Ciampi et al. (2023) با مقایسه میزان تصفیه آلاینده‌های صنعتی در دو مکان متفاوت، به تحلیل اثرات جریان گردشی در سیستم احیاء آبخوان پرداختند. ایشان کاهش زمان احیاء، افزایش رفع آلودگی و کم شدن مصرف آب را از نتایج جریان گردشی برشمردند. هرچند در تحقیق‌های Bica et al. (2019), Guo et al. (2019), Nagheli et al. (2020) و Ciampi et al. (2023) چاه تزریق وجود دارد اما موارد شبیه‌سازی شده، به صورت فنس هیدرولیکی نیستند و در فضای مسئله، مؤلفه آبراهه ندارند. Christ et al. (1999) و Suk et al. (2021) سیستم جفت‌چاهی را بررسی کردند، با این حال این پژوهش‌ها نیز فاقد مؤلفه آبراهه هستند. Asadi-Rakhshandehroo (2016) آبراهه را در ساختار مسئله در نظر گرفتند ولی در این تحقیق چاه تزریقی وجود ندارد. Antelmi et al. (2020) مسئله را با یک چاه پمپاژ و بدون آبراهه حل کردند.

علی‌رغم اهمیت جفت‌چاه‌های تغذیه-تخلیه در سیستم احیاء آب‌های زیرزمینی، به نظر می‌رسد که به سیستم فنس هیدرولیکی توجه لازم و کافی نشده است (Christ et al., 1999; Suk et al., 2021). از این رو در مقاله حاضر، فنس هیدرولیکی در کنار یک آبراهه دائمی، فضای مسئله را تشکیل دادند. قابل توجه است که مسئله مورد بررسی در این مقاله به صورت تحلیلی ارزیابی و حل شد. تمرکز بر حل تحلیلی به این علت بود که در یک مدل ریاضی، روش تحلیلی به عنوان راه‌حل عمومی و شیوه مقدم بر دیگر تکنیک‌ها معرفی شده است، به طوری

این رو لازم است تا هندسه مسئله و مؤلفه‌های آن در قالب معادلات ریاضی تشریح شوند. همچنین، در این قسمت، نحوه بدون بعد کردن روابط در مسئله شرح داده شد و معادلات لازم به منظور یافتن نقاط سکون^۹ برای ناحیه‌های گیرش و رهاسازی ارائه شدند. روش به دست آوردن دبی‌های پایه و بحرانی نیز توضیح داده شد.

۲-۱- تعریف مسئله

برای مشخص کردن جزئیات سیستم احیاء در مقاله حاضر، در ابتدای کار فرضیات مسئله ارائه شدند. سپس از طریق معادلات حاکم بر آب‌های زیرزمینی، مسئله به فرم ریاضی در آمد. هندسه مسئله مورد مطالعه، در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل، یک آبراهه دائمی مشاهده می‌گردد که با آبخوان مجاور، ارتباط هیدرولیکی کامل دارد. آبخوان به طور همگن و همسان و در وضعیت پایدار در نظر گرفته شد. از دیگر مفروضات می‌توان به امتداد مستقیم مرز آبراهه و یکنواخت بودن جریان منطقه‌ای اشاره کرد. اما در شرایط واقعی، محدودیت‌هایی وجود خواهد داشت از جمله این که آبخوان ناهمگن و ناهمسان است و تحت شرایط ناپایدار قرار دارد. مرز آبراهه به صورت یک خط مستقیم نیست و دارای تورفتگی و انحراف می‌باشد. همچنین جریان منطقه‌ای متغیر خواهد بود. با در نظر گرفتن مبدأ مختصات بر روی مرز آبراهه با آبخوان، موقعیت چاه‌های جذب و تزریق مشخص شد. در مسائلی که آبخوان با آبراهه مرز مشترک و ارتباط دارد، می‌توان از تئوری چاه مجازی استفاده کرد (Strack, 1989; Asadi- Aghbolaghi and Rakhshandehroo, 2016). بنابراین علاوه بر

جفت‌چاه حقیقی که در سمت راست شکل ۲ قرار دارد، یک جفت‌چاه مجازی در سمت چپ این شکل فرض شد که اثر آبراهه را در معادلات مسئله نشان می‌دهد.

مجموع اثرات فنس هیدرولیکی و بار ثابت موجود در مرز آبخوان با آبراهه، با معرفی پتانسیل مختلط (Ω) در آب زیرزمینی مطابق رابطه ۱ در دسترس قرار گرفت (Strack, 1989; Asadi-Aghbolaghi and Rakhshandehroo, 2016):

$$\Omega = qz \mp \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^2 Q_j \ln(z - z_j) \pm \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^2 Q_j \ln(z + \bar{z}_j) + c \quad (1)$$

در معادله بالا، q دبی در واحد عرض جریان منطقه‌ای یکنواخت، Q_j بیان‌گر دبی پمپاژ یا تغذیه چاه j ام، z موقعیت پتانسیل مختلط محاسبه شده در صفحه مختلط، z_j و \bar{z}_j مختصات و مختصات مزدوج چاه j ام در صفحه مختلط و c ثابت معادله هستند. در رابطه ۱، پتانسیل مختلط با استفاده از اصل برهم‌نهی به دست آمد. در طرف راست رابطه، ترم نخست مربوط به جریان منطقه‌ای (آبخوان) است. ترم‌های دوم و سوم با علامت مثبت، به ترتیب بیان‌گر چاه پمپاژ حقیقی و چاه پمپاژ مجازی هستند و این ترم‌ها با علامت منفی، نشان‌گر چاه تغذیه حقیقی و چاه تغذیه مجازی هستند.

با توجه به شکل ۲، مختصات چاه‌های حقیقی و مجازی (z_j, \bar{z}_j) بر مبنای فرم مختلط خود یعنی $z = x + iy$ و $i = \sqrt{-1}$ ، در معادله ۱ جایگزین شدند و در نتیجه، این معادله به صورت رابطه ۲ ارائه شد:

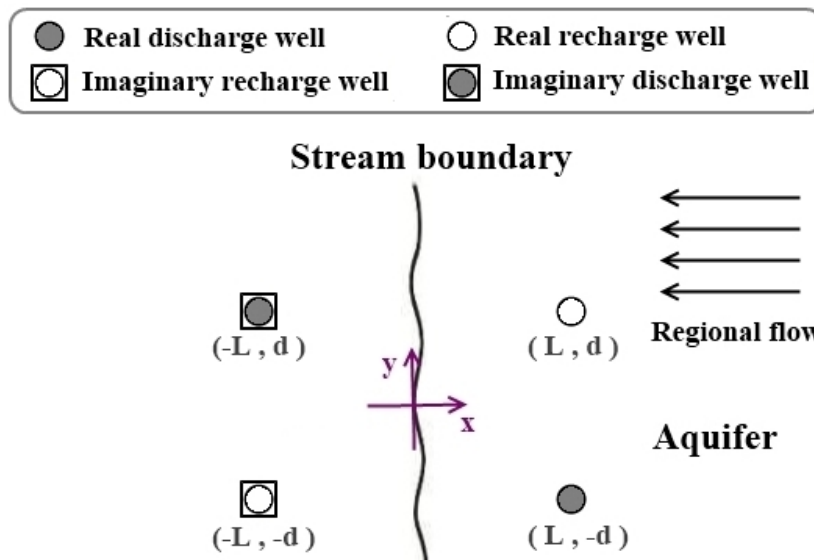


Fig. 2- The location of the aquifer remediation system in the present study (an injection-extraction well pair near a stream)

شکل ۲- موقعیت سیستم احیاء آبخوان در مطالعه حاضر (یک جفت‌چاه تغذیه-تخلیه در کنار یک آبراهه دائمی)

$$Q_D = \frac{Q}{2\pi Lq}, \quad \Omega_D = \frac{\Omega}{Lq}, \quad \Phi_D = \frac{\Phi}{Lq}, \quad \Psi_D = \frac{\Psi}{Lq} \quad (5)$$

معادله ۲ در فرم بی‌بعد، به صورت معادله ۶ بازنویسی شد تا Ω_D برای شکل ۲ به دست آید:

$$\Omega_D = z_D - Q_D \ln(z_D - 1 - id_D) + Q_D \ln(z_D - 1 + id_D) + Q_D \ln(z_D + 1 - id_D) - Q_D \ln(z_D + 1 + id_D) + c' \quad (6)$$

توابع پتانسیل بی‌بعد و جریان بی‌بعد برای سیستم جفت‌چاهی مورد بررسی (شکل ۲)، از معادلات ۷ و ۸ پیروی کردند. در این روابط، عبارات اول تا سوم به ترتیب مربوط به جریان منطقه‌ای، چاه‌های تغذیه حقیقی و پمپاژ مجازی، و چاه‌های پمپاژ حقیقی و تغذیه مجازی هستند.

$$\Phi_D = x_D + \frac{Q_D}{2} \ln \left[\frac{(x_D + 1)^2 + (y_D - d_D)^2}{(x_D - 1)^2 + (y_D - d_D)^2} \right] + \quad (7)$$

$$\frac{Q_D}{2} \ln \left[\frac{(x_D - 1)^2 + (y_D + d_D)^2}{(x_D + 1)^2 + (y_D + d_D)^2} \right] + c'$$

$$\Psi_D = y_D + Q_D \left[\arctan\left(\frac{y_D - d_D}{x_D + 1}\right) - \arctan\left(\frac{y_D - d_D}{x_D - 1}\right) \right] + \quad (8)$$

$$Q_D \left[\arctan\left(\frac{y_D + d_D}{x_D - 1}\right) - \arctan\left(\frac{y_D + d_D}{x_D + 1}\right) \right]$$

۲-۳- تعیین نقاط سکون

در راستای تشخیص این که تأثیر جریان ورودی به چاه پمپاژ (بر مبنای مخروط افت) و جریان خروجی از چاه تزریق (بر اساس مخروط تغذیه) تا کجا ادامه دارد، نیاز به تعیین ناحیه‌های گیرش و رهاسازی است. مشخص کردن این نواحی، با پیدا کردن نقاط سکون میسر می‌شود. به بیان دیگر، برای ترسیم محدوده‌ای که جریان وارد چاه پمپاژ می‌شود، لازم است که مرز ناحیه گیرش مشخص شود. همچنین به منظور تعیین ناحیه‌ای که تحت تأثیر جریان ورودی از چاه تزریق قرار دارد، باید مرز ناحیه رهاسازی را به دست آورد. نقطه سکون جایی است که خطوط مرزی ناحیه گیرش (یا ناحیه رهاسازی) به هم می‌رسند (Haitjema, 1995) و شیب هیدرولیکی در این نقطه برابر با صفر است (Asadi-Aghbolaghi and Rakhshandehroo, 2016). با استفاده از نقاط سکون، ناحیه تأثیر چاه‌ها مشخص می‌شود. این نقاط طبق معادله ۹ در دسترس قرار می‌گیرند (Christ et al., 1999):

$$\frac{d\Omega_D}{dz} = 0 \quad (9)$$

$$\Omega = qz - \frac{Q}{2\pi} \ln(z - L - id) + \frac{Q}{2\pi} \ln(z - L + id) + \frac{Q}{2\pi} \ln(z + L - id) - \frac{Q}{2\pi} \ln(z + L + id) + c \quad (2)$$

در سمت راست رابطه فوق، ترم‌های دوم و سوم نشان‌دهنده پتانسیل مختلط در جفت‌چاه حقیقی هستند و ترم‌های چهارم و پنجم بیان‌گر پتانسیل مختلط در جفت‌چاه مجازی هستند.

از یک سو، بخش حقیقی پتانسیل مختلط (Ω) برابر با تابع پتانسیل (Φ) است و از سوی دیگر، تابع پتانسیل در آبخوان‌های آزاد و محصور به ترتیب به طور $\Phi = \frac{1}{2}k\varphi^2 + C_U$ و $\Phi = kH\varphi + C_C$ بیان شده است (Strack, 1989). در روابط مذکور، k هدایت هیدرولیکی، H ضخامت آبخوان، φ هد هیدرولیکی، C_U ثابت آبخوان آزاد و C_C ثابت آبخوان محصور هستند. با وجود این که از طریق معادله پتانسیل مختلط، تابع پتانسیل یکسانی برای آبخوان‌های آزاد و محصور به دست می‌آید اما بر اساس روابط بالا، تابع پتانسیل می‌تواند به یک آبخوان آزاد (با k ، φ و C_U مربوط به خود) و یا یک آبخوان محصور (با k ، H ، φ و C_C مختص به خود) تعلق داشته باشد. بنابراین روش ارائه شده در این مقاله، قابلیت استفاده در آبخوان‌های آزاد و محصور را دارد.

۲-۲- بی‌بعدسازی روابط مسئله

بی‌بعد کردن معادله‌های مورد بررسی، علاوه بر ساده کردن مسئله، منجر به رسم دقیق میدان جریان و نواحی گیرش و رهاسازی شد. مطابق رابطه ۳، با تقسیم کردن مختصات دکارتی (x, y) ، مختصات مختلط (z) و نیم‌فاصله چاه‌ها از یکدیگر (d) بر فاصله جفت‌چاه از مرز آبراهه دائمی (L)، صفحه بی‌بعد تشکیل شد و فرم‌های بی‌بعد آن شامل (x_D, y_D) ، z_D و d_D به دست آمدند (Asadi-Aghbolaghi and Rakhshandehroo, 2016):

$$x_D = \frac{x}{L}, \quad y_D = \frac{y}{L}, \quad z_D = \frac{z}{L}, \quad d_D = \frac{d}{L} \quad (3)$$

معادله ۴، پتانسیل مختلط (Ω) را نشان می‌دهد که بخش حقیقی آن، تابع پتانسیل (Φ) است و قسمت موهومی آن، تابع جریان (Ψ) است (Strack, 1989):

$$\Omega = \Phi + i\Psi \quad \text{where} \quad i = \sqrt{-1} \quad (4)$$

روابط دبی بی‌بعد پمپاژ یا تغذیه (Q_D)، پتانسیل مختلط بی‌بعد (Ω_D)، تابع پتانسیل بی‌بعد (Φ_D) و تابع جریان بی‌بعد (Ψ_D) در معادله ۵ ارائه شدند (Asadi-Aghbolaghi and Rakhshandehroo, 2016):

رابطه بالا، مشتق پتانسیل مختلط بی‌بعد، نسبت به Z است که مساوی با صفر قرار دارد. این رابطه، معادله‌ای را به وجود آورد که حل آن در مطالعه حاضر، سبب یافتن چهار ریشه مختلط به ازای هر چاه (چه حقیقی و چه مجازی) شد. هر ریشه بی‌بعد (Z_D)، مختص یک چاه (۱۰)

$$Z_{SD(1,2,3,4)} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{3}(-1+d_D^2) + \frac{4 \times 2^{1/3} \times A}{3(B+3\sqrt{3} \times C)^{1/3}} + \frac{2}{3} 2^{2/3} (B+3\sqrt{3} \times C)^{1/3}}$$

$$\pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8}{3}(-1+d_D^2) - \frac{4 \times 2^{1/3} \times A}{3(B+3\sqrt{3} \times C)^{1/3}} - \frac{2}{3} 2^{2/3} (B+3\sqrt{3} \times C)^{1/3}} \pm \frac{16\sqrt{-1}d_D Q_D}{\sqrt{\frac{4}{3}(-1+d_D^2) + \frac{4 \times 2^{1/3} \times A}{3(B+3\sqrt{3} \times C)^{1/3}} + \frac{2}{3} 2^{2/3} (B+3\sqrt{3} \times C)^{1/3}}}$$

$$A = (1+d_D^2+d_D^4) \quad , \quad B = 2+3d_D^2-3d_D^4-2d_D^6-27d_D^2Q_D^2$$

$$C = \sqrt{-d_D^4-2d_D^6-d_D^8-4d_D^2Q_D^2-6d_D^4Q_D^2+6d_D^6Q_D^2+4d_D^8Q_D^2+27d_D^4Q_D^4}$$
(۱۱)

۳- نتایج و بحث

در ابتدای این بخش به بررسی پیکربندی نواحی گیرش و رهاسازی در دبی‌های مختلف و فواصل متفاوت پرداخته شد. سپس درباره شکل‌های رسم‌شده بحث گردید و در انتها، مقادیر جریان گردشی در فنس هیدرولیکی و نرخ جذب آب از آبراهه توسط سیستم احیاء تعیین شدند. همچنین برای حل معادلات و ترسیم شکل‌های میدان جریان، از بسته نرم‌افزاری Mathematica 9 استفاده شد.

۳-۱- پیکربندی I

در این پیکربندی، در دبی‌های کوچک، نواحی گیرش و رهاسازی هیچ‌گونه تداخلی با هم نداشتند. در واقع میان این نواحی، شکاف و فاصله قرار گرفته بود و آلودگی موجود در آبخوان می‌توانست از این شکاف وارد آبراهه شود (شکل ۳-الف). در این وضعیت، دبی چاه‌ها از دبی‌های پایه و بحرانی کوچکتر بود. زیاد شدن دبی، از بین رفتن شکاف موجود در بین حوضه‌های آبیگری و آبدهی چاه‌ها را به دنبال داشت (شکل ۳-ب). بر اثر افزایش مجدد دبی، جریان گردشی در سیستم جفت‌چاهی شکل گرفت (شکل ۳-ج). دبی همچنان روند صعودی داشت و ناحیه گیرش چاه پمپاژ با مرز آبراهه مماس شد (شکل ۳-د). همچنین، در دبی‌های بزرگتر، چاه تخلیه علاوه بر دریافت آب از چاه تغذیه، از آبراهه نیز آبیگری کرد که در این صورت امکان دارد آب آلوده به آبراهه منتقل شود (شکل ۳-ه). می‌توان گفت که در این پیکربندی، ابتدا دبی پایه رخ داد و پس از آن با بیشتر شدن دبی، نوبت به وقوع دبی بحرانی رسید.

۴-۲- تعیین دبی‌های پایه و بحرانی

برای تفسیر وضعیت‌های به وجود آمده در ساختار مسئله، دبی‌های پایه و بحرانی تعریف شدند. دبی پایه (Q_{BS}) بر اساس تشکیل جریان گردشی در نظر گرفته شد، به طوری که در مقادیر بزرگتر از این دبی، جریان خروجی از چاه تزریق، وارد چاه جذب می‌شود و ارتباط میان چاه‌ها برقرار می‌شود. در دبی بحرانی (Q_{CR})، ناحیه گیرش به وجود آمده از چاه پمپاژ، بر مرز آبراهه مماس می‌شود و با بیشتر شدن شدت پمپاژ از این دبی، جریان از آبراهه به چاه تخلیه راه می‌یابد. در راستای یافتن دبی‌های پایه و بحرانی (در پیکربندی‌های اول و سوم) از روش زیر استفاده شد:

- **دبی پایه (Q_{BS}):** در این دبی، جریان گردشی در جفت‌چاه تغذیه-تخلیه شکل می‌گیرد. با جایگذاری مختصات نقطه سکون هر چاه به صورت پارامتری در معادله ۸، Ψ_{SE} برای چاه پمپاژ و Ψ_{SI} برای چاه تزریق مشخص شدند. با برابر قرار دادن توابع جریان عبوری از نقطه سکون چاه‌ها در معادله ۱۲، مقدار دبی در یک d_D معین به دست آمد که در این دبی، نقاط سکون هر دو چاه روی یک خط جریان قرار دارند.

$$\Psi_{SI} = \Psi_{SE} \quad (۱۲)$$

- **دبی بحرانی (Q_{CR}):** در این دبی، ناحیه آبیگری چاه جذب به مرز آبراهه می‌رسد و با آن مماس می‌شود. دستیابی به مقدار این دبی از برابر با صفر قرار دادن عبارت زیر رادیکال در پارامتر C (رابطه ۱۱)، در دسترس قرار گرفت که در معادله ۱۳ ارائه شد.

$$-d_D^4 - 2d_D^6 - d_D^8 - 4d_D^2Q_D^2 - 6d_D^4Q_D^2 + 6d_D^6Q_D^2 + 4d_D^8Q_D^2 + 27d_D^4Q_D^4 = 0 \quad (۱۳)$$

۲-۳- پیکربندی II

در این حالت، دبی‌های پایه و بحرانی با یکدیگر برابر بودند. بنابراین در این پیکربندی لازم گردید که معادلات ۱۲ و ۱۳ به طور همزمان ارضا شوند که این موضوع، وقوع دو شرط را با هم به دنبال داشت. شرط نخست، تماس شدن ناحیه گیرش با مرز آبراهه بود و دومین شرط، عبور یک خط جریان مشترک از نقاط سکون چاه‌هاست. برقراری این شرایط منجر به تشکیل دستگاه دو معادله-دو مجهول در رابطه ۱۴ شد:

$$\begin{cases} \Psi_{SI} - \Psi_{SE} = 0 \\ -d_D^4 - 2d_D^6 - d_D^8 - 4d_D^2 Q_D^2 - 6d_D^4 Q_D^2 + \end{cases} \quad (14)$$

$$6d_D^6 Q_D^2 + 4d_D^8 Q_D^2 + 27d_D^4 Q_D^4 = 0$$

با حل رابطه ۱۴، مقادیر $d_D=1.041$ و $Q_D=0.612$ به دست آمدند. بنابراین در هنگامی که فاصله بی‌بعد چاه‌ها با $2 \times 1/0.41$ مساوی شد و دبی بی‌بعد هر چاه برابر با 0.612 بود، منطبق شدن دبی‌های پایه و بحرانی را به دنبال داشت. در این وضعیت (شکل ۴)، ناحیه گیرش چاه پایینی، هم‌مرز آبراهه شد، در حالی که به ناحیه رهاسازی چاه بالایی نیز پیوسته است. در صورتی که فاصله چاه‌ها کوچکتر از $2 \times 1/0.41$ بود، در دبی‌های مختلف، پیکربندی I (که در قسمت قبلی توضیح داده شد) برای سیستم جفت‌چاهی رخ داد. به عبارت دیگر، $d_D < 1.041$ سبب شد که با افزایش دبی، شکاف میان نواحی گیرش و رهاسازی، قبل از برخورد ناحیه گیرش با مرز آبراهه از بین برود. ولی موقعی که فاصله چاه‌ها از $2 \times 1/0.41$ بزرگتر شود، با زیاد شدن دبی، ناحیه گیرش مرز آبراهه را در وضعیتی قطع می‌کند که بین نواحی گیرش و رهاسازی، همچنان شکاف و فاصله وجود دارد. این حالت که مربوط به $d_D > 1.041$ است، در پیکربندی III تشریح می‌شود.

۳-۳- پیکربندی III

در سومین پیکربندی، در دبی‌های کوچک، محدوده‌های جذب و تزریق سیستم جفت‌چاهی از هم مجزا بودند و شکاف قابل توجهی در بین آن‌ها دیده شد (شکل ۵-الف). علی‌رغم زیاد شدن دبی، انفصال ناحیه‌های گیرش و رهاسازی، همچنان پابرجا بود در حالی که ناحیه گیرش با آبراهه هم‌مرز شد (شکل ۵-ب). با افزایش دبی، جریان آب از آبراهه به چاه پمپاژ وارد گردید (شکل ۵-ج) و در ادامه با بیشتر شدن دبی، وضعیتی به وجود آمد که آستانه تشکیل جریان از چاه تغذیه به چاه تخلیه است (شکل ۵-د). در مقادیر بزرگتر دبی نسبت به وضعیت قبل، جریان گردشی ایجاد شد و چاه جذب ضمن پمپاژ آب از آبراهه، از طریق چاه تزریق نیز آبیگری کرد (شکل ۵-ه). واضح است که در این پیکربندی، دبی بحرانی همواره از دبی پایه کوچکتر است. در

شکل‌های ۵-الف و ۵-ب آلودگی می‌تواند از شکاف سیستم جفت‌چاهی به آبراهه راه یابد. در شکل ۵-ج علاوه بر شکاف، آبیگری از آبراهه نیز شرایط انتقال آلودگی از آبخوان به آبراهه را ممکن می‌سازد. در شکل‌های ۵-د و ۵-ه شکافی در سیستم احیاء قرار ندارد و فقط از طریق آبیگری، آلودگی به آبراهه می‌رسد.

۳-۴- اثر فاصله چاه‌ها بر دبی‌های پایه و بحرانی

در شکل ۶، تغییرات دبی‌های پایه و بحرانی نسبت به فاصله چاه‌ها از یکدیگر به نمایش در آمده است. با بیشتر شدن d_D ، دبی پایه روند صعودی را طی کرد ولی دبی بحرانی کاهش یافت. نمودارهای مربوط به دبی‌های Q_{BS} و Q_{CR} ، یکدیگر را در نقطه $(d_D = 1.041, Q_D = 0.612)$ قطع کردند. این نقطه مشترک، برابر بودن دبی‌های پایه و بحرانی در دومین پیکربندی را نشان می‌دهد. اولین و سومین پیکربندی به ترتیب در قبل از این نقطه ($d_D < 1.041$) و پس از آن ($d_D > 1.041$) جای دارند.

۳-۵- محاسبه مقادیر دبی فنس هیدرولیکی و دبی برداشتی از آبراهه

در دبی فنس هیدرولیکی، ناحیه‌های گیرش و رهاسازی با هم ادغام می‌شوند. این دبی، بخشی از آبدهی چاه تغذیه می‌باشد که به میدان چاه تخلیه راه یافته است. مقدار بی‌بعد این دبی (Q_{FH}) بر مبنای رابطه ۱۵ به دست آمد.

$$Q_{FH} = Q_D - \frac{|\Psi_M - \Psi_N|}{2\pi} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، Q_D دبی بی‌بعد پمپاژ، Ψ_M و Ψ_N مقدار تابع جریان بی‌بعد در دو طرف سلول جریان سیستم جفت‌چاهی هستند. مقدار Q_{FH} در شکل‌های ۳-ج، ۳-د، ۳-ه و ۵-ه به ترتیب برابر 0.611 ، 0.876 و 0.215 بود. قطع شدن آبراهه توسط ناحیه گیرش، سبب می‌شود تا آب از آبراهه وارد چاه پمپاژ شود. مقدار بی‌بعد این آبیگری توسط چاه پمپاژ (Q_i) به صورت رابطه ۱۶ است.

$$Q_i = \frac{|\Psi_U - \Psi_V|}{2\pi} \quad (16)$$

که در آن، Ψ_U و Ψ_V به ترتیب مقدار به دست آمده برای تابع جریان بی‌بعد در خطوط بالا و پایین محدوده برداشت چاه پمپاژ هستند. برای شکل‌های ۳-ه، ۵-ج، ۵-د و ۵-ه به ترتیب برابر 0.002 ، 0.016 و 0.099 محاسبه شد.

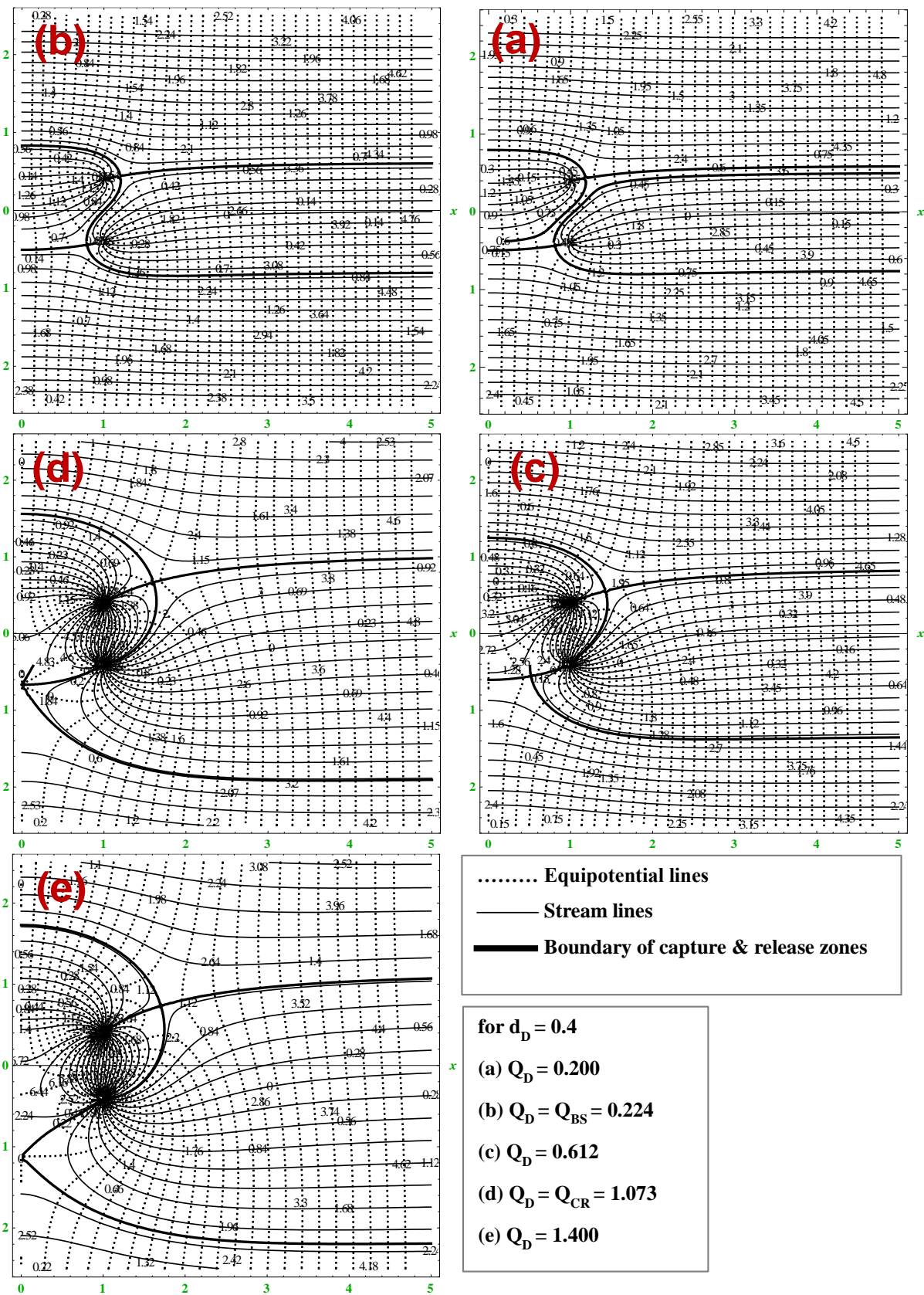


Fig. 3- The flow field for hydraulic fence system, configuration I for $d_D=0.4$

شکل ۳- میدان جریان برای سیستم فنس هیدرولیکی، پیکربندی I در $d_D=0.4$

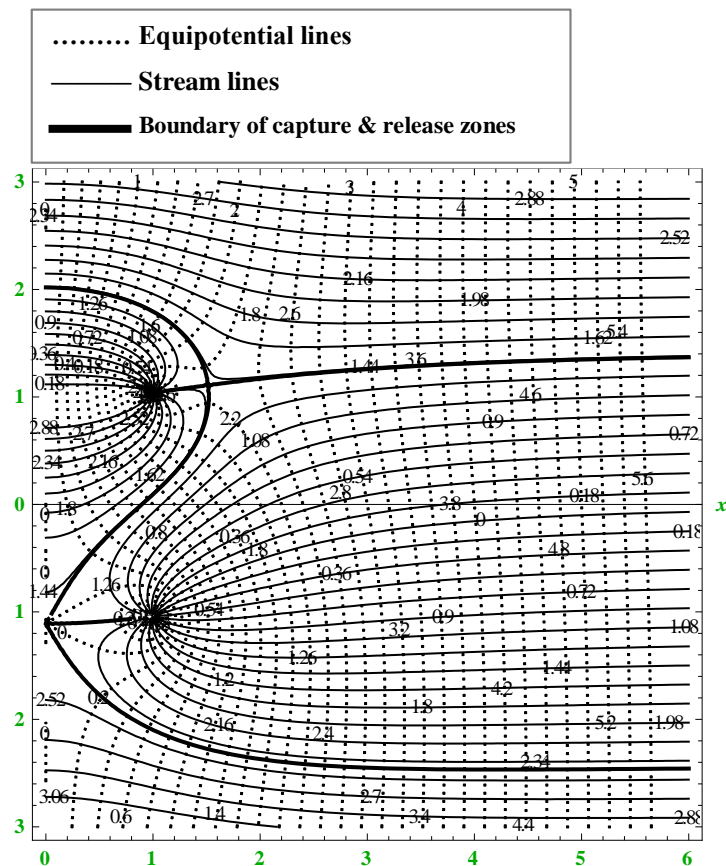


Fig. 4- The flow field for hydraulic fence system, in configuration II for $d_D=1.041$, $Q_D=Q_{BS}=Q_{CR}=0.612$
 شکل ۴- میدان جریان برای سیستم فنس هیدرولیکی، در پیکربندی II به ازای $d_D=1.041$ و $Q_D=Q_{BS}=Q_{CR}=0.612$

با ترسیم متغیرهای R_{FH} و R_i برای دبی‌های مختلف، در یک فاصله مشخص میان چاه‌ها، یک نمودار به دست آمد (شکل‌های ۷ و ۸). با دقت در شکل ۷ پی برده شد که نسبت گردش با دبی چاه‌ها رابطه مستقیم دارد، به نحوی که در یک فاصله ثابت با زیاد شدن دبی، R_{FH} نیز افزایش یافت. با این وجود، در صورتی که فاصله چاه‌ها در یک دبی مشخص بیشتر شود، مقدار نسبت گردش کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که هر یک از نمودارهای R_{FH} ، محور افقی را در دبی پایه قطع نمودند که با نزدیک شدن چاه‌ها به یکدیگر، مقدار این دبی تنزل پیدا کرد.

همانگونه که در شکل ۸ مشخص است، هنگامی که فاصله چاه‌ها تغییری نکرد، زیاد شدن دبی موجب شد که آب بیشتری از آبراهه به سمت چاه تخلیه هدایت شود و مقدار R_i بزرگتر شود. همچنین در صورتی که دبی ثابت بود، با دور شدن چاه‌ها از یکدیگر، نسبت برداشت دارای مقدار بیشتری شد. هر یک از نمودارهای R_i ، در دبی بحرانی به محور افقی برخورد داشتند که با زیاد شدن فاصله چاه‌ها، مقدار این دبی کمتر شد.

با بیشتر شدن دبی از مقادیر Q_{BS} و Q_{CR} ، بخشی از جریان ورودی به چاه پمپاژ، از طریق دبی فنس هیدرولیکی و دبی برداشتی از آبراهه تأمین می‌شود. به منظور روشن شدن کامل این مطلب، روابط ۱۷ و ۱۸ تعریف شدند که به ترتیب، نسبت گردش (R_{FH}) و نسبت برداشت (R_i) را نشان می‌دهند:

$$R_{FH} = \frac{Q_{FH}}{Q_D} \quad (17)$$

$$R_i = \frac{Q_i}{Q_D} \quad (18)$$

در حالی که آب از آبخوان به چاه تخلیه وارد می‌شود، با تشکیل جریان گردشی، قسمتی از آب پمپاژ شده از چاه تغذیه به دست می‌آید. با گسترش دامنه جذب در چاه تخلیه و قطع آبراهه، آگیری از آبراهه نیز به مقادیر پمپاژ ملحق می‌شود. به عبارت دیگر، نسبت گردش مشخص می‌کند که چه درصدی از کل دبی پمپاژ را جریان فنس هیدرولیکی تشکیل داده است. همچنین، نسبت برداشت نیز سهم جریان تأمین شده از آبراهه را از تمام دبی تخلیه آشکار می‌نماید.

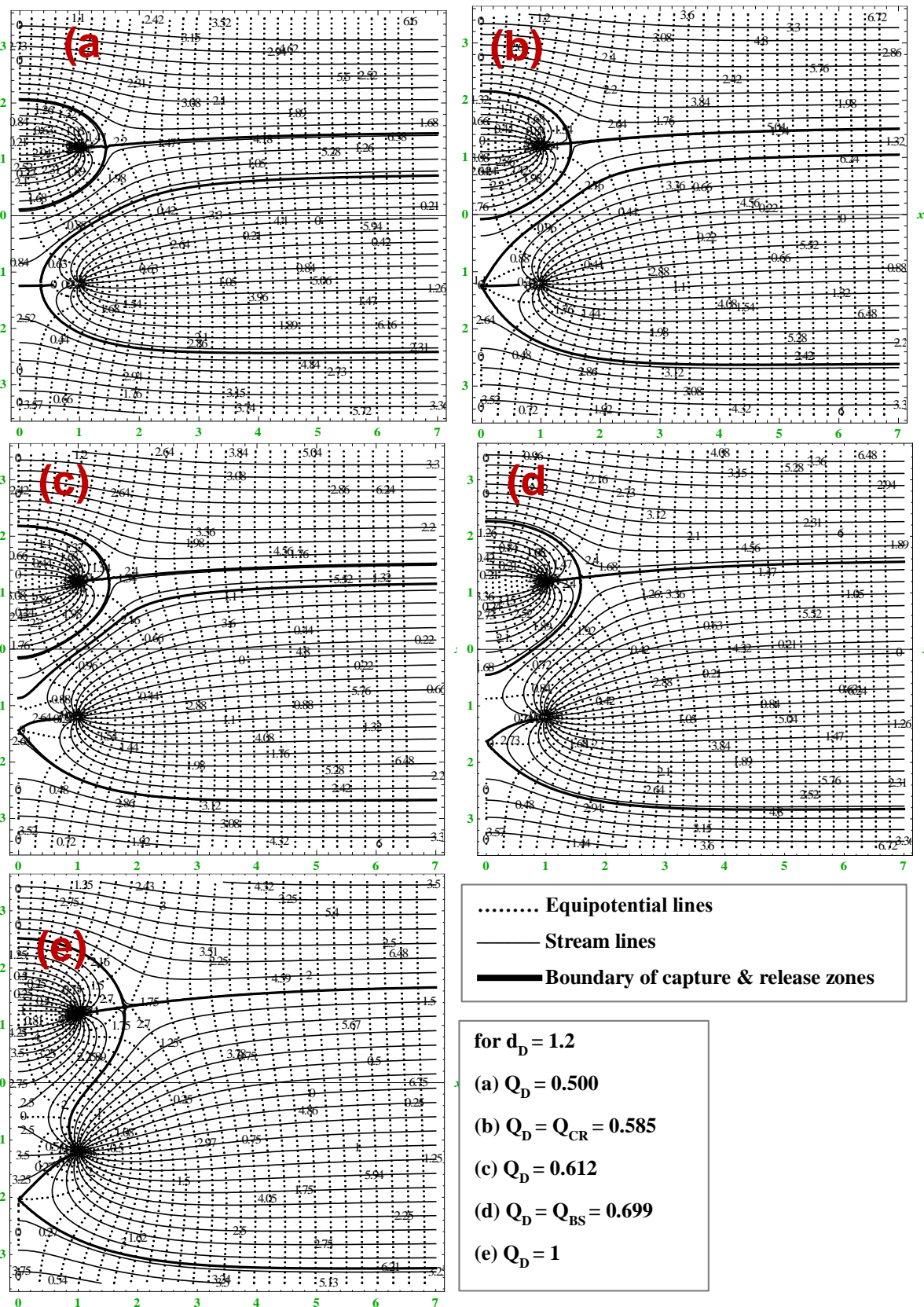


Fig. 5- The flow field for hydraulic fence system, configuration III for $d_D=1.2$

شکل ۵- میدان جریان برای سیستم فنس هیدرولیکی، پیکربندی III در $d_D=1.2$

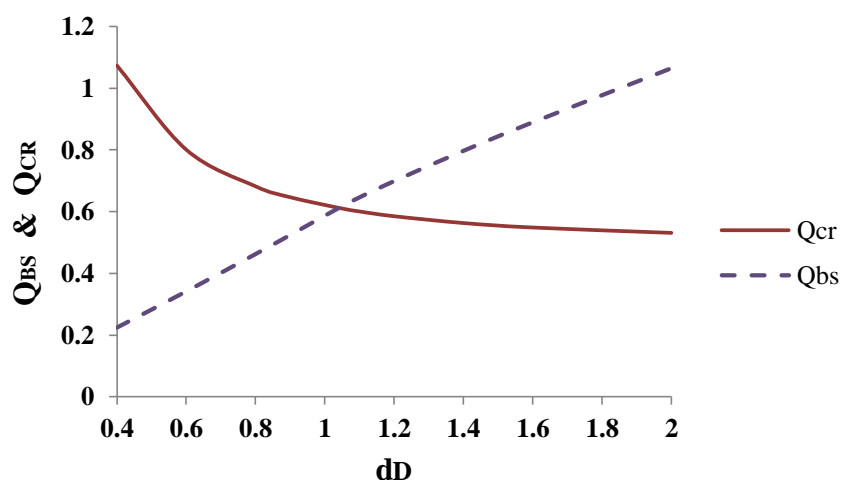


Fig. 6- Variations of base and critical flow rates versus the dimensionless half distance of the wells
 شکل ۶- تغییرات دبی‌های پایه و بحرانی در مقابل نصف فاصله بی‌بعد چاه‌ها

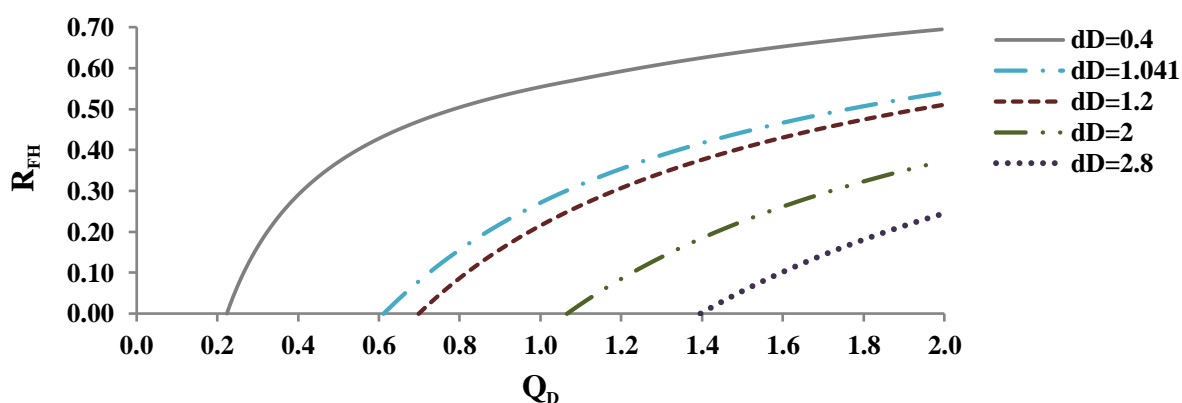


Fig. 7- Variations of circulation ratio versus dimensionless flow rate for different distances of wells
 شکل ۷- تغییرات نسبت گردش در مقابل دبی بی‌بعد برای فواصل متفاوت چاه‌ها

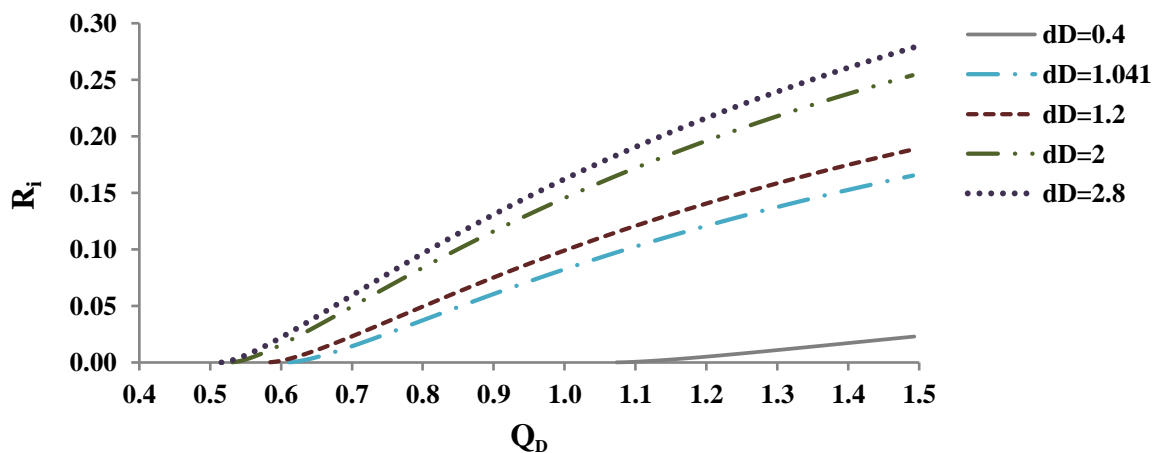


Fig. 8- Variations of extraction ratio versus dimensionless pumping rate for different distances of wells
 شکل ۸- تغییرات نسبت برداشت در مقابل دبی بی‌بعد پمپاژ به ازای فواصل متفاوت چاه‌ها

۴- نتیجه گیری

پی نوشتها

- 1- Pump and Treat
- 2- Injection-Extraction Well Pairs
- 3- Hydraulic Fence
- 4- Groundwater Circulation Cell
- 5- Contaminant Plume
- 6- Hydrodynamic Control
- 7- Capture Zone
- 8- Release Zone
- 9- Stagnation Points

سیستم فنس هیدرولیکی می تواند از انتقال آلودگی و توزیع آن با جریان آب زیرزمینی جلوگیری کند و جابه جایی و پراکنده شدن آلاینده ها در آبخوان را نیز مهار نماید. در واقع این سیستم با تغییر میدان جریان آب زیرزمینی، آلودگی را کنترل و از آبخوان خارج می سازد. در مقاله حاضر، برای نخستین بار به بررسی سیستم فنس هیدرولیکی در کنار یک آبراهه دائمی پرداخته شد. با استفاده از تئوری پتانسیل مختلط و تعیین روابط ریاضی برای توابع پتانسیل و جریان، سه پیکربندی بر اساس فاصله چاهها و دبی آنها ارائه شد. علاوه بر ترسیم ناحیه های گیرش و رهاسازی و تفسیر حالات به وجود آمده، مقادیر جریان گردشی و آب جذب شده از آبراهه نیز مشخص شدند. همچنین، دو نوع دبی برای روشن ساختن ارتباط بین نرخ دبی چاهها با میدان های جریان آب زیرزمینی ایجاد شده بر اثر فعالیت جفت چاه تغذیه-تخلیه، تعریف شد. دبی پایه که آستانه تشکیل سلول گردشی بود و دبی بحرانی که سرآغاز برداشت آب از آبراهه را نشان می داد. در اولین پیکربندی در موقعی که فاصله میان چاهها 2×0.4 بود، دبی های پایه و بحرانی برابر با 0.224 و 1.073 شدند. در $Q_D=1.400$ دبی برداشتی از آبراهه 0.24 به دست آمد و در دبی های 0.612 ، 1.073 و 1.400 دبی فنس هیدرولیکی به مقدار 0.265 ، 0.611 و 0.876 رسید. در دومین پیکربندی که به ازای فاصله 2×1.041 و دبی 0.612 برقرار بود، هیچ جریانی از چاه تغذیه و آبراهه به چاه تخلیه وارد نشد. در سومین پیکربندی با فاصله 2×1.2 در بین چاهها، دبی های پایه و بحرانی مقادیر 0.699 و 0.585 را داشتند. در دبی های 0.612 ، 0.699 و 1 دبی برداشتی از آبراهه برابر با 0.002 ، 0.16 و 0.099 بود و در $Q_D=1$ دبی فنس هیدرولیکی مقدار 0.215 را به دست آورد. رویکرد مطرح شده، نفوذ آلودگی از طریق آبخوان به آبراهه را در دبی های بزرگتر از دبی بحرانی متذکر شد و نیاز به مقادیر بزرگتر از دبی پایه، برای شروع جریان گردشی در سیستم احیاء را ضروری دانست.

۵- مراجع

- Antelmi M, Renoldi F, Alberti L (2020) Analytical and numerical methods for a preliminary assessment of the remediation time of pump and treat systems. *Water* 12(10):2850
- Asadi-Aghbolaghi M, Rakhshandehroo GR (2016) Delineating capture zone of a pumping well in a slanting regional groundwater flow to a stream with a leaky layer. *Water Resources Management* 30:4273-4291
- Bear J (2018) Modeling phenomena of flow and transport in porous media. Springer, Cham, Switzerland 760p
- Bica I, Boukhemacha MA, Groza G (2019) A semi-analytical solution for groundwater flow-field delineation near pumping/injection wells in confined aquifers. *Hydrogeology Journal* 27(1):61-71
- Casasso A, Tosco T, Bianco C, Bucci A, Sethi R (2020) How can we make pump and treat systems more energetically sustainable? *Water* 12(1):67
- Christ JA, Goltz MN, Huang J (1999) Development and application of an analytical model to aid design and implementation of in situ remediation technologies. *Journal of Contaminant Hydrology* 37(3-4):295-317
- Chu M-YJ, Bennett PJ, Dolan ME, Hyman MR, Peacock AD, Bodour A, Anderson RH, Mackay DM, Goltz MN (2018) Concurrent treatment of 1,4-dioxane and chlorinated aliphatics in a groundwater recirculation system via aerobic cometabolism. *Groundwater Monitoring & Remediation* 38(3):53-64
- Ciampi P, Esposito C, Cassiani G, Deidda GP, Rizzetto P, Papini MP (2021) A field-scale remediation of residual light non-aqueous phase liquid (LNAPL): Chemical enhancers for pump and treat. *Environmental Science and Pollution Research* 28(26):35286-35296
- Ciampi P, Esposito C, Bartsch E, Alesi EJ, Papini MP (2023) Pump-and-treat (P&T) vs groundwater circulation wells (GCW): Which approach delivers more sustainable and effective groundwater remediation? *Environmental Research* 234:116538
- Gandhi RK, Hopkins GD, Goltz MN, Gorelick SM, McCarty PL (2002) Full-scale demonstration of in situ cometabolic biodegradation of trichloroethylene in groundwater 1. Dynamics of a recirculating well system. *Water Resources Research* 38(4):10-1-10-15
- Guo Z, Brusseau ML, Fogg GE (2019) Determining the long-term operational performance of pump and treat and the possibility of closure for a large TCE plume. *Journal of Hazardous Materials* 365:796-803
- Haitjema HM (1995) Analytic element modeling of groundwater flow. Academic Press, San Diego, California, 406p
- Luo J, Kitanidis PK (2004) Fluid residence times within a recirculation zone created by an extraction-injection well pair. *Journal of Hydrology* 295(1-4):149-162
- Masters GM, Ela WP (2014) Introduction to environmental engineering and science. Pearson New International Edition, Pearson Education Limited, London, 704p
- Nagheli S, Samani N, Barry DA (2020) Capture zone models of a multi-well system in aquifers bounded with regular and irregular inflow boundaries. *Journal of Hydrology X* 7:100053
- North KP, Mackay DM, Kayne JS, Petersen D, Rasa E, Rastegarzadeh L, Holland RB, Scow KM (2012) In situ biotreatment of TBA with recirculation/oxygenation. *Groundwater Monitoring & Remediation* 32(3):52-62
- Strack ODL (1989) *Groundwater mechanics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 752p
- Suk H, Chen JS, Park E, Han WS, Kihm YH (2021) Numerical evaluation of the performance of injection/extraction well pair operation strategies with temporally variable injection/pumping rates. *Journal of Hydrology* 598:126494
- Teramoto EH, Pede MAZ, Chang HK (2020) Impact of water table fluctuations on the seasonal effectiveness of the pump-and-treat remediation in wet-dry tropical regions. *Environmental Earth Sciences* 79:435