

Laboratory Study of Hydraulic and Physical Barriers Effects on Saltwater Intrusion

Abbasali Rezapour^{1*}, Mehdi Rezapour², Ali Sarani Adimi³, Pouria Moghri³

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chabahar Maritime University.
3. M.S graduated in Civil Engineering, Chabahar Maritime University.

* abbas.rezapoor@birjandut.ac.ir

Received: 25 February 2024

Accepted: 6 June 2024

Discussion: 23 September 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Coastal aquifers are the main source of freshwater supply in most coastal regions. Their proximity to seas and oceans exposes them to the risk of salinization. Hence, providing an effective solution to reduce saltwater intrusion can play a significant role in coastal water resource management. In this study, an effort was made to evaluate the effects of recharge wells and abstraction wells as hydraulic barriers, and cutoff walls as a physical barrier, both separately and in combination, on the mitigation of seawater intrusion using several sets of experiments.

Methodology: The experimental model used in this study was a flow tank with a thickness of 1 centimeter. The flow tank was divided into a central chamber with internal dimensions of 140×58×5 centimeters and two side chambers with internal dimensions of 10×58×5 centimeters. The central chamber served as the porous medium, while the left and right-side chambers were used to control the head of saline and fresh water entering the porous medium during the experiments. Glass beads were employed to create the porous medium. The fresh water used in the experiments was supplied from the tap water, with a density of approximately 998 kg/m³. The saline water used in the experiments was prepared by adding 35 grams of purified salt and 2 milliliters of red food coloring to each liter of tap water. An aluminum sheet with a thickness of 7 millimeters, an approximate width of 5 centimeters, and a height of 54 centimeters was used to construct the cutoff wall. Two separate polyvinyl chloride (PVC) pipes were used as extraction and injection wells. The extraction well was placed 22 centimeters from the saltwater boundary, with its mouth penetrating to a depth of 52 centimeters from the top edge of the experimental model. The injection well was placed 40 centimeters from the saltwater boundary, with its mouth penetrating to a depth of 56 centimeters from the top edge of the model. To prepare the required freshwater for the injection well, one cubic centimeter of blue food coloring was added to each liter of tap water.

Results and Discussion: In this study, injection action was performed at flow rates of 0.65, 1.30, and 2.0 liters per minute. The fed water flow caused the return of the salt wedge. The reason is that when the injection well is activated, the local velocity in the aquifer increases because the recharge flow accumulates with the normal velocity inside the aquifer, resulting in a greater velocity at the outlet of the well towards the saltwater boundary. This increased flow washes and transports salt grains of the salt wedge along the common boundary towards the sea, leading to their removal from the porous

medium. Thus, greater local velocity, the greater the washing and salt transport, resulting in a smaller salt wedge or, in other words, a greater return. For examining the combined effect of cutoff walls and injection wells, the intrusion experiment was first conducted in the presence of a cutoff wall. Therefore, the distance of the salt wedge to the saltwater boundary was 38.5 centimeters. Then, injection action started at a rate of 0.65 liters per minute. The injected water began to move within the porous medium, and after approximately 50 minutes from the start of the injection process, the salt wedge reached a stable state. In the stable conditions, the length of the salt wedge was 27 centimeters, indicating a return of 17 centimeters. Therefore, the effectiveness of the simultaneous use of a cutoff wall and an injection well in preventing saltwater intrusion is approximately 38.6%. To consider the combined effect of injection and extraction wells in reducing saltwater intrusion, both wells were activated simultaneously at a rate of 0.65 liters per minute each. After about 35 minutes, the salt wedge reached a stable state with a length of 29.6 centimeters, indicating a return of approximately 16.7 centimeters. Thus, the simultaneous use of extraction and injection wells at a rate of 0.65 liters per minute each is approximately 32.7% more effective than using the extraction well alone.

Conclusion: The simultaneous use of extraction and injection wells showed a 5.22% better performance in preventing saltwater intrusion compared to using the extraction well alone, albeit with approximately 2% lower effectiveness in retreating the salt wedge compared to using the injection well alone. By comparing the combined effect of all three barriers with each individual method, it was evident that the combined method of cutoff wall, extraction well, and injection well had a better performance in preventing saltwater intrusion by 17% and 19.3% compared to the cutoff wall and extraction well alone, respectively. However, their effectiveness was 4.59% weaker compared to the individual effect of the injection well.

Keywords: Coastal aquifer, saltwater intrusion reduction, hydraulic barriers, physical barriers, laboratory study.

ارزیابی آزمایشگاهی اثرگذاری توأم بازدارنده‌های هیدرولیکی و فیزیکی بر کاهش هجوم و نفوذ آب‌شور دریا به آبخوان‌های ساحلی

عباسعلی رضاپور^{۱*}، مهدی رضاپور^۲، علی سارانی ادیمی^۳ و پوریا مقری^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار.

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار.

* abbas.rezapoor@birjandut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ ☞ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: آبخوان‌های ساحلی منبع اصلی تامین آب شیرین در اغلب ناحیه‌های ساحلی جهان به‌شمار می‌روند. قرارگیری این بازدارنده‌های با ارزش در مجاورت دریاها و اقیانوس‌ها، آن‌ها را در معرض خطر شوری قرار داده است. بنابراین ارائه راهکاری مناسب برای کاهش نفوذ آب شور به این منابع‌های طبیعی با ارزش، می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت منابع آب ناحیه‌های ساحلی داشته باشد. در این پژوهش تلاش شد اثر چاه تغذیه و چاه برداشت به عنوان بازدارنده‌های هیدرولیکی و دیوار آب‌بند به عنوان مانع فیزیکی به صورت مجزا و توأم با هم بر چگونگی کاهش هجوم آب دریا با استفاده از آزمایش‌های تجربی ارزیابی شود. مقایسه نتایج به دست آمده در زمان به‌کارگیری هر یک از بازدارنده‌ها به تنهایی نشان داد که استفاده از چاه تغذیه به‌صورت جداگانه به مراتب عملکرد بهتری بر میزان کاهش هجوم آب‌شور نسبت به به‌کارگیری دیوار آب‌بند و چاه برداشت به‌صورت مجزا دارد. همچنین نتایج نشان داد، به‌کارگیری دیوار آب‌بند و چاه برداشت به صورت هم‌زمان به‌میزان ۱۱/۸٪ نسبت به کاربرد دیوار آب‌بند تنها و به مقدار ۱۴/۱٪ نسبت به چاه برداشت مجزا و همچنین بکارگیری دیوار آب‌بند و چاه تغذیه به میزان ۲۶٪ نسبت به چاه تغذیه و به مقدار ۴/۵٪ نسبت به دیوار آب‌بند اثر گذاری بهتری برای کاهش هجوم آب‌شور دارد. از سویی استفاده هم‌زمان از چاه برداشت و چاه تغذیه در جلوگیری از هجوم آب شور به میزان ۲۲/۵٪ عملکرد بهتری در جلوگیری از نفوذ آب شور نسبت به چاه برداشت تنها داشته، اما حدود ۱/۳٪ عملکرد ضعیف‌تری نسبت به چاه تغذیه دارد. اثر ترکیبی هر سه بازدارنده با هم در جلوگیری از هجوم آب شور به ترتیب به میزان ۱۷٪ و ۱۹/۳٪ نسبت به دیوار آب‌بند و چاه برداشت تنها عملکرد بهتری داشته است.

کلیدواژگان: آبخوان ساحلی، کاهش هجوم آب شور، بازدارنده‌های هیدرولیکی، بازدارنده‌های فیزیکی، ارزیابی آزمایشگاهی.

۱- مقدمه

(al., 2012). هر چه برداشت آب شیرین از آبخوان ساحلی افزایش یابد، سطح ایستابی آبخوان کاهش می‌یابد. هر چه سطح ایستابی آبخوان کاهش یابد از شدت جریان طبیعی در آبخوان کاسته می‌شود که در نتیجه آن گوه آب شور بیشتر به درون آبخوان نفوذ کرده و سطح بیشتری از آبخوان را آلوده می‌سازد (Chang et al., 2012). امروزه افزایش جمعیت و برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی برای مصارف کاربردهای مختلف از یک سو و بالا آمدن سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها از سوی دیگر (که در نتیجه افزایش دمای جو کره زمین و ذوب شدن یخ‌ها و

آبخوان‌های ساحلی منبع بسیار مهم تأمین آب شیرین برای بیشتر منطقه‌های ساحلی جهان به‌شمار می‌روند. به‌طور معمول در آبخوان‌های ساحلی، سطح ایستابی آبخوان بالاتر از سطح آب دریا قرار دارد و شیب هیدرولیکی از سمت آبخوان به سمت دریا می‌باشد (Bear et al., 2010). در این وضعیت، آب شور دریا به علت چگالی بیشتر نسبت به آب شیرین آبخوان، از عمق به شکل یک گوه به سمت آبخوان نفوذ می‌کند (Kuan et

هرچه محل احداث دیوار آب‌بند به مرز دریا نزدیکتر شود تأثیرگذاری دیوار آب‌بند بر کاهش هجوم و نفوذ آب‌شور بیشتر شود.

Sriapai et al. (2012) با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی عملکرد چاه برداشت و دیوار آب‌بند را به‌طور جداگانه در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور در حضور چاه پمپاژ بررسی کردند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد، هنگامی چاه برداشت در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور مؤثر است که میزان برداشت آب‌شور از میزان پمپاژ آب شیرین بیشتر باشد. همچنین آنان نشان دادند هر چه عمق نفوذ دیوار آب‌بند بیشتر باشد اثرگذاری آن در کاهش هجوم و نفوذ آب‌شور بهتر است.

در تحقیقی دیگر، Abdoulhalik et al. (2017) با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی به همراه تجزیه و تحلیل خودکار تصویرها و شبیه‌سازی عددی، عملکرد استفاده از دیوار آب‌بند و سد زیرسطحی را به عنوان بازدارنده‌های فیزیکی به صورت ترکیبی و جداگانه بررسی کردند. ایشان با مقایسه نتایج به دست آمده بیان داشتند که استفاده از بازدارنده‌های فیزیکی ترکیبی به میزان ۴۲٪ نسبت به زمان استفاده از سد زیرزمینی تنها و به میزان ۶۲٪ نسبت به زمان استفاده از دیوار آب‌بند تنها اثرگذاری بهتری در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور دارد. همچنین نتایج آنان نشان داد، عملکرد حاصل از بازدارنده‌های فیزیکی ترکیبی با عمق دیوار ۴۰٪ ضخامت آبخوان، بیشتر از استفاده از یک دیوار آب‌بند تنها با عمق نفوذ ۹۰٪ ضخامت آبخوان است.

Ebeling et al. (2019) تأثیر استفاده همزمان چاه برداشت و چاه تغذیه را با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی کردند. ایشان بیان داشتند، هرچه دبی تغذیه بیشتر گردد، میزان عقب‌نشینی گُوه آب شور بیشتر می‌شود. از سویی هرچه چاه تغذیه به نوک پنجه گُوه نزدیک‌تر باشد میزان اثرگذاری آن بیشتر می‌شود. همچنین نتایج آنان نشان داد، استفاده همزمان چاه برداشت و چاه تغذیه اثر اصلاحی قابل توجهی در حرکت گُوه آب شور دارد اما اگر چاه تغذیه درون گُوه آب شور قرار گیرد باعث به دام افتادن آب شور در حاشیه آبخوان می‌شود و موجب از بین

برفها در جاهای مختلف کره زمین است) باعث تداخل بیشتر آب شور و شیرین در آبخوان‌ها ساحلی شده است (Werner, 2017). از این‌رو بررسی پدیده نفوذ آب شور به آبخوان‌های آب شیرین از جمله مهم‌ترین چالش‌های مدیریتی و تحقیقاتی است که مدیران منابع آب زیرزمینی باید بدان توجه کنند.

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه جلوگیری از نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی انجام شده است. در این تحقیقات، محققان از روش‌های مختلفی مانند: ایجاد بازدارنده‌های فیزیکی، ایجاد بازدارنده‌های هیدرولیکی، تغذیه طبیعی و اصلاح الگوی پمپاژ استفاده کرده‌اند (Abarca et al., 2006; Luyun et al., 2009; Pool & Carrera, 2010).

Luyun et al. (2009) با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی عملکرد سد زیرزمینی (سازه‌ای نفوذناپذیر که در کف آبخوان احداث شده و قسمتی از ارتفاع آبخوان را از کف به سمت بالا در برمی‌گیرد) را در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور بررسی کردند. در بررسی‌های آنان سد زیرزمینی پس از فرآیند هجوم و نفوذ آب‌شور بر روی کف آبخوان و در درون گوه آب شور مابین مرز آب‌شور و پنجه گوه تعبیه شد، به‌طوری که قسمتی از گوه آب‌شور در بالادست سد و قسمتی در پایین دست آن قرار می‌گرفت. آزمایش‌های آنان نشان داد، هنگامی سد بیشترین اثرگذاری را دارد که ارتفاع آن در محل احداث معادل ارتفاع گوه آب‌شور در آن محل باشد. چراکه هرچه ارتفاع سد از این مقدار بالاتر رود، مدت زمان لازم برای شستشو و تخلیه آب‌های شور تجمیع شده در پایین دست سد بیشتر می‌شود و چنانچه ارتفاع سد از این مقدار کمینه کمتر شود، آب‌شور هجوم آورنده از بالای سد عبور کرده و در عمل کارایی سد از بین می‌رود. Luyun et al. (2011) تأثیر دیوار آب‌بند (سازه‌ای نفوذناپذیر که از سطح زمین به درون آبخوان نفوذ می‌کند و قسمتی از ارتفاع آبخوان را از بالا به سمت عمق آبخوان در برمی‌گیرد) بر کاهش هجوم و نفوذ آب‌شور را به روش آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. نتایج بررسی ایشان نشان داد، هرچه دیوار آب‌بند به درون آبخوان بیشتر نفوذ کند و همچنین

بیشترین بهبود نسبی آبخوان مربوط به راهکار استفاده از تغذیه مصنوعی و کاهش ۲۰ درصدی برداشت آب و استفاده از سد زیرزمینی می‌باشد که موجب پسروری آب شور به میزان ۴۸۰ متر شد. در تحقیقی دیگر، Moghri et al. (2023) اثر وجود همزمان دیوار آب‌بند و چاه برداشت را بر کاهش هجوم و نفوذ آب شور به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج بررسی آنان نشان داد که با افزایش دبی برداشت میزان پسروری گوه آب شور به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. از سویی استفاده توأم دیوار آب‌بند و چاه برداشت با دبی $0/13$ و $0/2$ لیتر بر دقیقه به ترتیب سبب بازگشت گوه آب‌شور به میزان ۳۸ و ۴۱ درصد می‌شود.

تحقیقات محققان پیشین نشان می‌دهد تاکنون تلاش‌های شایسته‌ای برای بررسی روش‌های مختلف جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی انجام گرفته است. با این وجود تحقیقات کمی به تحلیل و بررسی آزمایشگاهی اثر توأم بازدارنده‌های هیدرولیکی و بازدارنده‌های فیزیکی پرداخته‌اند. تا آنجایی که تاکنون اثر ترکیبی دو بازدارنده هیدرولیکی (چاه تغذیه و چاه برداشت) و بازدارنده فیزیکی (دیوار آب‌بند) به طور همزمان برای جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور به صورت آزمایشگاهی بررسی نشده است. در این تحقیق تلاش می‌شود در آغاز اثر هر یک از بازدارنده‌ها (چاه برداشت، چاه تغذیه و دیوار آب‌بند) به صورت جداگانه ارزیابی شوند. سپس اثرگذاری هم‌زمان دو بازدارنده (چاه برداشت و چاه تغذیه، چاه برداشت و دیوار آب‌بند و چاه تغذیه و دیوار آب‌بند) و در نهایت اثر هم‌زمان هر سه بازدارنده به صورت توأم بررسی و ارزیابی شوند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی و فراسنجه‌های بی‌بعد

مدل‌های فیزیکی کاربردهای فراوانی در حل مسئله‌های هیدرولیکی دارند و برای طراحی و شبیه‌سازی اغلب پروژه‌های مهندسی مانند هواپیماها، کشتی‌ها، ماشین‌ها، سدها و آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی به کار گرفته می‌شوند. با انجام آزمایش بر روی مدل‌های فیزیکی

رفتن کیفیت آب شیرین موجود در آبخوان می‌شود. (Chang et al. (2019) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی عملکرد سد زیرزمینی را در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور بررسی کردند و کمترین ارتفاع مؤثر سد را در هنگام استفاده در مکان‌های مختلف پیشنهاد کردند. نتایج بررسی ایشان نشان داد: الف) در هر قسمت از طول گوه آب شور که محل احداث سد زیرزمینی باشد، کمترین ارتفاع مؤثر سد به اندازه‌ی ارتفاع گوه آب شور در همان قسمت است. ب) هرچه سد زیرزمینی به ساحل نزدیک‌تر باشد، تأثیر آن در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور بیشتر می‌شود. ج) با نزدیک شدن سد به مرز دریا، ارتفاع گوه آب شور و کمترین ارتفاع مؤثر سد افزایش خواهد یافت و به هزینه ساخت بالاتری نیاز دارد. د) با دور شدن سد از مرز دریا، ضمن کم شدن هزینه ساخت باعث کاهش ایمنی برداشت آب شیرین و آلوده شدن محدوده‌ی گسترده‌تری از آبخوان خواهد شد.

(Armanuos et al. (2020) تأثیر دیواره آب‌بند برای مهار هجوم آب شور در سفره‌های زیرزمینی ساحلی شیب‌دار را به صورت عددی ارزیابی کردند.

(Zohrabi Motlagh et al. (2021) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل خودکار تصویرهای حرکت گوه آب شور در یک آبخوان ساحلی را با حضور دیوار آب‌بند و بدون حضور آن در محیط همگن و ناهمگن بررسی کردند. با مقایسه نتایج به دست آمده در آزمایشگاه نشان داده شد که الف) میزان پسروری گوه آب شور در محیط ناهمگن بیشتر از محیط همگن می‌باشد. ب) دیوار آب‌بند در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور در محیط همگن بیشتر از محیط ناهمگن تأثیرگذار است. ج) با توجه به ابعاد طولی ۱۰۰ و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری مدل آزمایشگاهی، بهینه‌ترین محل قرارگیری دیوار آب‌بند در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از مرز دریا و ۶۴ سانتی‌متری از لبه مخزن به دست آمد.

(Beheshti et al. (2022) با استفاده از شبیه‌سازی عددی به ارزیابی راهکارهای مختلف برای کاهش هجوم و نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی آستانه - کوچصفهان پرداختند. نتایج شبیه‌سازی‌ها گویایی این است که

می‌توان رفتار نمونه واقعی را در شرایط هیدرولیکی مختلف در آزمایشگاه شبیه‌سازی، پیش‌بینی و بررسی کرد. چنانچه اصول شبیه‌سازی در هنگام ساخت مدل فیزیکی رعایت شود، می‌توان نتایج آزمایشگاهی را به نمونه واقعی تعمیم داد. در این پژوهش، برای شبیه‌سازی پدیده هجوم و نفوذ آب شور در سامانه سفره آب زیرزمینی از مدل مخزن ماسه‌ای استفاده شد.

برای شبیه‌سازی هر پدیده فیزیکی، در آغاز باید پارامترها یا متغیرهای موثر بر آن پدیده شناسایی گردند. از آنجا که با پیچیدگی پدیده فیزیکی مورد نظر تعداد فراسنجه‌های موثر زیاد می‌گردد، لذا روشی که بتوان با ترکیب این فراسنجه‌ها، فراسنجه‌های بی‌بعد دیگری که مفهوم فیزیکی دارند بوجود آورد، در کاهش فراسنجه‌های

موثر سودمند خواهد بود. تحلیل ابعادی روشی است که در آن با استفاده از مفهوم همگنی ابعاد، فراسنجه‌های موثر بر پدیده فیزیکی مورد نظر در قالب فراسنجه‌های بی‌بعد بیان می‌شوند. به منظور تعمیم نتایج آزمایشگاهی باید بین مدل و نمونه واقعی (اصل) همانندی هیدرولیکی که خود شامل همانندی هندسی، همانندی سینماتیکی و همانندی دینامیکی است، برقرار باشد.

با توجه به موضوع تحقیق که بررسی تأثیر دیوار آب‌بند، چاه برداشت و چاه تغذیه بر کاهش هجوم و نفوذ آب شور به صورت جداگانه و ترکیبی است، هندسه آبخوان (شکل ۱) و فراسنجه‌های موثر بر فضای تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

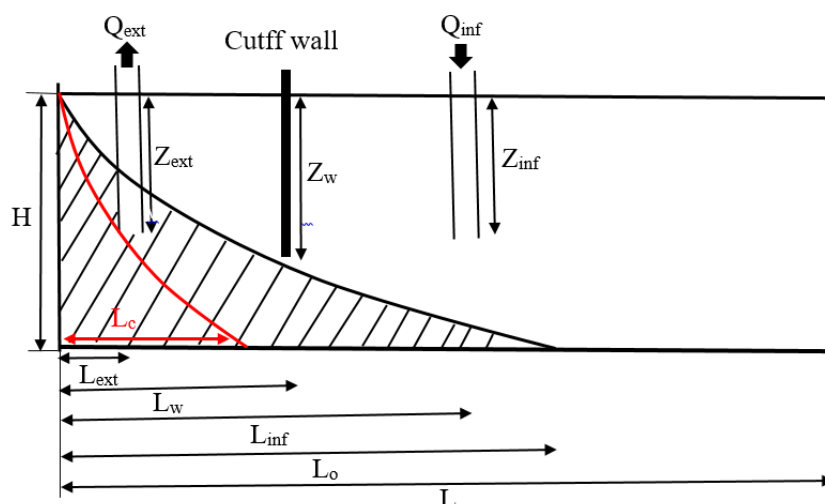


Fig. 1 Schematic of aquifer geometry and its hydraulic barriers

شکل ۱ نمای کلی از هندسه آبخوان و بازدارنده‌های هیدرولیکی به کار رفته در آن

فراسنجه‌های سینماتیکی: سرعت میانگین جریان آب در آبخوان (V)، هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در راستای افق (K_x) و قائم (K_y) دبی ورودی چاه تغذیه (Q_{inf}) و دبی خروجی چاه برداشت (Q_{ext}).

فراسنجه‌های دینامیکی: چگالی آب شیرین (ρ) و شور (ρ_s)، غلظت آب شیرین (C) و شور (C_s)

برای تحلیل ابعادی و استخراج متغیرهای بی‌بعد از نظریه باکینگهام استفاده شد که پس از ترکیب فراسنجه‌ها رابطه نهایی زیر به دست آمد.

فراسنجه‌های هندسی: فاصله طولی پنجه گوه آب شور در شرایط عدم وجود بازدارنده (L_o)، فاصله طولی پنجه گوه آب شور در شرایط وجود بازدارنده (L_c)، فاصله طولی چاه تغذیه از مرز آب شور (L_{inf})، فاصله طولی دیوار آب‌بند از مرز آب شور (L_w)، فاصله چاه برداشت از مرز آب شور (L_{ext})، ارتفاع آبخوان (H)، عمق نفوذ دیوار آب‌بند (Z_w)، عمق برداشت از سطح آزاد (Z_{ext})، عمق چاه تغذیه از سطح آزاد (Z_{inf})، قطر چاه برداشت (d_{ext})، قطر چاه برداشت موثرهای محیط متخلخل (d_c) و قطر موثرهای محیط متخلخل (d_{inf}).

(شکل ۲). برای جداسازی محفظه مرکزی از محفظه‌های جانبی از ورق‌های آلومینیومی استفاده شد. روی این ورق‌ها سوراخ‌هایی به قطر ۵ میلی‌متر با فاصله‌های ۳ سانتی‌متر ایجاد شدند و دورتادور آنها نیز توسط لایه‌ای از جنس پارچه پوشیده شدند. با این کار ضمن عبور جریان از بین محفظه‌ها از ورود دانه‌های محیط متخلخل به محفظه‌های جانبی جلوگیری شد. این ورق‌ها درون شیارهای آلومینیومی که از پیش در مدل آزمایشگاهی تعبیه شده بود قرار گرفته و ثابت شده بودند. برای ایجاد محیط متخلخل از دانه‌های شیشه‌ای با قطری در محدوده‌ی ۵۹۵ تا ۱۱۹۰ میکرون و وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد.

آب شیرین استفاده شده در آزمایش‌ها از آب لوله‌کشی شهری با چگالی حدود ۹۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب تأمین شد. آب شور مورد استفاده در آزمایش‌ها با اضافه کردن ۳۵ گرم نمک تصفیه شده و ۲ میلی‌لیتر رنگ خوراکی قرمز به هر لیتر آب شهری تهیه شد. چگالی آب شور رنگ شده با استفاده از ترازوی دیجیتال حدود ۱۰۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب اندازه‌گیری شد. برای ساخت دیوار آب‌بند از یک ورق آلومینیومی با ضخامت ۷ میلی‌متر، عرض حدودی ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۴ سانتی‌متر استفاده شد. در آزمایش‌ها از دو لوله پی.وی. سی (p.v.c) مجزا به عنوان چاه برداشت و چاه تغذیه استفاده شد. در قسمت انتهایی این لوله‌ها سوراخ‌هایی تعبیه و دور تا دور آنها توسط لایه‌ای توری پوشیده شدند تا ضمن عبور جریان آب، از ورود دانه‌های محیط متخلخل به درون چاه جلوگیری شود. برای تهیه آب شیرین مورد نیاز چاه تغذیه، به هر لیتر آب شیر شهری ۱ سی‌سی رنگ خوراکی آبی اضافه شد و درون بشکه‌ای هم‌تراز با بشکه آب شیرین نگهداری شد. برای ثابت ماندن نرخ برداشت آب شور توسط چاه برداشت و نرخ تغذیه آب شیرین توسط چاه تغذیه از شیر تقسیم هوا از جنس استیل استفاده شد تا دبی مورد نظر از لحظه آغاز برداشت و یا از لحظه آغاز تغذیه تا پایان آزمایش ثابت نگه داشته شود. برای محاسبه هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل از قانون دارسی استفاده شد که مقدار میانگین آن حدود ۰/۸ سانتی‌متر بر

$$PR = \frac{L_o - L_c}{\frac{L_o}{V}} = f\left(\frac{L_w}{H}, \frac{Z_w}{H}, \frac{L_{ext}}{H}, \frac{Z_{ext}}{H}, \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) K_x, \frac{L_{inf}}{H}, \frac{Z_{inf}}{H}, \frac{d_{ext}}{H}, \frac{d_{inf}}{H}, \frac{Q_{ext}}{VHb}, \frac{Q_{inf}}{VHb}, \frac{k_x}{k_y}, \frac{C}{C_s}\right) \quad (1)$$

که در آن b عرض آبخوان (برابر با واحد) و PR توصیفی برای میزان اثرگذاری بازدارنده‌ها و برابر با میزان کاهش پنجه گوه آب شور است که به صورت درصد بیان می‌شود. باید توجه داشت که رابطه (۱) به صورت کلی و در صورت به‌کارگیری هم‌ی بازدارنده‌ها نگاشته شده است. چنانچه هر کدام از بازدارنده‌ها از مدل فیزیکی حذف شود، فراسنجه‌های بی‌بعد متناظر با آن در این رابطه در نظر گرفته نمی‌شوند.

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

مدل آزمایشگاهی به کار رفته در این پژوهش، یک مخزن جریان شیشه‌ای شفاف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. این مخزن جریان شامل یک محفظه مرکزی با ابعاد درونی ۱۴۰×۵۸×۵ سانتی‌متر و دو محفظه جانبی با ابعاد درونی ۱۰×۵۸×۵ سانتی‌متر می‌باشد. برای محافظت مخزن جریان و جلوگیری از تخریب ناشی از فشار آب و محیط متخلخل درون آن، دو طرف مدل آزمایشگاهی و وسط آن توسط قاب‌های چوبی مهار شد (شکل ۲). از محفظه مرکزی به عنوان محیط متخلخل و از محفظه‌های جانبی سمت چپ و راست به ترتیب برای تنظیم بار (هد) آب شور و شیرین ورودی به محیط متخلخل در مدت زمان انجام آزمایش‌ها استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، برای تأمین آب شور و شیرین مورد نیاز آزمایش‌ها از دو بشکه پلاستیکی که در ارتفاعی بالاتر از مدل آزمایشگاهی تعبیه شده بودند، استفاده شد (Moghri et al, 2023). برای ورود آب شور و شیرین با دبی ثابت به محفظه‌های جانبی، ارتفاع آب درون این بشکه‌ها توسط شناورهایی تثبیت می‌شد. برای تنظیم هد (ارتفاع) آب شور و شیرین در محفظه‌های جانبی سمت چپ و راست، به ترتیب شیرهای پلاستیکی در ارتفاع ۴۵/۲ و ۴۱ سانتی‌متری و ۴۷/۵ و ۴۳ سانتی‌متری تعبیه شدند

هوای گیرافتاده بین دانه‌ها حذف شدند.

الف) هجوم و نفوذ آب شور

پس از پر شدن محفظه مرکزی از دانه‌های شیشه‌ای، آب شیرین از پایین به محفظه سمت راست وارد و از ارتفاع ۴۷/۵ سانتی‌متری سرریز می‌شد. با این عمل ضمن ثابت نگه داشتن بار (هد) آب شیرین در محفظه سمت راست، جریان آب از درون محیط متخلخل عبور و از ارتفاع ۴۵/۲ سانتی‌متری محفظه سمت چپ خارج می‌شد. پس از رسیدن جریان به شرایط پایدار، آب شور قرمز رنگ از پایین به محفظه سمت چپ تزریق شد. آب شور به سرعت جایگزین آب شیرین در محفظه سمت چپ شد و مازاد آن از ارتفاع ۴۵/۲ سانتی‌متری سرریز می‌شد. در این لحظه، آب شور به علت چگالی بالاتر نسبت به آب شیرین به درون محیط متخلخل نفوذ کرد و یک گُوه آب شور را تشکیل داد. با گذشت زمان گُوه آب شور پیشروی کرد تا سرانجام متوقف شد و به شرایط پایدار رسید.

ثانیه به‌دست آمد و برای محاسبه تخلخل دانه‌های شیشه‌ای از روش حجمی استفاده شد که مقدار میانگین آن حدود ۰/۳۷ محاسبه شد. برای اندازه‌گیری موقعیت پنجه و راس گوه آب‌شور در زمان دلخواه، لازم بود محفظه مرکزی جریان (آبخوان) مدرج شد. برای این منظور، یک متر مدرج به‌صورت افقی، هم‌تراز با کف مدل بر روی جداره شیشه‌ای مدل به‌گونه‌ای نصب شد که عدد صفر آن بر روی مرز آب‌شور (مرز محفظه مرکزی و محفظه سمت چپ) قرار گرفته بود و تا انتهای آبخوان ادامه داشت (شکل ۴). متر مدرج دیگر برای اندازه‌گیری راس گوه در راستای قائم روی مرز آب‌شور بر روی جدار شیشه‌ای مدل نصب شد (شکل ۳).

۲-۳- روش انجام آزمایش‌ها

پیش از وارد کردن دانه‌های شیشه‌ای به محفظه مرکزی، مدل آزمایشگاهی تراز و از آب شیرین پر شد. پس از آن دانه‌های شیشه‌ای در لایه‌های حدود ۱۰ سانتی‌متری درون محفظه مرکزی ریخته و به صورت یکنواخت متراکم شدند. با این کار ضمن ایجاد محیطی همگن، حباب‌های

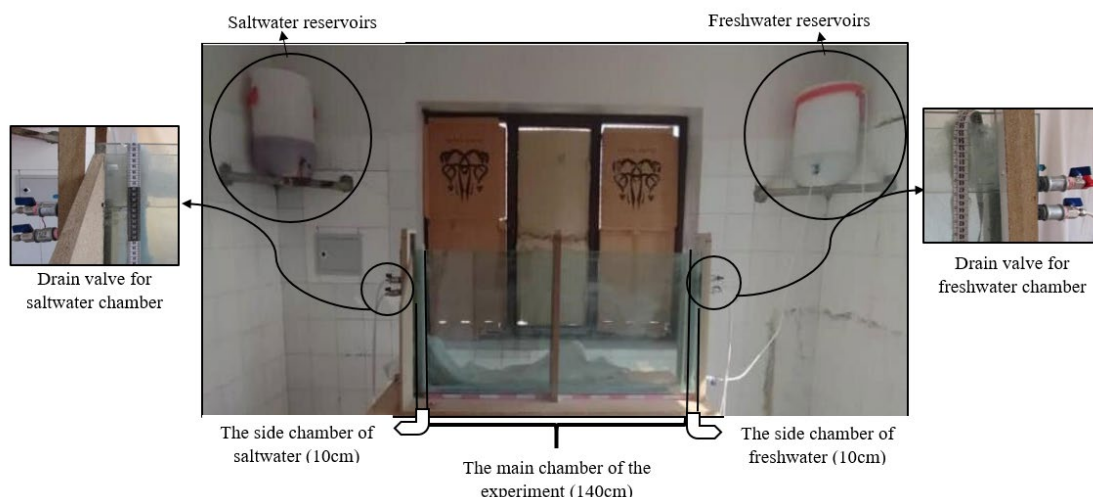


Fig. 2 Experimental model

شکل ۲ مدل آزمایشگاهی

توضیح‌های ارائه شده در قسمت الف انجام می‌گرفت. برای بررسی اثر چاه برداشت بر کاهش هجوم آب شور، پیش از ریختن دانه‌های شیشه‌ای درون محفظه مرکزی، چاه برداشت در فاصله ۲۲ سانتی‌متری از مرز آب شور قرار

شایان یادآوری است، برای بررسی اثر هر یک از بازدارنده‌ها هیدرولیکی یا فیزیکی بر کاهش هجوم و نفوذ آب شور، در آغاز مانع مورد نظر در مدل آزمایشگاهی تثبیت می‌شد آن‌گاه فرآیند هجوم آب شور بر وفق

بررسی اثر ترکیبی این بازدارنده‌ها نشان می‌دهد.

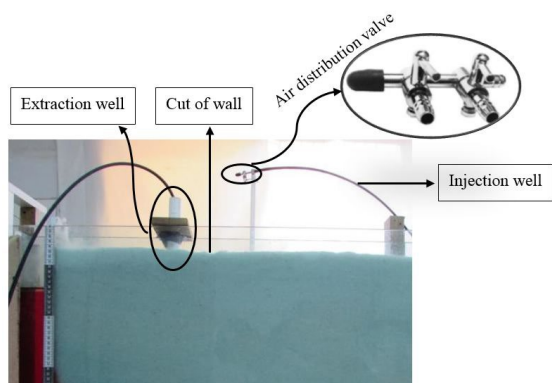


Fig. 3 Simultaneous presence of injection well, the extraction well and the cut off wall.

شکل ۳ حضور هم‌زمان چاه تغذیه، چاه برداشت و دیوار آب‌بند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- هجوم و نفوذ آب شور

شکل ۴ تصویرهای هجوم آب شور به درون محیط متخلخل را نشان می‌دهد.

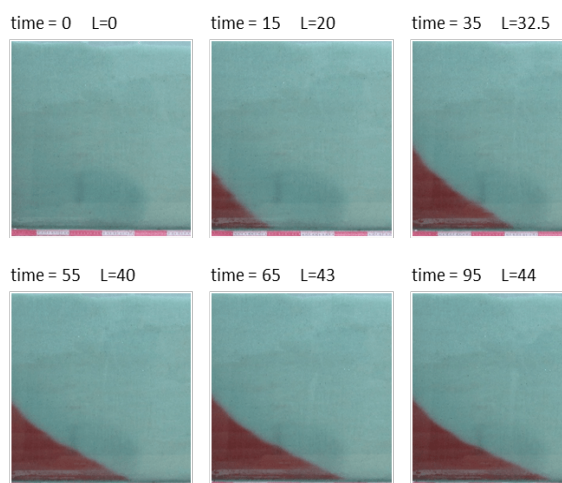


Fig. 4 Advancing salt water wedge under transitional condition

شکل ۴ پیشروی گُوه آب شور در شرایط گذرا

همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان، پیشروی گُوه آب شور به درون آبخوان بیشتر شد و پس از گذشت در حدود ۷۵ دقیقه گُوه آب شور متوقف شد. برای اطمینان از اینکه آیا جریان به شرایط پایدار رسیده است یا خیر، به فرآیند هجوم و نفوذ آب شور مدت زمان ۲۰ دقیقه بیشتر زمان داده شد اما تغییری در پیشروی گُوه

گرفت و دهانه آن تا عمق ۵۲ سانتی‌متری از لبه بالایی مدل آزمایشگاهی نفوذ کرد. پس از فرآیند هجوم آب شور در حضور چاه برداشت و پایدار شدن گُوه آب شور درون محیط متخلخل، استخراج آب از درون گُوه آب شور توسط چاه برداشت به روش آب‌شویه (سیفون) با سه دبی مختلف ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و ۰/۲ لیتر بر دقیقه انجام شد. استخراج آب شور توسط چاه برداشت به این صورت بود که یک سر شلنگ با قطر ۳ میلی‌متر درون چاه برداشت قرار گرفت و سر دیگر آن به شیر تقسیم هوا که از پیش برای دبی مدنظر تنظیم شده بود متصل شد. سپس با مکش آب شور از پایین چاه، آب شور با دبی مدنظر استخراج می‌شد.

برای بررسی تاثیر چاه تغذیه بر مهار هجوم آب شور، چاه تغذیه در فاصله ۴۰ سانتی متری از مرز آب شور و دهانه آن در عمق ۵۶ سانتی متری از لبه بالایی مدل قرار گرفت. پس از پایان فرآیند آزمایش هجوم و نفوذ آب شور و رسیدن گُوه آب شور به شرایط پایدار، از محل بشکه آب شیرین آبی رنگ با سه دبی مختلف ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و ۰/۲ لیتر بر دقیقه عمل تغذیه به درون محیط متخلخل انجام گرفت. روش تغذیه بدین صورت بود که یک سر شلنگ با قطر ۳ میلی‌متر به مخزن آب شیرین آبی رنگ متصل بود و طرف دیگر آن به شیر تقسیم هوا که از پیش برای دبی مورد نظر تنظیم شده بود وصل شد. شلنگ دیگری از محل خروجی شیر تقسیم هوا به درون چاه تغذیه راه یافت و با برقرار جریان از محل بشکه آب شیرین آبی رنگ عمل تغذیه انجام می‌گرفت (شکل ۳).

برای ایجاد دیوار آب‌بند نیز پیش از ریختن دانه‌ها درون مدل آزمایشگاهی، دیوار آب‌بند در فاصله ۲۹ سانتی‌متری از مرز آب شور و تا عمق ۵۴ سانتی‌متری از لبه مدل آزمایشگاهی ثابت شد. سپس با حضور دیوار آب‌بند گُوه آب شور درون محیط متخلخل آغاز به حرکت کرد تا به شرایط پایدار رسید.

برای بررسی اثر ترکیبی دو و یا سه بازدارنده به‌صورت توأم، مانند آنچه در بالا توضیح داده شد هر یک از بازدارنده‌ها در محل مورد نظر تثبیت و فرآیند انجام آزمایش انجام گرفت. به عنوان نمونه شکل ۳ تصویر محل قرارگیری دیوار آب‌بند، چاه برداشت و چاه تغذیه را برای

۰/۲ لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد. برای مقایسه‌ی بهتر نتایج آزمایشگاهی برای دبی‌های مختلف چاه تغذیه، تغییر پذیری پنجه‌ی گوه آب شور نسبت به زمان از لحظه آغاز تغذیه تا لحظه رسیدن گوه به شرایط پایدار در شکل ۶ نشان داده شده است. مقایسه‌ی نمودارها نشان می‌دهد،

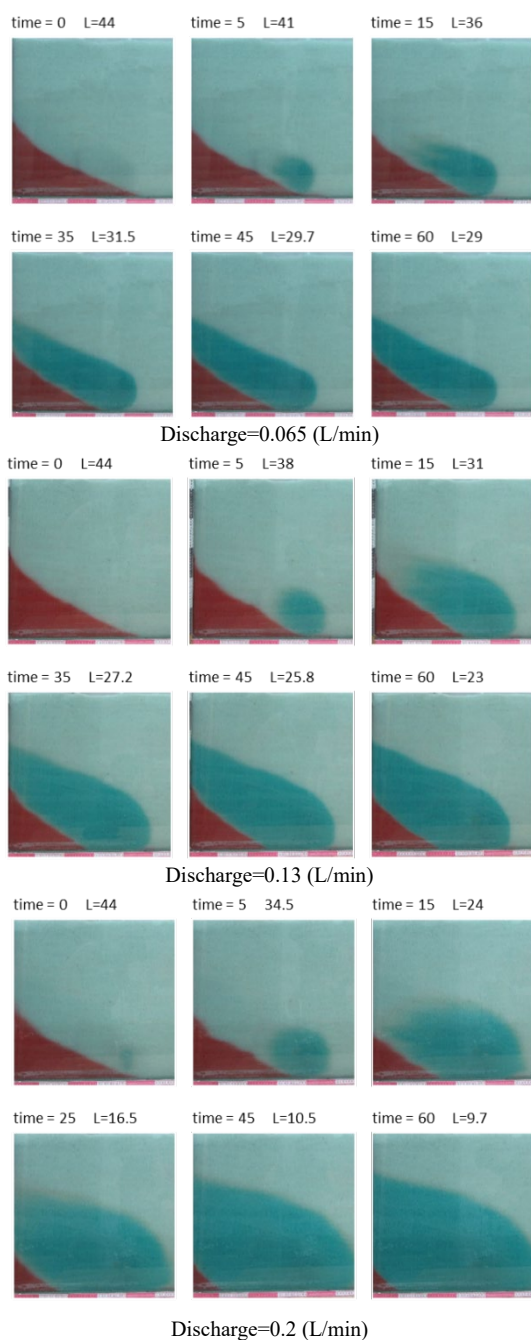


Fig. 5 Returning salt water wedge under transitional condition with injection well.

شکل ۵ بازگشت گوه آب شور در شرایط گذرا در حضور چاه تغذیه.

حاصل نشد. در شرایط پایدار، میزان پیشروی پنجه‌ی گوه آب شور از مرز آب شور (طول پنجه گوه آب شور) ۴۴ سانتی‌متری محاسبه شد.

۳-۲- اثرگذاری چاه تغذیه در کاهش هجوم و نفوذ آب شور

هرچه چاه تغذیه به نوک پنجه‌ی گوه آب شور نزدیک‌تر باشد و از سوی دیگر هرچه دهانه آن به کف آبخوان نزدیک‌تر شود، تأثیرگذاری چاه بیشتر می‌شود (Ebeling et al, 2019). در این پژوهش چاه تغذیه در فاصله‌ی ۴۰ سانتی متری از مرز آب شور قرار گرفت و تا عمق ۵۶ سانتی متری از لبه‌ی مدل آزمایشگاهی فرو برده شد. پس از فرآیند هجوم و رسیدن گوه آب شور به شرایط پایدار، عمل تغذیه توسط هر یک از دبی‌های ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و ۰/۲ لیتر بر دقیقه انجام گرفت. جریان آب تغذیه شده به رنگ آبی آغاز به حرکت در محیط متخلخل کرد و باعث عقب نشینی گوه آب شور شد. علت پس‌زدگی گوه آب شور را می‌توان چنین توصیف کرد که با فعال شدن چاه تغذیه، بر شدت جریان موضعی در آبخوان افزوده می‌شود چرا که شدت جریان تغذیه با شدت جریان عمومی درون آبخوان تجمیع شده و شدت جریان بزرگتری را در محل دهانه خروجی چاه به سمت مرز آب شور بوجود می‌آورند. این جریان بزرگتر موجب شستشوی نمک‌های گوه آب شور و انتقال آن‌ها در امتداد سطح مشترک به سمت مرز دریا و خروج آن‌ها از محیط متخلخل می‌شوند. در واقع عمل شستشو و انتقال نمک‌های گوه آب شور موجب کوچک‌تر شدن گوه آب شور می‌شود. عمل شستشو و انتقال نمک‌ها به خارج محیط متخلخل تا هنگامی ادامه می‌یابد که بار دیگر سامانه به شرایط پیوسته‌ای برسد. هرچه دبی تغذیه بیشتر باشد شدت جریان موضعی در دهانه چاه تغذیه بزرگتر می‌شود هر چه شدت جریان موضعی بزرگتر شود عمل شستشو و انتقال نمک بیشتر صورت می‌گیرد، در نتیجه گوه آب شور کوچک‌تر شده یا به عبارتی به میزان بیشتری عقب رانده می‌شود. شکل ۵ فرآیند پس‌زدگی گوه آب شور را در شرایط گذرا برای دبی‌های مختلف ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و

می‌شود حضور دیوار آب‌بند باعث کاهش نفوذ پنجه گوه آب شور به میزان ۵/۵ سانتی‌متر شد و در شرایط پیوسته‌ای طول پنجه گوه ۳۸/۵ سانتی‌متر به‌دست آمد. در نتیجه تأثیر دیوار آب‌بند در کاهش هجوم آب شور در مدل آزمایشگاهی حدود ۱۲/۵٪ می‌باشد. دلیل کاهش هجوم آب شور در حضور دیوار آب‌بند را می‌توان چنین بیان کرد که با نفوذ دیوار آب‌بند به درون آبخوان، سطح عبور جریان عمومی در محل دیوار کاهش یافته در نتیجه جریان آب شیرین ناچار است از زیر دیوار آب‌بند با سرعت بیشتری عبور کند. افزایش سرعت جریان در نزدیکی گوه آب شور موجب شستشو و انتقال نمک‌های گوه آب شور به بیرون از محیط متخلخل می‌شود. لذا گوه آب شور کوچکتر شده و از میزان هجوم اولیه آب شور کاسته می‌شود.

۳-۴- اثر گذاری چاه برداشت بر کاهش هجوم و نفوذ آب شور

برای بررسی تأثیر چاه برداشت بر کاهش هجوم آب شور، چاه برداشت در فاصله‌ی ۲۲ سانتی‌متری از مرز آب شور تثبیت شد در حالی که دهانه آن در عمق ۵۲ سانتی‌متری از لبه‌ی مدل آزمایشگاهی قرار داشت. پس از رسیدن گوه آب شور به شرایط پایدار، استخراج با سه دبی مختلف انجام گرفت. شکل ۸ چگونگی کاهش هجوم و نفوذ آب شور را در شرایط گذرا در اثر فعال شدن چاه برداشت با دبی‌های مختلف ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و ۰/۲ لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از فعال شدن چاه برداشت با دبی‌های یاد شده، گوه آب شور آغاز به عقب نشینی کرد و پس از گذشت به ترتیب حدود ۴۵، ۴۰ و ۳۰ دقیقه به شرایط پایدار رسید. همان‌طور که مشاهده می‌شود پنجه‌ی گوه آب شور به ترتیب به اندازه‌ی ۴/۵، ۱۱ و ۱۴/۳ سانتی‌متر به سمت مرز آب شور عقب‌نشینی کرده است. بنابراین وجود چاه برداشت با دبی ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و ۰/۲ لیتر بر دقیقه باعث کاهش هجوم و نفوذ آب شور در مدل آزمایشگاهی به ترتیب در حدود ۱۰/۲٪، ۲۵٪ و ۳۳٪ شد.

هرچه دبی تغذیه بیشتر شود سرعت اولیه بازگشت گوه آب شور و میزان عقب‌نشینی آن بیشتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، از لحظه آغاز فرآیند تغذیه برای دبی‌های مختلف ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و ۰/۲ لیتر بر دقیقه به ترتیب سامانه آبخوان و گوه آب شور پس از گذشت حدود ۶۰، ۶۰ و ۵۲ دقیقه به شرایط دائمی رسید. به ازای دبی‌های مختلف تغذیه و برای شرایط پیوسته‌ای، پنجه‌ی گوه آب شور به ترتیب در فاصله ۲۹، ۲۳ و ۹/۷ سانتی‌متری مرز آب شور قرار گرفت. به عبارتی در اثر وجود چاه تغذیه با دبی ۰/۰۶۵، ۰/۱۳ و ۰/۲ لیتر بر دقیقه، پنجه گوه به ترتیب به اندازه‌ی ۱۵، ۲۱ و ۳۴/۳ سانتی‌متر عقب‌نشینی کرده که می‌توان گفت میزان اثر چاه تغذیه بر کاهش هجوم آب شور به ازای هریک از دبی‌های فوق‌الذکر به ترتیب ۳۴٪، ۴۷/۷٪ و ۷۷/۹٪ است.

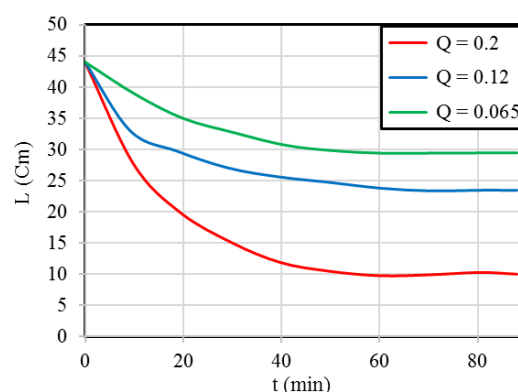


Fig. 6 claw return of salt water wedge until reaching a steady state with extraction well

شکل ۶ نمودار بازگشت پنجه گوه آب شور در شرایط گذرا در حضور چاه تغذیه

۳-۳- اثر دیوار آب‌بند در کاهش هجوم و نفوذ آب شور

هرچه دیوار آب‌بند ضخامت بیشتری از آبخوان را در برگیرد و از سویی هرچه به مرز آب دریا نزدیک‌تر باشد تأثیر گذاری آن بیشتر است (Luyun et al, 2013). برای بررسی اثر دیوار آب‌بند، دیوار آب‌بند در فاصله‌ی ۲۹ سانتی‌متری از مرز آب شور و تا عمق ۵۴ سانتی‌متری از لبه‌ی مدل آزمایشگاهی تعبیه شد. در شکل ۷ محل دیوار آب‌بند نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده

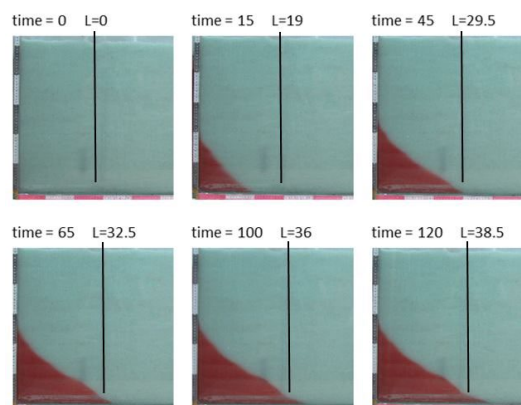
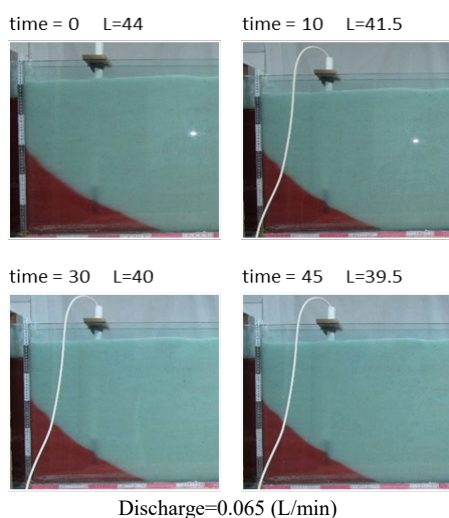


Fig. 7 return of salt water wedge until reaching a steady state with sealing wall.

شکل ۷ رفتار گذرای گُوه آب شور در حضور دیوار آب‌بند

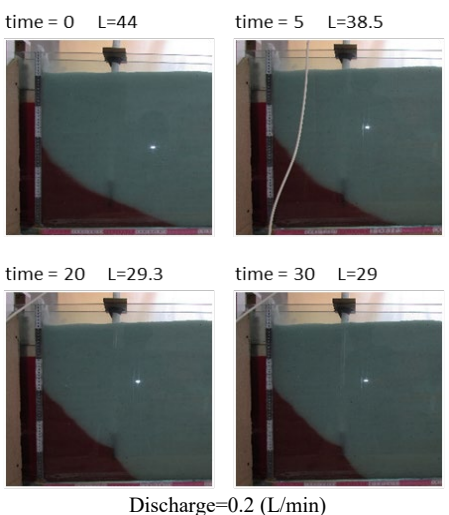
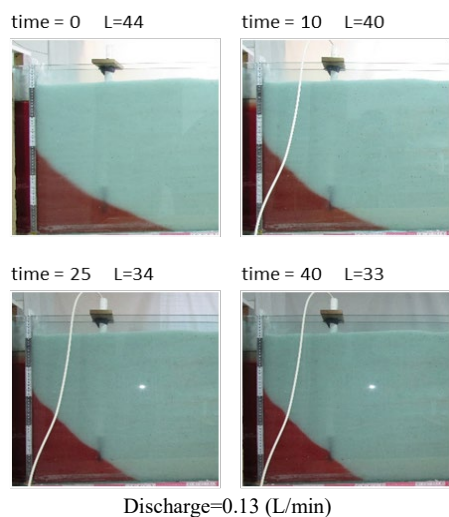


Fig. 8 return of salt water wedge until reaching a steady state with extraction well

شکل ۸ بازگشت گُوه آب شور در شرایط گذرا در حضور چاه برداشت

۳-۵- اثر توأم چاه برداشت و دیوار آب بند در کاهش هجوم آب شور

شایان یادآوری است، برای بررسی اثر ترکیبی بازدارنده‌ها، مقدار دبی تغذیه و دبی برداشت کمینه دبی استفاده شده در آزمایش‌ها یعنی ۰/۰۶۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد که نتایج برای میزان‌های بزرگتر دبی قابل تعمیم می‌باشد. برای بررسی تأثیر هم‌زمان دیوار آب‌بند و چاه برداشت در آغاز آزمایش هجوم در حضور دیوار آب‌بند انجام شد. در این شرایط طول پنجه گُوه آب شور نسبت به مرز آب شور ۳۸/۵ سانتی‌متر به دست آمد.

سپس چاه برداشت با دبی ۰/۰۶۵ لیتر بر دقیقه فعال شد. شکل ۹ تغییر پذیری‌های گُوه آب شور را با حضور دیوار آب‌بند و چاه برداشت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از گذشت حدود ۵۰ دقیقه از فعال‌سازی چاه برداشت، گُوه آب شور با طول پنجه‌ی ۳۳/۳ سانتی‌متر نسبت به مرز آب شور به حالت پایدار رسید. در نتیجه گُوه آب شور در مدل آزمایشگاهی به اندازه‌ی ۱۰/۷ سانتی‌متر عقب‌نشینی کرده که در حدود میزان ۲۴/۳٪ می‌باشد.

۳-۶- اثر توأم چاه تغذیه و دیوار آب بند در کاهش هجوم آب شور

در آغاز آزمایش هجوم در حضور دیوار آب‌بند انجام شد. در این شرایط فاصله پنجه گُوه نسبت به مرز آب شور ۳۸/۵ سانتی‌متر به دست آمد. سپس عمل تغذیه با تزریق آب شیرین آبی رنگ، با دبی ۰/۰۶۵ لیتر بر دقیقه آغاز شد. آب تغذیه شده، آغاز به حرکت در محیط متخلخل

از لحضه‌ی فعال شدن چاه برداشت و چاه تغذیه و تاثیر همزمان هر دو چاه با دبی یکسان 0.065 لیتر بر دقیقه می‌باشد. شکل ۱۱ بیانگر آن است که گوه آب شور پس از گذشت حدود ۳۵ دقیقه با طول پنجه‌ی $29/6$ سانتی‌متر به شرایط پیوسته‌ای رسید. در نتیجه گوه آب شور به اندازه‌ی $14/4$ سانتی‌متر نسبت به وضعیت هجوم و نفوذ آب شور (نبود بازدارنده‌ها) عقب‌نشینی کرده است. بنابراین تأثیرگذاری استفاده همزمان از چاه برداشت و چاه تغذیه با دبی 0.065 لیتر بر دقیقه در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور در حدود میزان $32/7\%$ می‌باشد. شکل ۱۲ نمودار تغییر پذیری‌های طول پنجه‌ی گوه آب شور را نسبت به زمان هنگام استفاده از چاه تغذیه و چاه برداشت به صورت جداگانه و به صورت ترکیبی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که استفاده همزمان چاه تغذیه و چاه برداشت تا حدود $22/15\%$ عملکرد بهتری از چاه برداشت به تنهایی داشته است، اما حدود $1/3\%$ عملکرد ضعیف‌تری نسبت به چاه تغذیه به تنهایی با دبی 0.065 لیتر بر دقیقه دارد. علت این عملکرد ضعیف‌تر را می‌تواند فاصله کم دو چاه از همدیگر با توجه به دبی چاه‌ها بیان کرد. چرا که آب تغذیه شده پس از مدتی به محل چاه برداشت رسیده و مقداری از حجم آب برداشت شده، از منبع‌های چاه تزریق انجام می‌شود. در نتیجه جریان تغذیه با شدت کمتری نسبت به شرایط چاه تغذیه‌ی جداگانه بر گوه آب شور اثر می‌گذارد. به عبارتی عمل شستشو و انتقال با شدت کمتری انجام گرفته و گوه آب شور نسبت به حالت چاه تغذیه جداگانه کوچک‌تر نمی‌شود. در این پژوهش اثر فاصله چاه‌ها از هم نیز بررسی شد. شکل ۱۳ نتایج گذرای فرآیند کاهش هجوم و نفوذ آب شور را در حضور چاه برداشت و چاه تغذیه در شرایطی که چاه برداشت و چاه تغذیه به ترتیب در فاصله ۱۰ سانتی‌متری و ۵۰ سانتی‌متری مرز آب شور قرار گرفته است (فاصله دو چاه از هم ۴۰ سانتی‌متر شده که نسبت به حالت پیش افزایش یافته است)، نشان می‌دهد. نتایج نشان داد پس از گذشت حدود ۶۰ دقیقه گوه آب شور با طول پنجه‌ی $28/5$ سانتی‌متر نسبت به مرز آب

مخزن جریان نمود. شکل ۱۰ تغییر پذیری‌های گوه آب شور را در حضور دیوار آب‌بند و چاه تغذیه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، گوه آب شور پس از گذشت حدود ۵۰ دقیقه از آغاز فرآیند تغذیه به حالت پایدار رسیده است. در شرایط پایدار، طول پنجه‌ی گوه 27 سانتی‌متر به دست آمد که نشان می‌دهد 17 سانتی‌متر عقب‌نشینی داشته است. بنابراین تأثیرگذاری استفاده همزمان از دیوار آب‌بند و چاه تغذیه در جلوگیری از هجوم آب شور در حدود به میزان $38/6\%$ می‌باشد.

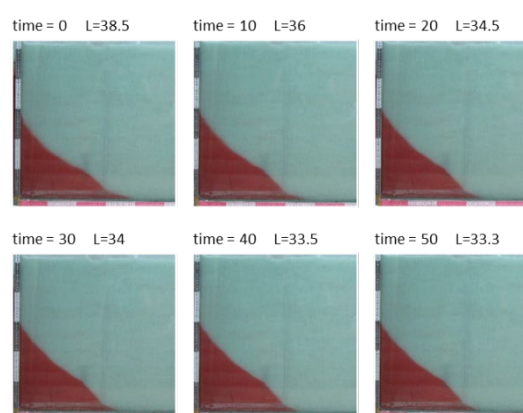


Fig. 9 salt water wedge until reaching a steady state with sealing wall and extraction well.

شکل ۹ رفتار گوه آب شور در شرایط گذرا در حضور دیوار آب‌بند و چاه برداشت.

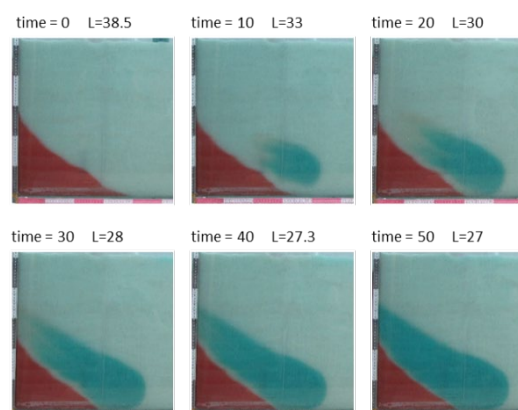


Fig. 10 salt water wedge until reaching a steady state with sealing wall and injection well.

شکل ۱۰ رفتار گوه آب شور در شرایط گذرا در حضور دیوار آب‌بند و چاه تغذیه.

۳-۷- اثرگذاری توأم چاه تغذیه و چاه برداشت در کاهش هجوم و نفوذ آب شور
شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی تغییر پذیری‌های گوه آب شور

و چاه تغذیه، در آغاز با حضور دیوار آب‌بند گوه آب شور با طول پنجه‌ی ۳۸/۵ سانتی‌متر نسبت به مرز آب شور به حالت پایدار رسید، سپس چاه برداشت و چاه تغذیه با میزان استخراج و میزان تغذیه ۰/۰۶۵ لیتر بر دقیقه فعال شدند. گوه آب شور آغاز به عقب‌نشینی کرده و پس از گذشت حدود ۳۰ دقیقه از فعال شدن چاه برداشت و چاه تغذیه با طول پنجه‌ی ۳۱ سانتی‌متر نسبت به مرز آب شور متوقف شد که نشان می‌دهد در شرایط پایدار گوه به اندازه‌ی ۱۳ سانتی‌متر عقب‌نشینی کرده است. شکل ۱۴ تغییرپذیری‌های گوه آب شور از لحظه‌ی فعال شدن چاه برداشت و چاه تغذیه را نشان می‌دهد. بنابراین اثر استفاده ترکیبی از دیوار آب‌بند و چاه برداشت و چاه تغذیه در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور حدود ۲۹٪/۵ می‌باشد. با مقایسه‌ی نمودار تغییرپذیری‌های طول پنجه‌ی گوه آب شور نسبت به زمان هنگام استفاده از دیوار آب‌بند و چاه برداشت و چاه تغذیه به صورت جداگانه و به صورت ترکیبی که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده ترکیبی از دیوار آب‌بند، چاه برداشت و چاه تغذیه عملکرد بهتری نسبت به دیوار آب‌بند و چاه برداشت داشته است اما نسبت به چاه تغذیه عملکرد ضعیف‌تری داشته است. جدول ۱ میزان تأثیر چاه برداشت و چاه تغذیه و دیوار آب‌بند و ترکیب آنها را بیان می‌کند.

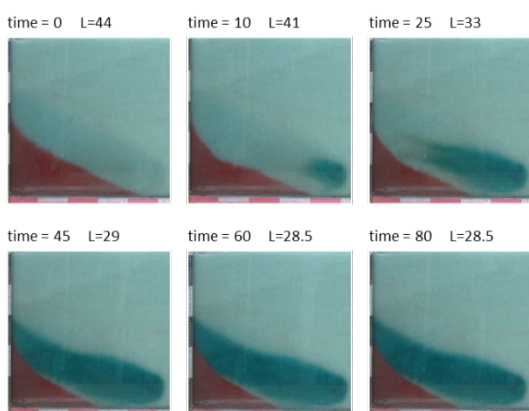


Fig. 13 salt water wedge until reaching a steady state with extraction well and injection well (distance of 10 and 50 cm respectively from the border of salt water).

شکل ۱۳ رفتار گوه آب شور در شرایط گذرا در حضور چاه برداشت و چاه تغذیه (با فاصله به ترتیب ۱۰ و ۵۰ سانتی‌متر از مرز آب شور).

شور به شرایط دائمی رسید. در نتیجه گوه آب شور به اندازه‌ی ۱۵/۵ سانتی‌متر عقب‌نشینی کرده است، بنابراین تأثیرگذاری استفاده هم‌زمان از چاه برداشت و چاه تغذیه با دبی ۰/۰۶۵ لیتر بر دقیقه در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور در حدود میزان ۳۵٪/۲ می‌باشد، که در مقایسه با اثر ترکیبی چاه برداشت در فاصله‌ی ۲۲ سانتی‌متر و چاه تغذیه در فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متری (وضعیت پیشین که فاصله دو چاه از هم ۱۸ سانتی‌متر بود) حدود ۲/۵٪ عملکرد بهتری داشته است.

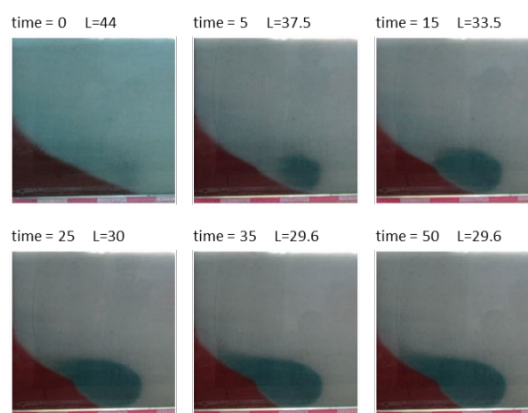


Fig. 11 salt water wedge until reaching a steady state with extraction well and injection well.

شکل ۱۱ رفتار گوه آب شور در شرایط گذرا در حضور چاه برداشت و چاه تغذیه.

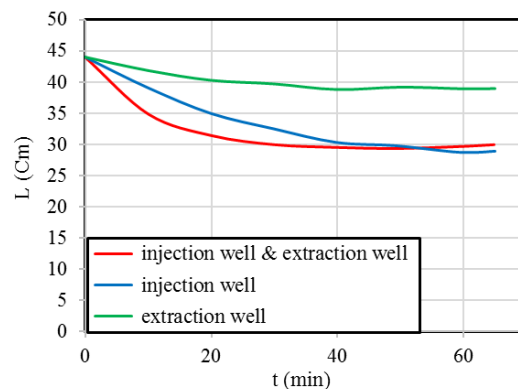


Fig. 12 claw return of salt water wedge until reaching a steady state with extraction well and injection well.

شکل ۱۲ نمودار بازگشت پنجه گوه آب شور در شرایط گذرا در حضور چاه برداشت و چاه تغذیه.

۳-۸- اثرگذاری توأم چاه تغذیه، چاه برداشت و دیوار آب‌بند در کاهش هجوم و نفوذ آب شور
برای بررسی اثرگذاری هم‌زمان دیوار آب‌بند و چاه برداشت

باشد اثرگذاری بهتری خواهد داشت. از سویی با فاصله گرفتن چاه تغذیه از کف آبخوان ضمن کاهش میزان عقب‌نشینی گُوه آب شور، مقداری آب شور قرمز رنگ در پایین قسمتی که آب شیرین به رنگ آبی تغذیه می‌شود محبوس شده و از گُوه آب شور که در حال عقب نشینی است جدا می‌شود.

(۲) با قرار دادن دیوار آب‌بند در فاصله ۲۹ سانتی‌متری از مرز آب شور و نفوذ آن تا عمق ۵۴ سانتی‌متری از لبه مدل آزمایشگاهی، یعنی هنگامی که حدود ۹۳٪ ضخامت آبخوان را پوشش داده است، میزان اثرگذاری دیوار آب‌بند در عقب راندن گُوه آب شور ۱۲٪/۵ خواهد بود.

(۳) چاه برداشت با دبی‌های مختلف ۰/۰۶۵، ۰/۱۱۳ و ۰/۲ به ترتیب به اندازه‌ی ۱۰/۲٪ و ۲۵٪ و ۳۳٪ و چاه تغذیه با همان دبی‌ها به ترتیب به میزان ۳۴/۰۹٪ و ۴۷/۷٪ و ۷۷/۹٪ در عقب راندن گُوه آب شور تأثیر گذار بوده‌اند.

(۴) مقایسه نتایج به دست آمده از اثر هر یک از روش‌ها به صورت منفرد نشان می‌دهد، استفاده از چاه تغذیه به مراتب اثرگذاری بهتری نسبت به دیوار آب‌بند و چاه برداشت به تنهایی داشته است.

(۵) با مقایسه اثر ترکیبی دیوار آب‌بند و چاه برداشت با حالت استفاده جداگانه هر یک از بازدارنده‌ها می‌توان نشان داد که روش ترکیبی دیوار آب‌بند و چاه برداشت به میزان ۱۱٪/۸ عملکرد بهتری نسبت به روش کاربرد دیوار آب‌بند و به مقدار ۱۴/۱٪ اثرگذاری بهتری نسبت به روش استفاده از چاه برداشت در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور دارد.

(۶) اثر ترکیبی دیوار آب‌بند و چاه تغذیه به ترتیب به میزان ۴/۵٪ و ۲۶٪ نسبت به چاه تغذیه و دیوار آب‌بند به تنهایی اثرگذاری بهتری در کاهش هجوم آب شور دارد.

(۷) استفاده هم‌زمان از چاه برداشت و چاه تغذیه در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور به میزان ۲۲/۵٪ عملکرد بهتری از چاه برداشت به تنهایی داشته، اما حدود ۱٪/۳ عملکرد ضعیف‌تری نسبت به چاه تغذیه به تنهایی در عقب راندن گُوه آب شور داشته است.

(۸) با مقایسه اثر ترکیبی هر سه بازدارنده با هر کدام از روش‌ها به صورت جداگانه، مشخص شد روش ترکیبی دیوار آب‌بند، چاه برداشت و چاه تغذیه به ترتیب به میزان ۱۷٪ و ۱۹/۳٪ نسبت به دیوار آب‌بند و چاه برداشت به صورت

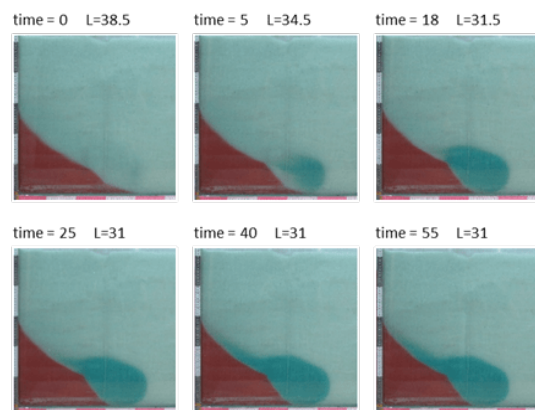


Fig. 14 salt water wedge until reaching a steady state with sealing wall, extraction well and injection well.

شکل ۱۴ گُوه آب شور تا رسیدن به حالت پایدار در حضور دیوار آب‌بند، چاه برداشت و چاه تغذیه.

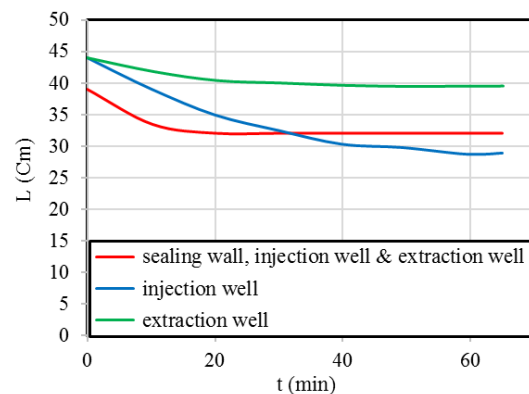


Fig. 15 claw return of salt water wedge until reaching a steady state with sealing wall, extraction well and injection well.

شکل ۱۵ بازگشت پنجه گُوه آب شور تا رسیدن به حالت پایدار حضور دیوار آب‌بند، چاه برداشت و چاه تغذیه.

۴- نتیجه‌گیری

پس از انجام آزمایش‌ها با پیش‌فرض‌های (سناریو) مختلف، در این بخش به جمع بندی نتایج و مقایسه عملکرد هر یک از روش‌های به کار برده شده برای کاهش هجوم و نفوذ آب شور پرداخته می‌شود.

(۱) در بررسی آزمایشگاهی تأثیر چاه تغذیه در جلوگیری از نفوذ آب شور نتایج شبیه‌سازی عددی محققان پیشین تایید شد. به عبارتی نتایج آزمایشگاهی ما نشان داد، هرچه دبی تغذیه بیشتر باشد سرعت پسروی و میزان عقب نشینی گُوه آب شور بیشتر خواهد بود و همچنین برای تأثیر بهتر چاه تغذیه در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور، هر چه چاه تغذیه به نوک پنجه گُوه آب شور و به کف آبخوان نزدیکتر

جدول ۱ تأثیر سناریو مختلف هجوم آب شور.

Table. 1 The effect of different scenarios of saltwater intrusion.

	Scenario of saltwater intrusion	Discharge (L/min)	The advance amount of salt water wedge	The reduction amount of salt water wedge	Percentage decrease (PR)
1		0.065	29	15	34
2	Presence of injection well	0.13	21	23	47.7
3		0.2	9.7	34.3	77.9
4		0.065	39.5	4.5	10.2
5	Presence of extraction well	0.13	33	11	25
6		0.2	29.7	14.3	33
7		-	38.5	5.5	12.5
8	(8.With injection well)	0.065	27	17	38.6
9	(9.With extraction well)	0.065	33.3	10.7	24.3
10	Presence of both injection and extraction wells	0.065	29.6	14.4	32.7
11	Presence of all three barriers	0.065	31	13	29.5

(2020). Underground barrier wall evaluation for controlling saltwater intrusion in sloping unconfined coastal aquifers. *Water*, 12(9), 2403. <https://doi.org/10.3390/w12092403>.

Basdurak, N.B., Onder, H. & Motz, L.H. (2007). Analysis of techniques to limit saltwater intrusion in coastal aquifers. In: World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat, 1-8. [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)177](https://doi.org/10.1061/40927(243)177)

Bear, J. & Cheng, A.H.D. (2010). Modeling groundwater flow and contaminant transport, Vol. 23, 89-103, Dordrecht, Springer.

Beheshti, J., Javadi, S., Hosseini, S.A. & Kardan Moghaddam, H. (2022). Evaluation of saline water intrusion treatment strategies using numerical simulation (Case study: Astaneh Kucheshfahan plain aquifer). *Iranian journal of Ecohydrology*, 9(1), 211-225. (In Persian)

Chang, Q., Zheng, T., Zheng, X., Zhang, B., Sun, Q. & Walther, M. (2019). Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater discharge. *Journal of Hydrology*, 576, 508-519.

Chang, S.W. & Clement, T.P. (2012). Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems. *Water Resources Research*, 48(9),

جداگانه در جلوگیری از هجوم و نفوذ آب شور عملکرد بهتری داشته است اما عملکرد آن‌ها نسبت به تأثیر چاه تغذیه جداگانه به میزان ۴/۵۹٪ ضعیف‌تر شده است.

۵- منابع‌ها

Abarca, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Capino, B., Gámez, D. & Batlle, F. (2006). Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water resources research*, 42(9), W09415. <https://doi.org/10.1029/2005WR004524>.

Abd-Elaty, I., Straface, S. & Kuriqi, A. (2021). Sustainable saltwater intrusion management in coastal aquifers under climatic changes for humid and hyper-arid regions. *Ecological Engineering*, 171, 106382. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106382>.

Abdoulhalik, A. & Ahmed, A.A. (2017). The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: Experimental and numerical study. *Journal of Environmental Management*, 199, 62-73.

Abdoulhalik, A., Ahmed, A. & Hamill, G.A. (2017). A new physical barrier system for seawater intrusion control. *Journal of Hydrology*, 549, 416-427.

Armanuos, A.M., Al-Ansari, N. & Yaseen, Z.M.

negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 95-105.

Rezapour A. & Saghravani S.F. (2016). The effect of changing the penetration angle of the sealing wall on the control of saltwater inflow in coastal aquifers. The second conference on environmental sciences, engineering and technologies, Tehran, Iran. (In Persian)

Shen, Y., Xin, P. & Yu, X. (2020). Combined effect of cutoff wall and tides on groundwater flow and salinity distribution in coastal unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, 581, 124444. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124444>.

Sriapai, T., Walsri, C., Phueakphum, D. & Fuenkajorn, K. (2012). Physical model simulations of seawater intrusion in unconfined aquifer. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 34(6), 679-687.

Werner, A.D. (2017). On the classification of seawater intrusion. *Journal of Hydrology*, 551, 619-631.

Werner, A.D., (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3-26.

Zang, Y. & Li, M. (2021). Numerical assessment of compressed air injection for mitigating seawater intrusion in a coastal unconfined aquifer. *Journal of Hydrology*, 595, 125964. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125964>.

Zohrabi Motlagh, A., Shahrbanouzadeh, M. & Mehdizadeh, S.S. (2021). Experimental Investigation on the Impact of Cutoff Wall on Seawater Recession in Coastal Aquifers Using Image Processing Technique. *Iran-Water Resources Research*, 17(3), 302-316. (In Persian)

W09527. <https://doi.org/10.1029/2012WR012134>.

Ebeling, P., Händel, F. & Walther, M. (2019). Potential of mixed hydraulic barriers to remediate seawater intrusion. *Science of the Total Environment*, 693, 133478. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.284>.

Hussain, M.S., Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A. & Sherif, M.M. (2019). Management of seawater intrusion in coastal aquifers: a review. *Water*, 11(12), 2467. <https://doi.org/10.3390/w11122467>.

Kaleris, V.K. & Ziogas, A.I. (2013). The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 476, 370-383.

Kuan, W.K., Jin, G., Xin, P., Robinson, C., Gibbes, B. & Li, L. (2012). Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers. *Water Resources Research*, 48(2), W02502. <https://doi.org/10.1029/2011WR010678>.

Lu, C., Shi, W., Xin, P., Wu, J. & Werner, A. D. (2017). Replenishing an unconfined coastal aquifer to control seawater intrusion: injection or infiltration?. *Water Resources Research*, 53(6), 4775-4786.

Luyun Jr., R., Momii, K. & Nakagawa, K. (2009). Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *Journal of Hydrology*, 377(3-4), 227-236.

Luyun Jr., R., Momii, K. & Nakagawa, K. (2011). Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion. *Groundwater*, 49(2), 239-249.

Moghri, P., Rezapour, M. & Rezapour, A. (2023). Laboratory study of the simultaneous effect of discharge well and cut of wall on reducing saltwater intrusion in coastal aquifers. *Journal of Marine Engineering*, 18(37), 79-88. (In Persian).

Pool, M. & Carrera, J. (2010). Dynamics of

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

