Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Vol. 20, No. 1, PP. 1-18, Spring 2025

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.419624.1680

Laboratory and Numerical Study of Saltwater Intrusion in Sandy Beach Aquifer Sloping under Transient Condition

Mohsen Azizi[1], Mohammad Hosein Najafimood[2], Abolfazl Akbarpour[3]*, Abbas Ali Rezapour[4]

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand.
2-Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand.
3- Professor, Department of Civil Engineering, University of Birjand.
4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology.

* **akbarpour@birjand.ac.ir**

Received: 6 October 2023
Accepted: 20 January 2024
Discussion: 22 June 2025

J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The phenomenon of saltwater advance in coastal aquifers is a global problem. Until now, most of the laboratory studies carried out regarding the advance of sea saltwater have considered the beach boundary as vertical, while the penetration and advance of saltwater from non-vertical beaches to coastal aquifers is a common phenomenon. Laboratory models can simulate the phenomenon of saltwater advancing on sloping beaches. This research expands the past research by building a 3D laboratory model and creating sloping beach conditions. The main purpose of this research is to explore the phenomenon of saltwater advance on a sloping beach in a laboratory and numerical 3D manner in permanent and non-permanent conditions. An image processing technique was used to analyze the images obtained from the progress of saltwater in the laboratory model. Validation of laboratory results was done with SEAWAT model.

Methodology: In this research, a laboratory model of a three-dimensional flow tank was built. The flow tank of this model included a central chamber containing the porous medium of the aquifer and two side chambers on the right and left side of the central chamber to adjust the saltwater and freshwater head. According to the purpose of this research, the grid plate on the saltwater side was connected to the bottom of the tank by a hinge to create a sloping beach. To create a porous medium, glass beads with a diameter of 1000 to 1200 microns and a specific weight of 2400 kg/m^3 were used (see Fig. 1). The experiments were conducted in three stages. The permanent condition of the first stage was used as the initial condition for the second stage of the experiment. In the second stage (advance stages), the level of freshwater in the left lateral chamber decreased and in the third stage (recede stages), the level of freshwater was returned to its original state. An image processing technique was also used to identify the behavior of saltwater advance in the porous medium and calculate the characteristics of the saltwater wedge. For all stages of the advance and recede experiments of the saltwater wedge, images of the flow tank were automatically taken at intervals of 60 seconds. The level curve with saltwater diluted by 50% was considered as the boundary of the mixing zone of salt-freshwater and determined the characteristics of the saltwater wedge. After obtaining the numerical value equivalent to saltwater with a concentration of 50% (Eq. 2) and the modified pixel values of each model image (Eq. 1), the contour of saltwater with a concentration of 50% was drawn in MATLAB software and the position of the saltwater wedge was determined. SEAWAT finite difference model has been

used to simulate the experiments performed in the laboratory model. The conceptual model and boundary conditions used to simulate the numerical model are shown in Fig. 3.

Results and Discussion: In this research, three indicators of length, height, and area of the saltwater wedge were considered as parameters representing the progress of the saltwater wedge. Pictures of laboratory observations and numerical model results of saltwater wedge advance and recede are shown in Figs. 4, 5, and 6. A good match between the laboratory observations and the simulation results of the numerical model can be observed. The reduction of the freshwater level at the beginning of the advanced stage of saltwater decreased the interaction forces exerted by the freshwater on the saltwater wedge. As a result, the wedge advanced into the laboratory model until reaching new equilibrium conditions (Fig. 5). On the other hand, in the third stage, with the increase in freshwater level, the interaction forces applied by the freshwater on the wedge increased and the wedge was pushed back towards the sea (Fig. 6).

To analysis the behavior of the saltwater wedge in the advance and recede stages, the relative displacement parameter of each index was used, which is a dimension less parameter and allows comparison independent of the unit and the total size of the change (Eq. 3). Fig. 8, shows that the toe length of wedge index reaches permanent conditions earlier in the recede phase of the wedge compared to the advancing time. This phenomenon was reported in experimental and numerical studies by Chang and Clement (2012), Lu and Werner (2013), Robinson et al., (2015), and Rezapour et al., (2018). However, the wedge height index reaches permanent conditions in both the advance and recede stages in an almost equal period. The value of each index over time and the relative changes of each index over time are displayed in a single Fig. 9. In the advancing stage, due to the decrease in the height of freshwater, the pressure field of freshwater decreases. Therefore, the salty waters are brought together. Due to the difference in density between saltwater and freshwater, as the depth of the interface increases, its advance rate increases in permanent conditions. As the rate of advance increases, the relative rate of advance decreases. Therefore, the height of the wedge, as the highest point of the interface, starts to move with the highest relative rate and reaches permanent conditions sooner. Accordingly, the toe wedge has the lowest relative displacement rate with the greatest advance.

Conclusion: The present study proposes and presents a three-step hybrid method (laboratory model, image processing, and numerical simulation) to analyze flow patterns with variable density in porous media. The height of the wedge reaches permanent conditions in both advance and recede stages in almost equal periods. But the toe length of the wedge reaches permanent conditions much earlier in the recede stages than in the advanced stages. During the intrusion of saltwater, the height of the wedge reaches a permanent condition much earlier than the toe and area of the wedge, but during the recede stages, all three indexes almost stop together. In addition to permanent conditions, the toe length index is also a suitable representative for expressing the amount of saltwater entering the coastal aquifer in transient conditions.

Keywords: Seawater, Physical Model, Image Processing Technique, SEAWAT.

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک
سال ۲۰، شماره ۱، صفحات ۱-۱۸، بهار ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2023.405101.1655

مطالعه آزمایشگاهی و عددی پیشروی آب شور در آبخوان ساحلی شنی شیبدار در شرایط گذرا

محسن عزیزی[۱]، محمد حسین نجفی مود[۲]، ابوالفضل اکبرپور[۳*]، عباسعلی رضاپور[۴]

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.
۳- استاد گروه مهندس عمران، دانشگاه بیرجند.
۴- استادیار گروه مهندس عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند.

* akbarpour@birjand.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: شناخت مسئله نفوذ آب شور در آبخوان های ساحلی، نقش موثری در مدیریت منابع آب زیرزمینی مناطق ساحلی دارد. مطالعات پیشین ضمن نادیده گرفتن سطح شیبدار ساحل که یک پدیده معمول در طبیعت است، مسئله پیشروی آب شور را بررسی کرده اند. در این تحقیق دینامیک گذرای پیشروی گوه آب شور دریا در سواحل شنی شیبدار از طریق مدل آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. مشاهدات آزمایشگاهی با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، تحلیل شدند. از کد عددی SEAWAT برای شبیه سازی نتایج آزمایشگاهی استفاده گردید. برای بررسی رفتار گوه آب شور در شرایط گذرا، تغییرات شاخص های طول پنجه، ارتفاع و مساحت گوه نسبت به زمان اندازه گیری شدند. نتایج نشان دادند که الف) نرخ نسبی تغییرات مساحت گوه در بیشتر اوقات با نرخ نسبی تغییرات پنجه گوه برابر است. لذا شاخص طول پنجه گوه نماینده مناسبی برای بیان میزان حجم آب شور هجوم آورنده به آبخوان ساحلی است. ب) در هنگام هجوم آب شور، شاخص ارتفاع گوه سریعتر از شاخص‌های پنجه و مساحت گوه به شرایط دائمی می رسد، اما در مرحله بازگشت هر سه شاخص تقریباً با هم متوقف می شوند. ج) شاخص ارتفاع گوه در هر دو مرحله پیشروی و بازگشت در مدت زمان تقریباً برابری به شرایط دائمی می رسد. اما شاخص طول پنجه گوه در مرحله بازگشت نسبت به مرحله پیشروی خیلی زودتر به شرایط پایدار می رسد. د) در شرایط گذرا با نوسان سطح آب شیرین آبخوان، میزان پیشروی گوه آب شور در شیبهای تندتر بیشتر از شیب های ملایم است.

کلید واژگان: آب دریا، مدل فیزیکی، تکنیک پردازش تصویر، SEAWAT.

۱- مقدمه

پدیده پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی مسئله‌ای جهانی است (Petalas et al., 2009). در آبخوان‌های ساحلی، به طور معمول گرادیان هیدورلیکی به طرف دریا می‌باشد، که این سبب جریان آبهای شیرین به سمت دریا می شود (Bear and Cheng, 2010). از آنجا که آب شور دریا در مجاورت آبخوان‌های ساحلی قرار دارد، تداخل آب شیرین (با چگالی کمتر) با آب شور (با چگالی بیشتر) سبب پیشروی آب شور دریا به سمت آبخوان ساحلی می‌شود و گوه‌ای از آب شور در عمق آبخوان ایجاد می‌کند. (Chang and Clement, 2012; kuan et al., 2012).

بسیاری از آبخوان‌های ساحلی به دلیل افزایش تقاضای آب شیرین و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و عامل‌های دیگر در معرض پیشروی آب شور قرار گرفته‌اند (Faal et al., 2021). امروزه مدیریت بهینه در بهره‌برداری از منابع آب، از جمله مهم‌ترین اصول چالشی در مدیریت منابع آب برای رسیدن به توسعه پایدار است (Guo et al., 2019). پیشروی آب شور می‌تواند به عواملی مانند تفاوت میزان تغذیه و تخلیه، ساختار زمین شناسی آبخوان، ویژگی‌های هیدرودینامیکی و عدم تعادل شرایط حاکم بر

آبخوان، نسبت داده شود. بررسی هر یک از عامل‌های یاد شده بر پیشروی آب شور در شرایط واقعی، امری بسیار دشوار و ناممکن است، به همین دلیل از مدل‌های فیزیکی و عددی به عنوان یک راه حل که به راحتی این عامل‌های را به هم مرتبط می‌سازند، استفاده می‌شود (Barlow and Reichard, 2010). در دهه‌های گذشته از مدل‌های عددی FEFLOW، FEMWATER، SUTRA و SEAWAT برای شبیه‌سازی فرایند پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی استفاده شده است. Goswami and Clement (2007)، Voss and Provost (2010)، Rezapour et al. (2018) و Ketabchi et al. (2010) در بررسی‌های خود از مدل عددی SUTRA استفاده کردند.

Guo and Bennett (1998)، Abd-Elhamid and Javadi (2011)، Abdoulhalik et al. (2022)، Mehdizadeh et al. (2020)، Vafaei and Abdolghasemi (2013) و Nasiri et al. (2020) در تحقیقات خود از مدل عددی SEAWAT استفاده کردند. همچنین Dalai et al., (2020) و Dalai and Dhar (2023) مدل عددی FEFLOW را به‌کار بردند و مدل FEMWATER توسط Lin et al. (1997) به‌کار گرفته شد.

Goswami and Clement (2007)، Chang and Clement (2012)، Shen et al. (2015)، Rezapour et al. (2018)، Mehdizadeh et al. (2018, 2020)، Yu et al. (2019)، Guo et al. (2019)، Rabbaniha et al. (2020) و Zohrabi Motlagh et al. (2021) پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی را توسط مدل‌های آزمایشگاهی با ساحل‌های شیب ثابت بررسی و ارزیابی کردند. Goswami and Clement (2007) تاثیر تغییر سطح آب زیرزمینی ناشی از پمپاژ آب از چاه را بر رفتار پیشروی گوه آب شور در آبخوانی با سیستم هد کنترل شده، بررسی کردند. Chang and Clement (2012) از طریق مدل آزمایشگاهی مجهز به سیستم کنترل دبی، به پژوهش درباره تاثیر تغییر جریان آب زیرزمینی بر پیشروی و بازگشت گوه آب شور پرداختند. Shen et al. (2015) تاثیر نوسان شرایط مرزی ساحل دریا ناشی از جزر و مد آب دریا بر پیشروی آب شور را در یک مدل آزمایشگاهی دارای شرایط ایجاد مرداب بررسی و ارزیابی کردند. Rezapour et al. (2018) پدیده پیشروی آب شور را در یک مدل آزمایشگاهی (دو بعدی) با استفاده از روش فنی پردازش تصویر و مدل SUTRA بررسی کرده‌اند. Mehdizadeh et al. (2018) در تحقیقی به بررسی میزان پیشروی آب شور دریا به سمت آبخوان‌های آزاد ساحلی در اثر تغییر ناگهانی سطح آب در مرز دریا و مرز خشکی با مدل آزمایشگاهی و عددی پرداختند. Yu et al. (2019) به پژوهشی درباره فرایند پیشروی و برگشت گوه آب شور در آبخوان‌های ساحلی از طریق مدل آزمایشگاهی (دو بعدی) پرداختند. در تحقیق دیگری Guo et al. (2019) اثرگذاری نوسان سطح آب دریا و پمپاژ آب زیرزمینی از آبخوان ساحلی را بر پیشروی آب دریا در آبخوان چند لایه ساحلی بررسی کردند. Rabbaniha et al. (2020) با ساخت مدل فیزیکی میزان پیشروی آب شور و شیرین کم عمق را در ناحیه اشباع و غیر اشباع را بررسی کردند. Zohrabi Motlagh et al. (2021) در تحقیقی تاثیر ایجاد دیوار آب بند بر کاهش نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. Mehdizadeh et al. (2020) در تحقیق دیگری تاثیر تغذیه مصنوعی آب شیرین در کاهش پیشروی آب شور در آبخوان‌های آزاد ساحلی را با استفاده از مدل فیزیکی و عددی شبیه‌سازی کردند.

به طور کلی Schotting et al. (1997)، Watson et al. (2002) و Flowers and Hunt (2007) با آزمایش‌های یک بعدی، Goswami and Clement (2007)، Zhang et al. (2002)، Konz et al. (2008) و Rezapour et al. (2018) با آزمایش‌های دو بعدی و Mehdizadeh et al. (2018, 2020) و Rabbaniha et al., (2020) با آزمایش‌های سه بعدی (مرز ساحل عمودی) فرایند پیشروی آب شور در محیط‌های متخلخل را بررسی کرده‌اند.

مرور بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد، در بیشتر آن‌ها، ارزیابی‌های آزمایشگاهی انجام شده تاکنون در زمینه پیشروی آب شور دریا، مرز ساحل شیبدار درنظر گرفته نشده است، درصورتی‌که نفوذ و پیشروی آب شور از ساحل‌های غیرعمودی به آبخوان‌های ساحلی یک پدیده

رایج است. با این حال، هیچ پژوهش تجربی سه بعدی (3D) در مقیاس آزمایشگاهی پدیده پیشروی آب شور را در شرایط با ساحل شیبدار بررسی نکرده است.

در این تحقیق، با ساخت مدل آزمایشگاهی سه بعدی و ایجاد شرایط ساحل شیبدار و با کمک پردازش تصویر و مدل عددی، پدیده پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی شیبدار در شرایط دائمی و غیر دائمی بررسی شد. به منظور تجزیه و تحلیل تصویرهای گرفته شده از روند پیشروی آب شور در مدل آزمایشگاهی از روش فنی پردازش تصویر استفاده شد. اعتبار سنجی نتایج آزمایشگاهی با مدل SEAWAT انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق، مدل آزمایشگاهی از یک مخزن جریان سه بعدی با ابعاد طولی ۱۴۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۵ سانتی‌متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر ساخته شد. مخزن جریان این مدل شامل یک محفظه مرکزی به طول ۱۱۰ سانتی‌متر شامل محیط متخلخل آبخوان (Zone B) است و به منظور ایجاد شرایط مرزی دو محفظه جانبی به طول ۱۵ سانتی‌متر در سمت راست و چپ محفظه مرکزی به ترتیب برای تنظیم هد آب شور (Zone C) و هد آب شیرین (Zone A) دارد. به منظور ایجاد شرایط تصویربرداری از فرایند پیشروی آب شور صفحه جلو و عقب این مخزن از شیشه شفاف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شد. دیواره‌های جانبی این مخزن از ورق‌های فلزی گالوانیزه به ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شد. در هریک از محفظه‌های جانبی لوله گالوانیزه $^{3}/_{4}$ اینچ برای ورود آب شور و شیرین به محفظه های جانبی تعبیه شد. همچنین به منظور تنظیم تراز آب شور و شیرین در محفظه‌های جانبی (ایجاد شرایط مرزی مورد نظر) یک لوله گالوانیزه با اندازه $^{3}/_{4}$ اینچ که قسمت بالای آن حدیده شده، در کف محفظه‌های جانبی تعبیه شد. به جهت استحکام مخزن جریان و تحمل وزن محیط متخلخل اشباع در مدت آزمایش، کل مخزن به وسیله یک قاب فلزی مهار شد. محیط متخلخل از محفظه‌های جانبی با صفحات مشبک فلزی با ضخامت ۸ میلی‌متر جدا شد. سوراخ های ۲ میلی‌متری صفحه‌های مشبک توسط توری ریز پوشیده شد تا ضمن عبور جریان از صفحه مشبک از ورود دانه‌های محیط متخلخل به محفظه‌های جانبی جلوگیری کند. با توجه به هدف این تحقیق بررسی پیشروی آب شور دریا در ساحل‌های شیبدار بود، صفحه مشبک سمت آب شور به منظور ایجاد ساحل شیبدار

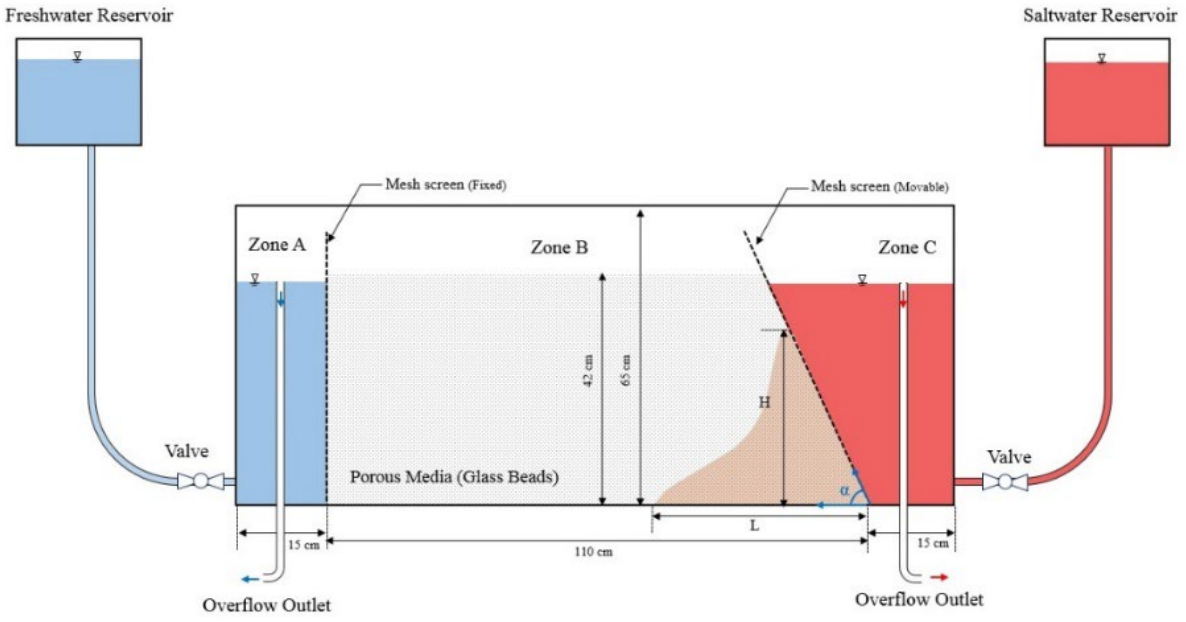

Fig. 1 Schematic image of the laboratory model

شکل ۱ نمای کلی مدل آزمایشگاهی

مقدار متوسط تخلخل دانه‌های شیشه ای از هر دو روش حجمی و وزنی ۰/۳۸۵ محاسبه شد. آب شیرین مورد نیاز توسط لولا به کف مخزن متصل شد. برای ایجاد محیط متخلخل از دانه‌های شیشه‌ای در محدوده قطر ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ میکرون با وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب (تهیه شده شرکت دانه‌های شیشه‌ای ایران بیدز) استفاده شد. نمای کلی از مدل آزمایشگاهی این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است.

آزمایش از شبکه آب آشامیدنی شهری با جرم حجمی ۹۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تامین شد. محلول آب شور با حل کردن ۳۵ گرم نمک دریا در یک لیتر آب آشامیدنی به دست آمد. از رنگ مایع خوراکی قرمز برای تمایز آب شور از آب شیرین در تصویربرداری از فرایند پیشروی آب شور استفاده شده است. رنگ مایع خوراکی قرمز با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به محلول آب شور اضافه شده و با همزدن توزیع یکنواخت محلول آب شور رنگی به دست آمده است. در انتخاب محلول رنگی سعی شد که سه ویژگی دارا بودن چگالی تاحدودی مشابه با آب شور، قابلیت انحلال مناسب در آب و نداشتن چسبیدگی به ذرات محیط متخلخل در نظر گرفته شود. رنگ مایع خوراکی در بررسی‌های Goswami and Clement (2007)، Chang and Clement (2012)، Oz et al. (2014)، Rezapour et al. (2018) و Mehdizadeh et al. (2018, 2020) با موفقیت به‌کار گرفته شده است. جرم حجمی آب شور رنگ شده توسط ترازوی دیجیتال ۱۰۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه گیری شد. هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل با روش اندازه‌گیری در محل، مشابه روش توصیف شده در منبع‌های علمی از جمله بررسی‌های Goswami and Clement (2007) و Oostrom et al., (1992) تحت گرادیان‌های مختلف اندازه‌گیری شد، که پس از میانگین‌گیری، میزان ۳۳ سانتی‌متر در دقیقه برآورد شد.

۲-۲- فرایند آزمایش

پیش از آغاز آزمایش، دانه‌های شیشه‌ای در شرایط به کلی اشباع، در لایه های ۵ سانتی‌متری به درون محفظه مرکزی ریخته شدند و به صورت یکنواخت متراکم شدند؛ با این کار ضمن توزیع یکنواخت دانه‌ها، حباب‌های هوای محبوس بین دانه‌ها از محیط متخلخل خارج شدند. در شرایطی که محیط متخلخل از آب شیرین به کلی اشباع بود، سطح آب در محفظه جانبی چپ مدل (آب شیرین) توسط لوله زهکش قائم خروجی روی تراز ۴۰/۵ سانتی‌متر تنظیم شد. همچنین تراز آب در محفظه جانبی سمت آب شور توسط لوله زهکش قائم خروجی روی تراز ۳۷/۴ سانتی‌متر تنظیم و ثابت شد. به منظور رسیدن مدل به شرایط دائمی، آب شیرین از پایین محفظه جانبی سمت چپ تزریق شد تا ضمن تثبیت هد در تراز ۴۰/۵ سانتی‌متری در این محفظه، جریان از درون محیط متخلخل عبور کند و از محفظه سمت راست که تراز آن در ۳۷/۴ سانتی‌متری ثابت شده بود سرریز کند.

پس از رسیدن جریان به شرایط دائمی، آب شور از پایین به محفظه جانبی سمت راست تزریق شد. آب شور با چگالی بالا به سرعت جایگزین آب شیرین در سرتاسر محفظه سمت راست شد و مازاد آن از تراز ۳۷/۴ سانتی‌متری توسط لوله زهکش قائم خروجی تعبیه شده در این محفظه سرریز می‌شد. با جایگزینی آب شور در محفظه سمت راست، فرایند هجوم آب شور با تشکیل گوه آب شور در محیط متخلخل محفظه مرکزی آغاز شد. با گذشت زمان، گوه آب شور پیشروی کرد تا اینکه جریان به شرایط پایدار رسید. گوه آب شور با گذشت ۱۵ دقیقه در محیط متخلخل دوباره پیشروی نکرد (مرحله اول آزمایش-SS1). سپس تراز آب شیرین به صورت لحظه‌ای در محفظه سمت راست از ۴۰/۵ سانتی‌متر به ۳۹/۵ سانتی‌متر کاهش یافت. همان‌طور که انتظار می‌رفت، گوه آب شور دوباره آغاز به پیشروی کرد و تا رسیدن به شرایط دائمی جدید پیشروی آن ادامه یافت (مرحله دوم آزمایشSS2). در مرحله آخر آزمایش تراز آب شیرین دوباره به صورت لحظه‌ای به ۴۰/۵ سانتی‌متر افزایش یافت. در نتیجه گوه آغاز به بازگشت به سمت دریا کرد تا اینکه به شرایط دائمی رسید و پسروی گوه آب شور متوقف شد. (مرحله سوم آزمایش-SS3).

۲-۳- پردازش تصویر

در این تحقیق برای شناسایی رفتار پیشروی آب شور در محیط متخلخل و محاسبه ویژگی‌های گوه آب شور از روش فنی پردازش تصویر استفاده شد. طی سالیان اخیر، محققان زیادی از روش فنی پردازش تصویر به عنوان یک روش برای اندازه‌گیری در مدل‌های آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند (Dalai et al., 2020; Dalai and Dhar, 2023; Rezapour et al., 2018; Catania et al., 2008; Jaeger et al.,2009; Oates and Harvey, 2006; Olsson and Grathwohl, 2007; Werth et al., 2010; Zinn et al., 2010; Robinson et al., 2015).

در این تحقیق برای ضبط و ثبت فرایند هجوم آب شور در محفظه مرکزی از دوربین عکاسی دیجیتال PENTAX با تفکیک‌پذیری (رزولوشن) ۶۰۰۰×۳۳۶۸ پیکسل که دارای قابلیت عکس برداری در فاصله‌های زمانی مشخص بود، استفاده شد. تصویربرداری از مخزن جریان در همه مرحله‌های آزمایش با فاصلهٔ زمانی ۶۰ ثانیه به‌صورت خودکار انجام شد. فاصله دوربین از مدل آزمایشگاهی و دیگر پارمترهای دوربین به گونه ای تنظیم شدند که مرز ناحیه پیشروی گوه آب شور به خوبی قابل شناسایی باشد، همچنین باکس های شیشه ای محیط متخلخل (دانه های شیشه‌ای) با غلظت آب شور مشخص (میزان رقت ۵٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) نیز مشاهده شوند (شکل ۴)، بنابراین دوربین در فاصله ۱/۵ متری مدل آزمایشگاهی قرار گرفت. در این تحقیق برای پردازش تصویرهای گرفته شده از فرایند پیشروی و بازگشت گوه آب شور مرحله‌های زیر انجام شد:

گام اول:

از آنجا که رنگ محلول آب شور قرمز می‌باشد، استخراج ناحیه پیشروی گوه آب شور به راحتی تفکیک‌پذیر است. همچنین تصویرهای گرفته شده توسط دوربین، حاوی بخش‌هایی غیر از محفظه اصلی جریان است که باید پیش از هرگونه پردازش حذف شوند. بنابراین تصاویر خام تصحیح و تراز شدند.

گام دوم:

پس از تحلیل اولیه تصویرها در نرم افزار MATLAB مشاهده شد که تصویرها به‌دست آمده از بین سه رنگ اصلی قرمز (R)، سبز (G) و آبی (B)، به شدت تحت تاثیر رنگ سبز (G) است. با بررسی مقدارهای عددی رنگ سبز پیکسل همه تصویرها در نرم افزار MATLAB مقداری نویز در توزیع رنگ سبز تصویرها مشاهده شد، که با اعمال میانگین همسایگی برابر رابطه (۱) روی مقدارهای عددی پیکسل‌های هر تصویر در نرم‌افزار MATLAB این نویز تا حدودی کاهش یافته و مقدارهای عددی رنگ سبز هر پیکسل تصویر اصلاح شد.

(1)

$$C^{G}_{i,j} = \frac{(D^{G}_{i-1,j+1} + D^{G}_{i-1,j} + D^{G}_{i-1,j-1} + D^{G}_{i,j+1} + D^{G}_{i,j} + D^{G}_{i,j-1} + D^{G}_{i+1,j+1} + D^{G}_{i+1,j} + D^{G}_{i+1,j-1})}{9}$$

در رابطه (۱)، $C^{G}_{i,j}$ مقدارهای عددی رنگ سبز اصلاح شده هر پیکسل تصویر اولیه در موقعیت مکانی i و j، $D^{G}_{i,j}$ مقدارهای شدت رنگ سبز هر پیکسل در تصویر اولیه در موقعیت مکانی i و j است.

گام سوم:

بنا بر نتایج تحقیقات انجام شده در سالهای گذشته توسط Dalai et al. (2020)، Dalai and Dhar (2023)، Rezapour et al. (2018) و Robinson et al. (2015)، این تحقیق منحنی تراز با آب شور رقیق شده را به میزان ۵۰٪ به عنوان مرز ناحیه اختلاط آب شور و شیرین و تعیین ویژگی‌های گوه آب شور (طول، ارتفاع و مساحت) در نظر گرفت. به منظور ترسیم خطوط هم‌تراز (کانتور) هم غلظت گوه آب شور ۵ عدد محفظه شیشه‌ای به ابعاد طولی ۱۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر ساخته شد. با استفاده از روش رقیق سازی، محلول آب شور با غلظت‌های رقیق شده ۵٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۹۵٪ تهیه و به همراه دانه‌های شیشه‌ای در هر محفظه ریخته شد. محفظه‌های شیشه‌ای در قسمت پایین محفظه مرکزی مدل طوری جای‌گذاری شد که این محفظه‌ها نیز در همه تصویرهای گرفته شده از مدل دیده شود (شکل۲).

با اعمال رابطه (۱) در مقدار عددی رنگ سبز پیکسل‌های محدوده باکس با رقت ۵۰٪ در نرم افزار MATLAB، مقدار عددی شدت رنگ سبز هر پیکسل $(\mathbf{C_{i,j}^{G50\%}})$ اصلاح و تعیین شد. آن‌گاه برابر رابطه (۲) با میانگین‌گیری مقدارهای اصلاح شده، مقدار عددی متناظر با آب شور با رقت ۵۰٪ به‌دست آمد.

$$\mathbf{C^{50\%}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{MN}} \sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{N}} \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{M}} \mathbf{C_{i,j}^{G50\%}} \quad (2)$$

در رابطه بالا M و N به ترتیب شمار پیکسل در جهت i و j تصویر، $\boldsymbol{C_{i,j}^{G50\%}}$ مقدار عددی اصلاح شده شدت رنگ سبز هر پیکسل در موقعیت مکانی i و j و $\boldsymbol{C^{50\%}}$ مقدار عددی معادل شوری با رقت ۵۰٪ است.

گام چهارم:

پس از به‌دست آوردن مقدار عددی معادل آب شور با غلظت ۵۰٪ $(\boldsymbol{C^{50\%}})$ و مقدارهای اصلاح شده پیکسل هر تصویر مدل در هر مرحله زمانی $(\boldsymbol{C_{i,j}^{G}})$، در نرم افزار MATLAB منحنی هم میزان غلظت آب شور با رقت ۵۰٪ رسم شد. پس از ترسیم منحنی مورد نظر، موقعیت پنجه و ارتفاع گوه آب شور تعیین شد.

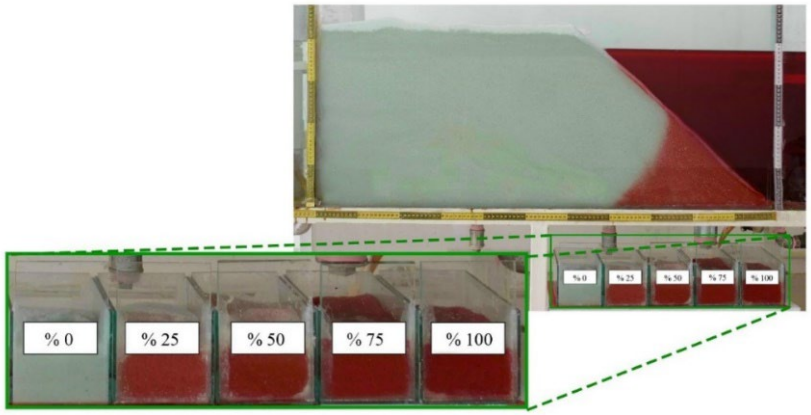

Fig. 2 Laboratory model with porous medium boxes with specific saltwater concentration

شکل ۲ تصویر مدل آزمایشگاهی به همراه محفظه های محیط متخلخل با غلظت آب شور مشخص

۲-۴ – شبیه سازی عددی

در این تحقیق برای شبیه‌سازی آزمایش‌های انجام شده در مدل آزمایشگاهی از مدل تفاضل محدود SEAWAT استفاده شده است. در این مدل، معادله جریان آب زیرزمینی توسط نرم افزار MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) و معادله پخش و انتقال آلاینده توسط نرم افزار MT3DMS (Zheng and Wang, 1999) حل می‌شود که در واقع این مدل با جفت‌وجور (کوپل) کردن این دو معادله توسط ترم چگالی به پیش بینی تراز جریان و غلظت آلاینده می‌پردازد. جزئیات معادله‌های بیان شده و چگونگی گسسته‌سازی و حل در بسیاری از مرجع‌های ذکر شده است و در اینجا از تکرار آن خودداری می‌شود. در سالهای اخیر از مدل SEAWAT برای شبیه‌سازی پیشروی آب شور استفاده شده است (Koen and Pieter, 2017; Antoifi and Ashraf, 2018; Noorabadi et al., 2017; Abdelgawad et al., 2018; Abdoulhalik and Ahmed, 2017; Goswami and Clement, 2007).

در این تحقیق برای استفاده از مدل SEAWAT، از بسته نرم‌افزاری GMS که واسط نگاره‌ای (گرافیکی) و به عنوان پیش‌پرداز و پس‌پرداز چندین مدل آب زیرزمینی است بهره گرفته شد.

در انتخاب ابعاد شبکه مدل عددی به دلیل موثر بودن ابعاد در دقت شبیه سازی از معیار عدد پکلت کمتر از ۴ استفاده شده است (Voss and Souza, 1987). برابر این رابطه ابعاد سلول‌های شبکه در راستای طول و ارتفاع مدل برابر ۰/۵ سانتی‌متر (ΔX=ΔZ=0.5cm) لحاظ شده و عرض مدل نیز به ۸ ردیف با ضخامت ۵ سانتی‌متر (ΔY=5cm)تقسیم شد. مدل مفهومی و شرایط مرزی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مدل عددی در شکل ۳ آمده است.

مقدار گام زمانی برای هر سه مرحله شبیه‌سازی Δt =1sec تنظیم شد. خلاصه‌ای از متغیرهای استفاده شده در مدل SEAWAT برای شبیه‌سازی مشاهده‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ خلاصه ای از متغیرهای وارده شده به مدل عددی
Table1 Summary of the Numerical simulation parameters

Input parameters	value	Unit
Domain length	110	cm
Domain height	42	cm
Domain width	40	cm
Hydraulic conductivity	33	cm/min
Longitudinal dispersivity	0.1	cm
Transversal dispersivity	0.01	cm
Freshwater density	998	Kg/m^3
Saltwater density	1024	Kg/m^3
Saltwater concentration	35	Kg/m^3
Porosity	0.385	-
Saltwater level	37.4	cm
Freshwater level	40.5 and 39.5	cm

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق سه شاخص طول، ارتفاع و مساحت گوه آب شور بر اساس خط هم‌تراز غلظت آب شور ۵۰٪ به عنوان شاخص‌های معرف پیشروی گوه آب شور لحاظ شد. به منظور تجزیه و تحلیل رفتار پیشروی و پسروی گوه آب شور در آبخوان‌های ناحیه‌های ساحلی از مدل آزمایشگاهی، روش فنی پردازش تصویر و شبیه‌سازی عددی مشاهده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. همان‌طور که بیشتر بیان شد آزمایش‌ها در سه مرحله انجام شد. به علت نادیده گرفتن تاثیر شرایط مرزی در آغاز مرحله اول آزمایش (SS-1)، هجوم آب شور در این مرحله بررسی نشد. تنها از شرایط دائمی مرحله اول به عنوان شرط اولیه برای مرحله دوم آزمایش(SS-2) یا پیشروی گوه استفاده شد. در مرحله دوم، تراز آب شیرین در محفظه جانبی سمت چپ از ۴۰/۵ سانتی‌متر به ۳۹/۵ سانتی‌متر کاهش یافت و در مرحله سوم (SS-3) یا مرحله پسروی گوه، تراز آب شیرین دوباره به وضعیت اول خود، یعنی تراز ۴۰/۵ سانتی‌متر، برگشت داده شد. تصویرهایی از مشاهده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی از پیشروی و بازگشت گوه آب شور در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. خط هم‌تراز آب شور با غلظت ۵۰٪ در تصویرهای شبیه سازی مدل عددی با خط تیره مشکی و در تصویرهای مشاهدات آزمایشگاهی خط هم‌تراز بالا که توسط روش فنی پردازش تصویر به دست آمده با خط زرد مشخص شده است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که بین مشاهده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی مدل عددی سازگاری خوبی وجود دارد. هر چند نتایج مدل عددی، انحنای بیشتر مرز مشترک آب شور و شیرین را نسبت به مشاهدات آزمایشگاهی، به ویژه در نزدیکی مرز دریا نشان می‌دهند.

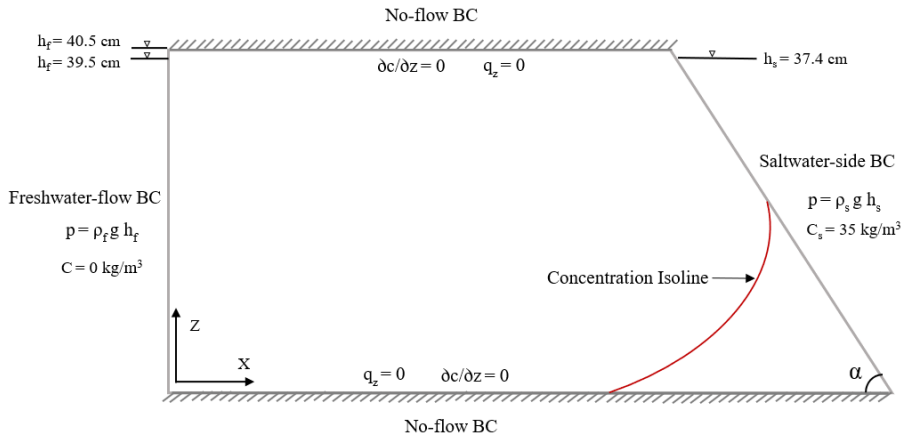

Fig. 3 Conceptual model and boundary conditions used to simulate the numerical model
شکل ۳ مدل مفهومی و شرایط مرزی مورد استفاده برای شبیه سازی مدل عددی

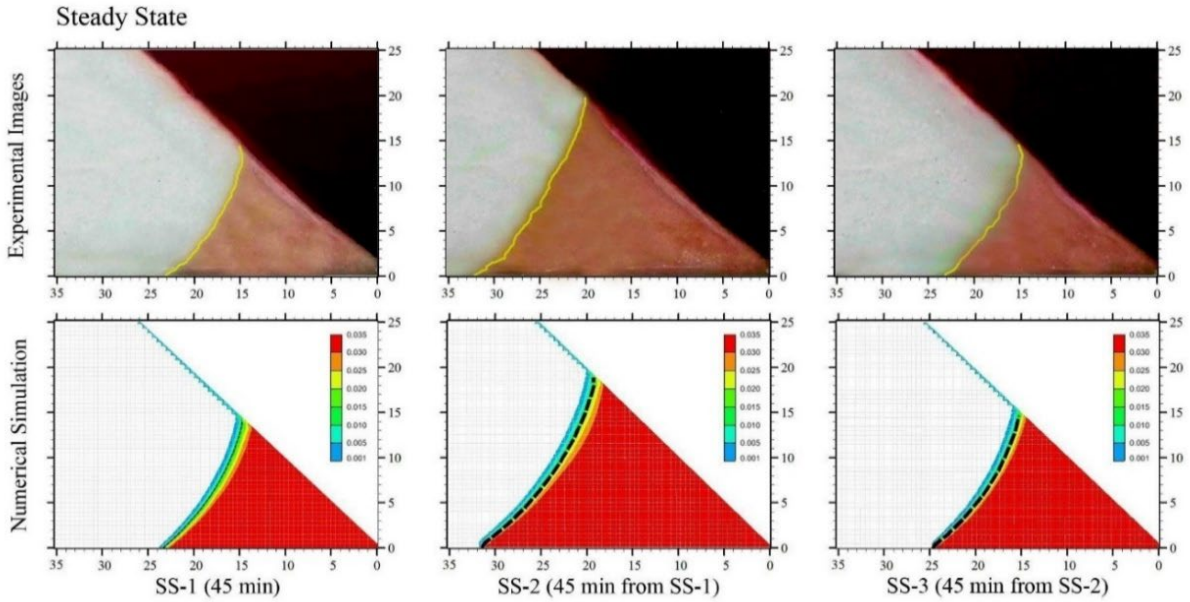

Fig. 4 Laboratory experiments and numerical simulations of Steady Sate

شکل ۴ مشاهده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در شرایط پایدار

Robinson et al., (2015) علت خطی‌تر بودن سطح مشترک در مدل‌های آزمایشگاهی نسبت به مدل‌های عددی را، وجود ناهمگنی‌های جزئی در محیط متخلخل (تغییرپذیرهای جزئی در اندازه و شکل ذرات) بیان کردند. برابر شکل ۵، کاهش تراز آب شیرین در آغاز مرحله پیشروی آب شور باعث کاهش نیروهای اندرکنشی اعمال شده از طرف آب شیرین بر گوه آب شور شد؛ در نتیجه تعادل موجود در سیستم مدل آزمایشگاهی به هم خورد و گوه تا رسیدن به شرایط تعادل جدید به درون مدل آزمایشگاهی پیشروی کرد. در مقابل در مرحله سوم با افزایش تراز آب شیرین، نیروهای اندرکنشی اعمال شده از طرف آب شیرین بر گوه افزایش یافت و گوه به سمت دریا عقب رانده شد (شکل ۶).

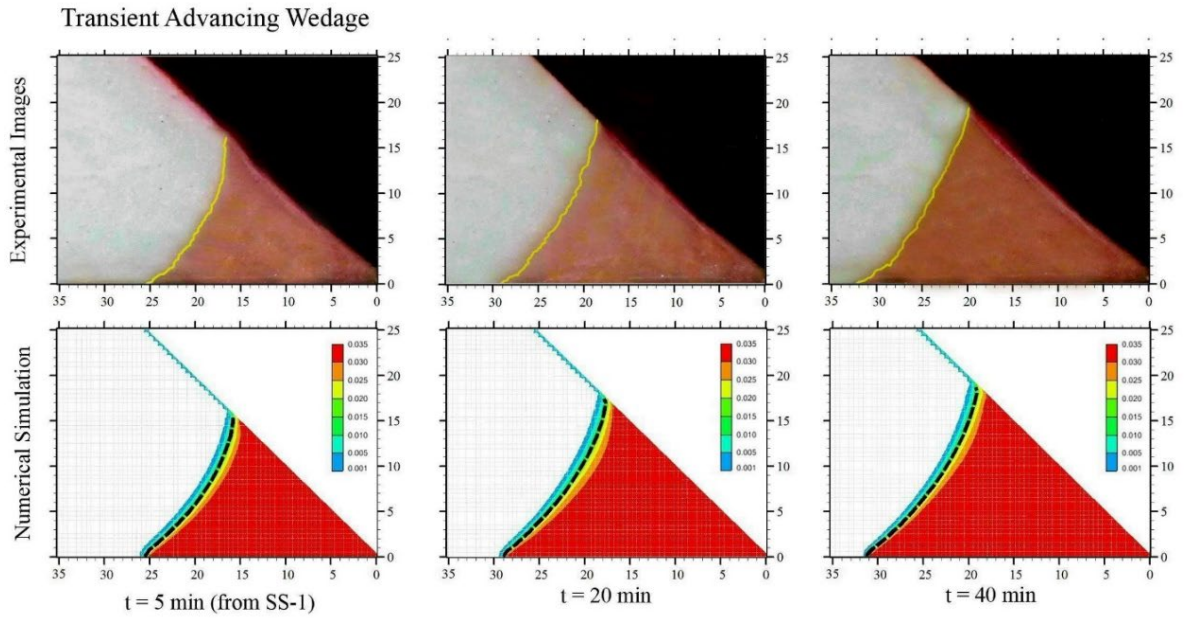

Fig. 5 Laboratory experiments and numerical simulations of Transient Advancing Wedge

شکل ۵ مشاهده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی پیشروی گوه آب شور

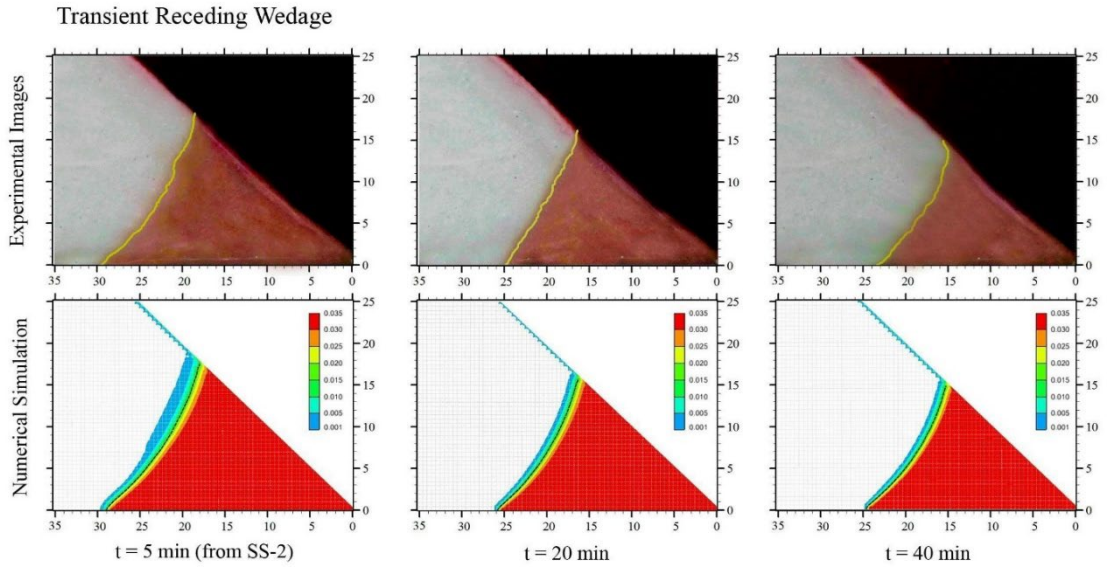

Fig. 6 Laboratory experiments and numerical simulations of Transient Receding Wedage

شکل ۶ مشاهده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی بازگشت گوه آب شور

چگونگی تغییر شاخص‌های طول پنجه گوه آب شور (L)، ارتفاع گوه آب شور (H) و مساحت گوه آب شور (S) در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی در فاصله‌های زمانی هر یک دقیقه (به صورت خودکار) و شبیه‌سازی عددی در فاصله‌های زمانی هر ۵ دقیقه استخراج شده است. در شکل ۷، شاخه صعودی هر نمودار مربوط به مرحله پیشروی گوه آب شور و شاخه نزولی مربوط به مرحله بازگشت گوه آب شور است و نتایج آزمایشگاهی و عددی همخوانی دارند.

شکل ۷(b) نشان می دهد که بین مشاهده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی برای شاخص ارتفاع گوه اختلاف اندکی وجود دارد، با وجود این روند تغییرپذیری‌های این شاخص برای دو نوع مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی در شرایط گذار از یک الگو پیروی می‌کند. می‌توان علت این اختلاف اندک را نبود شرایط به کلی یکنواخت ویژگی‌های محیط متخلخل و عدم تاثیر اعمال شرایط مرزی به کلی برابر در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی دانست.

برای بررسی بیشتر رفتار شاخص‌های طول پنجه گوه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور در مرحله‌های پیشروی و بازگشت آن، از متغیر جابه‌جایی نسبی هر شاخص (جابه‌جایی هر شاخص تقسیم بر کل تغییر آن شاخص)

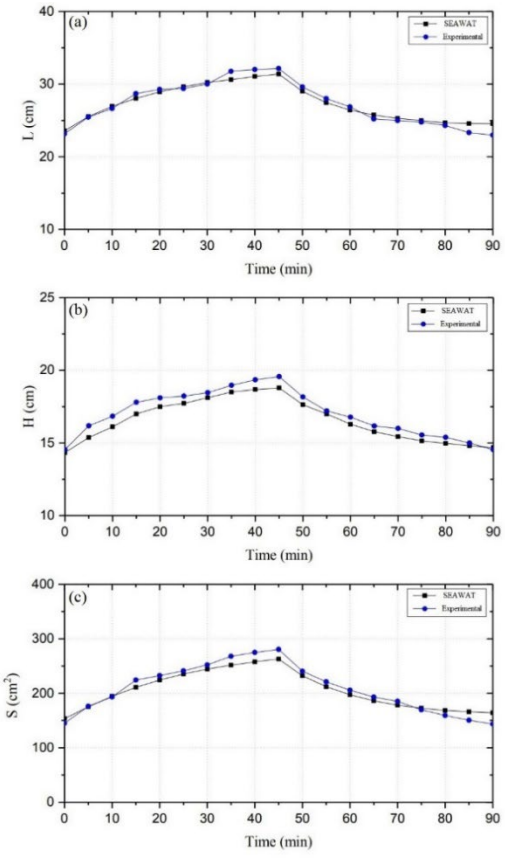

Fig. 7 Changes in the relative displacement of selected indicators of saltwater wedge in the advance and recede stage (a) the toe length of the wedge, (b) the height of the wedge, (c) the area of the wedge The beginning of the wedge recede stage is from t=45min.

شکل ۷ تغییرپذیری شاخص های گوه آب شور در شرایط گذرا (a) طول پنجه گوه، (b) ارتفاع گوه و (c) مساحت گوه آغاز مرحله بازگشت گوه از لحظه t=45 min است

که متغیری بدون بعد است و امکان مقایسه را مستقل از واحد و اندازه کل تغییر فراهم می‌کند، استفاده شد. رابطه ی (۳) چگونگی محاسبه جابه‌جایی نسبی هر شاخص را در شرایط گذرا ارائه می‌کند.

$$\mathbf{a^*(t)} = \frac{|\mathbf{a(t_s)-a(t)}|}{\mathbf{\Delta a}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، a*(t) جابه‌جایی نسبی شاخص پس از زمان t از آغاز هر یک از مرحله‌های پیشروی و بازگشت گوه آب شور است. a(ts) اندازه هر شاخص در شرایط دائمی هر مرحله و a(t) اندازه هر شاخص پس از زمان t از آغاز هر مرحله است. Δa کل تغییر شاخص مورد نظر در هر مرحله است. هر یک از سه شاخص طول پنجه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور می‌تواند جانشین متغیر a در رابطه (۳) شوند.

جابه‌جایی نسبی شاخص‌های طول پنجه و ارتفاع گوه آب شور در شکل ۸ آمده است. نگاهی اجمالی به شکل ۸ نشان می دهد که شاخص طول پنجه گوه، در مرحله بازگشت نسبت به زمان پیشروی زودتر به شرایط دائمی می‌رسد.

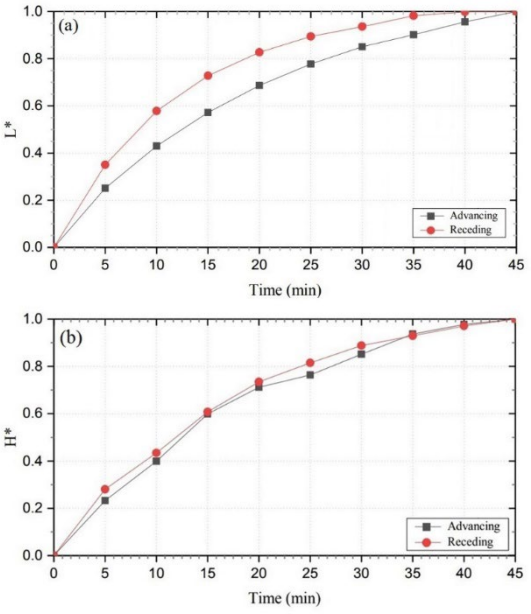

Fig. 8 Changes in the relative displacement of selected indicators of saltwater wedge in the advance and recede stage (a) the toe length of the wedge, (b) the height of the wedge

شکل ۸ تغییرپذیرهای جابه‌جایی نسبی شاخص های گوه آب شور در مراحل پیشروی و بازگشت گوه (a) طول پنجه گوه، (b) ارتفاع گوه

بنابر نتایج ارائه شده در شکل ۸، مشخص شد برخلاف شاخص طول پنجه گوه که در مرحله بازگشت سریع‌تر از مرحله پیشروی به شرایط دائمی می‌رسد، شاخص ارتفاع گوه در هر دو مرحله پیشروی و بازگشت در زمان تاحدودی برابری به شرایط دائمی می‌رسد که علت آن تغییر در میدان جریان و ایجاد جریان های همسوی آب شور و شیرین به سمت دریا، در هنگام بازگشت گوه آب شور است. نتایج این تحقیق با پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی انجام شده توسط Chang and Clement (2012)، Lu and Werner (2013)، Robinson et al. (2015) و Rezapour et al. (2018) همخوانی دارد.

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار گوه آب شور در مرحله‌های پیشروی و بازگشت گوه، مقدار هر شاخص در طول زمان و چگونگی تغییرپذیری‌های نسبی هر شاخص نسبت به زمان در یک شکل واحد نمایش داده شده‌اند (شکل ۹). در شکل بالا مقدارهای کمینه و بیشینه محور قائم نمودار مرتبط با هر شاخص، به گونه‌ای تنظیم شدند که نقطه‌های آغاز و پایان هر سه نمودار در هر دو مرحله (پیشروی و بازگشت گوه) بر هم منطبق شوند. با این کار امکان مقایسه تغییرپذیری‌های نسبی هر شاخص فراهم گردید؛ افزون بر این، در این شکل مقدار هر شاخص در زمان‌های مختلف بر مبنای محور خودش نیز قابل دیدن است. شکل ۹ نشان می‌دهد که نرخ نسبی تغییرپذیری‌های طول پنجه گوه نسبت به شاخص ارتفاع گوه در بیشتر زمان‌ها با نرخ نسبی تغییرات مساحت گوه همخوانی بیشتری دارد؛ لذا نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نمایان می‌کند که شاخص طول پنجه افزون بر شرایط دائمی، در شرایط گذرا نیز می‌تواند نماینده مناسبی برای بیان میزان حجم آب شور هجوم آورنده به آبخوان ساحلی باشد.

نکته قابل توجه دیگر، چگونگی رفتار شاخص ارتفاع گوه آب شور در شرایط گذار است. در مرحله پیشروی، ارتفاع گوه با سرعت نسبی به مراتب بالاتری نسبت به پنجه و مساحت گوه به سمت دائمی شدن پیش می‌رود و سریع‌تر از آنها به شرایط دائمی می‌رسد. در صورتی‌که در مرحله بازگشت تاحدودی هر سه شاخص به طور همزمان متوقف می‌شوند؛ زیرا با کاهش ارتفاع آب شیرین در محفظه

جانبی سمت راست، میدان فشار آب شیرین در آبخوان کاهش می‌یابد؛ بنابراین آبهای شور از مرز دریا به سمت آبخوان حرکت کرده و سطح مشترک، آغاز به پیشروی می کند. به علت اختلاف چگالی آب شور و شیرین، هرچه عمق سطح مشترک افزایش یابد، میزان پیشروی آن در شرایط دائمی افزایش می‌یابد و هرچه میزان پیشروی سطح مشترک در شرایط دائمی بیشتر شود، میزان نسبی پیشروی آن کاهش می‌یابد؛ از این رو ارتفاع گوه به عنوان بالاترین نقطه سطح مشترک، با بیشترین نرخ نسبی آغاز به حرکت می‌کند و سطح مشترک زودتر از دیگر نقطه‌ها به شرایط پایدار می‌رسد، بر همین مبنا پنجه گوه به عنوان پایین‌ترین نقطه سطح مشترک، بیشترین پیشروی را دارد؛ در نتیجه با کمترین میزان جابه‌جایی نسبی، دیرتر از دیگر نقطه‌های سطح مشترک به شرایط دائمی می‌رسد.

در مرحله بازگشت گوه، چون شاخص ارتفاع آن روی مرز دریا قرار دارد، در آغاز مرحله بازگشت، نسبت به دو شاخص دیگر با سرعت نسبی بیشتری کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، جریان‌های آب شیرین به ناحیه اختلاط وارد می‌شوند و شروع به شستن لایه‌های غلیظ این ناحیه می‌کنند. پس از آن جریان‌های لب شور ایجاد شده در ناحیه اختلاط، در امتداد سطح مشترک به سمت خروجی جریان (بر روی مرز دریا) حرکت می‌کنند. خروج آبهای لب شور از مرز دریا موجب کاهش سرعت افت ارتفاع گوه می‌شود. فرایند شستشو تا هنگامی ادامه می‌یابد که پنجه گوه به شرایط دائمی نزدیک شود، در نتیجه هر سه شاخص طول پنجه، مساحت و ارتفاع گوه تاحدودی به طور همزمان به شرایط پایدار می‌رسند.

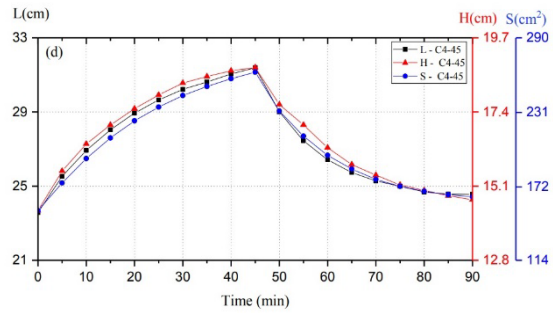

Fig. 9 Changes of selected indicators of saltwater wedge over time

شکل ۹ تغییرپذیری شاخص‌های انتخابی گوه آب شور نسبت به زمان

به منظور بررسی تاثیر شیب ساحل‌های در پیشروی گوه آب شور، با استفاده مدل عددی SEAWAT میزان پیشروی پنجه و ارتفاع گوه آب شور بر اثر کاهش تراز آب شیرین آبخوان در ساحل‌ها با شیب‌های ۹۰ و ۴۵ درجه بررسی و نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شد. برابر شکل ۱۰ (a) در مرحله دوم آزمایش‌ها (مرحله پیشروی گوه)، در ساحل‌های با شیب ۹۰ درجه، پنجه گوه آب شور نسبت به شرایط دائمی مرحله اول آزمایش، ۱۲/۱۱ سانتی‌متر پیشروی کرد، در صورتی‌که در شرایط مشابه، میزان پیشروی پنجه گوه در ساحل‌های با شیب ۴۵ درجه، ۷/۸۲ سانتی‌متر بود که نسبت به ساحل‌های با شیب ۹۰ درجه، ۴/۲۹ سانتی‌متر کمتر است. همچنین بنا بر نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ (b) نیز با انجام مرحله دوم آزمایش، مشاهده شد ارتفاع گوه آب شور نیز در ساحل‌های با شیب ۹۰ درجه نسبت به ساحل‌های با شیب ۴۵ درجه، ۳/۹۹ سانتی‌متر افزایش داشته است.

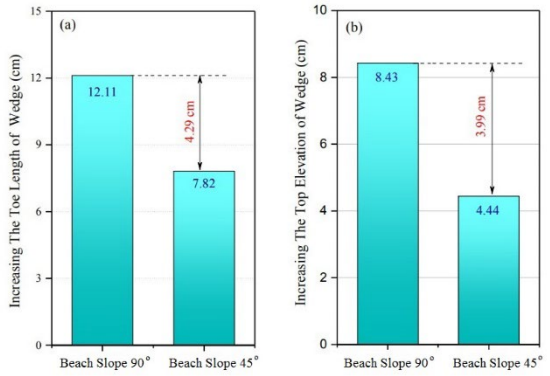

Fig. 10 The increase in the length of the toe and the height of the saltwater wedge in the saltwater advancing stage (a) the toe length of the wedge, (b) the height of the wedge

شکل ۱۰ میزان افزایش طول پنجه و ارتفاع گوه آب شور در مرحله پیشروی آب شور (a) طول پنجه گوه، (b) ارتفاع گوه

در ادامه نتایج این پژوهش با نتایج مدل آزمایشگاهی Goswami and Clement (2007) مقایسه شد. این مدل به منظور ارزیابی و صحت سنجی مدل‌های آب زیرزمینی وابسته به چگالی طراحی شد. این مدل از یک جعبه مستطیلی شکل با ابعاد ۵۳ سانتی‌متر طول و ۲/۷ سانتی‌متر عرض و ۳۰/۵ سانتی‌متر ارتفاع ساخته شده است. مدل از سه محفظه شامل محفظه مرکزی (محیط

متخلخل) و دو محفظه جانبی (مخزن‌های آب شور و شیرین) تشکیل شد. هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل حدود ۱۰۵۰ متر در روز برآورد شد. برای تهیه آب شور از نمک صنعتی استفاده شد و چگالی آب شور تهیه شده ۱/۰۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید. آزمایش‌ها برای سه حالت الف) وضعیت پایدار تحت گرادیان مشخص ب) حالت گذار در شرایط پیشروی گوه آب شور ج) حالت گذرا در شرایط پسروی گوه آب شور با ثابت نگه داشتن سطح آب شور در تراز ۲۵/۵ سانتی‌متر و تغییر سطح آب در محفظه آب شیرین بین ۲۶/۲ تا ۲۶/۷ سانتی‌متر انجام گرفت. وضعیت پایدار در سه مرحله انجام گرفت که در مرحله اول تراز آب شیرین در ارتفاع ۲۶/۷ سانتی‌متر تنظیم شد و جریان پایدار پس از مدتی برقرار شد (SS1) و سپس در مرحله دوم تراز آب شیرین به ۲۶/۲ سانتی‌متر کاهش داده شد و پس از ۶۰ دقیقه به حالت پایدار رسید (SS2) و در مرحله سوم تراز آب شیرین به ۲۶/۵۵ سانتی‌متر افزایش داده شد که در این حالت گوه آب شور آغاز به پسروی کرده و پس از گذشت زمان ۳۵ دقیقه به حالت پایدار رسید (SS3).

مقایسه نتایج این تحقیق با مشاهده‌های مدل آزمایشگاهی دو بعدی Goswami and Clement (2007) در خصوص موقعیت گوه آب شور در حالت پایدار اولیه (SS1)، حالت پایدار پس از پیشروی گوه آب شور (SS2) و حالت پایدار پس از پسروی گوه (SS3) در شکل ۱۱ ارائه شده است.

برابر شکل ۱۱ مشاهده می‌شود در اثر کاهش تراز آب شیرین از ۴۰/۵ به ۳۹/۵ در مدل آزمایشگاهی پنجه گوه آب شور ۷/۸۲ سانتی‌متر پیشروی می‌کند و در مقابل در مدل آزمایشگاهی Goswami and Clement (2007) با کاهش تراز آب شیرین از ۲۶/۷ به ۲۶/۲ سانتی‌متر، پنجه گوه آب شور ۲۲/۱۵ سانتی‌متر پیشروی کرده است. با توجه به اینکه مدل در آزمایشگاهی Goswami and Clement (2007) مرز آب شور به صورت عمودی درنظر گرفته شده است، می توان به این رسید که در شرایط گذرا با نوسان سطح آب شیرین آبخوان، میزان پیشروی گوه آب شور در شیب‌های تند بیشتر از شیب‌های ملایم است.

آبخوان‌های ساحلی منبع اصلی آب شیرین در بسیاری از منطقه‌های جهان هستند. امروزه رشد جمعیت از یک سو و برداشت بی‌رویه از آبخوان‌های ساحلی برای کاربرد صنعت و کشاورزی از سوی دیگر، سبب شده است تا پدیده پیشروی آب دریا در بسیاری از آبخوان‌های ساحلی جهان، از جمله آبخوان‌های ساحلی ایران گزارش شود. برای کاهش پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی این پدیده، لازم است فرایند رخداد و گسترش این پدیده شناسایی شود. بررسی پیشروی آب شور در شرایط واقعی، امری بسیار دشوار و ناممکن است، به همین

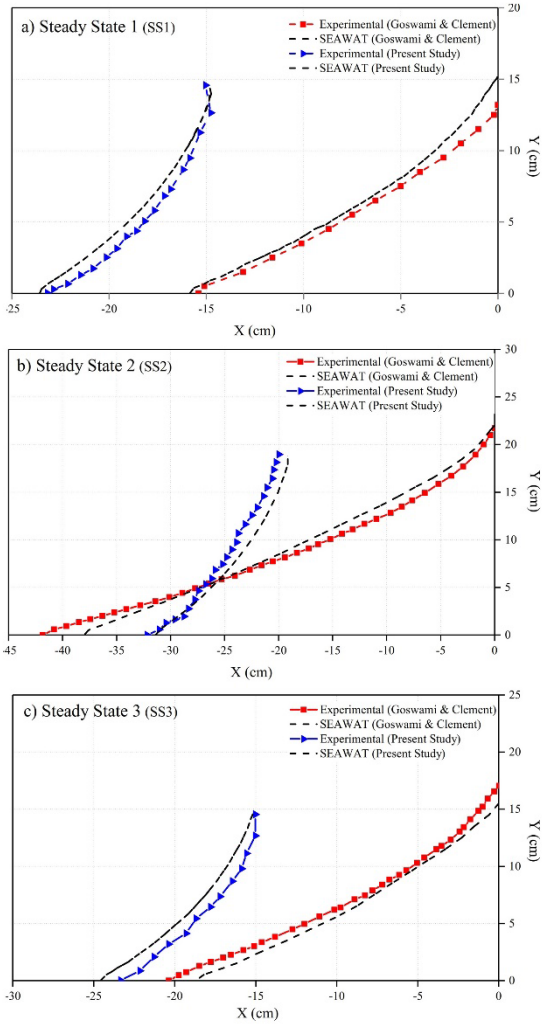

Fig. 11 Comparing the position of the saltwater wedge in the experiments of present study with the results of the Goswami and Clement research (a) initial steady state, (b) steady state after advancing (c) steady state after receding

شکل ۱۱ مقایسه موقعیت گوه آب شور در آزمایش‌های این تحقیق با نتایج تحقیق گواسمی و کلمنت (a) حالت پایدار اولیه، (b) حالت پایدار پس از پیشروی (c) حالت پایدار پس از پسروی

دلیل از دهه‌های گذشته برای بررسی این پدیده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی استفاده می شود.

۴- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی رفتار پیشروی و پسروی گوه آب شور در آبخوان‌های ساحلی شنی شیبدار با استفاده از مدل آزمایشگاهی پرداخت و برای تحلیل مشاهده‌های آزمایشگاهی پیشروی گوۀ آب شور در شرایط گذرا از روش فنی پردازش تصویر استفاده شد و نتایج مدل آزمایشگاهی توسط مدل عددی SEAWAT شبیه‌سازی و اعتبار سنجی شد. از بررسی‌های انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

- این پژوهش با روش ترکیبی سه مرحله‌ای (مدل آزمایشگاهی، پردازش تصویر و شبیه‌سازی عددی)، تجزیه و تحلیل الگوهای جریان با چگالی متغیر در محیط‌های متخلخل را پیشنهاد و ارائه می‌کند.
- شاخص ارتفاع گوه در هر دو مرحله پیشروی و بازگشت در زمان تاحدودی برابری به شرایط دائمی می‌رسد. اما شاخص طول پنجه گوه در مرحله بازگشت نسبت به مرحله پیشروی سریع‌تر به شرایط پایدار می‌رسد.
- در هنگام پیشروی آب شور، شاخص ارتفاع گوه خیلی زودتر از شاخص‌های پنجه و مساحت گوه به شرایط پایدار می‌رسد، اما در مرحله بازگشت تاحدودی هر سه شاخص با هم متوقف می‌شوند.
- نرخ نسبی تغییرپذیری طول پنجه گوه نسبت به شاخص ارتفاع گوه در بیشتر زمان‌ها با نرخ نسبی تغییرپذیری مساحت گوه همخوانی بیشتری دارد. لذا شاخص طول پنجه افزون بر شرایط پایدار، در شرایط گذرا نیز می‌تواند نماینده مناسبی برای بیان میزان حجم آب شور هجوم آورنده به آبخوان ساحلی باشد.
- در شرایط گذرا با نوسان سطح آب شیرین آبخوان، میزان پیشروی گوه آب شور در شیب‌های تند بیشتر از شیب‌های ملایم است.

۵- فهرست نشانه‌ها

غلظت آب شور (gr/lit)	C
غلظت آب شور دریا (gr/lit)	C_s
تراز هیدرولیکی (cm)	h
تراز مرز خشکی (cm)	h_f
تراز مرز دریا (cm)	h_s
هدایت هیدرولیکی (cm/min)	K
تخلخل	n
زمان (min)	t
موقعیت پنجه گوه آب شور (cm)	L
ارتفاع گوه آب شور (cm)	H
گستره (مساحت) گوه آب شور (cm^2)	S
طول هر سلول (cm)	Δx
ارتفاع هر سلول (cm)	Δz
عرض هر سلول (cm)	Δy
چگالی آب شیرین (Kg/m^3)	ρ_f
چگالی آب شور (Kg/m^3)	ρ_s
جابه‌جایی نسبی شاخص	a*(t)

۶- منبع‌ها

Abdelgawad, A., Abdoulhalik, A., Ahmed, A., Moutari, S. & Hamill, G.A. (2018). Transient investigation of the critical pumping rate in laboratory-scale coastal aquifer, *Water Resources Management*, *32*, 3563-3577, https://doi.org/10.1007/s11269-018-1988-3.

Abd-Elhamid, H.F. & Javadi, A.A. (2011). A cost-efective method to control seawater intrusion in coastal aquifers, *Water Resources Management*, *25*(11), 2755–2780, https://doi.org/10.1007/s11269-011-9837-7.

Abdoulhalik, A. & Ahmed, A.A. (2018). Transient investigation of saltwater upconing in laboratory-scale coastal aquifer, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *214*, 149-160, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.024.

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, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.040.

Abdoulhalik, A., Ahmed, A., Abdelgawad, A. & Hamill, G. (2022). The impact of a low-permeability upper layer on transient seawater intrusion in coastal aquifers, *Journal of Environmental Management*, *307*, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114602.

Barlow, P.M. & Reichard, E.G. (2010). Saltwater intrusion in coastal regions of North America,

groundwater fow of variable density, Fort Myers, Florida, Missimer International Inc.

Guo, X., Feng, Q., Si, J., Xi, H., Zhao, Y. & Deo, R.C. (2019). Partitioning groundwater recharge sources in multiple aquifers system within a desert oasis environment: Implications for water resources management in endorheic basins, *Journal of Hydrology*, *579*, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol. 2019.124212.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C. & McDonald, M.G. (2000). MODFLOW-2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, Open-file Report, vol. 134, U.S.Geological Survey, 121p.

Jaeger, S., Ehni, M., Eberhardt, C., Rolle, M., Grathwohl, P. & Gauglitz, G. (2009). CCD camera image analysis for mapping solute concentrations in saturated porous media, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *395*(6), 1867-1876, DOI: 10.1007/s00216-009-2978-3.

Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D. & Ataie-Ashtiani, B. (2014). Effects of climate change on saltwater intrusion in sloping coastal aquifers, 13th Iranian Hydraulic Conference, University of Tabriz, Tabriz. (In Persian)

Konz, M., Ackerer, P., Meier, E., Huggenberger, P., Zechner, E. & Gechter, D. (2008). On the measurement of solute concentrations in 2-D flow tank experiments, *Hydrology and Earth System Sciences*, *12*(3), 727–738, https://doi.org/10.5194/ hess-12-727-2008.

Kuan, W.K., Jin, G., Xin, P., Robinson, C., Gibbes, B. & Li, L. (2012). Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers, *Journal of Water Resources Research*, *48*(2) 1–11, https:// doi.org/10.1029/2011WR010678.

Lin, J., Richards, D.R., Talbot, C., Yeh, G.T., Cheng, R., Cheng, H.P. & Jones, N.L. (1997). FEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media, US Army Engineering Research and Development Center, Brigham Young University, Vicksburg.

Lu, C. & Werner, A.D. (2013). Timescales of seawater intrusion and retreat, *Advances in water resources*, *59*, 39-51, https://doi.org/10.1016/ j.advwatres.2013.05.005.

Mehdizadeh, S.S., Dini, A.M. & Ghoroqi, M. (2018). Experimental and numerical investigation *Hydrogeology Journal*, *18*(1), 247-260, https:// doi.org/10.1007/s10040-009-0514-3.

Bear, J. & Cheng, A.H.D. (2010). Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Springer Dordrecht, Berlin, Vol. 23, 834p, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6682-5.

Catania, F., Massabo, M., Valle, M., Bracco, G. & Paladino, O. (2008). Assessment of quantitative imaging of contaminant distributions in porous media, *Experiments in Fluids*, *44*(1), 167–177, DOI:10.1007/s00348-007-0388-x.

Chang, S.W. & Clement, T.P. (2012). Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems, *Journal of Water Resources Research*, *48*(9), 1–10, https://doi.org/10.1029/2012WR012134.

Dalai, C. & Dhar, A. (2023). Impact of beach face slope variation on saltwater intrusion dynamics in unconfined aquifer under tidal boundary condition, *Flow Measurement and Instrumentation, 89*, https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102298.

Dalai, C., Munusamy, S.B. & Dhar, A. (2020). Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics on sloping sandy beach under static seaside boundary condition, *Flow Measurement and Instrumentation, 75,* https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101794.

Faal, F., Ghafouri, H.R. & Ashrafi, S.M. (2021). Application of Aquifer Surface Recharge in the Modification of GALDIT Method to Assess the Risk of Seawater Intrusion in Qom Aquifer, *Journal of Water and Wastewater*, *32*(3), 94-112, DOI:10.22093/WWJ.2021.251996.3072. (In Persian)

Flowers, T.C. & Hunt, J.R. (2007). Viscous and gravitational contributions to mixing during vertical brine transport in water-saturated porous media, *Water Resources Research*, 43(1), doi:10.1029 /2005WR004773.

Goswami, R.R. & Clement, T.P. (2007). Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Water Resources Research*, *43*(4), W04418, doi:10.1029/2006WR005151.

Guo, Q., Huang, J., Zhou, Z. & Wang, J. (2019). Experiment and numerical simulation of seawater intrusion under the influences of tidal fluctuation and groundwater exploitation in coastal multilayered aquifers, *Geofluids,* 2316271, https://doi.org/ 10.1155/2019/2316271.

Guo, W. & Bennett, G.D. (1998). SEAWAT version 1.1: a computer program for simulation of

Physical Model, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *5*(14), 1677-1685. (In Perisan)

Rezapour, A.B., Saghravani, S.F.A. & Ahmadifard, A.R. (2018). Studying the phenomenon of saltwater inflow to coastal aquifers in transient conditions using image processing and numerical modeling, *Journal of Iranian Hydraulic Association*, *13*(2), 69-82. (In Persian)

Robinson, G., Hamill, G. & Ahmed A.A. (2015). Automated image analysis for experimental investigations of salt water intrusion in coastal aquifers, *Journal of Hydrology*, *530*(6), 350–360, DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.09.046.

Schotting, R.J., Moser, H. & Hassanizadeh, S.M. (1997). High-concentration-gradient dispersion in porous media: experiments, analysis and approximations, *Advances in Water Resources*, *22*(7), 665-680.

Shen, C., Zhang, C., Jin, G., Kong, J. & Li, L. (2016). Effects of unstable flow on solute transport in the marsh soil and exchange with coastal water, *Geophysical Research Letters*, *43*(23), 12091–12101, doi:10.1002/2016GL070576.

Vafaei, F. & Abolghasemi, H. (2013). Investigating the change of sea level and groundwater level on seawater intrusion in unconfined aquifers, The 1st National Conference on Environment, Energy and Biodefense, Tehran. (In Persian)

Voss, C. & Provost, A. (2010). SUTRA-a Model for saturated–unsaturated, variable density, Ground-water flow with Solute or energy transport, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 02-4231.

Voss, C.I. & Souza, W.R. (1987). Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone, *Water Resources Research*, *23*(10), 1851-1866, https://doi.org/10.1029/WR023i010p01851.

Watson, S., Barry, D., Schotting, R. & Hassanizadeh, S.M. (2002). Validation of classical densitydependent solute transport theory for stable, high-concentration-gradient brine displacements in coarse and medium sands, *Advances in Water Resources*, *25*(6), 611–635, https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00022-2.

Werth, C.J., Zhang, C. Brusseau, M.L., Oostrom, M. & Baumann, T. (2010). A review of non-invasive imaging methods and applications in contaminant hydrogeology research, *Journal of Contaminant Hydrology*, *113*(1–4), 1–24, on seawater intrusion into unconfined coastal aquifers under instantaneous head changes at the boundaries, *Journal of Iranian Hydraulic Association*, *14*(2), 129-143. (In Persian)

Mehdizadeh, S.S., Ketabchi, H., Ghoroqi, M. & Hasanzadeh, A.K. (2020). Experimental and numerical assessment of saltwater recession in coastal aquifers by constructing check dams, *Journal of Contaminant Hydrology*, *231*, https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103637.

Nasiri, M., Hamidi, M. & Kardan-Moghaddam, H. (2020). Simulation of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers (Case Study: the Southern Shores of the Caspian Sea), *Journal of water and soil*, *34*(2), 269-286. (In Persian)

Noorabadi, S., Sadraddini, A.A., Nazemi, A.H. & Delirhasannia, R. (2017). Laboratory and Numerical Investigation of Saltwater Intrusion into Aquifers, *Journal of Materials and Environmental Sciences*, *8*(12), 4273-4283.

Oates, P.M. & Harvey, C.F. (2006). A colorimetric reaction to quantify fluid mixing, *Experiments in Fluids*, *41*(5), 673–683, DOI:10.1007/s00348-006-0184-z.

Olsson, A. & Grathwohl, P. (2007). Transverse dispersion of non-reactive tracers in porous media: a new nonlinear relationship to predict dispersion coefficients, *Journal of Contaminant Hydrology*, *92*(3–4), 149–161, https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.09.008.

Oostrom, M., Hayworth, J.S., Dane, J.H. & Guven, O. (1992). Behaviour of dense aqueous phase leachate plumes in homogenous porous media, *Water Resources Research*, *28*(8), 2123 – 2134, https://doi.org/10.1029/92WR00711.

Oz, I., Shalev, E., Yechieli, Y., Gavrieli, I. & Gvirtzman, H. (2014). Flow dynamics and salt transport in a coastal aquifer driven by a stratified saltwater body: Lab experiment and numerical, *Journal of Hydrology*, *511*, 665-674, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.020.

Petalas, C., Pisinaras. V., Gemitzi. A., Tsihrintzis. V.A. & Ouzounis, K. (2009). Current conditions of saltwater intrusion in the coastal Rhodope aquifer system, northeastern Greece, *Journal of Desalination*, *237*(1-3), 22-41, https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.020.

Rabbaniha, H., Liaghat, A.M. & Soltani, M. (2020). Experimental Study of Shallow Saline Water and Freshwater Interference on Distribution of Salinity in the Saturated and Unsaturated Zone Using

Experimental visualization of solute transport and mass transfer processes in two-dimensional conductivity fields with connected regions of high conductivity, *Environmental Science & Technology, 38*(14), 3916–3926, DOI:10.1021/ es034958g.

Zohrabi-Motlagh, A., Shahrbanouzadeh, M. & Mehdizadeh-Mahali, 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(2), 302-316, Dor:20.1001.1.17352 347.1400.17.3.17.2. (In Persian)

Zuurbier, K.G. & Stuyfzand, P.J. (2017). Consequences and mitigation of saltwater intrusion induced by short-circuiting during aquifer storage and recovery in a coastal subsurface. Hydrology and Earth System Sciences, *21*(2), 1173–1188, https://doi.org/ 10.5194/hess-21-1173-2017.

DOI: 10.1016/j.jconhyd.2010.01.001.

Yu, X., Xin, P. & Lu, C. (2019). Seawater intrusion and retreat in tidally-affected unconfined aquifers: Laboratory experiments and numerical simulations, *Advances in Water Resources, 132*(17), DOI: 10.1016/j.advwatres.2019.103393.

Zhang, Q., Volker, R.E. & Lockington, D.A. (2002). Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater, *Advances In Environmental Research*, *6*(3), 229–237, https:// doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00054-5.

Zheng, C. & Wang, P.P. (1999). MT3DMS: a Modular Three-dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems, Department of Geological Sciences, University of Alabama, Tuscaloosa, 169p.

Zinn, B., Meigs, L.C., Harvey, C.F., Haggerty, R., Peplinski, W.J. & Schwerin C.F.V. (2004).

© 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.