



Experimental Investigation on the Impact of Cutoff Wall on Seawater Recession in Coastal Aquifers Using Image Processing Technique

A. Zohrabi Motlagh¹, M. Shahrbanouzadeh^{2*},
and S.S. Mehdizadeh Mahali³

Abstract

Understanding the problem of seawater intrusion (SWI) in coastal aquifers plays an essential role in managing groundwater resources in these areas. This research examines seawater recession (SWR) in coastal aquifer in a laboratory scale; considering both homogeneous and heterogeneous environments, with and without a cutoff wall, and in a steady-state condition. For this purpose, different scenarios are defined in the laboratory, and all the effective parameters in the problem are considered and dimensionalized to facilitate salinity analysis. The laboratory data were analyzed using image processing technique and isolines with the concentration of 5%, 95%, and transition zone (Seawater hydrodynamic dispersion zone) were determined. The results showed that in a heterogeneous case, the rate of SWI was higher, and the efficiency of cutoff wall performance was higher in the homogenous case than the heterogeneous case. According to the present study results, the maximum effectiveness of cutoff wall in SWR percentage was obtained in 100% homogeneous and 92% for the heterogeneous case. The best location of the cutoff wall in this study with tank dimensions of 1 and 0.6 meters obtained 0.8 m from the tank bed and 0.2 m from the saline boundary. The achieved graphs helped to design the cutoff wall in actual media optimally.

Keywords: Seawater Intrusion, Coastal Aquifer, Cutoff Wall, Freshwater, Image Processing Technique.

Received: March 10, 2021

Accepted: November 4, 2021

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دیوار آب‌بند بر کاهش نفوذ شور در آبخوان‌های ساحلی با استفاده از تکنیک پردازش تصویر

علی زهرابی مطلق^۱، مهرداد شهربانوزاده^{۲*}
و سیدسجاد مهدی‌زاده محلی^۳

چکیده

شناخت مسئله نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی، نقش مؤثری بر مدیریت منابع آب زیرزمینی مناطق ساحلی دارد. در این تحقیق کاهش نفوذ شور در یک آبخوان ساحلی در مقیاس آزمایشگاهی با در نظر گرفتن دیوار آب‌بند و بدون دیوار آب‌بند، محیط همگن و ناهمگن در حالت ماندگار بررسی شده است. برای این منظور، با تعریف سناریوهای مختلف در آزمایشگاه، پارامترهای مؤثر در مسأله در نظر گرفته شده و جهت تسهیل در تحلیل پسرقت شور، بی‌بعد شدند. داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از تکنیک پردازش تصویر آنالیز گردید و خطوط هم‌غلظت ۵٪، ۹۵٪ و ناحیه انتقالی آب شور مابین این خطوط (ناحیه پراکندگی هیدرودینامیکی آب شور) مشخص گردید. نتایج نشان داد در محیط ناهمگن میزان پیشروی گوه آب‌شور افزایش یافته و میزان تأثیرگذاری اجرای دیوار آب‌بند در محیط همگن بیشتر از محیط ناهمگن می‌باشد. حداکثر اثرگذاری اجرای دیوار آب‌بند در کاهش درصد پیشروی گوه آب شور در محیط همگن ۱۰۰٪ و در محیط ناهمگن ۹۲٪ به دست آمد. بهترین محل قرارگیری دیوار آب‌بند در این پژوهش با توجه به ابعاد طولی ۱ و ارتفاع ۰/۶ متری مخزن آزمایش، در ۰/۸ متری از کف و در فاصله ۰/۲ متری از مرز آب شور به دست آمد. از نمودارهای بی‌بعد حاصل می‌توان در طراحی بهینه دیوار آب‌بند در شرایط واقعی کمک گرفت.

کلمات کلیدی: نفوذ شور، آبخوان ساحلی، دیوار آب‌بند، آب شیرین، تکنیک پردازش تصویر.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱۳

1- M.Sc. Graduate in Water Resource Engineering, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran .

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. Email: m.shahrbanouzadeh@jsu.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Technology and Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.17.2](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.17.2)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول.

۲- استادیار گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکان‌پذیر است.



۱- مقدمه

مناطق ساحلی، مواردی همچون مدیریت مقدار برداشت آب زیرزمینی از طریق پمپاژ، اقدامات اصلاحی نظیر استفاده از موانع زیرزمینی، تغذیه مصنوعی آبخوان و یا پمپاژ آب دریا از منطقه نفوذ می‌تواند باعث بالارفتن کارایی برداشت آب شیرین شود (Abarca et al., 2006; Luyun et al., 2009; Pool and Carrera, 2010). هر چند تغذیه مصنوعی از طریق نفوذ در محدوده سطح حوضه یا با استفاده از چاه‌های تغذیه صورت می‌پذیرد، با این حال، این روش فقط در مواردی که ساختار زمین‌شناسی آبخوان و منابع آب مورد نیاز مناسب باشد کارایی خواهد داشت. در بسیاری از موارد، با توجه به مشکلات اجرایی گزینه‌های اصلاحی فوق، استفاده از موانع زیرزمینی به عنوان گزینه برتر مطرح می‌باشد (Kaleris and Ziogas, 2013).

در ادبیات فنی، موانع زیرزمینی به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) مانع زیرزمینی نیمه نفوذپذیر^۱ که عمدتاً از بالا تا پائین سفره آب زیرزمینی گسترش می‌یابد؛ (۲) سد زیرزمینی^۲ که از نفوذپذیری بسیار کمی برخوردار است و در کف لایه نفوذناپذیر آبخوان قرار می‌گیرد و فقط قسمت زیرین سطح مقطع سفره آبخوان را مسدود می‌کند؛ (۳) دیوار آب‌بند^۳ که از نفوذپذیری بسیار کمی برخوردار است و از سطح سفره آب زیرزمینی تا عمق معینی از سفره قرار می‌گیرد و فقط قسمت فوقانی سفره آب زیرزمینی را مسدود می‌نماید (Kaleris and Ziogas, 2013). تأثیر حفاظتی SPSB بر روی برداشت آب زیرزمینی در نواحی ساحلی توسط (Mahesha and Mahesha, 2009) و (Sugio et al., 2014) مورد بررسی واقع شده است. (1987) نشان دادند که اجرای SPSB می‌تواند باعث به تأخیرانداختن نفوذ شوری در زمان خشکسالی و پمپاژ پیوسته و طولانی مدت آب شیرین شود. (Mahesha, 2009) با استفاده از شبیه‌سازی عددی، نزدیکترین فاصله قرارگیری SPSB را از ساحل با توجه به برداشت آب شیرین مناسب بدست آورد. همچنین، (Mahesha and Lakshmikant, 2014) به بررسی تأثیر پمپاژ آب شیرین بر نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی در حضور یک مانع زیرزمینی در امتداد ساحل پرداختند و میزان حداقل برداشت آب شیرین را بدست آوردند.

سدهای زیرزمینی از دهه 1990 بصورت گسترده‌ای در کشور ژاپن مورد استفاده قرار گرفته است. توسط (Osuga, 1997) طبق اصول هیدروژئولوژی و تجربیات میدانی مبانی این نوع سد تشریح شده است و بر اساس تحقیقات انجام شده توسط آژانس منابع سبز ژاپن (Japan Green Resources Agency, 2004) تکنیک‌های ساخت این نوع سدها و شاخص‌های طراحی اولیه آن انجام گرفته است.

اراضی ساحلی پهنه‌ای با عرض مشخص از دریا، دریاچه‌ها یا خلیج (بطور متوسط بفاصله ۶۰ متر از دریا) است که حداقل یک‌سو به کنار دریا، دریاچه یا خلیج متصل است (Najmaei, 1990). در آبخوان‌های ساحلی، بطور معمول گرادیان هیدرولیکی به طرف دریا وجود دارد که سبب جریان یافتن آب‌های شیرین به سمت دریا می‌شود. نظر به وجود آب دریا در مجاورت آب‌های ساحلی، برخورد بین آب شیرین با چگالی کمتر و آب شور با چگالی بیشتر سبب تشکیل یک ناحیه انتقالی شده که پراکندگی هیدرودینامیکی دلیل تشکیل آن است (Todd and May, 2005). افتادگی هد پیزومتري در آب شیرین سبب رشد ناحیه انتقالی به طرف خشکی تا رسیدن به یک تعادل جدید می‌گردد که این پدیده نفوذ آب دریا نامیده می‌شود. پدیده نفوذ شوری در آبخوان‌های ساحلی اولین بار توسط (Ghyben (1889 در زمان برداشت آب از منبع آب زیرزمینی در آمستردام مشاهده گردید. چند سال بعد (Herzberg (1901 نیز در جزایر آلمانی دریای شمال به تشریح این پدیده پرداخت و این دو نفر به طور مستقل از هم به بیان معادله‌ای بر پایه تعادل استاتیکی بین آب شور و شیرین پرداختند که در سالیان بعد به معادله Ghyben-Herzberg مشهور شد (Feseker, 2007).

بیشتر از ۶۰ درصد جمعیت جهان در مناطق ساحلی ساکن هستند و رشد جهانی جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی سبب افزایش میزان تقاضا و در نتیجه برداشت آب بیشتر و رشد نفوذ آب دریا به داخل آبخوان‌ها شده است (Jakovic et al., 2011; Mehdizadeh and Vafaei, 2016). همچنین، تغییرات آب و هوایی، افزایش نوسانات سطح آب دریا و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها به عنوان عوامل مهمی در افزایش نفوذ شوری به آبخوان‌های ساحلی بشمار می‌آیند (Ketabchi et al., 2016; Mahmoodzadeh et al., 2014, 2016). همانطور که ناحیه انتقالی به سمت آبخوان حرکت می‌نماید، عرض آن نیز بیشتر شده و زمانیکه این منطقه انتقالی به محل احداث چاه برسد، سبب برداشت آب شور از چاه می‌گردد. در نتیجه کارایی چاه از بین رفته و این امر رها کردن چاه را به دنبال خواهد داشت (Abd-Elhamid and Javadi, 2011). از معادلات تحلیلی، مدل‌های عددی و آزمایشگاهی در بررسی نفوذ شوری در آبخوان‌های ساحلی استفاده شده است که برخی از تحقیقات آزمایشگاهی دیگر نظیر (Thorenz et al., 2002; Zhang et al., 2002; Goswami and Clement, 2007; Nasab et al., 2010; Chang and Clement, 2012; Abdollahi-, Mehdizadeh et al., 2014, 2015; Mehdizadeh and vafaei, 2016) می‌باشند. در

انجام شده است (Mahmoodzadeh and Karamouz, 2018; Xuan and Holly, 2019).

مرور جامع بر نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات آزمایشگاهی با ارائه همزمان اصول مکانیک سیالات کاربردی (آنالیز ابعادی)، موقعیت‌ها و ابعاد متفاوت دیوار آب‌بند در آبخوان همگن و ناهمگن ساحلی و استفاده از تکنیک پردازش تصویر در بدست آوردن نتایج صورت نپذیرفته است. از این‌رو در این تحقیق سعی شده با در نظر گرفتن یک مانع زیرزمینی تحت عنوان دیوار آب‌بند در یک مدل آزمایشگاهی بدلیل استفاده زیاد این مانع در آبخوان‌های آزاد، اجرای ساده‌تر، هزینه اقتصادی پائین‌تر و در عین حال کارایی بالا بکار برده شود و با استفاده از آنالیز ابعادی، تکنیک تصویربرداری و پردازش تصویر به تحلیل جریان پرداخته شود و با طرح سناریوهای مختلف نظیر ایجاد دو محیط همگن و ناهمگن، استفاده از دیوار آب‌بند با ابعاد مختلف (۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) و همچنین فواصل مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) از مرز آب شور (لبه داخلی مخزن در محل شیرهای ورودی آب شور) در حالت ماندگار، بهینه‌ترین فرم اجرای دیوار آب‌بند بدست آمد و در نهایت اقدام به تهیه منحنی‌های عددی بدون بعد بر اساس پارامترهای تعریف شده در آنالیز ابعادی گردید که می‌توان از این نمودارها، در طراحی بهینه دیوار آب‌بند در شرایط واقعی کمک گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آنالیز ابعادی و نسبت‌های بی‌بعد

مسائل زیادی در زمینه مکانیک سیالات و شرایط واقعی طراحی وجود دارد که تنها با استفاده از مدل‌های ریاضی قابل حل نیستند. اغلب لازم است برای ایجاد روابط بین متغیرهای مورد نظر به روش‌های تجربی متوسل شد. از آنجایی که مطالعات تجربی معمولاً بسیار پرهزینه هستند، لازم است آزمایشات لازم را به حداقل رسانند. این کار با استفاده از تکنیکی به نام آنالیز ابعادی انجام می‌شود که مبتنی بر مفهوم همگن‌سازی ابعادی است یعنی همه پارامترها در یک معادله باید ابعاد یکسانی داشته باشند (Potter et al., 2012). به همین منظور جهت دست یافتن به نتایج مناسب بایستی بین اصل و مدل، تشابه هیدرولیکی برقرار باشد که خود مشتمل بر تشابه هندسی، دینامیکی و سینماتیکی است. در این پژوهش، پارامترهای مؤثر بر فضای تحقیق عبارتند از:

Luyun et al. (2009) به بررسی نحوه کنترل پیشروی شوری در یک آبخوان ساحلی با استفاده از ساخت یک سد زیرزمینی در داخل آبخوان پرداختند. نتایج آن تحقیق نشان داد که پس از ساخت این سد ابتدا بخشی از گوه نمکی که در پشت دیوار قرار گرفته شروع به پهن شدن نموده و پنجه آن حرکتی رو به جلو داشت، اما با گذشت زمان این گوه کوچک شده و سرانجام محو شد.

Anwar (1983) تحقیقاتی را در خصوص تأثیر دیوار آب‌بند بر حرکت آب شور انجام داد و به یک رابطه تحلیلی برای تعیین محل ناحیه انتقالی تحت اثر دیوار آب‌بند رسید. Luyun et al. (2011) به بررسی اثرات چاه‌های تغذیه آب شیرین و دیوار آب‌بند بر کاهش نفوذ آب دریا با استفاده از مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی پرداخته‌اند. برخی از محققین به بررسی اثر دیوار آب‌بند بر آبخوان‌های ساحلی ناهمگن و همچنین بررسی اثر ترکیب دیوار آب‌بند و سد زیرزمینی بر روی حرکت گوه آب شور با استفاده از مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی پرداختند (Abdoulhalik et al., 2017; Abdoulhalik and Ahmed, 2017).

در برخی از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده برای بررسی حرکت گوه آب شور اغلب داده‌های آزمایشگاهی بصورت ساده و با استفاده از مشاهدات چشمی برداشت شده‌اند (Goswami and Clement, 2007; Chang and Clement, 2012; Mehdizade et al., 2014, 2015) که استخراج اطلاعات کاری زمانبر و توأم با خطا می‌باشد. لذا اخیراً با استفاده از فناوری پردازش تصویر به شناسایی دقیق‌تر حرکت آب شور و تعیین نقاط هم‌غلظت شوری پرداخته شده است. (Robinson et al. 2015) با استفاده از مدل آزمایشگاهی با ابعاد کوچک و تکنیک پردازش تصویر، محدودیت‌های گذشته را در شناسایی دینامیک گوه آب شور و ناحیه اختلاط با بدست آوردن یک رابطه کالیبراسیونی که غلظت محلول را بر اساس شدت روشنایی در هر پیکسل تصویر مشخص می‌کند برطرف کردند و در ادامه (Robinson et al. 2016) اثر تغییر اندازه دانه‌های محیط متخلخل را بر هجوم آب شور با همین روش بررسی کردند. Rezapour et al. (2018) به ارزیابی رفتار گذرای گوه آب‌شور و ناحیه اختلاط در آبخوان‌های آزاد، با استفاده از دو روش آزمایشگاهی و عددی و بهره‌گیری از تکنیک پردازش تصویر و سیستم تراز آب کنترل شده در مرزها پرداختند. برخی از مطالعات دیگر بر روی آبخوانهای ساحلی با در نظر گرفتن محیط غیرهمگن و تحت اثر مواردی همچون طوفان و افزایش تراز سطح آب دریا و همچنین اثر پمپاژ بر روی این آبخوانها

طول اولیه نفوذ گوه آب شور بدون اثر دیوار آب‌بند و طول L_C طول نهایی نفوذ گوه آب شور با اثر دیوار آب‌بند می‌باشد:

$$PR = \left(\frac{L_0 - L_C}{L_0} \right) * 100 \quad (4)$$

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایشات در یک مخزن از جنس پلاکسی گلاس با ابعاد طولی ۱۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و عرض ۱۰ سانتی‌متر بر پایه آزمایش‌های دویعدی انجام گرفت که ۱۰۰ سانتی‌متر از این مخزن را محیط متخلخل که شامل دانه‌های شیشه‌ای و ۳۰ سانتی‌متر از این مخزن را آب شیرین تشکیل می‌دهد (شکل ۱).

محفظه جانبی سمت راست (مخزن آب شیرین ۲) دارای شیر ورودی و لوله زهکش قائم خروجی است که قسمت بالایی لوله زهکش حدیده شده و از یک قطعه لوله دیگر که از داخل قلاویز شده جهت تغییر ارتفاع لوله زهکش استفاده شد و برای ایجاد تراز ارتفاعی دقیق مورد نظر از یک دوربین نقشه‌برداری نیوو (با دقت $\pm 2/5$ میلی‌متر در ۱ کیلومتر) استفاده شد که ترازهای ارتفاعی بر روی دیواره مخزن علامت‌گذاری شده و تراز ثابت مورد نظر در طول مدت آزمایش‌ها از روی آن تأمین شد. در سمت چپ مخزن، ۱۲ منفذ با قطر ۱۰ میلی‌متر و بفواصل ۵۰ میلی‌متر نسبت بهم تعبیه شده و از شیرهای پلاستیکی جهت کنترل ورود و خروج آب شور استفاده گردیده است که ده شیر پائینی (پورت L_1 تا L_{10}) جهت ورود همزمان آب شور به مخزن و دو شیر بالایی (پورت‌های L_{11} و L_{12}) جهت خروج آب شور و شیرین تداخلی از مخزن می‌باشد و امکان تنظیم به موقع هد آب شور را فراهم

پارامترهای هندسی: قطر مؤثر دانه‌های محیط متخلخل (d_e)، ارتفاع دیوار آب‌بند (Z_W)، فاصله طولی دیوار آب‌بند از مرز آب شور (L_W)، ارتفاع آبخوان (H);

پارامترهای دینامیکی: غلظت شوری محلول در منبع سیال (C_S)، غلظت شوری آبخوان (C)، هدایت هیدرولیکی افقی آبخوان (K_{fh})، هدایت هیدرولیکی عمودی آبخوان (K_{fv});

پارامترهای سینماتیکی: ویسکوزیته سینماتیکی (ν) و سرعت آب خروجی (V)

در حالت کلی می‌توان رابطه (۱) را نوشت:

$$F = (d_e \cdot Z_W \cdot L_W \cdot H \cdot k_{fh} \cdot k_{fv} \cdot \nu \cdot C_S \cdot C) = 0 \quad (1)$$

با استفاده از تئوری باکینگهام و با فرض پارامترهای (H, C_S, ν) بعنوان پارامترهای تکراری نسبت‌های بی‌بعد به صورت زیر بدست خواهند آمد:

$$F \left(\frac{Z_W}{H} \cdot \frac{L_W}{H} \cdot \frac{k_{fh}}{k_{fv}} \cdot \frac{C}{C_S} \cdot \frac{V d_e}{\nu} \right) = 0 \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، $\frac{Z_W}{H}$ عدد بی‌بعد عمق دیوار آب‌بند، $\frac{L_W}{H}$ عدد بی‌بعد طول دیوار آب‌بند، $\frac{k_{fh}}{k_{fv}}$ بیانگر همسانی محیط آبخوان، $\frac{C}{C_S}$ عدد بی‌بعد غلظت نسبی آبخوان و $\frac{V d_e}{\nu}$ عدد بی‌بعد رینولدز و اثر نیروی لزجت است. رابطه (۲) را می‌توان بصورت رابطه (۳) برای نشان دادن غلظت شوری نسبی بعنوان تابعی از عوامل فوق نمایش داد:

$$\frac{C}{C_S} = F \left(\frac{Z_W}{H} \cdot \frac{L_W}{H} \cdot \frac{k_{fh}}{k_{fv}} \cdot R_e \right) \quad (3)$$

برای توصیف اثرگذاری دیوار آب‌بند در کاهش نفوذ شوری از معیار درصد کاهش طول گوه آب شور مطابق رابطه (۴) استفاده شده است که در آن PR شاخص کاهش طول گوه آب شور می‌باشد و مقادیر L_0

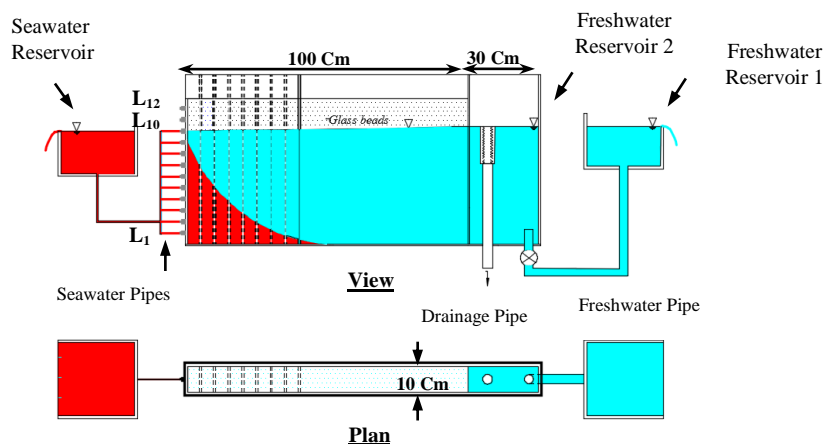


Fig. 1- View and plan of experimental model

شکل ۱- نما و پلان مدل آزمایشگاهی

آورده و در تمام آزمایش‌ها تراز آب شیرین (h_f) از ۴۱ تا ۴۶ سانتی‌متر متغیر و تراز آب شور (h_s) ثابت و در ۴۰ سانتی‌متر تنظیم شده است. برای جداسازی محیط متخلخل از محفظه آب شیرین، از صفحه‌های پلکسی‌گلاس مشبک استفاده گردیده است. سوراخ‌های ۱/۵ میلی‌متری صفحات، توسط توری ریز پوشیده شده تا ضمن عبور جریان از صفحه‌های مشبک از ورود دانه‌های محیط متخلخل به محفظه جانبی ممانعت کند. محیط آبخوان شبیه‌سازی شده به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و عرض ۱۰ سانتی‌متر است که از سمت مرز آب شور شیارهایی بر روی دیواره‌ی محفظه جریان به منظور قرارگیری دیوار آب‌بند در نظر گرفته شده است. این شیارها به عمق دو میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با فاصله پنج سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند و در کل تعداد هشت شیار روی دیواره محفظه جریان ایجاد شده است. از سه ورق از جنس پلکسی‌گلاس با ارتفاع ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، عرض ۱۰/۴ سانتی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر بعنوان دیواره‌های آب‌بند استفاده شده که این دیواره‌ها با قرار دادن داخل شیارهای تعبیه شده بر روی محفظه جریان شرایط را برای انجام آزمایش‌ها مهیا می‌سازد. برای ایجاد شرایط محیطی همگن در داخل محفظه آزمایشگاهی و امکان عکس‌برداری مناسب، از ذرات شفاف شیشه‌ای به جای ماسه به شکل کروی و آب گریز در محدوده قطر ۱۰۱۵ میکرومتر با وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و محیط ناهمگن از ترکیب دانه‌های در محدوده قطر ۴۲۰، ۶۰۰، ۸۵۰ و ۱۱۸۰ میکرومتر بر اساس تجربه تحقیقات گذشته (Mehdizade and

دانه‌بندی سیلت و ماسه ریز بعنوان نمودی از دانه‌بندی آبخوان‌های ساحلی با نسبت معین و لایه‌بندی مختلف استفاده شد. آب شیرین مورد نیاز آزمایش از آب شرب با جرم‌جمعی ۱۰۰۴/۸ کیلوگرم بر مترمکعب، در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد تأمین شده است. برای تمایز آب شور از آب شیرین و پایش آن درون محیط متخلخل، مطابق مطالعات (Goswami and Clement (2007) از رنگ خوراکی قرمز استفاده گردیده است. آب شور با افزودن نمک دریا و رنگ خوراکی قرمز به آب شیرین درون بشکه‌های ۲۵ لیتری آماده شده است. جرم حجمی آب شور رنگ شده، هم توسط چگالی‌سنج و هم توسط ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شده که مقدار آن ۱۰۲۳/۲ کیلوگرم بر مترمکعب (غلظت ۳۰ گرم بر لیتر) بدست آمده است.

با توجه به هدف تحقیق مبنی بر مشاهده و تحلیل گوه آب شور با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، لازم بود مخزن جریان درون اتاق تاریک قرار گیرد که نور آن فقط از یک منبع روشنایی کنترل شده تأمین گردد. با این کار اثر نور محیط پیرامونی بر روی تصویربرداری به حداقل رسید. همچنین جداره‌های شیشه‌ای محل آزمایش توسط رنگ مشکی، تیره شدند. در مدت آزمایش نور یکنواخت از یک منبع نوری ثابت (سه لامپ مهتابی ۱۰۰ وات) در فاصله معین در پشت مخزن و در ارتفاع بالاتر تأمین شد و جهت وضوح بیشتر تصاویر از دیواره سفید در پشت مخزن بهره گرفته شد.

Table 1- Summary of laboratory model characteristics

جدول ۱- خلاصه مشخصات مدل آزمایشگاهی

Characteristics	Description
Simulation Setup	
Model type	Reynolds model
Dimension	Three dimension (100*60*10) cm to two dimension form
Porous media	Glass bid
Simulation mode	Steady state flow
Model characteristics	
Diameter of porous media (d_e)	Homogenous layer: 1015 μm Heterogeneous layers: (420; 620; 800; 1180) μm
Cutoff wall height (Z_w)	20, 30, 40 cm (Plexiglass)
Cutoff wall distant from seawater boundary (L_w)	10, 20, 30, 40 cm (Plexiglass)
Concentration of seawater	Concentration of seawater aquifer (C) Concentration of seawater reservoir (Cs): 30 g/l
Hydraulic conductivity (Homogenous media)	Horizontal direction (k_{fh}): 0.55 cm/s Vertical direction (k_{fv}): 0.55 cm/s
Porosity	Homogenous layer: 0.37 Heterogeneous layers: 0.4
Kinematic parameters	Kinematic viscosity (ν), Velocity (V)

آمده و در نهایت عدد رینولدز محاسبه شده است. قطر مؤثر حالت ناهمگن ($d_{50}=0.8 \text{ mm}$) از طریق منحنی دانه‌بندی نمونه مصالح بدست آمده است.

در حالت بعدی و با همان شرایط قبلی، تراز آب شیرین در هر مرحله یک واحد کاهش داده شده و این کار تا تراز ۴۱ سانتی‌متری صورت گرفته است و با کاهش دادن تراز آب شیرین و ثابت ماندن تراز آب شور هجوم آب شور نسبت به حالت قبلی بیشتر و با گذشت زمان، گوه آب شور پیشروی کرده تا سرانجام سیستم به حالت ماندگار رسیده و بعد از اینکه ثابت شدن گوه محرز شد عکس مورد نظر ثبت و دبی خروجی اندازه‌گیری شده است. شکل ۲ وضعیت پیشروی گوه آب شور در محیط همگن و در تراز آب شیرین ۴۳ سانتی‌متر در حالت ماندگار را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲- محیط همگن با دیوار آب‌بند در حالت ماندگار

در حالت همگن و شرایط ماندگار تأثیر دیوارهای آب‌بند با ارتفاع‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری در فاصله‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری از مرز آب شور مورد بررسی قرار گرفته است. در همه آزمایش‌ها، قبل از ریختن دانه‌های شیشه‌ای ابتدا دیوار آب‌بند مورد نظر در فاصله معین، از بالای محل شیارهای تعبیه شده بر جداره داخلی مخزن نصب و با استفاده از چسب شفاف پلکسی آب‌بندی شده است. روند انجام آزمایش‌ها همانند حالت بدون دیوار است. شکل ۳ وضعیت پیشروی گوه آب شور را با در نظر گرفتن $Z_w=40 \text{ cm}$ و $L_w=30 \text{ cm}$ از مرز آب شور و تراز آب شیرین ۴۳ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

۲-۳-۳- محیط ناهمگن با شرایط بدون دیوار آب‌بند در حالت ماندگار

برای شرایط ناهمگن از ترکیب دانه‌هایی در محدوده ۱۱۸۰ میکرومتر (وزن ۲۰ کیلوگرم)، ۸۵۰ میکرومتر (وزن ۲۳ کیلوگرم)، ۶۰۰ میکرومتر (وزن ۲۲ کیلوگرم) و ۴۲۰ میکرومتر (وزن ۲۰ کیلوگرم) استفاده شده است، در شرایط ناهمگن دانه‌ها در لایه‌های مختلف هم از نظر قطر و هم از نظر بعد مکانی در مخزن ریخته شده و شرایط خروج هوای بین ذرات شیشه‌ای و روند انجام آزمایش‌ها همانند حالت همگن اجرا شده است. شکل ۴ وضعیت پیشروی شوری در حالت ناهمگن را در تراز آب شیرین ۴۳ سانتی‌متر و در حالت ماندگار نشان می‌دهد.

برای ضبط و ثبت فرایند نفوذ و یا پسرقت آب شور درون محفظه مرکزی از دوربین عکاسی دیجیتال Nikon D7100 با رزولوشن 3368×6000 پیکسل که دارای قابلیت عکس‌برداری در فواصل زمانی مشخص بود، استفاده شده است (Rezapour et al., 2018).

۲-۳-۳- فرآیند آزمایش

با توجه به روش‌شناسی تحقیق و استفاده از آنالیز ابعادی بعنوان پایه و اساس تحقیق، پارامترهای مؤثر در تحلیل نفوذ آب شور به آب شیرین مشخص و بر این اساس سناریوی تحقیق به فرم زیر تعریف گردید:

۲-۳-۱- محیط همگن با شرایط بدون دیوار آب‌بند در حالت ماندگار

قبل از شروع آزمایش، دانه‌های شیشه‌ای در شرایط کاملاً اشباع، در لایه‌های ۵ سانتی‌متری به داخل محفظه مرکزی ریخته شدند و به صورت یکنواخت متراکم گشتند. با این کار ضمن توزیع یکنواخت دانه‌ها، حباب‌های هوای گیر افتاده بین دانه‌ها از محیط متخلخل حذف شدند (Rezapour et al., 2018; Mehdizade and vafaei, 2016). در شرایطی که محیط متخلخل کاملاً از آب شیرین اشباع و تراز سطح آب شیرین در تراز ۴۶ سانتی‌متر تنظیم و ثابت شده بود، سطح آب در مخزن آب شور (سمت چپ) در تراز ۴۰ سانتی‌متر ثابت و شیرهای ورودی (پورت‌های L_1 تا L_8) آب شور مخزن باز شد تا آب شور از طریق ۸ تا پورت تحت شرایط یکسان به محیط آبخوان تزریق شود. آب شور با چگالی بالا به سرعت جایگزین آب شیرین در کف محفظه سمت چپ شده و مازاد آن از تراز ۴۰ سانتی‌متری از طریق شیرهای خروجی (پورت‌های L_9 تا L_{12}) خارج شده است. با جایگزین شدن آب شور در سمت چپ مخزن، فرایند هجوم آب شور با تشکیل گوه آغاز شده تا فراهم شدن شرایط ماندگار که ناشی از عدم پیشروی پنجه شوری بر اساس دو عکس متوالی گرفته شده در فاصله زمانی ۱۵ دقیقه (Mehdizade and Vafaei, 2016) و اندازه‌گیری طولی توسط خط‌کش مدرج در فاصله طولی مخزن آزمایش تصویربرداری نهائی مورد نظر انجام شد. بعد از ثبت عکس در هر مرحله از آزمایش دبی خروجی به صورت حجمی که شامل مخلوطی از آب شور و شیرین می‌باشد به منظور محاسبه سرعت اندازه‌گیری شد و سپس با در نظر گرفتن قطر مؤثر دانه‌های شیشه‌ای در دو حالت همگن و ناهمگن، لزجت سینماتیک با اندازه‌گیری دمای محیط آبخوان بدست

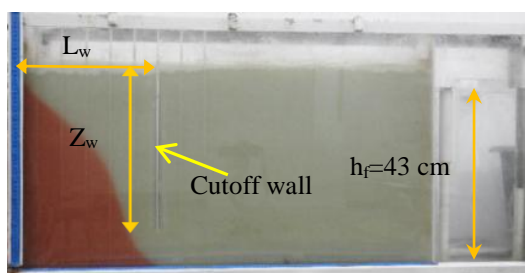


Fig. 3- SWI in homogeneous case with $Z_w=40$ cm and $L_w=30$ cm at freshwater level of $h_f=43$ cm

شکل ۳- پیشروی شوری در محیط همگن با $Z_w=40$ cm و $L_w=30$ cm در تراز آب شیرین ۴۳ سانتی متر

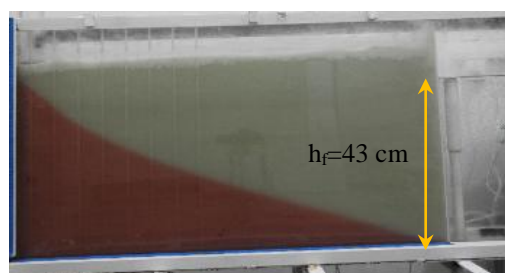


Fig. 2- SWI in homogeneous case without cutoff wall at the freshwater level of $h_f=43$ cm

شکل ۲- پیشروی شوری در محیط همگن بدون دیوار آب بند در تراز آب شیرین ۴۳ سانتی متر

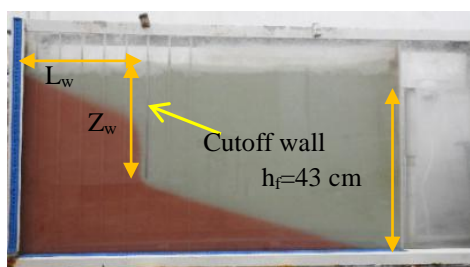


Fig. 5- SWI in nonhomogeneous case with $Z_w=30$ cm and $L_w=30$ cm at freshwater level of $h_f=43$ cm

شکل ۵- پیشروی شوری در محیط ناهمگن با $Z_w=30$ cm و $L_w=30$ cm در تراز آب شیرین ۴۳ سانتی متر

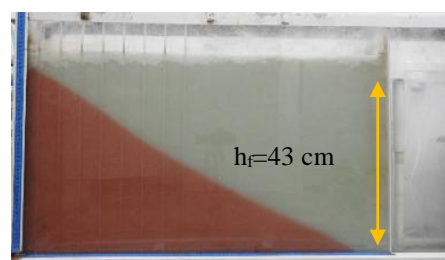


Fig. 4- SWI in nonhomogeneous case without cutoff wall at the freshwater level of $h_f=43$ cm

شکل ۴- پیشروی شوری در محیط ناهمگن بدون دیوار آب بند در تراز آب شیرین ۴۳ سانتی متر

استخراج پارامترهای مدنظر در شرایط ماندگار، تصاویر دیجیتال به دست آمده با استفاده از تکنیک پردازش تصویر آنالیز شدند. برای این منظور، الگوریتم پیشنهادی در Matlab (R2015b) پیاده سازی شد (Robinson et al., 2016; Rezapour et al., 2018) که شامل چهار گام اصلی می باشد:

۲-۴-۱- پیش پردازش

هدف از این مرحله حذف نواحی خارج از محفظه اصلی است. تصاویر اخذ شده توسط دوربین، حاوی بخش هایی غیر از محفظه اصلی است که قبل از هر چیز باید آنها را حذف نمود (شکل ۶).

از آنجا که محلول آب شور حاوی ماده قرمز رنگی است، استخراج ناحیه آب شور، به راحتی امکان پذیر است. برای این کار می توان با آستانه گیری تصویر در فضای رنگی مختلف استفاده نمود.

۲-۳-۴- محیط ناهمگن با دیوار آب بند در حالت ماندگار

در این بخش نیز روند آزمایش ها همانند محیط همگن است. در این حالت تراز آب شور در مرز ۴۰ سانتی متری ثابت بوده و با کاهش تراز آب شیرین در مرز ورودی از ۴۶ به ۴۱ سانتی متر پس از تثبیت گوه آب شور تصویربرداری صورت گرفته است. شکل ۵ وضعیت پیشروی شوری را در حالت ناهمگن با $Z_w=30$ cm و $L_w=30$ cm از مرز آب شور و تراز آب شیرین ۴۳ سانتی متر نشان می دهد.

۲-۴- جمع آوری داده ها و پردازش تصاویر

در هر مرحله از سناریوی آزمایش ها پس از برقراری شرایط ماندگار و تثبیت گوه آب شور، اقدام به تصویربرداری از مخزن شده است. فاصله دوربین از مخزن جریان و سایر پارامترهای دوربین به گونه ای تنظیم شدند که مرزهای ناحیه اختلاط به خوبی شناسایی شود. بنابراین، پس از آزمون های حساسیت، دوربین در فاصله ۱/۵ متری مخزن جریان قرار گرفت. تصاویر گرفته شده در فرمت RAW ذخیره شدند. برای

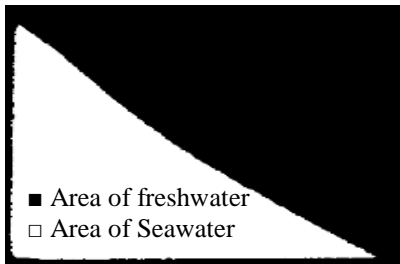


Fig. 7- Binary mask of seawater area

شکل ۷- ماسک باینری تعیین کننده ناحیه آب شور

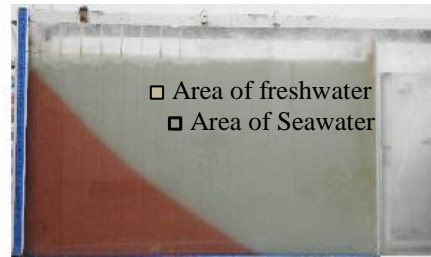


Fig. 6- Sample image taken by the camera

شکل ۶- نمونه تصویر اخذ شده توسط دوربین

به صورت تجربی بدست می‌آیند. برای این منظور نمونه‌هایی از آب شور در غلظت‌های ۰٪، ۵٪، ۵۰٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ و ۱۰۰٪ تهیه نموده و هر کدام به صورت جداگانه وارد محیط متخلخل شده و از آن در شرایط نوری یکسان تصویربرداری شده است. به این ترتیب چهار تصویر در چهار غلظت مختلف در دست داشته و الگوریتم‌های پیش‌پردازش بیان شده در بخش قبل بر روی آن اعمال می‌شود. پس از اعمال پیش‌پردازش بر روی هر کدام از تصاویر، چهار تصویر خاکستری به دست می‌آید که غلظت هر کدام از پیش تعیین شده است. سپس، پیکسل‌های هر کدام از چهار تصویر مورد نظر میانگین‌گیری می‌شود. با این کار به ازای هر تصویر یک عدد اسکالر به دست می‌آید که بیانگر سطح روشنایی آن تصویر است. به عنوان مثال برای تصویر خاکستری مربوط به غلظت ۵٪، سطح روشنایی $I^{5\%}$ طبق رابطه زیر از میانگین‌گیری تمام پیکسل‌های آن بدست می‌آید.

$$I^{5\%} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \text{Im}^{5\%}(i, j) \quad (۴)$$

در رابطه (۴) M و N به ترتیب تعداد پیکسل‌ها در جهت i و j تصویر و Im شدت روشنایی پیکسل در موقعیت مکانی i و j تصویر می‌باشد. در انتها به نمایندگی هر کدام از غلظت‌های ۰٪، ۵٪، ۵۰٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ و ۱۰۰٪ یک سطح روشنایی بصورت $I^{0\%}$ ، $I^{5\%}$ ، $I^{50\%}$ ، $I^{90\%}$ و $I^{95\%}$ و $I^{100\%}$ به دست می‌آید. با آنالیز رگرسیونی بر روی نتایج می‌توان مقادیر ضرایب a ، b و c را بدست آورد. به این ترتیب با معلوم شدن a ، b و c می‌توان رابطه (۵) را بر روی هر کدام از تصاویر اعمال نمود و آنها را از فضای شدت روشنایی به فضای غلظت منتقل نمود (Goswami et al., 2008; Robinson et al., 2015). شکل ۸، تصویر را پس از اعمال رابطه (۵) نشان می‌دهد.

از آنجایی که محلول آب شور قرمز رنگ و پشت زمینه محفظه، سبز است در فضای رنگی RGB، با تفاضل‌گیری دو کانال رنگی قرمز و سبز و آستانه‌گیری مناسب بر روی تصویر حاصله، می‌توان یک ماسک باینری تعیین کننده ناحیه آب شور را تولید نمود. به منظور اطمینان از یکپارچگی ماسک باینری، تکه‌های باینری نزدیک به هم ماسک توسط عملیات مورفولوژیک به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل ۷، ماسک باینری جداکننده ناحیه شور تصویر شکل ۶ را نشان می‌دهد.

ماسک باینری تولید شده، حدود ناحیه شور را تعیین می‌کند که از آن می‌توان برای تعیین کادر مستطیلی ناحیه مرکزی محفظه استفاده نمود. برای این منظور کافی است که مقدار مینیمم و ماکزیمم شماره سطر و ستون پیکسل‌های حاوی مقدار را در تصویر ماسک بدست آورده و با کمک آنها، حدود کادر مستطیلی ناحیه مرکزی محفظه بر روی تصویر را تعیین کرد.

۲-۴-۲- کالیبراسیون

تصویر به دست آمده در فضای شدت روشنایی است. به منظور انجام تحلیل‌های عددی می‌بایست آن را به فضای غلظت برد. در این صورت هر پیکسل از تصویر عددی بین ۰ تا ۱۰۰ خواهد داشت که بیانگر درصد غلظت محلول در آن نقطه خواهد بود. از آنجایی که رابطه بین شدت روشنایی و درصد غلظت، غیرخطی است باید پارامترهای این رابطه غیرخطی را بدست آورد. در مقاله Goswami and Clement (2007) نشان داده شده است که رابطه بین غلظت و شدت روشنایی را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$C = a(I)^b - c \quad (۵)$$

در رابطه (۵) C و I بیانگر درصد غلظت و شدت روشنایی پیکسل می‌باشند. a ، b و c ضرایبی هستند که با توجه به آنالیز رگرسیونی و

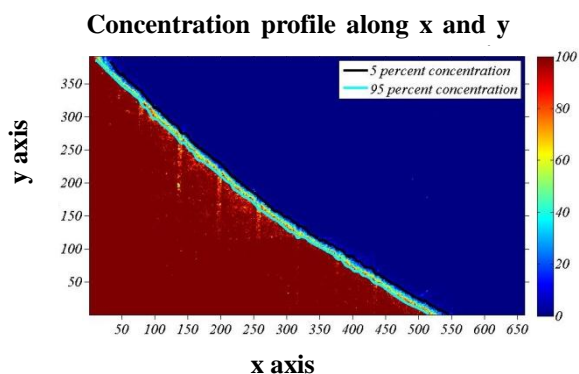


Fig. 9- Isolines with the concentration of 5% and 95%

شکل ۹- استخراج منحنی‌های هم غلظت ۵٪ و ۹۵٪

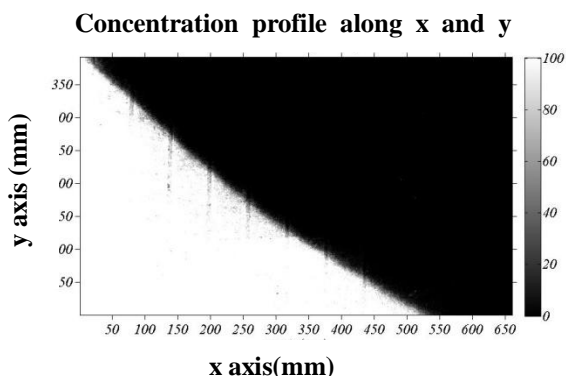


Fig. 8- Image concentration space

شکل ۸- فضای غلظت تصویر

است که بعنوان نمونه نتایج پردازش تصویر برای تراز آب شیرین ۴۳ سانتی‌متر مطابق سناریوها ارائه شده است.

شکل ۱۰ نتایج پردازش تصویر و تعیین فواصل نقاط هم‌غلظت گوه آب شور ۵٪ و ۹۵٪ از مرز آب شور را برای تراز آب شیرین ۴۳ سانتی‌متری در دو محیط همگن و غیرهمگن، بدون دیوار آب‌بند و با دیوار آب‌بند در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطوریکه در این شکل مشخص است با استفاده از کد متلب تهیه شده و پردازش تصاویر، خطوط هم‌غلظت ۵٪ و ۹۵٪ بدست آمد که با استفاده از آن می‌توان طول پیشروی نفوذ گوه آب شور به آب شیرین در دو حالت بدون و با دیوار آب‌بند (L_C, L_0) در دو جهت x و y را بدست آورد و در نهایت شاخص کاهش طول گوه آب شور (PR) را محاسبه کرد که بعنوان نمونه در شکل ۱۰ این مقادیر برای محیط همگن و خط هم‌غلظت ۹۵٪ بصورت $L_0 = 580$ mm و $L_C = 421$ mm و شاخص $PR=27.4\%$ و برای محیط غیرهمگن $L_0 = 656$ mm و $L_C = 549$ mm و شاخص $PR=16.3\%$ بدست آمد. این روند اجرا طبق روش تحقیق، برای ترازهای آب شیرین، طول ابعاد دیوار آب‌بند و فواصل مختلف تعریف شده کارگذاری این دیوار از مرز آب شور انجام و سپس محاسبات مربوط به آن صورت پذیرفت. جداول ۲ و ۳ نتایج محاسباتی درصد کاهش طول پیشروی گوه آب شور را در دو محیط همگن و غیرهمگن با نسبت‌های بی‌بعد $Zw/H=0.6$ و Lw/H مختلف نشان می‌دهد.

۲-۴-۳- استخراج داده‌ها

خطوط هم‌غلظت ۵٪ و ۹۵٪ به صورت دو منحنی مجزا استخراج شده‌اند. برای این منظور پیکسل‌هایی که مقدار غلظت آنها برابر با ۵٪ و ۹۵٪ است به صورت جداگانه استخراج شده و سپس از میان نقاط بدست آمده، داده‌های پرت به علت وجود نویزهای تصویر و بازتاب‌های نوری حذف شده است. در ادامه با استفاده از درون‌یابی چندجمله‌ای، منحنی عبوری از روی این نقاط بدست آورده شده است. شکل ۹ استخراج منحنی‌های هم‌غلظت ۵٪ و ۹۵٪ را نشان می‌دهد. به منظور نمایش بهتر و قابلیت تفکیک بهتر سطوح روشنایی، تصویر با استفاده از نقشه رنگی Colormap رنگ‌آمیزی شده است.

۲-۴-۴- پردازش کل داده‌ها

به منظور بدست آوردن طول پیشروی آب شور، محل قطع کردن محور طولی برای هر کدام از منحنی‌های ۵٪ و ۹۵٪ را بدست آورده و فاصله آن تا مبدأ محاسبه شده است. کلیه بخش‌های پیش‌پردازش، کالیبراسیون و استخراج داده‌ها بر روی کلیه تصاویر آزمایش همگن و آزمایش ناهمگن صورت پذیرفته است و از روی هر تصویر، میزان پیشروی آب شور استخراج شده است.

۳- نتایج و بحث

با توجه به سناریوهای تعریف شده در تحقیق، نتایج بدست آمده از انجام فرآیند آزمایش‌ها، ثبت و پردازش تصاویر در این بخش ارائه شده

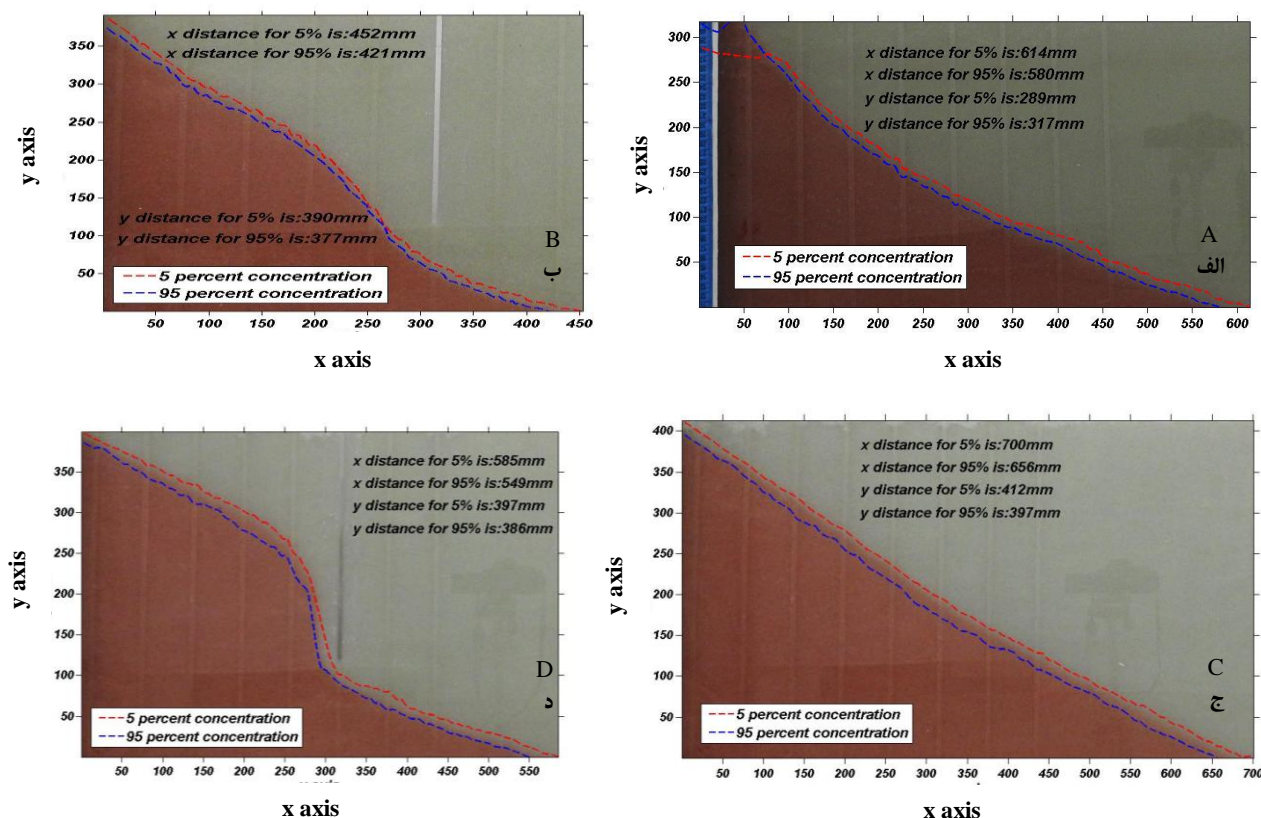


Fig. 10- The presentation of the isolines with the concentration of 5% and 95% from the seawater boundary and freshwater level $h_f=43$ cm A) Homogeneous case without cutoff wall, B) Homogeneous case with cutoff wall $Z_w/H=0.6$ at ratio of $Z_w/H=0.6$, C) Heterogeneous case without cutoff wall, D) Heterogeneous case with cutoff wall $Z_w/H=0.6$ at ratio of $L_w/H=0.6$

شکل ۱۰- نمایش منحنی و فواصل نقاط هم غلظت گوه آب شور ۵٪ و ۹۵٪ از مرز آب شور برای تراز آب شیرین $h_f=43$ cm (الف) محیط همگن بدون دیوار آب بند، (ب) محیط همگن با دیوار آب بند $Z_w/H=0.6$ در نسبت $L_w/H=0.6$ ، (ج) محیط ناهمگن بدون دیوار آب بند، (د) محیط ناهمگن با دیوار آب بند $Z_w/H=0.6$ در نسبت $L_w/H=0.6$

Table 2- Computational results of reduction percentage of the seawater wedge progression with cutoff wall ratio of $Z_w/H=0.6$ in different L_w/H in homogeneous case

جدول ۲- نتایج محاسباتی درصد کاهش طول پیشروی گوه آب شور با نسبت دیوار آب بند $Z_w/H=0.6$ در L_w/H مختلف در حالت همگن

Level (cm)	L_0 (cm)	($Z_w/H=0.6$)With cutoff wall							
		Lc(cm) at $L_w/H=0.2$		Lc(cm) at $L_w/H=0.4$		Lc(cm) at $L_w/H=0.6$		Lc(cm) at $L_w/H=0.8$	
		PR		PR		PR		PR	
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	55	0	100	0	100	0	100	20.2	63.2
44	65	0	100	11.9	81.69	21.8	66.46	31.7	51.2
43	75	19.2	74.4	29.3	60.93	33.1	55.86	46.8	37.6
42	85	33.1	61.058	39.6	53.41	42.1	50.47	61.3	27.8
41	95	44.4	53.26	51.6	45.68	50.7	46.63	87.3	8.10

Table 3- Computational results of reduction percentage of the seawater wedge progression with cutoff wall ratio of $Z_w/H=0.6$ in different L_w/H in heterogeneous case

جدول ۳- نتایج محاسباتی درصد کاهش طول پیشروی گوه آب شور با نسبت دیوار آب‌بند $Z_w/H=0.6$ در L_w/H مختلف در حالت ناهمگن

Level (cm)	L_0 (cm)	With cutoff wall ($Z_w/H=0.6$)							
		Lc(cm) at $L_w/H=0.2$		Lc(cm) at $L_w/H=0.4$		Lc(cm) at $L_w/H=0.6$		Lc(cm) at $L_w/H=0.8$	
		PR		PR		PR		PR	
46	64.84	14.6	77.48	23.3	64.06	29.5	54.50	48.8	24.73
45	73.92	22	70.23	29.1	60.63	38.9	47.37	61.8	16.39
44	77.6	28	63.91	37.3	51.93	46.9	39.56	68.5	11.72
43	96.6	29.8	69.15	46.7	51.65	54.7	43.37	78	19.25
42	98	35.2	64.08	54	44.89	64.6	34.08	95	3.06
41	98	39.7	59.4	58.1	40.71	69.9	28.67	98	0

قرارگیری دیواره آب‌بند در جهت کاهش پیشروی شوری در نسبت $L_w/H=0.2$ و $Z_w/H=0.8$ با میزان ۱۰۰٪ بدست آمد.

۳-۲- نتایج اثربخشی دیوار آب‌بند بر اساس آنالیز ابعادی در حالت ناهمگن

شکل ۱۲ نتایج اثربخشی اجرای دیوار آب‌بند را در حالت ناهمگن نشان می‌دهد که نسبت به حالت همگن درصد کاهش پیشروی گوه آب‌شور و شدت تغییرات به مراتب کمتر می‌باشد. در حالت ناهمگن با افزایش گرادیان هیدرولیکی میزان شاخص کاهش پیشروی شوری با روند یکنواخت‌تری نسبت به حالت همگن افزایش می‌یابد و این تغییر وضعیت بعلت نوع دانه‌بندی، تخلخل و فرم ساختمانی ذرات خاک در حالت ناهمگن می‌باشد. میزان اثربخشی دیوار آب‌بند در نسبت $L_w/H=0.2$ و $Z_w/H=0.8$ از گرادیان هیدرولیکی پایین تا بالا نزدیک بهم بوده و نتایج، مناسب‌ترین فرم قرارگیری دیواره را در همین نسبت با بالاترین میزان کاهش شوری به میزان ۹۲٪ نشان می‌دهد و بیان می‌کند که در حالت ناهمگن که با شرایط واقعی مطابقت دارد، نسبت به حالت همگن این اثرگذاری کاهش پیدا کرده اما با این وجود اثر آن قابل توجه بوده و می‌تواند بعنوان گزینه مؤثر در کنترل پیشروی گوه آب شور در آبخوان‌های ساحلی بکار گرفته شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیرگذاری اجرای دیوار آب‌بند به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش و کنترل نفوذ آب شور به آب شیرین آبخوان‌های ساحلی به روش آزمایشگاهی پرداخته شد.

۳-۱- نتایج اثربخشی دیوار آب‌بند بر اساس آنالیز ابعادی در حالت همگن

نتایج اثربخشی اجرای دیوار آب‌بند در کاهش نفوذ شوری به آب شیرین بر اساس نسبت‌های بی‌بعد که در آنالیز ابعادی مشخص شده بدست آمد. شکل ۱۱ نمودارهای درصد کاهش پیشروی گوه آب شور (غلظت ۹۵٪) را نسبت به مقادیر بدون بعد L_w/H ، Z_w/H و Re (عدد رینولدز) در حالت همگن نشان می‌دهد. با توجه به پارامترهای بی‌بعد در فضای تحقیق، اثر هر کدام را با توجه به شکل ۱۱ می‌توان بصورت زیر تفسیر کرد:

همانطوریکه در شکل ۱۱ پیداست در گرادیان‌های پایین و محدوده عدد رینولدز $0.031 \leq Re \leq 0.16$ بالارفتن ارتفاع دیوار آب‌بند و افزایش فاصله نصب آن نسبت به مرز آب شور عملاً تأثیری در کاهش شاخص پیشروی گوه آب شور ندارد و با افزایش گرادیان هیدرولیکی و عدد رینولدز این رویه تغییر می‌کند. بطور مشخص در گرادیان هیدرولیکی کم میزان اثربخشی ارتفاع دیواره آب‌بند در نسبت $Z_w/H=0.4-0.6$ پائین بوده و در $Z_w/H=0.4$ تقریباً بی‌اثر می‌باشد و در این حالت بهترین اثربخشی دیواره را در نسبت $L_w/H=0.2$ و $Z_w/H=0.4$ می‌توان دید. با افزایش گرادیان هیدرولیکی (افزایش تراز آب شیرین) میزان تأثیرگذاری دیواره آب‌بند در کاهش شاخص پیشروی شوری افزایش پیدا کرده به گونه‌ای که در $Re_{max}=0.468$ در نسبت $L_w/H=0.2$ و تمام نسبت‌های Z_w/H به حداکثر میزان خود می‌رسد. با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده در حالت همگن بهینه‌ترین شرایط

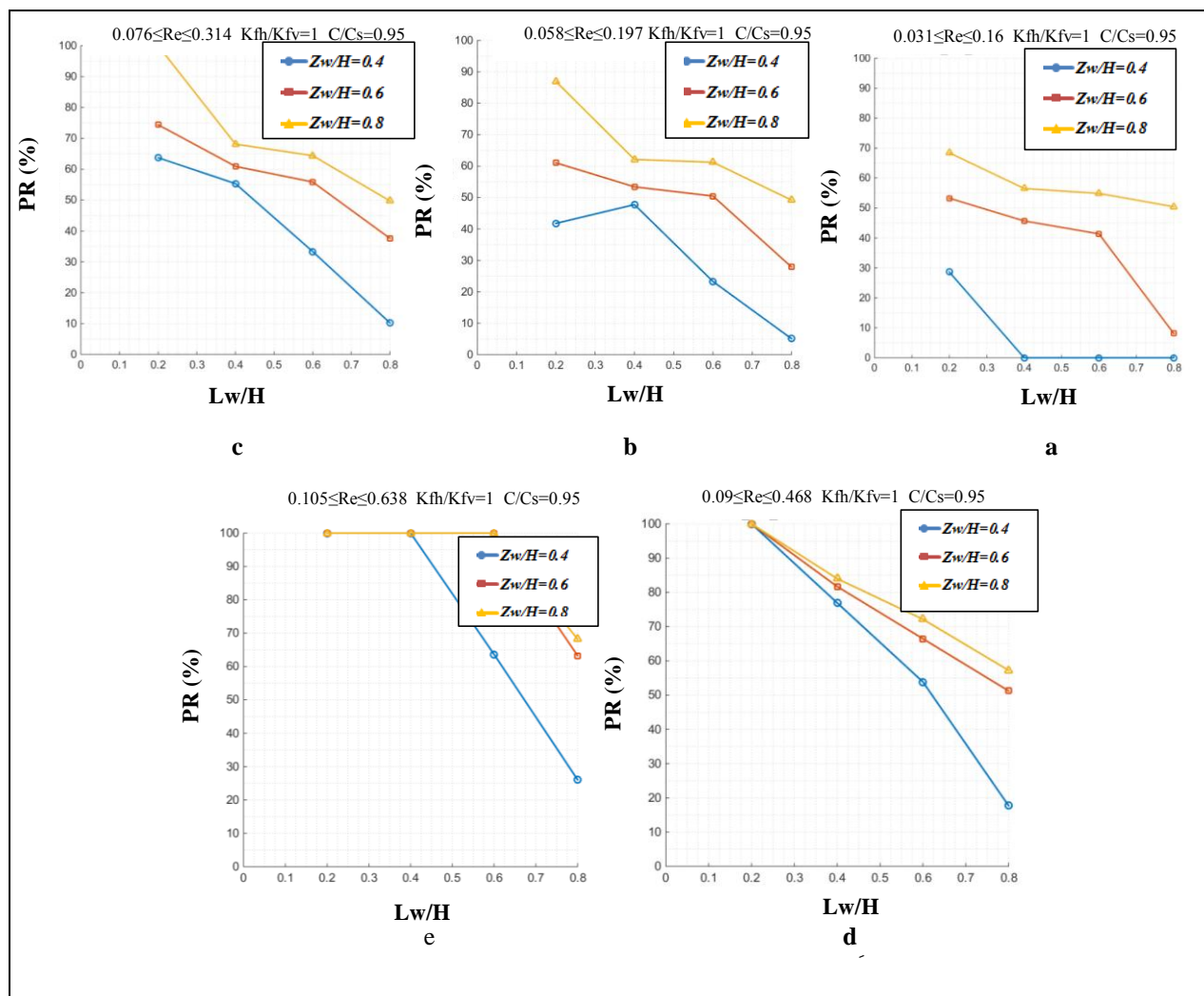


Fig. 11- (a to e)- Reduction percentage seawater wedge progression for different values of Lw/H, Zw/H and Re for homogeneous case

شکل ۱۱- (a تا e) - درصد کاهش پیشروی گوه آب شور برای مقادیر مختلف Lw/H, Zw/H و Re در حالت همگن

گوه آب شور در حالت ناهمگن نسبت به همگن افزایش یافته است. همچنین، تأثیرگذاری اجرای دیوار آب‌بند در حالت همگن بیشتر از حالت ناهمگن می‌باشد که حداکثر آن در حالت همگن ۱۰۰٪ و در حالت ناهمگن ۹۲٪ بدست آمد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها در مدل آزمایشگاهی مذکور بهترین فرم اجرای دیوار آب‌بند در حالت همگن و ناهمگن در نسبت‌های Lw/H=0.2 و Zw/H=0.8 حاصل شد.

مقایسه کلی نمودارهای هم‌غلظت ۵٪ و ۹۵٪ و همچنین ضخامت ناحیه اختلاط بدست آمده این تحقیق در حالت بدون دیوار آب‌بند و ناهمگن با نتایج تحقیق ارائه شده توسط Mehdizadeh and vafaei (2016) مطابقت دارد.

برای اینکار ابتدا پارامترهای مؤثر در مسئله در نظر گرفته شده و با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری باکینگهام نسبت‌های بی‌بعد بدست آمد و فرآیند و سناریوهای آزمایش‌ها با توجه به پارامترهای بی‌بعد مؤثر طرح‌ریزی شد. سپس در هر مرحله از آزمایش‌ها با استفاده از تصویربرداری و تکنیک پردازش تصویر به تحلیل نتایج آزمایشگاهی پرداخته شد و نتایج بدست آمده برای یافتن نقاط هم‌غلظت ۵٪ و ۹۵٪ و ترسیم منحنی مربوط به آنها با توجه به تغییرات گرادبان هیدرولیکی آب شیرین به سمت آب شور صورت پذیرفت. در نهایت منحنی‌های درصد کاهش پیشروی گوه آب شور به آب شیرین نسبت به مقادیر بدون بعد Lw/H, Zw/H و Re و همگنی یا غیرهمگنی محدوده آزمایشی بدست آمد. در مدل آزمایشگاهی، میزان پیشروی

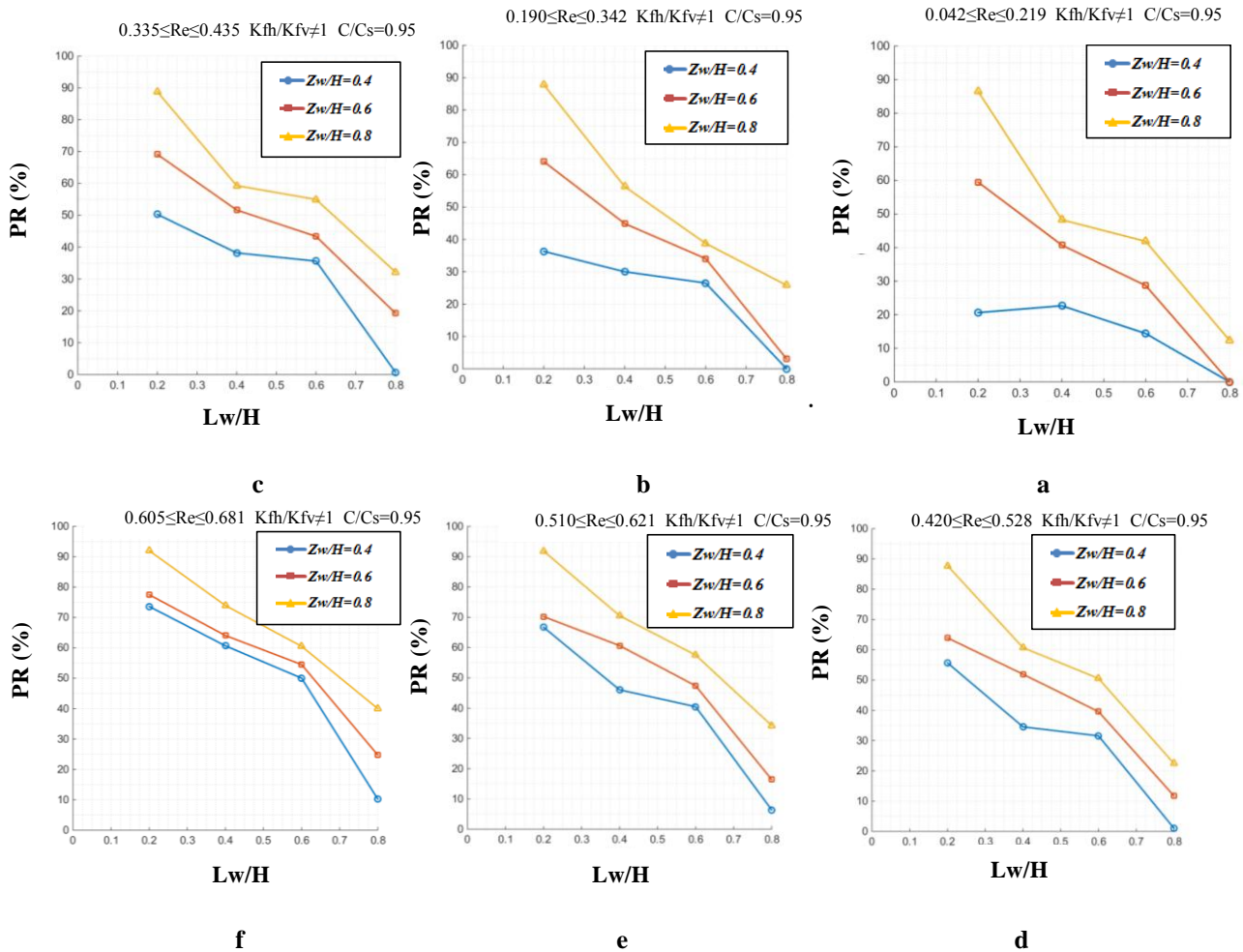


Fig. 12- (a to f)- Reduction percentage seawater wedge progression for different ratios of Lw/H, Zw/H and Re for heterogeneous case
 شکل ۱۲- (a تا f) - درصد کاهش پیشروی گوه آب شور برای نسبت‌های مختلف Lw/H و Zw/H در حالت ناهمگن

عددی بی‌بعد حاصل، در طراحی بهینه این دیواره در محیط واقعی کمک گرفت.

پی‌نوشت‌ها

- 1- The Semi-Pervious Subsurface Barrier
- 2- The Subsurface Dam
- 3- The Cutoff Wall

همچنین، یافته‌های این تحقیق با نتایج تحقیق ارائه شده توسط Kaleris and Ziogas (2013) در بدست آوردن نمودارهای بی‌بعد کاهش پیشروی گوه آب شور ناشی از تأثیرگذاری دیوار آب‌بند در دو حالت همگن و ناهمگن مطابقت دارد.

در یک نتیجه‌گیری کلی انجام این تحقیق نشان داد که می‌توان با استفاده از اصول مکانیک سیالات کاربردی، مطالعه آزمایشگاهی، تکنیک پردازش تصویر و نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌های پیشین به تحلیل دقیق‌تر پدیده نفوذ آب شور به آب شیرین در آبخوان‌های ساحلی با در نظر گرفتن دیواره آب‌بند پرداخت و می‌توان از نمودارهای

۵- مراجع

- Abarca E, Vazquez-Sune E, Carrera J, Capino B, Gamez D, and Batlle F (2006) Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resource Research* 42(9):W09415
- Abd-Elhamid HF, Javadi AA (2011) A density dependent finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 401:259-271
- Abdollahi-Nasab A, Boufadel MC, Li H, and Weaver JW (2010) Saltwater flushing by freshwater in a laboratory beach. *Journal of Hydrology* 386:1-12
- Abdoulhalik A, Ahmed AA (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, and Hamill G (2017) A new physical barrier system for seawater intrusion control. *Journal of Hydrology* 549:416-427
- Anwar HO (1983) The effect of a subsurface barrier on the conservation of fresh water in coastal aquifers. *Water Research* 17(10):1257-1265
- Chang SW, Clement TP (2012) Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems. *Water Resource Research* 48(9):1-10
- Feseker T (2007) Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany. *Hydrogeology Journal* 15(2):267-279
- Goswami R, Ambale B, and Clement TP (2008) Estimating errors in concentration measurements obtained from image analysis. *Vadose Zone Journal* 8(1):108-118
- Goswami R, Clement TP (2007) Laboratory scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Water Resource Research* 43(4)
- Gualbert HP (2001) Improving fresh groundwater supply: Problems and solutions. *Ocean Coastal Management* 44(5-6):429-449
- Jakovovic D, Werner AD, and Simmons CT (2011) Numerical modelling of saltwater up-coning: Comparison with experimental laboratory observations. *Journal of Hydrology* 402(3):261-273
- Japan Green Resources Agency (2004) Technical reference for effective groundwater development. Kanagawa Japan
- Kaleris VK, Ziogas AI (2013) The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 476:370-383
- Ketabchi H, Mahmoodzadeh D, Ataie-Ashtiani B, and Simmons CT (2016) Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology* 535(C):235-255
- Luyun JrR, Momii K, and Nakagawa K (2009) Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *Journal of Hydrology* 377(3):227-236
- Luyun JrR, Momii K, and Nakagawa K (2011) Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion. *Ground Water* 49(2):239-249
- Mahesha A (2009) Conceptual model for the safe withdrawal of freshwater from coastal aquifers. *Journal of Environmental Engineering* 135(10):980-988
- Mahesha A, Lakshmikanth P (2014) Saltwater intrusion in coastal aquifers subjected to freshwater pumping. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(2):448-456
- Mahmoodzadeh D, Karamouz M (2018) Seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers under flooding events. *Journal of Hydrology* 568:1118-1130
- Mahmoodzadeh D, Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B, and Simmons CT (2014) Conceptualization of a fresh groundwater lens influenced by climate change: A modeling study of an arid-region island in the Persian Gulf, Iran. *Journal of Hydrology* 519(A):399-413
- Mahmoodzadeh D, Ketabchi H, and Ataie-Ashtiani B (2016) Effects of sea level rise and recharge rate variations on seawater intrusion in confined aquifer. *Journal of Hydraulics* 10(4):1-15 (In Persian)
- Mehdizadeh SS, Werner AD, Vafaei F, and Badaruddin S (2014) Vertical leakage in sharp interface seawater intrusion models of layered coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 519:1097-1107
- Mehdizadeh SS, Vafaei F, and Abolghasemi H (2015) Assessment of sharp-interface approach for saltwater intrusion. *Environment Earth Science* 73(12):8345-8355
- Mehdizadeh SS, Vafaei F (2016) Experimental and numerical investigation on saltwater intrusion into unconfined coastal aquifers. *Journal of Oceanography* 7(25):67-76 (In Persian)
- Najmaei M (1990) Engineering hydrology. Amirkabir University Press, 440 p (In Persian)

- Osuga K (1997) The development of groundwater resources on the Miyakojima islands. *Freshwater Resources in Arid Lands*, UNU Global Environmental Forum V. United Nations University Press, Tokyo
- Pool M, Carrera J (2010) Dynamics of negative barriers to prevent seawater intrusion. *Hydrogeology Journal* 18(1):95–105
- Potter MC, Wiggert DC, Ramadan B, and Shih TI-P (2012) *Mechanics of fluids* 4th Edition. Cengage Learning, Inc, 818p
- Rezapour A, Saghravani SF, and Ahmadifard A (2018) Study of saltwater intrusion in the coastal aquifers under transient condition using image processing and numerical modeling. *Journal of Hydraulics* 13(2):69-82 (In Persian)
- Robinson G, Ahmed AA, and Hamill GA (2016) Experimental saltwater intrusion in coastal aquifers using automated image analysis: Applications to homogeneous aquifers. *Journal of Hydrology* 538:304–313
- Robinson G, Hamill GA, and Ahmed AA (2015) Automated image analysis for experimental investigations of salt water intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 530:350–360
- Sugio S, Nakada K, and Urish DW (1987) Subsurface seawater intrusion barrier analysis. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 113(6):767–779
- Thorenz C, Kosakowski G, Kolditz O, and Berkowitz B (2002) An experimental and numerical investigation of saltwater movement in coupled saturated–partially saturated systems. *Water Resource Research* 38(6)
- Todd DK, Mays LW (2005) *Groundwater hydrology*. John Wiley and Sons, Inc, Third Edition, 656PP
- Wilson JL, Sa da Costa A (1982) Finite element simulation of a saltwater/freshwater interface with indirect toe tracking. *Water Resources Research* 18(4):1069–1080
- Zhang Q, Volker RE, and Lockington DA (2002) Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater. *Advances in Environmental Research* 6(3):229-237
- Xuan Y, Holly AM (2019) Mechanisms, configuration typology, and vulnerability of pumping-induced seawater intrusion in heterogeneous aquifers. *Advances in Water Resources* 128:117-128