

## Research Paper

## Numerical investigation the effect of groundwater uplift on the interface between fresh and saline water and mixing zone in the aquifers adjacent deserts

Mohammadreza Ettehadi<sup>1</sup>, Seyed Arman Hashemi Monfared<sup>2</sup>, Abbasali Rezapoor<sup>3</sup>, Ali Mohtashami<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Master of science in Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

[Hashemi@eng.usb.ac.ir](mailto:Hashemi@eng.usb.ac.ir) (Corresponding Author)

<sup>3</sup> Assistant Professor of Civil Engineering, Birjand University of Technology

<sup>4</sup> PhD student in Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan



10.22125/IWE.2021.251546.1424

Received:  
**October.06.2020**  
Accepted:  
**January.06.2021**  
Available online:  
**October.5.2022**

### Keywords:

**Aquifers adjacent deserts, Saline Water Return, Interface, Mixing Zone, SUTRA numerical model**

### Abstract

Most parts of Iran have arid and semi-arid climates. Therefore, many deserts and playas have been formed in these areas. In the present study, the return of saline water due to the groundwater head increase in the aquifers with the usage of SUTRA numerical model, was investigated. In order to assess the wedge behavior of saline water in transient state, the toe length of the wedge is analyzed. The changes in the height of wedge shape due to the time is measured. The results showed that: a) With the progression of the wedge behavior, its height is getting earlier to the steady state in comparison to its length, however in the return time, they both reached the steady condition at the same time. b) Unlike the wedge's length, which reaches the steady state earlier than the progression time, its height has an equal time to reach the steady condition in both states (progression and return). The achieved results also showed that due to the mixing process, the mixing zone expanded earlier in return phase. Also, as the wedge approached the steady condition, the area of mixing zone decreased gradually.

\* **Corresponding Author:** Seyed Arman Hashemi Monfared

**Address:** Associate Professor, Civil Engineering,  
University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran,

**Email:** [Hashemi@eng.usb.ac.ir](mailto:Hashemi@eng.usb.ac.ir)

**Tel:** Number

## 1. Introduction

Water is known as the exigent factor in planning for the future. The main issue of water scarcity for countries such as Iran, has long been discussed, and access to water resources for various purposes such as drinking, agricultural, and industrial uses is of specific importance. This importance is even higher in areas of Iran that

are heavily dependent on groundwater resources. Groundwater resources in various areas of the world are used in different sectors such as irrigation, environment, and agriculture. For meeting these demands and water needs, desired practices were put in place to compensate for the permanent and irreversible (Akbarpour et al. 2020). As groundwater systems are complex in nature, especially in arid areas, it is essential to identify the groundwater temporal and spatial distribution when selecting the pumping rate of extraction wells. Therefore, simulation plays a crucial role in planning and managing groundwater systems (Swathi & Eldho 2014a, 2014b).

## 2. Materials and Methods

### Conceptual model

This research has used the geometric characteristics and hydrological parameters of Lu-Werner's (2013) homogeneous and isotropic 2D aquifer (Table 1) to study saline inflow/return to desert-vicinity aquifers.

Table 1- Geometric characteristics and hydrological parameters of the desired aquifer

Unit	Value	Parameter
m	1000	Computational field length
m	30	Height of computational field
m	1	Longitudinal dispersibility
m	0.1	Transverse dispersibility
-	0.3	Effective porosity
Kg/m <sup>3</sup>	1025	The density of salt water
Kg/m <sup>3</sup>	1000	Fresh water density
-	0.035	Mass concentration ratio
m <sup>2</sup>	1.18E11	Intrinsic permeability
1/m	0.008	Special save

### Numerical modeling

To simulate the saline-return phenomenon, this research has used the SUTRA numerical computer program that models the fluid flow movement in a porous medium along with the energy transfer. Its initial version was presented in 1984 and was gradually completed until the current SUTRA 2.2 version, which can also model time-dependent boundary conditions. It uses the finite element and backward finite difference methods for, respectively, spatial and temporal divisioning and approximates equations that govern the following two dependent processes:

- 1) Variable-density groundwater flows in saturated/unsaturated environments
- 2) Groundwater soluble-matter transfer considering adsorption, production or disintegration

In SUTRA numerical model, basic equations that govern fluid flows and soluble-matter transfer, when the latter is not subject to adsorption, production or disintegration and porous medium is saturated, are summarized as follows:

$$(\rho S_{op}) \frac{\partial p}{\partial t} + (\varepsilon) \frac{\partial p}{\partial c} - \nabla \left[ \left( \frac{kp}{\mu} \right) \cdot (\nabla p - pg) \right] = Q_p \quad (1)$$

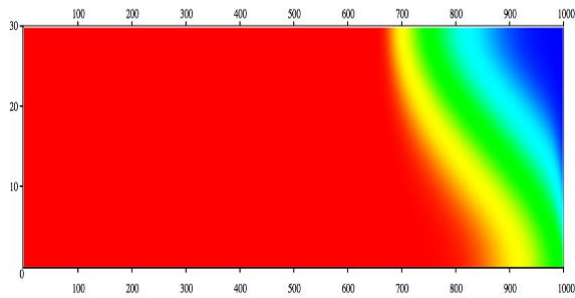
$$\frac{\partial(\varepsilon PC)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho v c) - \nabla[\varepsilon \rho (D_m I + D) \cdot \nabla C] = Q_p (C^* - C) \quad (2)$$

where  $\rho$  is the fluid density (M/L<sup>3</sup>), SOP is the aquifer specific pressure storage ([M/L/T<sup>2</sup>]-1) which is a function of the soil-fluid skeletal compressibility,  $p$  is the fluid pressure [M/(L×T<sup>2</sup>)],  $\varepsilon$  is the soil porosity,  $K$  is the inherent soil permeability [L<sup>2</sup>],  $\mu$  is the dynamic fluid viscosity [M/(L×T)],  $g$  gravity acceleration vector (L/T<sup>2</sup>),  $Q_p$  is the mass flux of the source fluid [M/(L<sup>3</sup>×T)],  $V$  is the average fluid velocity (L/T) found from Darcy relation,  $D_m$  is the molecular diffusion coefficient [L<sup>2</sup>/T],  $I$  is the identity matrix,  $D$  is the mechanical dispersion matrix [L<sup>2</sup>/t],  $C$  is the solution mass concentration [MS/M] and  $C^*$  is the soluble-material concentration in the source fluid [MS/M].

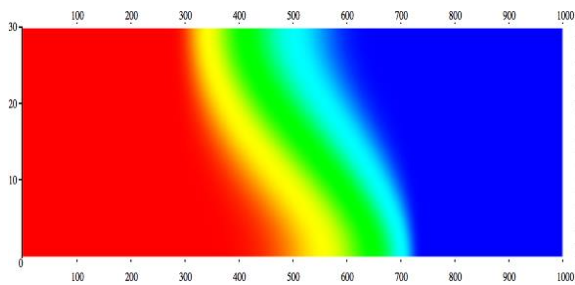
### 3. Results

It is worth mentioning that the results obtained by the end of the saline influx - Step 3 of the 4-Step modeling of the current study - were similar and conformed well (100%) to those of Rezapour (2018) in the numerical modeling part.

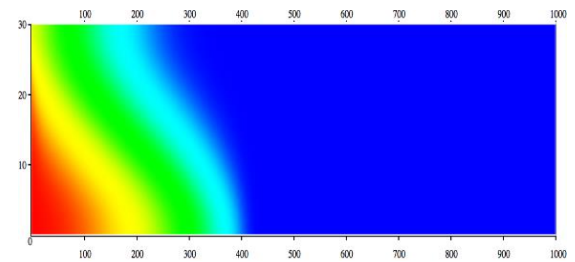
As mentioned before, 4 different concentrations (5, 15, 25 and 35 g/l) were used to study the playa saline return to the aquifer. All 4 Steps 1, 2, 3 and 4 were simulated for all 4 mentioned concentrations, but here, only the results of Step 4, conditions under which the aquifer water level is higher than that of the playa due to re-feeding, have been presented. Figures (1-4) show the numerical saline-return simulation results for the mentioned concentrations, respectively; for a standard aquifer, the horizontal axis shows the length and the vertical one presents the height (both in meters). In each figure, images presented at time zero correspond to the moment when Step 4 begins (stable conditions of Step 3 of the modeling). Results are shown for each concentration at 30-year time intervals under stable conditions to better present the saline return under transient conditions. To study the mixing zone behavior, the 25 and 75% concentration contours of saline and freshwater have also been drawn besides that of the 50% one. A brief study of Figures (1-4) shows that the higher is the playa saline concentration, the slower is the interface return speed towards the desert. In short, an increase in saline concentration: 1) increases the time to reach stable conditions, 2) decreases the interface slope and 3) causes different interface behavior under transient conditions for each specific concentration.



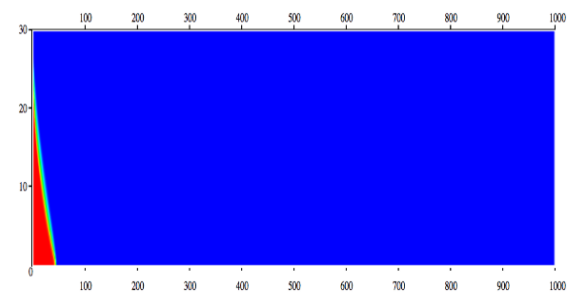
A: Concentration results at the beginning of the return phase  
(Time=0)



B: Concentration results after 30 years from the start of the return phase  
(Time=30)

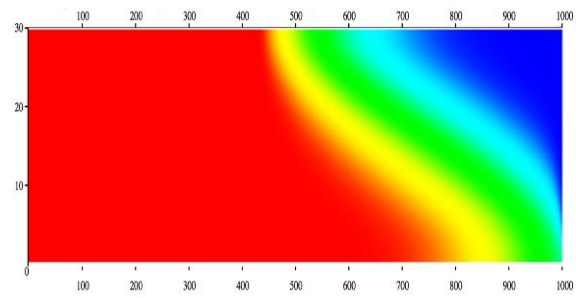


c: Concentration results after 60 years from the start of the return phase  
(Time=60)

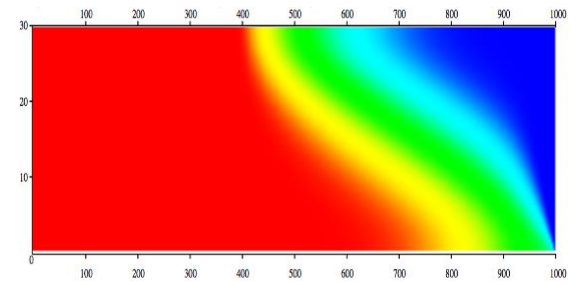


D: Concentration results under steady state return conditions  
(Time=steady state)

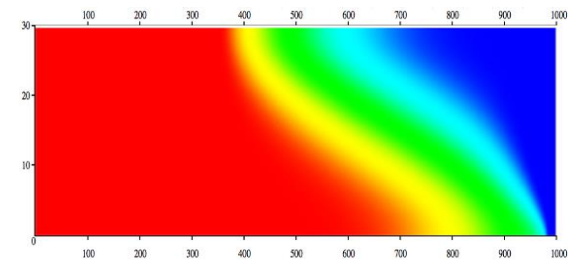
Figure 1)- Saline-return numerical simulation contours at 5 g/l; blue, red and green are for 75, 50 and 25% concentrations, respectively



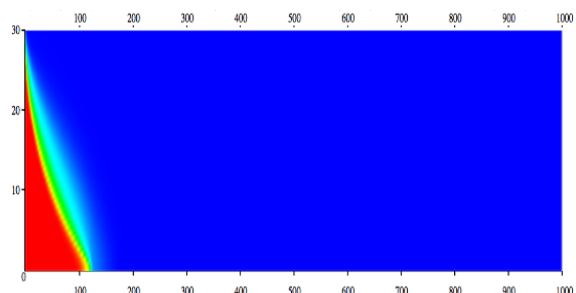
A: Concentration results at the beginning of the return phase  
(Time=0)



B: Concentration results after 30 years from the start of the return phase  
(Time=30)

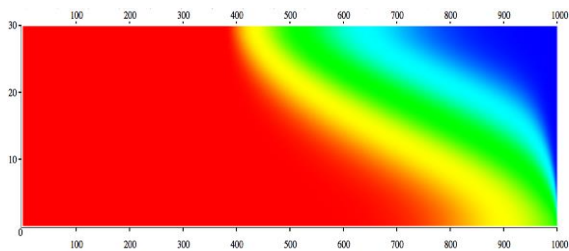


c: Concentration results after 60 years from the start of the return phase  
(Time=60)

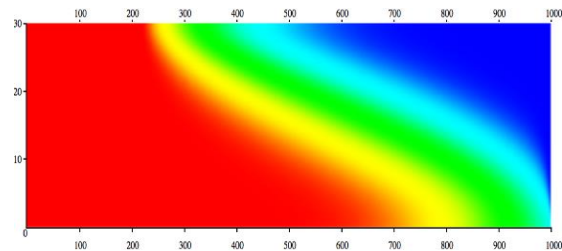


D: Concentration results under steady state return conditions  
(Time=steady state)

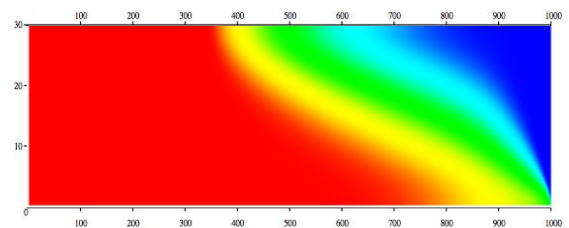
Figure 2)- Saline-return numerical simulation contours at 15 g/l; blue, red and green are for 75, 50 and 25% concentrations, respectively



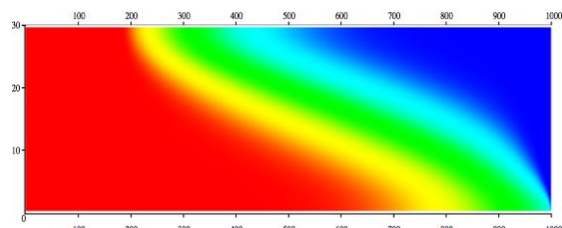
A: Concentration results at the beginning of the return phase  
(Time=0)



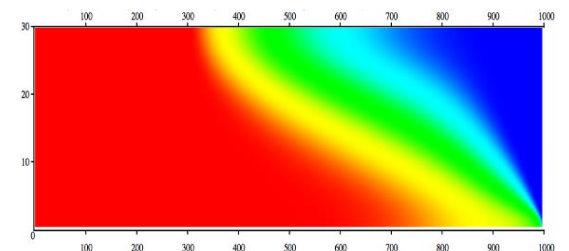
A: Concentration results at the beginning of the return phase  
(Time=0)



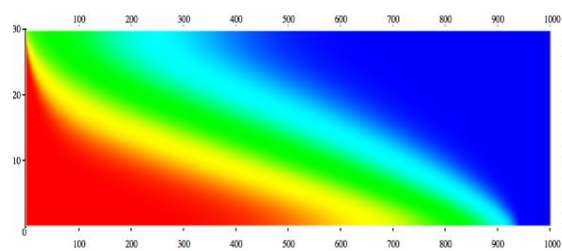
B: Concentration results after 30 years from the start of the return phase  
(Time=30)



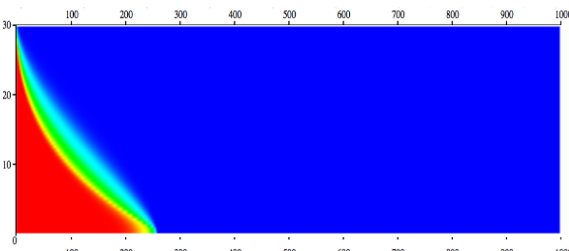
B: Concentration results after 30 years from the start of the return phase  
(Time=30)



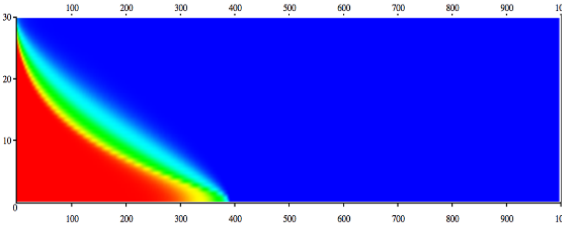
c: Concentration results after 60 years from the start of the return phase  
(Time=60)



c: Concentration results after 60 years from the start of the return phase  
(Time=60)



D: Concentration results under steady state return conditions  
(Time=steady state)



D: Concentration results under steady state return conditions  
(Time=steady state)

Figure 3)- Saline-return numerical simulation contours at 25 g/l; blue, red and green are for 75, 50 and 25% concentrations, respectively

Figure 4)- Saline-return numerical simulation contours at 35 g/l; blue, red and green are for 75, 50 and 25% concentrations, respectively

#### 4. Discussion and Conclusion

It is worth mentioning that the results obtained by the end of the saline influx - Step 3 of the 4-Step modeling of the current study - were similar and conformed well (100%) to those of Rezapour (2018) in the numerical modeling part. Although the groundwater is the most important freshwater supply source in arid and semi-arid regions of the world, its valuable resources, in Iran, are unfortunately close to the playa saline, and improper aquifer withdrawals for various purposes have reduced its water level causing the playa saline to enter them. An effective way to repel the invading saline is to increase the aquifer water level by different feeding manners. This study used the SUTRA numerical model to investigate the effects of feeding and raising the aquifer water level on the saline return in playa aquifers and obtained the following results:

1. The higher is the playa saline concentration the slower is the interface return speed towards it, meaning that an increase in the saline concentration increases the time to reach stable conditions.
2. The higher is the playa saline concentration the lower is the interface slope, and the lower is the latter the longer is the time interval between the interface apex and toe stopping.
3. The higher is the playa saline concentration the larger is the mixing zone area when the saline returns.
4. The washing-mixing process expands the mixing zone at the beginning of the return step.

#### 5. Six important references

1. Abdi, Masuod, Hossein Ebrahimi, and Abolfazl Akbarpour. "Optimal location of pumping wells by a mesh-free numerical method." *Water Supply* (2021).
2. Akbarpour, Abolfazl, Mohammad Javad Zeynali, and Mohammad Nazeri Tahroudi. "Locating optimal position of pumping Wells in aquifer using meta-heuristic algorithms and finite element method." *Water Resources Management* 34.1 (2020): 21-34.
3. Bower, J. W., L. H. Motz, and D. W. Durden. "Analytical solution for determining the critical condition of saltwater upconing in a leaky artesian aquifer." *Journal of Hydrology* 221.1-2 (1999): 43-54.
4. Brindha, K., et al. "Identification of surface water-groundwater interaction by hydrogeochemical indicators and assessing its suitability for drinking and irrigational purposes in Chennai, Southern India." *Applied Water Science* 4.2 (2014): 159-174
5. Lu, C. Werner, A.D. 2013 Timescales of seawater intrusion and retreat. *Advances in water resources*, 59: 39-51
6. Rezapour, Saghravani, Seyed Fazlollah, & Ahmadifard. (2018). Study of saline water inflow to coastal aquifers in transient conditions using image processing and numerical modeling. *Journal of Hydraulics*, 13 (2), 69-82.

#### Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

#### Acknowledgments

University of Sistan and Baluchestan vice chancellor for Research is commended for supporting this research



## بررسی عددی اثر بالا آمدگی سطح ایستابی آبخوان بر رفتار سطح مشترک آب شور و شیرین و ناحیه اختلاط در آبخوان‌های مجاور کویر

محمد رضا اتحادی<sup>۱</sup>، سید آرمان هاشمی منفرد<sup>۲</sup>، عباسعلی رضاپور<sup>۳</sup>، علی محتشمی<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

### چکیده

اغلب مناطق ایران دارای آب و هوای خشک و نیمه خشک است. از این رو در بیشتر نواحی آن کویرها یا پلایاهای متعددی شکل گرفته‌اند. در این تحقیق با استفاده از مدل عددی سوترا (SUTRA) نحوه بازگشت آب شور در اثر افزایش سطح ایستابی آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی رفتار گوه آب شور در شرایط گذرا، علاوه بر آنالیز شاخص طول پنجه گوه که در اغلب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی قبلی مورد استفاده قرار گرفته است، تغییرات شاخص ارتفاع گوه نسبت به زمان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که الف) در هنگام پیشروی گوه، شاخص ارتفاع گوه به مراتب زودتر از شاخص طول پنجه گوه به شرایط دائمی می‌رسد، این در حالی است که در هنگام بازگشت گوه، هر دو شاخص بطور هم زمان به وضعیت پایدار می‌رسند. ب) بر خلاف طول پنجه گوه که در وضعیت برگشت زودتر از وضعیت پیشروی به شرایط دائمی می‌رسد، شاخص ارتفاع گوه در هر دو وضعیت پیشروی و بازگشت تقریباً مدت زمان یکسانی را برای رسیدن به شرایط دائمی طی می‌کند. همچنین نتایج برای ناحیه اختلاط نشان داد که در اثر فرایندهای شستشو و اختلاط، ناحیه اختلاط در اوایل مرحله بازگشت گوه گسترش می‌یابد و با نزدیک شدن گوه به شرایط دائمی، فرایند شستشو متوقف شده و ناحیه اختلاط کم کم منقبض می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان‌های مجاور کویر، بازگشت آب شور، سطح مشترک آب شور و شیرین، ناحیه اختلاط،

مدل عددی SUTRA

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

mohammadreza.ettehadi1374@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، hashemi@eng.usb.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، Abbas.rezapoor@birjandut.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، mohtashamiali@yahoo.com



## مقدمه

آب‌های زیرزمینی راه‌یافته به پلایا و همچنین رواناب‌ها سطحی منتهی شده به آن در اثر تابش خورشید تبخیر شده و عاملی برای تداوم شوری در لایه‌های زیرین پلایا می‌شوند.

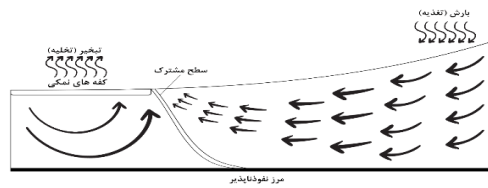
سفره‌های آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان، به‌خصوص نواحی خشک و نیمه خشک هستند. آب و هوای خشک و نیمه خشک به نواحی اطلاق می‌شود که در آن میزان بارش نسبت به پتانسیل تبخیر کمتر است. از این رو این نواحی از یک طرف در معرض کمبود شدید آب قرار دارند و از طرفی محیط‌های هیدرولوژیکی مناسبی برای تجمع نمک در خاک طبیعی زمین و شکل‌گیری انواع ساختارهای نمکی<sup>۱</sup> از جمله کویر-ها، کفه‌های نمکی<sup>۲</sup> و یا پلایاها<sup>۳</sup> هستند (Wheater et al., 2010). از آنجایی که اغلب مناطق ایران در نواحی خشک و نیمه خشک قرار گرفته‌اند، کویرها یا پلایاهای متعددی در آن پراکنده شده‌اند. احداث چاه‌های پمپاژ در این نواحی و عدم مدیریت صحیح آنها، موجب اختلاط آب شور و شیرین در بسیاری آبخوان‌های کویری کشور شده و یا در آینده‌ای نزدیک خواهد شد. شکل (۱) حالت‌های مختلف الگوی جریان آب زیرزمینی شیرین را در مجاورت جریان آب شور کویر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱-الف) مشاهده می‌گردد، سفره آب زیرزمینی توسط بارندگی‌های رخ داده در ارتفاعات تغذیه می‌شود و آب زیرزمینی در راستای شیب طبیعی زمین و به سمت مناطق پست حوضه (پلایا) جریان می‌یابد. با عبور آب زیرزمینی از سازندهای مختلف، به علت تغییر در خصوصیات زمین‌شناختی آبخوان، به تدریج از سرعت و کیفیت آن کاسته می‌شود. در نزدیکی پلایا، به علت اختلاف چگالی، مرز مشترکی بین آب شور تجمع شده در لایه‌های زیرین پلایا و آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. جریان آب زیرزمینی در امتداد این مرز مشترک به سمت بالا تغییر مسیر می‌دهد و در سطح پلایا تخلیه می‌گردد.

<sup>3</sup> Playas

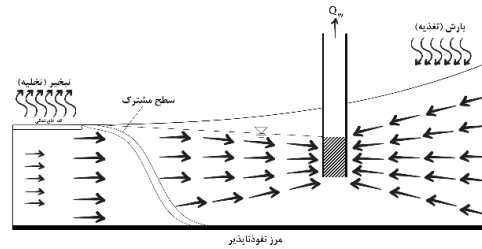
<sup>1</sup> Salt constructions

<sup>2</sup> Salt flats

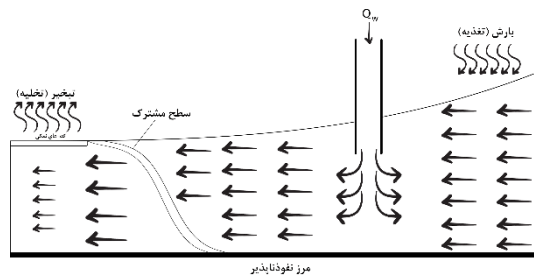




(الف): شماتیکی از جریانهای چرخشی در زیر پلایا



(ب): شماتیکی از هجوم آب شور کویر در اثر کاهش سطح ایستابی آبخوان



(ج): شماتیکی از بازگشت آب شور کویر در اثر افزایش سطح ایستابی آبخوان

شکل (۱): مدل مفهومی عمومی جهت نمایش الگوهای جریان شکل گرفته در لایه‌های زیرین پلایا و آبخوان مجاور آن

متفاوت از شکل پیشروی آن در آبخوان‌های ساحلی می‌باشد. تفاوت مهم دیگری که بین هجوم آب شور در آبخوان‌های مجاور کویر و آبخوان‌های ساحلی وجود دارد این است که برخلاف آبخوان‌های ساحلی که در آن‌ها غلظت آب شور هجوم آورنده (آب دریا) تقریباً ثابت و مشخص (حدود ۳۵ گرم بر لیتر) است، غلظت آب شور کویرها بسته به موقعیت جغرافیایی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک آن می‌تواند از مکانی به مکانی دیگر متغیر باشد.

یکی از راهکارهای موثر جهت مقابله با پدیده هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر و مدیریت منابع آب زیرزمینی در نواحی خشک و نیمه خشک، علاوه بر مدیریت صحیح چاه‌های برداشت، تغذیه آبخوان‌ها است. در اثر تغذیه

در سال‌های اخیر، برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها برای مصارف مختلف شرب، صنعت و کشاورزی موجب شده که در بیشتر آبخوان‌های کشور، سطح ایستابی آبخوان افت کند و در شرایط بحرانی، در ترازوی پایین‌تر از سطح آب شور کویر (پلایا) قرار بگیرد. در چنین شرایطی جهت محلی جریان از سمت کویر (پلایا) به سمت آبخوان معکوس می‌شود، بنابراین علاوه بر عامل اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین که عمدتاً علت اصلی هجوم آب شور در آبخوان‌های ساحلی است، در این آبخوان‌ها شیب هیدرولیکی معکوس شده نیز بر هجوم آب شور اثر می‌گذارد که در نتیجه آن‌ها آب شور کویر از سرتاسر عمق آبخوان و در جهت عمومی جریان به داخل آن هجوم می‌آورد (شکل ۱-ب). بنابراین شکل پیشروی سطح مشترک در آبخوان‌های مجاور کویر



یوتاه امریکا، شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پدیده انتقال آزاد آب نمک (انتقال آب نمک غلیظ به اعماق پلایا در اثر نیروی ثقل و جانشینی آن‌ها به جای آب نمک رقیقتر در کف پلایا) می‌تواند در لایه‌های زیرین پلایا رخ دهد. Wooding et al. (1997 a- b) توانستند شروع پدیده انتقال آزاد آب شور، پایداری لایه مرزی و توسعه انگشتی‌های نمک را در زیر پلایا شبیه‌سازی نمایند. Tweed et al. (2011) تحقیقاتی در مورد فرآیندهای شوری و تغذیه آب زیرزمینی حوضه دریاچه ایر<sup>۵</sup> واقع در کویر مرکزی استرالیا انجام دادند. Vasquez et al. (2013) تأثیر فرآیندهای ژئوشیمیایی را بر شکل‌گیری الگوهای جریان در زیر کفه نمکی آتاکاما<sup>۵</sup> واقع در کشور شیلی بررسی کردند. برای این منظور آنها از کد عددی شیمت<sup>۶</sup> استفاده نمودند و توانستند جریان‌های چرخشی آب شور را در زیر کفه نمکی شبیه‌سازی کنند. بررسی تحقیقات انجام شده در داخل کشور نشان می‌دهد که مدل‌سازی جامع و کاملی که بیانگر نحوه پیشروی آب شور به سمت آبخوان‌های مجاور کویر باشد بسیار محدود و اندک است (شکل ۱-ب) به طوری که اغلب محققین فقط وقوع پدیده هجوم آب شور را با استفاده از برداشت‌های میدانی و ارزیابی‌های کیفی نشان داده‌اند. نظری و همکاران، (۱۳۸۹) در تحقیقات خود بر روی آبخوان دشت قم، تغییر کیفیت آب زیرزمینی را مشاهده کردند. آنها با تحلیل اطلاعات هیدروگراف چاه‌های نزدیک و دور به دریاچه نمک (بین سال‌های ۷۹ تا ۸۳)، پیشروی آب شور را از مرز دریاچه به داخل آبخوان ثابت کردند. جعفری (۱۳۹۰) با مقایسه و آنالیز منحنی‌های هم‌پتانسیل و هدایت الکتریکی آبخوان دشت هرات نشان داد که در سال ۶۸ گرادبان هیدرولیکی و جهت اصلی جریان به سمت بیرون آبخوان بوده درحالی‌که در سال‌های بعد به علت برداشت بی‌رویه از آبخوان، سطح ایستابی آبخوان کاهش یافته و جهت جریان به‌مرور معکوس شده است. محمدی و کرمی (۱۳۹۲) با ترسیم نقشه‌های هدایت الکتریکی و هم‌پتانسیل آبخوان و آنالیز دیگر

آبخوان، چه به صورت طبیعی و چه به صورت مصنوعی، سطح ایستابی آبخوان افزایش می‌یابد و چنانچه فرآیند تغذیه ادامه پیدا کند، ممکن است شرایطی پیش آید که سطح ایستابی آبخوان مجدداً در تراز بالاتر از سطح آب شور کویر قرار گیرد. در این شرایط مجدداً جهت جریان تغییر کرده و از طرف آبخوان به سمت کویر (پلایا) برقرار می‌شود (شکل ۱-ج). در این وضعیت پس از مدتی آب‌های شور نفوذ کرده به داخل آبخوان توسط آب شیرین پس‌زده می‌شوند و آلودگی از سفره آب زیرزمینی برطرف می‌گردد. در مدت زمان پیشروی یا بازگشت آب شور در درون آبخوان، در امتداد سطح مشترک آب شور و شیرین، ناحیه اختلاط<sup>۱</sup> یا ناحیه انتقالی شکل می‌گیرد. در ناحیه اختلاط غلظت نمک از غلظت آب شور پلایا تا غلظت آب شیرین آبخوان تغییر می‌کند. علت اصلی شکل‌گیری ناحیه اختلاط در فرآیند هجوم، اثرات پراکندگی مکانیکی<sup>۲</sup> و پخشیدگی مولکول<sup>۳</sup> ماده محلول (نمک) و در فرآیند بازگشت، شستشوی لایه‌های غلیظ ناحیه اختلاط توسط جریان‌های آب شیرین ورودی به آن می‌باشد (رضاپور ۱۳۹۷). از - جایی که اختلاط مقدار حجم ناچیزی از آب شور با آب شیرین موجب از بین رفتن کیفیت آب برای نوشیدن می‌شود، ناحیه اختلاط منطقه‌ای بااهمیت در آبخوان‌ها محسوب می‌شود. چون کشورهای توسعه یافته کمتر با مسئله هجوم و بازگشت آب شور در آبخوان‌ها مجاور کویر روبرو بوده‌اند، تحقیقات کمی از طرف محققین آنها روی این پدیده انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات آن‌ها بیشتر بر شناسایی الگوهای جریان آب شور در لایه‌های زیرین پلایا و در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان در تراز بالاتر از سطح آب شور پلایا قرار داشته (شرایطی مشابه شکل ۱- الف) متمرکز بوده است. در همین راستا - Duffy and Al-Hassan. (1998) به کمک اطلاعات هیدرولوژیکی و انجام مدل‌سازی‌های عددی، الگوهای جریان آب زیرزمینی را در زیر پلایا و آبخوان مجاور آن، در حوضه کویری و بسته ایالت

<sup>5</sup> Atacama salt fat

<sup>6</sup> Sh\*emet

<sup>1</sup> Mixing Zone

<sup>2</sup> Mechanical dispersion

<sup>3</sup> Molecular diffusion

<sup>4</sup> Lake Eyre Basin

این تحقیق می‌کوشد که چگونگی بازگشت آب شور هجوم آورنده به داخل آبخوان‌های مجاور کویر را (حالتی مشابه شکل ۱- ج) با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی نماید. بنابراین این تحقیق از این جهت نوآوری دارد که الف): در آبخوان‌های مجاور کویر، برای اولین بار رفتار سطح مشترک در هنگام بازگشت آب شور و در شرایط گذرا شبیه-سازی و بررسی می‌گردد. ب): در آبخوان‌های مجاور کویر، برای اولین بار چگونگی تغییر مساحت ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک، در مدت زمان بازگشت آب‌های شور مشخص می‌شود.

## مواد و روش‌ها

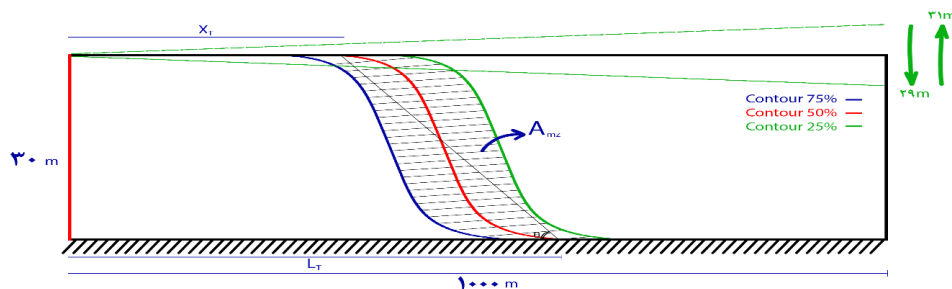
### مدل مفهومی

در این تحقیق جهت بررسی پدیده هجوم و بازگشت آب شور در آبخوان مجاور کویر از مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان دو بعدی، همگن و همسانگرد تحقیق (Lu and werner 2013) استفاده شده است (جدول ۱). در شکل (۲) نیز شماتیک مدل مفهومی این تحقیق و نحوه اندازه‌گیری پارامترهای انتخاب شده، جهت بررسی پدیده بازگشت آب شور در آبخوان مجاور کویر مشاهده می‌گردد.

پارامترهای هیدروژئوشیمیایی، وقوع پدیده هجوم آب شور را به بخش‌های جنوب و جنوب غربی آبخوان، خصوصاً ناحیه مجاور به آبخوان شور (صفی‌آباد) نمایان ساختند. آنها علت اصلی هجوم آب شور (حدود ۱۰ گرم بر لیتر) را در این منطقه، برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی آبخوان بیان کردند. از جمله تحقیقات دیگری که در آن‌ها هجوم آب شور کویر به داخل آبخوان با استفاده از آنالیزهای کیفی مشخص شده است می‌توان به کارهای شیخ وائلو و لشکری پور (۱۳۹۲)، ملکی فرد و همکاران (۱۳۹۲)، کاردان‌مقدم و بنی‌حبیب (۱۳۹۶) به ترتیب برای آبخوان-های دشت درونه، دشت قزوین و دشت سرایان اشاره کرد. اخیراً، رضاپور (۱۳۹۷) توانستند با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، چگونگی هجوم آب شور را در آبخوان‌های مجاور کویر شناسایی و بررسی نمایند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان دادند که ۱- هر چه غلظت آب شور کویر بیشتر شود، اثر اختلاف چگالی بر انتقال آزاد محلول نمک بیشتر می‌شود. در چنین شرایطی، سرعت حرکت پنجه سطح مشترک افزایش می‌یابد که در نتیجه آن فاصله پنجه سطح مشترک از راس آن بیشتر می‌شود و سطح مشترک با شیب کمتری به داخل آبخوان نفوذ می‌کند. ۲- صرف نظر از اینکه مقدار غلظت آب شور کویر چند است، هر چه از زمان آغاز فرآیند هجوم آب شور بگذرد، از شیب سطح مشترک کاسته می‌شود.

جدول (۱): مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان مورد بررسی

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	طول میدان محاسباتی	۱۰۰۰	m
۲	ارتفاع میدان محاسباتی	۳۰	m
۳	پراکنده پذیری طولی	۱	m
۴	پراکنده پذیری عرضی	۰/۱	m
۵	تخلخل موثر	۰/۳	-
۶	چگالی آب شور	۱۰۲۵	Kg/m <sup>3</sup>
۷	چگالی آب شیرین	۱۰۰۰	Kg/m <sup>3</sup>
۸	نسبت غلظت جرمی	۰/۰۳۵	-
۹	نفوذپذیری ذاتی	۱۱E-۱.۱۸	m <sup>2</sup>
۱۰	ذخیره ویژه	۰/۰۰۸	1/m



شکل (۲): شکل مرجع برای نمایش پارامترهای بازگشت آب شور

همان شرایط آب شور قرار گرفته بود (شرایطی مشابه شکل ۱-ب، مرحله سوم). در مرحله نهایی که مرحله بازگشت آب شور در آبخوان مجاور کویر است (موضوع تحقیق حاضر)، ارتفاع سمت راست آبخوان مجدداً از تراز ۲۹ متری به تراز ۳۱ متری افزایش داده شد در حالی که سمت چپ آبخوان در همان تراز ۳۰ متری با اعمال شرایط آب شور قرار داشت (شرایطی مشابه شکل ۱-ج، مرحله چهارم).

### مدل سازی عددی

در این تحقیق برای شبیه سازی پدیده بازگشت آب شور از مدل عددی SUTRA استفاده شده است. SUTRA یک برنامه کامپیوتری است که حرکت جریان سیال همراه با انتقال ماده محلول (یا انرژی) را در محیط متخلخل مدل سازی می نماید. نسخه ابتدایی این برنامه در سال ۱۹۸۴ ارائه شد و به تدریج این برنامه کامل تر گردید. نسخه حال حاضر آن SUTRA 2,2 است که قابلیت مدل سازی شرایط مرزی وابسته به زمان را نیز دارا می باشد. این کد کامپیوتری از روش اجزاء محدود برای تقسیم بندی مکانی و از روش تفاضل محدود پسرود برای تقسیم بندی زمانی استفاده می کند و معادلات حاکم بر دو فرآیند وابسته زیر را تقریب سازی می نماید:

(۱) جریان آب زیرزمینی با چگالی متغیر در محیط اشباع و غیراشباع

(۲) انتقال ماده محلول در آب زیرزمینی با در نظر گرفتن جذب، تولید و یا زوال

معادلات اصلی حاکم بر جریان سیال و انتقال ماده محلول، در مدل عددی SUTRA، در شرایطی که محیط

پارامترهای نشان داده شده در شکل فوق عبارتند از:  $L_t$ : طول پنجه سطح مشترک آب شور و شیرین،  $x_t$ : طول راس سطح مشترک آب شور و شیرین،  $A_{mz}$ : مساحت ناحیه اختلاط (در این تحقیق حد فاصل بین کانتورهای غلظت ۲۵٪ و ۷۵٪ آب شور و شیرین در نظر گرفته شده است).  $\theta$ : زاویه هجوم یا شیب سطح مشترک آب شور و شیرین.

همانطور که بیان شد، غلظت آب شور کویرها بسته به موقعیت جغرافیایی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی لایه های خاک آن می تواند از مکانی به مکانی دیگر متغیر باشد. بنابراین جهت بررسی رفتار سطح مشترک آب شور و شیرین و ناحیه اختلاط، ۴ غلظت مختلف ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر برای آب شور کویر (پلایا) در نظر گرفته شد و مراحل زیر برای هر غلظت به طور جداگانه انجام گرفت. ابتدا ارتفاع آب شیرین در مرز سمت راست آبخوان در تراز ۳۱ متری و ارتفاع آب شیرین در مرز سمت چپ آبخوان در تراز ۳۰ متری تنظیم شد (مرحله اول). سپس در حالی که ارتفاع آب شیرین در مرز سمت راست آبخوان در تراز ۳۱ متری و ارتفاع سمت چپ آبخوان در تراز ۳۰ متری قرار داشت، در مرز سمت چپ غلظت آب شور اعمال گردید (شرایطی مشابه آبخوان ساحلی). با این شرایط مرزی، شبیه سازی تا زمانی ادامه یافت که پیشروی گوه آب شور در داخل آبخوان متوقف شد و سیستم به شرایط دائمی رسید (مرحله دوم). در ادامه ارتفاع آب شیرین در مرز سمت راست آبخوان از تراز ۳۱ متری به صورت آبی به تراز ۲۹ متری کاهش یافت در حالی که ارتفاع سمت چپ آبخوان در همان تراز ۳۰ متری و با

انتشار ماده محلول در جهت عمود بر راستای جریان نشان می‌دهند.

SUTRA برای حل معادلات جریان وابسته به چگالی و انتقال ماده محلول از روش‌های اجزاء محدود و اختلاف محدود به صورت توام استفاده می‌کند. به این صورت که اجزاء محدود برای توصیف جمله‌هایی از معادله بکار می‌رود که بیانگر شار جرم سیال و شار جرم محلول (یا شار انرژی) باشند و سایر جمله‌ها بدون شار، با استفاده از روش اختلاف محدود تقریب می‌خورند. این شیوه حل معادلات، قابلیت بالای SUTRA را نشان می‌دهد که دقت ریاضی و انعطاف-پذیری هندسی روش اجزاء-محدود را داراست در حالی که کارآمدی و سرعت عمل روش اختلاف-محدود را نیز حفظ می‌کند. برای ایجاد هندسه مدل، شبکه بندی میدان محاسباتی، اعمال شرایط مرزی و وارد نمودن سایر اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی از پیش پردازنده ModelMuse استفاده گردید. ModelMuse یک رابط گرافیکی بین کاربر و مدل عددی SUTRA است که علاوه بر ورود اطلاعات می‌تواند می‌تواند نتایج خروجی مدل SUTRA را نیز نمایش دهد. برای شبیه‌سازی عددی ابتدا مستطیلی دو بعدی در مقطع قائم با ابعاد  $1000 \times 30$  متر به عنوان میدان محاسباتی در ModelMuse ایجاد شد. سپس طبق مدل مفهومی مسئله، شرایط مرزی هیدرواستاتیکی برای مرزهای راست و چپ میدان محاسباتی و شرط عدم وجود جریان، برای مرزهای بالا و پایین میدان محاسباتی در نظر گرفته شد. برای شبیه سازی مناسب ناحیه اختلاط، میدان مدل به شبکه‌ای کوچک با ابعاد  $\Delta x = \Delta z = 1m$   $0.5m$  گسسته شد به طوری که نتیجه آن  $60000$  سلول چهارضلعی بود. گام زمانی نیز برابر  $\Delta t = 1 day$  تنظیم شد.

### نتایج و بحث

لازم به ذکر است با توجه چهار مرحله بودن این مدل‌سازی که در قسمت قبل بیان شد. تا انتهای مرحله سوم که هجوم آب شور بوده نتایج گرفته شده با نتایج رضاپور (۱۳۹۷) یکسان بوده است بخش مدل‌سازی عددی این تحقیق مطابقت ۱۰۰ درصدی با نتایج مدل‌سازی رضاپور (۱۳۹۷) داشته است.

متخلخل اشباع باشد و ماده محلول در معرض جذب، تولید یا فروپاشی نباشد به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$(\rho S_{op}) \frac{\partial p}{\partial t} + (\varepsilon) \frac{\partial p}{\partial c} - \nabla \cdot \left( \left( \frac{kp}{\mu} \right) \cdot (\nabla p - pg) \right) = Q_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon PC)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho v c) - \nabla[\varepsilon \rho (D_m I + D) \cdot \nabla C] = Q_p (C^* - C) \quad (2)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال  $(M/L^3)$ ،  $S_{op}$  ذخیره فشار ویژه آبخوان  $[M/L/T^2]^{-1}$  که تابعی از تراکم پذیری اسکلت خاک و سیال است،  $\rho$  فشار سیال  $[M/(L * T^2)]$ ،  $\varepsilon$  تخلخل خاک،  $K$  نفوذپذیری ذاتی خاک  $[L^2]$ ،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال  $[M/(L * T)]$ ،  $g$  بردار شتاب ثقل  $(L/T^2)$ ،  $Q_p$  شار جرمی سیال منبع  $[M/(L^3 * T)]$ ،  $V$  میانگین سرعت سیال  $(L/T)$  که از رابطه دارسی محاسبه می‌شود،  $D_m$  ضریب پخش ملکولی  $[L^2/T]$ ،  $I$  ماتریس همانی،  $D$  ماتریس پراکندگی مکانیکی  $[l^2/t]$ ، غلظت جرمی محلول،  $[M_S/M]$  و  $C^*$  غلظت ماده محلول در سیال منبع،  $[M_S/M]$  است. در مدل SUTRA مقدار ضریب پخشیدگی مولکولی برای نمک  $10^{-9}$  در نظر گرفته شده و ماتریس پراکندگی مکانیکی برای محیط دو بعدی همگن طبق روابط زیر استخراج می‌شود:

$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D_{xx} = \frac{1}{v^2} (d_L v_x^2 + d_I v_y^2) \quad (4)$$

$$D_{yy} = \frac{1}{v^2} (d_L v_x^2 + d_I v_y^2) \quad (5)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{1}{v^2} (d_L - d_r) (v_x v_y) \quad (6)$$

$$d_r = a_T v \quad (7)$$

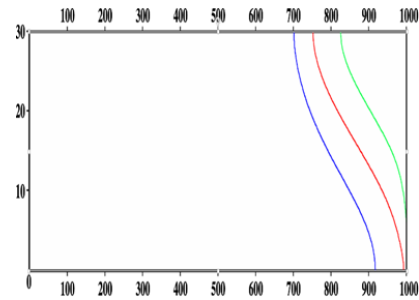
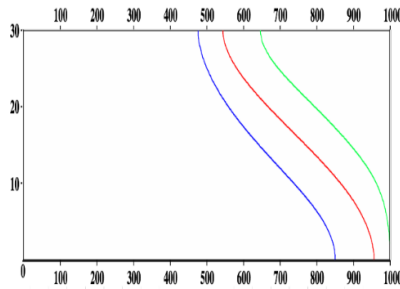
$$d_l = a_L v \quad (8)$$

در روابط فوق  $v$  مقدار سرعت جریان،  $d_L$  و  $d_T$  به ترتیب ضریب پراکندگی طولی و ضریب پراکندگی عرضی،  $a_L$  پراکنده‌پذیری طولی و  $a_T$  پراکنده‌پذیری عرضی است. پراکنده‌پذیری طولی، اثر ناهمگنی را در انتشار ماده محلول در جهت جریان و پراکنده‌پذیری عرضی، اثر ناهمگنی را در



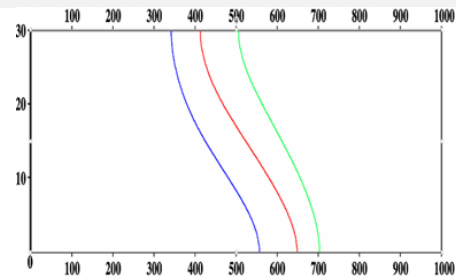
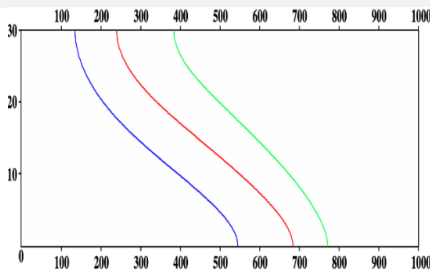
مرحله سوم مدل‌سازی است. جهت نمایش بهتر بازگشت آب شور در شرایط گذرا، نتایج برای هر غلظت در فواصل زمانی ۳۰ سال و شرایط دائمی نشان داده شده‌اند. جهت بررسی رفتار ناحیه اختلاط علاوه بر کانتور غلظت ۵۰ درصد آب شور و شیرین کانتورهای غلظت ۲۵ درصد و ۷۵ درصد نیز رسم شده‌اند. بررسی اجمالی نتایج ترسیم شده در شکل‌های (۳) تا (۶) نشان می‌دهند که هر چه غلظت آب شور کویر بیشتر می‌شود، سرعت بازگشت سطح مشترک به سمت کویر کندتر می‌شود به عبارتی با افزایش غلظت آب شور مدت زمان رسیدن به شرایط دائمی طولانی‌تر می‌شود. با نگاهی دیگر به نمودارهای ترسیم شده مشاهده می‌گردد که با افزایش غلظت آب شور، اولاً: شیب سطح مشترک کمتر می‌شود، ثانیاً: برای هر غلظت مشخص سطح مشترک رفتار متفاوتی را در شرایط گذرا از خود نمایان می‌کند

قبلاً بیان گردید که جهت بررسی پدیده بازگشت آب شور کویر به داخل آبخوان، ۴ غلظت مختلف ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر برای آب شور در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است در این تحقیق تمامی مراحل اول، دوم، سوم و چهارم برای هر ۴ غلظت اشاره شده شبیه‌سازی شد ولی در این قسمت فقط نتایج مرحله چهارم یا همان شرایطی که در آن سطح ایستابی آبخوان به علت تغذیه مجدداً بالاتر از سطح آب شور کویر قرار گرفته، آمده است. شکل‌های (۳) تا (۶) نتایج شبیه‌سازی عددی بازگشت آب شور را به ترتیب برای غلظت‌های ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر نشان می‌دهد. محور افقی و عمودی آبخوان استاندارد به ترتیب طول آن و ارتفاع آن در واحد متر است. در هر یک از شکل‌های نشان داده شده، تصاویر ارائه شده در زمان صفر ( $Time=0$ ) مربوط به لحظه شروع مرحله چهارم یا همان شرایط دائمی



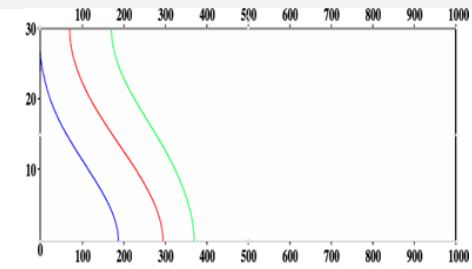
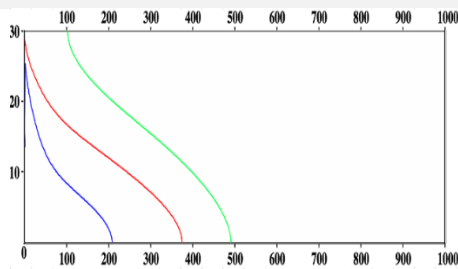
الف: نتایج غلظت در لحظه شروع مرحله بازگشت (Time=0)

الف: نتایج غلظت در لحظه شروع مرحله بازگشت (Time=0)



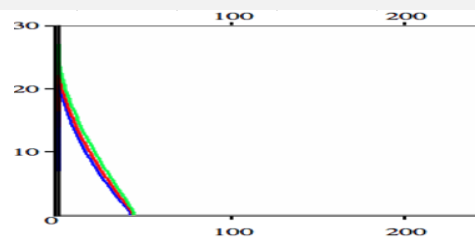
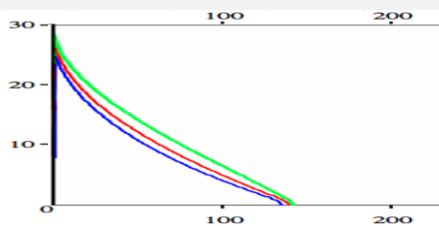
ب: نتایج غلظت پس از ۳۰ سال از لحظه شروع مرحله بازگشت  
(Time=30 year)

ب: نتایج غلظت پس از ۳۰ سال از شروع مرحله بازگشت ( Time=30  
year)



ج: نتایج غلظت پس از ۶۰ سال از لحظه شروع مرحله بازگشت  
(Time=60 year)

ج: نتایج غلظت پس از ۶۰ سال از شروع مرحله بازگشت  
(Time=60 year)

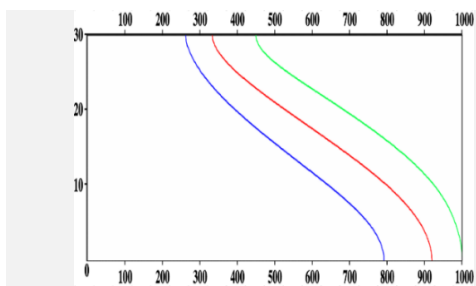


د: نتایج غلظت در شرایط دائمی مرحله بازگشت  
(Time=steady state)

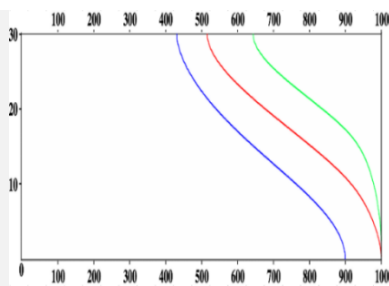
د: نتایج غلظت در شرایط دائمی مرحله بازگشت  
(Time=steady state)

شکل ۴: تصاویر شبیه سازی عددی بازگشت آب شور در غلظت ۱۵ گرم بر لیتر، رنگ آبی کانتور ۷۵٪، رنگ قرمز کانتور ۵۰٪، رنگ سبز کانتور ۲۵٪ می باشد.

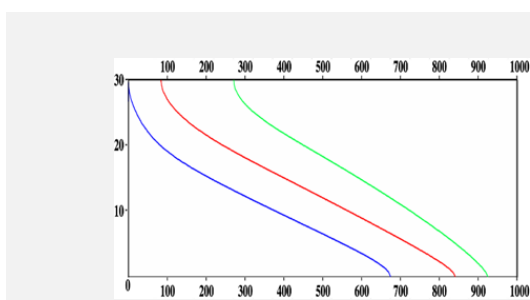
شکل ۳: تصاویر شبیه سازی عددی بازگشت آب شور در غلظت ۵ گرم بر لیتر، رنگ آبی کانتور ۷۵٪، رنگ قرمز کانتور ۵۰٪، رنگ سبز کانتور ۲۵٪ می باشد.



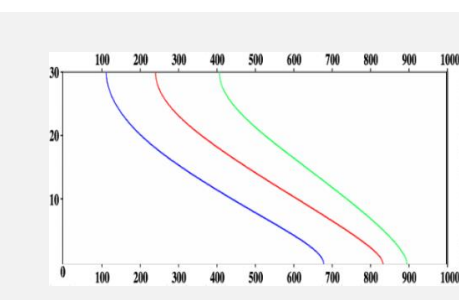
الف: نتایج غلظت در لحظه شروع مرحله بازگشت (Time=0)



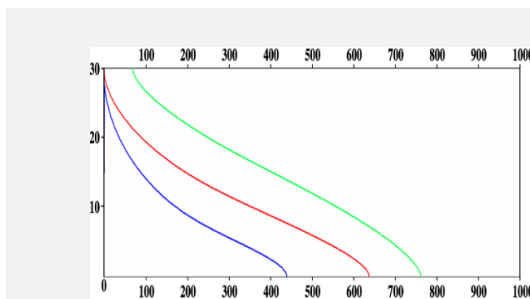
الف: نتایج غلظت در لحظه شروع مرحله بازگشت (Time=0)



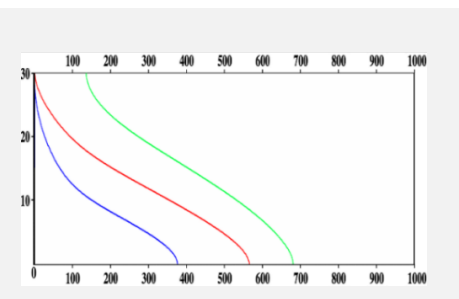
ب: نتایج غلظت پس از ۳۰ سال از شروع مرحله بازگشت  
(Time=30 year)



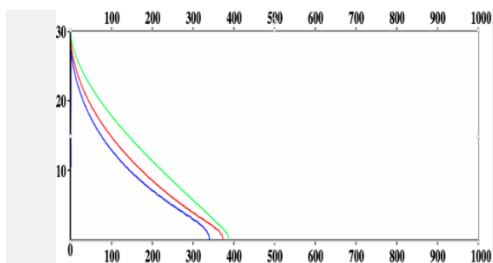
ب: نتایج غلظت پس از ۳۰ سال از شروع مرحله بازگشت  
(Time=30 year)



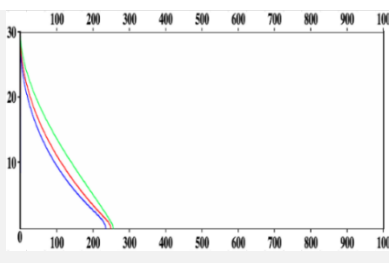
ج: نتایج غلظت پس از ۶۰ سال از شروع مرحله بازگشت  
(Time=60 year)



ج: نتایج غلظت پس از ۶۰ سال از شروع مرحله بازگشت  
(Time=60 year)



د: نتایج غلظت در شرایط دائمی مرحله بازگشت  
(Time=steady state)



د: نتایج غلظت در شرایط دائمی مرحله بازگشت  
(Time=steady state)

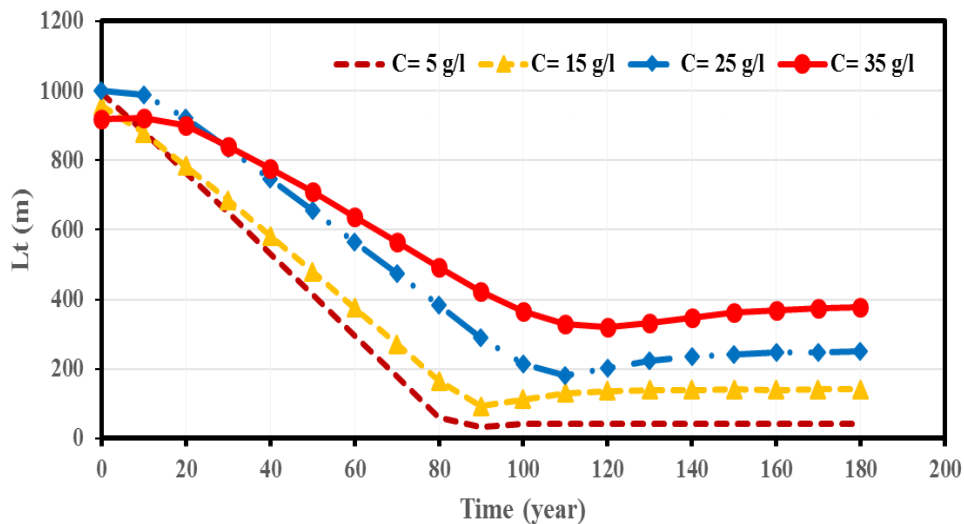
شکل ۶: تصاویر شبیه سازی عددی بازگشت آب شور در غلظت ۳۵ گرم بر لیتر، رنگ آبی کانتور ۷۵٪، رنگ قرمز کانتور ۵۰٪، رنگ سبز کانتور ۲۵٪ می باشد

شکل ۵: تصاویر شبیه سازی عددی بازگشت آب شور در غلظت ۲۵ گرم بر لیتر، رنگ آبی کانتور ۷۵٪، رنگ قرمز کانتور ۵۰٪، رنگ سبز کانتور ۲۵٪ می باشد

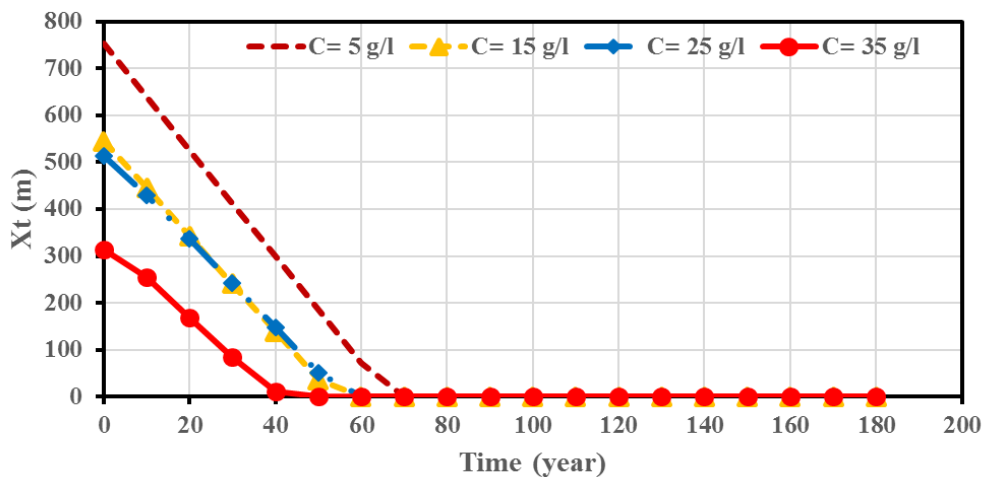


در شرایط گذرا) به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) رسم شده‌اند

برای بررسی دقیق‌تر این موضوعات نمودارهای تغییرات موقعیت پنجه و موقعیت راس سطح مشترک نسبت به زمان



شکل (۷) موقعیت پنجه مشترک نسبت به زمان



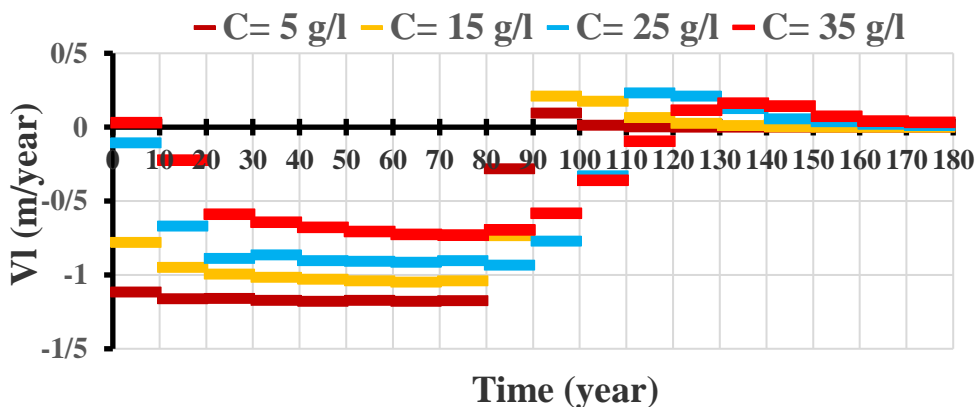
شکل (۸) موقعیت راس سطح مشترک نسبت به زمان

نمودارهای این غلظت‌ها مابین نمودارهای غلظت ۵ و ۳۵ گرم بر لیتر در این شکل گواه بر این استدلال است. به طوری که پنجه غلظت ۵ گرم بر لیتر تقریباً پس از ۹۰ سال به شرایط دائمی می‌رسد در حالی که پنجه غلظت‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر به ترتیب پس از ۱۲۰ سال، ۱۶۰ سال و ۱۸۰ سال به شرایط دائمی می‌رسند. در شکل (۸) اگر چه در نگاه اول دیده می‌شود که با افزایش غلظت آب شور،

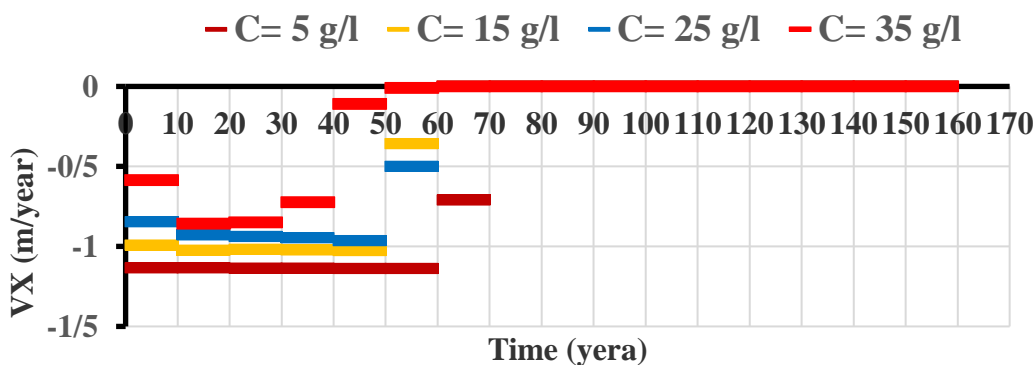
در شکل (۷) به وضوح دیده می‌شود که شیب نمودار غلظت ۵ گرم بر لیتر به مراتب بیشتر از شیب نمودار غلظت ۳۵ گرم بر لیتر است. به عبارتی پنجه سطح مشترک غلظت ۵ گرم بر لیتر نسبت به پنجه سطح مشترک غلظت ۳۵ گرم بر لیتر سریعتر به سمت کویر (پلایا) حرکت می‌کند و به طبع زودتر به شرایط دائمی می‌رسد. این رفتار برای غلظت‌های ۱۵ و ۲۵ گرم بر لیتر نیز صادق است و قرارگیری

سطح مشترک در غلظت‌های بالاتر این است که در این غلظت‌ها فاصله راس سطح مشترک تا مرز آب شور کمتر است در نتیجه راس سطح مشترک مدت زمان کمتری را تا مرز آب کویر سپری می‌کنند. این موضوعات در شکل‌های (۹) و (۱۰) که سرعت متوسط پنجه و راس سطح مشترک را در فواصل ۱۰ سال نمایش می‌دهد بهتر مشخص می‌گردد. همانطور که دیده می‌شود قدرمطلق سرعت متوسط چه برای پنجه و چه برای راس سطح مشترک با افزایش غلظت کاهش می‌یابد

مدت زمان رسیدن راس سطح مشترک به مرز آب شور زودتر اتفاق می‌افتد، به عبارتی راس سطح مشترک زودتر متوقف می‌شود (به عنوان مثال برای غلظت ۳۵ گرم بر لیتر این زمان تقریباً ۴۰ سال است در صورتی که برای غلظت ۵ گرم بر لیتر این مدت زمان تقریباً ۷۵ سال است)، ولی با دقت بیشتر به نمودارها معلوم می‌شود که در غلظت ۵ گرم بر لیتر شیب نمودار نسبت به غلظت‌های بیشتر علی‌الخصوص غلظت ۳۵ گرم بر لیتر بیشتر است به عبارتی همانند رفتار پنجه، با افزایش غلظت آب شور سرعت بازگشت راس نیز کمتر می‌شود. علت زودتر رسیدن راس



شکل (۹) سرعت پنجه نسبت به زمان



شکل (۱۰) سرعت تاج نسبت به زمان

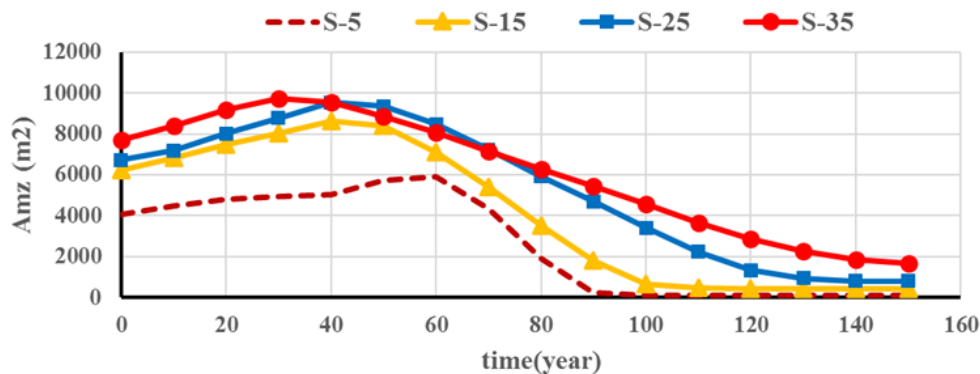
شور و شیرین و شیب هیدرولیکی معکوس شده به صورت توام (با اثر مثبت) باعث پیشروی آب شور به داخل آبخوان می‌شود، در پدیده بازگشت آب شور کویر، شیب هیدرولیک

علت رفتار سطح مشترک را در مدت زمان بازگشت برای تمامی غلظت‌ها می‌توان چنین بیان کرد که بر خلاف پدیده هجوم آب شور کویر که دو عامل اختلاف چگالی آب

بیشتر شده و یا به عبارتی اختلاف فشار بین آب شور و شیرین بر روی مرز مشترک کمتر می‌شود، در نتیجه نیروی لازم برای بازگرداندن سطح مشترک کاهش می‌یابد. به این دلیل سرعت بازگشت نقاط قرار گرفته در اعماق سطح مشترک (خصوصاً پنجه سطح مشترک) کمتر از سرعت بازگشت نقاط بالایی سطح مشترک (خصوصاً راس سطح مشترک) می‌باشند.

شکل (۱۱) تغییرات مساحت ناحیه اختلاط را در شرایط گذرا برای غلظت‌های انتخابی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد برای هر ۴ غلظت، در سال‌هایی ابتدایی مرحله بازگشت ناحیه اختلاط گسترش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار حداکثری مجدداً شروع به کاهش می‌کند. تا در نهایت و در شرایط دائمی، برابر شرایط دائمی مرحله دوم مدل‌سازی می‌گردد. نکته قابل بیان دیگر این است که هر چه غلظت آب شور بیشتر می‌شود مساحت ناحیه اختلاط بیشتر گسترش می‌یابد

حاکم بر سیستم آبخوان باعث بازگشت آب شور (سطح مشترک) به سمت مرز کویر شده ولی عامل اختلاف چگالی آب شور و شیرین موجب مقاومت سطح مشترک در برابر بازگشت می‌گردد. وقتی که سطح ایستابی آبخوان بالاتر از سطح آب شور کویر قرار می‌گیرد، شیب هیدرولیکی تغییر کرده و جریان عمومی در داخل آبخوان از سمت مرز زمین به سمت مرز پلایا برقرار می‌گردد. جریان آب شیرین ناشی از این شیب هیدرولیکی موجب اعمال نیرو بر سطح مشترک می‌شود و سطح مشترک را به سمت مرز پلایا باز می‌گرداند. اما هر چه غلظت آب شور کویر بیشتر شود، چگالی یا وزن مخصوص آن زیادتر می‌شود. هر چه وزن مخصوص بیشتر می‌شود، امکان بازگرداندن سطح مشترک توسط جریان عمومی داخل آبخوان کمتر می‌گردد. از طرفی همانطور که می‌دانیم در یک غلظت مشخص نیز با افزایش عمق آبخوان، فشار نیز افزایش می‌یابد ( $p = \gamma h$ ). بنابراین اثر اختلاف چگالی آب شور شیرین با افزایش عمق افزایش می‌یابد. به این صورت که هر چه به سمت عمق سطح مشترک حرکت می‌کنیم فشار آب شور بر سطح مشترک



شکل (۱۱) تغییرات مساحت ناحیه اختلاط نسبت به زمان

وارد ناحیه اختلاط می‌شوند. ورود جریان‌های آب شیرین به ناحیه اختلاط موجب اختلاط آن با آب‌های شور ناحیه اختلاط شده در نتیجه ضمن رقیق‌تر کردن ناحیه، شروع به شستن نمک‌های لایه‌های نواحی غلیظ‌تر ناحیه اختلاط (به عنوان مثال کانتور غلظت ۷۵٪) می‌کنند. اثر توام شستشو و اختلاط باعث می‌شود که کانتور جدیدی برابر با غلظت کانتور غلیظ قبلی شسته شده (۷۵٪) اما این بار نزدیکتر

علت این رفتار را می‌توان چنین توصیف کرد که با افزایش آبی سطح ایستابی آبخوان در ابتدای مرحله بازگشت، جهت عمومی جریان تغییر کرده (از سمت آبخوان به کویر تغییر جهت می‌دهد) و آب شیرین با شدت از مرز زمین (مرز سمت راست) وارد آبخوان می‌گردد. به علت پایین‌تر بودن بودن سرعت سطح مشترک آب شور و شیرین نسبت به سرعت جریان ورودی از مرز زمین، جریان‌های آب شیرین



در مجاورت آب‌های شور کویر قرار گرفته‌اند. برداشت‌های بی‌رویه برای مقاصد مختلف موجب کاهش سطح ایستابی آبخوان و پیشروی آب‌های شور کویر به داخل آن‌ها شده است. یک راه‌کار موثر برای عقب راندن آب شور هجوم آورنده به داخل آبخوان، افزایش سطح ایستابی آبخوان در اثر انواع مختلف تغذیه می‌باشد. در این تحقیق اثر بالابردن سطح ایستابی آبخوان ناشی از تغذیه، بر نحوه بازگشت آب شور در آبخوان‌های مجاور کویر با استفاده از مدل عددی SUTRA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی عددی نشان دادند که:

۱- هرچه غلظت آب شور کویر بیشتر می‌شود، سرعت بازگشت سطح مشترک به سمت کویر کندتر می‌شود، یعنی با افزایش غلظت آب شور مدت زمان رسیدن به شرایط دائمی طولانی‌تر می‌شود.

۲- هر چه غلظت آب شور کویر بیشتر شود، شیب سطح مشترک کمتر می‌گردد. هر چه شیب سطح مشترک کمتر گردد، فاصله زمانی مابین توقف راس سطح مشترک و پنجه سطح مشترک بیشتر می‌شود.

۳- هرچه غلظت آب شور کویر بیشتر شود، مساحت ناحیه اختلاط در هنگام بازگشت آب شور بیشتر می‌شود.

۴- فرآیند شستشو و اختلاط موجب گسترش ناحیه اختلاط در ابتدای مرحله بازگشت می‌گردد.

به مرز کویر ایجاد گردد. این فرآیند موجب می‌شود که فاصله بین کانتور رقیق ناحیه اختلاط (۰.۲۵٪) و کانتور غلیظ آن (۰.۷۵٪) افزایش یابد و در نتیجه آن ناحیه اختلاط در اوایل سال‌های بازگشت گسترش یابد و مساحت آن بیشتر شود. با گذشت زمان، اختلاف سرعت بین جریان‌های آب شیرین و سطح مشترک کم می‌گردد، در نتیجه فرآیند شستشو کاهش می‌یابد. بنابراین فاصله کانتور غلیظ (۰.۷۵٪) رفته رفته با کانتور رقیق (۰.۲۵٪) کم می‌شوند و ناحیه اختلاط به تدریج منقبض می‌گردد. طبیعی است هر چه غلظت آب شور کویر بیشتر باشد اثر توأم شستشو و اختلاط بر گسترش ناحیه اختلاط در اوایل مرحله بازگشت بیشتر می‌گردد.

### نتیجه‌گیری

لازم به ذکر است با توجه چهار مرحله بودن این مدل‌سازی که در قسمت قبل بیان شد. تا انتهای مرحله سوم که هجوم آب شور بوده نتایج گرفته شده با نتایج رضاپور (۱۳۹۷) یکسان بوده است بخش مدل‌سازی عددی این تحقیق مطابقت ۱۰۰ درصدی با نتایج مدل‌سازی رضاپور (۱۳۹۷) داشته است.

آب‌های زیرزمینی مهمترین منبع تامین آب شیرین در نواحی خشک و نیمه خشک جهان هستند. متأسفانه در اغلب مناطق خشک و نیمه خشک ایران این منابع ارزشمند

### منابع

- جعفری عظیم آبادی، هادی. (۱۳۹۰)، " بررسی کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی در ارتباط با افت سطح ایستابی ناشی از پمپاژ، آبخوان هرات در استان یزد"، هفتمین کنفرانس زمین شناسی و محیط زیست ایران، شاهرود.
- رضاپور، ع.، مطالعه آزمایشگاهی و عددی اندرکنش آب‌های شور و شیرین در محیط‌های متخلخل، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۱۳۹۷.
- شیخ وانلو، محمود و لشکری پور، غلامرضا، (۱۳۹۲)، " بررسی و ارزیابی پیشروی آب شور در آبخوان دشت درونه و تعیین الگوی اختلاط آن بر اساس نمودارهای ترکیبی"، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.
- کاردان مقدم، حمید و بنی حبیب، محمد ابراهیم، " بررسی اثرات زیست محیطی هجوم آب شور به آبخوان‌های کویری (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی-آبخوان سراپان)"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۳، جلد ۳۰، ص ۶۷۳.

محمدی، اعظم و کرمی، غلامحسین، (۱۳۹۲)، " بررسی هجوم آب شور از کویر مرکزی به آبخوان اسفراین (خراسان شمالی)"، فصلنامه زمین شناسی کاربردی، شماره ۱، سال ۹: ص ۵۳.

ملکی فرد، مه‌ری. نیکوکاران، غلامرضا. بیات، حسین و حسینی، سعید، (۱۳۹۲)، " بررسی افزایش شوری در جنوب شرق دشت قزوین و مدیریت کنترل آن"، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.

نظری، عطیه. نخعی، محمد. صادقی راد، محمد علی و عرب بافرانی، علیرضا. (۱۳۸۹)، " بررسی رخداد نفوذ آب شور دریاچه نمک به آبخوان دشت قم با استفاده از مدل‌سازی کمی آبخوان"، دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب، کرمان.

Duffy, C.J., Al-Hassan, S., 1988. Groundwater circulation in a closed desert basin: topographic scaling and climatic forcing. *Water Resources Research*, 24(10): 1675- 1688.

Lu, C., Werner, A.D., 2013. Timescales of seawater intrusion and retreat. *Advances in water resources*, 59: 39-51.

Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., Favreau, G., Leduc, C., 2011. Arid zone groundwater recharge and salinisation processes; an example from the Lake Eyre Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 408(3-4): 257-275.

Vásquez, C., Ortiz, C., Suárez, F., Muñoz, J.F., 2013. Modeling flow and reactive transport to explain mineral zoning in the Atacama salt flat aquifer, Chile. *Journal of hydrology*, 490: 114-125.

Wheater, H.S., Mathias, S.A., Li, X., 2010. *Groundwater modelling in arid and semi-arid areas*. Cambridge University Press.

Wooding, R., Tyler, S.W., White, I., 1997a. Convection in groundwater below an evaporating salt lake: 1. Onset of instability. *Water Resources Research*, 33(6): 1199-1217.

Wooding, R., Tyler, S.W., White, I., Anderson, P., 1997b. Convection in groundwater below an evaporating salt lake: 2. Evolution of fingers or plumes. *Water Resources Research*, 33(6): 1219-1228.



## Numerical Investigation the effect of Groundwater Uplift on the Interface Between Fresh and Saline Water and Mixing Zone in the Aquifers Adjacent Deserts

Mohammadreza Etehad<sup>1</sup>, Seyed Arman Hashemi Monfared<sup>2</sup>, Abbasali Rezapoor<sup>3</sup>, Ali Mohtashami<sup>4</sup>

### Abstract

Most parts of Iran have arid and semi-arid climates. Therefore, many deserts and playas have been formed in these areas. In the present study, the return of saline water due to the groundwater head increase in the aquifers with the usage of SUTRA numerical model, was investigated. In order to assess the wedge behavior of saline water in transient state, the toe length of the wedge is analyzed. The changes in the height of wedge shape due to the time is measured. The results showed that: a) with the progression of the wedge behavior, its height is getting earlier to the steady state in comparison to its length, however in the return time, they both reached the steady condition at the same time. b) Unlike the wedge's length, which reached the steady state earlier than the progression time, its height has an equal time to reach the steady condition in both states (progression and return). The achieved results also showed that due to the mixing process, the mixing zone expanded earlier in return phase. Also, as the wedge approached the steady condition, the area of mixing zone decreased gradually.

**Keywords:** Aquifers adjacent deserts, Saline Water Return, Interface, Mixing Zone, SUTRA numerical model

<sup>1</sup> Master of science in Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.  
Hashemi@eng.usb.ac.ir (Corresponding Author)

<sup>3</sup> Assistant Professor of Civil Engineering, Birjand University of Technology

<sup>4</sup> PhD student in Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan.