



## Journal of Environmental Studies

Vol. 48, No. 2, Summer 2022

Journal Homepage: [www.Jes.ut.ac.ir](http://www.Jes.ut.ac.ir)

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

### Mathematical Model of Salinity Intrusion in the Arvand Tidal River and Its Effect on Salinity of Lands Around the River

**Document Type**  
Research Paper

**Amir Hossein Montazeri, Mahdi Mazaheri\*, Saeed Morid**

**Received**  
December 8, 2021

Department of Water Management and Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

**Accepted**  
July 9, 2022

DOI: 10.22059/jes.2022.334989.1008258

#### Abstract

An increase in soil and water salinity is one of the world's problems that are an obstacle to economic and agricultural development. The Arvand river (Shatt Al-Arab), one of the most critical border rivers, is facing a significant decrease in the quality of water and soil due to the intrusion of salty water from the Persian Gulf, which is considered a severe threat to the region. It is formed from the intersection of the Tigris and Euphrates rivers and finally flows into the Persian Gulf. In the current research, the simulation results determined that in the average inflow conditions of Arvand, the saline front penetrates the river up to 60 km from the downstream and affects the river's water quality. Then the effect of river water salinity on soil salinity was done from two aspects, soil salinity by direct infiltration from riverbanks and soil salinity by long-term use of river water for irrigation. The results showed that in 188 km from the upstream of the river, up to 242 meters, saline water affects the soil on both sides of the river, and in the south of Abadan, this saline band disappears. The prediction of land salinity by irrigation with river water in steady conditions showed that the average salinity of saturated soil extract in Iran in Al-gasbah and in Iraq south of Faw region reaches 97.3 ppt.

**Keywords:** Arvand River, River water quality, Salinity Front Intrusion, Numerical simulation, Soil Salinity

---

\* Corresponding Author:

Email: [m.mazaheri@modares.ac.ir](mailto:m.mazaheri@modares.ac.ir)

**Extended Abstract****Introduction**

In recent decades, water and soil quality in downstream areas has been affected by using water resources in upstream. The intrusion of saline water from the sea into the river is a well-known and momentous phenomenon. In addition, one of the human problems, especially in arid and semi-arid regions, is the process of land salinization, which is one of the main phenomena of land destruction. All soil salinity factors can be divided into two general parts, primary salinity with the natural source and secondary salinity due to human activities or mismanagement. One of the factors of soil salinity is the reduction of river water quality, which is widely used for agricultural purposes. The estuary of tidal rivers is the place where saline water enters the fresh river water. Most studies have been performed on land reclamation that has already been damaged by water salinity, and less comprehensive attention has been paid to the issue of soil salinity in susceptible land such as border areas. Also, the combination and modeling of two processes of seawater salinity intrusion into freshwater of the river and its effect on soil salinity of the surrounding lands by direct infiltration from the riverbanks and by irrigation is the difference between this study and previous studies. This research is comprehensive due to the selection of the border river, the estimation of salinity infiltration along the river, and the combined effects of direct water infiltration from the riverbanks and tidal irrigation on date palm cultivated soils and lands on both sides of the river.

**Materials and Methods**

The study area is the Arvand (Shatt Al-Arab) River. The Arvand River is the essential border river between Iran and Iraq which is dominated by tidal conditions at the mouth of the river. It appears at the confluence of the Tigris and Euphrates rivers in Southern Iraq near the city of Al-Qurna and flows into the Persian Gulf after about 84 km on the Iranian-Iraqi border. The existing irrigation and drainage system in the studied area is mostly tidal and Generally, the irrigation of plants is carried out by flooding due to the low elevation of the land. The theoretical foundations of the study are divided into two main parts, water and soil quality. Here are Steps for modeling the effect of salinity intrusion on water and soil in the study area:

**1) Hydrodynamic modeling and salinity intrusion length**

In order to investigate the infiltration of Persian Gulf saline water into the river finite difference method in the implicit scheme was utilized, in the first stage for the hydrodynamic model and salinity intrusion, transverse and deep features of the river, upstream and downstream boundary conditions, and the Karun river inflow to the Arvand were entered as model inputs. In this study, two HD and AD models were used. The upstream boundary condition is the average monthly river discharge from 2009 to 2018, and the time series of sea level along with the average salinity of the Persian Gulf near the Arvand was considered for the downstream boundary condition. The reason for using the average inflow has been the effect of upstream activities in the last two decades, which has reduced the inflow of the Arvand river. The hydrodynamics and salinity models were validated with available 2014 data.

**2) Modeling the salinity infiltration of riverbanks**

After hydrodynamic modeling, changes in river salinity and water level were used spatially and temporally in the Hydrus-2D model. the soil hydraulic characteristics were estimated using past field studies by the Rosseta. Then, according to the soil type, the maximum longitudinal and transverse dispersivity coefficient was considered to simulate the salinity penetration length of the river walls in average conditions. Salt decomposition or adsorption was also ignored. A two-dimensional advection-dispersion equation was used to describe the salt transfer. The initial conditions were considered based on the soil moisture, and the content of solutes in the water in the whole soil profile was considered zero. The calculations were continued until the results did not change significantly and the model reached a stable state.

**3) Steady-state soil salinity model with irrigation**

Unsteady models for predicting soil salinity require data and high volumes of information restricting their use for research purposes and on large scales. The proposed equation in steady-state conditions

has been used, To calculate the average salinity of soil saturated extract by irrigation water. In order to calculate soil salinity by irrigation water, it is needed to have leaching fraction and irrigation water salinity to estimate the average salinity of soil saturated extract with long-term use of that water. In the current study, the leaching fraction is considered in a critical condition according to the drainage condition of the lands and the leaching method. Then the results were compared with the measured data for validation.

### Discussion of Results

Validation results showed that the simulated and measured water levels at 181 km (Faw) and 150 km from

upstream of the Arvand river corresponded with the coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.97 and 0.95, respectively. The result of dispersion coefficient validation based on measured salinity concentration in 2014 and the simulated concentration at 10 km from downstream (Faw region) showed that the salinity concentration matched with RMSE of 3.07 kg/m<sup>3</sup> (ppt) and with  $R^2$  of 0.85 for the average monthly. In addition, based on the measured data of field studies and previous studies, the average salinity of soil saturated extract in irrigated lands on both sides of the Arvand River, low leaching fraction performance can be confirmed. The simulation results of the water quality model in the river showed that in the average river conditions, the sea saline water affects about 60 km from the downstream to upstream of the river.

Modeling the infiltration of saline water from riverbanks that depends on the salinity of water in river cross-sections, it showed that at 188 km from Al-Qurna, i.e., near the Persian Gulf, up to 242 meters of soil on both sides of the river becomes saline to the point of starting damage to the date palm (2.5 ppt). This infiltration length in the 144 km of the Arvand River from the upstream section in the south of Abadan city reaches zero, which means that the salinity of the soil is less than damage to the date palm. Prediction of soil salinity of Arvand River lands with 10 km division for long-term use of river water in average conditions showed that the soil salinity in the lands on both sides of the river in downstream of the Arvand River reaches 97.3 ppt which is located in Iran near the area called Al-Gasaba and in Iraq in the south of Faw region. With increasing water quality to the upstream, average soil salinity is decreased.

### Conclusions

Modeling the direct infiltration and solute transport from the riverbanks showed that although its effects around the river are evident due to the dryness of palms, it has a small proportion of soil salinity compared to soil salinity by irrigation water. In order to prevent and control salinity, more leaching is needed in the root zone, which due to the heavy soil texture of the study area, increasing drainage efficiency has a significant effect in solving this problem. Upstream developments increase over time, and progress leads countries to consume more water, which reduces the volume of water inflow to the Arvand River. The main cause for concern is soil and water salinity. It threatens the productivity of the estuary ecosystem and large palm fields along its bank and will have social, economic, and political consequences. Thus, the water of the Arvand River, with a significant reduction in quality and soil on both sides of the river, is facing the threat of secondary salinity, which requires the necessary management to improve the existing conditions and prevent irreversible damage in the region.

## مدل ریاضی نفوذ شوری در رودخانه جزرومدی اروند و تأثیر آن بر شوری اراضی اطراف رودخانه

امیرحسین منتظری، مهدی مظاهری\*، سعید مرید

گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۹/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۴/۱۸

### چکیده

بخشی از مشکلات در جهان که مانعی در برابر توسعه اقتصادی و کشاورزی می‌باشد، افزایش شوری آب و خاک است. اروندرود که از مهم‌ترین رودخانه‌های مرزی کشور است در اثر نفوذ آب شور خلیج فارس با کاهش چشمگیر کیفیت آب و خاک اراضی مواجه است که تهدید جدی برای منطقه محسوب می‌شود. اروندرود از تقاطع رودهای دجله و فرات تشکیل می‌شود و در نهایت به خلیج فارس می‌ریزد. در تحقیق حاضر نتایج شبیه‌سازی مشخص کرد که در شرایط متوسط جریان ورودی اروند، جبهه‌ی آب شور تا ۶۰ کیلومتر از پایین‌دست به رودخانه نفوذ می‌کند و کیفیت آب اروندرود را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سپس اثر شوری آب رودخانه بر شوری خاک از دو جنبه، شوری خاک توسط نفوذ مستقیم از جداره‌های رودخانه و شوری خاک توسط استفاده بلندمدت از آب رودخانه به‌منظور آبیاری اراضی صورت گرفت. نتایج نشان داد در ۱۸۸ کیلومتری از بالادست رودخانه تا ۲۴۲ متر آب شور بر خاک دو طرف اروندرود اثرگذار است و در جنوب شهر آبادان این باند شوری از بین می‌رود. پیش‌بینی شوری اراضی توسط آبیاری با آب رودخانه در شرایط ماندگار، نشان داد شوری متوسط عصاره اشباع خاک در ایران در منطقه‌ای به نام الگصبه و در عراق جنوب منطقه فاو شوری خاک به ۹۷/۳ ppt می‌رسد.

**کلید واژه‌ها:** رودخانه اروند، کیفیت آب رودخانه، نفوذ جبهه‌ی شوری، شبیه‌سازی عددی، شوری خاک

### سراغاز

محققان منابع آب قرار گرفته است. یکی از عوامل اصلی بازدارنده در بهره‌برداری از آب رودخانه کاهش کیفیت آب است که برای مصارف مختلف همچون آب شرب، کشاورزی و صنعتی شاخص‌های کیفی خاصی وجود دارد. مدیریت و برنامه‌ریزی برای استفاده و برداشت از آب رودخانه مستلزم شناخت و بررسی کیفیت آب رودخانه است، یکی از پارامترهای اولیه برای اندازه‌گیری کیفیت آب در رودخانه‌ها شوری است که مشخص‌کننده‌ی

اهمیت مطالعه آب‌و‌خاک از دیرباز مورد توجه پژوهشگران و دولت‌ها بوده است. مطالعه‌ی هم‌زمان و اثر این دو منبع پراهمیت زمینی یعنی آب‌و‌خاک راه را برای مدیریت و توسعه پایدار حکومت‌ها آسان‌تر می‌کند. رودخانه‌ها از منابع اصلی آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی برای سال‌های متمادی بوده‌اند. در سال‌های گذشته حفظ و بهبود کیفیت آب رودخانه موردتوجه دولت‌ها و



غلظت نمک‌های محلول در آب است و بارگزاری‌های نقطه‌ای و گسترده غلظت شوری را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Somlyody et al., 1998; Fujioka, 2001). با عنایت به روند افزایش جمعیت و محدودیت منابع آب در مقیاس جهانی و ملی، بحران آب در آینده را جدی‌تر پیش‌بینی می‌شود. این عامل در منابع آب مشترک میان کشورها تشدید می‌شود و توجه به منابع آب مرزی امری پراهمیت تلقی می‌شود. یکی از منابع مهم آب سطحی که در این دسته قرار می‌گیرند رودخانه‌های مرزی می‌باشند که در آینده می‌تواند یک مسئله حیاتی برای هریک از کشورهای هم‌جوار باشد. بیش از ۲۰۰ رودخانه مرزی وجود دارد که ۱۴۸ عدد از این رودخانه‌ها میان دو کشور در جهان جاری هستند (Ni and Wang, 2007).

عدم نظارت کافی بر پروژه‌های ساخت بشر همچون سدها برای توسعه و تولید برق و در نظر نگرفتن اثرات آن‌ها با پایش و اندازه‌گیری دقیق در دهه‌های گذشته کاهش کیفیت رودخانه‌های بین‌المللی را به‌همراه داشته است (Llamosas and Sovacool, 2021) و بحث کشورهای ذینفع بر سر این منابع هرروز افزایش می‌یابد. از جمله حوضه‌های آبی مشترک در منطقه خاورمیانه حوضه اروندرود می‌باشد که از حساسیت و جایگاه خاص بنا بر موقعیت ژئوپلیتیکی ۱ حاکم برخوردار است (Zaki and Najafi, 2020).

اروندورد یکی از رودخانه‌های مرزی پراهمیت میان کشور ایران عراق است که شرایط جزرومدی در مصب رودخانه بر آن حاکم است. فعالیت‌های انسانی کشورهای مجاور ایران یعنی عراق و ترکیه بر کیفیت و کمیت آب اثرگذراست، حال که کشور ترکیه نوزدهمین صد خود را بر روی رودخانه‌های دجله و فرات به نام ایلی‌سو<sup>۲</sup> احداث و برای تولید برق آبیگری کرده است نگرانی کشورهای پایین‌دست بر روی رودخانه مرزی اروندر را بیش از پیش قوت بخشیده است. به علاوه یکی از معضلات بشر به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک فرایند شور شدن

زمین‌ها است. شوری زایی و قلیایی شدن خاک از پدیده‌های اصلی ازبین‌رفتن و تخریب اراضی به شمار می‌رود. شوری خاک یکی از عوامل محدودکننده است که مستقیماً بر روی رشد گیاه اثرگذار است و می‌تواند کل اکوسیستم یک منطقه را به مرز وجود برساند (Massakbayeva et al., 2020). به این علت مطالعات زیادی در خصوص پیامدهای شوری خاک صورت گرفته است. تغییرات مکانی و ویژگی‌های خاک همچون شوری خاک موضوعی معمول است اما شناخت تغییرات این ویژگی در مناطقی که کشاورزی امری اقتصادی است و بر شرایط سیاسی منطقه اثر گذار است امری مهم جهت مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق می‌باشد و توجه به آن برای سود بیشتر و رسیدن به هدف توسعه پایدار ضروری است (Eilers et al., 1997; AYOUBI et al., 2007).

مسائل شوری خاک به دلایل گوناگونی رخ می‌دهد، تمامی عوامل شوری خاک به دو بخش کلی شوری اولیه که منشأ طبیعی دارند و به‌صورت طبیعی در خاک‌ها رخ می‌دهند، همچون گنبد‌های نمکی و شوری ثانویه که به علت فعالیت‌های انسانی یا سوءمدیریت رخ می‌دهد می‌توان تقسیم‌بندی کرد. تفاوت گذاشتن میان دو نوع شوری اولیه و ثانویه عموماً مشکل است زیرا معمولاً شوری ثانویه، شوری اولیه‌ای است که در اثر فعالیت‌های انسانی شدت یافته است (Pishnamaz Ahamdi et al., 2017). از عوامل شوری خاک کاهش کیفیت آب رودخانه‌هایی است که از آن‌ها به صورت گسترده برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود، شور شدن خاک عامل ابتدایی تخریب خاک بوده و باعث کاهش توان تولید خاک می‌شود که درنهایت به علت کاهش راندمان تولیدات کشاورزی این اراضی به اراضی غیر قابل کشاورزی تبدیل خواهند شد و میتواند تهدیدی جدی برای ساختارهای روستایی و شهری، کاهش تنوع زیستی و محصولات کشاورزی باشد (Masoud and Koike, 2006). بیش از ۷۵ درصد از خاک‌های تحت تأثیر شوری در کره زمین به علت

اثر جزرومد دو عامل مستقل حاکم بر جریان آب در مصب رودخانه‌ها را می‌توان ذکر کرد. (۱) جریان رودخانه از بالادست که پدیده‌های اقلیمی، هواشناسی و همچنین عوامل انسانی بر آن اثر دارند. (۲) تغییرات سطح آب دریا بر اثر جزرومد در نزدیکی محل ورود آب دریا به رودخانه (پایین‌دست مصب). مهم‌ترین عامل تأثیر بر دبی رودخانه اثر فعالیت‌های انسانی بالادست است و در رابطه با پدیده جزرومد عامل مؤثر موقعیت زمین نسبت به ماه و خورشید است که در زمان‌های مختلف سال و کلیه نقاط زمین بر اساس محاسبات قابل پیش‌بینی است و حالت تکرار دارد که جداول آن معروف به جداول آدمیرالیتی<sup>۳</sup> در دسترس است. عوامل دیگر جوی همچون طوفان‌های دریایی، سونامی و... نیز در بالا آمدن سطح آب دریا نقش دارند که بررسی اثر آن‌ها بر ارتفاع آب دریا نیاز به مطالعات دقیق در علوم دریا دارد. به‌طور کلی مدیریت کیفی منابع آب که در معرض تهدید و آلودگی هستند، راهکاری برای بهره‌برداری و حفاظت صحیح از آن‌ها است (Somlyody et al., 1998). در پژوهش‌های پیشین اثر پدیده‌های گوناگون همچون تغییر دبی رودخانه و افزایش دامنه جزرومد بر نفوذ آب شور دریا در مناطق مختلف دتیا مورد بررسی قرار گرفته است و پروفیل طولی شوری رودخانه بررسی شده است. در مطالعه‌ای با استفاده از روش عددی به صورت یک بعدی اثر جریان رودخانه کارون بر نفوذ شوری به مصب رودخانه اروند از دریای خلیج فارس بررسی شده است. در این مطالعه بیان شد در صورتی که جریانی از بالادست اروند یعنی رودخانه دجله وارد اروندرود نشود و ورودی دبی رودخانه کارون به اروندرود در محدوده ۶۰ مترمکعب بر ثانیه باشد در طول دوره شبیه‌سازی می‌تواند میزان شوری را فراتر از ایستگاه ابوفلوس حفظ کند (Lafta, 2022). در اروندرود باهدف تخمین نفوذ شوری با استفاده از حل روابط تحلیلی مطالعه‌ای انجام شد. این کار با استفاده از مدل تحلیلی نفوذ یک‌بعدی نمک همراه با روابط اصلاح شده پیش‌بینی Gisen و همکاران (۲۰۱۵) برای جزرومد

آبیاری نادرست و عدم وجود شبکه‌های زهکشی با مشکل شوری مواجه هستند. طبق گزارش فائو در سال ۲۰۰۸ میلادی سطح جهانی خاک‌های تحت تأثیر نمک شامل خاک‌های شور و سدیمی بیش از ۸۰۰ میلیون هکتار تخمین زده شده است که این مورد در کشورهای درحال توسعه بیشتر به چشم می‌خورد (Fall, 2017). به صورت کلی میتوان از دلایل اصلی شوری خاک، استفاده از آب شور و نبود آب با کیفیت برای آبیاری، تبخیر شدید، آبشویی ناکافی و مدیریت زهکشی را نام برد (Rajabzadeh et al., 2009). باتوجه به اینکه حدود ۳۴ درصد مساحت اراضی کشور به درجات مختلف با مشکل شوری مواجه‌اند. از طرف دیگر، منابع آب در بیشتر این مناطق دارای مشکل شوری‌اند، بررسی در زمینه بهره‌برداری از این قبیل منابع آب و خاک و تأثیر آن بر خاک و گیاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است همچنین به حداقل رساندن آسیب‌های انسانی در مناطق مسکونی ساحلی، حفاظت از مناطق حساس زیست‌محیطی بایستی موردتوجه واقع شود. در رودخانه‌های ساحلی یا جزرومدی که به محیط‌های آبی شور منتهی می‌شوند مصب رودخانه محل ورود آب شور دریا به رودخانه است. موضوع تأثیر جزرومد بر رودخانه‌هایی که به دریا می‌ریزند موضوعی شناخته شده و قابل توجه است، همچنین یکی از مسائل پیچیده و مهم در مهندسی رودخانه و هیدرولیک می‌باشد (Nur et al., 2021). با در نظر گرفتن اثر جزرومد دریا بر رودخانه‌های جزرومدی، روندیابی هیدرولیکی و استفاده از مدل‌های موجود می‌توان سطح آب رودخانه را زمان‌های مختلف تعیین نمود و اثرات آن را به‌ویژه از نظر کیفی بر رودخانه بررسی کرد.

مصب رودخانه محل ورود آب شور به آب شیرین رودخانه است. باتوجه به این که چگالی آب شور دریا بیشتر از آب شیرین است در عمق پایین‌تر از سطح آب در مصب، وارد رودخانه می‌شود و تحت شرایط مختلف تاندازه‌ای پیشروی می‌کند. به‌طور کلی با بررسی رودخانه‌های تحت

صورت گرفته است. سپس از مدل پیش‌بینی شده برای بررسی پیامدهای تغییرات جریان رودخانه برای توزیع شوری استفاده شد (Abdullah et al., 2017).

Abbas (۲۰۱۷) با استفاده از مدل هیدرودینامیک HEC-RAS اقدام به شبیه سازی شرایط هیدرودینامیک یک‌بعدی و غیرماندگار شوری شط‌العرب کرده است. داده‌های دبی و TDS روزانه سال ۲۰۱۴ در بخش‌های مختلف در امتداد رودخانه شط‌العرب و تلاقی دجله و فرات گرفته شد، بعضی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری به‌عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده و بقیه برای کالیبراسیون و صحت سنجی مدل استفاده شده‌اند. نتیجه مدل با داده‌های واقعی مقایسه شده و مطابقت خوبی داشتند.

Al-asadi (۲۰۱۷) به بررسی آینده آب شیرین ورودی در شط‌العرب پرداخته، این مطالعه از داده‌های نرخ فعلی رشد جمعیت، توسعه کشاورزی و اثرات تغییر آب‌وهوا برای برآورد تقاضای آب و میزان آب موجود در شط‌العرب استفاده کرده است. رودخانه شط‌العرب در نتیجه کاهش آب دریافتی از سرشاخه‌های آن با کمبود آب شیرین روبه‌رو خواهد شد. در حال حاضر، این رودخانه در اثر ساخت سد در انشعابات ورودی تنها از رودخانه دجله آب شیرین دریافت می‌کند. در سال ۲۰۴۰ میلادی انتظار می‌رود که آب شیرین دجله در دسترس شط‌العرب نباشد؛ بنابراین نفوذ آب شور دریا به رودخانه افزایش می‌یابد و باعث تغییر کیفیت آب در رودخانه از آب شیرین به آب دریا شود و آب‌شور از خلیج فارس به سمت بالا پیشرفت خواهد کرد.

در مطالعه‌ای Duong و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیک MIKE یک بعدی و دوبعدی شبیه‌سازی جریان‌های آینده، سطح آب و میزان نفوذ شوری را در رودخانه Hau که یکی از شاخه‌های اصلی در دلتای مکنونگ است را بر اساس تغییرات هیدرولوژیکی محتمل در آینده رودخانه تحت سناریوهای متعدد تغییرات جریان ورودی از بالادست، تغییرات آب و هوا و افزایش سطح آب دریا را برای دوره زمانی ۲۰۳۶-۲۰۶۵ شبیه‌سازی

کردند و بیان کردند که نفوذ شوری ایجاد مجدد وضعیت آب شیرین را در مصب این رودخانه در آینده دشوارتر خواهد کرد. در مطالعه‌ای اثر افزایش سطح آب دریا بر نفوذ آب‌شور باتوجه به سناریوهای تغییر اقلیم در دلتای مکنونگ را Vu و همکاران (۲۰۱۸) تخمین زدند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌داده‌شده نشان داد شوری بیش از ۴ گرم بر لیتر که بر عملکرد برنج تأثیر می‌گذارد تا حدود ۶۰ کیلومتر به رودخانه نفوذ می‌کند و اگر سطح دریا تا سال ۲۰۵۰ در مقایسه با سال ۲۰۰۰، ۳۰ سانتی‌متر سطح دریا افزایش یابد سی هزار هکتار از اراضی کشاورزی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. Yu و همکاران (۲۰۱۴) با بکارگرفتن داده‌های از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ به بررسی توزیع شوری در رودخانه برزین در استرالیا پرداختند. نتایج نشان داد در شرایطی که در رودخانه دبی سیلابی جاری باشد اختلاط آب‌شور و شیرین در ۵ کیلومتر نزدیک‌تر به دریا در حالت غیر سیلابی اتفاق می‌افتد.

برای بررسی اثر آبیاری بر شور شدن خاک در مطالعه‌ای در دشت یزد - اردکان Zehtabian و همکاران (۲۰۰۶)، ۸ واحد مطالعاتی با منابع آب مجزا باکیفیت متفاوت از یکدیگر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد گرچه آبیاری با آب شور به تدریج سبب شور شدن خاک می‌شود اما در مناطق مورد مطالعه هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در اراضی بایر در برابر اراضی باغی و زراعی نشان می‌دهد آبیاری سبب کاهش شوری در این مناطق شده است و در مناطقی که شوری اولیه خاک زیاد باشد، آبیاری صحیح می‌تواند نقش اصلاح‌کننده در شوری خاک را داشته باشد. بررسی توزیع شوری خاک در اثر کم آبیاری و شوری آب آبیاری در تحقیقی توسط Alihoury و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد مقدار شوری خاک رابطه معنی‌دار و مستقیمی با میزان هدایت الکتریکی آب آبیاری دارد و شوری خاک با افزایش عمق خاک افزایش یافته است.

در پژوهشی نفوذ آب شور در بالاتر از مصب Tagus

بیشترین مطالعات شوری بر روی اصلاح اراضی که از پیش در برابر شوری آب آسیب دیده است صورت گرفته که عموماً مطالعات موردی بوده و کمتر نگاهی جامع به موضوع شوری خاک در مناطق حساسی همچون نواحی مرزی شده است، همچنین ترکیب و مدل سازی دو فرایند نفوذ شوری آب دریا به رودخانه و اثر آن بر شوری اراضی اطراف به صورت نفوذ مستقیم از جداره های رودخانه و توسط آبیاری، نوآوری و وجه تمایز این مطالعه با مطالعات صورت گرفته پیشین است. به منظور مدیریت بهتر مشکل شوری آب و خاک، روش های پیش بینی کننده و قطعی برای آگاهی از فرایند شوری لازم است که مورد توجه قرار گیرد، تا بتوان راهکارهای مدیریت شوری آب و عدم شوری بیش از حد خاک جهت حفاظت محیط زیست و اهمیت به موضوعات استراتژیکی منطقه را مورد بررسی قرار داد. این مطالعه از حیث انتخاب رودخانه مرزی و تخمین نفوذ شوری در طول رودخانه و بررسی توأم اثرات نفوذ مستقیم آب از جداره های رودخانه و آبیاری جزرومدی بر خاک تحت کشت نخیلات و اراضی سواحل دو طرف رودخانه مطالعه ای جامع به حساب می آید.

### مواد و روش بررسی

#### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه رودخانه اروند می باشد، این رودخانه از القرنه در مختصات  $31^{\circ}00'16''$  و  $47^{\circ}26'34''$  تا محل ریزش رودخانه به خلیج فارس به طول ۱۹۱ کیلومتر می باشد. همان طور که در شکل (۱) مشخص است رودخانه اروند (شط العرب) از به هم ریختن رودخانه های دجله و فرات و رودخانه کارون در فاصله ۳۳ کیلومتری از بصره تشکیل می شود. رودخانه های دجله و فرات در محلی به نام القرنه نزدیک شهر بصره در عراق در ۱۱۰ کیلومتری شمال غربی آبادان به هم می ریزند. این رودخانه در جهت جنوب شرقی از کنار شهر بصره گذشته مرز ایران و عراق را تشکیل داده و پس از طی کردن شهرهای مرزی آبادان و

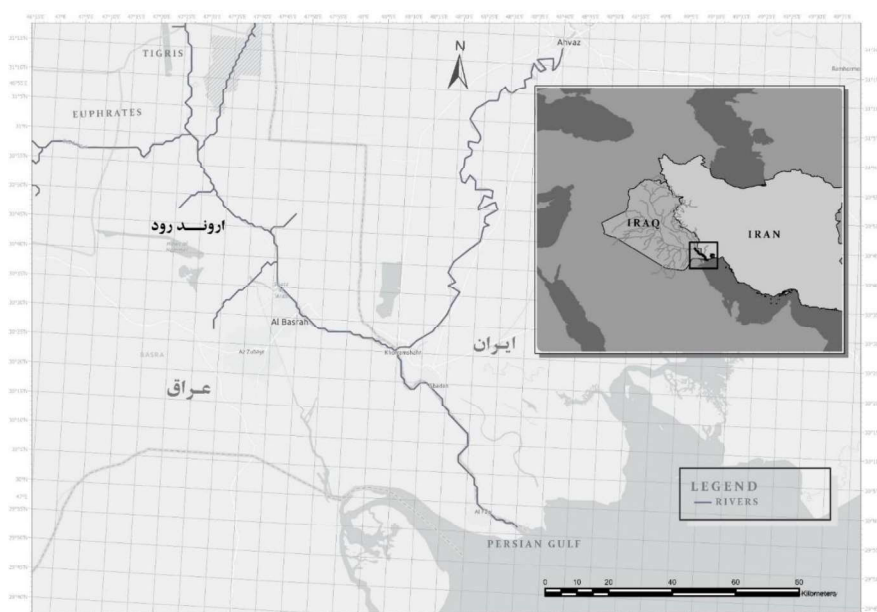
در شرایط خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت در این مطالعه تغییرات جریان ورودی به رودخانه در سناریوهای مختلف و بالا آمدن سطح آب بررسی شد نتایج حاکی از آن بود که کاهش جریان ورودی آب شیرین عواقب نفوذ آب شور را تشدید می کند (Rodrigues, Fortunato and Freire, 2019).

در مطالعه ای Aragüés و همکاران (۲۰۱۱) شوری خاک را در رابطه با خصوصیات فیزیکی خاک و مدیریت آبیاری در چهار ناحیه مدیترانه ای تحت آبیاری مورد پژوهش قرار دادند. نتایج حاصله از این مطالعه نشان داد شوری خاک غالباً تحت تأثیر شوری آب آبیاری، کیفیت و راندمان آبیاری می باشد و در رابطه با شوری آب زهکشی، عمدتاً از شوری خاک و کیفیت آب آبیاری تأثیرپذیر بوده است. در مطالعه انجام شده برای یک سیستم نهر-مرداب جزرومدی، یک مدل جفت شده بر پایه ELCRIC برای آب سطحی و SUTRA برای آب منفذی استفاده شده است. در این بررسی کد SUTRA با یک عبارت بارگذاری جزرومدی اضافه شده به رابطه ریچاردز اصلاح شد، نتایج نشان می دهد که این مدل به خوبی جریان آب سطحی و آب های زیرزمینی و فرایندهای انتقال املاح در تالاب ها را نشان می دهد (Yet al., 2011).

در مطالعه ای در دلتای رودخانه Red در ویتنام آسیب پذیری تولید گیاه برنج در برابر نفوذ شوری ناشی از بالا آمدن سطح آب را مورد بررسی قرار دادند، نتایج مشاهدات آنها نشان داد غلظت شوری آب وارد شده به مزارع برنج در نزدیکی دهانه رودخانه بیشتر بود همچنین در این محل ها عملکرد گیاه برنج به طور قابل توجهی از مزارع بالادست کمتر بود (Nguyen et al., 2017). قابل ذکر است که در پژوهش های گوناگون تغییرات غلظت در کیفیت آب رودخانه بر اثر نفوذ شوری از محیط های آبی شور می تواند غلظت املاح در خاک مجاور رودخانه را افزایش دهد و بر بهره وری زمین ها اثر گذار باشد (Tully et al., 2019; Weissman and Tully, 2020).

۱۲۵۰ متر گزارش شده است و طول بخش مرزی این رودخانه ۸۴ کیلومتر است. عمق رودخانه از ۸/۵ متر تا ۲۴ متر باتوجه به فصول پرآبی و کم‌آبی اندازه‌گیری شده است (Al-Asadi, 2017; Abdullah et al., 2016).

خرمشهر و ریختن شاخه‌ای از کارون به آن در حدود ۸ کیلومتری از اروندرکنار به خلیج فارس می‌ریزد. عرض این رودخانه از ۲۵۰ متر در ورودی رودخانه، در حدود ۷۰۰ متر در نزدیکی منطقه بصره و در ورودی خلیج فارس تا



شکل ۱. موقعیت رودخانه اروندر و محدوده مطالعه

گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Ibrahim et al., 2020). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که فاکتورهای آب و هوایی بر ورودی دجله و فرات اثر گذاشته است. از سال ۱۹۲۳ تا ۲۰۰۹، ۱۰ درصد بارش‌ها کاهش یافته و دما ۱/۷ درجه افزایش یافته است همچنین دبی رودخانه‌های دجله و فرات به ترتیب به ۸۰ درصد و ۲۵ درصد دبی آن‌ها کاهش یافته است (Al-Mahmood et al., 2015).

### وضع موجود آبیاری مزارع و نخیلات

سیستم آبیاری و زهکشی موجود در منطقه مورد مطالعه غالباً به صورت جزرومدی است، به این صورت که در هنگام مد آب شور رودخانه به علت چگالی بالا به زیر آب عاری از شوری در رودخانه رفته آب رودخانه بالآمده و با پرشدن انهار اصلی و فرعی، آبیاری نخیلات انجام می‌شود و هنگام جزر، زهکشی انهار آب صورت می‌گیرد و

ورود آب شور از پایین‌دست رودخانه بر اثر جزرومد، کاهش کیفیت و دبی ورودی اروندرود از بالادست موجب افزایش شوری این رودخانه شده است که محل تأمین آب روستاها، مزارع کشاورزی و همچنین صنایع متعددی می‌باشد. همچنین در اروندرود، باد شمالی یا شمال غربی تمایل به حفظ روند جزرومد دارد (Al-Muhyi, 2015). بخش پایین حوضه دجله - فرات بزرگ‌ترین منطقه تالابی در آسیای غربی و خاورمیانه است که در شرایط طبیعی ۲۰ هزار کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد (UNEP, 2001). جوامع شهری و روستایی کشور ایران و عراق که کشاورزی و دامداری راه اصلی آن‌ها برای ادامه‌ی زندگی است از منبع اصلی آب سطحی در آن منطقه یعنی اروندرود استفاده می‌کنند. آب با شوری متوسط ۴۰/۵ گرم بر کیلوگرم بیشتر مناطق خلیج فارس را اشغال می‌کند که در بهترین شرایط ورود آب شیرین اروندرود شوری در نزدیکی ریزشگاه ۲۴

2005). اولین قدم در مدل‌سازی عددی هر پدیده‌ای شناخت روابط حاکم بر آن فرایند است. از آنجایی که عمق آب در طول رودخانه ثابت نمی‌باشد. با توجه به هدف مطالعه، از روابط جریان غیریکنواخت در بررسی پدیده نفوذ شوری تحت تأثیر جزرومد استفاده شده است. روابط حاکم بر جریان رودخانه روابط پیوستگی رابطه (۱) و مومتوم رابطه (۲) به صورت یک‌بعدی به شرح زیر است (Martin, McCutcheon and Schottman, 2018):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2)$$

در روابط ذکر شده  $A$  سطح مقطع جریان،  $q$  دبی جریان ورودی جانبی در واحد طول،  $Q$  دبی جریان،  $h$  عمق آب،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $S_f$  شیب خط انرژی و  $S_0$  شیب بستر می‌باشد.

### رابطه انتقال آلاینده

نفوذ جبهه آب شور از دریا به مصب رودخانه، در اثر دو فرایند یا مکانیزم در رودخانه‌های منتهی به دریا صورت می‌گیرد. یکی فرایند جابه‌جایی<sup>۴</sup> و دیگری فرایند پخشیدگی<sup>۵</sup> در پدیده جابه‌جایی جریان آب همراه خود شوری را انتقال می‌دهد و فرایند پخشیدگی به معنای حرکت مواد محلول از جایی که غلظت بیشتر است به جایی که غلظت کمتر است که خود شامل دو بخش پخشیدگی مولکولی و پخشیدگی متلاطم<sup>۶</sup> است. نوسانات جریان در نهایت باعث ایجاد پخشیدگی متلاطم می‌شود که مقداری بزرگ‌تر از پخشیدگی مولکولی دارد و عموماً از پخشیدگی مولکولی صرف‌نظر می‌شود. در اثر پدیده جزرومد جریانی از سمت دریا به رودخانه تشکیل می‌شود و گرادیان غلظت شوری دائماً در حال تغییر است در نتیجه هر دو پدیده جریان آب‌شور (جابه‌جایی) و اختلاف گرادیان شوری

آب آن‌ها تخلیه می‌شود. عموماً آبیاری نخیلات به علت پست و کم‌ارتفاع بودن اراضی به صورت غرقاب صورت می‌گیرد به این معنا که آب پیوسته بر سطح خاک باقی می‌ماند و زهکشی عموماً به معنای خارج شدن آب سطحی در آن مناطق است اما در مواردی که آبیاری به صورت فارو یا نشتی از طریق نهرهای فرعی منشعب صورت می‌گیرد تا اندازه‌ای شرایط زهکشی خاک بهتر است و بر عملکرد نخیلات اثرگذار است. ابعاد و اندازه انهار سنتی منوط به گسترش نخیلات بوده و در مواردی به عنوان راه آبی نیز استفاده می‌شود. (دستورالعمل فنی-اجرایی آیشویی اراضی، ۱۳۹۸) کیفیت پایین آب در مواقعی از سال و شوری آب رودخانه جزرومدی اروند معضلی جدی در استفاده از این سیستم آبیاری و زهکشی برای آینده است و اولین نشانه‌ها از شور شدن خاک از بیش از ۷۰ سال پیش مشاهده شده است و از آن‌پس بهره‌برداری کنترل نشده از منابع آب بالادست و پیشروی آب‌شور دریا به موازات هم پیش رفته است.

### تئوری تحقیق

در این بخش مبانی تئوری مطالعه به دو قسمت هیدرودینامیک و خاک تقسیم می‌شود. در بخش هیدرودینامیک این تحقیق، روابط مربوط به جریان، جابه‌جایی و پخش آلودگی بیان شده است و در بخش خاک به روابط مربوط به نفوذ مستقیم شوری از جداره‌های رودخانه به خاک و شوری توسط آب آبیاری پرداخته شده است.

### هیدرودینامیک

#### روابط جریان

غالباً پدیده‌هایی همچون توپوگرافی و شیب بستر رودخانه، ارتفاع جزرومد دریا، دبی ورودی آب رودخانه که به دریا می‌ریزد، سرعت باد و اصطکاک بستر بر حرکت جریان آب‌شور در مصب رودخانه‌ها اثر گذارند (Savenije,

سطح مقطع جریان،  $C$  غلظت آلاینده،  $K$  ضریب زوال یا کاهش آلاینده و  $S$  ترم منبع یا کاهش می‌باشد. این رابطه با فرض اختلاط کامل معرف دو مکانیزیم انتقال جرم یعنی جابجایی افقی ماده آلاینده توسط جریان آب و پخشیدگی ماده آلاینده (در این مطالعه شوری) در اثر اختلاف غلظت است.

### خاک

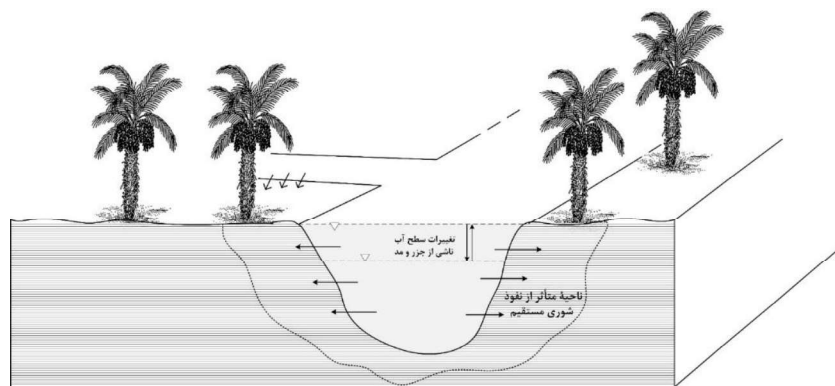
همان‌طور که ذکر شد شوری خاک به دو شکل اولیه و ثانویه صورت می‌گیرد، در شوری خاک به صورت طبیعی انسان نقشی ندارد اما در شوری ثانویه انسان بر شوری خاک اثرگذار است. در این مطالعه شوری خاک توسط آب رودخانه به دو شکل شوری خاک به صورت نفوذ مستقیم از جداره‌های رودخانه و شوری خاک توسط آب آبیاری در بلندمدت که دائماً توسط جزرومد در اراضی صورت می‌گیرد در نظر گرفته شده است با عنایت به این موضوع روابط براین اساس بیان شده‌اند. در شکل شماره (۲) دو فرایند شوری به صورت شماتیک نشان داده شده است.

(پخشیدگی) مرتباً آب شور را به سمت بالادست رودخانه حرکت می‌دهند. همان‌طور که ذکر شد عوامل گوناگونی بر اختلاط و نفوذ آب شور دریا به رودخانه اثر گذارند، این موارد غالباً با ساده شدن مسئله به عنوان یک مسئله یک‌بعدی جابه‌جایی-پراکندگی بیان می‌شوند (Taylor, 1954; Fischer, 1976). در مصب رودخانه‌های اختلاط کامل، جزرومد اثر غالب بر سیستم نفوذ آب شور دریا دارد و شوری در جهت عمودی کاملاً همگن و یکسان است و هرچه از دریا فاصله بگیریم شوری کاهش می‌یابد. در مدل‌های یک بعدی فرایند نفوذ در مصب اختلاط کامل در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه حل روابط و گسترش روابط با فرض اختلاط کامل ماده آلاینده در عمق عرض انجام می‌شود. برای بررسی و پیش‌بینی نحوه انتقال ماده آلاینده رابطه جابه‌جایی-پراکندگی رابطه (۳) بر پایه رابطه بقای جرم و قانون اول فیک بسط داده شده است (Chapra, 2008).

(۳)

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) - AKC \pm AS$$

در این رابطه  $D$  فاکتور پراکندگی در راستای طول،  $A$



شکل ۲. دو فرایند شوری خاک اطراف رودخانه ارنود از طریق نفوذ مستقیم و آبیاری

بیان می‌شود که از ترکیب رابطه داریسی<sup>۷</sup> و پیوستگی به‌دست آمده است (Farthing and Ogden, 2017).

(۴)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S(h)$$

### نفوذ مستقیم آب شور در خاک

در رابطه با روابط حاکم بر نفوذ مستقیم آب از جداره‌های رودخانه در خاک، برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک، رابطه ریچاردز (رابطه (۴)) به شکل زیر

در این رابطه  $C$  غلظت نمک‌های محلول در آب خاک  $(M/L^3)$ ،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک  $(L^3/L^3)$ ،  $q$  شدت جریان آب یا شار  $(L/T^{-1})$ ،  $t$  زمان  $(T)$ ،  $D$  ضریب پراکندگی هیدرودینامیک  $(L^2/T^{-1})$ . با صرف نظر از ضریب پخشیدگی ملکولی ضریب پراکندگی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$D = \lambda v \quad (10)$$

در این رابطه  $\lambda$  ضریب انتشارپذیری<sup>۱۱</sup>  $(L)$ ، این ضریب به عنوان یک فاکتور ثابت مستقل از سرعت جریان در نظر گرفته می‌شود و  $v$  متوسط سرعت آب منفذی  $(L/T^{-1})$  نیز از حل عددی مدل جریان آب به دست می‌آید (شار آب  $q$  تقسیم بر  $\theta$  رطوبت حجمی خاک) (Liu et al., 2021).

### شوری توسط آب آبیاری

عموماً پیش‌بینی شوری خاک در محدوده توسعه ریشه به‌سهولت میسر نیست و عوامل گوناگونی چون میزان آبیاری، کیفیت آب آبیاری، تأثیر واکنش‌های شیمیایی، برداشت آب به‌وسیله گیاه و وضعیت آب‌وهوایی مؤثر هستند. هر چند در این خصوص مدل‌های غیرماندگار و پیچیده‌ای توسعه داده شده‌اند. با این حال، مدل‌های غیرماندگار به داده‌ها و حجم بالای اطلاعات نیاز دارند، این امر کاربرد آنها را برای اهداف تحقیق محدود می‌کند و استفاده عملی از آنها را در مقیاس بزرگ محدود می‌کند (Visconti et al., 2012). کاربرد این مدل‌ها محدود می‌باشد و در عمل مدل‌های ساده تری که با فرض شرایط ماندگار توسعه داده شده‌اند بیشتر رایج است (Ayers and Westcot, 1985). برای محاسبه متوسط شوری خاک توسط آب آبیاری از رابطه‌ی پرکاربرد (رابطه ۱۱) که در شرایط ماندگار توسط آیرز و وسکات ارائه شده، استفاده شده است. از نظر ریاضی تحلیل در شرایط پایدار فاقد متغیر زمان است، فرض مورد استفاده برای توجیه شرایط پایدار

در این رابطه  $\theta$  رطوبت حجمی خاک  $(L^3/L^3)$ ،  $h$  مکش ماتریک  $(L)$ ،  $K(h)$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $(LT^{-1})$ ،  $X$  مختصات افقی  $(L)$ ،  $Z$  مختصات عمودی  $(L)$ ،  $S$  میزان برداشت آب توسط ریشه است  $(L^3/L^3T^{-1})$ .

همچنین برای توصیف مشخصات هیدرولیکی خاک همچون منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع روابط زیادی وجود دارد که معمول‌ترین آنها رابطه‌ی ون گنختون-معلم (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980) به شرح روابط زیر است (۵-۷):

$$m = 1 - 1/n \quad (5)$$

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (-\alpha|h|)^n]^m} + \theta_r \quad (6)$$

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

در روابط ذکر شده  $\theta_s$  رطوبت اشباع،  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده،  $K(s)$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $S_e$  اشباع مؤثر<sup>۸</sup>،  $\alpha$ ،  $m$  و  $n$  پارامترهای تجربی هستند. در رابطه ریچاردز آب استفاده شده توسط ریشه گیاه در واحد حجم خاک بر واحد زمان بر اساس رابطه فدس و همکاران (۱۹۸۲) به شکل زیر تعریف شده است:

$$S(h) = \alpha(h) S_p \quad (8)$$

که در این رابطه  $S_p$  شدت پتانسیل جذب آب و  $\alpha(h)$  تابع تنش آبی است.

جابه‌جایی و انتشار نمک‌ها در خاک‌ها با سه فرایند انتقال همرفت یا توده‌ای<sup>۹</sup>، پراکندگی هیدرودینامیکی<sup>۱۰</sup> و فرایند پخشیدگی صورت می‌گیرد. برای توصیف انتقال نمک رابطه جابه‌جایی - پراکندگی دوبعدی (رابطه ۹) به کار گرفته شد.

$$(9)$$

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(q_s C)}{\partial x} - \frac{\partial(q_z C)}{\partial z}$$



این است که در بازه‌های زمانی چندساله یا بیشتر تحت یک مدیریت آبیاری، محصول، الگوهای آب‌وهوایی و کیفیت آب آبیاری، توزیع مشخصات شوری خاک به یک حالت شبه پایدار می‌رسد. شرایط حالت پایدار یک فرض ایده‌آل برای سیستم‌های کشاورزی است و هیچ یک از این فرضیات کلی در عمل اتفاق نمی‌افتد اما با این وجود، تحلیل‌های حالت ماندگار اغلب تقریب‌های قابل قبول‌تری از تحلیل‌های پیچیده‌تر حالت غیرماندگار ارائه می‌دهند (Corwin and Grattan, 2018).

$$LF = \frac{EC_{iw}}{(5EC_e - EC_{iw})} \quad (11)$$

در این رابطه  $EC_{iw}$  شوری آب آبیاری،  $EC_e$  شوری عصاره اشباع خاک و  $LF$  کسر آبشویی است. این رابطه با فرضیات الگوی جذب آب توسط ریشه به صورت ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ در خاک، نمک تجمع یافته در خاک از جنس املاح موجود در آب آبیاری باشد به معنای این که منبع دیگر شوری موجود نباشد، میزان بارندگی نسبت به آب آبیاری ناچیز باشد و اختلاط کامل آب نفوذی با محلول خاک رخ دهد. در این رابطه با داشتن کسر آبشویی و شوری آب آبیاری می‌توان متوسط شوری خاک در ناحیه ریشه را تخمین زد.

مدل‌های متنوعی برای آنالیز و شبیه‌سازی کیفی و انتقال آلودگی در رودخانه‌ها توسعه داده شده است. در این مطالعه با توجه به داده‌های موجود از وضعیت شوری در رودخانه اروند با شرایط جزرومدی، برای حل عددی روابط دیفرانسیلی (۱) تا (۳) به صورت ضمنی<sup>۱۱</sup> و با روش تفاضل محدود<sup>۱۲</sup>، مدل عددی یک‌بعدی MIKE11 به کار گرفته شد. MIKE بسته‌ی نرم‌افزاری است که به وسیله‌ی مؤسسه هیدرولیک دانمارک<sup>۱۳</sup> ایجاد و توسعه داده شده است. یکی از مدل‌های در دسترس در آن MIKE11 می‌باشد که ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی کیفیت آب، هیدرودینامیک جریان، رواناب سطحی و ... برای

سیستم‌های رودخانه‌ای، مصب‌ها و کانال‌های آبیاری است. در این پژوهش برای رسم پروفیل شوری در طول رودخانه با در نظر گرفتن اثر جزرومد بر رودخانه، دو ماژول هیدرودینامیک (HD) به همراه ماژول جابجایی-پراکندگی (AD) مورد استفاده قرار گرفته است (DHI, 2016). نتایج مکانی و زمانی ماژول هیدرودینامیک همچون سرعت و تراز سطح آب ورودی‌های ماژول جابه‌جایی-پراکندگی می‌باشند. همچنین با توجه به رابطه (۱۲) انتخاب گام‌های مکانی و زمانی برای ارضا کردن شرایط پایداری در مدل اهمیت دارد.

$$\frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (12)$$

در این رابطه  $\Delta x$  گام مکانی،  $\Delta t$  گام زمانی و  $u$  سرعت جریان است. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی برای پایش شوری خاک به علت تغییرات مکانی شوری خاک عموماً امری وقت گیر و پرهزینه است و برای تعیین شوری خاک و پایش آن بهتر است از مدل‌های کامپیوتری استفاده کرد (Akramkhanov et al., 2011). برای حل عددی روابط حرکت آب و انتقال املاح از مدل Hydrus-2D استفاده شد که یکی از مدل‌های پیشرفته در رابطه با حرکت آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد. این مدل شامل حل عددی رابطه ریچاردز برای مطالعه حرکت آب و روابط جابه‌جایی-پراکندگی به منظور بررسی حرکت املاح و گرما در خاک در حالت غیراشباع، نیمه اشباع و اشباع کامل است. این مدل توانایی شبیه‌سازی و حل روابط دیفرانسیلی دو یا سه‌بعدی شرایط جریان را بر اساس حل عددی به صورت اجزاء محدود با به کارگیری روش گالرکین را دارا است (Šimůnek, Van Genuchten and Šejna, 2016).

### روش تحقیق

به منظور بررسی و مطالعه نفوذ آب شور خلیج فارس در آب رودخانه اروند، در مرحله اول ورودی‌های مدل

صورت نفوذ مستقیم و آبیاری مورد استفاده قرار گرفتند. برای شبیه سازی نفوذ شوری از جداره های رودخانه مشخصات خاک ناحیه اروندرود از مطالعات میدانی و پژوهش های پیشین استخراج شد و مورد استفاده قرار گرفت (Qureshi and Al-Falahi, 2015; saleh et al., 2019).

با عنایت به مطالعات صورت گرفته، در خاک اطراف ناحیه رودخانه اروند سه لایه قابل تشخیص است که مشخصات آن به تفصیل در پژوهش های پیشین ذکر شده است. توسط مدل ROSSETA که براساس شبکه عصبی با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک همچون داده های بافت خاک، درصد دانه بندی ذرات، چگالی ظاهری خاک، درصد رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم و ظرفیت زراعی پارامترهای هیدرولیکی خاک تخمین زده می شود. مقدار عددی این پارامترها برای اجرای مدل و حل عددی رابطه ریچاردز ضروری است، بنابراین این پیش بینی برای هر سه لایه خاک انجام شد. برای شبیه سازی جابه جایی و انتشار نمک در خاک توسط رابطه جابه جایی - پراکندگی که به آن اشاره شد نیاز است که ضریب انتشار پذیری ( $\lambda$ ) مشخص شود. این ضریب روش های متفاوتی برای تخمین دارد که در شرایط میدانی<sup>۱۵</sup> و آزمایشگاهی برای انواع خاک متفاوت است. به همین علت با توجه به مطالعه ی مروری جامع انجام شده (Vanderborght and Vereecken, 2007). و باتوجه به جنس خاک برای شبیه سازی طول نفوذ از جداره ها ماکزیمم ضریب انتشار پذیری طولی و عرضی ( $D_T$  و  $D_L$ ) در نظر گرفته شد تا حداکثر میزان نفوذ شوری در شرایط متوسط جریان رودخانه به دست آید به علاوه با توجه به این که نمک های غیر فعال در توده ی خاک واکنشی بروز نمی دهند انتقال به صورت غیر واکنش پذیر شبیه سازی شده است از تجزیه نمک یا جذب سطحی صرف نظر شد (Pazira, 2012).

پس از وارد کردن پارامترها برای نیل به هدف مورد نظر یعنی میزان نفوذ شوری از جداره های رودخانه به خاک

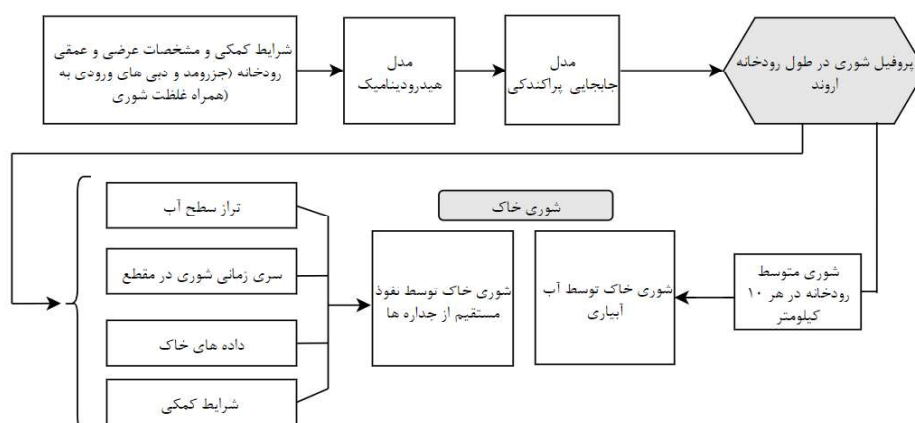
هیدرودینامیک که مشخصات عرضی و عمقی رودخانه، شرایط مرزی بالادست و پایین دست و ورودی رودخانه کارون به اروند بود بکار گرفته شدند. به منظور بررسی شرایط متوسط حاکم نفوذ شوری در رودخانه، در رابطه با شرایط مرزی بالادست باتوجه به منابع و گزارشات موجود از دبی ورودی اروند پس از به هم پیوستن رودخانه های دجله و فرات دبی به صورت ماهانه از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ استخراج شد و برای ورودی مدل متوسط ماهانه سال های گذشته در نظر گرفته شد (Hamdan, 2015; M. Mohamed and Abood, 2017; Mohamed and Hameed, 2019). علت بکارگیری دبی متوسط ورودی اثر فعالیت های بالادست در دو دهه ی اخیر بوده است که کاهش دبی ورودی اروند را در پی داشته است (Hameed and Aljorany, 2011; Abdullah et al., 2017).

برای شرط مرزی پایین دست رودخانه، دامنه جزرومد از جداول جزرومد موجود در دهانه خروجی اروند<sup>۱۴</sup> استخراج شد و تراز سطح آب دریا به همراه شوری متوسط خلیج فارس در نزدیکی اروند به صورت سری زمانی یک ساله با شرط مرزی باز خروجی که آلاینده (در این مطالعه شوری) امکان بازگشت به شبکه محاسباتی رودخانه را داشته باشد برای مدل سازی استفاده شد. همچنین رودخانه کارون باتوجه به آخرین ایستگاه هیدرومتری (ایستگاه فارسیات با لحاظ تأثیر تأسیسات و انحراف آب به بهمنشیر) به عنوان ورودی به اروندرود با شوری ۱/۷ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. در این مطالعه به منظور ارضا کردن شرط پایداری، گام های مکانی ۴۰۰ و زمانی ۳۰ ثانیه استفاده شد. همچنین به منظور جلوگیری از خطای زمانی و ازدست دادن اثرات جزرومد خروجی ها ۳ ساعته استخراج شدند. پس از نهایی شدن مدل هیدرودینامیک، تغییرات میزان شوری رودخانه و تراز سطح آب به صورت مکانی و زمانی مشخص و قابل استخراج است. این مقادیر به منظور بررسی شوری خاک به دو

اطراف، داده‌های تراز سطح آب در مقاطع موردنظر به همراه میزان غلظت شوری به‌صورت سری زمانی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی هیدرودینامیک وارد مدل نفوذ مستقیم شوری خاک شد. شرایط مرزی برای سطح خاک اتمسفری و هد فشاری متغیر برای داخل مقطع که سطح آب رودخانه متغیر می‌باشد تعریف شد. شرایط اولیه بر اساس میزان رطوبت خاک در نظر گرفته شد و چون رابطه حاکم بر انتقال املاح مقدار شوری و املاح موجود در آب را مدل می‌کند، میزان املاح موجود در آب در کل پروفیل خاک صفر در نظر گرفته شد و برای مرزهای انتقال شوری در خاک شرایط مرزی نوع سوم (مختلط) در نظر گرفته شد. محاسبات تا زمانی ادامه داده شد که نتایج پس از آن تغییر محسوسی نکنند و به‌اصطلاح مدل به حالتی پایدار برسد. برای ارضای شرط پایداری مدل حداقل گام‌های زمانی ۱۶/۸ ساعت در نظر گرفته شد.

حال به‌منظور محاسبه شوری خاک توسط آب آبیاری، همان‌طور که ذکر شد نیاز به داشتن کسر آبشویی و شوری آب آبیاری است تا در صورت استفاده طولانی‌مدت از آن آب آبیاری میزان متوسط شوری عصاره اشباع خاک تخمین

زده شود. باتوجه‌به وضع موجود آبیاری و زهکشی نخیلات که به آن اشاره شد روش مرسوم برای آبیاری نخلستان‌ها و مزارع انباشتن پیوسته آب بر سطح خاک است و آبشویی به‌صورت پیوسته انجام می‌شود و مقادیر زیادی آب صرف می‌شود. در این روش آبشویی آب به شکل یکنواخت از نیمرخ خاک عبور نمی‌کند و بیشتر آن از خلل‌و‌فرج درشت خاک به‌صورت ترجیحی عبور می‌کند. این عامل که ناشی از تمایل آب به گذر از خلل‌و‌فرج درشت خاک است، بر راندمان آبشویی که هدف آن خروج نمک تجمع یافته در خاک دانه‌ها است تأثیر منفی دارد. همین‌طور بافت خاک کم‌وبیش سنگین و مجهز نشدن به زهکشی مدرن در نخیلات و مزارع این موضوع را تشدید می‌کند که در عمل علتی بر پایین بودن کسر آبشویی در این اراضی است و همان‌طور که اشاره شد شوری محلول خاک متأثر از میزان جزء آبشویی است (Cote, Bristow and Ross, 2000; Abbas, 2010). به این منظور در این مطالعه جزء آبشویی در حالت بحرانی در نظر گرفته شد. نحوه فرایند شبیه‌سازی و به‌کارگیری داده‌های مدل هیدرودینامیک برای تخمین شوری خاک در شکل شماره (۳) بیان شده است.



شکل ۳. چارت نحوه‌ی شبیه‌سازی شوری آب و خاک

### اعتبارسنجی مدل هیدرودینامیک

مقاومت بستر در قسمت هیدرودینامیک (HD) یکی از پارامترهایی است که تا حد زیادی بر جریان رودخانه

اثرگذار است (Lemckert et al., 2011). در این مطالعه برای مقاومت بستر از ضریب زبری مانینگ استفاده شده، باتوجه‌به مطالعات گذشته بر روی اروندرود و تراز سطح

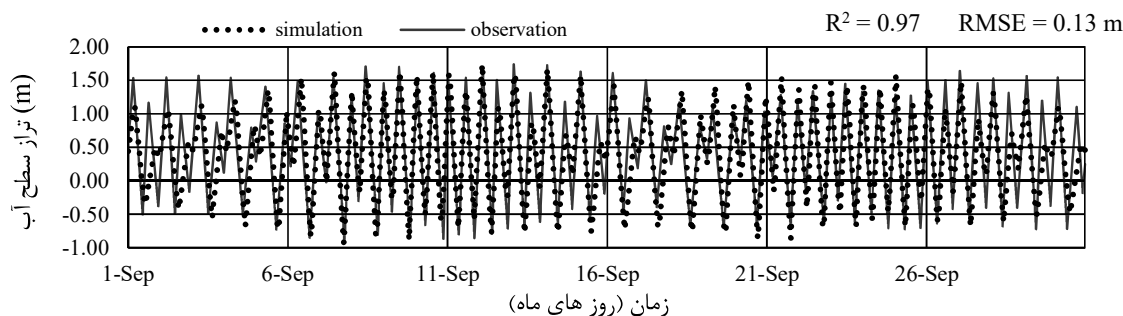
### نتایج

در این بخش پس از بیان نتایج صحت سنجی مدل هیدرودینامیک و شوری خاک توسط آب آبیاری به نتایج شبیه‌سازی شرایط متوسط مدل نفوذ شوری دریا در مصب رودخانه اروند و ترکیب آن با مدل‌های نفوذ مستقیم شوری خاک از جوانب و شوری خاک به وسیله آبیاری توسط آب رودخانه اشاره می‌شود. همان‌طور که بیان شد از عوامل اصلی شوری خاک و آب تشدید فرایندهای طبیعی توسط انسان است، در این مطالعه شبیه‌سازی اثرات متقابل شوری آب‌و خاک بر یکدیگر و ارزیابی شرایط متوسط در شوری آب‌و خاک محدوده رودخانه اروند صورت گرفته است.

### نتایج صحت سنجی مدل هیدرودینامیک

نتایج اعتبارسنجی حاکی از آن بود که تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در ۱۸۱ کیلومتری (منطقه فاو) شکل (۴) و ۱۵۰ کیلومتری شکل (۵) از بالادست رودخانه محل تقاطع دجله و فرات به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۷ و ۰/۹۵ ( $R^2$ ) مطابقت داشت. این برآوردهای کمتر در مقادیر شبیه‌سازی احتمالاً به علت صرف نظر از اثرات باد باشد (Hughes et al., 1998).

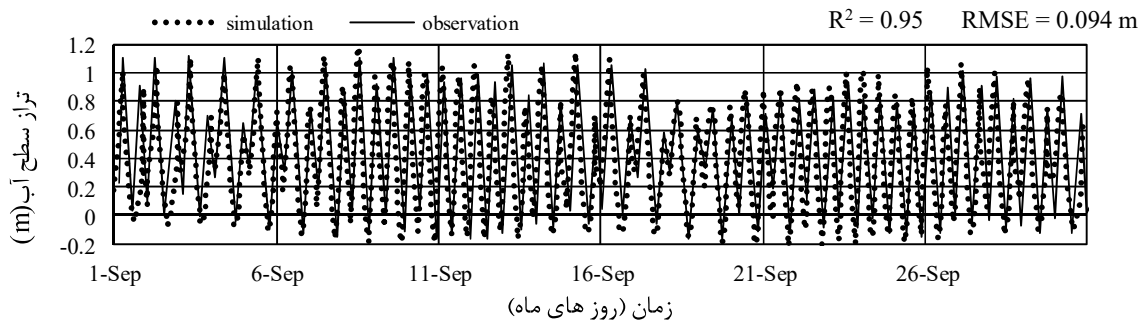
آب ضریب زبری مانینگ مقداری میان ۰/۰۱۷ تا ۰/۰۳۳ در نظر گرفته شد و با داده‌های مشاهداتی صحت سنجی شد (Al-Taei et al., 2019). به علاوه در مازول جابه‌جایی - پراکندگی (AD) ضریب پراکندگی که تا میزان زیادی تحت تأثیر گرادیان غلظت شوری یا ماده آلاینده است با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شوری و نتایج مدل اعتبارسنجی شد و باتوجه به این که شوری یک آلاینده پایستار است ضریب زوال صفر در نظر گرفته شد (Kanda et al., 2015). تغییرات سطح آب در دهانه رودخانه تحت تأثیر دامنه جزر و مدی قابل توجه است. با این حال این تأثیر به تدریج در امتداد رودخانه و در بالادست ضعیف‌تر می‌شود. اعتبارسنجی مدل هیدرودینامیک با داده‌های تراز آب در سال ۲۰۱۴، با به‌کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده برای دو ایستگاه که جزرومد بر آنها اثر قابل‌ملاحظه‌ای داشت برای یک ماه انجام شد. همچنین مدل نفوذ شوری نیز با استفاده از مقادیر غلظت شوری اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۱۴ و غلظت شبیه‌سازی شده در منطقه فاو انجام شد. به علاوه نتایج مدل ماندگار شوری خاک توسط آب آبیاری به منظور اعتبارسنجی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیقات میدانی پیشین، مورد آزمون قرار گرفت.



شکل ۴. تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در منطقه فاو

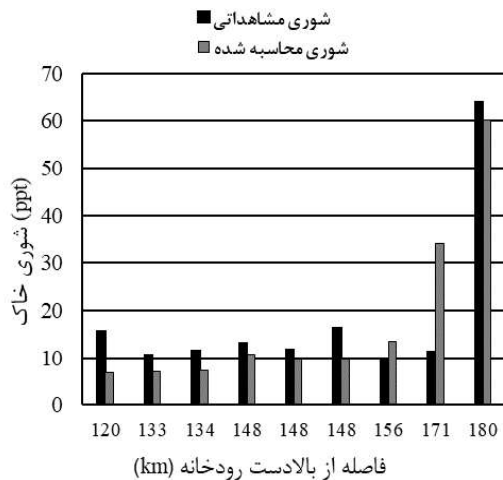
(منطقه فاو) مشخص کرد که غلظت شوری با RMSE ۳/۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب (ppt) و با مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) ۰/۸۵ برای متوسط شوری ماهانه، تطبیق داشت.

همچنین نتیجه‌ی اعتبارسنجی ضریب پراکندگی، بر پایه مقدار اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۱۴ و غلظت شبیه‌سازی شده در ۱۰ کیلومتری از پایین‌دست رودخانه



شکل ۵. تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در ۱۵۰ کیلومتری از بالادست

های سنگین عمق بیشتری از خاک آبهویی می‌شود و باعث نزدیک شدن شوری محلول خاک به شوری آب آبیاری است. که نتایج صحت سنجی عکس این موضوع را نشان می‌دهند و گواهی برا کم بودن کسر آبهویی در نخیلات حاشیه رودخانه است. سپس در هر ۱۰ کیلومتر طول رودخانه متوسط شوری آب با توجه به پروفیل طولی شوری خاک استخراج و با توجه به رابطه تجربی (۱۱) شوری عصاره اشباع خاک در آن منطقه محاسبه شد.

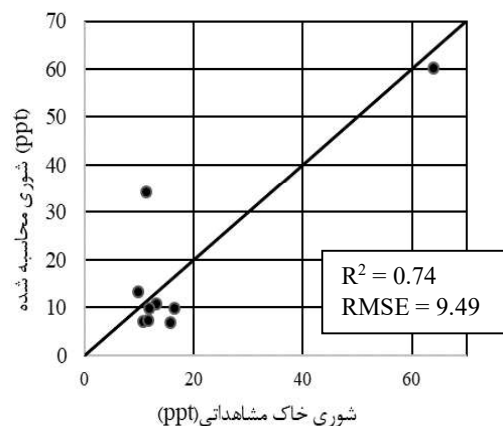


شکل ۶. مقایسه شوری خاک محاسبه شده و اندازه‌گیری شده

خلیج فارس بر اثر جزرومد در نزدیکی مصب رودخانه عیان است که تا حدود ۶۰ کیلومتری از پایین‌دست رودخانه یعنی در سمت کشور ایران تا نزدیکی مرکز شهر آبادان و در کشور عراق تا نزدیکی منطقه‌ای به نام السبیه<sup>۱۷</sup> اثرگذار

### نتایج صحت سنجی شوری خاک توسط آب آبیاری

باتوجه به نتایج صحت سنجی در شکل شماره (۶) بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده مطالعات صحرایی و پژوهش‌های پیشین متوسط شوری عصاره اشباع خاک، در نخیلات تحت آبیاری در دو طرف رودخانه ارونند عملکرد کسر آبهویی کم قابل تأیید است. تفاوت‌ها در پیش‌بینی به علت فرض شرایط ماندگار و ایده‌آل است که عموماً در عمل این شروط کمتر حاکم هستند (Qureshi and Al-Falahi, 2015). همچنین در جزء آبهویی بالا و آبیاری

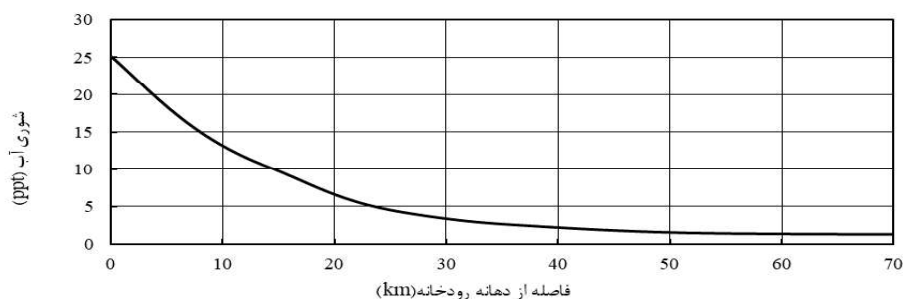


### نتایج مدل‌سازی نفوذ شوری آب دریا به رودخانه

توزیع طولی متوسط شوری آب در ارون‌دود در شرایط متوسط دبی ماهانه بر اساس داده‌های دبی ماهانه ۹ سال در شکل (۷) قابل مشاهده است، اثرات برگشت آب‌شور

ورودی رودخانه نزدیک‌تر می‌شود و از اثر نفوذ جبهه‌ی آب‌شور به علت مخلوط شدن آب‌شور و شیرین رودخانه کاسته می‌شود.

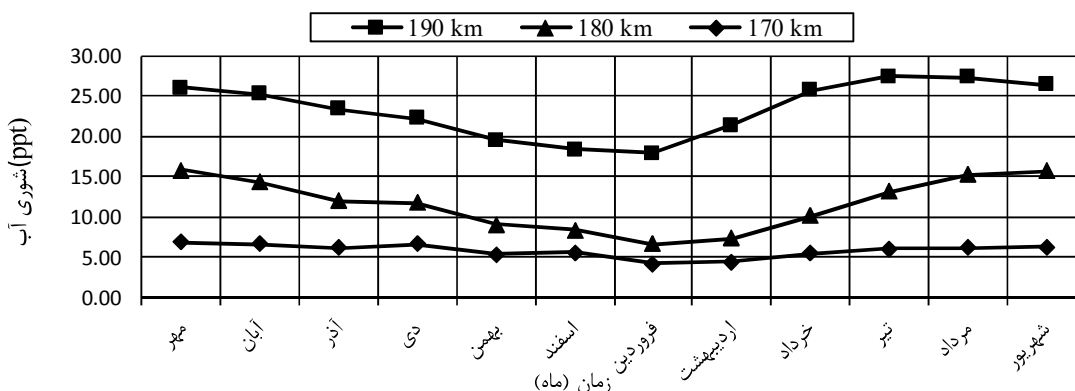
است که در حدود ۳۰ درصد از طول رودخانه متأثر از آب شوری خلیج فارس می‌شود. هرچه از محل ریزش رودخانه به خلیج فارس فاصله گرفته شود، کیفیت آب به کیفیت آب



شکل ۷. میزان نفوذ شوری در طول رودخانه اروند

خلیج فارس به اروندرود بیشتر می‌شود و غلظت شوری در رودخانه بالا می‌رود. ر در کیلومتر ۱۸۰ که در نزدیکی منطقه فاو قرار دارد و در کیلومتر ۱۷۰ از بالادست رودخانه در محدوده‌ی منطقه‌ی اروندرود دامنه‌ی تغییرات شوری به علت کم شدن اثر نفوذ جبهه‌ی شوری به تدریج کاهش می‌یابد. به همین علت است که تغییرات جریان ورودی به رودخانه‌ی مرزی اروندرود بیشترین اثر را در مناطق پایین‌دست رودخانه می‌گذارد.

در شکل (۸) در سه کیلومتر متفاوت یعنی ۱۸۰، ۱۹۰ و ۱۷۰ کیلومتر از بالادست رودخانه وضعیت شوری در شرایط متوسط جریان رودخانه نمایش داده شده است. در ۱۹۰ کیلومتری از بالادست رودخانه یعنی نزدیک خلیج فارس اثرگذاری بالای جبهه‌ی شوری بر مصب رودخانه بسیار محسوس‌تر است و به وضوح دیده می‌شود. علت تغییرات شوری در ماه‌های مختلف سال تغییرات جریان ورودی رودخانه از بالادست است، در ماه‌های خشک سال دبی ورودی کاهش یافته و نفوذ آب‌شور



شکل ۸. وضعیت غلظت شوری ماهانه در سه کیلومتر متفاوت در طول رودخانه

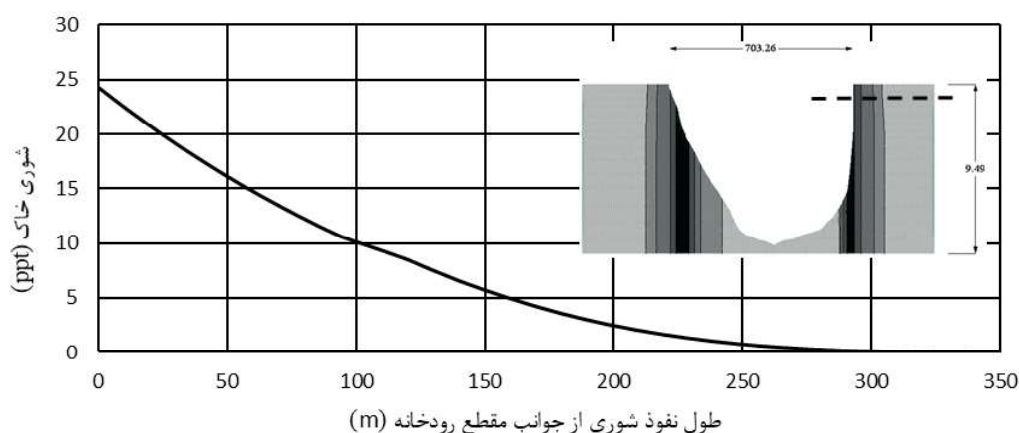
منطقه‌ی مورد مطالعه علاوه بر کاهش کیفیت آب، کاهش کیفیت خاک اراضی بر اثر انباشت نمک در خاک می‌باشد که مطلوبیت اراضی را برای کشاورزی از بین خواهد برد و

نتایج مدل‌سازی نفوذ مستقیم آب‌شور از جداره‌های رودخانه

همان‌طور که ذکر شد از مهم‌ترین مسائل پیش روی

رودخانه در شرایط متوسط، با استفاده از داده‌های تراز سطح آب و سری زمانی شوری آب اروندرود نفوذ مستقیم شوری از جداره رودخانه ارزیابی شد. نتایج نفوذ آب شور از جداره‌های مقاطع رودخانه نشان داد حرکت آب شور در خاک اطراف رودخانه، مناطق پایین‌دست در نزدیکی خلیج فارس را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و در ۱۸۸ کیلومتری از بالادست رودخانه تا حدود ۲۴۰ متری از دو طرف رودخانه آب شور نفوذ می‌کند و خاک را با غلظتی بیشتر از حد شروع آسیب به نخل شور می‌کند. واضح است که خاک نزدیک به رودخانه شورتر است و هرچه در جهت عمود بر رودخانه فاصله گرفته شود شوری خاک کاهش می‌یابد. برای مثال شکل (۹) در کیلومتر ۱۸۸ از بالادست رودخانه میزان شوری خاک بر اثر نفوذ مستقیم آب از جداره، در یک طرف رودخانه را بیان می‌کند که شوری خاک مجاور آب رودخانه به ۲۴/۲ ppt می‌رسد و با دور شدن از مقطع رودخانه کاهش می‌یابد.

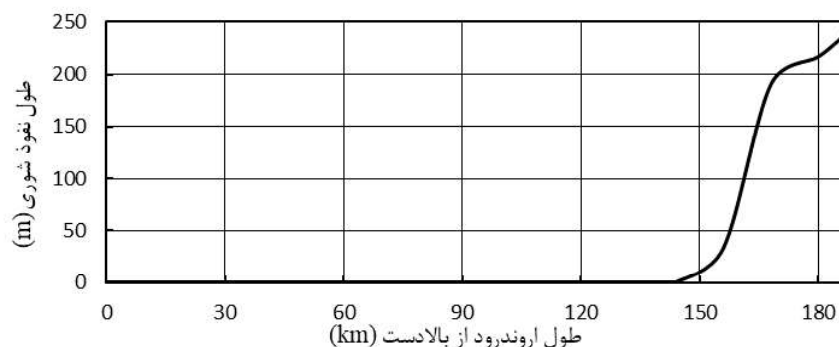
این معضل تبعات زیست‌محیطی، اقتصادی و سیاسی برای منطقه خواهد داشت. خرما یکی از محصولات استراتژیک و پراهمیت کشور است که ایران در تولید آن رتبه دوم را به خود اختصاص داده است. اگرچه نخل خرما به عنوان گیاهی مقاوم به شوری شناخته می‌شود و عموماً انواع مختلف آن نیز در مقابل شرایط نامساعد آب و خاک تحمل بالایی دارند، اما سبز بودن درخت به معنای سالم بودن و عدم کاهش عملکرد آن نیست. بر اساس گزارش سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO) خاک با شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر (۲/۵ ppt) را مرز شروع اثرات کاهش عملکرد بر رشد و باروری نخل خرما بیان کرده است (Rhoades et al., 1992). اما حداکثر تحمل این گیاه در مطالعات دیگر بر اساس نوع رقم بررسی شده است (Sperling et al., 2014). همچنین ۸۵ درصد از ریشه‌های نخل در عمق دو متری از سطح خاک قرار می‌گیرند (Munier, 1973). حال پس از شبیه‌سازی کیفیت آب



شکل ۹. طول نفوذ شوری از یک طرف مقطع رودخانه در کیلومتر ۱۸۸ از بالادست اروندرود

شوری حداکثر تا کیلومتر ۱۴۴ از بالادست یعنی در محدوده جنوب شهر آبادان از جداره‌های رودخانه را در پی دارد و پس از آن شوری خاک اطراف اراضی بر اثر نفوذ مستقیم کمتر از حد آسیب به نخل است.

این شبیه‌سازی برای دو طرف مقاطع متفاوت در طول اروندرود یعنی در کشور ایران و عراق انجام شد. دو فاکتور اساسی که بر این طول نفوذ اثرگذار است ارتفاع آب در مقطع و غلظت شوری آب در آن مقطع است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نتایج نشان می‌دهد، حرکت جبهه‌ی آب شور خلیج فارس به سمت بالادست رودخانه، نفوذ مستقیم



شکل ۱۰. عرض باند شوری نفوذ مستقیم آب شور در خاک دو طرف رودخانه

که پیشین به آن اشاره شد، شوری خاک بر اساس شوری آب رودخانه اروند برای استفاده آبیاری در شکل شماره (۱۲) تخمین زده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود شوری متوسط عصاره اشباع خاک در نزدیکی خلیج فارس در شرایط متوسط جریان اروندرود تا ۱۳۶ ppt افزایش یافته و عموماً غیرقابل استفاده و اراضی رها شده می‌باشند.

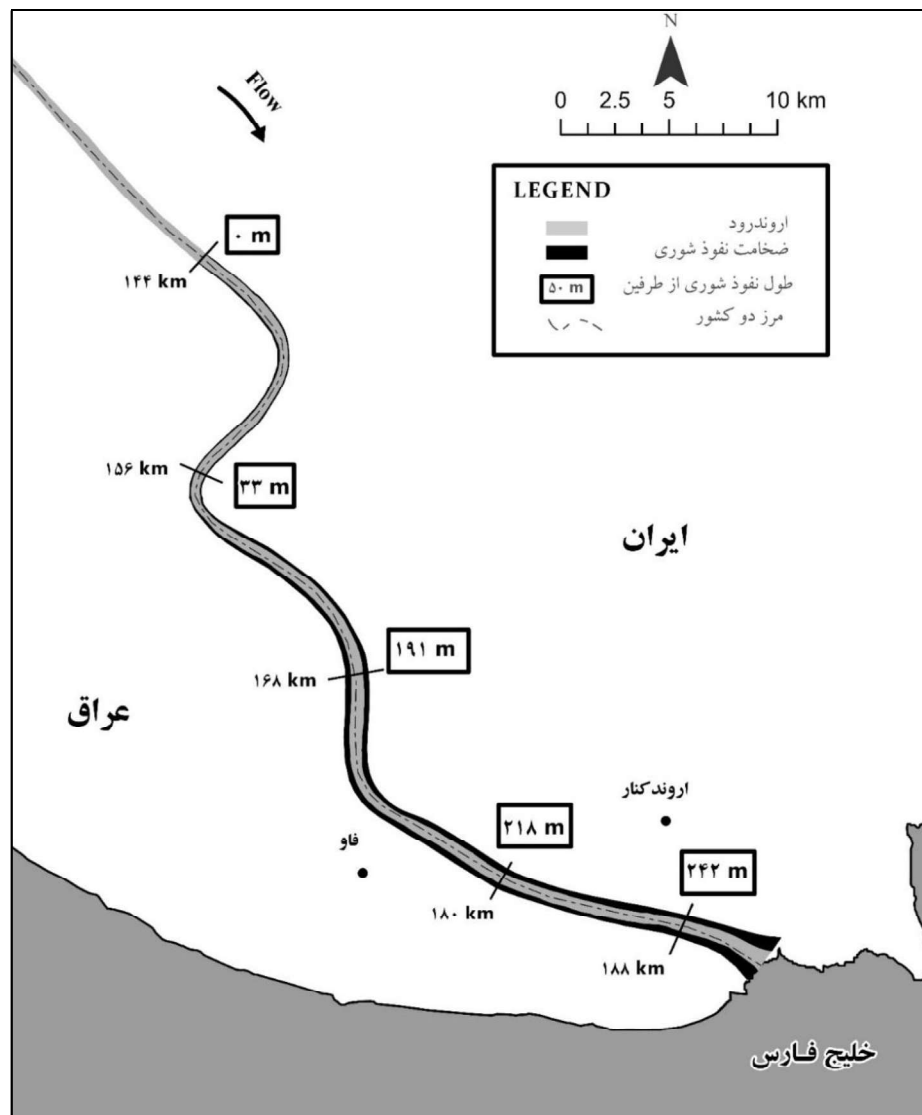
در شکل شماره (۱۳) شور شدن خاک توسط آب آبیاری با تقسیم‌بندی ۱۰ کیلومتری در طول رودخانه قابل ملاحظه است. نتایج مدل ماندگار شوری خاک، برای استفاده بلندمدت از آب آبیاری با کیفیتی در شرایط متوسط جریان، متوسط شوری خاک تا ۱۰ کیلومتر بالاتر از محل ریزش رودخانه به دریا یعنی در کشور عراق جنوب منطقه فاو و در ایران در نزدیکی منطقه‌ای به نام الکصبه<sup>۱۸</sup> را ۹۷/۳ ppt تخمین می‌زند و با افزایش کیفیت آب این شوری در طول رودخانه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل مشخص است، در حدود ۱۰۷ کیلومتری از بالادست اروندرود کیفیت آب رودخانه کارون نیز بر خاک آن محدوده اثرگذار است و اثر جبهه‌ی آب‌شور بر خاک تا حدود ۷۰ کیلومتری از پایین‌دست در رودخانه از بین می‌رود. در صورت نبود شرایط آبشویی و زهکشی اصلاح شده خاک اراضی منطقه به‌طور کلی از حیز انتفاع خارج می‌شود و برای هرگونه نخل که محصول استراتژیک منطقه است نامناسب می‌شود و آسیب مستقیم به کشاورزان منطقه وارد می‌شود.

عرض باند شوری در دو طرف رودخانه یعنی در کشور ایران و عراق بر اثر نفوذ مستقیم آب‌شور از جداره‌ها در شکل (۱۱) ارائه شده است، همان‌طور که مشخص است حداکثر عرض این باند در مناطق پایین‌دست رودخانه رخ داده است که علت اصلی آن غلظت بیشتر آب‌شور در مقاطع است. اثر نفوذ شوری به صورت مستقیم با توجه به تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی بر گیاه نخل قابل مشاهده است و قابل ذکر است این باند شوری به نسبت عرض رودخانه، عموماً قابل صرف‌نظر است و درصد کمی از شوری خاک را حادث می‌شود و حتی در بعضی مواقع در حریم رودخانه قرار خواهد گرفت، اما اثرات آن بر نخیلات حاشیه رودخانه قابل چشم‌پوشی نیست و این گیاه جای خود را به گیاهانی مقاوم‌تر داده است.

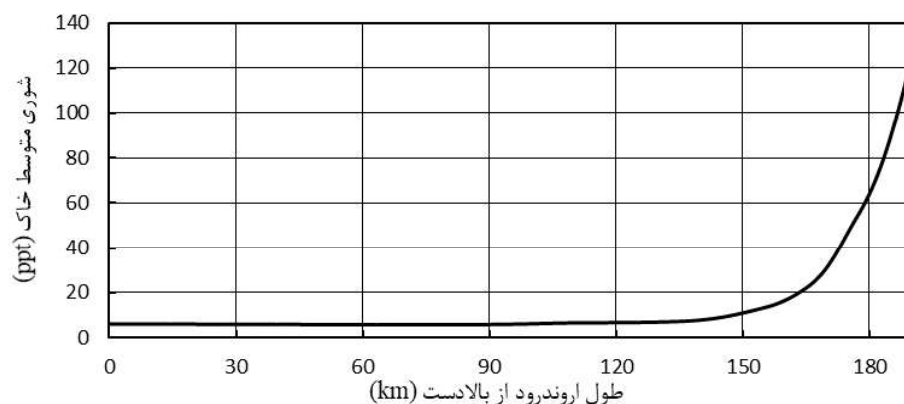
### نتایج مدل‌سازی شوری خاک توسط آبیاری از آب رودخانه

همان‌طور که ذکر شد کیفیت آب آبیاری بر شور شدن خاک مؤثر است. افزایش میزان نمک در آب آبیاری باعث تجمع نمک در خاک می‌شود با توجه به این که تنها منبع اصلی تأمین آب اراضی حاشیه اروندرود خود رودخانه می‌باشد، کاهش کیفیت آب در طول رودخانه به‌مرور کاهش کیفیت خاک را به دنبال خواهد داشت. شوری عصاره اشباع خاک تابعی از دو فاکتور مهم شوری آب آبیاری و ضریب آبشویی می‌باشد. با توجه به ضریب آبشویی

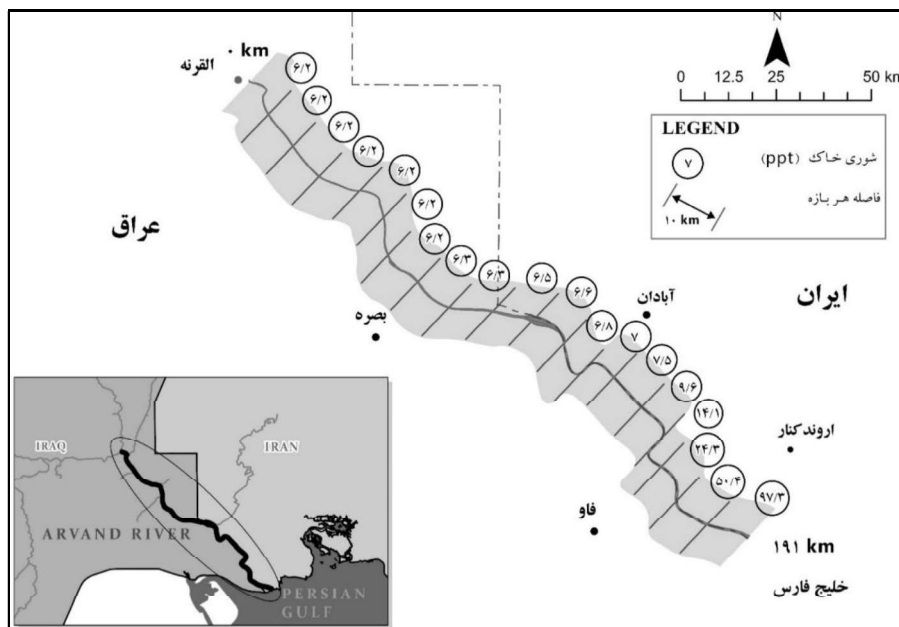




شکل ۱۱. نفوذ مستقیم شوری خاک از جداره‌های رودخانه اروند



شکل ۱۲. شوری خاک اراضی محدوده‌ی اروند توسط آبیاری بر اثر استفاده از آب رودخانه



شکل ۱۳. شوری خاک حاشیه اروندرود در صورت استفاده از آب رودخانه به منظور آبیاری

### بحث و نتیجه گیری

اثرات کاهش کیفیت آب رودخانه به معنای افزایش غلظت نمک‌های محلول در آن یا به اصطلاح شوری آب به شکل‌های مختلف مانند نفوذ شوری از دریا به رودخانه در شرایط جزرومدی می‌تواند افزایش نمک را در محلول خاک نیز به دنبال داشته باشد که مانع اصلی توسعه مزارع، از بین رفتن و یا کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می‌باشد. در منطقه‌ی مورد مطالعه، یعنی رودخانه‌ی اروند و اراضی مجاور آن به علت استفاده از آب باکیفیت کم در نتیجه‌ی جزرومد و تغییرات جریان ورودی رودخانه، دو مشکل کاهش کیفیت آب و خاک قابل توجه شده است و معیشت در حاشیه‌ی این رودخانه را تحت تأثیر قرار داده است.

هدف از این پژوهش بررسی کیفیت آب رودخانه اروند در شرایط متوسط و اثر آن بر خاک اطراف رودخانه است. شبیه‌سازی کیفیت و شوری آب رودخانه با به کارگیری مدل عددی نفوذ آب شور و هیدرودینامیک در یک بعد انجام شد. عملکرد قابل قبول مدل با صحت سنجی آن با داده‌های تراز سطح آب و غلظت شوری اندازه گیری شده

تأیید شد. پس از آن نتایج مدل به منظور تجزیه و تحلیل اثر شوری آب بر خاک به دو صورت نفوذ مستقیم از جداره‌های رودخانه و شوری توسط استفاده از آب رودخانه به عنوان آب آبیاری استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی مدل کیفیت آب در طول رودخانه حاکی از آن بود که در شرایط متوسط جریان رودخانه جبهه آب شور تا حدود ۶۰ کیلومتری از محل ریزش اروندرود به خلیج فارس به سمت بالادست در نزدیکی شهر آبادان در ایران و در کشور عراق تا نزدیکی منطقه‌ای به نام السیبه یعنی در حدود ۳۰ درصد از کل رودخانه از نفوذ شوری تحت تأثیر قرار می‌گیرد و پروفیل طولی غلظت شوری را دستخوش تغییر می‌کند.

نتایج مدل‌سازی نفوذ آب شور از جداره‌های رودخانه که وابسته به میزان غلظت شوری آب در مقاطع و تغییرات سطح آب رودخانه است، نشان داد در ۱۸۸ کیلومتری از محل تشکیل اروندرود در القرنه یعنی در نزدیکی خلیج فارس خاک مجاور رودخانه حداکثر تا ۲۴۲ متر از دو طرف رودخانه تا حد شروع آسیب به نخل شور می‌شود و به سمت بالادست با افزایش کیفیت آب، از عرض این باند نفوذ شوری در دو طرف کاسته می‌شود. طول این نفوذ در

املاح و عناصر به اعماق خاک رفته و از دسترس ریشه تا حدی خارج می‌شوند و در شرایطی که زمین بایر رها شود بر اثر حرکت مویینگی شاهد تجمع املاح در لایه‌های خاک می‌شویم و خاک منطقه به‌طور کلی از حیز انتفاع خارج می‌شود. به‌علاوه تأثیر تحولات بالادستی باگذشت زمان افزایش می‌یابد و پیشرفت روز افزون، کشورها را به سمت مصرف بیشتر آب سوق می‌دهد که این مورد باعث کاهش حجم آورد آب اروندرود می‌شود و عامل اصلی تهدیدات شوری آب‌و خاک است. این امر بهره‌وری اکوسیستم مصب رودخانه، مزارع بزرگ نخل خرما واقع در امتداد سواحل آن را تهدید می‌کند و تبعات اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در پی خواهد داشت. با توجه به نتایج مطالعه و مشاهدات می‌توان گفت آب رودخانه اروند با کاهش چشمگیر کیفیت و خاک دو طرف رودخانه با تهدید شوری ثانویه روبه‌رو بوده که نیازمند مدیریت‌های لازم جهت بهبود شرایط موجود و جلوگیری از آسیب‌های غیرقابل جبران در منطقه می‌باشد.

#### یادداشت‌ها

1. Geopolitics
2. Ilisu Dam
3. Admiralty tide table
4. Advection
5. Diffusion
6. Turbulant diffusion
7. Darcy's equation
8. Effective saturation
9. Advective also called Convective
10. Hydrodynamic Dispersive
11. Dispersivity
12. Implicit
13. Finite Difference
14. Danish Hydraulic Institute(DHI)
15. Shatt-al-Arab Outbar
16. Field
17. Al-Seeba
18. Al-Gasaba

۱۴۴ کیلومتری اروندرود از بالادست در جنوب شهر آبادان به صفر می‌رسد، به این معنا که شوری خاک از حد آسیب به نخل کمتر است. مسئله شوری ثانویه در خاک و افزایش املاح در پروفیل خاک در نتیجه استفاده از آب‌های باکیفیت پایین و به‌اصطلاح شور رخ می‌دهد. پس از صحت سنجی مدل ماندگار شوری خاک توسط داده‌های اندازه‌گیری شده در اراضی تحت آبیاری، پیش‌بینی شوری خاک اراضی حاشیه اروندرود با تقسیم‌بندی ۱۰ کیلومتری برای استفاده بلندمدت از آب رودخانه نشان داد شوری متوسط خاک در اراضی دو طرف رودخانه در پایین‌دست اروندرود به ۹۷/۳ ppt می‌رسد که در کشور ایران در محدوده‌ای به نام الگصبه و در عراق جنوب منطقه فاو می‌باشد. با افزایش کیفیت آب به سمت بالادست از میزان شوری متوسط خاک کاهش یافته، با توجه به نتایج اثر رودخانه کارون در ۱۰۷ کیلومتری اروندرود مشخص است و در نهایت تأثیر جبهه‌ی آب‌شور خلیج فارس بر متوسط شوری خاک منطقه تا محدوده شهر آبادان در کشور ایران از بین می‌رود.

به‌منظور پیشگیری و کنترل شوری نیاز به آبشویی بیشتری در منطقه ریشه وجود دارد که به علت بافت سنگین خاک منطقه مورد مطالعه بالا بردن راندمان زهکشی اثر مهمی در رفع این مشکل دارد. مدل‌سازی نفوذ مستقیم آب و املاح از جداره‌های رودخانه حاکی از آن بود که شوری خاک در اثر نفوذ مستقیم یا شوری اولیه که اثرات آن در اطراف رودخانه به‌واسطه خشکی نخل‌ها مشهود است، اما با این وجود نسبت به شوری خاک توسط آبیاری از آب رودخانه درصد کمی را به خود اختصاص می‌دهد و عمده کاهش کیفیت خاک به‌واسطه آب استفاده شده به‌منظور آبیاری است. همچنین بایستی توجه داشت که در این مطالعه شرایط شوری خاک با این فرض بیان شده است که خاک منطقه آبیاری شود هرچند با جزء آبشویی کم،

#### فهرست منابع

Abbas, A. H. A. K. (2017) 'Application of a Hydrodynamic HEC-RAS Model For Shatt Al-Arab River'.

- Abbas, A. H. (2010). *Characterization and classification of soil units of North Kut Project and prediction of some soil physical properties by using GIS and Remote Sensing* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, College of Agriculture, University of Baghdad, Iraq).
- Abdullah, A. D. *et al.* (2016) 'Predicting the salt water intrusion in the Shatt al-Arab estuary using an analytical approach', *Hydrology and Earth System Sciences*. doi: 10.5194/hess-20-4031-2016.
- Abdullah, A. D. *et al.* (2017) 'Analysis of possible actions to manage the longitudinal changes of water salinity in a tidal river', *Water resources management*, 31(7), pp. 2157–2171.
- Akramkhanov, A. *et al.* (2011) 'Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain', *Geoderma*, 163(1–2), pp. 55–62.
- Al-Asadi, Safaa A. R. (2017) 'The Future of Freshwater in Shatt Al- Arab River (Southern Iraq)', *Journal of Geography and Geology*, 9(2), p. 24. doi: 10.5539/jgg.v9n2p24.
- Al-Asadi, Safaa A R (2017) 'The future of freshwater in Shatt Al-Arab River (Southern Iraq)', *J Geogr Geolo*, 9(2), pp. 24–38.
- Al-Mahmood, H. *et al.* (2015) 'Impact of low discharge and drought on the water quality of the Shatt al-Arab and Shatt al-Basra rivers (south of iraq)', *Journal of international academic research for multidisciplinary*, 3(1), pp. 285–296.
- Al-Muhyi, A. H. (2015) 'The challenges facing Shatt Al Arab River in present and future', in *Presented at: 7th National Conference of the Environment and Natural Resources*.
- Al-Taei, S. A., Alfartusi, A. J., & Abdulhussein, I. A. (2019). Determination of Hydrodynamic Resistance Coefficient (Manning's Coefficient) in Shatt Al Arab River, Southern of Iraq-Basrah. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 23(03).
- Alihoury, M. *et al.* (2015) 'Effect of deficit irrigation and water salinity on soil salinity distribution and date plants vegetative growth', *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 4(3), pp. 1–13.
- Aragüés, R. *et al.* (2011) 'Soil salinity related to physical soil characteristics and irrigation management in four Mediterranean irrigation districts', *Agricultural Water Management*, 98(6), pp. 959–966.
- Ayers, R. S. and Westcot, D. W. (1985) *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- AYOUBI, S. H. A., MOHAMMAD, Z. S. and Khormali, F. (2007) 'Prediction total N by organic matter content using some geostatistic approaches in part of farm land of Sorkhankalateh, Golestan Province'.
- Chapra, S. C. (2008) *Surface water-quality modeling*. Waveland press.
- Corwin, D. L. and Grattan, S. R. (2018) 'Are existing irrigation salinity leaching requirement guidelines overly conservative or obsolete?', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(8), p. 2518001.
- Cote, C. M., Bristow, K. L., & Ross, P. J. (2000). Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of flow interruption with drainage of the "preferential flow paths". *Journal of Contaminant Hydrology*, 43(3–4), 191–209.
- DHI (2016) 'Mike 11 - User Guide'. Danish Hydraulic Institute, p. 512.
- Eilers, R. G., Eilers, W. D. and Fitzgerald, M. M. (1997) 'A salinity risk index for soils of the Canadian Prairies', *Hydrogeology Journal*, 5(1), pp. 68–79.
- Fall, A. C. A. L. (2017) 'Sustainable management of coastal saline soils in the Saloum river Basin, Senegal', *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(4), p. 1903. doi: 10.4314/ijbcs.v11i4.39.
- Feddes, R. A. (1982) *Simulation of field water use and crop yield*. Pudoc.

- Fischer, H. B. (1976) 'Mixing and dispersion in estuaries', *Annual review of fluid mechanics*, 8(1), pp. 107–133.
- Fujioka, R. S. (2001) 'Monitoring coastal marine waters for spore-forming bacteria of faecal and soil origin to determine point from non-point source pollution', *Water Science and Technology*, 44(7), p. 181.
- Van Genuchten, M. T. (1980) 'A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils', *Soil science society of America journal*, 44(5), pp. 892–898.
- Gisen, J. I. A., Savenije, H. H. G. and Nijzink, R. C. (2015) 'Revised predictive equations for salt intrusion modelling in estuaries', *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), pp. 2791–2803. doi: 10.5194/hess-19-2791-2015.
- Hamdan, A. N. (2015) 'Variation Effect of Discharge on Total Dissolved Solid in Shatt Al Arab River', in *2015 the 2nd International Conference of Buildings, Construction and Environmental Engineering (BCEE2-2015)*.
- Hameed, A. H. and Aljorany, Y. S. (2011) 'Investigation on nutrient behavior along Shatt Al-Arab River, Basrah, Iraq', *J. Appl. Sci. Res*, 7(8), pp. 1340–1345.
- Hughes, M. G., Harris, P. T. and Hubble, T. C. T. (1998) 'Dynamics of the turbidity maximum zone in a micro-tidal estuary: Hawkesbury River, Australia', *Sedimentology*, 45(2), pp. 397–410.
- Ibrahim, H. D., Xue, P. and Eltahir, E. A. B. (2020) 'Multiple Salinity Equilibria and Resilience of Persian/Arabian Gulf Basin Salinity to Brine Discharge', *Frontiers in Marine Science*, p. 573. doi: 10.3389/fmars.2020.00573.
- Kanda, E. K., Kosgei, J. R. and Kipkorir, E. C. (2015) 'Simulation of organic carbon loading using MIKE 11 model: a case of River Nzoia, Kenya', *Water Practice and Technology*, 10(2), pp. 298–304.
- Lafta, A. A. (2022) 'Numerical assessment of Karun river influence on salinity intrusion in the Shatt Al-Arab river estuary, northwest of Arabian Gulf', *Applied Water Science*, 12(6), pp. 1–11.
- Lemckert, C. J., Campbell, P. G. and Jenkins, G. A. (2011) 'Turbulence in the bottom boundary layer of Moreton Bay, Queensland, Australia', *Journal of Coastal Research*, (SPEC. ISSUE 64), pp. 1091–1094.
- Llamosas, C. and Sovacool, B. K. (2021) 'The future of hydropower? A systematic review of the drivers, benefits and governance dynamics of transboundary dams', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, p. 110495.
- Liu, Y. et al. (2021) 'Simulating water and salt transport in subsurface pipe drainage systems with HYDRUS-2D', *Journal of Hydrology*, 592, p. 125823.
- Martin, J. L., McCutcheon, S. C. and Schottman, R. W. (2018) *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. CRC press.
- Mualem, Y. (1976) 'A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media', *Water resources research*, 12(3), pp. 513–522.
- M. Mohamed, A.-R. and Abood, A. N. (2017) 'Compositional change in fish assemblage structure in the Shatt Al-Arab River, Iraq', *Asian Journal of Applied Sciences*, 5(5), pp. 944–958.
- Masoud, A. A. and Koike, K. (2006) 'Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt', *Journal of arid environments*, 66(1), pp. 151–167.
- Massakbayeva, A. et al. (2020) 'Water balance of the Small Aral Sea', *Environmental Earth Sciences*, 79(3). doi: 10.1007/s12665-019-8739-5.
- Mohamed, A.-R. M. and Hameed, E. K. (2019) 'Impacts of saltwater intrusion on the fish assemblage in the middle part of Shatt Al-Arab River, Iraq', *Asian Journal of Applied Sciences*, 7(5).
- Munier, P. (1973) 'Le palmier-dattier'.

- Nguyen, Y. T. B. et al. (2017) 'Salinity intrusion and rice production in Red River Delta under changing climate conditions', *Paddy and Water Environment*, 15(1), pp. 37–48.
- Nur, A. et al. (2021) 'Hydrodynamic Analysis at The Confluence of The Mahakam River and The Karang Mumus Tributary'.
- Ni, D. and Wang, Y. (2007) 'Sharing a polluted river', *Games and Economic Behavior*, 60(1), pp. 176–186.
- Pazira, A. (2012) 'Conservation of physical resources for agriculture production, soil and water', *National Committee of Irrigation and Drainage, Mashhad, Iran*.
- Pishnamaz Ahmadi, M., & Rezaie Mmoghadam, M., & Ffeizizadwh, B. (2017). Study Indexes and Mapping of Soil Salinity Using Remote Sensing Data (CASE STUDY: AJI CHAY RIVER DELTA). *Journal of RS and GIS for Ntural Resources Sience*, 8(1 (26)), 85-96 (in persion).
- Qureshi, A. S. and Al-Falahi, A. A. (2015) 'Extent, characterization and causes of soil salinity in central and southern Iraq and possible reclamation strategies', *Int. J. Engin. Res. Appl*, 5(1), pp. 84–94.
- Rajabzadeh, F. et al. (2009) 'Leaching saline and sodic soils along with reclamation-rotation program in the mid-part of Khuzestan, Iran.', *Journal of applied sciences*, 9(22), pp. 4020–4025.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A. and Mashali, A. M. (1992) 'The use of saline waters for crop production-FAO irrigation and drainage paper 48', *FAO, Rome*, 133.
- Rodrigues, M., Fortunato, A. B. and Freire, P. (2019) 'Saltwater intrusion in the upper Tagus Estuary during droughts', *Geosciences*, 9(9), p. 400.
- Saleh, S. M., Sultan, S. M. and Dheyab, A. H. (2019) 'Study of Morphological, Physical and Chemical Characteristics of Salt Affected Soils Using Remote Sensing Technologies at Basrah Province', *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 32, pp. 105–125.
- Savenije, H. H. G. (2005) *Salinity and tides in alluvial estuaries*. Gulf Professional Publishing.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M. T. and Šejna, M. (2016) 'Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages', *Vadose Zone Journal*, 15(7), pp. vzj2016-04.
- Somlyódy, L. et al. (1998) 'River water quality modelling: III. Future of the art', *Water Science and Technology*, 38(11), pp. 253–260.
- Sperling, O. et al. (2014) 'Effects of high salinity irrigation on growth, gas-exchange, and photoprotection in date palms (Phoenix dactylifera L., cv. Medjool)', *Environmental and Experimental Botany*, 99, pp. 100–109.
- Taylor, G. I. (1954) 'The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe', *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 223(1155), pp. 446–468.
- Tully, K. L. et al. (2019) 'Soils in transition: saltwater intrusion alters soil chemistry in agricultural fields', *Biogeochemistry*, 142(3), pp. 339–356.
- UNEP, H. (2001) 'The Mesopotamian Marshlands: demise of an ecosystem', *Division of Early Warning and Assessment, United Nations Environment Program (UNEP) Nairobi, Kenya*, 46.
- Vanderborght, J. and Vereecken, H. (2007) 'Review of dispersivities for transport modeling in soils', *Vadose Zone Journal*, 6(1), pp. 29–52.
- Visconti, F. et al. (2012) 'Comparison of four steady-state models of increasing complexity for assessing the leaching requirement in agricultural salt-threatened soils', *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(1), pp. 222–237.
- Vu, D. T., Yamada, T. and Ishidaira, H. (2018) 'Assessing the impact of sea level rise due to climate change on seawater intrusion in Mekong Delta, Vietnam', *Water Science and Technology*, 77(6), pp. 1632–1639.

Weissman, D. S. and Tully, K. L. (2020) 'Saltwater intrusion affects nutrient concentrations in soil porewater and surface waters of coastal habitats', *Ecosphere*, 11(2), p. e03041.

Yu, Y., Zhang, H. and Lemckert, C. (2014) 'Salinity and turbidity distributions in the Brisbane River estuary, Australia', *Journal of hydrology*, 519, pp. 3338–3352.

Yuan, L. *et al.* (2011) 'A coupled model for simulating surface water and groundwater interactions in coastal wetlands', *Hydrological Processes*, 25(23), pp. 3533–3546.

Zaki, Y. and Najafi, S. (2020) 'Determining Iran hydropolitics strategies in Arvandrood basin', *Human Geography Research*, 52(4), pp. 1529–1549.

Zehtabian, G., & Sadri, M., & Souri, M. (2006). The Study of Irrigation on Soil Salinity (CASE STUDY: YAZD-ARDAKAN PLAIN). *Desert (Biaban)*, 11(1), 197-210 (in persian).