



## The Effect of Stagnant Zone Behavior in One-Dimensional Hydrodynamic Models and Solute Transport in Rivers

A. Montazeri<sup>1</sup>, S. Khodambashi Emami<sup>2</sup>, M. Mazaheri<sup>3\*</sup>

Received: 11-07-2022

Revised: 03-11-2022

Accepted: 07-12-2022

Available Online: 22-02-2023

### How to cite this article:

Montazeri, A., Khodambashi Emami, S., & Mazaheri, M. (2023). The Effect of Stagnant Zone Behavior in One-Dimensional Hydrodynamic Models and Solute Transport in Rivers. *Journal of Water and Soil* 36(6): 661-675. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.77613.1181](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77613.1181)

### Introduction

Showing the rivers as a one-dimensional problem has simplified or eliminated many processes affecting salinity transfer in the river. Storage processes are one of the factors affecting water quality in rivers. Generally, as a substantial factor, the limitation of observational data confines the use of two-dimensional and three-dimensional models, leading to the use of more widely employed one-dimensional models. Most existing computer models are developed based on the Advection-Dispersion Equation (ADE) and do not consider the storage zone. For this purpose, Modified Advection-Dispersion Equation (MADE) is proposed to consider the stagnant area by defining effective velocity and dispersion coefficient. In this study, a solution has been proposed to apply the effect of the Stagnant zone in water quality simulation in one-dimensional models. The river simulation is closer to the natural conditions. In this model, to prove the improvement of the proposed method, the average stagnant zone fraction expressed as the fraction of the average cross-sectional area of the river ( $\eta$ ) and employed in a one-dimensional model through the definition of the effective velocity and the dispersion coefficient. This model is considered representative of the one-dimensional models developed only by the Advection /Dispersion relation, and the proposed method was investigated for the Arvand River. Observational data along the river were used to calibrate and validate the model.

### Materials and Methods

Since the available and well-known one-dimensional computer programs are generally developed based on the 1D Advection-Dispersion model, they do not consider factors affecting salinity transport such as topography and river morphology heterogeneities known as storage areas. In such a way, these processes are not expressed by presenting the problem as a one-dimensional equation. In this research, in order to increase the accuracy of the simulation with well-known and available one-dimensional models a corrective solution is proposed. To compare the proposed modified method and the base ADE, at the first, the tidal and transboundary arvand river is modeled as a study area, which is a well-mixed river. The river's upstream and downstream boundary conditions were defined according to the available data in 2014. Manning's roughness parameters ranged from 0.017 to 0.033, and the dispersion coefficient was 285 m<sup>3</sup>/s according to previous studies. In order to apply the effect of stagnant areas in the modified equations, it is essential to determine the value of  $\eta$  for the river. This study uses three parameters of dispersion factor (a), dispersion exponent (b), and  $\eta$  by ant colony algorithm with the definition of 5 initial ants and 100 repetitions in Sehan station in the study area, Arvand river was optimized. The values of the estimated parameters are respectively  $\eta = 0.168$ ,  $a = 273.4$ ,  $b = 0.94$ . Therefore, in the modified model, corrections were made using the speed and effective dispersion coefficient as the modified Advection - Dispersion (MADE) method and considering variable dispersion coefficient depending on the flow's speed in the one-dimensional model. These changes were validated in the other two stations (Faw and Dweeb.)

1, 2 and 3- Master's Degree and Associate Professor in Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [m.mazaheri@modares.ac.ir](mailto:m.mazaheri@modares.ac.ir))

## Results and Discussion

Based on this study results, increasing the parameter  $\eta$  caused the peak of the time series to rise and the river's travel time to decrease. The shortening of the water travel time in the river, although increases the dispersion coefficient due to the influence of the stagnant zone, the effect of this parameter on the time series of the simulated concentration is reduced. Like the observational data, the slope of falling and rising limbs is increased. By comparing the one-dimensional model in the two cases of using the effective dispersion coefficient and velocity and without it, the increase in accuracy in the simulation was determined at Sehan station - 123 km from the river formation site - after optimizing the coefficients with three statistical errors parameters. In addition, these changes at two other stations along the river with distances of 180 and 150 km from the river's source confirm this accuracy. For instance, the simulated and measured concentration in 12 months of the year by applying the optimized coefficients reaches the correlation coefficient ( $r$ ) of 0.86 to 0.97 at a distance of 150 km from the upstream, and the root means square error (RMSE) improves 1.27 ppt. The remaining difference in the concentration estimation may be caused by the effect of other parameters or even the entry of agricultural runoff from the lands along the river.

## Conclusion

Accurate estimation and simulation of concentration in river engineering have always been one of the environmental challenges. This research aimed to improve water quality simulation using one-dimensional model in well-mixed rivers. In order to increase the accuracy of the modeling and become closer to the actual conditions, correction factors such as considering the dead zones along the river have been suggested. Analysis showed that, on average, 16% of the surface of the Arvand River's cross-sections are stagnant areas, and the dispersion coefficient depends on the river's speed. These areas include bed dunes and meanderings of the river. The point that attracts attention is the tidal irrigation channels on the sides of the river. The results showed that in Sehan, Dweeb, and Faw stations, the root means square error decreases to 1.78, 1.27, and 0.84, respectively. Therefore, the modified 1D model estimated the concentration (in this study salinity) closer to the measurement data. In Dweeb and Sehan stations, the effect of dead zones such as river meandering is evident. Still, in Faw station, no significant improvement in the impact of stagnant zones was observed due to its proximity to the river mouth. The results of this research can be used for higher accuracy in one-dimensional water quality simulations and bringing the models closer to the natural conditions in rivers.

**Keywords:** Advection-Dispersion equation, Ant colony optimization, Arvand river, Stagnant zone

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۶۷۵-۶۶۱

# بررسی اثر رفتار نواحی ماندابی در مدل‌های یک بعدی هیدرودینامیک و انتقال مواد محلول در رودخانه‌ها

امیرحسین منتظری<sup>۱</sup> - سجاد خدام باشی امامی<sup>۲</sup> - مهدی مظاهری<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

## چکیده

بیان رودخانه به عنوان مسئله یک بعدی باعث شده بسیاری از عوامل دخیل در انتقال آلاینده در رودخانه ساده شوند و یا در نظر گرفته نشوند. در رودخانه‌ها نواحی نگهداشت عاملی اثرگذار در کیفیت آب می‌باشند. عموماً محدودیت داده‌های مشاهداتی که یکی از عوامل محدود کننده استفاده از مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی است باعث استفاده گسترده‌تر از مدل‌های یک‌بعدی شده است. اکثر مدل‌های تجاری موجود بر اساس معادله انتقال-انتشار کلاسیک توسعه یافته‌اند و نواحی نگهداشت را در نظر نمی‌گیرند. به این منظور برای مدل‌سازی تأثیرات نواحی ماندابی از سرعت و ضریب پراکندگی مؤثر به عنوان روشی برای بهبود عملکرد معادله انتقال-انتشار پیشنهاد شده است. سرعت و ضریب پراکندگی مؤثر، از طریق اصلاح سرعت متوسط جریان و ضریب پراکندگی طولی، با نسبت مساحت سطح مقطع ناحیه ماندابی به سطح مقطع عرضی رودخانه تعریف می‌شوند. با جای گذاری این پارامترها در حل معادلات سنت-ونانت و انتقال-انتشار در مدل‌های یک بعدی اعمال و رودخانه ارونند با آن مورد بررسی قرار گرفت. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از MIKE11 به عنوان نماینده‌ای از مدل‌های یک بعدی اعمال و رودخانه ارونند با آن مورد بررسی قرار گرفت. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های مشاهداتی غلظت در طول رودخانه استفاده شد. پارامترهای فاکتور پراکندگی و توان پراکندگی همراه با نسبت مساحت سطح مقطع ناحیه ماندابی به سطح مقطع عرضی رودخانه برای ایستگاه sehan در ۱۲۳ کیلومتری از القرنه، با الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان برآورد شد و برای ایستگاه‌های Faw و Dweeb با داده‌های غلظت مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در ایستگاه Sehan، Dweeb و Faw سه پارامتر خطای ضریب همبستگی، نش-ساتکلیف و جذر میانگین مربعات در مدل اصلاح شده کاهش یافته و به عنوان مثال پارامتر آماری خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب به ۱/۷۸، ۱/۲۷ و ۰/۸۴ کاهش می‌یابد؛ بنابراین اصلاحات حاکی از بهبود نتایج پیش‌بینی طبق مدل مفهومی جدید است.

**واژه‌های کلیدی:** ارونند رود، الگوریتم مورچگان، معادله انتقال-انتشار، ناحیه نگهداشت

## مقدمه

مستلزم درک کامل از کیفیت آب و فرآیندهای مؤثر بر سرنوشت مواد آلاینده در رودخانه است. در رودخانه‌های ساحلی یا جزرومدی که منتهی به دریا یا محیط‌های آبی شور هستند، مصب رودخانه محل ورود آب شور به آب شیرین رودخانه است (Hussain et al., 2019). در این رودخانه‌ها، جزرومد باعث نفوذ مکرر جبهه آب شور به رودخانه شده و عامل اصلی کاهش کیفیت و افزایش مواد محلول در آب رودخانه می‌باشد. این اتفاق موجب کاهش کیفیت خاک اطراف رودخانه، کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی و پرهزینه شدن برداشت و تصفیه آب می‌شود (Nhung et al., 2019). بررسی شوری در رودخانه‌های جزرومدی به خصوص در نزدیکی مصب به مراتب

رودخانه‌ها و نه‌های طبیعی منبع اصلی آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی برای سال‌های متمادی بوده‌اند. در سال‌های گذشته حفظ و بهبود کیفیت آب آن‌ها برای محققان و دولت‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده است. برنامه‌ریزی و مدیریت برای برداشت و استفاده از رودخانه

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته‌گان کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: m.mazaheri@modares.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2022.77613.1181

رودخانه، اددی‌ها، نواحی هایدروهییک<sup>۳</sup> و نواحی ماندابی<sup>۴</sup> باشد (Choi et al., 2016; Rana et al., 2019; Zaramella et al., 2020). در استفاده از معادلات یک بعدی در پیش‌بینی کیفیت رودخانه‌ها، فرایندهای نگهداشت عموماً ساده شده یا در نظر گرفته نمی‌شوند (Tong and Deng, 2015; Kelleher et al., 2013). مقطع عرضی رودخانه (A) به دو بخش شامل ناحیه ماندابی (A<sub>S</sub>) و ناحیه جریان (A<sub>f</sub>) تقسیم می‌شود. مناطق ماندابی در نهرها و رودخانه‌ها معمولاً در پشت تلماسه‌های بستر، در نزدیکی دیواره‌های مقعر در پیچان‌رودها و یا نواحی متخلخل در بدنه رودخانه تشکیل می‌شوند (شکل ۱). پهنه‌های ماندابی قسمتی از رودخانه یا نهر هستند که از جریان اصلی جدا شده‌اند، اما به طور متوسط در محاسبه مساحت مقطع عرضی کل رودخانه به حساب می‌آیند، از این رو مناطق ماندابی، سطح مقطع موثر جریان را کاهش می‌دهند (Cheme et al., 2021; Khodambashi and Mazaheri, 2022). این اتفاق باعث شده سرعت موثر بالاتر از سرعت میانگین اندازه‌گیری شده و یا محاسبه شده از طریق روابط ریاضی باشد (Seo and Cheong, 2001). سرعت موثر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_f = \frac{1}{A_f} \int_0^{A_f} u dA \quad (1)$$

A<sub>f</sub> سطح مقطع عرضی ناحیه جریان<sup>۵</sup> [L<sup>2</sup>], u سرعت نقطه‌ای در ناحیه جریان [LT<sup>-1</sup>], U<sub>f</sub> سرعت موثر جریان در رودخانه [LT<sup>-1</sup>] و A سطح مقطع کل رودخانه [L<sup>2</sup>] است. در مناطق ماندابی به علت اینکه انتقال (جابه‌جایی) پدیده غالب نبوده، سرعت در آن‌ها از سرعت متوسط در رودخانه کمتر است و به صفر میل می‌کند. با توجه به این A<sub>f</sub> < A می‌باشد، در نتیجه U<sub>f</sub> > U است. در اینجا U سرعت متوسط آب در رودخانه [LT<sup>-1</sup>] تعریف می‌شود که از تقسیم دبی رودخانه بر سطح مقطع عرضی محاسبه می‌شود. بزرگی سرعت موثر نسبت به سرعت متوسط باعث شده گرادیان سرعت در رودخانه افزایش یافته و ضریب پراکندگی موثر به همان نسبت بزرگ‌تر باشد. سینگ (Singh, 2003) با ایجاد تغییراتی در ADE مدل انتقال - انتشار اصلاح شده (MADE) را برای رودخانه‌های دارای نواحی ماندابی توسعه داد. همچنین او با بررسی رودخانه میسوری، نشان داد نتایج مدل ADE با جایگزین کردن سرعت و ضریب پراکندگی موثر در مدل به جای پارامترهای اصلی بهبود می‌یابد.

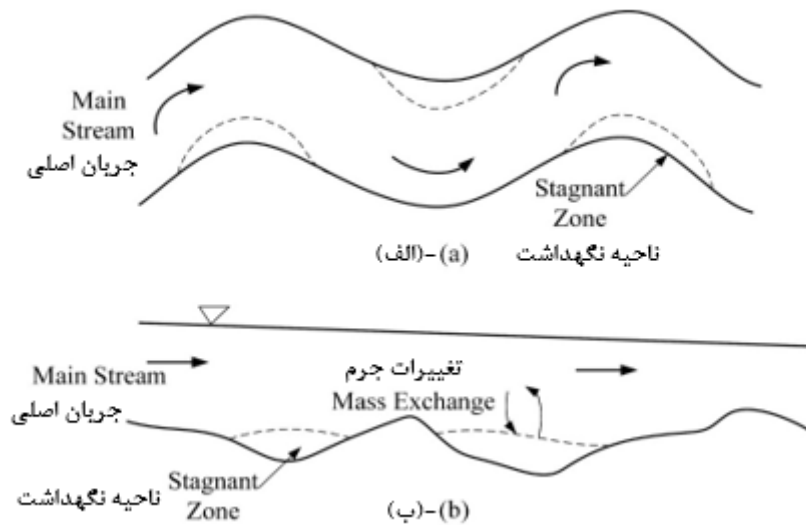
پیچیده‌تر از شرایط دیگر است به این علت که پدیده‌ی جزومد دائماً باعث تغییر حرکت جریان آب شور دریا می‌شود که در هنگام مد به سمت بالادست رودخانه و در هنگام جزر به سمت دریا است. شاخص‌های گوناگونی موثر بر پیشروی، اختلاط و نفوذ آب‌شور به رودخانه هستند که از آن‌ها می‌توان به ارتفاع جزومد، دبی‌های ورودی به رودخانه، توپوگرافی و ناهمگونی‌های مورفولوژی رودخانه که به عنوان نواحی نگهداشت شناخته می‌شوند، شیب بستر رودخانه، سرعت باد و اصطکاک بستر اشاره کرد که بیشترین تأثیر را بر سرنوشت جبهه آب شور می‌گذارند (Savenije, 2005; Singh, 2008). این فرایندها غالباً در مصب رودخانه‌های اختلاط کامل با طرح مسئله به عنوان یک معادله یک بعدی ساده می‌شوند (Yu et al., 2012; Saadat et al., 2022). نفوذ جبهه آب شور در رودخانه‌های جزر و مدی توسط دو فرایند انتقال<sup>۱</sup> و انتشار قابل تشریح است. در فرایند انتقال جریان آب همراه خود شوری را منتقل می‌کند و فرایند پراکندگی<sup>۲</sup> به علت تغییر در پروفیل سرعت اتفاق می‌افتد و باعث باز شدن ابر جبهه شوری در رودخانه می‌شود (Chapra, 2008).

در سراسر دنیا مطالعات گوناگونی در رابطه با نفوذ آب شور به رودخانه‌های منتهی به گستره‌های آبی شور انجام شده است (Eslami et al., 2019; Haddout et al., 2020; Pereira et al., 2022). رودخانه مرزی اروند نیز مستثنا نبوده و در سال‌های گذشته کیفیت آن مورد توجه واقع شده است (Abdullah et al., 2017; Al-Aesawi et al., 2021; Al-Battat, 2019; Lafta, 2022). عنوان مثال گنگ و همکاران (Gong et al., 2022) به منظور تدقیق اثرات تغییرات دبی، دامنه جزومد و باد را بر نفوذ شوری، مصب رودخانه ای در کشور چین را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اثرات دامنه جزومد بر میزان نفوذ شوری به رودخانه موثرتر از دیگر فاکتورها است. به علاوه در مطالعاتی به اثرات اهمیت مورفولوژی و بستر رودخانه بر کیفیت آب رودخانه‌های جزومدی که در معرض نفوذ آب شور هستند توجه شده است (Abarca et al., 2002; Guo, 2022; Mai et al., 2019; Winn et al., 2006).

رشد روزافزون نگرانی‌های زیست‌محیطی سبب شده مطالعات گسترده‌ای بر روی فرایندهای موثر بر انتقال مواد محلول در رودخانه‌ها انجام گیرد (Kwon et al., 2021; Zaghayan and Ketabchi, 2022). فرایندهای نگهداشت یک مفهوم برای تشریح اثر مناطقی درون یا نزدیک رودخانه بوده که سرعت آب در آن‌ها نسبت به جریان اصلی کمتر است و می‌تواند شامل استخرهای کنار

3- Hyporheic  
4- Stagnant Zone  
5- Flow Zone

1- Advection  
2- Dispersion



شکل ۱- طرح شماتیک از نواحی ماندابی در یک رودخانه (الف) نما از بالا (ب) نمای از کنار رودخانه  
Figure 1- Sketch showing Stagnant zones (a) plan view and (b) sectional view

وابسته به کیفیت آب رودخانه هستند بنابراین کیفیت آب این رودخانه از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال به علت اینکه اطلاعات سطح مقطع عرضی و وضعیت بستر این رودخانه به طور دقیق در دسترس نیست و یکی از علل استفاده از مدل‌های یک بعدی همین موضوع می‌باشد، برای سنجش صحت روش پیشنهادی، از این رودخانه بهره گرفته شد. پارامترهای فاکتور پراکندگی (a) و توان پراکندگی (b) همراه با  $\eta$  از طریق واسنجی مدل MIKE11 برای یک ایستگاه در اروندرود با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان تعیین می‌شود و برای دو ایستگاه دیگر مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد.

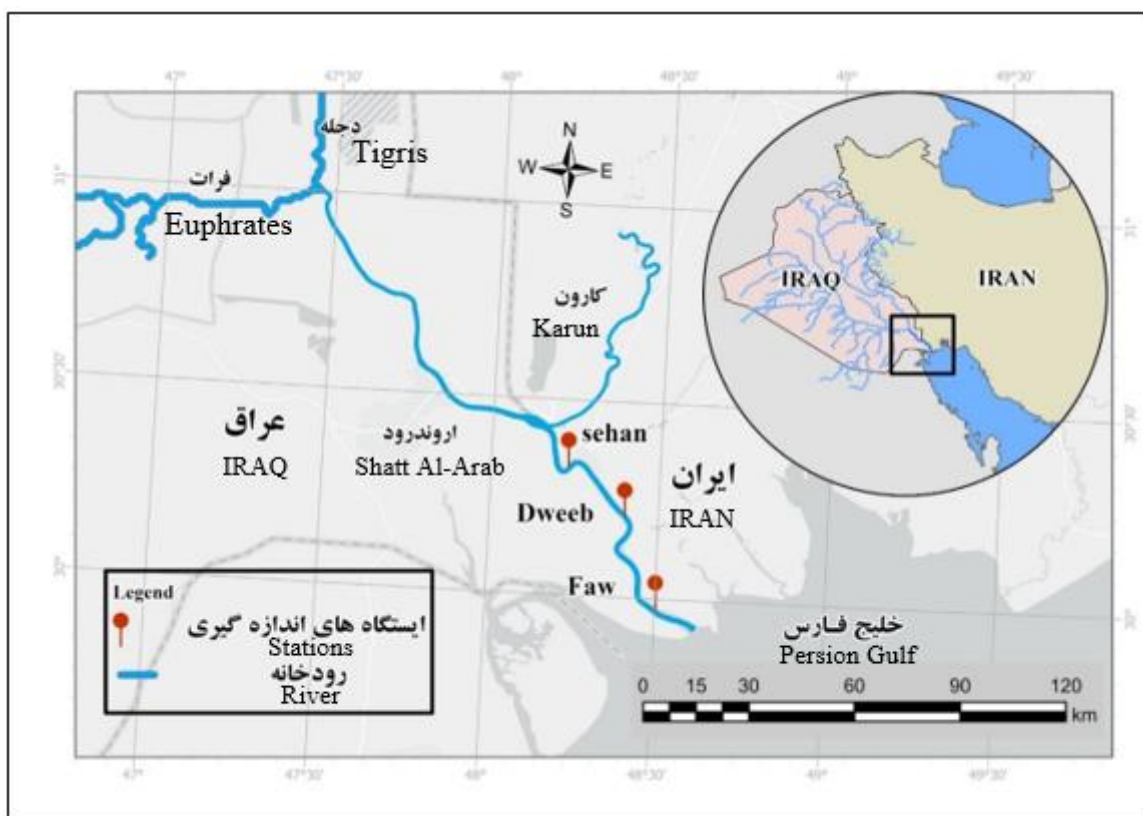
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه اروند با طول تقریبی ۱۹۲ کیلومتر یکی از بزرگ‌ترین مصب‌های جهان است که در جنوب ایران قرار گرفته است. رودخانه‌های دجله و فرات در القرنه<sup>۱</sup> نزدیک شهر بصره در عراق به هم می‌رسند و در ۳۳ کیلومتر شهر بصره رودخانه کارون به آن می‌پیوندد و اروندرود ایجاد می‌شود. این رودخانه پس از طی مسیر ۸۴ کیلومتری در مرز کشور ایران و عراق به خلیج فارس می‌ریزد (شکل ۲). عرض این رودخانه از ۲۵۰ متر در پایین‌دست دجله و فرات تا بیش از ۷۰۰ متر در مصب رودخانه می‌رسد عرض این رودخانه در ورودی به خلیج فارس ۱۲۵۰ متر نیز بیان شده است.

سینگ (Singh, 2008) سه مدل انتقال آلاینده در رودخانه‌ها شامل مدل نگهداشت موقت (TSM)، مدل انتقال - انتشار اصلاح شده (MADE) و مدل انتقال - انتشار کسری (FRADE) را برای تعدادی از رودخانه‌های ایالات متحده آمریکا به کار برد و نتیجه گرفت که معادله انتقال - انتشار اصلاح شده در مقایسه با دو مدل دیگر دارای پارامترهای کمتر و به لحاظ کاربردی ساده تر است. همچنین او نشان داد این مدل در مدل‌سازی رودخانه‌های دارای نواحی ماندابی بسیار تواناتر می‌باشد.

طرح مسئله به عنوان یک مدل یک بعدی باعث شده بسیاری از عوامل دخیل در انتقال مواد محلول در رودخانه ساده شوند و یا در نظر گرفته نشوند. در شرایطی که داده‌های مشاهداتی برای یک رودخانه محدود باشد و یا مدل‌های پیچیده دوبعدی و سه‌بعدی نمی‌توانند به طور قابل اعتماد مورد صحت‌سنجی قرار گیرند، از سرعت و ضریب پراکندگی مؤثر استفاده می‌شود. عموماً در مدل‌های یک بعدی نواحی نگهداشت تعریف نمی‌شوند و اکثر مدل‌های یک بعدی بر اساس رابطه‌ی پایه‌ی انتقال - انتشار توسعه یافته‌اند. ارزش عملی این روش در این واقعیت نهفته است که اثر مناطق ماندابی در استفاده از معادلات یک بعدی سنت - ونانت و انتقال - انتشار اعمال شده و در مدل‌های توسعه یافته شده یک بعدی بکار گرفته شود. برای اینکه اثر نواحی ماندابی در معادلات دیده شود، لازم است مقدار  $\eta$  برای رودخانه مورد نظر تعیین گردد. این پارامتر در نهایت از طریق سرعت (یا دی) و ضریب پراکندگی مؤثر وارد مدل می‌شود. رودخانه اروند علاوه بر مرزی بودن تنها ورودی آب شیرین به خلیج فارس محسوب می‌شود همچنین از آنجایی که اراضی و نخیلات اطراف رودخانه



شکل ۲- محدوده مطالعاتی و موقعیت رودخانه اروند  
Figure 2- Study area and location of Arvand river

(*et al.*, 2017) شبیه‌سازی جریان و کیفیت آب و انتقال آلودگی (در این مطالعه شوری) رودخانه توسط مدل یک بعدی انجام شد. مدل‌های زیادی برای تحلیل و شبیه‌سازی کیفیت و انتقال آلودگی در رودخانه‌ها توسعه داده شده است. MIKE11 یک ابزار یک بعدی با هیدرودینامیک قوی برای شبیه‌سازی جریان و کیفیت مصب‌ها، رودخانه‌ها و کانال‌ها است که توسط مؤسسه هیدرولیک دانمارک<sup>۲</sup> ایجاد و توسعه داده شده است (DHI, 2016). به منظور برآورد غلظت شوری در رودخانه مورد مطالعه، دو ماژول هیدرودینامیک (HD) و انتقال-انتشار (AD) مورد استفاده قرار گرفته است. قدم اول در مدل‌سازی عددی هر پدیده‌ای شناخت روابط حاکم بر آن پدیده است. نتایج مدل هیدرودینامیک شامل عمق آب و سرعت جریان از ورودی‌های مدل کیفیت برای پیش‌بینی شوری در مصب اروندرود می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان رودخانه معادلات یک بعدی سنت-ونانت است (Martin *et al.*, 2018).

ارتفاع کف این رودخانه در حدود ۰٫۷ متر در طول ۶۳ کیلومتر تا منطقه بصره کاهش می‌یابد. عمق رودخانه بین ۸٫۵ متر تا ۲۴ متر در فصول پرآبی و کم‌آبی بیان شده است (Abdullah *et al.*, 2015; Al-Asadi, 2017). قسمت پایین حوضه دجله - فرات نشان دهنده بزرگترین منطقه تالابی در خاورمیانه و غرب آسیا است که تحت شرایط طبیعی ۲۰ هزار کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد (UNEP, 2001). اصلی‌ترین منبع تأمین آب شیرین در آن منطقه رودخانه اروند است و پایدار ماندن بسیاری از نخیلات وابسته به کیفیت آب این رودخانه است. مهم‌ترین منبع کاهش کیفیت آب رودخانه نفوذ آب شور از سمت خلیج فارس به رودخانه است که بررسی عوامل اثر گذار بر برآورد کیفیت آب در اثر نفوذ آب شور را اجتناب ناپذیر کرده است (Montazeri *et al.*, 2023).

#### مدل‌سازی

در این پژوهش با توجه به اطلاعات از وضعیت شوری و این که رودخانه جزرومدی اروند اختلاط کامل<sup>۱</sup> محسوب می‌شود (Abdullah

2- Danish Hydraulic Institute (DHI)

1- Well-mixed

صفر باشد ضریب پراکندگی در طول ثابت و برابر فاکتور پراکندگی می‌شود و در صورتی که  $b$  عددی غیر صفر باشد، ضریب پراکندگی در محاسبات مدل وابسته به میزان سرعت بوده و در طول رودخانه و در زمان به علت غیریکنواخت بودن جریان متغیر خواهد بود.

به منظور مقایسه و بررسی بهبود نتایج در مدل MIKE11، ابتدا مدل بدون تغییرات پیشنهادی در رودخانه ارون اجرا شد. با توجه به اطلاعات موجود برای سال ۲۰۱۴ (شکل ۳)، ابتدا سری زمانی دبی و غلظت مواد محلول ورودی به رودخانه به عنوان شرایط مرزی بالادست وارد مدل شد (Mohamed and Abood, 2017). با توجه به جداول جزرومد در دهانه خروجی ارون، تراز سطح آب دریا به عنوان شرایط مرزی پایین دست رودخانه در نظر گرفته شد (Tables, 2014) و همراه با غلظت متوسط شوری خلیج فارس به مدل معرفی شد. قابل ذکر است شرایط مرزی پایین دست به صورتی تعریف شد که شوری خلیج فارس امکان بازگشت به شبکه محاسباتی در رودخانه را داشته باشد. همچنین، رودخانه کارون نیز به عنوان ورودی به شبکه‌ی رودخانه به صورت نقطه‌ای با جریان و غلظت ثابت تعریف شد (Montazeri et al., 2022).

پارامترهای هیدرودینامیک و کیفیت رودخانه پارامترهای مهم و اثرگذار در پیش‌بینی شرایط جریان و غلظت در رودخانه هستند. این تحقیق ضریب زبری مانینگ  $0.17$  تا  $0.33$  و ضریب پراکندگی  $285$  مترمربع بر ثانیه با توجه به مطالعات و گزارش‌های پیشین در رودخانه بکار گرفته شد (Abdullah et al., 2016; Al-Taei et al., 2019; Etemad-Shahidi et al., 2011; Montazeri et al., 2022). که در این پژوهش نیز از همین ضرایب برای شبیه‌سازی حالت پایه مدل MIKE11 استفاده شد.

به علاوه از اثر باد صرف نظر شد و ضریب واکنش با توجه به این که شوری آلاینده‌ای زوال‌ناپذیر است در شبیه‌سازی صفر ( $k=0$ ) در نظر گرفته شد (Kanda et al., 2015). با عنایت به رابطه (۶) در ابتدا فاکتور پراکندگی بگونه‌ای تعریف شد که در طول رودخانه بدون تغییر باشد ( $b=0$ ). بنابراین پس از مدل‌سازی هیدرودینامیک جریان (HD)، نتایج آن به مدل کیفیت (AD) وارد شد. در نتیجه سری زمانی غلظت در طول رودخانه قابل استخراج است.

حال با توجه به هدف مطالعه برای بهبود نتایج، تخمین بهتر تغییرات غلظت و جبران کمبود داده در مدل‌سازی، باید تغییراتی در پارامترهای ورودی اعمال شود. تأثیر نواحی ماندابی در رودخانه از طریق تعریف پارامتر  $\eta$  و اثر آن بر سری زمانی جریان ورودی به رودخانه و ضریب پراکندگی دیده می‌شود. ضریب پراکندگی و سرعت مؤثر به صورت عبارات (۷) و (۸) وارد مدل می‌شود.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (3)$$

در این روابط  $A$  سطح مقطع جریان  $[L^2]$ ،  $q$  دبی جریان ورودی جانبی در واحد طول  $[L^2T^{-1}]$ ،  $Q$  دبی جریان  $[L^3T^{-1}]$ ،  $g$  شتاب گرانش زمین  $[MT^{-2}]$ ،  $S_f$  شیب خط انرژی،  $S_0$  شیب بستر،  $h$  عمق آب  $[L]$ ،  $x$  مکان  $[L]$  و  $t$  زمان  $[T]$  می‌باشد. معادله انتقال-انتشار برای پیش‌بینی و نحوه انتقال ماده آلاینده بسط داده شده که بر اساس معادله بقای جرم و قانون اول فیک<sup>۱</sup> به دست آمده است. این معادله بیانگر دو مکانیزم انتقال جرم، شامل انتقال ماده آلاینده توسط جریان و پراکندگی بر اساس اختلاف غلظت و سرعت است که در ماژول AD به صورت یک‌بعدی با فرض اختلاط کامل استفاده می‌شود (Chapra, 2008).

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) - AKC \pm AS \quad (4)$$

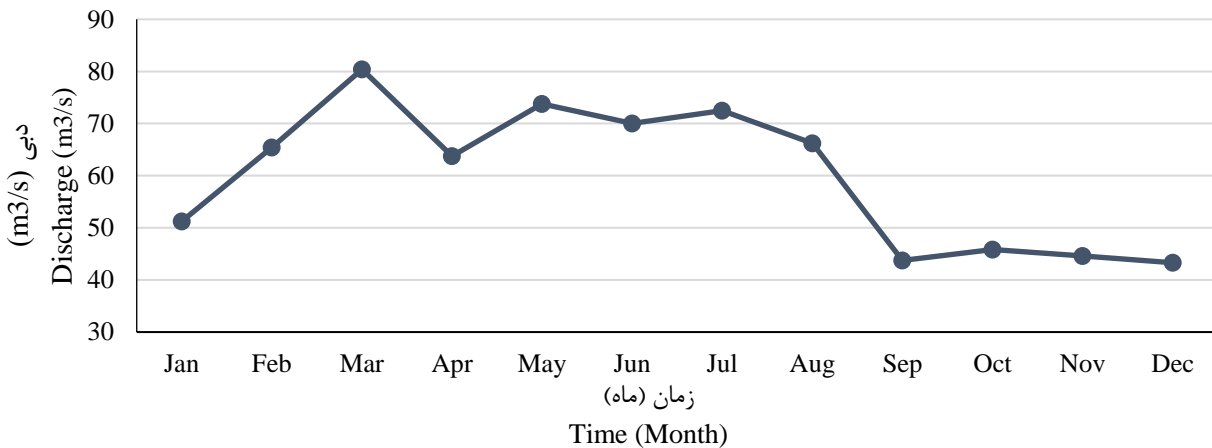
$C$  غلظت آلاینده در شبکه‌ی زمانی و مکانی رودخانه  $[ML^{-3}]$ ،  $A$  سطح مقطع جریان  $[L^2]$ ،  $Q$  دبی رودخانه  $[L^3T^{-1}]$ ،  $D$  ضریب پراکندگی طولی  $[L^2T^{-1}]$ ،  $K$  ضریب زوال آلاینده (بعد آن تابعی از درجه واکنش می‌باشد. برای واکنش درجه صفر  $[ML^{-3}T^{-1}]$ ، برای واکنش درجه یک دارای بعد  $[T^{-1}]$ ، برای واکنش درجه دو  $[L^3M^{-1}T^{-2}]$ ،  $S$  ترم منبع  $[ML^{-3}T^{-1}]$ ،  $x$  فاصله از محل تخلیه آلاینده  $[L]$  و  $t$  زمان  $[T]$  است. در مدل MIKE11 حل عددی روابط دیفرانسیلی (۲) تا (۴) با روش تفاضل محدود به شکل ضمنی صورت می‌گیرد. انتخاب گام زمانی و مکانی تا حد زیادی برای ارضا کردن شرایط پایداری معادله (۴) اهمیت دارد. شرط پایداری مدل MIKE11 در عبارت (۵) قابل مشاهده است. به علت اینکه جریان آب غیرماندگار و غیریکنواخت در نظر گرفته شده است، شرط پایداری در هر زمان و هر مکان باید برقرار باشد.

$$\frac{U \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (5)$$

در این رابطه  $\Delta x$  گام مکانی  $[L]$ ،  $\Delta t$  گام زمانی  $[T]$  و  $U$  سرعت متوسط جریان در رودخانه  $[LT^{-1}]$  است. به علت اینکه ضریب پراکندگی میزان زیادی به گرادیان مکانی سرعت وابسته است، در مدل MIKE11 این ضریب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = aU^b \quad (6)$$

در این رابطه  $U$  سرعت متوسط جریان رودخانه  $[LT^{-1}]$ ،  $a$  فاکتور پراکندگی  $[L^2T^{-1}]$  و  $b$  توان پراکندگی می‌باشند. در حالتی که  $b$  برابر



شکل ۳- جریان ورودی به رودخانه اروند از بالادست در سال ۲۰۱۴  
Figure 3- Monthly rate of discharge in the upstream of the Arvand River in 2014

روش واسنجی نشده‌اند. در این پژوهش از یکی از روش‌های فرا ابتکاری مبتنی بر هوش جمعی استفاده شده است که در برآورد پارامترها در یک مجموعه یکتا توانمند است (Blum, 2005; Dorigo et al., 2006).

پایاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه در چند مرحله صورت می‌گیرد. گام اول ایجاد مورچه‌های اولیه، ارزیابی، مرتب‌سازی و قراردادن آن‌ها در بایگانی می‌باشد. در این مقاله ۵ مورچه اولیه ایجاد شده که هر یک ۳ مقدار برای فاکتور پراکندگی ( $a$ ) و توان پراکندگی ( $b$ ) و نسبت مساحت مقطع عرضی ناحیه ماندابی به رودخانه ( $\eta$ ) در بر دارند. در گام دوم باید ضرایب وزنی  $w_l$  و احتمالات  $P_l$  محاسبه شود. این دو ضریب را می‌توان با عبارات مختلفی محاسبه نمود که رایج‌ترین روش محاسبه آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$w_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-1)^2}{2q^2k^2}} \quad (9)$$

$$P_l = \frac{w_l}{\sum_1^k w_k} \quad (10)$$

در این روابط  $l$  شماره مورچه اولیه موردنیاز،  $k$  تعداد مورچه‌های اولیه،  $q$  ضریب کنترل تابع می‌باشد. در مرحله سوم مدل احتمالی مربوط به هر کدام از متغیرهای تصادفی ساخته می‌شود. برای ایجاد توزیع نرمال نیازمند میانگین و واریانس داریم که میانگین عدد تصادفی انتخاب شده، در نظر گرفته می‌شود و واریانس از فرمول (۱۱) قابل محاسبه است. در نهایت برای استخراج مدل احتمالی توزیع‌های نرمال با ساختار فرمول (۱۲) ترکیب می‌شوند:

$$U_f = \frac{U}{1-\eta} \quad (7)$$

$$D_f = \frac{D}{1-\eta} \quad (8)$$

در روابط  $D$  ضریب پراکندگی  $[L^2T^{-1}]$ ،  $D_f$  ضریب پراکندگی موثر  $[L^2T^{-1}]$  و  $\eta$  نسبت مساحت مقطع عرضی ناحیه ماندابی به مقطع عرضی رودخانه است. برای رودخانه اروند سرعت موثر از طریق تقسیم سری زمانی دبی ورودی به عبارت  $(1-\eta)$  تولید می‌شود. وارد کردن ضریب پراکندگی موثر به مدل MIKE11 کمی پیچیده‌تر به نظر می‌رسد. با توجه به وابستگی این ضریب به گرادبان مکانی سرعت،  $\eta$  از طریق فاکتور پراکندگی در مدل وارد می‌شود. پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $\eta$  در مدل MIKE11 برای ایستگاه Sehan با فاصله ۱۲۳ کیلومتری از القره توسط الگوریتم فرا ابتکاری کلونی مورچگان واسنجی شده، سپس تغییرات اعمال شده در دو ایستگاه دیگر در طول رودخانه با توجه به داده‌های موجود اندازه‌گیری در سال ۲۰۱۴ صحت سنجی می‌شوند. ارتباط غیرمستقیم بین مورچه‌ها از طریق مسیرهای فرمونی آنها را قادر می‌سازد کوتاه‌ترین مسیرها را بین لانه و منابع غذایی خود بیابند. این ویژگی الهام بخش تعریف الگوریتمی جمعیت محور است که می‌تواند راه حل‌های تقریبی برای مسائل بهینه‌سازی پیچیده پیدا کنند. جزء اصلی الگوریتم‌های ACO مدل فرمونی است که برای نمونه برداری احتمالی از فضای جستجو استفاده می‌شود (Dorigo and Stützle, 2019). تاکنون روش‌های مختلفی برای واسنجی مدل‌های انتقال آلاینده استفاده شده است (Ward et al., 2017)؛ با این حال محققین موفق به انتخاب بهترین



مشاهداتی و غلظت‌های شبیه‌سازی شده توسط MIKE11 به عنوان تابع هدف تعریف می‌شود. برای پیاده سازی الگوریتم کلونی مورچگان برای شروع ۵ مورچه اولیه انتخاب و ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. روند پیشرفت در الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۵ قابل مشاهده است. مقادیر پارامترهای برآورد شده به ترتیب  $\eta = 0.168$ ،  $\eta = 273/4$ ،  $a = 0.94$ ،  $b$  می‌باشد.

افزایش پارامتر  $\eta$  باعث شده سرعت آب و ضریب پراکندگی در معادلات سنت-ونانت و انتقال-انتشار افزایش یابد. افزایش سرعت موجب کاهش زمان حرکت آب در رودخانه یا به اصطلاح Travel Time می‌شود. علی‌رغم افزایش ضریب پراکندگی به واسطه تأثیر ناحیه ماندابی، کوتاه شدن زمان حرکت آب در رودخانه باعث شده تا اثرگذاری این پارامتر بر سری زمانی غلظت شبیه‌سازی یا مشاهداتی کاهش یابد و شیب شاخه پایین رونده و بالارونده افزایش یافته و قلّه سری زمانی غلظت بالاتر رود. تغییرات حاصل از اعمال اثر ناحیه ماندابی بر نتایج شبیه‌سازی توسط معادلات یک بعدی سنت-ونانت و انتقال-انتشار در ایستگاه Sehan در شکل ۶ به خوبی قابل مشاهده است. در این شکل داده‌های مشاهده شده با شبیه‌سازی متوسط غلظت ماهانه در اروندرود در دو سناریوی با و بدون اثر دادن نواحی ماندابی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

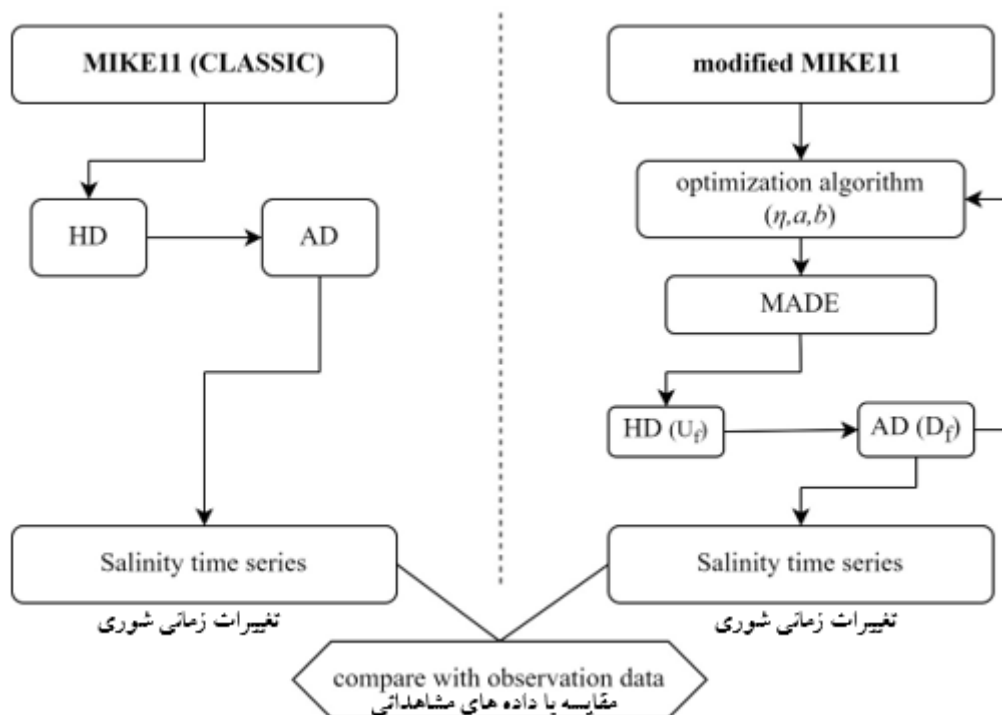
$$\sigma_i^i = \xi \sum_{n=1}^k \frac{|\mu_n^i - \mu_l^i|}{k-1} \quad (11)$$

$$G_i = \sum_l P_l N(\mu_l^i, \sigma_l^{i2}) \quad (12)$$

در این عبارات  $i$  شمارنده متغیر تصادفی،  $n$  شمارنده مورچه،  $\mu$  مقدار متغیر تصادفی،  $\xi$  ضریب کنترل تابع است. در نهایت با نمونه‌گیری تصادفی از هر متغیر و تولید مورچه‌های ثانویه، مورچه‌های جدید و موارد موجود در بایگانی ادغام شده و سپس آن‌ها را با توجه به تابع هدف مسئله مرتب کرده و اعضای اضافی حذف می‌شود. با بروزرسانی بهترین پاسخ یافته شده تا این لحظه می‌توان الگوریتم را در صورت نیاز تکرار نمود. در شکل ۴ فلوجارتی از نحوه‌ی مدل‌سازی مدل MIKE11 در دو حالت پایه و اصلاح شده با هدف مقایسه سری زمانی غلظت خروجی از این دو مدل ارائه شده است.

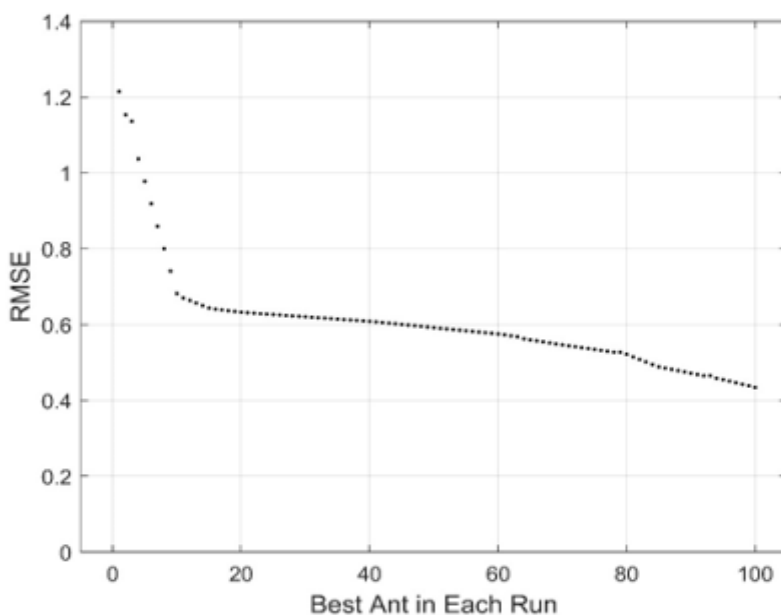
### نتایج و بحث

واسنجی مدل MIKE11 اصلاح شده برای توابع هدف در ایستگاه Sehan در فاصله تقریباً ۷۰ کیلومتری از مصب اروندرود توسط الگوریتم کلونی مورچگان انجام شده است. در این پژوهش برای واسنجی مدل، شاخص RMSE میان داده‌های غلظت



شکل ۴- فلوجارت شبیه‌سازی و مقایسه نتایج دو مدل پایه و اصلاح شده

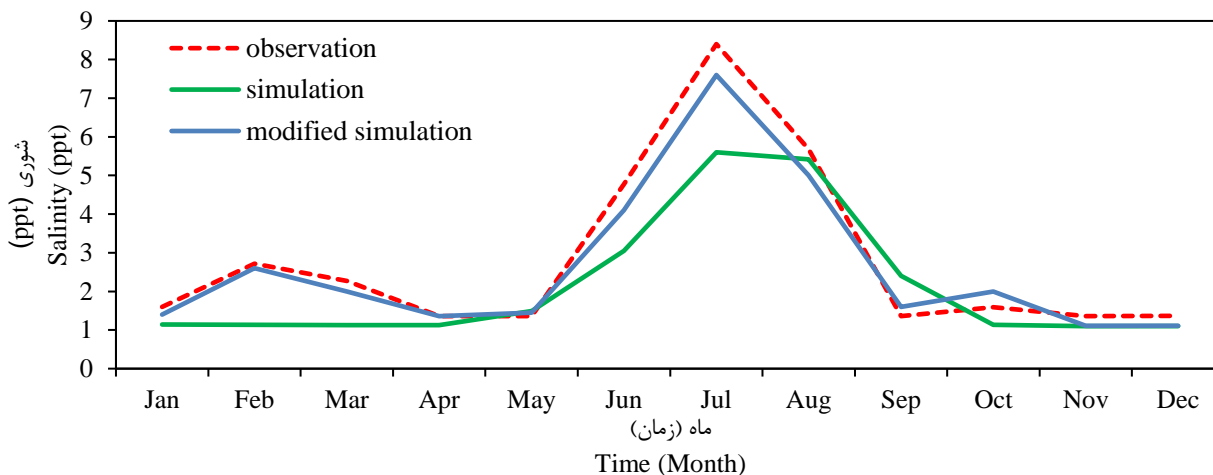
Figure 4- Simulation flowchart and comparison of the results of two classic and modified models



بهترین مورچه در هر بار اجرا

شکل ۵- تغییرات شاخص بهینه‌سازی با پیشرفت در الگوریتم کلونی مورچگان

Figure 5- changes in Object function (RMSE) with progress in ant colony algorithm



شکل ۶- سری زمانی غلظت شوری برای ماه‌های مختلف برای ایستگاه Sehan

Figure 6- Time series of salinity concentration for different months at Sehan station

قله سری زمانی به خوبی مشهود است. مقایسه نتایج MIKE11 و MIKE11 اصلاح شده توسط سه شاخص ضریب همبستگی<sup>۱</sup> (r)، خطای جذر میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMSE) و شاخص نش-ساتکلیف<sup>۳</sup> (NSE) در جدول ۱ قابل مشاهده است. افزایش دقت نتایج مدل با

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است استفاده از ضریب پراکندگی و سرعت مؤثر در معادلات، با افزایش ارتفاع بیشینه غلظت مشاهداتی و افزایش شیب در شاخه‌های پایین رونده و بالارونده باعث بهبود نتایج مدل شده است. این تغییرات به این معناست که شبیه سازی توسط مدل یک بعدی اصلاح شده به داده‌های مشاهداتی غلظت نزدیک‌تر شده است. بهبود تخمین غلظت در شاخه بالارونده و

- 1- Correlation Coefficient
- 2- Root mean squar Error
- 3- Nash-Sutcliffe

داده‌های اندازه‌گیری و یا حتی ورود زه آب‌های کشاورزی از مزارع و نخیلات حاشیه رودخانه باشد که عموماً تخمین و اندازه‌گیری آن‌ها امری مشکل است. اما مدل بهبود یافته با دقت بهتری شرایط ماهانه غلظت را پیش‌بینی می‌کند که تخمین آن در شرایط متفاوت جریان‌های ورودی به رودخانه و حتی بالا آمدن سطح دریاها و تغییر در دامنه جزرومد برای استفاده کشاورزی و حتی شرب اهمیت قابل توجهی دارد.

به طور کلی، غلظت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری در ۱۲ ماه از سال در حالت اعمال ضرایب بهینه شده ضریب همبستگی (r) را در فاصله ۱۵۰ کیلومتر از بالادست از ۰/۸۶ به ۰/۹۷ می‌رساند و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱/۲۷ ppt بهبود می‌یابد. در ایستگاه دیگر یعنی ۱۲۳ کیلومتری از بالادست اروندرود ضریب همبستگی از ۰/۹۳ به ۰/۹۸ رسیده است و با توجه به خطای RMSE، مدل اصلاح شده با خطای کمتری غلظت ماهانه را تخمین می‌زند. نتایج صحت سنجی دو ایستگاه ذکر شده با سه شاخص خطای آماری در جدول ۲ محاسبه شده است.

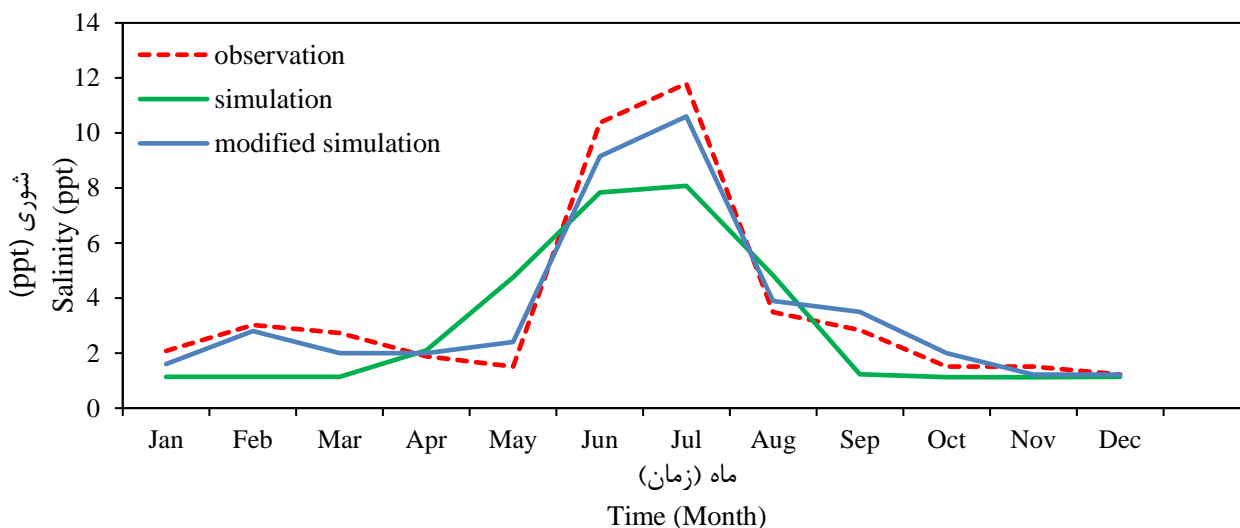
افزوده شدن پارامتر  $\eta$  کاملاً مشهود است و به‌عنوان مثال خطای آماری RMSE از ۲/۲۱ ppt به ۰/۴۳ ppt کاهش می‌یابد همچنین شاخص NSE نیز به طور قابل ملاحظه‌ای به عدد یک نزدیک می‌شود. بنابراین نتایج شبیه‌سازی مدل با پارامترهای بهینه شده در این ایستگاه (Sehan) یعنی متغیر در نظر گرفتن فاکتور پراکندگی در طول رودخانه با توجه به سرعت جریان و اثر دادن نواحی ماندابی در باعث افزایش دقت مدل‌سازی شده است.

در این بخش نتایج برای دو ایستگاه Faw و Dweeb با فواصل ۱۵۰ و ۱۸۰ کیلومتری از مبدأ رودخانه مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. جانمایی این دو ایستگاه در شکل ۲ مشخص شده است. نتایج سری زمانی غلظت شوری در ایستگاه‌های Faw و Dweeb به ترتیب در شکل ۷ و ۸ قابل مشاهده است. در این دو ایستگاه پس از اعمال ضرایب واسنجی شده در ایستگاه Sehan، نتایج شبیه‌سازی مدل اصلاح شده به داده‌های مشاهداتی غلظت نزدیک‌تر شده است. با توجه به این که در این دو ایستگاه کلیات سری زمانی به خوبی مدل شده است با این حال بیشترین خطا متعلق به بیشینه غلظت در سری زمانی می‌باشد. این اختلاف ممکن است ناشی از خطا در ثبت

جدول ۱- نتایج بهینه‌سازی در ایستگاه Sehan

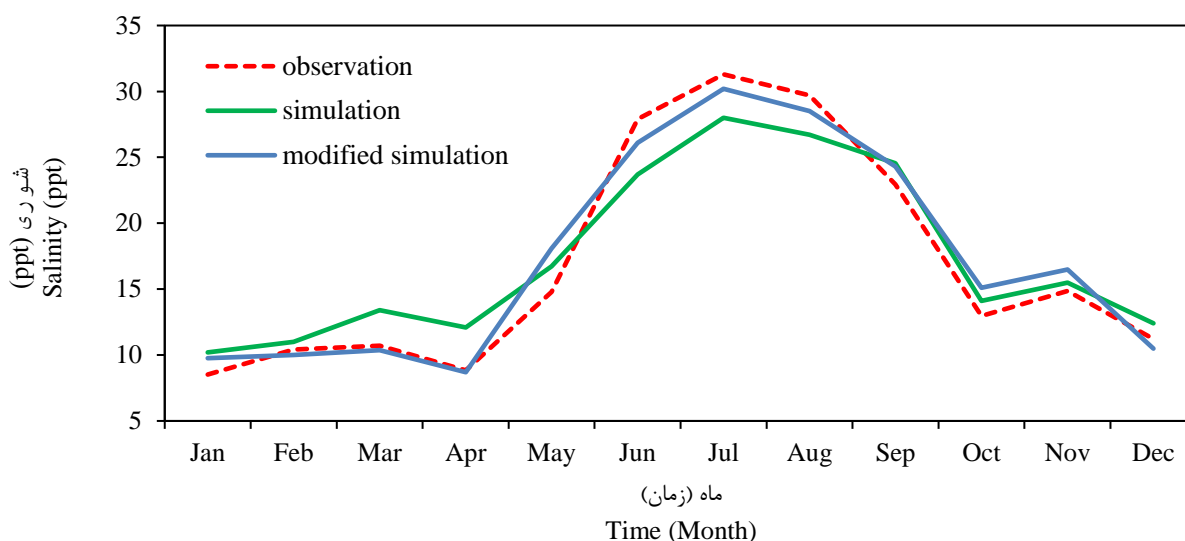
Table 1- Optimization results at Faw station

فاصله از القرنة (km) Distance from al-Qurna	مدل Model	r	RMSE (ppt)	NSE
123 (Sehan)	MIKE11	0.91	2.21	0.72
	Modified MIKE11	0.99	0.43	0.97



شکل ۷- مقایسه داده‌های اندازه‌گیری غلظت با نتایج خروجی در دو حالت از شبیه‌سازی در ایستگاه Dweeb

Figure 7- Time series of salinity concentration for different months at Dweeb station



شکل ۸- مقایسه داده‌های اندازه گیری غلظت با نتایج خروجی در دو حالت از شبیه‌سازی در ایستگاه Faw  
Figure 8- Time series of salinity concentration for different months at Faw station

جدول ۲- نتایج صحت سنجی برای ایستگاه‌های Sehan و Dweeb

Table 2-Validation results for Dweeb and Sehan stations

فاصله از القرنة (km) Distance from al-Qurna	مدل Model	r	RMSE (ppt)	NSE
150 (Dweeb)	MIKE11	0.86	1.97	0.72
	Modified MIKE11	0.97	0.7	0.95
180 (Faw)	MIKE11	0.93	2.38	0.86
	Modified MIKE11	0.98	1.54	0.97

کیفیت آب برآورد کردند و در مدل اصلاح شده نسبت به مدل پایه خطای کمتری وجود داشت به‌عنوان مثال خطای آماری RMSE بیش از ۵۰ درصد کاهش یافت و در نهایت نتایج شبیه‌سازی در دو ایستگاه Dweeb و Faw نیز با اعمال ضرایب به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داشت.

نتایج بررسی نشان داد به طور متوسط در حدود ۱۶ درصد از سطوح مقاطع عرضی رودخانه اروند را نواحی ماندابی تشکیل می‌دهند که بیشتر این نواحی شامل تل ماسه‌های بستر و ناهمواری‌های موجود در بدنه رودخانه می‌باشد، نکته‌ای که جلب توجه می‌کند کانال‌های آبیاری جزرومدی در جوانب رودخانه است که تعداد آن‌ها با توجه به مشاهدات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای نیز کم نیست. ورودی این کانال‌ها در مجاورت رودخانه منجر به تغییرات و به هم ریختن جریان آب در رودخانه می‌شود و عموماً سرعت آب در دهانه ورودی این کانال‌ها کمتر است. این عامل به طور مستقیم ناحیه ماندابی نیست؛ اما اثرات کاملاً مشابه در طول رودخانه دارد و عموماً اثر آن در مدل‌های یک‌بعدی دیده نمی‌شوند. با مقایسه سه ایستگاه اندازه‌گیری غلظت در طول رودخانه می‌توان گفت در ایستگاه‌های Dweeb و Sehan اثر نواحی ماندابی همچون پیچ و خم رودخانه به وضوح

## نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهبود شبیه‌سازی انتقال مواد محلول در رودخانه‌های تحت سلطه فرایند پراکندگی یک چارچوب برای اصلاح مدل‌های یک بعدی مرسوم به منظور افزایش دقت مدل‌سازی و نزدیک کردن آن به شرایط واقعی، ارائه داده است. این چارچوب فاکتوری اصلاحی مبتنی بر نسبت سطح مقطع عرضی نواحی ماندابی به سطح مقطع عرضی رودخانه را برای اصلاح سرعت جریان و ضریب پراکندگی در شرایط غیریکنواخت و غیرماندگار در معادلات اعمال می‌کند. در این مطالعه از مدل یک بعدی MIKE11 برای رودخانه مرزی و جزرومدی اروند استفاده شد. در نهایت با به‌کارگیری تئوری فراابتکاری بهینه‌سازی الگوریتم مورچگان ضرایب مربوط به نواحی ماندابی و متغیرهای پراکندگی بهینه شدند و تغییرات به مدل معرفی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی در دو حالت یعنی اعمال کردن ضرایب بهینه و حالت پایه با مقادیر مشاهداتی موجود، حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی کیفیت آب اروندرود در مدل اصلاح شده است. در مرحله بهینه‌سازی با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی ضرایب  $a = ۰/۹۴$ ،  $b = ۲۷۳/۴$ ،  $\eta = ۰/۱۶۸$  تخمین دقیق‌تری از

دخیل در مدل مورد بررسی قرار گیرد. از نتایج این پژوهش می‌توان در جهت دقت بالاتر در شبیه‌سازی‌های یک بعدی کیفیت آب و نزدیک کردن مدل‌ها به شرایط واقعی در رودخانه‌ها بهره برد.

### سپاسگزاری

نویسندگان وظیفه خود می‌دانند که از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به دلیل حمایت مالی از این پژوهش، تقدیر و تشکر نمایند.

مشخص است و در مدل اصلاح شده دقت شبیه‌سازی با تغییرات بیشتری بهبود یافته؛ اما در ایستگاه Faw به علت نزدیک بودن به مصب رودخانه، اثرگذاری نواحی ماندابی مانند پیچ و خم در رودخانه کمتر است، همچنین به علت نزدیکی به آب شور خلیج فارس کانال‌های آبیاری کمتری احداث شده است. به همین علت اختلاف زیادی در مدل پایه و اصلاح شده رخ نداده است. رودخانه اروندرود یکی از رودخانه‌های پراهمیت کشور است که با توجه به شرایط مرزی آن اطلاعات اندازه‌گیری شده محدودی در دسترس و به عنوان یک رودخانه نمونه در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت پیشنهاد می‌شود برای دیگر رودخانه‌ها با داده‌های اندازه‌گیری کامل تر اثر نواحی ماندابی در مدل‌های یک بعدی با تغییر ضرایب

### منابع

1. Abarca, E., Carrera, J., Voss, C.I., & Sánchez-Vila, X. (2002). *Effect of aquifer bottom morphology on seawater intrusion*. 17<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting (SWIM).
2. Abdullah, A.D., Gisen, J.I.A., Van Der Zaag, P., Savenije, H.H.G., Karim, U.F.A., Masih, I., & Popescu, I. (2016). Predicting the salt water intrusion in the Shatt al-Arab estuary using an analytical approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-20-4031-2016>.
3. Abdullah, A.D., Masih, I., van der Zaag, P., Karim, U.F.A., Popescu, I., & Al Suhail, Q. (2015). Shatt al Arab River system under escalating pressure: a preliminary exploration of the issues and options for mitigation. *International Journal of River Basin Management* 13(2): 215–227.
4. Abdullah, A.D., Popescu, I., Dastgheib, A., van der Zaag, P., Masih, I., & Karim, U.F.A. (2017). Analysis of possible actions to manage the longitudinal changes of water salinity in a tidal river. *Water Resources Management* 31(7): 2157–2171.
5. Al-Aesawi, Q., Al-Nasrawi, A.K.M., Jones, B.G., & Yang, S.-Q. (2021). Geomatic freshwater discharge estimations and their effect on saltwater intrusion in alluvial systems: a case study in Shatt Al-Arab estuary. *Environmental Earth Sciences* 80(18): 1–15.
6. Al-Asadi, S.A.R. (2017). The future of freshwater in Shatt Al-Arab River (Southern Iraq). *Journal Geography Geology* 9(2): 24–38.
7. Al-Battat, M.Q. (2019). Empirical prediction model of salt intrusion along Shatt Al-Arab River, southern Iraq. *Mesopotamian Journal of Marine Sciences* 34(1): 1–12.
8. 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).
9. Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews* 2(4): 353–373.
10. Chapra, S.C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland press.
11. Cheme, E.K., Mazaheri, M., Karami Cheme, E., & Mazaheri, M. (2021). The effect of neglecting spatial variations of the parameters in pollutant transport modeling in rivers. *Environmental Fluid Mechanics* 21(3): 587–603.
12. Choi, S.Y., Seo, I.W., & Kim, Y.-O. (2020). Parameter uncertainty estimation of transient storage model using Bayesian inference with formal likelihood based on breakthrough curve segmentation. *Environmental Modelling & Software* 123: 104558.
13. DHI. (2016). *'Mike 11 – User Guide'*. Danish Hydraulic Institute, p. 512.
14. Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 1(4): 28–39.
15. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). Ant colony optimization: overview and recent advances. *Handbook of Metaheuristics* 311–351.
16. Eslami, S., Hoekstra, P., Nguyen Trung, N., Ahmed Kantoush, S., Van Binh, D., Do Dung, D., Tran Quang, T., & van der Vegt, M. (2019). Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation. *Scientific Reports* 9(1): 1–10.
17. Etemad-Shahidi, A., Parsa, J., & Hajiani, M. (2011). Salinity intrusion length: comparison of different approaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* 164(1): 33–42.

18. Gong, W., Lin, Z., Zhang, H., & Lin, H. (2022). The response of salt intrusion to changes in river discharge, tidal range, and winds, based on wavelet analysis in the Modaomen estuary, China. *Ocean & Coastal Management* 219: 106060.
19. Gooseff, M.N., Wondzell, S.M., Haggerty, R., & Anderson, J. (2003). Comparing transient storage modeling and residence time distribution (RTD) analysis in geomorphically varied reaches in the Lookout Creek basin, Oregon, USA. *Advances in Water Resources* 26(9): 925–937. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(03\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(03)00105-2).
20. Guo, Y. (2022). Hydrodynamics in Estuaries and Coast: Analysis and Modeling. In *Water* 14(9): 1478. MDPI.
21. Haddout, S., Priya, K.L., & Adarsh, S. (2020). A predictive model for salt intrusion in estuaries applied to the Muthupet estuary (India) and Bouregreg estuary (Morocco). *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 26(4): 430–447.
22. Hussain, M.S., Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A., & Sherif, M.M. (2019). Management of seawater intrusion in coastal aquifers: a review. *Water* 11(12): 2467.
23. Kanda, E.K., Kosgei, J.R., & 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): 298–304.
24. Kelleher, C., Wagener, T., McGlynn, B., Ward, A.S., Gooseff, M.N., & Payn, R.A. (2013). Identifiability of transient storage model parameters along a mountain stream. *Water Resources Research* 49(9): 5290–5306.
25. Khodambashi Emami, S., & Mazaheri, M. (2022). 'Sensitivity analysis of transient storage parameters in mathematical modeling of pollution transport in rivers containing storage Zone', *Irrigation Sciences and Engineering*. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/jise.2022.39365.2009>.
26. Kwon, S., Noh, H., Seo, I.W., Jung, S.H., & Baek, D. (2021). Identification framework of contaminant spill in rivers using machine learning with breakthrough curve analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(3): 1023.
27. 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): 1–11.
28. Mai, N.T.P., Kantoush, S., Sumi, T., Thang, T.D., & Binh, D.V. (2019). *The influences of tidal regime and morphology change on salinity intrusion in Hau river*. E-Proceedings of the 38<sup>th</sup> IAHR World Congress.
29. Martin, J.L., McCutcheon, S.C., & Schottman, R.W. (2018). *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. CRC press.
30. Mohamed, A.-R.M., & Abood, A.N. (2017). Compositional change in fish assemblage structure in the Shatt Al-Arab River, Iraq. *Asian Journal of Applied Sciences* 5(5).
31. Montazeri, A., Mazaheri, M., & Morid, S. (2022). 'Mathematical model of salinity intrusion in the Arvand Tidal river and its effect on salinity of lands around the River', *Journal of Environmental Studies* 48(2): 221-248. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jes.2022.334989.1008258>.
32. Montazeri, A., Mazaheri, M., Morid, S., & Mosaddeghi, M.R. (2023). Effects of upstream activities of Tigris-Euphrates River Basin on water and soil resources of Shatt al-Arab Border River. *Science of The Total Environment* 858: 159751.
33. Nhung, T.T., Le Vo, P., Van Nghi, V., & Bang, H.Q. (2019). Salt intrusion adaptation measures for sustainable agricultural development under climate change effects: A case of Ca Mau Peninsula, Vietnam. *Climate Risk Management* 23: 88–100.
34. Pereira, H., Sousa, M.C., Vieira, L.R., Morgado, F., & Dias, J.M. (2022). Modelling salt intrusion and estuarine plumes under climate change scenarios in two transitional ecosystems from the NW Atlantic coast. *Journal of Marine Science and Engineering* 10(2): 262.
35. Rana, S.M.M., Boccelli, D.L., Scott, D.T., & Hester, E.T. (2019). Parameter uncertainty with flow variation of the one-dimensional solute transport model for small streams using Markov chain Monte Carlo. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.003>.
36. Runkel, R.L. (1998). *One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers* (Vol. 98, Issue 4018). US Department of the Interior, US Geological Survey.
37. Saadat, A.M., Mazaheri, M., & MV Samani, J. (2022). *Backward solution (in-time) of the pollution transport equation in river using group preserving scheme*. Ferdowsi Civil Engineering. <https://doi.org/10.22067/jfeci.2022.77645.1165>.
38. Savenije, H.H.G. (2005). *Salinity and tides in alluvial estuaries*. Gulf Professional Publishing.
39. Seo, I.W., & Cheong, T.S. (2001). Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(6): 453–465.
40. Singh, S.K. (2003). Treatment of Stagnant zones in riverine advection-dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2003\)129:6\(470\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:6(470)).
41. Singh, S.K. (2008). Comparing three models for treatment of Stagnant zones in riverine transport. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2008\)134:6\(853\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:6(853)).
42. Tables, A.T. (2014). NP203 admiralty tide tables (ATT), vol 3 Indian Ocean and South China Sea (including Tidal Stream Tables). *Hydrographer to the Navy, Admiralty Hydrography Department Place*.

43. Tong, Y., & Deng, Z. (2015). Moment-based method for identification of pollution source in rivers. *Journal of Environmental Engineering* 141(10): 4015026.
44. UNEP, H. (2001). The Mesopotamian Marshlands: demise of an ecosystem. *Division of Early Warning and Assessment, United Nations Environment Program (UNEP) Nairobi, Kenya*, 46.
45. Ward, A.S., Kelleher, C.A., Mason, S.J.K., Wagener, T., McIntyre, N., McGlynn, B., Runkel, R. L., & Payn, R. A. (2017). A software tool to assess uncertainty in transient-storage model parameters using Monte Carlo simulations. *Freshwater Science*. <https://doi.org/10.1086/690444>.
46. Winn, K.O., Saynor, M.J., Eliot, M.J., & Elio, I. (2006). Saltwater intrusion and morphological change at the mouth of the East Alligator River, Northern Territory. *Journal of Coastal Research* 22(1): 137–149.
47. Yu, Q., Wang, Y., Gao, S., & Flemming, B. (2012). Modeling the formation of a sand bar within a large funnel-shaped, tide-dominated estuary: Qiantangjiang Estuary, China. *Marine Geology* 299: 63–76.
48. Zaghiyan, M.R., & Ketabchi, H. (2022). Investigating the relationship between the river flow and dissolved solids concentration. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 175(2): 89–97.
49. Zaramella, M., Marion, A., Lewandowski, J., & Nützmänn, G. (2016). Assessment of transient storage exchange and advection–dispersion mechanisms from concentration signatures along breakthrough curves. *Journal of Hydrology* 538: 794–801.