



Recovering the salinity intensity of distributed sources in the river using inverse simulation-optimization approach

F. Yousofvand¹, J. Mohammad Vali Samani^{1*}, H. Mohammad Vali Samani²

¹Department of Engineering and Water Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

ABSTRACT: In recent years, the issue of identifying the polluting sources in the rivers has been one of the most important topics in scientific research in the field of water. In the main research, the pollutant sources have been considered as the point sources, and in order to recover pollutant concentration, it is necessary to have an observation point for each source. In this study, the places where groundwater enters to river are considered as distributed sources with known locations and length and the goal is to recover the intensity of sources, using only one observation point. The sources which considered are distributed sources with constant loading and significant distance from each other. The existence of distance among sources prevents the complete mixing of concentration at the observation point. This matter and also the constant intensity of loading, makes it possible to recover several distributed sources using only one observation point. For this purpose, the inverse solution of the advection-dispersion equation is done using the simulation-optimization approach. To design the backward model, MIKE11, linked with a genetic algorithm in MATLAB. Considering one observation point for recovering the intensity of several distributed sources is the advantage of the present study. The model was verified by using hypothetical examples, 40km section of Karun River, and by applying 5 and 15 percent noise to the observation data. The results demonstrate that the backward model can recover the intensity of several sources not only with one observation point but also with data from the concentration versus time curve at the observation point. The accuracy of the model in recovering resource intensity, according to statistical indicators, is more than 99%.

Review History:

Received: Aug. 08, 2022

Revised: Sep. 19, 2023

Accepted: Nov. 14, 2023

Available Online: Dec. 14, 2023

Keywords:

Backward Model

simulation-optimization approach

MIKE11 numerical model

the salinity distributed sources

genetic algorithm

1- Introduction

Determining the intensity of salinity entering the river from the adjacent aquifer, as a distributed source of pollution in the rivers, is an important and challenging issue that can help minimize the consequences and damages of pollutant sources in rivers. Previous studies on solving the inverse problem of the pollutant transport equation fall into three categories in terms the method applied, including [1]:

- probabilistic and geostatistical methods
- mathematical methods
- simulation-optimization methods

In the probabilistic and geostatistical methods, probabilistic and geostatistical distributions is used. In the mathematical methods, the inverse problem is solved only in a mathematical framework. In the simulation-optimization method, the researchers combine an optimization algorithm with other numerical methods of transport and hydrodynamic equations. Ghane et al (2016) applied Backward Probability Method (BPM) in identifying the pollution source location and release time in surface waters, mainly in the rivers. To accomplish this task, a numerical model is developed

based on the adjoint analysis, Then the developed model is verified using analytical solutions as well as real data. The results demonstrated that all suspected points, determined by the BPM could be a possible pollution source [2]. Barati Moghaddam et al (2022) developed a practical method for the simultaneous identification of the number, locations, and release histories of multiple pollutant point sources in a river network using minimum observation data. For this purpose, they solved the inverse advection-dispersion equation using the Backward Probability Method (BPM) [3]. Lu et al (2020) developed a parallel exploratory search strategy based on the Bayesian approach to simultaneously identify the characteristics of pollutant sources and unknown parameters of the groundwater. They significantly reduced the computational cost (about 400 times) by using a combined surrogate model [4].

The assessed problem in this research is entering salinity from distributed (non-point) sources to the rivers and the goal is to identify the salinity intensity of the sources by measuring the temporal distribution of concentration in one observation point in downstream of the river.

*Corresponding author's email: j_samani2003@yahoo.com



2- Methodology

2- 1- Forward transfer model in one-dimensional domain

Forward model is used to generate information at the observation point and also to verify the problem. The equations of forward model include Saint-Venant equations (flow model equations) and advection-dispersion equations. The Saint-Venant equations include mass conservation and momentum conservation equations, which are shown in equations (1) and (2). The advection-dispersion equation is also shown in equation (3).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AkC + C_s Q_s \tag{3}$$

In the above equations, Q is discharge, A is cross-sectional area, h is water level, S_f is friction slope, C is pollutant concentration, D is dispersion coefficient, k is decay coefficient, C_s is concentration of pollutant sources, Q_s is the discharge of pollutant sources, and x and t are respectively the spatial and temporal dimensions.

2- 2- Inverse transfer model in the river

In order to prepare an inverse model, the inverse solution of the transfer equation in the river is applied, using a simulation-optimization approach. For this purpose, a link code between the MIKE11 simulation model and the genetic optimization algorithm in MATLAB has been developed. The objective function is defined as follows:

$$F = \sum_{i=1}^n (c_i^{obs} - c_i^{cal})^2 \tag{4}$$

In the above equation, C_i^{obs} is observed salinity concentration at the observation point and C_i^{cal} is calculated salinity concentration, which is calculated from the inverse solution of transfer equation for different iterations.

3- Results and Discussion

3- 1- First example: Recovering the salinity intensity of a distributed source with one observation point

After designing and executing the forward model in this example, diagram of concentration versus time at the observation point is obtained as shown in Figure 1. Due to the existence of only one distributed source with constant loading ($S1=15\text{kg/s}$), only one step is formed in the diagram

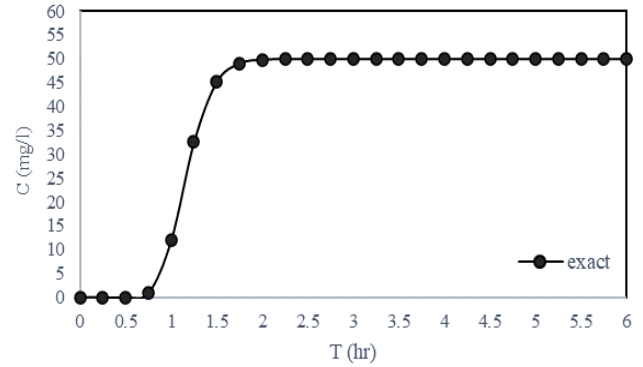


Fig. 1. Diagram of concentration versus time at observation point of the first example

Table 1. Exact and computed salinity intensity of S1

Source Number	W exact (kg/s)	W computed (kg/s)	RE_W
S1	15	15.00002	0.00013

of concentration versus time at the observation point. By using available data in the diagram and running the inverse model, the salinity intensity of S1 was recovered with high accuracy (Table 1).

3- 2- Second example: Recovering the salinity intensity of two distributed sources with one observation point

The purpose of this example is to investigate the appropriate arrangement of two distributed salinity sources with constant loading, in terms of the distance between them, to prevent the complete mixing of source concentrations at the observation point. Two sources are examined in three cases with different distances from each other. By comparing obtained results, observed that in adjacent or very close sources, the concentration versus time curves at the observation point will contain little or no information required to recover both sources.

3- 3- Third example: Validation of the inverse model using hypothetical salinity sources for the Karun River

In this example, the inverse model is validated by considering three hypothetical sources for a section of the Karun River. The recovery results of S1, S2, and S3 are presented in Table 2.

4- Conclusion

By using only one observation point located downstream of several distributed sources that are located at an appropriate distance from each other, the salinity intensity of sources can be recovered. The appropriate distance between the sources

Table 2. Exact and computed salinity intensity of S1, S2 and S3 and relative error index

Source Number	<i>W</i> exact (kg/s)	Start chainage (m)	End Chainage (m)	<i>W</i> calculated (kg/s)	RE _w (%)
S1	18	1000	1500	17.9752	0.1378
S2	44	16000	16700	44.0205	0.0466
S3	20	32500	34100	20.0036	0.018

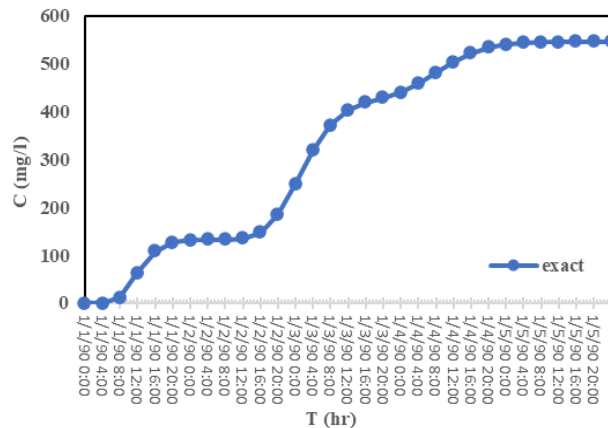


Fig. 2. Diagram of concentration versus time at observation point (p=37.543km)

leads to the non-complete mixing of source concentrations at the observation point.

Despite the error level of 5 and 15 percent in observation data, the proposed inverse model is capable of recovering the salinity intensity of distributed sources with high accuracy.


The accuracy of the model in recovering the source intensity, even with errors of observation data, is more than 99 percent.

References

[1] M. Mazaheri, Mathematical Model for Identification of Pollution Sources in the Rivers: Reconstruction of Location and Release History of the Sources, Ph.D. Thesis in Water Structures Engineering, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, (2011) (In Persian).
 [2] A. Ghane, M. Mazaheri, J.M.V. Samani, Location and release time identification of pollution point source in river networks based on the Backward Probability

Method, Journal of Environmental Management, 180 (2016) 164-171.

[3] M. Barati Moghaddam, M. Mazaheri, J.M.V. Samani, F. Boano, An Innovative Framework for Real Time Monitoring of Pollutant Point Sources in River Networks, Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, (2022) 1-28.
 [4] W. Lu, H. Wang, J. Li, Parallel heuristic search strategy based on a Bayesian approach for simultaneous recognition of contaminant sources and aquifer parameters at DNAPL-contaminated sites, Environmental Science and Pollution Research, (2020), 1-15.

<p>HOW TO CITE THIS ARTICLE <i>F. Yousofvand, J. Mohammad Vali Samani, H. Mohammad Vali Samani, Recovering the salinity intensity of distributed sources in the river using inverse simulation-optimization approach, Amirkabir J. Civil Eng., 55(12) (2024) 523-526.</i> DOI: 10.22060/ceej.2023.21675.7791</p>	
---	---



بازیابی شدت شوری منابع گسترده در رودخانه با استفاده از رویکرد معکوس شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

فاطمه یوسفوند^۱، جمال محمودلی سامانی^{۲*}، حسین محمودلی سامانی^۲

۱- گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳

کلمات کلیدی:

مدل معکوس
رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی
مدل عددی MIKE11
منابع گسترده شوری
الگوریتم ژنتیک

خلاصه: در سال‌های اخیر مسئله شناسایی منابع آلاینده در رودخانه‌ها یکی از پرتوجه‌ترین موضوعات تحقیقات علمی در حوزه‌ی آب بوده است. در عمده‌ی پژوهش‌های انجام‌شده، منابع آلاینده، نقطه‌ای در نظر گرفته شده‌اند و برای بازیابی شدت آلاینده نیاز است، یک نقطه‌ی شاهد در پایین‌دست هر منبع در نظر گرفته شود. در این پژوهش محل‌های ورود آب زیرزمینی به رودخانه، به عنوان منابعی گسترده با مکان و طول معلوم در نظر گرفته می‌شوند و هدف بازیابی شدت منابع، تنها با استفاده از یک نقطه شاهد در پایاب رودخانه است. منابع موردنظر، منابعی گسترده با بارگذاری ثابت و در فاصله قابل توجهی از هم هستند. وجود فاصله، مانع از اختلاط کامل غلظت در نقطه شاهد می‌شود. این امر و نیز ثابت بودن شدت بارگذاری باعث می‌شود بتوان تنها با یک نقطه شاهد، چند منبع گسترده را بازیابی کرد. بدین منظور حل معکوس معادله انتقال با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی انجام می‌شود. در تهیه مدل معکوس از پیوند MIKE11 به عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم ژنتیک در MATLAB استفاده شده است. بازیابی چندین منبع گسترده با یک نقطه شاهد، مهم‌ترین نقطه قوت پژوهش حاضر می‌باشد. صحت‌سنجی مدل توسط مثال‌های فرضی، ۴۰ کیلومتر از رودخانه کارون و نیز اعمال ۵ و ۱۵ درصد خطا به داده‌های مشاهداتی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد مدل قادر است، نه تنها با یک نقطه شاهد بلکه فقط با یک داده از نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد که تحت تاثیر منبع موردنظر باشد، شدت را بازیابی نماید. دقت مدل در بازیابی شدت منابع، براساس شاخص‌های آماری بیش از ۹۹ درصد می‌باشد.

۱- مقدمه

بوده و آبخوان تغذیه‌کننده جریان سطحی است. حال اگر آب‌زیرزمینی حامل شوری باشد، این شوری را با خود وارد آب سطحی می‌کند. تعیین شدت شوری وارد شده به رودخانه از آبخوان مجاور، به‌عنوان یک منبع گسترده‌ی آلودگی در رودخانه‌ها، مسئله‌ای مهم و چالش برانگیز است که می‌تواند در به حداقل رساندن تبعات و خسارات منابع آلاینده در رودخانه‌ها مفید واقع گردد. بازیابی منابع آلودگی در رودخانه‌ها نیازمند حل معکوس معادله انتقال در رودخانه است. با بررسی کلی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه حل معکوس معادله انتقال، می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد محققین مختلف در برخورد با این مسئله، از حیث روش حل، به سه حالت قابل طبقه‌بندی است [۱]:

- حل معکوس مسئله با استفاده از روش‌های احتمالاتی و زمین‌آماری
- حل معکوس مسئله با استفاده از روش‌های ریاضی
- حل معکوس مسئله به‌صورت یک مسئله شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

در حل معکوس معادله انتقال با استفاده از روش‌های احتمالاتی و زمین‌آماری، پارامترهای مجهول از طریق توزیع‌های احتمالاتی توصیف

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و نیاز به تامین آب کافی، حفظ و حراست از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دهه‌های اخیر مورد توجه دولت‌ها قرار گرفته است. از این رو مسئله شناسایی منابع آلاینده در محیط‌های آبی نیز یکی از پرتوجه‌ترین موضوعات تحقیقات علمی در حوزه‌ی آب بوده است. بیشتر رودخانه‌ها توسط صنایع ایجاد شده در اطراف آن‌ها آلوده می‌شوند. یکی دیگر از موارد حائز اهمیت در شناسایی منابع آلاینده در رودخانه‌ها، انتقال شوری از آب زیرزمینی به رودخانه‌هاست که در مناطق متعددی از جهان و از جمله در ایران مشاهده شده است. این مسئله زمانی اتفاق می‌افتد که شرایط دبی در رودخانه تغییر کند، مثلاً در فصل تابستان به علت پایین بودن سطح آب در رودخانه یا بالا بودن سطح ایستابی آب‌زیرزمینی، آب‌زیرزمینی بر آب سطحی مسلط شده و بخشی از جریان آب‌زیرزمینی به رودخانه منتقل می‌شود. در این حالت، سیستم آب سطحی و آبخوان متصل

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j_samani2003@yahoo.com



روش‌ها به صورت مستقیم معادله‌ی معکوس را حل می‌کنند. به علاوه همراه با روش‌های ریاضی، به منظور حل مسئله‌ی بدخیم نیاز به استفاده از یک روش تنظیم است. این روش‌ها هزینه محاسباتی کمتری داشته، اما در مقابل از لحاظ ریاضی پیچیدگی‌های خاص خود را دارند. **Deng و Tong** در سال ۲۰۱۲ با استفاده از تبدیل لاپلاس روشی را به منظور تخمین تابع رهاشده و همچنین جرم رهاشده ارائه کردند. در این پژوهش با به کارگیری تبدیل لاپلاس معادله‌ی مومنتوم استخراج شده و سپس شبیه‌سازی برای لایه‌های مختلف جریان انجام می‌شود. این مدل در پنج رودخانه واقعی بکار گرفته شده است [۹]. **Liu و Wang** (۲۰۱۲) روشی تحلیلی را به منظور شناسایی منبع آلاینده نقطه‌ای و در یک بعد ارائه کردند. روش تحلیلی مذکور نیازمند وجود اطلاعات رصد شده از دو نقطه‌ی متمایز در طول بازه رودخانه است [۱۰]. **Li و Wong** در سال ۲۰۱۴ روشی را بر اساس تابع پایه شعاعی^۲ و به منظور تخمین منبع آلاینده در رودخانه‌ها ارائه کردند [۱۱]. **Mazaheri** و همکاران (۲۰۱۵) به تعیین منابع آلاینده‌ی فعال در رودخانه و توابع شدت آن‌ها در حالت‌های یک و دو بعدی با کمک روش تابع گرین پرداختند. آن‌ها نشان دادند در تمام مثال‌های فرضی و واقعی در حالاتی که آرایش نقاط شاهد نسبت به منابع آلاینده مناسب باشد، نتایج مدل معکوس در بازیابی توابع شدت منابع آلاینده با دقت مناسبی قابل قبول خواهد بود [۱۲]. **Hamdi** (۲۰۱۷) مسئله بازیابی مشخصات منابع آلاینده نقطه‌ای چندگانه وابسته به زمان در قالب معادله غیرخطی یک بعدی را در نظر گرفت و اثبات کرد که اگر تعداد منابع آلاینده فعال بیش از دو منبع باشد، داده‌های ثبت شده غلظت در نقاط شاهد واقع در بالادست و پایین دست تمام منابع آلاینده قادر به بازیابی مشخصات منابع به صورت یکتا نمی‌باشند. وی سپس بر مبنای برخی تکنیک‌های پاسخ ضربه^۳ شرایط تئوری مورد نیاز برای حصول نتایج یکتا را شرح داد [۱۳]. **Mashhadgarme** و همکاران (۲۰۲۱) حل تحلیلی معادله انتقال آلودگی در حالت دو بعدی را به ازای شرط اولیه کلی و منابع فعال آلاینده نقطه‌ای با الگوهای زمانی دلخواه در دامنه محدود با استفاده از تکنیک تبدیل انتگرالی تعمیم یافته به دست آوردند. به منظور ارزیابی عملکرد حل تحلیلی استخراج شده، نتایج حاصله از حل تحلیلی پیشنهادی با حل تحلیلی با استفاده از روش تابع گرین در قالب دو مثال فرضی مجزا مقایسه شد. کانتورهای غلظت حاصله در هر دو مثال، انطباق حل تحلیلی پیشنهادی با حل تحلیلی با استفاده از روش تابع گرین را نشان می‌دهد [۱۴].

می‌شوند و سعی بر این است تا پاسخ‌های مسئله با حداقل تکرار و بدون شبیه‌سازی‌های متعدد محاسبه گردد. **Jia و Cheng** در سال ۲۰۱۰ مدلی احتمالاتی را به منظور تعیین مکان و زمان رهاسازی آلاینده به صورت دوبعدی ارائه کردند. مدل مذکور تنها برای شرایط ماندگار قابل کاربرد است [۲]. **Dang** و همکاران (۲۰۱۱) روش ریاضی مدل‌سازی و الگوریتم شبیه‌سازی لکه نفتی را ارائه کردند. در این مقاله ارتباط بین روش جزء الحاقی و مسئله‌ی حرکت لکه نفتی بیان شده و نشان داده می‌شود که معادله‌ی حرکت لکه نفتی همان معادله‌ی الحاقی است. بر اساس همین تساوی یک روش جدید شناسایی منبع آلاینده ارائه می‌شود [۳]. **Yuan** و همکاران (۲۰۱۳) روشی را بر اساس ترکیبی از روش‌های بیزی و روش‌های مونت کارلو به منظور شناسایی منابع آلاینده با الگوی تخلیه‌ی ناگهانی در آب‌های سطحی ارائه کردند [۴]. پس از آن‌ها **Yang** و همکاران در سال ۲۰۱۵، مدل را به صورتی ارتقا دادند که مدل قادر به تشخیص چندین منبع آلاینده به صورت هم‌زمان گردید [۵]. **Ghane** و همکاران (۲۰۱۶) با تکیه بر مدل احتمال برگشتی به شناسایی زمان و مکان ورود آلاینده نقطه‌ای به شبکه‌ی رودخانه پرداختند. در این پژوهش یک مدل عددی بر اساس آنالیز جزء الحاقی توسعه داده شد. همچنین نشان داده شد که معادله‌ی حاکم بر حرکت احتمال جزء الحاقی معادله‌ی انتقال است [۶]. **Lee** و همکاران (۲۰۱۸) مسئله شناسایی مکان یک منبع آلاینده با الگوی تخلیه ناگهانی در شبکه رودخانه را مدنظر قرار دادند. آن‌ها با تحلیل تغییرات در سطوح غلظت مشاهده شده در شبکه‌ای از سنسورها و استفاده از مدل جنگل تصادفی^۱، احتمال اینکه هر مکان بالقوه برای رهاسازی مکان واقعی رهاسازی باشد را به صورت عددی بین صفر تا یک نشان دادند [۷]. **Barati moghad-dam** و همکاران (۲۰۲۲) نیز روشی کاربردی را برای تشخیص منابع آلاینده در رودخانه‌ها تحت شرایط واقعی، توسعه دادند. برای این منظور معادله معکوس جابه‌جایی-پراکندگی را با استفاده از روش ژئواستاتیستیک حل کردند. آن‌ها همچنین میزان عدم قطعیت در بازیابی مشخصات منابع آلاینده را با محاسبه بازه اطمینان ۴۵ درصد در نظر گرفتند. نتایج اجرای مدل برای سه مثال فرضی و دو سری داده واقعی، حاکی از دقت مطلوب و پایداری عددی بالای مدل در بازیابی مشخصات منابع آلاینده حتی در شرایط پیچیده و نزدیک به واقعیت و با استفاده داده‌های مشاهداتی ناقص و دارای خطا بود [۸].

رویکرد دوم به منظور حل مسئله رویکرد ریاضی است. عموماً این

2 Radial Basis Function
3 Impulse response techniques

جستجوی اکتشافی موازی را بر اساس رویکرد بیزی، برای شناسایی همزمان مشخصات منابع آلاینده و پارامترهای مجهول سفره آب زیرزمینی توسعه دادند. آن‌ها با به کارگیری یک مدل جایگزین ترکیبی، هزینه محاسبات را به طور قابل توجهی (در حدود ۴۰۰ برابر) کاهش دادند. کاربرد روش ارائه شده در قالب یک مثال فرضی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استراتژی جستجوی اکتشافی موازی قادر به شناسایی همزمان مشخصات منابع آلاینده و پارامترهای مجهول سفره آب زیرزمینی با دقت قابل قبولی است [۲۱]. Jamshidi و همکاران (۲۰۲۰ و ۲۰۲۱)، از رویکرد شبیه سازی-بهینه سازی برای حل معکوس معادله انتقال آلودگی در یک سیستم یکپارچه به منظور شناسایی مشخصات منبع آلاینده رهاسده در آبخوان تا رسیدن به رودخانه مجاور و حرکت در طول مسیر جریان، تنها از روی اطلاعات غلظت-زمان اندازه‌گیری شده در ایستگاه کنترل رودخانه استفاده نمودند. به دلیل تکرارهای زیاد الگوریتم بهینه‌سازی در این رویکرد که منجر به هزینه محاسباتی بسیار بالایی خواهد شد، یک مدل جایگزین شبیه‌سازی براساس تئوری تابع انتقال به کار برده شد. مقایسه مدل‌ها و ارزیابی مزایا و معایب هر کدام برای دو مثال صورت پذیرفت. نتایج حاکی از سرعت بیش‌تر مدل جایگزین پیشنهادی در بازیابی مشخصات منبع آلاینده حتی با استفاده از داده‌های مشاهداتی دارای خطا بوده است [۲۲ و ۲۳]. Essouayed و همکاران (۲۰۲۰) یک استراتژی جمع‌آوری داده ابتکاری را برای شناسایی منبع آلاینده در آب‌های زیرزمینی توسعه دادند. استراتژی مذکور بر مبنای یک رویکرد تکراری قرار دارد که در هر مرحله از بازیابی مکان منبع آلاینده، با افزودن نقاط شاهد درصد به حداقل رساندن عدم قطعیت در نتایج است. این محققین ادعا کردند که روش ارائه شده قابلیت کاربرد در شرایط واقعی را دارد، زیرا به تعداد کمی نقطه شاهد در شروع فرآیند تکرار و درنهایت یک یا دو مکان داده برداری اضافی نیاز دارد [۲۴].

همانطور که بیان شد مسئله‌ی یافتن خصوصیات منابع آلاینده، موضوع موردتوجه بسیاری از پژوهش‌های پیشین است. غالب پژوهش‌ها و روش‌های توسعه داده‌شده توسط پژوهشگران، قابل کاربرد در منابع آب زیرزمینی بوده و تعداد روش‌های پیشنهادی در آب سطحی بسیار محدود است. در عمده‌ی پژوهش‌های انجام‌شده در آب سطحی نیز منابع آلاینده منابعی نقطه‌ای در نظر گرفته شده‌اند و محققین تاکید داشته‌اند که جهت بازیابی غلظت آلاینده رها شده از منابع نیاز است تا به ازای هر منبع آلاینده، یک نقطه‌ی شاهد در پایین‌دست آن در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر با یک نقطه شاهد نمی‌توان چند منبع آلودگی را بازیابی کرد و باید بین منابع نقاط شاهدی در

رویکرد مهم دیگر در حل معکوس معادله انتقال، رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی است. در رودخانه‌هایی با مقیاس‌های بزرگ روش‌های شبیه‌سازی - بهینه‌سازی پیشنهاد می‌گردد [۱۵]. در این روش‌ها یک الگوریتم بهینه‌سازی با روش‌های عددی حل جریان و انتقال ترکیب می‌شود. شبیه‌سازی تا زمانی که مدل مشخصات منبع را تخمین بزند ادامه خواهد داشت. هزینه محاسباتی این روش‌ها معمولاً بالا است. همچنین چون این روش تعداد بی‌شماری از پاسخ‌ها را در برداشت، نیاز بود یک روش بهینه‌سازی بهترین و بهینه‌ترین پاسخ را از بین آن‌ها تعیین کند. کاربرد این روش در شناسایی منابع آلاینده در آب‌های زیرزمینی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته و کارایی آن تایید شده است. با این حال استفاده از این رویکرد در حل معکوس معادله انتقال در رودخانه به دهه‌ی اخیر محدود می‌شود. Jha و Datta (۲۰۱۱) با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی به حل معکوس معادله انتقال و شناسایی منابع آلاینده نقطه‌ای در آب‌های زیرزمینی پرداختند [۱۶]. Telci و Aral (۲۰۱۱) با ترکیب قضیه‌ی بیز و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک روشی را به‌منظور تعیین مکان رهاسازی آلاینده با الگوی تخلیه ناگهانی ارائه کردند. نتایج حاصل از کاربرد این مدل در شبکه رودخانه التاماه^۱ در ایالت جورجیای آمریکا قابل قبول گزارش شده است [۱۷]. Nardo و همکاران در سال ۲۰۱۵ مدلی یک‌بعدی را بر اساس روش تنظیم حداقل مربعات با استفاده از اطلاعات دریافت شده از حسگرهای زیستی ارائه کردند. این مدل قادر به تشخیص مکان و زمان رهاسازی آلاینده در رودخانه بوده، اما کاربرد آن در شرایطی است که چندین نقطه‌ی برداشت در طول رودخانه موجود باشد [۱۸]. Zhang و Xin در سال ۲۰۱۷ با استفاده از الگوریتم ژنتیک روشی را به‌منظور تخمین مشخصات آلاینده‌ای که به‌صورت ناگهانی به رودخانه تخلیه می‌شود را ارائه کردند. در این پژوهش از رابطه‌ی تحلیلی انتقال آلاینده به‌صورت یک‌بعدی و غیر ماندگار در جهت تشکیل تابع هدف بهینه‌سازی استفاده شده است [۱۹]. Esfahani و Datta (۲۰۱۸) با استفاده مدل برنامه‌ریزی ژنتیک تعلیم دیده (GP) به‌عنوان مدل جایگزین در ارتباط با روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی لینک شده، روشی برای طراحی بهینه شبکه پایش به‌منظور شناسایی منبع آلاینده در آب‌های زیرزمینی ارائه دادند. کاربرد روش مذکور برای شناسایی منابع آلاینده گسترده (غیر نقطه‌ای) در یک سیستم آب زیرزمینی آلوده ارائه شد [۲۰]. Lu و همکاران (۲۰۲۰) یک استراتژی

می‌شود (محل تشکیل پله دوم، از C تا D). بار دیگر منبع سوم به نقطه شاهد رسیده (نقطه D) و روند تغییرات غلظت صعودی می‌شود. در نهایت غلظت در حداکثر مقدار حاصل از سه منبع ثابت می‌شود (محل تشکیل پله سوم، از E تا F). با اضافه شدن منابع دیگر روند تغییرات غلظت در نقطه شاهد به همین ترتیب ادامه می‌یابد. این موضوع با تشکیل پله‌هایی در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد مشهود است (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به علت وجود سه منبع گسترده با بارگذاری ثابت، سه پله در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد تشکیل شده است. از زمان صفر تا زمان B غلظت فقط تحت تاثیر منبع اول، از زمان B تا زمان D غلظت تحت تاثیر دو منبع اول و دوم و از زمان D تا زمان F نیز غلظت تحت تاثیر هر سه منبع اول، دوم و سوم می‌باشد که نشان دهنده اختلاط غلظت ناشی از هر سه منبع است. بنابراین در این حالت نیز منابع دچار اختلاط اثر در نقطه شاهد می‌شوند، اما به علت عدم اختلاط کامل منبع اول و وجود نقاطی در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد که فقط تحت تاثیر منبع اول است، امکان بازیابی مشخصات همه منابع به صورت گام به گام وجود دارد.

در این پژوهش، به منظور بازیابی شدت شوری وارده به رودخانه در محل‌های اندرکنش با سفره آب زیرزمینی، حل معکوس معادله انتقال در رودخانه با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی انجام می‌شود. در این پژوهش، شرایط جریان در رودخانه ماندگار فرض شده است. با توجه به موجود نبودن اطلاعات اندازه‌گیری شده در رودخانه و مطابق روال پژوهش‌های مشابه، حل مستقیم معادله انتقال در رودخانه با هدف محاسبه اطلاعات لازم در نقطه شاهد (یک نقطه‌ی دلخواه در پایین‌دست رودخانه) ضروری است. بنابراین ابتدا مدل مستقیم مسئله به منظور تعیین نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد اجرا می‌شود. سپس با داشتن اطلاعات موردنیاز در این نقطه و استفاده از مدل معکوس ارائه شده، به بازیابی شدت شوری هر یک از منابع پرداخته می‌شود. در ادامه مبانی نظری و جزئیات هر یک از مدل‌های مستقیم و معکوس تشریح می‌گردد.

۲-۱- مدل مستقیم انتقال یک بعدی

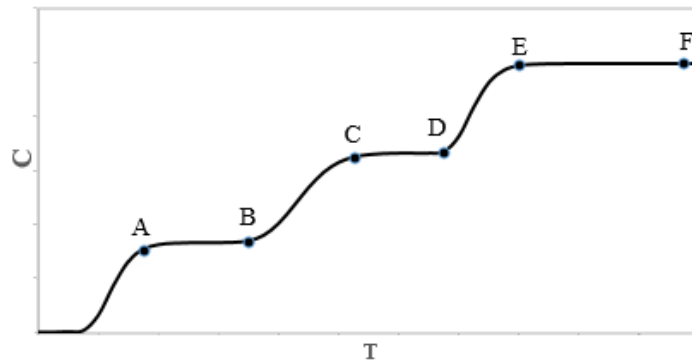
همانطور که گفته شد مدل مستقیم به منظور تولید اطلاعات در نقطه شاهد و نیز برای صحت‌سنجی و ممیزی مسئله استفاده می‌شود. مدل مستقیم دارای دو بخش، مدل جریان و مدل جابه‌جایی-پراکندگی است. روال اجرای مدل به این صورت است که ابتدا مدل جریان حل و خروجی‌های آن که شامل سرعت و عمق در مکان‌ها و زمان‌های مختلف است همراه با مکان و

نظر گرفته شود. در غیر این صورت بازیابی صحیح منابع آلاینده امکان پذیر نخواهد بود. علت این امر در اختلاط اثر منابع در نقطه شاهد است. بدین معنا که وقتی منابع از هم فاصله کمی دارند، در نقطه شاهد با هم مختلط می‌شوند و چون تاثیر منابع اختلاط یافته است با یک نقطه شاهد نمی‌توان چند منبع را بازیابی کرد. در نظر گرفتن چندین نقطه شاهد در طول رودخانه خود منجر به تحمیل هزینه فراوان خواهد شد. در این پژوهش سعی بر این است تا به ارائه روشی کاربردی برای حل معکوس معادله انتقال در رودخانه مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، به منظور بازیابی شدت شوری وارده به رودخانه از آبخوان مجاور پرداخته شود. به عبارت دیگر در این پژوهش محل‌های ورود آب زیرزمینی به رودخانه، به عنوان یک یا چند منبع گسترده که دارای مکان و طول معلوم‌اند در نظر گرفته می‌شوند و هدف بازیابی شدت شوری این منابع ($W(kg/s)$)، تنها با استفاده از یک نقطه شاهد در پایین‌دست رودخانه می‌باشد. در نظر گرفتن تنها یک نقطه شاهد در بازیابی چند منبع گسترده شوری، تعیین فاصله مکانی مناسب بین دو منبع گسترده از روی هیدروگراف غلظت-زمان در نقطه شاهد، به منظور تشخیص امکان استفاده از مدل معکوس ارائه شده و ارائه چهارچوب کلی برای بازیابی منابع گسترده در شرایط مختلف، از مهم‌ترین نقاط قوت پژوهش حاضر تلقی می‌گردند.

۲- مبانی نظری

منابع موردنظر در این پژوهش منابعی گسترده با بارگذاری ثابت اند که در فاصله مناسب از هم قرار دارند. منابع گسترده آلودگی که دارای بارگذاری ثابت هستند، با توجه به نوع بارگذاری (شدت ثابت در طول زمان) و نیز به علت پدیده‌های جابه‌جایی^۱ و پراکندگی^۲ که دو عامل مهم انتقال آلودگی در رودخانه‌ها می‌باشند، غلظت ماده آلاینده را در سرتاسر رودخانه در مدت زمان کوتاهی افزایش داده و سپس در مقدار حداکثر خود ثابت نگه می‌دارد. از طرفی وجود فاصله‌ی مناسب بین منابع، شرایط ویژه‌ای را در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد ایجاد می‌کند. به این صورت که ابتدا منبع اول (نزدیک‌ترین منبع) به نقطه شاهد می‌رسد و منجر به افزایش غلظت شوری در این نقطه می‌شود. پس از مدتی که غلظت حاصل از منبع اول در مقدار حداکثر خود ثابت شد (محل تشکیل پله اول، از A تا B)، منبع دوم به نقطه شاهد می‌رسد و باعث افزایش مجدد غلظت در این نقطه می‌شود (نقطه B) تا اینکه غلظت در نقطه شاهد در حداکثر مقدار حاصل از هر دو منبع ثابت

1 Advection
2 Dispersion



شکل ۱. نمودار شماتیک غلظت- زمان در نقطه شاهد حاصل از سه منبع گسترده با بارگذاری ثابت

Fig. 1. Schematic diagram of concentration versus time at observation point obtained from three distributed sources with constant loading

سطح آب، S_f شیب خط انرژی، g شتاب ثقل، C غلظت ماده آلاینده، D ضریب پراکندگی، k ضریب زوال ماده آلاینده، C_s غلظت منابع آلاینده، Q_s دبی منابع آلاینده و x و t به ترتیب بیانگر بعد مکان و زمان در معادلات می‌باشند.

در این پژوهش، رودخانه به‌عنوان یک سیستم یک بعدی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت معادلات جریان و انتقال در رودخانه نیز باید به صورت یک بعدی حل شوند. برای حل معادلات ۱، ۲ و ۳ از مدل عددی MIKE11 استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان سیالات و پخش آلودگی در رودخانه‌ها است. این مدل به دلیل سادگی استفاده و دقت بالای نتایج، طی سال‌های اخیر در بسیاری از پروژه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نرم‌افزار MIKE11 دارای مدول‌های مختلفی بوده که کارکردهای متفاوتی را امکان‌پذیر می‌کنند. با توجه به موضوع این پژوهش، برای انجام شبیه‌سازی انتقال شوری در رودخانه، از مدول هیدرودینامیکی (HD) و مدول جابه‌جایی-پراکندگی (AD) استفاده شده است. مدول HD معادلات سنت و نانت را با استفاده از یک طرح تفاضل محدود ضمنی به نام روش جاروب برگشتی^۱ حل کرده و مقادیر سرعت و دبی را در گره‌های محاسباتی به دست می‌آورد. این مقادیر ورودی مدول AD هستند. پس از حل معادله‌ی جابه‌جایی در نهایت، مقادیر غلظت در گره‌های محاسباتی در زمان‌های مختلف به دست می‌آید.

شدت منابع آلاینده به عنوان ورودی‌های مدل جابه‌جایی-پراکندگی در نظر گرفته می‌شود. پس از اجرای مدل جابه‌جایی-پراکندگی، توزیع مکانی و زمانی غلظت آلاینده در طول رودخانه بدست می‌آید. معادلات مدل مستقیم شامل معادلات سنت-ونانت (معادلات مدل جریان) و معادله جابه‌جایی-پراکندگی یا همان معادله بقای جرم ماده آلاینده می‌باشد. معادلات سنت-ونانت شامل دو معادله بقای جرم و بقای مومنتم است که در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند. معادله بقای جرم ماده آلاینده نیز در رابطه (۳) نشان داده شده است.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AkC + C_s Q_s \quad (3)$$

۲-۲- مدل معکوس انتقال در رودخانه

در یک مسئله مستقیم، مشخصات منابع آلودگی ورودی به رودخانه معلوم است و با استفاده از مدل ریاضی که در اینجا معادله دیفرانسیلی جابه‌جایی-پراکندگی است، غلظت آلودگی در نقطه یا نقاطی در پایین دست رودخانه مورد محاسبه قرار می‌گیرد. مسئله معکوس برعکس است. بدین معنا که در نقطه یا نقاطی از پایین دست رودخانه وضعیت غلظت آلاینده معلوم و مشخصات منابع آلاینده مجهول می‌باشند و هدف محاسبه مشخصات منابع آلودگی ورودی به رودخانه (مجهولات مسئله) با استفاده از معادله جابه‌جایی-پراکندگی است. به‌منظور تهیه مدل معکوس، از حل معکوس معادله انتقال در رودخانه با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در این روش، مجهولات منابع آلودگی (شدت شوری) ورودی به رودخانه آنقدر تغییر داده می‌شوند تا غلظت آلودگی در یک نقطه مشخص در پایین دست رودخانه به غلظت مشاهده‌ای در این نقطه، بسیار نزدیک شود. بدین منظور کد پیوند بین مدل شبیه‌سازی MIKE11 و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در محیط متلب، برای ایجاد ارتباط دو طرفه بین این دو، نوشته شده است. با توجه به اینکه رویکرد حداقل کردن مربع تفاضلات، روشی پذیرفته و موثر در مطالعات بهینه‌سازی است، در این مسئله تابع هدف به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$F = \sum_{i=1}^n (C_i^{obs} - C_i^{cal})^2 \quad (4)$$

در این رابطه، C_i^{obs} غلظت شوری مشاهده‌ای در نقطه‌ی شاهد و C_i^{cal} غلظت شوری محاسبه‌شده در این نقطه، از حل معکوس معادله انتقال است که برای تکرارهای مختلف محاسبه می‌شوند. بهینه‌ساز، مقدار این تابع را به حداقل می‌رساند. در واقع با به حداقل رساندن اختلاف داده‌های محاسباتی غلظت از مقادیر مشاهداتی در نقطه شاهد، می‌توان به شدت شوری منابع گسترده دست یافت.

۲-۲-۱- معرفی مدل بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین تکنیک‌های جست‌وجوی فراابتکاری در یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جست‌وجو است. این الگوریتم به صورت ذاتی جزء الگوریتم‌های گسسته و باینری می‌باشد، ولی ساختارش به گونه‌ای است که می‌تواند مسائل پیوسته را

نیز حل کند. با توجه به کاربرد گسترده الگوریتم ژنتیک در مسائل بهینه‌سازی و نیز سهولت استفاده از مفاهیم آن، در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای تهیه مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی موردنظر استفاده می‌شود. در الگوریتم ژنتیک ابتدا جمعیتی اولیه از جواب‌های مسئله (موسوم به کروموزوم‌ها) به صورت تصادفی کدگذاری می‌شوند. هر کروموزوم مرکب از تعدادی ژن است، که هر یک نشان‌دهنده یک متغیر تصمیم است. در این الگوریتم، هر ژن به صورت یک عدد حقیقی کدگذاری می‌شود. پس از کدگذاری از کروموزوم‌های موجود در جمعیت و تبدیل آن‌ها به مقادیر واقعی متغیرهای تصمیم، مقدار تابع هدف برای هر جواب (کروموزوم) تعیین می‌شود. در ادامه با توجه به مقادیر تابع هدف، کروموزوم‌های خوب از بین جمعیت جدا شده و از بین آن‌ها انتخاب والدین برای تولید نسل بعدی انجام می‌شود. پس از تبادل ژنی و جهش ژنی، جمعیت جدید تشکیل و مراحل مذکور تا رسیدن به شرط همگرایی یا توقف تکرار می‌شود. در این پژوهش برای انتخاب والدین از روش ترنومنت و برای تبادل ژنی از روش پیوسته استفاده می‌شود.

الگوریتم ژنتیک مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی با معرفی پارامترها، تابع هزینه^۲ (تابع هدف، رابطه (۴)) و قیودات آغاز می‌شود و همچنین خاتمه‌ی آن نیز مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی با کنترل همگرایی موردنظر می‌باشد. در این پژوهش، هدف یافتن شدت شوری منابع گسترده شوری در رودخانه است. از این رو متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله، شدت شوری (W) هستند. شدت یک متغیر پیوسته است و می‌تواند هر مقداری را در محدوده تعیین شده انتخاب نماید (رابطه (۵)).

$$0 \leq w \leq w_{max} \quad (5)$$

در این رابطه w_{max} بیشترین مقدار شدت شوری است و محدوده شدت شوری منبع را تعیین می‌کند. در این پژوهش حداقل و حداکثر شدت شوری به ترتیب صفر و ۵۰۰ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشند.

در الگوریتم توسعه داده شده، شرط توقف برنامه رسیدن به آخرین نسل است. با توجه به اینکه تعیین عملگرهای مناسب در الگوریتم ژنتیک (شامل تعداد نسل، اندازه جمعیت، نرخ انتخاب و نرخ جهش) تأثیر عمده‌ای در همگرایی مدل و زمان اجرای الگوریتم دارد، در این پژوهش تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن بازه‌ی وسیعی از این

1 Arithmetic crossover

2 Cost function

RE : شاخص خطای نسبی داده‌ها عددی بدون بعد است که معمولاً برحسب درصد بیان می‌شود. خطای نسبی از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

$$RE = \frac{(w_{cal} - w_{obs})}{w_{obs}} \times 100 \quad (7)$$

در روابط فوق، w_{cal} برابر با شدت شوری محاسبه شده و w_{obs} شدت شوری دقیق یا مشاهده‌ای است.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، مدل معکوس ارائه شده، با ذکر سه مثال فرضی، استفاده از داده‌های واقعی در بخشی از رودخانه کارون و نیز اعمال خطا به داده‌های مشاهداتی مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. در مثال اول، به بازیابی شدت شوری یک منبع گسترده با استفاده از یک نقطه شاهد پرداخته می‌شود. همچنین تعداد داده‌ی موردنیاز از نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد، برای بازیابی یک منبع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مثال دوم صحت‌سنجی مدل معکوس ارائه شده با بازیابی شدت شوری دو منبع گسترده و استفاده از تنها یک نقطه شاهد انجام می‌شود. بعلاوه، در این مثال حالت‌های مختلفی برای دو منبع فرض شده و در مورد فاصله مناسب منابع از هم، به منظور پرهیز از اختلاط اثر همه منابع و شرایط لازم برای بازیابی صحیح منابع از روی نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد بحث می‌گردد. در مثال سوم نیز مدل معکوس تحت شرایط پیچیده‌تر، سه منبع گسترده شوری و یک نقطه شاهد، صحت‌سنجی می‌شود. در بخش صحت‌سنجی با داده‌های واقعی، ۴۰ کیلومتر از طول رودخانه کارون از پایین‌تر از اهواز تا نزدیکی طرفایه، در نظر گرفته شده و مدل ارائه شده مورد آزمون قرار می‌گیرد. در انتها نیز مدل معکوس ارائه شده با اعمال دو سطح خطای ۵ و ۱۵ درصد به داده‌های مشاهداتی در ایستگاه شاهد و مشاهده‌ی تاثیر این خطاها در بازیابی شدت شوری منابع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در مثال‌های فرضی، یک رودخانه فرضی با مقاطع نامنظم و به طول ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. جریان تشکیل شده در رودخانه، جریان ماندگار و غیریکنواخت می‌باشد. شرایط مرزی در مدل جریان به صورت دبی ثابت در بالادست (۳۰۰ متر مکعب در ثانیه) و رقوم ثابت سطح آب در پایین‌دست (۹۹۰ متر) می‌باشد. برای شرایط اولیه هیدرودینامیک در مدل

پارامترها انجام شد که در این بخش برای کاهش حجم مطالب، صرفاً به بیان نتایج اکتفا می‌شود. بهترین تعداد نسل، اندازه جمعیت، نرخ انتخاب و نرخ جهش به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۱۵۰، ۰/۵۵ و ۰/۰۸ بدست آمد. همچنین الگوریتم ژنتیک به پارامتر نرخ انتخاب بیشترین حساسیت را داشت.

۲-۲- روش حل مسئله‌ی معکوس با رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی جزئیات حل در مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی لینک شده، به صورت زیر قابل تعریف است:

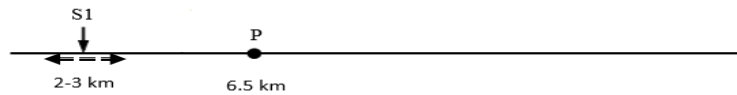
۱. ورود داده‌های اولیه به مدل شامل توپوگرافی و مقاطع عرضی رودخانه، شرایط اولیه و مرزی مدل جریان و مدل جابه‌جایی-پراکندگی
۲. تولید شدت‌های تصادفی برای منابع شوری (W) توسط الگوریتم ژنتیک
۳. اجرای نرم افزار MIKE11 با داده‌های مراحل قبل (مدل شبیه‌سازی) و محاسبه سری زمانی غلظت در نقطه شاهد (غلظت محاسبه‌ای)
۴. محاسبه‌ی تابع هدف مسئله با داشتن غلظت‌های مشاهداتی و محاسبه‌ای در نقطه شاهد
۵. بررسی برقراری شرط توقف مسئله. اگر شرط توقف برقرار باشد برنامه پایان می‌یابد و شدت شوری محاسبه شده برای منبع موردنظر، نشان داده می‌شود. در غیر این صورت، شدت منبع موردنظر تغییر کرده و مراحل ۲ تا ۵ تا رسیدن به شرط توقف تکرار می‌شود. همانطور که گفته شد در این پژوهش، شرط توقف رسیدن به آخرین نسل است.

۲-۳- معرفی شاخص‌های خطا

به منظور مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با پاسخ‌های دقیق یا داده‌های مشاهداتی و درک بهتر عملکرد مدل معکوس، در این پژوهش از شاخص‌های خطای نسبی (RE) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) استفاده می‌شود. توضیح مربوط به هر یک از این شاخص‌ها به صورت زیر می‌باشد:

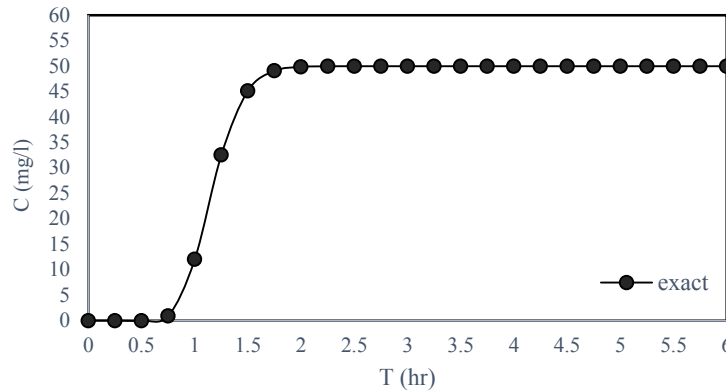
$RMSE$: جذر میانگین مربع خطا است. بعد این شاخص مشابه بعد داده‌ها بوده و از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (w_{cal} - w_{obs})^2}{n}} \quad (6)$$



شکل ۲. موقعیت منبع گسترده شور (S1) و نقطه شاهد (p) در مثال اول

Fig. 2. Location of the salinity distributed source (S1) and observation point (p) of first example



شکل ۳. نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد در مثال اول

Fig. 3. Diagram of concentration versus time at observation point of first example

شکل ۳ بدست می‌آید. به علت وجود فقط یک منبع گسترده با بارگذاری ثابت، تشکیل تنها یک پله در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد مشهود است. با استفاده از داده‌های موجود در نمودار غلظت-زمان و اجرای مدل معکوس، پس از ۴۲۲۳ تکرار شدت شوری منبع S1 با دقت بالایی بازیابی شد. مقدار بازیابی شده منبع S1 به همراه خطای نسبی محاسبات در جدول ۱ ارائه شده است. اجرای مدل معکوس در حدود ۱۰ ساعت به طول انجامید. همانطور که مشاهده می‌شود، داده‌های مشاهده‌ای در نقطه شاهد با اطلاعات محاسبه شده در این نقطه توسط مدل معکوس، با دقت بالایی بر هم منطبق است (شکل ۴). در این اجرا به علت داشتن فقط یک منبع گسترده از همه‌ی داده‌های موجود در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد برای بازیابی شدت شوری منبع موردنظر استفاده شد. در ادامه با استفاده از داده‌های غلظت-زمان در نقطه شاهد و اجرای مدل معکوس در حالت‌های مختلف، به بررسی تعداد داده‌ی موردنیاز از نمودار غلظت-زمان، برای بازیابی شدت شوری منبع S1 می‌پردازیم. مقادیر بازیابی شده منبع S1 در حالات مختلف، در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که با استفاده از

جریان نیز از شروع خودکار^۱ استفاده شده است. در این حالت، نرم افزار شرایط اولیه را با استفاده از حل معادلات جریان در حالت دائمی، از اولین مقادیر شرایط مرزی بدست می‌آورد. غلظت اولیه شوری در رودخانه نیز صفر در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل جریان، ضریب زبری مانینگ برابر با 0.35 ، Δx برابر با 100 متر و Δt 30 ثانیه می‌باشد. در این پژوهش ضریب پراکندگی 65 مترمربع بر ثانیه و به صورت ثابت در نظر گرفته شده است ($D = 65m^2/s$).

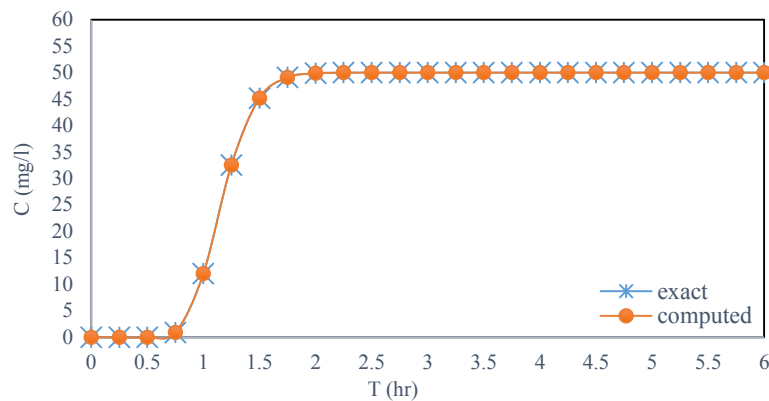
۳-۱- مثال اول: بازیابی شدت یک منبع گسترده شور با یک نقطه شاهد در شکل ۲ موقعیت منبع S1 و نقطه شاهد نسبت به ابتدای رودخانه فرضی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، منبع شوری در کیلومتر ۲ تا ۳ رودخانه گسترده شده است. نقطه شاهد نیز در $6/5$ کیلومتری از ابتدای رودخانه قرار دارد.

شدت شوری منبع S1، 15 کیلوگرم بر ثانیه فرض شده است. پس از طراحی و اجرای مدل مستقیم، نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد به صورت

جدول ۱. مقادیر دقیق و محاسبه‌ای شدت شوری منبع S1

Table 1. Exact and computed salinity intensity of S1

Source Number	W exact (kg/s)	W computed (kg/s)	RE_W
S1	۱۵	۱۵/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱۳



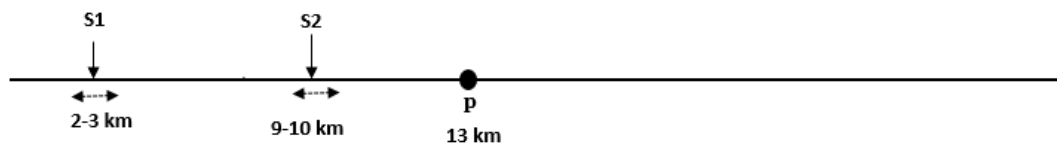
شکل ۴. نمودار غلظت-زمان مشاهده‌ای و محاسبه شده در نقطه شاهد ($p=۶/۵km$)

Fig. 4. Diagram of measured and computed concentration versus time at observation point ($p=6.5km$)

جدول ۲. مقادیر دقیق و محاسبه‌ای شدت شوری منبع S1 با تعداد داده‌های مختلف

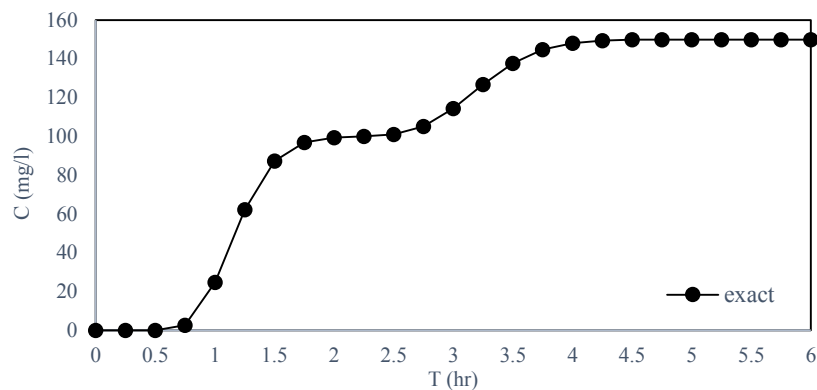
Table 2. Exact and computed salinity intensity of S1 using different numbers of data

W exact (kg/s)	W computed (kg/s)	RE_W	توضیح حالت	ردیف
۱۵	۱۴/۹۴۰۳	۰/۳۹۸۰	استفاده از ۳ داده اول (۱ داده غیر صفر)	۱
۱۵	۱۴/۹۸۶۴	۰/۰۹۰۸	استفاده از ۴ داده اول (۲ داده غیر صفر)	۲
۱۵	۱۵/۰۰۰۷	۰/۰۰۴۸	استفاده از ۵ داده اول (۳ داده غیر صفر)	۳
۱۵	۱۵/۰۰۰۵	۰/۰۰۳۱	استفاده از ۶ داده اول (۴ داده غیر صفر)	۴
۱۵	۱۴/۹۹۹۹	۰/۰۰۱۰	استفاده از ۷ داده اول (۵ داده غیر صفر)	۵
۱۵	۱۵/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۸	استفاده از ۸ داده اول (۶ داده غیر صفر)	۶
۱۵	۱۵/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱۳	استفاده از همه ۲۵ داده	۷
۱۵	۱۵/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴۰	استفاده از یک داده به دلخواه ($۳۲/۵۵۱$ mg/l در زمان ۱:۱۵ ساعت)	۸



شکل ۵. موقعیت منابع گسترده شوری و نقطه شاهد در مثال دوم، بخش اول

Fig. 5. Location of the salinity distributed sources and observation point of second example, first part



شکل ۶. نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد در مثال دوم، بخش اول

Fig. 6. Diagram of concentration versus time at observation point of second example, first part

گرفته باشند که در مثال‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. در تمام مثال‌های این بخش، مدت زمان شبیه‌سازی ۶ ساعت است.

بخش اول) دو منبع گسترده با فاصله ۶ کیلومتر

در این بخش دو منبع گسترده شوری با طول یکسان و شدت‌های متفاوت، در فاصله ۶ کیلومتری از هم در نظر گرفته شده‌اند. آرایش منابع و نقطه شاهد در شکل ۵ نشان داده شده است. شدت شوری در منبع S1، ۱۵ کیلوگرم بر ثانیه و شدت شوری در منبع S2، ۳۰ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. پس از طراحی و اجرای مدل مستقیم، منحنی غلظت-زمان در نقطه شاهد به صورت شکل ۶ بدست می‌آید.

در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود که ابتدا شوری منبع S2 به نقطه شاهد رسیده و روند غلظت شروع به افزایش می‌کند. تا اینکه پس از مدتی، شوری در حداکثر مقدار خود (تقریباً ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) ثابت می‌ماند.

هر تعداد از ۲۵ داده‌ی موجود در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد (با مقادیر بزرگتر از صفر)، می‌توان شدت شوری منبع را با دقت بالایی بازیابی کرد. با این حال هرچه از تعداد داده‌های بیشتری برای بازیابی منبع موردنظر استفاده شود، دقت بازیابی منبع بالاتر و زمان اجرای برنامه کمتر خواهد شد. بنابراین تنها با استفاده از یک داده از نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد می‌توان شدت شوری یک منبع گسترده با بارگذاری ثابت را که دارای مکان و طول مشخص است بازیابی کرد.

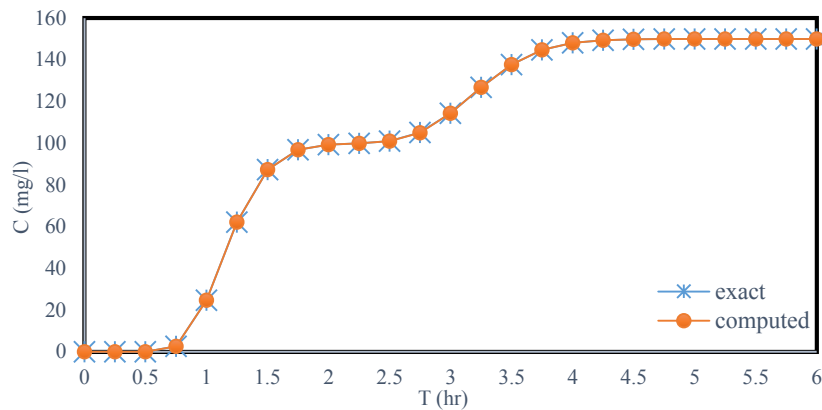
۳-۲- مثال دوم: بازیابی شدت دو منبع گسترده شوری با یک نقطه شاهد

در این مثال ضمن صحت‌سنجی مدل معکوس ارائه شده، به دنبال بررسی آرایش مناسب دو منبع گسترده شوری با بارگذاری ثابت، از نظر فاصله بین دو منبع برای جلوگیری از اختلاط کامل غلظت منابع در نقطه شاهد هستیم. دو منبع ممکن است در فواصل مختلف نسبت به هم قرار

جدول ۳. مقادیر دقیق و محاسبه‌ای شدت شوری منابع S1 و S2

Table 3. Exact and computed salinity intensity of S1 and S2

Source Number	W exact (kg/s)	W computed (kg/s)	RE _W
S1	۱۵	۱۵/۰۰۰۴	+/-۰۰۲۶
S2	۳۰	۳۰	۰



شکل ۷. نمودار غلظت-زمان مشاهده‌ای و محاسبه شده در نقطه شاهد (p=۱۳ km)

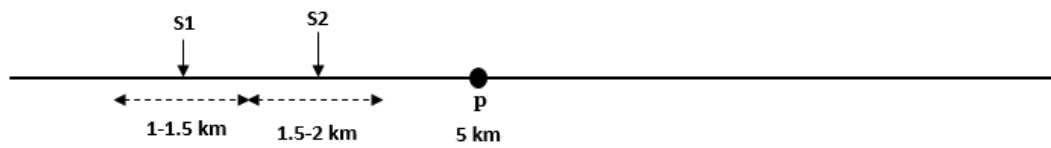
Fig. 7. Diagram of measured and computed concentration versus time at observation point (p=13km)

شدت به دست آمده برای منبع S2، در فایل شرایط مرزی قرار می‌گیرد و با استفاده از همه نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد که تحت تاثیر هر دو منبع می‌باشد، مدل معکوس برای به دست آوردن شدت منبع S1 اجرا می‌شود. مقادیر بازیابی شده منابع S1 و S2 در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود با استفاده از این روش، شدت شوری هر دو منبع با دقت بسیار بالایی بازیابی شده است. منحنی غلظت-زمان در نقطه شاهد پس از بازیابی هر دو منبع، در شکل ۷ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده شد، در این مثال فاصله دو منبع از هم به گونه‌ای است که بین زمان رسیدن دو منبع به نقطه شاهد، فاصله زمانی مناسب ایجاد شده و مانع از اختلاط کامل منابع با هم در این نقطه شده است. ارائه دستورالعملی برای تعیین فاصله مکانی مناسب بین دو منبع گسترده با بارگذاری ثابت که در نقطه شاهد به طور کامل دچار اختلاط اثر نشده باشند، موضوع پیچیده‌ای است و بستگی به سرعت جریان، ضریب پراکندگی

سپس به علت رسیدن شوری منبع S1 به نقطه شاهد، غلظت مجدداً شروع به افزایش می‌کند و روند صعودی به خود می‌گیرد. سرانجام شوری در حداکثر مقدار حاصل از دو منبع (۱۵۰ میلی گرم بر لیتر)، ثابت می‌شود. بنابراین مقادیر غلظت تا محل تشکیل پله در نمودار فوق، فقط تحت تاثیر منبع S2 و پس از آن تحت تاثیر هر دو منبع S1 و S2 می‌باشند.

با داشتن مقادیر مشاهده‌ای غلظت در نقطه شاهد و با توجه به محل تشکیل پله در نمودار (زمان رسیدن منبع S1 به نقطه شاهد و شروع اختلاط دو منبع)، می‌توان مدل معکوس را اجرا نمود و شدت منابع را مرحله به مرحله بازیابی کرد؛ ابتدا، منبع S2 و سپس منبع S1 بازیابی می‌شود. بدین منظور برای منبع S1 شدتی فرضی در نظر گرفته می‌شود و مدل معکوس با در نظر گرفتن منبع S2 و بخشی از نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد که تحت تاثیر منبع S2 می‌باشد (استفاده از ۷ داده اول نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد) اجرا شده و شدت شوری منبع S2 بازیابی می‌شود. سپس،



شکل ۸. موقعیت منابع گسترده شوری و نقطه شاهد در مثال دوم، بخش دوم

Fig. 8. Location of the salinity distributed sources and observation point of second example, second part

جدول ۴. مشخصات منابع S1 و S2 در بخش دوم

Table 4. The specifications of S1 and S2 in second part

Source Number	W (kg/s)	start chainage (m)	end chainage(m)	L (m)
S1	۷/۵	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰
S2	۱۵	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰

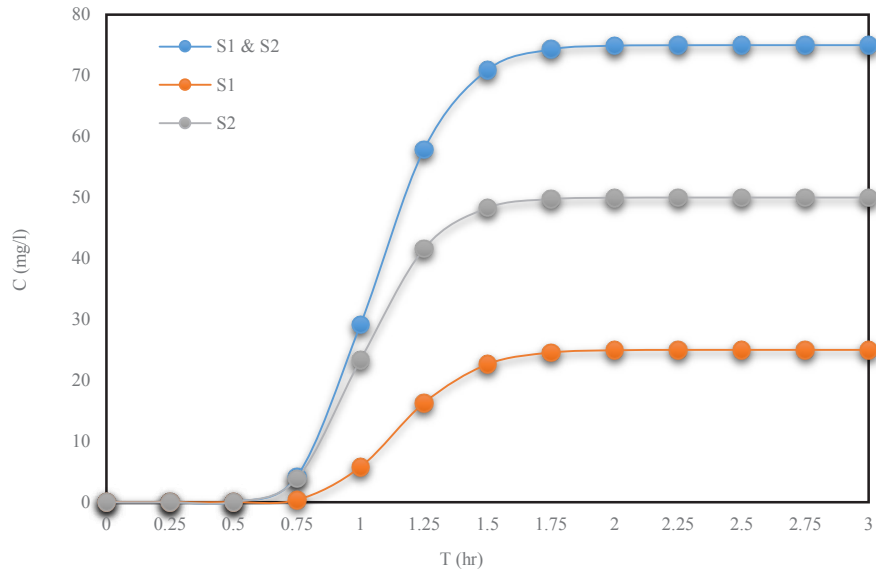
همزمان به نقطه شاهد می‌رسند و هیچ‌گونه پله‌ای نیز در نمودار غلظت-زمان حاصل از هر دو منبع در نقطه شاهد مشاهده نمی‌شود. (غلظت ناشی از منبع S1 در زمان ۳۰ دقیقه در نقطه شاهد ۰/۰۰۳ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت ناشی از منبع S2، ۰/۰۲۴۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد). به عبارت دیگر به علت همزمانی دو منبع، منابع در نقطه شاهد دچار اختلاط اثر شده‌اند که علت این امر در پیوسته بودن منابع S1 و S2 است. از این رو مشابه مثال مطرح در بخش اول، پله‌ای نیز در نمودار مشهود نخواهد بود. همانطور که گفته شد در صورتی قادر به بازیابی دو منبع با یک نقطه شاهد هستیم که حداقل یک داده در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد وجود داشته باشد که فقط تحت تاثیر یک منبع باشد. درحالی‌که در منابع پیوسته این فاصله زمانی وجود ندارد. از این رو قادر به بازیابی منابع پیوسته تنها با یک نقطه شاهد نخواهیم بود. به منظور بررسی تاثیر فاصله نقطه شاهد از دو منبع که در مجاورت هم هستند، این بار نقطه شاهد را در فاصله ۵۰ متری از منبع دوم قرار می‌دهیم. یعنی فاصله را از ۳ کیلومتر به ۵۰ متر کاهش می‌دهیم. منحنی‌های اندازه‌گیری غلظت-زمان منابع S1 و S2 به تفکیک و نیز هر دو منبع با هم در نقطه شاهد ($p=2050m$)، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در این حالت نیز هر دو منبع همزمان به نقطه شاهد می‌رسند ($t=15 \text{ min}$). بنابراین مشاهده می‌شود که کاهش فاصله نقطه

و ... دارد. اما یک روش ساده، استفاده از منحنی غلظت-زمان در نقطه شاهد است. چنانچه بین منابع فاصله مکانی مناسب وجود داشته باشد، پله یا پله‌هایی در نمودار مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد هر منبع تاثیر خود را به طور تقریباً کاملی در نقطه شاهد بر جای گذاشته و سپس منبع دیگر به نقطه شاهد رسیده است. در این صورت بازیابی این گونه منابع با استفاده از مدل معکوس ارائه شده در این پژوهش، امکان‌پذیر بوده و با دقت بالایی انجام خواهد شد. در این مثال نیز، این موضوع با تشکیل پله در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد قابل مشاهده است.

بخش دوم) دو منبع گسترده بدون فاصله و در مجاورت هم

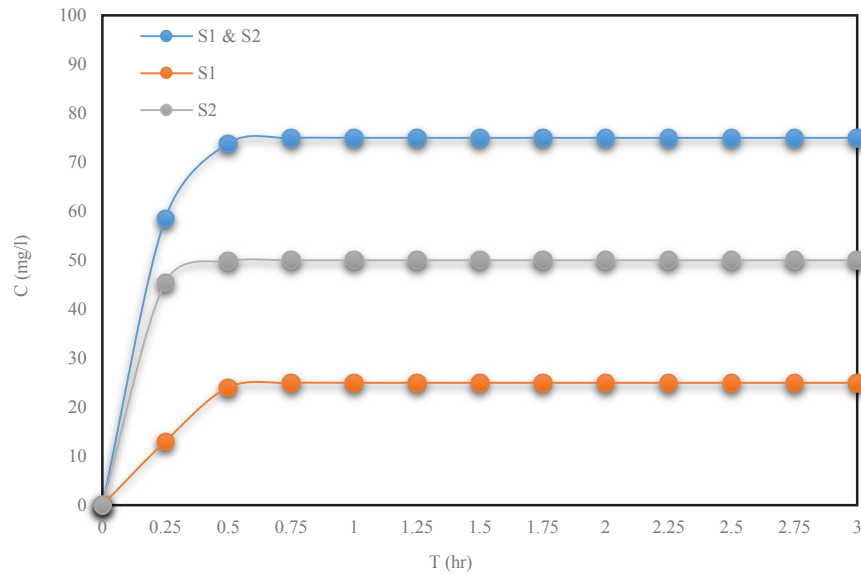
در این بخش دو منبع گسترده شوری که دارای طول یکسان و شدت‌های متفاوت اند، در مجاورت هم (به صورت پیوسته) قرار گرفته‌اند. نقطه شاهد نیز در کیلومتر ۵ از ابتدای رودخانه قرار دارد. آرایش منابع و نقطه شاهد در شکل ۸ نشان داده شده است.

پس از طراحی و اجرای مدل مستقیم، منحنی غلظت-زمان در نقطه شاهد بدست می‌آید. در شکل ۹ تغییرات غلظت نسبت به زمان منابع S1 و S2 به تفکیک و نیز هر دو منبع با هم در نقطه شاهد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود هر دو منبع در زمان ۳۰ دقیقه ($t=30 \text{ min}$) به صورت



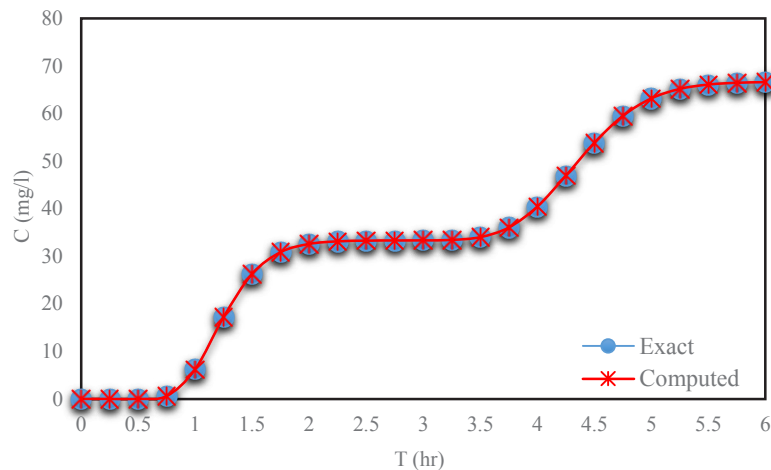
شکل ۹. نمودار غلظت-زمان منابع S۱ و S۲ در نقطه شاهد (p=۵km)

Fig. 9. Diagram of concentration versus time of S1 and S2 at observation point (p=5km)



شکل ۱۰. نمودار غلظت-زمان منابع S۱ و S۲ در نقطه شاهد (p=۲۰۵۰m)

Fig. 10. Diagram of concentration versus time of S1 and S2 at observation point (p=2050m)



شکل ۱۱. نمودار غلظت-زمان مشاهده‌ای و محاسبه شده در نقطه شاهد (p=۱۵km)

Fig. 11. Diagram of measured and computed concentration versus time at observation point (p=15km)

جدول ۵. مقادیر دقیق و محاسبه‌ای شدت شوری منابع S۱ و S۲

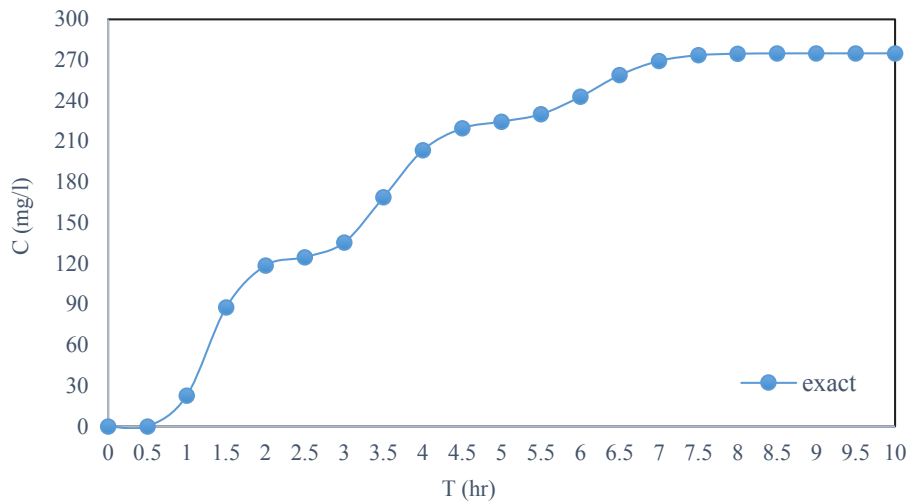
Table 5. Exact and computed salinity intensity of S1 and S2

Source Number	W exact (kg/s)	W computed (kg/s)	Start chainage (m)	End chainage (m)	REw
S1	۱۰	۱۰/۰۰۴۸	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۰/۰۴۸
S2	۱۰	۱۰/۰۰۰۱	۱۱۵۰۰	۱۲۰۰۰	۰/۰۰۱

زمان در نقطه شاهد وجود دارد که فقط تحت تاثیر منبع S2 است. از این رو مدل معکوس با دقت بیشتری قادر به بازیابی منبع S2 و در نتیجه منبع S1 خواهد بود. مقادیر بازیابی شده منابع S1 و S2 در جدول ۵ ارائه شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده در سه بخش مثال دوم، مشاهده می‌شود که هرچه فاصله دو منبع از هم بیشتر باشد، هر یک از منابع فرصت بیشتری برای ثبات خود و رسیدن به حداکثر مقدار غلظت در نقطه شاهد خواهند داشت. بنابراین غلظت منابع در نقطه شاهد کمتر دچار اختلاط شده و در نتیجه طول پله تشکیل شده در منحنی غلظت-زمان در نقطه شاهد نیز بیشتر خواهد بود. هرچه طول پله بیشتر باشد اطلاعات بیشتری از منابع در نقطه شاهد به صورت تفکیک شده به دست خواهد آمد. لذا بازیابی مجهولات مسئله (شدت شوری منابع) نیز با دقت بیشتری انجام خواهد شد. در حالی که در صورت نبود

شاهد از منابع، منجر به بازیابی صحیح منابع پیوسته توسط مدل معکوس نمی‌شود. مطابق تحقیقات قبلی انجام شده، با افزایش فاصله نقطه شاهد از منابع نیز اطلاعات کمتری از منحنی غلظت- زمان در نقطه شاهد حاصل می‌شود که بازیابی منابع توسط مدل معکوس را غیر ممکن می‌سازد.

بخش سوم) دو منبع گسترده در فاصله طولانی از هم (۱۰ کیلومتر) در این بخش دو منبع گسترده شوری در فاصله‌ی طولانی از هم (۱۰ کیلومتر) قرار دارند. از این رو منبع نزدیک‌تر (S2) فرصت کافی برای ثابت شدن در مقدار حداکثر غلظت خود در نقطه شاهد را دارد. این موضوع با تشکیل پله‌ی طولانی در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد نیز به خوبی مشهود است (شکل ۱۱). در این حالت تعداد بیشتری داده از نمودار غلظت-



شکل ۱۲. نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد (p=۲۰km)

Fig. 12. Diagram of concentration versus time at observation point (p=20km)

منبع S3 (نزدیک‌ترین منبع به نقطه شاهد)، سپس منبع S2 و در نهایت منبع S1 (منبع دورتر) بازیابی می‌شود. به این ترتیب که ابتدا برای منابع S1 و S2 شدتی فرضی در نظر گرفته می‌شود و مدل معکوس با در نظر گرفتن بخشی از نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد که تحت تاثیر منبع S3 می‌باشد، اجرا شده و شدت شوری منبع S3 بازیابی می‌شود. سپس، شدت به دست آمده برای منبع S3، در فایل شرایط مرزی قرار می‌گیرد و با استفاده از بخش دوم نمودار که تحت تاثیر منابع S2 و S3 می‌باشد، شدت شوری منبع S2 بازیابی می‌شود. در نهایت با استفاده از همه نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد که تحت تاثیر هر سه منبع می‌باشد و با داشتن دو منبع S2 و S3، مدل معکوس برای به دست آوردن شدت منبع S1 اجرا می‌شود. مقادیر بازیابی شده منابع S1 و S2 و S3 در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که در این جدول آمده است، مقدار خطای نسبی در بازیابی شدت منابع، با افزایش فاصله از نقطه شاهد افزایش یافته است؛ همانطور که گفته شد در این پژوهش منابع تک به تک و مرحله به مرحله بازیابی می‌شوند. با توجه به اینکه شدت شوری منبع S3 در فایل شرایط مرزی برای بازیابی منبع S2 قرار می‌گیرد، خطای محاسبه منبع S3 منجر به افزایش خطا در محاسبه منبع S2 می‌شود و به همین ترتیب خطای محاسبه شدت منابع S2 و S3 باعث افزایش خطا در محاسبه شدت منبع S1 می‌شود. منحنی

فاصله یا وجود فاصله خیلی کم بین دو منبع، منحنی غلظت-زمان در نقاط شاهد حاوی اطلاعاتی اندک یا فاقد اطلاعات مورد نیاز برای بازیابی هر دو منبع خواهد بود. این امر در صورت افزایش تعداد منابع تشدید شده و امکان بازیابی منابع وجود نخواهد داشت.

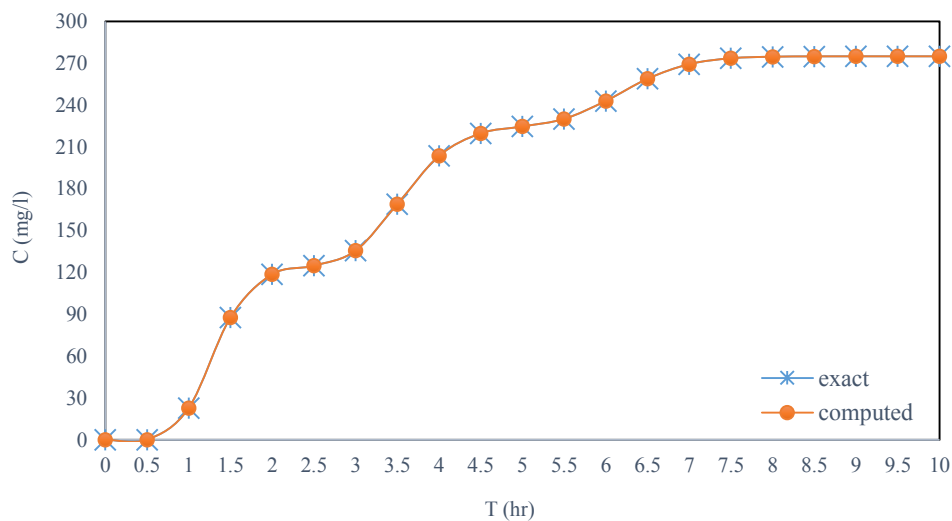
۳-۳- مثال سوم: بازیابی شدت سه منبع گسترده شوری با یک نقطه شاهد در مثال سوم، هدف تأیید صحت نتایج مدل معکوس ارائه شده در حالت پیچیده‌تر (وجود سه منبع گسترده شوری و یک نقطه شاهد) می‌باشد. به علت افزایش تعداد منابع، کل زمان شبیه‌سازی در این مثال ۱۰ ساعت در نظر گرفته شده است. شدت شوری در منابع S1 و S2 مشابه مثال دوم، بخش اول و شدت شوری منبع S3، ۳۷/۵ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد (جدول ۶). نقطه شاهد نیز در ۲۰ کیلومتر از ابتدای رودخانه در نظر گرفته شده است. منحنی غلظت-زمان در نقطه شاهد پس از اجرای مدل مستقیم، به صورت شکل ۱۲ بدست می‌آید.

در این مثال به علت وجود سه منبع گسترده شوری با بارگذاری ثابت، تشکیل دو پله در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد مشهود است (شکل ۱۲). در این مثال نیز با استفاده از نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد و اجرای مدل معکوس، شدت منابع را مرحله به مرحله بازیابی می‌کنیم؛ ابتدا،

جدول ۶. مقادیر دقیق و محاسبه‌ای شدت شوری منابع S1، S2 و S3 در مثال سوم

Table 6. Exact and computed salinity intensity of S1, S2 and S3 of third example

Source Number	W exact (kg/s)	Start chainage (m)	End chainage (m)	W computed (kg/s)	RE _w
S1	۱۵	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۵/۰۰۵۴	۰/۰۳۶
S2	۳۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰۰	۳۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۳
S3	۳۷/۵	۱۶۰۰۰	۱۷۵۰۰	۳۷/۵۰۰۲	۰/۰۰۰۵



شکل ۱۳. نمودار غلظت-زمان مشاهده‌ای و محاسبه شده در نقطه شاهد (p=۲۰km)

Fig. 13. Diagram of measured and computed concentration versus time at observation point (p=20km)

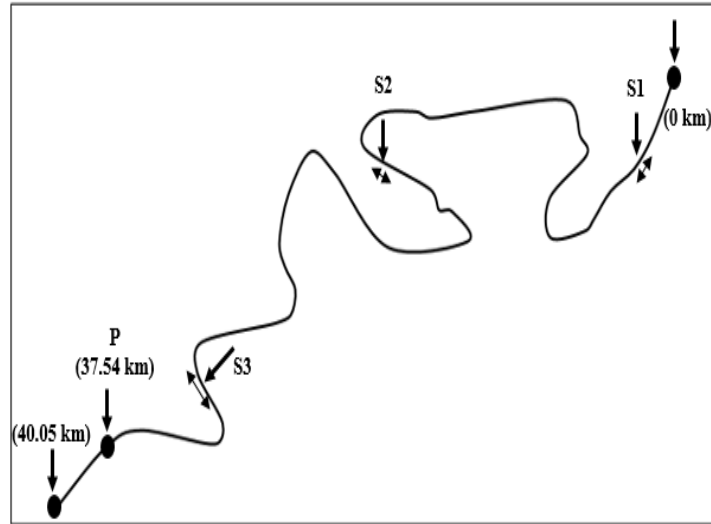
کارون به طول ۴۰ کیلومتر از پایین‌تر از اهواز (E ۶۷۸ ۳۵/ ۳۹ ۴۸ N و ۴۰/۶۴۱ ۱۶ ۳۱) تا روستای موران (E ۲۱/۷۲۹ ۳۰ ۴۸ N و ۴۷/۰۸۴ ۹ ۳۱) در نزدیکی طرفایه انتخاب شد. لازم به ذکر است که تنها اطلاعات مورد استفاده در بخش هیدرودینامیک مدل واقعی هستند (توپوگرافی رودخانه، مشخصات مقاطع عرضی و پارامترهای ورودی). زیرا هیچ‌گونه اطلاعاتی از منابع گسترده شوری که در رودخانه تخلیه شوند در دسترس نیست. بنابراین هر سه مشخصه منابع گسترده در نظر گرفته شده یعنی شدت شوری، مکان قرارگیری و طول گستردگی منابع به صورت فرضی در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط جریان در رودخانه ماندگار فرض شده است. مقادیر واسنجی شده ضریب زبری مانینگ و ضریب پراکندگی نیز براساس نتایج تحقیق انجام شده توسط Fakoori (۲۰۱۷) برای رودخانه کارون در منطقه مورد مطالعه، به صورت ضریب زبری برابر با ۰/۰۳۵ و ضریب پراکندگی برابر با

غلظت-زمان در نقطه شاهد پس از بازیابی هر سه منبع در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج این بخش مشاهده می‌شود در بازیابی شدت منابع گسترده با بارگذاری ثابت که دارای طول و مکان مشخص باشند، تنها با استفاده از یک داده از منحنی غلظت-زمان در نقطه شاهد برای هر منبع، می‌توان به بازیابی آن منبع پرداخت. روش بکار رفته در مثال‌های فوق، قادر است شدت شوری منابع را با دقت مطلوبی محاسبه کند.

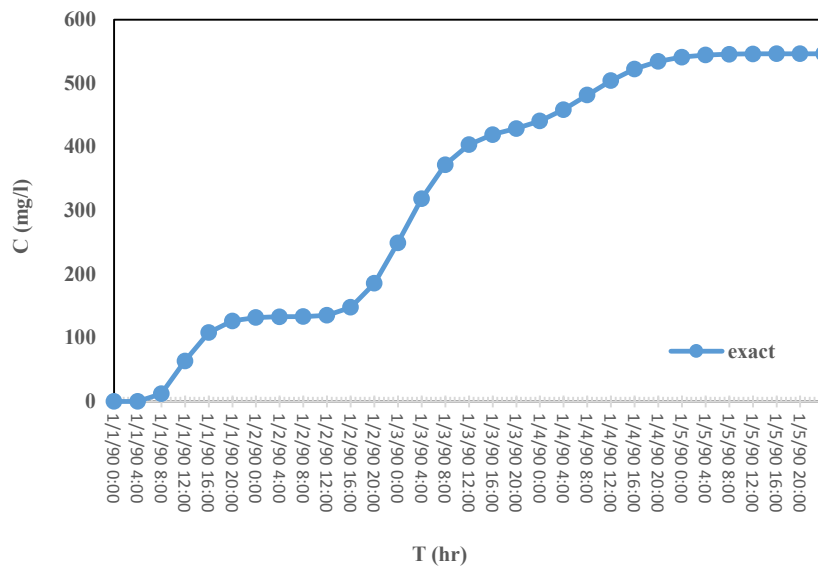
۳-۴- صحت‌سنجی مدل معکوس با استفاده از منابع شوری فرضی برای رودخانه کارون

در این بخش مدل معکوس با در نظر گرفتن سه منبع فرضی برای بخشی از رودخانه کارون صحت‌سنجی می‌شود. بدین منظور بخشی از رودخانه



شکل ۱۴. بازه موردنظر از رودخانه کارون به همراه موقعیت منابع گسترده شوری و ایستگاه اندازه‌گیری

Fig. 14. Study area in Karun River, salinity distributed source's location and measurement station



شکل ۱۵. نمودار غلظت - زمان در نقطه شاهد (p=37/543km)

Fig. 15. Diagram of concentration versus time at observation point (p=37.543km)

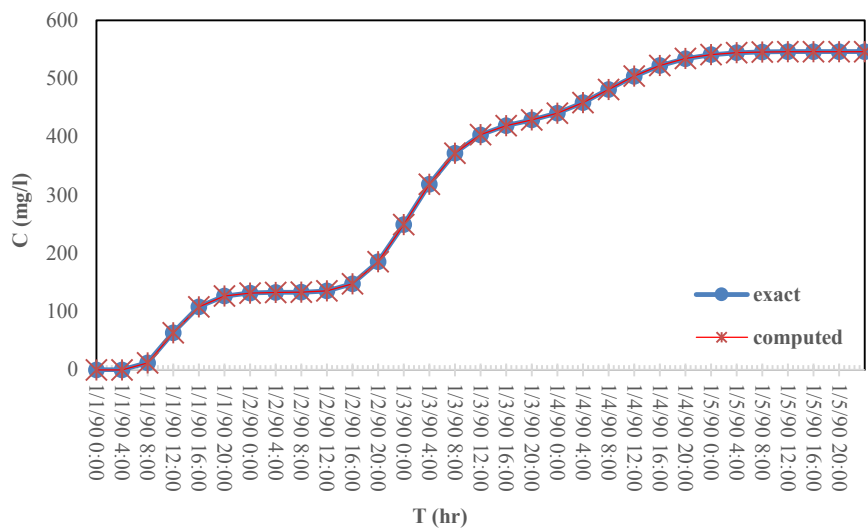
مشاهداتی است. به علت وجود سه منبع گسترده با بارگذاری ثابت، تشکیل دو پله در نمودار غلظت - زمان در نقطه شاهد (شکل ۱۵) مشهود است. شدت شوری هر سه منبع مجهول فرض می‌شوند. بنابراین تعداد مجهولات مسئله سه مجهول می‌باشد. در این مسئله مدل برای پنج روز و با گام‌های

۱۰۳/۳۱ در نظر گرفته شد [۲۵]. مقادیر دبی ورودی و تراز سطح آب در پایین دست به ترتیب برابر با ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه و ۹ متر می‌باشد. شکل ۱۴ طرح شماتیک رودخانه کارون در بازه موردنظر را نشان می‌دهد. در این شکل S1، S2 و S3 سه منبع گسترده ورود شوری به رودخانه و p ایستگاه

جدول ۷. مقادیر دقیق و محاسبه شده شدت شوری منابع S1، S2 و S3 به همراه شاخص خطای نسبی

Table 7. Exact and computed salinity intensity of S1, S2 and S3 and relative error index

Source Number	W exact (kg/s)	Start chainage (m)	End Chainage (m)	W calculated (kg/s)	RE _w (%)
S1	۱۸	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۱۷/۹۷۵۲	۰/۱۳۷۸
S2	۴۴	۱۶۰۰۰	۱۶۷۰۰	۴۴/۰۲۰۵	۰/۰۴۶۶
S3	۲۰	۳۲۵۰۰	۳۴۱۰۰	۲۰/۰۰۳۶	۰/۰۱۸



شکل ۱۶. نمودار غلظت - زمان مشاهده‌ای و محاسبه شده در ایستگاه مشاهداتی (p=۳۷/۵۴۳km)

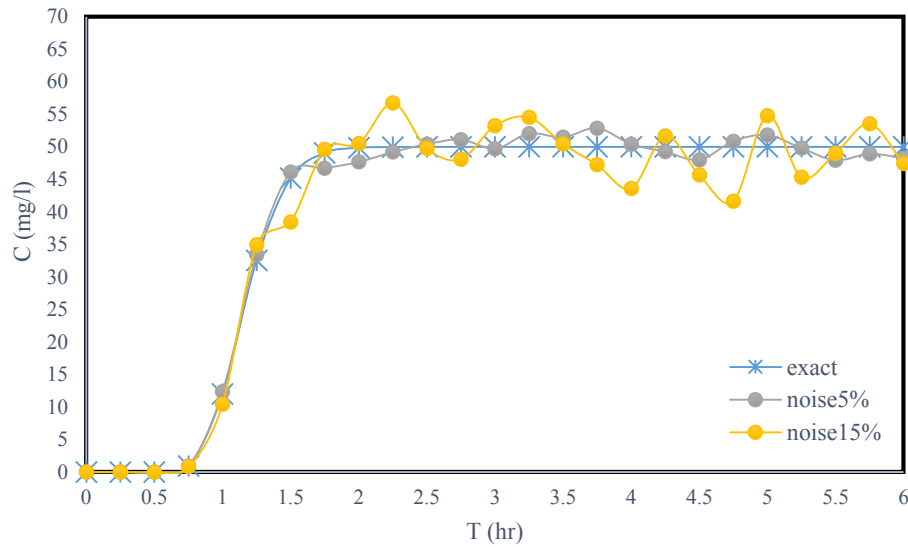
Fig. 16. Measured and computed concentration versus time at the measurement station (p=37.543 km)

زمانی چهار ساعته شبیه‌سازی شد.

با استفاده از نمودار غلظت - زمان در ایستگاه مشاهداتی و اجرای مدل معکوس، شدت شوری هر سه منبع به صورت مرحله به مرحله بازیابی می‌شود. نتایج بازیابی منابع S1، S2 و S3 در جدول ۷ ارائه شده است. نمودار غلظت - زمان در ایستگاه مشاهداتی پس از بازیابی هر سه منبع، در شکل ۱۶ نمایش داده شده که انطباق مطلوب داده‌های مشاهده‌ای با داده‌های محاسبه شده توسط مدل معکوس در ایستگاه مشاهداتی را نشان می‌دهد.

۳-۵- صحت‌سنجی مدل معکوس با اعمال خطا به داده‌های مشاهداتی

یک روش مهم دیگر در صحت‌سنجی عملکرد مدل‌های معکوس، اعمال خطا به داده‌های مشاهداتی در ایستگاه شاهد و مشاهده‌ی تاثیر این خطا در بازیابی مشخصات منبع آلاینده است. زیرا ممکن است در عمل اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه شاهد کاملاً دقیق و بدون خطا نبوده و دارای سطح خطای مشخصی باشند. در این پژوهش برای اعمال خطا به داده‌های حاصل از اجرای مدل مستقیم، از رابطه (۸) استفاده می‌کنیم [۲۶]:



شکل ۱۷. نمودارهای غلظت-زمان در نقطه شاهد در مثال اول؛ بدون اعمال خطا و با اعمال ۵ و ۱۵ درصد خطا

Fig. 17. Diagrams of concentration versus time at observation point of first example; with 0, 5 and 15 percent of noise

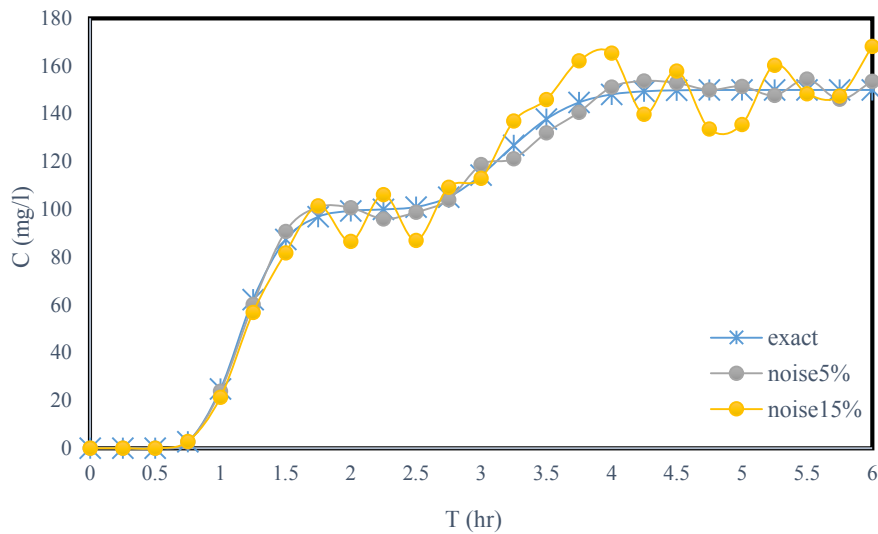
منابع مختلف در صورت وجود خطا در داده‌های مشاهداتی، حتی وجود سطح خطای ۱۵ درصد که سطح خطای بالایی محسوب می‌شود، شدت شوری منابع با دقت بالایی قابل بازیابی است. همچنین مشاهده می‌شود که شاخص خطای نسبی و مجذور مربعات خطا، با افزایش سطح خطای اعمال شده به داده‌های غلظت در نقطه مشاهداتی افزایش می‌یابد که این امر از نظر منطقی درست به نظر می‌رسد.

۴- نتیجه‌گیری

در بحث بازیابی شدت منابع آلاینده در رودخانه‌ها تحقیقات محدودی انجام شده است. در عمده‌ی این تحقیقات نیز منابع بازیابی شده، منابعی نقطه‌ای هستند که برای بازیابی نیازمند وجود یک نقطه شاهد به ازای هر منبع آلاینده می‌باشند. در نظر گرفتن چندین نقطه شاهد در طول رودخانه، منجر به تحمیل هزینه فراوان می‌شود. در این پژوهش مکان‌های ورود شوری از آب زیرزمینی به رودخانه به عنوان منابعی گسترده در نظر گرفته شده و با حل معکوس معادله انتقال در رودخانه‌ها با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، به بازیابی شدت شوری این منابع پرداخته شده

$$\hat{c} = c + \varepsilon ac \quad (8)$$

در این رابطه، \hat{c} غلظت اندازه‌گیری شده با خطا، ε برابر با سطح خطای موردنظر و a یک عدد تصادفی بین صفر و یک و با توزیع نرمال است. در این پژوهش، دو سطح خطای ۰/۰۵ و ۰/۱۵ به داده‌های مشاهداتی در نقطه شاهد برای مثال‌های اول و دوم (بخش اول) اعمال شده و مشخصات منابع در هر حالت بازیابی شده است. نمودارهای غلظت-زمان در نقطه شاهد در حالت‌های بدون اعمال خطا، اعمال ۵ درصد خطا و اعمال ۱۵ درصد خطا در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. با استفاده از نمودارهای غلظت-زمان نشان داده شده و استفاده از مدل معکوس ارائه شده، به بازیابی منابع موردنظر می‌پردازیم. نتایج بازیابی منابع شوری در مثال‌های اول و دوم (بخش اول) در جداول ۹ و ۱۰ ارائه شده است. همچنین به منظور امکان مقایسه راحت‌تر، نتایج بازیابی منابع در حالت بدون خطا به همراه منابع شوری فرض شده (جواب دقیق) نیز در این جداول ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در جداول ۸ و ۹ پیداست، شدت شوری



شکل ۱۸. نمودارهای غلظت-زمان در نقطه شاهد در مثال دوم (بخش اول): بدون اعمال خطا و با اعمال ۵ و ۱۵ درصد خطا

Fig. 18. Diagrams of concentration versus time at observation point of second example, first part; with 0, 5 and 15 percent of noise

جدول ۸. مقادیر محاسبه شده شدت شوری منبع S1 در مثال اول، بدون اعمال خطا و با اعمال ۵ و ۱۵ درصد خطا به همراه شاخص‌های خطا

Table 8. Computed salinity intensity of S1 of first example, with 0, 5 and 15 percent of noise and error indices

	W (kg/s)	RE _w	RMSE _w
Exact	۱۵	-	-
Noise (0%)	۱۵/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۲
Noise (5%)	۱۴/۹۸۷۵	۰/۰۸۳۴	۰/۰۱۲۵
Noise (15%)	۱۴/۹۲۸۷	۰/۴۷۵۱	۰/۰۷۱۲

شاهد و همچنین ثابت بودن شدت بارگذاری، می‌توان با استفاده از مدل معکوس ارائه شده در این پژوهش، به بازیابی شدت شوری منابع پرداخت. • در بازیابی شدت آلودگی هر منبع گسترده با بارگذاری ثابت، نه تنها یک نقطه شاهد بلکه تنها یک داده از نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد که تحت تاثیر منبع موردنظر باشد، برای بازیابی آن منبع کافی است. هرچه از تعداد داده‌های بیشتری در نمودار غلظت-زمان در نقطه شاهد استفاده شود، بازیابی شدت شوری منبع مجهول با دقت بالاتر و در زمان کمتری انجام خواهد شد.

است. نکات زیر مهم‌ترین نتایج حاصل از کاربرد مدل معکوس ارائه شده در این پژوهش، برای بازیابی شدت شوری منابع گسترده در رودخانه در حالت یک بعدی است:

• با استفاده از تنها یک نقطه شاهد واقع در پایین‌دست چند منبع گسترده با بارگذاری ثابت (برای هر منبع گسترده) که در فاصله مناسب از هم قرار دارند، می‌توان به بازیابی شدت شوری منابع پرداخت. وجود فاصله‌ی مناسب بین منابع، منجر به عدم اختلاط کامل غلظت منابع در نقطه شاهد می‌شود. بنابراین به علت عدم اختلاط کامل این نوع منابع با هم در نقطه

جدول ۹. مقادیر محاسبه شده شدت شوری منابع S1 و S2 در مثال دوم، بدون اعمال خطا و با اعمال ۵ و ۱۵ درصد خطا به همراه شاخص‌های خطا

Table 9. Computed salinity intensity of S1 and S2 of second example, with 0, 5 and 15 percent of noise and error indices

Source Number		W (kg/s)	RE _w	RMSE _w
S1	Exact	۱۵	-	-
	Noise (0%)	۱۵/۰۰۰۴	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۳۸
	Noise (5%)	۱۴/۸۵۸۵	۰/۹۴۳۷	۰/۱۴۱۵
	Noise (15%)	۱۵/۲۷۶۱	۱/۸۴۰۴	۰/۲۷۶۱
S2	Exact	۳۰	-	-
	Noise (0%)	۳۰	.	.
	Noise (5%)	۳۰/۰۵۹۵	۰/۱۹۸۳	۰/۰۵۹۴
	Noise (15%)	۲۹/۷۳۸۲	۰/۸۷۲۶	۰/۲۶۱۷

نمی‌توان تابع شدت منابع را به طور کامل بازیابی نمود. بلکه بسته به فاصله منابع از هم، تنها بخشی از تابع شدت هر منبع قابل بازیابی است. از این رو برای بازیابی منابع آلاینده با شدت متغیر لازم است تا به ازای هر منبع یک نقطه شاهد در نظر گرفته شود.

به منظور بهبود روش و بسط چارچوب ارائه شده، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده به مقایسه عملکرد روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ارائه شده در این پژوهش با روش‌های مبتنی بر رویکردهای ریاضی و احتمالاتی پرداخته شود. همچنین استفاده از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مقایسه نتایج و سرعت همگرایی آن‌ها با هم پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- [1] M. Mazaheri, Mathematical Model for Identification of Pollution Sources in the Rivers: Reconstruction of Location and Release History of the Sources, Ph.D. Thesis in Water Structures Engineering, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, (2011) (In Persian).
- [2] W. P. Cheng, Y. Jia, Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location

• هرچه فاصله دو منبع از هم بیشتر باشد، هر یک از منابع فرصت بیشتری برای ثبات خود و رسیدن به حداکثر مقدار غلظت در نقطه شاهد خواهند داشت. بنابراین غلظت منابع در نقطه شاهد کمتر دچار اختلاط شده و در نتیجه اطلاعات بیشتری از منابع در نقطه شاهد به صورت تفکیک شده به دست خواهد آمد. در این حالت طول پله تشکیل شده در منحنی غلظت- زمان در نقطه شاهد نیز بیشتر خواهد بود. هرچه طول پله بیشتر باشد بازیابی مجهولات مسئله (شدت شوری منابع) با دقت بیشتری انجام خواهد شد. در حالی که در صورت نبود فاصله یا وجود فاصله خیلی کم بین دو منبع، منحنی غلظت- زمان در نقاط شاهد حاوی اطلاعاتی اندک یا فاقد اطلاعات مورد نیاز برای بازیابی هر دو منبع خواهد بود.

- علی‌رغم وجود سطح خطای ۵ و ۱۵ درصد در داده‌های مشاهداتی، مدل معکوس ارائه شده قادر است تا با دقت بالایی شدت شوری منابع گسترده با بارگذاری ثابت را تنها با استفاده از یک نقطه شاهد بازیابی نماید.
- دقت مدل در بازیابی شدت منابع براساس شاخص‌های آماری محاسبه شده، حتی در صورت وجود خطا در داده‌های مشاهداتی، بیش از ۹۹ درصد می‌باشد.
- اگر منابع دارای بارگذاری ثابت نباشند، با استفاده از این روش

- 6(2) (2014)136–140.
- [12] M. Mazaheri, J.M.V. Samani, H.M.V. Samani, Mathematical model for pollution source identification in rivers, *Environmental Forensics*, 16(4) (2015) 310-321.
- [13] A. Hamdi, Detection and identification of multiple unknown time-dependent point sources occurring in 1D evolution transport equations. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 25 (2017), 532-554.
- [14] N. Mashhadgarne, M. Mazaheri, J.M.V. Samani, An Analytical solution to two-dimensional unsteady pollutant transport equation with arbitrary initial condition and source term in the open channels, *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(1) (2021) 77-90, (In Persian).
- [15] M. Amirabdollahian, B. Datta, Reliability Evaluation of Groundwater Contamination Source Characterization under Uncertain Flow Field, *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(7) (2015) 512-518.
- [16] M.K. Jha, B. Datta, Simulated annealing based simulation-optimization approach for identification of unknown contaminant sources in groundwater aquifers, *Desalination and Water Treatment*, 32 (2011)79-85.
- [17] I. T. Telci, M.M. Aral, *Water Quality Exposure and Health*, Springer, NewYork, 2011.
- [18] A. Di Nardo, G. Santonastaso, R. Battaglia, D. Musmarra, F. Tuccinardi, F. Castaldo, B. Della Ventura, M. Iervolino, R. Velotta, Smart identification system of surface water contamination by an innovative biosensor network, in: *Proceedings of Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and to the SECOTOX Conference*, 2015.
- [19] S. p. Zhang, X. k. Xin, Pollutant source identification model for water pollution incidents in small straight rivers based on genetic algorithm, *Applied Water Science*, 7(4) (2017) 1955-1963.
- [20] H. K. Esfahani, B. Datta, Fractal Singularity–Based Multiobjective Monitoring Networks for Reactive Species Contaminant Source Characterization, *Journal of probability density function method*, *Advances in Water Resources*, 33(4) (2010) 397–410.
- [3] Q. a. Dang, M. Ehrhardt, G. L. Tran, D. Le, *Mathematical Modeling and Numerical Algorithms for Simulation of Oil Pollution*, *Environmental Modeling and Assessment*, 17(3) (2011) 275–288.
- [4] C. Yuan-hua, W. Peng, J. Ji-ping, G. Liang, Contaminant point source identification of rivers chemical spills based on correlation coefficients optimization method, *China Environmental Science*, 31(11) (2013) 1802-1807.
- [5] H. Yang, D. Shao, B. Liu, J. Huang, X. Ye, Multi-point source identification of sudden water pollution accidents in surface waters based on differential evolution and Metropolis–Hastings–Markov Chain Monte Carlo, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30 (2) (2015) 507-522.
- [6] A. Ghane, M. Mazaheri, J.M.V. Samani, Location and release time identification of pollution point source in river networks based on the Backward Probability Method, *Journal of environmental management*, 180 (2016) 164-171.
- [7] Y. J. Lee, C. Park, M.L. Lee, Identification of a Contaminant Source Location in a River System Using Random Forest Models, *Water Journal*, 10(4) (2018) 391.
- [8] M. BaratiMoghaddam, M. Mazaheri, J.M.V. Samani, F. Boano, An Innovative Framework for Real Time Monitoring of Pollutant Point Sources in River Networks, *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, (2022) 1-28.
- [9] Y. Tong, Z. Deng, Moment-Based Method for Identification of Pollution Source in Rivers, *Journal of Environmental Engineering*, 141(10) (2012) 04015026.
- [10] Z. Wang, J. Liu, Identification of the pollution source from one-dimensional parabolic equation models, *Applied Mathematics and Computation*, 219(8) (2012) 3403-3413.
- [11] T. S. Li, S. M. Wong, Development of an Efficient and Accurate Global Space-Time Radial Basis Collocation Model for Estimation of River Pollution Source, *International Journal of Engineering and Technology*,

- Management, 11(2) (2021) 325-343, (In Persian).
- [24] E. Essouayed, E. Verardo, A. Pryet, R. Chassagne, O. Atteia, An iterative strategy for contaminant source localisation using GLMA optimization and Data Worth on two synthetic 2D Aquifers, *Journal of contaminant hydrology*, 228 (2020), 103554.
- [25] B. Fakoori Dekahi, Simulation of spatial and temporal variations in hydrodynamics and water salinity of Karun River (Molasani to Farsiat) with flow changes and loading management of pollution sources in the river, Master dissertation in Water Structures Engineering, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, (2017) (In Persian).
- [26] P.S. Mahar, B. Datta, Optimal identification of groundwater pollution sources and parameter estimation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127 (1) (2001) 20–29.
- Water Resources Planning and Management, 144 (2018), 04018021.
- [21] W. Lu, H. Wang, J. Li, Parallel heuristic search strategy based on a Bayesian approach for simultaneous recognition of contaminant sources and aquifer parameters at DNAPL-contaminated sites, *Environmental Science and Pollution Research*, (2020), 1-15.
- [22] A. Jamshidi, J. M. V. Samani, H. M.V. Samani, A. Zanini, M.G. Tanda, M. Mazaheri, Solving inverse problems of unknown contaminant source in groundwater-river integrated systems using a surrogate transport model based optimization, *Water*, 12(9) (2020), 2415.
- [23] A. Jamshidi, J. M. V. Samani, H. M.V. Samani, M. Mazaheri. The Comparison of Inverse approaches Simulation-Optimization and Surrogate Transport Model for Pollution Source Characteristics Identification in Aquifer-River Integrated Systems, *Water and Irrigation*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Yousofvand, J. Mohammad Vali Samani, H. Mohammad Vali Samani, Recovering the salinity intensity of distributed sources in the river using inverse simulation-optimization approach, Amirkabir J. Civil Eng., 55(12) (2024) 2503-2526.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21675.7791](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21675.7791)



