



## Recovering the Salinity Distributed Sources Into River from Aquifer Using the Simulation-Optimization Method

Fatemeh Yousofvand<sup>1</sup> | Jamal Mohammad Vali Samani<sup>2</sup> |  
Hossein Mohammad Vali Samani<sup>3</sup> | Mehdi Mazaheri<sup>4</sup>

1. Engineering and Water Management Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [f.yousofvand@modares.ac.ir](mailto:f.yousofvand@modares.ac.ir)
2. Corresponding Author, Engineering and Water Management Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [samani\\_j@modares.ac.ir](mailto:samani_j@modares.ac.ir)
3. Civil Engineering Department, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. E-mail: [hossein.samani@scu.ac.ir](mailto:hossein.samani@scu.ac.ir)
4. Engineering and Water Management Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [m.mazaheri@modares.ac.ir](mailto:m.mazaheri@modares.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

### Article history:

Received: 30 January 2023  
Received in revised form:  
3 April 2023  
Accepted: 6 June 2023  
Published online: 2 July 2023

### Keywords:

*Advection-Dispersion Equation,*  
*Backward Model,*  
*Forward Model,*  
*Genetic Algorithm,*  
*MIKE11 Software,*  
*Numerical Simulation.*

### ABSTRACT

Due to the increase in population and the need for water supply, preservation and protection of surface water and groundwater resources has been considered by governments. One of the pollutant sources in rivers is entering salinity from groundwater into the river, that in this research is considered as distributed (non-point) sources. The goal is to identify the salinity intensity, location and length of sources by measuring the temporal distribution of concentration in one observation point. For this purpose, the inverse solution of advection-dispersion equation in the river was employed using the simulation-optimization approach. MIKE11 numerical model was used to simulate flow and transfer of salinity in the river, and genetic algorithm was employed for optimization. In the proposed model, considering only one observation point with some measured intensity data for recovering several sources, unknown location and length of the sources, in addition to their intensities is the most significant advantage of the present study. The model verified by using hypothetical examples, 40 km section of the Karun River and also by applying five and 15 percent noise to the observation data. The results confirm the ability of the model to recover the specifications of several distributed sources using only one observation point. With five percent of noise in the observation data, all three specifications of sources can be recovered with the desired accuracy. While at 15 percent of noise, the accuracy of the model in recovering the location and length of sources was decreased. Also, to recover the specifications of each source, employing only three points of the measured data in the ascending part are sufficient.

**Cite this article:** Yousofvand, F., Mohammad Vali Samani, J., Mohammad Vali Samani, H., & Mazaheri, M. (2023). Recovering the Salinity Distributed Sources Into River from Aquifer Using the Simulation-Optimization Method. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (2), 471-486. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355061.1051>





## بازیابی منابع گسترده شوری وارده به رودخانه از آبخوان با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

فاطمه یوسفوند<sup>۱</sup> | جمال محمدولی سامانی<sup>۲</sup> | حسین محمدولی سامانی<sup>۳</sup> | مهدی مظاهری<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [f.yousofvand@modares.ac.ir](mailto:f.yousofvand@modares.ac.ir)
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [samani\\_j@modares.ac.ir](mailto:samani_j@modares.ac.ir)
۳. گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. رایانامه: [hossein.samani@scu.ac.ir](mailto:hossein.samani@scu.ac.ir)
۴. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [m.mazaheri@modares.ac.ir](mailto:m.mazaheri@modares.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

با توجه به افزایش جمعیت و نیاز به تأمین آب، حفظ و حراست از منابع آب سطحی و زیرزمینی موردتوجه دولت‌ها قرار گرفته است. یکی از منابع آلاینده رودخانه‌ها، ورود شوری از منابع آب‌زیرزمینی به رودخانه است که در این پژوهش به‌عنوان منابعی گسترده در نظر گرفته شده است. هدف پژوهش، یافتن شدت شوری، مکان و طول منابع با استفاده از توزیع زمانی غلظت در یک نقطه شاهد است. بدین منظور حل معکوس معادله جابه‌جایی - پراکندگی در رودخانه با رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی انجام شد. برای شبیه‌سازی جریان و انتقال شوری از نرم‌افزار MIKE11 و برای بهینه‌سازی مجهولات مسأله از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. استفاده از یک نقطه شاهد در بازیابی چند منبع، مجهول بودن مکان و طول منابع علاوه بر شدت و تعیین حداقل داده لازم از نمودار برای بازیابی مجهولات مسأله، از مهم‌ترین نقاط قوت این پژوهش هستند. صحت‌سنجی مدل توسط مثال‌های فرضی، بازه ۴۰ کیلومتری از رودخانه کارون و نیز اعمال سطوح پنج و ۱۵ درصد خطا به داده‌های مشاهداتی انجام شد. نتایج مؤید توانایی مدل در بازیابی مشخصات چند منبع با استفاده از تنها یک نقطه شاهد می‌باشد. در صورت وجود سطح خطای پنج درصد در داده‌های مشاهداتی، بازیابی هر سه مشخصه منابع با دقت مطلوبی انجام می‌شود. درحالی‌که در سطح خطای ۱۵ درصد، دقت مدل در بازیابی مکان و طول منابع کاهش می‌یابد. هم‌چنین برای بازیابی مشخصات هر منبع، تنها سه داده در قسمت صعودی نمودار که تحت تأثیر منبع موردنظر باشد کفایت می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

### کلیدواژه‌ها:

الگوریتم ژنتیک،

شبیه‌سازی عددی،

مدل مستقیم،

مدل معکوس،

معادله جابه‌جایی - پراکندگی،

نرم‌افزار MIKE11.

**استناد:** یوسفوند، فاطمه؛ محمدولی سامانی، جمال؛ محمدولی سامانی، حسین و مظاهری، مهدی (۱۴۰۲). بازیابی منابع گسترده شوری وارده به رودخانه از آبخوان با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۲)، ۴۷۱-۴۸۶.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355061.1051>



## ۱. مقدمه

باتوجه به رشد قابل توجه منابع آلاینده رودخانه‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، شناخت نوع منبع انتشار آلاینده و همچنین شدت و مکان دقیق انتشار بسیار دارای اهمیت است. در مسائلی که تحت عنوان مدل مستقیم<sup>۱</sup> مطرح می‌شوند، شدت، مکان و زمان آلودگی مشخص بوده و هدف تعیین مکان آلاینده و چگونگی توزیع غلظت آلودگی است. چنانچه شدت و مکان ورود آلاینده ناشناخته باشد، به‌منظور تعیین شدت و مکان رهاسازی از مدل‌های معکوس<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در مبحث بازیابی منابع آلاینده، حل معکوس معادله انتقال در رودخانه با استفاده از یکی از سه رویکرد زیر انجام می‌شود؛ رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، رویکرد ریاضی و رویکرد احتمالاتی و زمین‌آماری. در رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، 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 بالاست. کاربرد این روش در شناسایی منابع آلاینده در آب‌های زیرزمینی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته و کارایی آن تأیید شده است. با این حال، استفاده از این رویکرد در حل معکوس معادله انتقال در رودخانه به دهه اخیر محدود می‌شود. Jha and Datta (2011) با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی به حل معکوس معادله انتقال و شناسایی منابع آلاینده نقطه‌ای در آب‌های زیرزمینی پرداختند. آن‌ها برای ایجاد مدل خود از لینک یک روش بهینه‌سازی با مدل‌های شبیه‌سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی، MODFLOW و MT3DMS استفاده کردند. همچنین در این پژوهش به مقایسه روش‌های بهینه‌سازی تابکاری شبیه‌سازی شده (SA) و الگوریتم ژنتیک پرداخته شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از روش SA منجر به همگرایی سریع‌تر پاسخ‌ها به جواب بهینه شده و داده‌های واقعی را با دقت بیش‌تری تخمین می‌زند. Prakash and Datta (2014) به شناسایی منابع آلاینده در آب‌زیرزمینی در شرایطی پرداختند که مکان منبع آلودگی، مقدار شار آلاینده و زمان رهاسازی آن، یعنی مشخصات منبع آلودگی ناشناخته باشد. مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی توسعه داده شده در این پژوهش، برای دو سناریو مختلف بررسی و نتایج موفقیت‌آمیز بیان شد. Nardo *et al.* (2015) مدلی یک‌بعدی را براساس 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 نقطه برداشت در طول رودخانه موجود باشد. Zhang and Xin (2017) با استفاده از الگوریتم ژنتیک روشی را به‌منظور تخمین مشخصات آلاینده‌ای که به‌صورت ناگهانی به رودخانه تخلیه می‌شود ارائه کردند. در این پژوهش از رابطه تحلیلی انتقال آلاینده به‌صورت یک‌بعدی و غیر ماندگار در جهت تشکیل تابع هدف بهینه‌سازی استفاده شده است.

رویکرد دوم به‌منظور حل مسأله رویکرد ریاضی است. عموماً این روش‌ها به‌صورت مستقیم معادله معکوس را حل می‌کنند. به‌علاوه همراه با روش‌های ریاضی، به‌منظور حل مسأله بدخیمی نیاز به استفاده از یک روش تنظیم است. این روش‌ها هزینه محاسباتی کم‌تری داشته، اما در مقابل از لحاظ ریاضی پیچیدگی‌های خاص خود را داراست. Tong and Deng (2012) با استفاده از تبدیل لاپلاس روشی را به‌منظور تخمین تابع رهاسازی و همچنین جرم رهاسازی ارائه کردند. در این پژوهش با به‌کارگیری تبدیل لاپلاس معادله مومنتوم استخراج شده و سپس شبیه‌سازی برای لایه‌های مختلف جریان انجام می‌شود. Mazaheri *et al.* (2015) به تعیین منابع آلاینده 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 حالتی 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. سومین رویکرد در حل معکوس معادله انتقال، استفاده از روش‌های احتمالاتی و زمین‌آماری است. در این روش‌ها پارامترهای مجهول از طریق توزیع‌های احتمالاتی توصیف می‌شوند و

سعی بر این است تا پاسخ‌های مسأله با حداقل تکرار و بدون شبیه‌سازی‌های متعدد محاسبه شود. Yuan *et al.* (2013) روشی را براساس ترکیبی از روش‌های بیزی و روش‌های مونت کارلو به منظور شناسایی منابع آلاینده با الگوی تخلیه ناگهانی در آب‌های سطحی ارائه کردند. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای محاسبه‌شده به خوبی با مقادیر واقعی مطابقت دارند و الگوریتم ارائه‌شده دارای مزایایی مانند حداقل نیاز به داده و برنامه نویسی آسان است. Cupola *et al.* (2015) مدل احتمال برگشتی و مدل مبتنی بر روش‌های زمین‌آماری را با یکدیگر مقایسه کردند. در این مقاله از داده‌های آزمایشگاهی تحت شرایط کاملاً کنترل‌شده استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش زمین‌آماری قادر است، تابع اولیه رهاسازی آلاینده و مکان رهاسازی را به خوبی تشخیص دهد. Ghane *et al.* (2016) با تکیه بر مدل احتمال برگشتی به شناسایی زمان و مکان ورود آلاینده نقطه‌ای به شبکه رودخانه پرداختند. در این پژوهش یک مدل عددی براساس آنالیز جزء الحاقی توسعه داده شد. هم‌چنین نشان داده شد که معادله حاکم بر حرکت احتمال جزء الحاقی معادله انتقال 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. درحالی‌که به علت سرعت بسیار بیش‌تر جریان در رودخانه‌ها نسبت به سفره‌های آب زیرزمینی، تخلیه آلاینده‌ها از رودخانه در زمان بسیار کوتاه‌تری صورت می‌گیرد. از این‌رو، تشخیص مکان و مقدار آلودگی وارده به رودخانه‌ها به‌عنوان یک منبع مهم آب شیرین باید با سرعت و دقت بیش‌تری انجام شود. در اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در رودخانه‌ها نیز حل معکوس مسأله تنها برای بازیابی مقدار غلظت رهاشده از منابع آلاینده صورت گرفته است. در این پژوهش‌ها مکان منبع آلاینده یا معلوم فرض شده یا از اصل "تمام منابع آلاینده پتانسیل" استفاده شده است که در هر حالت، مکان به‌عنوان پارامتر معلوم در محاسبات در نظر گرفته شده و تنها مجهول مسأله شدت منابع آلاینده است. هم‌چنین منابع آلاینده منابعی نقطه‌ای در نظر گرفته شده‌اند و پژوهش‌گران تأکید داشته‌اند که برای بازیابی غلظت آلاینده رهاشده از منابع نیاز است تا به‌ازای هر منبع آلاینده، یک نقطه شاهد در پایین‌دست آن در نظر گرفته شود. به‌عبارت دیگر، با یک نقطه شاهد نمی‌توان چند منبع آلاینده را بازیابی کرد و باید بین منابع، نقاط شاهدی در نظر گرفته شود. 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 تأثیر 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. بنابراین می‌توان گفت معلوم فرض کردن مکان منابع، در نظر گرفتن چندین نقطه شاهد در طول رودخانه و نیز نقطه‌ای بودن عمده منابع آلاینده مورد مطالعه، از جمله مهم‌ترین شکاف‌های علمی موجود در پژوهش‌های گذشته است. درحالی‌که در پژوهش حاضر منابع مورد نظر منابعی گسترده می‌باشند و با استفاده از تنها یک نقطه شاهد در پایین‌دست رودخانه به بازیابی هر سه مشخصه مکان، شدت و طول گستردگی منابع می‌پردازیم.

مسأله مطرح در این پژوهش، انتقال شوری از آب زیرزمینی به رودخانه و افزایش میزان املاح و شوری (TDS) در رودخانه‌ها از حد مجاز است. در این پژوهش روشی کاربردی برای حل معکوس معادله انتقال در رودخانه مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ارائه می‌شود که به بازیابی مشخصات چندین منبع گسترده شوری در رودخانه می‌پردازد. به‌عبارتی مکان‌های ورود آب زیرزمینی به رودخانه، به‌عنوان یک یا چند منبع گسترده در نظر گرفته می‌شوند و هدف بازیابی مکان، طول گستردگی و شدت شوری ( $W(\text{kg/s})$ ) این منابع، تنها با استفاده از یک نقطه شاهد در پایین‌دست رودخانه می‌باشد. منابع مورد نظر در این پژوهش، منابعی گسترده با بارگذاری ثابت هستند که در فاصله قابل توجهی از هم قرار دارند. وجود فاصله 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، منبع دوم به نقطه شاهد می‌رسد و باعث افزایش دوباره غلظت در این نقطه می‌شود تا این که غلظت در نقطه شاهد در حداکثر مقدار حاصل از هر دو منبع ثابت می‌شود. 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. روش استفاده شده در پژوهش حاضر به لحاظ استفاده از تنها یک نقطه شاهد در بازیابی مشخصات چندین منبع شوری، مجهول بودن مکان و طول گستردگی منابع علاوه بر شدت آن و نیز ارائه چهارچوب کلی در بازیابی منابع گسترده، با پژوهش‌های قبل متفاوت است.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این بخش از پژوهش، روش حل مسأله توسط مدل‌های مستقیم و معکوس و جزئیات هر کدام از آن‌ها توضیح داده می‌شود. مطابق روال پژوهش‌های مشابه، برای حل معکوس مسأله انتقال در رودخانه به نتایج حل مستقیم به‌عنوان ورودی مسأله نیاز است. بنابراین، ابتدا با استفاده از مدل مستقیم، معادلات هیدرودینامیک و انتقال جرم ماده آلاینده حل می‌شوند. خروجی‌های مدل مستقیم (داده‌های غلظت- زمان در نقطه شاهد)، به‌عنوان ورودی مدل معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس با اجرای مدل معکوس، نتایج نهایی مسأله که عبارتند از مکان، طول و شدت شوری وارده از آبخوان به رودخانه به‌دست می‌آید.

### ۲-۱. مدل مستقیم

در این پژوهش، رودخانه به‌عنوان یک سیستم یک بعدی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت معادلات جریان و انتقال در رودخانه نیز باید به‌صورت یک بعدی حل شوند. مدل مستقیم دارای دو بخش، مدل جریان (HD) و مدل جابه‌جایی-پراکندگی (AD) است. ابتدا مدل جریان اجرا می‌شود و خروجی‌های آن که شامل سرعت و عمق در مکان‌ها و زمان‌های مختلف است همراه با مکان، طول گستردگی و شدت منابع به‌عنوان ورودی‌های مدل جابه‌جایی-پراکندگی در نظر گرفته می‌شود. پس از اجرای مدل جابه‌جایی-پراکندگی، توزیع مکانی و زمانی غلظت آلاینده در طول رودخانه به‌دست می‌آید. معادلات مدل مستقیم شامل معادلات سنت-ونانت<sup>۳</sup> و معادله جابه‌جایی-پراکندگی<sup>۴</sup> 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.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AkC + C_s Q_s \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این معادلات، Q برابر با دبی جریان، A سطح مقطع جریان، h عمق آب رودخانه، S<sub>f</sub> شیب خط انرژی، g شتاب ثقل، C غلظت ماده آلاینده، D ضریب پراکندگی طولی، k ضریب زوال ماده آلاینده، C<sub>s</sub> غلظت منابع آلاینده، Q<sub>s</sub> دبی منابع آلاینده و x و t به ترتیب بیانگر بعد مکان و زمان در معادلات می‌باشند.

در این پژوهش، برای حل معادلات جریان و انتقال در رودخانه (معادلات ۱ تا ۳) از مدل عددی MIKE11 استفاده

می‌شود. در مدل عددی MIKE11 حل معادلات یک‌بعدی جریان و انتقال با استفاده از یک طرح تفاضل محدود ضمنی به نام الگوریتم شش نقطه‌ای ابوت<sup>۵</sup> انجام می‌شود (Abbott and Ionescu, 1967). این مدل دارای مدول‌های مختلفی بوده و کارکردهای متفاوتی را امکان‌پذیر می‌کند. با توجه به موضوع این پژوهش، برای انجام شبیه‌سازی انتقال شوری در رودخانه، از مدول هیدرودینامیک و مدول جابه‌جایی-پراکندگی استفاده شده است.

## ۲-۲. مدل معکوس

همان‌طور که گفته شد برای حل معکوس معادله انتقال و تهیه مدل معکوس سه روش مختلف وجود دارد. در این پژوهش از حل معکوس معادله انتقال در رودخانه با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده می‌شود. برای تهیه مدل معکوس موردنظر کد پیوند بین مدل شبیه‌سازی MIKE11 و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در محیط MATLAB نوشته شد.

## ۲-۳. مدل بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

باید مشخصات هر یک از منابع، شامل شدت شوری، مکان و طول گستردگی به‌گونه‌ای به‌دست آیند که سری زمانی غلظت شوری محاسبه‌شده در نقطه شاهد توسط مدل معکوس، با سری زمانی غلظت شوری مشاهده‌ای در این نقطه برابر یا دارای حداقل اختلاف باشد. حصول این هدف نیازمند استفاده از یک روش بهینه‌سازی است. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده می‌شود. در الگوریتم توسعه داده‌شده، هر کروموزوم نشان‌دهنده مشخصات منبع آلاینده است و تعداد ژن‌های آن برابر با تعداد مجهولات مسأله است. این کروموزوم‌ها آزادانه تولید، تکثیر و جهش داده می‌شوند. این روند تا رسیدن به شرط همگرایی یا توقف، دنبال خواهد شد. در این پژوهش، شرط همگرایی، رسیدن به آخرین نسل است.

با توجه به این‌که رویکرد حداقل کردن مربع تفاضلات، روشی پذیرفته و مؤثر در مطالعات بهینه‌سازی است، مسأله بهینه‌سازی ما به این صورت تعریف می‌شود: تعیین مقادیر شدت شوری ( $W$ )، مکان و نیز طول گستردگی ( $L$ ) هر یک از بازه‌های اندرکنش رودخانه با آبخوان مجاور، به‌گونه‌ای که تابع هدف  $F$  حداقل شود.

$$F = \sum_{i=1}^n (c_i^{obs} - c_i^{cal})^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه،  $c_i^{obs}$  غلظت شوری مشاهده‌ای (اندازه‌گیری‌شده) در نقطه شاهد و  $c_i^{cal}$  غلظت شوری محاسبه‌شده در این نقطه، از حل معکوس معادله انتقال است که برای تکرارهای مختلف محاسبه می‌شوند. بنابراین هدف اصلی در این پژوهش، شناسایی مکان‌های ورود شوری به رودخانه، تعیین طول هر منطقه ( $L_1, L_2, L_3, L_4, \dots, L_n$ ) و نیز محاسبه شدت شوری واردشده به رودخانه در هر یک از این مکان‌هاست ( $W_1, W_2, W_3, W_4, \dots, W_n$ ) که متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله، نامیده می‌شوند. شدت یک متغیر پیوسته است و می‌تواند هر مقداری را در محدوده تعیین شده انتخاب نماید (رابطه ۵).

$$0 < w \leq w_{max} \quad \text{رابطه (۵)}$$

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 به‌ترتیب صفر و ۵۰۰ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشند. همچنین طول گستردگی منابع در محدوده زیر قابل تعریف است:

$$0 < L \leq L_{max} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)،  $L_{max}$  بیشترین مقدار ممکن برای طول گستردگی منبع موردنظر است و مقدار آن با توجه به مکان در نظر گرفته شده برای نقطه شاهد و در نظر گرفتن این نکته که منبع شوری بالاتر از نقطه شاهد قرار گرفته است، تعیین می‌شود. از این رو، مقدار  $L_{max}$  برای هر منبع و در هر مثال متفاوت در نظر گرفته شده است. در مجموع می‌توان روش حل مسأله در مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیق شده را به صورت مراحل زیر بیان نمود:

۱. ورود داده‌های اولیه به مدل شامل توپوگرافی و مقاطع عرضی رودخانه، شرایط اولیه و مرزی مدل جریان و مدل جابه‌جایی- پراکندگی
۲. تولید شدت و طول‌های تصادفی برای منابع شوری ( $W$  و  $L$ ) توسط الگوریتم ژنتیک
۳. اجرای نرم‌افزار MIKE11 با داده‌های مراحل قبل و محاسبه سری زمانی غلظت در نقطه شاهد (غلظت محاسبه‌ای)
۴. محاسبه تابع هدف مسأله با داشتن غلظت‌های مشاهداتی و محاسبه‌ای در نقطه شاهد
۵. بررسی برقراری شرط همگرایی. اگر شرط همگرایی برقرار باشد برنامه پایان می‌یابد و مشخصات محاسبه‌شده برای منبع موردنظر، شامل شدت و طول گستردگی منبع، نشان داده می‌شود. در غیر این صورت، مشخصات منبع موردنظر تغییر کرده و مراحل دو تا پنج تا رسیدن به همگرایی تکرار می‌شود.

#### ۲-۴. نحوه صحت‌سنجی مدل معکوس

صحت‌سنجی مدل معکوس ارائه‌شده در این پژوهش، با استفاده از مثال‌های فرضی متعدد و در حالات مختلفی از نظر تعداد و فاصله منابع گسترده شوری از هم و نیز تعداد مجهولات متفاوت انجام شده است. در بخش ارائه نتایج، دو نمونه از مثال‌های اصلی ارائه شده است. در مثال‌های ارائه‌شده، یک رودخانه با مقاطع نامنظم و طول ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. جریان رودخانه 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 پایین دست (۹۹۰ متر) می‌باشد. برای مدل انتقال نیز شرط مرزی بالادست به صورت غلظت ثابت صفر (بدون آلودگی) و برای پایین دست شرط مرزی به صورت گرادیان مکانی غلظت برابر با صفر ( $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ ) در نظر گرفته شد. برای شرایط اولیه هیدرودینامیک در مدل جریان از شروع خودکار<sup>۲</sup> استفاده شده است. غلظت اولیه شوری در رودخانه نیز صفر در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل جریان، ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۰۳۵،  $\Delta x$  برابر با ۱۰۰ متر و  $\Delta t$  ۳۰ ثانیه می‌باشد. ضریب پراکندگی ۶۵ مترمربع بر ثانیه و به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین شوری به عنوان یک آلاینده واکنش‌ناپذیر با ضریب زوال صفر وارد مدل شد ( $k=0$ ). مدل ارائه‌شده علاوه بر مثال‌های فرضی، با استفاده از منابع شوری فرضی، برای بخشی از رودخانه کارون به طول ۴۰ کیلومتر مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

یک روش مهم دیگر در صحت‌سنجی عملکرد مدل‌های معکوس با استفاده از مثال‌های فرضی، اعمال خطا به داده‌های مشاهداتی در ایستگاه شاهد و مشاهده تأثیر این خطا در بازیابی مشخصات منبع آلاینده است. زیرا ممکن است در عمل اندازه‌گیری‌های انجام‌شده 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 (۷) استفاده شده است (Mahar and Datta, 2001):

$$\hat{c} = c + \varepsilon ac \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه،  $\hat{c}$  غلظت اندازه‌گیری‌شده با خطا،  $\varepsilon$  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 ترتیب به عنوان سطح خطای پایین و

سطح خطای بالا در نظر گرفته شده است. این دو سطح خطا به داده‌های مشاهداتی در نقطه شاهد برای مثال دوم اعمال و مشخصات منابع در هر حالت بازیابی شده است.

به منظور ارزیابی نتایج حاصله و درک بهتر عملکرد مدل معکوس، شاخص‌های خطای نسبی (RE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای پارامترهای شدت شوری و طول منابع گسترده، مطابق روابط (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) در نظر گرفته شده‌اند.

$$RMSE_w = \sqrt{\frac{\sum (w_{cal} - w_{obs})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$RMSE_L = \sqrt{\frac{\sum (L_{cal} - L_{obs})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$RE_w = \frac{(w_{cal} - w_{obs})}{w_{obs}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$RE_L = \frac{(L_{cal} - L_{obs})}{L_{obs}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در این روابط،  $w_{cal}$  برابر با شدت شوری محاسبه‌شده،  $w_{obs}$  شدت شوری دقیق یا واقعی،  $L_{cal}$  طول گستردگی محاسبه‌شده و  $L_{obs}$  طول گستردگی دقیق یا واقعی می‌باشد.

### ۳. نتایج و بحث

در این بخش ابتدا مدل معکوس مورد نظر با ذکر دو مثال مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مثال اول به بازیابی مکان، طول و شدت شوری یک منبع گسترده با استفاده از یک نقطه شاهد پرداخته می‌شود. هم‌چنین تعداد داده‌های لازم برای بازیابی مجهولات که باید از نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد برداشت شود، تعیین می‌شود. در مثال دوم به بازیابی مکان، طول و شدت شوری دو منبع گسترده با استفاده از تنها یک نقطه شاهد می‌پردازیم. سپس، مدل معکوس با در نظر گرفتن سه منبع شوری فرضی در بخشی از رودخانه کارون به طول ۴۰ کیلومتر صحت‌سنجی می‌شود. نحوه تعریف منابع آلاینده گسترده در مدل MIKE11 به این صورت است که باید کیلومتر از ابتدا و انتهایی منبع و نیز شدت آلودگی را تعیین کرد. اختلاف کیلومتر از ابتدایی و انتهایی منبع، گستردگی (طول) منبع را نشان می‌دهد. با داشتن کیلومتر از ابتدایی و انتهایی منبع، علاوه بر طول، مکان منبع نیز تعیین می‌شود. بنابراین به‌ازای هر منبع، سه مجهول داریم. کیلومتر از ابتدای منبع<sup>۷</sup>، کیلومتر از انتهای منبع<sup>۸</sup> و شدت شوری و یا به‌عبارت دیگر، طول، مکان و شدت شوری.

#### ۳-۱. مثال اول) بازیابی شدت، مکان و طول یک منبع گسترده با یک نقطه شاهد

در شکل (۱) موقعیت منبع S1 و نقطه شاهد نسبت به ابتدای رودخانه فرضی نشان داده شده است. منبع S1 با شدت شوری ۱۵ کیلوگرم بر ثانیه، در کیلومتر دو تا سه رودخانه واقع شده است. نقطه شاهد نیز در ۶/۵ کیلومتری از ابتدای رودخانه قرار دارد. در این مثال، تعداد مجهولات مسأله سه مجهول (شدت شوری، مکان و طول منبع S1) می‌باشد. نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد در شکل (۲) نشان داده شده است.

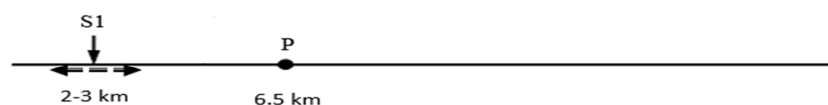


Figure 1. Location of distributed source (S1) and observation point (p)



همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود از ساعت دو به بعد غلظت در نقطه شاهد به بیش‌ترین مقدار خود که ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر است رسیده و در سایر زمان‌ها در این مقدار ثابت می‌ماند. ابتدا با استفاده از همه داده‌های نمودار غلظت- زمان و اجرای مدل معکوس به بازیابی سه مجهول مسأله یعنی شدت شوری، مکان و طول منبع S1 می‌پردازیم. مشخصات دقیق و بازیابی‌شده منبع S1، در جدول ۱ ارائه شده است. نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد پس از بازیابی منبع S1، در شکل (۳) نشان داده شده است.

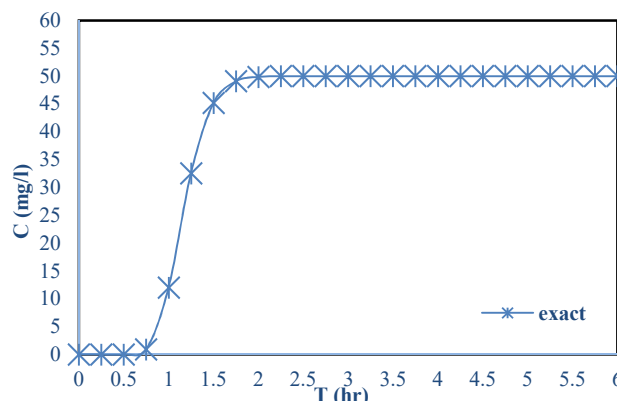


Figure 2. Measured concentration versus time at observation point

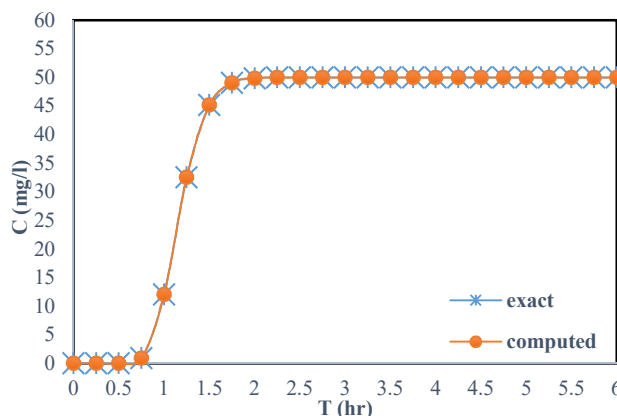


Figure 3. Measured (exact) and computed concentration versus time at observation point (p=6.5 km).

Table 1. Exact and computed specifications of S1

	W (kg/s)	Start chainage (m)	End chainage (m)	L (m)	RE <sub>w</sub> (%)	RE <sub>L</sub> (%)
Exact	15	2000	3000	1000	-	-
Computed	14.99	1999.99	3000.01	1000.01	0.0001	0.001

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، داده‌های مشاهده‌ای در نقطه شاهد با اطلاعات محاسبه‌شده در این نقطه توسط مدل معکوس، با دقت بالایی بر هم منطبق است. در این اجرا از همه داده‌های نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد برای بازیابی مشخصات منبع S1 استفاده شده است. در ادامه با استفاده از تعداد متفاوتی از داده‌های نمودار غلظت- زمان و اجرای مدل معکوس، به بررسی تعداد داده موردنیاز برای بازیابی مشخصات منبع S1 می‌پردازیم. در این مثال مدت زمان شبیه‌سازی شش ساعت و گام زمانی اجرای محاسبات ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است.

این‌رو، نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد دارای ۲۵ عدد است که دو عدد اول آن صفر می‌باشند. مشخصات بازیابی شده منبع S1 در حالات مختلف، در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 2. Computed specifications of S1 using different numbers of data

Explanation	W (kg/s)	Start chainage (m)	End chainage (m)	L (m)	RE <sub>w</sub> (%)	RE <sub>L</sub> (%)
1 Using the first 3 data (1 non-zero data)	68.53	155.51	2975.42	2801.91	356.84	<b>180.19</b>
2 Using the first 4 data	63.6	20.7	2905.9	2885.2	323.98	<b>188.52</b>
3 Using the first 5 data	15.08	2000.02	3037.59	1037.57	0.5	<b>3.76</b>
4 Using the first 6 data	15.03	1988.01	3000.05	1012.04	0.18	<b>1.2</b>
5 Using the first 7 data	15.01	1993.05	3004.53	1011.49	0.07	<b>1.15</b>
6 Using the first 8 data	15.008	1999.98	3000.01	1000.04	0.06	<b>0.004</b>
7 Using the first 9 data	15.007	2000.001	3000.04	1000.04	0.05	<b>0.003</b>
8 Using the first 10 data	15.005	2000.002	3000.03	1000.03	0.04	<b>0.003</b>
9 Using the first 11 data	15.002	2000.002	3000.02	1000.02	0.01	<b>0.002</b>
10 Using all 25 data	14.99	1999.99	3000.01	1000.01	0.004	<b>0.001</b>
11 Using data from 5 to 7 (located on the ascending part of the graph)	15.02	1999.38	3000.4	1001.02	0.12	<b>0.1</b>
12 Using data from 11 to 13 (located at the end of the graph)	14.99	4507.06	6079.39	1572.33	0.001	<b>57.23</b>

با توجه به آنالیز انجام شده و نتایج ارائه شده در جدول (۲) مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از یک یا دو داده غیر صفر (حالت‌های یک و دو)، مدل معکوس قادر به بازیابی مشخصات منبع موردنظر نیست. در صورتی که از سه داده غیرصفر یا بیش‌تر برای بازیابی مجهولات مسأله استفاده شود (حالت سه به بعد)، مدل معکوس قادر است تا با دقت مطلوبی سه مشخصه شدت، طول و مکان منبع موردنظر را بازیابی نماید. اگرچه هرچه از تعداد داده‌های بیش‌تری در بازیابی منبع موردنظر استفاده شود، دقت بازیابی منبع بالاتر و زمان اجرای برنامه کم‌تر خواهد شد. هم‌چنین مشاهده شد که اگر سه داده منتخب از مقادیر بزرگ‌تر شدت شوری و واقع در قسمت صعودی نمودار باشند، مدل معکوس قادر است با دقت بالا و در زمان کوتاه‌تری سه مجهول مسأله را بازیابی نماید (حالت شماره ۱۱). چنان‌چه سه داده انتخاب شده از داده‌های واقع بر روی پله انتهایی نمودار باشند (حالت شماره ۱۲)، مدل معکوس فقط می‌تواند شدت منبع موردنظر را به‌درستی بازیابی نماید و اطلاعاتی از مکان منبع در اختیار نمی‌گذارد. زیرا اعداد واقع بر روی پله انتهایی نمودار، در یک مقدار مشخص ثابت شده‌اند و نحوه تغییرات غلظت در نقطه شاهد را نشان نمی‌دهند. از این‌رو، قادر به بازیابی مکان منبع موردنظر نیز نمی‌باشند.

در همین مثال، برای حصول نتایج بیش‌تر در مورد نحوه انتخاب سه داده از نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد، گام زمانی اجرای محاسبات که در تعداد داده‌های نمودار مؤثر است به پنج دقیقه کاهش داده شد. در این مقاله، برای کاهش حجم مطالب به بیان نتایج حاصل اکتفا می‌شود. با کاهش گام زمانی تعداد داده‌های بیش‌تری از نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد در دسترس قرار می‌گیرد (۳۷ عدد در دوره شبیه‌سازی سه ساعته). این بار با در نظر گرفتن ۳۷ داده موجود در نمودار و اجرای مدل معکوس در حالت‌های مختلف، به بررسی شرایط سه داده موردنظر پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که سه داده منتخب برای بازیابی شدت، طول و مکان یک منبع گسترده، باید در قسمت صعودی نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد واقع باشند تا مدل معکوس بتواند مشخصات منبع را به درستی بازیابی نماید.

### ۳-۲. مثال دوم) بازیابی شدت، مکان و طول دو منبع گسترده با یک نقطه شاهد

در این مثال موقعیت منابع S1 و S2 و نقطه شاهد مشابه آنچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در نظر گرفته شده است. مشخصات منابع نیز در جدول ۳ ارائه شده است. پس از طراحی و اجرای مدل مستقیم، نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد به صورت شکل ۵ حاصل شد.

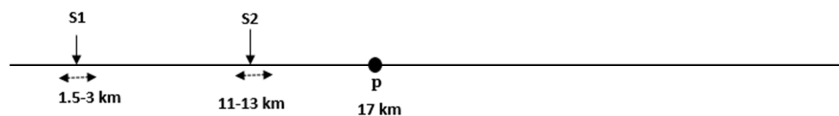


Figure 4. Location of distributed sources (S1 and S2) and observation point (p)

Table 3. The specifications of S1 and S2

Source Number	W (kg/s)	Start chainage(m)	End chainage(m)	L(m)
S1	30	1500	3000	1500
S2	52.5	11000	13000	2000

با دقت در نمودار شکل (۶) و مشاهده‌ی دو پله تشکیل شده، می‌توان وجود دو منبع گسترده با بارگذاری ثابت را تشخیص داد. مقادیر غلظت تا محل تشکیل پله اول در نمودار، فقط تحت تأثیر منبع S2 و پس از آن تحت تأثیر هر دو منبع S1 و S2 می‌باشد که اختلاط اثر دو منبع از این زمان به بعد را نشان می‌دهد. بنابراین با داشتن مقادیر مشاهداتی غلظت در نقطه شاهد و با توجه به محل تشکیل پله اول در نمودار (زمان رسیدن منبع S1 به نقطه شاهد و شروع اختلاط دو منبع)، می‌توان مدل معکوس را اجرا نمود و مشخصات منابع را مرحله به مرحله بازیابی نمود؛ ابتدا، منبع S2 و سپس منبع S1 بازیابی می‌شود. بدین منظور ابتدا مدل معکوس را با در نظر گرفتن بخشی از نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد که تحت تأثیر منبع S2 می‌باشد (از ابتدای نمودار تا محل تشکیل پله اول) اجرا شده و هر سه مشخصه مجهول منبع S2 بازیابی می‌شود. سپس، مشخصات 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 تأثیر هر دو منبع می‌باشد، مدل معکوس برای به دست آوردن مشخصات منبع S1 اجرا می‌شود. مشخصات بازیابی شده منابع S1 و S2 در جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود با استفاده از این روش، مشخصات هر دو منبع با دقت مطلوبی بازیابی شده‌اند. همچنین مقدار خطای نسبی در بازیابی منبع S1 نسبت به منبع S2 افزایش یافته است. زیرا منابع به صورت مرحله به مرحله بازیابی می‌شوند. با توجه به این که مشخصات منبع S2 در فایل شرایط مرزی برای بازیابی منبع S1 قرار می‌گیرد، خطای محاسبه منبع S2 منجر به افزایش خطا در محاسبه منبع S1 می‌شود. نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد پس از بازیابی هر دو منبع، در شکل (۶) نشان داده شده است.

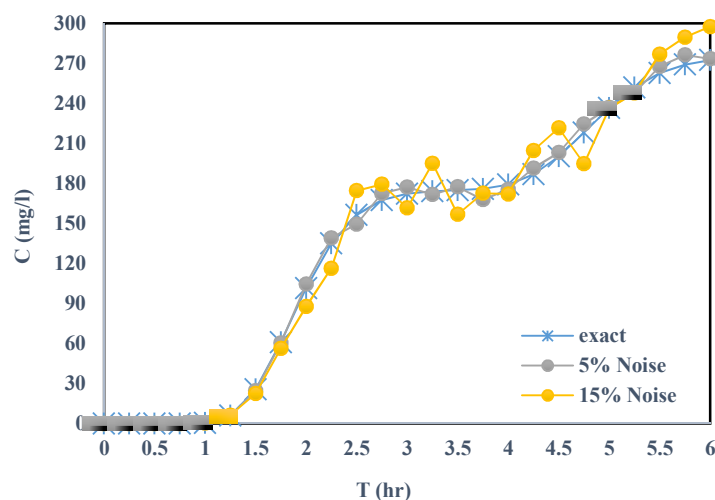


Figure 5. Concentration versus time at observation point; with 0, 5 and 15 percent of noise

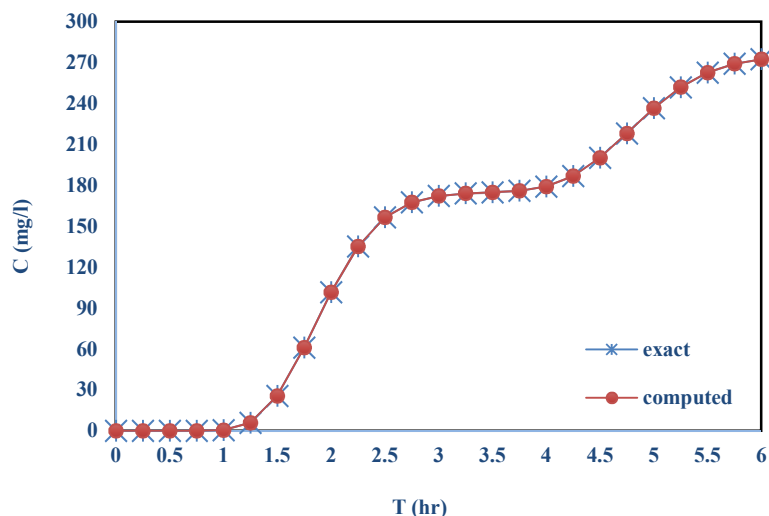


Figure 6. Measured and calculated concentration versus time at the observation point (p=17 km); without noise

Table 4. Computed specifications of S1 and S2

Source Number	W (kg/s)	Start chainage (m)	End chainage (m)	L(m)	RE <sub>w</sub> (%)	RE <sub>L</sub> (%)
S1	30.002	1500.22	3000.13	1499.91	0.008	<b>0.006</b>
S2	52.498	11000.02	12999.99	1999.98	0.004	<b>0.001</b>

در این مثال با بهره‌گیری از رابطه ۷، دو سطح خطای ۰/۰۵ و ۰/۱۵ به داده‌های مشاهده‌ای در نقطه شاهد اعمال و مشخصات منابع در هر حالت بازیابی شد. با استفاده از نمودارهای غلظت- زمان نشان داده‌شده در شکل (۵) و اجرای مدل معکوس، به بازیابی منابع موردنظر می‌پردازیم. نتایج بازیابی منابع در جدول (۵) ارائه شده است. در سطح خطای پنج درصد (سطح خطای پایین) بازیابی هر سه مشخصه منابع با دقت مطلوبی انجام می‌شود. درحالی‌که با سطح خطای ۱۵ درصد (سطح خطای بالا) دقت مدل در بازیابی مکان و طول منابع به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. اگرچه در این حال، ت، دقت مدل در بازیابی شدت شوری منابع قابل قبول است.

Table 5. Computed specifications of S1 and S2, with 0, 5 and 15 percent of noise and error indices

Source Number		W (kg/s)	L(m)	RMSE <sub>w</sub> (kg/s)	RE <sub>w</sub> (%)	RMSE <sub>L</sub> (m)	RE <sub>L</sub> (%)
S1	Exact	30	1500	-	-	-	-
	Noise (5%)	30.25	1551.44	0.26	0.85	51.44	<b>3.43</b>
	Noise(15%)	28.72	1900	1.29	4.28	400	<b>26.67</b>
S2	Exact	52.5	2000	-	-	-	-
	Noise (5%)	52.41	1962.56	0.09	0.17	37.44	<b>1.87</b>
	Noise (15%)	53.79	2240.87	1.29	2.54	240.86	<b>12.04</b>

### ۳-۳. 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 کارون به طول ۴۰ کیلومتر از پایین‌تر از اهواز (E ۶۷۸ ۳۵/ ۳۹ ۴۸ و N ۴۰/۶۴۱ ۱۶ ۳۱) تا روستای موران (E ۲۱/۷۲۹ ۳۰ ۴۸ و N ۴۷/۰۸۴ ۹ ۳۱) در نزدیکی طرفی 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 پژوهش انجام شده توسط Fakoori (2017) برای رودخانه کارون در منطقه مورد مطالعه، به صورت ضریب زبری برابر با ۰/۰۳۵ و ضریب پراکندگی برابر با ۱۰۳/۳۱ در نظر گرفته شد. مقادیر دبی ورودی و تراز سطح آب در پایین دست به ترتیب برابر با ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه و نه متر می باشد. شکل (۷) طرح شماتیک رودخانه کارون در بازه مورد نظر را نشان می دهد. در این شکل S1، S2 و S3 سه منبع گسترده ورود شوری به رودخانه و P ایستگاه مشاهداتی است. به علت وجود سه منبع گسترده با بارگذاری ثابت، تشکیل سه پله در نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد (شکل ۸) مشاهده می شود. هر سه مشخصه شدت، مکان و طول منابع مجهول فرض می شوند. بنابراین تعداد مجهولات مسأله، نه مجهول می باشد. در این مسأله مدل برای پنج روز و با گام های زمانی چهار ساعته شبیه سازی شد.

با استفاده از نمودار غلظت- زمان در ایستگاه مشاهداتی و اجرای مدل معکوس، مشخصات سه منبع شوری به صورت مرحله به مرحله بازیابی می شود. برای بازیابی هر منبع همان طور که به عنوان یک نتیجه مهم در مثال های قبلی بیان شد، حداقل به سه داده از نمودار غلظت- زمان در ایستگاه مشاهداتی که تحت تأثیر منبع مورد نظر باشند نیاز داریم. با توجه به در دسترس بودن بیش از سه نقطه قبل از تشکیل هر پله، در بازیابی هر منبع از حداکثر داده موجود استفاده می شود، تا بازیابی آن منبع با دقت بیشتری انجام شود. 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 (۹) نمایش داده شده که انطباق مطلوب داده های مشاهده ای با داده های محاسبه شده توسط مدل معکوس در ایستگاه مشاهداتی را نشان می دهد.

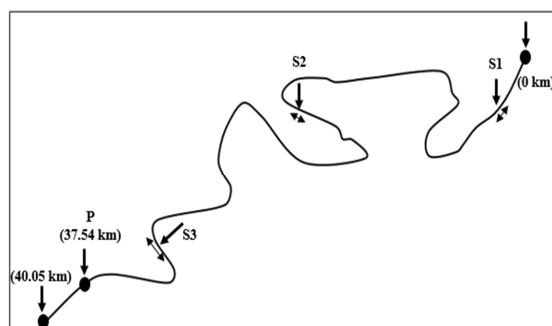


Figure 7. The picture of study area in Karun River and salinity source locations and measurement station

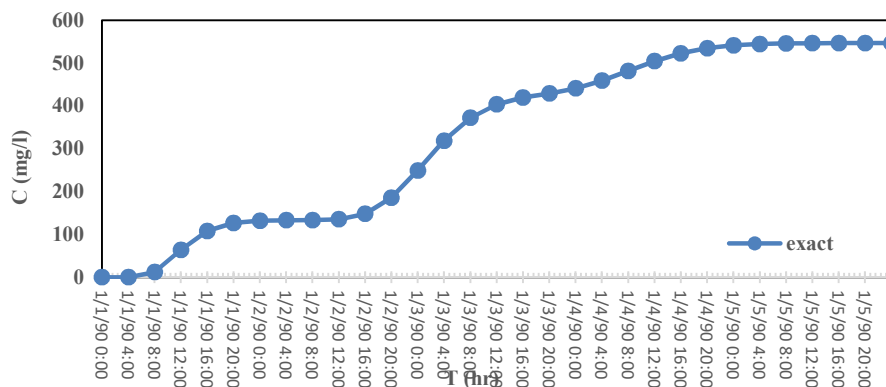
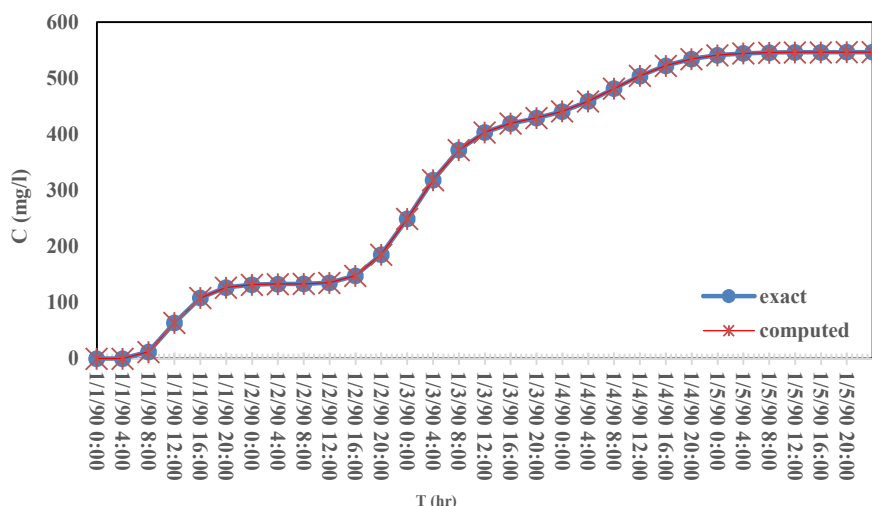


Figure 8. Concentration versus time at the measurement station (p=37.543 km)

**Table 6.** Specifications of hypothetical sources S1, S2 and S3

Source Number	W (kg/s)	Start chainage (m)	End chainage (m)	L (m)
S1	18	1000	1500	500
S2	44	16000	16700	700
S3	20	32500	34100	1600



**Figure 9.** Measured and computed concentration versus time at the measurement station (p=37.543 km)

**Table 7.** Computed specifications of S1, S2 and S3 and relative error index

Source Number	W (kg/s)	Start chainage (m)	End chainage (m)	L (m)	RE <sub>w</sub> (%)	RE <sub>L</sub> (%)
S1	17.98	997.59	1507.26	509.67	0.14	1.93
S2	44.02	15994.99	16700.05	705.05	0.05	0.72
S3	20.01	32500.01	34100.15	1600.14	0.02	0.01

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش محل‌های ورود شوری از آب زیرزمینی به رودخانه به‌عنوان منابعی گسترده در نظر گرفته شد که مکان، طول و شدت شوری وارده از این منابع به رودخانه مجهول می‌باشد. بنابراین هر منبع شوری دارای سه مجهول است. با حل معکوس معادله انتقال در رودخانه با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، به بازیابی مشخصات این منابع پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از کاربرد مدل معکوس ارائه‌شده در این پژوهش، در بازیابی مشخصات منابع گسترده در رودخانه عبارتند از:

- برای بازیابی مکان، طول و شدت شوری چند منبع گسترده با بارگذاری ثابت (برای هر منبع) که در فاصله قابل‌توجهی از هم قرار دارند، تنها یک نقطه شاهد واقع در پایین‌دست منابع کافی است. وجود فاصله مناسب بین منابع، باعث تشکیل پله‌هایی در نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد می‌شود که به‌علت نوع بارگذاری منابع و نیز عدم اختلاط کامل غلظت منابع در نقطه شاهد است. از این‌رو، با استفاده از مدل معکوس ارائه‌شده در این پژوهش و استفاده از نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد، می‌توان به بازیابی شدت شوری، مکان و طول چند منبع گسترده به‌صورت مرحله به مرحله پرداخت.

- برای بازیابی مشخصات هر منبع، حداقل به سه داده غیر صفر از نمودار غلظت- زمان در نقطه شاهد که تحت تأثیر منبع موردنظر باشند، نیاز است. سه داده منتخب باید در قسمت صعودی نمودار قرار داشته باشند تا مدل معکوس بتواند مشخصات منبع را به درستی بازیابی نماید.

- در صورتی که سه داده لازم از اعداد واقع در ابتدای نمودار غلظت- زمان (قسمت افقی) انتخاب شوند، مدل معکوس قادر به بازیابی مشخصات منبع موردنظر نمی‌باشد. زیرا اعداد واقع در این قسمت معمولاً دارای مقادیر بسیار ریز و در منابع با شدت‌های مختلف بسیار به هم نزدیک می‌باشند. این امر تفکیک منابع مختلف از هم را برای مدل سخت و پیچیده می‌کند. از این‌رو، بازیابی مشخصات منبع موردنظر با استفاده از اعداد واقع در این بخش از نمودار امکان‌پذیر نمی‌باشد.

- همچنین امکان بازیابی مکان یک منبع با استفاده از اعدادی که در انتهای نمودار واقع هستند وجود ندارد. زیرا در انتهای نمودار، غلظت در یک مقدار مشخص ثابت می‌شود. با استفاده از اعداد ثابت واقع در انتهای نمودار تنها می‌توان شدت منبع را به درستی بازیابی نمود.

- هرچه از تعداد داده‌های بیش‌تری برای بازیابی منبع موردنظر استفاده شود، دقت بازیابی آن منبع بالاتر و زمان اجرای برنامه کم‌تر خواهد شد.

- در صورت وجود سطح خطای پنج درصد در داده‌های مشاهداتی، بازیابی هر سه مشخصه منابع با دقت مطلوبی انجام می‌شود. درحالی‌که در صورت وجود سطح خطای ۱۵ درصد، دقت مدل در بازیابی مکان و طول منابع به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. اگرچه در این حالت، دقت مدل در بازیابی شدت شوری منابع قابل قبول است.

- در رودخانه‌های کاملاً واقعی در صورتی که منابع گسترده شوری در فواصل قابل توجهی از هم قرار داشته باشند که منجر به عدم اختلاط کامل غلظت منابع در نقطه شاهد و در نتیجه ایجاد پله‌هایی در نمودار غلظت- زمان می‌شود، با استفاده از مدل معکوس ارائه‌شده در این پژوهش، می‌توان مشخصات منابع را با استفاده از تنها یک نقطه شاهد در پایاب رودخانه بازیابی نمود.

## ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Forward Modeling
2. Inverse Modeling
3. Saint-Venant equations
4. Advection-Dispersion equation
5. Abbott six-point algorithm
6. Auto Start
7. Start Chainage
8. End Chainage

## ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷. منابع

- Abbott, M. B., & Ionescu, F. (1967). On the numerical computation of nearly horizontal flows. *Journal of Hydraulic Research*, 5(2), 97-117.
- Cupola, F., Tanda, M. G., & Zanini, A. (2015). Laboratory sandbox validation of pollutant source location methods. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(1), 169-182.
- Fakoori Dekahi, B. (2017). *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, Tarbiat Modares University, Iran. (In Persian).

- Ghane, A., Mazaheri, M., & Mohammad Vali Samani, J. (2016). Location and release time identification of pollution point source in river networks based on the Backward Probability Method. *Journal of Environmental Management*, 180, 164-171.
- Jha, M. K., & Datta, B. (2011). Simulated annealing based simulation-optimization approach for identification of unknown contaminant sources in groundwater aquifers. *Desalination and Water Treatment*, 32(1-3), 79-85.
- Mahar, P. S., & Datta, B. (2001). Optimal identification of groundwater pollution sources and parameter estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127 (1), 20-29.
- Mazaheri, M., Mohammad Vali Samani, J., & Mohammad Vali Samani, H. (2015). Mathematical Model for Pollution Source Identification in Rivers. *Environmental Forensics*, 16(4), 310-321.
- Nardo, A., Santonastaso, G. F., Battaglia, R., & Velotta, R. (2015). Smart identification system of surface water contamination by an innovative biosensor network. In: *Proceeding of 5th international conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics*, 14 to 18 june, Mykonos island, Greece.
- Prakash, O., & Datta, B. (2014). Characterization of Groundwater Pollution Sources with Unknown Release Time History. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 337-350.
- Tong, Y., & Deng, Z. (2012). Moment-Based Method for Identification of Pollution Source in Rivers. *Journal of Environmental Engineering*, 141(10), 326-335.
- Yuan-hua, C., Peng, W., Ji-ping, J., & Liang, G. (2013). Contaminant point source identification of rivers chemical spills based on correlation coefficients optimization method. *China Environmental Science*, 31(11), 1802-1807.
- Zhang, S., & Xin, X. (2017). Pollutant source identification model for water pollution incidents in small straight rivers based on genetic algorithm. *Applied Water Science*, 7, 1955-1963.