

حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ نواحی نگهداشت موقت در حالت وجود جریان غیر ماندگار در رودخانه‌ها با مقطع نامنظم

مریم براتی مقدم^۱، مهدی مظاهری^{۲*} و جمال محمد ولی سامانی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. m.mazaheri@modares.ac.ir

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۱

چکیده

برای شبیه‌سازی دقیق‌تر انتقال آلاینده در رودخانه‌های طبیعی باید اصلاحاتی در معادله کلاسیک جابه‌جایی-پراکندگی انجام و عبارت‌هایی برای لحاظ تأثیر نواحی نگهداشت موقت به آن اضافه شوند. در این تحقیق مدلی جدید و جامع با تلفیق الگوهای عددی با درجه دقت بالاتر (روش کوئیک) برای حل معادله جابه‌جایی - پراکندگی با لحاظ نواحی نگهداشت موقت در رودخانه‌ها با مقطع نامنظم تحت رژیم جریان غیر ماندگار ارائه گردیده است. مدل با استفاده از راه‌حل تحلیلی، مثال فرضی و داده‌های واقعی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت و نتایج حاکی از دقت مطلوب مدل در شبیه‌سازی انتقال آلاینده در شرایط مذکور بود. با اجرای مدل برای حالت جابه‌جایی خالص و مقایسه نتایج حاصل با نتایج دو الگوی عددی دیگر که از روش مشتق‌گیری مرکزی برای گسسته‌سازی مکانی معادله‌ها استفاده می‌کردند، توانایی مدل در شبیه‌سازی دقیق‌تر این حالت هم نشان داده شد. نتایج نشان داد که مدل ارائه‌شده، مدلی جامع و کاربردی است و می‌تواند در بسیاری از مطالعات انتقال ماده حل‌شده در نهرها و رودخانه‌های طبیعی جایگزین مدل‌های فعلی شود.

کلیدواژه‌ها: معادله‌ی جابه‌جایی - پراکندگی، نگهداشت موقت، حل عددی، جریان غیر ماندگار، الگوی کوئیک (QUICK).

Numerical Solution to Advection-Dispersion Equation with Transient Storage Zones, Considering Unsteady Flow in Irregular Cross Section Rivers

M. Barati Moghaddam¹, M. Mazaheri^{2*} and J. MohammadVali Samani³

1-Msc. Graduate of Water Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University.

2* - Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Water Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University.

3- Professor, Department of Water Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University.

Received: 23 September 2015

Accepted: 3 January 2016

Abstract

For accurate simulation of transport in natural rivers, some revisions have to perform in classical advection dispersion equation and some terms for considering of transient storage zones added to this equation. In this study a new and comprehensive model that merges numerical schemes with higher order accuracy (QUICK scheme) for solution of advection dispersion equation with transient storage zones in rivers with irregular cross sections at unsteady flow regime is presented. The presented method is verified by analytical solution, hypothetical example and two sets of real data. The results of verification implied that presented model have reasonable accuracy in simulation of contaminant transport in this condition. Also with implementation of model in the case of pure advection and comparing the results with two other numerical model results that use from centered difference method in spatial discretization of equations the ability of presented model in more accurate simulation in this case is shown. Results show that presented model in this study, is an applicable model and could be suggested as alternative for common present models at contaminant transport studies in natural rivers and streams.

Keywords: Advection-dispersion equation, Transient storage, Numerical solution, unsteady flow, QUICK.

مقدمه

نهرها و رودخانه‌های طبیعی، به‌ویژه رودخانه‌های کوهستانی، علاوه بر نواحی با جریان آزاد، دارای نواحی هستند که در اصطلاح نواحی نگهداشت^۱ یا نواحی مرده^۲ نامیده می‌شوند. در نواحی نگهداشت آب نسبت به کانال اصلی با سرعت کمتری در جریان است و تبادل بین این نواحی و کانال اصلی به‌کندی صورت می‌گیرد. وقتی که یک ابر ماده آلاینده در چنین نهری حرکت می‌کند، بخشی از جرم ماده آلاینده وارد نواحی نگهداشت شده و غلظت ماده حل‌شده در کانال اصلی رقیق می‌شود. بعد از این که ابر ماده آلاینده به‌طور کامل از نهر عبور کرد، نواحی نگهداشت به‌عنوان منبعی از ماده حل‌شده برای نهر عمل می‌کنند. بدین ترتیب جرمی که موقتاً در این نواحی نگه‌داشته شده بود، به‌تدریج به کانال اصلی برمی‌گردد و باعث ایجاد یک دنباله پیش‌رونده در پروفیل غلظت مشاهده‌شده می‌شود. مثال‌هایی از این نواحی شامل؛ نواحی برگشت آب^۳، جریان‌های ثانویه^۴، بستر سنگریزه‌ای کانال نهر و موانع جریان مثل پوشش گیاهی و تخته‌سنگ‌ها هستند.

از اواخر دهه ۱۹۶۰، وقتی محققین دریافتند که معادله کلاسیک جابه‌جایی-پراکندگی^۵ پروفیل‌های ماده ردیاب مشاهده شده را در بسیاری از موارد به‌خوبی توصیف نمی‌کند، تحقیقات در رابطه با توسعه یک مدل مناسب‌تر برای انتقال ماده حل‌شده در رودخانه‌های طبیعی آغاز شد (دی^۶، ۱۹۷۵، تیلور^۷ ۱۹۵۴). این تلاش‌ها سرآغاز فصل جدیدی در مطالعات انتقال ماده حل‌شده در نهرها و رودخانه‌های طبیعی شد و از اوایل دهه ۱۹۸۰ تحلیل مسائل انتقال ماده حل‌شده در نهرها و رودخانه‌های طبیعی با لحاظ تأثیر نگهداشت موقت به یکی از حوزه‌های فعال تحقیقات مبدل گردید. محققین بسیاری بر ضرورت در نظر گرفتن تأثیر نواحی نگهداشت موقت بر شبیه‌سازی رفتار رودخانه در مواجهه با ماده‌ی آلاینده تأکید کرده‌اند و تاکنون روش‌های زیادی هم برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در رودخانه‌های دارای نواحی نگهداشت ارائه شده است که یکی از رایج‌ترین آن‌ها، مدل نگهداشت موقت^۸ می‌باشد (بلتاوس و دی^۹، ۱۹۷۸، نوردین و تروتمن^{۱۰}، ۱۹۸۰، بنکالا و والترز^{۱۱}، ۱۹۸۳، سئو و ماکسول^{۱۲}، ۱۹۹۲، سئو و چئونگ^{۱۳}، ۲۰۰۱).

در ساده‌ترین شکل، مدل نگهداشت موقت از معادله یک‌بعدی جابه‌جایی-پراکندگی همراه با یک عبارت اضافی برای به‌حساب آوردن تأثیر نواحی نگهداشت بر انتقال ماده حل‌شده تشکیل شده

- 1- Storage zones
- 2- Dead zones
- 3- Backwater
- 4- Eddy
- 5- Advection Dispersion Equation (ADE)
- 6- Day
- 7- Taylor
- 8- Transient Storage Model (TSM)
- 9 - Beltaos and Day
- 10- Nordin and Troutman
- 11- Bencala and Walters
- 12- Seo and Maxwell
- 13 - Seo and Cheong

است. نگهداشت موقت به‌صورت حرکت مواد حل‌شده از کانال اصلی با جریان آزاد به داخل نواحی ماندابی، حس موقتی در این نواحی و متعاقب آن بازگشت مجدد جرم ماده حل‌شده به کانال اصلی تعریف می‌شود. مدل نگهداشت موقت به‌صورت کمی اولین بار در سال ۱۹۸۳ ارائه و برای استفاده در نهرهای کوهستانی کوچک توسعه داده شد. این مدل همچنین برای هر نهر یا رودخانه‌ای که بتوان انتقال را در آن یک‌بعدی فرض کرد، قابل به‌کارگیری است (بنکالا و والترز، ۱۹۸۳).

در پی انجام آزمایش‌های مختلف با استفاده از مواد ردیاب و شبیه‌سازی انتقال در رودخانه‌ها و نهرهای طبیعی با استفاده از مکانیزم‌های جابه‌جایی و پراکندگی بدون در نظر گرفتن تبادل با ناحیه‌ی نگهداشت مشاهده گردید که نتایج حاصل از معادله کلاسیک جابه‌جایی-پراکندگی تطابق خوبی با داده‌های حاصل از آزمایش ندارد و داده‌های واقعی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند. از جمله این که داده‌های واقعی کاهش غلظت بیشتر در پایین دست و دنباله‌های طولانی‌تری را در نمودار غلظت نشان می‌دهند. محققین پس از شبیه‌سازی داده‌ها با در نظر گرفتن نگهداشت موقت تناسب خوبی بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های واقعی، به‌ویژه برای نهرهای کوهستانی کوچک‌تر، جایی که جریان سریع و مقطع جریان نامنظم است، مشاهده کردند.

مروری بر تحقیقات انجام‌شده در حوزه مدل‌سازی انتقال ماده حل‌شده با لحاظ نواحی نگهداشت موقت، نشان می‌دهد که تا به حال یک مدل جامع که مسئله‌ی انتقال آلاینده را در رودخانه‌ها با مقطع نامنظم تحت رژیم جریان غیر ماندگار و با در نظر گرفتن نگهداشت موقت شبیه‌سازی کند، ارائه نشده و اکثریت قریب‌به‌اتفاق مدل‌های ارائه‌شده دارای محدودیت‌هایی شامل در نظر نگرفتن جریان غیر ماندگار، عدم توانایی در شبیه‌سازی مسئله انتقال ماده حل‌شده در مقاطع نامنظم، استفاده از الگوهای عددی با درجه دقت پایین و جامع نبودن مدل هستند (سئو و ماکسول، ۱۹۹۲، هارت^{۱۴}، ۱۹۹۵، رانکل^{۱۵}، ۱۹۹۸، چپرا و رانکل^{۱۶}، ۱۹۹۹، دیویس و اتکینسون^{۱۷}، ۲۰۰۰، سینگ^{۱۸}، ۲۰۰۳، ماریون و زاراملا^{۱۹}، ۲۰۰۵).

به‌عنوان نمونه رانکل (۱۹۹۸)، نسخه‌ی کامل مدل نگهداشت موقت ارائه‌شده توسط بنکالا و والترز (۱۹۸۳) شامل فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی را به‌عنوان پایه‌ی توسعه‌ی مدل اوتیس^{۲۰} استفاده کرد. باوجود اینکه اوتیس در حال حاضر تقریباً بهترین مدل ریاضی است که برای شبیه‌سازی نگهداشت موقت در نهرها و رودخانه‌ها در دسترس عموم قرار دارد و مکرراً توسط محققین برای

- 14- Hart
- 15- Runkel
- 16- Chapra and Runkel
- 17- Davis and Atkinson
- 18- Singh
- 19- Marion and Zaramella
- 20- One-Dimensional Transport with Inflow and Storage (OTIS)

لازم به ذکر است که مدل ارائه شده در این تحقیق قابلیت شبیه سازی مسئله انتقال ماده حل شده در هر دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت، تحت هر دوی رژیم های جریان ماندگار و غیرماندگار و همچنین توانایی حل مسئله انتقال در رودخانه ها با مقطع نامنظم - بدون محدودیت در تعداد مقاطع - را به صورت توأمان دارا می باشد که از این نظر نسبت به سایر مدل هایی که تاکنون ارائه شده اند، منحصر به فرد است.

مواد و روش ها

مدل نگهداشت موقت

نگهداشت موقت به حبس موقتی ماده حل شده در نواحی ماندابی که نسبت به نواحی مرکزی کانال دارای سرعت کمتری هستند، اطلاق می گردد. علاوه بر این بخش های قابل توجهی از آب ممکن است، وارد سنگریزه ها و ماسه های درشت بستر نهر و یا نواحی متخلخل موجود در کناره های نهر شوند (رانکل، ۱۹۹۸). زمان انتقال مواد حل شده در این نواحی متخلخل به طور قابل توجهی بیشتر از زمان انتقال مواد حل شده در ستون آب است. مدل، با نوشتن معادله های تعادل جرم برای دو ناحیه ی فرضی شکل می گیرد: کانال اصلی و ناحیه ی نگهداشت. کانال اصلی به عنوان بخشی از نهر یا رودخانه که در آن جابه جایی و پراکندگی مکانیزم های حاکم بر انتقال هستند، تعریف می شود. ناحیه ی نگهداشت بخشی از نهر است که در نگهداشت موقت مشارکت دارد (مثل پهنه های ماندابی و نواحی متخلخل بستر نهر (شکل ۱)). شکل (۲) نیز فرایندهای تأثیر گذار بر ماده حل شده در کانال اصلی و ناحیه ی نگهداشت را به صورت شماتیک نشان می دهد.

در کانال اصلی مواد حل شده توسط جابه جایی و پراکندگی به سمت پایین دست انتقال می یابند. جابه جایی و پراکندگی شامل ناحیه ی نگهداشت نمی شوند، جایی که انتقال به سمت پایین دست قابل اغماض است. جریان ورودی جانبی نشان دهنده ی ورود آب اضافی به کانال اصلی به صورت جریان روزمینی، جریان ورودی و تخلیه ی آب زیرزمینی است. جریان خروجی جانبی نشان دهنده ی تخلیه آب از کانال اصلی به پهنه های سیلابی اطراف است. کانال اصلی و ناحیه ی نگهداشت از طریق فرآیند نگهداشت موقت به هم مرتبط می شوند، تبادل جرم بین کانال اصلی و ناحیه ی نگهداشت، به عنوان یک فرآیند انتقال جرم مرتبه اول مدل سازی شده است.

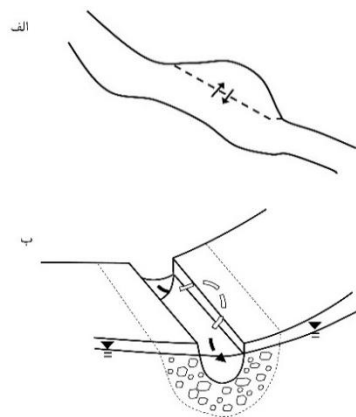
تجزیه و تحلیل آزمایش های میدانی ماده ردیاب مورد استفاده قرار گرفته است، اما دارای نقایصی است (رانکل، ۲۰۰۰، لوتر و همکاران^۱، ۲۰۰۶، لوتر و سیگل^۲، ۲۰۰۷، اوکتر و همکاران^۳، ۲۰۰۹، اسزفتل و همکاران^۴، ۲۰۱۱، فابیان و همکاران^۵، ۲۰۱۱، کلا و همکاران^۶، ۲۰۱۳، وارد و همکاران^۷، ۲۰۱۳). به عنوان مثال اوتیس در شبیه سازی جریان غیریکنواخت یا غیر ماندگار برای تأمین داده های جریان متکی به یک برنامه ی خارجی روندیابی نهر است و مشخصات جریان باید از یک برنامه روندیابی دیگر در قالب یک فایل متنی وارد مدل شود (لین و مدینا^۸، ۲۰۰۳). همچنین مدل اوتیس برای گسسته سازی معادله های مدل نگهداشت موقت از الگوی عددی الگوی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان^۹ استفاده می کند که در این الگو مشتق های مکانی با استفاده از روش مشتق گیری مرکزی گسسته می شوند. از موارد اشکال این روش این است که در مکان هایی که گرادیان غلظت ماده ی آلاینده زیاد است، نوسانات عددی در حل معادله ها مشاهده می شود و در مدل سازی مسئله ورود حجم ناگهانی غلظت به رودخانه (مثل تخلیه ناگهانی فاضلاب) عملکرد خوبی ندارد.

از معایب دیگر اوتیس می توان به محدودیت در تعداد پارامترهای ورودی برای مدل سازی اشاره کرد. در هنگام اجرای مدل متغیرهای ورودی نباید از تعداد حداکثر تعریف شده در ساختار برنامه نویسی مدل تجاوز کنند. به عنوان نمونه اوتیس در تعداد بازه های در نظر گرفته شده در طول رودخانه، تعداد نقاط نمایش نتایج شبیه سازی و حداکثر تعداد نقاط برای اختصاص دادن مشخصات جریان غیر ماندگار، دارای محدودیت است. برای آگاهی از سایر مشخصات و محدودیت های مدل اوتیس می توان به مرجع رانکل (۱۹۹۸) مراجعه کرد.

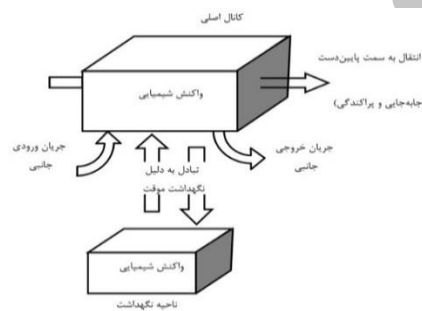
در این تحقیق سعی بر این است که مدلی جامع با تلفیق الگوهای عددی دقیق تر برای حل عددی معادله یک بعدی جابه جایی - پراکندگی با لحاظ نگهداشت موقت در حالت وجود جریان غیرماندگار در رودخانه ها با مقطع نامنظم ارائه گردد تا نواقص موجود در مدل های رایج موجود در زمینه شبیه سازی انتقال آلاینده را مرتفع سازد. بدین منظور در این تحقیق از روش حجم کنترل^{۱۰} و الگوی عددی کوئیک^{۱۱} به دلیل پایداری و خطاهای تقریب کم (دقت از درجه سوم)، در گسسته سازی مکانی معادله جابه جایی - پراکندگی با لحاظ نواحی نگهداشت موقت، استفاده شده است (لئونارد^{۱۲}، ۱۹۷۹).

- 1- Lautz *et al.*
- 2- Lautz and Siegel
- 3- O'connor *et al.*
- 4- Szeftel *et al.*
- 5- Fabian *et al.*
- 6- Kelleher *et al.*
- 7- Ward *et al.*
- 8- Lin and Medina
- 9- Centered Time - Centered Space (CTCS)
- 10- Control volume
- 11- Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK)
- 12- Leonard

براتی مقدم و همکاران: حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ...



شکل ۱- مکانیزم‌های نگهداشت موقت. الف) وقتی که مواد حل شده وارد توده‌های کوچک آب که با سرعت کم حرکت می‌کنند، می‌شوند و ب) وقتی مواد حل شده کانال اصلی را ترک کرده و وارد نواحی متخلخل بستر و کناره‌های کانال می‌شوند. پیکان‌ها حرکت آب بین کانال اصلی و ناحیه‌ی نگهداشت موقت را نشان می‌دهند (راتکل و بنکالا، ۱۹۹۵)



شکل ۲- مدل فرضی شامل کانال اصلی و ناحیه‌ی نگهداشت (راتکل، ۱۹۹۸)

اصلی، C_L : غلظت ماده‌ی حل شده در جریان ورودی جانبی، C_S ؛ غلظت ماده‌ی حل شده در ناحیه‌ی نگهداشت، D : ضریب پراکندگی طولی، Q : دبی جریان، q_{LIN} : دبی در واحد عرض جریان ورودی جانبی، α : ضریب تبادل ناحیه‌ی نگهداشت، λ : ضریب زوال مرتبه اول کانال اصلی، λ_s : ضریب زوال مرتبه اول ناحیه‌ی نگهداشت، t : زمان و x : مسافت هستند.

حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ نواحی نگهداشت موقت در حالت یک‌بعدی

حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ نواحی نگهداشت موقت در این تحقیق بر اساس روش حجم کنترل و الگوی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان انجام می‌گیرد. نام‌گذاری گره‌ها در روش حجم کنترل مورد استفاده در این تحقیق به این صورت است که گره مورد نظر که قرار است مجهولات برای آن گره محاسبه شوند، با P نمایش داده می‌شود و نقاط واقع در غرب و شرق این نقطه به ترتیب با W و E نشان داده می‌شوند. سطح کنترل غربی نقطه P با w و سطح کنترل شرقی نقطه P با e مشخص می‌شوند (شکل ۳).

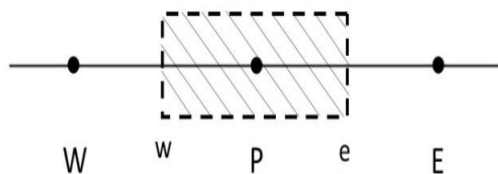
معادله‌های دیفرانسیل حاکم

معادله‌های بسیاری برای لحاظ تأثیر نواحی نگهداشت موقت بر انتقال ماده حل شده در نهرها و رودخانه‌های طبیعی ارائه شده‌اند که از بین آن‌ها مدل نگهداشت موقت ارائه شده توسط بنکالا و والترز (۱۹۸۳) به دلیل این‌که قابلیت در نظر گرفتن رژیم جریان غیرماندگار و مقاطع نامنظم را دارا می‌باشد، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. با نوشتن معادله‌های بقای جرم برای ماده‌ی حل شده در کانال اصلی و ناحیه نگهداشت، زوج معادله دیفرانسیل زیر برای کانال اصلی و ناحیه نگهداشت به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + q_{LIN}(C_L - C) + \alpha A(C_S - C) - \lambda AC \quad (1)$$

$$\frac{dC_S}{dt} = \alpha \frac{A}{A_s} (C - C_S) - \lambda_s C_S \quad (2)$$

که A : مساحت مقطع عرضی کانال اصلی، A_s : مساحت مقطع عرضی ناحیه‌ی نگهداشت، C : غلظت ماده‌ی حل شده در کانال



شکل ۳- نحوه نام‌گذاری گره‌ها در روش حجم کنترل الگوی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان (CTQS)

تفاضل مرکزی است، چراکه بر اساس یکی از ویژگی‌های هندسی سهمی، شیب وتر بین دو نقطه در یک سهمی برابر با تانژانت سهمی در نقطه میانی آن است، یعنی:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_w = \frac{\phi_p - \phi_w}{\Delta x} \quad (۶)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_e = \frac{\phi_e - \phi_p}{\Delta x} \quad (۷)$$

بر اساس این الگو صورت گسسته شده معادله‌های (۱) و (۲) به صورت معادله‌های (۸) و (۹) درمی‌آیند؛ با جایگزین کردن مقادیر کمیت‌های روی سطح کنترل با استفاده از معادله‌های (۴) تا (۷) و انجام کمی عملیات جبری معادله (۸) را می‌توان به صورت معادله (۱۰) نوشت که ضرایب این معادله، از معادله‌های (۱۱) تا (۱۵) به دست می‌آیند.

اگر تعداد احجام کنترل در کل طول دامنه حل برابر با N باشد، با نوشتن معادله (۱۰) برای هر چهار حجم کنترل متوالی با شروع از سومین حجم کنترل تا حجم کنترل $N-1$ ام، یک دستگاه معادله‌های با $N-3$ معادله و N مجهول به دست می‌آید. برای حل این دستگاه سه معادله دیگر مورد نیاز است که این معادله‌ها با استفاده از شرایط مرزی ابتدا و انتها به دست می‌آیند. در روش کوئیک مقادیر غلظت در مرزهای حجم کنترل با استفاده از مقادیر غلظت در سه نقطه مجاور، دو نقطه بالادست و یک نقطه پایین دست محاسبه می‌شوند. گره‌های اول، دوم و آخر به دلیل قرارگیری در نزدیکی مرزهای دامنه حل و اعمال شرایط مرزی نیاز به فرمول‌بندی جداگانه دارند. شکل ماتریسی دستگاه معادله‌های خطی تشکیل شده به شکل معادله (۱۶) است. دستگاه معادله‌های (۱۶) به راحتی با استفاده از روش حذفی گوس قابل حل است. با حل این دستگاه مقادیر غلظت در کانال اصلی در سطح زمانی $n+1$ به دست می‌آیند. بعد از محاسبه مقادیر غلظت در کانال اصلی با استفاده از معادله (۱۷) می‌توان مقادیر غلظت ناحیه نگهداشت را برای تمامی احجام کنترل محاسبه کرد:

در الگوی مورد استفاده در این تحقیق، مشتق‌های مکانی با استفاده از الگوی کوئیک و به صورت میانگین سطوح زمانی n و $n+1$ گسسته می‌شوند. به منظور مقایسه دو روش عددی دیگر، یعنی الگوی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان و الگوی پسرود در زمان و مرکزی در مکان هم ارائه شده‌اند. برای هر سه روش عددی مذکور برنامه کامپیوتری تهیه شده و نتایج در ادامه آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که مدل عددی اوتیس برای گسسته‌سازی معادله‌های نگهداشت موقت از الگوی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان و نرم‌افزار مایک ۱۱ برای حل معادله کلاسیک جابه‌جایی-پراکندگی از الگوی پسرود در زمان و مرکزی در مکان بهره می‌گیرند.

الگوی کوئیک برای گسسته‌سازی مکانی معادله جابه‌جایی-پراکندگی بر مبنای درون‌یابی بالادست درجه دوم، توسعه داده شده است (لئونارد، ۱۹۷۹). این روش به خاطر دقت عددی بالا (از درجه سوم) به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش برخلاف روش مرکزی که از یک نقطه در بالادست و یک نقطه در پایین دست برای تخمین مقادیر مجهول روی سطوح کنترل استفاده می‌شود و برازش هم به صورت خطی است، از دو نقطه در بالادست و یک نقطه در پایین دست استفاده می‌شود و برازش به صورت یک منحنی درجه دوم (سهمی) است. در روش کوئیک برای محاسبه مقادیر کمیت مورد نظر روی سطوح کنترل از معادله‌های زیر استفاده می‌شود:

$$\phi_{ace} = \frac{6}{8}\phi_{t-1} + \frac{3}{8}\phi_t - \frac{1}{8}\phi_{t-2} \quad (۳)$$

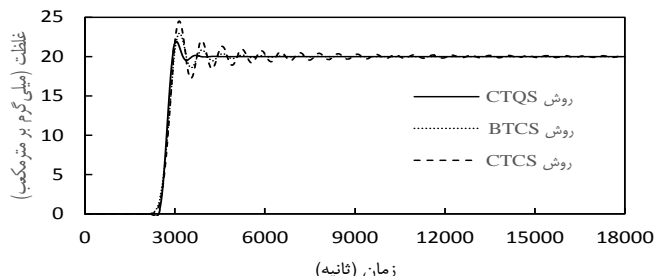
$$\text{if } u_w > 0: \quad \phi_w = \frac{6}{8}\phi_w + \frac{3}{8}\phi_p - \frac{1}{8}\phi_{ww} \quad (۴)$$

$$\text{if } u_e > 0: \quad \phi_e = \frac{6}{8}\phi_p + \frac{3}{8}\phi_e - \frac{1}{8}\phi_{ee} \quad (۵)$$

عبارت‌های پراکندگی هم با استفاده از مشتق سهمی تقریب زده شده، محاسبه می‌شوند. نکته جالب توجه این است که در یک شبکه یکنواخت با احجام کنترل یکسان، عبارت‌های به دست آمده از این روش برای پراکندگی، مشابه عبارت‌های به دست آمده از روش

جدول ۱- مشخصات مثال فرضی برای اجرای مدل در حالت جابه‌جایی خالص

پارامتر	طول کانال (کیلومتر)	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)	مساحت مقطع عرضی (مترمربع)	غلظت ورودی (میلی‌گرم بر مترمکعب)	غلظت اولیه
	۱۰	۱۰	۱۰	۲۰	۰



شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از سه الگوی عددی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان، الگوی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان و الگوی پسر و مرکزی در زمان و کوئیک در مکان، الگوی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان برای یک شبکه 1800×1000 در حالت جابه‌جایی

الگوی پسر و مرکزی در زمان و مرکزی در مکان در مورد این مثال اجرا و نتایج در قالب نمودارهای غلظت در برابر زمان با هم مقایسه گردیدند. جدول (۱) مشخصات این مثال فرضی را نشان می‌دهد. مدت‌زمان کل شبیه‌سازی پنج ساعت، گام مکانی ۱۰۰ متر و گام زمانی ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که به دلیل این‌که در اینجا جابه‌جایی تنها فرآیند مؤثر در انتقال ماده حل‌شده در نظر گرفته می‌شود، از تأثیر فرآیندهای پراکندگی و نگهداشت موقت صرف‌نظر شده است.

با توجه به شکل‌های (۴) تا (۶) مشخص می‌شود که الگوی عددی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان در حالت جابه‌جایی خالص نوسان خیلی کمی دارد، اما دو الگوی عددی دیگر دارای نوسان نسبتاً زیادی هستند. لذا می‌توان گفت مدل عددی ارائه‌شده در این تحقیق در مواردی که جابه‌جایی فرآیند غالب در انتقال ماده حل‌شده است، نسبت به دو الگوی عددی دیگر دارای عملکرد بهتری است. به‌طور مشخص‌تر همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از الگوی عددی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان، که در مدل عددی اوتیس هم مورد استفاده قرار گرفته است، برای حالت جابه‌جایی خالص نوسان خیلی زیادی دارد، درحالی‌که نتایج حاصل از الگوی عددی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان دارای نوسان بسیار کم و پایداری عددی بالاتری است.

نکته جالب‌توجه این است، که در رودخانه‌های کوهستانی که مکانیزم نگهداشت موقت بیشتر در این نوع از رودخانه‌ها مشاهده می‌شود، به دلیل شیب نسبتاً زیاد مسیر، سرعت جریان نسبت به رودخانه‌های جاری در دشت بیشتر است و لذا فرآیند جابه‌جایی در انتقال ماده حل‌شده غالب است. بنابراین این نتایج به‌نوعی تأییدکننده برتری مدل عددی ارائه‌شده در این تحقیق در شبیه‌سازی انتقال ماده حل‌شده در این نوع از رودخانه‌ها با لحاظ نگهداشت موقت نسبت به سایر مدل‌های رایج در زمینه شبیه‌سازی انتقال ماده حل‌شده است.

وقتی عدد دمکوهلر خیلی بزرگ‌تر از یک است، برای مثال ۱۰۰، تبادل بین کانال اصلی و ناحیه نگهداشت به‌قدری سریع است که می‌توان فرض کرد این دو جزء در تعادل هستند. وقتی عدد دمکوهلر خیلی کوچک‌تر از یک است، مثلاً ۰/۰۰۱، تبادل بین کانال اصلی و ناحیه نگهداشت بسیار کم و قابل صرف‌نظر کردن است، به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت که در این چنین نه‌ری که عدد دمکوهلر خیلی کمی دارد، عملاً تبدیلی بین کانال اصلی و ناحیه نگهداشت اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه مکانیزم نگهداشت موقت جزو مکانیزم‌های فیزیکی دخیل در انتقال آلاینده به سمت پایین دست به شمار نمی‌آید. به‌منظور تخمینی قابل‌اتکا از پارامترهای مدل نگهداشت موقت، نشان داده شده است که مقدار عدد دمکوهلر باید بین ۰/۱ تا ۱۰ باشد (وگنر و هاروی، ۱۹۹۷، فرنالد و همکاران، ۲۰۰۱، راماسوامی و همکاران، ۲۰۰۵).

نتایج و بحث

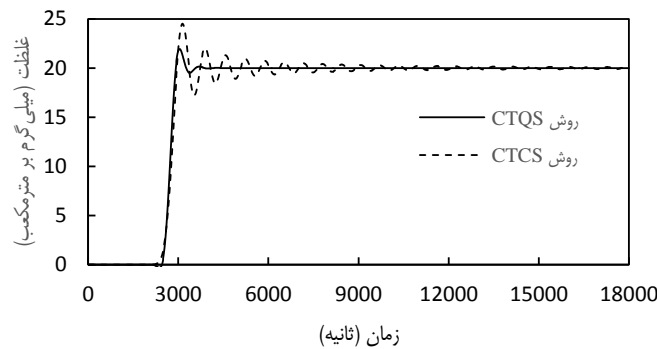
اجرای مدل در حالت جابه‌جایی خالص

همان‌طور که محققین بسیاری هم اشاره کرده‌اند، روش مشتق‌گیری مکانی مرکزی، در شبیه‌سازی حالت جابه‌جایی خالص^۳ ناتوان است و عملکرد خوبی ندارد (ژانگ و آرال، ۲۰۰۴، شیمکیویچ، ۲۰۱۰)، اما روش مشتق‌گیری مکانی کوئیک در این مورد بسیار بهتر از روش مرکزی عمل می‌کند (لئونارد، ۱۹۷۹، نومن و همکاران، ۲۰۱۱ و برتولوتو و همکاران، ۲۰۱۱).

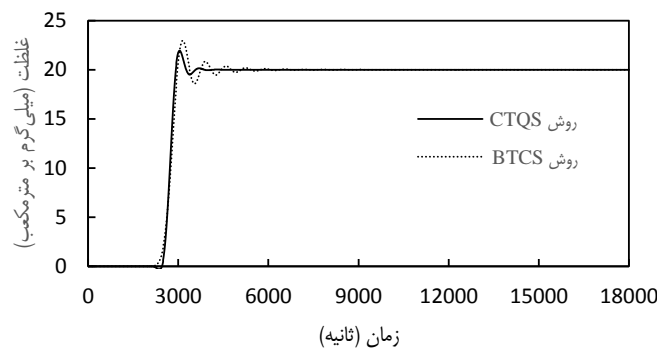
به‌منظور نشان دادن این وجهه از برتری روش کوئیک، یک مثال فرضی طراحی شد و سه الگوی عددی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان، الگوی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان و

- 1- Fernald *et al.*
- 2- Ramaswami *et al.*
- 3- Pure advection
- 4- Zhang and Aral
- 5- Szymkiewicz
- 6- Neumann *et al.*
- 7- Bertolotto *et al.*

براتی مقدم و همکاران: حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ...



شکل ۵- مقایسه نتایج حاصل از دو الگوی عددی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان و الگوی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان برای یک شبکه 100×1800 در حالت جابه‌جایی خالص



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از دو الگوی عددی مرکزی در زمان و کوئیک در مکان و الگوی پسر و در زمان و مرکزی در مکان برای یک شبکه 100×1800 در حالت جابه‌جایی خالص

جدول ۲- مشخصات مثال‌های فرضی به کار گرفته شده برای صحت‌سنجی مدل

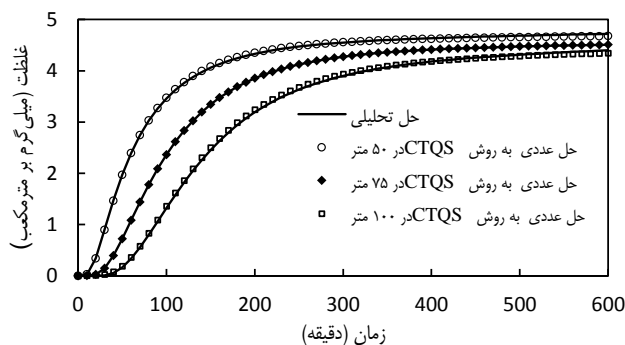
مثال	نحوه صحت‌سنجی	طول کانال / رودخانه	شرایط جریان	شکل مقطع	شرط مرزی بالادست ماده آلاینده
اول	حل تحلیلی	۲۰۰ متر	ماندگار	منظم با سطح مقطع ثابت	پیوسته با غلظت ورودی پنج میلی‌گرم بر مترمکعب
دوم	حل تحلیلی	۲۰۰ متر	ماندگار	منظم با سطح مقطع ثابت	هوساید با مدت‌زمان محدود ۱۰۰ دقیقه و غلظت ورودی پنج میلی‌گرم بر مترمکعب

جدول ۳- برخی از مشخصات داده‌های واقعی مورد استفاده در صحت‌سنجی مدل

نام آزمایش	محل انجام آزمایش	طول بازه در نظر گرفته شده از رودخانه	ماده ردیاب	شرط مرزی بالادست ماده آلاینده
یواس کریک	آمریکا- کالیفرنیا	۶۶۹ متر	کلراید	پالسی شکل به مدت‌زمان ۳ ساعت
آتاباسکا	کانادا- آلبرتا	۸/۳ کیلومتر	رودامین	نامنظم به مدت‌زمان ۰/۷۵ ساعت

جدول ۴- مشخصات مثال فرضی طراحی شده برای صحت‌سنجی مدل با استفاده از راه‌حل تحلیلی

پارامتر	طول (متر)	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)	مساحت مقطع عرضی کانال اصلی (مترمربع)	مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت (مترمربع)	ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت ضریب پراکندگی (مترمربع بر ثانیه)
	۲۰۰	۰/۰۱	۱	۱	۰/۲



شکل ۷- نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل با استفاده از حل تحلیلی برای حالت شرط مرزی بالادست پیوسته، در فواصل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متری از بالادست

به صورت پیوسته برای مدت زمان ۱۰ ساعت تزریق شد. مدت زمان کل شبیه‌سازی ۱۰ ساعت، گام زمانی محاسبات ۳۰ ثانیه و گام مکانی ۱ متر در نظر گرفته شدند. شکل (۷) نتایج حاصل از اجرای مدل برای این مثال فرضی و راه‌حل تحلیلی را در فواصل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متری از بالادست نشان می‌دهد. شاخص‌های خطا برای شرط مرزی بالادست پیوسته در جدول (۵) آورده شده‌اند. با توجه به شکل (۷) و شاخص‌های خطای ارائه شده در جدول (۵) مشخص می‌شود که روند نتایج حاصل از مدل‌سازی و حل تحلیلی در حالت با نگهداشت یکسان است و مدل ارائه شده در شبیه‌سازی مثال فرضی در نظر گرفته شده دارای دقت قابل قبولی است.

همان‌طور که قبلاً هم گفته شد مدل ارائه شده در این تحقیق قابلیت شبیه‌سازی مسئله انتقال را در هر دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت دارا می‌باشد؛ بنابراین به منظور نشان دادن قابلیت‌های مدل و بررسی صحت و درستی جواب‌ها در حالت بدون در نظر گرفتن نگهداشت، مدل برای همین مثال با قرار دادن $\alpha = 0$ اجرا شد و نتایج حاصل از اجرای مدل با نتایج حاصل از راه‌حل تحلیلی معادله کلاسیک جابه‌جایی-پراکنندگی مقایسه گردیدند.

به عنوان نمونه نتایج برای فاصله ۱۰۰ متری از بالادست در قالب نمودار مقایسه‌ای در هر دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت در شکل (۸) آورده شده‌اند. جدول (۶) هم شاخص‌های خطا را برای شرط مرز پیوسته در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۸) هم می‌توان گفت نتایج حاصل از اجرای مدل در هر دو حالت با در نظر گرفتن نگهداشت و بدون در نظر گرفتن نگهداشت بسیار نزدیک به پاسخ‌های حل تحلیلی است. شاخص‌های خطای ارائه شده در جدول (۶) هم مؤید این مطلب هستند. شکل (۸) همچنین نشان می‌دهد که در حالت در نظر گرفتن نگهداشت موقت، نمودارهای غلظت در برابر زمان نسبت به حالتی که نگهداشت موقت در نظر گرفته نمی‌شود ($\alpha = 0$) دارای اوج پایین‌تری هستند که این امر با مفهوم نگهداشت موقت که قبلاً ذکر شد همخوانی دارد.

صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی مدل ارائه شده با استفاده از راه‌حل تحلیلی معادله جابه‌جایی-پراکنندگی با لحاظ نگهداشت موقت در دو حالت شرط مرزی بالادست پیوسته و شرط مرزی بالادست هویساید و دو سری داده واقعی انجام شد. در مورد سری اول داده‌های واقعی متغیرهای مدل جریان به صورت اندازه‌گیری شده موجود است، بنابراین نیازی به اجرای مدل جریان نیست؛ اما در مورد سری دوم داده‌های واقعی مختصات مقاطع عرضی رودخانه به صورت نقاطی با مختصات (x, z) و شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست مدل جریان به صورت اندازه‌گیری شده موجود هستند، بنابراین برای این سری از داده‌ها مدل جریان هم اجرا می‌شود. مشخصات مثال‌های فرضی و داده‌های واقعی به کاررفته در این تحقیق به منظور صحت‌سنجی مدل به ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده‌اند.

صحت‌سنجی با استفاده از راه‌حل تحلیلی

دقت الگوریتم‌های عددی جدید را می‌توان با استفاده از راه‌حل‌های تحلیلی مورد آزمون قرار داد. صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از راه‌حل تحلیلی که توسط کازیلماز الهان^۱ در سال (۲۰۰۸) ارائه گردیده، انجام شده است. وی راه‌حل‌های تحلیلی را برای مدل نگهداشت موقت ارائه شده توسط بنکالا و والترز (۱۹۸۳)، با لاپلاس‌گیری از معادله‌های مدل نگهداشت موقت، با فرض ثابت بودن سرعت جریان، مساحت مقطع عرضی کانال و ضریب پراکنندگی طولی و همچنین بدون در نظر گرفتن جریان‌های ورودی جانبی و عبارات‌های مربوط به زوال مرتبه اول در کانال اصلی و ناحیه نگهداشت، برای حالت‌های تزریق پیوسته و محدود ماده ردیاب استخراج کرد. مشخصات مثال فرضی طراحی در جدول (۴) نشان داده شده است. برای مثال فرضی مقدار عدد بی‌بعد عدد دمکوهلر برابر با $0/8$ به دست می‌آید که در محدوده قابل قبول است.

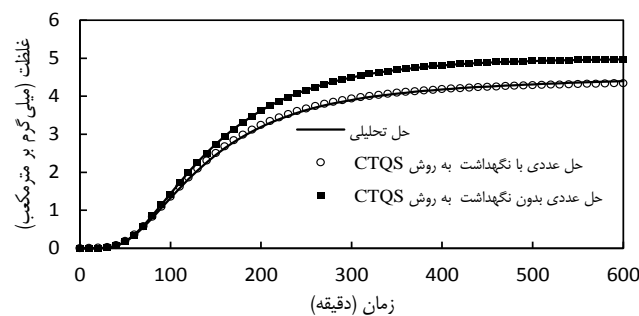
شرط مرزی بالادست: پیوسته

در این حالت، ماده حل شده با غلظت پنج میلی‌گرم بر مترمکعب

براتی مقدم و همکاران: حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ...

جدول ۵- شاخص‌های خطا برای شرط مرزی بالادست پیوسته

شاخص	فاصله از بالادست		
	۵۰ متر	۷۵ متر	۱۰۰ متر
مجذور ضریب همبستگی (درصد)	۹۹/۹۷	۹۹/۹۶	۹۹/۹۶
جزر میانگین مربع خطا (میلی گرم بر مترمکعب)	۰/۰۲۱	۰/۰۲۶	۰/۰۳۳۶
میانگین خطای مطلق (میلی گرم بر مترمکعب)	۰/۰۱۶۸	۰/۰۲۲۷	۰/۰۲۹
میانگین خطای نسبی (درصد)	۰/۴۵	۰/۷۸	۱/۲



شکل ۸- نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل با استفاده از حل تحلیلی برای شرط مرزی بالادست پیوسته، در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت، در فاصله ۱۰۰ متری از بالادست

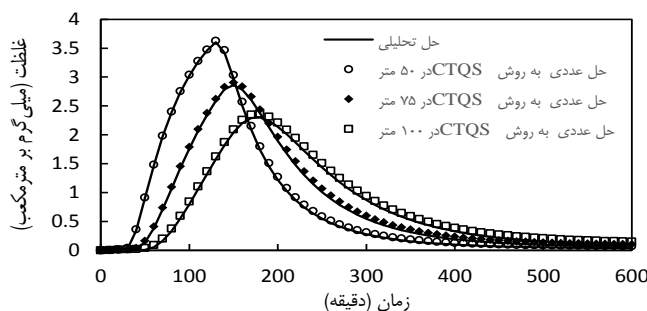
جدول ۶- شاخص‌های خطا برای شرط مرزی بالادست پیوسته در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت

شاخص	فاصله از بالادست ۱۰۰ متر	
	با نگهداشت	بدون نگهداشت
مجذور ضریب همبستگی (درصد)	۹۹/۹۶	۹۹/۹۹
جزر میانگین مربع خطا (میلی گرم بر مترمکعب)	۰/۰۳۳۶	۰/۰۰۹۳
میانگین خطای مطلق (میلی گرم بر مترمکعب)	۰/۰۲۹	۰/۰۰۶۵
میانگین خطای نسبی (درصد)	۱/۲	۰/۶۴

شرط مرزی بالادست: تابع هویساید

این بار ماده حل شده با غلظت پنج میلی‌گرم بر مترمکعب برای مدت‌زمان محدود ۱۰۰ دقیقه به نهر تزریق شد. مدت‌زمان کل شبیه‌سازی ۱۰ ساعت و گام زمانی محاسبات ۳۰ ثانیه و گام مکانی ۱ متر در نظر گرفته شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل با پاسخ‌های راه‌حل تحلیلی در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. جدول (۷) هم شاخص‌های خطا را برای این مثال فرضی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹) و جدول (۷) درستی و صحت نتایج حاصل از مدل ارائه شده تأیید می‌شود. بعد از اطمینان از درستی جواب‌ها در حالت شرط مرزی بالادست هویساید با در نظر گرفتن نگهداشت موقت، مدل برای همین مثال با قرار دادن $\alpha = 0$ اجرا شد و نتایج حاصل از اجرای مدل با نتایج حاصل از حل تحلیلی معادله کلاسیک جابه‌جایی-پراکندگی مقایسه گردیدند.

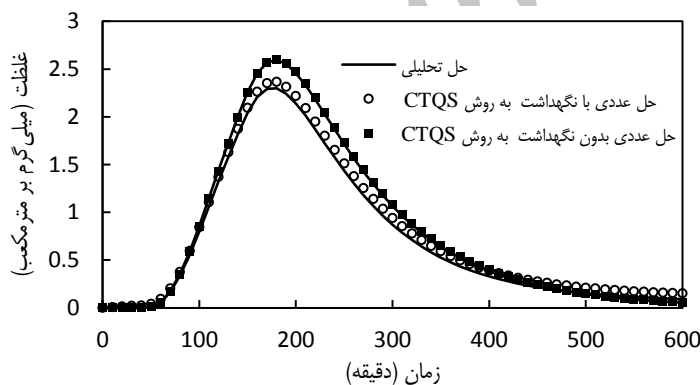
نتایج برای فاصله ۱۰۰ متری از بالادست در قالب نمودار مقایسه‌ای در شکل (۱۰) آورده شده‌اند. شاخص‌های خطا برای هر دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت هم در جدول (۸) آورده شده‌اند. با توجه به شکل (۱۰) مشخص است که نتایج حاصل از اجرای مدل در هر دو حالت تطابق قابل قبولی با پاسخ‌های راه‌حل تحلیلی دارند و روند نتایج یکسان است. این شکل همچنین تفاوت نمودارهای غلظت در برابر زمان ماده حل شده را در این دو حالت به‌خوبی نشان می‌دهد. نمودارهای غلظت در برابر زمان ماده حل شده برای حالتی که نگهداشت جزو مکانیزم‌های دخیل در انتقال ماده حل شده به سمت پایین دست در نظر گرفته می‌شود، نسبت به حالتی که نگهداشت موقت در نظر گرفته نمی‌شود، دارای نقطه اوج پایین‌تر و دنباله بلندتری هستند.



شکل ۹- نتایج حاصل از صحت سنجی مدل با استفاده از راه حل تحلیلی برای شرط مرزی بالادست هویساید، در ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متری

جدول ۷- شاخص های خطا برای شرط مرزی بالادست هویساید

فاصله از بالادست			شاخص
۱۰۰ متر	۷۵ متر	۵۰ متر	
۹۹/۹۶	۹۹/۹۷	۹۹/۹۸	مجذور ضریب همبستگی (درصد)
۰/۰۵۸	۰/۰۴۵	۰/۰۳۴	چتر میانگین مربع خطا (میلی گرم بر مترمکعب)
۰/۰۵۶	۰/۰۴۳۸	۰/۰۳۱	میانگین خطای مطلق (میلی گرم بر مترمکعب)
۵	۴/۲	۳/۵	میانگین خطای نسبی (درصد)



شکل ۱۰- نتایج حاصل از صحت سنجی مدل با استفاده از حل تحلیلی برای شرط مرزی بالادست هویساید، در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت، در فاصله ۱۰۰ متری از بالادست

حدود ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه به صورت ماندگار و غلظت پس زمینه کلر برابر ۳/۷ میلی گرم بر لیتر ثبت گردیدند. پنج سایت نمونه برداری به ترتیب در فواصل ۳۸، ۱۰۵، ۲۸۱، ۴۳۳ و ۶۱۹ متری پایین دست محل تزریق در طول نهر مستقر شدند.

بنکالا و والترز (۱۹۸۳) با استفاده از داده های آزمایش تزریق ماده ردیاب کلراید به داخل یواس کریک کاربرد مدل نگهداشت موقت را برای داده های میدانی نشان دادند. در طی یک سری از شبیه سازی ها آن ها مقادیر A_1 ، A_2 و D را برای هر بخش آن قدر تغییر دادند تا بهترین تطابق را بین غلظت های مشاهداتی و شبیه سازی شده به دست آورند. در واقع آن ها تکیه بر روش سعی و خطا، آن پارامتری که قرار بود تخمین زده شود، به صورت دستی تغییر دادند تا تطابق قابل قبولی بین غلظت های ماده ردیاب

صحت سنجی با استفاده از سری اول داده های واقعی: نهر یواس کریک

داده های مورد استفاده در این بخش از آزمایش تزریق ماده ردیاب در یواس کریک واقع در کالیفرنیا آمریکا استخراج شده اند. جزئیات انجام آزمایش اعم از نحوه نمونه برداری و آنالیز نتایج را می توان در آوانزینو و همکاران^۱ (۱۹۸۴) یافت. یواس کریک نهری کوهستانی کوچک با شیب تند ۰/۰۳ در بازه مورد مطالعه است. تزریق ماده ردیاب (محلول غلیظ نمک طعام) در ساعت ۸ صبح ۲۶ سپتامبر ۱۹۷۲ آغاز و برای سه ساعت ادامه یافت. در زمان انجام آزمایش دبی در نهر یواس کریک نزدیک به جریان پایه فصلی، در

1- Avanzino et al.

براتی مقدم و همکاران: حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ...

نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت در دو ایستگاه ۲۸۱ و ۴۳۳ متری نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱) و جدول ۱۰ مشخص می‌شود که مدل ارائه‌شده داده‌های مشاهده‌شده در آزمایش مذکور را با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند. شکل (۱۲) هم نشان می‌دهد که در حالتی که شبیه‌سازی با لحاظ نواحی نگهداشت موقت انجام شده است، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق بیشتری با داده‌های واقعی در شکل عمومی نمودار غلظت در برابر زمان، غلظت اوج و زمان رسیدن به اوج دارد.

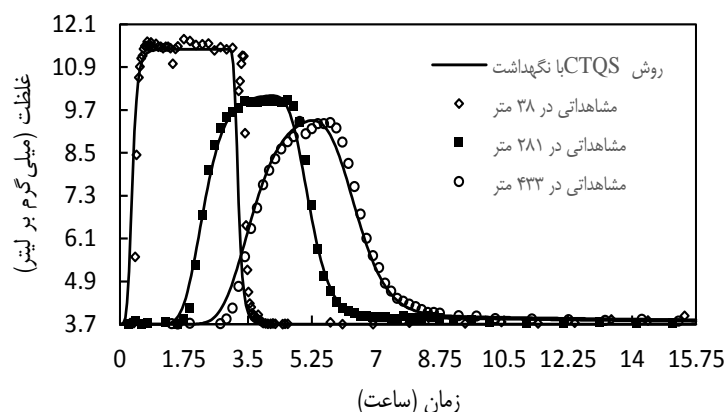
شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده برقرار گردد. جدول (۹) پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی آزمایش یواس کریک از جمله طول هر بازه، ضریب پراکندگی، مساحت مقطع عرضی کانال اصلی نهر و ناحیه نگهداشت و ضریب تبادل را برای هر بازه بر مبنای کار این محققین نشان می‌دهد (بنکالا و والترز، ۱۹۸۳). نتایج شبیه‌سازی آزمایش ماده ردیاب کلراید نهر یواس کریک با استفاده از مدل ارائه‌شده برای ایستگاه‌های ۲۸۱، ۴۳۳ و ۴۳۳ متری پایین دست محل تزریق در شکل (۱۱) آورده شده‌اند. شکل (۱۲) هم نتایج اجرای مدل برای آزمایش یواس کریک را در دو حالت با در

جدول ۸- شاخص‌های خطا برای شرط مرزی بالادست هویساید در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت

فاصله از بالادست ۱۰۰ متر		پارامتر
بدون نگهداشت	با نگهداشت	
۹۹/۹۹	۹۹/۹۶	مجذور ضریب همبستگی (درصد)
۰/۰۰۹۴	۰/۰۵۸	جذر میانگین مربع خطا (میلی گرم بر مترمکعب)
۰/۰۰۷۵	۰/۰۵۶	میانگین خطای مطلق (میلی گرم بر مترمکعب)
۱/۴۹	۵	میانگین خطای نسبی (درصد)

جدول ۹- پارامترهای شبیه‌سازی در آزمایش یواس کریک

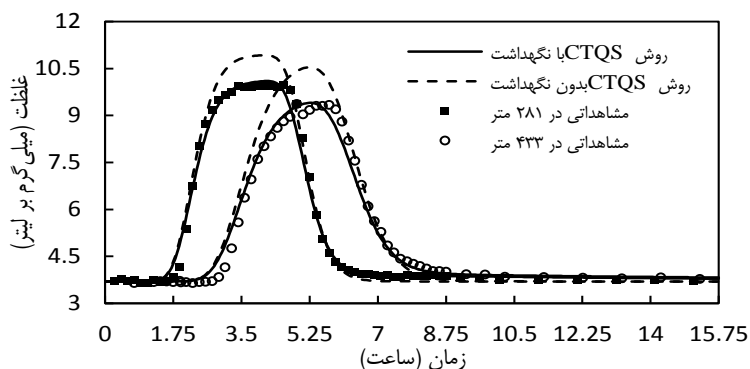
ضریب تبادل (α)	مساحت مقطع عرضی		ضریب پراکندگی (مترمربع بر ثانیه)	بازه (متر)
	ناحیه نگهداشت (A_S)	کانال اصلی (A)		
۰	۰	۰/۳	۰/۱۲	۰-۳۸
۰	۰	۰/۴۲	۰/۱۵	۳۸-۱۰۵
3×10^{-5}	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۲۴	۱۰۵-۲۸۱
1×10^{-5}	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۳۱	۲۸۱-۴۳۳
$4/5 \times 10^{-5}$	۱/۵۶	۰/۵۲	۰/۴	۴۳۳-۶۱۹



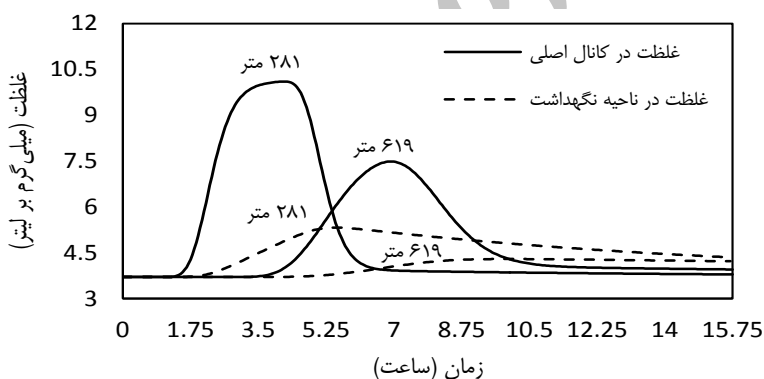
شکل ۱۱- غلظت مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده کلراید در ۳۸، ۲۸۱ و ۴۳۳ متری یواس کریک

جدول ۱۰- شاخص های خطا در آزمایش یواس کریک

شاخص	ایستگاه ۳۸ متر	ایستگاه ۲۸۱ متر	ایستگاه ۴۳۳ متر
مجدور ضریب همبستگی (درصد)	۹۴/۱	۹۹/۲۹	۹۸/۲۵
جزر میانگین مربع خطا (میلی گرم بر مترمکعب)	۰/۷۲۷	۰/۲۸۳۸	۰/۳۶۶
میانگین خطای مطلق (میلی گرم بر مترمکعب)	۰/۲۰۲	۰/۲۲۷	۰/۳۰۵
میانگین خطای نسبی (درصد)	۳/۵	۴/۷	۶/۶



شکل ۱۲- نتایج اجرای مدل برای آزمایش یواس کریک در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت، در ۲۸۱ و ۴۳۳ متری

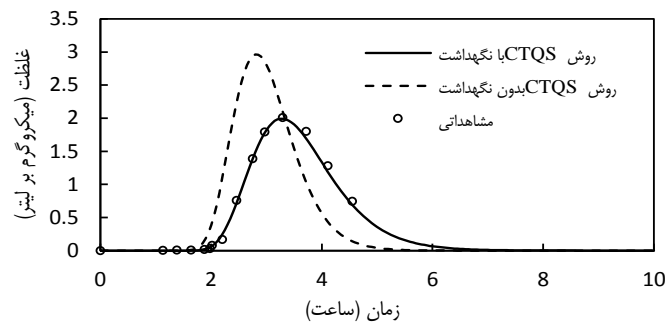


شکل ۱۳- مقایسه غلظت کلراید در ناحیه نگهداشت و کانال اصلی با در نظر گرفتن نگهداشت موقت در ۲۸۱ و ۶۱۹ متری یواس کریک

یعنی این بار این نواحی در نقش یک منبع از ماده حل شده ظاهر می شوند. در نتیجه این مکانیزم ها نمودارهای غلظت در برابر زمان ماده حل شده در کانال اصلی دارای نقطه اوج کوتاه تر و دنباله طولانی تری نسبت به نمودارهای غلظت در برابر زمان پیش بینی شده با استفاده از معادله کلاسیک جابه جایی-پراکندگی خواهند بود (شکل ۱۲).

شکل (۱۳) هم غلظت کلراید را در نواحی نگهداشت در مقایسه با غلظت کلراید در کانال اصلی نشان می دهد. همان طور که در شکل هم مشاهده می شود، تداوم دنباله نمودار غلظت در برابر زمان در نواحی نگهداشت بیشتر از کانال اصلی است. این بدان معناست که مقادیر قابل توجهی از جرم ماده حل شده تا مدت ها پس از عبور ابر ماده حل شده در نواحی نگهداشت باقی می ماند. این شکل همچنین نشان می دهد که نواحی نگهداشت بخشی از جرم ماده حل شده را موقتاً از کانال اصلی خارج کرده و به صورت یک تخلیه موقتی عمل می کنند. بعد از عبور ابر ماده حل شده جرمی که موقتاً در این نواحی نگه داشته شده بود، به تدریج وارد کانال اصلی می شود،

براتی مقدم و همکاران: حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ...

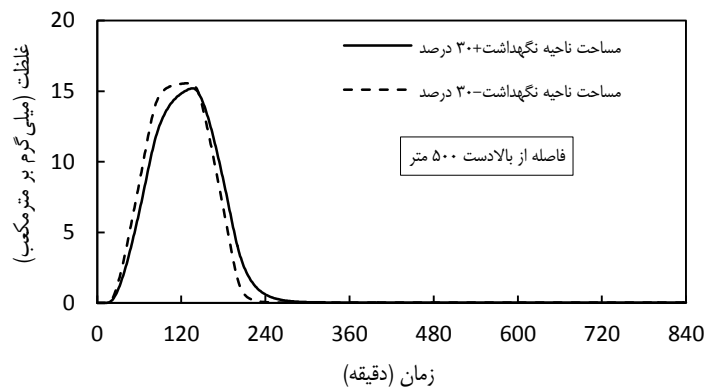


شکل ۱۴- نتیجه اجرای مدل برای آزمایش رودخانه آتاباسکا در ۱۱/۸۵ کیلومتری بالادست محل تزریق

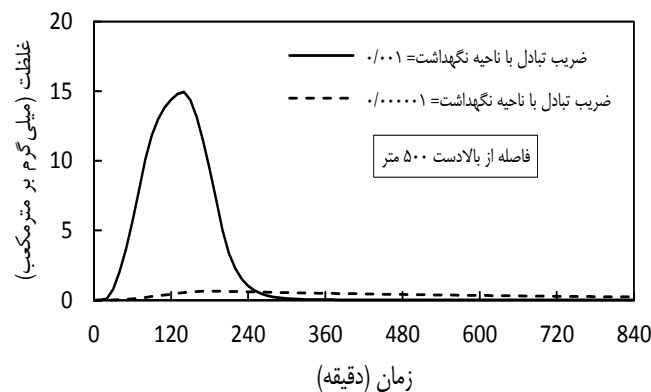
جدول ۱۱- شاخص‌های خطا در آزمایش رودخانه آتاباسکا با در نظر گرفتن نگهداشت موقت و بدون در نظر

گرفتن نگهداشت موقت

شاخص	مجدور ضریب همبستگی (درصد)	جزر میانگین مربع خطا (میکروگرم بر لیتر)	میانگین خطای مطلق (میکروگرم بر لیتر)	میانگین خطای نسبی (درصد)
با نگهداشت	۹۷/۴	۰/۱۱	۰/۰۶	۴/۴۷
بدون نگهداشت	۹۱/۵۸	۰/۱۹	۰/۱۲۷	۲۸/۰۶



شکل ۱۵- مقایسه غلظت ناحیه نگهداشت در دو حد بالا و پایین بازه تغییرات مساحت ناحیه نگهداشت



شکل ۱۶- مقایسه غلظت ناحیه نگهداشت در دو حد بالا و پایین بازه تغییرات ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت

نظر گرفته شد. شکل ۱۴) نتیجه اجرای مدل برای آزمایش آتاباسکا را در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت در فاصله ۱۱/۸۵ کیلومتری از بالادست نشان می‌دهد. شاخص‌های خطا را برای این ایستگاه نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۴ می‌توان گفت که نمودار غلظت در برابر زمان حاصل از اجرای مدل در حالت در نظر گرفتن نگهداشت موقت تطابق خیلی خوبی با نمودار مشاهده شده غلظت در برابر زمان ماده ردیاب در رودخانه مذکور دارد، اما نمودار غلظت در برابر زمان ماده ردیاب شبیه‌سازی شده بدون در نظر گرفتن نگهداشت موقت این‌طور نیست. بالا بودن شاخص میانگین خطای نسبی برای این حالت دلالت بر عملکرد ضعیف معادله کلاسیک جابه‌جایی-پراکنندگی در شبیه‌سازی انتقال ماده حل شده در رودخانه‌های طبیعی دارد. لذا به‌منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار انتقال ماده حل شده در رودخانه‌های طبیعی ضروری است تا تأثیر نگهداشت موقت بر انتقال به سمت پایین دست ماده حل شده در نظر گرفته شود.

بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی

دو پارامتر مهم ورودی به مدل که توصیف‌کننده مکانیزم نگهداشت موقت هستند، شامل مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت و ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت می‌باشند. نتایج حاصل از مدل تا حد زیادی به تغییرات این دو پارامتر بستگی دارد، لذا بررسی حساسیت مدل ارائه شده نسبت به تغییرات آن‌ها دارای اهمیت زیادی است. بدین منظور یک مثال فرضی طراحی گردید و ابتدا شاخص‌های سنجش خطا به ازای حالت پایه در بررسی حساسیت برای این مثال تعیین گردیدند، سپس پارامتری که بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات آن مدنظر بود، در دامنه قابل قبول تغییر داده شد و با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، مدل در این حالت اجرا شده و شاخص‌های سنجش خطا مجدداً تعیین گردیدند. لذا با ارائه شاخص‌های سنجش خطا به ازای تغییرات پارامتر موردنظر در بررسی حساسیت در قالب یک جدول، حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامتر موردنظر قابل تشخیص خواهد بود. لازم به ذکر است که با توجه به عدم قطعیت بالا در تخمین ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت دامنه وسیعی از تغییرات این پارامتر در نظر گرفته شده است.

با توجه به شاخص‌های خطای ارائه شده در جدول (۱۲) مشخص است که با افزایش مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت دقت مدل کاهش پیدا می‌کند، دلیل این امر هم این است که با افزایش مساحت این ناحیه مدت‌زمان ماند در ناحیه نگهداشت کمی افزایش می‌یابد و آزادسازی جرم با کمی تأخیر همراه خواهد بود، که این مسئله روی دنباله نمودار غلظت در برابر زمان تأثیر می‌گذارد و باعث طولانی شدن دنباله نمودار می‌شود، البته میزان این تأخیر زمانی خیلی قابل توجه نیست، لذا می‌توان گفت که حساسیت مدل نسبت به تغییرات مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت کم است (شکل ۱۵).

صحت‌سنجی با استفاده از سری دوم داده‌های واقعی: رودخانه آتاباسکا

پوتز و اسمیت^۱ (۲۰۰۰) مشخصات دو آزمون میدانی تزریق ماده ردیاب را در بازه‌ای به طول تقریبی ۲۶ کیلومتر از رودخانه آتاباسکا^۲ در نزدیکی هینتون، آلبرتا^۳، کانادا توصیف کردند. در آزمایش اول، ماده ردیاب رودامین بیست درصد به مدت ۵/۵۲ ساعت با دبی و غلظت ثابت به رودخانه تزریق و در آزمایش دوم ۱۰ لیتر از ماده ردیاب رودامین بیست درصد به صورت ناگهانی به داخل نهر ریخته شد و نمونه‌ها در چهار مقطع عرضی ۴/۷۲۵، ۱۱/۸۵، ۱۶/۲۷۵، ۲۰/۶۲۵ کیلومتری پایین دست محل تزریق برداشت شدند.

در این تحقیق از داده‌های آزمون تزریق ناگهانی ماده ردیاب برای صحت‌سنجی مدل ارائه شده، استفاده گردیده است. طول بازه در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی، ۸/۳ کیلومتر، حدفاصل ۴/۷۲۵ کیلومتری تا ۱۳/۰۲۵ کیلومتری رودخانه مذکور می‌باشد. پارامترهای هندسی بین دو مقطع عرضی، یعنی در جاهایی که اطلاعات مقطع وجود نداشت، به ازای یک رقوم سطح آب معین با استفاده از مین‌یابی خطی بین دو مقطع مجاور محاسبه گردید.

نکته اساسی که در انتخاب این بازه از رودخانه مدنظر قرار گرفت، این بود که بازه موردنظر باید ویژگی‌های هندسی معمول رودخانه‌های دارای نواحی نگهداشت مثل توالی نقاط عمیق و کم‌عمق و تغییرات عرض ناگهانی و فراوان را دارا می‌بود. مدت‌زمان کل شبیه‌سازی ۱۰ ساعت، گام مکانی ۲۵ متر، گام زمانی ۱ دقیقه، مساحت ناحیه نگهداشت برای بازه ۵/۵ کیلومتری تا ۶/۲۵ کیلومتری، ۴۰ مترمربع و ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت 10^{-6} در نظر گرفته شدند. پارامترهای مربوط به نگهداشت موقت از طریق سعی و خطا و تطبیق چشمی داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی به دست آمدند. با توجه به پارامترهای تخمین زده شده، معیار دمکوهلر برابر ۰/۳۸ به دست آمد که در بازه قابل قبول ۰/۱ تا ۱۰ قرار دارد، لذا می‌توان گفت که در بازه مورد استفاده در شبیه‌سازی از رودخانه مذکور نگهداشت موقت جزو مکانیزم‌های دخیل در انتقال ماده ردیاب به سمت پایین دست محسوب می‌گردد.

شرایط مرزی مدل جریان بر اساس داده‌های ایستگاه اندازه‌گیری محیط‌زیست کانادا، به صورت دبی ثابت ۳۳۴ مترمکعب در مرز بالادست و رقوم سطح آب ثابت با زمان ۹۵۲/۶ متر در پایین دست در نظر گرفته شدند. با توجه به این که نمونه‌های غلظت فقط در چهار مقطع عرضی پایین دست محل تزریق برداشت شده‌اند، نمودار غلظت در برابر زمان برداشت شده در ۴/۷۲۵ کیلومتری به‌عنوان شرط مرزی بالادست مدل انتقال و نمودار غلظت در برابر زمان برداشت شده در ۱۱/۸۵ کیلومتری برای مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل با داده‌های واقعی مورد استفاده قرار گرفت. شرط مرزی پایین دست مدل انتقال هم به‌صورت گردان‌یاب مکانی صفر غلظت در

1-Putz and Smith
2- Athabasca
3- Hinton, Alberta

براتی مقدم و همکاران: حل عددی معادله جابه‌جایی-پراکندگی با لحاظ...

جدول ۱۲- بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت

مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت (متر)							شاخص
$A_S + 30\%$ درصد	$A_S + 20\%$ درصد	$A_S + 10\%$ درصد	A_S	$A_S - 10\%$ درصد	$A_S - 20\%$ درصد	$A_S - 30\%$ درصد	
۹۹/۳	۹۹/۳۵	۹۹/۳۹	۹۹/۴۳	۹۹/۴۶	۹۹/۴۹	۹۹/۵۳	مجدور ضریب همبستگی (درصد)
۰/۴۱۶	۰/۴	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۳۶۵	۰/۳۵۴	۰/۳۴	جذر میانگین مربع خطا (میلی گرم بر مترمکعب)
۰/۱۹۳	۰/۱۸۸	۰/۱۸۳	۰/۱۷۹	۰/۱۷۶	۰/۱۷۳	۰/۱۷	میانگین خطای مطلق (میلی گرم بر مترمکعب)
۶/۳۷	۶/۳۶۵	۶/۳۶۳	۶/۳۶	۶/۳۳	۶/۲	۶/۱۶	میانگین خطای نسبی (درصد)

جدول ۱۳- بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت

ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت (S^{-1})							شاخص
4α	3α	2α	α	$1/2\alpha$	$1/3\alpha$	$1/4\alpha$	
۹۹/۵۲	۹۹/۵	۹۹/۴۷	۹۹/۴۳	۹۹/۳۶	۹۹/۳۲	۹۹/۳	مجدور ضریب همبستگی (درصد)
۰/۶۲	۰/۵۱	۰/۴۱۵	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۴۵	جذر میانگین مربع خطا (میلی گرم بر مترمکعب)
۰/۳۴۵	۰/۲۹	۰/۲۳	۰/۱۷۹	۰/۱۸۷	۰/۱۹۶	۰/۲۰۲	میانگین خطای مطلق (میلی گرم بر مترمکعب)
۹/۷۳	۸/۵۹	۷/۵۴	۶/۳۶	۶/۷۴	۷	۷/۱۵	میانگین خطای نسبی (درصد)

ارائه گردید تا نواقص موجود در مدل‌های رایج موجود در زمینه شبیه‌سازی انتقال آلاینده را مرتفع سازد. برای نیل به این هدف، از روش کوئیک به دلیل پایداری و خطاهای تقریب کم، در گسسته‌سازی مکانی معادله جابه‌جایی - پراکندگی با لحاظ نگهداشت موقت، استفاده شد. باید به این نکته هم اشاره کرد که مدل ارائه‌شده در این تحقیق یک مدل جامع است که قابلیت شبیه‌سازی مسئله انتقال ماده حل‌شده را در هر دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن ناحیه نگهداشت دارا می‌باشد. به این صورت که اگر ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت (α) در مدل برابر صفر در نظر گرفته شود، معادله به کاربرده شده در ساختار مدل، به معادله کلاسیک جابه‌جایی - پراکندگی تبدیل شده و تأثیر نواحی نگهداشت موقت در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین با ثابت در نظر گرفتن شرایط مرزی مربوط به مدل جریان در برابر زمان، می‌توان مدل را برای حالت جریان ماندگار هم اجرا کرد. مدل ارائه‌شده با استفاده از حل‌های تحلیلی ارائه‌شده برای معادله‌ی جابه‌جایی - پراکندگی با لحاظ نگهداشت موقت برای دو حالت شرط مرزی بالادست پیوسته و شرط مرزی بالادست تابع هویساید و دو سری داده واقعی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

نتایج حاصل صحت‌سنجی نشان داد که مدل قادر به شبیه‌سازی انتقال آلاینده با لحاظ نواحی نگهداشت موقت با دقت خوب و قابل قبولی است. همچنین به‌منظور نشان دادن برتری الگوی عددی مورد استفاده در مدل ارائه‌شده، علاوه بر مدل اصلی، دو مدل دیگر که با استفاده از الگوی عددی مرکزی در زمان و مرکزی در مکان (CTCS) و الگوی پسرود در زمان و مرکزی در مکان (BTCS) تدوین شده بودند، برای حالت جابه‌جایی خالص اجرا و نتایج حاصل از سه مدل با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که الگوی عددی مورد استفاده در مدل (مرکزی در زمان - کوئیک در مکان) در مواردی که جابه‌جایی فرآیند غالب انتقال است، نسبت به دو الگوی عددی مرکزی در زمان - مرکزی در مکان و الگوی پسرود در زمان - مرکزی در مکان، دارای نوسان عددی کمتر و پایداری بالاتری است.

بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات دو پارامتر ورودی مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت و ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت هم نشان داد مدل نسبت به تغییرات مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت حساس نیست، اما حساسیت نسبتاً بالایی نسبت به تغییرات ضریب تبادل با ناحیه نگهداشت دارد، لذا انتخاب این پارامتر باید با دقت بیشتری صورت گیرد.

در مجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که مدل ارائه‌شده در این تحقیق یک مدل کاربردی است و بسیاری از محدودیت‌ها و معایب ذکرشده برای مدل‌های رایج فعلی را ندارد، لذا می‌تواند در بسیاری از مطالعات انتقال ماده حل‌شده در نه‌رها و رودخانه‌های طبیعی به‌ویژه رودخانه‌های کوهستانی، جایگزین مدل‌های فعلی شود.

با توجه به جدول (۱۳) هم می‌توان گفت که با افزایش و کاهش ضریب تبادل نسبت به مقدار آن در حالت پایه دقت مدل کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش این ضریب میزان غلظت ناحیه نگهداشت به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (شکل ۱۶) و به‌تبع آن نقطه اوج نمودار غلظت در برابر زمان پایین افتاده و دنباله نمودار هم طولانی‌تر می‌شود و با کاهش این ضریب عکس این مورد اتفاق می‌افتد، یعنی نمودار به حالت نمودار حاصل از معادله کلاسیک (بدون در نظر گرفتن نگهداشت) نزدیک‌تر می‌شود.

نتیجه‌گیری

محققین بسیاری با تکیه بر نتایج حاصل از آزمایش‌های میدانی ماده ردیاب در نه‌رها و رودخانه‌های طبیعی به این نکته اشاره کرده‌اند که معادله کلاسیک جابه‌جایی - پراکندگی به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی نمودارهای غلظت در برابر زمان مشاهده‌شده در واقعیت نیست، لذا در نظر گرفتن عبارتهایی برای لحاظ تأثیر نواحی نگهداشت موقت منجر به شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده انتقال ماده حل‌شده در نه‌رها و رودخانه‌های طبیعی می‌شود.

از طرفی مروری بر مقالات تدوین‌شده در حوزه مدل‌سازی انتقال ماده حل‌شده در نه‌رها و رودخانه‌های طبیعی نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت چشمگیری که صورت گرفته است، هنوز مشکلات عدیده‌ای وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتری است، از آن جمله این که در گذشته اغلب مطالعات بر روی انتقال ماده حل‌شده بر رژیم جریان ماندگار و مقاطع منظم که به‌صورت در نظر گرفتن سرعت متوسط ثابت در مدل نمود پیدا می‌کند، متمرکز شده‌اند. درحالی‌که وجود شرایط جریان غیرماندگار و مقاطع نامنظم در نه‌رها و رودخانه‌های طبیعی امری معمول است؛ بنابراین نیاز به مدل‌هایی که قابلیت شبیه‌سازی انتقال ماده حل‌شده تحت رژیم جریان غیرماندگار و مقاطع نامنظم را داشته باشند، احساس می‌شود. همچنین در گذشته توجه کافی به جنبه‌های حل عددی معادله‌های انتقال و نگهداشت موقت نشده است، بنابراین لزوم استفاده از الگوریتم‌های دقیق‌تر و کارآمدتر برای حل این معادله‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

تاکنون مدل‌های عددی و نرم‌افزارهای تجاری بسیاری برای حل مسئله انتقال ماده حل‌شده در رودخانه‌ها ارائه شده‌اند که اکثر آن‌ها از معادله کلاسیک جابه‌جایی - پراکندگی برای برخورد با این مسئله استفاده می‌کنند که از جمله آن‌ها می‌توان به نرم‌افزار مایک ۱۱ اشاره کرد. در حال حاضر تنها مدل عددی که برای حل معادله جابه‌جایی - پراکندگی با لحاظ تأثیر نواحی نگهداشت موقت در دسترس محققین قرار دارد مدل اوتیس (رانکل، ۱۹۹۸) است که دارای معایب بسیاری است، از آن جمله می‌توان به نداشتن برنامه روندیابی جریان، استفاده از روش مشتق‌گیری مرکزی برای گسسته‌سازی مکانی معادله‌ها و محدودیت در تعداد پارامترهای ورودی اشاره کرد.

در این مقاله مدلی جامع با تلفیق الگوهای عددی دقیق‌تر برای حل عددی معادله‌های جابه‌جایی - پراکندگی با لحاظ نگهداشت موقت در حالت وجود جریان غیرماندگار در رودخانه‌ها با مقطع نامنظم

منابع

- 1- Avanzino, R. J., Zellweger, G., Kennedy, V., Zand, S. and K. E. Bencala, 1984. Results of a solute transport experiment at Uvas Creek, September 1972. USGS Open-File Report 84-236, 82 p.
- 2- Beltaos, S. and T. Day, 1978. A field study of longitudinal dispersion. Canadian Journal of Civil Engineering, 5: 572-585.
- 3- Bencala, K. E. and R. A. Walters, 1983. Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream: a transient storage model. Water Resources Research, 19: 718-724.
- 4- Bertolotto, D., Manera, A., Macián-Juan, R. and R. Chawla, 2011. Improvement of the one-dimensional dissolved-solute convection equation using the QUICKEST-ULTIMATE algorithm. Nuclear Engineering and Design, 241: 245-256.
- 5- Chapra, S. C. and R. L. Runkel, 1999. Modeling impact of storage zones on stream dissolved oxygen. Journal of Environmental Engineering, 125: 415-419.
- 6- Davis, P. and T. Atkinson, 2000. Longitudinal dispersion in natural channels: 3. An aggregated dead zone model applied to the River Severn, UK. Hydrology And Earth System Sciences, 4: 373-381.
- 7- Day, T. J. 1975. Longitudinal dispersion in natural channels. Water Resources Research, 11: 909-918.
- 8- Fabian, M. W., Endreny, T. A., Bottacin-Bosolin, A. and L. K. Lautz, 2011. Seasonal variation in cascade-driven hyporheic exchange, northern Honduras. Hydrological Processes, 25: 1630-1646.
- 9- Fernald, A. G., Wigington, P. and D. H. Landers, 2001. Transient storage and hyporheic flow along the Willamette River, Oregon: Field measurements and model estimates. Water Resources Research, 37(6):1681-94.
- 10- Hart, D. R. 1995. Parameter estimation and stochastic interpretation of the transient storage model for solute transport in streams. Water Resources Research, 31: 323-328.
- 11- Harvey, J. W. and B. Wagner, 2000. Quantifying hydrologic interactions between streams and their subsurface hyporheic zones. Streams and Ground Waters, 3-44.
- 12- Jin, L., Siegel, D. I., Lautz, L. K. and M. H. Otz, 2009. Transient storage and downstream solute transport in nested stream reaches affected by beaver dams. Hydrological Processes, 23: 2438-2449.
- 13- Kazezyilmaz-Alhan, C. M. 2008. Analytical solutions for contaminant transport in streams. Journal of Hydrology, 348: 524-534.
- 14- Kelleher, C., Wagener, T., McGlynn, B., Ward, A., Gooseff, M. and R. Payn, 2013. Identifiability of transient storage model parameters along a mountain stream. Water Resources Research, 49: 5290-5306.
- 15- Lautz, L. K. and Siegel, D. I. 2007. The effect of transient storage on nitrate uptake lengths in streams: An inter-site comparison. Hydrological Processes, 21(26):3533-3548.
- 16- Lautz, L. K., Siegel, D. I. and R. L. Bauer, 2006. Impact of debris dams on hyporheic interaction along a semi-arid stream. Hydrological Processes, 20: 183-196.
- 17- Leonard, B. P. 1979. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering, 19: 59-98.
- 18- Lin, Y. C. and M. A. Medina JR, 2003. Incorporating transient storage in conjunctive stream-aquifer modeling. Advances in Water Resources, 26: 1001-1019.
- 19- Marion A. and M. Zaramella, 2005. A residence time model for stream-subsurface exchange of contaminants. Acta Geophysica Polonica, 53(4): 527-538.

- 20-Neumann, L., Šimunek, J. and F. Cook, 2011. Implementation of quadratic upstream interpolation schemes for solute transport into HYDRUS-1D. *Environmental Modelling and Software*, 26: 1298-1308.
- 21-Nordin, C. F. and B. M. Troutman, 1980. Longitudinal dispersion in rivers: The persistence of skewness in observed data. *Water Resources Research*, 16: 123-128.
- 22-O'connor, B. L., Hondzo, M. and J. W. Harvey, 2009. Predictive modeling of transient storage and nutrient uptake: Implications for stream restoration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136: 1018-1032.
- 23-Putz, G. and D. W. Smith, 2000. Two-dimensional modelling of effluent mixing in the Athabasca River downstream of Weldwood of Canada Ltd., Hinton, Alberta. University of Alberta, Project report, 2000-7, 51p.
- 24-Ramaswami, A., Milford, J. B. and M. J. Small, 2005. Integrated environmental modeling: pollutant transport, fate, and risk in the environment, John Wiley, Hoboken, New Jersey, 688 p.
- 25-Runkel, R. L. 1998. One-Dimensional Transport with Inflow and Storage (OTIS): A Solute Transport Model for Streams and Rivers. *Water-Resources Investigations Report 98-4018*, 80p.
- 26-Runkel, R. L. 2000. Using OTIS to model solute transport in streams and rivers. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- 27-Runkel, R. L. and K. E. Bencala, 1995. Transport of reacting solutes in rivers and streams. *Environmental Hydrology*, Springer, 482 p.
- 28-Scott, D. T., Gooseff, M. N., Bencala, K. E. and R. L. Runkel, 2003. Automated calibration of a stream solute transport model: implications for interpretation of biogeochemical parameters. *Journal of The North American Benthological Society*, 22: 492-510.
- 29-Seo, I. W. and T. S. Cheong, 2001. Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127: 453-465.
- 30-Seo, I. W. and W. H. C. Maxwell, 1992. Modeling low-flow mixing through pools and riffles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118: 1406-1423.
- 31-Singh, S. K. 2003. Treatment of stagnant zones in riverine advection-dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129: 470-473.
- 32-Szeftel, P., Moore, R. and M. Weller, 2011. Influence of distributed flow losses and gains on the estimation of transient storage parameters from stream tracer experiments. *Journal of Hydrology*, 396: 277-291.
- 33-Szymkiewicz, R. 2010. Numerical modeling in open channel hydraulics. Springer, 370 p.
- 34-Taylor, G. 1954. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 223: 446-468.
- 35-Wagner, B. J. and J. W. Harvey, 1997. Experimental design for estimating parameters of rate-limited mass transfer: Analysis of stream tracer studies. *Water Resources Research*, 33: 1731-1741.
- 36-Ward, A. S., Payn, R. A., Gooseff, M. N., McGlynn, B. L., Bencala, K. E., Kelleher, C. A., Wondzell, S. M. and T. Wagener, 2013. Variations in surface water-ground water interactions along a headwater mountain stream: Comparisons between transient storage and water balance analyses. *Water Resources Research*, 49: 3359-3374.
- 37-Zhang, Y. and M. M. Aral, 2004. Solute transport in open-channel networks in unsteady flow regime. *Environmental Fluid Mechanics*, 4: 225-247.