Archive of SID

مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۱۶۹-۱۵۵

بررسی تحلیلی اهمیت مکانی و زمانی ضریب پراکندگی طولی در رودخانه‌ها در جریان غیرماندگار و غیریکنواخت

نیلوفر سادات جعفری[۱]، مهدی مظاهری[۲*]، جمال محمد ولی سامانی[۳]
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲. استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳. استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

چکیده

ضریب پراکندگی طولی یک عنصر کلیدی در مدل‌سازی انتقال آلاینده در رودخانه‌ها می‌باشد. مهم‌ترین عامل مؤثر بر ضریب پراکندگی طولی، هیدرودینامیک جریان است. با توجه به متغیربودن پارامترهای هیدرولیکی و هندسی رودخانه‌ها، ضریب پراکندگی طولی تابعی از زمان و مکان بوده، لذا محاسبه دقیق آن در چنین شرایطی سخت و تقریباً غیرممکن می‌باشد. تعیین اهمیت زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی در شبیه‌سازی انتقال آلاینده در رودخانه‌ها موضوع بسیار مهمی است که در پژوهش‌های گذشته به‌صورت دقیق به آن پرداخته نشده است. در این پژوهش با استفاده از حل تحلیلی معادله جابه‌جایی- پراکندگی و استخراج معادله مشتق جزیی غلظت نسبت به ضریب پراکندگی تأثیر این ضریب بر دقت نتایج محاسبات توزیع غلظت بررسی شده است. مدل ارائه‌شده برای یک رودخانه فرضی با دو الگوی زمانی آلاینده ورودی مختلف و هم‌چنین برای یک رودخانه واقعی (رودخانه کارون) با تابع شدت آلاینده ورودی فرضی و واقعی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. با اجرای مدل ارائه‌شده برای بازه ۵۰ کیلومتری از رودخانه کارون، بیش‌ترین درصد خطایی که در اثر تغییرات ۱۰۰ درصدی ضریب پراکندگی در توزیع غلظت آلاینده ایجاد می‌شود تنها ۴/۸ درصد است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برآورد دقیق ضریب پراکندگی طولی تنها در برخی از بازه‌های زمانی و مکانی رودخانه الزامی بوده و در بیش‌تر مواقع لزومی به محاسبه دقیق آن در تمام طول رودخانه نمی‌باشد. از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، ارائه یک روش کاربردی به کاربر است که با توجه به الگوی زمانی آلاینده ورودی، زمان‌ها و مکان‌های حساس به مقدار ضریب پراکندگی طولی به صورت دقیق شناسایی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آنالیز حساسیت، شار پراکندگی، شار جابه‌جایی، معادله جابه‌جایی- پراکندگی.

Analytical evaluation of temperal and Spatial Sensitivity of longitudinal dispersion coefficient in rivers for unsteady and nonuniform flows

Niloofar Sadat Jafari[1], Mehdi Mazaheri[2*], Jamal Mohammad Vali Samani[3]
1. Master Student of Water Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Assistant Prof., Department of Water Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. Professor, Department of Water Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Received: October 24, 2019 Accepted: December 01, 2019

Abstract

Longitudinal dispersion coefficient (LDC) is a key element in pollutant transport modeling in streams. The most important factor affecting dispersion coefficient is the hydrodynamic flow. Due to the variability of hydraulic and geometrical parameters of rivers, the dispersion coefficient is a function of time and place, therefore precise calculation in such conditions is difficult and almost impossible. Determining the temporal and spatial importance of the longitudinal dispersion coefficient in pollutant transport in rivers is an important issue which has not been well-studied so far. In this study, the effect of this coefficient on the accuracy of concentration distribution results is evaluated. To do so, using analytical solution of the advection-dispersion equation and extraction of partial derivative of the concentration relative to the dispersion coefficient, the subjected sensitivity was estimated. To validate the proposed method, it is performed for a hypothetical river with two different input pollution time patterns as well as for a real river (Karun River) with a hypothetical and real input pollution intensity function. By applying the presented model for the 50 km interval of the Karun river, the highest percentage error caused by 100 percent variation in the dispersion coefficient was only 4.8 percent. The results of this study show that accurate estimation of dispersion coefficient is necessary only in some time and place ranges of the river and in most cases precise calculation is not necessary. One of the most important findings of this study is to suggest a practical approach for users that according to the time pattern of input pollutants, times and places sensitivity to the longitudinal dispersion coefficient could be identified.

Keywords: Advection-Dispersion Equation, Advection Flux, Dispersion Flux, Sensitivity analysis.

* نویسنده مسئول
Email: m.mazaheri@modares.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

آب بدون شک ارزشمندترین منبع طبیعی در سیاره زمین است و منابع آب سطحی به‌عنوان مهم‌ترین نوع منابع آب، دارای کاربردهای فراوانی در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و مصارف شهری است. متأسفانه گاهی فاضلاب و پساب‌های صنعتی در رودخانه‌ها تخلیه می‌شود و به‌دلیل محدودیت توان جذب و خودپالایی رودخانه‌ها، درصورتی‌که روند توسعه و رشد صنایع در یک منطقه بدون سازماندهی و برنامه‌ریزی‌های لازم باشد، در نهایت به عدم تعادل و ناپایداری محیط زیست خواهد انجامید و مشکل‌های جدّی را در رابطه با سلامت انسان و محیط زیست به‌وجود می‌آورد. بنابراین انتقال آلودگی در رودخانه و کنترل آلوده‌کننده‌های آن، از مهم‌ترین مسائل و مشکلات موجود می‌باشد. برای درک بهتر عملکرد محیط زیست و اثرات فعالیت انسان بر روی آن، دانشمندان و مهندسان، چهارچوب‌هایی را برای شرح فرآیندهای زیست‌محیطی به‌کار گرفته و مدل‌های ریاضی مربوط به آن‌ها را بسط داده‌اند. براتی و مظاهری (۱) در مطالعه خود مدل جدید و جامعی را برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده با لحاظ نگهداشت موقت و جذب سینتیک در رودخانه‌ها تحت رژیم جریان غیریکنواخت و غیرماندگار ارائه دادند. در پژوهشی که توسط فکوری و همکاران (۲) انجام شد شبیه‌سازی تغییرات زمانی و مکانی شوری آب برای ۱۰۵ کیلومتر از رودخانه کارون با استفاده از مدل Mike11 انجام شد.

بیان ریاضی انتقال آلودگی در رودخانه به‌وسیله معادله دیفرانسیل جزیی جابه‌جایی- پراکندگی انجام می‌شود. معادله مذکور یک معادله دیفرانسیل جزیی خطی سهموی است که نسبت به زمان و مکان به‌ترتیب مرتبه اول و دوم می‌باشد. پاسخ این معادله درک ما را از نحوه پخش و انتقال آلودگی در محیط مورد مطالعه بهبود بخشیده و محاسبه مقدار غلظت در نقاط مختلف و زمان‌های دلخواه را ممکن می‌سازد.

سرنوشت آلاینده‌ها در رودخانه عمدتاً تحت تأثیر ضریب پراکندگی طولی می‌باشد از طرفی با توجه به شرایط متغیر و پیچیده رودخانه‌ها، این ضریب دارای نوسانات بسیار زیادی است و با کم‌ترین تغییر در شرایط هیدرولیکی و هندسی رودخانه‌ها تغییر می‌کند. بنابراین، بهبود تخمین ضریب پراکندگی طولی می‌تواند مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد. به‌عبارتی ضریب پراکندگی طولی یک عنصر کلیدی در مدل‌سازی انتقال آلاینده در جریان است، که به‌دلیل وابستگی به متغیرهای هیدرولیکی جریان (مانند عمق و سرعت متوسط جریان)، خصوصیات سیال (ویسکوزیته)، انتقال رسوب (مانند تعلیق) و هندسه رودخانه (مانند شکل مقطع عرضی و انحنای مسیر)، عدم قطعیت قابل‌توجهی در برآورد آن وجود دارد (۲۴). برای برآورد دقیق ضریب پراکندگی طولی از مطالعات میدانی و آزمایش‌های ماده ردیاب استفاده می‌شود که با توجه به پیچیدگی‌های اندازه‌گیری و هزینه‌بر و وقت‌گیربودن این آزمایش‌ها (۳)، برخی از پژوهش‌گران مدل‌های تجربی و داده محور را برای تخمین این ضریب در مدل‌سازی کیفیت آب ارائه دادند.

روابط تجربی زیادی به‌منظور برآورد ضریب پراکندگی طولی توسط پژوهش‌گران ارائه شده است. مدل‌های کیفیت آب رودخانه، معمولاً معادله فیشر را برای تعیین ضریب پراکندگی طولی در حل معادله جابه‌جایی- پراکندگی اعمال می‌کنند. رمضانی و همکاران (۱۸) موفق شدند فرمول دقیق‌تری را با استفاده از مدل‌سازی عددی برای تعیین ضریب پراکندگی در رودخانه‌ها معرفی کنند مدل توسعه‌یافته مذکور، با پیونددادن نرم‌افزار متلب به اکسل یک بستر کاربر پسند را برای پژوهشرگران فراهم می‌کند. در پژوهش‌هایی که توسط ساهای (۲۰) صورت گرفت، عرض جریان، عمق جریان، انحنای جریان، سرعت جریان و سرعت برشی به‌عنوان پارامترهای

www.SID.ir

Archive of SID

تأثیرگذار در پیش‌بینی دقیق ضریب پراکندگی طولی معرفی شدند. آنالیز حساسیت و خطا بر روی مدل ارائه شده توسط ساهای نشان داد که انحنای جریان یک ورودی مهم برای پیش‌بینی دقیق ضریب پراکندگی می‌باشد و هرگونه خطا در اندازه‌گیری آن منجر به ایجاد خطای قابل‌توجهی در برآورد ضریب پراکندگی در رودخانه‌های پرپیچ و خم می‌شود، این در حالی است که در بیشتر معادلات ارائه‌شده برای ضریب پراکندگی این پارامتر نادیده گرفته شده است. براساس شاخص‌های حساسیت، کارایی مدل‌های تجربی و داده‌محور در شرایط مختلف با توجه به عدم قطعیت پارامترهای ورودی، متفاوت است. به این شکل که معادله کاشف‌پور و فالکونر (۱۲)، دارای حداقل حساسیت نسبت به عرض کانال است که می‌تواند برای رودخانه‌هایی با تنوع زیاد در عرض و یا عدم قطعیت در اندازه‌گیری این پارامتر استفاده شود. در این حالت، عدم اطمینان در این پارامتر حداقل تأثیر را در برآورد ضریب پراکندگی طولی خواهد داشت و مدل زنگ و هوایی (۲۵) برای شرایط با نوسانات عمق جریان استفاده می‌شود (۱۵). پژوهش‌های گاندلفی و همکاران (۱۰) نشان داد هنگامی‌که تغییرات زمانی غلظت آلاینده ورودی به رودخانه ثابت باشد، نقش پراکندگی در انتقال آلاینده در اغلب موارد ناچیز است. درحالی‌که اگر تغییرات زمانی غلظت آلاینده ورودی به رودخانه متغیر باشد، خطای ناشی از نادیده‌گرفتن پراکندگی به‌شدت وابسته به تغییرات تابع شدت آلاینده ورودی است، به این صورت که اگر تغییرات تابع شدت آلاینده ورودی بالا باشد، ممکن است مهم باشد. امکان نادیده‌گرفتن اثرات پراکندگی هیدرودینامیکی، پیامدهای مهمی هم از نظر ساده‌سازی‌های محاسباتی و تحلیلی و هم از نظر نیاز داده برای واسنجی مدل دارد (۷). دامن (۲۳) نتایجی را در رابطه با آنالیز نقش پراکندگی طولی در مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها، براساس پاسخ فرکانسی انجام داد. به‌طورکلی نتایج نشان داد در جریان‌ها و رودخانه‌های کوهستانی زمانی‌که بار آلودگی ورودی متغیر با زمان، با دوره تناوب هفت روز یا کم‌تر باشد، مقادیر کم پراکندگی ممکن است حائز اهمیت باشد. محاسبات زنگ و هوایی (۲۵) نشان می‌دهد که در بیشتر معادلات ارائه‌شده برای ضریب پراکندگی، در شرایطی که نسبت عرض به عمق جریان بین ۲۰ تا ۱۰۰ متغیر باشد، که در اکثر رودخانه‌های طبیعی نیز چنین است، پراکندگی طولی ناچیز نشان داده می‌شود. در پژوهشی که دابین (۸) بر روی رابطه بین اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی و اکسیژن، در جریان انجام داد، شرایطی که تحت آن پراکندگی می‌تواند نادیده گرفته شود را تعریف کرد و این موضوع بعدها توسط رادون (۱۹) تأیید شد. بنابراین این واقعیت که اگر شار ورودی ثابت باشد پراکندگی ناچیز است، نمی‌تواند ناچیزبودن پراکندگی را تحت شرایطی که شار ورودی متغیر با زمان است تضمین کند، لذا در این شرایط پراکندگی ممکن است اهمیت بیش‌تری داشته باشد. لی (۱۴) اثرات پراکندگی بر روی منحنی کاهشی اکسیژن محلول در جریان یکنواخت را بررسی کرد. پژوهش‌های او نشان داد پراکندگی اثرات کمی بر روی منحنی کاهشی اکسیژن محلول ثابت دارد. نتایج به‌دست‌آمده توسط پژوهش‌گران مختلف در رابطه با اهمیت ضریب پراکندگی اندکی با هم متفاوت است. دامن (۲۳) بیان می‌کند که اثر پراکندگی هیدرودینامیکی به‌طورکلی در هر دو محل ورود آلاینده و در پایین‌دست آن قابل‌توجه است. درحالی‌که، لی (۱۴) و سانچنی‌سسا و همکاران (۲۲) بر این باورند که در بعضی شرایط انتقال آلودگی از محل ورود آلاینده به بالادست آن و تأثیر پدیده پراکندگی پایین‌دست، می‌تواند نادیده گرفته شود.

با توجه به پژوهش‌هایی که در زمینه ضریب پراکندگی

www.SID.ir

Archive of SID

ارائه شده است، بیش‌تر پژوهش‌گران بر روی روش‌های برآورد این ضریب کار کرده‌اند و تاکنون به‌صورت دقیق به اهمیت زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی در شبیه‌سازی انتقال آلاینده در رودخانه‌ها و میزان تأثیر آن بر دقت نتایج محاسبات توزیع غلظت پرداخته نشده است و تنها چند پژوهش پراکنده که به برخی از آن‌ها اشاره شد، در این زمینه انجام شده است، که این پژوهش‌ها نیز برای الگوهای خاصی از آلاینده مشخص ارائه شده است و نتایج یکپارچه و مشخصی را در این رابطه ارائه نداده‌اند. بنابراین این موضوع که اهمیت ضریب پراکندگی طولی در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف رودخانه چقدر است و در شبیه‌سازی‌ها چگونه باید در نظر گرفته شود، بسیار حائز اهمیت است که تاکنون به‌صورت دقیق به آن پرداخته نشده است.

به‌دلیل برقراری جریان غیریکنواخت و غیرماندگار در رودخانه‌ها و با توجه به وابسته‌بودن ضریب پراکندگی طولی به متغیرهای هیدرولیکی و هندسی رودخانه‌ها، محاسبه ضریب پراکندگی طولی تحت چنین شرایطی دشوار و تقریباً غیرممکن است. لذا هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک روش تحلیلی است که شرایطی که تحت آن پراکندگی می‌تواند نادیده گرفته شود را بیان کند. در واقع با ارائه این روشِ تحلیلی می‌توان تأثیر پدیده پراکندگی در انتقال آلاینده در رودخانه‌ها را تحت شرایط غیریکنواخت و غیرماندگار بررسی کرده و حساسیت مدل‌های انتقال آلاینده در بازه‌های مختلف زمانی و مکانی رودخانه را به مقدار ضریب پراکندگی طولی نشان داد. از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، ارائه یک روش کاربردی به کاربر است که با توجه به الگوهای زمانی آلاینده ورودی، زمان‌ها و مکان‌هایی که حساسیت مدل به مقدار ضریب پراکندگی طولی زیاد است به‌صورت دقیق شناسایی شوند. براساس چنین اطلاعاتی گام مهمی در زمینه ساده‌سازی محاسبات شبیه‌سازی انتقال آلودگی در رودخانه‌ها برداشته خواهد شد. چرا که با شناسایی بازه‌های زمانی و مکانی حساس به مقدار ضریب پراکندگی طولی، می‌توان در سایر بازه‌ها با قراردادن مقادیر متوسطی از ضریب پراکندگی طولی که از روابط ارائه شده موجود اتخاذ می‌شود، از محاسبه دقیق این ضریب صرف‌نظر کرد.

مواد و روش‌ها

ضریب پراکندگی طولی یکی از پارامترهای مهم در مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها در رودخانه‌ها می‌باشد. معادله حاکم بر انتقال آلاینده در رودخانه‌ها در حالت یک‌بعدی در راستای محور طول، برای جریان غیریکنواخت و غیرماندگار معادله جابه‌جایی- پراکندگی نام دارد و به شکل معادله (۱) نوشته می‌شود. که یک معادله دیفرانسیل جزیی مرتبه دوم، یک‌بعدی، خطی، غیرهمگن و سهموی است (۴).

$$\frac{\partial(Ac)}{\partial t} = -\frac{\partial(Qc)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(AD\frac{\partial c}{\partial x}\right) - KAc + As \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، Q دبی جریان (به‌صورت تابعی از زمان و مکان تعریف می‌شود $Q = Q(x,t)$)، A سطح مقطع جریان (به‌صورت تابعی از زمان و مکان تعریف می‌شود $A = A(x,t)$)، C غلظت آلاینده (به‌صورت تابعی از زمان و مکان تعریف می‌شود $C = C(x,t)$)، x فاصله نقطه‌ای در پایین‌دست رودخانه از محل ورود آلاینده، t زمان، D ضریب پراکندگی طولی (به‌صورت تابعی از زمان و مکان تعریف می‌شود $D = D(x,t)$)، K ضریب زوال آلاینده و S ترم منبع می‌باشد.

در معادله (۱) سطح مقطع جریان، دبی، سرعت، ضریب زوال آلاینده و ضریب پراکندگی طولی پارامترهای جریان در معادله جابه‌جایی- پراکندگی هستند. این پارامترها نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کنند و با توجه

www.SID.ir

Archive of SID

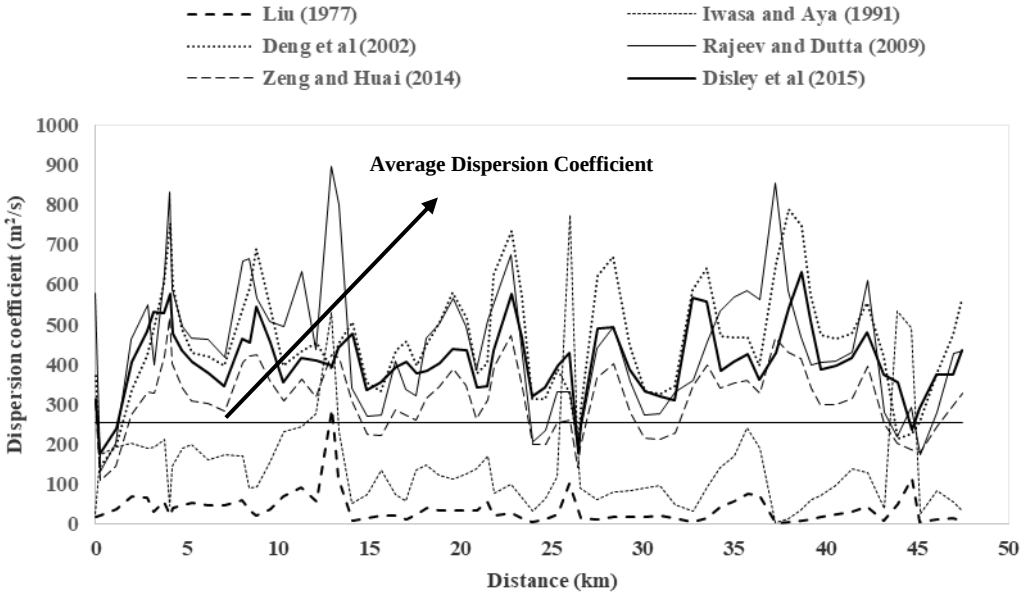
به وابستگی ضریب پراکندگی طولی به پارامترهای جریان، بنابراین ضریب پراکندگی طولی نیز تابعی از زمان و مکان خواهد بود. شکل (۱) تغییرات زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی به‌دست‌آمده از روابط ارائه‌شده نسبت به مقدار متوسط آن را برای رودخانه کارون نشان می‌دهد. همان‌طورکه قبلاً بیان شد برآورد ضریب پراکندگی طولی تحت شرایط غیریکنواخت و غیرماندگار رودخانه‌ها بسیار سخت و تقریباً غیرممکن است. از طرفی با توجه به شکل (۱) روابط ارائه‌شده مختلف نیز، زمانی که برای یک رودخانه مشخص تحت یک شرایط هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرند، پیش‌بینی‌های متفاوتی را در رابطه با مقدار ضریب پراکندگی طولی در زمان‌ها و مکان‌های مختلف از رودخانه ارائه می‌دهند، لذا هیچ‌کدام از دقت قابل‌قبولی برخوردار نمی‌باشند. لازم به ذکر است که تمامی این روابط براساس پارامترهای متوسط جریان بوده و خروجی آن‌ها نیز ضریب پراکندگی طولی متوسط می‌باشد.

اهمیت ضریب پراکندگی طولی در شار پراکندگی نمود پیدا می‌کند. شار انتقال‌یافته در اثر فرآیند پراکندگی با استفاده از قانون اول فیک به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (۹):

$$J_{disp} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه: J_{disp} شار انتقال‌یافته در اثر پدیده پراکندگی می‌باشد.

همان‌طورکه متعاقباً ذکر شد محاسبه ضریب پراکندگی طولی تحت شرایط غیریکنواخت و غیرماندگار سخت و تقریباً غیرممکن است. لذا با توجه به رابطه (۲) یک فاکتور مؤثر در پدیده پراکندگی، گرادیان غلظت می‌باشد. در واقع در روش ارائه‌شده در این پژوهش، اهمیت شار پراکندگی با استفاده از گرادیان غلظت سنجیده می‌شود. از طرفی با توجه به این‌که مهم‌ترین عامل مؤثر بر گرادیان غلظت الگوی آلاینده ورودی و الگوی مکانی و زمانی جریان می‌باشد، بنابراین جهت بررسی اهمیت ضریب پراکندگی طولی در نتایج محاسبات توزیع غلظت در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف رودخانه‌ها، بایستی به تغییرات زمانی الگوی آلاینده ورودی توجه کرد.



شکل ۱. دامنه تغییرات مقادیر ضریب پراکندگی به‌دست‌آمده از روابط مختلف، نسبت به مقدار متوسط این ضریب

www.SID.ir

Archive of SID

به‌منظور بررسی اهمیت ضریب پراکندگی طولی، لازم است معادله جابه‌جایی- پراکندگی با ضرایب متغیر حول یک مقدار میانگین، به معادله جابه‌جایی- پراکندگی با ضرایب ثابت تبدیل شود. ضرایب معادله در حالت ثابت، میانگین این ضرایب در حالت متغیر در نظر گرفته شده است. به‌منظور تعیین ضریب پراکندگی طولی میانگین، از روابط ارائه شده توسط پژوهش‌گران استفاده شده است. از طرف دیگر سطح مقطع و دبی رودخانه با استفاده از مدل جریان و حل معادلات سنت‌ونانت به‌دست می‌آید. با انجام این کار می‌توان تغییرات زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی را نسبت به مقدار میانگین آن سنجید. در واقع با در نظرگرفتن شرایط ساده‌کننده، مانند جریان یکنواخت و ماندگار و ضریب پراکندگی ثابت، معادله جابه‌جایی- پراکندگی به شکل رابطه (۳) تغییر خواهد کرد.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U\frac{\partial c}{\partial x} + D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc + s \qquad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه: U متوسط سرعت جریان و سایر پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

حل تحلیلی رابطه (۳) تحت شرایط مرزی و اولیه زیر و با درنظرگرفتن ضرایب ثابت (سرعت، سطح مقطع و ضریب پراکندگی)، ترم منبع دلخواه و با توجه به الگوی تغییرات زمانی غلظت ورودی به رودخانه، به‌صورت رابطه (۴) می‌باشد (۱۶).

شرط اولیه: $t = 0$

شرط مرزی: $x = 0$

$$c(x,t) = \int_0^\infty f(\xi)G(x,\xi,t)d\xi + D\int_0^t g(\tau)\Lambda(x,t-\tau)d\tau + \int_0^t\int_0^\infty s(\xi,\tau)G(x,\xi,t-\tau)d\xi d\tau \qquad \text{رابطه (۴)}$$

$$G(x,\xi,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}}\exp\left[\frac{-U(\xi-x)}{2D} + \left(-k - \frac{U^2}{4D}\right)t\right]\left\{\exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}\right] - \exp\left[-\frac{(x+\xi)^2}{4Dt}\right]\right\} \qquad \text{رابطه (۵)}$$

$$\Lambda(x,t) = \frac{\partial}{\partial\xi}G(x,\xi,t)\Big|_{\xi=0} \qquad \text{رابطه (۶)}$$

در روابط (۴)، (۵) و (۶)، ξ و τ متغیرهای انتگرال‌گیری، $f(x)$ شرط اولیه و $g(t)$ شرط مرزی مسئله می‌باشد. لازم به ذکر است رابطه (۴) با استفاده از روش تابع گرین استخراج شده است.

رابطه (۴) غلظت آلاینده در هر زمان و مکان را به‌دست می‌دهد. اساس راه‌حل تحلیلی ارائه‌شده در این پژوهش یافتن بازه‌هایی از زمان و مکان است که حساسیت مدل به مقدار ضریب پراکندگی طولی در این بازه‌ها کم است. لذا یک راه مطمئن که به‌منظور بررسی میزان حساسیت مدل‌های انتقال آلاینده در بازه‌های مختلف زمانی و مکانی رودخانه به مقدار ضریب پراکندگی وجود دارد، محاسبه مشتق جزیی غلظت نسبت به ضریب پراکندگی طولی می‌باشد. در واقع به‌کمک این روش می‌توان تأثیر ضریب پراکندگی طولی در توزیع غلظت در رودخانه‌ها را در شرایط غیریکنواخت و غیرماندگار تعیین کرد.

با توجه به رابطه (۷)، مشتق غلظت نسبت به ضریب پراکندگی تابعی از زمان، مکان، سرعت متوسط جریان، ضریب پراکندگی طولی و ضریب زوال می‌باشد. که با قراردادن مقادیر متوسط پارامترهای ذکرشده در این رابطه

www.SID.ir

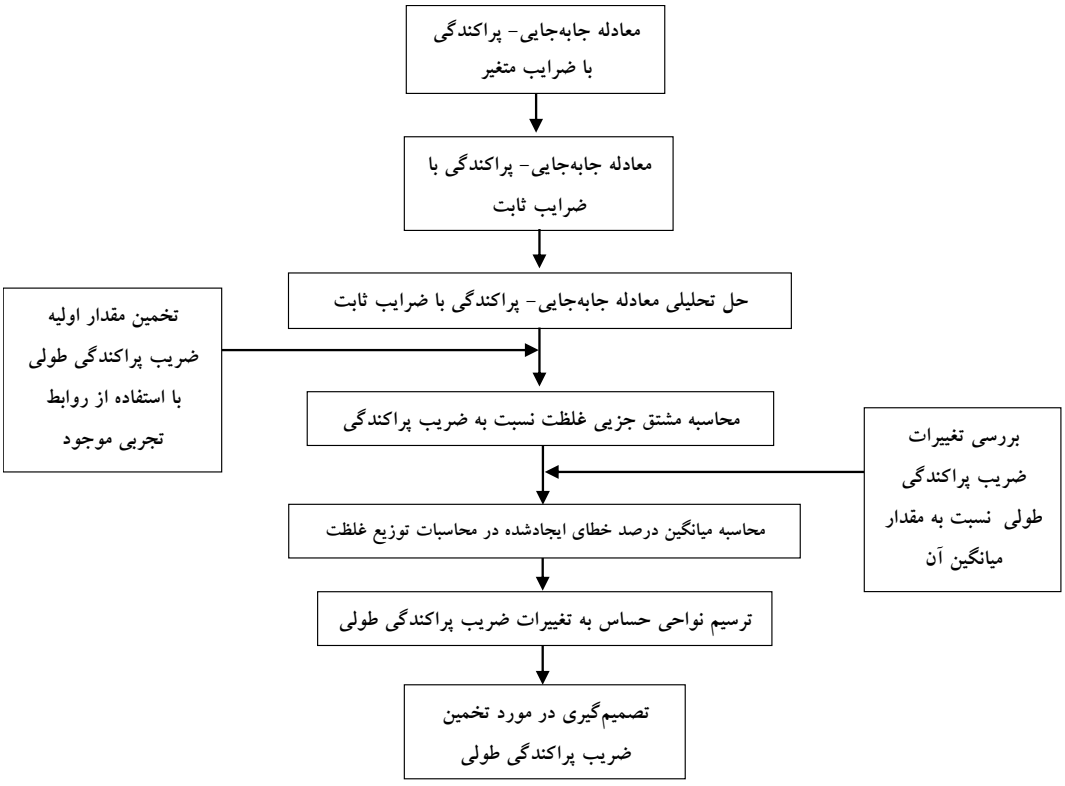
Archive of SID

و با درنظرگرفتن مقادیر موردنیاز مشتق غلظت نسبت به ضریب پراکندگی که بیانگر حساسیت غلظت نسبت به ضریب پراکندگی می‌باشد، می‌توان در صفحه مکان- زمان (x-t)، محدوده حساسیت غلظت نسبت به ضریب پراکندگی را تعیین کرد و دامنه تغییرات ضریب پراکندگی نسبت به مقدار متوسط آن را به‌دست آورد.

رابطه (۷)
$$\frac{\partial c}{\partial D}=\int_0^L f(\xi)\frac{\partial G(x,\xi,t)}{\partial D}d_\xi+\int_0^t g(\tau)\Lambda(x,t-\tau)d_\tau+D\int_0^t g(\tau)\frac{\partial \Lambda(x,t-\tau)}{\partial D}d_\tau$$

در این پژوهش با تبدیل معادله جابه‌جایی- پراکندگی از ضرایب متغیر به ضرایب ثابت و با استفاده از حل تحلیلی معادله جابه‌جایی-پراکندگی (رابطه ۴)، معادله مشتق جزیی غلظت نسبت به ضریب پراکندگی (رابطه ۷) استخراج می‌شود. در این مرحله با تخمین مقدار اولیه برای ضریب پراکندگی طولی و هم‌چنین اعمال درصد خطاهای مختلف بر روی آن، تأثیر تغییرات ضریب پراکندگی بر روی محاسبات توزیع، غلظت محاسبه شده و براساس نتایج حاصل از آن می‌توان اهمیت زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی در رودخانه‌ها را تحت شرایط غیریکنواخت و غیرماندگار بررسی کرد. با تعیین اهمیت زمانی و مکانی ضریب پراکندگی و تعریف ضریب پراکندگی دینامیک، کاربر بهتر می‌تواند در مورد تخمین ضریب پراکندگی طولی تصمیم‌گیری کند.

مراحل روش تحلیلی ارائه‌شده در این پژوهش در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲. فلوچارت روش تحلیلی ارائه‌شده به‌منظور تعیین اهمیت زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی در انتقال آلاینده در رودخانه‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج و بحث

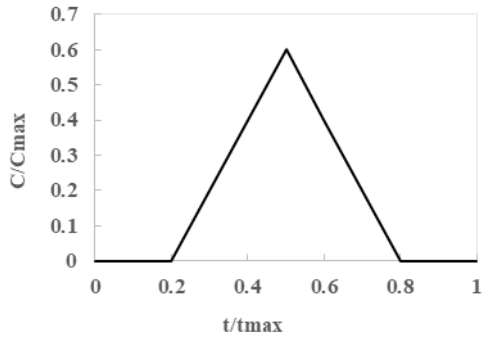
به‌منظور صحت‌سنجی روش ارائه‌شده در این پژوهش، یک مثال فرضی طراحی می‌شود و مدل ارائه‌شده برای این مثال فرضی تحت دو سناریوی مختلف شامل تغییرات و نوسانات زمانی زیاد غلظت آلاینده ورودی و تغییرات و نوسانات زمانی کم غلظت آلاینده ورودی اجرا شده و نتایج حاصل از آن بررسی می‌شود. هدف اصلی از طراحی این مثال در دو سناریوی فوق بررسی اهمیت ضریب پراکندگی طولی در انتقال آلاینده در رودخانه‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف و هم‌چنین تأثیر الگوی آلاینده ورودی بر اهمیت زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی می‌باشد. مدل ارائه‌شده هم‌چنین با استفاده از یک رودخانه واقعی (رودخانه کارون) با تابع شدت آلاینده ورودی فرضی و واقعی مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. هدف از اجرای مدل برای رودخانه کارون، نشان دادن کاربرد مدل ارائه‌شده در عمل است. ویژگی‌های هیدرولیکی و سایر پارامترهای مورداستفاده برای شبیه‌سازی مثال فرضی و مثال واقعی به‌کار گرفته شده در جدول (۱) آورده شده است.

صحت‌سنجی مدل ارائه‌شده با استفاده از مثال فرضی

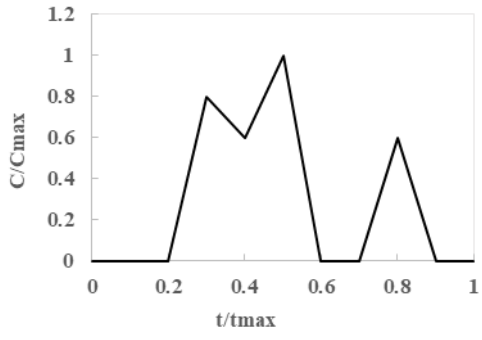
الگوی تغییرات غلظت آلاینده ورودی در مثال فرضی مطرح‌شده تحت شرایط تغییرات و نوسانات زمانی کم غلظت آلاینده ورودی، و هم‌چنین تغییرات و نوسانات زمانی زیاد غلظت آلاینده ورودی به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است. الگوی بارگذاری آلاینده ورودی به‌صورت نامنظم و در طول بازه زمانی ۱۰ ساعت وارد رودخانه شده است. طول گام مکانی محاسبات ۱۰۰ متر و طول گام زمانی ۱۰ دقیقه می‌باشد.

جدول ۱. ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی مثال‌های به‌کارگرفته‌شده برای صحت‌سنجی مدل

مثال	نوع صحت‌سنجی	سناریو	کل زمان شبیه‌سازی (h)	طول رودخانه (km)	سرعت (m/s)	ضریب پراکندگی (m^2/s)	ضریب زوال (1/s)
اول	مثال فرضی	اول دوم	۱۰	۱۵	۰/۵	۲۰	۰
دوم	مثال واقعی	اول دوم	۱۰ ۱۲ ماه سال ۱۳۸۸	۵۰	۰/۵۰۹	۲۵۴	۰



شکل ۳. الگوی غلظت آلاینده ورودی به رودخانه فرضی در سناریوی اول



شکل ۴. الگوی غلظت آلاینده ورودی به رودخانه فرضی در سناریوی دوم

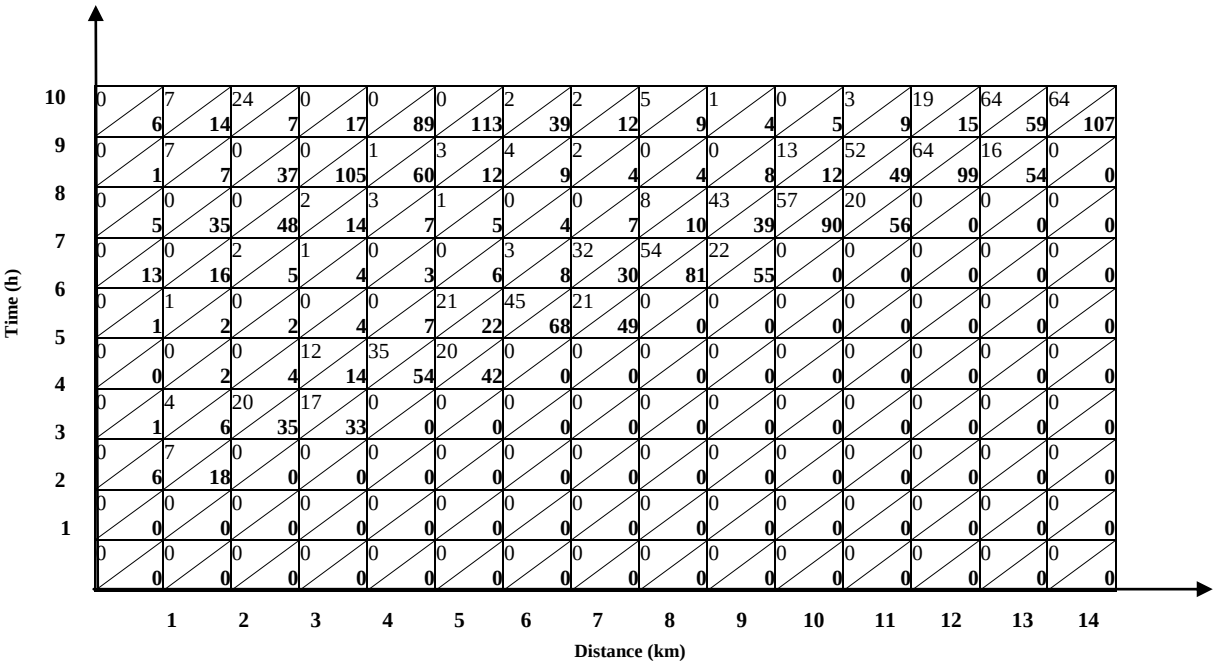
www.SID.ir

Archive of SID

با اجرای مدل ارائه‌شده، نتایج میانگین درصد خطای ایجادشده در غلظت آلاینده رودخانه فرضی تحت شرایط دو سناریوی فوق، در اثر اعمال ۱۰۰ درصد خطا در ضریب پراکندگی طولی با ایجاد شبکه‌ای با فاصله زمانی ۱ ساعت و فاصله مکانی ۱۰۰۰ متر در نمودار شکل (۵) آورده شده است. اعداد سمت چپ مربوط به سناریوی اول یعنی تغییرات و نوسانات کم غلظت آلاینده ورودی و اعداد سمت راست که به‌صورت پررنگ‌تر نیز می‌باشند مربوط به سناریوی دوم یعنی تغییرات و نوسانات زیاد غلظت آلاینده ورودی می‌باشد.

نتایج ارائه‌شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که میانگین درصد خطای ایجادشده در غلظت در شرایط سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، در اکثر بازه‌ها بیش‌تر می‌باشد. در واقع به‌دلیل تغییرات و نوسانات الگوی آلاینده ورودی نسبت به زمان، اهمیت ضریب پراکندگی طولی در مکان‌ها و زمان‌های مختلف رودخانه متفاوت است. از طرفی با وجود این‌که در سناریوی دوم تغییرات زمانی غلظت آلاینده ورودی زیاد است، با این حال تنها در برخی از بازه‌های زمانی و مکانی درصد خطای ایجادشده در غلظت بالا بوده و در بیش‌تر مناطق رودخانه، خطای ایجادشده تقریباً ناچیز و در بیش‌تر آن‌ها صفر می‌باشد و این نیز به معنی حساسیت پایین مدل به مقدار ضریب پراکندگی طولی می‌باشد.

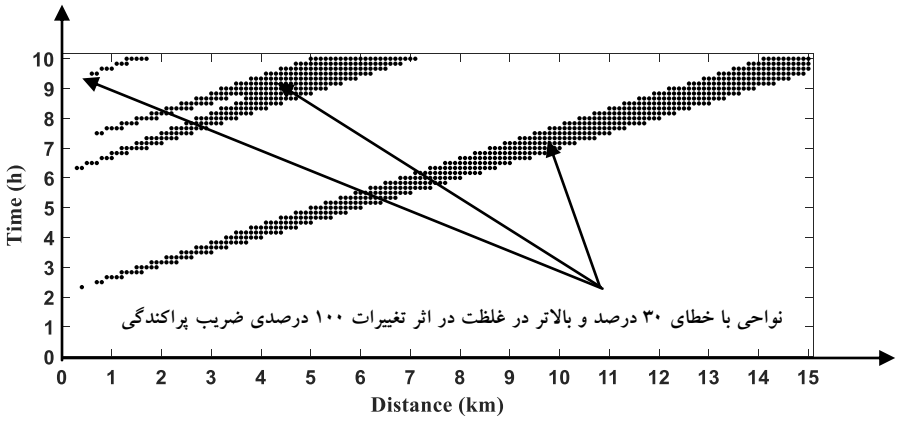
در شکل (۶) نواحی حساس به پارامتر ضریب پراکندگی طولی تحت سناریوی دوم با هاشور مشخص شده است. در این نواحی با اعمال ۱۰۰ درصد خطا در ضریب پراکندگی، مقدار ۳۰ درصد و بالاتر، خطا در برآورد توزیع غلظت ایجاد خواهد شد. هم‌چنین نواحی سفید نشان‌دهنده خطای کم‌تر از ۳۰ درصد در برآورد توزیع غلظت می‌باشد.



شکل ۵. میانگین درصد خطای ایجادشده در غلظت آلاینده تحت دو سناریو مختلف در اثر اعمال ۱۰۰ درصد خطا در ضریب پراکندگی

www.SID.ir

Archive of SID



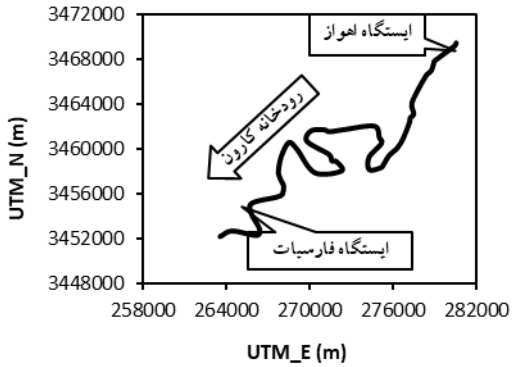
شکل ۶. نواحی حساس به تغییرات ضریب پراکندگی طولی مثال فرضی تحت شرایط سناریوی دوم در اثر تغییرات ۱۰۰ درصدی ضریب پراکندگی

همان‌طورکه در شکل (۶) مشاهده می‌شود با اعمال خطای ۱۰۰ درصدی در ضریب پراکندگی طولی در بیش تر بازه‌های زمانی و مکانی رودخانه خطایی کم‌تر از ۳۰ درصد در محاسبات توزیع غلظت ایجاد می‌شود و این بدان معناست که در این بازه‌ها تأثیر ضریب پراکندگی طولی بر نتایج محاسبات توزیع غلظت کم بوده و ضریب پراکندگی طولی اهمیت چندانی ندارد. از موارد کاربردی این روش تعیین اهمیت زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی در انتقال آلاینده در رودخانه‌ها می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل ارائه‌شده با استفاده از داده‌های واقعی

به‌منظور ارزیابی مدل ارائه‌شده با استفاده از داده‌های واقعی، بازه‌ای به طول ۵۰ کیلومتر از رودخانه کارون که در حد فاصل ایستگاه‌های آب‌سنجی اهواز و فارسیاب قرار دارد، در نظر گرفته شده است. شکل (۷) نمای کلی از منطقه مورد بررسی در رودخانه کارون را نشان می‌دهد.

در این مرحله مدل ارائه‌شده برای بازه مشخص از رودخانه کارون با تابع شدت آلاینده ورودی فرضی و واقعی آنالیز شده است. کل مدت زمان شبیه‌سازی در شرایط مرزی فرضی ۱۰ ساعت، گام زمانی محاسبات ۱۰ دقیقه و گام مکانی ۳۰۰ متر می‌باشد. هم‌چنین در شرایط مرزی واقعی شبیه‌سازی برای ۱۲ ماه سال ۱۳۸۸ انجام شده است و طول گام زمانی و مکانی محاسبات به‌ترتیب ۱۰ ساعت و ۳۰۰ متر درنظر گرفته شده است.



شکل ۷. نمای کلی از منطقه مورد بررسی در رودخانه کارون

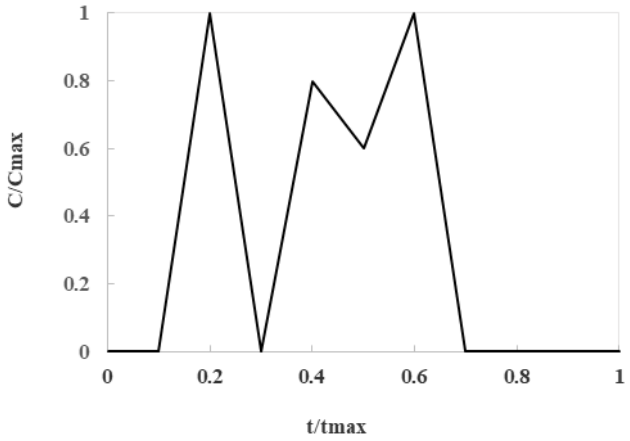
با توجه به شرایط جریان غیریکنواخت و غیرماندگار رودخانه‌ها و به‌دلیل وابستگی ضریب پراکندگی طولی به متغیرهای هیدرولیکی و هندسی رودخانه، همان‌طورکه قبلاً اشاره شد ضریب پراکندگی طولی بسیار حساس و متغیر می‌باشد. لذا با کم‌ترین تغییر در شرایط هیدرولیکی

www.SID.ir

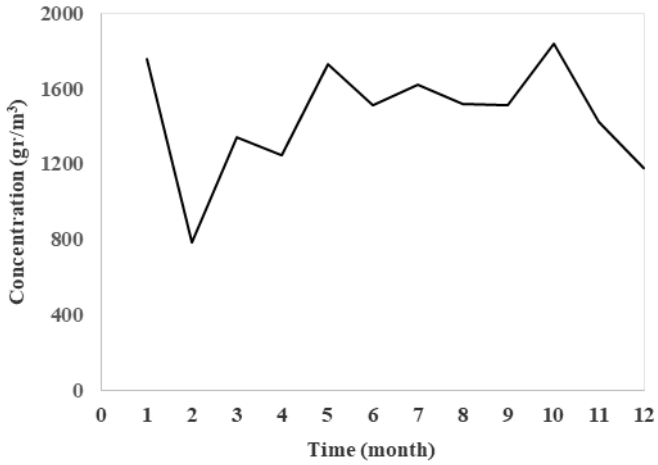
Archive of SID

و هندسی رودخانه‌ها تغییر می‌کند. در این پژوهش به‌منظور محاسبه ضریب پراکندگی متوسط از روابط ارائه شده توسط پژوهش‌گران استفاده شده است، چرا که هدف از ارائه این مدل، آنالیز حساسیت غلظت به تغییرات ضریب پراکندگی نسبت به مقدار متوسط آن می‌باشد.

نتایج حاصل از اجرای مدل ارائه شده، برای بازه مورد نظر از رودخانه کارون تحت شرایط الگوی آلاینده فرضی در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) آورده شده است. شکل (۱۰) میانگین درصد خطای ایجاد شده در غلظت آلاینده را در اثر اعمال خطای ۱۰۰ درصدی ضریب پراکندگی نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل (۱۲) نواحی حساس به مقادیر ضریب پراکندگی طولی با هاشور مشخص شده است. در این نواحی تغییرات ۱۰۰ درصدی ضریب پراکندگی خطای ۳۰ درصد و بالاتر را در محاسبات توزیع غلظت وارد می‌کند. هدف از اجرای مدل تحت شرایط فوق، بررسی این موضوع است که اگر ضریب پراکندگی تا دامنه ۱۰۰ درصد خطا نیز محاسبه شود، به چه میزان خطا در محاسبات توزیع غلظت وارد می‌شود.



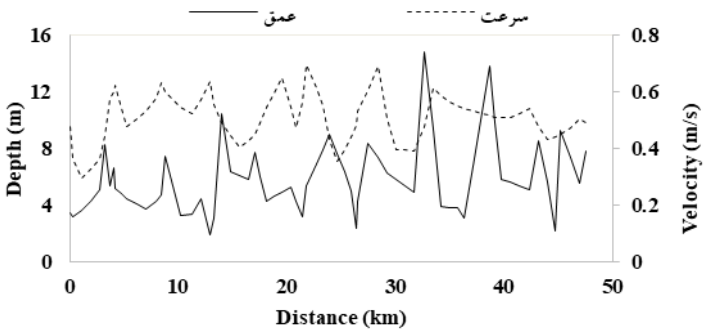
شکل ۸. الگوی فرضی غلظت آلاینده ورودی به رودخانه کارون



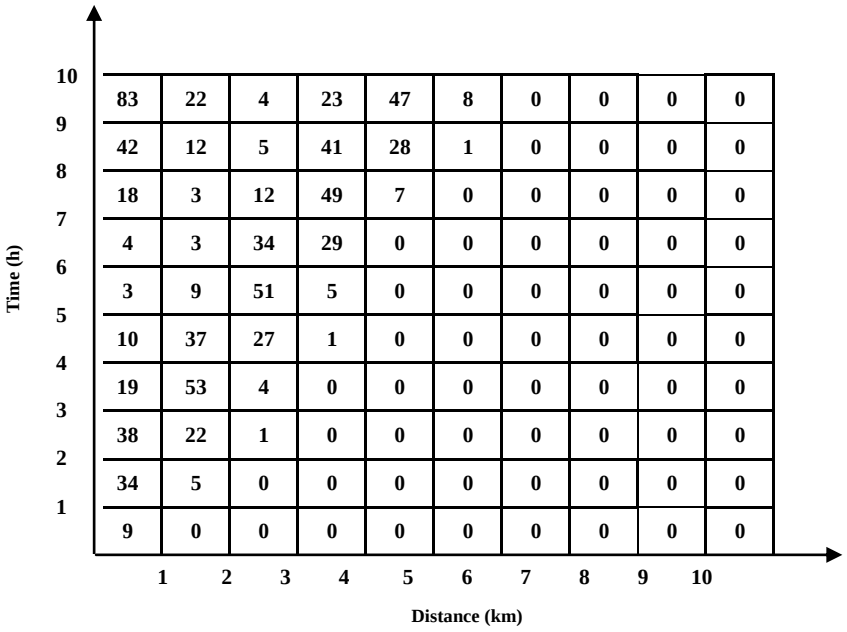
شکل ۹. الگوی واقعی غلظت آلاینده ورودی به رودخانه کارون

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰. تغییرات سرعت جریان و عمق جریان در طول بازه مورد بررسی در رودخانه کارون



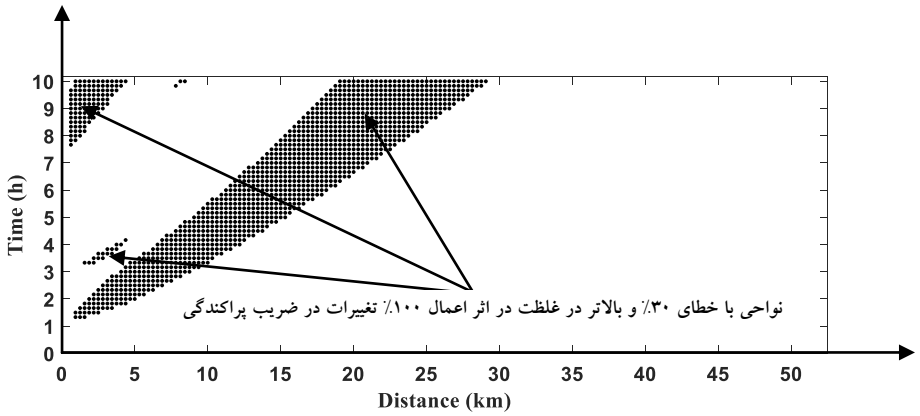
شکل ۱۱. میانگین درصد خطای ایجاد شده در غلظت آلاینده رودخانه کارون تحت شرایط مرزی فرضی در اثر تغییرات ۱۰۰ درصدی ضریب پراکندگی

همان‌طورکه در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود برای بازه مورد بررسی از رودخانه کارون، می‌توان گفت اهمیت ضریب پراکندگی طولی تنها در ۳۰ کیلومتری ابتدایی و در برخی از بازه‌های زمانی اهمیت داشته و به‌نظر می‌رسد با توسعه زمان شبیه‌سازی، نواحی با خطای ۳۰ درصد به بالا به پایین‌دست منتقل می‌شود.

در تحقیق حاضر، مطابق شکل (۷) با توجه به الگوی آلاینده ورودی به رودخانه کارون در سال ۱۳۸۸، شبیه‌سازی برای ۱۲ ماه و برای طول ۵۰ کیلومتری مشخص از رودخانه کارون انجام شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل تحت شرایط فوق نشان می‌دهد که در اثر اعمال ۱۰۰ درصدی خطا در ضریب پراکندگی طولی بیش‌ترین درصد خطایی که در برآورد توزیع غلظت آلاینده در این رودخانه ایجاد می‌شود تنها ۴/۸ درصد است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲. نواحی حساس نسبت به تغییرات ضریب پراکندگی طولی رودخانه کارون تحت شرایط غلظت آلاینده ورودی فرضی

بنابراین با توجه به شرایط پیچیده رودخانه‌ها و حساسیت بالای ضریب پراکندگی طولی نسبت به متغیرهای هیدرولیکی و هندسی، می‌توان در بازه مذکور از رودخانه کارون از برآورد دقیق ضریب پراکندگی طولی صرف‌نظر کرده و جهت تخمین آن از فرمول‌های ارائه‌شده موجود استفاده کرد. مدل تحلیلی ارائه‌شده در پژوهش حاضر می‌تواند به‌صورت جامع برای تمامی رودخانه‌ها به‌کار برده شود. در این مدل براساس الگوی زمانی غلظت آلاینده ورودی مشخص به رودخانه، اهمیت ضریب پراکندگی طولی در انتقال آلاینده در رودخانه‌ها در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف بررسی شده و در نهایت با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان در رابطه با تخمین مقدار ضریب پراکندگی طولی در معادلات شبیه‌سازی انتقال آلودگی تصمیم گرفت. به این صورت که در بازه‌های زمانی و مکانی که حساسیت مدل به مقدار ضریب پراکندگی طولی کم است کاربر می‌تواند با استفاده از روابط ارائه شده موجود توسط پژوهش‌گران، ضریب پراکندگی را تخمین زده و جهت مدل‌سازی انتشار آلاینده به‌کار گیرد. در این‌صورت گام مهمی در زمینه ساده‌سازی محاسبات شبیه‌سازی انتقال آلودگی در رودخانه‌ها برداشته خواهد شد. از طرفی چنان‌چه در بازه‌های زمانی و مکانی حساس به تغییرات ضریب پراکندگی طولی، این ضریب به‌صورت دقیق محاسبه نشود خطای قابل‌توجهی را در محاسبات توزیع غلظت ایجاد می‌کند. نتایج این پژوهش می تواند دقت مدل‌های شبیه‌سازی انتشار آلودگی را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد.

نتیجه‌گیری

سرنوشت آلاینده‌ها در رودخانه عمدتاً تحت تأثیر ضریب پراکندگی طولی است. همان‌طورکه قبلاً اشاره شد این ضریب وابسته به متغیرهای هیدرولیکی جریان و هندسه رودخانه می‌باشد و به‌دلیل متغیربودن این پارامترها نسبت به زمان و مکان، ضریب پراکندگی طولی نیز تابعی از زمان و مکان بوده و دارای نوسانات بسیار زیادی است. همان طورکه در فرمول شار پراکندگی دیده می‌شود با توجه به عدم قطعیتی که در برآورد ضریب پراکندگی طولی وجود دارد، یک فاکتور مؤثر در پدیده پراکندگی گرادیان غلظت می‌باشد. از طرفی گرادیان غلظت نیز تابعی از الگوی آلاینده ورودی است و به‌دلیل تغییرات و نوسانات الگوی آلاینده ورودی اهمیت ضریب پراکندگی طولی در انتقال آلاینده‌ها در رودخانه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متفاوت است. نتایج حاصل از این پژوهش بیان‌گر این

www.SID.ir

Archive of SID

واقعیت است که ضریب پراکندگی طولی تنها در برخی از بازه‌های زمانی و مکانی اهمیت داشته و در نواحی گسترده‌ای از رودخانه اهمیت ضریب پراکندگی طولی در مدل‌سازی انتقال آلودگی ناچیز می‌باشد. لذا در چنین مناطقی با توجه به این‌که خطای ناشی از عدم محاسبه دقیق ضریب پراکندگی طولی در برآورد توزیع غلظت آلاینده ناچیز بوده و تخمین این ضریب با خطای بالا اثر چندانی ندارد، بنابراین می‌توان از روابط تجربی برای محاسبه آن استفاده کرد و میانگینی از اعداد به‌دست‌آمده از روابط مختلف را در نظر گرفت. با ارائه این روش تحلیلی، تأثیر پدیده پراکندگی در انتقال آلاینده در رودخانه‌ها تحت شرایط جریان غیریکنواخت و غیرماندگار بررسی شده و می‌توان به‌صورت دقیق بیان کرد که در چه زمان‌ها و مکان‌هایی باید ضریب پراکندگی طولی به‌صورت دقیق محاسبه شود و در چه زمان‌ها و مکان‌هایی می‌توان از محاسبه دقیق آن صرف‌نظر کرد. از محدودیت‌های مدل فوق می‌توان به یک‌بعدی بودن جریان اشاره کرد. هم‌چنین این مدل نیاز به یک تخمین اولیه برای ضریب پراکندگی طولی دارد که می‌توان از روابط تجربی موجود برای برآورد آن استفاده کرد و میانگینی از اعداد به‌دست‌آمده از روابط مختلف را در نظر گرفت. در واقع با انجام این کار می‌توان تغییرات زمانی و مکانی ضریب پراکندگی طولی را نسبت به مقدار میانگین آن سنجید. استفاده از مدل پیش رو، گام مهمی در ساده‌سازی محاسبات شبیه‌سازی انتقال آلودگی برداشته می‌شود، چرا که با استفاده از نتایج حاصل از مدل ارائه‌شده، اهمیت ضریب پراکندگی در بازه‌های مختلف زمانی و مکانی رودخانه‌ها به‌صورت دقیق مشخص شده و با داشتن چنین اطلاعاتی می‌توان در رابطه با تخمین مقدار ضریب پراکندگی به‌صورت جزئی در بازه زمانی و مکانی مشخص با توجه به الگوی آلاینده ورودی تصمیم گرفت.

منابع

۱. براتی، م. و مظاهری، م. (۱۳۹۴). مدل یک‌بعدی انتقال آلاینده در رودخانه‌های طبیعی با تأکید بر نواحی نگهداشت. مدیریت آب و آبیاری. ۵ (۲): ۱۶۹-۱۹۰.

۲. فکوری دکاهی، ب.، محمد ولی سامانی، ج. و مظاهری، م. (۱۳۹۵). اثر سیلاب‌ها و مدیریت منابع آلاینده بر تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه کارون (ملاثانی تا فارسیاب). مدیریت آب و آبیاری. ۶ (۲): ۲۹۵-۳۱۴.

3. Atkinson TC and Davis PM (2000) Longitudinal dispersion in natural channels: 1. Experimental results from the River Severn, UK. *Hydrol Earth Syst Sc* 4(3): 345-353.
4. Chapra SC and Runkel RL (1999) Modeling impact of storage zones on stream dissolved oxygen. *Environmental Engineering* 125(5): 415-419.
5. Deng ZQ, Bengtsson L, Singh VP and Adrian DD (2002) Longitudinal dispersion coefficient in single-channel streams. *Hydraulic Engineering* 128(10): 901-916.
6. Disley T, Gharabaghi B, Mahboubi AA and McBean EA (2015) Predictive equation for longitudinal dispersion coefficient. *Hydrological Processes* 29(2): 161-172.
7. Di Toro DM (1969) Stream equations and methods of characteristics. *J Sanit Eng Div Amer Soc Civil Eng* 95(SA4): 699-703.
8. Dobbins WE (1965) BOD and oxygen relationships in streams: Sanitary Engineering Division. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 91, 49-55.
9. Fischer HB, List JE, Koh CR, Imberger J and Brooks NH (2013) *Mixing in inland and coastal waters*. Elsevier.
10. Gandolfi C, Facchi A and Whelan MJ (2001) On the relative role of hydrodynamic dispersion for river water quality. *Water Resources Research* 37(9): 2365-2375.
11. Iwasa Y and Aya S (1991) Predicting longitudinal dispersion coefficient in open channel flows. n: Proceedings of International Symposium on Environmental Hydraulics, Hong Kong, pp. 505–10.
12. Kashefipour SM and Falconer RA (2002) longitudinal dispersion coefficients in natural channels. *Water Research* 36(6): 1596-1608.

www.SID.ir

Archive of SID

13. Liu H (1977) Predicting dispersion coefficient of streams. *Environmental Engineering Division* 103(1): 59-69.
14. Li WH (1972) Effects of dispersion on DO-Sag in uniform flow. *Sanitary Engineering Division* 98(1): 169-182.
15. Nezaratian H, Zahiri J and Kashefipour SM (2018) Sensitivity Analysis of Empirical and Data-Driven Models on Longitudinal Dispersion Coefficient in Streams. *Environmental Processes* 5(4): 833-858.
16. Polyanin AD (2002) Linear partial differential equations for Engineers and Scientists.
17. Rajeev RS and Dutta S (2009). Prediction of longitudinal dispersion coefficients in natural rivers using genetic algorithm. *Hydraulic Engineering* 40(6): 544-552.
18. Ramezani M, Noori R, Hooshyaripor F, Deng Z and Sarang A (2019) Numerical modelling-based comparison of longitudinal dispersion coefficient formulas for solute transport in rivers. *Hydrological Sciences* 64(7): 808-819.
19. Ruthven DM (1971) The dispersion of a decaying effluent discharged continuously into a uniformly flowing stream. *Water Resources Management* 5: 343-352.
20. Sahay RR (2013) Predicting longitudinal dispersion coefficients in sinuous rivers by genetic algorithm. *Hydrology and Hydromechanics* 61(3): 214-221.
21. Seo IW and Cheong TS (1998) Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Hydraulic Engineering* 124(1): 25-32.
22. Soncini-Sessa R, Nardini A and Kraszewski A (1994) Data gathering campaigns for the calibration of river quality models: [1] Considerations on design criteria, Internal Rep. 94.081, Dip. di Elettron., Politec. di Milano, Milan, Italy.
23. Thomann RV (1973) Effects of longitudinal dispersion on dynamic water quality response of streams and rivers. *Water Resources* 9(2): 355-366.
24. Toprak ZF and Cigizoglu HK (2008) Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial intelligence methods. *Hydrological Processes: An International Journal* 22(20): 4106-4129.
25. Zeng Y and Huai W (2014) Estimation of longitudinal dispersion coefficient in rivers. *Hydro-Environment Research* 8(1): 2-8.

www.SID.ir