بررسی حساسیت مدل انتقال- انتشار املاح به ضرایب واکنش و خصوصیات هیدرولیکی رودخانه در فرایند شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول

سیده سیمین میرهاشمی* و محمد شایان‌نژاد[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱)

چکیده

امروزه آلودگی‌های محیطی به‌ویژه آلودگی آب، به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است. یکی از مشکلات ورود آلاینده‌ها به رودخانه، کاهش غلظت اکسیژن محلول آب رودخانه است. برای مدیریت منابع آب لازم است مقدار اکسیژن محلول پیش‌بینی شود. پژوهش حاضر، با افزودن عوامل تولید و مصرف اکسیژن در رودخانه به معادله انتقال- پخشیدگی املاح در خاک، معادله جدیدی برای شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول در رودخانه ارائه داده است. معادله حاصل به روش عددی تفاضلات محدود و به‌کمک الگوی ضمنی منفصل شد. پس از منفصل‌سازی معادله و اعمال شرایط اولیه و مرزی، دستگاه معادلات به‌دست آمده، با الگوریتم توماس حل شد. محاسبات با کدنویسی‌هایی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. برای واسنجی و تأیید مدل اکسیژن محلول، از داده‌های رودخانه زاینده‌رود در محدوده کارخانه ذوب‌آهن اصفهان و مجتمع فولاد مبارکه استفاده شد. با استفاده از قسمتی از داده‌ها، ضرایب مدل تعیین شد. تجزیه و تحلیل حساسیت ضرایب مدل نشان داد ثابت هوادهی (K_r) بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی‌های مدل دارد. از آنجائی که K_r وابسته به پارامترهای هیدرولیکی رودخانه است، میزان حساسیت عمق و سرعت رودخانه نیز بررسی و در نهایت عمق رودخانه به‌عنوان حساس‌ترین متغیر معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: اکسیژن محلول، پارامترهای هیدرولیکی، زاینده‌رود، معادله انتقال و پخشیدگی، MATLAB

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mirhashemi931@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

حفظ و استفاده از منابع آب از اصول توسعه پایدار هر کشور است. آب‌های سطحی جاری یا رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آب هستند که نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف مانند کشاورزی، شرب و تولید برق دارند (۱۶). رشد جمعیت و آلودگی‌های ناشی از تخلیه انواع فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، شیرابه محل‌های دفع زباله و روانابهای سطحی، باعث گسترش آلودگی و محدودتر شدن منابع آب در دسترس شده است (۱۴). مشکل آلودگی رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آبی در دسترس بشر، همواره به‌عنوان یکی از سرفصل‌های مهم پژوهشی و مطالعاتی در زمینه ابداع و کاربرد روش‌هایی به‌منظور شناخت و کنترل آلودگی‌ها قرار داشته است. برای اعمال تکنیک‌ها و روش‌هایی مؤثر و در واقع مدیریتی صحیح به‌منظور مبارزه با این مشکل، شناخت واقعیت مسئله و استفاده از مدل‌ها و مسیرهایی که تا حد امکان به این واقعیت نزدیک‌تر هستند و مطابقت بیشتری با آن داشته باشند، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است (۲). امروزه مدل‌سازی به‌عنوان ابزار مناسب و کارامد در تعیین و ارزیابی اثرات آلاینده‌های مختلف در منابع آب کاربرد دارد (۱۸). اساس مدل توسعه‌یافته در این پژوهش، معادله انتقال- انتشار املاح در خاک است. برای استفاده از رابطه انتقال- انتشار املاح در شبیه‌سازی حرکت اکسیژن محلول در رودخانه، باید اصلاحاتی روی این رابطه صورت بگیرد. برای انجام این اصلاحات، ابتدا مفاهیم سرعت و پخشیدگی بر مبنای حرکت آب در رودخانه تعریف می‌شود. سپس عوامل تولید و مصرف اکسیژن محلول در رودخانه بررسی خواهند شد تا در نهایت، یک جمله برای تولید اکسیژن محلول و جمله‌ای دیگر به‌منظور مصرف آن به معادله اضافه شود. حل معادله و انجام اصلاحات به‌کمک روش‌های حل عددی و کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. مدل توسعه داده شده شامل چهار ضریب K، L_o، D_o و K_r است که به‌ترتیب ضریب واکنش BOD (۱/ day)، اکسیژن خواهی نهایی توسط ریزجانداران (mg/lit)، ضریب پخشیدگی املاح در آب (cm^2/s) و ثابت هوادهی (۱/ day) هستند. ابتدا، میزان حساسیت مدل به چهار ضریب مذکور سنجیده شد تا ضریبی که بیشترین تأثیر را بر خروجی‌های مدل دارد، تشخیص داده شود. سپس عواملی که بر ضریب حساس مدل تأثیر می‌گذارند بررسی شد تا درنهایت، حساس‌ترین متغیر ورودی مدل انتقال- انتشار املاح برای شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول رودخانه، مشخص شود.

سابقه مدل‌سازی بسته به تعریفی که از مدل می‌توان ارائه کرد، متفاوت است اما عمده مدل‌سازی به مفهوم امروزی مربوط به سال‌های دهه ۱۹۵۰ به بعد است که از روش‌های عددی به‌ویژه تفاضلات محدود و المان محدود برای حل معادلات جریان و انتقال، به کرات استفاده شده و برنامه‌های کامپیوتری متعددی برای حل این معادلات نوشته شده است (۱۸). از آن جمله می‌توان شاهی‌نژاد و دهقانی (۱۲) را نام برد که به مقایسه مدل‌های شبکه عصبی موجک، ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین میزان اکسیژن محلول در آب رودخانه کامبرلند واقع در ایالت تنسی پرداختند. برای این منظور سری زمانی ماهانه شاخص DO رودخانه کامبرلند در طی یک دوره ۱۰ ساله با استفاده از پارامترهای دبی جریان و دما شبیه‌سازی شد. پس از آن به‌منظور مقایسه مدل‌های نام‌برده، شاخص‌های آماری محاسبه شدند. نتایج پایش کیفی، برتری مدل شبکه عصبی موجک نسبت به دو مدل دیگر را نشان داد (۵). بیگلری و همکاران (۳) با رویکرد کنترل آلودگی در مبدأ برای تأمین سلامت آبزیان، به مدل‌سازی و مدیریت کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود پرداختند. به این منظور، سه دوره نمونه‌برداری پارامترهای کیفیت آب، پایش منابع آلاینده رودخانه و پایش وضعیت پوشش گیاهی بستر از نقاط مختلف رودخانه در فصول مختلف سال ۱۳۹۶ انجام دادند. سپس مدل هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه را در محیط QUAL2KW آماده‌سازی، واسنجی و صحت‌سنجی کردند. تحلیل منابع آلاینده نشان داد که منابع گسترده بیشترین سهم را در آلودگی آب

www.SID.ir

Archive of SID

دارند و از بین منابع نقطه‌ای و آلاینده‌های کشاورزی، منابع نقطه‌ای سهم بیشتر آلایندگی را در فصل تابستان و پاییز و آلاینده‌های کشاورزی سهم بیشتر را در فصل بهار دارند. بررسی سناریوهای مختلف مدیریت کیفیت رودخانه نشان می‌دهند، محدود کردن BOD۵ فاضلاب کارخانه قند در این حوضه، به مقدار ۲۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط کنونی، سبب می‌شود تا غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی رودخانه در حد استاندارد برای حیات آبزیان بماند (۳). سلگی و همکاران (۱۱) به مدل‌سازی و پیش‌بینی اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی با استفاده از ترکیب ماشین بردار پشتیبان با تبدیل موجک پرداختند. به‌منظور بررسی مدل‌ها به‌صورت ترکیبی، از تبدیل موجک استفاده شد. بعد از تجزیه پارامترها با تبدیل موجک، با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) مؤلفه‌های مهم تعیین شدند. سپس از این مؤلفه‌های مهم به‌عنوان ورودی به مدل ماشین بردار پشتیبان استفاده شد تا مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان- موجک (WSVM) حاصل شود. برای انجام این پژوهش از سری زمانی ماهانه BOD رودخانه کارون در ایستگاه ملاثانی و متغیرهای کمکی اکسیژن محلول (DO)، جریان رودخانه و دمای ماهانه در یک دوره ۱۳ساله استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن که اعمال تبدیل موجک روی داده‌های ورودی مدل باعث بهبود نتایج می‌شود. بنابراین ترکیب ماشین بردار پشتیبان با تبدیل موجک به‌عنوان یک ایده جدید برای پیش بینی مقدار BOD رودخانه کارون معرفی شد (۱۱). سینگ و پارمر (۱۵) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به مدل‌سازی اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی و اکسیژن محلول در رودخانه‌های گانگا و یامونای هند پرداختند. برای توسعه مدل، کدنویسی‌هایی در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، رنگ و دمای آب به‌عنوان پارامترهای اصلی در توسعه مدل بوده‌اند. خروجی‌های مدل با اطلاعات در دسترس مقایسه شده و ضریب همبستگی بالا، دقت قابل قبول مدل مذکور را در پیش‌بینی غلظت BOD و DO رودخانه نشان داده است (۱۵). هوانگ و همکاران (۷)، به مدل‌سازی اکسیژن محلول در رودخانه نانفی چین پرداختند. به این منظور، مدل WASP را در رودخانه توسعه دادند. تغییرات غلظت اکسیژن محلول نسبت به مکان را بررسی نموده و مدل را واسنجی و صحت‌سنجی کردند. نتایج نشان داد که ایستگاه تصفیه فاضلاب موجود در این محدوده، نقش بسزایی در کاهش غلظت اکسیژن محلول رودخانه دارد و مقدار غلظت اکسیژن محلول در مجاورت این ایستگاه، به حالت بحرانی می‌رسد چرا که در این مکان، مصرف اکسیژن محلول برای تجزیه مواد آلی کربن‌دار بر تولید اکسیژن محلول از طریق فتوسنتز گیاهان آبزی پیشی گرفته است. در نهایت، راهکارهایی برای کاهش ریسک کمبود اکسیژن محلول رودخانه نانفی ارائه دادند (۷). مسروراحمد و علی‌شاه (۹) با بهره‌گیری از اطلاعات کیفی رودخانه و روش تطبیقی عصبی- فازی به تخمین اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی رودخانه سورما در بنگلادش پرداختند. نتایج نشان داد که این روش قادر به پیش‌بینی میزان BOD رودخانه با دقتی قابل قبول است و به‌عنوان مدلی کارآمد در پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی رودخانه محسوب می‌شود (۹). در این پژوهش، پس از تکمیل و اصلاح معادله انتقال- انتشار املاح در خاک، به‌گونه‌ای که قابلیت شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول رودخانه را داشته باشد؛ غلظت اکسیژن محلول قسمتی از رودخانه زاینده‌رود تحت تأثیر آلاینده‌های ذوب‌آهن و فولاد مبارکه، شبیه‌سازی شد. مدل مذکور، واسنجی شد و ضرایب آن به‌دست آمد. در نهایت، حساسیت مدل توسعه‌یافته، به ضرایب واکنش و ویژگی‌های هیرولیکی رودخانه بررسی شد تا پارامتر حساس مدل، مشخص شود.

مواد و روش‌ها

معادله انتقال- انتشار املاح در خاک:

معادله انتقال- انتشار املاح (ADE) در خاک به شکل رابطه (۱) است (۵):

$$\frac{\partial c}{\partial t}=D_0\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}-V\frac{\partial c}{\partial x} \qquad (۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

در این رابطه c: غلظت آلاینده یا املاح مورد نظر؛ V: سرعت واقعی جریان در خاک و D_0، ضریب پخشیدگی و انتشار املاح در خاک است (۵). برای اینکه از رابطه (۱) به منظور شبیه‌سازی حرکت اکسیژن محلول در آب استفاده شود، ابتدا باید مفاهیم سرعت جریان و پخشیدگی و انتشار بر مبنای حرکت آب در رودخانه بیان شود. پس از آن نیاز است جملاتی برای تولید و مصرف اکسیژن تعریف شود و معادله‌ی جدیدی استخراج شود.

استخراج معادلات

به‌طور کلی حرکت املاح در رودخانه‌ها تحت فرایندهای انتقال، پخشیدگی و انتشار صورت می‌گیرد.

در فرایند انتقال، حرکت املاح ناشی از حرکت آب در رودخانه با سرعت V است. بنابراین اگر غلظت املاح c باشد، میزان شدت انتقال املاح طبق رابطه (۲) برابر است با (۱):

$$J_c=V.c \qquad (۲)$$

شدت جریان املاح ناشی از فرایندهای پخشیدگی و انتشار، تابعی از گرادیان غلظت است و بنابر رابطه (۳) با قانون اول فیک بیان می‌شود (۱):

$$J_d=-D_0.\frac{\partial c}{\partial x} \qquad (۳)$$

در این معادله، J_d: شدت جریان املاح ناشی از فرایند پخشیدگی و انتشار (جرم املاح پخش‌شده و منتشرشده در واحد سطح و در واحد زمان) و D_0، مجموع ضرایب پخشیدگی املاح (D_S) و انتشار املاح (D_h) در آب (L^2T^{-1}) است (۱):

تعیین D_0: طبق رابطه (۴)، D_0 از مجموع ضریب پخشیدگی املاح و ضریب انتشار املاح در آب به‌دست می‌آید [۶]:

$$D_0=D_S+D_h \qquad (۴)$$

$$D_S=۷/۴\times۱۰^{-۸}\frac{T.(۲/۲۶.M_{H_2O})^{۰/۵}}{\mu.V_{O_2}^{۰/۶}} \qquad (۵)$$

در این معادله، T: دمای آب (K)؛ M_{H_2O}: جرم مولکولی آب؛ μ: لزجت آب (سانتی‌پویز)، V، حجم مولی اکسیژن و D_0 بر حسب (cm^2/s) است. برای محاسبه D_h، می‌توان رابطه (۶) را به کار برد (۶):

$$D_h=\lambda.V \qquad (۶)$$

در این معادله، λ: ضریب انتشارپذیری و V، بیانگر سرعت است. بنابراین مجموع شدت جریان املاح ناشی از فرایندهای انتقال، پخشیدگی و انتشار به‌صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود (۶):

$$J=J_d+J_c=V.c-D_0.\frac{\partial c}{\partial x} \qquad (۷)$$

اگر یک جزء یک‌بعدی به طول Δx از رودخانه‌ای به‌صورت زیر در نظر گرفته شود می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial t}(A.\Delta x.c)=J.A+m_1-[J.A+\frac{\partial(J.A)}{\partial x}\Delta x]-m_2 \qquad (۸)$$

در این معادله، $\frac{\partial}{\partial t}(A.\Delta x.c)$: تغییرات جرم املاح در واحد زمان؛ J.A: جرم ورودی املاح در واحد زمان؛ m_1: جرم املاح تولید شده در واحد زمان؛ $[J.A+\frac{\partial(J.A)}{\partial x}\Delta x]$: جرم املاح خارج شده در واحد زمان و m_2، جرم املاح مصرف شده در واحد زمان است.

اگر از تغییرات A نسبت به زمان و مکان صرف‌نظر شود می‌توان رابطه (۹) را نوشت:

$$m_1-A.\Delta x.\frac{\partial J}{\partial x}-m_2=A.\Delta x.\frac{\partial c}{\partial t}\rightarrow \qquad (۹)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t}=\frac{-\partial J}{\partial x}+\frac{m_1}{A.\Delta x}-\frac{m_2}{A.\Delta x}$$

مقادیر m_1 و m_2 اگر بر $A.\Delta x$ (حجم جزء) تقسیم شود برابر می شود با جرم املاح تولیدشده و مصرف‌شده در واحد حجم در واحد زمان که به‌ترتیب با m_1 و m_2 نمایش داده می‌شود. پس می‌توان طبق رابطه (۱۰) نوشت:

$$\frac{\partial c}{\partial t}=-\frac{\partial}{\partial x}(V.c-D_0.\frac{\partial c}{\partial x})+M_1-M_2 \qquad (۱۰)$$

چون جریان یکنواخت فرض شده است می‌توان سرعت جریان را ثابت در نظر گرفت. در این صورت رابطه (۱۱) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t}=\frac{-V\partial c}{\partial x}+D_0\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}+M_1-M_2 \qquad (۱۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

چون معادله (۱۱) قرار است برای اکسیژن محلول استفاده شود بنابراین c برابر با غلظت اکسیژن محلول در آب خواهد بود و M_1 و M_2 به‌ترتیب میزان اکسیژن تولیدی و مصرفی در واحد حجم آب در واحد زمان خواهند بود. منابع تولید و مصرف اکسیژن متعدد است؛ اما مهم‌ترین آنها عبارتست از تولید اکسیژن توسط هوادهی و مصرف اکسیژن توسط ریزجانداران برای تجزیه مواد آلی موجود در آب‌های آلوده به فاضلاب و مواد شیمیایی. در ادامه روابطی برای M_1 و M_2 ارائه می‌شود:

تولید اکسیژن توسط هوادهی: اگر میزان اکسیژن محلول تولیدشده در واحد حجم آب و در واحد زمان تابعی از کمبود اکسیژن محلول در نظر گرفته شود، می‌تواند به صورت رابطه (۱۲) بیان شود. در این معادله c_s: غلظت اکسیژن محلول در آب در حالت اشباع؛ c: غلظت اکسیژن محلول در آب در حالت واقعی؛ c_s-c: کمبود اکسیژن محلول در آب و K_r، ثابت هوادهی (T^{-1}) است.

$$M_1=K_r.(c_s-c) \qquad (۱۲)$$

تعیین c_s: برای c_s روابط متعددی ارائه شده است. یکی از آنها رابطه (۱۳) است (باکاو آرنت ۱۹۷۶):

$$c_s=۱۴/۶۵۲-۰/۴۱۰۲۲T+۰/۰۰۷۹۹۱T^2-۷/۷۷۴\times۱۰^{-5}T^3 \qquad (۱۳)$$

T: دمای آب برحسب درجه سانتیگراد و c_s، غلظت اکسیژن محلول در آب در حالت اشباع برحسب میلی‌گرم بر لیتر است (۱۷).

تعیین K_r: برای تعیین K_r از روش‌های تجربی که بر اساس دبی و عمق است استفاده می‌شود (۶). در این پژوهش با در نظر گرفتن میانگین سرعت رودخانه زاینده‌رود در محدوده کارخانجات ذوب‌آهن و فولادمبارکه در فصول پاییز و زمستان ۹۱ و بهار ۹۲ و عمق آن، پس از تطبیق با محدوده‌های پیشنهادی روابط تجربی، از رابطه چرچیل و همکاران استفاده شد:

$$K_r=۵/۰۲۶\frac{V}{H^{۱/۶۷}} \qquad (۱۴)$$

در این معادله V: سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه؛ H: عمق بر حسب متر و K_r، ثابت هوادهی برحسب (۱/ روز) است (۶).

تصحیح دمائی K_r: با توجه به اینکه سرعت و عمق رودخانه در محدوده مورد مطالعه در دمای ۲۰ سانتی‌گراد محاسبه شده است، لذا برای براورد ضریب در دماهای دیگر نیاز به تصحیح دمایی ضریب مربوطه است. رابطه‌ی (۱۵) برای تصحیح ضرایب استفاده می‌شود [۶]:

$$(K_r)_T=(K_r)_{۲۰}(\theta)^{T-۲۰} \qquad (۱۵)$$

که در معادله بالا، T: دمای مورد نظر(c°) و θ، ۱/۰۲۴ است (۶).

مصرف اکسیژن توسط ریزجانداران: مقدار تقاضا برای مصرف اکسیژن توسط ریزجانداران برای تجزیه مواد آلی با BOD بیان می‌شود که به آن اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی می‌گویند. بنابراین میزان اکسیژن مصرف شده در مدت زمان t را به‌صورت BOD_t نمایش می‌دهند. اگر اکسیژن‌خواهی نهایی توسط ریزجانداران با L_0 نمایش داده شود، اکسیژن‌خواهی باقی‌مانده در مدت زمان t که با L_t نمایش داده می‌شود به‌صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود (۱۳):

$$L_t=L_۰-BOD_t \qquad (۱۶)$$

چنان‌چه از مفهوم اکسیژن‌خواهی باقیمانده در زمان t استفاده شود، تغییرات L_t نسبت به زمان به‌صورت مرتبه اول زیر در نظر گرفته می‌شود (۱۳):

$$\frac{dL_t}{dt}=-K.L_t \rightarrow \int_{۰}^{L_t}\frac{dL_t}{L_t}=\int_{۰}^{t}-K.dt \rightarrow \ln\frac{L_t}{L_۰}=-K.t$$
$$\rightarrow \frac{L_t}{L_۰}=e^{-K.t} \rightarrow L_t=L_۰e^{-K.t}$$
$$\rightarrow BOD_t=L_۰-L_t=L_۰(1-e^{-K.t}) \qquad (۱۷)$$

در این معادله، K: ضریب واکنش BOD با دیمانسیون T^{-1} است (۱۳). با اندازه‌گیری BOD_t حداقل در دو زمان مختلف، می‌توان مقادیر K و $L_۰$ را به‌دست آورد. حال اگر فرض شود میزان مصرف اکسیژن توسط ریزجانداران تابعی از L_t باشد؛ می‌توان M_2 را از معادله (۱۸) به‌دست آورد :

$$M_2=K_dL_t=K_dL_۰e^{-K.t} \xrightarrow{K_d=K} M_2=K.L_۰.e^{-Kt} \qquad (۱۸)$$

در این معادله، t برحسب روز و K بر حسب ۱/ روز؛ $L_۰$ بر حسب میلی‌گرم در لیتر و در نهایت M_2 برحسب میلی‌گرم در

www.SID.ir

Archive of SID

لیتر در روز است که بیانگر مقدار اکسیژن مصرف شده در واحد زمان از واحد حجم آب است (۱۳). در نهایت با اصلاحاتی که در این پژوهش روی معادله انتقال- انتشار املاح در خاک صورت گرفت؛ معادله ADE برای شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول در طول رودخانه به شکل رابطه (۱۹) درآمد:

$$\frac{\partial c}{\partial t}=D_0\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}-V\frac{\partial c}{\partial x}+K_r.(c_S-c)-K.L_0.e^{-K.t} \qquad (۱۹)$$

حل عددی معادله استخراج‌شده

منفصل‌سازی معادله: برای حل عددی معادله استخراج‌شده (۱۹) از الگوی ضمنی و برای منفصل‌سازی آن از روش تفاضلات محدود استفاده شد:

$$\frac{c_i^{n+1}-c_i^n}{\Delta t}=D_0\frac{c_{i-1}^{n+1}-2c_i^{n+1}+c_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2}-$$
$$V\frac{c_i^{n+1}-c_{i-1}^{n+1}}{\Delta x}+K_r(c_S-c_i^{n+1})-KL_0e^{-Kt^{n+1}}$$
$$\rightarrow A.c_{i-1}^{n+1}+B.c_i^{n+1}+C.c_{i+1}^{n+1}=D \qquad (۲۰)$$

حل دستگاه معادلات خطی ایجاد شده: پس از منفصل‌سازی معادله (۱۹)، یک دستگاه معادلات خطی ایجاد می‌شود. به‌دلیل سه‌قطری بودن ماتریس ضرایب دستگاه به‌دست آمده، از روش الگوریتم توماس برای حل آن استفاده شد. برای این کار نیازمند به شرایط اولیه و مرزی است (۵):

اعمال شرایط اولیه: غلظت اکسیژن محلول در رودخانه قبل از ورود فاضلاب= c_i^n for i=1:n+1

شرایط مرزی: شرایط مرزی باید در دو نقطه x=0 و x=L محاسبه شود. غلظت در نقطه x=0 از رابطه (۲۱) به‌دست می‌آید (۵):

$$c^{n+1}\Big|_{x=0}=\frac{c_w.Q_w+c_r.Q_r}{Q_w+Q_r} \qquad (۲۱)$$

که در این معادله Q_w: دبی فاضلاب ورودی و Q_r: دبی رودخانه است (۵):

اعمال شرایط مرزی در x=L:

$$\frac{\partial c}{\partial x}\Big|_{i=n}^{n+1}=0\rightarrow\frac{c_{n+1}-c_n}{\Delta x}=0\rightarrow c_{n+1}=c_n$$

حال معادله (۲۰) به‌ازای مقادیر مختلف i بازنویسی می‌شود (i=2, 3, 4, 5,...,n). بنابراین n-1 معادله و n-1 مجهول به‌دست می‌آید. با حل دستگاه حاصل به روش الگوریتم توماس مقادیر غلظت در نقاط دو الی n در زمان n+1 به‌دست می‌آید. سپس با تکرار محاسبات می‌توان در سایر زمان‌ها نیز غلظت را به‌دست آورد. بنابراین می‌توان توزیع غلظت در طول رودخانه را در زمان‌های مختلف ترسیم کرد. به‌منظور توسعه مدل اکسیژن محلول برمبنای حل عددی معادله انتقال- انتشار املاح با منظور کردن واکنش‌های مربوط به تولید و زوال اکسیژن محلول، از کدنویسی با نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت حدود ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع، حوضه کاملاً بسته‌ای است که هیچ خروجی به دریا ندارد. قسمت عمده‌ای از حوضه به‌ویژه در پایین‌دست (منطقه رودشت) دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است (۸). تأمین آب شرب، کشاورزی، صنعت و فضای سبز، زیستگاه موجودات مختلف، تلطیف هوا، حفاظت از اراضی، اشتغال، زیبایی مناظر و جذب توریست از جمله مزایای زاینده‌رود است. تمدن، فرهنگ و توسعه در مناطق مجاور رودخانه وابسته به زاینده‌رود است و در حقیقت دارای تأثیر متقابلند، تغییرات هرکدام روی دیگری اثر داشته و ناپایداری هرکدام به‌طور سیستمی باعث ناپایداری دیگری خواهد شد (۴). بنابراین با توجه به احداث صنایع بزرگی مانند ذوب‌آهن، فولاد مبارکه و صنایع‌نظامی در مجاورت رودخانه و رشد روزافزون صنایع، افزایش جمعیت و عوامل متعدد تأثیرگذار بر کیفیت آب، مطالعه کیفیت آب در این رودخانه حائز اهمیت است.

جمع‌آوری اطلاعات DO و BOD رودخانه: در این پژوهش، تمرکز بر آلودگی صنعتی است. اطلاعات در محدوده کارخانه‌های ذوب‌آهن و فولاد مبارکه و با توجه به مکان‌های ورود پساب‌های ایجاد شده از صنایع مذکور به رودخانه جمع‌آوری شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

به‌منظور نمونه‌برداری از رودخانه زاینده‌رود، نمونه‌برداری در عمق ۰/۶ متری رودخانه، به‌صورت ماهانه در ماه‌های آذر، دی، بهمن، اسفند سال ۱۳۹۱ و فروردین‌ماه سال ۱۳۹۲ انجام شده است. به‌طور تصادفی در ۱۵ روز از هر یک از ماه‌های مذکور، نمونه‌برداری از رودخانه صورت گرفته است. پس از هر بار نمونه‌برداری، آب مورد آزمایش در دو بطری ۳۰۰ میلی‌لیتری با درپوش سمباده‌ای ریخته شده است. در یکی از آنها اندازه‌گیری اکسیژن محلول، بلافاصله در محل، با استفاده از دستگاه پرتابل مدل ۸۴۰۳ انجام شده است. در نمونه دوم، اندازه‌گیری اکسیژن محلول به‌صورت روزانه (تا ۱۵ روز)، با دستگاه مذکور انجام شده است تا مقدار اکسیژن‌خواهی‌بیولوژیکی در روزهای متوالی به‌دست آید. برای انجام پژوهش و اندازه‌گیری غلظت اکسیژن محلول، پنج نقطه در پایین‌دست کانال تخلیه پساب ذوب‌آهن و پنج نقطه در پایین‌دست کانال تخلیه پساب فولاد مبارکه در نظر گرفته شده است.

اطلاعات دما و pH: پارامترهای دما و pH در هنگام اندازه‌گیری مقدار اکسیژن محلول در محل رودخانه توسط دستگاه Mi۸۰۵ اندازه‌گیری شده است.

اطلاعات عمق رودخانه و سرعت جریان: با توجه به اینکه رودخانه کم‌عمق و کم‌عرض است، سرعت و عمق جریان در هر بار نمونه‌برداری با استفاده از مولینه و اشل، اندازه‌گیری شده و میانگین این مقادیر در هر ماه در محاسبات استفاده شده است.

اطلاعات دبی: مقدار دبی رودخانه و کانال‌های انتقال پساب در ماه‌های مورد مطالعه، از سازمان آب منطقه‌ای اخذ شده است و میانگین این مقادیر به‌عنوان دبی رودخانه، دبی کانال تخلیه پساب ذوب‌آهن و کانال تخلیه پساب فولاد مبارکه در نظر گرفته شده است.

واسنجی مدل و به‌دست آوردن ضرایب K و $L_{\circ}$: با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه، تعدادی از پارامترهای مورد نیاز برای حل معادله انتقال- انتشار املاح به‌دست آمد. برای سایر پارامترها مقدار اولیه‌ای در نظر گرفته شد. پس از اجرای مدل، تغییراتی روی ضرایب مجهول مدل اعمال شد تا در مجموع، میزان RMSEها به حداقل رسید. سپس با توجه به رابطه $BOD=L_{\circ}.(۱-e^{-K.t})$ برای محاسبه دقیق‌تر پارامترهای K و $L_{\circ}$ در مدل، از برازش منحنی روی داده‌های اندازه‌گیری شده برای BOD استفاده شده است.

تجزیه و تحلیل حساسیت

در طول واسنجی، بعضی از پارامترها نسبت به بقیه حساس‌ترند. یک پارامتر حساس پارامتری است که تأثیر بیشتری بر خروجی مدل دارد؛ بنابراین اگر مقدار یک پارامتر حساس به‌آرامی تغییر کند، تأثیر زیادتری در پیشگویی مدل خواهد داشت. در تجزیه و تحلیل حساسیت، تخمین دقیق یک پارامتر حساس از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۰).

تجزیه و تحلیل حساسیت ضرایب مدل: مدل توسعه داده شده شامل چهار ضریب K، $L_{\circ}$، $D_{\circ}$ و K_r است که به‌ترتیب ضریب هوادهی (۱/ day) هستند. برای تجزیه و تحلیل حساسیت ضرایب مدل، هر بار یکی از چهار ضریب مدل، متغیر در نظر گرفته شده و سه ضریب دیگر ثابت فرض شده‌اند. ضریب متغیر، از ۵± تا ۵۰± درصد مقدار اولیه خود، تغییر داده شده است و هر بار خروجی مدل بررسی شده تا میزان تغییرات غلظت اکسیژن محلول بررسی شود. تغییرات غلظت اکسیژن محلول در سه زمان مختلف و سه مکان بررسی شده است. در نهایت، محسوس‌ترین تغییرات در غلظت اکسیژن محلول انتخاب شده و تأثیر هر یک از ضرایب مدل بر این تغییرات، ترسیم شده است.

بررسی تغییرات خصوصیات هیدرولیکی رودخانه

ضریب K_r، بنابر روابط تجربی، وابسته به عمق رودخانه و سرعت جریان است (۶). بنابراین میزان حساسیت پارامترهای H و V نیز مورد بررسی قرار گرفت.

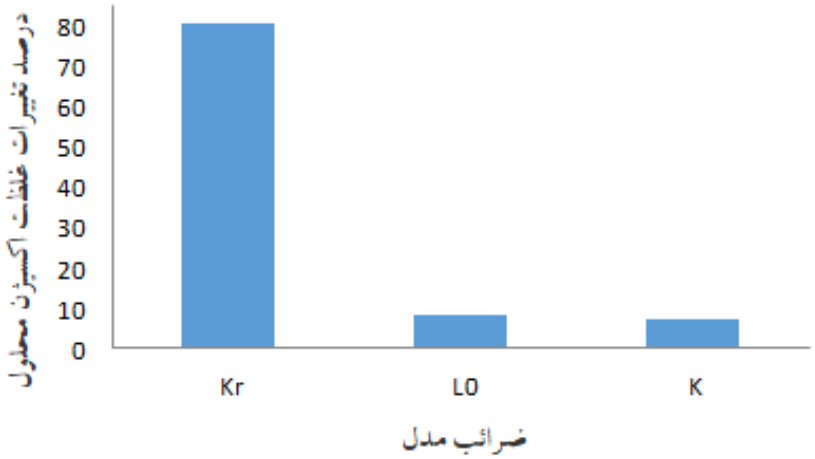
نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل حساسیت ضرایب مدل

پس از تجزیه و تحلیل حساسیت به‌ازای ۵± درصد تا ۵۰± درصد تغییر هر یک از ضرایب مشخص شد که محسوس‌ترین تغییرات به ازای ۳۵± درصد تغییر در ضرایب بوده است. از

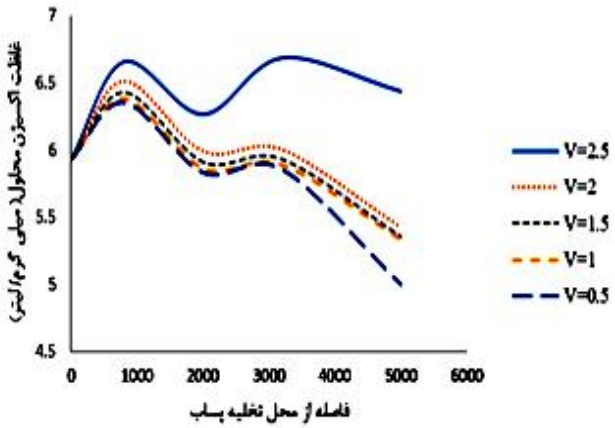
www.SID.ir

Archive of SID

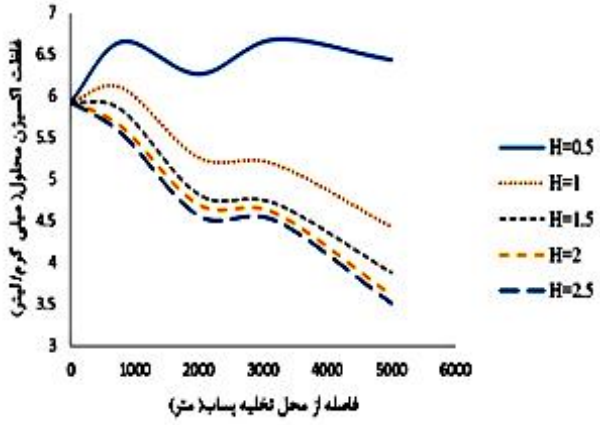


شکل ۱. حداکثر تغییرات اکسیژن محلول نسبت به ۳۵ درصد افزایش در هر یک از ضرایب K_T، L. و K- فولاد مبارکه

شکل ۲. حداقل تغییرات اکسیژن محلول نسبت به ۳۵ درصد کاهش در هر یک از ضرایب K_T، L. و K – فولاد مبارکه



شکل ۳. تغییرات DO به‌ازای عمق‌های مختلف رودخانه



شکل ۴. تغییرات DO به‌ازای سرعت‌های مختلف جریان رودخانه

www.SID.ir

Archive of SID

می‌شود. به عبارتی شدت تولید اکسیژن در اثر هوادهی نسبت به شدت مصرف اکسیژن بیشتر شده و به اصطلاح خودپالایی طبیعی رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر سایر عوامل تولید اکسیژنی که مدل توسعه‌یافته در نظر نگرفته است (مانند فتوسنتز گیاهان آبزی) در تولید اکسیژن رودخانه دخیل نشوند؛ در رودخانه‌های عمیق، مشکل خودپالایی وجود خواهد داشت. در مجموع، دو دسته فرایند در راستای هم در رودخانه رخ می‌دهند. یک سری از فرایندها مربوط به تولید اکسیژن و دسته‌ای دیگر مربوط به مصرف اکسیژن است. هر زمان که منابع تولید اکسیژن بر مصرف آن غالب شوند، غلظت اکسیژن محلول افزایش یافته و منحنی بالا می‌رود. زمانی که مصرف اکسیژن توسط ریزجانداران بر هوادهی پیشی بگیرد، غلظت اکسیژن محلول کاهش یافته و منحنی حالت نزولی به خود می‌گیرد.

منابع مورد استفاده

1. Abasi, F. 2008. Advanced Soil Physics. Tehran University. Iran. (In Farsi).
2. Aliverdi, A. and H. Eslami. 2015. Modeling of quality parameters of Dissolved Oxygen (DO) and Biological Oxygen Demand (BOD) in Karkhe River by using WAsP6 Software. *In:* Proceeding of the First National Architecture, Civil and Environmental Conference, Iran. (In Farsi).
3. Bigleri, M., S. Sima and M. Saadatpur. 2019. Modelling and management of river by using the pollution control approach at the origin to the purpose of aquatic health (case study: Zarinehrud), Water resources research of Iran (online publishing) (In Farsi).
4. Deputy of Isfahan Municipality Services, 2013. The causes of Zayanderud river drought. (In Farsi).
5. Erfani Manesh, M. and M. Afyuni. 2012. The Polution of Water, Soil and Air. Arkan. Esfahan (In Farsi).
6. Haider, H. and W. Ali. 2010. Development of dissolved oxygen model for a highly variable flow river: a case study of ravi river in Pakistan. *Environmental Modeing and Assessment* 15: 583-599.
7. Huang, J., H. Yin, S. C. Chapra and O. Zhou. 2017. Modelling disolved oxygen depression in an urban river in China. *Water* 9(7): 520.
8. Khatunabadi, A. 2009. Searching in Zayandehrud river history. *Daneshnema Journal* 12: 174- 175. (In Farsi).
9. Masrur Ahmed, A. A. and S. M. Ali Shah. 2015. Application of adaptive neuro- fuzzy inference system (ANFIS) to estimate the biochemical oxygen demand(BOD) of Surma River. J*ournal of King Saud University- Engineering Sciences* 29: 237- 243.
10. Sarkar, A. and P. Pandey. 2015. River water quality modeling using artificial neural network technique. *Aquatic Procedia* 4: 1070-1077.
11. Selgi, A., A. Purhaghi, H. Zarei and H. Ansari. 2017. Modeling and prediction of Biological Oxygen Demand (BOD) by combining backup vector machine with wavelet transform, *Journal of Water and Soil Researches* 1: 86-100. (In Farsi).
12. Shahinejad, B. and R. Dehghani. 2019. The comparison of wavelet neural network models, support vector machine and gene expression planning for estimation of water soluble oxygen in rivers. *Water Resources Research* 14(3): 226- 238. (In Farsi).
13. Shayannejad, M. 2017. Computational Methods in Water Engineering Modeling by Using MATLAB Software. Jahade Daneshgahi of Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Farsi).
14. Simeonov, V., J. A. Stratis, C. Samara, G. Zachariadis, D. Voutsa, A. Anthemidis, M. Sofonion and T. Kouimtzis. 2003. Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Research* 37(17): 4119-4124.
15. Singh, V. P. and D. Parmar. 2017. BOD- DO Models for ganges and yamuna river, India using ANN. *In:* Proceeding of the International Conference on Modelling of Environmental and Water Resources Systems. India, Kanpur.
16. The ministry of energy. 2010. Environmental roles of reclaimed water and wastewater reusing, issue no. 535: 7- 10. (In Farsi).
17. Torabiyan, A. and H. Hashemi. 2003. Quality Modeling of Surface Water. Tehran University. Iran. (In Farsi).
18. Water Resources Management Company. 2006. Guide to Self-Purification Studies of River. 292: 9- 11. (In Farsi).

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 3, Fall 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Checking the Sensitivity of Solute Advection- Dispersion Model to Reaction Coefficients and River Hydraulic Properties in the Process of Dissolved Oxygen Simulation

S. Mirhashemi[*] and M. Shayannejad[1]

(Received: July 31-2017; Accepted: September 23-2018)

Abstract

Nowadays, environmental pollutions especially water pollution is increasingly developing. One of the problems of entering the pollutants to rivers is reduction in the concentration of river dissolved oxygen. In order to manage the water resources, amount of dissolved oxygen should be predicted. This study presents a novel equation for simulating the concentration of river dissolved oxygen by adding the oxygen production and consumption in the river factors to equation for transmission-diffusion of minerals in the soil. The resultant equation was separated in finite differential method and by using implicit pattern. Calculations were done by encodings in MATLAB software. In order to calibrate and confirm the dissolved oxygen model, data derived from Zayanderood River around Zob-Ahan factory of Isfahan and Mobarakeh Steel Complex was used. By using some data, coefficients of model were determined. Analyzing the sensitivity of model coefficients showed that aeration constant (K_r) had the most effect on predicting the model. Since depends on hydraulic parameters of river, sensitivity of depth and pace of river was studied and finally depth of river was introduced as the most sensitive variable.

Keywords: Dissolved oxygen, hydraulic parameters, Zayandehrud, Advection- Dispersion Equation, MATLAB

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*: Corresponding Author, Email: mirhashemi931@yahoo.com

www.SID.ir