Archive of SID

نشریه علمی- پژوهشی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering

سال نهم- شماره ۳۱- زمستان ۱۳۹۴ Vol. 9, No. 31, Winter 2015

ارزیابی ضریب نرخ بازهوادهی رودخانه‌ی سفیدرود

مهدی محمدی قلعه‌نی[۱]، کیومرث ابراهیمی[۲] و محمدحسین امید[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹٤/۰۸/۱۰

چکیده

برآورد مناسب ضریب نرخ بازهوادهی یکی از مهم‌ترین نیازهای اولیه مدل‌سازی اکسیژن محلول و خودپالایی رودخانه‌ها می‌باشد. هدف اصلی مقاله حاضر ارزیابی ۲۹ معادله پرکاربرد پیشنهادی در برآورد ضریب نرخ بازهوادهی رودخانه‌ها در قالب مطالعه موردی سفیدرود می‌باشد. در این مقاله ارزیابی و مدل‌سازی اکسیژن محلول سفیدرود با استفاده از روش تحلیلی استریتر- فلپس و کاربرد داده‌های کیفیت آب موجود از چهار سری نمونه‌برداری رودخانه مذکور انجام گرفت. بازه انتخابی از زیردست سد سفیدرود تا دریای خزر به طول تقریبی ۱۱۰ کیلومتر و در ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری می باشد. نتایج ارزیابی معادلات برآورد ضریب نرخ بازهوادهی، حاکی از وجود بیشترین دقت در معادلهٔ "پارخوراست و پومروی" با خطای استاندارد، خطای میانگین ضربی و مجموع مربعات باقیمانده‌هایی به ترتیب برابر با ۰/۵۱، ۱/۰۵ و ۲/۳۵ می‌باشد. همچنین رفتارسنجی خودپالایی سفیدرود نشان‌دهندهٔ بالا بودن نیاز اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و پایین‌بودن توان خودپالایی این رودخانه در مهر ماه که مصادف با ورود حداکثر مقدار آلاینده‌های غیرنقطه‌ای مانند زهاب‌های کشاورزی است می باشد.

واژه‌های کلیدی: *استریتر- فلپس، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، ضریب نرخ بازهوادهی، سفیدرود، مدل‌سازی اکسیژن محلول*

مقدمه

مدیریت کیفی رودخانه‌ها به عنوان حیاتی‌ترین منبع تأمین آب همواره مورد توجه سازمان‌های ملی و بین‌المللی بوده است. این موضوع در مناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند ایران که رودخانه‌ها نقش اساسی در تأمین نیازهای آبی را دارند، اهمیت بیشتری دارد. ضریب نرخ بازهوادهی[4] توصیف کننده‌ی جذب فیزیکی اکسیژن از اتمسفر به داخل آب است [۳٤]. مقادیر اکسیژن محلول[5] در مدل‌سازی کیفی، حساسیت زیادی به تغییرات کم ضریب نرخ بازهوادهی از خود نشان می‌دهد [۱۹]. بنابراین تخمین صحیح ضریب نرخ بازهوادهی بسیار ضروری است. تعداد زیادی رابطه‌ی تجربی به منظور تخمین ضریب نرخ بازهوادهی با استفاده از متغیرهای هیدرولیکی جریان مانند سرعت متوسط، میانگین عمق جریان، سرعت برشی جریان، عدد فرود، دبی جریان و شیب خط انرژی جریان پیشنهاد شده است[۲۱].

در دهه‌های گذشته، محققان زیادی روابط پیشنهادی تخمین ضریب نرخ بازهوادهی را بررسی کرده و سعی در ارزیابی کارایی این روابط داشته‌اند. بنت و راتبون [٤] یکی از نخستین محققانی بوده‌اند که سیزده معادله ضریب نرخ بازهوادهی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که از بین ۱۳ معادله مورد ارزیابی، فرمول چرچیل و همکاران [۸] بهترین برازش را با داده‌های جریان‌های طبیعی دارد. همچنین فرمول‌های اکونر و دوبینز [۳۲]، دوبینز [۱۱] و تاکستون و کرنکل [٤۰] بهترین برازش را برای کل داده‌ها از خود نشان دادند.

انصاری پور و همکاران [۲] با استفاده از چهار معادله‌ی تجربی اکونر و دوبینز [۳۲]، لانگبین و دیورام [۲۳]، لینگ و همکاران [۲٦] و بولتون [٦] به بررسی خودپالایی رودخانه پسیخان واقع در استان گیلان پرداختند. نتایج تحقیق ایشان حاکی از دقت بیشتر معادله بولتون [٦] و اکونر و دوبینز [۳۲] نسبت به دو معادله دیگر بود. نظری و همکاران [۳۰] نیز نتایج مشابهی را در مورد دقت بیشتر روابط بولتون و اکونر و دوبینز بدست آوردند.

بررسی تحقیقات گذشته در مورد ضریب نرخ بازهوادهی نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده در مورد ضریب نرخ بازهوادهی را می‌توان به چهار دسته کلی به شرح زیر تقسیم کرد. دسته‌ی اول مطالعات به تحقیقات بلک و فلپس [۵] بازمی‌گردد که نخستین مدل

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب دانشگاه تهران
۲- نویسنده مسئول و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
پست الکترونیک: EbrahimiK@ut.ac.ir
۳- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

4. Reaeration rate coefficient
5. Dissolved Oxygen

www.SID.ir

Archive of SID

پیش‌بینی ظرفیت بازهوادهی جریان را بر اساس شرایط هیدرولیکی جریان ارائه کردند. در ادامه محققانی چون استریتر و فلپس [۳۹]، اکونر و دوبینز [۳۲]، چرچیل و همکاران [۸]، کرنکل و اورلب [۲۲]، اونز و همکاران [۳۳] و دوبینز [۱۱] معادلات تجربی مشابهی را ارائه دادند. در این دسته از تحقیقات سعی شده است که یک معادلهٔ جدید بر اساس شرایط مورد مطالعه استخراج و ارائه شود.

دسته دوم مطالعات به اندازه‌گیری‌های مستقیم و مستقل میدانی ضریب نرخ بازهوادهی باز می‌گردد که نخستین بار توسط سازمان کنترل آلودگی آب فدرال آمریکا در رودخانه جکسون در غرب ایالت ویرجینیا با استفاده از یک روش ردیابی میدانی توسعه داده شد. در ادامه این تحقیقات تسیوگلو و والاس [٤٧] و زوگوروسکی و فایوست [٤٩] روش‌های تعادل توزیعی و ردیابی را در مطالعات خود استفاده کردند.

در دسته سوم مطالعات که ایده‌ی آن نخستین بار توسط کوار [۹] ارائه شد، محققین به دنبال یافتن بهترین رابطه‌ی تخمین ضریب نرخ بازهوادهی بر اساس شرایط متفاوت هیدرولیکی جریان بوده‌اند. مطالعاتی محققانی چون زیسون و همکاران [٤٨]، شیندالا و تراکس [۳٦]، حیدر و همکاران [۱۷] و پالومبو و براون [۳٤] را می‌توان در این دسته جای داد.

گروه چهارم محققان در مطالعات خود پس از بررسی روابط مختلف به دنبال یافتن معادله‌ی جدیدی برای ضریب نرخ بازهوادهی با استفاده از پارامترهای آماری بوده‌اند. مطالعاتی چون جها و همکاران [۲۰] و کالبورگی و همکاران [۲۱] در این دسته مطالعات جای می‌گیرند.

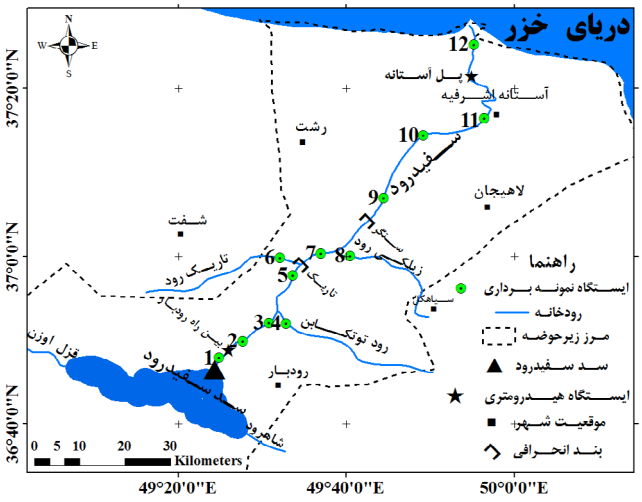
از طرف دیگر بررسی مطالعات انجام شده‌ی داخلی در مورد مدل‌سازی اکسیژن محلول حاکی از عدم انجام تحقیقات جامعی در مورد ضریب نرخ بازهوادهی در رودخانه‌های کشورمان می‌باشد. هدف اصلی مقاله حاضر ارزیابی کارآیی روابط تجربی مختلف برای تخمین ضریب نرخ بازهوادهی به منظور استفاده در مدل‌سازی اکسیژن محلول با لحاظ مطالعه موردی سفیدرود می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعات واقع در محدوده آستانه- کوچصفهان، قسمتی از شاخه اصلی سفیدرود بزرگ می‌باشد. این محدوده از زیردست سد مخزنی سفیدرود شروع و تا مصب دریای خزر ادامه دارد. ایستگاه‌های هیدرومتری نمونه‌براری در نظر گرفته شده در این محدوده شامل ۹ ایستگاه بر روی رودخانه سفیدرود و ۳ ایستگاه بر روی شاخه‌های فرعی ورودی به رودخانه سفیدرود شامل، زیلکی‌رود، تاریک‌رود و رود توتکابن می‌باشد. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری را در قسمت پایاب سفیدرود نشان می‌دهد.

در شکل ۱ طول سفیدرود از اولین تا آخرین ایستگاه نمونه‌برداری برابر ۱۰۹/٦٦٥ کیلومتر می‌باشد که این طول به ۸ بازه جهت



شکل ۱- محدوده مطالعه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری سفیدرود

Fig 1. Sefidroud river study reach and sampling stations

مدل‌سازی اکسیژن محلول تقسیم شد. جدول ۱ لیست داده‌های مورد استفاده در مقاله حاضر را نشان می‌دهد.

نمونه‌برداری از سفیدرود طی چهار دوره در آذرماه ۱۳۸٦، تیرماه ۱۳۸۷، مهرماه ۱۳۸۷ و آبان‌ماه ۱۳۸۷ توسط سازمان حفاظت محیط زیست [۱٤] انجام شده است. اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی[1]، قلیائیت، کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، کدورت، فسفر کل و نیتروژن کل از مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها می‌باشد. هر یک از پارامترهای جدول ۱ در فرآیند مدل‌سازی اکسیژن محلول با استفاده از مدل استریتر- فلپس مورد استفاده قرار گرفت. به عنوان مثال درجه حرارت آب برای تعدیل دمایی ضرایب نرخ بازهوادهی و زوال (معادلات ۵ و ٦)، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی برای تخمین ضریب زوال (معادله ٤) و هدایت الکتریکی برای برآورد اکسیژن محلول اشباع (معادله ۲) استفاده شد.

با توجه به جدول ۱، حداقل و حداکثر مقدار اکسیژن محلول برابر با ۳/۸ و ۹/۷ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب در مهرماه و تیرماه ۱۳۸۷ در ایستگاه‌های شماره‌ی ۱۲ و ٤ اندازه‌گیری شده است. همچنین حداقل اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی برابر با ۹ میلی‌گرم بر لیتر در آذرماه ۱۳۸٦ و آبان‌ماه ۱۳۸۷ در ایستگاه‌های ۱ و ۳ و حداکثر آن در مهرماه ۱۳۸۷ و برابر با ۹۸ میلی گرم بر لیتر در ایستگاه ۱۱ اندازه‌گیری شده است.

مدل سازی اکسیژن محلول سفیدرود

رابطه کلاسیک استریتر- فلپس به صورت معادله (۱) تعریف شده است [۳۹].

$$U\frac{dD}{dx} = K_c L - K_a D \qquad (۱)$$

که در آن، D کمبود اکسیژن محلول نسبت به حالت اشباع

1. Biochemical Oxygen Demand

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی اکسیژن محلول سفیدرود [۱۴]

Table 1. Used data to dissolved oxygen modeling in Sefidroud river [14]

شماره دوره Period n.	تاریخ نمونه برداری Sampling date	پارامتر* Parameter	شماره ایستگاه نمونه‌برداری Sampling station number											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
دوره اول First Per.	آذرماه ۱۳۸۶ Dec 2007	درجه حرارت آب Water Temperature	10	10	11	11	10.5	10	10	10	11	11	10.5	11
		دبی Flow rate	106	130	116	26	115	40	118	22	233	127	156	121
		اکسیژن محلول Dissolved oxygen	8.2	8.1	8.9	8.2	8.1	8.5	8.2	7.9	7.8	9.2	7.6	8.1
		اکسیژن‌خواهی بیوشمیایی BOD	13	13	***9***	11	12	12	16	15	15	12	14	16
		هدایت الکتریکی EC	5.8	3.2	4.8	1.1	2.1	3.0	2.4	3.0	2.9	2.0	2.4	2.0
دوره دوم Second Per.	تیرماه ۱۳۸۷ Jul 2008	درجه حرارت آب Water Temperatu	23	24	25.5	24.5	25	25	26	26	25	27	28	27.5
		دبی Flow rate	513	230	525	42	525	43	509	25	549	533	518	522
		اکسیژن محلول Dissolved oxygen	9.6	9.1	8.8	***9.7***	9.0	8.6	8.3	9.1	8.5	8.6	9.0	8.8
		اکسیژن‌خواهی بیوشمیایی BOD	10	11	11	12	14	10	11	13	11	10	12	13
		هدایت الکتریکی EC	0.4	3.0	0.4	1.1	0.4	2.2	0.3	0.8	0.4	0.3	0.3	0.3
دوره سوم Third Per.	مهرماه ۱۳۸۷ Oct 2008	درجه حرارت آب Water Temperatu	18	16	20	20	19	18	18	18	19	20	21	21
		دبی Flow rate	208	516	201	38	202	44	256	30	121	213	246	251
		اکسیژن محلول Dissolved oxygen	4.3	3.9	5.1	4.0	3.4	3.9	4.4	4.4	4.0	4.0	3.9	***3.8***
		اکسیژن‌خواهی بیوشمیایی BOD	43	53	62	52	55	48	47	49	42	52	***98***	34
		هدایت الکتریکی EC	4.2	2.9	3.4	1.0	2.6	1.3	2.1	0.4	4.2	2.0	1.5	1.7
دوره چهارم Fourth per.	آبان‌ماه ۱۳۸۷ Nov 2008	درجه حرارت آب Water Temperatu	20	21	22	22	20	18	22	19	23	21	22	23
		دبی Flow rate	203	214	215	57	209	45	219	27	229	217	213	204
		اکسیژن محلول Dissolved oxygen	7.8	8.0	7.6	7.6	7.3	7.5	8.1	8.1	7.9	8.0	8.2	8.2
		اکسیژن‌خواهی بیوشمیایی BOD	***9***	10	12	11	12	11	12	10	10	12	11	10
		هدایت الکتریکی EC	1.5	3.0	1.5	0.4	1.4	1.3	1.3	0.3	1.5	1.2	1.1	1.1

* در جدول ۱، واحد درجه حرارت آب درجه سانتی‌گراد، دبی مترمکعب بر ثانیه، اکسیژن محلول و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی میلی‌موس بر سانتی‌متر می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

$(D = C_s - C)$ می‌باشد. در این مطالعه مقادیر غلظت اکسیژن محلول اشباع با استفاده از معادله (۲) محاسبه شده است [۳۷].

(۲)

$$\ln C_s = -139.34411 + (1.575701\times10^5/T) - (6.642308\times10^7/T^2) + (1.243800\times10^{10}/T^3) - (8.621949\times10^{11}/T^4) - Chl[(3.1929\times10^{-2}) - (1.9428\times10/T) + (3.8673\times10^3/T^2)]$$

در معادله (۲) T، درجه حرارت آب به درجه کلوین، و $Chl = EC/1.80655$ غلظت کلرید که در آن شوری آب (EC) به میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد، است. در یک سیستم یک بعدی و با جریان دائمی با حل تحلیلی معادله (۱) به معادله (۳) تبدیل می شود[۴۳].

$$D = D_0 e^{-K_a t} + \frac{K_c L_0}{K_a - K_c}\left(e^{-K_c t} - e^{-K_a t}\right) \qquad (۳)$$

در معادله (۳)، D_0، کمبود اکسیژن محلول اولیه، K_c، ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، K_a، ضریب نرخ بازهوادهی اتمسفری، L_0، غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی به میلی گرم بر لیتر، L_0، غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی اشباع به میلی‌گرم بر لیتر و t زمان ماند هیدرولیکی به روز می‌باشد. در مقاله حاضر معادله (۳) معادله اصلی استفاده شده برای مدل‌سازی اکسیژن محلول سفیدرود است.

ضریب نرخ بازهوادهی (K_a)

از آنجایی‌که در مدل کلاسیک استریتر- فلپس (معادله ۱) هوادهی به عنوان تنها منبع اکسیژن محلول در نظر گرفته شده است، برآورد مناسبی از ضریب نرخ بازهوادهی کمک شایانی به مدل‌سازی اکسیژن محلول رودخانه می‌کند. در مقاله حاضر ابتدا ۲۹ رابطهٔ تجربی اصلی و متداول در برآورد ضریب نرخ بازهوادهی جمع آوری و دسته بندی شد (به جدول ۲ نگاه شود). سپس بهترین رابطه برای سفیدرود مشخص شد، که در ادامه بحث شده است.

در روابط جدول ۲، K_a ضریب نرخ بازهوادهی (یک بر روز)، U میانگین سرعت جریان (متر بر ثانیه)، H عمق متوسط (متر)، Q دبی (مترمکعب بر ثانیه)، S شیب کف رودخانه(بدون بعد)، u^* سرعت برشی جریان (متر بر ثانیه)، g شتاب جاذبه زمین (متر بر مجذور ثانیه)، F عدد فرود (بدون بعد)، D_m ضریب پخش مولکولی (مترمربع بر ثانیه)، R_{g-t} عدد انتقال گاز رینولدز (بدون بعد) و ν سرعت سینماتیکی جریان (مترمربع بر ثانیه) می‌باشد.

ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (K_c)

ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در حقیقت سرعت تجزیه مواد آلی را در شرایط هوازی بیان می‌کند که عمدتا توسط میکروارگانیزم‌ها صورت می‌گیرد. در مقاله حاضر این ضریب با استفاده از معادله ٤، محاسبه شد[۳۹].

$$K_c = \frac{1}{\Delta t}\log\frac{L_a}{L_b} \qquad (٤)$$

در معادله ٤، K_c ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی بر حسب یک بر روز، Δt زمان عبور بین دو ایستگاه نمونه‌برداری بر حسب روز، L_a غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در ایستگاه بالادست و L_b مقدار اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در ایستگاه پایین دست بازه مورد مطالعه می‌باشد. معادلات برآورد ضریب نرخ بازهوادهی ارائه شده در جدول ۲ و ضریب زوال (معادله ٤) همگی برای آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده‌اند و در دماهای دیگر باید این ضرایب با استفاده از معادلات ۵ و ٦ تعدیل دمایی شوند [۱۰].

$$K_{a,T} = K_{a,20}(\theta)^{T-20} \qquad (۵)$$

$$K_{c,T} = K_{c,20}(\theta)^{T-20} \qquad (٦)$$

در معادلات ۵ و ٦، $K_{a,۲۰}$ و $K_{c,۲۰}$ به ترتیب ضریب نرخ بازهوادهی و ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و $K_{a,T}$ و $K_{c,T}$ به ترتیب ضریب نرخ بازهوادهی و ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در دمای T درجه سانتی‌گراد می‌باشند. همچنین مقادیر ضریب دمایی θ برای معادلات ۵ و ٦ به ترتیب برابر ۱/۰۲٤ و ۱/۰٤۷ در نظر گرفته شده است ([٤۸]، [۱۸]).

معیارهای آماری انتخاب معادله مناسب

در مقاله حاضر از ٤ معیار خطا برای مقایسه نتایج مدل استریتر- فلپس [۳۹] و داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. دو معیار خطای مجموع مربعات باقیمانده‌ها[1] و خطای استاندارد[2] از معیارهای متداولی هستند که برای مقایسه نتایج استفاده می‌شوند. این معیارها بر اساس روابط ۷ و ۸ قابل محاسبه هستند [۱۲].

$$SSR = \sum_{i=1}^{N}\left(C_{p,i} - C_{m,i}\right)^2 \qquad (۷)$$

$$SE = \left[\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(C_{p,i} - C_{m,i}\right)^2}{N}\right]^{1/2} \qquad (۸)$$

موگ و جیرکا [۲۸] خطای ضربی میانگین[3] را برای ارزیابی نتایج معادلات تخمین ضریب نرخ بازهوادهی پیشنهاد کردند. خطای میانگین ضربی در حقیقت همان میانگین هندسی قدرمطلق نسبت مقادیر تخمینی به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد که رابطه آن مطابق با معادله ۹ می‌باشد [۲۸].

1. Sum of Square of Residuals (SSR)
2. Standard Error (SE)
3. Mean Multiplicative Error (MME)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- روابط تجربی مورد استفاده برای برآورد ضریب نرخ بازهوادهی رودخانه سفیدرود [۱۷]

Table 2. Predictive reaeration rate equations for Sefidroud river [17]

شماره Nomber	نام محققین investigator of NVame	نام معادله Name .Eq	معادله Equation	سیستم مورد استفاده در استخراج معادله system the of Type
1	O'Connor and Dobbins,1958	OD	$Ka- 3.93U^{0.5} H^{-1.5}$	مدل مفهومی Conceptual model
2	Churchill et al1962	CH	$Ka- 5.26UH^{-1.67}$	رودخانه‌های بزرگ Large rivers
3	Owens et al., 1964	OW	$Ka- 5.32U^{0.67} H^{-1.85}$	رودخانه‌های بزرگ و کوچک Small and Large Rivers
4	Langbein and Durum, 1967	LD	$Ka- 5.134UH^{-1.33}$	رودخانه‌های بزرگ Large rivers
5	Bennett and Rathburn,1972	BR	$Ka- 5.577U^{0.607} H^{-1.689}$	رودخانه‌های بزرگ و کوچک Large and small rivers
6	Bansal, 1973	BA	$Ka- 4.1528U^{0.6} H^{-1.4}$	رودخانه‌های متوسط تا بزرگ Medium to large rivers
7	Baecheler and Lazo1999	BL	$Ka- 1.923U^{1.325} H^{-2.006}$	رودخانه‌های کوهستانی Mountainous rivers
8	Jha et al., 2001	JH	$Ka- 5.792U^{0.5} H^{-0.25}$	رودخانه River
9	Isaacs and Gaudy, 1968	IG	$Ka- 4.05UH^{-1.5}$	فلوم استوانه‌ای چرخشی Recirculating cylindrical flume
10	Eloubaldy, 1969	EL۱	$Ka- 3.6UH^{-1.5}$	فلوم چرخشی Recirculating flume
11	Isaacs et al., 1969	IS		فلوم استوانه‌ای چرخشی Recirculating cylindrical flume
12	Negulescu and Rojanski, 1969	NR	$Ka- 10.9U^{0.85} H^{-0.85}$	فلوم چرخشی Recirculating flume
13	Padden and Gloyna, 1972	PG	$Ka- 4.54(U/ H^{-1.5})^{0.703}$	فلوم چرخشی Recirculating flume
14	Krenekl and Orlob, 1962	KO	$Ka- 173(SU)^{0.404}H^{-0.66}$	فلوم چرخشی Recirculating flume
15	Cadwallader and Mcdonnel, 1969	CM	$Ka- 186(SU)^{0.5}H^{-1}$	_
16	Tsiovoglou and Neal 1976	TN	$Ka- 3170S$	نهرها Streams
17	Grant, 1976	GR	$Ka- 22700U$	نهرهای کوچک Small streams
18	Thyseen et al., 1987	TH	$Ka- 8784U^{0.743}S^{0.93}H^{0.42}$	نهرهای کوچک Small streams
19	Smoot, 1998	SM	$Ka- 543S^{0.6236}U^{0.5325}H^{-0.7258}$	_
20	Mogg and Jirka, 1998	MJ	$Ka- 1740U^{0.46}S^{-0.79}H^{-0.74}$	_
21	Melching and Flores, 1999	MF	$Ka- 596(US)^{0.528}Q^{-0.136}$	نهرها و رودخانه‌های بزرگ Large rivers and streams
22	Tackston and Krenkel, 1969	TK	$Ka- 0.000125(1+F^{1/2})u^*H^{-1}$	رودخانه‌های بزرگ Large rivers
23	Eloubaldy ,1969	EL۲	$Ka- 154u^*H^{-1}$	فلوم چرخشی Recirculating Flume
24	Lau, 1972	LA	$Ka- 2506.7(U/H)(u^*/U)^3$	رودخانه‌های بزرگ Large rivers
25	Parkhurst and Pomeroy, 1972	PP	$Ka- 23.0400(1+/17F^2)(SU)^{0.375}H^{-1}$	نهرها و رودخانه‌ها Streams, Rivers
26	Alonso et al., 1975	AL	$Ka- 123u^*H^{-1}$	فلوم چرخشی Recirculating flume

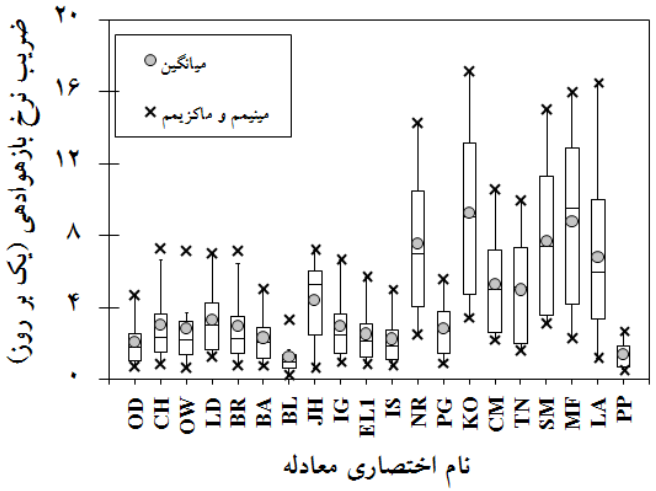
www.SID.ir

Archive of SID

ادامه دول ۲- روابط تجربی مورد استفاده برای برآورد ضریب نرخ بازهوادهی رودخانه سفیدرود [۱۷]

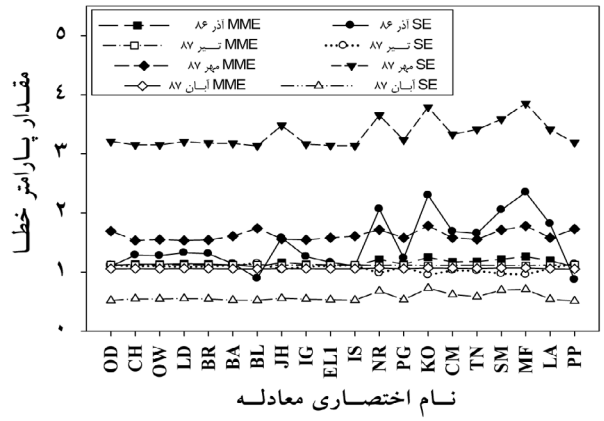
Table 2. Predictive reaeration rate equations for Sefidroud river [17]

شماره Nomber	نام محققین investigator of NVame	نام معادله Name .Eq	معادله Equation	سیستم مورد استفاده در استخراج معادله system the of Type
27	Thyssen and Jeppesen, 1980	TJ	$K_a = 23000U^{0.76}(1+F)^{2.66}S^{1.13}H^{-0.60}$	رودخانه‌های کوچک Small streams
28	Takston and Dawson, 2001	TD	$K_a = 0.000025\left(1+9F^{1/4}\right)u^{*}H^{-1}$	رودخانه‌های بزرگ Large rivers
29	Gualtieri and Gualtieri, 2004	GG	$K_a = (D_m)^{2/3}\left(gS/2\nu R_{g-l}\right)^{1/3}H^{-1}$	فلوم Flume



شکل ۲- مقادیر ضریب نرخ بازهوادهی رودخانه سفیدرود

Fig 2.Values of predictive reaeration rate equations in Sefidroud river



شکل ۳- مقادیر پارامترهای خطای اماری در معادلات براورد ضریب نرخ بازهوادهی

Fig 3. Values of statistical error parameters in predictive reaeration rate equations

$$MME = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{N}\left|\mathrm{h}\left(C_{p,i}/C_{m,i}\right)\right|}{N}\right] \qquad (۹)$$

درصد اریبی[1] بیانگر بیش‌برآورد یا کم‌برآورد یک معادله است. درصد اریبی مثبت نشانگر کم‌برآورد و درصد اریبی منفی بیانگر بیش‌برآورد یک مدل می‌باشد. درصد اریبی مطابق معادله ۱۰ است [۲۵].

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(C_{m,i}-C_{p,i}\right)\times 100}{\sum_{i=1}^{N}C_{m,i}}\right] \qquad (۱۰)$$

در روابط ۷ تا ۱۰، MME، SE، SSR و PBIAS به ترتیب مجموع مربعات باقیمانده‌ها، خطای استاندارد، خطای ضربی میانگین و درصد اریبی می‌باشد. همچنین $C_{p,i}$ غلظت اکسیژن محلول برآوردشده، $C_{m,i}$ غلظت اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده و N تعداد اندازه‌گیری‌های اکسیژن محلول می‌باشد.

1. Percent Bias (PBIAS)

نتایج

هر یک از معادلات تجربی ضریب نرخ بازهوادهی (ارائه شده در جدول ۲) با توجه به نوع داده‌های مورد استفاده در استخراج آن معادله، دارای محدوده عملکرد مناسبی می‌باشند. تومان [۴۲] حدود تغییرات ضریب نرخ بازهوادهی را بر اساس تعداد زیادی از مطالعات گذشته بین ۰/۰۵ تا ۱۲/۲ و بر حسب واحد یک بر روز عنوان کرد. بر این اساس و با توجه به نتایج ارزیابی‌های اولیه مقاله حاضر مشخص شد که از بین ۲۹ معادله مورد مطالعه، ۹ معادله‌ی GR [۱۵]، TH [۴۵]، MJ [۲۸]، TK [۴۰]، EL2 [۱۳]، AL [۱]، TJ [۴۴]، TD [۴۱] و GG [۱۶] نتوانسته‌اند تخمین مناسبی از ضریب نرخ بازهوادهی سفیدرود داشته باشند. شکل ۲، مقادیر مینیمم، میانگین و ماکزیمم ضریب نرخ بازهواهی رودخانه سفیدرود را با استفاده از ۲۰ معادله‌ی باقیمانده نشان می‌دهد.

شکل ۲ نشان می‌دهد که مینیمم و ماکزیمم ضریب نرخ بازهوادهی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- مقادیر پارامترهای خطا در ۱۳ معادله برتر برآورد ضریب نرخ بازهوادهی

Table 3. Values of error parameters in 13 top performancing predictive reaeration rate equations

رتبه معادله Eq. Rank	دوره نمونه‌برداری Sampling date											
	آذر ۱۳۸٦ Dec 2007			تیر ۱۳۸۷ Jul 2008			مهر ۱۳۸۷ Oct 2008			آبان ۱۳۸۷ Nov 2008		
	نام معادله	SSR	PBIAS	نام معادله	SSR	PBIAS	نام معادله	SSR	PBIAS	نام معادله	SSR	PBIAS
1	***PP***	6.9	***-6.0***	***KO***	8.1	9.6	***BL***	88.5	***-32.1***	***PP***	***2.3***	***-1.1***
2	BL	7.2	-4.7	MF	8.2	9.6	IS	88.6	-42.8	OD	2.4	-1.8
3	OD	10.9	-8.8	SM	8.5	9.7	EL1	89.0	-45.2	BL	2.4	***-0.6***
4	IS	10.9	-8.6	NR	8.7	9.8	CH	89.5	-48.7	BA	2.5	-2.1
5	BA	11.8	-9.5	TN	9.4	10.0	OW	89.5	-47.3	IS	2.5	-1.9
6	EL1	12.2	-9.5	CM	9.5	10.1	IG	90.2	-48.7	EL1	2.5	-2.2
7	PG	13.8	-11.2	JH	9.8	10.2	BA	90.9	-44.9	PG	2.6	-2.7
8	IG	14.3	-10.8	LA	10.2	10.3	BR	91.2	-49.3	LA	2.6	-3.9
9	OW	14.7	-10.6	LD	10.5	10.5	PP	91.7	-36.0	OW	2.6	-2.4
10	CH	14.9	-10.9	PG	10.7	10.5	LD	92.6	-51.8	IG	2.7	-2.6
11	BR	15.5	-11.3	IG	10.7	10.5	OD	92.9	-40.7	BR	2.7	-2.6
12	LD	15.8	-11.9	CH	10.8	10.5	PG	94.2	-49.8	CH	2.7	-2.6
13	JH	22.4	-16.6	BR	10.8	10.5	CM	***99.8***	***-63.6***	LD	2.7	-3.0

در ۱۳ معادله از حدود ۰/۳ تا ۱٦/٦ یک بر روز متغیر می‌باشد. مقادیر مینیمم و ماکزیمم ضریب نرخ بازهوادهی در هفت معادله‌ی NR [۳۱]، KO [۲۲]، CM [۷]، TN [٤۷]، SM [۳۷]، MF [۲۷] و LA [۲٤] از ۱/۲ تا ۱٦/۱ یک بر روز متغیر می‌باشد. شکل ۳ پارامترهای خطای استاندارد (SE) و خطای ضربی میانگین (MME) ۲۰ معادله را در چهار دوره نمونه‌برداری نشان می‌دهد.

شکل ۳ نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین مقادیر پارامترهای خطای SE و MME به ترتیب مربوط به دوره‌ی سوم (آبان‌ماه ۱۳۸۷) و چهارم (مهرماه ۱۳۸۷) نمونه‌برداری می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که معادله PP [۳۵] در دوره‌های اول و چهارم، KO [۲۲] در دوره دوم و BL [۳] در دوره سوم، کمترین مقادیر پارامترهای خطا را داشته‌اند. جدول ۳، رتبه‌بندی ۱۳ معادله‌ی برتر از لحاظ دقت را دوره‌های نمونه‌برداری به همراه پارامترهای مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSR) و درصد اریبی (PBIAS) مربوطه نشان می‌دهد.

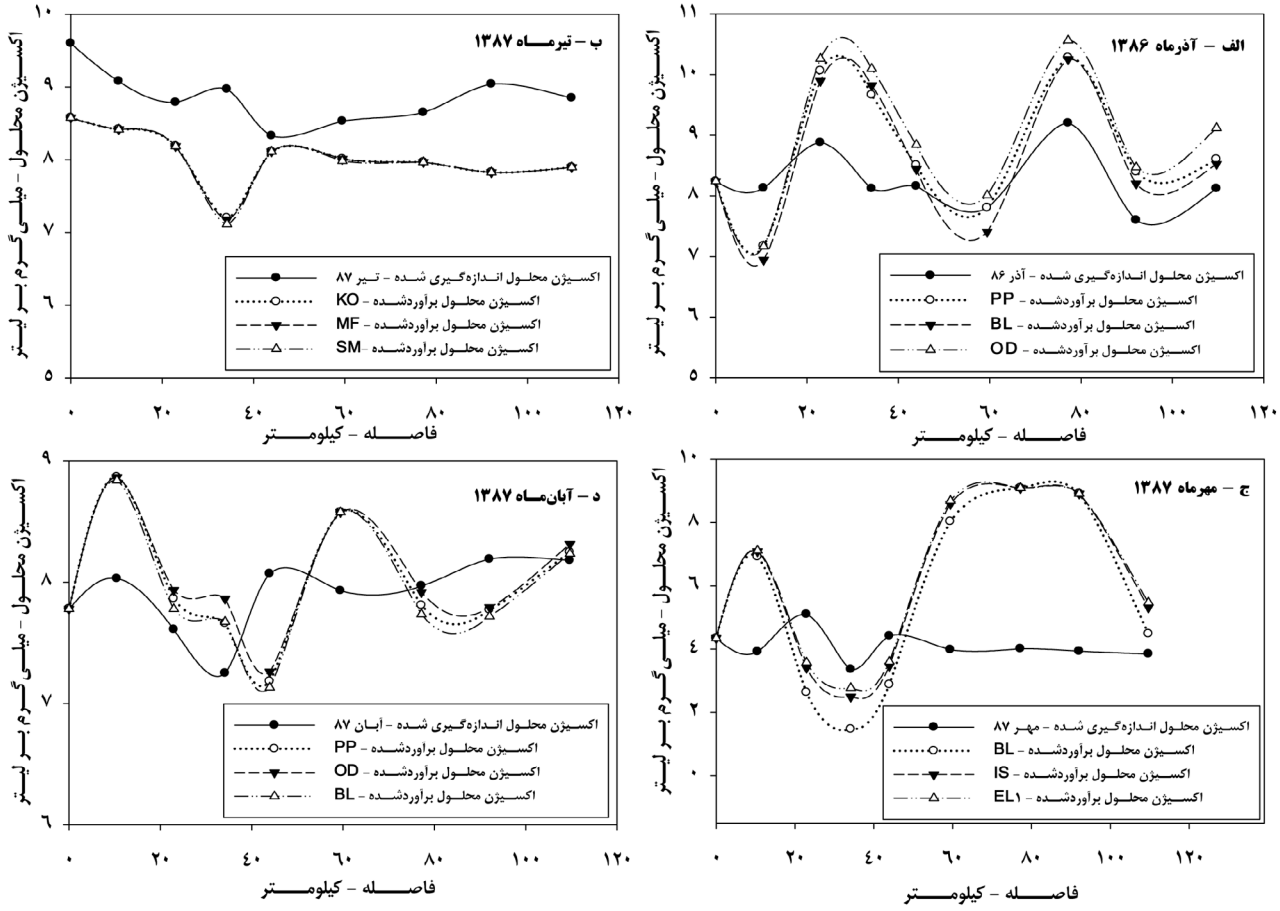
مقادیر مثبت و منفی پارامتر درصد اریبی (PBIAS) به ترتیب بیانگر کم‌برآورد و بیش‌برآورد مقادیر تخمینی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند [۲۹]. مقادیر درصد اریبی جدول ۳ نشان می‌دهد که در دوره‌های آذرماه ۱۳۸٦، مهرماه ۱۳۸۷ و آبان‌ماه ۱۳۸۷ معادلات از حدود ۱/۱ تا ٦۳/٦ درصد دچار بیش‌برآورد بوده‌اند و تنها در دوره تیرماه ۱۳۸۷ مقادیر اکسیژن محلول را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده‌اند. کمترین و بیشترین مقادیر مجموع مربعات باقیمانده‌ها با توجه به جدول ۳ مربوط به دوره‌های آبان‌ماه ۱۳۸۷ و مهرماه ۱۳۸۷ و به ترتیب برابر ۲/۳ و ۹۹/۸ می‌باشد.

نتیجه‌ی مهم جدول ۳ این است که با توجه به شرایط هیدرودینامیکی رودخانه که در طی سال متغیر می‌باشد، معادله‌ی مناسب جهت برآورد ضریب نرخ بازهوادهی متفاوت است. معادله‌ی PP [۳۵] در دوره‌های آذر۱۳۸٦ و آبان ۱۳۸۷ با بیش‌برآوردی از ۱/۱ تا ٦/۰ درصد دقیق‌ترین برآورد را از اکسیژن محلول داشته است. رتبه‌های اول، دوم و سوم دقیق‌ترین معادله به ترتیب در دوره‌های مهر ۱۳۸۷، آذر ۱۳۸٦ و آبان ۱۳۸۷ متعلق به معادله‌ی BL [۳] می‌باشد که با بیش‌برآوردی از ۰/٦ تا ۳۲/۱ درصد بهترین برآورد را از اکسیژن محلول داشته است. شکل ٤ مقادیر غلظت اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده در چهار دوره دادهٔ مورد بررسی مربوطه را به همراه مقادیر برآوردی آن از شبیه سازی اکسیژن محلول (با استفاده از معادله ۳ که در آن از سه معادله برتر جدول ۳ استفاده شده است) را نشان می‌دهد.

در بین نمودارهای چهارگانه ارائه شده در شکل ٤، شکل٤-د دارای بیشترین انطباق بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است. شکل ٤-د نشان می‌دهد که مدل‌سازی اکسیژن محلول با استفاده از روش استریتر – فلپس در آبان‌ماه ۱۳۸۷ به خوبی توانسته است برآورد مناسبی از اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده داشته باشد. اما قسمت (ج) شکل ٤ کمترین دقت روش مدل سازی را در برآورد اکسیژن محلول سفیدرود نشان می‌دهد. در حالی‌که شکل ٤-الف نشانگر هم‌روند بودن داده‌های اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده و

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤- مقادیر اکسیژن محلول اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده سفیدرود

Fig 4. Values of Measured and Simulated Dissolved Oxygen in Sefidroud

برآوردشده می‌باشد، شکل ٤-ب عدم پیروی روندها از یکدیگر را در بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآوردشده نشان می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر عملکرد ۲۹ معادله‌ی تخمین ضریب نرخ بازهوادهی در مدل‌سازی اکسیژن محلول سفیدرود طی چهار دوره‌ی آذرماه ۱۳۸٦، تیرماه ۱۳۸۷، مهرماه ۱۳۸۷ و آبان‌ماه ۱۳۸۷ ارزیابی شد. در مجموع معادله‌های PP [۳۵]، BL [۳] و OD [۳۲] بهترین معادلات در تخمین ضریب نرخ بازهوادهی سفیدرود از بین روابط مورد مطالعه می‌باشند. حیدر و همکاران [۱۷] عنوان کردند که رابطهٔ OD [۳۲] با مجموع مربعات باقیمانده‌های از ۰/۸۵ تا ۰/۸۹، معادله مناسبی برای تخمین ضریب نرخ بازهوادهی در رودخانه‌های با تغییرات زیاد جریان می‌باشد که با نتایج این تحقیق منطبق است. بطوری که در تحقیق حاضر نیز رابطه اکونر و دوبینز(OD) [۳۲] با مجموع مربعات باقیمانده‌هایی از ۲/۳ تا ۹۲/۹ دقت خوبی داشته اند هر چند که نسبت به نتایج حیدر و همکاران [۱۷] از دقت نسبتاً کمتری برخوردار است. کالبورگی و همکاران [۲۱] نتیجه گرفتند که معادله PP [۳۵] پس از روش جها و همکاران [۲۰] با خطای استاندارد و خطای میانگین ضربی به ترتیب برابر ۲/۲٤ و ۱/۵۸ بهترین تخمین را برای ضریب نرخ بازهوادهی داشته است. در مقاله حاضر حدود تغییرات مقادیر پارامترهای خطای استاندارد و خطای میانگین ضربی در معادله PP به ترتیب از ۰/۵۱ تا ۳/۱۹ و از ۱/۰۵ تا ۱/۷۳ بوده است که با نتایج کالبورگی و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. پالمبو و همکاران [۳٤] اظهار کردند که حتی بهترین معادله‌ها برای تخمین ضریب نرخ بازهوادهی خطایی از ٤۰ تا بیش از ۱۰۰ درصد دارند در حالی‌که در مقاله حاضر نتایج نشان داد که معادله PP [۳۵] از ۱/۱ تا ۳٦/۰ درصد خطا را نشان داد که دارای دقت بیشتری از گزارش پالمبو و همکاران [۳٤] می‌باشد.

سپاسگزاری

انجام تحقیق حاضر و تهیه مقالات مربوطه با استفاده از امکانات دانشگاه تهران و داده‌های برداشت شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست امکان پذیر شده است، که از هر دو تشکر و قدردانی می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

1. Alonso, C.V., McHenry, J. R. and Hong, J. C. S. 1975. The influence of suspended sediments on the reaeration of uniform streams. Water Research. 9: 695–700.

2. Ansaripour, A. H., Ebrahimi. K., and Omid, M. H. 2013. A Mathematical Model for River Flow Assimilation: A Case Study of Pasikhan River, Iran. Journal of Agricultural Engineering Research. 14(2):31-42. (In Persian)

3. Baecheler, J. V. and Lazo, O. L. 1999. Evaluation of water quality modeling parameters: reaeration coefficient. IAHR, Madrid.

4. Bennett, J. P. and Rathbun, R. E. 1972. Reaeration in open-channel flow. USGS Prof. Washington, DC.737p.

5. Black, W. M. and Phelps, E. B. 1911. The discharge of sewage New York Harbor. Report made to Board of estimate and apportionment, New York.

6. Boulton, N. S. 1954. The drawdown of the water table under non-steady condition near a pumped well in an unconfined formation. Porc. Inst. Civil Engineering. 3(4): 564-579.

7. Cadwallader, T. E. and McDonnel, A. J. 1969. A multivariate analysis of reaeration data. Water Research 3:731-742.

8. Churchill, M. A., Elmore, H. L. and Buckingham, R. A. 1962. The prediction of stream reaeration rates. Journal of Sanitary Engineering Division. 88(4):1–46.

9. Covar, A. P. 1976. Selecting the proper reaeration coefficient for use in water quality models. EPA Conferences on Environmental Simulation and Modeling, Cincinnati, OH.

10. Demars, B. O. L. and Manson, J.R. 2013. Temperature dependence of stream aeration coefficients and the effect of water turbulence: a critical review. Water Research 47(1): 1–15.

11. Dobbins, W. E. 1965. BOD and oxygen relationships in streams. Journal of the Sanitary Engineering Division. 90(3):53–78.

12. Draper, N. R. and Smith, H. 1998. Applied Regression Analysis (3rd edition). John Wiley. New York. 736p.

13. Eloubaldy, A. F. 1969. Wind wave and the reaeration coefficient in open channel flow. PhD Thesis. Colorado State University. Fort Collins, Colorado.

14. Environmental Protection Agency of IRAN. 2010. Prevent, control and reduce pollution Sefidroud River studies, Water pollution data analysis report. Volume 1. 398p. (In Persian)

15. Grant, R. S. 1976. Reaeration coefficient measurement of 10 small streams in Wisconsin using radioactive tracer with a section on the energy dissipation model. Geological Survey Water Resources Division: Madison, Wisconsin. 76–96. 50 p.

16. Gualtieri, C. and Gualtieri, P. 2004. Turbulence-based models for gas transfer analysis with channel shape factor influence. Environmental Fluid Mechanics 4: 249-271.

17. Haider, H., Ali, W. and Haydar, S. 2013. Evaluation of various relationships of reaeration rate coefficient for modeling dissolved oxygen in a river with extreme flow variations in Pakistan. Hydrological Processes. 27(26):3949-3963.

18. Holley, E. R. 1975. Oxygen transfer at the air–water interface, in interfacial transfer processes in water resources. State University. New York at Buffalo.

19. Jain, S. K. and Jha, R. 2005. Comparing the stream reaeration coefficient estimated from ANN and empirical models. Hydrological Science. 50(6):1037–1052.

20. Jha, R., Ojha, C. S. P., and Bhatia, K. K. K. 2001. Refinement of predictive reaeration equations for a typical river in India. Hydrological Processes. 15(6):1047-1060.

21. Kalburgi, P. B., Jha, R., Ojha, C. S. P. and Deshannavar, U. B. 2014. Evaluation of re-aeration equations for river Ghataprabha, Karnataka, India and development of refined equation. Environmental Technology.

22. Krenekl, P. A. and Orlob, G. T. 1962. Turbulent diffusion and the reaeration rate coefficient, Journal of the Sanitary Engineering Division. 88(2):53-116.

23. Langbein, W. B. and Durum, W. H. 1967. The aeration capacity of streams, USGS Survey Curriculum: Washington DC, 542p.

24. Lau, Y. L. 1972. Prediction equations for reaeration in open channel flow. Journal of the Sanitary Engineering Division. 98(6): 1063-1068.

25. Lehmann, E. L. 1951. A General Concept of Unbiasedness. The Annals of Mathematical Statistics. 22(4):587–592.

www.SID.ir

Archive of SID

26. Ling, L., Chunli, Q., Qidong, P., Zhifeng, Y. and Qianhong, G. 2010. Numerical simulation of dissolved oxygen supersaturation flow over the three gorges dam spillway. Tsinghua Science and Technology. 15(5):574-579.

27. Melching, C. S. and Flores, H. E. 1999. Reaeration equations derived from US geological survey database. Journal of Environmental Engineering. 125(5): 407-414.

28. Mogg, D. B. and Jirka, G. H. 1998. Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. Journal of Environmental Engineering. 124(2):104-110.

29. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50(3): 885–900.

30. Nazari, A., Ebrahimi, K. and Omid, M. H. 2013. Comparison of methods for estimating longitudinal dispersion coefficient in simulation of dissolved oxygen - River Pasikhan. 9th International River Engineering Conference. Shahid Chamran University. Ahvaz. (In Persian)

31. Negulescu, M. and Rojanski, V. 1969. Recent research to determine reaeration coefficient. Water Resources. 189-202.

32. O'Connor, D. J. and Dobbins, W. E. 1958. Mechanism of reaeration in natural streams. Transactions of the American Society of Civil Engineers.123:641–684.

33. Owens, M., Edwards, R. W. and Gibbs, J. W. 1964. Some reaeration studies in streams. International Journal of Air Water Pollution. 8(8/9):469–486.

34. Palumbo, J. E. and Brown, L. C. 2014. Assessing the Performance of Reaeration Prediction Equations. Journal of Environmental Engineering. 140(3): 04013013(7).

35. Parkhurst, J. D. and Pomeroy, R. D. 1972. Oxygen absorption in streams, Journal of the Sanitary Engineering Division. 98(1):101-124.

36. Shindala, A. and Trux, D. D. 1980. Reaerarion characteristics of small streams, engineering and industrial reaserch station, Mississippi state university, Mississippi.

37. Smoot, J. L. 1988. An examination of steam reaeration rate coefficients and hydraulic conditions in pool and riffle streams. PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University: Blacksburg. VA.

38. Streeter, H. W. and Phelps, E. B. 1925. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. Public Health Bulletin No. 146. Washington (DC): Public Health Service.

39. Streeter, H. W., Wright, C. T., and Kehr, R. W. 1936. Measure of natural oxidation in polluted streams. III. Exprimental study of atmospheric reaeration under stream flow conditions. Sewage works journal, 7(2):282-316.

40. Tackston, E. L. and Krenkel, P. A. 1969. Reaeration prediction in natural streams. Journal of the Sanitary Engineering Division. 95(1):65-94.

41. Takston, E. L. and Dawson, J. W. 2001. Recalibration of a reaeration equation. Journal of Environmental Engineering 127(4):317-321.

42. Thoman, R. V. 1972. System analysis and water quality measurement. Environmental research and application, McGraw-Hill Book Company Inc., New York.

43. Thomann, V. R. and Mueller, A. J. 1987. Principals of surface water quality modeling. Harper International Edition. Harper & Row: New York.

44. Thyssen, N. and Jeppesen, E. 1980. Genluftning I mindre vandlob. Wattern, In Denish. 36:231-248.

45. Thyssen, N., Erlandse, M., Jeppesen, E. and Ursin, C. 1987. Reaeration of oxygen in shallow, macrophyte rich streams: I-Determination of the reaeration rate coefficient. International Review of Hydrobiology 72(4):405-429.

46. Tsiovoglou, E. C. and Wallace, J. R. 1972. Characterization of stream reaeration capacity. Report No. EPA-R3-72-012. Washington (DC): US Environmental Protection Agency.

47. Tsiovoglou, E. C. and Neal, L. A. 1976. Tracer measurement of reaeration: IIIPredicting the reaeration capacity of inland streams. Journal of Water Pollution Control Federation. 48:2669-2689.

48. Zison, S., Mills, B. W., Diemer, D. and Chen, W. C. 1978. Rates, constants and kinetic formulations in surface water quality modeling. Athens: Tera Tech, Inc. USEPA, ORD. 455p.

49. Zogorski, J. S. and Faust, S. D. 1973. Atmospheric reaeration capacity of streams, Part II, Direct measurement of the atmospheric reaeration rate constant in the upper Raritan river basin. Environmental Letter. 4(1):61–85.

www.SID.ir