

## ارزیابی سالیانه ضریب نرخ بازهوادهی رودخانه کارون (بازه‌ی ایستگاه ملاثانی تا کوت امیر)

بنفشه عبداللہی<sup>۱</sup>، کیومرث ابراهیمی<sup>۲\*</sup>، شهاب عراقی نژاد<sup>۳</sup> و عبدالمجید لیاقت<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۴. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۷)

### چکیده

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدیریت کیفی منابع آب سطحی میزان اکسیژن محلول آن می‌باشد. ضریب نرخ بازهوادهی توصیف‌کننده جذب فیزیکی اکسیژن از اتمسفر به داخل آب است. مقادیر اکسیژن محلول در مدل‌سازی کیفی حساسیت زیادی حتی به تغییرات کم ضریب نرخ بازهوادهی داشته و برآورد صحیح آن بسیار مهم است. هدف اصلی مقاله حاضر انتخاب بهترین روابط برآورد ضریب نرخ بازهوادهی از بین ۲۹ رابطه پرکاربرد پیشنهادی بر اساس مدل‌سازی اکسیژن محلول برای رودخانه کارون در فصول مختلف می‌باشد. بدین منظور ۹۱ کیلومتر از رودخانه کارون و از ایستگاه ملاثانی تا کوت امیر انتخاب شد. از داده‌های ماهانه کمی و کیفی این رودخانه در سال‌های آبی ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۱-۱۳۹۰ و مدل Qual2Kw5.1 استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که رابطه TH در فصل پائیز، رابطه LA در فصول زمستان و بهار و رابطه JH در فصل تابستان با RMSE‌هایی به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۴۸، ۰/۲۹ و ۰/۲۹ و MBE‌هایی به ترتیب برابر با ۱/۷۸، ۰/۴۳، ۲/۴۷- و ۰/۶۷- بین اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در هر فصل دارای بهترین برآورد از ضریب نرخ بازهوادهی بوده و مقادیر ضریب نرخ بازهوادهی این رودخانه در فصول ذکر شده به ترتیب برابر ۰/۶۲، ۰/۲۳، ۰/۳۳ و ۱/۵۹ یک بر روز می‌باشد.

واژه های کلیدی: اکسیژن محلول، ضریب نرخ بازهوادهی، کارون، Qual2Kw5.1

### مقدمه

می‌شود (Hoseini, 2007). اگر ضریب نرخ بازهوادهی مورد استفاده در مدل‌ها از مقدار واقعی آن در جریان کمتر باشد مدل، بار آلودگی مجاز ورودی به جریان را کمتر از توان آن برآورد می‌کند که این منجر به صرف هزینه‌های گزاف برای تصفیه خواهد بود (John et al, 1984). در مقابل اگر ضریب نرخ بازهوادهی استفاده شده در مدل، بزرگ‌تر از ضریب واقعی جریان باشد مدل بار آلودگی تخصیص یافته به جریان را بیشتر از توان آن برآورد می‌کند و منجر به نقض استانداردهای کیفیت آب و به بار آمدن مشکلات زیست‌محیطی خواهد شد (Kilpatrick et al, 1989).

روش‌های اندازه‌گیری بازهوادهی عبارتند از تعادل اکسیژن محلول، اکسیژن‌زدایی، سنجش بهره‌وری، تعادل توزیعی، ردیاب گازی و استفاده از معادلات پیش‌بینی (Zison, 1978; Grant and Skavroneck, 1980 and Holley and Yotsukura, 1984). روش تعادل اکسیژن محلول به علت پتانسیل خطای بالا، روش اکسیژن‌زدایی به علت محدودیت استفاده تنها در آب‌های شفاف و تمیز، روش سنجش بهره‌وری به علت خطای بالای

غلظت اکسیژن محلول رودخانه، یکی از معیارهای اصلی در تعیین کیفیت آب رودخانه است (Meftah-Halghi and Mesgaran-Karimi, 2008). مدل‌های کیفیت آب برای برآورد غلظت اکسیژن محلول در آب چندین دهه است که مورد استفاده قرار می‌گیرند و یکی از مهم‌ترین تصمیم‌گیری‌ها هنگام استفاده از این مدل‌ها آگاهی از بهترین مقدار ضریب نرخ بازهوادهی است. این ضریب توصیف‌کننده جذب فیزیکی اکسیژن از اتمسفر به داخل آب است (Palumbo and Brown, 2013). مقادیر اکسیژن محلول در مدل‌سازی کیفی، حساسیت زیادی به تغییرات کم ضریب نرخ بازهوادهی از خود نشان می‌دهد (Jain and Jha, 2005). بنابراین برآورد صحیح ضریب نرخ بازهوادهی بسیار ضروری است. همچنین ارزیابی ضریب نرخ بازهوادهی جریان برای محاسبه ظرفیت خودپالایی استفاده

نتایج حاصل از این روابط را به وسیله دو پارامتر آماری ضریب همبستگی و مجموع مجذورات باقیماندهها ( $SSR^1$ )، با یکدیگر مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که روابط گروه اول که دارای دو پارامتر عمق و سرعت جریان بودند بهترین نتایج را از لحاظ پارامترهای آماری داشتند. Palumbo and Brown (2013) عملکرد کلی ۱۸ رابطه پیش‌بینی ضریب نرخ بازه‌دهی را با استفاده از معیارهای آماری مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که به ندرت رابطه‌ای در یک ناحیه سرعت-عمق بهترین عملکرد را خواهد داشت، بلکه معمولاً گروهی از معادلات دارای بهترین عملکرد خواهند بود. همچنین نمی‌توان رابطه‌ای را یافت که برای تمام شرایط هیدرولیکی بهترین عملکرد را داشته باشد. Kalburgi et al (2015)، تا از پرکاربردترین معادلات تجربی ضریب بازه‌دهی را در مکان‌های مختلف رودخانه Ghataprabha هند مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد رابطه پیش‌بینی توسعه یافته توسط Jha et al (2001) برای رودخانه‌های معمول در هند بهترین مقادیر SE، NME و همبستگی را بدست می‌دهد. Shokri et al (2015) به شبیه‌سازی کیفی آمونیم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده از مدل QUAL2Kw پرداختند. نتایج حاصل از صحت‌سنجی آن‌ها نشان داد مدل تطابق خوبی با واقعیت دارد. Moghimi-Nejad et al (2016) به مطالعه تغییرات فصلی پدیده خودپالایی رودخانه کارون پرداختند. برای این منظور در طول ۱۱۳ کیلومتر از رودخانه متغیرهای کیفی DO، BOD، نیترات و کلیرم را با استفاده از مدل Qual2Kw شبیه‌سازی و مطالعه کردند. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد تمام متغیرهای کیفی دارای کمترین مقدار خطای نسبی و مجذور مربعات خطا بوده‌اند. Kannel et al (2007) از مدل QUAL2Kw برای مدل‌سازی استفاده کردند و به مدیریت کیفیت آب رودخانه Bagmati در Nepal پرداختند. آن‌ها مدل یک بعدی کیفیت آب QUAL2Kw را با استفاده از داده‌های سال ۲۰۰۰ کالیبره و صحت‌سنجی کردند. نتایج نشان داد مدل، داده‌های صحرایی را به جز چند استثنا به خوبی شبیه‌سازی می‌کند.

برخی مدل‌های مهم کیفیت آب سطحی عبارتند از CE-QUAL-WASP، QUAL، QUASAR، Streeter-phelps، W2، BASINS و MIKE (Fan et al, 2009 و Morley, 2007). همچنین مدل‌های QUAL2E، WASP و QUASAR بهترین

ناشی از محاسبه هوادهی به صورت غیرمستقیم و روش تعادل توزیعی به علت تناقض در جواب‌ها قابل اطمینان نبودند (Holley and Yotsukura, 1984; Ghaly and Kok, 1988 and Zison, 1978). تا این که در سال ۱۹۶۵ روش اندازه‌گیری مستقیم ضریب نرخ بازه‌دهی توسعه داده شد که به موجب آن ردیاب رادیواکتیو گازی، گاز را به داخل جریان تزریق می‌کرد (Kilpatrick et al, 1989). روش‌های ردیابی می‌توانند بسیار دقیق و قابل اعتماد باشند اما به علت مشکلات اجرایی و نیز هزینه بالا، افراد به استفاده از معادلات پیش‌بینی روی آوردند (Grant and Skavroneck, 1980). بنابراین تعداد زیادی رابطه‌ی تجربی به منظور برآورد ضریب نرخ بازه‌دهی با استفاده از متغیرهای هیدرولیکی جریان مانند سرعت متوسط، میانگین عمق جریان، سرعت برشی جریان، عدد فرود، دبی جریان و شیب انرژی کانال پیشنهاد شده‌است (Kalburgi et al, 2015).

Mohammadi-Ghaleni et al (2015) ضریب نرخ بازه‌دهی رودخانه سفیدرود را مورد ارزیابی قرار دادند. هدف آن‌ها از این مطالعه، بررسی ۲۹ رابطه پرکاربرد پیشنهادی در برآورد ضریب نرخ بازه‌دهی رودخانه‌ها در قالب مطالعه موردی سفیدرود بود. نتایج تحقیق ایشان نشان داد رابطه PP دارای بیشترین دقت می‌باشد. همچنین Mohammadi-Ghaleni et al (2015b) میزان تأثیرپذیری اکسیژن محلول را به عنوان شاخص توان خودپالایی رودخانه از سه ضریب بازه‌دهی، پخش طولی و زوال مورد بررسی قرار دادند. ایشان از تکنیک‌های داده‌برداری میدانی از یک رودخانه و یک کانال بتنی به عنوان مدل فیزیکی و همچنین کاربرد تکنیک‌های عددی و مقایسه نتایج با کاربست مدل کیفی QUAL2Kw استفاده کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد رابطه‌های PP، BL و OD بهترین روابط در تخمین ضریب نرخ بازه‌دهی رودخانه سفیدرود از بین روابط مورد مطالعه می‌باشند. همچنین نتایج آنالیز حساسیت ایشان نشان داد، اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود بیشترین حساسیت را نسبت به ضریب بازه‌دهی دارد. Jha و همکاران (2001) ۱۱ رابطه پرکاربرد برای پیش‌بینی ضریب بازه‌دهی رودخانه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد روابط توسعه یافته توسط Smoot و نیز توسعه یافته توسط Cadwallader و McDonnell عملکرد بهتری داشته‌اند. Haider et al (2013) روابط ریاضی مختلفی را در مورد ضریب بازه‌دهی توسعه دادند. این روابط دارای پارامترهای مختلفی مانند عمق جریان، سرعت، عرض، شیب، عدد فرود، ضریب پخشیدگی مولکولی، ویسکوزیته سینماتیکی و عدد انتقال گاز رینولدز می‌باشد. ایشان ۲۹ رابطه موجود را به چهار دسته‌ی مختلف تقسیم کرده و

1. Sum of Square of Residuals

نسبتاً زیادی کاهش می‌یابد که می‌تواند بیانگر پایین بودن کیفیت آب رودخانه دز به دلیل ورود آلودگی به آن در پایین دست ایستگاه دزفول باشد. از طرف دیگر *Dezfooli et al* (2017) با استفاده از شبکه عصبی احتمالی (PNN) بعنوان یک جایگزین برای شاخص متداول و پرکاربرد NSFQWI به تعیین طبقه کیفیت آب رودخانه کارون پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که شبکه عصبی PNN تنها با استفاده از سه پارامتر کیفیت کدورت، کلیفرم مدفوعی و کل مواد جامد توانسته است با دقت بالا طبقه کیفیت آب رودخانه کارون را مشخص کند. بنابراین با توجه به اهمیت رودخانه کارون و نقصان پژوهش در زمینه نرخ بازهوادی برای این رودخانه، هدف از مقاله حاضر بررسی عملکرد روابط مختلف ضریب نرخ بازهوادی بر شبیه‌سازی اکسیژن محلول این رودخانه با استفاده از مدل *Qual2Kw* و در نهایت انتخاب بهترین روابط ضریب نرخ بازهوادی در هر فصل می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

در مقاله حاضر از اطلاعات کیفی و کمی شامل دمای آب، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیترات، هدایت الکتریکی، قلیائیت، دبی و عمق جریان رودخانه کارون در چهار ایستگاه ملائانی، زرگان، اهواز و کوت امیر در ماه‌های دو سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۱-۱۳۹۰ استفاده شد. مشخصات آماری پارامترهای کیفی و کمی استفاده شده این رودخانه در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱. مشخصات آماری پارامترهای کیفی و کمی رودخانه کارون

سال آبی	پارامتر	T (C°)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	NO3 (mg/l)	PO4 (µg/l)	EC (µs/m)	pH	Q (m3/s)	H (m)
۹۰-۱۳۸۹	بیشینه	۳۱/۰۰	۹/۸۰	۶/۲۲	۱۲/۳۲	۸۰/۰۰	۳۳۱۰/۰۰	۸/۱۵	۳۲۰/۲۰	۲/۸۳
	کمینه	۱۳/۰۰	۵/۳۲	۲/۰۲	۴/۳۱	۲/۰۰	۱۵۰۴/۰۰	۷/۰۰	۱۸۴/۲۲	۱/۳۵
	میانگین	۲۱/۸۲	۷/۴۳	۳/۵۹	۸/۳۶	۵۷/۱۰	۲۳۶۴/۶۱	۷/۷۴	۲۵۸/۷۹	۲/۰۶
۹۱-۱۳۹۰	انحراف معیار	۵/۷۶	-/۹۵	-/۸۲	۱/۴۶	۸۰/۳۱	۳۹۹/۰۳	-/۲۱	۵/۷۷	-/۳۷
	بیشینه	۳۵/۲۰	۸/۵۸	۴/۶۶	۷/۳۰	۲۰۶/۲۰	۳۱۸۵/۰۰	۸/۱۳	۳۲۹/۶۷	۲/۷۳
	کمینه	۱۴/۰۰	۵/۶۲	۲/۱۴	۱/۸۰	۸/۰۰	۱۲۷۱/۰۰	۷/۰۰	۲۰۹/۷۲	۱/۷۴
۹۱-۱۳۹۰	میانگین	۲۱/۲۲	۷/۰۱	۳/۵۰	۵/۶۷	۲۸/۷۲	۲۲۰۸/۱۵	۷/۷۰	۲۵۵/۶۰	۲/۰۸
	انحراف معیار	۵/۴۶	-/۷۳	-/۴۶	۱/۴۰	۳۱/۹۵	۳۸۸/۸۲	-/۱۷	۸/۷۳	-/۳۷

نشان می‌دهد (*Jain and Jha, 2005*) منطقی به نظر می‌رسد تا با بررسی تأثیر روابط تجربی برآورد ضریب نرخ بازهوادی بر مدل‌سازی اکسیژن محلول، بهترین این روابط برای رودخانه

مدل‌ها برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول در طول رودخانه‌ها و جریان‌ها می‌باشند (*Kannel et al, 2011*). *Yuceer et al* (2007)، اظهار داشتند اکثر مقالات مبین کارایی بالای مدل *Qual2E* در مدل‌سازی‌های کیفی بوده‌اند. مدل *Qual2Kw* نیز توسعه یافته مدل *Qual2E* است با قابلیت کالیبراسیون خودکار و در نظرگیری مواردی چون جلبک کف، تنفس هیپوفیز، شار حرارتی رسوب که نمونه قبلی خود چنین قابلیت‌هایی را نداشته است (*Chapra and Pelletier, 2003*) بنابراین با توجه به تحقیقات پیشین توسعه‌یافته‌ترین و کامل‌ترین مدل خانواده *QUAL* یعنی *QUAL2KW* در این مطالعه به کار گرفته شد.

به منظور مدیریت منابع اکسیژن محلول در جریان که می‌تواند با افزایش کیفیت فاضلاب ورودی به رودخانه و یا با کاهش مقدار تخلیه فاضلاب ورودی به رودخانه صورت گیرد؛ لازم است ضریب نرخ بازهوادی به دقت تعیین شود (*Kilpatrick et al, 1989*). با وجود تلاش‌های زیادی که در مورد توسعه روابط تجربی جهت برآورد ضریب نرخ بازهوادی صورت گرفته است؛ هر یک از این روابط تجربی برای محدوده‌ای از شرایط هیدرولیکی خاص مناسب بوده و یک رابطه عمومی دقیق برای برآورد ضریب نرخ بازهوادی در تمام شرایط هیدرولیکی وجود ندارد. رودخانه کارون از مهم‌ترین رودخانه‌های کشور است. (*Moravej et al, 2017*) کیفیت آب رودخانه کارون را بر اساس شاخص کیفیت آب و با استفاده از ابزار GIS و مدل‌سازی سری زمانی مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که کیفیت آب رودخانه کارون نسبت به گذشته اندکی بهبود یافته ولی با اتصال رودخانه دز، شاخص کیفیت آب به میزان

## تئوری

از آنجایی که مقادیر اکسیژن محلول در مدل‌سازی کیفی، حساسیت زیادی حتی به تغییرات کم ضریب نرخ بازهوادی

نرم افزار QUAL2Kw5.1 به منظور برآورد مناسب ضریب نرخ بازهوادی از این قابلیت برخوردار است که رابطه‌ای بین داده‌های عمق و سرعت جریان با ضریب نرخ بازهوادی بر اساس داده‌های وارد شده به مدل برآورد می‌کند و امکان برآورد ضریب نرخ بازهوادی برای هر بازه نیز وجود دارد، به طوری که تا وقتی مقادیر ضریب نرخ بازهوادی به صورت دستی به مدل وارد شده باشد گزینه‌های مربوط به انتخاب مدل برآورد ضریب نرخ بازهوادی غیرفعال خواهند بود (Ashegh-Moala, 2015).

در دهه‌های گذشته، محققان زیادی روابط پیشنهادی برآورد ضریب نرخ بازهوادی را بررسی کرده و سعی در ارزیابی کارایی این روابط داشته‌اند. در این تحقیق ابتدا ۲۹ رابطه‌ی تجربی اصلی و متداول در برآورد ضریب نرخ بازهوادی جمع‌آوری و بر اساس متغیرهای مورد نیاز در چهار گروه دسته‌بندی شدند (جدول ۲). مقادیر ضریب نرخ بازهوادی با استفاده از این روابط بدست آمد و به صورت دستی به عنوان ضریب نرخ بازهوادی به مدل داده شد، سپس اکسیژن محلول با استفاده از مدل، مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. سپس با محاسبه معیارهای آماری بین اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و اکسیژن محلول مشاهده‌ای بهترین روابط ضریب نرخ بازهوادی برای رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه و در فصول مختلف مشخص شد که در ادامه آورده شده‌اند.

### معیارهای آماری

میانگین مربع مجذور خطا (RMSE<sup>۱</sup>) و خطای استاندارد (SE<sup>۲</sup>) معیارهای آماری متداولی هستند که تفاوت میان مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقدار مشاهده‌ای را نشان می‌دهند. این معیارهای آماری ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای شبیه‌سازی یک مجموعه داده (داده‌های هم‌جنس) هستند و برای مقایسه چند مجموعه داده کاربرد ندارند. با توجه به این که میانگین مربع مجذور خطا متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر است مقایسه‌ی مقدار آن برای دو متغیر با واحدهای متفاوت (غیر هم‌جنس) درست نخواهد بود. بنابراین مقدار میانگین مربع مجذور خطا را به دامنه داده‌های مشاهده‌ای تقسیم کرده و آن را میانگین مربع خطای نرمال شده (NRMSE<sup>۳</sup>) می‌نامند. این معیار آماری برای مقایسه متغیرهایی با واحدهای متفاوت قابل استفاده بوده و کاربرد دارد. درصد میانگین انحراف خطا (MBE<sup>۴</sup>) بیانگر بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی یک رابطه است.

مورد مطالعه انتخاب شوند. مدل QUAL2Kw، مدلی برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه است. این مدل، مدلی یک‌بعدی است که در آن جریان آب دائمی غیریکنواخت و کیفیت آب پویا فرض شده است. این مدل به منظور تعیین غلظت پارامترهای کیفی به حل عددی معادلات حاکم بر آن می‌پردازد (Chapra et al, 2006).

رابطه عمومی موازنه جرم (General mass balance equation) برای جزء اصلی در ستون آب برای بازه  $i$  در مدل Qual2Kw به فرم رابطه (۱) تعریف می‌شود.

(رابطه ۱)

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{abs,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i + \frac{E'_{hyp,i}}{V_i} (c_{2,i} - c_i)$$

در رابطه (۱)،  $c_i$ ،  $c_{i+1}$  و  $c_{i-1}$  به ترتیب غلظت آب سطحی در بازه  $i$ ،  $i+1$  و  $i-1$  غلظت در ناحیه زیستی زیر رسوبات به میلی‌گرم بر لیتر،  $Q_i$  و  $Q_{i-1}$  به ترتیب دبی خروجی از بازه‌های  $i$  و  $i-1$  دبی خروجی از بازه  $i$  به مترمکعب بر روز،  $V_i$  حجم بازه  $i$  به مترمکعب،  $E'_{i-1}$  و  $E'_i$  به ترتیب پخش حجمی (Bulk dispersion coefficients) بین بازه‌های  $i$  و  $i+1$  و بازه‌های  $i-1$  و  $i$   $E'_{hyp,i}$  ضریب پخش حجمی بین ناحیه زیستی زیر رسوبات و بازه  $i$  به مترمکعب بر روز،  $S_i$  منابع و مصارف از حجم بازه  $i$ ، در نتیجه واکنش و انتقال جرم به میلی‌گرم در لیتر بر روز و  $W_i$  بار خروجی از جزء اصلی به بازه  $i$  به میلی‌گرم در روز می‌باشد.

رابطه توزیع اکسیژن محلول نیز با حذف اکسیژن خواهی رسوب، فتوسنتز و تنفس جلبکی و ثابت فرض کردن سرعت متوسط و سطح مقطع در طول بازه و همچنین عدم ورود و خروج جریان در طول بازه برای جریان غیردائمی به صورت رابطه ۲ قابل بیان است (EPA, 1983):

(رابطه ۲)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_a(C_s - C) - K_d L - \alpha_1 N - \alpha_2 P$$

در رابطه (۲)،  $C$  غلظت اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر)،  $u$  سرعت متوسط جریان رودخانه (متر بر ثانیه)،  $D_L$  ضریب پخش طولی (مترمربع بر ثانیه)،  $K_a$  ضریب بازهوادی (یک بر روز)،  $C_s$  غلظت اشباع اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر)،  $K_d$  ضریب زوال اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (یک بر روز)،  $L$  غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (میلی‌گرم بر لیتر)،  $\alpha_1$  ضریب زوال نیتروژن نیتراتی (یک بر روز)،  $\alpha_2$  ضریب زوال فسفات (یک بر روز)،  $N$  غلظت نیتروژن نیتراتی (میلی‌گرم بر لیتر) و  $P$  غلظت فسفات (میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد.

1. Root Mean Square Error
2. Standard Error
3. Normalized Root Mean Square Error
4. Mean Bias Error

باشد. درصد میانگین انحراف خطا مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Lehmann, 1951).

درصد میانگین انحراف خطای مثبت نشانگر کم‌برآوردی و درصد میانگین انحراف خطای منفی بیانگر بیش‌برآوردی یک مدل می‌-

جدول ۲. روابط تجربی ضریب نرخ بازهادهی رودخانه کارون (Haider et al, 2013)

سیستم مورد استفاده در استخراج رابطه	رابطه	نام رابطه	نام محققین	شماره
گروه ۱				
مدل مفهومی	$K_a = 3.93U^{0.5}H^{-1.5}$	OD	O'Connor and Dobbins, 1958	۱
رودخانه‌های بزرگ	$K_a = 5.026UH^{-1.67}$	CH	Churchill et al., 1962	۲
رودخانه‌های بزرگ و کوچک	$K_a = 5.32U^{0.67}H^{-1.85}$	OW	Owens et al., 1964	۳
رودخانه‌های بزرگ	$K_a = 5.134UH^{-1.33}$	LD	Langbein and Durum, 1967	۴
رودخانه‌های بزرگ و کوچک	$K_a = 5.5773U^{0.607}H^{-1.689}$	BR	Bennett and Rathburn, 1972	۵
رودخانه‌های متوسط تا بزرگ	$K_a = 4.1528U^{0.6}H^{-1.4}$	BA	Bansal, 1973	۶
رودخانه‌های کوهستانی	$K_a = 1.923U^{1.325}H^{-2.006}$	BL	Baecheler and Lazo, 1999	۷
رودخانه	$K_a = 5.792U^{0.5}H^{-0.25}$	JH	Jha et al., 2001	۸
فلوم استوانه‌ای چرخشی	$K_a = 4.753UH^{-1.5}$	IG	Isaacs and Gaudy, 1968	۹
فلوم چرخشی	$K_a = 4.05UH^{-1.5}$	EL1	Eloubaldy, 1969	۱۰
فلوم استوانه‌ای چرخشی	$K_a = 3.6UH^{-1.5}$	IS	Isaacs et al., 1969	۱۱
فلوم چرخشی	$K_a = 10.9U^{0.85}H^{-0.85}$	NR	Negulescu and Rojanski, 1969	۱۲
فلوم چرخشی	$K_a = 4.54(U/H^{1.5})^{0.703}$	PG	Padden and Gloyna, 1972	۱۳
گروه ۲				
فلوم چرخشی	$K_a = 173(SU)^{0.404}H^{-0.66}$	KO	Krenkl and Orlob, 1962	۱۴
-	$K_a = 186(SU)^{0.5}H^{-1}$	CM	Cadwallader and McDonnel, 1969	۱۵
نهرها	$K_a = 3170S$	TN	Tsiouglou and Neal, 1976	۱۶
نهرهای کوچک	$K_a = 22700S$	GR	Grant, 1976	۱۷
نهرهای کوچک	$K_a = 8784U^{0.743}S^{0.93}H^{-0.42}$	TH	Thyseen et al., 1987	۱۸
-	$K_a = 543S^{0.6236}U^{0.5325}H^{-0.7258}$	SM	Smoot, 1998	۱۹
-	$K_a = 1740U^{0.46}S^{0.79}H^{0.74}$	MJ	Mogg and Jirka, 1998	۲۰
نهرها و رودخانه‌های بزرگ	$K_a = 596(US)^{0.528}Q^{-0.136}$	MF	Melching and Flores, 1999	۲۱
گروه ۳				
رودخانه‌های بزرگ	$K_a = 0.00012(1 + F^{1/2})u^*H^{-1}$	TK	Tackston and Krenkel, 1969	۲۲
فلوم چرخشی	$K_a = 154u^*H^{-1}$	EL2	Eloubaldy, 1969	۲۳
رودخانه‌های بزرگ	$K_a = 25067(U/H)(u^*/U)^3$	LA	Lau, 1972	۲۴
نهرها و رودخانه‌ها	$K_a = 23.040(1 + 0.17F^2)(SU)^{0.375}H^{-1}$	PP	Parkhurst and Pomeroy, 1972	۲۵
فلوم چرخشی	$K_a = 123u^*H^{-1}$	AL	Alonso et al., 1975	۲۶
رودخانه‌های کوچک	$K_a = 2300U^{0.76}(1 + F)^{2.66}S^{1.13}H^{-0.60}$	TJ	Thyssen and Jeppesen, 1980	۲۷
رودخانه‌های بزرگ	$K_a = 0.00002(1 + 9F^{1/4})u^*H^{-1}$	TD	Takston and Dawson, 2001	۲۸
گروه ۴				
فلوم	$K_a = (D_m)^{2/3}(gS/2\nu R_{g-t})^{1/3}H^{-1}$	GG	Gualtieri and Gualtieri, 2004	۲۹

مجموعه داده‌هایی از جنس‌های متفاوت استفاده شود. بنابراین از معیارهای آماری NRMSE و SE در این مراحل استفاده شد. در مرحله‌ی بررسی ضریب نرخ بازهادهی، از آنجایی که تنها پارامتر مورد بررسی اکسیژن محلول می‌باشد می‌توان از RMSE که برای یک مجموعه داده کاربر دارد، استفاده کرد. همچنین

با توجه به مطالب گفته‌شده منطقی به نظر می‌رسد تا در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل که داده‌هایی از جنس‌های متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند برای بررسی نتایج از دو معیار آماری مختلف یکی برای بررسی منحصرأ مجموعه داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی هم‌جنس و دیگری برای مقایسه‌ی

برای تشخیص تأثیر روابط مختلف ضریب نرخ بازه‌دهی بر روی کم برآوردی و یا بیش برآوردی مدل از MBE استفاده شد.

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (C_{m,i} - C_{p,i})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{C_{m,Max} - C_{m,Min}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$SE = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(C_{p,i} - C_{m,i})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$MBE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (C_{m,i} - C_{p,i}) \times 100}{\sum_{i=1}^N C_{m,i}} \right] \quad (\text{رابطه ۶})$$

در روابط سه تا شش مقدار  $C_{m,i}$  مقدار داده مشاهده‌ای،  $C_{p,i}$  مقدار داده شبیه‌سازی و  $N$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

#### نتایج صحت‌سنجی و واسنجی مدل

نتایج واسنجی مدل هیدرودینامیکی رودخانه کارون در بازه‌ی ملاثانی- کوت امیر در جدول (۳) قابل مشاهده است. با توجه به

جدول (۳) مشخص می‌شود، مدل در تمامی فصول برای دبی، عمق جریان و سرعت جریان دارای کمترین مقادیر NRMSE و SE می‌باشد. با توجه به معیار NRMSE که معیاری است برای مقایسه متغیرهایی با جنس‌های متفاوت، می‌توان دریافت، مدل عمق جریان را نسبت به دبی و سرعت جریان با دقت بالاتری شبیه‌سازی کرده است و NRMSE برای عمق جریان به طور متوسط با مقدار ۰/۱۹ از مقادیر NRMSE برای دبی و سرعت جریان در فصول مختلف کمتر است. بیشترین مقدار متوسط NRMSE نیز با مقدار ۰/۹۶ مربوط به دبی بوده و مدل در شبیه‌سازی آن از دقت کمتری برخوردار می‌باشد.

معیار SE که در مقایسه‌ی دقت مدل برای متغیرهایی از یک جنس کاربرد دارد، نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی دبی و عمق جریان فصل بهار با مقادیر SE به ترتیب برابر با ۱۲/۲۸ و ۰/۱۹ عملکرد بهتری داشته است. همچنین بهترین عملکرد مدل در شبیه‌سازی سرعت جریان با SE برابر با ۰/۰۶ مربوط به فصل پائیز است. ضعیف‌ترین عملکرد مدل نیز در شبیه‌سازی هر سه پارامتر دبی، عمق جریان و سرعت جریان مربوط به فصل تابستان و با مقادیر SE به ترتیب برابر با ۱۸/۵۰، ۰/۳۰ و ۰/۰۸ می‌باشد. بهترین مقادیر هر یک از معیارهای آماری با خط کشیدن زیر آن‌ها و بدترین آن با برجسته کردن آن‌ها در جدول (۳) مشخص شده است.

جدول ۳. معیارهای آماری بدست آمده در مرحله واسنجی مدل هیدرودینامیکی

سال آبی ۱۳۸۹-۹۰	SE			NRMSE		
	دبی	عمق جریان	سرعت جریان	دبی	عمق جریان	سرعت جریان
پائیز	۰/۹۳	۰/۲۰	۰/۱۳	۱۲/۷۱	۰/۲۸	۰/۰۶
زمستان	۰/۹۲	۰/۱۸	۰/۴۵	۱۳/۰۷	۰/۲۰	۰/۰۷
بهار	۱/۰۹	۰/۲۰	۰/۳۳	۱۲/۲۸	۰/۱۹	۰/۰۸
تابستان	۰/۹۱	۰/۲۰	۰/۲۴	۱۸/۵۰	۰/۳۰	۰/۰۸
میانگین	۰/۹۶	۰/۱۹	۰/۲۹	۱۴/۱۴	۰/۲۴	۰/۰۷

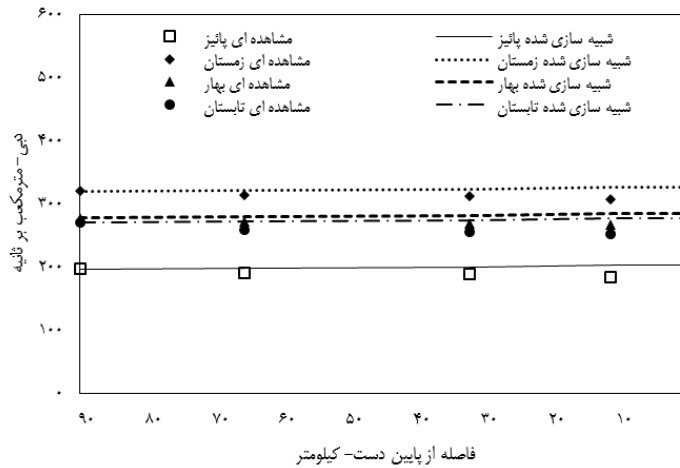
مقادیر NRMSE و SE بوده و عملکردی مطلوب دارد. بررسی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد، معیار NRMSE که معیاری است برای مقایسه متغیرهایی با جنس‌های متفاوت، برای عمق جریان نسبت به دبی و سرعت جریان با مقدار متوسط ۰/۱۲ کمتر می‌باشد و در نتیجه مدل در شبیه‌سازی عمق جریان دقت بالاتری دارد. بیشترین مقدار متوسط NRMSE نیز با مقدار ۰/۹۶ مربوط به دبی بوده و مدل در شبیه‌سازی آن از دقت کمتری برخوردار می‌باشد. مدل در شبیه‌سازی سرعت جریان دارای NRMSE برابر با ۰/۲۶ بوده و دقت آن در شبیه‌سازی این پارامتر مابین دقت مدل در شبیه‌سازی دبی و عمق جریان قرار دارد. با توجه

به طور نمونه نتایج واسنجی دبی مدل برای فصول مختلف سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ در شکل (۱) نشان داده شده است. واضح است که دبی مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل بسیار به یکدیگر نزدیک هستند و اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین آن‌ها وجود ندارد. با توجه به شکل (۱) می‌توان دریافت دبی فصل زمستان سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ از سایر فصول بیشتر بوده و دبی فصل پائیز کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است.

برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ استفاده شد. جدول (۴) نتایج را نشان می‌دهد. مدل به طور کلی در تمامی فصول برای دبی، عمق و سرعت جریان دارای کمترین

شبیه‌سازی سرعت جریان بیش از دقت مدل در شبیه‌سازی دبی می‌باشد.

به جدول (۳) و جدول (۴) نتایج حاصله با نتایج واسنجی مدل مشابه است به طوری که دقت مدل در شبیه‌سازی عمق جریان بیش از دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت جریان و دقت مدل در



شکل ۱. دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

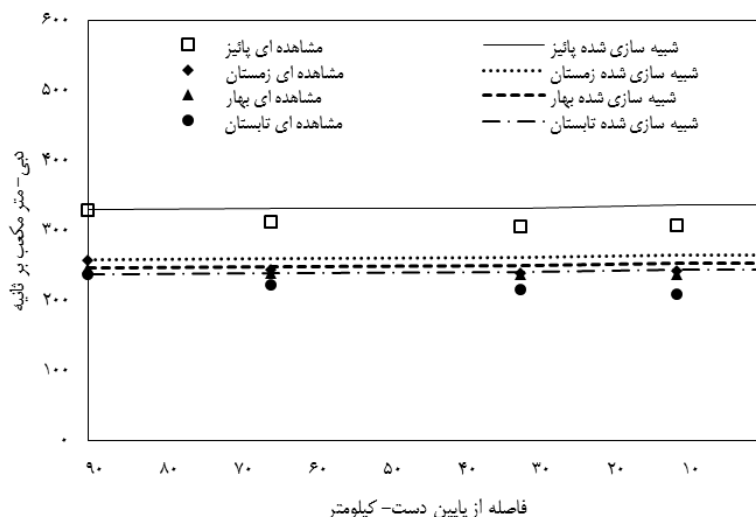
۰/۰۶ افزایش پیدا کرده‌اند که البته این افزایش دقت در مورد عمق جریان چشمگیرتر است. بدین ترتیب در مرحله صحت-سنجی دقت مدل در شبیه‌سازی دو پارامتر از سه پارامتر بهبود یافته است. بهترین مقادیر هر یک از معیارهای آماری با خط کشیدن زیر آن‌ها و بدترین آن با برجسته کردن آن‌ها در جدول (۴) مشخص شده است.

شکل (۲) به طور نمونه نشان‌دهنده نتایج صحت‌سنجی مدل برای دبی در فصول مختلف سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ می‌باشد. در این شکل به وضوح مشخص است؛ مدل در مرحله صحت-سنجی عملکرد مناسبی داشته و مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. با توجه به شکل می‌توان دریافت در تمامی فصول دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل اندکی بیشتر از دبی مشاهده‌ای است. همچنین در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ دبی در فصل پائیز بیشتر از دبی سایر فصول است.

معیار SE که در مقایسه‌ی دقت مدل برای متغیرهایی از یک جنس کاربرد دارد، نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی دبی، عمق و سرعت جریان در فصل بهار به ترتیب با مقادیر ۱۲/۳۴، ۰/۰۸ و ۰/۰۴ بیشترین دقت را داشته است که نتیجه حاصله نتایج واسنجی مدل هماهنگی دارد با این تفاوت که در مرحله صحت‌سنجی، دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت و عمق جریان در فصل بهار افزایش یافته و در شبیه‌سازی دبی تقریباً ثابت مانده است. ضعیف‌ترین شبیه‌سازی‌های دبی، عمق جریان و سرعت جریان به ترتیب با مقادیر SEهایی برابر با ۲۵/۳۸، ۰/۲۲ و ۰/۰۸ مربوط به فصول تابستان، زمستان و پائیز می‌باشند. با توجه به جدول (۳) و جدول (۴) دقت مدل در شبیه‌سازی دبی از میانگین SE برابر با ۱۴/۱۴ به میانگین SE برابر با ۲۰/۷۰ کاهش پیدا کرده است اما دقت مدل در شبیه‌سازی عمق و سرعت به ترتیب از میانگین SEهایی برابر با ۰/۲۴ و ۰/۰۷ در مرحله واسنجی به میانگین SEهایی به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و

جدول ۴. معیارهای آماری بدست آمده در مرحله صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیکی

سال آبی ۹۱-۱۳۹۰	SE		NRMSE	
	عمق جریان	دبی	سرعت جریان	عمق جریان
پائیز	۰/۱۶	۲۴/۶۹	۰/۲۵	۰/۱۰
زمستان	۰/۲۲	۲۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۱۸
بهار	۰/۰۸	۱۲/۳۴	۰/۲۳	۰/۰۷
تابستان	۰/۱۴	۲۵/۳۸	۰/۳۲	۰/۱۵
میانگین	۰/۱۵	۲۰/۷۰	۰/۲۶	۰/۱۲



شکل ۲. دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

قلیائیت کمترین و یا بسیار نزدیک به کمترین مقدار آن بوده است. SE برای پارامترهای کیفی اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، نیترات، فسفر کل، هدایت الکتریکی و قلیائیت این فصل به ترتیب برابر با ۰/۲۰، ۰/۲۷، ۰/۶۰، ۶/۲۸، ۲۳۲/۴۰ و ۰/۵۸ هستند. بهترین مقادیر شبیه‌سازی شده برای قلیائیت با SE برابر با ۰/۲۹ مربوط به تابستان می‌باشد. اکسیژن خواهی بیوشیمیایی نیز در فصل زمستان توسط مدل به بهترین صورت ممکن در مقایسه با سایر فصول با SE برابر با ۰/۲۶ شبیه‌سازی شده است. ضعیف‌ترین عملکرد مدل در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی اکسیژن محلول و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی با SE به ترتیب برابر ۰/۴۸ و ۰/۴۵ مربوط به فصل بهار است. شبیه‌سازی نیترات، فسفر کل و هدایت الکتریکی به ترتیب با مقادیر SE برابر با ۱/۹۱، ۶/۲۸ و ۱۱۰۳/۶۵ کم‌دقت‌ترین شبیه‌سازی پارامترهای مذکور توسط مدل بوده و مربوط به فصل زمستان می‌باشند. قلیائیت شبیه‌سازی شده فصل پاییز نیز با بیشترین مقدار SE برابر با ۰/۵۸ ضعیف‌ترین مقدار شبیه‌سازی شده پارامتر مذکور توسط مدل در بین سایر فصول می‌باشد. بهترین مقادیر هر یک از معیارهای آماری با خط کشیدن زیر آن‌ها و بدترین آن با برجسته کردن آن‌ها در جدول (۵) مشخص شده است.

به طور نمونه نتایج واسنجی کیفی مدل برای اکسیژن محلول در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده به اکسیژن محلول مشاهده‌ای بسیار نزدیک است و مدل در شبیه‌سازی اکسیژن محلول از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

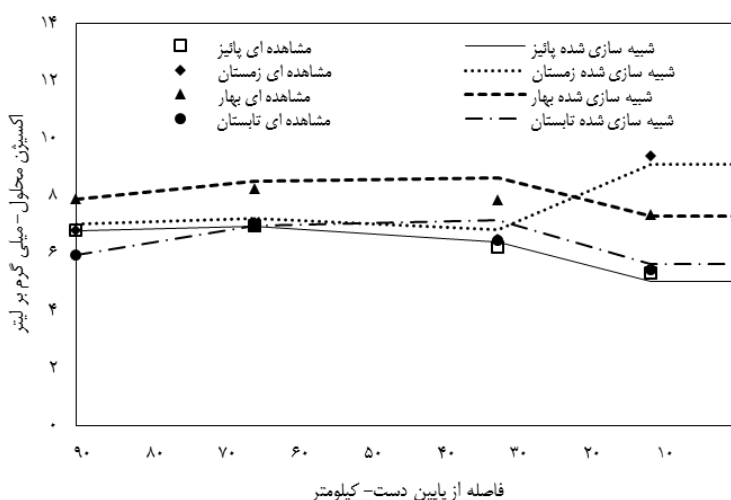
مدل کیفی رودخانه کارون در بازه ملائانی- کوت امیر برای فصول مختلف سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ با توجه به پارامترهای اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD)، نیترات (NO<sub>3</sub>)، فسفر کل (TP)، هدایت الکتریکی (EC) و قلیائیت (pH) واسنجی شد. با توجه به جدول (۵) مشخص می‌شود، مدل در تمامی فصول برای پارامترهای واسنجی شده دارای کمترین مقادیر NRMSE و SE می‌باشد. نتایج واسنجی مدل کیفی رودخانه کارون در بازه ملائانی- کوت امیر در جدول (۵) قابل مشاهده است. با توجه به معیار NRMSE که معیاری است برای مقایسه متغیرهایی از جنس‌های متفاوت می‌توان دریافت مدل، اکسیژن محلول را نسبت به سایر پارامترهای کیفی با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرده است. میانگین این معیار آماری برای اکسیژن محلول برابر با ۰/۲۲ می‌باشد. بعد از اکسیژن محلول مدل در شبیه‌سازی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی و نیترات دقت یکسان و بالاتری نسبت به سایر پارامترهای کیفی با میانگین NRMSE برابر با ۰/۴۸ داشته است. دقت مدل در شبیه‌سازی فسفر کل و قلیائیت با میانگین NRMSE‌هایی یکسان و برابر با ۰/۵۷ در مرتبه پائین‌تری قرار می‌گیرد و در آخر دقت مدل در شبیه‌سازی هدایت الکتریکی با NRMSE برابر با ۰/۶۷ از سایر پارامترهای کیفی شبیه‌سازی شده کمتر است.

معیار SE که در مقایسه‌ی دقت مدل برای متغیرهایی از یک جنس کاربرد دارد، نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی تمامی پارامترهای کیفی در فصل پاییز بیشترین دقت را داشته است و مقادیر SE برای تمامی پارامترهای کیفی این فصل به جز



جدول ۵. معیارهای آماری بدست آمده در مرحله واسنجی مدل کیفی

سال آبی ۱۳۸۹-۹۰	DO	BOD	NO3	TP	EC	pH
پائیز	۰/۱۲	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۳۷	۰/۶۲	۰/۵۶
زمستان	۰/۰۹	۰/۵۳	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۶۷	۰/۶۸
بهار	۰/۴۴	۰/۹۶	۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۶۱	۰/۳۵
تابستان	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۷۱	۰/۸۰	۰/۶۸
میانگین	۰/۲۲	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۵۷
پائیز	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۶۰	۶/۲۸	۲۳۲/۴۰	۰/۵۸
زمستان	۰/۳۴	۰/۲۶	۱/۹۱	۳۱/۲۹	۱۱۰۳/۶۵	۰/۴۳
بهار	۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۶۵	۲۰/۱۴	۵۹۰/۳۷	۰/۳۹
تابستان	۰/۴۳	۰/۴۳	۱/۰۲	۲۰/۱۸	۳۰۰/۸۱	۰/۲۹
میانگین	۰/۳۶	۰/۳۵	۱/۰۴	۱۹/۴۷	۵۵۶/۸۰	۰/۴۲



شکل ۳. اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

مرحله صحت‌سنجی در بین سایر پارامترهای کیفی بوده است. با توجه به جدول (۵) و جدول (۶) نتایج صحت‌سنجی تا حدودی با نتایج واسنجی مشابه است به طوری که در حالت صحت‌سنجی نیز مانند حالت واسنجی دقت مدل در شبیه‌سازی اکسیژن محلول بیشتر از دقت مدل در شبیه‌سازی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی می‌باشد. همچنین دقت مدل در شبیه‌سازی نیترات بیشتر از دقت مدل در شبیه‌سازی قلیائیت و فسفر کل است و دقت مدل در شبیه‌سازی قلیائیت و فسفر کل بسیار نزدیک بهم و بیشتر از دقت مدل در شبیه‌سازی هدایت الکتریکی می‌باشد. با این حال نتایج مرحله واسنجی مدل با نتایج صحت‌سنجی مدل تفاوت‌هایی نیز دارد بدین ترتیب که دقت مدل در مرحله صحت‌سنجی در شبیه‌سازی نیترات، قلیائیت، فسفر کل و هدایت الکتریکی بیشتر از دقت مدل در شبیه‌سازی اکسیژن محلول و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی می-

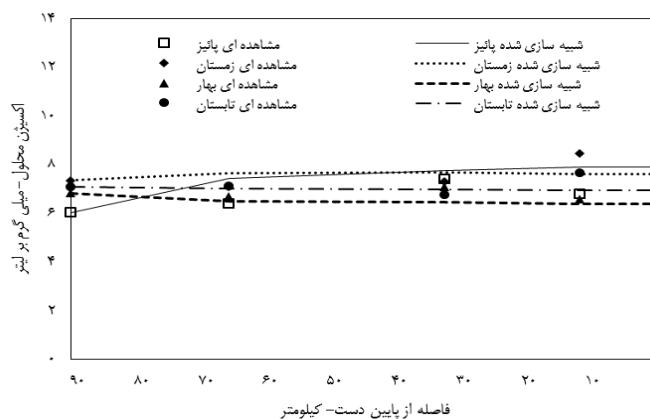
نتایج صحت‌سنجی مدل کیفی رودخانه کارون در بازه‌ی ملاثانی- کوت امیر در جدول (۶) قابل مشاهده است. با توجه به جدول (۶) مشخص می‌شود، مدل در تمامی فصول برای پارامترهای صحت‌سنجی شده دارای کمترین NRMSE و SE می‌باشد. با توجه به معیار NRMSE که معیاری است برای مقایسه متغیرهایی از جنس‌های متفاوت، می‌توان دریافت مدل نیترات را نسبت به سایر پارامترهای کیفی با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرده است. میانگین این معیار آماری برای نیترات برابر با ۰/۳۸ می‌باشد. بعد از آن مدل در شبیه‌سازی قلیائیت، فسفر کل، هدایت الکتریکی و اکسیژن محلول به ترتیب با میانگین NRMSE‌هایی برابر با ۰/۴۲، ۰/۴۳، ۰/۴۹ و ۰/۵۱ دقت کمتری داشته است. ضعیف‌ترین شبیه‌سازی کیفی مدل در مرحله صحت‌سنجی مربوط به اکسیژن خواهی بیوشیمیایی با NRMSE برابر ۰/۷۳ می‌باشد که بیشترین مقدار NRMSE در

باشد اما در مرحله‌ی واسنجی این نتیجه برعکس بود. معیار SE که در مقایسه‌ی دقت مدل برای یک جنس متغیر کاربرد دارد، نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی و قلیائیت با مقادیر SE‌هایی به ترتیب برابر با ۰/۵۰ و ۰/۱۲ در فصل پائیز بیشترین دقت را داشته است. همچنین در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی نیترات و فسفر کل با SE‌هایی به ترتیب برابر با ۰/۲۱ و ۲/۲۰ در فصل بهار عملکرد بهتری داشته است. بهترین شبیه‌سازی پارامترهای کیفی اکسیژن محلول و هدایت الکتریکی نیز با SE‌هایی به ترتیب برابر با ۰/۳۸ و ۳۱۲/۳۰ مربوط به فصل تابستان است. مدل در شبیه‌سازی تمامی پارامترهای کیفی فصل پائیز به جز اکسیژن خواهی بیوشیمیایی و قلیائیت کمترین دقت را داشته است و مقادیر SE برای پارامترهای کیفی اکسیژن محلول، نیترات، فسفر کل و هدایت الکتریکی این فصل به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۲/۳۶، ۱۰/۱۵ و ۷۰۹/۳۲ است. ضعیف‌ترین نتایج شبیه‌سازی پارامترهای کیفی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی و قلیائیت نیز مربوط به فصل تابستان با مقادیر SE‌هایی به ترتیب برابر ۱/۱۰ و ۰/۲۶ می‌باشد. با توجه به جدول (۵) و جدول (۶) می‌توان دریافت دقت مدل در شبیه‌سازی اکسیژن محلول و

اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در مرحله صحت‌سنجی کاهش پیدا کرده است به این نحو که مقادیر میانگین SE برای پارامترهای مذکور از مقادیر ۰/۳۴ و ۰/۳۵ در مرحله‌ی واسنجی به مقادیر ۰/۵۸ و ۰/۷۲ در مرحله صحت‌سنجی افزایش یافته‌اند. با این حال دقت مدل در شبیه‌سازی نیترات، فسفر کل، هدایت الکتریکی و قلیائیت در مرحله صحت‌سنجی افزایش یافته است به این نحو که مقادیر میانگین SE برای پارامترهای مذکور به ترتیب از مقادیر ۱/۰۴، ۱۹/۴۷، ۵۵۶/۸۰ و ۰/۴۲ به مقادیر ۱/۰۱، ۴/۶۵، ۵۱۵/۲۷ و ۰/۲۰ کاهش یافته است. بدین ترتیب در مرحله صحت‌سنجی دقت مدل در شبیه‌سازی چهار پارامتر از شش پارامتر کیفی بهبود یافته است. بهترین مقادیر هر یک از معیارهای آماری با خط کشیدن زیر آنها و بدترین آنها با برجسته کردن آنها در جدول (۶) مشخص شده است. به طور نمونه نتایج صحت‌سنجی کیفی مدل برای اکسیژن محلول در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده به اکسیژن محلول مشاهده‌ای بسیار نزدیک است و مدل در شبیه‌سازی اکسیژن محلول از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

جدول ۶. معیارهای آماری بدست آمده در مرحله صحت‌سنجی مدل کیفی

سال آبی ۹۱-۱۳۹۰	DO	BOD	NO <sub>3</sub>	TP	EC	pH
پائیز	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۲۹
زمستان	۰/۴۰	۰/۶۱	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۰
بهار	۰/۶۵	۱/۰۹	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۵۷
تابستان	۰/۴۲	۰/۷۳	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۱
میانگین	۰/۵۱	۰/۷۳	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۴۲
پائیز	۰/۹۳	۰/۵۰	۲/۳۶	۱۰/۱۵	۷۰۹/۳۲	۰/۱۲
زمستان	۰/۶۳	۰/۵۷	۰/۷۱	۲/۴۳	۵۶۳/۳۵	۰/۱۹
بهار	۰/۳۹	۰/۷۳	۰/۲۱	۲/۲۰	۴۷۶/۰۹	۰/۲۳
تابستان	۰/۳۸	۱/۱۰	۰/۷۶	۳/۸۰	۳۱۲/۳۰	۰/۲۶
میانگین	۰/۵۸	۰/۷۲	۱/۰۱	۴/۶۵	۵۱۵/۲۷	۰/۲۰



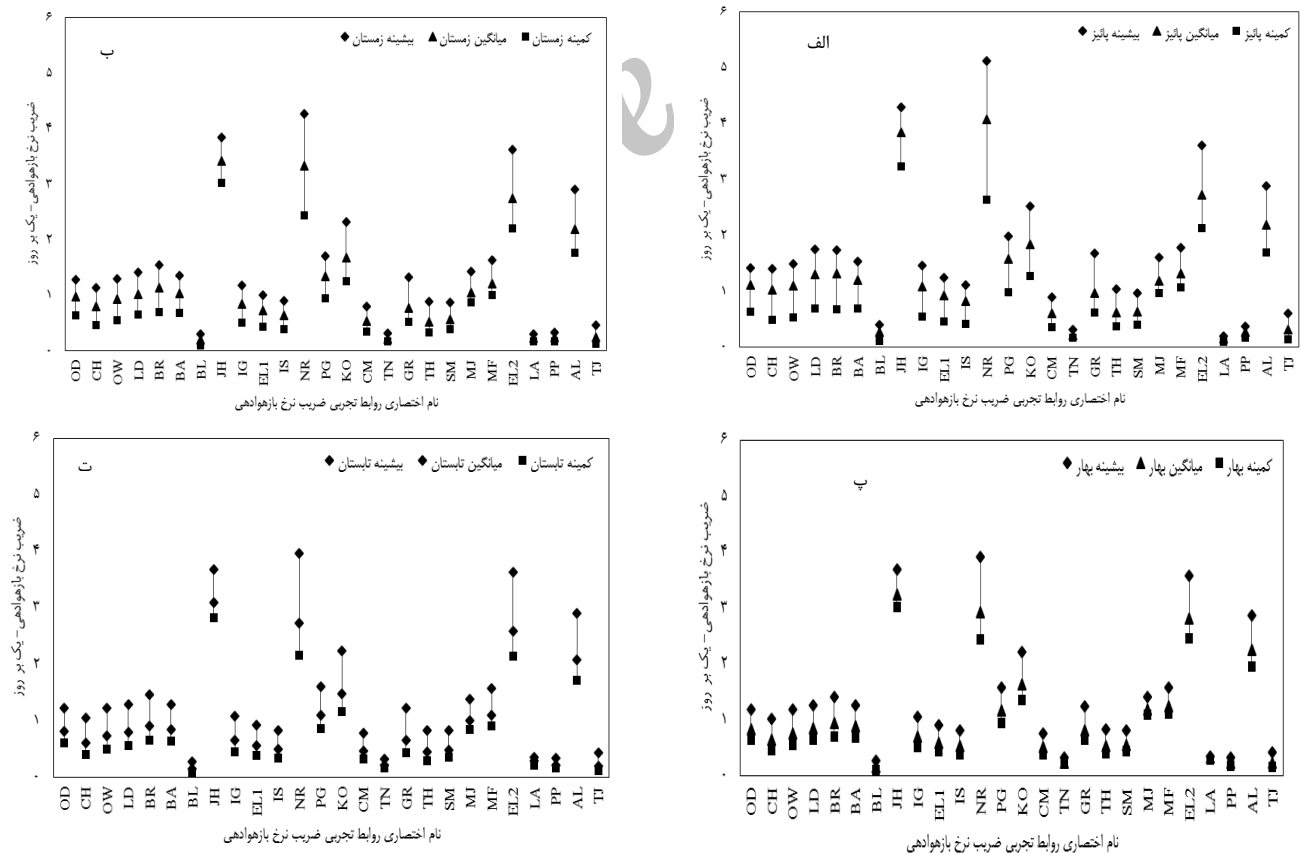
شکل ۴. اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

استفاده از ۲۶ رابطه باقی‌مانده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بیشترین مقدار ضریب نرخ بازهادهی در فصل پائیز برابر با ۵/۱۲ یک بر روز، مربوط به رابطه تجربی NR و کمترین آن برابر با ۰/۰۹ یک بر روز، مربوط به رابطه تجربی LA می‌باشد. با توجه به شکل (۵) قسمت ب، مقادیر کمینه و بیشینه ضریب نرخ بازهادهی رودخانه کارون در فصل زمستان به ترتیب برابر با ۴/۲۷ یک بر روز، حاصل از رابطه تجربی NR و ۰/۱ یک بر روز، حاصل از رابطه تجربی BL است. تغییرات ضریب نرخ بازهادهی در فصل بهار بین ۳/۹۲ و ۰/۱ یک بر روز می‌باشد که مقدار ۳/۹۲ یک بر روز، مربوط به رابطه تجربی NR بوده و مقدار ۰/۱ یک بر روز مربوط به رابطه تجربی BL می‌باشد (شکل ۵-قسمت پ). در فصل تابستان ضریب نرخ بازهادهی بین ۳/۹۵ و ۰/۰۸ یک بر روز تغییر می‌کند. بیشترین مقدار ضریب نرخ بازهادهی مربوط به رابطه تجربی NR و نیز کمترین آن مربوط به رابطه تجربی BL می‌باشد (شکل ۵-قسمت پ).

**ضریب نرخ بازهادهی با استفاده از روابط تجربی مختلف**  
با توجه به این که از داده‌های سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ در مرحله واسنجی استفاده شد بنابراین ضرایب نرخ بازهادهی برای سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ به منظور بررسی‌های بعدی با استفاده از روابط تجربی ضریب نرخ بازهادهی محاسبه شد.

هریک از روابط ضریب نرخ بازهادهی با توجه به نوع داده‌های مورد استفاده در استخراج آن رابطه، دارای محدوده عملکرد مناسبی می‌باشد. حدود تغییرات ضریب نرخ بازهادهی بر اساس تعداد زیادی از مطالعات گذشته بین ۰/۰۵ تا ۱۲/۲، یک بر روز می‌باشد (Thomann, 1972). بر این اساس و با توجه به ارزیابی‌های اولیه مشخص شد که از بین ۲۹ رابطه مورد مطالعه، سه رابطه TK، TD و GG نتوانسته‌اند برآورد مناسبی از ضریب نرخ بازهادهی رودخانه کارون در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ داشته باشند.

شکل (۵) قسمت الف، مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه ضریب نرخ بازهادهی رودخانه کارون را در فصل پائیز و با



شکل ۵. ضریب نرخ بازهادهی فصول مختلف با استفاده از روابط تجربی

وجود، ضریب نرخ بازهادهی را به صورت دستی به مدل وارد کند. در واقع امکان ویژه‌سازی مقادیر ضریب نرخ بازهادهی برای هر بازه در کاربرگ Reach این مدل وجود دارد (Ashgh-

مدل Qual2Kw5.1 برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول از روابط مختلفی جهت برآورد ضریب نرخ بازهادهی استفاده می‌کند و علاوه بر آن به کاربر این امکان را می‌دهد تا در صورت

بهترین روابط برآورد ضریب نرخ بازهوادی بوده و رابطه LA نیز در فصول زمستان و بهار جوابی مشابه داشته و استفاده از آن منجر شده تا اکسیژن محلول با دقت بیشتری توسط مدل شبیه‌سازی شود. روابط EL2 و AL هم از این گروه برای تابستان بهترین برآورد را از ضریب نرخ بازهوادی داشته‌اند.

ضعیف‌ترین عملکرد در فصول پائیز، زمستان و بهار از بین روابط برآورد ضریب نرخ بازهوادی گروه یک به روابط NR و JH تعلق دارد. همچنین در فصل بهار رابطه PG نیز عملکرد مطلوبی نداشته است. در فصل تابستان نیز رابطه BL از گروه یک ضعیف‌ترین عملکرد را به خود اختصاص داده است. رابطه KO از گروه دو برای فصول پائیز، زمستان و بهار بدترین برآورد را از ضریب نرخ بازهوادی ارائه داده است. از این گروه همچنین رابطه TN برای فصل تابستان عملکرد ضعیفی در برآورد ضریب نرخ بازهوادی داشته است. روابط EL2 و AL از گروه سه نتایجی برای ضریب نرخ بازهوادی ارائه داده‌اند که در نتیجه آن اکسیژن محلول با بیشترین اختلاف از مقدار مشاهده‌ای آن در فصول پائیز، زمستان و بهار شبیه‌سازی شده است. همچنین روابط PP و TJ از گروه سه برای فصل تابستان عملکردی مشابه داشته‌اند.

(Moala, 2015). با توجه به ارتباط بسیار نزدیک اکسیژن محلول و ضریب نرخ بازهوادی می‌توان برای تشخیص تأثیر هریک از روابط تجربی برآورد ضریب نرخ بازهوادی این ضرایب را محاسبه و به مدل وارد نمود؛ و پس از آن با بررسی اختلاف اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل، بهترین روابط ضریب نرخ بازهوادی را برای رودخانه مورد نظر و در فصول مختلف انتخاب کرد.

خلاصه نتایج بهترین و ضعیف‌ترین روابط تجربی ضریب نرخ بازهوادی در فصول مختلف در جدول (۷) آورده شده است. با توجه به این جدول، در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ رابطه BL از گروه یک در سه فصل پائیز، زمستان و بهار نتایج خوبی در برآورد ضریب نرخ بازهوادی از خود نشان داده است. در فصل بهار علاوه بر رابطه BL، روابط IS، EL1 و CH نیز عملکرد خوبی داشته‌اند. در فصل تابستان نیز روابط NR و JH بهترین برآورد را از ضرب نرخ بازهوادی داشته‌اند. روابط TH، CM و SM از گروه دو در فصول پائیز و بهار نتایجی مشابه داشته و جز بهترین روابط برآورد ضریب نرخ بازهوادی در این گروه قرار می‌گیرند. همچنین رابطه TN از این گروه در فصول زمستان و بهار جز بهترین روابط برآورد ضریب نرخ بازهوادی بوده‌اند. از روابط گروه سه، روابط PP و TJ در فصول پائیز، زمستان و بهار جز

جدول ۷. خلاصه نتایج بهترین و ضعیف‌ترین روابط تجربی ضریب نرخ بازهوادی در فصول مختلف

سال آبی ۹۱-۱۳۹۰						
ضعیف‌ترین روابط			بهترین روابط			
گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱	گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱	
EL2-AL	KO	NR- JH	TJ- PP	TH- CM- SM	BL	پائیز
EL2-AL	KO	NR- JH	TJ- PP- LA	TN	BL	زمستان
EL2-AL	KO	NR- JH- PG	TJ- PP- LA	TH- CM- SM- TN	BL- IS- EL1- CH	بهار
TJ-PP	TN	BL	EL2- AL	KO	NR- JH	تابستان

محلول مشاهده‌ای و اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده RMSE برابر با ۰/۳۵ و MBE برابر با ۱/۷۸ داشته باشند که این مقادیر نسبت به مقادیر حاصله با استفاده از سایر روابط گروه دو کمترین بوده و در نتیجه دقت این رابطه در برآورد ضریب نرخ بازهوادی نسبت به سایر روابط گروه دو بیشتر می‌باشد. روابط CM و SM نیز با RMSE‌هایی به ترتیب برابر با ۰/۳۷ و ۰/۳۸ و نیز MBE‌هایی به ترتیب برابر با ۲/۶۰ و ۲/۸۰ عملکردی مشابه با رابطه TH داشته‌اند. در گروه سه برای فصل پائیز بهترین عملکرد مربوط به رابطه PP است. با استفاده از این رابطه برای برآورد ضریب نرخ بازهوادی، RMSE بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برابر با ۰/۴۳ و MBE برابر با

با توجه به جدول (۸) در فصل پائیز، RMSE و MBE بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب با مقادیر ۰/۳۹ و ۲/۶۱- کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. در این حالت ضریب نرخ بازهوادی که تغییرات اندک آن بر روی اکسیژن محلول بسیار تأثیرگذار است با استفاده از رابطه تجربی BL از گروه یک برآورد شده است. منفی بودن MBE بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد ضریب نرخ بازهوادی بدست آمده از این رابطه تجربی منجر شده تا مدل، اکسیژن محلول را کمتر از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه‌سازی کند. استفاده از رابطه TH از گروه دو برای برآورد ضریب نرخ بازهوادی در فصل پائیز منجر شده تا اکسیژن

که منجر به کاهش دقت در شبیه‌سازی اکسیژن محلول شده است. لازم به ذکر است رابطه TH از گروه دو در بین تمامی روابط بهترین عملکرد را داشته و رابطه NR که ضعیف‌ترین عملکرد را در برآورد ضریب نرخ بازهوادی داشته است مربوط به گروه یک می‌باشد؛ این نتایج با نتایج حاصل از میانگین RMSE هماهنگی دارند. همچنین هر سه گروه به طور متوسط با توجه به مقادیر مثبت میانگین MBE (گروه یک برابر با ۹/۸۵، گروه دو برابر با ۴/۶۶ و گروه سه برابر با ۲/۹) منجر به شبیه‌سازی اکسیژن محلول بیشتر از مقدار مشاهده‌ای آن شده‌اند.

۳/۶۳- بدست آمده است. مدل در این حالت اکسیژن محلول را کمتر از آنچه در واقعیت وجود دارد شبیه‌سازی می‌کند. رابطه TJ نیز با RMSE و MBE به ترتیب برابر ۰/۴۴ و ۳/۸۲- عملکردی مشابه با رابطه PP داشته است. در بین گروه‌ها در فصل پائیز به طور متوسط گروه دو با میانگین RMSE برابر ۰/۵۹ بهترین نتایج را برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول بدست داده است و پس از آن گروه سه با میانگین RMSE برابر با ۰/۷۸ قرار دارد. در آخر نیز گروه یک با متوسط RMSE برابر با ۰/۸۶ ضعیف‌ترین عملکرد را در برآورد ضریب نرخ بازهوادی داشته

جدول ۸. معیارهای آماری بدست آمده برای فصل پائیز در مرحله بررسی تأثیر ضرایب نرخ بازهوادی بر شبیه‌سازی اکسیژن محلول

DO			DO			پائیز ۹۱-۱۳۹۰		
MBE	RMSE	رابطه	MBE	RMSE	رابطه			
۱۲/۸۸	۱/۰۴	KO	۹/۳۴	۰/۷۸	OD			
۲/۶۰	۰/۳۷	CM	۸/۶۱	۰/۷۳	CH			
-۵/۸۰	۰/۵۶	TN	۹/۳۹	۰/۷۸	OW			
۵/۶۷	۰/۵۴	GR	۱۰/۷۵	۰/۸۸	LD			
۱/۷۸	۰/۳۵	TH	۱۰/۹۶	۰/۸۹	BR			
۲/۸۰	۰/۳۸	SM	۱۰/۰۲	۰/۸۳	BA			
۷/۷۴	۰/۶۹	MJ	-۲/۶۱	۰/۳۹	BL	گروه ۱		
۹/۵۸	۰/۸۱	MF	۱۷/۸۶	۱/۴۱	JH			
۴/۶۶	۰/۵۹	میانگین	۹/۰۹	۰/۷۶	IG			
۱۵/۵۵	۱/۲۴	EL2	۷/۶۱	۰/۶۶	EL1			
-۷/۵۸	۰/۶۸	LA	۶/۵۰	۰/۵۹	IS			
-۳/۶۳	۰/۴۳	PP	۱۸/۲۴	۱/۴۴	NR	گروه ۳		
۱۳/۹۹	۱/۱۲	AL	۱۲/۳۲	۱/۰۰	PG			
-۳/۸۲	۰/۴۴	TJ	۹/۸۵	۰/۸۶	میانگین			
۲/۹۰	۰/۷۸	میانگین						

۰/۴۸ را بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بدست داده و نتایج بهتری نسبت به سایر روابط گروه سه داشته است. همچنین با استفاده از این رابطه مدل اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده را با MBE برابر با ۰/۴۳ بیش از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه‌سازی کرده است. روابط PP و TJ نیز با RMSE‌هایی یکسان و برابر با ۰/۵۵ و MBE‌هایی به ترتیب برابر با ۱/۳۶ و ۰/۲۶ نتایجی مشابه با رابطه LA بدست داده‌اند. در بین سه گروه در فصل زمستان با توجه به مقادیر RMSE بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بهترین عملکرد مربوط به رابطه LA از گروه سه می‌باشد. ضعیف‌ترین عملکرد در برآورد ضریب نرخ بازهوادی و در نتیجه آن شبیه‌سازی اکسیژن محلول نیز مربوط به رابطه EL2 از گروه سه می‌باشد. به طور متوسط گروه دو با میانگین RMSE برابر با ۰/۹۲ بهترین روابط

هنگامی که از رابطه BL برای برآورد ضریب نرخ بازهوادی در فصل زمستان استفاده می‌شود RMSE و MBE بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۰/۵۸ و ۰/۵۷ است که این مقادیر کمترین مقادیر معیار-های مذکور حاصل از سایر روابط گروه یک بوده‌اند. بنابراین این رابطه در برآورد ضریب نرخ بازهوادی بهترین عملکرد را با وجود بیش برآورد بودن، داشته است. در گروه دو رابطه TN بهترین عملکرد را داشته است؛ این رابطه منجر به RMSE برابر با ۰/۵۳ و MBE برابر با ۰/۰۵ بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، شده است. MBE رابطه مذکور بسیار پایین بوده و اندکی اکسیژن محلول را بیشتر از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه‌سازی کرده است. در گروه سه استفاده از رابطه LA برای برآورد ضریب نرخ بازهوادی کمترین مقدار RMSE برابر با

را در برآورد ضریب نرخ بازه‌های و در نتیجه شبیه‌سازی اکسیژن محلول داشته است و پس از آن به ترتیب گروه‌های سه و یک با میانگین RMSE‌هایی برابر با ۰/۹۷ و ۱/۲ قرار دارند. لازم به ذکر است روابط سه گروه با میانگین MBE‌هایی برابر با ۱۲/۳۰، ۸/۵۵ و ۷/۷۱ در فصل زمستان اکسیژن محلول را بیش از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه‌سازی کرده‌اند.

در فصل بهار رابطه IS از گروه یک بهترین عملکرد را در برآورد ضریب نرخ بازه‌های داشته است که در نتیجه آن RMSE و MBE بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مقادیر ۰/۳۵ و ۳/۷۵ به کمترین مقدار خود در مقایسه با سایر روابط گروه یک رسیده‌اند. با استفاده از رابطه IS برای برآورد ضریب نرخ بازه‌های با توجه به MBE، مدل اکسیژن محلول را بیش از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه‌سازی کرده است. استفاده از رابطه EL1 نیز پس از IS نتایج خوبی را برای شبیه‌سازی ضریب نرخ بازه‌های بدست می‌دهد بدین ترتیب که RMSE و MBE بین اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و اکسیژن محلول مشاهده‌ای در این حالت برابر با ۰/۴۲ و ۴/۷۷ شد. روابط BL و CH با RMSE‌هایی یکسان و برابر با ۰/۴۸ و نیز MBE‌هایی به ترتیب برابر با ۵/۶۶- و ۵/۶۵ در مرتبه‌ای پایین‌تر از روابط IS و EL1 در شبیه‌سازی اکسیژن محلول قرار می‌گیرند اما با این حال دقت آن‌ها در مقایسه با سایر روابط گروه یک بیشتر است. قابل توجه است که دو رابطه BL و CH نتایجی بسیار مشابه بدست داده‌اند با این تفاوت که مدل در حالتی که از BL برای برآورد ضریب نرخ بازه‌های استفاده می‌شود مدل اکسیژن محلول را کمتر از مقدار مشاهده‌ای آن و در حالتی که از CH استفاده می‌شود بیشتر از مقدار مشاهده‌ای آن برآورد می‌کند. در گروه دو بهترین عملکرد برآورد ضریب نرخ بازه‌های مربوط به رابطه TH می‌باشد؛ چرا که با استفاده از این رابطه اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دارای کمترین مقدار (۰/۲۹) RMSE و (۲/۷۵) MBE می‌باشند. همچنین روابط CM، SM و TN به ترتیب با مقادیر RMSE‌هایی برابر با ۰/۳۰، ۰/۳۳ و ۰/۳۸ و MBE‌هایی به ترتیب برابر با ۲/۸۶، ۳/۳۷ و ۴/۲۸- بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده عملکردی مشابه با رابطه TH داشته‌اند. در گروه سوم با استفاده از رابطه LA اختلاف بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به حداقل رسیده و با RMSE برابر با ۰/۲۹ و MBE برابر با ۲/۴۷- بهترین عملکرد را در این فصل بین روابط سایر گروه‌ها به خود اختصاص داده است. لازم به ذکر است با استفاده از این رابطه در فصل بهار مقدار اکسیژن محلول کمتر از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه-

سازی شده است. روابط TJ و PP نیز با RMSE به ترتیب برابر با ۰/۳۴ و ۰/۳۵ و MBE برابر با ۳/۶۸- و ۳/۸۰- بین اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، مشابه با رابطه LA بوده‌اند. به طور متوسط گروه دو با میانگین RMSE برابر با ۰/۵۴ بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بهترین عملکرد و گروه سه با میانگین RMSE برابر با ۰/۶۴ عملکردی متوسط و گروه یک با میانگین RMSE، ۰/۶۹ ضعیف‌ترین عملکرد را داشته‌اند. با توجه به میانگین MBE (گروه یک برابر با ۷/۵۴، گروه دو برابر با ۵/۰۸ و گروه سه برابر با ۳/۵۵) استفاده از روابط سه گروه برای برآورد ضریب نرخ بازه‌های باعث شده تا اکسیژن محلول بیش از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه‌سازی شود. نتایج حاصل از روابط مختلف برآورد ضریب نرخ بازه‌های برای فصل تابستان در هر سه گروه نتایجی بسیار نزدیک بهم دارد و انتخاب یک رابطه خاص به عنوان بهترین رابطه برآورد ضریب نرخ بازه‌های دشوار است. با این حال به بررسی جزئی‌تر نتایج حاصله پرداختیم. در فصل تابستان با استفاده از رابطه JH از گروه یک برای برآورد ضریب نرخ بازه‌های اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با RMSE و MBE برابر با ۰/۲۹ و ۰/۶۷- دارای بهترین عملکرد در بین سایر روابط هر سه گروه بوده است. در حالی که شاهد بودیم در فصل بهار و زمستان بدترین عملکرد مربوط به این رابطه بوده است. استفاده از رابطه NR نیز از این گروه با RMSE برابر با ۰/۳۰ و MBE برابر با ۰/۸۰- عملکردی مشابه و نزدیک به رابطه JH داشته است؛ و مدل با استفاده از هر دو رابطه JH و NR برای برآورد ضریب نرخ بازه‌های با توجه به مقدار MBE بدست آمده، اکسیژن محلول را کمتر از مقدار مشاهده‌ای آن شبیه‌سازی کرده است. زمانی که از رابطه KO گروه دو برای برآورد ضریب نرخ بازه‌های فصل تابستان استفاده شد، RMSE و MBE بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۰/۳۳ و ۱/۴۹- بدست آمد که نشان می‌دهد این رابطه بهترین عملکرد را در بین سایر روابط این گروه داشته است. استفاده از رابطه EL2 از گروه سه برای برآورد ضریب نرخ بازه‌های باعث شد تا اختلاف بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با RMSE برابر با ۰/۳۰ و MBE برابر با ۰/۸۸- در مقایسه با سایر روابط گروه سه به حداقل برسد. رابطه AL با RMSE برابر با ۰/۳۱ و MBE برابر با ۱/۱۰- عملکردی مشابه به رابطه EL2 داشته است. با توجه به نتایج فوق می‌توان دریافت روابط JH و NR از گروه یک، رابطه KO از گروه دو و رابطه EL2 از گروه سه عملکردی مشابه داشته و جز بهترین‌ها در برآورد ضریب نرخ بازه‌های قرار می‌گیرند. رابطه BL از

منفی بوده و مدل در شبیه‌سازی اکسیژن محلول کم برآورد می‌باشد. ضعیف‌ترین عملکرد روابط نیز مربوط به فصل زمستان می‌باشد؛ در این فصل اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای دارای بیشترین مقادیر RMSE و MBE به ترتیب برابر با ۱/۰۳ و ۱۲/۹۵ می‌باشد.

از بین بهترین روابط برآورد ضریب نرخ بازهادهی همان-طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شده بود می‌توان تنها یک رابطه را برای هر فصل معرفی کرد. در جدول (۱۰) بهترین رابطه در هر فصل و مقدار ضریب نرخ بازهادهی با استفاده از آن رابطه در هر فصل آورده شده است. همچنین میانگین اکسیژن محلول در ایستگاه‌های مختلف در هر فصل آورده شده است. با توجه به جدول می‌توان دریافت با کاهش اکسیژن محلول مقدار ضریب نرخ بازهادهی افزایش می‌یابد و رودخانه نیاز به هوادهی بیشتری برای تأمین اکسیژن محلول کاهش یافته دارد. در فصل تابستان مقدار اکسیژن محلول با میانگین ۶/۴۹ کمترین و در فصل زمستان با مقدار ۷/۵۰ بیشترین مقدار را دارند، برخلاف تغییرات اکسیژن محلول، در فصل تابستان ضریب نرخ بازهادهی با مقدار ۱/۵۹ بیشترین و در فصل زمستان با مقدار ۰/۲۳ کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. این امر به واسطه وابستگی ضریب نرخ بازهادهی به کمبود اکسیژن محلول نسبت به حالت اشباع می‌باشد.

گروه یک، TN از گروه دو و TJ از گروه سه نیز مشابه یکدیگر بوده و عملکرد ضعیفی داشته‌اند. به طور متوسط استفاده از روابط گروه یک برای برآورد ضریب نرخ بازهادهی باعث می‌شود اختلاف بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با میانگین RMSE برابر با ۰/۳۹ بهترین عملکرد را در این فصل و گروه سه با میانگین RMSE برابر با ۰/۴۲ ضعیف‌ترین عملکرد را داشته باشند. گروه دو با میانگین RMSE برابر با ۰/۴۱ در این میان قرار می‌گیرد. با توجه به نزدیکی میانگین RMSE سه گروه و نیز عملکرد مشابه سه گروه در ارائه بهترین و ضعیف‌ترین روابط برآورد ضریب نرخ بازهادهی می‌توان گفت هر سه عملکردی یکسان داشته‌اند. لازم به ذکر است هر سه به طور متوسط برای برآورد ضریب نرخ بازهادهی نتایجی ارائه داده‌اند که بر اساس آن مدل، با میانگین MBE‌هایی به ترتیب برابر با ۲/۲۸، -۲/۷۵ و -۲/۸۲ در فصل تابستان اکسیژن محلول را کمتر از مقدار مشاهده‌ای شبیه‌سازی می‌کند.

با توجه به جدول (۹) می‌توان دریافت دقت روابط برآورد ضریب نرخ بازهادهی که برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول مورد استفاده قرار می‌گیرند در فصل تابستان بیشتر از سایر فصول بوده است. بدین ترتیب که میانگین RMSE و MBE بین اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در فصل تابستان با مقادیری برابر با ۰/۴۱ و -۲/۶۲ کمتر از سایر فصول بوده است. همچنین تنها در فصل تابستان به طور میانگین MBE

جدول ۹. مقایسه عملکرد گروه‌های ضرایب نرخ بازهادهی در شبیه‌سازی اکسیژن محلول فصول مختلف

سال آبی ۹۱-۱۳۹۰		میانگین		میانگین	
MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
۱۲/۳۰	۱/۲۰	۹/۸۵	۰/۸۶	۱/۲۰	۱۲/۳۰
۱۸/۸۵	۰/۹۲	۴/۶۶	۰/۵۹	۰/۹۲	۱۸/۸۵
۷/۷۱	۰/۹۷	۲/۹۰	۰/۷۸	۰/۹۷	۷/۷۱
<b>۱۲/۹۵</b>	<b>۱/۰۳</b>	<b>۵/۸۰</b>	<b>۰/۷۴</b>	<b>۱/۰۳</b>	<b>۱۲/۹۵</b>
-۲/۲۸	۰/۳۹	۷/۵۴	۰/۶۹	۰/۳۹	-۲/۲۸
-۲/۷۵	۰/۴۱	۵/۰۸	۰/۵۴	۰/۴۱	-۲/۷۵
-۲/۸۲	۰/۴۲	۳/۵۵	۰/۶۴	۰/۴۲	-۲/۸۲
<b>-۲/۶۲</b>	<b>۰/۴۱</b>	<b>۵/۳۹</b>	<b>۰/۶۲</b>	<b>۰/۴۱</b>	<b>-۲/۶۲</b>

جدول ۱۰. ضریب نرخ بازهادهی و اکسیژن محلول در هر فصل

فصل	میانگین اکسیژن محلول	نام بهترین رابطه	ضریب نرخ بازهادهی با استفاده از بهترین رابطه
پائیز	۶/۶۷	TH	۰/۶۲
زمستان	۷/۵۰	LA	۰/۲۳
بهار	۷/۳۲	LA	۰/۳۳
تابستان	۶/۴۹	JH	۱/۵۹

### آنالیز حساسیت

اکسیژن محلول زمانی که  $K_a$ ، ۵۰ درصد کاهش داشته بیشترین مقدار بوده است. نکته قابل توجه دیگر در مورد این ضریب این است که کاهش در مقدار آن تأثیر بیشتری در برآورد ضریب نرخ بازهوادی داشته است و در این حالت به طور متوسط اکسیژن محلول برآورد شده، اختلاف بیشتری با اکسیژن محلول برآورد شده در حالت بدون تغییر در مقدار ضریب نرخ بازهوادی دارد. بعد از ضریب نرخ بازهوادی به ترتیب پارامترهای  $pH$ ،  $T$  و  $BOD$  بیشترین تأثیر را در برآورد اکسیژن محلول داشته‌اند و پارامترهای  $EC$  و  $PO_4$  نیز کمترین اثر را در برآورد اکسیژن محلول داشته‌اند.

آنالیز حساسیت پارامترهای استفاده شده در این مطالعه با هدف بررسی تأثیر آن‌ها بر روی برآورد اکسیژن محلول صورت گرفت. برای این آنالیز از داده‌های سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ استفاده شد، همچنین از بهترین ضرایب نرخ بازهوادی بدست آمده به عنوان ضریب نرخ بازهوادی استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که ضریب نرخ بازهوادی بیشترین تأثیر را در برآورد اکسیژن محلول دارد که این تأثیر در فصل بهار با مقدار  $4/436$  درصد کاهش در برآورد اکسیژن محلول زمانی که  $K_a$ ، ۵۰ درصد افزایش داشته و نیز با مقدار  $5/859$  درصد افزایش در برآورد

جدول ۱۱. نتایج آنالیز حساسیت مدل با استفاده از داده‌های سال آبی ۹۱-۱۳۹۰

درصد تغییرات		+۵۰٪						
پارامتر	DO	T	BOD	NO3	PO4	EC	Ka	pH
		(°C)	(mg/l)	(mg/l)	(µg/l)	(µs/m)	(l/day)	
پائیز		۰.۷۶۵	۰.۰۶۳	-۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	-۳.۷۰۷	-۰.۶۱۵
زمستان		۰.۹۳۳	۰.۱۳۰	-۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	-۳.۷۰۷	-۰.۴۷۷
بهار		۰.۲۰۵	۰.۰۱۷	-۰.۰۰۶	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	-۴.۴۳۶	۰.۱۰۴
تابستان		۰.۱۹۵	-۰.۰۷۴	-۰.۰۰۹	-۰.۰۸۹	-۰.۰۸۸	-۰.۸۷۶	-۰.۲۷۲
درصد تغییرات		-۵۰٪						
پارامتر	DO	T	BOD	NO3	PO4	EC	Ka	pH
		(°C)	(mg/l)	(mg/l)	(µg/l)	(µs/m)	(l/day)	
پائیز		-۰.۷۹۴	-۰.۰۶۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۴.۴۱۷	۰.۰۳۸
زمستان		-۰.۹۶۰	-۰.۱۳۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	۳.۳۶۷	۰.۰۱۰
بهار		-۰.۲۳۰	-۰.۰۱۷	۰.۰۰۶	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۵.۸۹۵	۰.۰۵۲
تابستان		-۰.۴۳۲	-۰.۱۰۳	-۰.۰۸۷	-۰.۰۸۹	-۰.۰۸۹	-۲.۲۶۵	-۰.۰۲۸

بیشتری شبیه‌سازی کند. همچنین در فصل زمستان روابط  $PP$ ،  $BL$ ،  $TJ$ ،  $LA$  و  $TN$  برآوردی از ضریب نرخ بازهوادی ارائه داده‌اند که در نتیجه آن مدل دقت بیشتری در شبیه‌سازی اکسیژن محلول داشته است. در فصل بهار روابط  $PP$ ،  $BL$ ،  $TH$ ،  $TJ$ ،  $LA$ ،  $TN$ ،  $SM$ ،  $CM$ ،  $CH$ ،  $EL1$  و  $IS$  بهترین عملکرد را در برآورد ضریب نرخ بازهوادی داشته‌اند. در فصل تابستان نیز بهترین عملکرد در برآورد ضریب نرخ بازهوادی مربوط به روابط  $JH$ ،  $NR$ ، کرنکل و  $KO$ ،  $AL$  و  $EL2$  است.

Mohammadi-Ghaleni et al (b2015) عملکرد ۲۹

رابطه‌ی برآورد ضریب نرخ بازهوادی در مدل‌سازی اکسیژن محلول سفیدرود طی هشت دوره‌ی آذر ۱۳۸۶، تیر ۱۳۸۷، مهر ۱۳۸۷، آبان ۱۳۸۷، بهمن ۱۳۸۹، فروردین ۱۳۹۰، خرداد ۱۳۹۰ و مرداد ۱۳۹۰ را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافته‌اند که در آذر ۱۳۸۶ و آبان ۱۳۸۷ روابط  $BL$  و  $PP$  بیشترین دقت را در برآورد ضریب نرخ بازهوادی داشته‌اند که با نتایج حاصل از این

### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی روابط تجربی مختلف برآورد ضریب نرخ بازهوادی نشان می‌دهد بیشترین مقادیر ضریب نرخ بازهوادی مربوط به رابطه تجربی  $NR$  بوده و به ترتیب برابر  $5/12$  در فصل پائیز،  $4/27$  در فصل زمستان،  $3/92$  در فصل بهار و  $3/95$  یک بر روز در فصل تابستان می‌باشد. همچنین کمترین مقادیر ضریب نرخ بازهوادی در فصول زمستان، بهار و تابستان مربوط به رابطه تجربی  $BL$  بوده و به ترتیب برابر با  $0/1$ ،  $0/1$  و  $0/08$  می‌باشد. کمترین مقدار ضریب نرخ بازهوادی در فصل پائیز نیز برابر با  $0/09$  و مربوط به رابطه  $LA$  می‌باشد.

بررسی تأثیر ضریب نرخ بازهوادی برآورد شده توسط هر یک از روابط تجربی بر روی شبیه‌سازی اکسیژن محلول نشان می‌دهد استفاده از ضرایب نرخ بازهوادی به دست آمده از روابط  $PP$ ،  $BL$ ،  $TH$ ،  $SM$ ،  $CM$  و  $TJ$  در مدل‌سازی اکسیژن محلول فصل پائیز باعث شده تا مدل، اکسیژن محلول را با دقت



اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای دارای بیشترین مقادیر میانگین مربع مجذور خطا و درصد میانگین انحراف خطا به ترتیب برابر با ۱/۰۳ و ۱۲/۹۵ می‌باشد.

رابطه TH در فصل پائیز، رابطه LA در فصول زمستان و بهار و رابطه JH در فصل تابستان با RMSEهایی به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۴۸، ۰/۲۹ و ۰/۲۹ و MBEهایی به ترتیب برابر با ۱/۷۸، ۰/۴۳، ۲/۴۷- و ۰/۶۷- دارای بهترین برآورد از ضریب نرخ بازهادهی از میان تمامی روابط بوده‌اند و مقادیر ضریب نرخ بازهادهی با استفاده از این روابط به ترتیب مقادیر ۰/۲۳، ۰/۳۳ و ۱/۵۹ می‌باشد. در فصول پائیز، زمستان، بهار و تابستان میانگین اکسیژن محلول برابر با ۶/۶۷، ۷/۵۰، ۷/۳۲ و ۶/۴۹ می‌باشد؛ که از این میان در فصل تابستان مقدار اکسیژن محلول با میانگین ۶/۴۹ کمترین و در فصل زمستان با مقدار ۷/۵۰ بیشترین مقدار را دارند، برخلاف تغییرات اکسیژن محلول، در فصل تابستان ضریب نرخ بازهادهی با مقدار ۱/۵۹ بیشترین و در فصل زمستان با مقدار ۰/۲۳ کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. این امر به واسطه وابستگی ضریب نرخ بازهادهی به میزان کمبود اکسیژن محلول نسبت به حالت اشباع می‌باشد.

با توجه به ارتباط مستقیم ضریب نرخ بازهادهی با میزان کمبود اکسیژن محلول نسبت به حالت اشباع با کاهش اکسیژن محلول ضریب نرخ بازهادهی افزایش می‌یابد تا بدین ترتیب کمبود اکسیژن محلول سریع‌تر جبران شود که این موضوع در مورد فصل تابستان به وضوح روشن است. در این فصل شاهد بیشترین مقدار ضریب نرخ بازهادهی هستیم و کمترین مقدار اکسیژن محلول نیز مربوط به این فصل است.

نتایج آنالیز حساسیت نشان داد ضریب نرخ بازهادهی بیشترین تأثیر را در برآورد اکسیژن محلول دارد که با نتایج Mohammadi-Ghaleni et al (b2015) مبنی بر اینکه اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود بیشترین حساسیت را نسبت به ضریب بازهادهی دارد تطابق دارد. همچنین پارامترهای EC و  $PO_4$  کمترین تأثیر را در برآورد اکسیژن محلول دارند.

### سپاسگزاری

این تحقیق و تهیه مقالات آن با حمایت دانشگاه تهران صورت گرفته است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

پژوهش برای فصل پائیز مبنی بر برتری روابط BL و PP مطابقت دارد. ایشان همچنین برای بهمن‌ماه ۱۳۸۹ رابطه BL و برای تیرماه ۱۳۸۷ و مردادماه ۱۳۹۰ رابطه KO را پیشنهاد داده‌اند که با نتایج حاصل از این پژوهش مبنی بر برتری روابط BL و KO به ترتیب در فصول زمستان و تابستان تطابق دارد. Mohammadi-Ghaleni et al (b2015) رابطه IS را برای فرودین و خرداد ۱۳۹۰ رابطه مناسبی برشمردند که در پژوهش حاضر نیز به نتیجه‌ای مشابه رسیده‌ایم و رابطه IS در فصل بهار بهترین رابطه برآورد ضریب نرخ بازهادهی می‌باشد. Kalburgi et al (2015) و Palumbo and Brown (2013) نتیجه گرفتند که رابطه PP بهترین برآورد را از ضریب نرخ بازهادهی داشته است. در پژوهش حاضر نیز رابطه PP در برآورد ضریب نرخ بازهادهی در فصول پائیز، زمستان و بهار برتری داشته است.

به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که هیچ یک از روابط تجربی ضریب نرخ بازهادهی به تنهایی بیشترین دقت را نداشته‌اند بلکه یک گروه دقت بیشتری در برآورد ضریب نرخ بازهادهی داشته است. در مطالعه حاضر روابط گروه دو که با استفاده از متغیرهای شیب، سرعت جریان، عمق جریان و دبی برآورد می‌شدند، از بیشترین دقت در برآورد ضریب نرخ بازهادهی در تمامی فصول برخوردار بودند که در نتیجه آن اکسیژن محلول به خوبی شبیه‌سازی شده و اختلاف بسیار کمی با اکسیژن محلول مشاهده‌ای داشته است. این نتیجه با نتیجه Palumbo and Brown (2013) که عملکرد کلی ۱۸ رابطه برآورد ضریب نرخ بازهادهی را با استفاده از معیارهای آماری مورد بررسی قرار دادند مشابه است. آن‌ها دریافتند به ندرت می‌توان گفت رابطه‌ای دارای بهترین عملکرد بوده است و معمولاً گروهی از روابط دارای بهترین عملکرد خواهند بود.

با توجه به نتایج می‌توان دریافت دقت روابط برآورد ضریب نرخ بازهادهی که برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول مورد استفاده قرار می‌گیرند در فصل تابستان بیشتر از سایر فصول بوده است. بدین ترتیب که میانگین مربع مجذور خطا و درصد میانگین انحراف خطا بین اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در فصل تابستان با مقادیری برابر با ۰/۴۱ و ۲/۶۲- کمتر از سایر فصول بوده است. همچنین درصد میانگین انحراف خطا بین اکسیژن محلول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده تنها در فصل تابستان منفی بوده و مدل کم‌برآورد است. ضعیف‌ترین عملکرد روابط نیز مربوط به فصل زمستان می‌باشد. در این فصل

### REFERENCES

Ashegh-Moala, M. (2015). Simulation of river water quality with QUAL2Kw model, Step by step

guide for users. Tehran: Talab. (In Farsi)  
Chapra, S. Pelletier, G. and Tao, H. (2006). A

- Modeling framework for simulating river and stream water quality, Version 2.04: Documentation and users manual.* Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, Medford, MA.
- Chapra, S.C. and Pelletier, G.J. (2003). *QUAL2K: a modeling framework for simulating river and stream water quality: documentation and users manual.* Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, Medford, MA.
- Dezfooli, D. Hosseini-Moghari<sup>1</sup>, S.M. Ebrahimi<sup>1</sup>, K. Araghinejad, S. (2017) Classification of water quality status based on minimum quality parameters: application of machine learning techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, DOI: org/10.1007/s40808-017-0406-9.
- EPA. (1983). Technical Guidance Manual for Performing Waste Load Allocations. Book II: Streams and Rivers. -440/4-84-020.
- Fan, S. F. Feng, M. Q. and Liu, Z. (2009). Simulation of water temperature distribution in Fenhe reservoir. *Journal of Water Science and Engineering*, 2(2), 32–42.
- Ghaly, A. E. and Kok, R. (1988). The effect of sodium sulfite and cobalt chloride on the oxygen transfer coefficient. *Journal of Applied biochemistry and biotechnology*, 19(3), 259-270.
- Grant, R. S. and Skavronck, S. (1980). Comparison of tracer methods and predictive equations for determination of stream-re-aeration coefficients on three small streams in Wisconsin. Water-resources investigations (final). Geological Survey, Madison, WI (USA). Water Resources Div.
- 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. *Journal of Hydrological processes*, 27(26), 3949-3963.
- Holley, E. R. and Yotsukura, N. (1984). *Field techniques for reaeration measurements in rivers.* In Gas transfer at water surfaces, Water science and technology library, Springer Netherlands, pp. 381-401.
- Hoseini, Y. M. (2007). Estimate of maximum Potential purification in Karkhe river for inputing urban. *First Conference of Sanitary Engineering*, Tehran, Iran, pp: 129-137. (In Farsi)
- Jain, S. K. and Jha, R. (2005). Comparing the stream re-aeration coefficient estimated from ANN and empirical models/Comparaison d'estimations par un RNA et par des modèles empiriques du coefficient de réaération en cours d'eau. *Journal of Hydrological sciences journal*, 50(6), 1037-1052.
- Jha, R. Ojha, C. S. P. and Bhatia, K. K. S. (2001). Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river. *Journal of Hydrological processes*, 15(6), 1047-1060.
- John, J. P. S. Gallagher, T. W. and Paquin, P. R. (1984). *The sensitivity of the dissolved oxygen balance to predictive reaeration equations.* In Gas transfer at water surfaces, Water science and technology library, Springer Netherlands, 577-588.
- Kalburgi, P. B. Jha, R. Ojha, C. S. P. and Deshannavar, U. B. (2015). Evaluation of re-aeration equations for river Ghataprabha, Karnataka, India and development of refined equation. *Journal of Environmental technology*, 36(1), 79-85.
- Kannel, P. R. Kanel, S. R. Lee, S. Lee, Y.-S. and Gan, T. Y. (2011). A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. *Journal of Environmental Modeling and Assessment*, 16(2), 183–04.
- Kannel, P. R. Lee, S. Kanel, S. R. Lee, Y. S. and Ahn, K. H. (2007). Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. *Journal of Environmental monitoring and assessment*, 125(1-3), 201-217.
- Kilpatrick, F. A. Rathbun, R. E. Yotsukura, N. Parker, G. W. and DeLong, L. L. (1989). *Determination of stream reaeration coefficients by use of tracers.* US Government Printing Office.
- Lehmann, E.L. (1951). A General Concept of Unbiasedness. *Journal of The Annals of Mathematical Statistics*, 22(4), 587–592.
- Meftah-Halghi, M. and Mesgaran-Karimi, B. (2008). *A Study of self-purification for Ghare-Sou River.* Report of Gorgan Environmental Protection Agency, Gorgan, Iran. (In Farsi)
- Moghimi-Nejad, S. Ebrahimi, K. Kerachian, R. (2016) Investigation of seasonal self-purification variations of Karun river, Iran. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/ceej.2016.866 (In Farsi).
- Mohammadi-Ghaleni, M. (b2015). Assessing the effectiveness of longitudinal dispersion coefficient, decay rate and reaeration on the river assimilative capacity Index. Ph. D. dissertation, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Mohammadi-Ghaleni, M. Ebrahimi, K. Omid, M. H. (a2015). Evaluation of Sefidrood River's Re-aerationRate Coefficient. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 9(31), 89-98. (In Farsi)
- Moravej, M. Karimirad, I. Ebrahimi, K.(2017) Evaluation of Karun River water quality status based on Water Quality Index and involving GIS environment. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(1), 225-235, DOI: 10.22059/ije.2017.60905 (In Farsi).
- Morley, N. J. (2007). Anthropogenic effects of reservoir construction on the parasite fauna of aquatic wildlife. *Journal of EcoHealth*, 4(4), 374–383.
- Palumbo, J. E. and Brown, L. C. (2013). Assessing the performance of reaeration prediction equations. *Journal of Environmental Engineering*. 140(3), 04013013. [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

- Shokri, S. Hoshmand, A and Moazed, H. (2015). Ammonium and Nitrate Quality Simulation in GarGar river using QUAL2KW Model. *Journal of Wetland Ecobiology*, 7(1), 57-68. (In Farsi)
- Thomann, V. R. (1972). System analysis and water quality management. USA: McGraw-Hill Book Company.
- Yuceer, M. Karadurmus, E. and Berber, R. (2007). Simulation of river streams: Comparison of a new technique to QUAL2E. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*, 46(1-2), 292-305.
- Zison, S. W. (1978). *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling*. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Environmental Research Laboratory.

Archive of SID