



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۶۹-۷۹

# برآورد ضریب هوادهی در مدیریت کیفی آب رودخانه دیناچال، با استفاده از روابط تجربی و روش‌های عددی

مهدی محمدی قلعه‌نی<sup>۱</sup>، کیومرث ابراهیمی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین امید<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۳. استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۳۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۱

### چکیده

برآورد دقیق ضریب هوادهی، با توجه به تأثیر آن بر اکسیژن محلول رودخانه، از گام‌های مهم و ابتدایی مدل‌سازی برای مدیریت کیفی منابع آب مربوطه است. هدف اصلی مقاله حاضر، ارزیابی میزان تأثیرپذیری اکسیژن محلول رودخانه دیناچال از ضریب هوادهی است. برای این منظور، نمونه‌های کیفیت آب در بازه‌ای به طول ۲ کیلومتر از رودخانه، در شهریور ۱۳۹۱ برداشت شد. پارامترهای اصلی کیفیت آب اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها عبارت‌اند از: هدایت الکتریکی، اسیدیته، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نترات و فسفات. در این تحقیق، رابطه مشهور و متداول استریتز-فلپس با افزودن فرایندهای انتقال، پخش و زوال، بهبود می‌یابد. سپس به موازات آن، با کاربرد چهار روش عددی اف‌تی‌سی‌اس، کوئیکست، آپ‌استریم و لکس-وندروف، غلظت اکسیژن محلول در رودخانه دیناچال شبیه‌سازی و نتایج روش‌های عددی و مدل استریتز-فلپس نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. ضریب هوادهی رودخانه دیناچال نیز با کاربرد چهار رابطه تجربی اکونر و دوینز، لانگبین و دیورام، بولتون و لینگ و همکاران، برآورد و این روابط اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان داد که روش عددی آپ‌استریم با استفاده از ضریب هوادهی بولتون، بهترین جواب را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه کرده است. مقادیر ضریب هم‌بستگی پیرسون و میانگین قدرمطلق خطا در این روش، به ترتیب ۰/۹۹۵ و ۰/۰۳۳ است.

**کلیدواژه‌ها:** اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، روش‌های عددی، ضریب هم‌بستگی پیرسون، مدل استریتز-فلپس، کیفیت آب.

## مقدمه

غلظت اکسیژن محلول در رودخانه، یکی از معیارهای اصلی تعیین کیفیت آب رودخانه است (۲). برای مثال، حداقل غلظت اکسیژن محلول برای تداوم حیات آبزیان و مصارف شرب، به ترتیب ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر است (۴)؛ بنابراین، برآورد مقدار غلظت اکسیژن محلول، یکی از مراحل ضروری برای پایش سلامت رودخانه‌هاست. فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی یا زیستی ممکن است اکسیژن را از رودخانه جذب یا به آن وارد کنند (۱۴). مهم‌ترین منبع اکسیژن محلول در رودخانه‌ها، هوادهی اتمسفری است که ضریب نرخ هوادهی در آن با استفاده از روابط تجربی برآورد می‌شود (۷). در این راستا، برآورد دقیق ضریب هوادهی از گام‌های نخست و ضروری در مدل‌سازی رودخانه‌ها به منظور مدیریت کیفیت منابع آبی است.

در یکی از تحقیقات اولیه، نوعی مدل سینتیکی برای پارامتر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و منحنی افت اکسیژن محلول ارائه شد که در آن مقادیر ضرایب مختلف مدل، ثابت فرض شده بود. در این مدل، اکسیژن‌خواهی رسوب و ته‌نشینی، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و فرایندهای انتقال و پخش در نظر گرفته نشد (۱۲). محقق با اصلاح معادله استریتر-فلپس، روشی جدید برای مدل‌سازی اکسیژن محلول پیشنهاد کرد. وی با به‌کارگیری روش استریتر-فلپس عنوان کرد که این روش بازخورد بین غلظت اکسیژن محلول و نسبت اکسیداسیون مواد آلی را در نظر نگرفته است و این کار باعث کاهش دقت در شبیه‌سازی می‌شود (۶).

در ادامه باید گفت محققانی به بررسی ۲۹ رابطه ریاضی مختلف در مورد ضریب هوادهی پرداختند. این روابط دارای پارامترهای مختلفی‌اند؛ مانند عمق جریان، سرعت، عرض، شیب، عدد فرود، ضریب پخشیدگی مولکولی، ویسکوزیته سینماتیکی و عدد انتقال گاز رینولدز. روابط یادشده، به چهار دسته تقسیم و نتایج آن‌ها با دو

پارامتر آماری ضریب هم‌بستگی و مجموع مجذورات باقی‌مانده‌ها<sup>۱</sup> با هم مقایسه شدند. 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 (۷). در تحقیقی دیگر، انتقال آلودگی در حالت یک‌بعدی، با استفاده از روش‌های عددی و مدل فیزیکی مدل‌سازی و نتایج دو روش با هم مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که به ترتیب، بهترین و ضعیف‌ترین نتایج مربوط به روش‌های عددی آپ‌استریم<sup>۲</sup> و اف تی سی اس<sup>۳</sup> است (۱۰). در تحقیق دیگری از بین روابط تجربی، رابطه تجربی کاشفی پور-فالكونر، به‌عنوان مناسب‌ترین رابطه برای محاسبه ضریب انتشار طولی در رودخانه پسیخان انتخاب و در شبیه‌سازی اکسیژن محلول با مدل‌های عددی و تحلیلی استفاده شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل عددی و تحلیلی در مقابل داده‌های میدانی برداشت‌شده در این تحقیق، برتری مدل عددی بر مدل تحلیلی و تطابق بسیار خوب پیش‌بینی‌های مدل عددی را نشان داد (۳). محققانی به بررسی خودپالایی جریان‌های رودخانه‌ای با توسعه و کاربرد مدل‌های ریاضی برای رودخانه پسیخان واقع در استان گیلان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های عددی اف تی سی اس، کوئیکست<sup>۴</sup>، آپ استریم و لکس-وندروف<sup>۵</sup> که برای بررسی خودپالایی از آن‌ها استفاده شده است، دقت خوبی داشته و اختلاف کمی با یکدیگر دارند. در ضمن، همه این روش‌ها، عملکرد بهتری از روش استریتر-فلپس دارند. همچنین مشخص شد این رودخانه در بازه مورد مطالعه، از ظرفیت خودپالایی خوبی برخوردار است (۱).

1. Sum of Square of Residuals (SSR)
2. Upstream
3. FTCS
4. Quickest
5. Lax and Wendroff

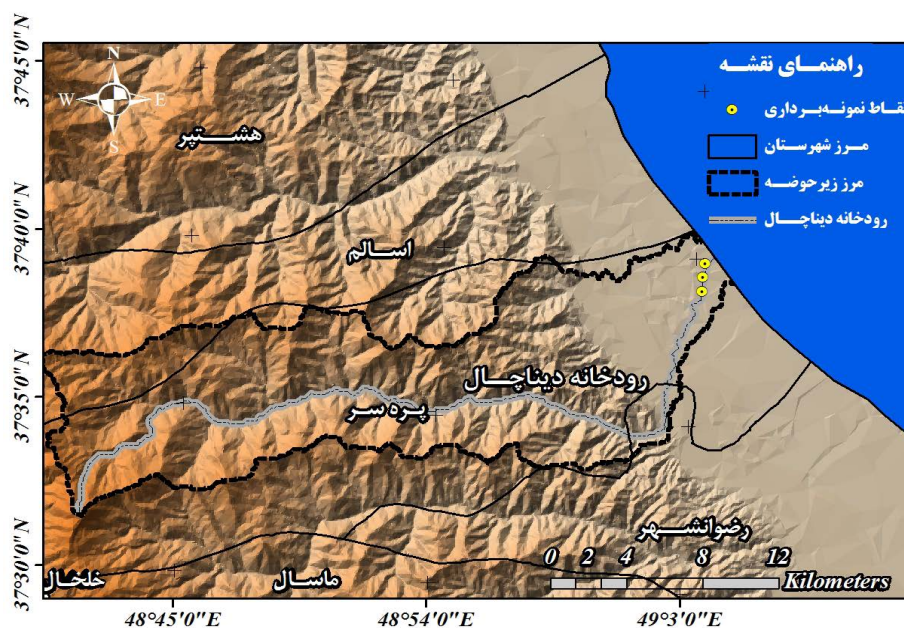
## مدیریت آب و آبیاری

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه دیناچال در حوضه اصلی دریای مازندران و در حوضه درجه دوی تالش - مرداب انزلی قرار دارد. این رودخانه در غرب استان گیلان و در بخش پره‌سر شهرستان تالش واقع شده است. جریان حداقل این رودخانه، بر اساس اندازه‌گیری‌های هیدرومتری انجام شده، حدود دو تا سه مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است. شکل ۱، نمایی از این رودخانه و مقاطع نمونه‌برداری از آن را نشان می‌دهد.

هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی میزان تأثیرپذیری اکسیژن محلول از ضریب هوادهی در رودخانه دیناچال است. به این منظور، مدل‌سازی اکسیژن محلول با استفاده از حل تحلیلی استریتر-فلیس و روش‌های عددی صورت گرفته و با استفاده از فرمول‌های تجربی تخمین ضریب هوادهی، اثرهای مقدار ضریب هوادهی بر اکسیژن محلول بررسی شده است. در ادامه، نتایج حل تحلیلی و عددی با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده مقایسه شده است.



شکل ۱. موقعیت رودخانه دیناچال و نقاط نمونه‌برداری کیفی

منبع: سازمان نقشه‌برداری کشور

جریان و دمای آب در هر مقطع اندازه‌گیری شد. به‌منظور پیشگیری از خطاهای نمونه‌برداری و افزایش دقت، از هر مقطع سه نمونه برداشت گردید و با نگهداری در دمای کم و استاندارد، بلافاصله به آزمایشگاه انتقال و پارامترهای کیفی آن اندازه‌گیری شد. سرعت متوسط جریان آب در رودخانه دیناچال با استفاده از مولینه مدل BFM002-Valeport، ۱/۳۹ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. با توجه به

## داده‌برداری میدانی

در این تحقیق، نمونه‌برداری کیفی از رودخانه دیناچال در شهریور ۱۳۹۱، در دو نوبت صبح (۱۰ و ۳۰ دقیقه) و بعدازظهر (۱۴ و ۳۰ دقیقه) و در بازه‌ای به طول دو کیلومتر و در سه مقطع به فواصل یک‌کیلومتری انجام شد. پس از شناسایی مقاطع نمونه‌برداری، مشخصات هیدرولیکی رودخانه شامل عرض رودخانه، عمق جریان، سرعت

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

**شبیه‌سازی اکسیژن محلول با استفاده از حل عددی**  
 با در نظر گرفتن منابع و مصارف اکسیژن محلول، ثابت فرض کردن سرعت متوسط و سطح مقطع ثابت در طول بازه و نداشتن ورود و خروج جریان در طول بازه، معادله تغییرات اکسیژن محلول به صورت معادله ۴ است (۵):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_a(c_s - c) - k_c L \quad (4)$$

در این رابطه،  $c$  غلظت اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر)،  $u$  سرعت متوسط جریان در رودخانه (متر بر ثانیه)،  $D_x$  ضریب پخش طولی (مترمربع بر ثانیه)،  $k_a$  ضریب هوادهی (یک بر روز)،  $c_s$  غلظت اشباع اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر)،  $k_c$  ضریب زوال اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (یک بر روز) و  $L$  غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (میلی‌گرم بر لیتر) است. در تحقیق حاضر، از چهار روش عددی تفاضلات محدود اف تی سی اس، لکس-وندروف، آپاستریم و کوئیکست برای حل معادله ۴ استفاده شده است (۹). رابطه ۴، از نوع معادلات دیفرانسیل جزئی سهموی است. این گونه معادلات از لحاظ زمانی به مقدار اولیه نیاز دارند و در جهت مکان، به شرایط مرزی. همچنین، عموماً از لحاظ زمانی، گام به گام حل می‌شوند. شرایط مرزی در تحقیق حاضر، مقدار غلظت اکسیژن محلول در ابتدا و انتهای بازه مورد مطالعه بود. شرط اولیه نیز مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده اکسیژن محلول در نقاط میانی بازه در نظر گرفته شد. روش‌های عددی ذکر شده، در محیط فرترن نسخه نود برنامه‌نویسی شد.

### ضرایب استفاده شده در حل عددی و تحلیلی ضریب زوال ( $k_c$ )

محاسبه ضریب زوال اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، روند سرعت تجزیه مواد آلی را در شرایط هوازی بیان می‌کند که عمدتاً میکروارگانیسم‌ها انجام می‌دهند. به طور کلی، میزان

فاصله یک کیلومتری مقاطع نمونه برداری از همدیگر و سرعت متوسط اندازه‌گیری شده، زمان طی مسافت جریان در طول هر بازه، ۱۲ دقیقه به دست آمد.

### تئوری مسئله

### شبیه‌سازی اکسیژن محلول با استفاده از حل تحلیلی معادله پایه استریتر-فلیس

استریتر و فلیس با این فرض که اثرهای فتوسنتز گیاهان آبرزی، فرایند تنفسی آبرزیان، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی نیتروژنی و تغییرات غلظت ناشی از پخش و انتقال ناچیز و قابل صرف نظر باشند، رابطه ۱ را ارائه و آن را به صورت تحلیلی حل کردند (۱۲).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = k_a(c_s - c) - k_c L_c \quad (1)$$

در این رابطه،  $L_c$  مقدار غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی،  $k_c$  ضریب زوال اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی،  $c$  غلظت اکسیژن محلول،  $c_s$  غلظت اکسیژن محلول اشباع و  $k_a$  ضریب هوادهی است. آن‌ها رابطه ۲ را نیز برای به دست آوردن  $L_c$  پیشنهاد کردند.

$$L_c = L_{c0} e^{k_c t} \quad (2)$$

در این رابطه،  $k_c = k_c + k_s$ ،  $k_s$  نرخ ته نشینی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی و  $L_{c0}$  مقدار اولیه  $L_c$  است. با استفاده از معادلات فوق و با تعریف میزان کمبود اکسیژن محلول به صورت اختلاف غلظت اکسیژن محلول اشباع و غلظت اکسیژن محلول موجود ( $D = O_s - c$ ) و با فرض  $D = D_0$  در زمان  $t = 0$ ،  $D = 0$  در زمان  $t = \infty$  و  $k_c = k_c$ ، حل تحلیلی معادله پیشنهادی استریتر-فلیس به صورت زیر خواهد بود (۱۲).

$$D = \frac{k_c L_{c0}}{k_a - k_c} (e^{-k_c t} - e^{-k_a t}) + D_0 e^{-k_a t} \quad (3)$$

در این رابطه،  $D$  نشان دهنده میزان کمبود اکسیژن محلول نسبت به حالت اشباع است.

برآورد ضریب هوادهی در مدیریت کیفی آب رودخانه دیناچال، با استفاده از روابط تجربی و روش‌های عددی

$$k_c = \frac{1}{\Delta t} \log \frac{L_a}{L_b} \quad (5)$$

در این رابطه،  $\Delta t$  زمان عبور بین دو نقطه نمونه‌برداری،  $L_a$  مقدار اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در بالادست رودخانه و  $L_b$  مقدار اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در پایین‌دست رودخانه است.

### ضریب هوادهی ( $k_a$ )

جذب اکسیژن توسط اتمسفر دارای روند مشخصی است که سرعت آن تحت ضریب هوادهی ( $k_a$ ) است و روش‌های متعددی برای محاسبه آن وجود دارد. در تحقیق حاضر، از چهار معادله تجربی جدول ۱ برای محاسبه ضریب هوادهی استفاده شده است.

جدول ۱. روش‌های تجربی مورد استفاده برای تخمین ضریب هوادهی

رابطه	نام رابطه / مؤلف	ردیف
$K_a = \frac{3/9u^{-0.5}}{H^{1/5}}$	Oconnor and Dobbins, 1958	۱
$K_a = \frac{5/134u}{H^{1/33}}$	Langbein and Durum, 1967	۲
$K_a = \frac{5/23u}{H^{1/67}}$	Boulton, 1954	۳
$K_a = \frac{1/923u^{0.273}}{2/30.3H^{1/33}}$	Ling et al, 2010	۴

در جدول ۱،  $u$  سرعت متوسط جریان برحسب متر بر ثانیه و  $H$  عمق متوسط رودخانه برحسب متر است.

$$D_x = 10/612HU \left( \frac{U}{U^*} \right), \quad U^* = \sqrt{gHS} \quad (6)$$

در این رابطه،  $H$  عمق متوسط جریان،  $U$  سرعت متوسط جریان،  $S$  شیب کف رودخانه و  $U^*$  سرعت متوسط برشی جریان است.

### نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، در جدول ۲ ارائه شده است.

$k_c$ . تنها به عوامل زمان و دما بستگی ندارد، بلکه عوامل دیگری نظیر نوع ماده آلی، شرایط بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی که تجزیه در آن صورت می‌گیرد نیز با آن در ارتباط است. مهم‌ترین فرضیاتی که در استخراج معادله ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی به روش استریتر-فلپس در نظر گرفته شده است، در نظر گرفتن هوادهی به‌عنوان تنها منبع اکسیژن محلول و فرض نیاز اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی به‌عنوان تنها منبع مصرف اکسیژن محلول است (۱۱). در تحقیق حاضر، به علت تطابق فرضیات روش استفاده با شرایط فیزیکی رودخانه مورد مطالعه، از روش استریتر-فلپس (معادله ۵) استفاده شده است (۱۳).

### ضریب پخش طولی

از میان پارامترهای مؤثر در برآورد ضریب پخش طولی می‌توان به عمق متوسط جریان ( $H$ )، سرعت متوسط جریان ( $U$ )، شیب کف رودخانه ( $S$ ) و سرعت متوسط برشی ( $U^*$ ) اشاره کرد. براساس نتایج نظری و همکاران، از بین روابط تجربی برای برآورد ضریب پخش طولی، معادله کاشفی‌پور-فالكونر مناسب‌ترین رابطه در رودخانه پسیخان است. در تحقیق حاضر، برای محاسبه ضریب پخش طولی از رابطه تجربی کاشفی‌پور و فالكونر (رابطه ۶) استفاده شده است (۸):

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

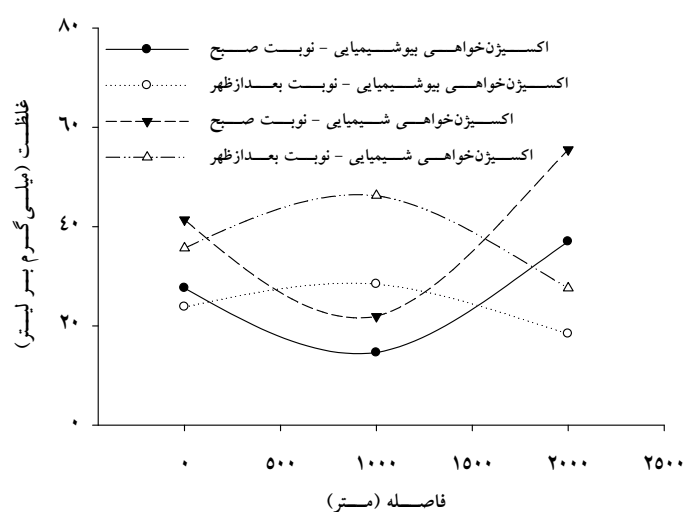
جدول ۲. مقادیر پارامترهای کیفی رودخانه دیناچال - شهریور ۱۳۹۱

COD <sup>†</sup>	BOD <sup>†</sup>	DO <sup>†</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>†</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>†</sup>	pH	EC(μs/m)	Temperature(°C)	ساعت نمونه برداری	مقطع نمونه برداری	ردیف
۴۱/۴۰	۲۷/۶۰	۷/۲۰	۱/۷۳	۰/۰۳۸	۷/۸۴	۳۲۵	۲۱/۲	۱۰:۳۰	۱	۱
۲۱/۹۰	۱۴/۶۰	۶/۷۷	۱/۷۴	۰/۰۴۸	۷/۸۱	۳۲۶	۲۰/۸	۱۰:۴۲	۲	۲
۵۵/۵۰	۳۷	۶/۹۷	۱/۵۹	۰/۰۴۶	۷/۹۲	۳۳۰	۲۱/۶	۱۰:۵۴	۳	۳
۳۵/۷۰	۲۳/۸۰	۶/۸۰	۲/۸۵	۰/۰۵۸	۷/۹۰	۳۲۱	۲۳/۴	۱۴:۳۰	۱	۴
۴۶/۲۷	۲۸/۴۰	۷	۲/۸۰	۰/۰۶۳	۷/۹۲	۳۲۵	۲۳/۱	۱۴:۴۲	۲	۵
۲۷/۶۰	۱۸/۴۰	۷/۳۰	۲/۳۹	۰/۰۵۵	۷/۹۴	۳۲۸	۲۳/۸	۱۴:۵۴	۳	۶
۳۴/۷۳	۲۴/۹۷	۷/۰۱	۲/۱۸	۰/۰۵۱	۷/۸۹	۳۲۶	۲۲/۳	میانگین		

† واحد اعداد جدول برحسب میلی‌گرم بر لیتر است.

اکسیژن محلول در نمونه‌های برداشت شده برابر ۷/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر است که وضعیت نسبتاً مطلوب کیفیت رودخانه را نشان می‌دهد. در شکل ۲، تغییرات غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) در دو نوبت صبح و بعدازظهر نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۲، میانگین هدایت الکتریکی در کل نمونه‌های برداشت شده از رودخانه دیناچال برابر ۳۲۶ میکروزیمنس بر متر بوده است که حاکی از مطلوب بودن آب رودخانه دیناچال از لحاظ شوری است. مقادیر pH از قلیابیت کم آب رودخانه حکایت می‌کند. مقادیر کم فسفات و نترات اندازه‌گیری شده در آب رودخانه نیز نشان از وضعیت مطلوب کیفیت آب آن دارد. میانگین غلظت



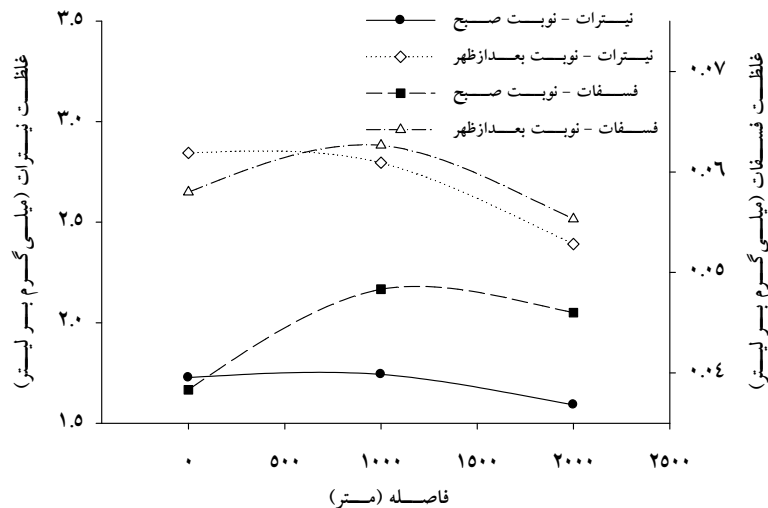
شکل ۲. تغییرات غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و شیمیایی در رودخانه دیناچال (نوبت صبح و بعدازظهر)

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

نوبت بعدازظهر، روندی کاهشی از خود نشان می‌دهند. در شکل ۳، تغییرات غلظت نیترات و فسفات رودخانه دیناچال، در دو نوبت صبح و بعدازظهر نشان داده شده است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که تغییرات غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) در دو نوبت صبح و بعدازظهر از یکدیگر پیروی می‌کنند؛ به طوری که در نوبت صبح، غلظت‌ها روندی افزایشی و در



شکل ۳. تغییرات غلظت نیترات و فسفات در رودخانه دیناچال (نوبت صبح و بعدازظهر)

همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، روش عددی آپاستریم با معادله بولتون<sup>۳</sup> بهترین جواب را در مقایسه با سایر روش‌ها به دست آورده است. مقادیر ضریب هم‌بستگی پیرسون و میانگین قدرمطلق خطا در این روش، به ترتیب ۰/۹۹۵ و ۰/۰۳۳ است. در روش حل تحلیلی استریتز-فلپس، جواب نه‌چندان دقیقی برای برآورد اکسیژن محلول به دست آمده است که دلیل آن در نظر گرفتن ترم‌های انتقال و پخش در این روش حل است. پس از روش عددی آپاستریم، روش لکس-وندروف جواب‌های بهتری نسبت به دو روش عددی اف‌تی‌سی‌اس و کوئیکست به دست آورده است. ضریب هم‌بستگی و میانگین قدرمطلق خطا در روش لکس-وندروف با معادله لانگبین و دیورام<sup>۴</sup> به ترتیب ۰/۹۴۱ و

شکل ۳، نشان می‌دهد غلظت‌های نیترات و فسفات در نوبت بعدازظهر بیشتر از نوبت صبح است که می‌تواند ناشی از ورود بیشتر آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در نمونه‌برداری نوبت بعدازظهر باشد. همچنین نشان‌دهنده روندهایی مشابه در تغییرات غلظت نیترات و فسفات در دو نوبت صبح و بعدازظهر است. در مقاله حاضر، نتایج شبیه‌سازی اکسیژن محلول با استفاده از چهار روش عددی ذکر شده و روش تحلیلی استریتز-فلپس در مقابل داده‌های مشاهداتی با هم مقایسه شده است. در جدول ۳، برای مقایسه جواب‌های انواع روش‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده، از مقادیر پارامترهای آماری ضریب هم‌بستگی پیرسون<sup>۱</sup> و میانگین قدرمطلق خطا<sup>۲</sup> استفاده شده است.

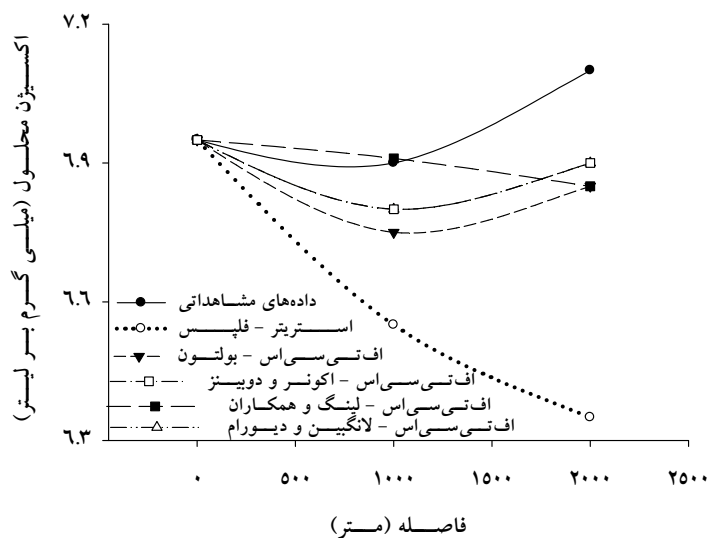
3. Boulton  
4. Langbein and Durum

1. Pearson's Correlation Coefficient  
2. Mean Absolute Error (MAE)

۰/۰۳۳ به دست آمده است که پس از روش عددی آپاستریم با معادله بولتون، بهترین جواب را نسبت به سایر روش‌ها به دست آورده است. روند تغییرات شبیه‌سازی شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای آماری بین روش‌های حل و داده‌های اندازه‌گیری شده در رودخانه دیناچال

MAE	R	معادله ضریب هوادهی	نوع روش حل	MAE	R	معادله ضریب هوادهی	نوع روش حل
				۰/۳۶۷	۰/۵۷۶		استریتز-فلپس
۰/۴۱۷	۰/۳۳۸	اکونر و دوبینز	کوئیکست	۰/۱۰۰	۰/۴۱۸	اکونر و دوبینز	افتی‌سی‌اس
۰/۵۰۷	۰/۱۰۵	لینگ و همکاران		۰/۰۸۷	۰/۷۹۵	لینگ و همکاران	
۰/۱۶۷	۰/۸۳۸	بولتون		۰/۱۳۳	۰/۲۳۹	بولتون	
۰/۴۳۳	۰/۰۷۱	لانگین و دیورام		۰/۱۰۰	۰/۴۱۸	لانگین و دیورام	
۰/۲۱۷	۰/۶۲۴	اکونر و دوبینز	لکس-وندروف	۰/۰۵۰	۰/۸۹۱	اکونر و دوبینز	آپاستریم
۰/۲۱۷	۰/۶۲۴	لینگ و همکاران		۰/۰۵۰	۰/۸۸۴	لینگ و همکاران	
۰/۲۱۷	۰/۶۲۴	بولتون		۰/۰۳۳	۰/۹۹۵	بولتون	
۰/۰۳۳	۰/۹۴۱	لانگین و دیورام		۰/۰۴۳	۰/۹۸۴	لانگین و دیورام	



شکل ۴. نتایج حل عددی افتی‌سی‌اس با چهار روش برآورد ضریب هوادهی

و دیورام و اکونر و دوبینز<sup>۱</sup> با هم شبیه‌اند. ضریب هوادهی لینگ<sup>۲</sup> و همکاران نتایج شبیه‌سازی دقیق‌تری نسبت به سایر

با توجه به شکل ۴، نتایج حل تحلیلی استریتز-فلپس نشان می‌دهد که در کل، بازه‌ها برآورد کمتری از داده‌های مشاهداتی داشته است. همچنین شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول در روش افتی‌سی‌اس با ضرایب هوادهی لانگین

1. Oconnor and Dobbins

2. Ling

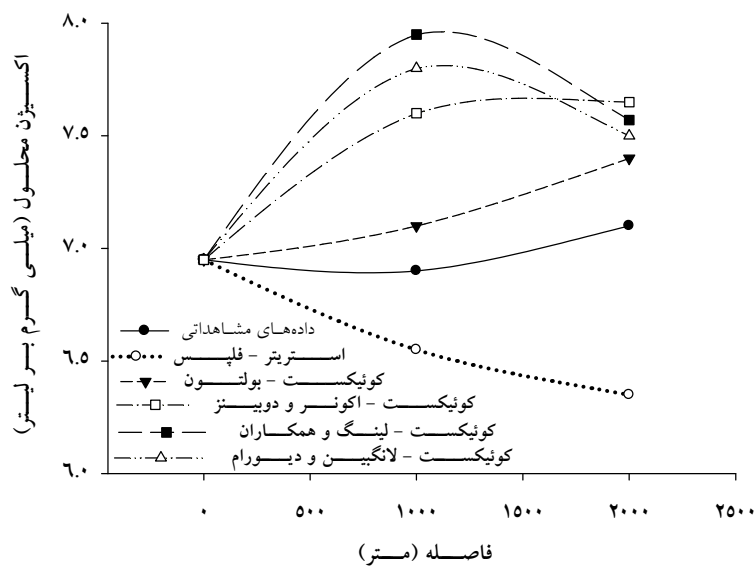


برآورد ضریب هوادهی در مدیریت کیفی آب رودخانه دیناچال، با استفاده از روابط تجربی و روش های عددی

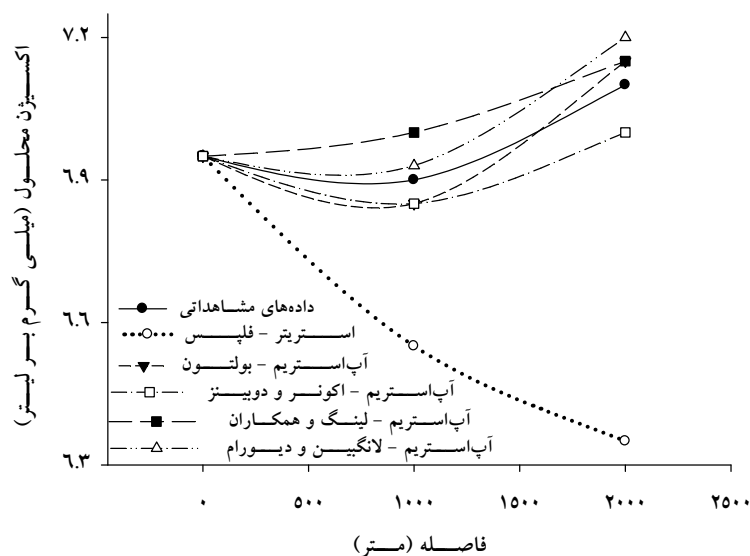
روش های برآورد ضریب هوادهی، مقادیر اکسیژن محلول را بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده برآورد کرده اند و به عبارتی، دچار بیش برآورد شده اند. در بین چهار روش تخمین ضریب هوادهی، روش بولتون نتایج بهتری نسبت به سایر روش ها داشته است. شبیه سازی غلظت اکسیژن محلول با استفاده از حل عددی آپ استریم در شکل ۶ نشان داده شده است.

روش های برآورد ضریب هوادهی به دست آورده است. شبیه سازی غلظت اکسیژن محلول با استفاده از حل عددی کوئیکست و ضرایب هوادهی در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل ۵ نشان می دهد نتایج حل تحلیلی استریتز-فلپس در تمام بازه ها، مقدار کمتری برای اکسیژن محلول برآورد کرده است. در مقابل، حل عددی کوئیکست با هر چهار



شکل ۵. نتایج حل عددی کوئیکست با چهار روش برآورد ضریب هوادهی



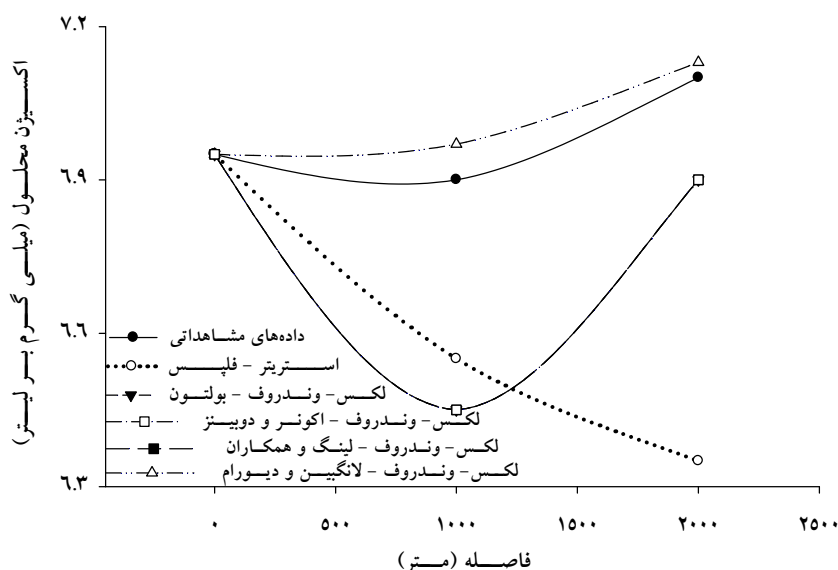
شکل ۶. نتایج حل عددی آپ استریم با چهار روش برآورد ضریب هوادهی

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

انصاری پور و همکاران در بررسی خودپالایی رودخانهٔ پسیخان به این نتیجه رسیدند که روش عددی آپاستریم، بیشترین دقت را در شبیه‌سازی اکسیژن محلول رودخانهٔ مذکور دارد. همچنین روش تجربی بولتون، ضریب هوادهی رودخانهٔ پسیخان را با دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها برآورد کرده است که نتایج ایشان با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد (۱). نظری و همکاران نیز نتایج مشابهی در مورد دقت بیشتر روابط تجربی بولتون، اکونر و دوینز در برآورد ضریب هوادهی رودخانهٔ پسیخان به دست آوردند. نتایج تحقیق حاضر، نتایج تحقیقات گذشته را تأیید می‌کند (۳).

شکل ۶ نشان می‌دهد که شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول در روش آپاستریم با ضرایب هوادهی نتایج شبیه‌سازی دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌های عددی به دست آورده است. شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول با استفاده از حل عددی لکس-وندروف و ضرایب هوادهی در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که در حل عددی لکس-وندروف با ضرایب هوادهی بولتون، اکونر و دوینز و لینگ و همکاران نتایجی مشابه به هم به دست آمده است. روش لانگین و دیورام غلظت اکسیژن محلول را در حل عددی لکس-وندروف دقیق‌تر برآورد کرده است.



شکل ۷. نتایج حل عددی لکس-وندروف با چهار روش برآورد ضریب هوادهی

شبیه‌سازی روش‌های عددی و تحلیلی پارامتر اکسیژن محلول در رودخانهٔ دیناچال و بررسی روند تغییرات آن، مشخص شد که ضریب هوادهی از مهم‌ترین ضرایب سیستمی است که در میزان دقت این روش‌ها تأثیر بسزایی دارد. با مقایسهٔ نتایج حل عددی با داده‌های مشاهده‌ای، مشخص شد که روش آپاستریم با معادلهٔ ضریب هوادهی

## نتیجه‌گیری

مقایسهٔ نتایج حل عددی و حل تحلیلی رابطهٔ استریت-فلپس در شبیه‌سازی اکسیژن محلول در رودخانهٔ دیناچال، نشان‌دهندهٔ دقت بیشتر روش‌های عددی در مقایسه با حل تحلیلی است که علت آن را می‌توان نبود ترم‌های انتقال و پخش در رابطهٔ استریت-فلپس دانست. با توجه به نتایج

6. Gotovtsev A V (2010) Modification of the Streeter-Phelps System with the Aim to Account for the Feedback between Dissolved Oxygen Concentration and Organic Matter Oxidation Rate. *Water Resources*. 37(2):245-251.
7. 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*. 7:3949-3963.
8. Kashefipour S M and Falconer R A (2002) Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Channels. *Water Research*. 36:1596-1608.
9. 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.
10. Morid Nejad M, Ebrahimi K and Banihabib M E (2009) A Study of Tracing Contaminant through the Surface Water involving Physical and Numerical Models. 2nd international conference on Water, Eco-systems and sustainable development in arid and semi-arid zones, Yazd, Iran.
11. Schnoor J (1996) Environmental modeling: Fate and transport of pollutants in water, air, and soil. Wiley & Sons, New York, pp. 231-354.
12. Streeter M W and Phelps E E (1925) A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *United State Public Health*. pp. 87-102.
13. Streeter H W, Wright C T and Kehr R W (1936) Measures of natural oxidation in polluted streams. *Sewage Works*. 8:282-316.
14. Yu L and Salvador N N B (2005) Modeling Water Quality Rivers. *American Applied Sciences*. 2(4):881-886.

بولتون، بیشترین دقت را در شبیه‌سازی اکسیژن محلول در رودخانه دیناچال دارد. معادله تجربی اکونر و دوینز که یکی از روش‌های پرکاربرد در برآورد ضریب هوادهی است، بعد از روش تجربی بولتون بیشترین دقت را داشته است.

### قدردانی

این تحقیق و تهیه مقالات مربوط، با پشتیبانی دانشگاه تهران و شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان (طرح شماره ۳۹۶۴۹/۱۶) انجام شده است که بدین‌وسیله از آن‌ها قدردانی می‌شود.

### منابع

۱. انصاری پور ا. ح، ابراهیمی ک. و امید م ح (۱۳۹۲) بررسی خودپالایی جریان‌های رودخانه‌ای با توسعه و کاربرد مدل‌های ریاضی مطالعه موردی: رودخانه پسیخان-گیلان. تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۳۱-۴۲:(۲)۱۴.
۲. مفتاح هلقی م. و مسگران کریمی ب (۱۳۷۸) مطالعه و بررسی خودپالایی رودخانه قره‌سو. گزارش سازمان حفاظت محیط زیست گرگان، ۱۶۴ صفحه.
۳. نظری ع، ابراهیمی ک. و امید م ح (۱۳۹۱) مقایسه روش‌های برآورد ضریب انتشار طولی در شبیه‌سازی اکسیژن محلول- رودخانه پسیخان. نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.
4. Alam J B, Hossain A, Khan S K, Banik B K, Islam M R, Muyen Z and Rahman H M (2007) Deterioration of water quality of Surma River. *Environmental Monitoring and Assessment*. 134:233-242.
5. EPA (1997) Technical Guidance Manual for Developing Total Maximum Daily Loads. Book II: Streams and Rivers. pp. 39-46.