

استفاده از مدل عددی در حل معادلات جریان و برآورد آلاینده‌های کیفی رودخانه‌ها (مطالعه موردی رودخانه کرخه)

مهدی ناصری ملکی^۱ و سید محمود کاشفی پور^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ استاد گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

در سال‌های اخیر کوشش‌های بسیاری در زمینه توسعه مدل‌های کیفیت آب برای تخمین مقدار و نرخ آلودگی رودخانه‌ها، سواحل و خلیج‌ها صورت گرفته است. شاخص‌های بسیاری در این مدل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال می‌توان به کلیفرم، BOD، SOD، چرخه نیتروژن، اکسیژن محلول و فسفر اشاره نمود. هدف از این تحقیق بررسی دینامیکی جریان و پارامترهای کیفی شوری، BOD و فسفر در محدوده پای پل تا حمیدیه واقع در رودخانه کرخه می‌باشد. قبل از آن که اقدام به مدل‌سازی کیفیت آب و یا انتقال رسوب در سیستم‌های رودخانه‌ای شود لازم است معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر جریان آب در رودخانه‌ها حل شوند. برای این منظور از مدل عددی FASTER استفاده گردید. جهت حل هیدرودینامیک جریان لازم است که ضریب زبری مانینگ در مدل FASTER کالیبره شود. با کالیبراسیون، مقدار این ضریب $0/028$ انتخاب شد. در مرحله بعد لازم است معادله انتقال و پخش (ADE) حل گردد. برای این منظور از ۴ معادله مختلف برای تخمین ضریب پخشیدگی (D_L) استفاده گردید و سپس با آزمون و خطا مقادیر ضرایب ثابت برای پارامترهای کیفی مشخص گردید. با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده در رودخانه کرخه و محاسبه شده توسط مدل مشخص گردید که برای پارامترهای مذکور، ضریب پخش فیشرفر قابل قبول و نزدیک به داده‌های اندازه‌گیری می‌دهد.

واژگان کلیدی: رودخانه کرخه، مدل FASTER، ضریب پخشیدگی، پارامترهای کیفی.

۱- مقدمه

کیفیت رودخانه‌ها است، اکسیژن محلول (DO) و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD) در رودخانه زاینده رود را مدل‌سازی، و نرخ رشد و زوال آنها را تعیین نمود [۴]. توکلی‌زاده با استفاده از مدل FASTER، تأثیر ضریب پخش طولی را در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی BOD، نیتروژن و آمونیاک در رودخانه کارون بررسی نمود و در آخر برای تخمین هر یک از پارامترهای آلودگی رابطه‌ای که بیشترین دقت را در برآورد داشت، پیشنهاد کرد [۵]. صدیق‌نژاد و کاشفی‌پور برای مقایسه مدل‌های انتقال رسوب آبگیر مارد ضریب زبری مانینگ را برای ایستگاه پمپاژ مارد کالیبره نمودند [۶]. ایوب‌زاده و همکاران از سیستم استنتاج فازی-عصبی-تطبیقی (ANFIS) که نیاز به معادلات پیچیده ریاضی ندارد، جهت تخمین ضریب پخش طولی استفاده کردند [۷]. شاخه مهندسی ارتش آمریکا نیز طرحی را به عنوان شبیه‌سازی کیفیت آب خلیج فلوریدا اجرا نمود است. در این پروژه رسوبات معلق، فسفر، نیتروژن، BOD و شوری مدل شده‌اند [۸]. Lee و Park برای مشخص نمودن رابطه بین آلودگی رودخانه ناکدونگ در کره و مدل‌سازی کره کیفی آن از مدل کامپیوتری QUAL2E استفاده نمودند و برای رفع برخی از این محدودیت‌ها اصلاحاتی در کدنویسی مدل انجام

افزایش تقاضای آب، بالا رفتن سطح زندگی، گسترش آلودگی منابع آب در اثر توسعه فعالیت‌های کشاورزی، شهری و صنعتی موجب ایجاد وضع نامساعدی در بسیاری از مناطق جهان شده است. کنترل آلاینده‌های ورودی به سیستم، تعیین راندمان تصفیه آلاینده‌ها با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی از اصلی‌ترین مسائل در مدیریت کیفی رودخانه‌ها است [۱]. توسعه مدل‌های کیفی آب از سال ۱۹۲۵ آغاز شده است و در آغاز توجه در دو زمینه متمرکز بوده است، نخست مدل‌سازی شیمیایی رودخانه‌ها مانند مدل BOD-DO و معادله توازن غلظتی آلاینده‌ها مانند مدل پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها، به علت نبود ابزار محاسباتی مانند کامپیوتر حل معادلات در این مدل‌ها بسیار مشکل و به صورت تحلیلی و یا گرافیکی بوده است [۲]. باغبان‌پور (۱۳۸۹) به منظور بررسی رسوبات معلق در رودخانه کرخه از مدل FASTER استفاده نمود. مطالعات ایشان نشان داد که رابطه فیشرفر برای ضریب پخش و معادله فان‌رایان برای رسوب معلق تخمین درستی از بار معلق در رودخانه کرخه می‌دهد [۳]. صفوی با استفاده از سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی که روشی نو جهت پیش‌بینی

۲-۲- حل عددی معادلات جریان

در این تحقیق معادلات پیوستگی و مومنتم با استفاده از روش Staggered و اندازه شبکه متغیر به صورت عددی حل شده‌اند. در روش Staggered یا روش زیگزآگی معادله پیوستگی حول گره (i) و معادله مومنتم حول گره $(i+1/2)$ حل می‌شود. منظور از روش Staggered این است که نقطه محاسباتی برای دبی و عمق آب فرق می‌کند. شکل تفکیک شده معادله پیوستگی با استفاده از روش Staggered به صورت رابطه (۳) می‌باشد [۱۱].

$$\frac{1}{\Delta t} T_{wi}^n (Z_i^{n+1} - Z_i^n) (x_{i+1/2} - x_{i-1/2}) + \theta (Q_{i+1/2}^{n+1} - Q_{i-1/2}^{n+1}) + (1 - \theta) (Q_{i+1/2}^n - Q_{i-1/2}^n) = Q_{Li}^{n+1} \quad (3)$$

که در این رابطه $0 \leq \theta \leq 1$ ضریب وزنی می‌باشد و مقدار تأثیر زمان n و $n+1$ را در حل معادله نشان می‌دهد. معادله مومنتم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \underbrace{\beta \frac{\partial \left[\frac{Q^2}{A} \right]}{\partial x}}_2 = - \underbrace{\frac{\tau_b p}{\rho}}_3 - \underbrace{gA \frac{\partial y}{\partial x}}_4 \quad (4)$$

معادله بالا به فرم ابقایی معادله مومنتم مشهور است. در رابطه بالا، p محیط خیس شده، ρ جرم واحد حجم آب و τ_b تنش برشی کف می‌باشد. سایر پارامترها مشابه روابط قبل می‌باشند. تنش برشی کف از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\tau_b = \rho g R S_f \quad (5)$$

در این رابطه، R شعاع هیدرولیکی است و وابسته به زمان و مکان است. S_f با استفاده از رابطه مانینگ و شزی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$S_f = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} = \frac{v^2}{c^2 R} = \frac{Q|Q|}{c^2 A^2 R} \quad (6)$$

در معادله اخیر n ضریب زبری مانینگ و c ضریب شزی است. در معادله (۴)، عبارت ۱ شتاب محلی، عبارت ۲ شتاب جابجایی،

شد و نسخه جدید، مدل QUAL2E نامیده شده است. نتایج هر دو مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شده است و نتایج نشان می‌دهد مدل QUAL2E جواب‌های نزدیکتری با داده‌های واقعی دارد زیرا مدل QUAL2E دارای توانایی شبیه‌سازی تبدیل مرگ جلبک‌ها به BOD و نیتروژن‌زدایی می‌باشد [۹]. کاشفی‌پور و فالکونر با تکیه بر ۸۰ سری داده از ۳۰ رودخانه در آمریکا، ضریب پخشیدگی را بررسی کردند. چرا که پیش از تعیین پارامترهای کیفی در سیستم‌های رودخانه‌ای، لازم است تخمین درست و دقیقی از ضریب پخشیدگی صورت پذیرد [۱۰]. هدف از تحقیق حاضر، تعیین هیدرودینامیک جریان و پارامترهای مؤثر در آن و همچنین اندازه‌گیری میزان رشد و زوال پارامترهای کیفی و آلاینده‌ها در رودخانه کرخه می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر جریان یک بعدی

در اکثر سیستم‌های رودخانه‌ای می‌توان از اثر لایه‌های آب بر روی یکدیگر صرف‌نظر نمود و از مدل‌های تک‌بعدی جهت مدل‌سازی جریان آب استفاده نمود. معادلات یک‌بعدی جریان غیرماندگار در مجاری روباز، معادلات سنت و نانت نامیده می‌شوند. این معادلات، از دو معادله مجزا به نام پیوستگی (معادله (۱)) و مومنتم (معادله (۲)) تشکیل شده‌اند، و پس از توسعه توسط یک مهندس فرانسوی به نام آدهم‌رجین کلادبر مشهور به سنت و نانت در سال ۱۸۷۱ به این نام درآمدند. این معادلات به صورت زیر ارائه شدند.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + T \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

در معادلات بالا، A سطح مقطع جریان، Q دبی جریان، T عرض سطح آب، β ضریب تصحیح مومنتم، g شتاب ثقل، y عمق جریان، S_f شیب خط انرژی، S_0 شیب کف، x فاصله در جهت جریان و t متغیر زمان می‌باشند. شیب خط انرژی در معادله (۲) از رابطه مانینگ یا شزی به دست می‌آید، بنابراین نتایج حاصل از این معادله به مقدار انتخاب شده برای n وابسته است. با انتخاب چند مقدار برای n و مقایسه نتایج، بهترین مقدار را می‌توان تعیین کرد.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2\beta Q q_L}{A} - \frac{2\beta Q T}{A} \frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{\beta Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} = -gA \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{Q|Q|}{c^2 RA} \quad (V)$$

با استفاده از روش Staggered و حل معادله حول نقطه (i+1/2) معادله مومنتم به صورت زیر به دست می‌آید:

عبارت ۳ مقاومت کف و عبارت ۴ گرادیان فشار است. اگر در فرم ابقایی معادله مومنتوم از ترم انتقالی معادله، یعنی $\frac{\partial}{\partial x}(\beta Q^2 / A)$ مشتق گرفته شود و به جای $\frac{\partial Q}{\partial x}$ از معادله پیوستگی و $S_f = \frac{Q|Q|}{c^2 A^2 R}$ و $\tau_b = \rho g R S_f$ جای‌گذاری گردند، صورت دیگری از معادله مومنتوم به دست می‌آید که به آن فرم غیر ابقایی معادله مومنتوم گویند که به صورت رابطه (V) می‌باشد.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} (Q_{i+1/2}^{n+1} - Q_{i-1/2}^{n+1}) + \left[\frac{2\beta[\theta Q_{i+1/2}^{n+1} + (1-\theta)Q_{i+1/2}^n]}{(x_{i+1} - x_i) A_{i+1/2}^n} \right] Q_{Li+1/2}^{n+1} \\ & - \beta \frac{Q_{i+1/2}^n T_{wi+1/2}^n}{\Delta t A_{i+1/2}^n} (z_{i+1}^{n+1} + z_i^{n+1} - z_{i+1}^n - z_i^n) - \frac{\beta Q_{i+1/2}^{n+1} Q_{i+1/2}^n}{(A_{i+1/2}^n)^2 (x_{i+1} - x_i)} (A_{i+1}^n - A_i^n) = \\ & - \frac{g A_{i+1/2}^n}{(x_{i+1} - x_i)} [\theta (z_{i+1}^{n+1} - z_i^{n+1}) + (1-\theta)(z_i^{n+1} - z_i^n)] - \frac{g Q_{i+1/2}^{n+1} |Q_{i+1/2}^n|}{(C_i^{n+1})^2 A_{i+1/2}^n R_{i+1/2}^n} \end{aligned} \quad (A)$$

جدول ۱- روابط ارائه شده برای تخمین ضریب پخشیدگی طولی

منبع	معادله D_L
Elder (۱۹۵۹)	$D_L = \left[\frac{0.4041}{K^3} + \frac{K}{6} \right] HU_* \quad \text{or} \quad D_L = 5.93 HU_*$
Fischer (۱۹۷۹)	$D_L = 0.011 \frac{U^2 W^2}{HU_*}$
کاشفی‌پور و Falconer (۲۰۰۲) و (۲۰۰۰)	$D_L = 10.612 HU_* \left(\frac{U}{U_*} \right)$ If $W/H \geq 50$ $D_L = \left[7.428 + 1.775 \left[\frac{W}{H} \right]^{0.62} \left[\frac{U}{U_*} \right]^{0.572} \right] HU_* \left[\frac{U}{U_*} \right]$ If $W/H < 50$
کاشفی‌پور (۲۰۰۱)	$D_L = 3.263 \left[\frac{W}{H} \right]^{0.6} HU_*$ برای فلوام آزمایشگاهی
Cheong و Seo (۱۹۹۸)	$\frac{D_L}{HU_*} = 5.915 \left[\frac{W}{H} \right]^{0.62} \left[\frac{U}{U_*} \right]^{1.428}$

۳-۲- معادله انتقال - پخش (ADE)

معادله انتقال - پخش را در حالت یک بعدی می توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(SA)}_1 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(SQ)}_2 - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left[AD_L \frac{\partial S}{\partial x}\right]}_3 = \underbrace{S_T}_4 + \underbrace{\frac{Q_L S_L}{\delta x}}_5 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، S غلظت ماده آلاینده یا غلظت رسوبات معلق در مقطع، S_T منبع افزایش دهنده یا کاهش دهنده، D_L ضریب پخشیدگی طولی، A سطح مقطع جریان، Q دبی جریان، S_L غلظت جریان ورودی یا خروجی جانبی و Q_L دبی جریان جانبی است و سایر پارامترها مشابه روابط قبل می باشند. در این رابطه ترم ۱: تأثیر محلی یا تغییر موضعی غلظت، ۲: انتشار به وسیله جابجایی یا ترم انتقال، ۳: انتشار به وسیله پخشیدگی، ۴: منبع کاهش دهنده یا افزایش دهنده آلودگی (ترم زوال یا رشد ماده آلاینده) و ۵: مقدار آلاینده و یا رسوب ورودی و یا خروجی جانبی (زمان/غلظت) می باشد. D_L یا ضریب پخشیدگی طولی تابعی از خاصیت پخش مولکولی و شرایط هیدرولیکی است. برای

محاسبه D_L روابط تجربی و تئوری زیادی ارائه شده است. در جدول (۱) به برخی از این روابط اشاره شده است [۱۱ و ۱۲]. در معادلات جدول (۱)، U سرعت متوسط جریان، W عرض سطح آب، H عمق جریان، U^* سرعت برشی جریان و D_L ضریب پخشیدگی طولی است.

۴-۲- معرفی مدل FASTER و منطقه مورد مطالعه

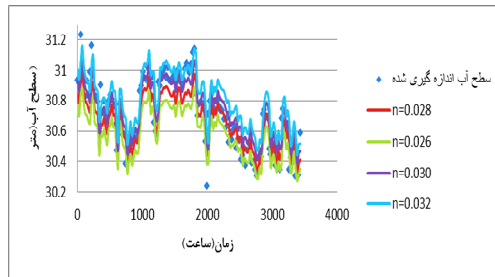
در تحقیق حاضر از مدل یک بعدی هیدرودینامیکی و کیفی FASTER استفاده شده است. این مدل اولین بار توسط کاشفی پور در مرکز تحقیقات آب دانشگاه کاردیف انگلستان توسعه پیدا کرد [۱۱]. در این مدل سطح آب و دبی به کمک حل عددی فرم کامل معادلات غیر همگام سنت و نانت تعیین می گردند. بخش کیفی مدل FASTER قادر است ۱۱ نوع آلودگی از جمله شوری، BOD، DO، ترکیبات نیتروژن و فسفر و را مدل نماید. بسته به نوع آلودگی و یا رسوب، روابط متفاوتی می توان برای S_T در مدل FASTER تعریف نمود. برخی از این روابط در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- روابط موجود در منابع برای S_T

پارامتر کیفی	رابطه پیشنهادی S_T
کلیفرم	$S_T = -K_5 AS$
نیتروژن آلی	$S_T = -\beta_3 N_4 A - \sigma_4 N_4 A$
نیتروژن آمونیاکی	$S_T = \beta_3 N_4 A - \beta_1 N_1 A$
فسفر آلی	$S_T = \beta_4 P_1 A - \sigma_5 P_1 A$
فسفر محلول	$S_T = \beta_4 P_1 A - \sigma_6 P_2 A$
اکسیژن خواهی بیوشیمیایی	$S_T = -K_1 SA - K_3 SA$
اکسیژن محلول	$S_T = -K_2 (O_2^* - O_2) A - K_1 SA - K_4 - \alpha_5 \beta_1 N_1 A$

محلول؛ K_1 ضریب اکسیژن خواهی بیوشیمیایی؛ K_3 نرخ کاهش BOD کربناته در اثر ته نشینی؛ O_2 غلظت اکسیژن محلول (mg/l)؛ K_2 ثابت اکسیژن گیری (day^{-1})؛ O_2^* غلظت اکسیژن محلول اشباع در دما و فشار محلی (mg/l)؛ K_4 نرخ اکسیژن خواهی رسوب و دامنه تغییرات ۱/۵ الی ۹/۸ $(O_2/m^2/day)$ ؛ α_5 نرخ مصرف اکسیژن به ازای واحد اکسیداسیون نیتروژن آمونیاکی می باشد. در این تحقیق مدل سازی پارامترهای شوری، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و فسفر در رودخانه کرخه مورد بررسی قرار گرفته

در روابط جدول (۲)، S_T غلظت ماده آلاینده، A سطح مقطع جریان؛ K_5 ثابت مرگ و میر کلیفرم (day^{-1})؛ N_4 غلظت نیتروژن آلی (mg/l)؛ β_3 نرخ ثابت هیدرولیز نیتروژن آلی به نیتروژن (day^{-1})؛ σ_4 ضریب نرخ ته نشینی نیتروژن آلی (day^{-1})؛ N_1 غلظت نیتروژن آمونیاکی (mg/l)؛ β_1 ثابت نرخ اکسیداسیون نیتروژن آمونیاکی؛ P_1 غلظت فسفر آلی (mg/l)؛ β_4 نرخ زوال فسفر آلی؛ σ_5 نرخ رسوب فسفر آلی؛ P_2 غلظت فسفر غیر آلی یا فسفر محلول (mg/l)؛ σ_6 نرخ زوال فسفر



شکل ۲- نمونه مقایسه سطح آب اندازه گیری شده و محاسبه شده به ازای ضرایب زبری مختلف (مرحله واسنجی)

پس از اجرای مدل برای مقادیر زیادی از n و با آزمون و خطا، بهترین مقدار ضریب زبری 0.028 حاصل شد. در شکل‌های (۱) و (۲) نتایج اجرای مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده رودخانه به ترتیب برای دبی جریان و سطح آب در مرحله واسنجی با در نظر گرفتن زبری‌های مختلف نشان داده شده است. با دقت در اشکال بالا واضح است که مقادیر دبی به ازای زبری‌های مختلف تغییر چندانی ندارد و منحنی‌ها تقریباً بر هم منطبق هستند. دلیل این موضوع این است که مقادیر دبی در مدل FASTER با استفاده از معادله پیوستگی به دست می‌آید و از آنجا که ضریب زبری تأثیری روی معادله پیوستگی ندارد، لذا تغییرات دبی ناچیز خواهد بود. اما از آنجا که سطح آب در مدل از معادله مومنوم به دست می‌آید و ضریب زبری روی معادله مومنوم مؤثر است، لذا کوچکترین تغییر در این ضریب، مقادیر به دست آمده برای اشل را به میزان زیادی تغییر خواهد داد. جدول (۳) مقادیر درصد خطا را به ازای ضرایب زبری مختلف نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از واسنجی مدل به ازای زبری 0.028 در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر درصد خطا برای دبی و اشل به ازای ضرایب زبری مختلف

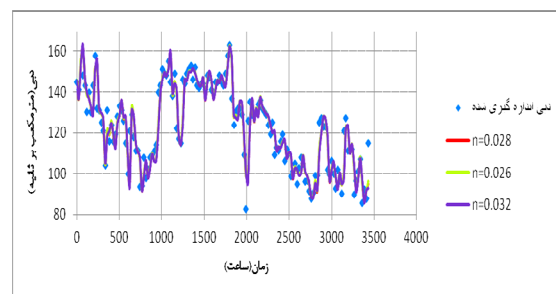
درصد خطا		ضریب زبری مانینگ
اشل	دبی	
۶/۰۱	۴/۲۰	$n=0.024$
۵/۵۶	۴/۳۶	$n=0.025$
۳/۹۱	۴/۴۸	$n=0.026$
۲/۵۹	۴/۵۲	$n=0.028$
۲/۶۴	۵/۲۱	$n=0.030$
۳/۷۹	۵/۴۸	$n=0.032$
۴/۲۱	۶/۵۶	$n=(0.027-0.029)$

است. بازه مورد مطالعه از ایستگاه پای پل تا حمیدیه در رودخانه کرخه می‌باشد که بین دو ایستگاه مذکور، ایستگاه عبدالخان قرار دارد. اطلاعات مربوط به پارامترهای کیفی و شاخص‌های آلودگی و همچنین اطلاعات مربوط به هیدرودینامیک جریان از جمله دبی- اشل از سازمان آب و برق خوزستان تهیه گردیده است. ایستگاه پای پل به عنوان مرز بالادست و ایستگاه حمیدیه مرز پایین دست در نظر گرفته شده است. همچنین ایستگاه هیدرومتری عبدالخان در این تحقیق ایستگاه شاخص (برای مقایسه نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده) می‌باشد. برای مرز بالادست اطلاعات ورودی شامل هیدروگراف جریان و برای مرز پایین دست اشل (عمق جریان) است که این اطلاعات به عنوان شرایط مرزی در مدل تعریف می‌شوند. بازه انتخابی 227 مقطع^۱ دارد که مقطع 227 پای پل و مقطع ۱ حمیدیه و مقطع ۹۱ عبدالخان است. در این تحقیق، دو دوره برای واسنجی و صحت‌سنجی انتخاب شد. دوره اول برای واسنجی از تاریخ $1386/7/2$ تا $1386/11/25$ و دوره دوم برای صحت سنجی از تاریخ $1388/6/13$ تا $1388/10/17$ انتخاب شده‌اند.

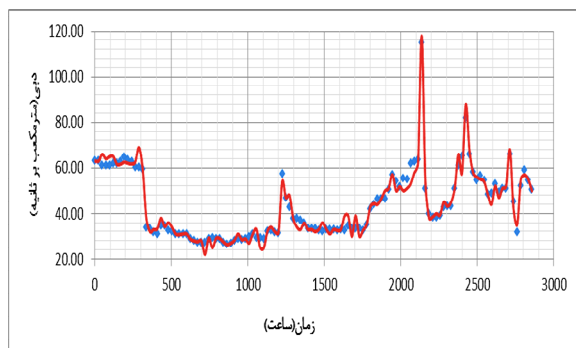
۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی و صحت‌سنجی هیدرودینامیک مدل

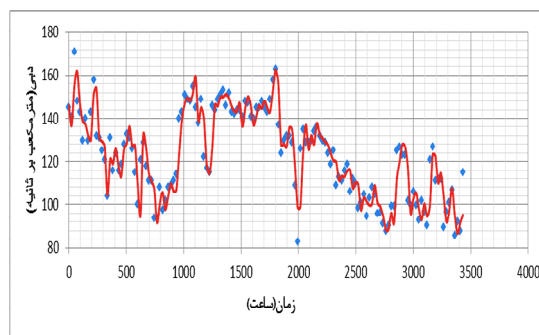
به منظور تعیین ضریب زبری (n) در حد فاصل پای پل تا حمیدیه واقع در رودخانه کرخه، مقادیر مختلف برای این ضریب انتخاب و برای هر مقدار هیدرودینامیک جریان شبیه‌سازی گردید. کمترین ضریب برای شروع آزمون و خطا 0.022 در مدل وارد شده و این مقدار برای اخذ نتیجه مناسب تا مقدار 0.032 تغییر داده شده است. همچنین مقادیر n ‌های متغیر برای بازه‌های مختلفی از رودخانه با توجه به هیدرودینامیک جریان، لحاظ و مدل‌سازی گردید.



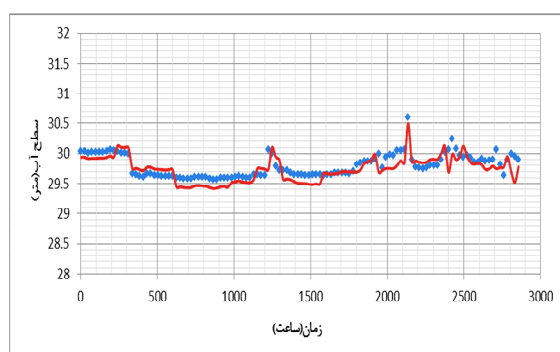
شکل ۱- نمونه مقایسه دبی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به ازای ضرایب زبری مختلف (مرحله واسنجی)



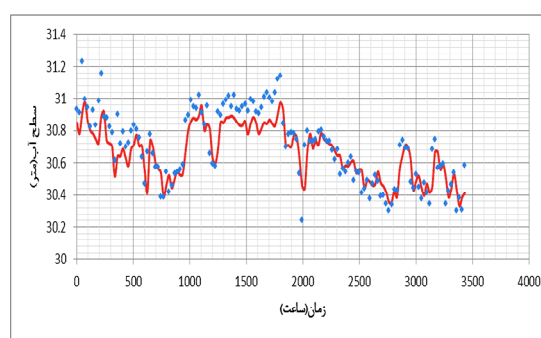
شکل ۵- مقایسه دبی محاسبه شده (منحنی قرمز) و اندازه‌گیری شده (نقاط آبی) در مرحله صحت سنجی با $n=0/028$



شکل ۳- مقایسه دبی محاسبه شده (منحنی قرمز) و اندازه‌گیری شده (نقاط آبی) در مرحله واسنجی با $n=0/028$



شکل ۶- مقایسه سطح آب محاسبه شده (منحنی قرمز) و اندازه‌گیری شده (نقاط آبی) در مرحله صحت سنجی با $n=0/028$



شکل ۴- مقایسه سطح آب محاسبه شده (منحنی قرمز) و اندازه‌گیری شده (نقاط آبی) در مرحله واسنجی با $n=0/028$

برای محاسبه مقدار خطا در مقایسه نتایج مدل، از روابط آماری در جدول (۴) استفاده شده است. این روابط به ترتیب، ضریب همبستگی (R^2)، متوسط درصد مطلق خطا جذر متوسط مجموع مربع خطاها (RMSE) و اختلاف نسبت به خط ۴۵ درجه ($\alpha_{average}$) نام دارند.

در شکل‌های (۵) و (۶)، نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل برای زبری $0/028$ در ایستگاه عبدالخان نشان داده شده است. همچنین مقادیر ضریب همبستگی و درصد خطا برای دبی و اشل در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴- مقادیر ضریب خطا و همبستگی به ازای زبری $0/028$ از مقایسه سطح آب و دبی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده

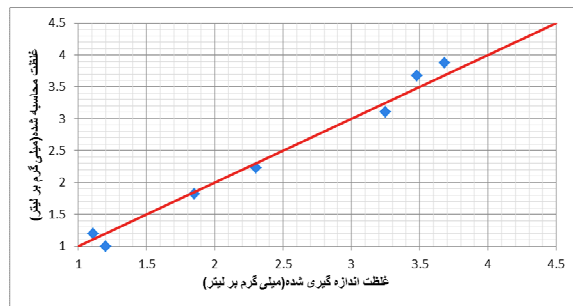
مدل هیدرودینامیکی	مرحله	R^2	خطا (%)	RMSE	$\alpha_{average}$
سطح آب	واسنجی	۰/۹۲	۲/۵۹	۱/۱۰	۰/۹۹۸۵
	صحت‌سنجی	۰/۸۲	۵/۳۶	۲/۶۰	۱/۰۰۱۹
دبی	واسنجی	۰/۹۸	۴/۵۲	۰/۰۱۴	۱/۰۰۳۳
	صحت‌سنجی	۰/۹۶	۴/۳۶	۰/۰۳	۱/۰۰۱۷

شکل ۸- مقایسه غلظت شوری اندازه‌گیری شده (نقاط آبی) و محاسبه شده (منحنی قرمز) در مرحله صحت سنجی

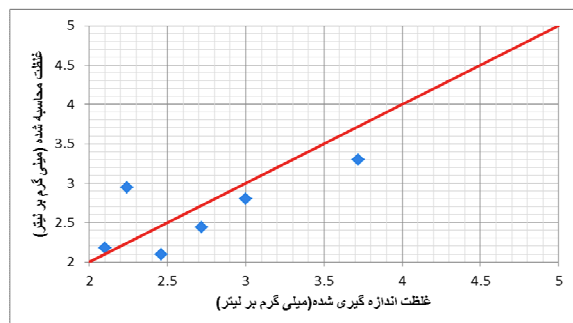
جدول ۶- محاسبه مقادیر خطا و همبستگی مدل در شبیه

سازی BOD

دوره	R^2	a	%E	RMSE
واسنجی	۰/۹۸	۰/۹۸	۵/۵۲	۰/۰۲۱
صحت‌سنجی	۰/۹۱	۰/۹۸	۱۲/۵	۰/۰۳۸



شکل ۱۳- مقایسه همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت BOD (واسنجی مدل)

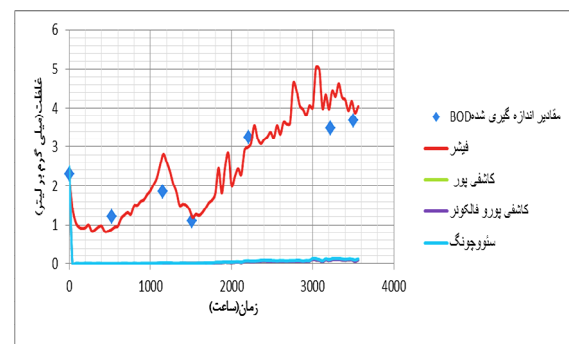


شکل ۱۴- مقایسه همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت BOD (صحت‌سنجی مدل)

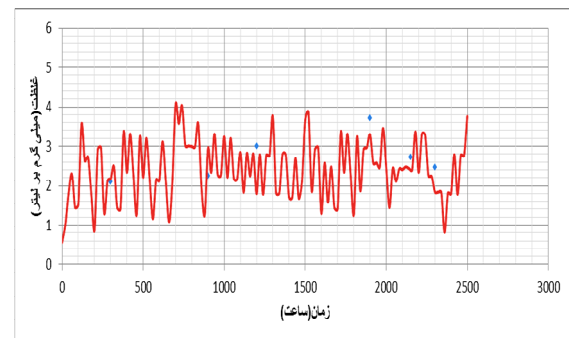
۳-۲-۳- نتایج مدل‌سازی فسفر

آخرین پارامتری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، پارامتر فسفر محلول می‌باشد و ضریب ثابتی که مقدار آن در واسنجی باید مشخص شود، ضریب زوال فسفر محلول (σ_6) می‌باشد. ضرایب مؤثر در فسفر محلول عبارتند از (σ_6 و β_4) که β_4 ، نرخ زوال فسفر آلی است. برای شبیه‌سازی فسفر محلول ابتدا باید فسفر آلی محاسبه و ضرایب آن از جمله β_4 مشخص و در محاسبه فسفر محلول اعمال گردد. اما با توجه به این که این مقدار در ایستگاه عبدالخان اندازه‌گیری نمی‌شود، پارامتر β_4 در بخش فسفر محلول واسنجی و صحت‌سنجی شده است. در مدل‌سازی این پارامتر نیز مشابه سایر پارامترهای کیفی دیگر، از

محاسبه ضریب پخشیدگی (D_L) رابطه فشر در مدل BOD دارای بهترین تخمین بوده است. سایر ضرایب پخشیدگی نتایج نزدیک به هم و غیر قابل قبول می‌دهند. پس از تعیین رابطه مناسب برای محاسبه ضریب پخشیدگی مقدار ضرایب ثابت در مدل BOD از طریق واسنجی و صحت‌سنجی باید مشخص شوند. با مقایسه نتایج اجرای مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در عبدالخان، مقادیر ضرایب ثابت K_1 و K_3 به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۰- به دست آمده‌اند. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل (BOD) به ترتیب در نمودارهای شکل (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

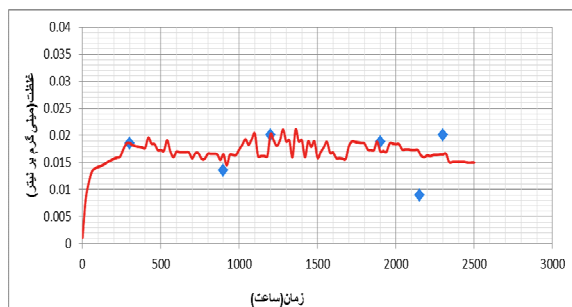


شکل ۱۱- مقایسه نتایج اجرای مدل BOD با تغییر روابط ضریب پخشیدگی در ایستگاه عبدالخان (واسنجی مدل)



شکل ۱۲- مقایسه غلظت BOD اندازه‌گیری شده (نقاط آبی) و پیش‌بینی شده (منحنی قرمز) در مرحله صحت‌سنجی

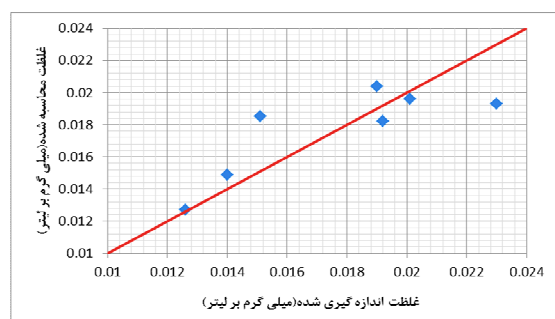
مقادیر خطای اندازه‌گیری شده در جدول (۶) آورده شده است. همچنین در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) همبستگی بین نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل BOD و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه عبدالخان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل بسط داده شده به خوبی این پارامتر را مدل‌سازی می‌کند.



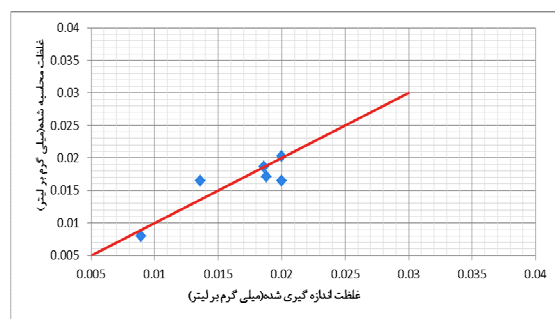
شکل ۱۷- مقایسه غلظت فسفر محلول اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در ایستگاه عبدالخان (مرحله صحت سنجی)

جدول ۷- محاسبه مقادیر خطا و همبستگی مدل در شبیه‌سازی فسفر محلول

دوره	R^2	a	%E	RMSE
واسنجی	۰/۹۸	۱/۰۱۹	۰/۱۶	۰
صحت‌سنجی	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۰۹۲	۰

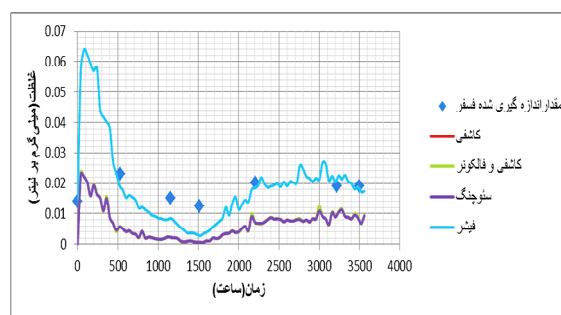


شکل ۱۸- مقایسه همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت فسفر محلول (واسنجی مدل)

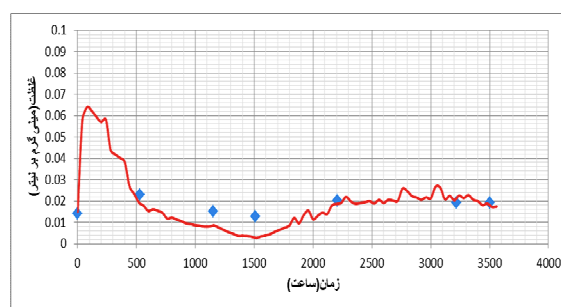


شکل ۱۹- مقایسه همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت فسفر محلول (صحت سنجی مدل)

اطلاعات کیفی پنج ماه دوم سال ۸۶ برای واسنجی و چهار ماه دوم سال ۸۸ برای صحت‌سنجی مدل در ایستگاه عبدالخان استفاده شده است و نتایج مدل در این ایستگاه با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. بهترین مقدار این ضریب با استفاده از واسنجی مدل برای (β_4) ، ۱ و برای (σ_6) ، ۰/۰۱ به دست آمده است. رابطه فیشر در این پارامترها مطابقت بهتری نسبت به سایر روابط در محاسبه ضریب پخشیدگی دارد. شکل (۱۵) نتایج حاصل از مدل‌سازی فسفر محلول بازای ضریب پخشیدگی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همچنین نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از رابطه فیشر در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۵- مقایسه نتایج اجرای مدل فسفر محلول با تغییر روابط ضریب پخشیدگی با مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۱۶- مقایسه غلظت فسفر محلول اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در ایستگاه عبدالخان (مرحله واسنجی)

مقادیر مقدار خطای اندازه‌گیری شده در جدول (۷) آورده شده است. همچنین در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) همبستگی بین نتایج واسنجی و صحت سنجی فسفر محلول و مقادیر اندازه‌گیری شده آن در ایستگاه عبدالخان بررسی شده است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با توجه به گرافهای حاصل و مقایسه نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده، مقدار 0.028 برای ضریب زبری مانینگ در رودخانه کرخه مقدار مناسبی برای هیدرودینامیک جریان است.

۲- با مقایسه نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار با نتایج واقعی، برای محاسبه ضریب پخشیدگی (D_L) رابطه فیشر تخمین دقیق‌تری از نرخ رشد و زوال پارامترهای کیفی شوری، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی و فسفر در رودخانه کرخه می‌دهد.

۳- با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده از مراحل صحت سنجی و واسنجی و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده رودخانه کرخه، ضرایب $k_1 = 0.025$ و $k_3 = -0.020$ جهت پیش‌بینی سرعت رشد و زوال BOD و ضرایب $\beta_4 = 1$ و $\sigma_6 = 0.01$ برای تخمین فسفر مناسب می‌باشند. همچنین در مورد مدل شوری، تنها رابطه مناسب برای محاسبه ضریب پخشیدگی باید مشخص گردد و ضرایب ثابت در این مدل وجود ندارد.

۴- در این تحقیق از مدل یک‌بعدی FASTER به منظور تعیین هیدرودینامیک جریان و آلاینده‌ها استفاده گردید. مقایسه نتایج مدل با مقادیر واقعی، حاکی از دقت بالای مدل FASTER در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای کیفی و آلودگی است.

۵- مراجع

- [۴] صفوی، ح. ر.، "پیش‌بینی کیفی رودخانه‌ها با استفاده از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی"، مجله محیط شناسی، شماره ۱۳۸۸، ۵۳، ۱-۱۰.
- [۵] توکلی‌زاده، ا. ع.، "تأثیر ضریب پخشیدگی بر مدل‌سازی کیفی آب‌های سطحی"، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۵.
- [۶] صدیق‌نژاد، ح.، کاشفی‌پور، س. م.، "مقایسه نتایج مدل‌های انتشار و انتقال رسوب برای آبگیر مارد و ارائه مدل مناسب برای منطقه با استفاده از مدل ریاضی FASTER"، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۵.
- [7] Ayyoubzadeh, S., Riahi-Madvar, A. H., Khadangi, E., Ebadzadeh, M., "An Expert System for Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Streams by Using ANFIS", Journal of Expert Systems with Applications, 2009, 36, 8589-8596.
- [8] US Army Corps of Engineering, "HEC-6 Scour and Deposition in Rivers and Reservoir, User's Manual", The Hydraulic Engineering Center, USA, 1993.
- [9] Park, S. S., Lee, Y. S., "A Water Quality Modeling Study of the Nakdong River, Korea", Ecological Modeling, 2001, 152, 65-75.
- [10] Kashefipour, S. M., Falconer, R. A., "Longitudinal Dispersion Coefficients in Natural Channels", Journal of Water Research, 2002, 36, 1596-1608.
- [11] Kashefipour, S. M., "Modeling Flow, Water Quality and Sediment Transport Processes in Riverine Basins", PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Cardiff University, UK, 2001.
- [12] Seo, I. W., Cheong, T. S., "Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Streams", ASCE Journal of Civil Engineering, 1998, 124, (1), 25-32.
- [۱] کارآموز، م.، "برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ دوم، ۱۳۸۷.
- [۲] توکلی‌زاده، ا. ع.، "بررسی کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای به کمک مدل‌های کامپیوتری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۲.
- [۳] باغبان‌پور، ش.، "مدل‌سازی عددی رسوب معلق غیرچسبنده در رودخانه‌ها"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۹.