مدل‌سازی عددی انتقال رسوب معلق غیرچسبنده در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه کرخه)

شقایق باغبان‌پور* و سید محمود کاشفی‌پور[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۷)

چکیده

رودخانه‌ها به عنوان منبع اصلی تأمین آب مورد نیاز برای شرب و کشاورزی و صنعت از اهمیت زیادی برخوردارند؛ این مطلب لزوم مطالعه برای کنترل، بهبود و رفع مشکلات مربوط به رودخانه‌ها را به ویژه در مورد مسائل مربوط به کیفیت و آلودگی معلوم می‌سازد. برآورد رسوب معلق از جمله مواردی است که در این راستا مورد توجه واقع شده است. در این تحقیق انتقال رسوب معلق غیرچسبنده در رودخانه کرخه به کمک مدل عددی مطالعه شده است. معادلات هیدرودینامیکی سنت-ونانت و هم‌چنین معادله انتقال-پخش برای مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب معلق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در معادله انتقال-پخش علاوه بر انتخاب معادله مناسب برای برآورد رسوب معلق در حالت تعادلی، لازم است تا ضریب پخش مناسب برای رودخانه مورد مطالعه تعیین شود. در این تحقیق ۵ معادله رسوب معلق و ۶ معادله برای تعیین ضریب پخش انتخاب شد. تعداد ۳۰ ترکیب از این معادلات تهیه و مدل نهایی برای هرکدام از این ترکیب‌ها جداگانه اجرا گردید. با مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده از مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه شاخص، عبدالخان، در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی ملاحظه شد که ترکیب معادله رسوب معلق فان رایان و معادله ضریب پخش فیشر نتایج مناسبی را ارائه می‌کنند. حداکثر درصد خطا در برآورد غلظت رسوب معلق در این حالت معادل ۱۹/۵۶ و ۲۶/۳، به‌ترتیب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی بوده است.

واژه‌های کلیدی: رسوب معلق، رودخانه کرخه، معادله *ADE*، مدل *FASTER*، ضریب پخش طولی

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shbaghbanpour@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]

مقدمه

امروزه علاوه بر رودخانه‌ها سایر منابع آبی نظیر آب‌های زیرزمینی، برای تأمین آب مورد نیاز شرب، کشاورزی و صنعت مورد استفاده و بهره‌برداری واقع می‌شوند، اما همچنان رودخانه‌ها به عنوان اصلی‌ترین و بزرگ‌ترین منبع در دسترس حائز اهمیت‌اند. به همین دلیل مطالعات و سرمایه گذاری‌های زیادی جهت بهره‌برداری بهینه، کنترل و حفظ این منابع انجام گرفته است. از جمله مواردی که در این راستا مورد توجه قرار گرفته‌اند، ذراتی هستند که از بستر و دیواره آبرفتی رودخانه‌ها جدا شده و به شکل بار معلق و بار بستر به حرکت در می‌آیند؛ وجود این ذرات که در اصطلاح رسوبات نامیده می‌شوند، در سیستم‌های رودخانه‌ای باعث بروز مشکلاتی خواهد شد. از جمله ورود ذرات رسوبی به پمپ‌ها و آبگیرها، کاهش حجم مفید سدها و کانال‌ها و اختلال در شبکه‌های انتقال و توزیع آب؛ علاوه بر موارد ذکر شده از آن‌جا که در بعضی از رودخانه‌ها، مخصوصاً در سال‌های اخیر، مجاری تخلیه فاضلاب به رودخانه‌ها وارد شده‌اند و مواد و آلاینده‌های شیمیایی به ذرات موجود در آب چسبیده و به شبکه‌های تأمین آب شرب و یا آب کشاورزی وارد می‌شوند، اهمیت مطالعه و تخمین بار رسوب در رودخانه‌ها دو چندان می‌شود.

با توسعه مدل‌های عددی و به کاربردن روابط موجود برای تخمین مقدار رسوب در این مدل‌ها، و انجام سریع محاسبات و مشاهده نتایج، استفاده از این مدل‌ها توانسته در حل مسائل هیدرولیک جریان و انتقال رسوبات مفید واقع شود. در دهه‌های اخیر مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی سیستم‌های رودخانه‌ای (اعم از جریان، رسوب و مسائل کیفی آب) در رودخانه‌ها توسعه یافته‌اند. کاشفی‌پور و همکاران (۲۰۰۲)، معادله یک‌بعدی دینامیکی پخش و انتشار را به کمک روش عددی جدیدی که ترکیبی از روش *ULTIMATE QUICKEST* و یک روش ضمنی تفاضل محدود می‌باشد، حل کردند. این روش به کمک یک مثال استاندارد *(FTCS)* مرکزی تأیید و سپس برای پیش‌بینی غلظت باکتری کالیفرم در سیستم رودخانه‌ای ریبل در شمال غرب انگلستان مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل و مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داده که این مدل توانسته است با دقت نسبتاً بالایی مقادیر کالیفرم را به خوبی پیش‌بینی کند.(۱۰) هم‌چنین در تحقیقی دیگر توکلی‌زاده و کاشفی‌پور (۱۳۸۵) شاخص‌های آلودگی را با استفاده از معادلهٔ موازنه جرم توسط روش‌های عددی شبیه‌سازی نمودند. مدل عددی مورد استفاده، مدل *FASTER* می‌باشد. در این تحقیق ابتدا تأثیر ضریب پخشیدگی در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی *BOD*، نیتروژن آمونیاکی و اکسیژن محلول مورد بررسی قرار گرفت. سپس دقت تخمین این ضریب با استفاده از چهار رابطه برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفی مذکور در محدودهٔ ملاثانی تا فارسیات در رودخانه کارون تشریح و در آخر برای تخمین هر یک از پارامترهای آلودگی رابطه‌ای که بیشترین دقت را در برآورد دارد، پیشنهاد شده است (۱).

جان و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از ۳۲ سری داده (۱۶ سری برای استخراج معادله و ۱۶ سری برای صحت سنجی) وآنالیز ابعادی یک رابطه تجربی برای ضریب پخش انتقالی ارائه کردند. انتخاب مقدار مناسب این ضریب در معادله انتقال-پخش در دقت نتایج اهمیت اساسی دارد. در این رابطه ضریب پخش انتقالی به پارامترهای هیدرولیکی نظیر سرعت متوسط، سرعت برشی جریان، عرض سطح آب و عمق جریان وابسته شده است. در نهایت این رابطه با چند رابطه مورد مقایسه قرار گرفته است (۶). پریانز(۲۰۰۴) با توسعه یک مدل برای شبیه‌سازی انتقال ذرات معلق در رودخانه *Rhone* در فرانسه، معادلات هیدرودینامیکی را در حالت ۳ بعدی حل کرد (۱۱). ریاحی مدوار و همکاران(۲۰۰۹) با استفاده از سیستم استنتاج عصبی- فازی با در نظرگرفتن داده‌های صحرایی، ضریب پخشیدگی خطی را محاسبه و نتایج را با روابط تجربی مقایسه کردند (۱۳). وروانی و همکاران (۱۳۸۱) با در نظرگرفتن معادله رگرسیونی در حوزه آبخیز گرگانرود ارتباط بین رسوب معلق و خصوصیات حوزه آبخیز را نشان دادند، در این تحقیق رسوب معلق، متغییر وابسته و پارامترهای درصد مساحت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]

سازندهای مقاوم به فرسایش و نسبتاً مقاوم به فرسایش ماقبل کواترنر، مجموع درصد مساحت اراضی نیمه متراکم و یا کم‌تراکم یا اراضی جنگلی دست‌خورده و دبی متوسط سالیانه متغیرهای وابسته بودند. وابستگی رسوب معلق به دبی متوسط سالیانه از سایر پارامترها بیشتر بود که با ضریب همبستگی ۰/۸۲ این ارتباط را تأیید شد (۳). کینگچاو و همکاران (۲۰۰۸) مدلی یک‌بعدی برای بررسی انتقال رسوب معلق را توسعه دادند، و به معادلهٔ مومنتم برای در نظرگرفتن اثر جریان جانبی یک ترم افزودند. اثر غلظت پایین، سرعت سقوط رسوبات و حجم ذرات هم در این ترم نظر گرفته شده است. ضرائب مورد استفاده در این مدل با تجزیه و تحلیل داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است. مقایسه نتایج مدل با معادلاتی که برای ظرفیت انتقال رسوب استفاده می‌شود، توانایی مدل را در شبیه‌سازی انتقال رسوبات در دو حالت غلظت بالا و کم رسوبات تضمین می‌کند. در نهایت از این مدل برای بررسی تغییرات کف در پایین‌دست رودخانه زرد استفاده شده است (۱۲). ژو و همکاران(۲۰۰۹) یک مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب برای جریان غیردائمی ارائه نمودند و مدل را با استفاده از اطلاعات و داده‌های اندازه‌گیری شده از رودخانهٔ یانگتز در چین مقایسه نمودند (۱۹). هدف این تحقیق مدل‌سازی انتقال رسوب معلق در رودخانه کرخه با استفاده از معادله دینامیکی انتقال- پخش (ADE)، به کمک معادلات مختلف تجربی رسوب معلق در شرایط تعادلی ومعادلات مختلف برآورد ضرائب پخش می‌باشد. در این تحقیق مناسب‌ترین روابط مربوطه که در معادله *ADE* ادغام می‌شوند، برای مدل‌سازی رسوب معلق در رودخانه کرخه انتخاب می‌شوند.

معادلات حاکم

برای مدل‌سازی رسوب معلق و حل معادلهٔ *ADE* لازم است ابتدا معادلات جریان حل گردند. معادلات جریان در حالت یک‌بعدی به معادلات سنت ونانت(Saint-Venant) مشهورند و به‌صورت معادله (۱) نوشته می‌شوند (۴):

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q_L$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\frac{Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial y}{\partial x}+gA\left(S_f-S_0\right)=0 \qquad [1]$$

جزء اول معادلهٔ (۱) پیوستگی و جزء دوم مومنتم نامیده می‌شوند. در این معادلات A سطح مقطع جریان، Q دبی جریان و q_L جریان ورودی یا خروجی جانبی در واحد طول آبراهه ($Q_L/\delta x$) می‌باشند. هم‌چنین g شتاب ثقل، S_f شیب خط انرژی، S_0 شیب کف کانال، x فاصله در جهت جریان و t متغیر زمان است.

اساس استخراج این روابط بر پایه فرضیات بنیادی زیر است:

۱. جریان یک‌بعدی است؛ یعنی در هر مقطع سرعت یکنواخت و پروفیل سطح آب افقی است.

۲. انحنای خطوط جریان بسیار کم و سرعت عمودی جریان ناچیز می‌باشد، در نتیجه توزیع فشار هیدرواستاتیک است.

۳. اتلاف انرژی در جریان غیردائم را می‌توان با استفاده از قوانین مقاومت جریان‌های دائم نظیر معادله شزی یا مانینگ بیان کرد.

۴. شیب کف کانال کم است و $\cos\theta\cong 1$ و $\sin\theta\cong\tan\theta$ است.(θ زاویه بین کف کانال و خط افق می‌باشد.) در این صورت عمق‌های جریان که به‌طور عمودی از کف کانال و به‌صورت قائم اندازه‌گیری می‌شود تقریباً یکسان می‌باشند.

معادلهٔ دینامیکی توازن جرمی در قالب رابطه انتقال پخش برای حالت یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی اساس مدل‌سازی کیفی آب می‌باشد؛ که با به‌کارگیری روش فیک برای شار جرمی متلاطم (موازنه جرم) معادلهٔ یک‌بعدی انتقال پخش(ADE) را می‌توان به‌صورت معادله (۲)، نوشت (۸):

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(SA)}_{1}+\underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(SQ)}_{2}-\underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left[AD_L\frac{\partial S}{\partial x}\right]}_{3}=\underbrace{S_T}_{4}+\underbrace{\frac{Q_L S_L}{\delta x}}_{5} \qquad [2]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]

در رابطهٔ فوق ترم ۱ تأثیر محلی، ترم ۲ ترم انتقال، ترم ۳ انتشار به‌وسیله پخشیدگی، ترم ۴ منبع کاهش‌دهنده یا افزایش‌دهنده آلودگی و ترم۵ مقدار آلاینده ورودی و یا خروجی جانبی می‌باشد.

در رابطهٔ (۲)، S غلظت متغیر مورد نظر در مقطع، A سطح مقطع جریان، Q دبی جریان، D_L ضریب پخشیدگی طولی، S_L غلظت جریان ورودی یا خروجی جانبی(Lateral) و Q_L دبی جریان جانبی است. S_T در مدل‌سازی رسوب معلق و غیرچسبنده به‌صورت رابطه (۳) در معادله انتقال پخش قرار می‌گیرد (۱۸):

$$S_T = \gamma \omega_s W (S_e - S) \qquad [۳]$$

در این معادله γ فاکتور پروفیل عمقی غلظت یا ضریب انطباق، ω_s سرعت سقوط، W عرض بالای سطح آب، S غلظت رسوبی که مجهول است و S_e از رابطه (۴) به‌دست می‌آید:

$$S_e = ۱/۱۳ \frac{q_s}{q} \qquad [۴]$$

q دبی واحد عرض جریان و q_s مقدار رسوب معلق در شرایط تعادلی است که از روابط تجربی موجود برای تخمین بار معلق به‌دست می‌آید. D_L یا ضریب پخشیدگی طولی (*Longitudinal Dispersion Coefficient*)، تابعی از خاصیت پخش مولکولی و شرایط هیدرولیکی است. برای تخمین ضریب پخش یا D_L روابط تجربی زیادی ارائه شده است. در این تحقیق روابطی که برای تخمین ضریب پخشیدگی و روابط تخمین رسوب معلق در شرایط تعادلی در معادله (ADE) مورد استفاده قرارگرفته‌اند به اختصار در جدول ۱ آمده‌اند. در معادلات آمده در جدول ۱، U سرعت متوسط جریان، H عمق جریان و U_* سرعت برشی جریان است. در رابطه بگنولد τ_b تنش برشی بستر (N/m^2)، $\tan\beta$ شیب کف، ρ_s چگالی رسوب (kg/m^3)، ρ چگالی سیال(kg/m^3) و g شتاب ثقل(m/s^2) می‌باشد. e_s پارامتر مربوط به بار معلق (۰/۰۲-۰/۰۱) و e_b پارامتر مربوط به بار بستر (۰/۲-۰/۱) می‌باشد. در معادله وایف $\Delta = \left(\rho_s / \rho - ۱\right)$، ρ دانسیته جرمی سیال، ρ_s دانسیته جرمی رسوبات، S شیب سطح آب یا شیب بستر کانال، ω_s سرعت متوسط سقوط مواد بستر، D_s قطر ذرات است.فان رایان برای محاسبه هر یک از فاکتورهای F و S_a و U_s روابطی ارائه کرده است که هرکدام، به پارامترهایی وابسته‌اند و در چند مرحله محاسباتی به‌دست می‌آیند. این روش از پرکاربردترین روش‌های محاسبه بار معلق است (۱۶ و ۱۷). در معادله ساماگا و همکاران φ_s با توجه به یک گراف به‌دست می‌آید، در این گراف پارامترهای زیر در مقابل یکدیگر رسم شده‌اند (۱۴):

$$T_* = \frac{\tau_*}{(\gamma_s - \gamma) D_s} \qquad [۵]$$

$$K_s L_s \varphi_s = f(T_*) \qquad [۶]$$

هم‌چنین مقادیر K_s به ازاء مقادیر مختلف $\frac{\tau_*}{\tau_c}$ (که در آن $\tau_* = \gamma R s$ و τ_c تنش برشی بحرانی است که از دیاگرام شیلدز حاصل می‌شود) از جداولی که برای این منظور تهیه شده به‌دست می‌آید. مقادیر مختلف L_s براساس k (ثابت فان‌کارمن) قابل استخراج است، و در نهایت با انجام مراحل فوق و معلوم شدن مقدار φ_s، بار معلق قابل محاسبه خواهد بود. در مدل FASTER این گراف با توجه به پارامترهای مربوط به یک رابطه ریاضی تبدیل شده و در نهایت این رابطه به مدل معرفی شده است (۷ و ۹).

مواد و روش‌ها

برای مدل‌سازی رسوب معلق در این مقاله، رودخانه کرخه مورد بررسی قرار گرفته است.بازه‌ای از رودخانه که در این تحقیق انتخاب شده از ایستگاه پای‌پل تا حمیدیه است، که بین دو ایستگاه مزبور ایستگاه عبدالخان به عنوان ایستگاه شاخص قرار دارد. هر سه ایستگاه، ایستگاه هیدرومتری‌اند و کلیه اطلاعات مورد نیاز شامل اطلاعات هیدرومتری، مقاطع، آورد رسوب و... از سازمان آب و برق خوزستان تهیه شده است. مدلی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، مدل *FASTER* می‌باشد. این مدل توسط کاشفی‌پور (۲۰۰۱) برای شبیه‌سازی جریان و انتقال

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]

جدول۱. روابط ارائه شده تجربی و نیمه تجربی برای تخمین ضریب پخشیدگی طولی و دبی رسوب معلق در شرایط تعادلی

منبع	ضریب پخش (D_L)	معادله رسوب معلق
بگنولد(۱۹۶۶)		$q_S = \frac{e_s(1-e_b)\tau_b U}{(\rho_s-\rho)g\cos\beta\left[\left(W_s/U\right)-\tan\beta\right]}$
وایف و همکاران(۱۹۶۶)		$q_s = 0/016\frac{(UHS)^2}{\Delta^2 D_S \omega}$
فیشر و همکاران(۱۹۷۹)	$D_L = 0/011\frac{u^2W^2}{HU_*}$	
فان رایان (۱۹۸۴، ۱۹۹۳)		$q_s = FU_sHS_a$
ساماگا و همکاران (۱۹۸۶)		$\phi_s = \frac{q_s}{\gamma_s D_s}\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_s-\gamma}\frac{1}{gD_s}}$
سئو و چونگ(۱۹۹۸)	$\frac{D_L}{HU_*} = 5/915\left[\frac{W}{H}\right]^{0/62}\left[\frac{U}{U_*}\right]^{1/428}$	
کاشفی‌پور و فالکونر (۲۰۰۲ و۲۰۰۰)	$D_L = 10/612HU\left(\frac{U}{U_*}\right)$	$q_s = 213/3U^{1/211}, U < 0/45\left(m/s\right)$
	$D_L = \left[7/428+1/775\left[\frac{W}{H}\right]^{0/62}\left[\frac{U}{U_*}\right]^{0/572}\right]HU\left[\frac{U}{U_*}\right]$	$q_s = 1202/2U^{2/908}, U \geq 0/45\left(m/s\right)$
کوئسیس و میراسل (۱۹۹۸)	$D_l = 0/6\frac{U_*W^2}{H}$	
هویزمن و همکاران(۲۰۰۰)	$D_l = 0/003\frac{U^2W^2}{HU_*}$	

املاح در رودخانه و خلیج بسط داده شده است. این مدل به زبان فورترن نوشته شده و در محیط‌های *Visual Fortran* و *Fortran Power Station* قابل اجرا می‌باشد (۸). برای شبیه‌سازی رسوب معلق تعدادی زیر برنامه به اصل مدل اضافه شده است، که در این زیر برنامه‌ها کلیه معادلات رسوب معلق و معادلات ضرائب پخش وارد شده‌اند و در هنگام اجرای مدل برنامه با فراخوانی این زیربرنامه‌ها از معادلات استفاده می‌کند، هم‌چنین برای هر کدام از معادلات یک کد در ابتدای زیر برنامه معرفی شده که از این طریق مدل قادر به تمیز دادن معادلات در اجرای مدل می‌باشد. این مدل معادلات جریان را از الگوی کرانک-نیکولسون به همراه روش *Staggered* با اندازه شبکه متغیر حل می‌کند. روش عددی مورد استفاده یک روش ضمنی بوده، که همیشه پایدار است. در مدل *FASTER*، معادله دینامیکی *ADE* با ادغام روش دقیق *QUICKEST SCHEME* و روش ضمنی مرکزی حل شده است.

از اطلاعات موجود دو دوره، برای واسنجی و صحت‌سنجی انتخاب شده است. ایستگاه پای‌پل به عنوان مرز بالادست و ایستگاه حمیدیه مرز پائین‌دست در نظر گرفته شدند. هم‌چنین ایستگاه هیدرومتری عبدالخان در این تحقیق ایستگاه شاخص (برای مقایسه نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده) می‌باشد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]

برای مرز بالادست اطلاعات ورودی شامل هیدروگراف جریان و رسوب ورودی و در مرز پائین‌دست اشل(عمق جریان) است. در بازهٔ انتخابی اطلاعات ۲۲۷ مقطع در دسترس بود. دوره آماری برای واسنجی شامل ۸ ماه، از آغاز مهر ماه سال ۱۳۸۱ تا پایان اردیبهشت ماه ۱۳۸۲ است. هم‌چنین برای صحت‌سنجی مدل از اطلاعات ۵ ماه، از آبان سال ۱۳۸۵ تا اسفند همان سال استفاده شده است. کلیه معادلاتی که در مقدمهٔ این مقاله معرفی شده‌اند، برای اجرای مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای ضریب D_L در معادله (ADE) از شش معادله و برای تخمین میزان رسوب معلق در شرایط تعادلی از پنج روش (جدول۱) استفاده شد و در مجموع ۳۰ اجرا انجام گرفت. در شکل۱ بازه مورد نظر از رودخانه کرخه شامل سه ایستگاه هیدرومتری پای‌پل، عبدالخان و حمیدیه نشان داده شده است.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی بخش هیدرودینامیک مدل

برای محاسبه بار معلق، در ابتدا لازم است معادلات جریان شامل معادله پیوستگی و مومنتم حل شوند، سپس با استفاده از نتایج حاصل از حل این دو معادله، که عمق و سرعت جریان در گره‌های زمانی دلخواه است، می‌توان از معادله انتقال-پخش برای مدل‌سازی رسوب معلق غیرچسبنده استفاده کرد. در مدل *FASTER*، ضریب زبری مانینگ (n)، پارامتری است که باید واسنجی شود. همان‌طورکه پیشتر گفته شد، در این تحقیق، دو دوره برای واسنجی و صحت‌سنجی انتخاب شد، که دوره اول برای واسنجی شامل ۸ ماه از مهر ۱۳۸۱ تا اردیبهشت ۱۳۸۲ و دوره دوم برای صحت‌سنجی شامل ۵ ماه از آبان ۱۳۸۳ تا اسفند همان سال است. بنابراین در ابتدا برای انتخاب ضریب زبری مناسب رودخانه، هیدرودینامیک جریان مدل‌سازی شده و با انتخاب ضرایب مختلف برای زبری و مقایسه عمق و دبی خروجی از مدل برای هرکدام از مقادیر انتخاب شده با مقادیر اندازه‌گیری شده از ایستگاه شاخص(ایستگاه هیدرومتری عبدالخان)، مقدار مناسب این ضریب ۰/۰۲۸ انتخاب شد.

درصد خطا و *RMSE* طبق روابط آماری (۷) و (۸) برای سطح آب به ازای چند مقدار n طبق جدول ۲ می‌باشد.

$$RMSE = \frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(x_{ip} - x_{im}\right)^2} \qquad [7]$$

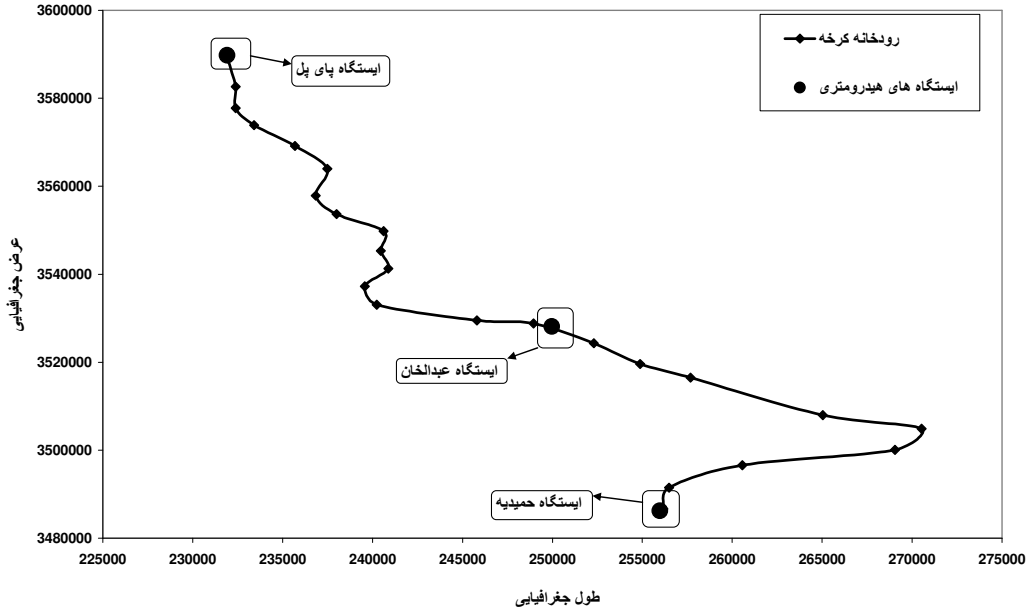
$$Error\% = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left|\left(x_{ip} - x_{im}\right)\right|}{\sum_{i=1}^{N} x_{im}} \times 100 \qquad [8]$$

در معادلات (۷) و (۸)، x_{ip} و x_{im} به‌ترتیب مقادیر تخمینی توسط مدل و اندازه‌گیری شده می‌باشند.

همان‌طورکه در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد، مقدار زبری ۰/۰۲۸ دارای بهترین دقت در پیش‌بینی سطح آب برای مدل بوده است. ضمناً مقایسه مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده دبی جریان در این مرحله نشان داد که درصد خطا و *RMSE* به‌ترتیب برابر ۱۰/۸ و ۱۲/۰۴ می‌باشند. در شکل‌های ۲ و ۳، به‌ترتیب، مقادیر سطح آب و دبی به‌دست آمده از اجرای مدل با ضریب زبری مناسب (۰/۰۲۸)، در مقایسه با سطح آب و دبی اندازه‌گیری شده از ایستگاه عبدالخان در مرحله واسنجی برای بخشی از دوره زمانی مورد نظر، نشان داده شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده رودخانه به‌ترتیب برای سطح آب و دبی جریان برای بخشی از دوره زمانی در نظرگرفته شده در مرحله صحت‌سنجی ارائه شده است. همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به خط ۴۵ درجه برای سطح آب و دبی در مرحله صحت‌سنجی به عنوان نمونه به‌ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طوری‌که دیده می‌شود پراکندگی نقاط در اطراف خط ۴۵ درجه گویای دقت مدل در برآورد ارتفاع سطح آب و دبی جریان می‌باشد. هم‌چنین مقادیر درصد خطا و *RMSE* برای برآورد ارتفاع سطح آب در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با ۵/۱۳ و ۰/۰۱۴ و برای دبی برابر با ۱۱/۱۱ و ۱/۳ به‌دست آمد. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد مدل قادر بوده است با دقت بالایی در مرحله صحت‌سنجی ارتفاع سطح آب و دبی را پیش‌بینی نماید. البته انتظار این بود که در این مرحله دقت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

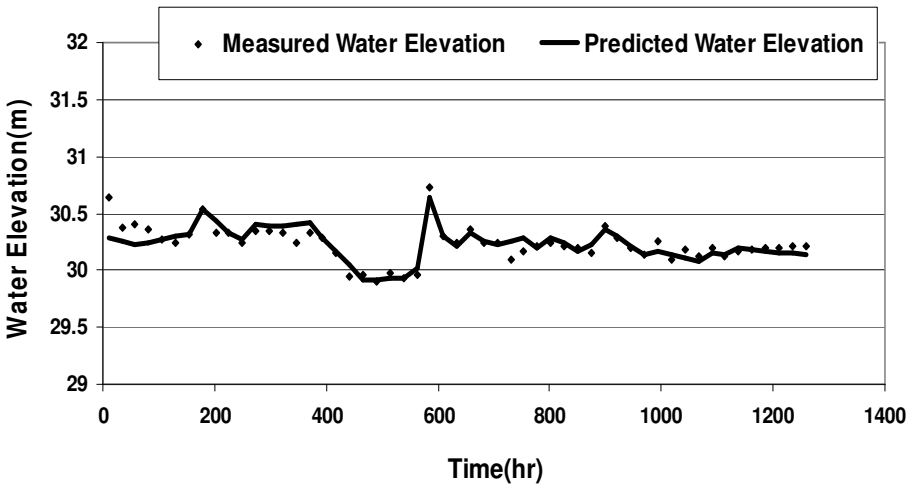
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]



شکل۱. بازه مورد مطالعه رودخانه کرخه و ایستگاه‌های هیدرومتری واقع بر آن

جدول۲. *E%* و *RMSE* برای سطح آب به ازای چند مقدار *n* در مرحله واسنجی مدل

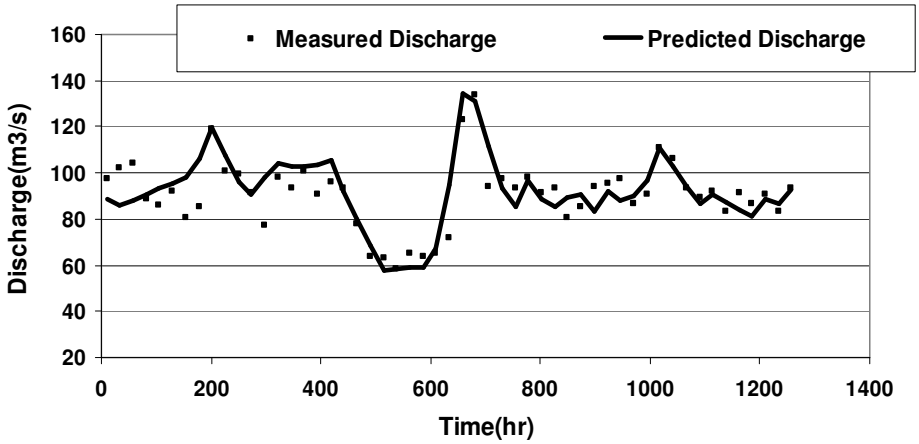
RMSE	*E%*	*n*
۱۴/۰	۶/۲۸	۰/۰۲۷
۱۳/۰	۶/۰۹	۰/۰۲۸
۱۸/۰	۷/۹۸	۰/۰۲۹



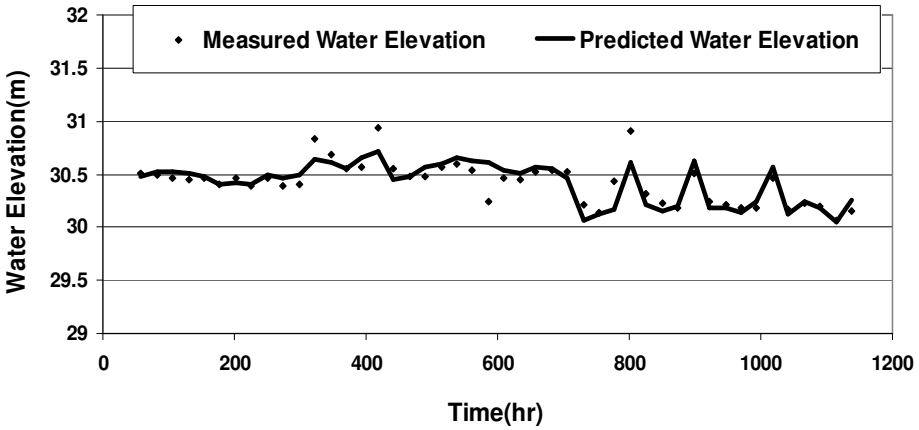
شکل۲. مقایسه سطح آب پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده در ایستگاه عبدالخان در مرحله واسنجی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

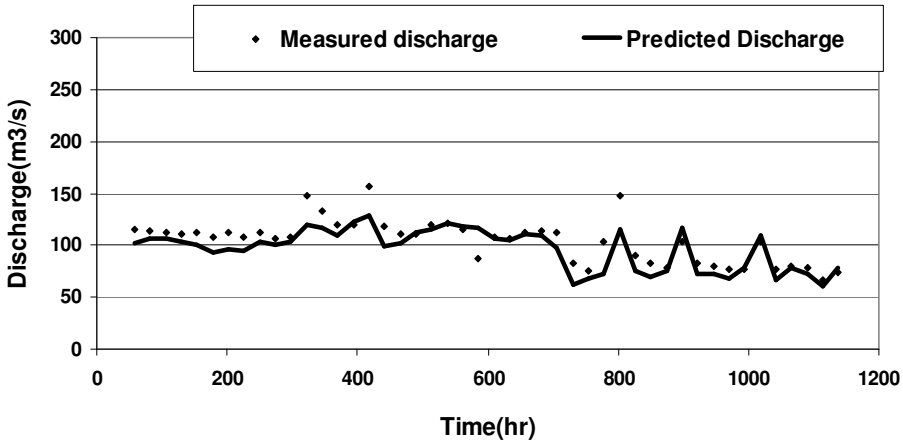
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]



شکل۳. مقایسه دبی پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده در ایستگاه عبدالخان در مرحله واسنجی

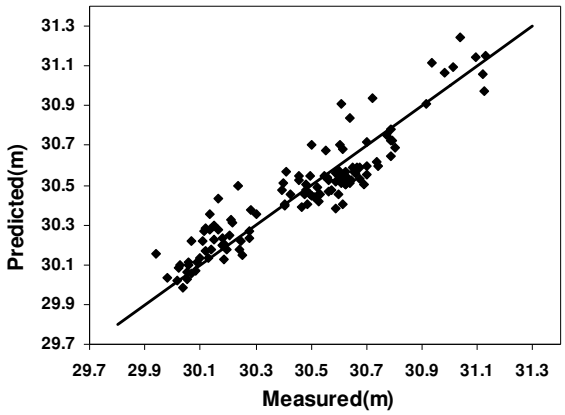


شکل۴. سطح آب پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده در ایستگاه عبدالخان در مرحله صحت‌سنجی

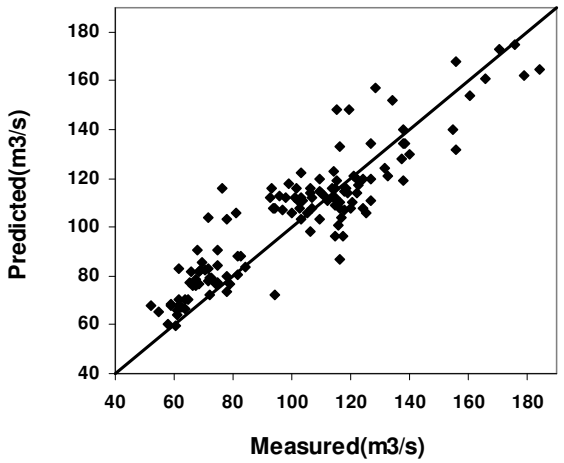


شکل۵. دبی پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده درایستگاه عبدالخان در مرحله صحت‌سنجی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]



شکل ۶. همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به خط ۴۵ درجه برای سطح آب در مرحله صحت سنجی

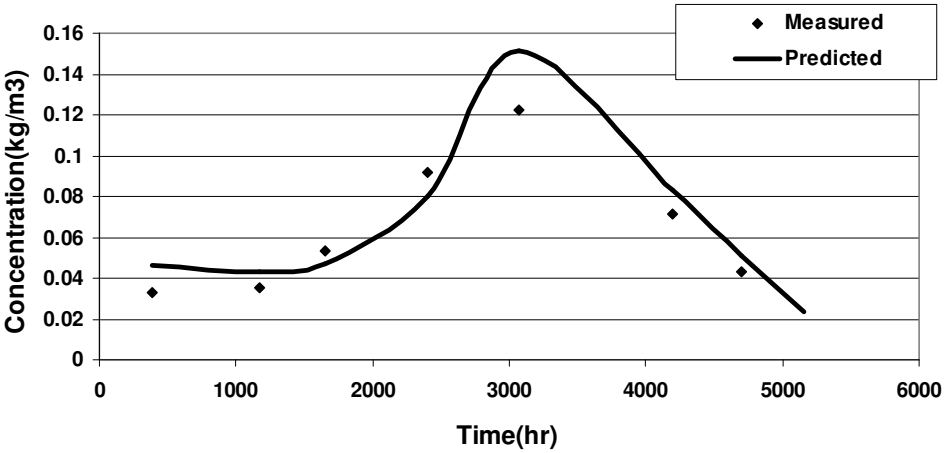


شکل ۷. همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به خط ۴۵ درجه برای دبی در مرحله صحت‌سنجی

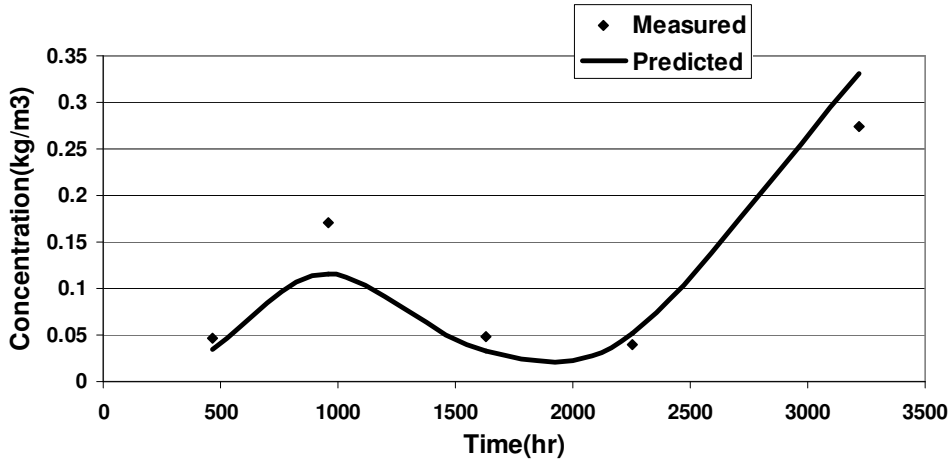
برآورد مدل کمتر از مرحله واسنجی شود اما احتمالاً به دلیل کیفیت داده‌های برداشت شده و یا شرایط به‌خصوص جریان در اینجا دقت مرحله صحت‌سنجی حتی از واسنجی هم بیشتر شده است.

پس از حل معادلات هیدرودینامیکی جریان، مدل *FASTER* می‌تواند، محاسبات مربوط به برآورد رسوب را انجام دهد. ورودی‌ها و اطلاعات مورد نیاز مدل برای برآورد میزان رسوب معلق شامل اندازه ذرات رسوب، چگالی ویژه ذرات و لزجت سینماتیک آب است. برای اندازه ذرات از منحنی دانه‌بندی ایستگاه عبدالخان استفاده شده است، بر این اساس اندازه متوسط ذرات (D_{50})، ۰/۱۵ میلی‌متر و سایر اندازه‌ها شامل D_{16}، D_{84} و D_{90} به‌ترتیب، برابر ۰/۰۷، ۰/۲۵ و ۰/۳ میلی‌متر به‌دست آمده و چگالی ویژه ذرات رسوب *(SG)* نیز برابر ۲/۶۵ در نظر گرفته شده است. متوسط دمای آب در بازه مورد مطالعه برابر ۲۴ درجه سانتی‌گراد بوده است، که براین اساس لزجت سینماتیکی آب برابر $۱/۰\times۱۰^{-۶}$ مترمربع بر ثانیه می‌باشد. غلظت رسوب معلق اندازه‌گیری شده در ایستگاه پای‌پل به عنوان مرز بالادست و در ایستگاه عبدالخان به عنوان ایستگاه شاخص مورد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]



شکل ۸. نمودار غلظت رسوب پیش‌بینی شده با مدل رسوب فان‌رایان و ضریب پخش فیشر، با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه عبدالخان برای مرحله واسنجی



شکل ۹. نمودار غلظت رسوب پیش‌بینی شده با مدل رسوب فان‌رایان و ضریب پخش فیشر، با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه عبدالخان برای مرحله صحت‌سنجی

استفاده قرار گرفتند. مدل برای ترکیب‌های متفاوت از روابط تجربی تخمین رسوب معلق در شرایط تعادلی و فرمول‌های تجربی برآورد ضریب پخش طولی (جدول ۱) اجرا شد. بهترین ترکیب روابط در معادله دینامیکی *ADE* که کمترین خطا را در مقایسه بین غلظت رسوب معلق حاصل از مدل و مقادیر مشابه اندازه‌گیری شده داد، روابط فان‌رایان و فیشر به‌ترتیب برای رابطه تجربی برآورد دبی رسوب معلق در شرایط تعادلی و رابطه تخمین ضریب پخش طولی بوده‌اند. نتایج حاصل از مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۸ و ۹ برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نشان داده شده‌اند. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد مدل قادر بوده است غلظت رسوب معلق را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

لازم به توضیح است رابطه رسوب معلق تعادلی فان‌رایان به دلیل این‌که از بررسی‌های همه جانبه عوامل مختلف و مؤثر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

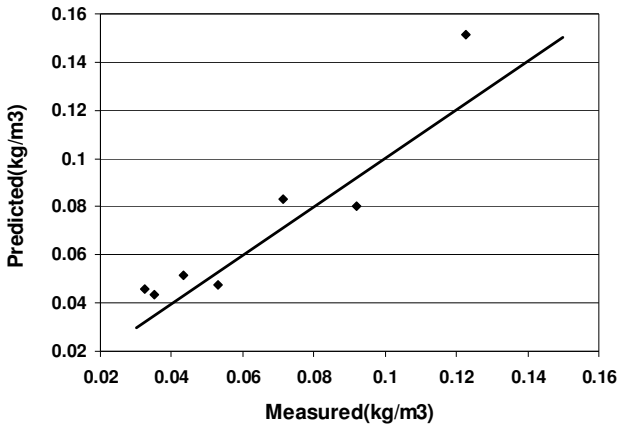
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]

جدول۳. *E%* و *RMSE* برای ترکیب معادله رسوب فان‌رایان و ضرائب پخش مختلف در مرحله واسنجی مدل

مدل ضریب پخش	E%	RMSE
کاشفی‌پور و فالکونر ۱	۴۴	۰/۰۶
کاشفی‌پور و فالکونر۲	۴۴	۰/۰۲
سئو و چانگ	۴۸	۰/۰۲
فیشر	۱۹/۵۶	۰/۰۰۵
کوئیسیس و میراسل	۵۲/۳۲	۰/۰۲
هویزمن و همکاران	۵۲/۳۴	۰/۰۲

جدول۴. *E%* و *RMSE* برای ترکیب معادله رسوب فان‌رایان و ضرائب پخش مختلف در مرحله صحت سنجی مدل

مدل ضریب پخش	E%	RMSE
کاشفی‌پور و فالکونر ۱	۵۳	۰/۰۸
کاشفی‌پور و فالکونر۲	۵۲	۰/۰۷
سئو و چانگ	۵۲	۰/۰۸
فیشر	۲۶/۳	۰/۰۴
کوئیسیس و میراسل	۶۴	۰/۰۸
هویزمن و همکاران	۶۴	۰/۰۹

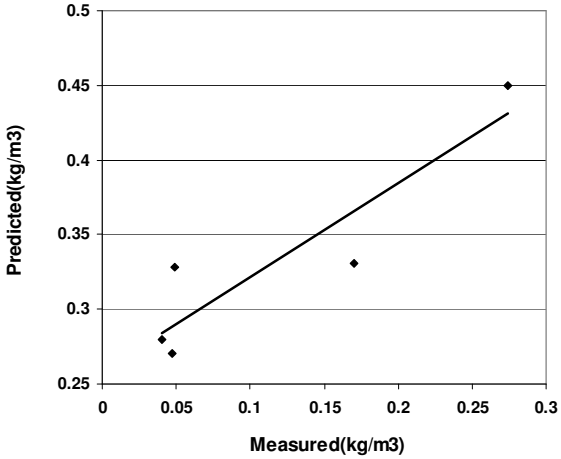


شکل ۱۰. مقایسهٔ همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحلهٔ واسنجی مدل

برای حرکت رسوب برخوردار است، نشان داد که در کلیه حالات و اجراهای برنامه در هر ترکیبی با معادلات تجربی ضرائب پخش کمترین خطا را دارد. نتایج نشان داده است که استفاده از سایر مدل‌های برآورد رسوب معلق در شرایط تعادلی می‌تواند میزان اشتباه در برآورد غلظت رسوب معلق را تا بیش از ۲ برابر یا ٪۱۰۰ خطا برساند. لذا در ادامه سعی شده نتایج مربوط به این مدل ارائه شود. درصد خطا و مقدار *RMSE* برای شرایط استفاده از روابط مختلف ضریب پخش طولی در معادله *ADE* در جداول ۳ و ۴ به‌ترتیب برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی آمده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه همبستگی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]



شکل ۱۱. مقایسهٔ همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحلهٔ صحت‌سنجی مدل

بین نتایج حاصل از مدل و مقادیر غلظت رسوب معلق اندازه‌گیری شده را با خط ۴۵ درجه در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند. همان‌طور که در جدول ۳ و ۴ ملاحظه می‌گردد، استفاده از روابط تجربی مناسب در معادله هیدرودینامیکی پیوستگی رسوب *ADE* به عنوان ضریب پخش و برآورد دبی رسوب معلق در شرایط تعادلی (به جدول ۱ مراجعه شود) تأثیر قابل ملاحظه‌ای در دقت برآورد مدل عددی دارد. همواره محققین در حل معادلات دیفرانسیل جزئی روی روش‌های حل عددی تمرکز کرده و حداکثر تلاش خود را نموده‌اند تا روش‌های عددی را با دقت بالاتر ارائه نمایند؛ اما مستوفی‌زاده (۲) نشان داده است که روش حل عددی معادله *ADE* در دقت برآورد بسیاری از آلودگی‌ها حداکثر تا ٪۱۲ می‌تواند اثر گذار باشد، حال آن‌که جداول ۳ و ۴ نشان می‌دهند که روابط مناسب تجربی می‌توانند تا ٪۴۰ درصد در دقت برآورد مدل *ADE* برای غلظت رسوب معلق بهبود ایجاد نمایند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد با حل عددی معادله انتقال- پخش غلظت رسوب معلق غیرچسبنده در رودخانه کرخه مدل‌سازی شود. برای این منظور از مدل یک‌بعدی *FASTER* استفاده شده است. پیش از اجرای مدل برای برآورد غلظت رسوب لازم بود تا ضریب زبری مانینگ در این مدل برای منطقه مورد مطالعه با حل هیدرودینامیک جریان واسنجی شود، با انتخاب دو دوره برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل، مقدار این ضریب ۰/۰۲۸ در رودخانه کرخه برآورد شد. سپس غلظت رسوب معلق غیرچسبنده با قرار دادن معادلات مختلف رسوب و ضرائب پخش مختلف در معادله انتقال-پخش مدل‌سازی گردید. با توجه به مقایسه نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت رسوب معلق، و هم‌چنین با استناد به جداول ۲ و ۳ که مقادیر درصد خطا و *RMSE* را برای هر دو دوره انتخاب شده نشان می‌دهند، واضح است که معادله برآورد دبی رسوب معلق در شرایط تعادلی فان رایان و معادله تخمین ضریب پخش طولی فیشر برای استفاده در معادله دینامیکی انتقال- پخش یا ADE، در مقایسه با سایر روابط موجود، برای برآورد رسوب معلق رودخانهٔ کرخه نتایج مناسبی ارائه می‌کنند و از دقت بالایی برخوردارند و بنابراین در تخمین رسوب معلق برای رودخانه کرخه در مطالعات می‌توان به نتایج حاصل اعتماد کرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان آب و برق خوزستان و به خصوص معاونت محترم مطالعات پایه به دلیل همکاری قابل ملاحظه برای در اختیار گذاشتن اطلاعات تشکر و قدردانی می‌گردد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]

منابع مورد استفاده

۱. توکلی‌زاده، ا.ع. و س.م کاشفی‌پور. ۱۳۸۵. تأثیر ضریب پخشیدگی بر مدل‌سازی کیفی آب‌های سطحی. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن‌ماه ۱۳۸۵، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲. مستوفی‌زاده، ش. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر روش‌های عددی حل معادله *ADE* در دقت پیش‌بینی معادله و مقایسه آن با تأثیر ضرائب تجربی در این معادله. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۷۵ صفحه.

۳. وروانی،ج.، س. فیض نیا، م. مهدوی و م. عرب خدری.۱۳۸۱. آنالیز ناحیه‌ای رسوب معلق با استفاده از معادله رگرسیونی در حوزه آبخیز گرگانرود. مجله منابع طبیعی گرگان ۵۵ (۱): ۳۵-۴۶.

4. Chanson, H.2008. The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. 2nd ed. Elsevier Ltd., 585pp.
5. Ficsher, H.B., E.J. List, R.C.J. Koh, J. Imberger and N.H. Brooks. 1979. Mixing in Inland and Costal Waters. Academic Press. Inc., San Diego. 483pp.
6. Jeon, T.M., K.O. Beak and I.W. Seo.2007. Development of an empirical equation for the transverse dispersion coefficient in natural streams. Environ. Fluid Mechanics. 7(4): 317-329.
7. Kashefipour, S.M. and R.A. Falconer. 2000. An improved model for predicting fluxes in eastuarine waters. 4th Intl. Conf. Hydro Informatics. 23-27 July.
8. Kashefipour, S.M. 2001. Modeling Flow, Water Quality and Sediment Transport Processes in Riverine Basins. PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, Cardiff University, UK. 306pp.
9. Kashefipour, S.M. and R.A. Falconer. 2002. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. J. Water Res. 36: 1596-1608.
10. Kashefipour, S.M., B. Lin, E.L. Harris and R.A.Falconer. 2002. Hydro environmental modeling for bathing water compliance of an esturine basin. J. Water Res. 36 (7): 1854-1868.
11. Prianz, R. 2005. Modelling the transport of suspended particulate matter by the Rhone River plume (France). Implications for pollutant dispersion. Environ. Pollut. 133 :351–364.
12. Qingchao, G., H. Chunhong, T. Koniyoshi, I., Hirishi and C. Wenhong. 2008. Numerical modeling of hyper-concentrated sediment transport in the Lower Yellow River. J. Hydraul. Res. 49(5): 659-667.
13. Riahi-Madvar, H., S.A. Ayyoubzadeh, E. Khadangi and M. Ebadzadeh. 2009. An expert system for predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by using ANFIS. J. Expert Sys. with Appl. 36: 8589–8596.
14. Samaga, B.R. and K.G. Ranga Raja. 1986. Suspended load transport of sediment mixtures. J. Hydraul. Eng. 112: 1019-1035.
15. Seo, I.W. and T.S. Cheong. 1998. Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Streams. J. Hydraul. Eng. ASCE. 124(1):25-32.
16. Van Rijn, L.C. 1984. Sediment transport. Part II: Suspended load transport. J. Hydraul. Eng. ASCE. 110(11): 1613-1641.
17. Van Rijn, L.C. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Pub., Netherlands.
18. Wu,W. 2008. Comutational River Dynamics. Taylor & Francis Group. 494 pp.
19. Zhou, G., H. Wang, X. Shao and D. Jia. 2009. Numerical model for sediment transport and bed degradation in the Yangtze River Channel downstream of three Gorges Reservoir. J. Hydraul. Eng. 135(9):729-740.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.4.1]