



## Hydrodynamic and Water Quality FASTER Model and Its Application in River Engineering

## مدل هیدرودینامیکی و کیفی FASTER و کاربرد آن در مهندسی رودخانه

S. M. Kashefipour<sup>1</sup> and A. A. Tavakoly Zadeh<sup>2</sup>

سید محمود کاشفی پور<sup>۱</sup> و احمدعلی توکلی زاده<sup>۲</sup>

### Abstract

This paper introduces the 1D hydrodynamic and water quality, FASTER model. this model was first developed by kashefipour in Environmental Research Centre in Cardiff University, UK. FASTER is able to determine water elevation and discharge using numerical solution of the Saint Venant Unsteady and non uniform equations. The implicit Crank-Nikolson central scheme with staggered method was applied for the hydrodynamic module of the model. The influence line technique was used in the numerical solution and as a result the solution remains implicit for all reaches and junctions. The water quality module of the model is able to simulate eleven different water quality parameters including coliforms, BOD, DO, and etc. In this paper the FASTER model is introduced and its abilities is shown using two examples in hydrodynamic simulations and one standard example in water quality simulation.

**Keywords:** Numerical Methods, Mathematical Model, Water Quality Parameters, Advective-dispersion Equation

### چکیده

در مقاله حاضر مدل یک بعدی هیدرودینامیکی و کیفی FASTER معرفی شده است. این مدل اولین بار توسط کاشفی پور در مرکز تحقیقات آب دانشگاه کاردیف انگلستان توسعه پیدا کرد. در این مدل سطح آب و دبی به کمک حل عددی فرم کامل معادلات غیر همگام سنت و نانت تعیین می گردند. روش کرانک نیکلسون به شکل تفاضل مرکزی بکار گرفته شده و با بهره گیری از سیستم یک در میان یا Staggered معادلات خطی ایجاد شده و با روش ضمنی الگوریتم توماس حل می شوند. در مدل FASTER روشی برای حل معادلات تحت عنوان تکنیک خط تأثیر یا Influence Line Technique بکار گرفته شده که مدل را قادر می سازد در حل کلیه آبراهه ها و تقاطع ها بصورت ضمنی باقی بماند. بخش کیفی مدل FASTER قادر است ۱۱ نوع آلودگی از جمله کلیفرم ها، BOD، DO، ترکیبات نیتروژن، فسفر و ... را مدل نماید. در این مقاله مدل FASTER به کمک دو مثال در بخش هیدرودینامیک شامل حل جریان همگام و متغیر تدریجی در لوپ ها و جریان غیر همگام انتقال موج بالادست و یک مثال استاندارد در بخش کیفی صحت سنجی گردید.

**کلمات کلیدی:** روشهای عددی، مدل ریاضی، پارامترهای کیفی آب، معادله انتقال و پخش

1- Associate Professor, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, e-mail: [kashefipour@excite.com](mailto:kashefipour@excite.com)  
2- Ms.c, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, e-mail: [tavakolyzadeh@gmail.com](mailto:tavakolyzadeh@gmail.com)

۱- دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
۲- کارشناس ارشد سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

## ۱- مقدمه

برخی از پارامترهای آلودگی در دو مخزن با مشخصات متفاوت در سیدنی استرالیا استفاده نموده‌اند. دیارتمان حمل و نقل تگزاس (TxDOT) به منظور بررسی پتانسیل تأثیرات بازسازی یک پل ارتباطی بر روی شرایط هیدرودینامیکی و زندگی آبزیان خلیج غربی از یک مدل دو بعدی هیدرودینامیکی و آلودگی استفاده کرده است (Su et al., 2004). کاهش کیفیت آب دریاچه مصنوعی شیوهاو یکی از مسائل مهم کره جنوبی می‌باشد. برای نگهداری کیفیت آب این دریاچه در حد استاندارد از دریچه‌های آبگیر استفاده می‌شود. اما عملکرد دریچه‌های آبگیر برای مناسب نگه داشتن کیفیت آب این دریاچه کافی نبوده است. به منظور بررسی مشکل دریاچه از مدل سه بعدی CE-QUAL-ICM استفاده شد. همچنین شرایط هیدرودینامیکی دریاچه با استفاده از مدل سه بعدی TIDE3D شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی کیفی نشان می‌دهد که مشاهده کیفیت آب استاندارد بدون در نظر گرفتن چرخه جریان در کل قلمرو جریان درون دریاچه امکان‌پذیر نمی‌باشد. این بدان معنی است که مدیریت موثر کیفی باید شامل یک چرخه فعال جهت خروج آب دریاچه به درون دریا بصورت آزاد باشد (Suh et al 2004).

از آنجائیکه روشهای حل عددی فقط روشی تقریبی را برای حل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان و انتقال رسوب و آلودگی ارائه می‌نمایند، لذا دقت، پایداری و انعطاف این روشها از اهمیت خاصی برخوردار است. در مقاله حاضر مدل یک بعدی FASTER<sup>۴</sup> برای مدل‌سازی جریان، انتقال آلودگی و رسوب در سیستم‌های رودخانه‌ای و خلیج‌ها و قابلیت‌های آن معرفی می‌گردد. این مدل کامپیوتری که بر اساس معادلات جریان، رسوب و آلودگی می‌باشد ابتدا توسط Kashefipour (2001) توسعه یافته و سپس مدل‌سازی انواع آلودگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی به آن اضافه گردیده است.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر جریان و روش

#### حل عددی

در اغلب مطالعات مدل‌های سیستم رودخانه و یا دهانه رودخانه‌ها که در آنها بتوان فرض نمود تأثیر لایه‌های آب بر روی یکدیگر قابل صرف‌نظر باشند از سیستم یک بعدی برای مدل‌سازی جریان استفاده می‌شود. در این حالت معادلات پیوستگی و اندازه حرکت را که معمولاً به معادلات سنت ونانت<sup>۵</sup> مشهور هستند می‌توان استفاده نمود (Cunge et al. 1980). این معادلات در مدل بصورت زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:  
معادله پیوستگی:

یکی از مهمترین نگرانی‌ها در مسائل موجود در رودخانه‌ها و خلیج‌ها انتقال رسوب و آلودگی و تأثیر منفی آن روی زندگی منطقه می‌باشد. رسوبگذاری باعث کاهش ظرفیت رودخانه‌ها و در نتیجه افزایش احتمال سیل‌خیزی رودخانه می‌شود. علاوه بر آن رسوبات ریزدانه در انتقال و جابجایی فلزات سنگین که اکثراً سمی هستند نقش مهمی بازی می‌کنند. انواع آلودگی‌های بیولوژیکی مانند کالیفرم‌ها می‌توانند نه تنها روی محیط زیست رودخانه و دریا تأثیر منفی بسزائی داشته باشند بلکه حتی روی سلامتی انسانها نیز مؤثر می‌باشند. بدلیل نقش محیط‌زیست رودخانه و دریا به خصوص در مناطقی که شهرها و صنایع بزرگ در نزدیکی رودخانه‌ها قرار دارند در تأمین نیاز آبی منطقه، اهمیت قادر بودن در شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرآیند انتقال رسوب و آلودگی را در سیستم‌های منابع آب روشن‌تر می‌نماید.

در دو دهه گذشته استفاده از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب و واکنشهای کیفی آب در آبهای سطحی رواج بسیار یافته است. روش‌های شبیه‌سازی خط مشی‌هایی جامع و مناسب برای ارزیابی روشهای کاهش بار آلودگی ارائه داده‌اند. مدل‌های ریاضی ابزار با ارزشی را برای پیش‌بینی شرایط جریان، فرآیند انتقال آلودگی و رسوب فراهم نموده‌اند و بنحو بسیار گسترده‌ای در مدیریت و مهندسی محیط آب کاربرد دارند. در ادامه به چند نمونه از مطالعات انجام شده در سالهای اخیر پرداخته می‌شود.

(Park and Lee 2002) برای مشخص نمودن رابطه بین آلودگی رودخانه ناکدونگ و مدلسازی کیفی آن رودخانه مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند. رودخانه ناکدونگ یکی از چهار رودخانه بزرگ کره محسوب می‌شود و آب مصرفی حدود ۱۳ میلیون نفر را تأمین می‌کند. پس از بررسی‌های زیاد مدل کامپیوتری QUAL2E بهترین مدل برای این رودخانه انتخاب شد. در این تحقیق برای رفع برخی از این محدودیتها اصلاحاتی در کدنویسی مدل انجام شد و نسخه جدید، مدل QUAL2K نامیده شده است. مدل QUAL2K مشابه مدل QUAL2E می‌باشد با این تفاوت که در روابط مورد استفاده در قسمت اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و نیترات تغییراتی داده شده است. نتایج هر دو مدل با داده‌های اندازه گیری شده مقایسه شده است و نتایج نشان می‌دهد مدل QUAL2K جوابهای نزدیکتری با داده‌های واقعی دارد زیرا مدل QUAL2K دارای توانایی شبیه‌سازی تبدیل مرگ جلبکها به BOD و نیتروژن‌زدایی می‌باشد. (Romero et al. 2004) / از یک مدل اکولوژی با نام CAEDYM<sup>۱</sup> و دو مدل هیدرودینامیکی یک‌بعدی و سه‌بعدی با نامهای DYRESM<sup>۲</sup> و ELCOM<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2\beta Q Q_L}{A \Delta x} - \frac{2\beta Q T_w}{A} \frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{\beta Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} = -gA \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{Q|Q|}{C^2 RA} \quad (۴)$$

فرم کامل معادلات سنت و نانت دارای حل تحلیلی نبوده و به کمک روش‌های عددی حل می‌گردند. برای حل معادلات هیدرودینامیک جریان روابط متفاوت زیادی بکار گرفته می‌شود. در حل این معادلات با استفاده از روش تفاضل مرکزی یک سری معادلات جبری خطی ایجاد می‌شود، که در ساخت آن سه گره متوالی دخالت دارند و مقادیر دبی و سطح آب در یک گره مشترک محاسبه نمی‌گردند بلکه سطح آب در گره‌ها و دبی در وسط بین دو گره محاسبه می‌گردند. به این پروسه روش Staggered می‌گویند (Abbott and Basco 1997). در مدل FASTER معادلات پیوستگی و مومنتم با استفاده از الگوی کرانک-نیکلسون به همراه روش Staggered و اندازه شبکه متغیر بصورت عددی حل شده‌اند. با توجه به روش Staggered در حل عددی معادلات دیفرانسیلی حاکم (معادلات ۱ و ۲)، فرم خطی معادله پیوستگی حول گره (i) و معادله مومنتم حول گره  $(i + \frac{1}{2})$  به صورت

زیر نوشته می‌شوند:

معادله پیوستگی

$$a_i Q_{i-1/2}^{n+1} + b_i Z_i^{n+1} + c_i Q_{i+1/2}^{n+1} = d_i \quad (۵)$$

معادله مومنتم

$$a_{i+1/2} Z_i^{n+1} + b_{i+1/2} Q_{i+1/2}^{n+1} + c_{i+1/2} Z_{i+1}^{n+1} = d_{i+1/2} \quad (۶)$$

ضرایب رابطه (۵) عبارتند از:  $-\theta = a_i$ ;  $b_i = \frac{T_{wi}^n}{\Delta t} (x_{i+1/2} - x_{i-1/2})$ ;  $\theta = c_i$  و

$$\frac{T_{wi}^n}{\Delta t} (x_{i+1/2} - x_{i-1/2}) Z_i^n - (1 - \theta)(Q_{i+1/2}^n - Q_{i-1/2}^n) + 0.5(Q_{Li+1/2}^{n+1} + Q_{Li-1/2}^{n+1}) = d_i$$

در فرم خطی معادله مومنتم (رابطه ۶) ضرایب  $a_{i+1/2}$ ،  $b_{i+1/2}$ ،  $c_{i+1/2}$  و  $d_{i+1/2}$  عبارتند از:

$$a_{i+1/2} = \frac{-\beta Q_{i+1/2}^n T_{wi+1/2}^n}{\Delta t A_{i+1/2}^n} - \frac{g \theta A_{i+1/2}^n}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (۷)$$

$$b_{i+1/2} = \frac{1}{\Delta t} + \frac{2\beta \theta Q_{Li+1/2}^{n+1}}{(x_{i+1} - x_i) A_{i+1/2}^n} - \frac{\beta Q_{i+1/2}^n (A_{i+1}^n - A_i^n)}{(x_{i+1} - x_i) (A_{i+1/2}^n)^2} + \frac{g |Q_{i+1/2}^n|}{(C_{i+1/2}^n)^2 A_{i+1/2}^n R_{i+1/2}^n}$$

$$c_{i+1/2} = \frac{-\beta Q_{i+1/2}^n T_{wi+1/2}^n}{\Delta t A_{i+1/2}^n} = \frac{g \theta A_{i+1/2}^n}{(x_{i+1} - x_i)}$$

$$d_{i+1/2} = \frac{1}{\Delta t} Q_{i+1/2}^n - \frac{2\beta(1-\theta)Q_{i+1/2}^n Q_{Li+1/2}^{n+1}}{(x_{i+1} - x_i) A_{i+1/2}^n} - \frac{\beta Q_{i+1/2}^n T_{wi+1/2}^n (Z_{i+1}^n + Z_i^n)}{\Delta t A_{i+1/2}^n}$$

$$\frac{g(1-\theta)A_{i+1/2}^n (Z_{i+1}^n - Z_i^n)}{(x_{i+1} - x_i)}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + T_w \frac{\partial Z}{\partial t} \Delta x = Q_L \quad (۱)$$

در این رابطه:  $Q=Q(x,t)$ : دبی بر حسب  $(m^3/s)$ ;  $A=A(x,t)$ : مساحت سطح مقطع جریان بر حسب  $(m^2)$ ;  $Q_L=Q_L(x,t)$ : جریان جانبی ورودی و یا خروجی (منفی برای جریان‌های خروجی و مثبت برای جریان ورودی) بر حسب  $(m^3/s)$ ;  $Z=Z(x,t)$ : ارتفاع سطح آب  $H(x,t) + Z_b(x)$  بر حسب  $(m)$ ;  $T_w=T_w(x,t)$ : عرض بالای سطح آب بر حسب  $(m)$ ;  $H(x,t)$ : عمق جریان و  $Z_b(x)$ : ارتفاع کف هر دو بر حسب  $(m)$  می‌باشند. معادله مومنتم بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \frac{\partial \left[ \frac{Q^2}{A} \right]}{\partial x} = -gAS_f - gA \frac{\partial Z}{\partial x} \quad (۲)$$

در این رابطه:  $S_f(x,t) = S_f$ : شیب خط انرژی است و با استفاده از رابطه مانینگ و یا شزی می‌توان آن را بصورت زیر تعریف نمود:

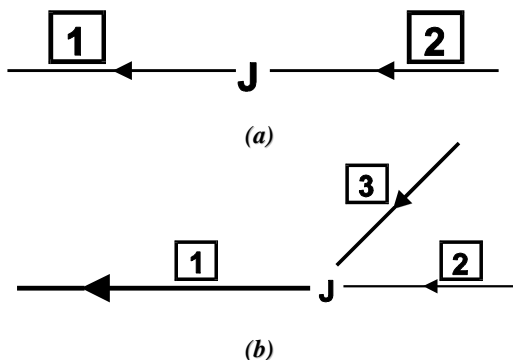
$$S_f = \frac{n^2 U^2}{R^{4/3}} = \frac{U^2}{RC^2} = \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} \quad (۳)$$

در این رابطه:  $C=C(x,t)$ : فاکتور ضریب شزی و  $R=R(x,t)$ : شعاع هیدرولیکی جریان بر حسب  $(m)$  می‌باشد. در معادله (۲): ترم (۱) عبارت است از: شتاب محلی، (۲) شتاب جابجایی، (۳) مقاومت کف، (۴) گرادیان فشار. با جایگزین نمودن رابطه (۳) در معادله (۲)، بسط ترم ۲ معادله (۲) و جایگزین نمودن  $\frac{\partial Q}{\partial x}$  از معادله (۱)، رابطه مومنتم

بصورت زیر نوشته می‌شود:

### ۲-۳-۲-۳- شرایط مرزی داخلی

در اتصال بازه‌های مختلف در یک سیستم رودخانه‌ای، انتهای بازه‌ها در محل تقاطع‌ها به عنوان شرایط مرزی داخلی تعریف می‌شوند. با توجه به انواع سیستم‌های شبکه، نوع نقاط اتصال می‌تواند متفاوت باشد. دو نوع از این اتصالات در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱a)، قانون بقای جرم بصورت  $Q_1 = Q_2$  و سطح آب سازگار با سیستم بصورت  $Z_1 = Z_2 = Z_J$  در نظر گرفته می‌شود. که در این رابطه:  $Z_J$  برابر سطح آب در اتصال می‌باشد. در جریان بحرانی، معادله سرریز بصورت  $Q_J = f_{weir}(Z_1, Z_2)$  را می‌توان بعنوان شرایط مرزی مجهول استفاده نمود (Dronkers (1975). این حالت را می‌توان در تنگ شدگی و یا شیبهای تند مورد استفاده قرار داد. با توجه به قانون بقای جرم و انرژی، می‌توان نوشت:  $Q_1 = Q_2$  و  $Z_1 + V_1^2 / 2g = Z_2 + V_2^2 / 2g \pm H_f$  و  $H_f$  به شرایط جریان بستگی دارد. برای شرایط مرزی داخلی چند شاخه‌ای<sup>۶</sup> (شکل ۱b) با توجه به قانون بقای انرژی و جرم،  $E_1 = E_2 = E_3$ ,  $Q_1 = Q_2 + Q_3$  می‌باشد. که در این رابطه  $E = Z + \alpha V^2 / 2g$  است. چنانچه مقدار سرعت در نقطه اتصال کم باشد از ترم سرعت در رابطه انرژی می‌توان صرف نظر نمود و معادله انرژی بصورت،  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_J$  نوشته می‌شود.



شکل ۱- دو نوع از اتصالات در شبکه رودخانه

بطوریکه از روابط (۵) و (۶) ملاحظه می‌گردد معادلات جریان با روش ضمنی یا Implicit حل می‌گردند. برتری این روش بر روش صریح یا Explicit این است که حل معادلات تابع عدد کورانت<sup>۸</sup> یا  $C_r = U \frac{\Delta t}{\Delta x}$  نبوده و همواره پایدار می‌باشند. البته لازم به توضیح است با استفاده از روش کرانک-نیکلسون با  $\theta = 0.5$  حل معادله بصورت ضمنی کامل (Fully Implicit) نبوده و این امر باعث افزایش دقت محاسبات عددی علاوه بر پایداری آنها می‌گردد. بهر حال برای کنترل دقت بهتر است سعی شود عدد کورانت کمتر از ۵ باشد. در حل معادلات وجود مقادیر مرزی هر بازه لازم است. در روش ضمنی

که در این روابط:  $0 \leq \theta \leq 1$  ضریب وزنی می‌باشد و مقدار تأثیر زمان (n) و (n+1) در حل معادلات را نشان می‌دهد. همچنین در رابطه (۷)  $A_{i+1/2} = 0.5(A_i + A_{i+1})$  می‌باشد. به همین ترتیب روابط مشابهی برای  $R_{i+1/2}, C_{i+1/2}, T_{wi+1/2}$  نوشته می‌شود.

با استفاده از معادلات (۵) و (۶) برای تمام گره‌ها از زمان  $n\Delta t$  به  $(n+1)\Delta t$ ، سیستم ماتریسی با تأکید بر  $Z^{n+1}, Q^{n+1}$  بدست می‌آید. معادله عمومی، که شامل معادلات جبری خطی می‌باشد را می‌توان با استفاده از الگوریتم توماس حل نمود.

### ۲-۲-۲- شرایط اولیه و مرزی برای حل معادلات

#### هیدرودینامیکی جریان

#### ۲-۲-۱- شرایط اولیه

برای شروع هر شبیه‌سازی مقادیر اولیه متغیرهای وابسته که شامل سطح آب و دبی، همچنین مقادیر اولیه جریانهای ورودی و خروجی در هر نقطه باید مشخص شوند. برای یک شروع ساده دبی اولیه معمولاً صفر، سطح آب افقی و برابر ماکزیمم حالت مد و یا حداکثر ارتفاع کف بستر بعلاوه چند سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

#### ۲-۲-۲-۲- شرایط مرزی باز<sup>۶</sup>

شرایط مرزی باز می‌تواند دبی اندازه‌گیری شده و یا رقوم سطح آب باشد. به عنوان مثال، رقوم جزر و مدی، سطح آب در یک دریاچه و یا مخزن که بوسیله ایستگاه اندازه‌گیری ثبت شده‌اند، می‌توانند به عنوان شرایط مرزی باز استفاده شوند. رابطه دبی-اشل می‌تواند به عنوان گزینه‌ای در شرایط مرزی باز مجهول برای پایین دست سیستم استفاده شود. همچنین برای کانال با انتهای بسته برای شرایط مرزی دبی برابر صفر می‌باشد. در این مدل چهار نوع شرایط مرزی وجود دارد که در جدول (۱) بصورت خلاصه نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- انواع شرایط مرزی با توجه به نوع بازه

نوع بازه	نوع شرایط مرزی	
	پایین دست	بالا دست
۱	سطح آب	سطح آب
۲	سطح آب	دبی
۳	دبی	دبی
۴	دبی	سطح آب

است از: تأثیر محلی؛ (۲): انتشار به وسیله انتقال؛ (۳): انتشار به وسیله پخشیدگی؛ (۴) منبع کاهش دهنده یا افزایش دهنده آلودگی و (۵): جریان ورودی و یا خروجی جانبی می‌باشد. در ادامه پارامترهای ضریب پخشیدگی طولی و منبع کاهش دهنده و یا افزایش دهنده آلودگی توضیح داده می‌شوند.

در مدلسازی کیفی پخشیدگی طولی و پارامترهای افزایش دهنده و کاهش دهنده آلودگی از اهمیت زیادی برخوردار هستند و دقت حل معادله (۸) وابسته به انتخاب روابط تجربی و تئوری این پارامترها دارد. روابط تجربی و تئوری بسیاری جهت تخمین مقدار  $D_L$  پیشنهاد شده است. چهار رابطه متفاوت در مدل به منظور محاسبه مقادیر  $D_L$  مورد استفاده قرار گرفته است، که عبارتند از:

۱- رابطه (McQuivey and Keefer (1974)

$$D_L = 0.058 \frac{Q}{SW} \quad (9)$$

۲- رابطه (Fisher et al. (1979)

$$D_L = 952.58 \frac{U^2 W^2}{HU_*} \quad (10)$$

۳- رابطه (Seo and Cheong (1998)

$$\frac{D_L}{HU_*} = 5.915 \left[ \frac{W}{H} \right]^{0.62} \left[ \frac{U}{U_*} \right]^{1.428} \quad (11)$$

۴- رابطه (Kashefipour and Falconer (2002)

$$D_L = \left[ 7.428 + 1.775 \left[ \frac{W}{H} \right]^{0.62} \left[ \frac{U}{U_*} \right]^{0.572} \right] HU_* \left[ \frac{U}{U_*} \right] \quad (12)$$

در روابط ارائه شده:  $Q$ : دبی جریان بر حسب  $(m^3/s)$ ;  $H$ : عمق جریان بر حسب  $(m)$ ;  $U_*$ : سرعت برشی بر حسب  $(m/s)$ ;  $U$ : سرعت جریان بر حسب  $(m/s)$ ;  $W$ : عرض بالای سطح آب بر حسب  $(m)$  و  $S$ : شیب گرادیان انرژی می‌باشد.

بسته به نوع آلودگی و یا رسوب روابط متفاوتی می‌توان برای  $\phi_T$  تعریف نمود. روابطی که در این مدل برای مدلسازی پارامترهای آلودگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول (۲) تشریح شده‌اند. نکته اینکه برای مدلسازی هر پارامتر آلودگی مقدار آن می‌تواند جایگزین  $\phi$  در مدل شود. مدل FASTER توانایی انجام شبیه‌سازی ۱۲ پارامتر آلودگی را بصورت هم‌زمان و حتی با تأثیر متقابل روی همدیگر را دارا می‌باشد.

کلیه معادلات بصورت ماتریسی نوشته و با هم بر اساس زمان حال  $((n+1) \Delta t)$  حل می‌گردند. در محل‌های تقاطع بازه‌ها مقادیر مرزی به عنوان مرزهای داخلی در زمان  $((n+1) \Delta t)$  مشخص نیستند در حالیکه برای ادامه حل معادلات لازم هستند. در پاره‌ای از مدل‌های تجاری حل معادلات در محل تقاطع‌ها با روش صریح انجام می‌پذیرد یعنی اینکه بر اساس مقادیر گام زمانی قبل  $(n \Delta t)$  مقادیر مرزهای داخلی مشخص می‌گردند. حال آنکه در مدل توسعه یافته FASTER برای رفع این مشکل و یا به عبارت دیگر انجام کامل حل معادلات بصورت ضمنی از خواص ریاضی ماتریس‌ها استفاده شده که تحت عنوان تکنیک خط تأثیر<sup>۹</sup> نامگذاری شده است. با توجه به این روش ماتریس ضرایب ثابت معادلات به سه ماتریس تقسیم شده که حل کلی این ماتریس‌ها با حل اولیه ماتریس ضرایب یکسان خواهد شد. اولین بار این روش توسط (Sobey et al. (1980 در مدلی تحت عنوان ESTFLO مورد استفاده قرار گرفت. در این تکنیک ضمن حل معادلات جریان ماتریسی دیگر از معادلات اتصالات ایجاد و با حل این معادلات مقادیر مرزی داخلی به کمک مرزهای باز پیدا می‌گردند و سپس در حل معادلات جریان و ماتریس مربوطه بکار گرفته می‌شوند. مدل ریاضی-کامپیوتری FASTER به نحوی توسعه و هوشمند شده است که قادر می‌باشد هر گونه شکل اتصالات را تشخیص و مطابق آن ماتریس معادلات مربوط به اتصالات را تشکیل و حل نماید. توضیحات کامل در ارتباط با این تکنیک در (Kashefipour (2001 آمده است.

## ۳-۲- معادله دینامیکی حرکت آلودگی و رسوب و روش

### حل عددی

غلظت یک ماده در محل و مکانی خاص از سیستم توسط فرآیندهای فیزیکی انتقال و پخش که اجزای سیال را از مکانی به مکان دیگر انتقال می‌دهند، به طور دائم در حال تغییر است مقدار کل ماده در یک سیستم بسته ثابت است. مگر آن که توسط فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی تغییر کند. با بکارگیری روش فیک<sup>۱۰</sup> برای شار جرمی متلاطم<sup>۱۱</sup> معادله (موازنه جرم<sup>۱۲</sup>) یک بعدی انتقال-پخش<sup>۱۳</sup> را می‌توان به صورت زیر نوشت (Lee et al. (1997):

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\phi A)}_1 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(\phi Q)}_2 - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[ AD_L \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]}_3 = \underbrace{\phi_T}_4 + \underbrace{\frac{Q_L \phi_L}{\delta x}}_5 \quad (8)$$

که در این رابطه:  $\phi$ : غلظت متغیر مورد نظر در مقطع؛  $Q$ : دبی جریان؛  $D_L$ : ضریب پخشیدگی طولی بر حسب  $(m^2/s)$ ؛  $\phi_L$ : غلظت پارامتر ورودی یا خروجی جانبی. در این رابطه ترم (۱) عبارت

جدول ۲- روابط مورد استفاده برای پارامترهای آلودگی

معادله دیفرانسیل مربوط	علامت	آلاینده
$\phi_T = \frac{S_{ae}}{S_e} W_f W (S_e - S)$	S	بار رسوب معلق
$\phi_T = -K_5 AC$	C	کلیفرم کلی و مدفوعی
$\phi_T = -\beta_3 N_4 A - \sigma_4 N_4 A$	N	نیتروژن آلی
$\phi_T = \beta_3 N_4 A - \beta_1 N_1 A$	N <sub>1</sub>	نیتروژن آمونیاکی
$\phi_T = \beta_4 P_1 A - \sigma_5 P_1 A$	P <sub>1</sub>	فسفر آلی
$\phi_T = \beta_4 P_1 A - \sigma_6 P_2 A$	P <sub>2</sub>	فسفر محلول
$\phi_T = -K_1 LA - K_3 LA$	L	اکسیژن خواهی بیوشیمیایی
$\phi_T = -K_2 (O_2^* - O_2) A - K_1 LA - K_4 - \alpha_5 \beta_1 N_1 A$	O <sub>2</sub>	اکسیژن محلول

ازای واحد اکسیداسیون نیتروژن آمونیاکی مقدار این ضریب در محدوده ۳ الی ۴ تغییر می کند (mgO<sub>2</sub>/mg).  
 برای محاسبه مقدار K<sub>2</sub> می توان به O'Connor and Dobbins (1958) ضرایب مورد استفاده در مدل وابسته به درجه حرارت هستند. برای این منظور ضرایب در ۲۰°C وارد شده و سپس به کمک رابطه استریتز فلیپس برای دمای مورد نظر تصحیح می شوند.

$$K_T = K_{20} \eta^{(T-20)} \quad (13)$$

در رابطه فوق: K<sub>T</sub>: میزان ضریب درجه حرارت محلی؛ K<sub>20</sub>: میزان ضریب در درجه حرارت استاندارد؛ η: ثابت تجربی برای ضریب واکنش. مقدار η برای هر کدام از ضرایب متفاوت می باشد مقادیر آن برای مدل سازی هر کدام از پارامترهای آلودگی در جدول (۳) ارائه شده اند (Brown and Barnwell 1987):

جدول ۳- مقادیر ضریب تصحیح دما برای ضرایب مختلف

ضرایب	علامت	مقدار η
زوال BOD	K <sub>1</sub>	۱/۰۴۷
ثابت اکسیژن گیری	K <sub>2</sub>	۱/۰۲۴
ته نشین BOD	K <sub>3</sub>	۱/۰۲۴
اکسیژن خواهی رسوب	K <sub>4</sub>	۱/۰۶
زوال کلیفرم	K <sub>5</sub>	۱/۰۴۷
زوال نیتروژن آمونیاکی	β <sub>1</sub>	۱/۰۸۳
زوال نیتروژن آلی	β <sub>3</sub>	۱/۰۴۷
زوال فسفر آلی	β <sub>4</sub>	۱/۰۴۷

در این روابط: S: غلظت بار معلق؛ S<sub>ae</sub>: مقدار غلظت در شرایط تعادلی در فاصله a از بستر؛ S<sub>e</sub>: متوسط غلظت متعادل در عمق؛ W: عرض بالای سطح آب بر حسب (m)؛ W<sub>f</sub>: سرعت ته نشینی ذرات؛ C: غلظت کلیفرم (cfu/100ml)؛ A: سطح مقطع جریان؛ K<sub>5</sub>: ثابت مرگ و میر باکتری ها (day<sup>-1</sup>). دامنه تغییرات این ضریب بین ۰/۰۵ الی ۴؛ N<sub>4</sub>: غلظت نیتروژن آلی (mg/l)؛ β<sub>3</sub>: نرخ ثابت هیدرولیز نیتروژن آلی به نیتروژن آمونیاکی با دامنه تغییرات ۰/۰۲ الی ۰/۴ (day<sup>-1</sup>)؛ σ<sub>4</sub>: ضریب نرخ ته نشینی نیتروژن آلی در محدوده ۰/۰۰۰۱ الی ۰/۱ (day<sup>-1</sup>)؛ N<sub>1</sub>: غلظت نیتروژن آمونیاکی (mg/l)؛ β<sub>1</sub>: ثابت نرخ اکسیداسیون نیتروژن آمونیاکی وابسته به دما و دامنه تغییرات این پارامتر بین ۰/۱ الی ۱ (day<sup>-1</sup>)؛ P<sub>1</sub>: غلظت فسفر آلی (mg/l)؛ β<sub>4</sub>: نرخ زوال فسفر آلی وابسته به دما با دامنه تغییرات ۰/۰۱ الی ۰/۷ (day<sup>-1</sup>)؛ σ<sub>5</sub>: نرخ رسوب فسفر آلی وابسته به دما با دامنه تغییرات ۰/۰۰۱ الی ۰/۱ (day<sup>-1</sup>)؛ P<sub>2</sub>: غلظت فسفر غیر آلی یا فسفر محلول (mg/l)؛ σ<sub>6</sub>: نرخ رسوب فسفر محلول (day<sup>-1</sup>)؛ L: غلظت BOD نهایی (mg/l)؛ K<sub>1</sub>: ضریب اکسیژن خواهی وابسته به دما با دامنه تغییرات ۰/۰۲ الی ۳/۴ (day<sup>-1</sup>)؛ K<sub>3</sub>: نرخ کاهش BOD کربناته در اثر ته نشینی با دامنه تغییرات ۰/۳۶ الی ۰/۳۶ (day<sup>-1</sup>) می باشد؛ O<sub>2</sub>: غلظت اکسیژن محلول (mg/l)؛ K<sub>2</sub>: ثابت اکسیژن گیری مطابق با قانون فیک<sup>۱۵</sup> (day<sup>-1</sup>)؛ O<sub>2</sub><sup>\*</sup>: غلظت اکسیژن محلول اشباع در دما و فشار محلی (mg/l)؛ K<sub>4</sub>: نرخ اکسیژن خواهی رسوب با دامنه تغییرات ۱/۵ الی ۹/۸ (O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day)؛ α<sub>5</sub>: نرخ مصرف اکسیژن به

حل عددی معادله (۸) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{1}{\Delta t} [(\varphi A)_i^{n+1} - (\varphi A)_i^n] + \frac{1}{(x_{i+1/2} - x_{i-1/2})} [\theta(M_{i+1/2}^{n+1} - M_{i-1/2}^{n+1}) + (I - \theta)(M_{i+1/2}^n - M_{i-1/2}^n)] - \frac{1}{(x_{i/2} - x_{i-1/2})} [\theta(N_{i+1/2}^{n+1} - N_{i-1/2}^{n+1}) + (I - \theta)(N_{i+1/2}^n - N_{i-1/2}^n)] = (\varphi_T)_i^{n+1} + \left(\frac{Q_L \varphi_L}{\Delta x}\right)_i^{n+1} \quad (14)$$

#### ۲-۴-۲- شرایط مرزی داخلی

در مدل FASTER برای محاسبه مرزهای داخلی از حل صریح معادله پیوستگی و بقای جرم در تقاطعها بصورت فرم زیر استفاده شده است (Berkhoff (1973):

$$\frac{\partial}{\partial t} (V_j \varphi_j) + \sum_{i=1}^N (Q\varphi - AD_L \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \varphi_T \Delta x) - \sum_{i=1}^M Q_{LT_i} \varphi_{LT_i} = 0$$

در این رابطه:  $V_j$  = حجم کنترل در تقاطع که در مدل بصورت  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \Delta x_i$  استفاده شده است،  $\varphi_j$  = غلظت ماده آلوده کننده مورد نظر در تقاطع،  $N$  = تعداد آبراهه‌های متصل به تقاطع،  $Q_{LT}$  = دبی‌های ورودی و یا خروجی جانبی که در تقاطع وارد می‌شوند،  $\varphi_{LT}$  = غلظت ماده مورد نظر که توسط جریان جانبی وارد و یا از تقاطع خارج می‌گردد،  $M$  = تعداد ورودی‌های جانبی ورودی به و یا خروجی از تقاطع. با استفاده از این رابطه با مشخص بودن دبی ( $Q$ ) و غلظت ماده مورد نظر ( $\varphi$ ) در هر آبراهه که از زمان  $n$  مشخص شده‌اند و با مشخص بودن سایر پارامترها مانند  $D_L$ ،  $A$  برای هر آبراهه (از زمان  $n$ ) می‌توان مقدار  $\varphi_j$  را مشخص نمود و این مقدار به عنوان مرز استفاده شده و برای زمان  $(n+1)$  برای ماتریس معادلات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۲-۵- معادله پیوستگی رسوب و روش حل عددی

برای بررسی شرایط مورفولوژی بستر رودخانه، معادله پیوستگی رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله مشتق جزیی را می‌توان با استفاده از روش حجم کنترل و معادله پیوستگی برای کل بار رسوب بدست آورد. این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود (Hosseinipour (1989) and Van Rijn (1984)):

$$\frac{\partial A_S}{\partial t} + \frac{1}{(I-P)} \frac{\partial Q_t}{\partial x} = q_{LS} \quad \text{or} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{(I-P)W} \frac{\partial Q_t}{\partial x} = \frac{q_{LS}}{W}$$

$$M = \varphi Q, \quad N = AD_L \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

که در آن: همانطوریکه ملاحظه می‌گردد حل عددی بصورت روش ضمنی کرانک - نیکلسون می‌باشد که برای  $\theta \geq 0.5$  همواره روشی پایدار است اما دقت آن در مکان و زمان از مرتبه دوم است. همچنین از موارد اشکال این روش این است که در مکانهایی که گرادیان غلظت ماده آلوده کننده زیاد است نوسانات عددی در حل معادلات دیده می‌شود. روش دیگری تحت عنوان ULTIMATE QUIKEST ( $UQ$ ) که بر مبنای تفاضل حجم محدود ارائه شده نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد و نوع حل صریح، و بصورت مشروط پایدار می‌باشد. شرط پایداری در آن کمتر بودن عدد کورانت  $^{16}$  ( $C_r$ ) از ۱ می‌باشد. (Leonard, 1979).

در مدل FASTER مقدار  $\varphi$  در نقاط  $i - \frac{1}{2}$  و  $i + \frac{1}{2}$  یعنی مرزهای حجم کنترل حول نقطه  $i$  برای زمان  $n$  به روش  $UQ$  پیدا شده و سپس در رابطه (۱۴) جایگزین می‌گردد. این امر باعث شده که این روش ترکیبی، خصوصیات  $UQ$  را از نظر دقت و عدم وجود نوسانات عددی داشته باشد و هم خصوصیات مناسب روش ضمنی یعنی پایداری در هر شرایطی را دارا باشد. بنابراین حل نهایی به صورت ضمنی و مرکزی باقی خواهد ماند ولیکن غلظت در مرزهای هر حجم کنترل به کمک روش  $UQ$  محاسبه می‌گردند. لازم به توضیح است با بالا رفتن عدد کورانت از دقت پیش‌بینی مدل علیرغم پایداری آن کاهش می‌یابد.

#### ۲-۴-۲- شرایط اولیه و مرزی برای حل معادله ADE<sup>۱۷</sup>

##### ۲-۴-۱- شرایط اولیه

برای حل عددی معادله انتقال-پخش مشابه معادلات هیدرودینامیکی جریان غلظت آلاینده در شروع شبیه‌سازی باید مشخص گردد. این مقدار در شروع شبیه‌سازی می‌تواند معادل صفر در نظر گرفته شود.

در این رابطه:  $A_s$ : سطح بستر کانال؛  $Q_i$ : کل بار رسوب؛  $P$ : تخلخل؛  $Z_b$ : ارتفاع کف بستر؛  $q_{LS}$ : نرخ جریان جانبی رسوب در واحد طول؛  $W$ : متوسط عرض سطح آب می‌باشد.

$$\Delta V(Z_{bi}^{n+1} - Z_{bi}^n) + \frac{\Delta t}{(1-p)W} \left\{ \theta \left[ (Q_i A)_{i+1/2}^{n+1} - (Q_i A)_{i-1/2}^{n+1} \right] + (1-\theta) \left[ (Q_i A)_i^n - (Q_i A)_{i-1/2}^n \right] \right\} = \Delta V \Delta t \frac{q_{LS}}{W} \quad (17)$$

که در آن:

$$\Delta V = \frac{1}{16} (x_{i+1} - x_{i-1}) (A_{i-1}^{n+1} + 2A_i^{n+1} + A_{i+1}^{n+1} + A_{i-1}^n + 2A_i^n + A_{i+1}^n), A_{i+1/2} = 0.5(A_i + A_{i+1})$$

$$A_{i-1/2} = 0.5(A_i + A_{i+1}), \bar{W} = \frac{1}{8} (W_{i-1}^{n+1} + 2W_i^{n+1} + W_{i+1}^{n+1} + W_{i-1}^n + 2W_i^n + W_{i+1}^n)$$

$$\frac{q_{LS}}{W} = \frac{1}{4} \left[ \left( \frac{q_{LS}}{W} \right)_{i-1/2}^{n+1} + \left( \frac{q_{LS}}{W} \right)_{i+1/2}^{n+1} + \left( \frac{q_{LS}}{W} \right)_{i-1/2}^n + \left( \frac{q_{LS}}{W} \right)_{i+1/2}^n \right], W_{i-1/2} = 0.5(W_{i-1} + W_i)$$

$$W_{i+1/2} = 0.5(W_i + W_{i+1})$$

در صورتیکه این بخش از مدل FASTER فعال شود،  $Z_b$  تابعی از مکان و زمان خواهد بود و در حل معادلات جریان تأثیر گذار خواهد شد.

▪ حل عددی معادله انتقال-پخش با استفاده از روش عددی ULTIMATE QUICKEST. این الگو از نوسانات عددی در آشفستگی‌های بالا جلوگیری می‌کند.

مدل FASTER به زبان فرترن ۷۷ نوشته شده است و در محیط‌های تحت ویندوز فرترن نیز قابل اجرا است.

## ۲-۶- تواناییها و ویژگیهای مدل FASTER

این نرم‌افزار ابزار مناسبی برای محاسبه یک بعدی سرعت، سطح مقطع جریان و انتقال رسوب و آلودگی در رودخانه و خلیج‌های کم عمق می‌باشد. بطور خلاصه قابلیت‌های این مدل را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

- حل کامل معادلات سنت‌ونان برای جریان در کانالهای باز.
- قابل استفاده برای خلیج‌های کم عمق و سیستم‌های رودخانه‌ای.
- شبیه‌سازی جریانهای تحت تأثیر جزر و مد.
- محاسبه ضریب پخشیدگی با استفاده از روابط مختلف.
- محاسبه بارمعلق رسوب توسط روشهای مختلف.
- آنالیز ۱۱ پارامتر کیفی از جمله: دما، شوری، کلیفرم کلی و مدفوعی و Ecoli، نیتروژن آلی، نیتروژن آمونیاکی، فسفر آلی، فسفر محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و اکسیژن محلول (DO) و فلزات سنگین.
- در دسترس بودن اصل برنامه. این ویژگی باعث می‌شود که بتوان روشهای مختلف شبیه‌سازی را برای پدیده‌های گوناگون مورد استفاده قرار داد. در نتیجه مدل قابل توسعه می‌باشد.
- قابلیت ادغام مدل با مدل‌های دو بعدی.

## ۲-۷- صحت‌سنجی و آزمایش مدل

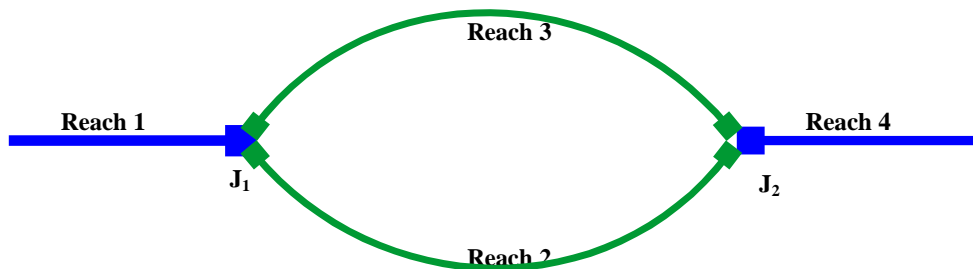
برای نشان دادن توانایی مدل FASTER در شبیه‌سازی، دو مثال برای محاسبه سطح آب و دبی و یک مثال برای توانایی آن در تخمین غلظت ماده آلوده‌کننده برای شرایطی با گرادین غلظت بالا ذکر شده است.

### ۲-۷-۱- جریان همگام و متغیر تدریجی در یک لوپ

#### (Loop)

این آزمایش توانایی مدل را برای محاسبه دبی و سطح آب در جریانی که بصورت شاخه‌ای جدا و سپس به یک آبراهه منتهی و به شکل Loop می‌باشد نشان می‌دهد. شکل (۲) نشان دهنده شرایط این مثال می‌باشد. سیستم کانالهای باز تشکیل شده از چهار بازه ۱، ۲، ۳ و ۴ که سطح مقطع تمامی آنها بصورت دوزنقه‌ای با شیب جداره  $45^\circ$  (۱:۱) و شرایط هیدرولیکی شرح جدول (۴) می‌باشد. اطلاعات مربوط به این مثال توسط Harpin et al. (1995) ارائه شده است.





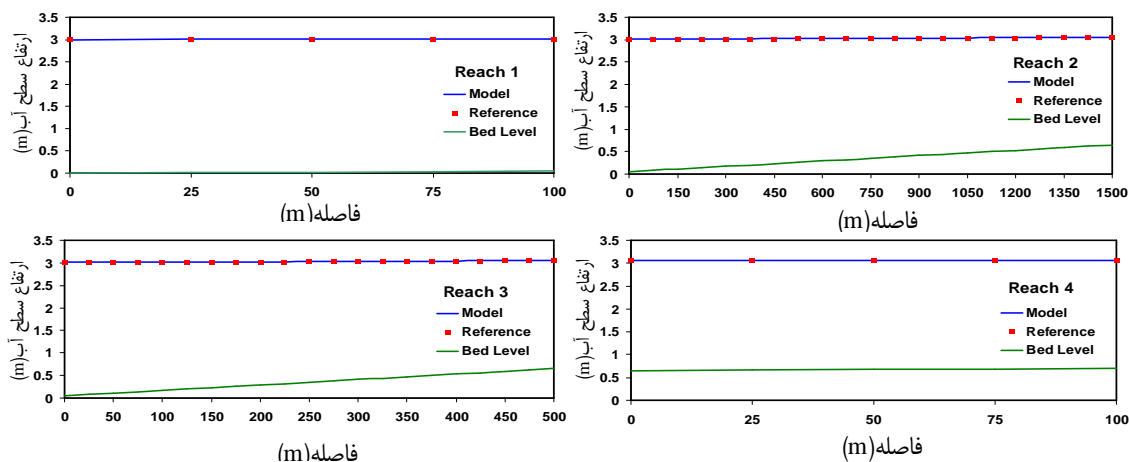
شکل ۲- شرایط مثال جریان همگام و متغیر تدریجی در یک لوپ (Loop)

جدول ۴- مشخصات هیدرولیکی جریان همگام و متغیر تدریجی در یک لوپ (Loop)

کانال	طول (m)	عرض (m)	فاصله گره‌ها (m)	ضریب زبری مانینگ	شیب کف
۱	۱۰۰	۵۰	۲۵	۰/۰۱۲۰	۰/۰۰۰۵
۲	۱۵۰۰	۳۰	۷۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۰۴
۳	۵۰۰	۲۰	۲۵	۰/۰۱۳۰	۰/۰۰۱۲
۴	۱۰۰	۴۰	۲۵	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۰۵

دبی‌های پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر ارائه شده مترمکعب در ثانیه برای بازه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ بوده است. که مقدار حداکثر خطای اندازه‌گیری در بازه ۲ با مقدار ۰/۰۷۸٪ محاسبه گردید.

ارتفاع سطح آب پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر ارائه شده هارپین و همکاران مقایسه شد. نتایج مقایسه در شکل (۳) نشان داده شده است. درصد خطای برآورد در محل‌های تقاطع نقاط  $J_1$  و  $J_2$  به ترتیب معادل ۰/۶۶۰٪ و ۰/۸۶۴٪ محاسبه گردیده است. متوسط خطای اندازه‌گیری برای کلیه نقاط روی بازه‌ها معادل ۰/۰۹٪ شده است.

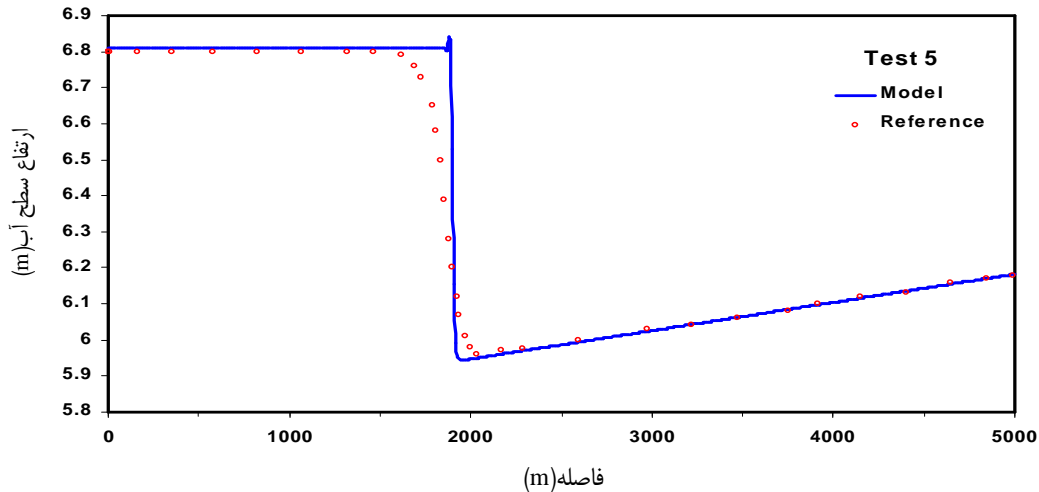


شکل ۳- مقایسه نتایج پیش‌بینی سطح آب توسط مدل با مقادیر هارپین و همکاران برای کلیه کانالها

## ۲-۷-۲- شبیه‌سازی موج انتقال به طرف بالادست

برای نشان دادن توانایی مدل در شبیه‌سازی جریانهای ناپایدار و غیر همگام از آزمایش زیر که مقادیر سطح آب در آن توسط Jha (1996) ارائه شده، استفاده گردیده است. در این مثال فرض بر این است که یک جریان یکنواخت با سرعت ۱/۴۷ متر بر ثانیه، عمق ۵/۷۹ متر در کانالی بطول ۵ کیلومتر و به شکل دوزنقه‌ای با شیب دیواره ۱/۵ به ۱ (افقی به عمودی) و شیب کف ۰/۰۰۰۰۷۸۵ و زبری

۰/۰۱۳ در حال جریان است، در یک لحظه و بصورت ناگهانی سرعت جریان در پایین‌دست توسط یک دریچه به صفر کاهش یافته و همین امر ایجاد یک موج نموده که به طرف بالادست حرکت می‌نماید. در زمان  $t=۳۵۴$  ثانیه مقادیر ارائه شده توسط مدل با مقادیر ارائه شده توسط Jha et al. (1996) در شکل (۴) مقایسه گردیده است. همانطوریکه ملاحظه می‌گردد مدل FASTER قادر بوده است بخوبی موج ایجاد شده را مدل نماید.



شکل ۴- مقایسه نتایج پیش‌بینی سطح آب توسط مدل با مقادیر جوا و همکاران

## ۲-۷-۳- شبیه‌سازی انتقال آلودگی با گرادبان غلظت بالا

برای بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی کیفی مدل FASTER از مثال زیر استفاده شده است. اگر جریان همگام و یکنواخت فرض گردد و منبع افزایش و یا کاهش دهنده آلودگی و یا رسوب حذف شود و همچنین پخشیدگی وجود نداشته باشد، در این صورت معادله (۸) به صورت زیر، خواهد شد:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + U \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

که در آن  $U$  سرعت متوسط جریان است.

حل تحلیلی این معادله موجود است. لذا معادله (۱۸) به شکل عددی با روش ترکیبی پیشنهادی حل و با حل تحلیلی آن مقایسه می‌گردد. در این مثال استاندارد فرض می‌گردد غلظت اولیه ماده آلوده کننده مطابق شکل (۵) باشد که در آن گرادبان غلظت مکانی زیاد است. با توجه به طبیعت معادله (۱۸) هیچگونه پخشیدگی وجود ندارد و از نظر تحلیلی اثبات می‌گردد که این ماده آلوده کننده پس از تعداد مشخصی گام زمانی به همین شکل در نقاط پایین دست شکل می‌یابد. اگر فاصله بین نقاط مکانی یکسان باشد فاصله‌ای را که پس

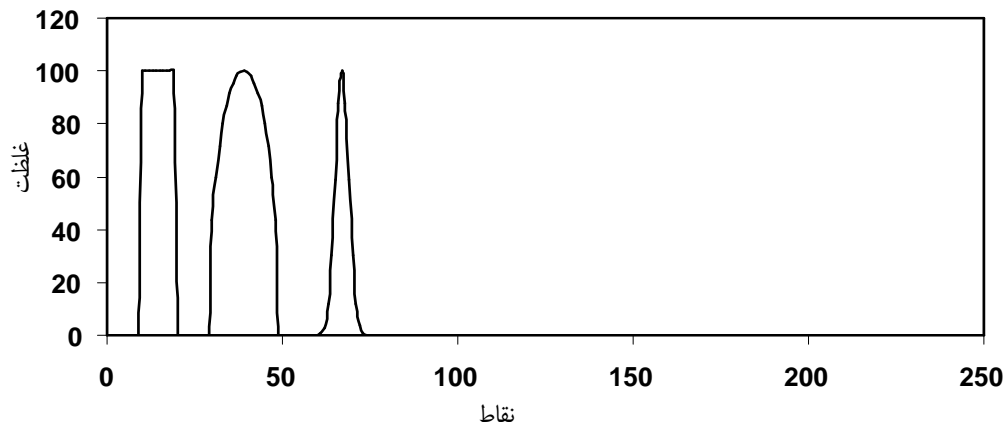
از  $m$  گام زمانی طی می‌کند برابر با  $m.C_r$  که در آن  $C_r = U \frac{\Delta t}{\Delta x}$  (عدد کورانت) خواهد بود. در این مثال فرض شده است  $C_r = 0/5$  و تعداد گام زمانی معادل ۱۰۰ می‌باشد. در شکل (۶) نتایج مدل با حل تحلیلی آن مقایسه گردیده است. در این شکل نتایج بدست آمده از روش حل عددی ضمنی تفاضل محدود مرکزی ( $\theta = 0/5$ ) نیز با نتایج حل تحلیلی مقایسه شده است. بطوریکه ملاحظه می‌گردد دقت مدل پیشنهادی به مراتب بیشتر از روش تفاضل محدود مرکزی است، ضمن اینکه هیچگونه نوسانات عددی دیده نمی‌شود. لازم به توضیح است که روش  $UQ$  خود به تنهایی همان دقت روش پیشنهادی را دارد ولیکن این روش برای  $C_r > 1$  پایدار نمی‌باشد. حال آنکه روش پیشنهادی در  $C_r$  های بالاتر از ۱ نیز پایدار است.

در  $C_r = 1$  دقت مدل بسیار بالاست و جوابهای آن شبیه جوابهای مربوط به روش صریح Backward. (Abbott and Basco (1997) در مقادیر  $C_r$  بالاتر روش  $UQ$  پایدار نخواهد بود حال آنکه روش ترکیبی پیشنهادی پایدار و با کنترل  $\theta$  می‌توان از دقت لازم نیز برخوردار شود. نتایج بدست آمده از مدل

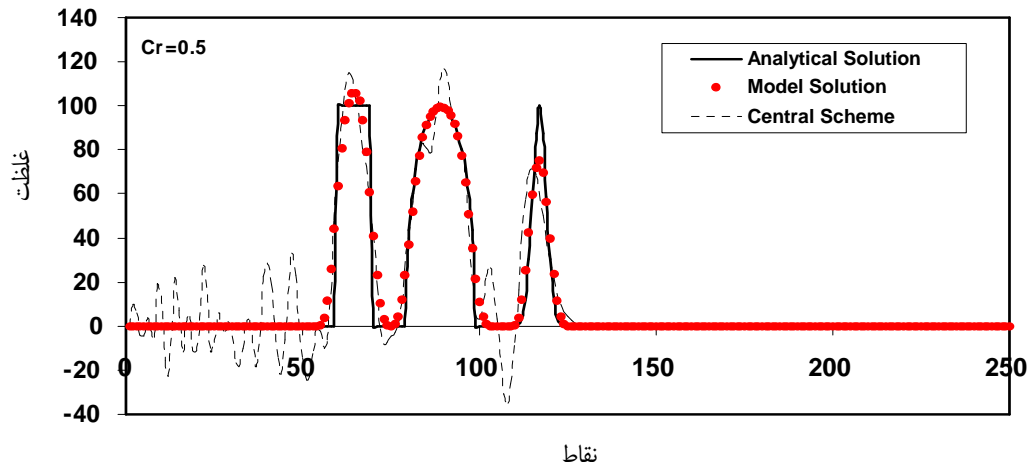
بایستی به عدد یک نزدیک باشند. نتایج مقادیر  $a$  و  $R^2$  برای مقادیر عدد کورانت  $0.5$ ،  $1/10$  و  $1/5$  در جدول (۵) خلاصه گردیده‌اند.

$$C_m = aC_p \quad (19)$$

برای مقادیر  $C_r = 0.5$ ،  $C_r = 1$  و  $C_r = 1/5$  با مقادیر بدست آمده از حل تحلیلی به کمک رابطه (۱۹) مقایسه شده‌اند. در این رابطه  $C_m$ : غلظت اندازه‌گیری شده و  $C_p$ : غلظت محاسبه شده توسط مدل می‌باشند. ضریب  $a$  در رابطه (۱۹) و ضریب همبستگی  $R^2$  می‌تواند بیانگر صحت پیش‌بینی مدل باشد. بالطبع هر دو این پارامترها



شکل ۵- غلظت اولیه ماده آلوده کننده (مثال)



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل پیشنهادی و روش حل اختلاف مرکزی با حل تحلیلی

جدول ۵- ضرایب  $a$  و  $R^2$  در رابطه (۲۰) برای مقایسه نتایج

مدل با روش حل تحلیلی

۳- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مدل یک‌بعدی تحت عنوان FASTER که قادر است جریان رودخانه و خلیج‌های کم عرض را با دقت بالا مدل نماید معرفی شده است. در این مدل معادلات سنت‌ونانت به کمک روش

$R^2$	$a$	$C_r$
۰/۹۵۰	۱/۰۲۸	۰/۵
۰/۹۹۶	۱/۰۱۹	۱/۰
۰/۹۲۰	۱/۰۵۸	۱/۵

#### ۴- مراجع

- Abbott, M. B., and D.R. Basco, (1997), "Computational Fluid Dynamics: An introduction for engineers" Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., 425p.
- Berkhoff, J.C.W., (1973), "Transport of Pollutant or Heat in a system of Channels", Hydraulic Research of Water management, Proceedings of Technical Meeting, No. 26, Delft Hydraulics Laboratory, Netherlands, pp. 80-106.
- Brown, L.C., and T.O. Barnwell, (1987), "The Enhanced Stream Water Quality Models, QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual", EPA/600/387/007 U. S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens.
- Cunge, J.A., F.M. Holly, Jr and A. Verwey. (1980). "Practical Aspects of Computational River Hydraulics". Pitman Publishing Limited, London, 420p.
- Dronkers, J. J., (1975), "Tidal Theory and Computations.", *Advances in Hydro science*, Vol. 10, pp. 145-226.
- Fisher, H.B., E.J., List, R.C.J., Koh, J. Imberger, and N.H. Brooks, (1979), "Mixing in Inland and Coastal Waters", Academic Press, Inc., San Diego, 483p.
- Harpin, R. , D.R. Webb, C.D. Whitlow, P.G. Samuels, and J.B.Wark, (1995), "National Rivers Authority Benchmarking of Hydraulic Models", Stage One Final Report, Sir William Halcrow & Partners Ltd., R&D Project Record 508/ST/2.
- Hosseini-pour, Z., (1989), "Development and Application of a Fluvial Hydrodynamic and Sediment Transport Model.", In: "hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Water", by: R.A. Falconer, P. Goodwin and R.G.S. Matthew(Eds), *Proceedings of International Conference*, Bradford University, UK, pp. 474-483.
- Jha, A.K., J. Akiyama, and M. Ura, (1996), "A Fully Conservative Beam and Warming Scheme for Transient Open Channel Flows", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 5, pp. 605-621.
- Kashefipour, S.M., (2001), "Modelling Flow, Water Quality and Sediment Transport Processes in Riverine Systems", PhD Thesis, University of Cardiff, UK, 295p.
- Kashefipour, S.M., and R.A. Falconer, (2002), "Significance of Empirical Coefficients on the Accuracy of the Numerical Solution of the ADE", *Proceedings of the fifth International hydroinformatics Conference*, pp 95-102, July 1-5, Cardiff, UK.
- Lee, H.Y., H.M., Hsieh, J.C., Yang and C.T., Yang, (1997), "Quasi-Two-Dimensional Simulation of Scour and Deposition in Alluvial Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 7, pp. 600-609.
- تفاضل محدود مرکزی و با بهره‌گیری از سیستم یک در میان Staggered حل شده‌اند. در این روش برای حل ضمنی معادلات در کل سیستم رودخانه‌ای از تکنیکی تحت عنوان خط تأثیر بهره‌جویی شده است. تعداد ۱۲ نوع آلودگی مختلف را مدل می‌تواند شبیه‌سازی نماید که این آلودگی‌ها به کمک حل عددی رابطه دینامیکی پخش و جابجایی (ADE) به مدل داده شده‌اند. آلودگی‌هایی که مدل قادر است شبیه‌سازی نماید شامل: انواع کلیفرم‌ها، نیتروژن آلی، نیتروژن آمونیاکی، فسفر آلی، فسفر غیر آلی، شوری، دما، فلزات سنگین، رسوب معلق و اکسیژن محلول است. این مدل توانمندی‌های زیادی از جمله دقت بالا، پایداری حل معادلات، امکان تلفیق با مدل‌های دوبعدی را دارا می‌باشد. مدل FASTER سپس توسط دو مثال در بخش هیدرودینامیکی شامل الف: شبیه‌سازی جریان متغیر تدریجی در لوپ و ب: جریان غیر همگام انتقال موج به بالادست صحت‌سنجی گردید. نتایج مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و ارائه شده توسط هارپین و همکاران در مثال (الف) و جوا و همکاران در مثال (ب) بیانگر دقت بالای این مدل می‌باشد (شکل‌های ۳ و ۴). علاوه بر این مدل برای یک شرایط خاص جریان تحت عنوان انتقال خالص (Advection Pure) که عمدتاً بصورت یک مثال استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد، بکار برده شد. در این مثال که حل تحلیلی آن موجود است نتایج مدل برای کورانت ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ با مقادیر تحلیلی آن مقایسه گردید. نتایج مقایسه که در شکل ۶ و جدول ۵ آمده است بیانگر دقت پیش‌بینی مدل FASTER بوده است.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Computational Aquatic Ecosystems Dynamic Model
- 2- Dynamic Reservoir Simulation Model
- 3- Estuary and Lake Computer Model
- 4- Flow and Solute Transport in Estuaries and Rivers
- 5- Saint Venant
- 6- Open Boundary Conditions
- 7- Multi-Reach Internal Boundary Condition
- 8- Courant Number
- 9- Influence Line Technique
- 10- Fick
- 11- Turbulent mass flux
- 12- Mass balance
- 13- Advection - Diffusion Equation
- 14- Colony forming unit
- 15- Fick's law
- 16- Courant number
- 17- Advection - Diffusion Equation

- Streams*", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 25-32.
- Sobey, R. J., T. S. Adil, and P. F. Vidler, (1980), "User's Guide to ESTFLO/Version 2B", James Cook University of North Queensland, Department of Civil and System Engineering, Research Bulletin No. CS22.
- Su, Y.C., J., Morse, M., Heaney, (2004), "Two-Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Modeling for Evaluating Impacts From IH 45 Galveston Causeway Construction", Texas Department of Transportation, Houston, Texas.
- Suh, S.W., J.H., Kim, I.T., Hwang, H.K., Lee, (2004) "Water Quality Simulation on an Artificial Estuarine Lake Shihwaho, Korea", Journal of Marine Systems 45, pp. 143-158.
- Van Rijn, L. C., (1984), "Sediment Transport, Part III: Bed Form and Alluvial Roughness." *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp. 1733-1755.
- Leonard, B.P. (1979). "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, pp. 59-98.
- McQuivey, R.S., and T.N. Keefer, (1974), "Simple Method for Predicting Dispersion in Streams", *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 100 No. (4), pp. 997-1011.
- O'Connor, D.J., and W.E., Dobbins, (1958), "Mechanism of Reaeration in Natural Streams", *Transactions of the ASCE*, R3, pp. 641-684.
- Park S.S., and Y.S., Lee, (2002), "A Water Quality Modeling Study of the Nakdong River, Korea", *Ecological Modeling*, 152, pp. 65-75.
- Romero, J.R., J.P., Antenucci, and J., Imberger, (2004), "One-and three-dimensional biogeochemical simulations of two differing reservoirs", *Ecological Modeling*, 174, pp. 143-160.
- Seo, I.W., and T.S., Cheong, (1998), "Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural

تاریخ دریافت مقاله: ۲۰ تیر ۱۳۸۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۴ اسفند ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۱ اسفند ۱۳۸۶