

# ارائه مدل یک بعدی شبیه‌سازی جریان و رسوب، مطالعه موردی: رودخانه‌اندخوی

محمدتقی اعلمی<sup>۲</sup>

کیومرث روشنگر<sup>۳</sup>

محمدعلی کی‌نژاد<sup>۲</sup>

یوسف حسن‌زاده<sup>۱</sup>

(دریافت ۸۷/۱۰/۱۴ پذیرش ۸۸/۷/۲۱)

## چکیده

در این مقاله، مدل ریاضی رفتار جریان غیردائمی، ظرفیت حمل رسوب و تغییرات بستر در یک آبراهه فرسایش‌پذیر مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت. به این منظور جریان غیردائمی متغیر تدریجی با معادله سن-وانان و پیوستگی رسوب با معادله اکسندر با روش اصلاح شده و دو مرحله‌ای لکس و ندرف-ریچ‌مایر با دقت بالا و مرتبه دوم زمانی و مکانی، به صورت صریح و مزدوج تحلیل شد. صحت عملکرد و نتایج مدل ریاضی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. همچنین با در نظر گرفتن داده‌های هیدرولیکی و ابعاد هندسی رودخانه‌اند در بازه بدلان و ارزیابی تناسب کاربرد و سازگاری روشهای مختلف برآورد بار رسوب در این بازه، تغییرات پروفیل سطح آب، کف بستر و پارامترهای هیدرولیکی به صورت تابعی از زمان و مکان ارائه شد. نتایج این تحقیق کارایی بسیار بالای مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پروفیل بستر و جریان و امکان اعمال شرایط مختلف در آن را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی، جریان غیر دائمی، بار بستر، سن-وانان-اکسندر، لکس و ندرف-ریچ‌مایر

## One-Dimensional Simulation of Flow and Sediment Transport, A Case Study in the Aland River

Yousef Hasanzadeh<sup>1</sup>  
Kiyoumars Roushangar<sup>3</sup>

Mohammad Ali Keynejad<sup>2</sup>  
Mohammad Tagi Alami<sup>4</sup>

(Received Jan 4, 2009 Accepted Oct. 13, 2009)

### Abstract

In this paper, a mathematical model is presented for studying the unsteady flow, aggradation, and degradation in alluvial channels. The one-dimensional, unsteady, gradually varied flow equations (saint-venant equations) and the sediment continuity equation are solved numerically using the second-order, explicit finite difference two-step scheme developed by Lax Wendroff- Richmayer. All the three governing equations are solved simultaneously during any step so that the water flow and sediment continuity equations are coupled. The computed results are compared with the experimental results obtained in a laboratory flume. Also the Aland River data in Badalan Station with different sediment discharge equations are used for simulating the unsteady flow model bed changes and hydraulic parameters for different sections and time steps. Results show that the model is capable of simulating unsteady open channel flow, bed load transport, aggradation and degradation satisfactorily.

**Keywords:** Simulation, Unsteady Flow, Bed Load, Saint-Venant-Exner, Lax Wendroff- Richmayer

1. Prof., Dept of Civil Eng., University of Tabriz (Corresponding Author)  
(+98 411) 3354100 yhasanzadeh@tabrizu.ac.ir

2. Prof., Dept. of Civil Eng., Sahand University, Tabriz

3. Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Dept. of Civil Eng., University of Tabriz

4. Asist. Prof., Dept. of Civil Eng., University of Tabriz

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول)  
yhasanzadeh@tabrizu.ac.ir (۰۴۱۱) ۳۳۵۴۱۰۰

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سهند، تبریز

۳- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

همبستگی آماری و ترکیبی از روشهای تحلیلی، فرضهای منطقی و اطلاعات تجربی توسعه یافته‌اند. در مورد بار کف می‌توان به تحقیقات میر-پیتر و مولر<sup>۱۰</sup>، انیشتن<sup>۱۱</sup>، زانکه<sup>۱۲</sup>، پارکر<sup>۱۳</sup>، سان<sup>۱۴</sup> و داناو<sup>۱۵</sup>، چنگ<sup>۱۶</sup> و ویلکوک<sup>۱۷</sup> اشاره کرد [۹-۱۵].

هدف اصلی این تحقیق، مدل‌سازی عددی جریان غیردائمی در یک بستر فرسایش‌پذیر، بررسی قابلیت و کارآمدی مدل مورد نظر در شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان، برآورد غیرمستقیم بار رسوبی بستر و شناسایی و مقایسه روابط سازگار در بازه مورد نظر به کمک روشهای تحلیلی و نیمه تجربی بود.

در این تحقیق با در نظر گرفتن فرایند انتقال رسوب در بازه بدلان واقع در رودخانه الند شهرستان خوی به عنوان رودخانه‌ای با مواد بستری درشت دانه و ارزیابی تناسب کاربرد و سازگاری روشهای مختلف در برآورد بار رسوبی بستر، یک مدل ریاضی یک بعدی برای تحلیل معادلات سن-ونان-اکسندر و پیش‌بینی تغییرات پروفیل آب بستر رودخانه و شدت انتقال رسوب تهیه و ارائه شد. در مدل مذکور معادلات سن-ونان برای جریان آب و معادله اکسندر برای پیوستگی رسوب با روش اصلاح شده-لکس و ندرف-ریچ مایر<sup>۱۸</sup> به صورت دو مرحله‌ای، جفت<sup>۱۹</sup> و با دقت از مرتبه دوم تحلیل شد. ضمن بررسی نتایج و صحت عملکرد مدل در بازه مورد نظر، روند تغییرات بستر، پروفیل سطح آب و پارامترهای هیدرولیکی به صورت تابعی از زمان و مکان برای هر نوع معادله رسوبی، قابل پیش‌بینی است.

## ۲- معادلات حاکم بر مدل

معادلات دیفرانسیل جزئی مدل مزبور که بیان‌کننده معادلات جریان غیردائمی با کف فرسایش‌پذیر است، از نوع هذلولوی غیر خطی بوده که برای کانال مستطیلی به صورت زیر بیان می‌شوند

$$(h)_t + (hu)_x = 0 \quad (۱) \text{ معادله پیوستگی}$$

$$(۲) \text{ معادله مومنتم}$$

$$(hu)_t + (hu^2 + \frac{gh^2}{2})_x - gh(S_0 - S_f) = 0$$

$$(Z)_t + (\frac{1}{1-P})(q_s)_x = 0 \quad (۳) \text{ معادله پیوستگی رسوب}$$

یکی از اهداف مهم در مهندسی منابع آب، بهینه کردن منافع و کمینه کردن خسارات ناشی از جریان در رودخانه‌ها است. این کار با شناسایی، رفتار سنجی و تحلیل جریان در رودخانه‌ها میسر می‌گردد. کنترل و به حداقل رساندن خسارات وارده ناشی از سیلاب، رسوبگذاری و فرسایش به آبراهه‌ها، اراضی کشاورزی، تأسیسات و ابنیه‌های آبی مستلزم این است که فرایند حرکت جریان، فرسایش بستر، انتقال مواد جامد و ته‌نشینی مواد رسوبی مورد مطالعه کامل قرار گیرد.

امروزه محدودیت داده‌های هیدرولیکی اندازه‌گیری شده از یک سو و توسعه روشهای عددی از سوی دیگر، شبیه‌سازی ریاضی رفتار جریان، ظرفیت حمل رسوب و روند رسوبگذاری و فرسایش را امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر کرده است. به همین دلیل محققان مختلفی شبیه‌سازی عددی یک بعدی را برای بررسی جریان‌های با بستر متحرک در کانال‌های آبرفتی و رودخانه‌های طبیعی مورد توجه قرار داده‌اند.

در این رابطه می‌توان به مدل خطی و پخشی پیش‌بینی پروفیل بستر توسط سونی و همکاران<sup>۱</sup>، استفاده از سری فوریه و روش تابع خطا در تحلیل معادله رسوبگذاری توسط گیل<sup>۲</sup>، استفاده از روش باقیمانده‌ها در تحلیل معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی توسط جارامیلو<sup>۳</sup> و جین<sup>۴</sup>، بررسی روشهای مزدوج توسط چادری<sup>۵</sup>، حل معادلات سن-ونان-اکسندر<sup>۶</sup> در حالات بحرانی توسط لین<sup>۷</sup> و آلتین کار<sup>۸</sup> و شبیه‌سازی سیلابهای شدید در رودخانه‌های طبیعی توسط والرئو<sup>۹</sup>، اشاره نمود [۶-۱]. اخیراً نیز تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی بستر ناشی از پدیده‌های فرسایش و رسوبگذاری در مخزن سد علویان به طور موردی توسط حسن‌زاده و همکاران و مدل ریاضی جهت برآورد مقدار رسوبگذاری در مخازن سدهای کوچک توسط صمدی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۷ و ۸].

در مورد برآورد بار بستر در دهه‌های اخیر به منظور شناخت، تحلیل حرکت ذرات و برآورد بار رسوبی، کوشش‌های بسیاری صورت گرفته است. ولی با توجه به محدودیت شناخت نسبت به مکانیسم و فرم مختلط حرکت ذرات، تاکنون روش تحلیلی جامع و عمومی ارائه نشده است. روابط پیشنهادی اغلب بر اساس

<sup>10</sup> Meyer -Peter and Muller

<sup>11</sup> Enistein

<sup>12</sup> Zanke

<sup>13</sup> Parker

<sup>14</sup> Sun

<sup>15</sup> Donahue

<sup>16</sup> Cheng

<sup>17</sup> Wilcock

<sup>18</sup> Lax Wendroff- Richmayer

<sup>19</sup> Coupled

<sup>1</sup> Soni et al.

<sup>2</sup> Gill

<sup>3</sup> Jaramilo

<sup>4</sup> Jain

<sup>5</sup> Chaudhery

<sup>6</sup> Saint-Venan-Exner

<sup>7</sup> Lyn

<sup>8</sup> Altin kar

<sup>9</sup> Valerio

که در این روابط

۳-۱- گام اول

### ۳- الگوی عددی برای تحلیل معادلات

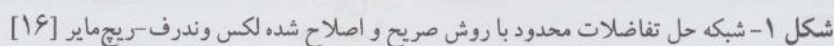
### ۳-۲- گام دوم

<sup>1</sup> Leapfrog

$$\bar{f}_i^n = \frac{f_{i+1}^n + f_i^n}{2}, \quad \tilde{f}_i^n = \frac{f_i^n - f_{i-1}^n}{2}, \quad S_f = \frac{n^2 u^2}{(R)^{4/3}}, \quad S_0 = -Z_x$$

که در آن

$$\begin{bmatrix} h \\ hu \\ Z \end{bmatrix}_i^{n+1} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ Z \end{bmatrix}_i^n - 2\varepsilon \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \tilde{\eta} \\ \frac{\tilde{q}_s}{1-p} \end{bmatrix}_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\xi} \\ 0 \end{bmatrix}_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \quad (6)$$



سپس با تصحیح مقدار  $X_R$ ، عملیات مجدداً با مقادیر تصحیح شده، ادامه یافت و با حصول همگرایی، مقادیر متغیرهای مجهول در گره‌های مرزی بالا دست به دست آمد (۱۰)

$$X_R^n = (c - u)_1^n \Delta t$$

$$\begin{bmatrix} Q \\ A \\ Z \end{bmatrix}_R^n = \begin{bmatrix} Q \\ A \\ Z \end{bmatrix}_2^n - \left( \frac{X_2 - X_R^n}{\Delta X} \right) \begin{bmatrix} Q_2 - Q_1 \\ A_2 - A_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^{n+1} = \frac{(Q_1^{n+1} - Q_R^n) - \Delta t(b \xi_R^n)}{(U + C)_R^n} + A_R^n$$

(۱۱)

$$X_R^n = \frac{1}{2} \Delta t ((C - U)_1^{n+1} + (C - U)_R^n)$$

$$\begin{bmatrix} Q \\ A \\ Z \end{bmatrix}_R^n = \begin{bmatrix} Q \\ A \\ Z \end{bmatrix}_2^n - \left( \frac{X_2 - X_R^n}{\Delta X} \right) \begin{bmatrix} Q_2 - Q_1 \\ A_2 - A_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^{n+1} = \frac{2(Q_1^{n+1} - Q_R^n) - b \Delta t (\zeta_R^n + \zeta_1^{n+1})}{(U + C)_R^n + (U + C)_1^{n+1}} + A_R^n$$

که در این روابط

$Q$  دبی جریان و  $A$  مساحت مقطع است.

برای گره‌های مرزی پایین دست نیز با در نظر گرفتن شیب مثبت منحنی مشخصه، مانند موارد بالا عمل شد. در مورد رقوم کف در بالادست نیز از برون‌یابی مقادیر داخلی استفاده گردید و به‌منظور پایداری الگو نیز شرط کورانست  $(U + C) \leq \frac{1}{\varepsilon} (CFL)$  در هر نقطه شبکه رعایت شد.

### ۳-۴- روش محاسباتی

در این پژوهش از روش لکس-وندرف ریچ‌مایر که یک روش چندگامی است، استفاده شد. این روشها برای معادلات هذلولوی غیرخطی مناسب بوده و عملکرد آنها بر اساس پیش‌بینی و تصحیح است به‌طوری که در گام نخست مقدار متغیری برای متغیر وابسته پیش‌بینی می‌شود و سپس در گام بعدی مقدار تصحیح شده برای تعیین مقدار نهایی متغیر انتخاب می‌گردد. روش چندگامی لکس-وندرف اولین گام را در نقطه میانی  $(i + \frac{1}{2})$  اعمال می‌کند در حالی که گام زمانی  $n + \frac{1}{2}$  است و سپس در مرحله زمانی  $n + 1$ ، از روش

به‌منظور کاهش نوسانات ناشی از خطاهای عددی، ویسکوزیته مصنوعی به الگو اضافه می‌شود. روش غیرخطی جیمسون و همکاران<sup>۱</sup> یکی از روشهای موفق در کاهش نوسانات غیرواقعی در روشهای حل مرتبه دوم بوده و کمترین خطای احتمالی را به‌همراه دارد. در اینجا ابتدا متغیرهای  $\Gamma$  و  $\Psi$  تعریف می‌شوند [۱۶]

$$\Psi = \left[ \frac{|h_i - h_{i-1}|}{|h_i| + |h_{i-1}|} \right] \left[ \frac{|h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1}|}{|h_{i+1}| + 2|h_i| + |h_{i-1}|} \right] \left[ \frac{|h_{i+1} - h_i|}{|h_{i+1}| + |h_i|} \right] \quad (۷)$$

مرز پایین دست  $i=k+1$ ، نقاط میانی  $k$  تا  $i=2$  و مرز بالادست  $i=1$  است.

$$\Gamma^+ = k \text{Max}(\Psi_{i+1}, \Psi_i), \quad \Gamma^- = k \text{Max}(\Psi_i, \Psi_{i-1}) \quad (۸)$$

که در آن

$k$  ضریب تنظیم میزان لزجت مصنوعی بوده و  $k = 0.3$  برای شروع الگوریتم در نظر گرفته شده است.

مقادیر نهایی به‌صورت زیر اصلاح می‌شود (۹)

$$\begin{bmatrix} h \\ hu \\ Z \end{bmatrix}_i^{n+1} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ Z \end{bmatrix}_i^{n+1} + 2\Gamma^+ \begin{bmatrix} \tilde{h} \\ \tilde{q} \\ \tilde{Z} \end{bmatrix}_{i+1}^{n+1} - 2\Gamma^- \begin{bmatrix} \tilde{h} \\ \tilde{q} \\ \tilde{Z} \end{bmatrix}_i^{n+1}$$

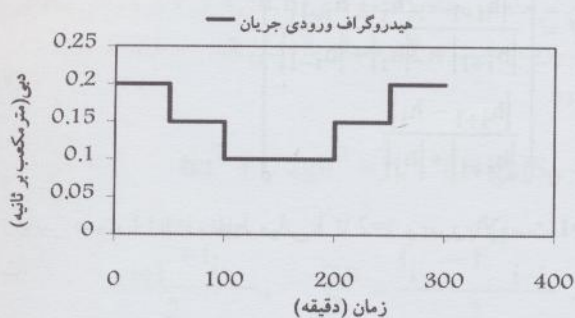
### ۳-۳- محاسبه مقادیر متغیرها در مرزها

برای شرایط جریان زیر بحرانی به‌منظور محاسبه مقادیر  $z$ ,  $u$ ,  $h$  در گره‌های ۱ و  $k+1$  مطابق تئوری مشخصه<sup>۲</sup>، دو شرط مرزی در بالا دست و یک شرط مرزی در پایین دست لحاظ شد. به‌عنوان شرط مرزی جریان در بالا دست، هیدروگراف ورودی سیل و در پایین دست، منحنی دبی-آشل در نظر گرفته شد که مطابق روابط زیر، مقادیر متغیرهای وابسته‌ای که از طریق شرایط مرزی مشخص نبودند، به‌کمک تئوری مشخصه، محاسبه گردیدند [۱۶]. برای کمیت‌های بالا دست ابتدا با تعریف مقادیر پارامترها در نقطه  $R$  و به‌کمک هیدروگراف ورودی، مقادیر  $y_1^{n+1}$  و  $u_1^{n+1}$  محاسبه شدند.

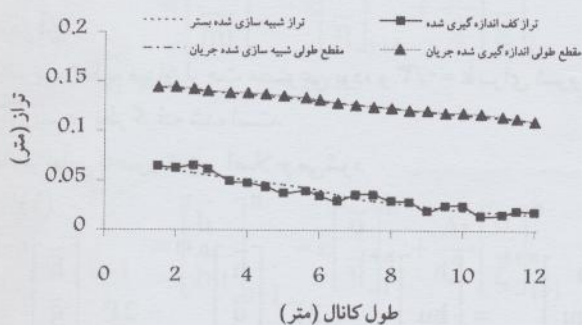
<sup>۱</sup> Jamson et al.

<sup>۲</sup> Characteristic Theory

استفاده شد [۱۷]. در این آزمایش طول کانال ۳۰ متر، عرض آن ۲ متر و شیب اولیه کف ۰/۰۰۲ و دانه بندی تقریباً یکنواخت با  $D_{50}=1/2\text{mm}$  بود. هیدروگراف ورودی مطابق شکل ۲ است. با توجه به مقادیر بار بستر اندازه گیری شده، روش آیکرز وایت<sup>۴</sup> برای محاسبه  $q_s$  در این آزمایش پیشنهاد شد، اعمال داده های اولیه مرزی در این آزمایش به مدل پیشنهادی و مقایسه آن با داده های اندازه گیری شده مطابق شکل ۳، حاکی از عملکرد خوب مدل در شبیه سازی تغییرات کف و پروفیل جریان است.



شکل ۲- هیدروگراف ورودی جریان به کانال آزمایشگاهی



شکل ۳- مقایسه عملکرد مدل و داده های آزمایشگاهی در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه

۴- تعیین دانه بندی و ضریب مانینگ در بازه مورد مطالعه رودخانه الند از کوه های مرزی ایران و ترکیه سرچشمه گرفته و پس از طی مسیری کوهستانی در جنوب شهر خوی به رودخانه قطور تخلیه می شود. با لحاظ کردن شرایط یک بازه مناسب رودخانه ای برای مطالعات هیدرولیکی، بازه بدلان در پایین دست ایستگاه هیدرومتری بدلان و بالادست سد انحرافی الند، انتخاب شد. مدل ریاضی برآورد بار رسوبی و شبیه سازی هیدرولیکی جریان سیلابی در بازه مورد مطالعه به کمک روش پیشنهادی، مورد مطالعه قرار گرفت.

جهش نقطه میانی<sup>۱</sup> برای یافتن متغیرها استفاده می گردد. این روش با دقت زمانی و مکانی از مرتبه دوم جزء روش های با دقت بالا محسوب می گردد [۱۶].

با فرض معلوم بودن مقادیر  $h_i^n$  و  $q_i^n$  و  $Z_i^n$  در مرحله زمانی معین  $k$  در کلیه نقاط شبکه  $(i=1,2,...,K+1)$  از یک آبراهه تقسیم شده به  $n$  بازه در مرحله زمانی  $k+1$  مقادیر به ترتیب زیر محاسبه شدند

۱- مقادیر  $h_{i\pm\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$  و  $q_{i\pm\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$  در گره های داخلی  $(i=2,3,...,k)$  با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه و مقادیر آنها در مرزها  $(i=1, i=k+1)$  به کمک شرایط مرزی مناسب تعیین شد.

۲- مقادیر  $Z_i^{n+1}$ ،  $q_i^{n+1}$ ،  $h_i^{n+1}$  در گره های داخلی  $(i=2,3,...,k)$  به کمک مقادیر محاسباتی بند الف و الگوی به کار گرفته شده، تعیین و مقادیر آنها در مرزها از شرایط مرزی مشخص شده محاسبه شدند. ۳- برای استهلاک نوسانات، ویسکوزیته مصنوعی به روش جیمسون به الگو اضافه شده و مقادیر محاسبه شده در مرحله قبل تصحیح شد.

۴- مقادیر  $Z_i^n$ ،  $q_i^n$ ،  $h_i^n$  را برای بازه زمانی بعدی برابر  $Z_i^{n+1}$ ،  $q_i^{n+1}$ ،  $h_i^{n+1}$  قرار داده و بازه زمانی  $\Delta t$  برای گام بعدی از معادله کورانت تعیین شد. این روند تا تکمیل مشابه سازی برای زمان مورد نظر تکرار شد.

در این روش معادلات جریان و پیوستگی رسوب با یکدیگر مرتبط<sup>۲</sup> هستند. در گام اول، ارتباطی بین معادلات وجود ندارد ولی در گام دوم مقادیر پیش بینی شده  $h$  و  $q$  برای محاسبه  $q_s$  مورد استفاده قرار می گیرد و در نتیجه برای هر متغیر وابسته ای که در انتهای بازه زمانی محاسبه شود، تغییرات تمام متغیرهای دیگر منظور می گردد. شایان ذکر است که روش جفت در مدل سازی کانال های آبرفتی منجر به نتایج دقیق تر و بهتری می گردد [۴].

به طور کلی روش محاسباتی ارائه شده به دلیل سادگی عمل و عدم نیاز به تشکیل دستگاه معادلات غیر خطی و نیز تکرار محاسبات دارای سرعت نسبتاً بالایی در مقایسه با روش های ضمنی بوده و استفاده از گام زمانی مناسب با توجه به شرط پایداری کورانت، ضرورتی ذاتی برای پایداری و استفاده از آن است.

### ۳-۵- ارزیابی صحت عملکرد مدل

به منظور ارزیابی صحت عملکرد مدل از نتایج آزمایش رسوب گذاری و فرسایش آزمایشگاه هیدرولیک بورلینگتون<sup>۳</sup>

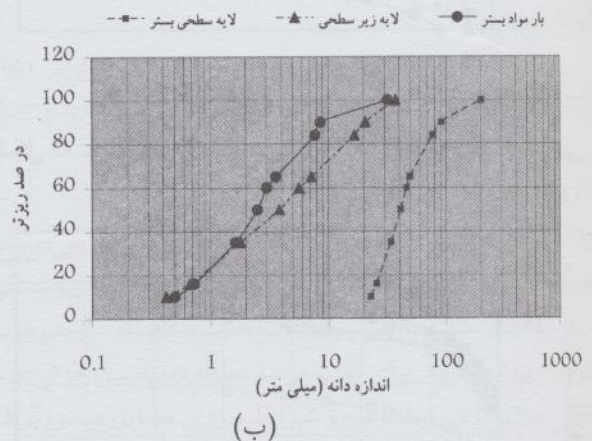
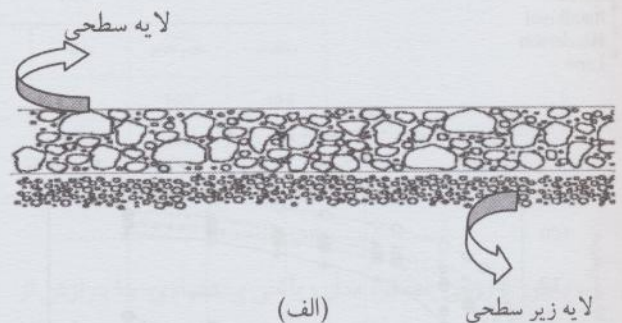
<sup>4</sup> Ackes White

<sup>1</sup> Leapfrog Method

<sup>2</sup> Coupled

<sup>3</sup> Burlington

رودخانه آند در بدلان جزء رودخانه‌هایی با بستر درشت دانه است و به همین دلیل مطابق شکل ۴-الف بستر آن به دو لایه سطحی و زیر سطحی قابل تفکیک است. نمونه‌های لازم به روش شبکه‌ای<sup>۱</sup> و با استفاده از دستگاه‌های هلی اسمیت<sup>۲</sup> از لایه سطحی و زیر سطحی برداشته شد و مواد بار کف در دبی‌های مختلف تهیه و منحنی دانه‌بندی آن مطابق شکل ۴-ب ترسیم و ارائه شد [۱۸ و ۱۹].



شکل ۴-الف) نمایش لایه‌های سطحی و زیر سطحی و (ب) دانه‌بندی آنها

با توجه به اینکه در رودخانه‌های با مواد بستر درشت دانه، لایه سطحی بستر به عنوان معیار تعیین ضریب مقاومت به شمار می‌رود، بنابراین برای محاسبه ضریب مانینگ در بازه مورد مطالعه رودخانه آند نیز به دلیل تغییرات لایه سطحی، فرسایش و رسوبگذاری و تغییرات فرم بستر در جریان‌های سیلابی از سه روش متداول زیر استفاده شد

۱- روابط تجربی که اساس آن وابستگی کامل مقاومت به زبری و اندازه مواد متشکله کف به صورت  $n = aD_g^b$  بود. نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲- روش کیفی یا مقایسه‌ای که مبنای آن انطباق شرایط مورفولوژیکی، هیدرولیکی و هندسه بازه با رودخانه مشابه مرجع [۲۰] است که در این روش  $0.39 \leq n \leq 0.34$  نتیجه شد [۲۰].

۳- روش اندازه‌گیری مستقیم که با کارکرد روش شیب سطح<sup>۳</sup> در حل معادله مانینگ، مقدار ضریب زبری در شرایط جریان دائمی در حدود  $0.31/$  برآورد گردید [۲۰].

۵- شبیه‌سازی جریان سیلابی و شدت بار بستر در رودخانه مورد مطالعه  
۵-۱- شرایط اولیه

جریان در بازه مورد مطالعه دارای طول ۴۰۰ متر، عمق متوسط ۱ متر، شیب  $0.67/$  درصد، عرض متوسط ۲۰ متر و دبی ۲۷ مترمکعب بر ثانیه بود. به دلیل عریض و مستقیم بودن مسیر و همچنین عدم وجود تغییرات ناگهانی در پروفیل طولی کف بستر و نیز تثبیت دیواره‌های جانبی، جریان در یک مقطع مستطیلی عریض به صورت یک بعدی در راستای اصلی جریان شبیه‌سازی شد.

## ۵-۲- وقوع سیلاب

در اثر وقوع جریان غیر دائمی سیلابی مطابق هیدروگراف ورودی شکل ۵، دبی از ۲۷ به ۶۰ مترمکعب در ثانیه در مدت زمان  $t_1$  برابر ۴۰ دقیقه افزایش یافت و سپس در مدت زمان ۱۱۰ دقیقه ( $t_2 - t_1$ ) فروکش نمود تا تقریباً به مقدار اولیه رسید. برای به کارگیری معادله مناسب انتقال بار بستر در مدل پیشنهادی با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به هیدرولیک جریان و بار بستر در ایستگاه مورد نظر، روابط تجربی و تحلیلی سازگار با شرایط رودخانه مورد نظر انتخاب شد. با احتساب خصوصیات فیزیکی مواد رسوبی در لایه‌های سطحی، زیر سطحی و مواد بار کف بستر، نرخ انتقال بار رسوبی کف و میزان خطای آنها در مقایسه با داده‌های تجربی مطابق شکلهای ۶ تا ۹ ارزیابی شد [۲۱]. خطا از رابطه ۱۲ محاسبه شد

$$E\% = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{b\text{model}} - Q_{b\text{measured}}}{Q_{b\text{measured}}} \right) \quad (12)$$

که در این رابطه

$Q_{b\text{model}}$  دبی بار بستر پیش‌بینی شده توسط مدل و  $Q_{b\text{measured}}$  دبی بار بستر اندازه‌گیری شده است.

<sup>3</sup> Slope Area Method

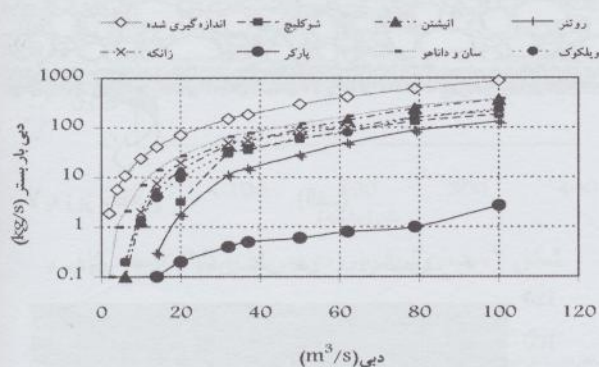
<sup>1</sup> Grid by Number

<sup>2</sup> Helly Smith

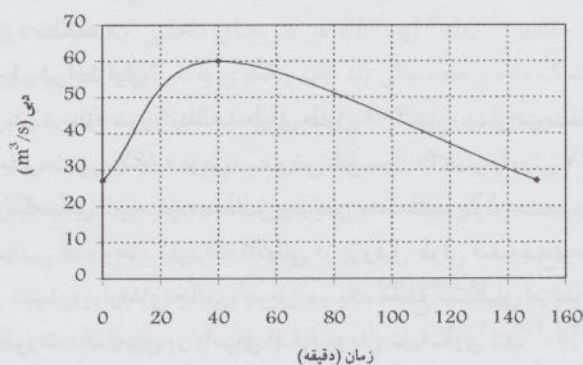
جدول ۱- مقدار ضریب زبری محاسبه شده با روابط تجربی مختلف در بازه مورد مطالعه [۲۱]

| ضرایب | روش | میرپیتر | لین <sup>۶</sup> | هندرسون <sup>۵</sup> | رادکیوی <sup>۴</sup> | گارد <sup>۳</sup> | برآی <sup>۲</sup> | سابرامانیا <sup>۱</sup> |
|-------|-----|---------|------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| a(m)  |     | ۰/۰۳۸   | ۰/۰۳۱۷           | ۰/۰۴۱۵               | ۰/۰۰۴۱               | ۰/۰۴۷۶            | ۰/۰۵۶             | ۰/۰۴۷                   |
| b     |     | ۰/۱۶۶   | ۰/۱۶۶            | ۰/۱۶۶                | ۰/۱۶۶                | ۰/۱۶۶             | ۰/۱۷۶             | ۰/۱۶۶                   |
| g(%)  |     | ۹۰      | ۷۵               | ۵۰                   | ۷۵                   | ۵۰                | ۶۵                | ۵۰                      |
| n     |     | ۰/۰۲۵   | ۰/۰۳             | ۰/۰۲۴                | ۰/۰۲۵                | ۰/۰۲۸             | ۰/۰۳۳             | ۰/۰۲۷                   |

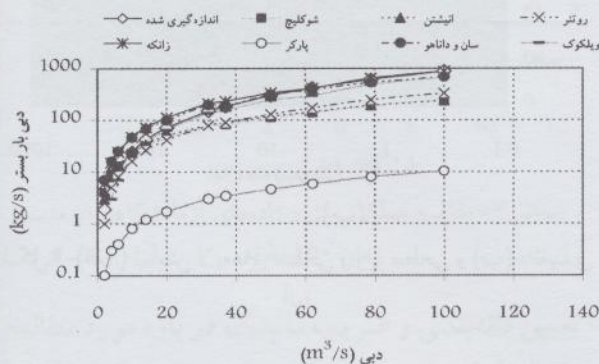
1 Subramanya  
2 Bray  
3 Garde  
4 Raudkivei  
5 Henderson  
6 Lane



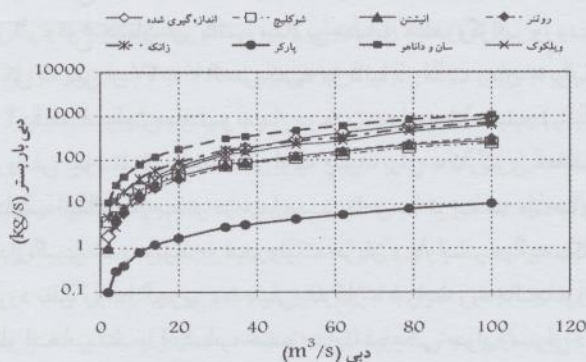
شکل ۴- تغییرات دبی بار بستر نسبت به دبی جریان با دانه بندی لایه سطحی



شکل ۵- هیدروگراف ورودی جریان در بالادست



شکل ۶- تغییرات دبی بار بستر نسبت به دبی جریان با دانه بندی مواد بارکف

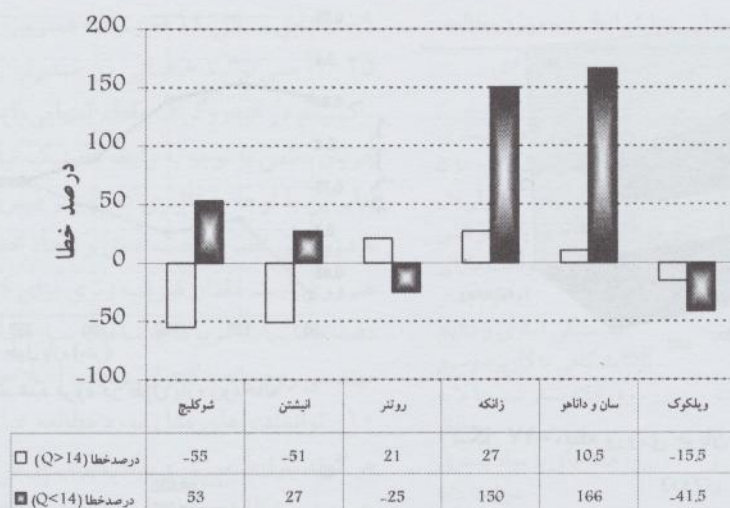


شکل ۷- تغییرات دبی بار بستر به دبی جریان با دانه بندی لایه زیرسطحی

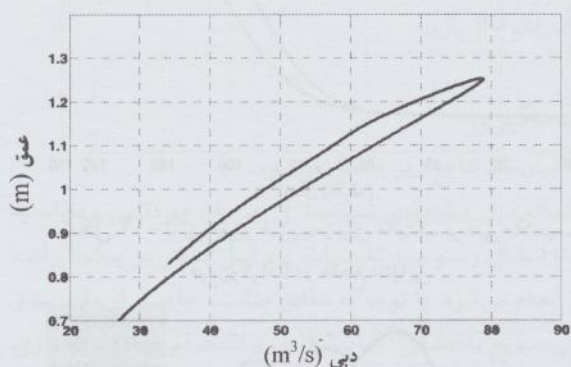
جدول ۲- مقایسه درصد خطای نسبی مدل‌های محاسبه بار بستر با در نظر گرفتن دانه‌بندی و ترکیب روشها

| دبی بارکف      | هر دبی Q            | Q < 14 (m³/s)       | Q > 14 (m³/s)       |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| درصد خطا       | (%) Q <sub>b1</sub> | (%) Q <sub>b2</sub> | (%) Q <sub>b3</sub> |
| لایه سطحی بستر | ۹۲۰                 | ۴۸۹                 | ۳۹۷                 |
| لایه زیر سطحی  | ۱۳۰                 | ۹۰                  | ۱۹                  |
| مواد بارکف     | ۱۹۵                 | ۷/۳۳                | ۱۸/۳۳               |

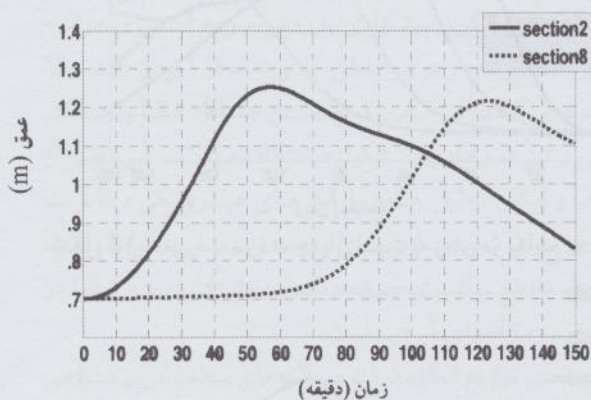
Q<sub>b1</sub>: متوسط روشهای انیشتن، روتتر، شوکلیچ، زانکه، ویلیکوک و سان و داناو. Q<sub>b2</sub>: متوسط روشهای انیشتن، روتتر و شوکلیچ. Q<sub>b3</sub>: متوسط روشهای زانکه، ویلیکوک و سان و داناو.



شکل ۹- درصد خطای نسبی روشهای منتخب برآورد رسوب بستر نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده



شکل ۱۱- تغییرات دبی نسبت به عمق در مقطع دوم



شکل ۱۲- تغییرات عمق نسبت به زمان

## ۶- نتایج و بحث

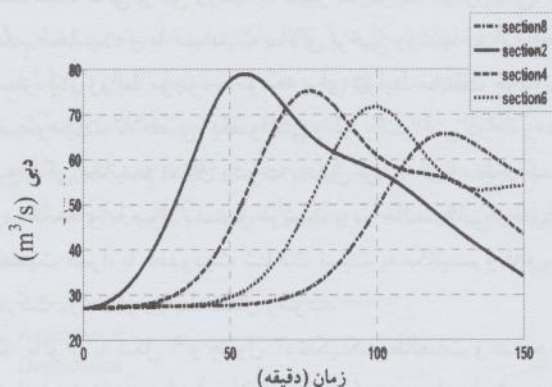
۱- مطابق شکل‌های ۶ تا ۸، به‌کارگیری دانه‌بندی لایه سطحی بستر به‌منظور برآورد بار کف، خطای نسبی بزرگ‌تری نسبت به دو حالت دیگر دارد [۲۱]. بنابراین تخمین شدت بار بستر به‌کمک

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل ریاضی پیشنهادی، با برآزش از داده‌های تجربی رسوبی برداشت شده از ایستگاه بدلان، رابطه ۱۳ استخراج شد [۱۹]

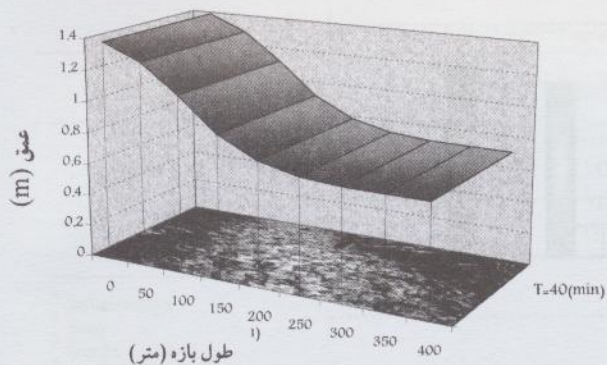
$$Q_b = 0.645Q^{1.57} \quad (13)$$

که در این رابطه

$Q_b$  دبی بار بستر بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و  $Q$  دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه است. سپس رابطه ۱۳ در معادله پیوستگی رسوب اعمال شد و با تقسیم بازه به هشت فاصله ۵۰ متری با فواصل زمانی پایدار برای مدل، هر سه معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی حاکم، با شرایط اولیه و شرایط مرزی مطابق هیدروگراف ورودی شکل ۵ به‌طور مزدوج تحلیل شد و تغییرات مشخصات هیدرولیکی نسبت به پارامترهای مختلف در شکل‌های ۱۰ تا ۱۷ ترسیم و ارائه شد.



شکل ۱۰- تغییرات دبی نسبت به زمان در مقاطع مختلف



شکل ۱۷- مقطع ورودی جریان سیلابی در زمان اوج هیدروگراف ورودی ۴۰ دقیقه

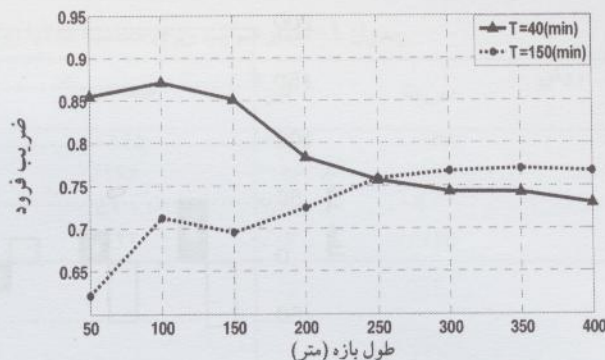
خصوصیات فیزیکی لایه زیر سطحی بستر و مواد بار کف، نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

۲- مطابق شکل‌های ۷ تا ۹، برای پیش‌بینی بار بستر در دبی‌های بالا برای بازه مذکور روش‌های میر-پیتز مولر، پارکر، انیشتین و بگنولد با دانه‌بندی لایه زیر سطحی و مواد کف به دلیل وجود خطاهای زیاد، مناسب به نظر نمی‌رسند [۲۱]. در حالی که به کارگیری روش‌های زانکه، ویلکوک، سان و دانه‌ها در جریان‌های سیلابی با دبی بالا و روش‌های روتنر، انیشتین و شوکلیچ در دبی‌های پایین به دلیل سازگاری با یکدیگر و حداقل شدن خطای مقادیر برآوردی آنها نسبت به مقادیر مشاهداتی، توصیه می‌شود.

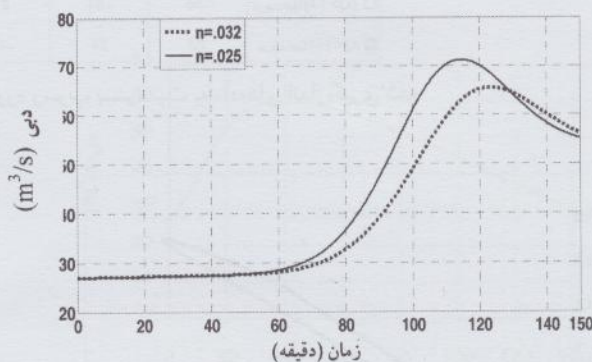
۳- مطابق جدول ۲ استفاده از میانگین روش‌های انیشتین، روتنر و شوکلیچ در دبی‌های پایین و میانگین روش‌های زانکه، ویلکوک، سان و دانه‌ها در دبی‌های بالا به دلیل کاهش مجدد خطاهای نسبی برای اندازه‌گیری شدت بار بستر در بازه مذکور مناسب‌تر است.

۴- دلایل تفاوت فاحش برخی روش‌ها در برآورد بار بستر عبارت‌اند از: شرایط کاربردی مخصوص هر کدام از روش‌ها (جدول ۳) با توجه به محدودیت‌ها، پیشنهادها و توصیه‌ها، عدم حساسیت کافی برخی روش‌ها به تغییرات شرایط هیدرولیکی جریان، عدم حساسیت و یا حساسیت بالای برخی روش‌ها به اندازه مواد بستر، نیاز روابط موجود به توسعه برای شرایط مختلف جریان نظیر خصوصیات تلاطمی، یکنواختی و غیریکنواختی ذرات رسوب، پیچیدگی مکانیسم انتقال رسوب به دلیل توسعه لایه سطحی بستر در رودخانه‌های با مواد بستری درشت و در حالت کلی وجود عدم قطعیت همراه با محدودیت شناخت نسبت به مکانیسم و فرم مختلط حرکت ذرات در روابط انتقال رسوب.

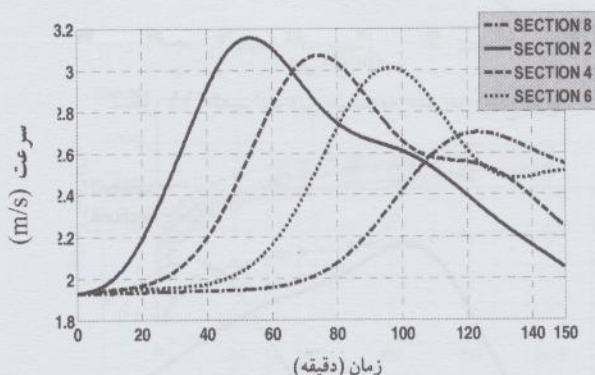
۵- با توجه به شکل ۹ و جدول ۲، تفکیک مطالعات و نتایج برای شرایط مختلف جریان (سیلابی و دائمی) سبب پایدار شدن روند تغییرات آن خواهد شد.



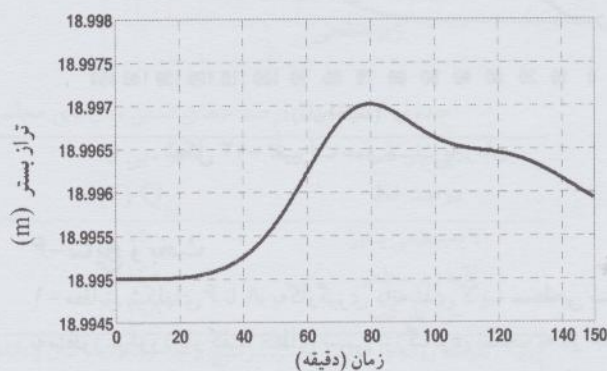
شکل ۱۳- تغییرات عدد فرود در طول بازه رودخانه



شکل ۱۴- تأثیر تغییر ضرب زیری مانینگ بر دبی ماکسیمم و هیدروگراف در مقطع انتهایی



شکل ۱۵- تغییرات سرعت جریان نسبت به زمان در مقاطع مختلف



شکل ۱۶- تغییرات تراز بستر نسبت به زمان در مقطع میانی

جدول ۳- روشهای برآورد بار بستر متناسب با شرایط بازه مورد مطالعه

| روش برآورد بار بستر | مبنای نظری                                 | توصیه کاربردی                                                                  |
|---------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| شوکلچ (۱۹۳۴)        | دبی بحرانی                                 | در رودخانه‌های با مواد بستری درشت دانه به قطر ۰/۳ تا ۵ میلی‌متر                |
| انیشتن (۱۹۵۰)       | خصوصیات تلاطمی                             | برای رودخانه‌های با بستر شنی و ماسه‌ای غیریکنواخت دارای فرم بستر               |
| روتتر (۱۹۵۹)        | همبستگی آماری و نتایج تجربی                | همبستگی آماری و نتایج آزمایشگاهی با کاربرد وسیع رودخانه بستر شنی با لایه محافظ |
| پارکر (۱۹۸۲)        | حرکت همسان ذرات                            |                                                                                |
| زانکه (۱۹۸۷)        | خصوصیات تلاطمی و احتمالات                  | رودخانه‌های با مواد بستری درشت دانه                                            |
| سان و داناو (۲۰۰۰)  | تئوری احتمال تصادفی تبادل و توزیع بار رسوب | رودخانه‌های بستری درشت دانه به قطر ۰/۲ تا ۱۰ میلی‌متر                          |
| ویلکوک (۲۰۰۳)       | همبستگی آماری و احتمالات                   | مواد بستری درشت دانه به قطر ۰/۵ تا ۸۲ میلی‌متر                                 |

۹- مطابق شکل ۱۴ تغییرات ضریب زبری در بازه ۰/۳۲ تا ۰/۲۵ می‌تواند خطایی در حدود ۱۰ درصد در تخمین دبی ماکسیمم در هیدروگراف مقطع انتهایی، ایجاد نماید. این خطا برای جریان دائمی با توجه به رابطه مانینگ تا حدود ۲۸ درصد است. بنابراین با توجه به تأثیری که تغییر ضریب زبری بر پارامترهای هیدرولیکی نظیر سرعت، عمق و ایجاد خطا در برآورد رسوب دارد، ضروری است مقدار ضریب زبری برای کاهش هزینه‌ها، افزایش دقت محاسبات مربوط به ساخت سازه‌های آبی، امور مربوط به مهندسی رودخانه و کنترل سیلاب اصلاح و تدقیق شود.

۱۰- توانمندی‌های مدل مورد مطالعه عبارت‌اند از: امکان گنجاندن هر گونه شرایط مرزی و به‌کارگیری هر نوع معادله رسوبی، عدم نیاز به سعی و خطا در محاسبات، امکان استخراج پروفیل سطح آب و تغییرات کف در هر فاصله زمانی و مکانی از بازه و امکان بررسی هیدروگراف سیلاب و استهلاك آن از بالادست به پایین‌دست در هر نقطه دلخواه از بازه.

## ۷- نتیجه‌گیری

از آنچه بیان شد نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- به‌کمک مدل پیشنهادی شبیه‌سازی جریان غیردائمی، محاسبه ظرفیت انتقال رسوب و تغییرات پروفیل بستر در یک آبراهه طبیعی انجام می‌شود. با توجه به تطابق مناسب حاصل از مقایسه و ارزیابی نتایج داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی با شبیه‌سازی عددی، کاربرد این مدل برای پیش‌بینی تغییرات پروفیل‌های بستر و سطح آب سایر رودخانه‌های مشابه توصیه می‌شود.

۲- تحلیل عددی الگوی پیشنهادی با روش صریح لکس و ندرف-ریچ مایر اصلاح شده و دو مرحله‌ای، با توجه به دارا بودن دقت بالا از مرتبه دوم مکانی و زمانی، دربرداشتن حداقل خطا و حداکثر همگرایی و نیز عدم نیاز به تشکیل دستگاه معادلات غیرخطی از یک طرف و امکان تحلیل جامع پارامترهای هیدرولیکی و قابلیت تعمیم آن برای شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه بعدی توأم با به‌کارگیری مقاطع مرکب از طرف دیگر، مدلی کارآمد و توانا در شبیه‌سازی رودخانه‌های آبرفتی است.

۳- منحنی توزیع اندازه ذرات در لایه‌های سطحی، زیر سطحی و مواد بارکف، تأثیر بالایی در تخمین شدت بار بستر در بازه مذکور دارد. بنابراین مطالعه خصوصیات مواد بستر در موارد مشابه و مطالعات موردی، به‌منظور تعیین و واسنجی روشهای برآورد بار رسوب توصیه می‌شود.

۴- با توجه به خطاهای بالا در معادلات، محاسبه نرخ انتقال رسوب، ارزیابی و صحت سنجی جامع‌تر و دقیق‌تر به‌منظور کاربرد این معادلات در رودخانه‌های آبرفتی توصیه می‌شود.

۶- نتایج محاسبات و مقایسه عملکرد مدل با داده‌های تجربی، نشان می‌دهد که با به‌کار گرفتن روش دو مرحله‌ای لکس و ندرف-ریچ مایر، معادلات حاکم بر پدیده را می‌توان به‌صورت مزدوج و با دقت مطلوب تحلیل نمود.

۷- وجود تأخیر زمانی بین  $Q_{max}$  و  $Y_{max}$  در حلقه بسته جریان غیر دائمی شکل ۱۱، تفاوت دبی ماکسیمم بین مقاطع ابتدایی و انتهایی شکل ۱۰ و امکان مشاهده پدیده رسوبگذاری در بستر<sup>۱</sup> و فرسایش بستر<sup>۲</sup> در شکل ۱۶، بیانگر عملکرد صحیح مدل در حل دقیق معادلات سن-وان و معادله پیوستگی رسوب است.

۸- در شکل ۱۳ تغییرات عدد فرود در طول بازه رودخانه نمایش داده شده است. مطابق شکل روند تغییرات عدد Fr از ابتدای بازه تا انتهای آن در زمان ۴۰ دقیقه برخلاف زمان ۱۵۰ دقیقه است. دلیل این امر گسترش موج سیلاب در زمان اوج در طول بازه و فروکش کردن آن در زمان انتهایی هیدروگراف ورودی، از بالادست به پایین‌دست بازه است. شکل ۱۰ تغییرات دبی نسبت به زمان را نشان می‌دهد. تغییرات عمق و سرعت نسبت به زمان در مقاطع مختلف در شکل‌های ۱۲ و ۱۵، نشان داده شده است. شکل‌های مذکور تأثیرات تأخیر زمانی، طول مسیر و حجم جریان موجود بین مقاطع را در پارامترهای هیدرولیکی و تغییرات هیدروگرافی یک سیلاب نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Aggradation

<sup>2</sup> Degradation

در این تحقیق از راهنمایی‌های ارزنده و نیز اطلاعات و داده‌های اندازه‌گیری شده انتقال بار بستر آقایان دکتر مهدی یاسی و رحیم حمزه پوری استفاده شد. به این وسیله از همکاری‌های صمیمانه ایشان تقدیر و تشکر می‌گردد.

## ۹- مراجع

- 1- Soni, J. P., Garde, R. J., and Raju, K. G. R. (1980). "Aggradation in streams due to over loading." *J. Hydr. Div.*, 106 (1), 117-132.
- 2- Gill, M. A. (1983). "Diffusion model for aggradation." *J. Hydr. Res.*, 21(5), 355-367.
- 3- Jaramilo, W. F., and Jain, S. C. (1984). "Aggradation and degradation of alluvial channel beds." *J. Hydr. Engrg.*, 110 (8), 1072-1085.
- 4- Chaudhry, M. H. (1998). "Comparision of coupled and semi coupled numerical models for alluvial channels." *J. Hydraulic Engineering*, 124 (28), 794-802.
- 5- Lyn, D. A., and Altinkar, M. (2002). "St. Venant- Exner equations for near-critical and and critical flows." *J. of Hydraulic Engineering*, 128 (6), 579-587.
- 6- Valerio, C. (2003). "Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels." *J. of Hydraulic Research*, 41 (2), 167-177.
- ۷- حسن‌زاده، ی.، فیضی، ا.، و اعلمی، م. (۱۳۸۷). "مقایسه نتایج مدل ریاضی رسوب‌گذاری در مخزن سد علویان مراغه با داده‌های آبنگاری." *م. آب و فاضلاب*، ۶۷، ۴۷-۵۷.
- ۸- صمدی بروجنی، ح.، و موسوی، س. ف. (۱۳۷۷). "یک مدل ریاضی جهت برآورد مقدار رسوب‌گذاری در مخازن سدهای کوچک (فاقد آمار)." *م. آب و فاضلاب*، ۲۴، ۲۶-۲۹.
- 9- Meyer-Peter, E., and Muller, R. (1984). "Formulas for bed-load transport." *Proc. 3<sup>rd</sup> Meeting IAHR*, Stockholm, 39- 64
- 10- Einsten, H.A. (1950). *The bed – load function for sediment transportation in open channel flows*, Technical Bulletin, No 1026, USDA, Soil Conservation Servic, Washington D.C.
- 11- Habersack, H. M., and Laronne, J. B. (2002). "Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on Helly-Smith sampling in an alpine gravel bed rivers." *J. of Hyd. Eng.*, 128 (5), 484-499.
- 12- Parker, G., Klingeman, P. C., and Mclean, D. G. (1982). "Bed load and size distribution in paved gravel-bed stream." *J. of Hyd.Div.*, 108 (4), 544-571.
- 13- Sun, Z., and Donahue, J. (2000). "Statistically derived bed load formula for any fraction of non uniform sediment." *J. of Hyd. Eng.*, 126 (2), 105-111.
- 14- Cheng, N. S. (2002). "Exponential formula for bed load transport." *J. of Hyd. Eng.*, 128 (10), 942-946
- 15- Wilcock, P. R., Kenworthy, S. T., and Crowe, J. (2001). "Experimental study of the transport of mixed sand and gravel." *Water Resources Research*, 37 (12), 3349-3358.
- 16- Anderson, D. A., Tannehill, J. C., and Pletcher, R. H. (2006). *Computational fluid mechanics and heat transfer*, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw Hill, New York.
- 17- Krishnappan, B. G. (1983). *Modeling of unsteady flows in alluvial streams*, Hydraulics Division, National Water Research Institute, Burlington, Ontario.
- ۱۸- مرکز تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو. (۱۳۸۲). *پیش‌نویس دستورالعمل روشهای عملیات نمونه‌برداری رودخانه‌ها*، تهران.
- ۱۹- مهندسین مشاور آبگیر. (۱۳۸۲). *مطالعات مرحله اول نیروگاه برق آبی حصار و بدلان خوی*، جلد اول، معاونت عمرانی وزارت جهاد کشاورزی، تهران.
- 20- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*, 1<sup>st</sup> Ed., McGraw Hill, New York.
- ۲۱- حمزه‌پوری، ر. (۱۳۸۳). "ارزیابی بار رسوبی در رودخانه‌های با مواد بستری درشت دانه." *پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری، دانشگاه ارومیه*.