

## شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب معلق در قوس رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کارون)

عبدالرضا ظهیری

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان zahiri.areza@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۳

### چکیده

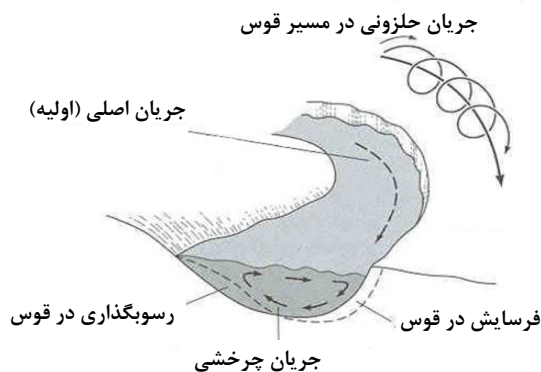
شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان و نیز غلظت رسوب معلق در قوس رودخانه‌ها، دارای اهمیت زیادی بوده و در حفاظت سواحل رودخانه، الگوی انتقال و ته‌نشست رسوبات، انتشار آلودگی و کنترل سیلاب کاربرد دارد. به دلیل ساختار سه‌بعدی جریان در قوس رودخانه‌ها، مدل‌های ریاضی یک‌بعدی در این شرایط جواب‌گو نبوده و باید از مدل‌های ریاضی دو یا سه‌بعدی استفاده نمود. در این تحقیق، ابتدا با اندازه‌گیری میدانی داده‌های توزیع عرضی سرعت و غلظت بار معلق از سه قوس واقع در رودخانه کارون (قوس‌های ملیحه، جنگیه و خبینه)، مدل شبه دو بعدی متوسط در عمق (Shiono and Knight, 1991) واسنجی شد. با استفاده از نتایج توزیع سرعت به دست آمده از این مدل ریاضی، ظرفیت انتقال رسوب رودخانه محاسبه شد. نتایج نشان داد که در هر سه قوس انتخاب شده، از میان روابط رسوبی مورد مطالعه، رابطه رسوبی یانگ مطابقت بهتری با مقادیر غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در عرض رودخانه داشته و نسبت به روابط رسوبی اکرز-وایت و انگلوند-هانسن، از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** روابط انتقال رسوب، رودخانه کارون، قوس رودخانه، مدل ریاضی شبه دو بعدی.

### مقدمه

کانال‌های سیلاب‌بر در قوس خارجی است. هم‌چنین افت انرژی در رودخانه‌های پیچان‌رود نسبت به رودخانه‌های مستقیم بیشتر است. علاوه بر موضوعات فوق، جنبه‌های مهمی از این رودخانه‌ها نیز دارای اهمیت می‌باشد. حل توزیع عرضی سرعت جریان و نیز توزیع عرضی رسوب معلق در قوس رودخانه‌ها می‌تواند به مدیریت مناسب طرح‌های حفاظت از سواحل رودخانه و نیز طراحی آبیگرهای جانبی کمک نماید. نحوه عملکرد جریان در محل قوس رودخانه‌ها به تفصیل در کتاب‌ها و مقالات معتبر ذکر شده است. جریان چرخشی در عرض رودخانه حاصل برآیند نیروهای گریز از مرکز و گرادیان فشار هیدرواستاتیک می‌باشد که در ترکیب با جریان اصلی رودخانه، جریان حلزونی یا ماریچی را در طول مسیر رودخانه ایجاد می‌کند. شکل (۱)، نمایش ساده‌ای از این عملکرد جریان را نشان می‌دهد.

مطالعه هیدرولیک جریان و رسوب معلق در رودخانه‌ها همواره مورد توجه محققین بوده است. با توجه به این که معمولاً هیچ رودخانه‌ای در یک مسیر طولانی دارای راستای مستقیم نیست، موضوع قوس رودخانه اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. در محل قوس، تغییرات عمق جریان، سرعت و تنش برشی در جهت عرض رودخانه شدید بوده و باعث ایجاد جریان حلزونی و فرسایش قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی می‌شود. رودخانه‌های پیچان‌رود همواره مورد توجه مهندسیین و محققین مختلف بوده و مطالعات زیادی در زمینه بررسی مکانیک جریان در قوس رودخانه، تغییرات زمانی خم رودخانه، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و تغییرات بستر رودخانه‌های پیچان‌رود انجام شده است (Da Silva, 2006). از مهم‌ترین دلایل این توجه، فرسایش قوس خارجی رودخانه و لزوم احداث تأسیسات آبیگری و نیز



شکل ۱- الگوی جریان ثانویه و جریان حلزونی (ماریچی) در قوس رودخانه

رو باز ارائه نمودند. هم‌چنین Knight و Tang (2009b) مدل خود را برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی در دشت‌های سیلابی اصلاح نمودند. Hu et al. (2010) مدل ریاضی شبه‌دوبعدی توزیع عرضی سرعت جریان و غلظت رسوب معلق در کانال‌های با مقطع مرکب را ارائه نموده و معادلات دیفرانسیل حاکم را به‌صورت تحلیلی حل نمودند. Yang et al. (2012) با ارائه یک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی در یک مقطع مرکب مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. Zahiri et al. (2012) با استفاده از حل عددی مدل شیونو و نایت به روش اجزاء محدود، توزیع عرضی سرعت و نیز رابطه دبی-اشل رودخانه میناب در استان هرمزگان را در شرایط سیلاب استخراج نمودند. Gholinejad et al. (2012) با استفاده از حل عددی شبه‌دوبعدی معادلات هیدرولیک جریان، توزیع عرضی سرعت در رودخانه گرگانرود در استان گلستان (ایستگاه آق‌قلا) را شبیه‌سازی نمودند.

در زمینه رودخانه‌های پیچان‌رود، مطالعات زیادی انجام شده است که اغلب از نرم‌افزارهای دوبعدی و یا کد نویسی استفاده شده است. در این زمینه مطالعات Kalkwijk و De Vriend (1980)، Duan (2004)، Crosato (2008) و Duan و Julien (2005) قابل اشاره است. Spooner و Shiono (2003)، یک مدل ریاضی دوبعدی تحلیلی برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب پیچان‌رود ارائه دادند. Rameshwaran و Shiono (2004) این مدل را به‌صورت عددی حل نمودند. Shiono et al. (2009) با مدل‌سازی فیزیکی چند قوس از رودخانه بلک‌واتر، رفتار هیدرودینامیکی و توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر آن را در چند درجه انحناء مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. Kordi et al. (2015) با ارائه یک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی برای تعیین توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب، آن را در مختصات منحنی‌الخط به‌صورت عددی حل نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردار است. Shiar Bahadori (2012) با حل عددی مدل ریاضی شیونو و نایت در یک قوس از رودخانه کاسکاسکیا، توزیع عرضی سرعت جریان را شبیه‌سازی نمود. نتایج این تحقیق در مقایسه با داده‌های صحرایی از دقت مناسبی برخوردار بوده است.

همان‌طور که اشاره شد، اغلب مطالعات محققین در زمینه رودخانه‌های پیچان‌رود یا به‌صورت آزمایشگاهی بوده و یا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، هیدرولیک جریان مدل‌سازی شده است. در این تحقیق، به کمک داده‌های سرعت و غلظت رسوب معلق برداشت شده از چند قوس رودخانه کارون، هیدرولیک جریان و رسوب در محل قوس با استفاده از حل عددی معادلات حاکم، مدل‌سازی شده است. برنامه‌نویسی حل عددی معادلات حاکم در محیط ++C انجام شده است.

با وجود مطالعات زیاد محققین در زمینه قوس رودخانه‌ها، تاکنون روش جامع و دقیقی برای تحلیل هیدرولیک جریان و رسوب معلق در قوس وجود ندارد. این مسئله علاوه بر ساختار پیچیده و سه‌بعدی جریان در قوس رودخانه‌ها به کمبود شدید داده‌های صحرایی در این زمینه نیز مرتبط است. به همین دلیل اغلب مطالعات در زمینه هیدرولیک جریان و رسوب در محل قوس به‌صورت آزمایشگاهی بوده است. به‌دلیل عرض کم کانال‌های آزمایشگاهی نسبت به عرض واقعی رودخانه‌ها، الگوی جریان‌های ثانویه در کانال‌ها و رودخانه‌ها، تا حدود زیادی متفاوت بوده و نتایج آزمایشگاهی نمی‌تواند تحلیل دقیقی از وضعیت جریان در قوس را ارائه نماید (Yalin and Da Silva, 2001) به همین دلیل، انجام مطالعات به داده‌های میدانی سرعت و غلظت رسوب در محل قوس رودخانه‌ها دارای اهمیت بوده و می‌تواند تا حدودی خلأ موجود را پوشش دهد.

Shiono و Knight (1988) مدلی شبه‌دوبعدی با حل تحلیلی را برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها و محاسبه توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق ارائه نمودند. این مدل ریاضی به شکل متوسط در عمق و از معادلات ناویر-استوکس استخراج شده است. اگرچه نتایج تحلیلی این مدل ریاضی در مقیاس آزمایشگاهی با موفقیت زیادی همراه بود اما در شرایط رودخانه‌ای و به‌ویژه برای رودخانه‌های نامنظم، کاربرد محدودی داشته است. برای اولین بار Knight et al. (1989) حل تحلیلی این مدل را برای یک رودخانه طبیعی کوچک با مقطع عرضی منظم (رودخانه سورن (Severn River) در انگلستان) مورد استفاده قرار داده و نتایج قابل قبولی به‌دست آوردند. Shiono و Knight (1991) با اعمال اثر جریان‌های ثانویه (Secondary Flow) در مدل قبلی، آن را اصلاح نمودند. اعمال جریان ثانویه در شرایط خاصی از قبیل وجود دشت‌های سیلابی و نیز وجود قوس در مسیر رودخانه (که علاوه بر سرعت اصلی در جهت جریان، سرعت در جهت عرض و قائم نیز مهم است)، دقت نتایج مدل را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. Ervine et al. (2000) مدلی شبه‌دوبعدی تحلیلی برای تحلیل هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها با مسیر مستقیم و پیچان‌رود ارائه نمودند. در این مطالعه نشان داده شد که اثر جریان‌های ثانویه در محل قوس رودخانه‌ها و مقاطع مرکب با مسیر پیچان‌رود حدود ۱۰ برابر مقدار متناظر آن در رودخانه‌های با مسیر مستقیم است. Abril و Knight (2004) با استفاده از حل عددی مدل ریاضی Shiono و Knight، روابط دبی-اشل رودخانه‌ها را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نمودند. Omran (2008) هیدرولیک جریان و رسوب کانال‌های روباز مستطیلی و با مسیر مستقیم را با یک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی، نشان‌دهنده کارایی این مدل بوده است. Knight و Tang (2009a) مدل عمومی شبه‌دوبعدی توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق را برای کانال‌های

باعث تغییر هیدرولیک جریان و مورفولوژی رودخانه می‌شوند. در بعضی از شرایط، این جریان‌ها حتی در رودخانه‌های با مسیر مستقیم نیز قابل توجه هستند.

برای مدل‌سازی و دخالت جریان‌های ثانویه، فرضیات مختلفی ارائه شده است. در ساده‌ترین فرض، Shiono و Knight (1991) اثر جریان ثانویه را در مقاطع مستقیم به صورت تابعی از مؤلفه وزن سیال در جهت جریان بیان نمودند:

$$\frac{\partial H(\rho \bar{U}\bar{V})_d}{\partial y} = \beta(\rho g S_0 H) \quad (3)$$

که  $\beta$ : ضریب جریان ثانویه بوده و مقدار آن برای مقطع اصلی رودخانه‌های مستقیم در شرایط غیرسیلابی، ۰/۰۵ توصیه شده است (Abril and Knight, 2004).

در تحقیق دیگری، Ervine et al. (2000) فرض نمودند که سرعت‌های  $\bar{U}$  و  $\bar{V}$  تابع سرعت متوسط در عمق  $u_d$  است:

$$U = k_1 u_d, V = k_2 u_d$$

$$\rightarrow \frac{\partial H(\rho \bar{U}\bar{V})_d}{\partial y} = \frac{\partial (H k u_d^2)}{\partial y} \quad (4)$$

که  $k_1, k_2$  و  $k$  ضرایب تناسب است. ضریب  $k$  تابع عمق جریان، ضریب زبری و درجه پیچان رودی رودخانه است. Ervine et al. (2000) محدوده این ضریب در مقطع اصلی رودخانه‌های پیچان‌رود را حدود ۵/۵-۱ درصد به‌دست آوردند. Kordi et al. (2015) روابط بدون بُعدی را برای دخالت اثر جریان‌های ثانویه در معادله دیفرانسیل (۱) ارائه نمودند. ایشان به این منظور، هر دو فرض Shiono و Knight (1991) و Ervine et al. (2000) را با هم ترکیب نموده و به صورت زیر به کار بردند:

$$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 = \beta(\rho g H S_0)$$

$$+ \left[ \frac{\partial (H k u_d^2)}{\partial y} + \frac{2}{r_{in} + y_{in}} H k u_d^2 \right] \quad (5)$$

که  $\Gamma$  بیانگر جمله جریان ثانویه و  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  به ترتیب عبارات فرض شده توسط Shiono و Knight (1991) و Ervine et al. (2000) برای جریان ثانویه است. این معادله برای رودخانه‌های مستقیم و پیچان‌رود قابل استفاده است.

Shiar Bahadori (2012) با استفاده از داده‌های توزیع عرضی سرعت در رودخانه‌های پیچان‌رود در دبی‌های مختلف جریان، روابط ساده‌ای را برای محاسبه دو ضریب  $\beta$  و  $k$  ارائه نمود. به این منظور، ابتدا مقطع عرضی رودخانه مطابق شکل (۳) به سه ناحیه تقسیم می‌شود. دو ناحیه یک و سه در قسمت سواحل جانبی رودخانه و به ترتیب در قوس‌های خارجی و داخلی در نظر گرفته می‌شوند. ناحیه دو نیز ناحیه مرکزی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مدل ریاضی شبه دوبعدی توزیع عرضی سرعت در رودخانه‌های پیچان‌رود

Spooner و Shiono (2003) با فرض جریان ماندگار و یکنواخت و با انتگرال‌گیری عمقی از معادله ناویر-استوکس، توزیع عرضی سرعت در مقاطع پیچان‌رود را به صورت زیر ارائه نمودند:

$$\rho g H S_0 - \left( 1 + \frac{y_{in}}{r_{in}} \right) \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}}$$

$$+ \left( 1 + \frac{y_{in}}{r_{in}} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \lambda H^2 \left( \frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right\}$$

$$+ \frac{2}{r_{in}} \left\{ \rho \lambda H^2 \left( \frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right\}$$

$$= \rho \left[ \left( 1 + \frac{y_{in}}{r_{in}} \right) \frac{\partial H(\bar{U}\bar{V})_d}{\partial y} + \frac{2H(\bar{U}\bar{V})_d}{r_{in}} \right] \quad (1)$$

که در این معادله  $\rho$ : جرم حجمی آب ( $kg/m^3$ ),  $g$ : شتاب ثقل ( $m/s^2$ ),  $H$ : عمق جریان ( $m$ ),  $S_0$ : شیب طولی بستر,  $f$ : ضریب اصطکاک دارسی- ویسباخ,  $u_d$ : سرعت متوسط در عمق ( $m/s$ ),  $s$ : شیب جانبی رودخانه,  $\lambda$ : ضریب بدون بعد لزجت جریان متلاطم و  $y$ : موقعیتی از عرض مقطع می‌باشد که سرعت در آن نقطه باید به‌دست آید. در معادله فوق  $r_{in}$ : شعاع داخلی قوس رودخانه و  $y_{in}$ : فاصله مقطع داخلی منحنی است (شکل ۲). به عبارت بهتر، برای هر مقطع عرضی از رودخانه در مسیر یک قوس، مقدار  $r_{in}$  ثابت است اما مقدار  $y_{in}$  متغیر بوده و نقش زاویه قوس یا مقطع موردنظر برای شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت را به عهده دارد. قابل ذکر است که رابطه فوق برای کلیه مسیرها (مستقیم و پیچان‌رود) قابل استفاده است. برای رودخانه‌های مستقیم،  $r_{in} = \infty$  یا  $y_{in} = 0$  می‌باشد که معادله کلی (۱) به معادله مشهور Shiono و Knight (1991) ساده می‌شود:

$$\rho g H S_0 - \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \lambda H^2 \left( \frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right\}$$

$$= \frac{\partial H(\rho \bar{U}\bar{V})_d}{\partial y} \quad (2)$$

عبارت سمت راست معادله‌های (۱) و (۲)، نماینده جریان‌های ثانویه است که اثر سرعت جریان در جهت عرضی ( $V$ ) را نشان می‌دهد. در این عبارت  $\bar{U}$  و  $\bar{V}$  به ترتیب سرعت‌های متوسط در طول زمان در جهت‌های طولی و عرضی رودخانه می‌باشند. در رودخانه‌های پیچان‌رود، جریان‌های ثانویه اهمیت زیادی داشته و

$$k_2 = 0.006 \left( R_r \frac{H}{L_2} \right) \quad (10)$$

ناحیه سه: در این ناحیه که در قوس داخلی رودخانه قرار دارد (فاصله انتهایی بستر تا لبه آب در ساحل داخلی)، مقدار  $\beta$  به صورت خطی از مقدار به دست آمده از رابطه (۸) برای نقطه  $c$  تا مقدار آن در نقطه  $d$  که از رابطه زیر محاسبه می‌شود، تغییر می‌کند:

$$\beta = 0.0266 \left[ S_i^{1.397} \left( \frac{y_d}{y_d + L_3} \right)^{21.19} R_r^{0.004} \right] \quad (11)$$

مقدار  $k$  در این ناحیه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_3 = 0.06 \left( R_r \frac{H}{L_3} \right) \quad (12)$$

#### روابط محاسبه دبی کل رسوب در رودخانه‌ها

علاوه بر سرعت و دبی جریان، غلظت و دبی رسوب نیز در بسیاری از طرح‌های مهندسی رودخانه و ساماندهی آن اهمیت زیادی دارند. دبی رسوب تابع دبی جریان بوده و با افزایش سرعت جریان به صورت توانی افزایش می‌یابد. به عبارت بهتر، یکی از مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر دبی رسوب، سرعت جریان است. اگر سرعت جریان با دقت مناسبی محاسبه شود، دبی رسوب و نیز حجم رسوبات انتقالی از یک ایستگاه هیدرومتری با دقت بهتری به دست خواهد آمد. به همین دلیل در این تحقیق از ایده جدیدی برای محاسبه دبی رسوب رودخانه‌ها استفاده شده است. در این ایده، بر اساس توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه و با استفاده از معادلات تجربی انتقال رسوب، توزیع دبی رسوب در عرض رودخانه محاسبه می‌شود. انتظار می‌رود با توجه به این که در این روش، سرعت جریان با دقت بهتری نسبت به مدل‌های یک‌بعدی (که سرعت را به صورت متوسط در کل مقطع در نظر می‌گیرند) به دست می‌آید، دقت نتایج محاسبات انتقال رسوب نیز افزایش یابد.

ناحیه یک: در این ناحیه که از ساحل خارجی رودخانه (نقطه  $a$ ) آغاز شده و تا ابتدای بستر رودخانه (نقطه  $b$ ) ادامه پیدا می‌کند، مقدار  $\beta$  در نقاط  $a$  و  $b$  به ترتیب از روابط (۶) و (۷) به دست می‌آیند. مقدار  $\beta$  در محدوده نقاط  $a$  تا  $b$  به صورت خطی تغییر می‌کند.

$$\beta = 0.0263 \left[ S_i^{1.377} \left( \frac{y_a}{y_a + L_1} \right)^{2.174} R_r^{6.312} \right] \quad (6)$$

$$\beta = 0.1234 \left[ S_i^{1.283} \left( \frac{y_b}{y_b + L_1} \right)^{6.595} R_r^{0.586} \right] \quad (7)$$

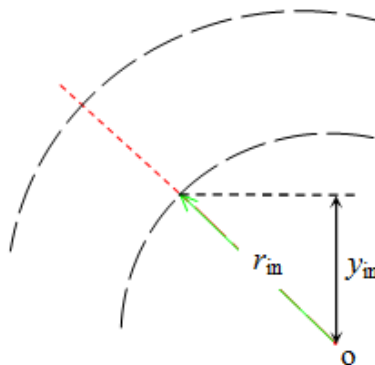
که  $S_i$ : درجه انحنای رودخانه (سینوسیته)،  $R_r$ : شعاع نسبی،  $L_1$ : عرض ناحیه یک (فاصله لبه آب در ساحل خارجی تا شروع بستر رودخانه) و  $y_a$  و  $y_b$  به ترتیب فاصله از مبدأ مختصات تا نقاط  $a$  و  $b$  می‌باشند. مقدار  $k$  در این ناحیه تابع شعاع نسبی، عمق آب و عرض ناحیه بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_1 = 0.012 \left( R_r \frac{H}{L_1} \right) \quad (8)$$

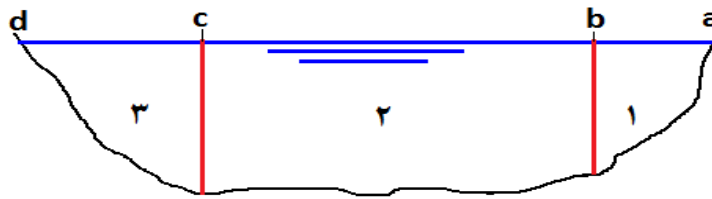
ناحیه دو: در این ناحیه که بخش مرکزی رودخانه را شامل می‌شود (عرض کف رودخانه)، مقدار  $\beta$  به صورت خطی از مقدار به دست آمده از رابطه (۷) برای نقطه  $b$  تا مقدار آن در نقطه  $c$  که از رابطه زیر محاسبه می‌شود، تغییر می‌کند:

$$\beta = 0.0174 \left[ S_i^{1.311} \left( \frac{y_c}{y_c + L_2} \right)^{6.409} R_r^{1.643} \right] \quad (9)$$

مقدار  $k$  در این ناحیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۲- نمایش پارامترهای مدل ریاضی اسپونر-شیونو در یک رودخانه پيچان‌رود



شکل ۳- تقسیم‌بندی مقطع عرضی رودخانه پیچان رود برای محاسبه ضرایب  $\beta$  و  $k$  (Shiar Bahadori, 2012)

جدول ۱- ضرایب روش اکرز- وایت

محدوده $d_{gr}$	ضرایب
$d_{gr} \geq 60$	$n = 0.0$
	$A = 0.17$
	$m = 1.78$
	$C = 0.025$
$1 \leq d_{gr} \leq 60$	$n = 1.0 - 0.56 \log d_{gr}$
	$A = 0.23 d_{gr}^{-0.5} + 0.14$
	$m = 6.83 d_{gr}^{-1} + 1.67$
	$\log C = -3.46 + 2.79 \log d_{gr} - 0.98 (\log d_{gr})^2$

رابطه رسوبی (Engelund and Hansen, 1967)

در این روش دبی کل رسوب ( $m^3/s$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید (Shafaei Bejestan, 2008):

$$Q_t = 0.05 Q \frac{G_s}{G_s - 1} \frac{VS_0}{\sqrt{(G_s - 1)gd_{50}}} \times \frac{RS_0}{(G_s - 1)d_{50}} \quad (16)$$

رابطه رسوبی (Yang, 1979)

Yang (1979) با فرض توان واحد جریان به عنوان مهم‌ترین فاکتور در تخمین ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه‌های آبرفتی، رابطه زیر را ارائه نمود (Karamisheva et al., 2006):

$$\log C_t = I + J \log \left( \frac{VS_0}{w} \right) \quad (17)$$

که  $C_t$  غلظت رسوب (ppm) و  $w$  سرعت سقوط ذرات ( $m/s$ ) است. در رابطه فوق، پارامترهای  $I$  و  $J$  بر اساس تعداد زیادی از داده‌های آزمایشگاهی و به کمک تحلیل رگرسیونی به صورت زیر به دست آمده‌اند:

$$I = 5.165 - 0.153 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0.297 \log \frac{u_*}{w} \quad (18)$$

رابطه رسوبی (Ackers and White, 1973)

روش اکرز- وایت بر اساس تحلیل ابعادی و بر مبنای جمع‌آوری ۱۰۰۰ داده آزمایشگاهی در شرایط جریان دارای عدد فرود کمتر از ۰/۸ بنا شده است. در این روش، دبی کل رسوب از رابطه زیر قابل محاسبه است (Shafaei Bejestan, 2008):

$$Q_t = QC \frac{d_{50}}{R} \left( \frac{V}{u_*} \right)^n \left( \frac{F_g}{A} - 1 \right)^m \quad (13)$$

که در آن  $Q_t$ : دبی کل رسوب،  $Q$ : دبی جریان،  $u_*$ : سرعت برشی،  $V$ : سرعت متوسط جریان،  $R$ : شعاع هیدرولیکی،  $d_{35}$ : قطری است که ۳۵ درصد ذرات از آن ریزتر هستند و  $F_g$ : عدد حرکت رسوب است. ضرایب  $n$ ،  $m$ ،  $A$  و  $C$  ضرایب روش اکرز- وایت است که از جدول (۱) تعیین می‌شوند. این ضرایب تابع  $d_{gr}$  می‌باشند (قطر بدون بُعد ذره) و از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$d_{gr} = d_{50} \left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (14)$$

که  $G_s$ : چگالی ویژه رسوب و  $V$ : لزجت سینماتیکی آب ( $m^2/s$ ) می‌باشد. مقدار پارامتر حرکت رسوب ( $F_g$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن،  $R$ : شعاع هیدرولیکی آبراهه می‌باشد:

$$F_g = \frac{u_*^n}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \times \left( \frac{V}{\sqrt{32 \log(10R/d_{50})}} \right)^{1-n} \quad (15)$$



ظهوری: شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب معلق در قوس...

عرضی سرعت جریان، هندسه مقطع عرضی رودخانه در محل قوس، دانه‌بندی رسوبات معلق رودخانه و مصالح کف و نیز توزیع غلظت عرضی رسوب معلق در چند دبی جریان برداشت و اندازه‌گیری شده‌اند. برای اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت از دستگاه مولینه (سرعت‌سنج) مدل OTT آلمانی و برای نمونه‌برداری بار رسوب از دستگاه نمونه‌بردار تجمعی رسوب مدل DH-48 استفاده شد. برای تعیین شیب طولی رودخانه تراز سطح آب در فواصلی حدود ۵۰ متر بالادست و پایین‌دست محل برداشت داده‌ها اندازه‌گیری شد. برای برداشت سرعت در عرض، رودخانه به حداقل ۱۰ بازه تقسیم شد. غلظت رسوب نیز در سه بازه (قوس خارجی، ناحیه میانی و قوس داخلی) اندازه‌گیری شد. قوس‌های در نظر گرفته شده برای این مطالعه عبارتند از: قوس روستای ملیحه یا ویس با مختصات GPS (۳۴۸۴۳۹۳، ۲۹۷۱۹۷)، قوس روستای جنگیه با مختصات (۳۴۵۸۲۱۹، ۲۷۴۵۴۸) و قوس روستای خینه یا بحور با مختصات (۳۴۵۲۱۵۹، ۲۶۵۶۳۲). در شکل‌های (۴) تا (۶) محدوده‌های مورد مطالعه در این تحقیق نشان داده شده است. در این شکل‌ها، محل مقطع عرضی مورد نظر برای عملیات اندازه‌گیری و نیز شعاع داخلی و خارجی قوس نیز مشخص شده است.

$$J = 1.780 - 0.360 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0.480 \log \frac{u_*}{w} \quad (19)$$

در کلیه روابط رسوبی فوق، برای محاسبه دبی کل رسوب، پارامتر سرعت یا دبی جریان نقش دارد. تاکنون در محاسبات رسوبی، از سرعت متوسط جریان یا دبی کل رودخانه استفاده شده است. در این تحقیق ابتدا مقطع عرضی رودخانه به چند بازه کوچک تقسیم شده و سپس توزیع عرضی سرعت محاسبه می‌شود. با استفاده از عمق جریان، سرعت جریان و سرعت برشی در هر بازه، دبی یا غلظت رسوب حمل شده در این بازه محاسبه و سپس از کل بازه‌ها در عرض رودخانه انترگرال‌گیری می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق سه قوس از میان قوس‌های رودخانه کارون در بالادست و پایین‌دست اهواز انتخاب شد. با توجه به این‌که معمولاً در محل قوس، ایستگاه هیدرومتری وجود ندارد، بنابراین برای واسنجی مدل ریاضی پیشنهادی در این تحقیق، داده‌های توزیع



شکل ۴- موقعیت قوس روستای ملیحه برای عملیات اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت و غلظت رسوب معلق



شکل ۵- موقعیت قوس روستای جنگیه برای عملیات اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت و غلظت رسوب معلق



شکل ۶- موقعیت قوس روستای بجزور برای عملیات اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت و غلظت رسوب معلق

استفاده قرار گرفته و توزیع عرضی سرعت در هر ناحیه و در نتیجه برای کل مقطع عرضی رودخانه به دست می‌آید. برای انجام این کار ابتدا مقداری برای ضریب زبری مانینگ بستر رودخانه فرض شده و مدل ریاضی اجرا می‌شود. با مقایسه نتایج توزیع عرضی سرعت به دست آمده و مقادیر اندازه‌گیری شده، ضریب زبری قابل اصلاح است. با انجام مراحل بهینه‌سازی، مقدار بهینه ضریب زبری مانینگ طوری به دست می‌آید که اختلاف بین مقادیر توزیع عرضی سرعت محاسباتی و مقادیر اندازه‌گیری شده به حداقل برسد.

با انجام این مراحل، ضریب زبری مانینگ بهینه برای قوس‌های ملیحه، جنگیه و خبینه به ترتیب حدود  $0.03$ ،  $0.0289$  و  $0.034$  به دست آمده است که با توجه به آبرفتی بودن بستر رودخانه کارون در محل این قوس‌ها، این اعداد منطقی است. همچنین با توجه به نتایج ضرایب زبری، مشخص می‌شود که در طول رودخانه کارون در مسیر جریان، ضریب زبری دارای روندی افزایشی است.

نتایج به دست آمده از این محاسبات در شکل‌های (۸) تا (۱۰) در مقایسه با توزیع سرعت واقعی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع عرضی سرعت جریان حاصل از مدل ریاضی مطابقت نسبتاً خوبی با مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده برای هر سه منطقه مورد مطالعه (هم در قوس خارجی و هم در قوس داخلی) دارد. مسئله مهم این است که این انطباق فقط با تنظیم ضریب زبری مانینگ ایجاد شده و نیازی به واسنجی معادلات مهم مدل ریاضی برای دخالت اثر جریان ثانویه در محل قوس (معادلات (۶) تا (۱۲)) نبوده است. دبی جریان واقعی و محاسباتی در قوس ملیحه به ترتیب  $200$  و  $213$  مترمکعب بر ثانیه به دست آمد که خطایی حدود  $6/2$  درصد را برای مدل ریاضی نشان می‌دهد. همچنین دبی جریان واقعی در قوس‌های جنگیه و خبینه به ترتیب  $319$  و  $329$  مترمکعب بر ثانیه و دبی‌های محاسباتی به دست آمده از مدل ریاضی به ترتیب حدود  $332$  و  $320$  مترمکعب می‌باشند که بیانگر خطایی به ترتیب معادل  $4/1$  و  $2/5$  درصد برای این دو قوس است.

نکته قابل اشاره این است که طبق نتایج اندازه‌گیری بار بستر رودخانه کارون در ایستگاه‌های اهواز و ملاثانی، درصد بار بستر نسبت به بار معلق در این ایستگاه‌ها حدود سه تا هفت درصد است که به طور کلی درصد ناچیزی است و می‌توان از بار بستر صرف‌نظر نمود. Saadati و Hosseini Zare (2005) به همین دلیل در این تحقیق، از روابط تجربی تعیین بار کل رسوب برای محاسبه بار معلق رودخانه کارون استفاده شده است.

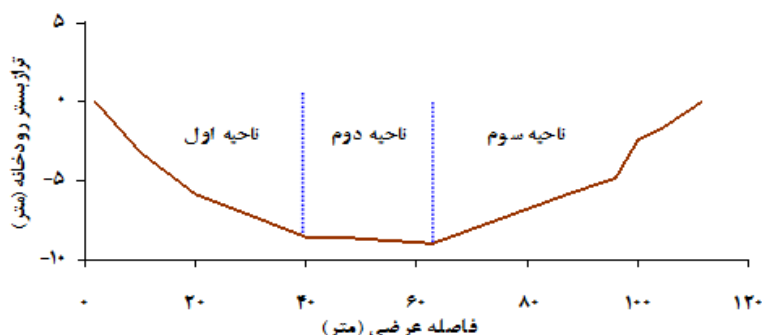
#### واسنجی مدل ریاضی توزیع عرضی سرعت

مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق (معادلات دیفرانسیلی (۱) و (۲) به همراه روابط (۵) تا (۱۲) و نیز تلفیق آن‌ها با روابط انتقال رسوب (۱۴) تا (۱۹)) به گونه‌ای ارائه و آماده شده است که برای واسنجی در رودخانه‌های با مسیر مستقیم و پیچان‌رود، فقط به تعیین ضریب زبری مانینگ بستر رودخانه نیاز است. این مسئله به‌ویژه برای رودخانه‌های پیچان‌رود دارای مزیت فراوانی است. بر این اساس در این تحقیق برای واسنجی مدل ریاضی پیشنهادی در قوس‌های مورد مطالعه، ابتدا مشخصات هندسی و هیدرولیکی این قوس‌ها استخراج شد. با بازدیدهای متعدد از محل اندازه‌گیری و نیز بررسی محل قوس در نرم‌افزار Google Earth، شعاع داخلی قوس ملیحه  $572$  متر، شعاع خارجی  $595$  متر، شیب طولی رودخانه حدود  $0.0018$ ، درجه انحنای مسیر (سینوسیستی) حدود  $1/34$  و عرض رودخانه در محل قوس حدود  $97$  متر به دست آمد. برای قوس جنگیه، شعاع داخلی و خارجی به ترتیب  $555$  و  $747$  متر و درجه انحنای آن (سینوسیستی) حدود  $2/33$  به دست آمده است. این میزان درجه انحنای بیانگر تند بودن قوس در این محل دارد. این مقادیر برای قوس خبینه به ترتیب  $607$  متر،  $663$  متر و  $1/56$  به دست آمده است.

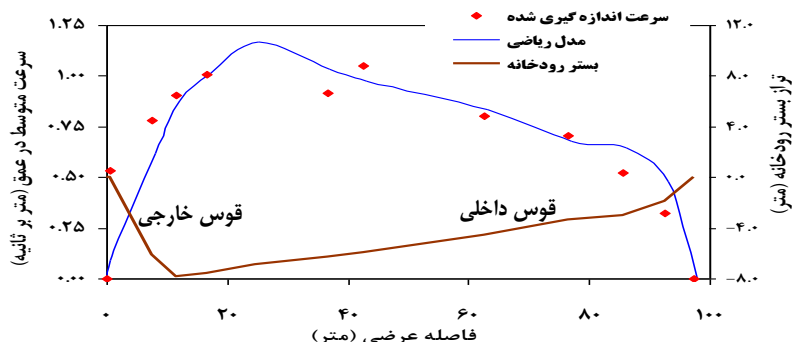
با استفاده از داده‌های ورودی فوق و نیز تقسیم مقطع عرضی رودخانه به سه ناحیه ساحل خارجی، بخش میانی و ساحل داخلی در محل قوس (مطابق شکل (۷) برای قوس خبینه)، مدل ریاضی همراه با معادلات این ناحیه‌ها با همان ضرایب و نماها مورد

است (Shiono and Muto, 1998; Ervine et al., 2000; Patra et al., 2004) این شرایط، امکان وقوع سرعت های حداکثر در قوس داخلی نیز وجود دارد. البته موقعیت و محل برداشت داده ها در قوس رودخانه نیز مهم است به طوری که در ابتدای قوس معمولاً سرعت های حداکثر در قوس داخلی ایجاد شده و در طول مسیر و رسیدن به مرکز قوس و توسعه جریان های ثانویه، این روند معکوس شده و سرعت های حداکثر در قوس خارجی ظاهر می شوند.

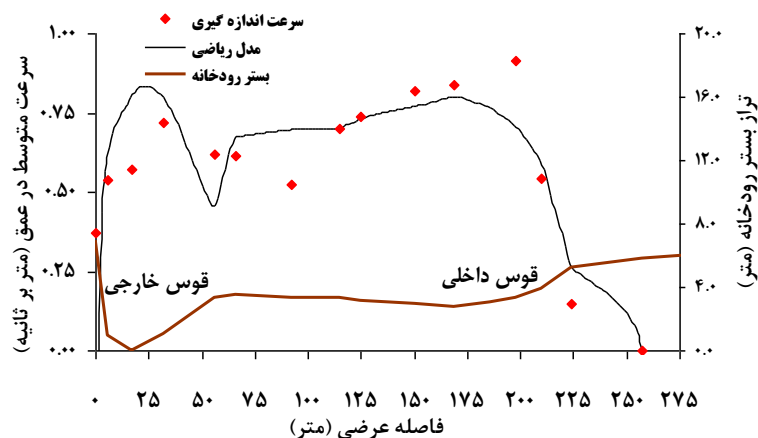
همان طور که در شکل (۸) مشاهده می شود سرعت های حداکثر جریان اندازه گیری شده در قوس خارجی افتاده است، این در حالی است که در شکل (۹) (قوس جنگیه) مقادیر حداکثر سرعت جریان مشاهداتی غالباً متمایل به قوس داخلی است. این مسئله احتمالاً مرتبط با مکانیسم هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب پیچان رود است که قوس جنگیه به دلیل هندسه خاص خود مشابه یک مقطع مرکب عمل نموده است. این مسئله به اثر متقابل یا اندرکنش جریان ثانویه (نیروی گریز از مرکز) و انتقال مومنوم جریان از مقطع اصلی به دشت سیلابی نسبت داده شده



شکل ۷- نحوه تقسیم بندی مقطع عرضی رودخانه کارون در محل قوس خزینه به سه ناحیه مختلف



شکل ۸- مقایسه نتایج مدل ریاضی و مقادیر واقعی توزیع عرضی سرعت در قوس مجاور روستای ملیحه

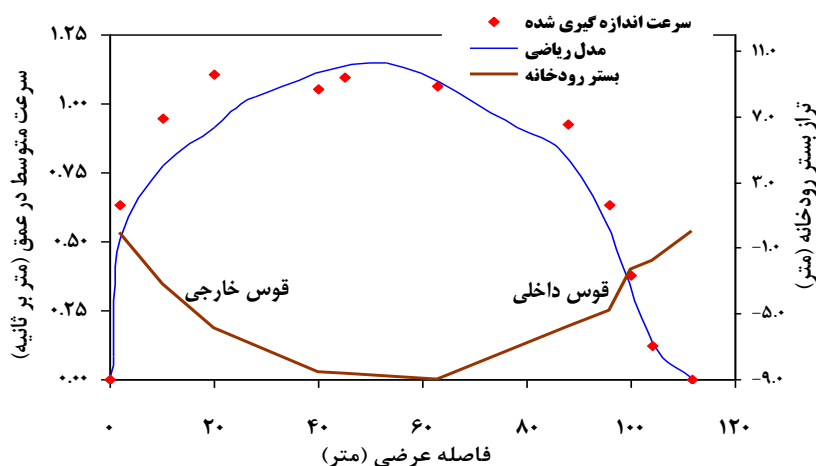


شکل ۹- مقایسه نتایج مدل ریاضی و مقادیر واقعی توزیع عرضی سرعت در قوس جنگیه

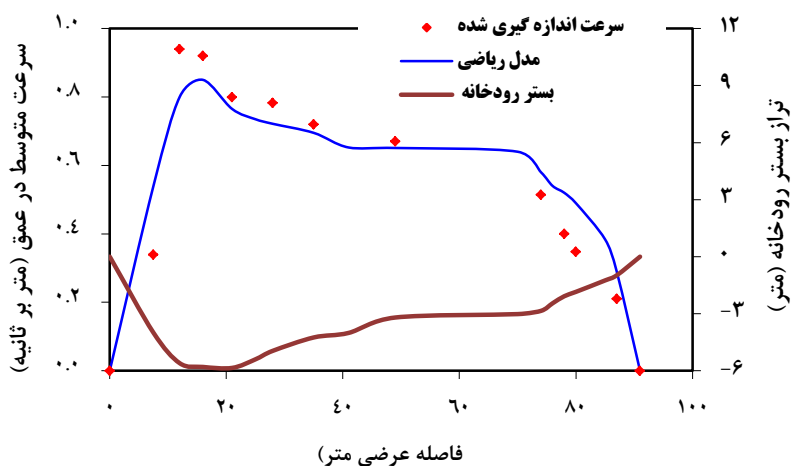


دبی‌های جریان اندازه‌گیری شده و محاسباتی به ترتیب حدود ۱۰۶ و ۱۱۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشند که بیانگر خطایی حدود ۶/۵ درصد برای مدل ریاضی است. البته تعمیم این مسئله برای تمامی شرایط جریان نمی‌تواند صحیح باشد. دلیل این مسئله این است که ضریب زبری در رودخانه‌ها به ویژه برای رودخانه‌های عمیق و دارای پوشش گیاهی معمولاً تابعی از عمق جریان است اما در این پژوهش به دلیل عدم دسترسی به داده‌های هیدرولیکی مناسب از قوس‌های رودخانه کارون، از یک مقدار ثابت برای ضریب زبری مانینگ استفاده شده است.

نکته مهم دیگر این است که ضریب زبری مانینگ به دست آمده در مرحله واسنجی باید برای شرایط دیگر جریان نیز تا حدود زیادی اعتبار داشته باشد. برای نشان دادن این مسئله، نتایج شبیه‌سازی توزیع سرعت در یک مقطع عرضی جدید از رودخانه کارون در محل قوس ملیحه در شکل (۱۱) ارائه شده است. برای مدل‌سازی توزیع عرضی در این دو مقطع، از مقدار ضریب زبری مانینگ به دست آمده از مرحله واسنجی (حدود ۰/۰۲۸۹) استفاده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج محاسباتی با مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده مطابقت نسبتاً خوبی دارند. در این مرحله



شکل ۱۰- مقایسه نتایج مدل ریاضی و مقادیر واقعی توزیع عرضی سرعت در قوس خبینه



شکل ۱۱- ارزیابی دقت مدل ریاضی در شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت رودخانه در محل قوس ملیحه (مرحله صحت‌سنجی)

## انتقال رسوب در محل قوس رودخانه

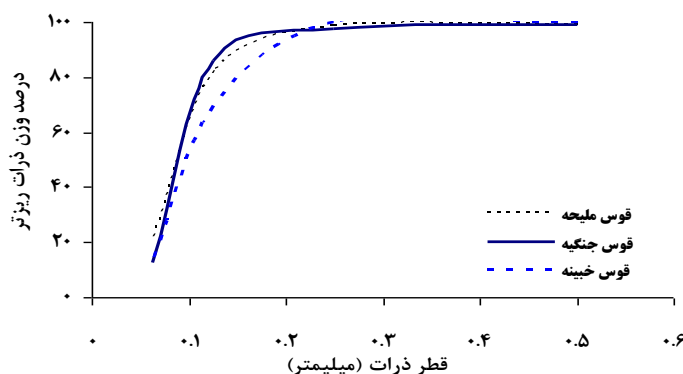
در این تحقیق، علاوه بر اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت جریان در سه قوس از رودخانه کارون، توزیع غلظت رسوب معلق و نیز دانه‌بندی مصالح بستر در این سه قوس نیز اندازه‌گیری شده است. با توجه به کمبود داده‌های صحرایی در محل قوس، انجام این اندازه‌گیری‌ها بسیار ارزشمند و مفید است.

برای بررسی کارایی روش‌های تجربی انتقال رسوب در محل قوس رودخانه‌ها، سه رابطه تجربی اکرز-وایت، انگلوند-هانسن و یانگ برای سه قوس از رودخانه کارون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به این منظور ابتدا منحنی دانه‌بندی مصالح بستر رودخانه در محل این سه قوس باید مشخص شود. در شکل (۱۲) این منحنی‌ها ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً رودخانه کارون در طول مسیر خود از ایستگاه ملاثانی تا فارسیات دارای مصالح بستر یکنواختی است. بر اساس این شکل، اندازه قطر میانه مصالح بستر ( $d_{50}$ ) در قوس‌های ملیحه، جنگیه و خبینه حدود ۰/۱ میلی‌متر و اندازه  $d_{75}$  نیز ۰/۰۹ میلی‌متر می‌باشد. با مشخص شدن دانه‌بندی مصالح بستر و نیز معلوم بودن شیب طولی رودخانه در محل قوس، هندسه مقطع عرضی رودخانه، عمق یا تراز سطح آب و همچنین توزیع عرضی سرعت محاسباتی، حال می‌توان توزیع عرضی غلظت رسوب معلق در رودخانه و در نتیجه دبی کل رسوب را برآورد نمود.

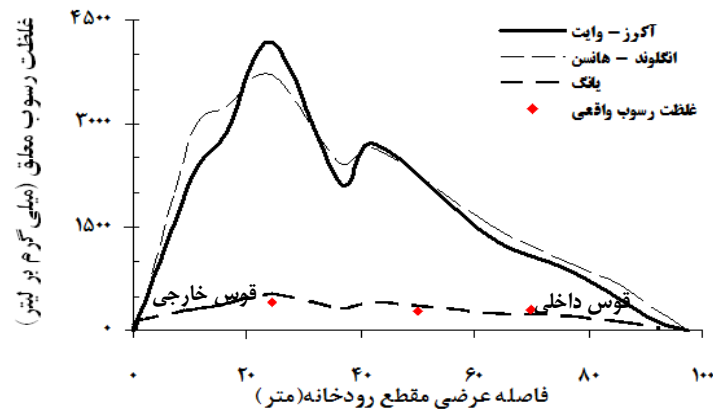
در شکل (۱۳) نتایج توزیع عرضی غلظت رسوب معلق محاسباتی (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر یا ppm) به‌دست آمده از مدل ریاضی برای سه روش تجربی انتقال رسوب اکرز-وایت، انگلوند-هانسن و یانگ در رودخانه کارون در محل قوس ملیحه نشان داده شده است. در این شکل مقادیر اندازه‌گیری شده نیز ارائه شده است. با مقایسه نتایج محاسباتی و مقادیر اندازه‌گیری شده مشخص می‌شود که از میان سه روش تجربی انتقال رسوب مورد استفاده، رابطه یانگ انطباق بسیار خوبی با مقادیر واقعی غلظت رسوب معلق در عرض رودخانه دارد. روش‌های اکرز-وایت و نیز انگلوند-هانسن دارای برآوردهایی بسیار بزرگتر از مقادیر واقعی (تا بیش از ۱۰ برابر) می‌باشند. این نتیجه با نتایج محاسبات رسوب ارائه شده برای ایستگاه ملاثانی نیز هم‌خوانی بسیار خوبی

دارد. در این ایستگاه مشخص شده بود که به ازاء دبی‌های جریان پایین (غیرسیلابی یا کمتر از حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه)، رابطه یانگ کارایی مناسبی داشته و روابط اکرز-وایت و انگلوند-هانسن برآورد بالاتری دارند. یکی از دلایل عدم کارایی معادلات مشهوری مثل اکرز-وایت و انگلوند-هانسن در قوس‌های مورد مطالعه، ریزدانه بودن رسوب انتقالی و نیز بستر رودخانه در محل قوس است. با توجه به کارآمد بودن معادلات اکرز-وایت و انگلوند-هانسن در شرایط رودخانه‌های ماسه‌ای، عدم کارایی این معادلات در این قوس‌ها منطقی و محتمل به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، رابطه رسوبی یانگ معمولاً برای ذرات ریزدانه کارایی بیشتری دارد که همین مسئله در محاسبات این مقاله نیز اتفاق افتاده است. به‌طور کلی روابط یانگ و به ویژه روابط جدیدتر این محقق برای رودخانه‌هایی که بار شسته در آنها قابل توجه است (مثل رودخانه کارون) کارایی بیشتری دارند. نکته دیگر این است که با توجه به اینکه پایه و اساس رابطه رسوبی یانگ، قدرت یکه جریان است و در این نظریه، انتقال هر ذره رسوب مستقیماً متناسب با سرعت ذره است، احتمالاً به همین دلیل این رابطه از دقت بیشتری در محاسبات این مقاله که با همین رویکرد به قضیه پرداخته است (یعنی تمام ذرات رسوبی با یک سرعت یکسان منتقل نمی‌شوند بلکه هر ذره رسوب با یک سرعت منتقل می‌شود) برخوردار بوده است.

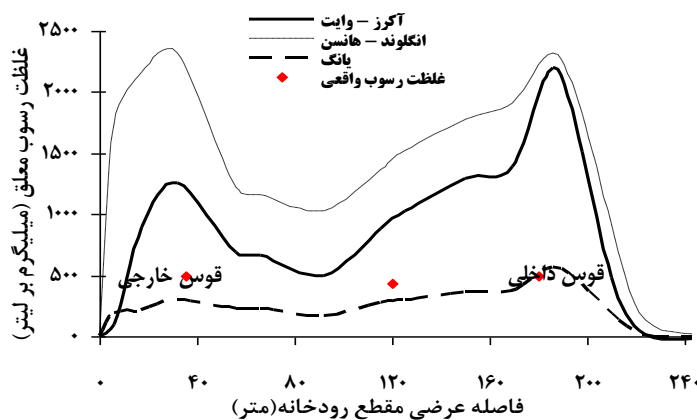
همین محاسبات برای قوس‌های جنگیه و خبینه به‌ترتیب در حوالی ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز و فارسیات در رودخانه کارون نیز انجام شده است. نتایج توزیع عرضی غلظت رسوب به‌دست آمده از مدل ریاضی در این دو قوس به‌ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت رسوب نیز در این دو شکل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر دو قوس از رودخانه کارون، رابطه یانگ مطابقت بسیار خوبی با مقادیر غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در عرض رودخانه داشته و نسبت به روابط اکرز-وایت و انگلوند-هانسن، از دقت بسیار بالاتری برخوردار می‌باشد. دقت این رابطه در قوس خبینه نسبت به قوس جنگیه بهتر است.



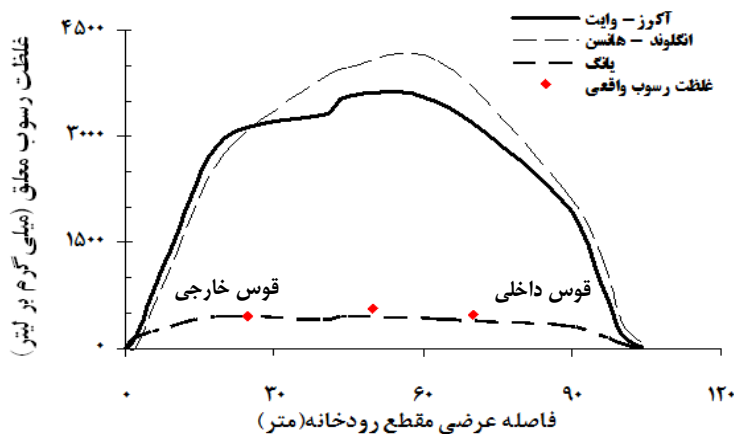
شکل ۱۲- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر رودخانه کارون در محل قوس‌های ملیحه، جنگیه و خبینه



شکل ۱۳- مقایسه توزیع عرضی غلظت رسوب معلق اندازه‌گیری شده و محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (قوس ملیحه)



شکل ۱۴- مقایسه توزیع عرضی غلظت رسوب معلق اندازه‌گیری شده و محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (قوس جنگیه)



شکل ۱۵- مقایسه توزیع عرضی غلظت رسوب معلق اندازه‌گیری شده و محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (قوس خبینه)

بوده است که به همین دلیل قدرت جریان ثانویه کاهش یافته است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای شبیه‌سازی سرعت جریان و غلظت رسوبات معلق در چند قوس از رودخانه کارون از مدل ریاضی شبه دوعبده Shiono و Knight (1991) استفاده شده است.

نکته مهم در نمودارهای فوق این است که توزیع عرضی غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در هر سه قوس بر خلاف توزیع عرضی سرعت تقریباً یکنواخت است و این مسئله نشان می‌دهد که احتمالاً حساسیت غلظت رسوب به پدیده جریان ثانویه در قوس رودخانه‌ها کمتر از سرعت جریان است. البته دبی جریان رودخانه در زمان اندازه‌گیری تا حدود زیادی کمتر از دبی سیلابی

رابطه رسوبی یانگ انطباق مناسبی با مقادیر مشاهداتی غلظت رسوب دارد. هم‌چنین مشخص شد که روابط رسوبی اکوز-وایت و انگلوند-هانسن، جواب‌های بسیار بالاتری نسبت به واقعیت ارائه می‌کنند. با انتگرال‌گیری عرضی از نتایج توزیع غلظت رسوب در عرض رودخانه، بار کل رسوب رودخانه به ازاء دبی‌های جریان اندازه‌گیری شده محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده از رابطه یانگ برای سه قوس ملیحه، جنگیه و خبینه به ترتیب ۱۳۵۰۰، ۱۶۰۰۰ و ۲۳۵۰۰ تن بر روز به دست آمده است. مقادیر اندازه‌گیری شده در این سه قوس به ترتیب حدود ۱۲۰۲۳، ۲۶۵۰۰ و ۲۸۵۰۰ تن بر روز می‌باشد.

نتایج واسنجی هیدرولیکی این مدل ریاضی نشان داد که برای مدل‌سازی توزیع عرضی سرعت در قوس رودخانه، انتخاب یک ضریب زبری مانینگ کافی است. این مسئله یکی از مهم‌ترین مزیت‌های مدل ریاضی پیشنهادی است. برای قوس‌های ملیحه، جنگیه و خبینه، ضریب زبری مانینگ بهینه به ترتیب حدود ۰/۰۲۸۹، ۰/۰۳ و ۰/۰۳۴ به دست آمد. با تلفیق نتایج توزیع عرضی سرعت به دست آمده از مدل ریاضی و معادلات تجربی انتقال رسوب، توزیع غلظت رسوب در عرض رودخانه در محل قوس به دست آمد. نتایج مقایسه ظرفیت انتقال رسوب محاسباتی و مقادیر حمل رسوب اندازه‌گیری شده از محل قوس نشان داد که

### منابع

- 1- Abril, J.B. and Knight, D.W., 2004. Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), pp.616-629.
- 2- Ackers, P. and White, W.R., 1973. Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 99(hy11), pp. 2041-2060.
- 3- Crosato, A., 2008. *Analysis and modelling of river meandering* (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).
- 4- Da Silva, A.M.F., 2006. On why and how do rivers meander? *Journal of Hydraulic Research*, 44(5), pp.579-590.
- 5- Duan, J.G. and Julien, P.Y., 2005. Numerical simulation of the inception of channel meandering. *Earth surface processes and landforms*, 30(9), pp.1093-1110.
- 6- Duan, J.G., 2004. Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), pp.964-976.
- 7- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R.H., 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), pp.653-669.
- 8- Engelund, F. and Hansen, E., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Technical University of Denmark Ostervoldgade 10, Copenhagen*.
- 9- Gholinejad, J., Zahiri, A. and Dehghani, A., 2012. One and quasi two dimensional simulation of flood flows in rivers (Case Study: Gorganrood River at Aq-qalla hydrometric station). *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(4), pp. 103-119. (In Persian).
- 10- Hosseini Zare, N., and Saadati, N. 2005. Estimation of erosion and sedimentation using sediment data and computation of suspended sediment load in Khozestan province's river basins. *In 3<sup>rd</sup> Natinal Conference on Erosion and Sedimentation, Tehran*. (In Persian)
- 11- Hu, C., Ji, Z. and Guo, Q., 2010. Flow movement and sediment transport in compound channels. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), pp.23-32.
- 12- Kalkwijk, J.T. and De Vriend, H.J., 1980. Computation of the flow in shallow river bends. *Journal of Hydraulic Research*, 18(4), pp.327-342.
- 13- Karamisheva, R.D., Lyness, J.F., Myers, W.R.C., Cassells, J.B.C., & O'Sullivan, J. 2006. Sediment transport formulae for compound channel flows. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 159(3): 183-193.

- 14- Knight, D.W., Shiono, K. and Pirt, J., 1989. Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. *International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters, Gower Technical, University of Bradford, UK.*
- 15- Kordi, H., Amini, R., Zahiri, A. and Kordi, E., 2015. Improved Shiono and Knight method for overflow modeling. *Journal of Hydrologic Engineering, 20(12)*, p.04015041.
- 16- Omran, M., 2008. New developments in predicting stage–discharge curves, velocity and boundary shear stress distributions in open channel flow. *Water and Environment Journal, 22(2)*, pp.131-136.
- 17- Patra, K.C., Kar, S.K. and Bhattacharya, A.K., 2004. Flow and velocity distribution in meandering compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering, 130(5)*, pp.398-411.
- 18- Rameshwaran, P. and Shiono, K., 2004. Modelling of overbank flow structures in meandering channels. *Maritime Engineering Journal, 156(3)*, pp.225-233.
- 19- Shafaei Bejestan, M., 2008. Hydraulics of sediment transport. Shahid Chamran University Publishing Ltd. (In Persian)
- 20- Shiar Bahadori, H., 2012. Numerical simulation of lateral velocity distribution in river bends. MSc. Thesis, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
- 21- Shiono, K. and Knight, D.W., 1988. Two-dimensional analytical solution for a compound channel. In *3rd International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Nippon Toshi Center, Tokyo, Japan.
- 22- Shiono, K. and Knight, D.W., 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics, 222*, pp.617-646.
- 23- Shiono, K. and Muto, Y., 1998. Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow. *Journal of Fluid Mechanics, 376*, pp.221-261.
- 24- Shiono, K., Chan, T.L., Spooner, J., Rameshwaran, P. and Chandler, J.H., 2009. The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part I. *Journal of Hydraulic Research, 47(1)*, pp.5-19.
- 25- Spooner, J. and Shiono, K., 2003, September. Modelling of meandering channels for overbank flow. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering, 156(3)*, pp. 225-233). Thomas Telford Ltd.
- 26- Tang, X. and Knight, D.W., 2009a. Analytical models for velocity distributions in open channel flows. *Journal of Hydraulic Research, 47(4)*, pp.418-428.
- 27- Tang, X. and Knight, D.W., 2009b. Lateral distributions of streamwise velocity in compound channels with partially vegetated floodplains. *Science in China Series E: Technological Sciences, 52(11)*, pp.3357-3362.
- 28- Yalin, M.S., & da Silva, A.M.F. 2001. Fluvial Processes- Solutions Manual. Supplement to the IAHR Monograph Fluvial Processes. IAHR, Delft, The Netherlands, 197 pp.
- 29- Yang, K., Nie, R., Liu, X. and Cao, S., 2012. Modeling depth-averaged velocity and boundary shear stress in rectangular compound channels with secondary flows. *Journal of Hydraulic Engineering, 139(1)*, pp.76-83.
- 30- Yang, C.T., 1979. Unit stream power equations for total load. *Journal of Hydrology, 40(1-2)*, pp.123-138.



- 31-Zahiri, A., Abdolmajidi, H., Ghorbani Koochi Kheili, S. and Dehghani, A. 2012. Simulation of lateral velocity distribution in rivers using Finite Elements Method (Case study: Berentine hydrometric station in Minab River). *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(2): pp. 63-80.(In Persian).