

## شبیه سازی عددی میدان جریان غیر دائم و انتقال رسوب غیر تعادلی در قوس رودخانه (مطالعه موردی رودخانه ی کارون)

محسن مغربی<sup>۱\*</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۲</sup>

### چکیده

جریان سیال و انتقال رسوب در رودخانه ها یک پدیده ۳ بعدی می باشد. هرچند که شبیه سازی ۳ بعدی پدیده ها از اطمینان بیش تری بر خوردار است، اما مدل های ۳ بعدی زمان بر است، لذا مدل های ۱ بعدی و ۲ بعدی با ساده سازی هایی مثل متوسط گیری در عرض و یا متوسط گیری در عمق مورد توجه قرار گرفته است تا ضمن حصول دقت مناسب از حجم محاسبات لازم برای رسیدن به جواب نهایی کاسته شود. در این مقاله؛ الگوی جریان و انتقال رسوب غیر یکنواخت در دو قوس ۱۸۰ درجه تند در رودخانه کارون به صورت دو بعدی متوسط گیری شده در عمق در حالت غیر تعادلی حد فاصل سال های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ مدل سازی شده است. حل معادلات به روش المان محدود پیشرفته و بر مبنای قابلیت های مدل CCHE2D انجام گرفته و برای مدلسازی آشفستگی از مدل  $k - \epsilon$  استفاده شده است. نتایج خروجی از مدل نشان می دهد که مدل CCHE2D توانسته است به درستی الگوی جریان و تغییرات بستر در این بازه از رودخانه ی کارون را شبیه سازی نماید. شبیه سازی الگوی جریان در بازه ی زمانی سال های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ نشان می دهد که بیشینه سرعت در خروجی قوس ابتدایی و انتهایی به مقدار ۱،۰۳ متر بر ثانیه ناشی از کاهش مقطع عرضی رودخانه می باشد. همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی انتقال رسوب نشان می دهد که روش فن رایین (۱۹۸۴) برای تعیین طول تطبیق بار بستر و روش وی (۱۹۹۹) برای تعیین فاکتور تطبیق بار معلق دارای بهترین نتایج در شبیه سازی انتقال رسوب در بازه ی مورد بررسی می باشد. الگوی رسوب گذاری در ناحیه ی مورد بررسی شامل ، رسوب گذاری در کرانه داخلی قوس اول و دوم می باشد که این امر با توجه به اثر ترکیبی جریان اصلی و جریان حلزونی قابل توجه می باشد. همچنین در حد فاصل دو قوس نیز شاهد افزایش تراز در کرانه های داخلی می باشیم که این امر به علت واگرایی خطوط جریان در خط القعر می باشد. به طور کلی الگوی رسوب گذاری پیش بینی شده در ناحیه ی مورد بررسی می بایستی باعث مهاجرت رودخانه به سمت چپ در پلان گردد که این روند مهاجرتی با عکس های ماهواره ای همخوانی دارد. میانگین خطای مدل سازی در پیش بینی تغییرات بستر بین ۱۱،۰۴ الی ۶۸،۰۷ درصد می باشد .

**کلمات کلیدی:** الگوی جریان در خم، رودخانه کارون، مدل عددی CCHE2D، انتقال رسوب غیر تعادلی

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل دوره دکتری مهندسی منابع آب و محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استاد سازه های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت مدرس

\* نویسنده مسول مقاله: maghrebi.mohsen@ut.ac.ir، تلفن: ۰۹۱۵۳۰۲۴۷۶۰

## مقدمه

با پیشرفت های اخیر در علوم رایانه، مدل های عددی به منظور شبیه سازی رفتار طبیعی رودخانه ها با هدف شناخت بهتر فرآیند های رودخانه ای شامل میدان جریان، انتقال رسوبات و تغییرات بستر لازم می باشد (Sun 2015). در این مقاله برای بررسی کارایی مدل عددی CCHE2D در پیش بینی تغییرات رودخانه به بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در رودخانه کارون حد فاصل سال های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ پرداخته می شود. در نهایت نتایج خروجی حاصل از مدل با داده های واقعی در بخش شبیه سازی هیدرودینامیکی و انتقال رسوبات در رودخانه ی کارون مقایسه می شود.

## معرفی بازه ی مورد بررسی

بازه ی مورد نظر در مختصات جغرافیایی جهانی (۲۹۴۹۷۲،۳۴۸۵۷۰۱) و (۲۹۲۲۸۹،۳۴۸۴۳۴۰) و به طول ۵/۲ کیلومتر و شیب متوسط ۰/۰۰۴۸ در شمال اهواز قرار دارد. عرض متوسط رودخانه در بازه ی مورد بررسی ۲۵۳/۹۳ متر با بیشینه ۳۵۳/۷ و کمینه ۱۳۹/۹ متر می باشد. در محدوده ی مورد بررسی رودخانه دارای دو قوس ۱۸۰ درجه تند با شعاع های ۳۹۰/۳۵ و ۱۹۵/۰۶ متر و نسبت  $\frac{R_c}{B}$  به ترتیب برابر با ۲/۲ و ۱/۹ می باشد.

## معرفی نرم افزار CCHE2D

CCHE2D یک مدل دو بعدی برای شبیه سازی جریان غیر دائم در حالت آشفته همراه با انتقال رسوب می باشد. این مدل برای انفصال معادلات دیفرانسیل از روش المان محدود و برای ترم میدان سرعت و فشار از شبکه های جابجا شده و برای حل جابجایی از روش آپویند استفاده می نماید (فتحی، ۲۰۱۳). برای حل سیستم معادلات حاکم جبری از روش تصحیح سرعت استفاده می شود و شبیه سازی الگوی جریان غیر پایدار توسط طرح پیشروی زمانی انجام می شود. فرم صریح معادلات پیوستگی و مومنتوم گسسته شده به صورت روابط (۱) الی (۳) می باشد.

$$Z^{n+1} = \Delta t.Q^n + \Delta t.FS^n \quad (1)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t.C_u^n + \Delta t.FM_u^n \quad (2)$$

جریان در قوس رودخانه های طبیعی جریانی آشفته و بسیار پیچیده می باشد که بر نحوه ی فرسایش و رسوبگذاری تاثیر گذاشته و توپوگرافی نامنظمی را موجب می شود؛ بطوریکه فرسایش در قوس خارجی و رسوب گذاری در قوس داخلی صورت می گیرد (Jackson, 1975; Yen and Lee, 1995). از جمله مشخصات بارز جریان در قوس ها وجود جریان حلزونی بوده که از اندر کنش جریان ثانویه و جریان اصلی بوجود می آید (اقبال زاده، ۱۳۸۰، Clayton, 2010, Knack 2018). جریان حلزونی نقش مهمی در مسیر انتقال رسوب و تغییرات مورفولوژی رودخانه ایفا می کند و بر روی جنبه های کاربردی رودخانه از منظر کنترل فرسایش، کشتیرانی و آبگیر های جانبی موثر می باشد (Pradhan ۲۰۱۸). به طور کلی تحقیقات گسترده ای بر روی الگوی جریان در خم در آزمایشگاه انجام گرفته است (دهقانی، ۱۳۸۴ و سلاجقه، ۱۳۸۴ و Sun 2015) به عنوان مثال بلانکارت و گراف (۲۰۰۱) در یک قوس ۱۲۰ درجه ملایم به بررسی الگوی جریان و آشفته گی پرداختند آن ها طی بررسی الگوی جریان در مقطع ۶۰ درجه دریافتند، یک جریان چرخشی تحت عنوان سلول چرخشی مرکزی وجود دارد و علاوه بر آن یک جریان چرخشی دیگر در خلاف جهت این جریان در نزدیکی قوس خارجی وجود دارد (بلانکارت و گراف، ۲۰۰۱). این محققین بر اساس بررسی تنش های برشی رینولدز به این نتیجه رسیدند که عدم همگنی تنش های قائم رینولدز داخل مقطع باعث ایجاد سلول چرخشی دوم در کنار جداره خارجی می شود. آنها همچنین اظهار نموده اند که جریان ثانویه دوم عاملی برای جلوگیری از فرسایش قوس بیرونی می باشد و دلیل آنرا وقوع حداکثر سرعت در مرز بین دو سلول و دور از جداره خارجی عنوان کرده اند. اکثر کارهای تحقیقاتی در شرایط آزمایشگاهی و اغلب با یک قوس مشخص رودخانه ای، در حالت دائم و با اعمال یک قطر دانه بندی مشخص انجام گرفته است در حالی که در رودخانه های طبیعی شاهد تفاوت مقدار فرسایش و رسوب گذاری و ثابت نبودن قطر ذرات به همراه تغییرات عرض رودخانه در طول قوس در انتقال رسوبات و مهاجرت جانبی می باشیم (مغربی، ۱۳۸۸).

با انتگرال گیری از معادله ی پیوستگی و مونتوم؛ معادلات کلی متوسط گیری شده در عمق بدست می آید. مدل سازی انتقال رسوب توسط معادله جابه جایی- پخش متوسط گیری شده در عمق برای انتقال بار معلق (رابطه ی ۱۲) و معادله پیوستگی برای بار بستر (رابطه ی ۱۳) صورت می گیرد.

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y}) + E_{bk} - D_{bk} \quad (12)$$

$$(1-p) \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial q_{bkx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bky}}{\partial y} = -E_{bk} + D_{bk} \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (13)$$

اندیس  $k$  بیانگر کلاس ابعادی ذرات رسوب می باشد. و  $C_k$  و  $\epsilon_s$  به ترتیب عبارتند از غلظت بار رسوبات معلق و ضریب پخش گردابه ای رسوب که  $\epsilon_s$  از رابطه  $\epsilon_s = \frac{V_t}{\sigma_s}$  محاسبه می شود. و  $V_t$  و  $\sigma_s$  به ترتیب لزجت گردابه ای جریان و عدد اشمیت- پرانتل آشفتگی (که بین ۵ تا ۱ قرار دارد) می باشند.  $E_{bk}$  و  $D_{bk}$  به ترتیب بیانگر نرخ ورود ذرات رسوب از ناحیه بار بستر به ناحیه بار معلق و نرخ ته نشینی ذرات رسوب در مرز بین نواحی بار بستر و معلق می باشد.

$$E_{bk} - D_{bk} = \alpha \omega_{sk} (C_{*k} - C_k) \quad (14)$$

ضریب پارامتری  $\alpha$  است در مدل سازی انتقال رسوب به نام ضریب تطبیقی غیر تعادلی بار معلق ۳،  $\omega_{sk}$  سرعت سقوط مربوط به کلاس ابعادی ذرات رسوب و  $C_{*k}$  بیانگر غلظت رسوبات در حالت تعادلی (ظرفیت انتقال رسوب)،  $p'$  تخلخل مواد کف،  $\bar{c}_{bk}$  غلظت متوسط بار بستر در منطقه حرکت بار بستر،  $\delta$  ضخامت لایه بستر و  $q_{bkx}$  به ترتیب مولفه های نرخ انتقال بار بستر در راستای  $x$  و  $y$  می باشند.

در مرز های ثابت مانند جزیره ها و یا کناره ها، نرخ انتقال بار بستر و تغییرات غلظت بار بستر عمود بر مرز برابر با صفر در نظر گرفته می شود.

$$q_{bk} = 0 \quad (15)$$

$$v^{n+1} = v^n + \Delta t.C_v^n + \Delta t.FM_v^n \quad (3)$$

که  $Z'$  پارامتر تصحیح تراز سطح آب،  $\Delta t$  گام زمانی،  $n$  زمان،  $Q$  پارامتر دیورژانس،  $FS$  ترم چشمه و پارامترهای  $C_v$  و  $C_{**}$  بیانگر فرم گسسته شده ترم های سمت چپ معادلات مونتوم می باشند. ترم های  $FM_{**}$  و  $FM_v$  بیانگر فرم گسسته نیروهای مونتوم (گرادیان فشار، تنش های رینولدز، تنش های برشی، نیروی کورولیس) در سمت راست معادلات مونتوم می باشند. روش تصحیح فشار برای کوپل نمودن سرعت و میدان فشار به کار می رود. سرعت توسط پارامتر تصحیح فشار (سطح آب) برای حفظ بقای جرم تصحیح می شود. که  $\bar{u}^*$  بیانگر سرعت موقت و  $Z$  تراز سطح آب می باشد.

$$\bar{u}^{n+1} = \bar{u}^* - \Delta t.g.\nabla Z' \quad (4)$$

$$Z' = Z^{n+1} - Z^n \quad (5)$$

### معادلات جریان و شرایط مرزی در حالت متوسط گیری شده در عمق

معادله ی مونتوم برای جریان کم عمق در جهت های  $x$  و  $y$ . بترتیب مطابق با رابطه های (۶) و (۷) می باشد.

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial(u_x u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u_x u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(u_x u_z)}{\partial z} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (6)$$

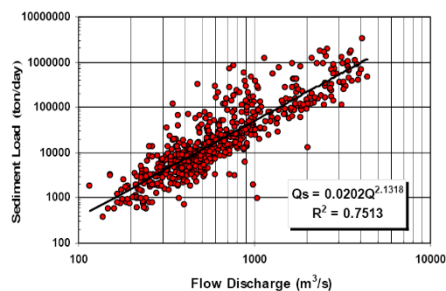
$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial(u_x u_y)}{\partial x} + \frac{\partial(u_y u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(u_y u_z)}{\partial z} = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (7)$$

در کف و کناره های کانال می توان از شرط عدم لغزش استفاده نمود.

$$u_{bx} = 0, u_{by} = 0, u_{bz} = 0 \quad (8)$$

همچنین سطح آب به عنوان یک شرط مرزی آزاد قابل حرکت رفتار می کند که تعیین مکان آن جزئی از حل می باشد. برای ذرات بر روی سطح آزاد آب؛ مکان را می توان به صورت رابطه ی (۹) بیان نمود که بیان کننده شرایط سینماتیکی سطح آزاد آب می باشد.

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + u_{bx} \frac{\partial z_s}{\partial x} + u_{by} \frac{\partial z_s}{\partial y} = u_{bz} \quad (9)$$



شکل ۲- منحنی سنج رسوب معلق در ناحیه ی مورد بررسی

جدول (۱) نشان دهنده ی دانه بندی رسوبی رودخانه می باشد که در ۵ قطر دانه بندی تقسیم شده اند. برای تعیین درصد قطر های دانه بندی در بار بستر از روش میانگین گیری حسابی استفاده شده است. همچنین برای شبیه سازی انتقال رسوب نیاز به غلظت بار معلق و بار بستر در مرز ورودی و میزان مشارکت هر کدام از قطر های دانه بندی در غلظت می باشد. غلظت بار معلق و بستر در مرز ورودی شامل یک سری زمانی می باشد که با توجه به تغییرات دبی می توان آنرا از منحنی شکل (۲) بدست آورد.

### شبکه بندی و کالیبراسیون

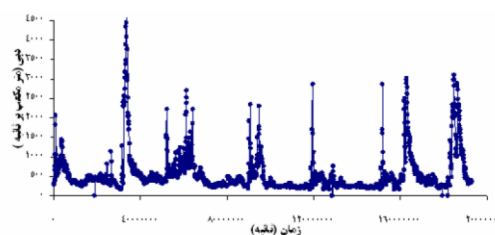
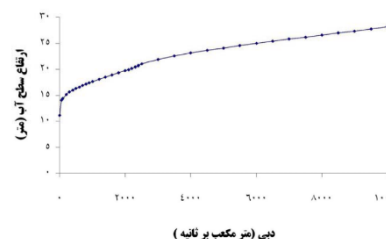
شبکه مورد استفاده شامل یک شبکه ساختار یافته غیر یکنواخت از نوع تطبیق یافته ۴ با ابعاد ۱۵\*۱۰۵ بوده که توسط نرم افزار CCHE-Mesh تولید و ارتقا یافته است. این شبکه بر مبنای نقشه برداری میدانی با مقیاس ۱:۵۰۰ تهیه شده است. نتایج حاصله نشان داد که ریز تر کردن شبکه تاثیر چندانی بر حل میدان نداشته و شبکه فوق برای محاسبات میدان جریان مورد استفاده قرار گرفته است. برای کالیبراسیون مدل از مقادیر سطح آب ثبت شده در طول ناحیه ی مورد بررسی استفاده شده است. کالیبراسیون در دبی ۱۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه انجام شده است. سطح آب در ۶ مقطع در طول ناحیه ی مورد بررسی و در هر مقطع برای یک نقطه ثبت شده است. برای انتخاب بهترین ضریب زبری از ضرایب مختلف مانینگ استفاده شده است. برای این منظور مدل در ضرایب زبری مختلف اجرا و در هر مرحله خطا محاسبه شده است که در نهایت معلوم شد که ضریب زبری ۰/۰۳۱ دارای بهترین نتایج می باشد. شکل (۳) نشان دهنده ی سطح آب خروجی از مدل

$$\frac{\partial C_k}{\partial n} = 0 \quad (16)$$

در مرز خروجی، محاسبات بار بستر نیاز به شرط خاصی ندارد، اما تغییرات غلظت بار معلق در جهت حرکت جریان برابر با صفر در نظر گرفته می شود.

$$\frac{\partial C_k}{\partial s} = 0 \quad (17)$$

شکل (۱- الف) نشان دهنده ی هیدروگراف رودخانه حد فاصل سال های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ می باشد که به عنوان مرز ورودی در نظر گرفته شده و شکل (۱- ب) نشان دهنده ی منحنی دبی - اشل رودخانه در بازه ی مورد بررسی می باشد که به عنوان مرز خروجی برای نرم افزار در شبیه سازی میدان جریان مشخص شده است.



شکل ۱- هیدروگراف رودخانه حد فاصل سال های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ و منحنی دبی اشل در پایاب.

جدول ۱- میزان مشارکت اقطار دانه بندی در غلظت بار معلق و بار بستر.

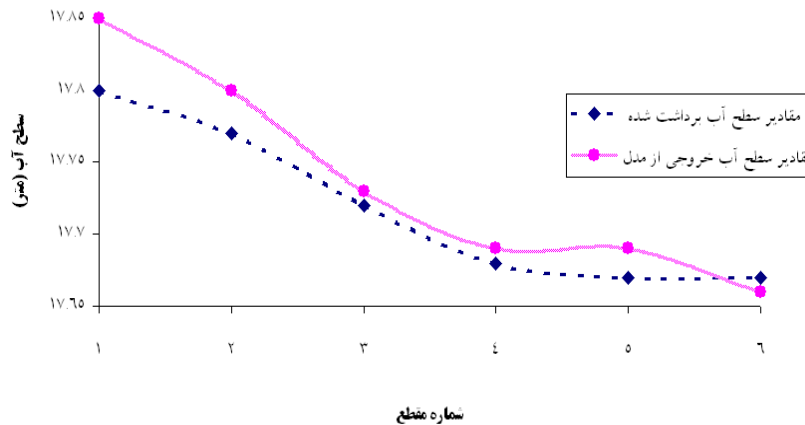
درصد در بار معلق	درصد در بار بستر	قطر دانه بندی (متر)
۴۰	۵	۰/۰۰۰۱۲۵
۳۰	۵	۰/۰۰۰۲۵
۱۵	۲۰	۰/۰۰۰۵
۱۰	۵۵	۰/۰۰۰۷
۵	۱۵	۰/۰۰۱۲

زمان های ۴ روز و ۱۴ ساعت و ۲۷ دقیقه و ۴۸ ثانیه و ۱۹۴۴ روز و ۳۰ دقیقه و ۱۸ ثانیه پس از شروع شبیه سازی در طی شبیه سازی میدان جریان با گام زمانی ۸۰۰/۷۵۶ می باشد که به ترتیب با نشانه های (الف) و (ب) مشخص شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، بیشینه سرعت در خروجی قوس ابتدایی و انتهایی دیده می شود. در این نواحی شاهد کاهش مقطع عرضی در رودخانه می باشیم که این خود می تواند باعث تمرکز سرعت بیشینه گردد. همچنین در نقطه ی عطف چماب شاهد تمرکز سرعت بیشینه در کرانه ی خارجی قوس می باشیم که مقدار این سرعت در طی زمان شبیه سازی افزایش می یابد که این امر می تواند ناشی از رسوب گذاری جریان در کرانه ی داخلی چماب باشد.

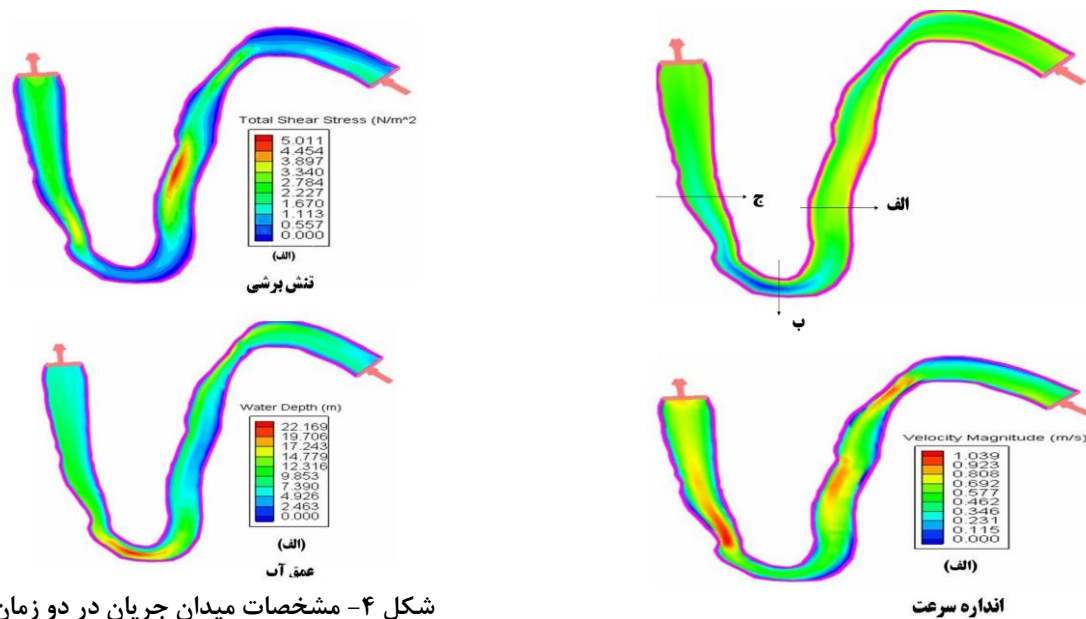
با ضریب زبری مانینگ ۰/۰۳۱ در مقابل سطح آب ثابت شده در طول ناحیه ی مورد بررسی می باشد. همان طور که در این شکل مشخص است بیشترین اختلاف سطح آب در ورودی میدان می باشد که این امر می تواند ناشی از فرض توزیع سرعت یکنواخت در ورودی میدان توسط نرم افزار CCHE2D و اثر آن بر روی تراز سطح آب در ورودی میدان باشد. بیشینه خطا، کمینه خطا، خطای متوسط مشاهده شده در کالیبراسیون مدل، به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۰۵ و ۰/۱۲ می باشد.

### بررسی میدان جریان

شبیه سازی الگوی جریان در بازه ی زمانی سال های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ انجام پذیرفته است. شکل (۴) نشان دهنده ی سطح آب، سرعت و تنش برشی ایجاد شده در



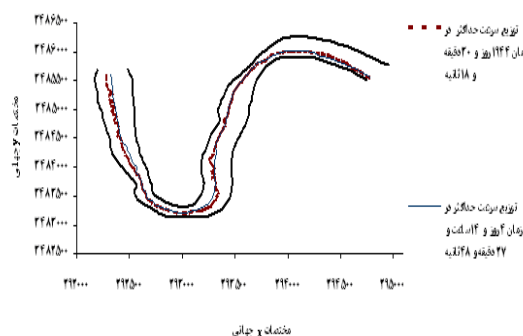
شکل ۳- مقایسه سطح آب خروجی از مدل با مقادیر برداشت شده.



شکل ۴- مشخصات میدان جریان در دو زمان مختلف

باشد، به طوری که در ناحیه ی خط القعر ۵ رودخانه شاهد تمرکز تنش برشی می باشیم که این امر به علت اثر انقباضی مقطع عرضی در این ناحیه بر روی تغییرات گرادیان سرعت در این ناحیه می باشد. همچنین نتایج حاصل از مقایسه میدان سرعت در دو زمان مختلف در ناحیه ی مورد بررسی نشان می دهد که در دو حالت تنش برشی حداکثر در قوس خارجی خط القعر واقع شده است که این امر می تواند به علت کاهش سطح مقطع مفید جریان ناشی از واگرایی خطوط سرعت در این ناحیه باشد.

شکل (۵) نشان دهنده ی توزیع سرعت حداکثر در محدوده ی مورد بررسی در دو زمان مختلف می باشد. از آنجا که شبیه سازی جریان در حالت غیر دائم می باشد، لذا انتظار تغییر در شرایط میدان جریان با تغییرات دبی در دو قوس تند ۱۸۰ درجه در ناحیه ی مورد بررسی وجود دارد. همان طور که در شکل (۵) دیده می شود مکان قرار گیری بیشینه سرعت و بیشینه توزیع تنش برشی در یک زمان خاص در یک ناحیه نمی باشد که این امر بدلیل نرخ گرادیان سرعت متفاوت در ناحیه ی مورد بررسی می



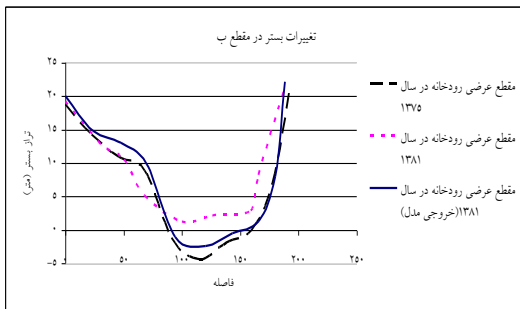
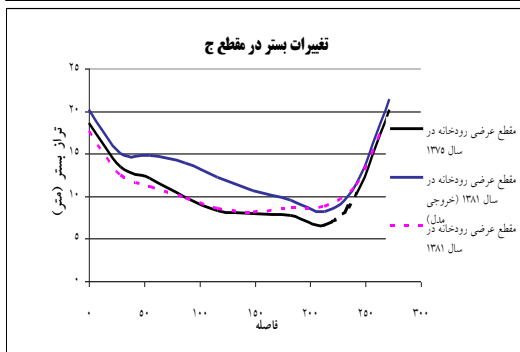
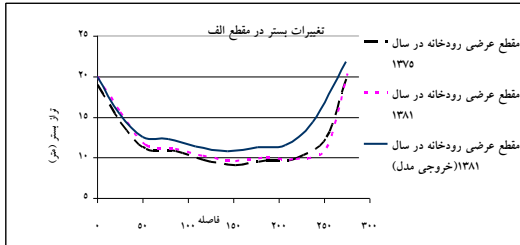
شکل ۵- توزیع سرعت حداکثر در دو زمان مختلف در طی شبیه سازی میدان جریان غیر دائم

### شبیه سازی انتقال رسوب

در شبیه سازی انتقال رسوب در حالت غیر تعادلی پارامترهای طول تطبیق بار بستر و فاکتور تطبیق بار معلق از مهمترین پارامترهای موثر بر روی نتایج می باشند، به طوری که وو، رودی و ونکا (۲۰۰۰) معتقدند که مقدار این پارامترها بر روی شبکه بندی و گام زمانی موثر می باشد و مقادیر کم این پارامترها نیاز به شبکه ریز تر و گام زمانی کوچک تر دارد. اما به طور کلی این پارامترها بیانگر طول مشخصه رسوب برای تغییر وضعیت از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی می باشد. در شبیه سازی انتقال رسوب در حالت متوسط گیری شده در عمق دارای سه مجهول  $\frac{\partial Z_b}{\partial t}$  (تغییرات زمانی بستر رودخانه)،  $q_{kb}$  (نرخ انتقال بار بستر) و  $C_k$  (غلظت بار معلق متوسط گیری شده در عمق) در مقابل دو معادله ی انتقال بار بستر و جابه جایی-پخش بار معلق می باشیم. برای حل این مشکل ولینگتون (۱۹۷۸)، فیلیپ و سادرلند (۱۹۸۹) و تاک (۱۹۹۱) معادله ی (۱۸) را علاوه بر دو معادله ی قبلی ارائه نموده اند.

معادله ی (۱۸) 
$$(1-p') \frac{\partial Z_b}{\partial t} = \alpha \omega_{sk} (C_k - C_{*k}) + \frac{(q_{bk} - q_{b*k})}{L_b} \quad (18)$$
 که در آن  $P'$  تخلخل مواد بستر،  $\frac{\partial Z_b}{\partial t}$  نرخ زمانی تغییرات بستر،  $\omega_{sk}$  سرعت سقوط ذرات رسوبی،  $C_k$  غلظت بار معلق متوسط گیری شده در عمق،  $C_{*k}$  غلظت بار معلق متوسط گیری شده در عمق در حالت تعادل،  $q_{bk}$  نرخ انتقال بار بستر،  $q_{b*k}$  نرخ انتقال بار بستر در شرایط تعادل و  $L_b$  طول تطبیق بار بستر می باشد. در معادله ی (۱۸) رابطه ای بین تغییرات زمانی بستر و نرخ انتقال بار بستر و غلظت بار معلق متوسط گیری شده در عمق توسط طول تطبیق بار بستر و فاکتور تطبیق بار معلق ایجاد گردیده است و از این طریق، این پارامترها در حل معادلات انتقال رسوب وارد گردیده اند. روش های متفاوتی برای تعیین این پارامترها از سوی محققین مختلف ارائه شده است. جدول (۳) نشان دهنده ی مهمترین روش هایی می باشد که برای تعیین این ضرایب وجود دارد. که

تراز در کرانه های داخلی می باشیم که این امر به علت واگرایی خطوط جریان در خط القعر می باشد. به طور کلی الگوی رسوب گذاری پیش بینی شده در ناحیه ی مورد بررسی می بایستی باعث مهاجرت رودخانه به سمت چپ در پلان گردد که این روند مهاجرتی با عکس های ماهواره ای همخوانی دارد.



شکل ۶- مقایسه سطح مقطع رودخانه و سطح مقطع پیش بینی شده توسط مدل CCHE2D

جدول (۵) نشان دهنده ی میزان خطای موجود در پیش بینی تغییرات بستر در مقاطع فوق می باشد. همان طور که در جدول (۵) مشخص است، میانگین خطای ایجاد شده در پیش بینی تغییرات بستر در مقاطع مختلف متفاوت است، که این امر می تواند ناشی از خصوصیات محلی مقاطع باشد.

جدول ۵- خطای موجود در پیش بینی تغییرات بستر

نام مقطع	میانگین خطا	بیش ترین خطا	کم ترین خطا
الف	۱۱/۰۴۵	۲۸/۷۵	۰/۱۶
ب	۶۸/۰۷	۳۰۰	۳/۷
ج	۲۲/۴۳	۴۳/۵۲	۱/۷

در آن  $\alpha$  فاکتور تطبیق بار معلق،  $a$  عمق بار بستر،  $h$  عمق آب و  $u^*$  سرعت برشی می باشد.

جدول ۳- روش های تعیین ضرایب طول تطبیق بار بستر و فاکتور تطبیق بار معلق

نام روش	طول تطبیق بار بستر	فاکتور تطبیق بار معلق
بل و سادر لند (۱۹۸۳)	تابعی از زمان	تابعی از زمان
وانگ (۱۹۹۹)	۱۰-۲ متر (در آزمایشگاه)	-
ناکاگوا و سوچیموتو (۱۹۸۰)	طول لغزش متوسط ذرات رسوبی	-
فیلیپ و سادرلند (۱۹۸۹)	طول لغزش متوسط ذرات رسوبی	-
راهول (۱۹۸۹)	۱ تا ۲ برابر اندازه شبکه فن	-
راین (۱۹۸۴)	۷/۳ عمق جریان	-
یالین (۱۹۷۲)	۶/۳ عرض کانال	-
وو (۲۰۰۰)	۵-۱۰ برابر عمق جریان	-
آرمانی و دی سیلویو (۱۹۸۸)	-	$\frac{1}{\alpha} = \frac{a}{h} + (1 - \frac{a}{h}) \exp \left[ -1.5 \left( \frac{a}{h} \right)^{\frac{-1}{6}} \frac{\omega_{sk}}{u^*} \right]$
وی (۱۹۹۹)	-	۰/۰۰۱

برای تعیین طول تطبیق بار بستر و فاکتور تطبیق بار معلق از تمامی جایگشت های ممکن در روابط فوق استفاده شده است. نتایج جایگشت های مختلف دیگر از روابط فوق نیز منجر به رسوب گذاری بیش از حد در ورودی میدان و احیاناً واگرایی در نتایج خروجی و توقف نرم افزار می گردد. همچنین شکل (۶-ب) نشان دهنده ی تغییرات پیش بینی مدل از روند تغییرات بستر در طی ۶ سال (۱۳۷۵-۱۳۸۱) با استفاده از روش فن راین (۱۹۸۴) برای تعیین طول تطبیق بار بستر و پیشنهاد وی (۱۹۹۹) برای تعیین فاکتور تطبیق بار معلق می باشد.

شکل (۷) نشان دهنده ی مقایسه مقاطع عرضی خروجی از مدل در مقایسه با مقاطع عرضی رودخانه در سال ۱۳۸۱ در سه مقطع عرضی می باشد. همان طور که در شکل (۸-ب) دیده می شود رسوب گذاری در قوس اول و دوم در کرانه ی داخلی قوس می باشد که این امر با توجه به اثر ترکیبی جریان اصلی و جریان حلزونی قابل توجیه می باشد همچنین در حد فاصل دو قوس نیز شاهد افزایش

River of Illinois and Indiana. Geological Society of America Bulletin 1975; 86(11): 1511-1522.

11) Pradham, A. Khatua, K., 2018. Variation of Velocity Distribution in Rough Meandering Channels, journal of advanced in civil engineering, Vol. Volume 2018, Article ID 1569271, <https://doi.org/10.1155/2018/1569271>.

12) Knack, I.M. and Shen, H.T., 2018. A numerical model for sediment transport and bed change with river ice. Journal of Hydraulic Research, pp.1-13.

13) Sun, J., Lin, B., 2015, Development and application of a braided river model with non-uniform sediment transport, Advanced in water resources, Vol.81, Page 62-74.

14) Yen C, Lee KT. Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow. Journal of Hydraulic Engineering 1995; 121(8): 591-599.

## نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی الگوی جریان نشان می دهد که مکان قرار گیری تنش برشی بیشینه و سرعت حداکثر بیشینه در طول ناحیه ی مورد بررسی الزاما بر یکدیگر منطبق نمی باشند بلکه تنش برشی بیشینه در راس خط القعر متمرکز شده است که در این ناحیه بدلیل واگرایی خطوط جریان شاهدگردیان سرعت می باشیم. همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی انتقال رسوب در ناحیه ی مورد بررسی نشان می دهد که که روش فن راین (۱۹۸۴) برای تعیین طول تطبیق بار بستر و روش وی (۱۹۹۹) برای تعیین فاکتور تطبیق بار معلق دارای بهترین نتایج در شبیه سازی انتقال رسوب در بازه ی مورد بررسی می باشد.

## منابع

- ۱) اقبال زاده ا. ۱۳۸۰. بررسی جابه جایی حفره ناشی از برداشت ماسه در بسترکانال های دارای انحنا. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲) دهقانی ا. ۱۳۸۴. مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب به آبگیر جانبی در قوس ۱۸۰ درجه. رساله دکتری هیدرولیک، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳) مغربی م. ۱۳۸۸. شبیه سازی عددی مهاجرت در پیچانرودها (مطالعه موردی رودخانه کارون). پایان نامه کارشناسی ارشد عمران گرایش آب، دانشگاه تربیت مدرس
- ۴) سلاجقه ع، صالحی نیشابوری س.ع، ۱۳۸۴، بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی در قوس رودخانه، نشریه منابع طبیعی ایران، جلد ۵۸، شماره ۱، سال ۸۴
- 5) Booij, R. Blanckaert, k. 2001. measurement and large eddy simulation of some curved flume. journal of turbulence, 4(1), 8-16.
- 6) Clayton JA. Local sorting, bend curvature, and particle mobility in meandering gravel bed rivers. Water resources research 2010; 46(2), W02601
- 7) Fathi, M. Honarbakhsh. A. 2013. morphological simulation of bank erosion in natural river, international research journal of applied and basic science, Vol 4(11):3292-3300.
- 8) Graf, W. Blanckaert, k. 2001. flow around bends in rivers, 2nd international conference on eco compatible solution for aquatic environments, Italy.
- 9) Jian, Y. Mccorquadale, J. 1998. simulation of curved open channel flow by 3D hydrodynamic model, journal of hydraulic engineering, 124(7), 687-698.
- 10) Jackson RG. Velocity – bed-form – texture patterns of meander bends in the lower Wabash