

## شبیه‌سازی عددی تغییرات بستر کانال‌های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه

علی سواریان<sup>۱</sup>، امیر حسین نیک سرشت<sup>۲\*</sup>، ناصر طالب بیدختی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، بخش راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

۲- استادیار بخش مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز

۳- استاد بخش عمران، دانشگاه شیراز

\* شیراز، خیابان زند، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی راه و ساختمان، کدپستی ۷۱۳۴۸-۵۱۱۵۶

nikser@sutech.ac.ir

**چکیده-** در این تحقیق، نحوه ایجاد تغییرات در بستر کانال قوسی ۱۸۰ درجه، به روش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل دوفازی اولری-که معادلات حاکم ترکیبی اولر-اولر را برای فازهای آب و رسوب در کنار مدل تلاطم  $k-\epsilon$  به کار می‌برد- در نرم‌افزار FLUENT شبیه‌سازی شده است. برای محاسبه میزان انتقال رسوبها از معادلات اساسی دینامیک استفاده شده و بدین ترتیب از کاربرد معادلات تجربی انتقال رسوب که برای شرایط خاص و برای مکانی ویژه حاصل شده، اجتناب می‌شود. در شبیه‌سازی، اندرکنش ذرات آب با رسوب و همچنین اندرکنش ذرات رسوب با یکدیگر ملحوظ شده است. برای مطالعه دقیق تغییرات تراز بستر، یک آستانه بر اساس بخش حجم ماسه در نظر گرفته شد، تا منحنی‌های تراز بستر، ترسیم شود. تغییرات ایجاد شده در بستر مانند مکان و عمق چاله فرسایشی، در مدل‌های عددی تطابق خوبی با آزمایش‌های انجام شده در قبل داشت. نتایج این تحقیق همچنین وجود سازوکاری جدید را برای انتقال رسوب به نام بار لایه‌ای نشان می‌دهد.

**کلیدواژگان:** تغییرات بستر، کانال قوسی، چاله فرسایشی، مدل دوفازی، شبیه‌سازی عددی.

### ۱- مقدمه

تغییرات بستر در کانال‌های قوسی یکی از مشکلات مهمی است که مهندسان هیدرولیک با آن سروکار دارند. تغییر شکل و مهاجرت رودخانه‌ها ممکن است موجب وارد آمدن آسیب جدی به سازه‌های نزدیک رودخانه شود و لذا پیش‌بینی و پیش‌گیری از آن می‌تواند سبب صرفه‌جویی در منابع مالی شود. بنابراین دانش پیش‌بینی رفتار آبراهه‌ها برای طراحی و مکانیابی سازه‌های نزدیک

به آنها بسیار ضروری است. این پدیده پیچیده ناشی از اندرکنش میدان جریان آشفته سه‌بعدی در قوس و بستر متحرک آبراهه است. به‌منظور پیش‌بینی فرسایش کناری رودخانه‌ها و حرکت جانبی آنها مدل‌های کامپیوتری متنوعی تهیه شده است. در مطالعات اولیه، روش متوسط‌گیری در عمق برای کاهش جریان روخانه از سه بعد به دو بعد استفاده می‌شده است. (Leschziner and Rodi (1979

محدود حل و برای بستن معادلات از روش آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است. برای صحت‌سنجی مدل نتایج برداشت شده از یک کانال پیچانرودی آزمایشگاهی با مقیاس بزرگ با بستر ثابت به کار گرفته شد.

صفرزاده و صالحی نیشابوری (۱۳۸۴) با توجه به تحقیقات Leschziner and Rodi (1979) و تکیه بر این که تغییرات سطح آب تأثیر چندانی بر نتایجی که در کف آبراهه (به‌ویژه در مورد تنش برشی کف) ندارد، مرز تقارن را برای سطح آب در مدل عددی خود اعمال کردند. این محققان با استفاده از نرم‌افزار FLUENT الگویی سه بعدی جریان آشفته را در قوسی با زاویه مرکزی  $180^\circ$  درجه با استفاده از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد و  $k-\omega$  شبیه‌سازی کردند. بر طبق نظر این دو محقق به خلاف مدل  $k-\epsilon$  استاندارد، تنش برشی پیش‌بینی شده در کف آبراهه توسط مدل  $k-\omega$  به نتایج گزارش شده توسط Odgaard and Bergs (1988) نزدیک‌تر است.

لازم است ذکر شود که Odgaard and Bergs (1988) در نتایج آزمایشگاهی خود، وقوع فرسایش در مقطع عرضی  $120^\circ$  درجه را گزارش کرده‌اند. در حالی که مدل عددی صفرزاده و صالحی نیشابوری (۱۳۸۴) مدل بستر متحرک نبوده و وقوع پدیده فرسایش یا رسوب‌گذاری را نشان نمی‌دهد و توزیع تنش برشی در حالت بستر صلب فقط قادر به پیش‌بینی حالت شروع فرسایش موضعی است.

Julien and Duan (2005) از طریق ترکیب مدل فرسایش بستر با نوعی مدل عددی هیدرودینامیکی دو بعدی میانگین‌گیری شده در عمق، تغییر شکل بستر در قوسها را بررسی کردند. ایشان قدرت جریان ثانویه در انتقال رسوبها در عرض آبراهه‌ها را به دو عامل شعاع انحنای

شبیه‌سازی جریان در قوس  $180^\circ$  درجه، معادلات حاکم بر جریان دائمی در قوس و در کانال با مقطع مستطیلی را در دستگاه مختصات استوانه‌ای به کار بردند. نکته جالب در کار ایشان، استفاده از شرط مرزی تقارن برای سطح آزاد آب و تأکید بر تأثیر ناچیز عمق جریان بر وضعیت بستر آبراهه‌ها بود.

میدان جریان دو بعدی در کانال با شکل سینوسی با استفاده از مدل‌های میانگین‌گیری شده در عمق توسط Johannesson and Parker (1989) تحلیل و بر اهمیت تأثیر جریان ثانویه در توزیع سرعت در قوسها تأکید شده است.

Keating and Nestic (1999) برای شبیه‌سازی میدان جریان در قوس  $180^\circ$  درجه، از نرم‌افزار PHOENICS که بر دینامیک سیالات محاسباتی متکی است، استفاده کردند و برای بررسی تلاطم جریان مدل  $k-\epsilon$  را به کار بردند. با استفاده از نتایج به دست آمده برای میدان جریان توسط نرم‌افزار PHOENICS و یک کد نرم‌افزاری دیگر بر اساس روش‌های ردیابی حرکت ذرات، این دو محقق نحوه فرسایش بستر و همچنین ته‌نشین شدن ذرات ماسه در قوس  $180^\circ$  درجه را بررسی کردند. محل حداکثر فرسایش در نزدیکی انتهای قوس و در محل دیوار خارجی گزارش شده است.

Jia et al. (1999) از نوعی مدل هیدرودینامیکی میانگین‌گیری شده در عمق و مدل انتقال رسوبها به نام CCHE2D برای شبیه‌سازی و مطالعه میدان جریان و تغییرات ریخت شناسانه رودخانه‌های طبیعی استفاده کردند.

Wilson et al. (2003) نوعی مدل عددی سه بعدی را برای شبیه‌سازی جریان‌های پیچانرودی شبه طبیعی به کار بردند. در این مدل معادلات ناویر-استوکس با روش حجم

که در آن  $t=s, f$  و  $\alpha_f + \alpha_s = 1$ ؛  $\alpha_s$  و  $\alpha_f$  به ترتیب بخش سیال آب و رسوب و  $\rho_s$  و  $\rho_f$  به ترتیب جرم حجمی آب و رسوب است.

معادلات ممتم برای هر یک از فازهای آب و رسوب به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p \quad (2)$$

$$+ \nabla \cdot \vec{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + K_{sf}(\vec{v}_s - \vec{v}_f) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p$$

$$+ \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{sf}(\vec{v}_s - \vec{v}_f)$$

که در آن  $\vec{v}_s$  و  $\vec{v}_f$  سرعت متوسط فازهای آب و رسوب،  $p$  فشار مشترک دوفاز،  $\tau_s$  تانسور تنش فاز جامد<sup>۲</sup> که برابر است با  $\alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s (\lambda_s - 2\mu_s/3) \nabla \cdot \vec{v}_s \vec{I}$ ،  $\tau_f$  تانسور تنش فاز مایع<sup>۳</sup>،  $\vec{I}$  تانسور شناسایی،  $\lambda_s$  لزجت توده‌ای<sup>۴</sup> که برابر با

$$\frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2}$$

است که احتمال برخورد ذرات به یکدیگر را توصیف می‌کند؛  $\alpha_{s,max}$  حداکثر بخش حجم رسوب که برابر  $0.63$  در نظر گرفته شد؛  $\Theta_s$  دمای ذرات،  $e_{ss}$  ضریب رهاسازی<sup>۵</sup>،  $\vec{g}$  شتاب ثقل،  $d_s$  قطر ذرات،  $\mu_f$  لزجت برشی<sup>۶</sup> آب،  $\mu_s$  لزجت برشی ذرات رسوب که از رابطه زیر به دست می‌آید:  $\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr}$  که  $\mu_{s,col}$  لزجت در اثر برخورد،  $\mu_{s,fr}$  لزجت اصطکاکی، و  $\mu_{s,kin}$  جنبشی<sup>۷</sup> و  $K_{sf} (=K_{fs})$  ضریب تبادل بین فاز ممتم<sup>۸</sup> است (Fluent user's guide, 2005).

قوس و زاویه پیچش آن ربط دادند. از ویژگی های مدل ایشان در نظر گرفتن بار معلق از طریق اعمال معادله رویز بود.

در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار Ver. 6.3.26 FLUENT، مدل دوفازی اولر- که شامل معادلات حاکم ترکیبی اولر- اولر برای فازهای آب و رسوب است- همراه با مدل تلاطم k-ε حل شده و تغییرات بستر در کانال با قوس ۱۸۰ درجه شبیه سازی شده است. برای محاسبه میزان انتقال رسوبها از معادلات اساسی دینامیک استفاده شده که بدین ترتیب از کاربرد معادلات تجربی و نیمه تجربی انتقال رسوب که هر یک برای شرایط و مکانی ویژه حاصل شده، اجتناب می شود. لازم است ذکر شود که در این مطالعه اندرکنش ذرات آب با رسوب و همچنین اندرکنش ذرات رسوب با یکدیگر ملحوظ شده است.

## ۲- معرفی مدل استفاده شده

مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل دو فازی اولر در نرم افزار FLUENT است. در این مدل فضای اشغال شده توسط هر فاز با پارامتری به نام بخش حجم<sup>۱</sup> ( $\alpha$ ) نشان داده می‌شود ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ). معادلات بقای جرم و مومتم برای هر یک از فازها به صورت جداگانه تعریف می‌شود.

## ۳- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی برای هر یک از فازهای سیال (f) و جامد (s) به صورت زیر است:

$$\text{(Bowen, 1976; Anderson and Jackson, 1967)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

1. Volume Fraction

2. Solid Phase Stress Tensor  
3. Liquid Phase Stress Tensor  
4. Bulk Viscosity  
5. Relaxation Factor  
6. Shear Viscosity  
7. Kinetic Viscosity  
8. Inter-Phase Momentum Exchange Coefficient

$$\vec{v}_{dr} = -D_{t,sf} [(\sigma_{sf} \alpha_f)^{-1} \nabla \alpha_s - (\sigma_{sf} \alpha_f)^{-1} \nabla \alpha_f]$$

در اینجا  $\vec{v}_{sf}$  سرعت نسبی بین فازهای جامد و مایع،  $D_{t,sf}$  ضریب پخش دوگانه تلاطم،  $\sigma_{sf} = 0.75$ ،  $k_{fs}$  کوواریانس سرعت‌های فازهای جامد و سیال، ضریب تبادل مومتم بین فازی،  $G_{k,f}$  تولید انرژی جنبشی تلاطم در جریان،  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ،  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ،  $C_{3\varepsilon} = 1.2$ ،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  (Fluent user's guide, 2005).

#### ۵- تلاطم در فاز جامد

تلاطم در فاز جامد با کاربرد تئوری Tchen برای پراکندگی ذرات جدا<sup>۳</sup> در جریان‌های همگن ملحوظ شد (Hinze, 1975). ضرایب پراکندگی، توابع رابط و انرژی جنبشی تلاطم فاز جامد، در قالب مشخصه‌های جنبش های تلاطمی پیوسته در فاز سیال، بر اساس دو مقیاس زمانی توصیف شد. مقیاس اول مربوط به اثر اینرسی بر ذرات است که به صورت زیر تعریف می‌شود:  $\tau_{F,sf} = \alpha_s \rho_f K_{sf}^{-1} (\rho_s / \rho_f + C_V)$ ؛ در این رابطه برای  $C_V$  که ضریب جرم افزوده است، مقدار ۰/۵ منظور می‌شود. مقیاس زمانی دوم مربوط می‌شود به جنبش‌های تلاطمی یا زمان اندرکنش ذره-گردابه که به صورت  $\tau_{t,sf} = \tau_{t,f} [1 + C_\beta \xi^2]^{-1/2}$  تعریف می‌شود: که در آن  $\tau_{t,f} = 3C_\mu k_f / 2\varepsilon_f$ ،  $\xi = |\vec{V}_r| / \sqrt{2k_f / 3}$  که  $\tau_{t,f}$  مشخصه زمانی گردابه‌های تلاطمی پرقدرت است،  $\vec{V}_r$  سرعت متوسط نسبی ذره نسبت به سیال محیط و  $C_\beta = 1.8 - 1.35 \cos^2 \theta$  می‌باشد.  $\theta$  زاویه بین سرعت متوسط ذره و سرعت متوسط نسبی آن است. نسبت بین دو شاخص زمانی معرفی شده برابر است با:  $\eta_{sf} = (\tau_{t,sf}) / (\tau_{F,sf})$  انرژی

#### ۴- تلاطم در فاز سیال

برای در نظر گرفتن تلاطم در فاز سیال از مدل تلاطم k-ε استاندارد با چند جمله اضافه برای در نظر گرفتن انتقال بین فازی مومتم استفاده شده است. تانسور تنش رینولدز برای فاز مایع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_f = & -\frac{2}{3} (\rho_f k_f + \rho_f \mu_{t,f} \nabla \cdot \vec{U}_f) \bar{I} \\ & + \rho_f \mu_{t,f} (\nabla \vec{U}_f + \nabla \vec{U}_f^T) \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن  $\vec{U}_f$  سرعت وزنی فازی،  $\mu_{t,f}$  لزجت تلاطم<sup>۱</sup> و برابر است با  $\rho_f C_\mu k_f^2 / \varepsilon_f$  و  $C_\mu = 0.09$  است. انرژی جنبشی تلاطم<sup>۲</sup>  $k_f$  و نرخ استهلاک آن  $\varepsilon_f$  از دو رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f k_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{U}_f k_f) = \\ \nabla \cdot (\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_k} \nabla k_f) + \alpha_f G_{k,f} \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} -\alpha_f \rho_f \varepsilon_f + \alpha_f \rho_f \prod_{k_f} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \varepsilon_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{U}_f \varepsilon_f) = \\ \nabla \cdot (\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_f) + \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} (C_{1\varepsilon} C_{k,f} - C_{2\varepsilon} \rho_f \varepsilon_f) \\ + \alpha_f \rho_f \prod_{\varepsilon_f} \end{aligned} \quad (۶)$$

در آن  $\prod_{k_f}$  و  $\prod_{\varepsilon_f}$  نشان‌دهنده تأثیر فاز جامد بر فاز مایع است و از دو رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\prod_{k_f} = \frac{K_{fs}}{\alpha_f \rho_f} (k_{sf} - 2k_f + \vec{v}_{sf} \cdot \vec{v}_{dr}),$$

$$\prod_{\varepsilon_f} = C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon_f}{k_f} \prod_{k_f}$$

که در آن  $\vec{v}_{dr}$  سرعت متوسط شناوری ذرات در اثر میدان سرعت به شکل زیر به دست می‌آید:

1. Turbulence Viscosity
2. Turbulence kinetic Energy

جدول ۱ مشخصات هیدرولیکی مدل‌های ساخته شده

نام مدل	عمق آب (m)	عرض کانال (m)	دبی جریان (l/s)	سرعت متوسط (m/s)
180-1	۰/۰۸	۰/۶	۱۷/۷	۰/۳۶
180-2	۰/۱۵	۰/۶	۳۷	۰/۴۱
180-3	۰/۲۰	۰/۶	۵۰	۰/۴۴

### ۷-۲- شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

با توجه به اینکه برای انفصال معادلات از روش حجم محدود استفاده شده، لذا باید دامنه محاسباتی شبکه‌بندی شود. شبکه تولید شده از نوع ساختارمند<sup>۲</sup> بوده که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ مشخصات شبکه‌های تولید شده

نام مدل	تعداد گره‌ها	زمان جریان (s)	زمان اجرا (hr)
180-1	۲۴۸۳۲۵	۶۰	۱۸۰۰
180-2	۲۷۹۲۱۶	۵۱	۲۲۰۰
180-3	۲۳۴۳۸۱	۵۰	۲۱۰۰

در بخشهایی از آبراهه که مسیر مستقیم وجود دارد شبکه‌بندی یکنواخت به‌کار رفته و با نزدیک شدن به قوس از آنجائیکه تغییرات مکانی جریان اهمیت بیشتری می‌یابد، شبکه‌بندی، در پلان و همچنین در عمق ریزتر شده است. برای دستیابی به جوابی مستقل از تعداد سلول‌های به‌کار رفته در شبکه بندی، مطالعه‌ای بر روی چگونگی تأثیر اندازه سلول بر نتایج مدل صورت گرفت. برای این منظور در هر مورد سلول‌ها بگونه‌ای در نظر گرفته شده که کوچکتر کردن آنها تأثیری ناچیز و قابل اغماض بر نتایج مدل داشته باشد. برای شبیه‌سازی عددی، رایانه‌ای با پردازنده مرکزی ۳/۴ گیگاهرتز به‌کار رفته و زمان اجرای برنامه و در جدول ۲ آورده شده است.

جنبشی فاز جامد چنین تعریف می‌شود:

$$k_s = k_{sf} \left[ \frac{b^2 + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right]$$

گردابه‌ای<sup>۱</sup> برای فاز جامد چنین است:

$$D_s = D_{t,sf} + (0.66k_s - 0.33bk_{sf})\tau_{F,sf}$$

که در آن  $b = (1 + C_v)(\rho_s/\rho_f + C_v)^{-1}$  و  $k_{sf}$  کواریانس

سرعت‌های فاز سیال است (Fluent user's guide, 2005).

### ۶- نتایج آزمایشگاهی مطالعه مدل عددی

دهقانی و همکاران (۱۳۸۶) آزمایشهایی را در شرایط مختلف هیدرولیکی در کانال با مقطع مستطیلی و قوس ۱۸۰ درجه با بستر متحرک از جنس ماسه یکنواخت انجام دادند و در هر آزمایش، تراز بستر را در مقاطع مختلف کانال اندازه‌گیری کردند. در این تحقیق، هندسه مدل عددی به‌کار رفته، شرایط هیدرولیکی و مصالح بستر کانال مشابه آزمایشهای فوق‌الذکر فرض شده است. بر این اساس، شبیه‌سازی عددی برای کانالی با قوس ۱۸۰ درجه به عرض ۰/۶ متر - که سایر مشخصات آن مطابق شکل ۱ است - انجام شد.

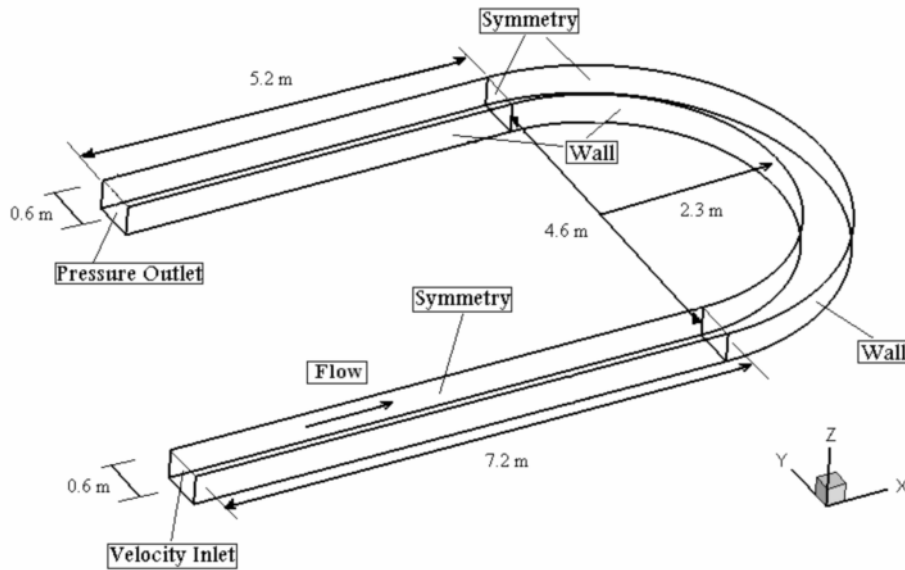
### ۷- شبیه‌سازی عددی

#### ۷-۱- شرایط هیدرولیکی

شبیه‌سازی عددی تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه، برای سه عمق مختلف با دبی‌های متفاوت صورت گرفت که مشخصات مدل‌ها در جدول ۱ آورده شده است. برای حصول اطمینان از تأثیر نداشتن عوامل پیش‌بینی نشده، ابعاد مدل‌های مورد استفاده، همان ابعاد به‌کار رفته در آزمایشگاه در نظر گرفته شد.

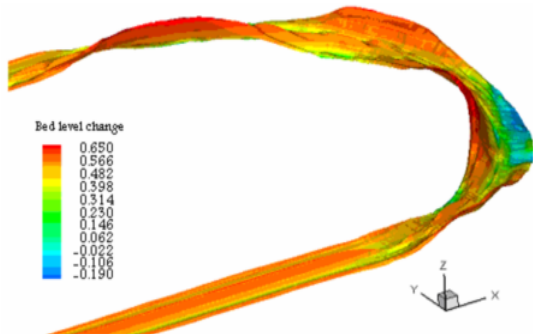
2. Structured

1. Eddy Viscosity



شکل ۱ طرح کانال آزمایشگاهی دهقانی و همکاران به همراه شرایط مرزی بکار گرفته شده در مطالعه حاضر

اصطلاحات بار معلق و بار بستر، این نوع انتقال رسوبها را می‌توان "بار لایه‌ای" نامید.



شکل ۲ نمایش سه‌بعدی از تغییرات حاصل در بستر مدل 3-180

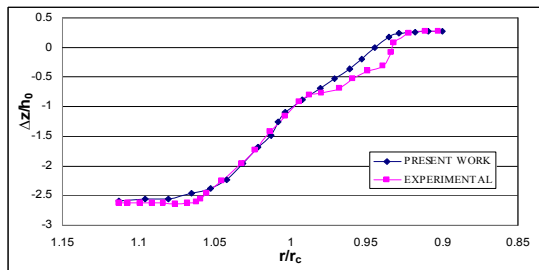
در شکل ۳ (الف، ب و ج) منحنی‌های تغییر شکل بستر برای شرایط مختلف شبه‌سازی، ترسیم شده است. حداکثر عمق آبشستگی در نیمه اول قوس در حدود زاویه ۵۵ درجه پدید آمده که در حدود ۳۰ درصد از حداکثر عمق آبشستگی در نیمه دوم قوس که کمی فراتر از زاویه ۱۲۰ درجه واقع شده، بزرگتر است.

### ۷-۳- شرایط مرزی

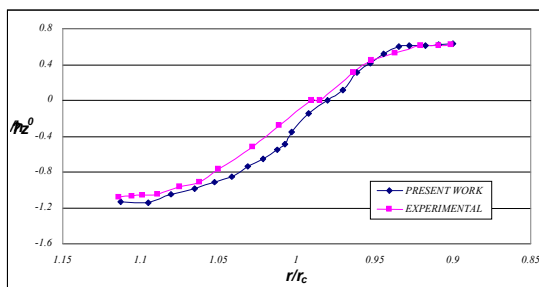
شرایط مرزی که برای تحلیل عددی در نظر گرفته شد، در شکل ۱ نشان داده شده که این شرایط برای سه حالت هیدرولیکی شبه‌سازی شده، یکسان است.

### ۸- نتایج شبه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

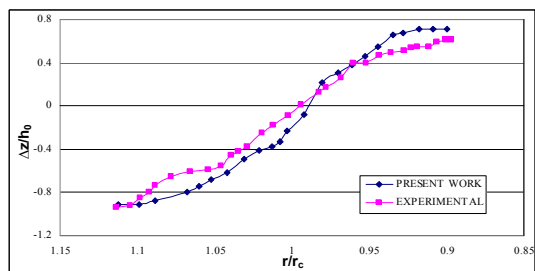
نمایی سه‌بعدی از تغییرات حاصل در بستر یکی از مدل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. سطوح نشان داده شده در این شکل در واقع مکان‌هایی است که در آنها بخش حجم فاز جامد برابر ۰/۵ است ( $\alpha_s=0.5$ ). شبه‌سازی‌های این تحقیق نشان داد که در نواحی زیر سطح متحرک ماسه (بستر کانال)، ذرات تحرک لایه‌ای دارند. این وضعیت که حتماً در طبیعت نیز وجود دارد، در پیشینه تحقیقاتی شبه‌سازی انتقال رسوبها گزارش نشده و همواره این ناحیه ثابت فرض می‌شده است. بدین دلیل در کنار



الف- مدل 180-1



ب- مدل 180-2



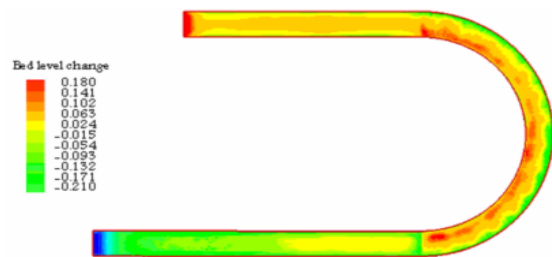
ج- مدل 180-3

شکل ۴ مقایسه تغییر شکل بستر در مقطع ۶۰ درجه

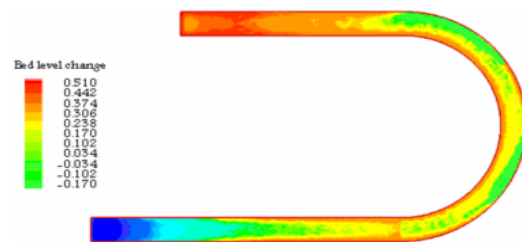
Yen and Lee (1995) نیز رابطه زیر را برای تعیین عمق آبشستگی قوس ارائه کرده‌اند:

$$\frac{\Delta z}{h_0} = -0.814 \tanh \left[ 10 \left( \frac{r}{r_c} - 0.16 \right) \right] - 0.0135 \quad (۸)$$

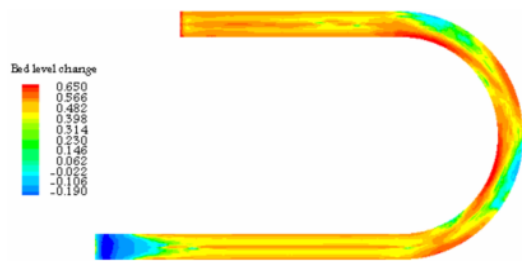
که در آن  $r_c$  شعاع انحنا مرکزی قوس است. در جدول ۳ مقادیر پیش‌بینی شده برای حداکثر عمق آبشستگی توسط دو رابطه بالا و نتایج دهقانی و همکاران با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شده است که در مقادیر



۳- الف مدل 180-1



۳- ب مدل 180-2



۳- ج مدل 180-3

شکل ۳ منحنی‌های تغییر شکل بستر

در شکل ۴ (الف، ب و ج) پروفیل عرضی بستر در مقطع چاله فرسایشی با نتایج آزمایشگاهی دهقانی و همکاران (۱۳۸۴) مقایسه شده است.

Turne به منظور تعیین میزان آبشستگی در قوس، رابطه زیر را ارائه کرده است (گزارش شده توسط Hoffmans, 1997):

$$\frac{\Delta z}{h_0} = 1.07 - \log \left( \frac{r}{B} - 2 \right) \quad \text{for } (2 < \frac{r}{B} < 22) \quad (۷)$$

که در آن  $\Delta z/h_0$  نسبت تغییرات تراز بستر به عمق اولیه جریان در بالادست و  $r/B$  نسبت شعاع انحنا قوس به عرض کانال است.

شرایط هیدرولیکی جریان تغییر کرده و با افزایش دبی به سمت پائین دست حرکت می‌کنند (شکل ۳).

۵- منحنی‌های تغییر شکل بستر در تمامی حالتها، نوسانی بودن تغییرات را در تراز بستر نشان می‌دهد.

۶- در شبه‌سازی‌ها مشاهده شد که الگوی توپوگرافی بستر در نیمه اول قوس در تمامی حالتها مشابه است، اما تغییرات عرضی بستر با شرایط هیدرولیکی تغییر می‌کند.

### ۱۰- فهرست علائم

B	عرض کانال
$C_V$	ضریب جرم افزوده
$d_s$	قطر ذرات
$D_{t,sf}$	ضریب پخش دوگانه تلاطم
$e_{ss}$	ضریب رهاسازی
$\vec{g}$	شتاب ثقل
$G_{k,f}$	تولید انرژی جنبشی تلاطم
$g_{0,ss}$	تابع توزیع
$h_0$	عمق اولیه جریان در بالادست
$\bar{I}$	تانسور شناسایی
$k_f$	انرژی جنبشی تلاطم
$K_{fs}$	ضریب تبادل مومتم بین فازی
$K_{sf}(=K_{fs})$	ضریب تبادل بین فازی مومتم
$k_{sf}$	کوواریانس سرعت‌های فازهای جامد و سیال
$p$	فشار مشترک دوفاز
$R$	شعاع انحنای قوس
$r_c$	شعاع انحنای مرکزی قوس
$\vec{U}_f$	سرعت وزنی فازی
$\vec{V}_r$	سرعت متوسط نسبی ذره نسبت به سیال محیط
$A$	بخش حجم
$\alpha_f$	بخش سیال آب
$\alpha_s$	بخش سیال رسوب

حاصل از حل عددی نزدیکی قابل ملاحظه‌ای نسبت به تجربیات آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

جدول ۳ مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده حداکثر عمق آبستگي از روابط مختلف و تحقیق حاضر

نام مدل	Turne	Yen و Lee	دهقانی و همکاران	شبه‌سازی عددی
180-1	-۰/۰۵۶	-۰/۰۶۷	-۰/۲۱۱	-۰/۲۰۷۷۵
180-2	-۰/۱۰۳	-۰/۱۲۲	-۰/۱۶۱	-۰/۱۶۹۷۳
180-3	-۰/۱۳۶	-۰/۱۶۰	-۰/۱۷۸	-۰/۱۸۸۱۴

### ۹- نتیجه‌گیری

۱- مدل عددی استفاده شده در این تحقیق با توجه به نتایج آزمایشگاهی مختلف، کارکرد قابل اعتمادی را نشان داده و الگوی به‌کار رفته برای تحلیل جریان و پیش‌بینی تغییرات تراز بستر در قوس‌ها - که به کمک نرم‌افزار FLUENT بررسی شد - کارایی قابل قبولی داشت.

۲- همان‌گونه که در نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی دیده می‌شود، دیوار بیرونی قوس همواره در معرض فرسایش و آبستگي و دیواره داخلی دائماً در معرض رسوبگذاری قرار دارد که این ناشی از جریان ثانویه است که مقدار حداکثر سرعت را در سطح آب به دیوار خارجی منتقل و رسوبها را در کف به سمت دیوار داخلی هدایت می‌کند.

۳- در تمامی حالت‌های شبه‌سازی شده در نزدیکی زاویه ۵۵ درجه، چاله فرسایشی ایجاد و با نزدیک شدن به سر قوس، فرسایش کمتر شده و دوباره در نیمه دوم، رو به افزایش می‌گذارد.

۴- عمق چاله‌های فرسایشی شکل گرفته در نیمه دوم قوس از چاله‌های نیمه اول کمتر بوده و محل آنها با تغییر



Anderson, T. B. and Jackson, R. (1967). "A fluid mechanical description of fluidized beds", I & EC Fundam, 6: pp. 527-534.

Bowen, R. M. (1976). "Theory of mixtures", In A. C. Eringen, editor, Continuum Physics, Academic Press, New York, pp. 1-127.

Leschziner, M. A., and Rodi, W., (1979), "Calculation of strongly curved open channel flow," J. Hydraulic Engineering, ASCE, 103(10), pp. 1297-1314.

Johannesson H., Parker, G., (1989). "Velocity redistribution in meandering rivers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(10), pp. 1010-1039.

Keating, A. and Nesic, S., (1999), "Prediction of two-phase erosion-corrosion in bends," [http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf99/papers/035keat.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf99/papers/035keat.pdf)

Jia, Y., Wang, S. Y. Y., and Xu, Y., (2002). "Validation and application of a 2D model to channels with complex geometry," International Journal of Computational Engineering Science, Vol. 3, No. 1 (March 2002), pp. 57-71.

Wilson, C. A. M. E., Boxall, J. B., Guymer, I. and Olsen N. R. B., (2003). "Validation of a three-dimensional numerical code in the simulation of pseudo-natural meandering flows", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 129(10), pp. 758-768.

Odgaard, A. J. and Bergs, M. A. (1988). "Flow processes in a curved alluvial channel", *Water Resources Research*, 24 (1), pp. 45-56.

Duan, J.G. and Julien, P.Y., (2005). "Numerical simulation of the inception of channel meandering," <http://www.azwaterinstitute.org>

Fluent 6.2 Documentation, User's Guide, Fluent Inc., (2005).

Hinze, J.O., (1975). "Turbulence", McGraw-Hill Publishing Co., New York.

Hoffmans, G. J., (1997). "Scour manual", A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Yen, C. L. and Lee, K. T., (1995), "Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(8), pp. 591-599.

$\alpha_{s,max}$	حداکثر مقدار بخش حجم رسوب
$\Delta z$	تغییرات تراز بستر
$\varepsilon_f$	نرخ کاهش انرژی جنبشی تلاطم
$\theta$	زاویه بین سرعت متوسط ذره و سرعت متوسط نسبی آن
$\Theta_s$	دمای ذرات
$\lambda_s$	لزجت توده‌ای
$\mu_f$	لزجت برشی آب
$\mu_s$	لزجت برشی ذرات رسوب
$\mu_{s,col}$	لزجت در اثر برخورد
$\mu_{s,fr}$	لزجت اصطکاکی
$\mu_{s,kin}$	لزجت جنبشی
$\mu_{t,f}$	لزجت تلاطم
$\vec{v}_{dr}$	سرعت متوسط شناوری ذرات در اثر میدان سرعت
$\vec{v}_f$	سرعت متوسط فاز آب
$\vec{v}_s$	سرعت متوسط فاز رسوب
$\vec{v}_{sf}$	سرعت نسبی بین فازهای جامد و مایع
$\rho_f$	جرم حجمی آب
$\rho_s$	جرم حجمی رسوب
$\tau_f$	تانسور تنش فاز مایع
$\tau_s$	تانسور تنش فاز جامد
$\tau_{t,f}$	مشخصه زمانی گردابه‌های تلاطمی پر قدرت

## ۱۱- منابع

- صفرزاده، ا. و صالحی نیشابوری، س.ع.ا. (۱۳۸۴). "مطالعه هیدرودینامیکی الگوی جریان آشفتنه در قوس رودخانه با استفاده از مدل عددی سه بعدی"، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال یکم، شماره ۳، پائیز ۱۳۸۴، ۶۵-۷۷.
- دهقانی، ا.ا.، قدسیان، م.، صالحی، س.ع.ا.، و شفیعی فر، م. (۱۳۸۶). "بررسی تغییرات بستر کانالهای آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه"، نشریه علمی- پژوهشی هیدرولیک، تابستان ۱۳۸۶.