

مدل سازی عددی آب شستگی در محل تنگ شدگی کوله پل

سپهر کریمی¹، امیر رضا زراتی^{2*}

1- دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد عمران آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

2- استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

* تهران، صندوق پستی، 15875-4413

Zarrati@aut.ac.ir

چکیده- با توجه به پیشرفت روز افزون قدرت رایانه ها و توسعه مدل های عددی توانمند که قادر به شبیه سازی جریان و انتقال رسوب به صورت سه بعدی می باشند، افق جدیدی در نحوه محاسبات برای مهندسان گشوده شده است. هدف این مقاله مدل سازی عددی سه بعدی جریان و رسوب در محل تنگ شدگی یک پل به منظور محاسبه آب شستگی در اطراف کوله ها می باشد. برای این منظور به دلیل قابلیت های زیاد مدل عددی SSIM2، این مدل انتخاب و از آن استفاده شده است. در تحقیق حاضر، این مدل در شبیه سازی تنگ شدگی در اثر قرارگیری کوله پل در بستر صلب و فرسایش پذیر بکار گرفته شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان داد دقت مدل عددی در پیش بینی تراز سطح آب و توزیع سرعت خوب است، ولی هر مقدار اختلال در جریان اطراف کوله به علت بالارفتن دبی یا افزایش طول کوله زیاد شود، خطای مدل عددی نیز افزایش می یابد. مدل عددی برای تغییرات بستر و عمق آب شستگی اطراف کوله نیز بررسی شد و نتایج نشان داد مدل عددی تغییرات بستر را در مقایسه با مدل آزمایشگاهی به خوبی پیش بینی کرده و محل حداکثر عمق آب شستگی را به درستی تعیین می کند. ولی عمق حفره آب شستگی در مسأله مورد بررسی در حدود 16% از نتایج آزمایشگاهی کمتر بدست آمد. با توجه به نتایج حاصله، دقت مدل عددی مذکور برای مدل سازی تنگ شدگی به عنوان یکی از مسائل مهندسی رودخانه مشخص شده است.

کلیدواژگان: مدل سازی عددی سه بعدی، تنگ شدگی، کوله پل، انتقال رسوب، آب شستگی.

1- مقدمه

چند دهه اخیر استفاده از مدل های عددی که به کمک حل معادلات اصلی حاکم، به تحلیل جریان در رودخانه ها می پردازند، بسیار معمول شده است و با افزایش قدرت رایانه ها، مدل های عددی نیز توسعه یافته اند. در شرایط ساده می توان از مدل های عددی یک بعدی به همراه محاسبه حمل رسوب برای پیش بینی آب شستگی و رسوب گذاری استفاده نمود (Wong 2006, Szykiewicz 1995, Ballos and Sakkas 1987). کاربرد

در مسائل مهندسی رودخانه از قبیل ساماندهی و طرح سازه های رودخانه ای، لازم است که مهندسان بتوانند توزیع سرعت و تنش و تراز سطح آب را در شرایط مختلف پیش بینی و محاسبه نمایند. تحلیل جریان در اطراف تنگ شدگی دارای پیچیدگی های زیادی است که طبیعت کاملاً سه بعدی جریان، به همراه جریان های ثانویه و چرخشی، از جمله ویژگی های بارز آن است. در

مدل‌های دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق و همچنین مدل‌های سه‌بعدی با فرض فشار هیدرواستاتیک، برای حل معادلات در آب‌های کم عمق که در آن‌ها جریان‌های ثانویه در عمق شدید نیست، گزارش شده است (Kuipers and Vreugdenhil 1973, van Rijn 1987, Jin and Steffler, 1993, Zarrati et al. 2005) و هادیان و زراتی، 1388.

Miglio و همکارانش (2005) روشی را برای ترکیب مدلسازی دوبعدی و یک‌بعدی ارائه دادند. هدف آن‌ها کاهش هزینه‌های حل کاملاً دوبعدی بوده است. Yang و همکارانش (2007) ترکیب مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی را به منظور شبیه‌سازی جریان حاصل از شکست سد در رودخانه به کار برده‌اند. Biglari و Turm در سال 1998 با استفاده از مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق و مدل آشفستگی ($k-\epsilon$), یک مدل عددی برای جریان در اطراف کوله‌ها با دیوار قائم واقع در دشت سیلابی کانال‌های مرکب توسعه دادند. در این مدل بستر صلب فرض شده است.

در مسائل پیچیده‌تر به دلیل تغییرات زیاد فشار و وجود جریان‌های ثانویه قوی در عمق و سرعت‌های عمودی، لازم است از مدل‌های سه‌بعدی کامل در پیش‌بینی میدان سرعت، سطح آب و انتقال رسوب استفاده شود. در دهه اخیر استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر برای مدلسازی سه‌بعدی شرایط جریان و رسوب با در اختیار داشتن رایانه‌های پرسرعت امکان‌پذیر و معمول شده است. تاکنون تعداد زیادی از مدل‌های سه‌بعدی همراه با انتقال رسوب توسعه داده شده‌اند که قادر هستند پدیده‌های پیچیده هیدرولیکی را، خصوصاً در مهندسی رودخانه، شبیه‌سازی نمایند (Wang and Adeff 1986, Demuren 1991, Majumdar et al. 1992, Olsen and Stokseth 1995, Olsen and Kjellesvig 1998, Huang et al. 2002).

Giri و همکاران در سال 2004 محدوده جریان و آشفستگی

اطراف آبشکن در یک خم کانال بصورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در بررسی آن‌ها خصوصیات جریان اطراف کوله‌ها توسط دستگاه ADV در آزمایشگاه برداشت شده و سپس یک مدل عددی برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان و آشفستگی ارائه شده است. Haltigin و همکاران در سال 2007 هندسه حفره آبشستگی را نزدیک آبشکن با مدل سه‌بعدی عددی بررسی کردند. در این تحقیق آبشکن با سه زاویه 45، 90 و 135 درجه نسبت به جریان بالادست مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که طول و زوایای مختلف این سازه‌ها بر هندسه حفره آبشستگی تاثیر دارد. همچنین آنان بیشترین فرسایش را برای زاویه 45 درجه و کمترین فرسایش را برای زاویه 135 درجه بدست آوردند.

با وجود مطالعات عددی زیاد انجام شده در سال‌های اخیر، تاکنون مطالعاتی در زمینه دقت مدل‌های عددی در محل تنگ‌شدگی یک پل به دلیل احداث کوله در مسیر جریان انجام نشده است. برای اطمینان از میزان دقت مدل‌های عددی، باید این مدل‌ها در موارد مشابه به کار گرفته شوند تا فرض‌ها و تقریب‌های موجود در آن‌ها شناسایی شوند. با توجه به نبود اطلاعات از دقت مدل‌های سه‌بعدی در مدلسازی جریان و آبشستگی در محل تنگ‌شدگی (پل) هدف تحقیق حاضر انجام چنین مدلسازی و مقایسه با چند نمونه از کارهای آزمایشگاهی در محل تنگ‌شدگی پل به عنوان یکی از مسائل مهم و پیچیده در مهندسی رودخانه می‌باشد. در این مطالعه از مدل عددی سه‌بعدی SSIIM2 استفاده شده است (Olsen, 2004) که علت انتخاب آن استفاده از شبکه بی‌سازمان و سیستم چند بلوکه، مدل‌های آشفستگی پیشرفته و الگوریتم‌های حل متنوع، توانایی مدل کردن هندسه‌های پیچیده، قابلیت شبیه‌سازی انتقال رسوب و هم چنین دسترسی این مدل به صورت رایگان می‌باشد.

2- معادلات حاکم

معادلات جریان در نرم افزار SSIIM، معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر استوکس معروف به معادلات رینولدز (RANS) است. فرم کلی این معادلات که شامل یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنت می باشند، به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = B_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

در این معادلات ρ جرم مخصوص سیال، u_i سرعت جریان در جهت محور x_i ، B_i نیروهای حجمی (ثقلی)، μ لزجت دینامیکی سیال و μ_t لزجت آشفتگی می باشد. لزجت آشفتگی نامعلوم بوده و برای به دست آوردن آن نیاز به مدل آشفتگی است. نرم افزار SSIIM از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG که توسط Yakhot و همکارانش توسعه داده شده است، استفاده می کند. مدل RNG توانایی های بیشتری در مدل سازی پدیده های پیچیده و خصوصاً جدایی جریان دارد. در مدل های $k-\varepsilon$ مقدار μ_t از رابطه (3) به دست می آید (Yakhot and Smith, 1992):

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

که در آن C_μ یک ضریب تجربی است که معمولاً برابر 0/09 در نظر گرفته می شود. k انرژی جنبشی آشفتگی و ε نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی هستند. تفاوت مدل های مختلف $k-\varepsilon$ در تعیین مقادیر k و ε می باشد. در مدل RNG از معادلات (4) و (5) استفاده می شود:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_j \right)_j + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_j = & \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_j \right)_j + C_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} S_{ij} \\ & - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^3}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji})$$

که در آن C_1 و C_2 ضرایب تجربی، S_{ij} تانسور تنش و σ_k و σ_ε نیز به ترتیب اعداد پراتل و اشمیت آشفته می باشد. مدل RNG به علت داشتن ترم های بیشتر در معادله ε جریان های بر روی سطوح دارای انحنا، جدایی جریان و جریان های چرخشی را بهتر مدل می نماید (Yakhot and Smith, 1992). برای محاسبه انتقال رسوبات، آن را به دو دسته بار بستر و بار معلق تقسیم می کنند که غلظت بار معلق از معادله جابجایی - پخش به صورت رابطه (6) محاسبه می شود (van Rijn, 1984):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

که در آن c غلظت رسوبات w سرعت سقوط ذرات رسوب، x_i بعد مختصات و Γ ضریب پخشیدگی آشفتگی است (Olsen, 2004):

$$\Gamma = \frac{v_t}{\sigma_s} \quad (7)$$

$v_t = \mu_t / \rho$ و مقدار σ_s بین 0/7 تا 1/0 منظور می شود. برای محاسبه غلظت رسوبات نزدیک بستر که به عنوان شرط مرزی در حل معادله انتقال بار معلق بکار می رود، در SSIIM از فرمول Van Rijn استفاده می شود که رابطه آن به صورت (8) می باشد (Van Rijn, 1984):

$$c_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{1.5}}{a \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho v^2} \right)^{0.1}} \quad (8)$$

که در آن c_{bed} غلظت رسوبات نزدیک بستر، d قطر ذرات رسوب، ρ_s جرم مخصوص مصالح بستر، a ارتفاع معادل زبری رسوبات است که مقدار آن زمانی که فرم های بستر وجود ندارد، برابر زبری معادل و زمانی که فرم های بستر وجود دارد، برابر نصف ارتفاع متوسط فرم های بستر می باشد. τ تنش برشی بستر τ_c تنش برشی بحرانی برای حرکت رسوبات است که از روش شیلدز به دست می آید. برای محاسبه بار بستر به طور پیش فرض در نرم افزار از فرمول تجربی بار بستر van Rijn استفاده می شود که به

صورت رابطه (9) است (van Rijn, 1987).

$$\frac{q_b}{d^{1.5} \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) g}} = 0.053 \frac{\left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right)^{1.5}}{d^{0.3} \left(\frac{(\rho_s - \rho) g}{\rho v^2}\right)^{0.1}} \quad (9)$$

که در آن q_b دبی بار بستر در واحد عرض و v لزجت سینماتیکی سیال است. در نرم‌افزار SSIIM برای شرط مرزی دیواره‌ها و بستر از تابع دیوار استاندارد استفاده می‌شود. شکل کلی این تابع برای سطوح زیر به صورت رابطه (10) می‌باشد (Schlichting, 2000).

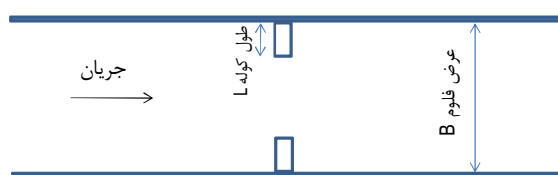
$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{30Y}{k_s}\right) \quad (10)$$

که در آن k_s زبری یکنواخت معادل، u سرعت در فاصله Y از دیواره، u_* سرعت برشی و κ ثابت فن‌کارمن و برابر $0/4$ است. برای محاسبه سطح آزاد در نرم‌افزار در هرگام زمانی سطح آب ثابت در نظر گرفته می‌شود، سپس با استفاده از میدان فشار و سرعت و با استفاده از یک نقطه ثابت به عنوان مبنا، تغییرات زمانی و مکانی سطح آب محاسبه شده و شبکه به هنگام می‌شود. برای مرزهای ورودی دبی معلوم و برای مرزهای خروجی سطح آب ثابت منظور می‌شود. الگوریتم منقطع‌سازی در نرم‌افزار SSIIM حجم محدود بوده و برای کوپل معادلات سرعت-فشار از الگوریتم SIMPLE و برای محاسبه شارها از روش قانون توانی Upwind مرتبه دوم استفاده می‌شود (Olsen, 2004).

3- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی

3-1-3- مشخصات مدل آزمایشگاهی در بستر صلب

کلاتتری در سال 1385 مطالعاتی بر روی الگوی جریان در اطراف کوله‌های پل با بستر صلب و فرسایش پذیر انجام داد. در این مطالعات، آزمایش‌ها در فلومی به طول 14 متر و با عرض 0/75 متر انجام شد. آزمایش‌ها با بستر صلب با دو عمق پایاب (h) 10 و 15 سانتی‌متر و دو دبی



شکل 1 نمایی از فلوم و قرارگیری کوله‌ها

3-2-3- مشخصات مدل آزمایشگاهی در بستر فرسایش‌پذیر

آزمایش با بستر فرسایش‌پذیر با عمق پایاب 19 سانتی‌متر انجام شده است. طول کوله‌ها در این آزمایش 11 سانتی‌متر است.

جدول 1 مشخصات جریان‌ها در مدل‌سازی بستر صلب

Code	L (cm)	Q (lit/s)	h (cm) پایاب	V (cm/s) بالادست	Fr بالادست
Run 1 - R	15	29/3	10	39/86	0/40
Run 2 - R	15	11/12	10	15/13	0/15
Run 3 - R	25	29/3	10	39/86	0/40
Run 4 - R	25	29/3	15	26/58	0/27
Run 5 - R	25	11/12	10	15/13	0/15
Run 6 - R	25	11/12	15	10/09	0/10

آزمایش با تنش متوسط بستر بالادست تنگ‌شدگی در حد 0/85 تنش بحرانی ذرات بستر و تا زمان به تعادل رسیدن عمق تعادل آب‌شستگی انجام شده است و پس از زهکشی فلوم، با نصب فاصله‌سنج لیزری که بتواند در راستای طولی و عرضی فلوم حرکت کند، مقدار آب‌شستگی

جریان در نواحی کوله از مدل RNG برای مدل سازی آشفتگی استفاده شده است.

4-2- بستر فرسایش پذیر

ابعاد شبکه در طول برابر 3 سانتی متر، در عرض 2 سانتی متر و در عمق به تدریج از 9 میلی متر در نزدیکی سطح آزاد به 3 میلی متر در نزدیکی بستر کاهش پیدا کرده است. همچنین به دلیل پیچیدگی جریان در اطراف کوله ها، تقریباً از یک متر بالادست تا یک متر پایین تر از محل قرارگیری کوله ها، سلول ها ریزتر شده اند تا جواب ها دقیق تر باشد. بستر فرسایش پذیر در نظر گرفته شده و مطابق شرایط آزمایشگاهی قطر دانه های بستر برابر 0/00098 متر لحاظ شده است. زمان اجرای برنامه تا رسیدن به زمان تعادل بستر (زمانی که مقدار آبشستگی با گذشت زمان به صفر برسد)، 4 روز بوده است. جهت اجرای برنامه، از یک رایانه دو هسته ای با پردازنده 2 گیگاهرتز استفاده شده و زمان اجرا بیش از هر عامل دیگر تحت تأثیر تعداد سلول ها و بازه زمانی (Δt) انتخاب شده برای اجرای برنامه به صورت غیردائمی می باشد. نمونه ای از شبکه بندی در شکل 2 آورده شده است.

همچنین در تمامی مدل ها از شرط مرزی دبی معلوم برای ورودی و فشار معلوم (عمق معلوم) برای خروجی و برای دیواره ها و کف نیز از فرم استاندارد تابع دیوار استفاده شده است.

4-5- نتایج مدل عددی

نتایج مدل عددی در بستر صلب در دو قسمت سطح آزاد و پروفیل های سرعت و در بستر فرسایش پذیر به صورت مقایسه بین توپوگرافی بستر فرسایش یافته در آزمایشگاه و مدل عددی ارائه شده است.

4-5-1- سطح آزاد در بستر صلب

با توجه به مقاطع عرضی نشان داده شده در شکل 3،

در هر نقطه قرائت شده و مختصات آن نقطه برداشت شده است. بدین ترتیب با برداشت مختصات نزدیک به 320 نقطه، تغییرات توپوگرافی بستر رسم شده است. در جدول 2، مشخصات جریان در بستر فرسایش پذیر که برای شبیه سازی با نرم افزار SSIIM استفاده گردیده، ارائه شده است.

جدول 2 مشخصات جریان در مدل سازی بستر فرسایش پذیر

Code	L (cm)	Q (lit/s)	h(cm)	V (cm/s)	Fr	u^*/u^*_c
Run - M	11	50	19	34/63	0/25	0/85

4- شبکه بندی و شرایط مرزی میدان محاسباتی

4-1-4- بستر صلب

مدل سازی عددی همانند شرایط آزمایشگاهی در کانالی به طول 14 متر صورت گرفت. لازم به ذکر است در کلیه اجراهایی که در قسمت های بعد خواهد آمد، عدم وابستگی جواب ها به اندازه سلول های شبکه مورد توجه قرار گرفته است. به این منظور تعداد سلول های محاسباتی طی چند اجرا افزایش یافته است (اندازه سلول ها کاهش یافته است) و جواب ها تا آنجا که دیگر با ریزتر کردن شبکه محاسباتی تغییری قابل توجه در جواب های مدل ایجاد نشود، مقایسه شده است.

ابعاد شبکه در طول برابر 5 سانتی متر، در عرض 2/5 سانتی متر و در عمق به دلیل گرادین زیاد سرعت در این ناحیه، به تدریج از 9 میلی متر در نزدیکی سطح آزاد به 3 میلی متر در نزدیکی بستر کاهش پیدا کرده است. همچنین به دلیل پیچیدگی جریان در اطراف کوله ها، از یک متر بالادست تا یک متر پایین تر از محل قرارگیری کوله ها، سلول ها ریزتر شده اند تا جواب ها دقیق تر باشد. برای مدل سازی از یک رایانه دو هسته ای با پردازنده 2 گیگاهرتز استفاده شده است که با شرایط شبکه بندی اشاره شده، زمان اجرا تا همگرایی برنامه، 15 ساعت بوده است. در اجرای برنامه در بستر صلب، به دلیل پیچیدگی

به آزمایش Run 3 - R می‌باشد که منجر به شکل‌گیری گردابه‌های بزرگتر و قوی‌تر و همچنین اختلال بیشتر در جریان در ناحیه اطراف کوله می‌شود، از این‌رو، بیشترین مقدار خطای مدل عددی در این آزمایش مشاهده شده است.

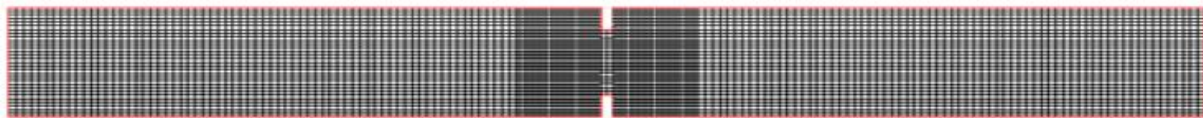
جدول 3 خطا در پیش‌بینی سطح آب بین داده‌های

آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی

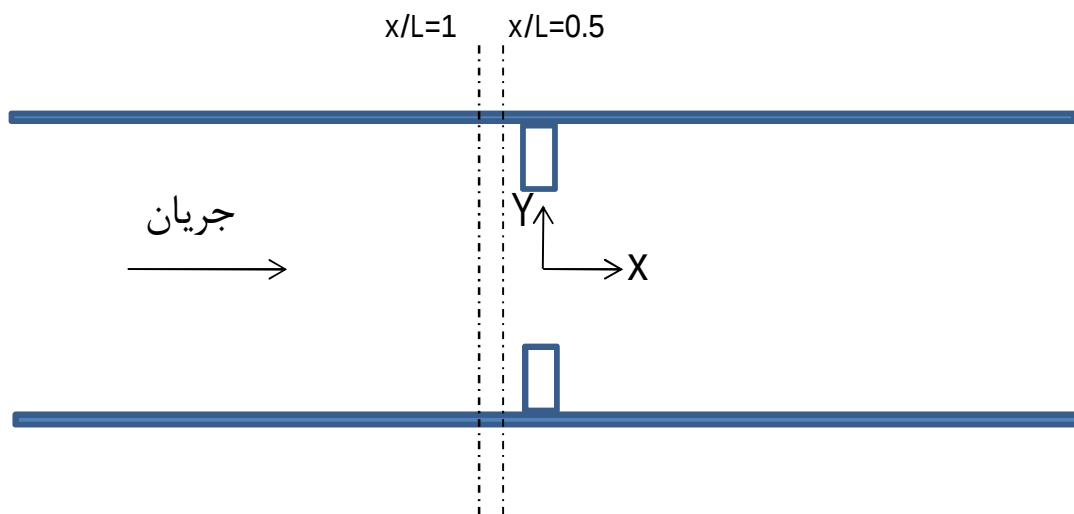
Code	L (cm)	Q (lit/s)	h (cm)	Max. Error (%)
Run 1 - R	15	29.3	10	4/04
Run 2 - R	15	11.12	10	2/12
Run 3 - R	25	29.3	10	8/11
Run 4 - R	25	29.3	15	7/24
Run 5 - R	25	11.12	10	3/03
Run 6 - R	25	11.12	15	5/56

پروفیل‌های سطح آب در دو مقطع عرضی $X/L=0/5$ و $X/L=1$ در آزمایش‌های ارائه شده در جدول 1، در شکل 4 آورده شده است که در آن L طول کوله می‌باشد. همان‌طور که از شکل 4 مشاهده می‌شود، مدل سه‌بعدی تغییرات تراز آب را در چنین شرایط پیچیده‌ای با تقریب خوبی نشان می‌دهد. خطای محاسباتی در پیش‌بینی سطح آب در اجراهای مختلف حداکثر 8 درصد بوده است که در جدول 3 آورده شده است. با بررسی جدول 3 مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار خطا مربوط به آزمایش Run 3 - R و کمترین مقدار خطا در آزمایش Run 2 - R بوده است.

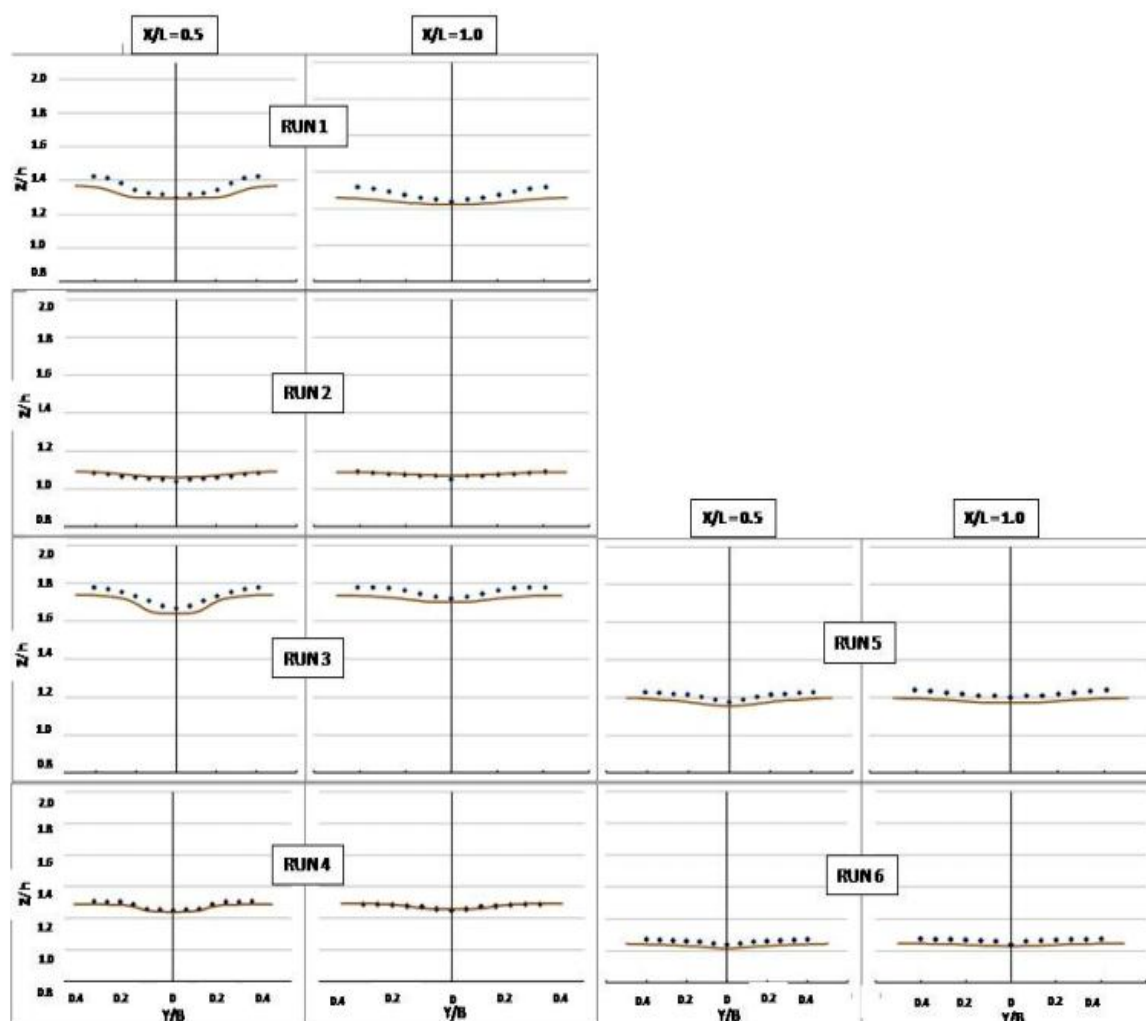
با توجه به این‌که در بین آزمایش‌های انجام شده، بزرگ‌ترین میزان تنگ‌شدگی (طول کوله برابر 25 سانتی‌متر) و بیشترین مقدار دبی (29 لیتر بر ثانیه)، مربوط



شکل 2 نمونه‌ای از شبکه‌بندی میدان محاسباتی در مدل‌سازی بستر فرسایش‌پذیر



شکل 3 پلان فلووم و مقاطع عرضی ارائه شده برای منحنی‌های سطح آزاد



شکل 4 مقایسه پروفیل‌های سطح آب در مدل آزمایشگاهی و عددی (خط پیوسته نتایج عددی و نقاط نتایج آزمایشگاهی)

مختصات (شکل 5) u سرعت در راستای طولی فلوم (جهت مثبت در جهت جریان است)، v سرعت در راستای عرضی فلوم (جهت مثبت به سمت کوله است) و w سرعت در راستای عمود بر بستر (جهت مثبت به سمت سطح آزاد است) می باشد.

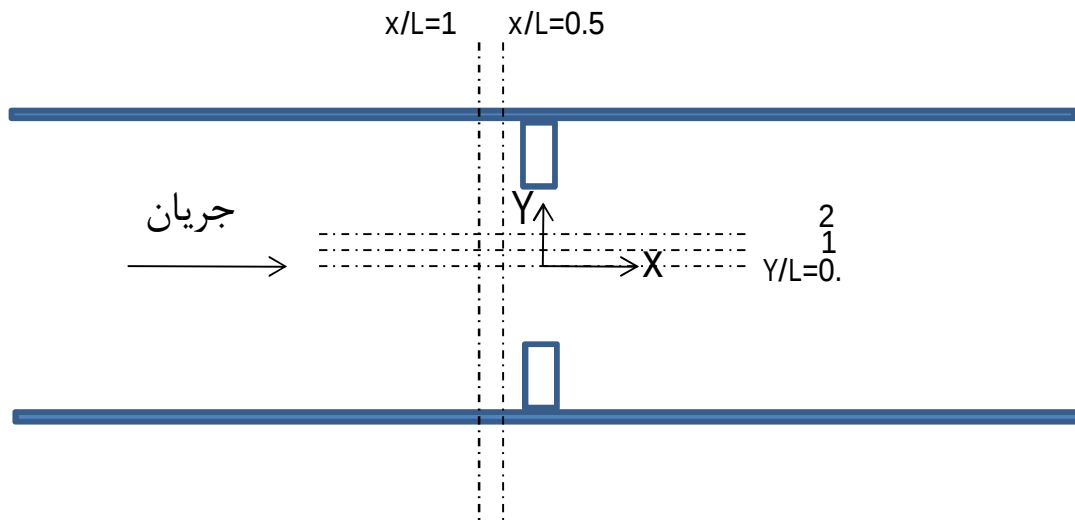
با توجه به حداکثر خطای $4/3$ درصدی در مقایسه پروفیل‌های سرعت در مدل عددی و آزمایشگاهی، می‌توان دریافت مدل عددی قابلیت بالایی در تخمین پروفیل‌های سرعت دارد. از آنجا که مقاطع انتخاب شده برای رسم پروفیل‌های سرعت در شکل‌های 6 تا 8، مقاطعی نزدیک به کوله می‌باشند، در نتیجه اختلال در جریان و شکل‌گیری جریان‌های چرخشی در این ناحیه

از طرفی در آزمایش Run 2 - R که کوچک‌ترین میزان تنگ‌شدگی (طول کوله برابر 15 سانتی‌متر) و کمترین مقدار دبی (11 لیتر بر ثانیه) را داراست، خطای کمتری نیز رخ داده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان از این مدل برای محاسبه میزان بالازدگی سطح آب در بالادست یک تنگ‌شدگی (مثل پل) استفاده کرد.

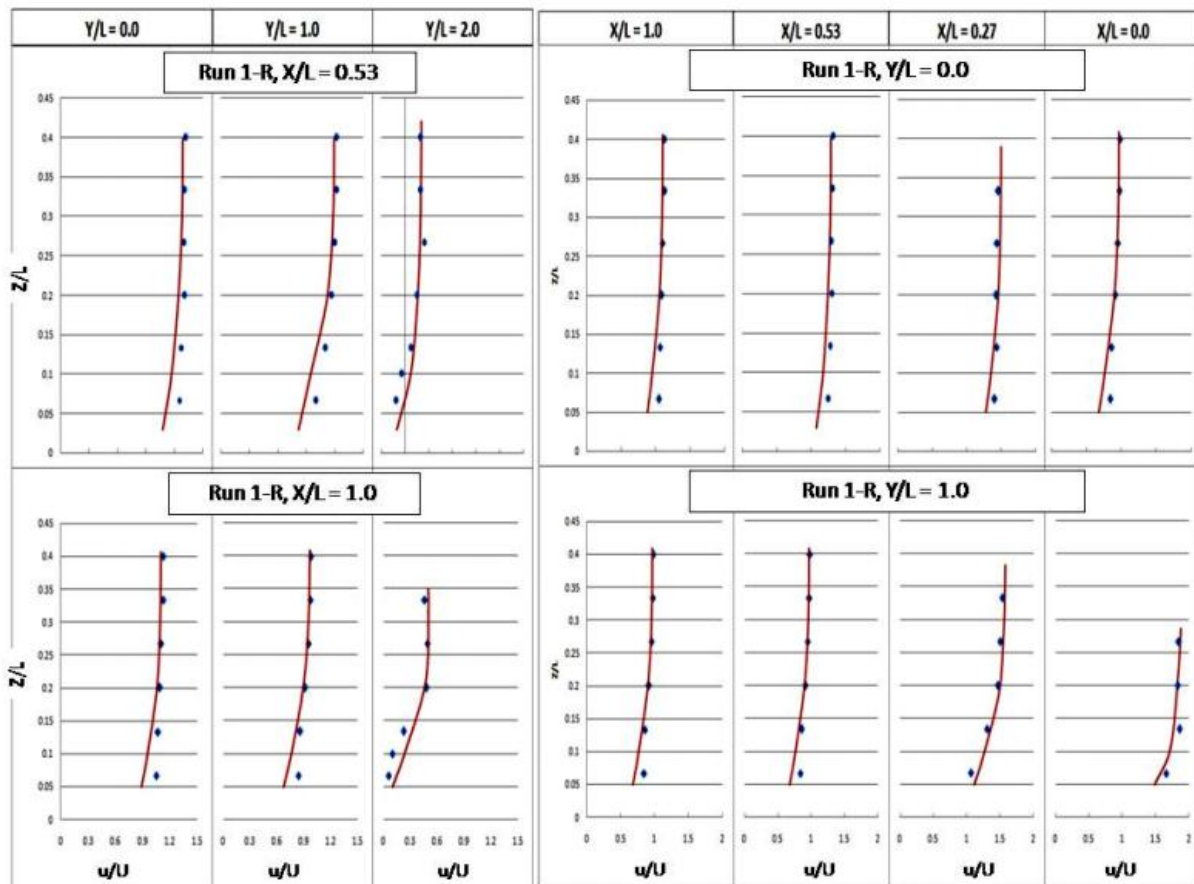
2-5- پروفیل‌های سرعت در بستر صلب

مقایسه‌ای از پروفیل‌های سرعت در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای بعضی آزمایش‌های اشاره شده در جدول 1 در مقاطع مختلف نشان داده شده در شکل 5 در شکل‌های 6 تا 8، آمده است. با توجه به محورهای

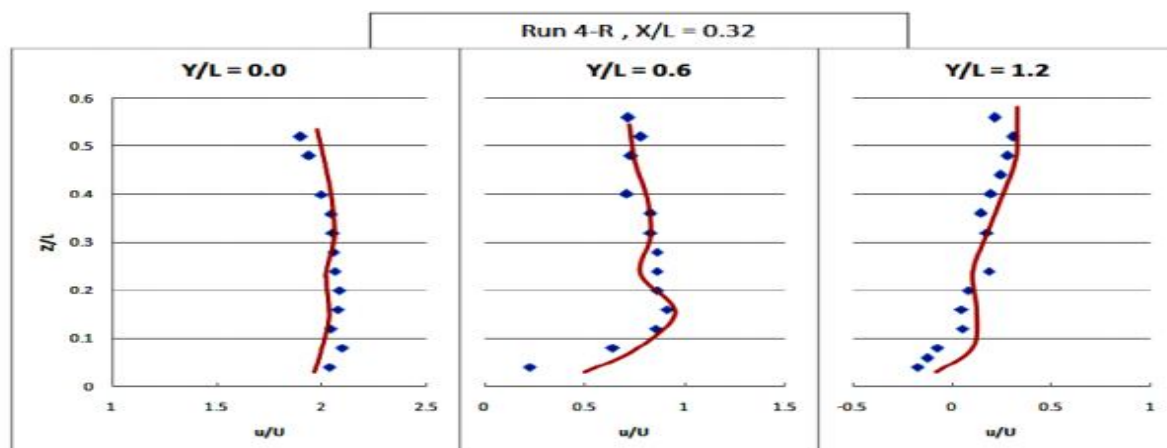
زیاد بوده و میزان خطای ایجاد شده قابل توجه است (مطلب فوق در شکل 7 بیشتر نمایان است).



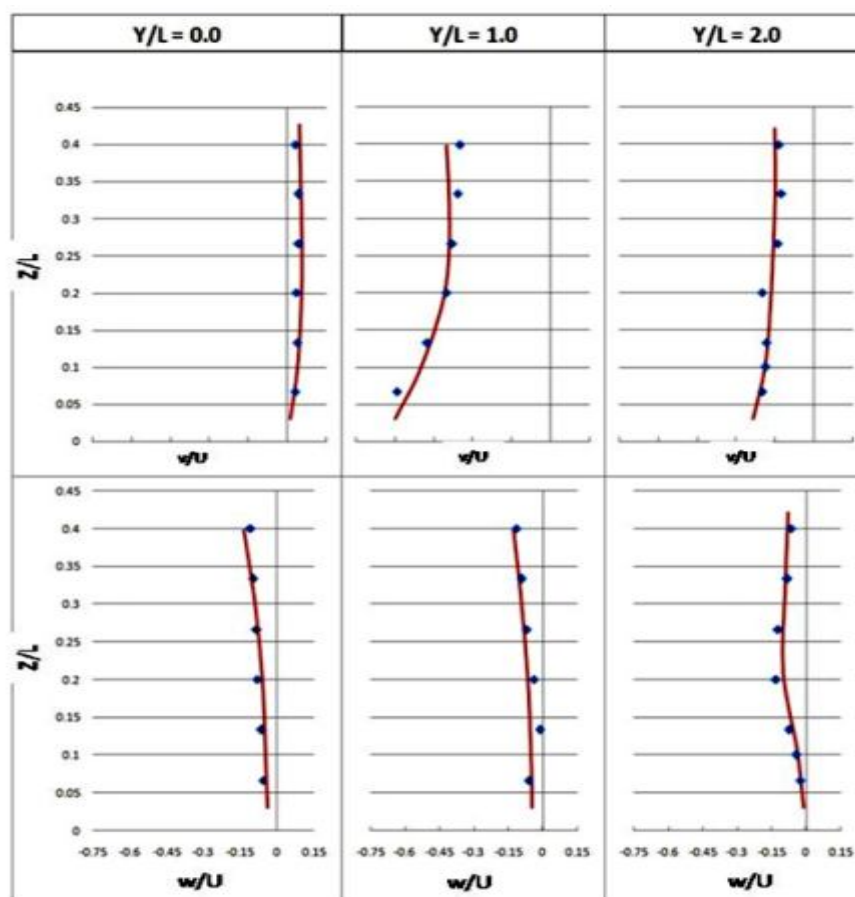
شکل 5 محل مقاطع عرضی و طولی برای پروفیل‌های سرعت



شکل 6 پروفیل سرعت در راستای X در آزمایش RUN1-R (خطوط پیوسته نتایج عددی و نقاط نتایج آزمایشگاهی)



شکل 7 پروفیل سرعت در راستای X در آزمایش RUN4-R (خطوط پیوسته نتایج عددی و نقاط نتایج آزمایشگاهی)



شکل 8 پروفیل سرعت در راستای Y و Z در آزمایش RUN1-R (خطوط پیوسته نتایج عددی و نقاط نتایج آزمایشگاهی)

خصوصاً برای جریان بر روی سطوح دارای انحنا، جدایی جریان و جریان های چرخشی مناسب تر است. لذا برای

همان طور که اشاره شد مدل RNG در مقایسه با مدل $k-\varepsilon$ استاندارد، برای مدلسازی پدیده های پیچیده و

پایین‌دست آن است. همچنین مصالح شسته شده، در پایین‌دست کوله (در ناحیه $X/B < 1$) ریخته شده، لذا تراز بستر در این ناحیه کمی بالاتر آمده است. برای مقایسه بهتر تغییرات بستر، بر اساس محل مقاطع ارائه شده در شکل 10 منحنی آب‌شستگی در سه مقطع عرضی و دو مقطع طولی در شکل های 11 و 12 نشان داده شده است.

پس از مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی، می‌توان دریافت که مدل عددی، محل حداکثر عمق آب‌شستگی در بالادست کوله را به درستی تخمین زده است و در پیش‌بینی مقادیر آب‌شستگی خطای حداکثر 16 درصد دارد. با توجه به اینکه در بسیاری از موارد استفاده از روابط تجربی برای محاسبه حداکثر عمق آب‌شستگی در مجاورت کوله خطایی بیش از این مقدار را به همراه دارد و از طرفی با توجه به جزئیاتی مثل توزیع سرعت و تنش‌که از مدل عددی حاصل می‌شود، نتایج خوب ارزیابی می‌شود.

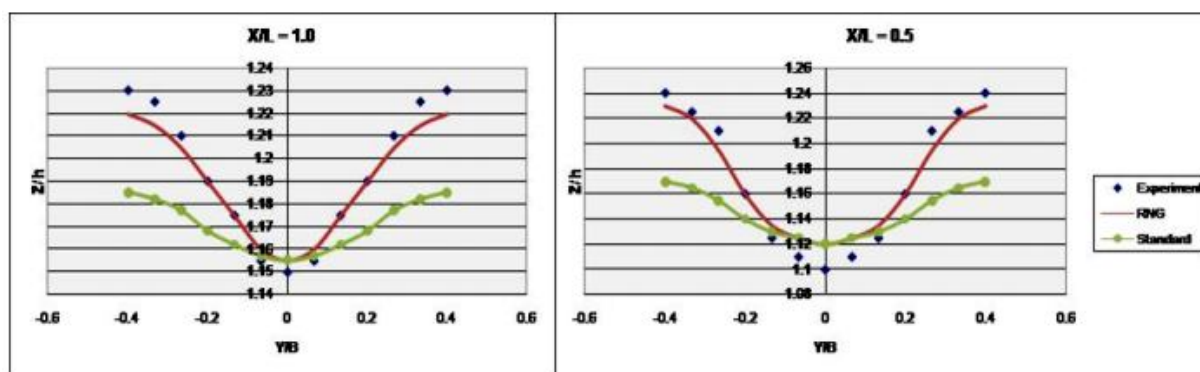
به دلیل وجود اختلال زیاد در جریان و شکل‌گیری جریان‌های چرخشی در مجاورت کوله، این میزان خطا برای یک مدل عددی برای پیش‌بینی آب‌شستگی قابل قبول به نظر می‌رسد.

مقایسه بین نتایج مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ RNG و استاندارد در تخمین پروفیل سطح آزاد آب، مدل Run 1 - R در جدول 1 با مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد نیز اجرا شده است. مقایسه‌ای از مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ RNG و استاندارد در شکل 9 مشاهده می‌شود. در شکل 9 منحنی تراز سطح آب در دو مقطع عرضی $X/L=0/5$ و $X/L=1$ آورد شده (مقاطع در شکل 3 نشان داده شده است). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل آشفته‌گی RNG در تخمین پروفیل سطح آب قابل قبول‌تر است. با توجه به شکل 9، حداکثر خطای پروفیل سطح آزاد آب در مدل استاندارد، 9 درصد و در مدل RNG، 2/8 درصد بوده است.

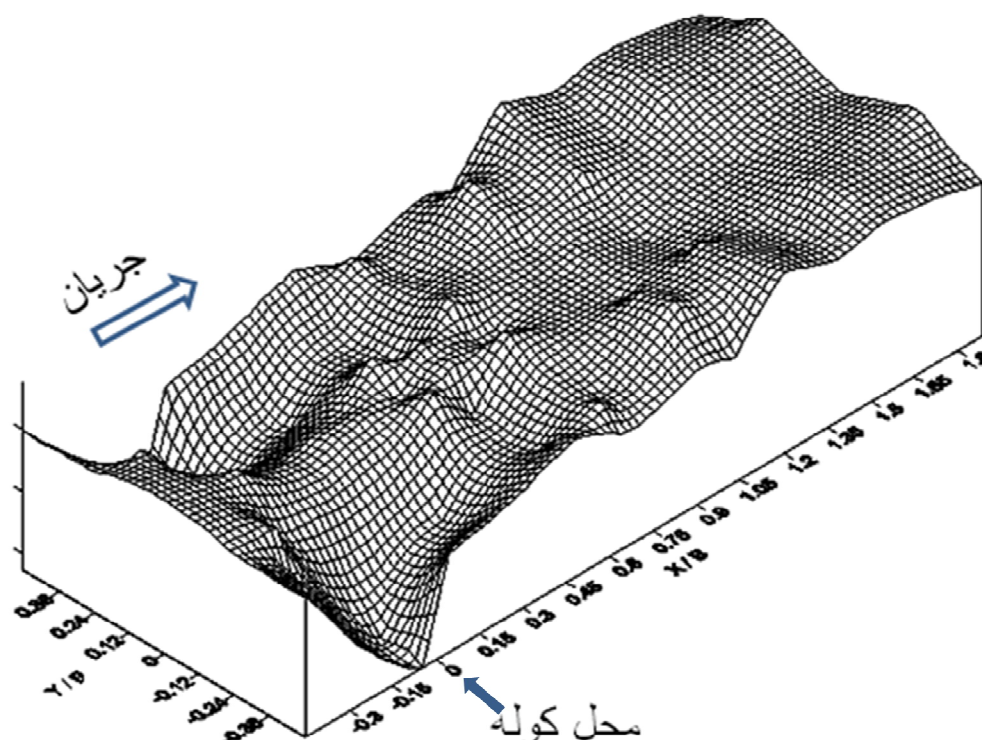
3-5- نتایج مدل عددی در بستر فرسایش‌پذیر

با توجه به شرایط جریان ارائه شده در جدول 2 و شرایط مرزی لحاظ شده، شکل نهائی بستر محاسبه شده در شکل 10 آورده شده است.

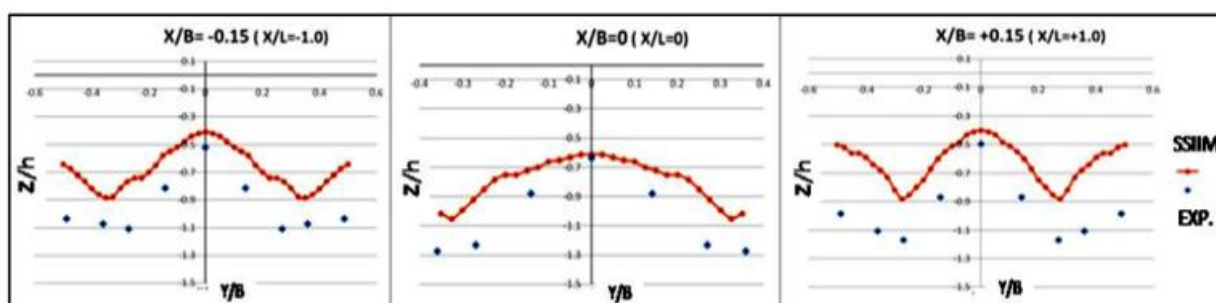
همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود دو حفره آب‌شستگی در وسط فلولم به هم رسیده و این ناحیه نیز دچار آب‌شستگی شده است (پروفیل عرضی تراز بستر در شکل 12 آورده شده است). از طرفی می‌توان دریافت که شیب حفره آب‌شستگی در بالادست کوله بیشتر از شیب



شکل 9 مقایسه‌ای بین تراز سطح آب بین دو مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG



شکل 10 شمای سه بعدی تغییرات بستر از مدل عددی (کوله در ناحیه $X/B = -0.05$ تا 0.05 و $Y/B = \pm 0.35$ تا ± 0.5 قرار دارد)

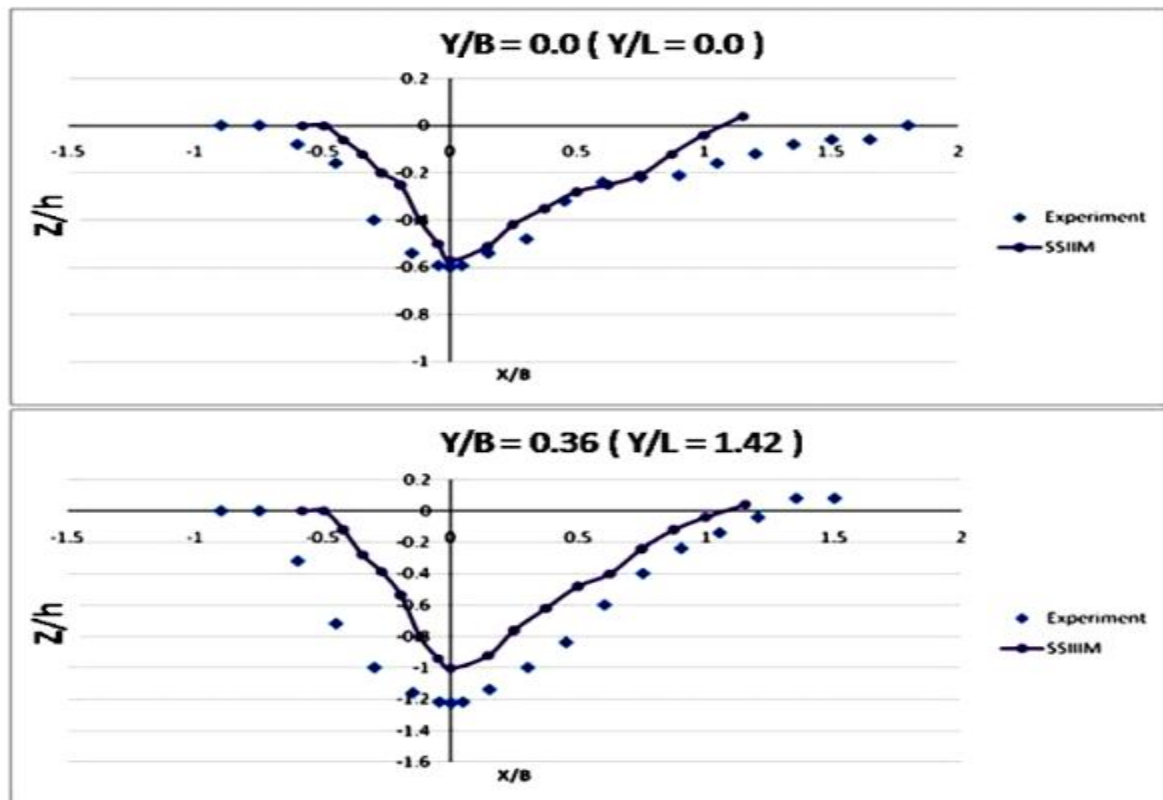


شکل 11 منحنی آب شستگی در مقاطع عرضی (خط: نتایج عددی، نقطه: نتایج آزمایشگاهی)

6- نتیجه گیری

با توجه به محدودیت‌های مدل‌های فیزیکی، استفاده از مدل‌های عددی سه بعدی در مسائل پیچیده مهندسی رودخانه می‌تواند از نظر زمان و هزینه بسیار مقرون به صرفه باشد. با این حال کاربرد مدل‌های عددی سه بعدی مستلزم شناخت دقت محاسبات و تقریب‌ها در مسائل مختلف می‌باشد. در این مقاله مدل عددی سه بعدی جریان

و انتقال رسوب SSIIM2 برای تحلیل جریان و آب شستگی در تنگ‌شدگی مقطع کانال به دلیل قرارگیری کوله پل در بستر صلب و فرسایش پذیر به کار گرفته شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهند، مدل عددی استفاده شده، در شبیه‌سازی پروفیل‌های سه بعدی، الگوی جریان و محاسبه سطح آزاد و میزان بالادگی آن، مقادیری قابل قبول پیش‌بینی می‌نماید.



شکل 12 منحنی آب شستگی در مقاطع طولی

در پیش بینی تغییرات بستر و عمق آب شستگی، مدل تغییرات بستر را در مقایسه با مدل آزمایشگاهی به خوبی نشان داده و محل حداکثر عمق آب شستگی را به درستی تعیین می کند. ولی عمق حفره آب شستگی را در حدود 16% کمتر از نتایج آزمایشگاهی پیش بینی می نماید. با توجه به مطالب فوق می توان گفت دقت مدل های عددی سه بعدی مانند مدلی که در این مقاله از آن استفاده شده است، با توجه به دقت مورد نیاز در کارهای مهندسی در حد قابل قبولی قرار داشته و می توان در مسائل پیچیده حرکت آب و رسوب در مهندسی رودخانه مثل آب شستگی در اطراف کوله ها و آب شکن ها از آن استفاده کرد.

7- فهرست علائم

B_i	نیروهای حجمی (ثقلی)
C_μ	ضریب تجربی
C_2, C_1	ضرایب تجربی
C_{bed}	غلظت رسوبات نزدیک بستر
c	غلظت رسوبات
d	قطر ذرات رسوب
Fr	عدد فرود در بالادست محل تنگ شدگی
h	عمق پایاب
k	انرژی جنبشی آشفتگی
k_s	زبری یکنواخت معادل
L	طول کوله
q_b	دبی بار بستر در واحد عرض
Q	دبی
S_{ij}	تانسور تنش
u_i	سرعت جریان در جهت محور X_i
u^*	سرعت برشی

a

ارتفاع معادل زبری رسوبات

"Predicting equilibrium scour-hole geometry near angled stream deflectors using a three-dimensional numerical flow model", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 8, pp. 983-988

Huang, J. C., Weber, L. J. and Lai, Y. G. (2002). "Three-dimensional numerical study of flows in open channel junctions", J. Hydr. Eng. ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 268-280.

Jin, Y. C., and Steffler, P. M. (1993). "Predicting flow in curved open channels by depth-averaged method", J. Hydr. Eng. ASCE., Vol. 119, No. 1, pp. 109-124.

Kuipers, J., and Vreugdenhil, C. B. (1973). "Calculation of two dimensional horizontal flow", Report S163, part 1, Delft Hydraulics Lab., Delft, the Netherlands.

Majumdar, S., Rodi, W., and Zhu, J. (1992). "Three-dimensional finite volume method for incompressible flows with complex boundaries", J. Fluids Engrg., Vol. 114, pp. 496-503.

Miglio, S. Perotto, F. Saleri (2005). "Model coupling techniques for free-surface flow problems: Part I", Nonlinear Analysis 63, e1885 – e1896.

Olsen, N.R.B and Stokseth, S. (1995). "Three-dimensional numerical modeling of water flow in a river with large bed roughness", J. Hydraul. Res. IAHR, Vol. 33, No. 4, pp. 571-581.

Olsen, N. R. B. and Kjellesvig, H. M. (1998). "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth", Journal of Hydraulic Research, No. 4, pp. 579-590.

Olsen, N.R.B. (2004). SSIIM Users' Manual. The Norwegian University of Science and Technology.

Schlichting and Gersten, (2000). Boundary layer theory, Springer, 8th Edition, p. 799.

Szykiewicz, R. (1995). "Method to solve 1D unsteady transport and flow equations", ASCE, J. Hydr. Eng., Vol. 121, No. 5, pp. 396-403.

van Rijn, L.C. (1984). "Sediment transport, part ii: suspended load transport", J. Hydr. Eng. ASCE., Vol. 110, No. 11, pp. 1613-1641.

van Rijn, L. C. (1987). "Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport", Delft Hydr. Communication, No. 382, Delft, the Nederland.

Wang, S. S.-Y., and Adeff, S. E. (1986). "Three-dimensional modeling of river sedimentation processes", Proc., 3rd Int. Symp. on River Sedimentation, University of Mississippi.

u_{*c}	سرعت برشی بحرانی
V	سرعت متوسط در بالادست محل تنگ شدگی
w	سرعت سقوط ذرات رسوب
P	جرم مخصوص سیال
ρ_s	جرم مخصوص مصالح
μ	لزجت دینامیکی
μ_t	لزجت آشفتگی
ε	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی
σ_k و σ_s	به ترتیب اعداد پراوتل و اشمیت آشفتگی
Γ	ضرب پخشیدگی آشفتگی
τ^*	تنش برشی بستر
τ_c	تنش برشی بحرانی برای حرکت رسوبات
ν	لزجت سینماتیکی
κ	ثابت فن کارمن

8- منابع

کلانتری سید سجاد (1385). مطالعه آزمایشگاهی شرایط جریان در یک تنگ شدگی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

هادیان محمد رضا و زراتی امیر رضا (1388). مدل‌های عددی آب‌های کم عمق و کاربرد آنها در مهندسی رودخانه و سواحل، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ص. 311.

Ballos, C. V. and Sakkas, J. G. (1987). "1-D dam-break flood-wave propagation on dry bed", ASCE, J. Hydr. Eng., Vol. 113, No.12, pp. 1510-1524.

Biglari B. and Sturm T. W. (1998). "Numerical modeling of flow around bridge abutments in compound channels", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 156-164.

Demuren, A. O. (1991). "Development of a mathematical model for sediment transport in meandering rivers", Rep. No. 693, Inst. for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.

Giri, S., Shimizu, Y., and Surajate B. (2004). "Laboratory measurement and numerical simulation of flow and turbulence in a meandering-like flume with spurs", J. Flow Measurement and Instrumentation, 15, pp. 301-309.

Haltigin W., Biron P. and Lapointe M. (2007).

derivation of turbulence models”, J. Sci. Comput., Vol. 7, No. 35, pp. 35-61.

Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere, New York.

Zarrati, A. R., Tamai, N. and Jin, Y. C. (2005). “Mathematical modeling of meandering channels with a generalized depth averaged model”, ASCE, J. Hydr. Eng., Vol. 131, No. 6, pp. 467-475.

Wong, M. (2006). “One-dimensional modeling of bed evolution in gravel bed river subject to cycled flood hydrograph”, J. Geophysical Res., Vol. 111, No. F3, F03018.

Yang Fang-li, Zhang Xiao-feng and Tan Guang-ming (2007) “One- and two-dimensional coupled hydrodynamics model for dam break flow”, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 19(6), pp. 769-775.

Yakhot, V. and Smith, L.M. (1992) “The renormalization group, the expansion, and