

شبیه‌سازی آب‌شستگی و میدان جریان در اطراف تک شمع با استفاده از مدل عددی SSIIM

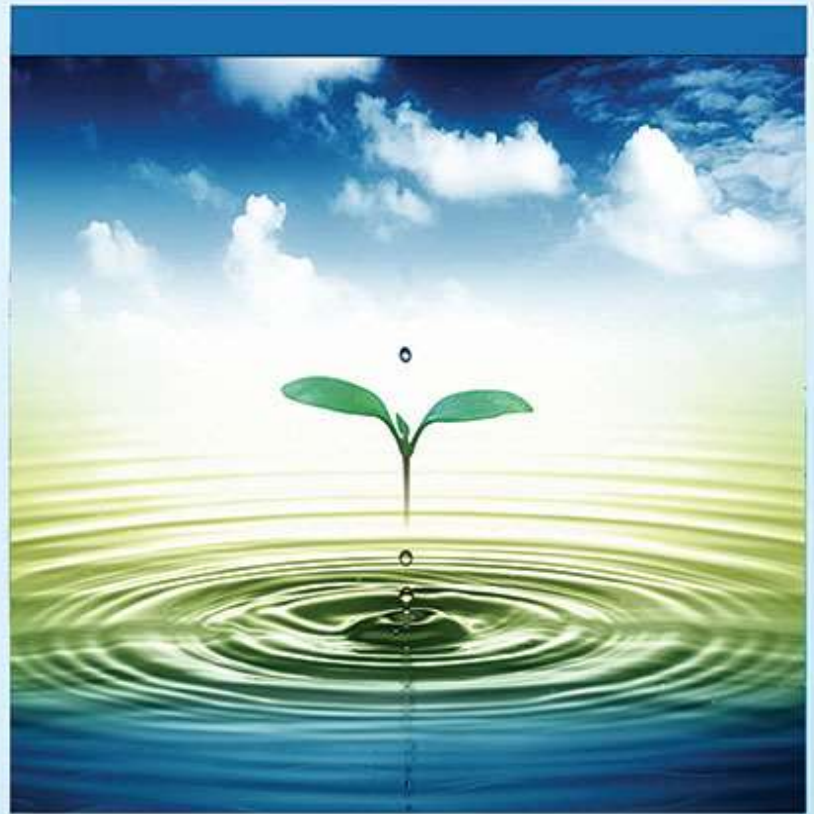
امیررضا حمیدی، حامد نوری و سید علی‌اصغر هاشمی

دوره ۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحات ۳۳۳ - ۳۴۵

Vol. 2(4), Winter 2017, 333 -345

**Numerical Simulation of Scour and Flow  
Field around Single Pier using SSIIM**

Hamidi A. R., Noori H. and Hashemi  
A. A.



[www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

OPEN  ACCESS

نحوه ارجاع به این مقاله: حمیدی ا.، نوری ح. و هاشمی ع.ا. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی آب‌شستگی و میدان جریان در اطراف تک شمع با استفاده از مدل عددی SSIIM، محیط‌زیست و مهندسی آب، جلد ۲، شماره ۴، صفحات: ۳۳۳-۳۴۵

**How to cite this paper:** Hamidi A. R., Noori H. and Hashemi A. A. (2017). Numerical simulation of scour and flow field around single pier using SSIIM, J. Environ. Water Eng. 2(4), 333- 345

## شبیه‌سازی آب‌شستگی و میدان جریان در اطراف تک شمع با استفاده از مدل عددی SSIIM

امیررضا حمیدی<sup>۱\*</sup>، حامد نوری<sup>۲</sup> و سید علی اصغر هاشمی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سمنان، ایران

\*نویسنده مسئول: amirreza\_hamidi@alumni.iust.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۰۷/۱۶]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۰۹/۲۲]

### چکیده

آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پل که در معرض جریان قرار دارند اجتناب‌ناپذیر است. برآورد عمق آب‌شستگی و فهم الگوی جریان اطراف پایه می‌تواند کمک زیادی به طراحی ایمن پایه کند. در این مطالعه از مدل عددی SSIIM به‌عنوان یک مدل دینامیک محاسباتی سیالات (CFD) برای مدل‌سازی هم‌زمان جریان و رسوب در اطراف تک‌شمع در معرض جریان استفاده شد. از داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی مربوط به تک‌شمع برای صحت‌سنجی این مدل استفاده شد. همچنین برای بررسی بهتر، نتایج محاسبات آب‌شستگی و الگوی جریان پیرامون پایه به‌صورت گرافیکی و عددی در زمان‌های گوناگون از آغاز شبیه‌سازی بررسی شد. در این مدل معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس برای جریان به همراه مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  حل و از خروجی‌های محاسبات جریان برای معادلات انتقال رسوب استفاده شد. مقایسه‌ی نتایج آب‌شستگی مدل SSIIM با نتایج آزمایشگاهی کارایی بهتر این مدل نسبت به برخی روابط تجربی موجود برای تخمین عمق آب‌شستگی حداکثر است. الگوی جریان مدل نیز جریانی رو به پایین در جلوی پایه و جریانی رو به بالا در پشت پایه را به‌خوبی نشان می‌دهد که مقدار جریان رو به پایین تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

**واژگان کلیدی:** پایه پل، حفره آب‌شستگی، شبیه‌سازی عددی، رسوب‌گذاری، مدل SSIIM

## ۱- مقدمه

آب‌شستگی یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه است. بستر رودخانه‌ها در طول عمر خود همواره در اثر عبور جریان آب در حال رسوب‌گذاری و رسوب‌برداری است. آب‌شستگی در حالت کلی به دودسته‌ی آب‌شستگی انقباضی<sup>۱</sup> و آب‌شستگی موضعی<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. حالت انقباضی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع جریان و آب‌شستگی موضعی ناشی از فرارگیری موانعی در مسیر جریان هستند. (Beheshti and Ashtiani 2008) در آب‌شستگی موضعی، تغییر در اندازه‌ی سرعت و جهت جریان سبب ایجاد فرسایش در اطراف مانع موردنظر می‌شود. مهم‌ترین عامل فرسایش پیرامون پایه‌ی پل‌های در مسیر جریان، آب‌شستگی موضعی است که می‌تواند باعث خرابی پل‌ها گردد (Sadeghian et al. 2012). هنگامی که پایه‌ی پل در مسیر جریان آب قرار می‌گیرد، تغییر رفتار جریان سبب ایجاد آب‌شستگی در اطراف شمع می‌شود. در این حالت سیستم اصلی که به تشکیل حفره‌های آب‌شستگی کمک می‌کند، گردابه‌های نعل اسبی<sup>۳</sup> است (Hajebi and Meftah-Helghi 2015). این گردابه‌ها در اثر انسداد جریان توسط پایه و انحراف آن به طرف پایین ایجاد می‌شود که نظیر یک جت عمودی آب عمل کرده و ذرات رسوب جلو و کناره‌ی پایه‌ی پل را همراه جریان به بالا پرتاب نموده و جریان آب آن‌ها را با خود حمل می‌کند. در نتیجه این جریان چرخشی، گودالی را در جلوی شمع ایجاد می‌کند (Baareh et al. 2006). همچنین در اثر برخورد جریان به پایه‌ی پل و جدایی آن، در پشت پایه یک ناحیه‌ی کم‌فشار به وجود می‌آید و سبب تشکیل جریانی رو به بالا و رو به عقب در این ناحیه می‌شود که به این چرخش جریان، گردابه‌ی دنباله‌ای<sup>۴</sup> می‌گویند. این ناحیه مانند یک گردباد، ذرات پشت شمع را به سمت بالا مکیده و سبب ایجاد آب‌شستگی در پشت شمع می‌شود. از زمانی که آب‌شستگی موضعی به‌عنوان یک مسئله‌ی مهم در هیدرولیک مطرح شده است، مطالعاتی برای برآورد آب‌شستگی با استفاده از مدل‌های فیزیکی آزمایشگاهی انجام شده و روابط متعددی برای تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی به دست آمده است. (Melville and Sutherlands, 1988) با انجام آزمایش‌هایی پارامترهای شدت و عمق جریان، زاویه‌ی برخورد جریان به پایه، شکل پایه و اندازه‌ی ذرات رسوبی را به‌طور هم‌زمان در برآورد بیش‌ترین عمق فرسایش یافته‌ی پیرامون پایه مؤثر دانستند. نتایج مطالعات آن‌ها به‌صورت رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود:

$$d_s/D = K_1 K_d K_y K_a K_s \quad (1)$$

که ضرایب K به ترتیب ضریب شدت جریان، ضریب اندازه ذرات، ضریب عمق جریان، ضریب زاویه‌ی برخورد جریان به پایه و ضریب شکل پایه پل هستند. همچنین (Melville and Chiew, 1999) علاوه بر این عوامل، اثر پارامتر زمان را نیز در تخمین مقدار آب‌شستگی در نظر گرفته و با استفاده از روابطی، حداکثر عمق فرسایش یافته در هر زمانی را به‌صورت نسبتی از مقدار آب‌شستگی نهایی بیان کردند. (Richardson and Davis, 2001) در قالب تحقیقاتی که برای اداره فدرال‌های بزرگراه‌های امریکا انجام دادند، رابطه‌ی (۲) را برای برآورد آب‌شستگی تک‌شمع ارائه دادند.

$$d_s/D = 2.0 \times K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{h}{D} \right)^{0.35} \times (Fr)^{0.43} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲) ضرایب K به ترتیب ضریب تأثیر شکل پایه، ضریب زاویه برخورد جریان، ضریب شرایط بستر و ضریب اندازه ذرات بستر هستند که برای به دست آوردن مقادیر آن‌ها جداولی وجود دارند (Richardson and Davis 2001). همچنین h عمق جریان، D قطر پایه پل و Fr عدد فرود جریان هستند. در سال‌های اخیر به سبب پیشرفت رایانه‌ها، استفاده از مدل‌های عددی افزایش پیدا کرده است. از مزایای کدهای عددی نسبت به مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به کم‌هزینه بودن، صرف زمان کمتر و در

<sup>1</sup> Contraction scour

<sup>2</sup> Local scour

<sup>3</sup> Horseshoe vortex

<sup>4</sup> Wake vortex

دسترس بودن بیش‌تر آن اشاره کرد (Salaheldin et al. 2004). مدل SSIIM یک مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی آب و رسوب است که در دپارتمان مهندسی هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ توسعه‌یافته و در حل مسائل هیدرولیک نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Hajebi and Meftah-Helghi, 2015). از آن جمله می‌توان به مطالعه‌ی (Vaghefi et al. 2015) اشاره نمود. در این مقاله مدل عددی SSIIM جهت تعیین میزان و محدوده آب‌شستگی و رسوب‌گذاری در قوس‌های کانال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای قوس‌های ملایم در شرایط نصب عمودی آب‌شکن در وسط قوس، مقدار نسبت آب‌شستگی بیشینه به عمق جریان ورودی کانال، برابر با ۱/۳۵ و مقدار نسبت رسوب‌گذاری بیشینه به عمق جریان ورودی کانال، برابر با ۰/۵۲ است. همچنین در خصوص سرعت‌های طولی و برآیند سرعت‌های افقی، مدل SSIIM و مدل آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند ولی دیتاهای سرعت عرضی و عمودی کاملاً بر هم منطبق نبوده است. در پژوهشی دیگر (Mahjoob et al. 2015) میزان آب‌شستگی ناشی از پایه پل در مقطع با تنگ‌شدگی طولانی توسط مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی کردند؛ نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش مقدار نسبت تنگ‌شدگی، افزایش قطر ذرات رسوبی، انتخاب پایه پل با شکل مقطع مناسب و بافاصله قرار دادن پایه پل از ابتدای تنگ‌شدگی و مرزهای کناری مقدار آب‌شستگی در اطراف پایه پل به حداقل می‌رسد. (Norouzi et al. 2009) با مقدار خطای ناچیزی توانستند آب‌شستگی حول آب‌شکن تیغه‌ای را با استفاده از مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی کنند. (NajiAbhari et al. 2009) نیز تأثیر موقعیت آب‌شکن بر روی الگوی آب‌شستگی را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی در یک قوس ۹۰ درجه بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش موقعیت قرارگیری آب‌شکن، مقدار آب‌شستگی موضعی در اطراف آب‌شکن افزایش می‌یابد. هدف از انجام این تحقیق، بررسی الگوی آب‌شستگی و جریان در اطراف تک‌پایه است. از مدل عددی SSIIM برای مدل‌سازی استفاده و نتایج مربوط به تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی با نتایج آزمایشگاهی و روابط تجربی متداول مقایسه شد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- معرفی مدل SSIIM

این مدل توسط Olsen در سال ۲۰۰۲ نوشته شد و در مهندسی رودخانه، هیدرولیک و محیط‌زیست کاربرد دارد (Olsen et al. 2007). مهم‌ترین عامل برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌های CFD موجود، قابلیت حل محاسبات انتقال رسوب در یک بستر متحرک در طی گذشت زمان است. معادلات حاکم بر این مدل به دو بخش معادلات جریان و معادلات رسوب تقسیم می‌شود.

### ۲-۱-۱- معادلات مربوط به جریان

معادلات جریان در این مدل معادلات متوسط‌گیری شده‌ی زمانی ناویر استوکس<sup>۵</sup> معروف به معادلات رینولدز هستند که به صورت رابطه‌ی (۳) بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P\delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (3)$$

که در این رابطه،  $x_j$  مکان در راستای زام است،  $U_j$  سرعت متوسط‌گیری شده‌ی جریان در جهت محورهای  $x_j$ ،  $P$  فشار آب،  $\delta_{ij}$  دلتای کرونگر<sup>۶</sup> و  $u_j$  نوسانات سرعت در گام زمانی  $\Delta t$  در جهت  $x_j$  هستند. در معادله‌ی ناویر استوکس ترم اول سمت چپ، ترم تغییرات زمانی سرعت و ترم بعدی، ترم‌های انتقالی هستند. همچنین ترم اول سمت راست، ترم فشار و ترم‌های بعدی نیز ترم‌های تنش‌های رینولدز است. برای محاسبه‌ی تنش‌های رینولدز در مدل SSIIM از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  استفاده شده است. معادلات مربوط به این مدل آشفتگی به‌صورت رابطه‌ی (۴) بیان می‌شوند (Olsen et al. 2007).

<sup>5</sup> Navier-Stokes

<sup>6</sup> Kronecker

$$\overline{\rho u_i u_j} = \rho v_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴)،  $v_T$  لزجت گردابه‌ای است و با استفاده از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

$$v_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (5)$$

$k$  انرژی جنبشی آشفتگی است و طبق رابطه‌ی (۶) حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - P_k - \varepsilon \quad (6)$$

که در این رابطه  $P_k$  برابر است با رابطه‌ی (۷):

$$P_k = v_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

$\varepsilon$  بیانگر اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی بوده و با استفاده از رابطه‌ی (۸) تعیین می‌گردد:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

در مدل SSIIM برای محاسبه‌ی سرعت در نزدیک بستر و دیواره‌ها از قانون دیواره<sup>۷</sup> استفاده می‌شود. این سرعت محاسبه شده به‌عنوان شرایط مرزی برای معادله‌ی ناویر استوکس مورد استفاده قرار می‌گیرد (Dargahi 1990). رابطه‌ی سرعت ناشی از این قانون به‌صورت رابطه‌ی (۹) بیان می‌شود.

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{30y}{k_s} \right) \quad (9)$$

که در آن  $U$  سرعت جریان در فاصله‌ی  $y$  از دیواره و موازی با آن،  $U_*$  سرعت برشی،  $k_s$  ارتفاع زبری دیواره،  $\kappa$  ثابت فون کارمن است که برابر ۰/۴ فرض شده است.

## ۲-۱-۲- معادلات مربوط به رسوب

انتقال رسوب به دو بخش بار معلق و بار بستر تقسیم‌بندی می‌شود. بار معلق با استفاده از معادله‌ی انتقال-انتشار<sup>۸</sup> برای غلظت رسوب  $c$  با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$w$  سرعت سقوط ذرات،  $\Gamma_T$  ضریب انتشار ذرات در آب<sup>۹</sup> و  $c$  غلظت حجمی ذرات است. در مدل SSIIM، ضریب انتشار برابر لزجت گردابه‌ای به‌دست‌آمده از مدل آشفتگی فرض می‌گردد. در این مدل، انتقال بار بستر به‌صورت پیش‌فرض با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) (Van Rijn, 1987) تعیین می‌شود.

<sup>7</sup> Wall laws

<sup>8</sup> Convection-Diffusion

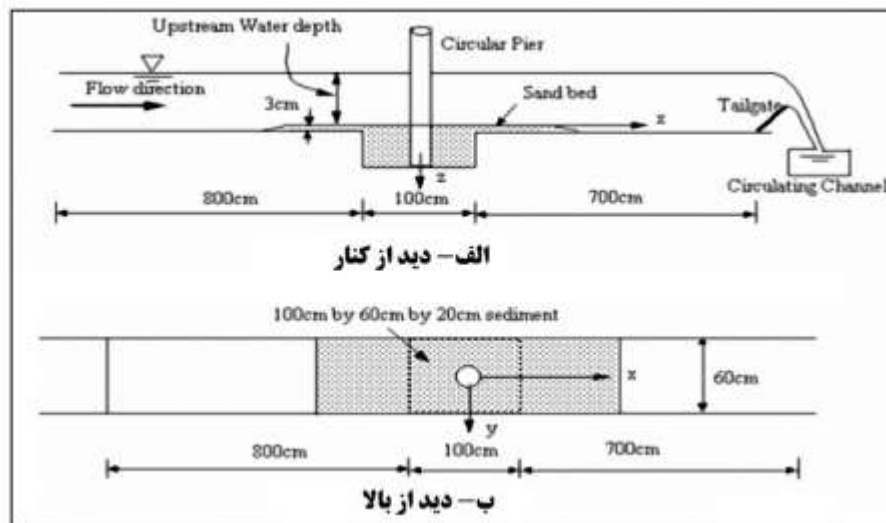
<sup>9</sup> Diffusive coefficient

$$\frac{q_b}{d_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w}}} = \frac{0.053 \left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2.1}}{d_{50}^{0.3} \left( \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w \nu^2} \right)^{0.1}} \quad (11)$$

$q_b$  مقدار شار انتقال رسوب بار بستر است.  $\tau$  تنش برشی وارد بر ذرات،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی ذرات،  $d_{50}$  اندازه‌ی میانه‌ی دانه‌های رسوبی،  $\nu$  ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال و  $\rho_s$  و  $\rho_w$  نیز به ترتیب چگالی ذرات و چگالی آب است.

## ۲-۲- داده‌های آزمایشگاهی

به‌منظور صحت‌سنجی حالت تک شمع از داده‌های آزمایشگاهی (Mia and Nago., 2003) استفاده شد. این آزمایش‌ها در جریان یکنواخت با شرایط آب تمیز و در کانالی به عرض  $60\text{ cm}$  انجام شد. جریان آب به‌وسیله‌ی یک پمپ در بالادست با دبی ثابت  $30$  لیتر بر ثانیه وارد کانال و ارتفاع جریان مقدار  $16\text{ cm}$  است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود منطقه‌ای با بستر دانه‌ای و قابل شسته شدن به طول  $100\text{ cm}$  و عرض  $60\text{ cm}$  و عمق  $57\text{ cm}$  در فاصله‌ی  $800\text{ cm}$  از ابتدای کانال تعبیه شده است. دانه‌بندی مورد استفاده در این ناحیه با قطر متوسط  $d_{50} = 1.28\text{ mm}$  و انحراف از معیار  $\sigma_g = 1.29$  است که با توجه به این که مقدار انحراف از معیار آن کم‌تر از  $1/3$  است، می‌توان دانه‌بندی را یکنواخت در نظر گرفت (Sadeghian et al. 2012). سرعت متوسط جریان بالادست برابر  $10/313\text{ m/s}$  است. در مرکز ناحیه‌ی قابل فرسایش یک شمع استوانه‌ای به قطر  $D = 6\text{ cm}$  به صورت عمودی قرار داده شده و به کف کانال چسبانده شده است. بر اساس نتایج آزمایش، بیش‌ترین عمق آب شستگی در این آزمایش برابر  $71\text{ mm}$  مشاهده گردید.

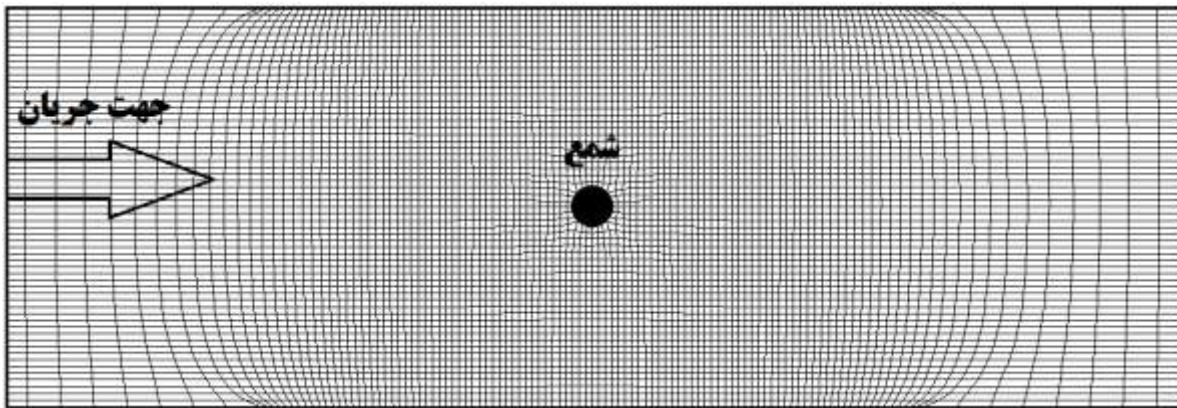


شکل ۱- مدل آزمایش تک شمع: الف- دید از کنار ب- دید از بالا (Mia and Nago, 2003)

## ۲-۳- مدل‌سازی کانال و جریان

گام نخست مدل‌سازی با استفاده از مدل عددی SSIIM تقسیم‌بندی جریان به سلول‌های حجمی یا شبکه‌بندی است. به دلیل این که انجام محاسبات مربوط به جریان و آب‌شستگی در پیرامون پایه باید با دقت بیشتری انجام شود، شبکه‌بندی جریان در  $1\text{ m}$

میانی با ابعاد ریزتری صورت گرفت. بدین ترتیب شبکه‌بندی با اندازه‌ی  $12 * 60 * 180$  سلول به ترتیب در جهت جریان، عمود بر جریان و قائم به‌عنوان شبکه‌بندی مناسب در نظر گرفته شد. شکل (۲) این شبکه‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- پلان مش‌بندی در جهت جریان و عمود بر جریان

مدل SSIM برای حل معادلات جریان و رسوب از روش گسسته‌سازی حجم محدود استفاده می‌کند. در مدل‌سازی انجام شده روش توانی<sup>۱۰</sup> مورد استفاده قرار گرفت که یک روش مرتبه اول بالاست<sup>۱۱</sup> است. جهت محاسبه‌ی فشار آب در سلول‌ها از الگوریتم SIMPLE و برای محاسبه‌ی پروفیل سطح آب از روش برون‌یابی استفاده شد. روش برون‌یابی با استفاده از یک نقطه با سطح آب ثابت در پایین دست و معادله‌ی برنولی، ارتفاع سلول‌های سطح آب را محاسبه می‌کند. در سطح آب گرادین همه‌ی متغیرها صفر است به‌جز  $k$  که مقدار آن صفر در نظر گرفته شد. پس از انجام هر بار محاسبات آب‌شستگی و تغییر تراز بستر، بر اساس اندازه ارتفاع سلول‌های در جهت قائم، تغییر اندازه می‌دهند که به این حالت، حالت گذرا<sup>۱۲</sup> گفته می‌شود. غلظت رسوب در بستر به‌عنوان شرایط مرزی برای حل معادله انتقال-پخش در نظر گرفته شد. به‌منظور رسیدن به‌دقت و همگرایی بیشتر در جواب‌های معادلات، مقادیر کوچکی برای ضرایب آسایش<sup>۱۳</sup> مورد استفاده قرار گرفت. کاهش تنش برشی بحرانی برای حرکت ذرات رسوب در بستر شیب‌دار شده ناشی از آب‌شستگی نیز از رابطه‌ی پیشنهادی (Breusers, 1977) محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- عمق و نحوه توسعه آب‌شستگی

برای رسیدن به حالت نهایی آب‌شستگی، محاسبات برای حدود ۱۱ ساعت (۶۶۰ دقیقه) انجام شد. اجرای این مدل در یک رایانه با پردازنده‌ی ۳ گیگاهرتز در حدود ۱۰ روزه طول انجامید. بر این اساس، حداکثر عمق آب‌شستگی محاسبه شده به‌وسیله‌ی مدل برابر  $75/5$  mm به دست آمد که در مقایسه با مقدار اعلام‌شده از نتایج آزمایش که برابر  $71$  mm بود، خطای  $6/3\%$  را نشان می‌دهد. برای مقایسه‌ی این مقدار خطا با روابط تجربی، از روابط (۱) و (۲) برای برآورد بیش‌ترین عمق آب‌شستگی تک‌شمع استفاده شد. در این روابط پس از تعیین ضرایب  $K$  از جداول استاندارد (Melville and Sutherlands, 1988) و در نظر گرفتن قطر شمع معادل  $6$  cm، عمق آب‌شستگی به‌صورت رابطه (۱۲) محاسبه شد:

$$\frac{d_s}{0.06} = 0.66 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 = 0.66 \rightarrow d_s = 0.0396 = 39.6 \text{ mm} \quad (12)$$

<sup>10</sup> Power-law Scheme

<sup>11</sup> First-Order Upstream Scheme

<sup>12</sup> Transient

<sup>13</sup> Relaxation factors

بدین ترتیب حداکثر عمق آب‌شستگی بر طبق روش (Melville and Sutherlands, 1988) مقدار  $39/6\text{mm}$  تخمین زده شد که با مقدار آزمایشگاهی خطایی در حدود ۴۴٪ دارد و تخمینی پایینی است. برآورد بیشترین عمق آب‌شستگی تک‌شمع با استفاده از رابطه‌ی (۲) طبق روال مرحله قبل به‌صورت رابطه (۱۳) محاسبه شد:

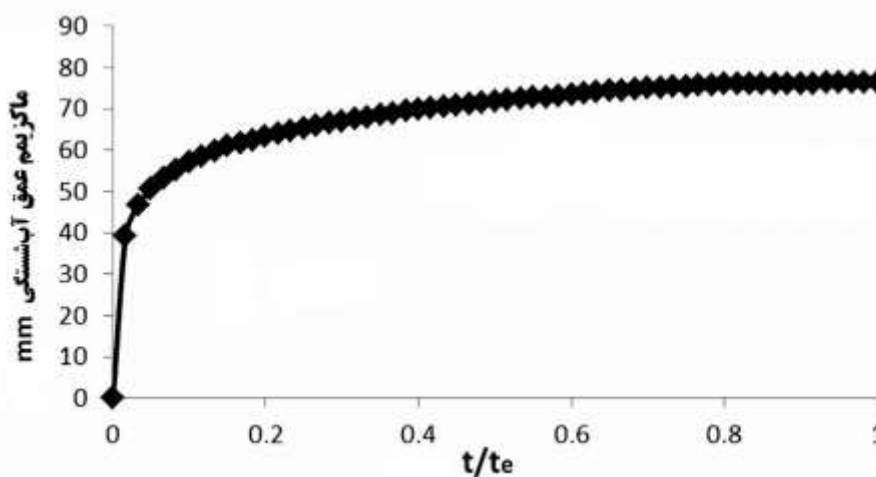
$$(13)$$

$$d_s/0.06 = 2 \times 1 \times 1 \times 1.1 \times 1 \times \left(\frac{0.16}{0.06}\right)^{0.35} \times \left(\frac{0.313}{\sqrt{9.81 \times 0.16}}\right)^{0.43} = 1.7$$

$$d_s/0.06 = 1.7 \rightarrow d_s = 0.102\text{m} = 102\text{mm}$$

حداکثر عمق آب‌شستگی که از روش (Richardson and Davis 2001) برابر  $102\text{mm}$  تخمین زده شد، خطایی برابر ۴۳٪ را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد و تخمینی بالایی است.

نمودار شکل (۳) روند تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به زمان انجام محاسبات (حدود ۱۱ ساعت) را نشان می‌دهد (که در آن  $t_e$  برابر است با زمان کل شبیه‌سازی). حدود ۷۰٪ عمق آب‌شستگی نهایی محاسبه‌شده به‌وسیله مدل در یک ساعت (۶۰ دقیقه) نخست شبیه‌سازی به دست آمد. این یافته با نتایج آزمایشگاهی (Melville and Chiew, 1999) هم‌خوانی مناسبی دارد. آن‌ها به‌وسیله نتایج آزمایشگاهی بیان کردند که ۵۰-۸۰٪ مقدار آب‌شستگی نهایی پس از گذشت ۱۰٪ زمان کل (حدود ۱۱ ساعت یا ۶۶۰ دقیقه) رخ می‌دهد.



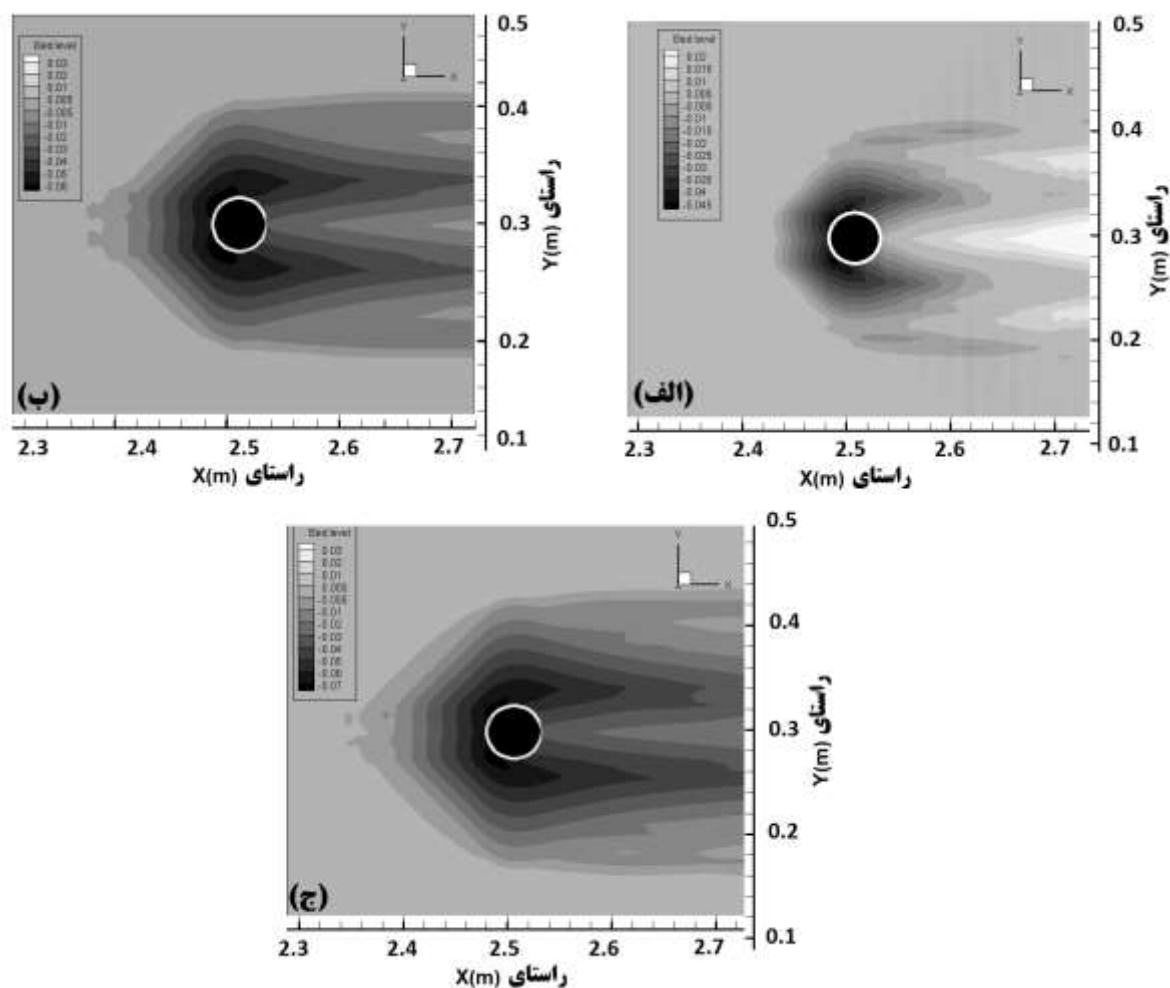
شکل ۳- نمودار مقایسه‌ی مقادیر حداکثر آب‌شستگی به زمان اجرایی مدل

مدل عددی SSIM خروجی نتایج محاسبات جریان و رسوب را به‌صورت اعداد ارائه می‌دهد که در ادامه برای نمایش بهتر و شکل‌های گرافیکی از نرم‌افزار Tecplot که یکی از ابزارهای قدرتمند رسم نمودار داده‌ها در زمینه‌ی CFD است، استفاده شد. شکل (۴) وضعیت حفره آب‌شستگی اطراف شمع را به‌صورت دید از بالا (پلان) به ترتیب در زمان‌های ۳۰ دقیقه، ۳۰۰ دقیقه و ۶۶۰ دقیقه (زمان نهایی) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود آب‌شستگی از ناحیه‌ی جلویی چسبیده به پایه با شدت بیش‌تری آغاز شده و با گذشت زمان به مناطق کناری و پشت شمع و بالادست شمع گسترش پیدا می‌کند. دلیل آن نیز افزایش دامنه‌ی فعالیت گردابه‌های نعل اسبی در جلوی پایه و گردابه‌ی دنباله‌ای در پشت شمع است. حداکثر آب‌شستگی در محدوده‌ای به زاویه‌ی ۳۰ تا ۶۰ درجه و چسبیده

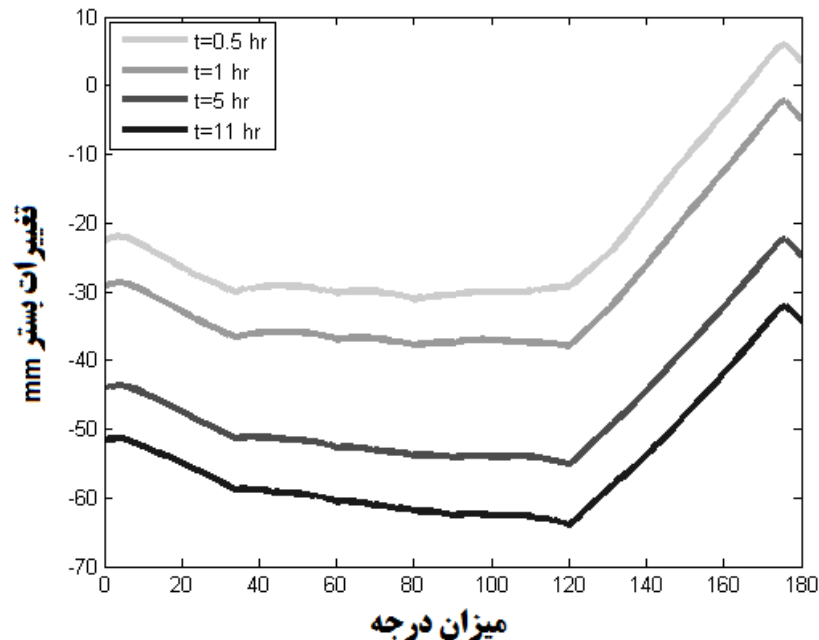


به پایه و به صورت متقارن قرار دارد که نشان می‌دهد که به صورت کلی، گردابه‌ی نعل اسبی قوی‌تر عمل کرده و این گردابه با نزدیک شدن به شمع، شدت بیش‌تری پیدا می‌کند.

برای بررسی بهتر اثر پارامتر زمان بر فرسایش نزدیک پایه، آب‌شستگی بر روی محیط دایره‌ای به شعاع  $2R$  در زمان‌های سی دقیقه، یک ساعت (۶۰ دقیقه)، پنج ساعت (۳۰۰ دقیقه) و یازده ساعت (۶۶۰ دقیقه) در شکل (۵) آورده شده است. در شکل (۵)، شعاع  $R$  شمع است و مرکز دایره بر روی مرکز پایه منطبق است. این نمودار تغییرات بستر را نسبت به زاویه‌ی نقاط محیط دایره از مرکز پایه نشان می‌دهد که در دماغه‌ی جلویی شمع که در معرض جریان قرار دارد، زاویه‌ی صفر درجه و پشت شمع زاویه‌ی  $180^\circ$  درجه در نظر گرفته شد. به دلیل تقارن آب‌شستگی نقاط موردنظر در محیط دایره، داده‌های نیم‌دایره (از زاویه‌ی صفر تا  $180^\circ$  درجه) به جای کل دایره در نمودار آورده شد. بر اساس شکل (۵)، در زمان‌های ابتدایی در پشت پایه رسوب‌گذاری دیده می‌شود. حال آنکه با گذشت زمان گردابه‌های دنباله‌ای بر عامل رسوب‌گذاری غلبه کرده و سبب آب‌شستگی در آن ناحیه می‌شود. همچنین منطقه‌ی بحرانی برای فرسایش بستر از پهلو‌ی روبه‌جلوی شمع تا پهلو‌ی رو به پشت شمع (زوایای  $80^\circ$  تا  $120^\circ$  درجه) بوده و با سپری شدن زمان تغییر خاصی در ناحیه‌ی بحرانی دیده نمی‌شود.



شکل ۴- وضعیت آب‌شستگی اطراف پایه: الف- در دقیقه‌ی ۳۰ ام. ب- در دقیقه ۳۰۰ ام. ج- در دقیقه ۶۶۰ ام

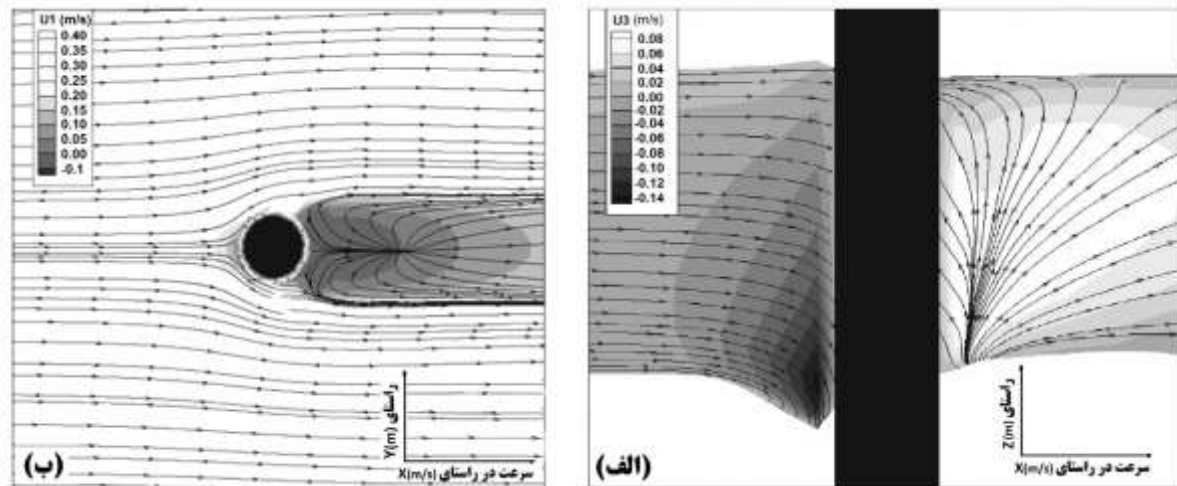


شکل ۵- نمودار تغییرات بستر بر روی محیط دایره‌ای به شعاع 2R در زمان‌های مختلف

### ۲-۳- الگوی جریان

بر طبق نتایج حاصل از اجرای مدل، بیش‌ترین مقدار سرعت رو به پایین در ناحیه جلوی نوک پایه و در زمان‌های ابتدایی شروع مدل‌سازی است. شکل (۶-الف) کانتور سرعت‌های قائم و بردارهای جریان را در مقطع طولی گذرنده از خط تقارن پایه در زمان ۱۵ دقیقه از آغاز شبیه‌سازی نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار سرعت رو به پایین تقریباً برابر ۵۵٪ سرعت متوسط بالادست است همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی (Dey and Raikar, 2007) دارد. آن‌ها حداکثر مقدار سرعت رو به پایین را برای تک پایه به قطر ۱۲cm در حدود ۶۰٪ سرعت بالادست گزارش داده‌اند. این کمتر بودن مقدار محاسبه شده می‌تواند به دلیل بزرگ بودن قطر پایه در مقایسه با قطر شمع کنونی باشد. گردابه‌های دنباله‌ای و جریان رو به بالای آن که سبب آب‌شستگی در پشت پایه می‌شود در شکل (۶-ب) مشخص است. حداکثر سرعت رو به بالا در پشت شمع برابر ۲۸٪ سرعت متوسط بالادست است که در ناحیه چسبیده به شمع قرار دارد.

با توجه به خطوط جریان در شکل (۶-الف)، جریان رو به عقب در پشت شمع با نزدیک شدن به سطح آب قوی‌تر می‌شود. دلیل آن وجود ناحیه کم‌فشار در موقعیت پشت پایه و در نزدیک سطح آب است. در همین راستا در شکل (۶-ب) کانتورهای سرعت افقی و خطوط جریان در صفحه‌ی پلان  $\frac{z}{h} = 0.95$  نمایش داده شده‌اند؛ که در آن  $z$  ارتفاع از کف بستر پس از فرسایش است. در این صفحه، ناحیه با سرعت افقی برگشتی (منفی) به گسترده‌ترین حالت خود رسیده و حداکثر مقدار این سرعت نیز برابر ۲۸٪ سرعت متوسط بالادست است. لازم به ذکر است شکل (۶-ب) مربوط به زمان ۱۵ دقیقه‌ی ابتدایی شبیه‌سازی است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، جریان رو به عقب در زمان‌های ابتدایی مقدار بیش‌تری دارد و با گذشت زمان کمی از مقدار آن کاسته می‌شود. همچنین، بیش‌ترین جریان رو به عقب همچنان در ناحیه چسبیده به پایه قرار دارد.



شکل ۶- کانتور جریان: الف- سرعت‌های قائم و بردارهای جریان در مقطع طولی گذرنده از مرکز پایه در دقیقه‌ی ۱۵ ام. ب- نمایش کانتور سرعت‌های افقی و بردارهای جریان در صفحه‌ی  $\frac{z}{h} = 0.95$  در دقیقه‌ی پانزدهم

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی جریان و آب شستگی پیرامون تک شمع در معرض جریان از مدل عددی SSIIM استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این مدل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

۱- حدود ۷۰ درصد عمق آب شستگی نهایی محاسبه شده به وسیله‌ی مدل SSIIM در یک ساعت (۶۰ دقیقه) نخست شبیه‌سازی به دست آمد؛ و حداکثر آب شستگی در محدوده‌ای به زاویه‌ی ۳۰ تا ۶۰ درجه و چسبیده به پایه و به صورت متقارن قرار دارد و گواه این امر است که گردابه‌های نعل اسبی قدرت بالاتری در آب شستگی دارند و با نزدیک شدن به شمع، شدت بیشتری پیدا می‌کند.

۲- با گذشت زمان گردابه‌های دنباله‌ای بر عامل رسوب‌گذاری غلبه کرده و سبب آب شستگی در ناحیه پشت شمع می‌شود. منطقه‌ی بحرانی برای فرسایش بستر در محدوده‌ی زوایای ۸۰ تا ۱۲۰ درجه است که با سپری شدن زمان تغییر خاصی در ناحیه‌ی بحرانی دیده نمی‌شود.

۳- بیش‌ترین مقدار سرعت رو به پایین تقریباً برابر ۵۵ درصد سرعت متوسط بالادست، در ناحیه‌ی جلوی نوک پایه و در زمان‌های ابتدایی شروع مدل‌سازی است؛ که هم‌خوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۴- نتایج الگوی جریان نشان می‌دهد این مدل می‌تواند با دقت مناسبی جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل اسبی را که عامل اصلی فرسایش در جلوی تک‌شمع است، شبیه‌سازی و محاسبه نماید.

۵- مقایسه‌ی نتایج آب شستگی مدل SSIIM با نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده‌ی مقدار خطای کم‌تر این مدل نسبت به برخی روابط تجربی موجود برای تخمین عمق آب شستگی حداکثر است؛ و مقدار خطای جزئی مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی، می‌تواند ناشی از تبدیل محیط پیوسته جریان به محیط گسسته (مش بندی) باشد.

#### ۵- تشکر و قدردانی

در پایان از زحمات فراوان خانم دکتر رستم‌آبادی و کمک‌های ایشان کمال تشکر را دارم. همچنین از همکاری انجمن هیدرولیک ایران و رئیس این انجمن جناب آقای دکتر نصیری نیز قدردانی می‌نمایم.

## References

- Baareh A., Sheat A. F. and AL-Khanifes K. (2006). Forecasting sediment load in river flow in the USA: A comparison between Auto-Regression and neural network Non-parametric models. *J. Comput. Sci.*, 2(10), 775-780.
- Beheshti A. and Ashtiani A. (2008). Numerical simulation of scour and flow field around pier group, 4<sup>th</sup> Civil Conference, University of Tehran, Tehran. Iran [In persian]
- Breusers H., Nicollet G. and Shen H. (1977). Local scour around cylindrical piers. *J. Hydraul. Res.*, 15(3), 211-252.
- Dargahi B. (1990). Controlling mechanism of local scouring. *J. Hydraul. Eng.*, 116(10), 1197-1214.
- Dey S. and Raikar R. (2007). Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers. *J. Hydraul. Eng.*, 133(4), 399-413.
- Hajebi F. and Meftah-Helghi M. (2014). 3D simulation of scouring around pier within a long contraction with applying numerical model SSIIM. *J. Water Soil Conserv.*, 21(5), 241-256 [In persian].
- Mahjoob B., Mohammadnezhad B. and Behmanesh J. (2014). Numerical modeling of local scouring around group bridge piers and compared with experimental results. *J. Water Soil*, 28(2), 267-275 [In persian].
- Melville B.W. and Chiew Y. M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.*, 125(1), 59-65.
- Melville B.W. and Raudkivi A. J. (1977). Flow characteristics in local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Res.*, 5(1), 373-380.
- Melville B.W. and Sutherlands A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.*, 114(10), 1210-1226.
- Mia F. Nago H. (2003). Design method of time dependent local scour at circular bridge pier. *J. Hydraul. Eng.*, 129(6), 212-224.
- NajiAbhari M. Ghodsian M. and Vaghefi M. (2009). Experimental and numerical flow pattern around the breakwater at a 90 degree bend. 8<sup>th</sup> Civil Conference in Iran, Shiraz University. [In persian]
- Norouzi H. Salehi S.A. Nasiri F. and Azarderakhsh M. (2009). Three dimensional numerical simulation of scouring around piers. *J. Modares Eng. Technol.*, 36, 13-23 [In persian].
- Olsen N.R.B. (1999). Computational fluid dynamics in hydraulic and sedimentation engineering, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.
- Olsen N.R.B. and Melaaen C. (1993). Three-dimensional calculation of scour around cylinders. *J. Hydraul. Eng.*, 119(9), 1048-1054.
- Richardson E. and Davis S. R. (2001). Evaluating scour at bridges (4<sup>th</sup> ed.). Federal Highway Administration Hydraulic Engineering Circular, No18, FHWA NHI 01-001.

Sadeghian A., Hadian M. and Zarrati A. (2012). Using of SSIIM application in simulation the scour hole. 11<sup>th</sup> Hydrolic Conference in Iran, Urmia univercity, Urmia, Iran [In persian].

Salaheldin T. M., Imran J. and Chaudhry M.H. (2004). Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. J. Hydraul. Eng., 130(2), 91-100.

Vaghefi M., Safarpoor Y. and Hashemi S. (2015). Determining the amount of scour and three-dimensional velocity components around the T-shape spur dike in channel bend using numerical method and experimental data. J. Irrigat. Water Eng., 19, 109-123 [In persian]

Van Rijn L. C. (1987). Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. PhD Thesis, Hydraulic and Geotechnic Engineering Departement, Delft Univercity of Technology, Delft.

## Numerical Simulation of Scour and Flow Field Around Single Pier Using SSIIM

Amirreza Hamidi<sup>1\*</sup>, Hamed Noori<sup>2</sup> and Seyed Aliasgar Hashemi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup>PhD Scholar, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran

<sup>3</sup>Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Semnan, Iran

\*Corresponding author: amirreza\_hamidi@alumni.iust.ac.ir

Received: October 7, 2016

Accepted: December 12, 2016

### Abstract

Estimation of scour depth and understanding the flow field around pier would help to design with safer factor. In this study, we used the numerical model SSIIM as a CFD model to simulate flow and scour pattern simultaneously around single pier. The model was verified using laboratory data including the results reported for single pier. In this model, we considered the  $k - \varepsilon$  as a turbulence model to solve the 3D Navier-Stokes flow equations and used their outputs as inputs of sediment transition equations. Comparison between scour calculations of SSIIM model and experimental terms showed that the model has appropriate deviation value for estimating the maximum scour depth around single pier. Numerical and graphics discussions of scour pattern and flow field have been done in various simulation time for pier. Graphical results showed that the down flow at front of pier and upward flow at the rear of pier. In addition, the maximum down flow was simulated with high accuracy in compare with experimental results.

**Keywords:** Numerical Simulation, Pier, Scour Hole, Sedimentation, SSIIM Model.