

شبیه‌سازی آبشستگی و میدان جریان در اطراف دو پایه کناری یکدیگر

با استفاده از مدل عددی SSIIM

سید مصطفی سیادت موسوی^{۱*}، امیررضا حمیدی^۲

۱. استادیار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

siadatmousavi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۶/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۶/۱۸]

چکیده - آبشستگی پیرامون پایه‌های پل در معرض جریان امری 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 به عنوان یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل‌سازی همزمان جریان و رسوب در اطراف گروه‌شمع در معرض جریان استفاده شده است. از داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی مربوط به دو پایه کناری یکدیگر به عنوان یک حالت خاص گروه‌شمع برای واسنجی و شناخت بهتر این مدل استفاده شده است. در این مدل معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس برای جریان به همراه مدل‌های آشفتگی $k-\omega$ و $k-\epsilon$ حل شده و از خروجی‌های محاسبات جریان برای حل معادلات انتقال رسوب استفاده شده است. با بررسی الگوی آبشستگی دو پایه و مقایسه آن با مقادیر آزمایشگاهی مشخص شد که مدل عددی SSIIM، محاسبات جریان رو به پایین در جلوی پایه‌ها و در نتیجه عمق آبشستگی در این منطقه را با دقت قابل قبولی می‌کند. اما اثر گردابه‌های دنباله‌ای در پشت پایه‌ها و اثر تداخل گردابه‌های نعل‌اسبی بین پایه‌ها را بیش از واقعیت در نظر گرفته و مقادیر عمق آبشستگی در این نواحی بیش از مقادیر واقعی است. الگوی آبشستگی حاصل از به کارگیری مدل آشفتگی $k-\epsilon$ دقت بسیار بهتری نسبت به الگوی آبشستگی حاصل از به کارگیری مدل $k-\omega$ در پیرامون دو پایه دارد. البته لازم به گفتن است که دلیل پیچیدگی محاسبات جریان و رسوب و ساده‌سازی‌های انجام شده برای مدل‌سازی، نتایج بدون اشکال نیست.

واژگان کلیدی: آبشستگی، مدل‌سازی، SSIIM، دو پایه

۱- مقدمه

مسیر جریان، آبشستگی موضعی است که می‌تواند باعث خرابی پل‌ها گردد. 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 نعل‌اسبی^۳ است [۶]. این گردابه‌ها در اثر انسداد جریان به وسیله پایه و انحراف آن به طرف پایین ایجاد می‌شود که مانند 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

بستر رودخانه‌ها در طول عمر خود همواره در اثر عبور جریان آب در حال رسوب‌گذاری و رسوب‌برداری است. آبشستگی در حالت کلی به دو دسته‌ی آبشستگی انقباضی^۱ و آبشستگی موضعی^۲ تقسیم‌بندی می‌شود. حالت انقباضی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع جریان و آبشستگی موضعی ناشی از قرارگیری موانعی در مسیر جریان است. در حالت آبشستگی موضعی، تغییر در اندازه‌ی سرعت و جهت جریان سبب ایجاد فرسایش در اطراف مانع مورد نظر می‌شود. مهم‌ترین عامل فرسایش پیرامون پایه‌ی پل‌های در

3 Horseshoe vortex

1 Contraction scour

2 Local scour

یکدیگر^۳ و دو پایه به صورت زاویه‌دار با یکدیگر را بررسی کرد و نمودارهای عمق آبستگی در نقاط مختلف را به صورت تابعی از نسبت فاصله‌ی شکاف بین شمع‌ها به قطر آنها (G/D) بیان کرد [۹].

در سال‌های اخیر به سبب پیشرفت کامپیوترها، استفاده از مدل‌های عددی افزایش پیدا کرده است. از مزایای کدهای عددی نسبت به مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به کم‌هزینه بودن، گذشت زمان کمتر و در دسترس بودن بیش‌تر آن اشاره کرد [۱۶]. مدل عددی SSIIM یک مدل کامپیوتری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و رسوب است که در برخی مسائل مورد استفاده قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به مطالعه‌ی انجام گرفته به وسیله‌ی نوروزی و همکاران (۱۳۸۸) اشاره کرد. آنها با مقدار خطای ناچیز توانستند آبستگی حول آبشکن تیغه‌ای را با استفاده از مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی کنند [۳]. ناجی و همکاران (۱۳۸۸) نیز تأثیر موقعیت آبشکن روی الگوی آبستگی را به صورت عددی و آزمایشگاهی در یک قوس ۹۰ درجه بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش موقعیت قرارگیری آبشکن، مقدار آبستگی موضعی در اطراف آبشکن افزایش می‌یابد [۳]. بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۷) نیز با استفاده از این نرم‌افزار یک گروه‌شمع با آرایش ۲×۴ را مدل‌سازی کرده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. بر طبق مطالعه‌ی آنها مدل عددی SSIIM اثر حفاظتی شمع‌های بالادست روی شمع‌های پایین دست را بیش از حد تخمین می‌زند و اثر تقویت‌کنندگی شمع‌های قرار گرفته در راستای عمود بر جریان بر یکدیگر را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند [۱].

هدف از انجام این پژوهش، به دست آوردن شناخت بیشتر از مدل عددی SSIIM به وسیله‌ی مدل‌سازی جریان و آبستگی پیرامون دو پایه‌ی کنار یکدیگر با استفاده از داده‌های موجود است. الگوی آبستگی نهایی مدل با الگوی حاصل از نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود و نتایج عددی محاسبات عمق فرسایش بستر به صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود. اثر تغییر

می‌کند [۱۰]. 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^۱ می‌گویند. این ناحیه مانند یک گردباد، ذرات پشت شمع را به سمت بالا مکیده و سبب ایجاد آبستگی در پشت شمع می‌شود [۱۰]. (شکل ۱) این سیستم گردابه‌ها را نشان می‌دهد.

شکل (۱) چگونگی تشکیل گردابه‌های نعل‌اسبی و دنباله‌ای [۱۰]

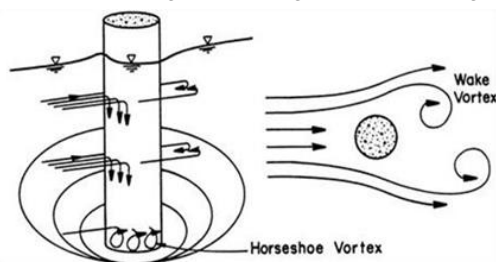


Fig 1. Formation of horseshoe and wake vortex

از زمانی که آبستگی موضعی به عنوان یک مسئله‌ی مهم در هیدرولیک مطرح شده است، پژوهشگران گوناگونی مطالعات و آزمایش‌های زیادی را در زمینه‌ی عمق و الگوی آبستگی پایه‌ی پل انجام داده‌اند و روابط تجربی متعددی را ارائه داده‌اند. بیشتر این مطالعات در زمینه‌ی آبستگی اطراف تک‌شمع بوده است اما در مورد پدیده‌ی آبستگی پیرامون گروه‌شمع تحقیقات زیادی صورت نگرفته است. از آن جمله می‌توان به مطالعات ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱) اشاره کرد. آنها با انجام آزمایش‌هایی رابطه‌ی این رابطه را برای تخمین عمق آبستگی بیشینه پیرامون تک‌پایه ارائه کردند، سپس این رابطه را برای گروه‌شمع نیز تعمیم دادند. آنها برای حالت گروه‌شمع پیشنهاد کردند که به جای استفاده از طول و عرض هر شمع، از طول و عرض موثر گروه‌شمع استفاده شود [۱۵]. طول (عرض) موثر گروه‌شمع برابر است با مجموع طول (عرض) شمع‌های قرار گرفته کنار هم به صورتی که با یکدیگر همپوشانی نداشته باشند. همچنین هانا (۱۹۷۸) به مطالعه‌ی حالت دو پایه به عنوان یکی از حالت‌های گروه‌شمع پرداخت. او چیدمان‌های مختلف حالت دو پایه از جمله دو پایه‌ی کنار یکدیگر^۲، دو پایه پشت سر

1 Wake vortex
2 Side by side piers

3 Tandem piers

برای محاسبه‌ی لزجت گردابه‌ای از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در این مطالعه به منظور مقایسه‌ی بهتر از مدل‌های آشفتگی $k - \omega$ و $k - \epsilon$ استفاده شده است.

در مدل SSIIM برای محاسبه‌ی سرعت در نزدیک بستر و دیواره‌ها از قانون دیواره^۴ استفاده می‌شود. این سرعت محاسبه شده به عنوان شرایط مرزی برای معادله‌ی ناویر استوکس مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. رابطه‌ی سرعت در نزدیکی دیواره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{U}{u_x} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{30y}{k_s}\right) \quad (3)$$

در این رابطه، u_x سرعت برشی، y فاصله از دیواره و κ ثابت فون کارمن است که برابر 0.41 فرض شده است.

۲-۲- معادلات مربوط به رسوب

انتقال رسوب به دو بخش بار معلق و بار بستر تقسیم‌بندی می‌شود. بار معلق با استفاده از معادله‌ی انتقال-انتشار^۵ برای غلظت رسوب c محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (4)$$

w سرعت سقوط ذرات، Γ_T ضریب انتشار^۶ و c غلظت حجمی ذرات است.

در این نرم‌افزار، انتقال بار بستر به صورت پیش‌فرض با استفاده از فرمول فن‌راین^۸ تعیین می‌شود که برابر است با:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w}}} = \frac{0.053 \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2.1}}{D_{50}^{0.3} \left(\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right)^{0.1}} \quad (5)$$

q_b مقدار شار انتقال رسوب بار بستر است. τ تنش برشی وارد بر ذرات، τ_c تنش برشی بحرانی ذرات، d_{50} اندازه‌ی میانه‌ی دانه‌های رسوبی، v ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال و ρ و ρ_s نیز به ترتیب چگالی ذرات و چگالی آب است.

مدل SSIIM برای حل معادلات جریان و رسوب از روش گسسته‌سازی حجم محدود استفاده می‌کند. در مدل‌سازی انجام شده از روش توانی^۹ استفاده شده، که یک روش مرتبه‌ی اول

مدل‌های آشفتگی مربوط به لزجت گردابه‌ای جریان بر الگوی فرسایش اطراف شمع‌ها نیز بررسی می‌شود. همچنین اثر تغییر فاصله‌ی پایه‌ها نسبت به یکدیگر بر الگوی آبستتگی پیرامون پایه‌ها بررسی شده و نتایج آن به صورت نمودارهای عددی با نمودارهای تجربی موجود در این زمینه مقایسه خواهد شد تا معیار بهتری برای استفاده از این مدل عددی به دست آید.

۲- معرفی مدل SSIIM

این مدل به وسیله‌ی اولسن و همکارانش در سال ۲۰۰۲ نوشته شده است و در مهندسی رودخانه، هیدرولیک و محیط زیست کاربرد دارد [۱۲]. مهم‌ترین عامل برتری این مدل نسبت به اکثر دیگر مدل‌های CFD موجود، قابلیت حل محاسبات انتقال رسوب در یک بستر متحرک در مدت گذشت زمان است. معادلات حاکم بر این مدل به دو بخش معادلات جریان و معادلات رسوب تقسیم می‌شود.

۲-۱- معادلات مربوط به جریان

معادلات جریان در این نرم‌افزار معادلات متوسط‌گیری شده‌ی زمانی ناویر استوکس^۱ معروف به معادلات رینولدز است [۱۲].

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

که در این معادلات x_j مکان در راستای زام است. U_j سرعت متوسط‌گیری شده‌ی جریان در جهت محور x_j ، P فشار آب، δ_{ij} دلتای کرونگر^۲ و u_j نوسانات سرعت در گام زمانی δt در جهت x_j است. در معادله‌ی ناویر استوکس ترم اول سمت چپ ترم تغییرات زمانی سرعت و ترم بعدی، ترم‌های انتقالی هستند. ترم اول سمت راست ترم فشار و ترم‌های بعدی نیز ترم‌های تنش‌های رینولدز است. رابطه‌ی تنش رینولدز برابر است با:

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

در این رابطه ν_T لزجت گردابه‌ای^۳ است. در نرم‌افزار SSIIM

4 Wall laws
5 Convection-diffusion
6 fall velocity
7 Diffusive coefficient
8 Van rijn (1987)
9 Power-law Scheme

1 Navier-Stokes
2 Kronecker
3 Eddy viscosity

بستر برابر ۴۸ ساعت است. بیشینه عمق آبشستگی در بین دو پایه ۱۷۴/۵ میلی‌متر به دست آمده است که در مقایسه‌ی با آبشستگی حالت تک‌پایه با همین قطر افزایش ۱۵٪ را نشان می‌دهد [۴].

شکل (۲) کانتورهای عمق آبشستگی نهایی آزمایش دو پایه‌ی کنار یکدیگر [۴]

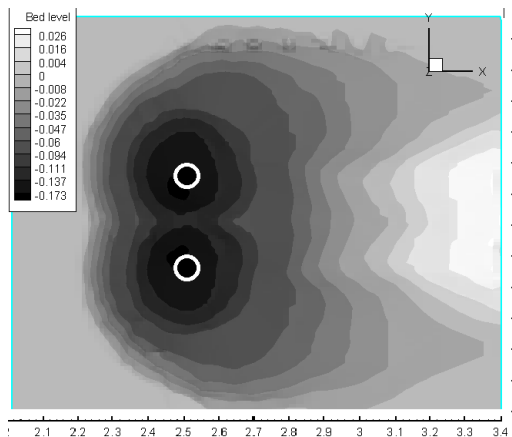


Fig 2. Final contours of bed level changes for side by side piers

۴- مدل‌سازی کانال و جریان

گام نخست مدل‌سازی با استفاده از مدل عددی SSIIM تقسیم‌بندی جریان به سلول‌های حجمی است که به این کار شبکه‌بندی می‌گویند. برای انجام این کار بر مبنای روش سعی و خطا طول کانال برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است که دو پایه در موقعیت وسط کانال قرار داده شده است. به دلیل آن‌که انجام محاسبات مربوط به جریان و آبشستگی در پیرامون پایه باید با دقت بیشتری انجام شود، شبکه‌بندی جریان در این ناحیه با ابعاد ریزتری صورت گرفته است. بدین صورت که سلول‌های ۰/۵ متر میانی با ابعاد $1 \times 1 \text{ cm}$ و سلول‌های دورتر از پایه‌ها با ابعاد $2.5 \times 1 \text{ cm}$ انتخاب شدند. همچنین برای شبکه‌بندی قائم جریان، سلول‌های نزدیک بستر ریزتر در نظر گرفته شده‌اند و هر چه از بستر دورتر می‌شویم سلول‌هایی با ابعاد درشت‌تر قرار داده شده‌اند. این کار به دلیل حساسیت و انجام دقت محاسبات مربوط به جریان و رسوب در نزدیک بستر است. بنابراین ابعاد کلی شبکه‌بندی انجام شده $12 \times 126 \times 160$ است. برای به وجود آوردن پایه‌های دایره‌ای شکل در شبکه‌ی موجود، براساس معادله‌ی دایره در فایل koordina نزدیک‌ترین نقاط به دایره را به مرز دایره انتقال داده

بالادست^۱ است. محاسبه‌ی فشار آب در سلول‌ها با استفاده از الگوریتم SIMPLE انجام شده است. در این مدل برای محاسبه‌ی پروفیل سطح آب از روش برون‌یابی فشار استفاده شده است. این روش با استفاده از یک نقطه با سطح آب ثابت در پایین دست و معادله‌ی برنولی، ارتفاع سلول‌های سطح آب را محاسبه می‌کند. علاوه بر در نظر گرفتن مدل آشفستگی $k - \epsilon$ به عنوان یکی از مدل‌های آشفستگی جریان، در یک اجرای دیگر از مدل $k - \omega$ نیز استفاده شده است. پس از انجام هر بار محاسبات آبشستگی و تغییر تراز بستر، سلول‌های در جهت قائم بر اساس فاصله‌ی نسبی از بستر، تغییر اندازه می‌دهند که به این حالت، حالت گذرا^۲ گفته می‌شود. کاهش تنش برشی بحرانی برای حرکت آغازین ذرات رسوب در بستر شیب‌دار شده ناشی از آبشستگی نیز از رابطه‌ی پیشنهادی بروکس (1963) محاسبه شده است [۷].

۳- داده‌های آزمایشگاهی

برای مدل‌سازی گروه‌شمع از داده‌های آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۲۰۱۲)^۳ که مربوط به دو پایه‌ی کنار یکدیگر^۴ است استفاده شده است. بر طبق داده‌های موجود، آزمایش در یک کانال به طول ۱۵ متر و عرض ۱/۲۶ متر انجام شده و جریان یکنواخت آب تمیز با دبی ۱۳۴ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲/۵ سانتی‌متر و سرعت متوسط بالادست ۰/۳۳ متر بر ثانیه وارد کانال می‌شود. در فاصله‌ی ۱۰ متر از کف کاذب یک مقطع آزمایش به شکل فرورفتگی و به طول ۲ متر و عمق ۳۵ سانتی‌متر ساخته شده و با ذرات رسوب یکنواخت با قطر میانه‌ی ۰/۷۱ میلی‌متر و انحراف از معیار (σ_g) ۱/۲ پر شده است. دو پایه به قطر $D = 9.1 \text{ cm}$ و با شکافی به طول ۱۸/۲ که برابر $2D$ است به طور قائم در بستر قرار گرفته است [۴].

شکل (۲) کانتورهای آبشستگی نهایی را در اطراف دو پایه‌ی کنار هم و پس از پایان آزمایش را که به صورت فرمت خروجی درآمده نشان می‌دهد که مدت زمان تعادل در تغییرات

1 First-Order Upstream Scheme

2 Transient

3 B. Ataie-Ashtiani, A. Aslani-Kordkandi (2012)

4 Side by side piers

شکل (۴) نمایش کانتور سرعت‌های افقی (بر حسب m/s) و بردارهای جریان در صفحه‌ی $Z/h = 0.01$ پس از پایان مدل‌سازی

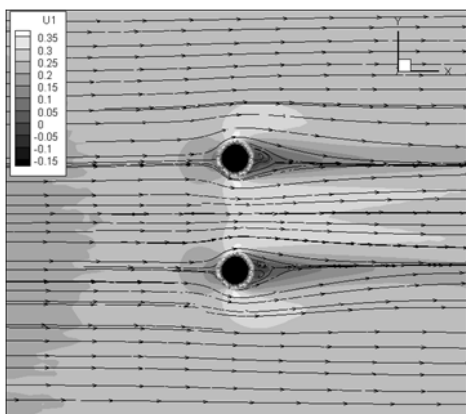


Fig 4. Horizontal velocity contours (m/s) and streamlines in the plane $Z/h = 0.01$ at the end of simulation time

شکل (۵) نمایش کانتور سرعت قائم (بر حسب m/s) در صفحه‌ی $Z/h = 0.01$ پس از پایان مدل‌سازی

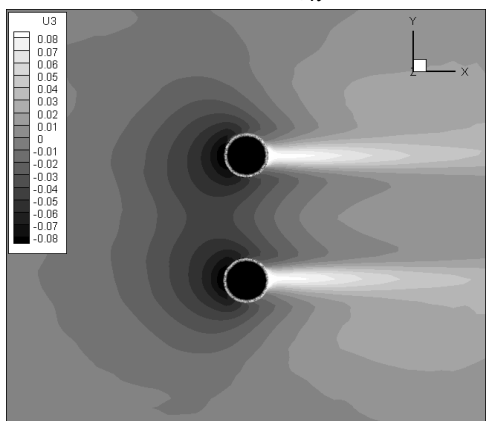


Fig 5. Vertical velocity contours (m/s) in the plane $Z/h = 0.01$ at the end of simulation time

(شکل‌های ۵ و ۶) کانتورهای سرعت قائم را در صفحات تراز $Z/h = 0.01$ و $Z/h = 0.5$ نشان می‌دهد. بر طبق این شکل‌ها در ترازهای نزدیک بستر جریان رو به پایین با شدت بیشتری نسبت به ترازهای بالای آن مشاهده می‌شود. همچنین به دلیل تداخل جریان‌های رو به پایین هر یک از شمع‌ها با یکدیگر و اندرکنش گردابه‌های نعل‌اسبی در بین دو پایه، جریان رو به پایین شدیدتری در این ناحیه نسبت به اطراف پایه‌ها دیده می‌شود. برای مشاهده بهتر این موضوع، خطوط جریان در مقطع عرضی گذرنده از مرکز شمع‌ها در شکل (۷) به نمایش درآمده است.

شکل (۶) نمایش کانتور سرعت قائم (بر حسب m/s) در صفحه‌ی

که یک شکل دایره‌ای در شبکه تشکیل می‌شود. سپس سلول‌های داخل دایره‌ها را در فایل control به عنوان مانع^۱ تعریف می‌کنیم تا قوانین دیواره برای آن اعمال شود. بخشی از پلان شبکه‌بندی آن در شکل (۳) به نمایش درآمده است.

شکل (۳) پلان شبکه‌بندی اطراف دو پایه‌ی در نظر گرفته شده

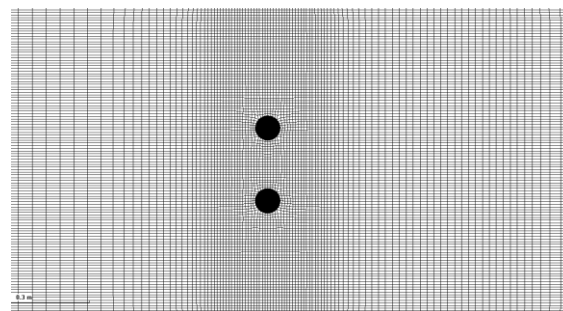


Fig 3. Mesh grid employed for numerical model close to piers

به عنوان یک خروجی این مطالعه، در اجراهای متفاوت با تغییر فاصله‌ی پایه‌ها نسبت به یکدیگر، الگوی آبشستگی مناطق مختلف نسبت به حالت تک‌پایه بررسی شده است و نمودار حاصل با نتایج آزمایشگاهی هاتا (1978) مقایسه شده است.

۵- نتایج مدل‌سازی

محاسبات که به وسیله‌ی رایانه با پردازنده‌ی ۳ گیگاهرتز انجام شد در حدود ۱۸ روز زمان برد.

۵-۱- الگوی جریان

برای نشان دادن رفتار جریان، منحنی‌های هم سرعت افقی و قائم در صفحه‌ی پلان $Z/h = 0.01$ که نزدیک بستر فرسایش یافته قرار دارد، رسم شده است. Z فاصله‌ی از بستر پیش از فرسایش و h عمق جریان است. شکل (۴) کانتورهای سرعت افقی و جهت جریان را در این صفحه و در زمان پایان شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت افقی در نزدیک بستر در بین دو پایه افزایش می‌یابد. این امر علاوه بر تنگ‌شدگی و قانون پیوستگی، می‌تواند به دلیل وجود حفره‌های آبشستگی و تداخل آنها در بین دو پایه باشد که سبب کاهش ارتفاع بستر در بین دو پایه و کاهش اصطکاک بستر می‌شود.

1 obstacle

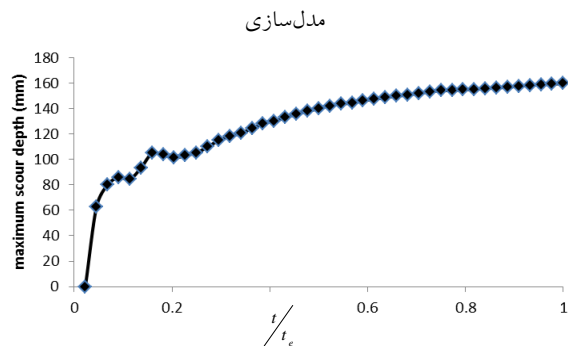


Fig 8. Time series of the maximum scour depth

شکل (۹) وضعیت تغییر الگوی آبستگی اطراف دو پایه بر حسب متر در

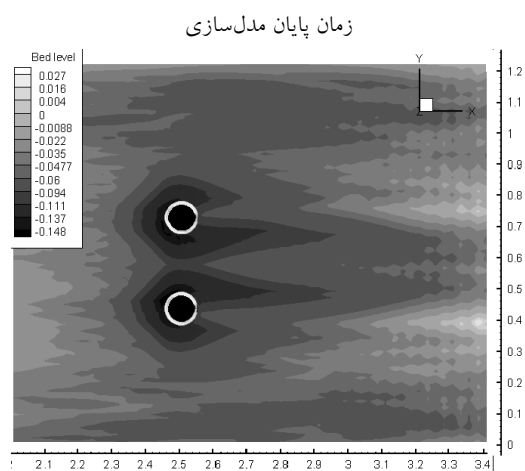


Fig 9. Contours of scour depths pattern close to piers at the end of simulation

(شکل ۹) کانتورهای آبستگی حاصل از انجام محاسبات مدل را در زمان پایان مدل‌سازی نشان می‌دهد.

مقایسه با شکل آزمایشگاهی (شکل ۲) نشان می‌دهد مدل نیز مانند داده‌های آزمایشگاهی، تراکم و شدت آبستگی در بین شمع‌ها را بیش‌تر از نواحی دیگر تخمین می‌زند و بیش‌ترین اعماق آبستگی یافته را در این ناحیه محاسبه کرده است. هر چند کانتور بیشینه کاهش ارتفاع بستر ناشی از آبستگی در بین پایه‌ها در حدود ۱۷-۱۴ درصد کم‌تر از بیش‌ترین کانتور عمق آبستگی در پایان آزمایش (کانتور ۱۷۴ میلی‌متر) است. در ضمن، مقادیر عمق آبستگی پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل برای نواحی پشت پایه‌ها بیش‌تر از مقادیر آزمایشگاهی است. همچنین نتایج مدل‌سازی مقادیر رسوب‌گذاری کمتری را در بخش انتهایی شکل نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. براساس این مشاهده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی

شبیه‌سازی از پایان مدل‌سازی $z/h = 0.5$

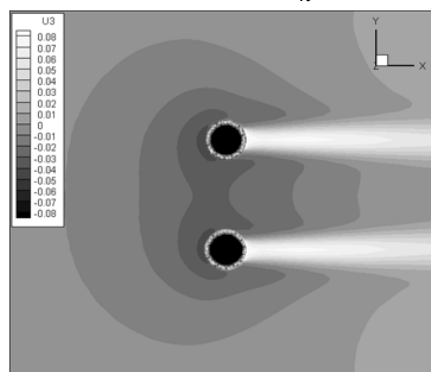


Fig 6. Vertical velocity contours (m/s) in the plane $z/h = 0.5$ at the end of simulation time

شکل (۷) نمایش خطوط جریان و کانتور سرعت‌های قائم در مقطع عرضی

گذرنده از مرکز شمع‌ها در زمان پایان شبیه‌سازی

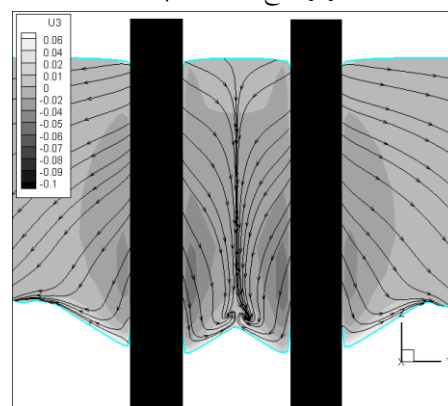


Fig 7. Vertical velocity contours and streamlines in the transverse section passing through centers of piles at the end of simulation time

۵-۲- الگوی آبستگی

نمودار (شکل ۸) بیانگر روند تغییرات بیشینه عمق آبستگی نسبت به زمان انجام مدل‌سازی است (محور افقی نسبت به زمان پایان اجرا بی‌بعد شده است). لازم به گفتن است در هر ۱۵ دقیقه از اجرای مدل‌سازی تغییرات محاسبه شده‌ی بستر در یک فایل جداگانه ثبت شده است. بنا بر بررسی‌های انجام شده حدود ۵۷٪ عمق آبستگی نهایی در یک ساعت نخست اجرای مدل رخ داده است و بیش‌ترین عمق آبستگی تقریباً برابر ۱۶۰ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین کاهش موقت عمق آبستگی نسبت به زمان گذشته که به صورت مقطعی در نمودار زیر دیده می‌شود، می‌تواند به دلیل تغییر در الگوی آبستگی باشد که با گذشت زمان دیگر رخ نداده است.

شکل (۸) نمودار روند تغییرات بیشینه عمق آبستگی نسبت به زمان اجرای

استفاده شده است که نتایج تغییر تراز بستر پس از انجام شبیه‌سازی در (شکل ۱۱) نشان داده شده است. این شکل مانند (شکل ۹)، نمایش دهنده‌ی کانتورهای عمق آبستگي برای این مدل آشفته‌گی است.

شکل (۱۱) کانتورهای عمق آبستگي اطراف دو پایه براساس مدل آشفته‌گی

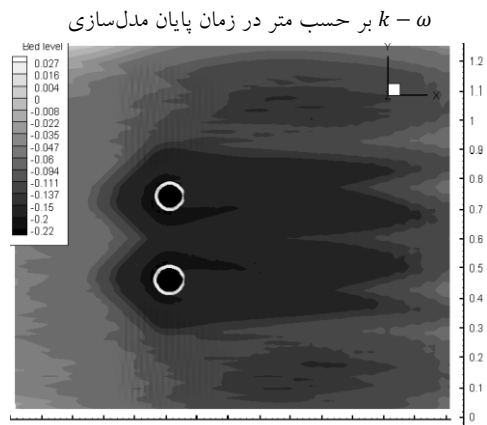


Fig 11. Contours of scour depth simulated using $k - \omega$ turbulence model at the end of simulation

این مدل آشفته‌گی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، کانتورهای بسیار عمیق‌تری را در بین پایه‌ها نمایش می‌دهد. همچنین در این مدل، گردابه‌های دنباله‌ای بسیار قوی‌تری نسبت به مدل آشفته‌گی $k - \epsilon$ محاسبه شده است زیرا گسترش ناحیه‌ی آبستگي در پشت پایه‌ها بسیار بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی و مدل آشفته‌گی $k - \epsilon$ است. مقدار RMS عمق آبستگي سلول‌ها نسبت به عمق‌های واقعی برای این مدل برابر 0.0899 متر به دست آمد که حدود $2/5$ برابر مقدار RMS برای خروجی مدل با به کارگیری روابط آشفته‌گی $k - \epsilon$ است. بنابراین به صورت کلی در مدل عددی مورد استفاده و با شرایط مدل‌سازی شده در این پژوهش مدل آشفته‌گی $k - \epsilon$ در مقایسه‌ی با مدل آشفته‌گی $k - \omega$ برتری داشته و بهتر می‌تواند محاسبات جریان و در پی آن محاسبات آبستگي را انجام دهد.

۳-۵ اثر فاصله‌ی پایه‌ها بر آبستگي

در ادامه سعی شده است تا اثر تغییر فاصله‌ی پایه‌ها نسبت به یکدیگر در الگوی میزان آبستگي بررسی شود. این فاصله‌ها براساس نسبت شکاف بین پایه‌ها به قطر پایه‌ها (G/D) سنجیده می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر، الگوی‌های آبستگي محاسبه

SSIIIM گردابه‌های دنباله‌ای پشت شمع‌ها را بیش از مقدار واقعی آنها تخمین می‌زند.

مقدار مجموع مجذور مربعات تفاضلات (RMS) عمق‌های آبستگي سلول‌های مدل با عمق‌های آبستگي سلول‌های رقومی شده‌ی نتایج آزمایشگاهی نیز انجام شد که برابر 0.0353 متر به دست آمد.

شکل (۱۰) نمودار تغییرات الگوی آبستگي بر روی محیط دایره‌ای به شعاع $2R$ در پایه‌ی پایینی و در زمانهای بررسی شده

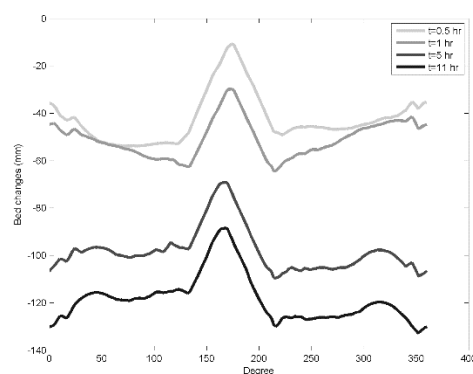


Fig 10. Scour pattern on perimeter of a circle with radius equals $2R$ at the bottom pier at given times

نمودار شکل (۱۰) عمق آبستگي را بر روی محیط دایره‌ای به شعاع $2R$ و در زمانهای سی دقیقه، ساعت اول، ساعت پنجم و ساعت یازدهم نشان می‌دهد که R شعاع شمع‌ها و برابر 0.0455 متر است. به دلیل آن که این الگو برای هر دو شمع یکسان است فقط الگوی مربوط به یکی از پایه‌ها (پایه‌ی پایینی) بررسی شده است. این دایره از زاویه‌ی صفر که در جلوی پایه قرار دارد آغاز شده و بر روی مسیر دایره‌ای در خلاف حرکت عقربه‌های ساعت (جهت مثلثاتی) می‌چرخد تا دوباره به زاویه‌ی 360 درجه در همان مکان اولیه‌اش برسد. بدین ترتیب این نمودار معیار بهتری از چگونگی آبستگي در گذشت زمان ارائه می‌دهد. بر طبق این نمودار، در زمان‌های اولیه تفاوت چندانی در آبستگي دو طرف پایه وجود ندارد. اما با گذشت زمان عمق آبستگي در طرفی که در منطقه‌ی بین دو پایه قرار دارد (زاویای 180 تا 360 درجه) بیش‌تر از طرف دیگر پایه (زاویای صفر تا 180 درجه) محاسبه شده است. در ادامه از مدل آشفته‌گی $k - \omega$ نیز برای حل معادلات جریان

می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی SSIIM جریان رو به پایین در جلوی پایه‌ها را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند. (شکل ۱۳) نمودار بی‌بعد شده‌ی عمق آبستگي مدل را در نقطه‌ی B نشان می‌دهد. در این شکل نیز نتایج تجربی هانا در نقطه‌ی B نیز با خط‌چین مشخص شده است.

شکل (۱۳) نمودار مقایسه‌ی آبستگي مدل در نقطه‌ی B نسبت به نمودار تجربی

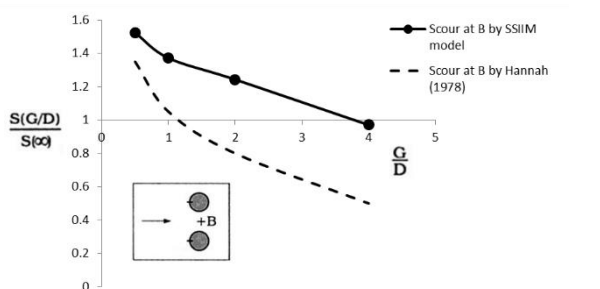


Fig 13. Comparison between scour level calculated by the model and measurements of Hannah (1978) at the mid-region of piers

این مقایسه نشان می‌دهد مقادیر محاسبه شده به وسیله‌ی مدل در کل نمودار، بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی است. به عبارت دیگر، مدل عددی SSIIM اثر تداخل و اندرکنش گردابه‌های نعل‌اسبی در بین دو پایه را بیشتر از نتایج آزمایشگاهی محاسبه کرده است و دقت کمتری برای انجام محاسبات عمق آبستگي در این ناحیه دارد.

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مطالعه تلاش شده است با استفاده از مدل عددی SSIIM که یک مدل برای محاسبات جریان و انتقال رسوب است، آبستگي و جریان اطراف دو پایه‌ی کنار یکدیگر در معرض جریان شبیه‌سازی شده و نتایج آن به منظور شناخت بهتر این مدل بررسی شود. در الگوهای جریان مشاهده شد که تداخل گردابه‌های نعل‌اسبی و در پی آن گسترش ناحیه‌ی فرسایش‌یافته و کاهش ارتفاع بستر، کاهش اصطکاک بستر در بین دو پایه به وجود می‌آید و سرعت افقی جریان در ترازهای مختلف این ناحیه شدیدتر است. به دلیل تنگ‌شدگی و رعایت قانون پیوستگی، این افزایش سرعت تشدید نیز می‌شود. تداخل این گردابه‌ها سبب شد که سرعت قائم رو به پایین در این

شده با نتایج آزمایشگاهی حاصل از مطالعه‌ی هانا (1978) مقایسه شده است. در این نتایج که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده، عمق فرسایش نهایی دو پایه‌ی کنار یکدیگر در دو نقطه‌ی A و B نشان داده شده نسبت به حالت تک‌پایه بی‌بعد شده است [۱۷].

براساس این نمودار نقطه‌ی A در (شکل ۱۲) در ناحیه‌ی بسیار نزدیک و چسبیده به نوک دماغه‌ی هر پایه قرار دارد که می‌تواند معیار مناسبی از جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل‌اسبی نزدیک‌شونده به شمع باشد. همچنین نقطه‌ی B در (شکل ۱۳) دقیقاً در فاصله‌ی وسط خط عبور کننده از مراکز دو پایه قرار دارد که می‌تواند معیار خوبی از اندرکنش گردابه‌های نعل‌اسبی بین شمع‌ها باشد. مقادیر آبستگي این نقاط به وسیله‌ی مقادیر عمق آبستگي همین نقاط برای حالت تک‌پایه با همان شرایط (S_{00}) بی‌بعد شده‌اند. شکل (۱۲) نمودار بی‌بعد شده‌ی آبستگي پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل در نقطه‌ی A را نشان می‌دهد. در این نمودار، نتایج تجربی هانا در نقطه‌ی A نیز با خط‌چین مشخص شده است.

شکل (۱۲) نمودار مقایسه‌ی آبستگي مدل در نقطه‌ی A نسبت به نمودار تجربی

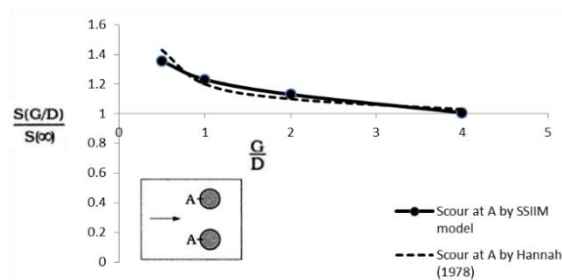


Fig 12. Comparison between scour level calculated by the model and measurements of Hannah (1978) at the front region of piers

در این نمودار با افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها شاهد کاهش آبستگي هستیم به طوری که در فاصله‌ی $G/D = 4$ مقدار بی‌بعد شده‌ی آبستگي تقریباً به یک می‌رسد. بدین معنی که در این فاصله، آبستگي جلوی پایه‌ها همانند حالت تک‌پایه عمل می‌کند. با کاهش فاصله‌ی پایه‌ها نیز افزایش مقدار آبستگي نقطه‌ی A دیده می‌شود. این نمودار همخوانی مناسبی را بین مقادیر مدل‌سازی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. بنابراین

[۲] ناجی ابهری م. قدسیان م. واقفی م. پناهپور ن. ۱۳۸۸. "مطالعه آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان حول آبسکن در قوس ۹۰ درجه"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

[۳] نوروزی ح. صالحی نیشابوری س.ع.ا. نصیری صالح ف. آذردرخش م. ۱۳۸۸. "شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی آبستگي حول آبسکن"، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۶، ص ۱۳-۲۲.

[4] Ataie-Ashtiani, B. Aslani-Kordkandi, A. (2012) "Flow field around side-by-side piers with and without a scour hole" *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 152-166.

[5] Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A.A. (2006) "Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups"; *J. Hydraul. Eng.* 132(10) 1100-1104.

[6] Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W., (1977) "Local scour around cylindrical piers." *J. Hydraul. Res.*, 15(3), 211-252.

[7] Brooks, H. N. (1963) discussion of "Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels", by A. T. Ippen and P. A. Drinker, *J. Hydr. Eng., ASCE*, Vol. 89, No. HY3.

[8] Dargahi, B. (1990) "Controlling mechanism of local scouring"; *J. Hydraul. Eng.* 116(10) 1197-1214.

[9] Hannah, C. R. (1978). "Scour at pile groups." Research Rep. No. 28-3, Civil Engineering Dept., Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

[10] Melville, B.W. and Raudkivi, A.J. (1977). "Flow characteristics in local scour at bridge piers". *Journal of Hydraulic Research IAHR*, 15(1):373-380.

[11] Olsen, N. R. B. (1999) "Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering", class notes, Division of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.

[12] Olsen, N.R.B. (2011), "A Three-dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multiblock option" Department of Hydraulic and environmental Engineering, The Norwegian university of science and technology.

[13] Olsen N, Kjellesvig HM. (1998), "Three dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth". *J Hydraul Res* ;36(4):579590.

[14] Olsen N, Melaaen C. (1993) "Three-dimensional calculation of scour around cylinders". *J Hydr Eng*;119(9):1048-54.

[15] Richardson, E. V., and Davis, S. R. (2001). "Evaluating scour at bridges." *Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18)*, Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

[16] Salaheldin, M., Imran, J. and Chaudhry, M.H. (2004). "Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers." *Journal of Hydraulic Engineering., ASCE*, Vol. 130(2):91-100.

[17] Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (2002) "The mechanics of scour in the marine environment." World Scientific Publication Co. Pte. Ltd., Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 17.

[18] Van Rijn, L.C. (1987), "Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport", Doctoral thesis, Hydr. and Geotechn. Engrg. Div., Delft Univ. of Technol., Delft.

[19] Wilcox, D. C. (2000) "Turbulence modelling for CFD", DCW industries, ISBN. 0-9636051-51.

ناحیه شدیدتر از طرف‌های دیگر شمع‌ها شود. در بررسی عددی و گرافیکی الگوی آبستگي مشخص شد که در زمان‌های اولیه اجرای مدل، الگوی عمق آبستگي در دو طرف دو پایه به طور یکسان پخش شده است اما با گذشت زمان آبستگي بین پایه‌ها افزایش بیش‌تری نسبت به طرف دیگر پایه‌ها نشان می‌دهد. نتایج مدل، رسوب‌گذاری کم‌تری را در بخش پشت پایه‌ها نسبت به نتایج آزمایشگاهی محاسبه کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی SSIIM گردابه‌های دنباله‌ای پشت شمع‌ها را بیش از مقدار واقعی آنها تخمین می‌زند. مقدار RMS برای عمق‌های محاسبه‌شده تغییر تراز بستر نسبت به ترازهای بستر واقعی با مدل آشفستگی $k - \varepsilon$ ، مقدار کمتری را در مقایسه با جریان با مدل آشفستگی $k - \varepsilon$ را نشان می‌دهد. بنابراین در این نرم‌افزار، مدل آشفستگی $k - \varepsilon$ بهتر می‌تواند محاسبات جریان و در پی آن محاسبات انتقال رسوب را انجام دهد. همچنین در اجراهای دیگر با تغییر فاصله‌ی پایه‌ها نسبت به یکدیگر، سعی شد عمق‌های آبستگي حاصل از مدل با نمودارهای آزمایشگاهی هانا (1978) مقایسه شود. همخوانی نمودارها برای ناحیه‌ی جلوی پایه‌ها نشان می‌دهد که مدل عددی SSIIM محاسبات جریان رو به پایین در جلوی پایه‌ها را با دقت قابل قبولی انجام می‌دهد. اختلاف زیاد نمودارها برای منطقه‌ی بین پایه‌ها نشان می‌دهد که این نرم‌افزار اثر تداخل و اندرکنش گردابه‌های نعل‌اسبی در بین دو پایه را با دقت پایین، و بیش‌تر از واقعیت محاسبه می‌کند.

سپاسگزاری:

بدین‌وسیله از زحمات فراوان خانم دکتر رستم‌آبادی و کمک‌های ایشان کمال تشکر را داریم. همچنین از همکاری انجمن هیدرولیک ایران و رئیس این انجمن جناب آقای دکتر نصیری نیز قدرانی می‌نمایم.

۷- مراجع

[۱] بهشتی ع.ا. عطایی آشتیانی ب. ۱۳۸۷. "بررسی عددی الگوی جریان و آبستگي در اطراف گروه شمع"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

Numerical simulation of scour and flow field around side by side piers using SSIIM

S. M. Siadatmousavi¹, A. Hamidi²

1) Assistant Professor, Environmental and Water Resources Engineering, Iran University of Science and Technology

2) Master Student, Iran University of Science and Technology

siadatmousavi@iust.ac.ir

Abstract:

Scour around pier in the flow is an Inevitable issue. Estimation of scour depth and understanding the flow field around pier would help us to design with safer factor. The most important factor of scour around pier is changing of streamlines that leads to a system so called local scour. It consist of two vortices: horseshoe vortices and wake vortex. The obstacle creates downflow jet in front of pier that collide with bed sediments and carry them to the downstream, making the horseshoe vortice. The wake vortex is caused by splitting the streamlines and formation of low pressure flow field region and absorption of flow in rear of pier and pick up the bed sediments in this district.

In this study we used the numerical model SSIIM as a CFD model to simulate flow and scour pattern Simultaneously around a group piers. This model can be used in hydraulic and environment engineering and has the ability of sediment transport calculation in bed transient movement with temporal dependent as the most important advantage in compare with the other CFD models. The verification of this model was implemented by data and results reported for side by side piers examinations as one of the group categorize. In this model we considered the $k - \varepsilon$ and $k - \omega$ separately as a turbulence model to solve the eddy viscosity of 3D Navier-Stokes flow equations and use their outputs as inputs of sediment transition equations, we used Power-Law scheme as one of the discretization method of First-Order upstreame scheme to solve the flow and sediment equations on the grids. The pressure term of Navier-Stokes equations in cells was calculated by SIMPLE algorithm which is the First-Order upstreame scheme too. Also by changing the G/D distant ratio on the other simulation runs, we generated the diagrams with comparative situation with experimental diagrams.

Results in the last time of simulation showed there is much more value of horizontal and vertical velocity between the piers than the other sides. It was 57% of final maximum scour depth in first hour of calculation. Similarly to velocity, The final scour patterns showed there is more scour depth counters between the piers. In details it was derived that the scour depth pattern was symmetric in early time of calculation, but with time passing it appeared more in the region of between the piers. Although Numerical results show the SSIIM model have calculated the erosion depth in front of piers with high accuracy resulted from good calculation of downflow, comparisons between model results and data show the scour depth pattern that the model calculated the wake vortices behind the piers and Interference the horseshoe vortex between the piers with overestimate value and there are deeper counters of scour depth than experiment diagram. Also the RMS index of scour depth has been calculated in the grid and it represented the values of 0.0353 for $k - \varepsilon$ model and 0.0899 for $k - \omega$ model. Therefore, the $k - \varepsilon$ turbulence model resulted better scour depth pattern calculated in compare with $k - \omega$ turbulence model.

Keywords: Scour, Simulation, SSIIM numerical model, Side by side piers