

شبیه‌سازی عددی آب‌شستگی موضعی در پایه‌های پل با رسوبات غیریکنواخت

محمد جواد اعرابی^۱، محمدرضا چمنی^۲، امیراحمد دهقانی^۳، کیوان اصغری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استادیار مهندسی عمران، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- استادیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

mjaarabi@cv.iut.ac.ir , mjaarabi@gmail.com

خلاصه

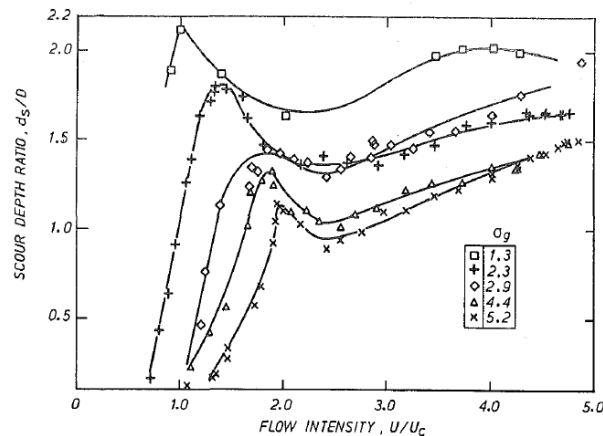
عملکرد نامطلوب پل‌ها موجب اختلال در سیستم ارتباطی یک کشور خواهد شد. آب‌شستگی در پایه‌ی پل‌ها یک تهدید جدی برای پایداری پل محسوب می‌گردد. پیش‌بینی عمق آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل در طراحی مطمئن و اقتصادی آنها دارای اهمیت است. از آنجا که بستر رودخانه‌های طبیعی شامل رسوبات غیریکنواخت است و ممکن است دانه‌های ریزتر پشت دانه‌های درشت‌تر به تله بیفتند، تعیین عمق آب‌شستگی در این شرایط می‌تواند طراحی را به حالت واقعی نزدیکتر کند. باتوجه به این‌که اکثر مطالعات پیشین بر روی آب‌شستگی در حالت رسوب یکنواخت استوار است، در این مقاله با استفاده از مدل سه‌بعدی SSIM، آب‌شستگی در اطراف پایه‌ی استوانه‌ای با رسوبات غیریکنواخت شبیه‌سازی گردید. حداکثر عمق آب‌شستگی شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی تطابق خوبی با نتایج مطالعات آزمایشگاهی دارد. نتایج مدل عددی نشان می‌دهد که ضریب غیریکنواختی مصالح پارامتر مهمی در پدیده‌ی آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل‌ها است.

کلمات کلیدی: آب‌شستگی موضعی، پایه‌ی پل، رسوبات غیریکنواخت، مدل SSIM، آب زلال

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین سازه‌هایی که از دیرباز مورد توجه همگان بوده، پل است. جهت عبور از رودخانه‌ها، وجود پل‌ها اجتناب‌ناپذیر است. یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌ها، آب‌شستگی موضعی^۱ در پایه‌های آنها است و بشر همواره به دنبال مهار این پدیده بوده است. طبق گزارش بریاد و همکاران (۱۹۹۹) در طول ۳۰ سال، علت تخریب ۶۰ درصد پل‌های تخریب شده، آب‌شستگی بوده است [۱]. در طی ۶۰ سال گذشته مطالعه آب‌شستگی موضعی در پایه‌ی پل‌ها مورد توجه محققین متعددی قرار گرفته است. جریان سه‌بعدی غیردایمی و بستر متحرک باعث شده که این زمینه‌ی تحقیقاتی همچنان در حال توسعه باشد. جانسون (۱۹۹۵) نشان داد که مطالعات در این زمینه هنوز پاسخگوی استفاده در شرایط میدانی نیست [۲]. مهم‌ترین متغیرها در فرآیند آب‌شستگی، خصوصیات آب و رسوب و هندسه‌ی پایه است. در اکثر مطالعات گذشته مربوط به آب‌شستگی در پایه‌ی پل‌ها، انحراف از معیار توزیع رسوبات بستر نزدیک به یک بوده است. باتوجه به اینکه بستر اکثر رودخانه‌های طبیعی به صورت غیریکنواخت است، نیاز به توسعه‌ی روابط تخمین آب‌شستگی در این شرایط ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات آزمایشگاهی در زمینه‌ی آب‌شستگی در پایه‌ی پل با رسوبات غیریکنواخت توسط اتما (۱۹۷۷) نشان داد که عمق آب‌شستگی با افزایش غیریکنواختی (S) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. میزان آب‌شستگی موضعی در رودخانه با بستر شنی دارای $S = 3/5$ معادل ۲۰ درصد آب‌شستگی در بستر یکنواخت با قطر متوسط یکسان است. این آزمایش‌ها در شرایط آب زلال بوده و شامل بستر زنده نمی‌شد [۳]. در حالت بستر زنده، رفتار رسوبات به طور قابل توجهی دارای پیچیدگی است. بیکر (۱۹۸۶) در شرایط بستر زنده با انجام آزمایش‌هایی نشان داد که میزان کاهش عمق آب‌شستگی در این شرایط به شدت شرایط آب زلال نیست. نتایج آزمایش‌های بیکر در شکل (۱) آمده است [۴].

¹ Local scour



شکل ۱- تأثیر غیریکنواختی بر آب شستگی با اندازه متوسط ذره ۰/۶ میلی متر [۴]

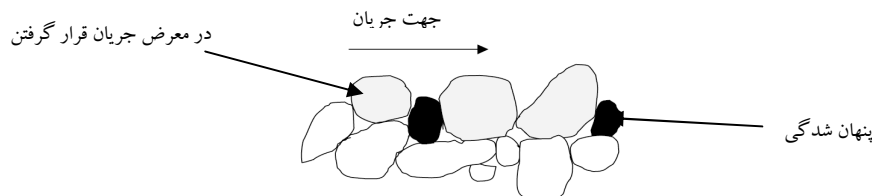
جانسون (۱۹۹۲) با استفاده از رویکرد احتمالاتی، معادله‌ی آب شستگی (D_s) دانشگاه ایالتی کلرادو را به صورت رابطه‌ی (۱) اصلاح کرد [۵].

$$D_s = 2.02 h \left(\frac{b}{h} \right)^{0.98} Fr^{0.21} \sigma^{-0.24} \quad (1)$$

که در آن، h عمق آب، b عرض پایه‌ی پل، Fr عدد فرود و انحراف از معیار توزیع رسوبات با σ نشان داده شده است. اولیوتو و هگر (۲۰۰۲) با استفاده از عدد فرود ذره^۱ (F_d) و انحراف از معیار توزیع رسوبات (σ)، از پارامتر $Z \sigma^{0.5} / F_d^{1.5}$ جهت پیش‌بینی توسعه‌ی زمانی آب شستگی استفاده کردند [۶]. چانگ و همکاران (۲۰۰۴) مدل تحلیلی برای توسعه‌ی زمانی آب شستگی موضعی در پایه‌ی پل با رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت در شرایط ماندگار و ناماندگار ارائه کردند. آنها با استفاده از مفهوم ضخامت لایه‌ی اختلاط^۲، مدلی جهت تعیین عمق آب شستگی نهایی ارائه دادند [۷]. تشکیل لایه‌ی مسلح^۳ در بستر و چاله‌ی آب شستگی باعث کاهش در عمق آب شستگی نسبت به بستر با مصالح یکنواخت می‌گردد. مسلح شدن بستر موجب می‌شود که سرعت برشی بستر افزایش یافته و موجب کاهش عمق آب شستگی می‌گردد.

۲. انتقال رسوبات غیریکنواخت

پیش‌بینی آستانه حرکت^۴ و انتقال رسوب در رسوبات غیریکنواخت نسبت به رسوبات یکنواخت مشکل‌تر است. پس از شروع آزمایش، دانه‌بندی مصالح بستر نسبت به بستر اولیه تغییر می‌کند. لذا، مدل‌سازی آستانه حرکت مصالح بستر و دانه‌بندی آن بسیار پیچیده است. در حین انتقال رسوبات غیریکنواخت، دانه‌های درشت‌تر در بستر به علت افزایش احتمال قرارگیری آنها در معرض جریان نسبت به حالت یکنواخت، راحت‌تر شروع به حرکت می‌کنند. این پدیده در مورد رسوبات ریزتر به علت پنهان شدن در پشت دانه‌های درشت برعکس است. این فرآیند پنهان‌شدگی^۵ نامیده می‌شود که در شکل (۲) به صورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۲- در معرض جریان قرار گرفتن/پنهان‌شدگی در رسوبات غیریکنواخت

اینشتین (۱۹۵۰) با استفاده از ضریب پنهان‌شدگی سعی در بهبود رابطه‌ی باربستر برای رسوبات غیریکنواخت کرد. میسری و همکاران (۱۹۸۴) نشان دادند که این ضریب به خوبی نمی‌تواند اثر غیریکنواختی رسوبات را برآورد کند [۸]. ایگیازارف (۱۹۶۵) رابطه‌ی (۲) را برای محاسبه تنش برشی بحرانی ذره-

¹ Densimetric Particle Froude Number

² Mixing Layer

³ Armor Layer

⁴ Incipient motion

⁵ Hiding-Exposure

ای با قطر D_i نسبت به تنش برشی بحرانی ذره‌ای با قطر نماینده مخلوط رسوب (D_g) ارایه کرد [۹].

$$\frac{\tau_{BSC_i}}{\tau_{BSC_g}} = \frac{D_i}{D_g} \left[\frac{\log(19)}{\log(19 \frac{D_i}{D_g})} \right]^2 \quad (2)$$

آشید و میچو (۱۹۷۱)، هایاشی و همکاران (۱۹۸۰) و پاتل و رانگا راجو (۱۹۹۹) روابط دیگری برای این نسبت ارائه کردند [۱۰]. وو و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از تعداد زیادی داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی و با فرض اینکه در معرض جریان قرار گرفتن از توزیع نرمال پیروی می‌کند رابطه‌ی (۳) را ارایه نمودند [۱۱].

$$\frac{\tau_{Ci}}{(\gamma_s - \gamma)d_i} = 0.03 \left[\frac{p_{ei}}{p_{hi}} \right]^m \quad (3)$$

با استفاده از مطالعات آماری صورت گرفته، مقدار پارامتر m در رابطه (۳) معادل ۰/۶ بدست آمد. در مدل‌های عددی ارایه شده تاکنون، بستر رودخانه به دو یا سه لایه تقسیم می‌شود. در مدل‌های دولایه‌ای، بستر رودخانه به لایه‌ی فوقانی که در معرض جریان قرار دارد و لایه‌ی تحتانی که بدون حرکت باقی می‌ماند، تقسیم می‌شود [۱۲]. در مدل‌های سه لایه‌ای، بستر رودخانه به لایه‌ی فوقانی، لایه‌ی تبادلی و لایه‌ی تحتانی تقسیم می‌شوند [۱۳]. در لایه‌ی فوقانی که نزدیک‌ترین لایه به بستر است، مخلوط آب و رسوب حرکت می‌کند. در لایه‌ی تبادلی که لایه‌ی فعال^۱ نیز نامیده می‌شود، رسوب با آب حرکت نمی‌کند، اما با لایه‌ی فوقانی مبادله می‌شود. در لایه‌ی تحتانی (لایه‌ی غیرفعال)، رسوبات هیچ گونه حرکتی ندارند.

۳. معرفی مدل عددی SSIIM

مدل عددی SSIIM توسط اولسن از سال ۱۹۹۳ در دانشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ توسعه یافته است. مدل SSIIM توانایی شبیه‌سازی جریان دوفازی آب و رسوب در محیط سه‌بعدی را دارد. این مدل تاکنون در شبیه‌سازی آب‌شستگی در پایه‌های پل با رسوبات یکنواخت (۱۹۹۳، ۱۹۹۸)، تخمین ظرفیت سرریز (۱۹۹۸)، شبیه‌سازی پوشش گیاهی مستغرق (۲۰۰۱)، شکل‌گیری الگوی پیچان‌رود^۲ (۲۰۰۳)، جریان در خم ۹۰ درجه (۲۰۰۵) و موارد متعدد دیگری به‌خوبی عمل کرده است [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹]. مزیت اصلی این مدل عددی در مقایسه با سایر برنامه‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۳ (به گفته‌ی توسعه‌دهنده‌ی آن)، توانایی آن در مدل کردن انتقال رسوب در بستر متحرک در هندسه‌های پیچیده و غیرتجاری بودن آن است [۲۰].

۴. معادلات حاکم بر جریان آب و رسوب

مدل عددی SSIIM، معادله‌ی پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر-استوکس^۴ (معادلات رینولدز) را به کمک مدل‌های آشفتگی متعددی در میدان سه‌بعدی حل می‌کند. این مدل نیز مشابه اغلب نرم‌افزارهای سیالاتی از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات استفاده می‌کند. معادله‌ی ناویر-استوکس در سیالات تراکم‌ناپذیر به فرم برداری در رابطه‌ی (۴) ارایه شده است:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (4)$$

چون در معادله‌ی پیوستگی از فشار استفاده نمی‌شود، لذا با استفاده از الگوریتم SIMPLE^۵ میدان فشار تصحیح می‌گردد. سرعت و شار با استفاده از درونیایی ریو و چاوو^۶ در سطح سلول‌ها محاسبه می‌گردد. مدل عددی SSIIM به‌طور پیش‌فرض از مدل آشفتگی $K-\epsilon$ جهت محاسبه‌ی تنش‌های رینولدز استفاده می‌کند. در تحقیق حاضر از روش $K-\omega$ که توسط ویلکاکس (۱۹۹۸) ارایه شده، استفاده شده است. معادلات اصلی این مدل در روابط زیر بیان شده‌اند:

¹ Active Layer

² Meander

³ Computational Fluid Dynamics

⁴ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

⁵ Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

⁶ Rhie & Chow

انرژی جنبشی جریان آشفته (K) با استفاده از رابطه ی (۵) مدل می شود.

$$\frac{\partial K}{\partial t} + U_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma v_T \frac{\partial K}{\partial x_j}) + P_k - \beta^* K \omega \quad (5)$$

که در آن لزجت گردابه ای (v_T) و P_k به ترتیب توسط روابط زیر با فرکانس آشفتگی (ω) مرتبط می گردد:

$$v_T = \frac{K}{\omega} \quad (6)$$

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

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma v_T \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + \alpha \frac{\omega}{K} P_k - \beta \omega^2 \quad (8)$$

ثابت ها در روابط بالا به قرار زیر است:

$$\alpha = \frac{13}{25} \quad ; \quad \sigma = \frac{1}{2} \quad ; \quad \beta_0 = \frac{9}{125} \quad ; \quad \beta_0^* = \frac{9}{100} \quad (9)$$

در نوشتن برنامه مدل آشفتگی $K-\omega$ از قانون دیواره استفاده شده در مدل $K-\epsilon$ بهره گرفته شده است. توزیع سرعت در راستای قایم از قانون دیواره برای جداره های زیر با استفاده از زیری که توسط کاربر تعیین می گردد، تبعیت می کند، اما این توزیع در عرض کانال یکنواخت فرض می شود.

بار رسوب در مدل عددی SSIM به صورت بار بستر و بار معلق مورد محاسبه قرار می گیرد. برای غلظت حجمی رسوب، با استفاده از معادله انتقال-پخش^۱ میزان بار معلق محاسبه می گردد. در رابطه ی زیر سرعت سقوط (w) از داده های ورودی و ضریب پخش (Γ_T) از مدل آشفتگی استفاده می شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} + w \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_T \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

$$\Gamma = \frac{v_T}{Sc} \quad (11)$$

در این مدل عددی از رابطه ی زیر برای نزدیک ترین سلول در بستر که توسط ون راین (۱۹۸۷) برای غلظت رسوب تعادلی ارایه گردیده، استفاده می شود:

$$C_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3}}{a} \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{\left[\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (12)$$

که در آن d قطر ذرات رسوبی، a تراز مرجع با توجه به ارتفاع زیری، τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی آستانه حرکت، ρ_s و ρ_w به ترتیب چگالی رسوب و آب، v ویسکوزیته سینماتیکی آب و g شتاب ثقل است. در این مدل عددی جهت شبیه سازی رسوبات غیر یکنواخت به دو روش می توان عمل کرد:

الف) هر دسته از دانه بندی به صورت مجزا مدل شود. در این روش، قسمت های منحنی دانه بندی به صورت مجزا و بدون در نظر گرفتن اثر متقابل ذرات روی یکدیگر مدل می گردند. مدل عددی SSIM به طور پیش فرض از این روش استفاده می کند.

ب) استفاده از ضریب پنهان شدگی و در معرض جریان قرار گرفتن. استفاده از ضریب پنهان شدگی باعث می شود که یک متغیر به متغیرها اضافه گردد.

۵. داده های آزمایشگاهی

به منظور صحت سنجی مدل عددی در شبیه سازی آب شستگی، از داده های آزمایشگاهی چانگ و همکاران (۲۰۰۴) استفاده گردید. آزمایش ها در فلو می به عرض ۱ متر و طول ۳۶ متر و بدون شیب انجام شده است. منحنی دانه بندی مصالح بستر دارای وزن مخصوص ۲/۶۵ و توزیع لوگ نرمال با $d_{50}=0.71\text{mm}$ و انحراف معیار ۳ است. پایه ی پل استوانه ای از پلکسی گلاس به قطر ۱۰ سانتی متر در مرکز فلو م قرار داده شده است [۷]. سرعت جریان آب ثابت و برابر ۳۵/۵ سانتی متر بر ثانیه با عمق ۳۰ سانتی متر است. میزان عمق آب شستگی پس از ۳۸ ساعت معادل ۶/۸ سانتی متر گزارش شده است. با استفاده از جدول توزیع نرمال، منحنی دانه بندی به ۸ دسته تقسیم گردید. دسته های رسوب دارای قطر متوسط ۰/۱۷، ۰/۴۰، ۰/۷۱، ۱/۱۷، ۱/۷۹، ۲/۵۱، ۳/۴۵، ۶/۱۱ میلی متر است.

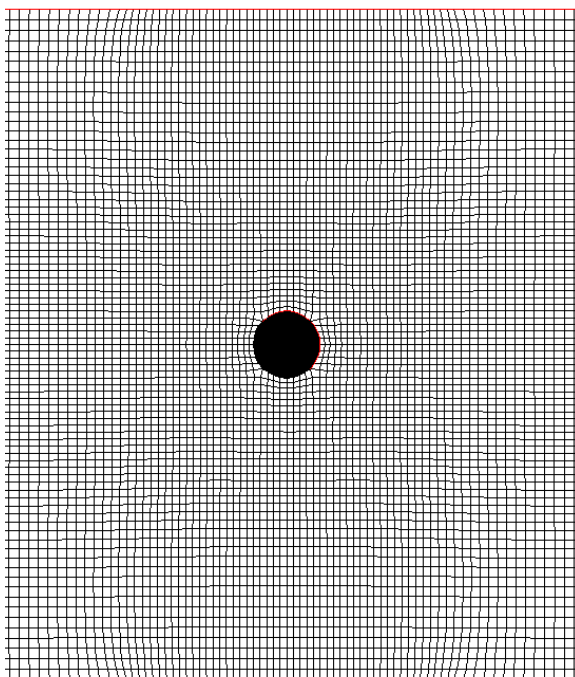
¹ Convection-Diffusion

۶. شبیه سازی

چون در مدل SSIM از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات جریان استفاده می شود، محاسبات الزاماً بر روی مجموعه ای از نقاط شبکه صورت می گیرد. پس اولین گام در شبیه سازی، تقسیم بندی ناحیه ی مورد مطالعه به سلول هایی است که معادلات حاکم بر روی آن ها حل شود. با توجه به قابلیت های محدود مدل عددی در زمینه ی شبکه بندی، ساخت شبکه زمان برترین مرحله پیش از اجرای مدل می باشد. نوع شبکه ای که برای یک مسأله انتخاب می شود ممکن است حل عددی را امکان پذیر و یا غیرممکن سازد. شبکه بندی دقت نتایج و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می دهد. چون در محدوده ی خاصی از فلو، جریان دستخوش تغییر می شود، استفاده از شبکه بندی یکنواخت منطقی به نظر نمی رسد. به وسیله ی برنامه ی نوشته شده در این تحقیق، شبکه بندی غیر یکنواخت با توجه به تغییرات خصوصیات جریان تولید گردید. در بالادست پایه از ۴ و در پایین دست آن از ۲ اندازه ی سلول و در عرض نیز از سه اندازه ی سلول استفاده گردید. در راستای قایم نیز در ۱۲ تراز میدان جریان گسسته شده است. مجموع تعداد سلولها در میدان جریان سه بعدی ۵۲۳۸۹۶ عدد است. شبکه بندی انجام شده در اشکال (۳ و ۴) نشان داده شده اند.



شکل ۳- شبکه ی مورد استفاده در بالادست پایه



شکل ۴- شبکه مورد استفاده در اطراف پایه

برای شبیه سازی اولین ساعت آزمایش با گام زمانی ۲ ثانیه با استفاده از یک کامپیوتر ۴ هسته ای با ۳ گیگابایت رم^۱، محاسبات حدود ۸ روز به طول انجامید. در این مقاله از رابطه وو و همکاران (۲۰۰۰) جهت اعمال اندرکنش ذرات ریزدانه و درشت دانه و مقدار ۰/۶ برای پارامتر m استفاده شده است.

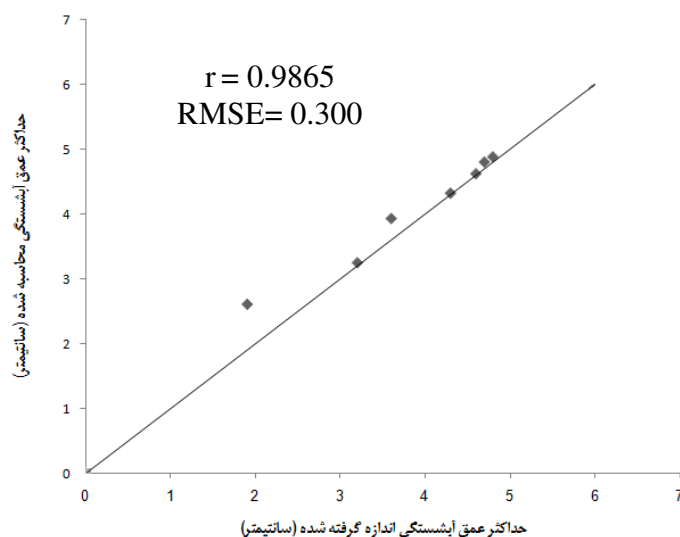
^۱ RAM

۷. نتایج مدل عددی

با توجه به اینکه بیش از ۷۰ درصد آب‌شستگی در ۴۰ دقیقه اول آزمایش اتفاق افتاده و زمان لازم برای اجرای مدل نیز زیاد است، لذا محاسبات و نتایج آن تا این زمان مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۵) نتایج مدل عددی را در برابر مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. عمق آب‌شستگی برآورد شده توسط مدل عددی در گام‌های زمانی ابتدایی بیشتر از عمق آب‌شستگی آزمایشگاهی است، اما با گذشت زمان، این دو مقدار به هم نزدیک می‌شوند. مقادیر ضریب همبستگی خطی (r) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه شده است:

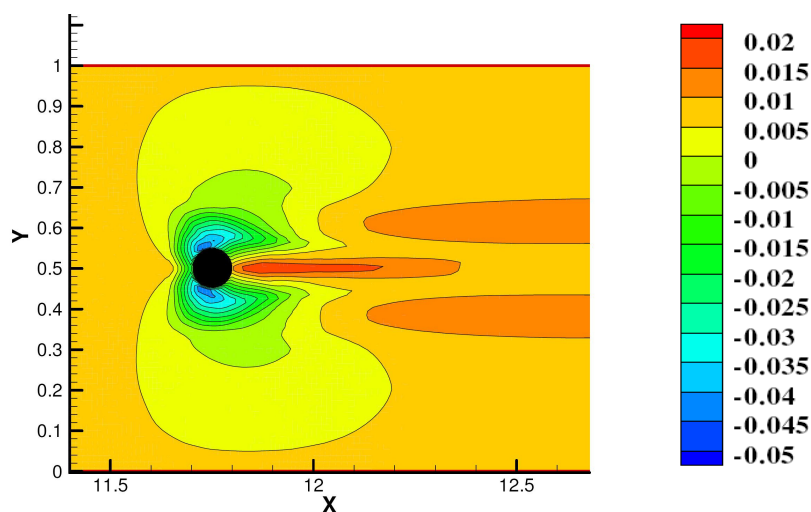
$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (14)$$



شکل ۵- مقایسه مقدار محاسبه شده با مقدار اندازه گرفته شده

در شکل (۶) توپوگرافی بستر پس از یک ساعت از شروع آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۶- توپوگرافی بستر پس از یک ساعت



۸. نتیجه گیری

باتوجه به پیچیدگی های مدل سازی عددی رسوبات غیریکنواخت و مقدار بالای ضریب همبستگی خطی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، مدل عددی SSIM، به خوبی توانست اثر غیریکنواختی مصالح بستر را در پدیده ی آب شستگی موضعی شبیه سازی کند. باتوجه به سه بعدی بودن مدل عددی، این مدل نسبت به موارد مشابه خود دارای برتری محسوسی است. چون مقدار پارامتر m از داده های آزمایشگاهی و صحرایی به دست آمده است، استفاده از مقدار $0/6$ برای این پارامتر، نتایج خوبی را به دست می دهد.

۹. قدردانی

نویسندگان از دکتر چانگ در پارک تحقیقات و فناوری Hsinchu تایوان به علت در اختیار گذاشتن اطلاعات آزمایشگاهی خود، کمال تشکر را می نمایند.

۱۰. مراجع

1. Briaud, J.L., Ting, F., Chen, H. C., Gudavalli, S. R., Perugu, S., and Wei, G., (1999), "SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers," Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE, 125(4), 237-246.
2. Johnson, P. A., (1995), "Comparison of Pier-scour Equations Using Field Data," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(8), pp 626-629.
3. Raudkivi, A.J., (1986), "Functional Trends of Scour at Bridge Piers," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112 (1), pp 1-13.
4. Melville, B. W. and Sutherland, A. J., (1988). "Deign Methods for Local Scour at Bridge Piers," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(10), pp 1210-1226.
5. Johnson, P. A., (1992), "Reliability-based Pier Scour Engineering," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118 (10), pp 1344-1358.
6. Oliveto, G. and Hager, W. H., (2002), "Temporal Evolution of Clear-water Pier and Abutment Scour," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128 (9), pp 811-820.
7. Chang, W.Y., Lai, J.S., and Yen, C.L., (2004), "Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 130(9), pp 905-913.
8. Misri, R.L. Ranga Raju, K.G. and Garde R.J., (1984), "Bed Load Transport of Coarse Nonuniform Sediments," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(3), pp 312-328.
9. Egiazaroff, I.V., (1965), "Calculation of Nonuniform Sediment Concentration," Journal of Hydraulic Division, ASCE, 91(4), pp 225-247.
10. Patel, P.L. and Ranga Raju, K.G., (1999), "Critical Tractive Stress of Nonuniform Sediments," Journal of Hydraulic Research, IAHR, 37(1), pp 39-58.
11. Wu, W., Wang, S.S.Y. and Jia, Y., (2000), "Nonuniform Sediment Transport in Alluvial Rivers," Journal of Hydraulic Research, IAHR, 38(6), pp 427-434.
12. Deigaard, R. and Fredsoe, J., (1978), "Longitudinal Grain Sorting by Current in Alluvial Streams," Nordic Hydrology, 9, pp 7-16.
13. Olsen, N. R.B., (2000). "CFD Algorithms for Hydraulic Engineering." The Norwegian University of Science and Technology.
14. Olsen, N.R.B. and Melaaen, M. C., (1993). "Three-Dimensional Calculation of Scour Around Cylinders." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(9), pp 1048-1051.
15. 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, IAHR, 36(4), pp 579-590.
16. Olsen, N. R. B. and Kjellesvig, H. M., (1998), "Three-Dimensional Numerical Flow Modeling for Estimation of Spillway Capacity." Journal of Hydraulic Research, IAHR, 36(5), pp 775-784.
17. Fischer-Antze, T., Stoesser, T. and Bates, P., (2001), "3D Numerical Modeling of Open-



- channel Flow with Submerged Vegetation.” Journal of Hydraulic Research, IAHR, 39(3), pp 303-310.
18. Olsen, N. R. B., (2003), “Three-Dimensional CFD Modeling of Self-Forming Meandering Channel.” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 129(9), pp 366-372.
 19. Ruther, N. and Olsen, N. R. B., (2005), “Three-Dimensional Modeling of Sediment Transport in a Narrow 90 Channel Bend.” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 131(10), pp 917-920.
 20. Olsen, N. R. B., (2010), “A Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements in Water Intakes with Multiblock Option.” SSIIM User Manual.