

مطالعه عددی سه بعدی آبشستگی اطراف پایه پل ها

تحت جریان های غیر ماندگار

تایماز اسماعیلی^۱، سعید خرقانی^۲ و امیر احمد دهقانی^۳

چکیده: آبشستگی موضعی در مجاورت پایه پل ها همواره به عنوان یک مشکل، بویژه در زمان وقوع سیلاب ها در رودخانه ها مطرح بوده است که اگر تمهیدات لازم برای پیشگیری از این پدیده و یا کاهش اثرات آن اندیشیده نشود، سازه پل با خطر انهدام مواجه خواهد بود. همچنین قرارگیری پی پایه ی پل در فاصله زیاد از سطح زمین باعث غیر اقتصادی شدن طرح می شود. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که مقدار آبشستگی حاصل از وقوع هیدروگراف سیلاب بمراتب کمتر از مقدار آبشستگی محاسبه شده از دبی حداکثر سیلابی است. لذا چنانچه بتوان مقدار آبشستگی تحت اثر جریان غیر دائمی را شبیه سازی نمود، می توان به اقتصاد طرح کمک فراوانی نمود. در این تحقیق با بکارگیری مدل عددی سه بعدی SSIIM، آبشستگی اطراف تک پایه استوانه ای تحت هیدروگراف جریان شبیه سازی شد. جهت صحت سنجی از داده های آزمایشگاهی موجود در این زمینه استفاده گردید. نتایج نشان می دهد که با استفاده از مدل عددی SSIIM می توان مقادیر آبشستگی را در شاخه صعوی هیدروگراف با دقت مناسبی شبیه سازی نمود.

کلید واژه: آبشستگی موضعی، جریان غیر دائمی، نرم افزار SSIIM، هیدروگراف سیلاب.

۱- مقدمه

در صورت عدم طراحی مناسب، با افزایش عمق آبشستگی موضعی و رسیدن آن به تراز پی پایه پل، پایداری سازه پل در خطر خواهد بود. انهدام سازه پل که نقشی مهم در جریان های ارتباطی کشورها دارند تبعات اقتصادی و اجتماعی نا مطلوب زیادی به دنبال خواهد داشت. در ایالات متحده آبشستگی یکی از دلایل اصلی خرابی پل است [4]. هزینه های مربوط به تغییر سازه ها یا ساختن مجدد آنها قابل توجه است ولی کمتر از ۵ برابر هزینه های غیرمستقیم اختلال در حمل و نقل و ترافیک است [5]. این هزینه ها در مناطقی مانند ایالت آلاسکای آمریکا شاید بیش از این مقادیر نیز باشد چون در این ایالت راه های ارتباطی زمینی بین مناطق مختلف شهری محدود هستند و بین بسیاری از شهرها فقط یک راه ارتباطی وجود دارد [6].

از جمله روش های مقابله با آبشستگی موضعی می توان به قرار دادن پی پایه پل ها در عمقی بیش از عمق آبشستگی (متناظر با سیل طرح) اشاره نمود. هرچند، در نظر گرفتن حداکثر سیلاب طرح با دوره بازگشت های زیاد برای محاسبه ی عمق آبشستگی در جهت اطمینان است، لیکن این کار توجیه اقتصادی نخواهد داشت. از سوی دیگر پیش بینی عمق آبشستگی تعادلی بر اساس دبی سیل طراحی و بوسیله یک رابطه معمولاً مستقل از زمان صورت می پذیرد و این در حالی است که افزایش عمق آبشستگی پدیده ای است که با زمان رابطه

پیش بینی عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه پل ها همواره به عنوان یکی از دغدغه های اصلی مهندسین رودخانه مطرح بوده است. سیستم اصلی گردابه ای که به تشکیل حفره های آبشستگی کمک می کند از برخورد جریان به جلوی پایه و انحراف آن به طرف پایین ایجاد می شود که نظیر یک جت عمودی آب عمل کرده و مواد کناره پایه پل را همراه جریان به بالا پرتاب نموده و جریان آب، آن را با خود حمل می کند. در نتیجه در جلوی پایه گودالی حفر می شود که در داخل این گودال جریان چرخشی ایجاد شده و به تدریج عمق حفره زیاد می شود. جریان چرخشی در جلو پایه به دو طرف پایه نیز امتداد می یابد و شکل نعل اسبی را به خود می گیرد [2].

طبق نظر بعضی از محققین این عامل در ابتدا ضعیف است ولی پس از تشکیل حفره ی آبشستگی سیستم جریان نعل اسبی از نظر قدرت و اندازه نیز رشد می کند. با زیاد شدن عمق آبشستگی، مقدار سرعت جریان در نزدیک کف حفره کم شده و هنگامی که قدرت نیروهای محرک تقریباً برابر نیروهای مقاوم گردید آبشستگی متوقف می شود. گردابه های نعل اسبی نیز در اثر جدا شدن خطوط جریان به علت وجود پایه پل در مسیر جریان آب بوجود می آید [3].

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی. taimaz.esmaeili@gmail.com

۲. استادیار دانشکده آب، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور. kharaghanis@yahoo.com

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. a.dehghani@gau.ac.ir

دقت بسیار بالای مدل عددی SSIIM در محاسبه عمق آبشستگی در شرایط جریان دائمی بود. عمق آبشستگی متعادل در زمان نسبتاً طولانی حاصل می‌شود و این در حالی است که ممکن است دبی پیک جریان به اندازه‌های تداوم نداشته باشد که عمق آبشستگی متعادل را ایجاد کند. بنابراین عمق آبشستگی متعادل ممکن است بزرگتر از مقداری باشد که در طول زمان تداوم کوتاه تر ایجاد می‌گردد. Yanmaz, Mia and Nago (2003) (2006) توسعه تنش برشی بستر اطراف پایه در ترکیب با تئوری انتقال رسوبات بستر را مورد توجه قرار دادند و یک روش برای محاسبه تغییرات عمق آبشستگی با زمان ارائه نمودند. [10, 14] Kothyari et al. (1992) تغییرات عمق آبشستگی را با توجه به پارامتر زمان، اطراف پایه‌های استوانه‌ای پل‌ها در شرایط جریان آب صاف، تحت جریان‌های غیر دائمی که به کمک هیدروگراف پلکانی تقریب زده شده بود بررسی کردند. Olivetto et al. (2007) یک مدل تئوری ارائه کردند که قابلیت ارزیابی پروسه آبشستگی در شرایط جریان‌های غیردائمی را داشت. [10] Chang et al. (2004) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ملی تایوان مطالعاتی در زمینه توسعه عمق حفره آبشستگی اطراف پایه پل در شرایط آب صاف و تحت جریان‌های غیر دائمی که با هیدروگراف‌های پلکانی تقریب زده شده بودند، انجام داد. [13].

امروزه کاربرد مدل‌های عددی در زمینه‌های مهندسی بسیار رایج گشته‌اند. از این رو از آنها در کارهای مهندسی رودخانه نیز به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. مدل‌های عددی سه بعدی به دلیل در نظر گرفتن جریان‌های ثانویه ناشی از برخورد جریان آب به پایه پل در این میان از جایگاه ممتازی برخوردار هستند این در حالی است که مدل‌های یک بعدی و دو بعدی فاقد چنین توانایی می‌باشند.

در این مقاله پس از معرفی مدل عددی SSIIM و معادلات حاکم بر میدان جریان و رسوب، توسعه عمق حفره آبشستگی در طول زمان هیدروگراف‌های مختلف در اطراف پایه استوانه‌ای به کمک مدل عددی SSIIM، شبیه سازی شده است. نتایج مدل عددی با اطلاعات آزمایشگاهی در دسترس مقایسه گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که نتایج مدل عددی در شاخه صعودی هیدروگراف‌ها در تمام شرایط بسیار خوب است ولی دقت نتایج مدل عددی در شاخه نزولی

مستقیم دارد به گونه‌ای که در ابتدا آهنگ آبشستگی بالا بوده ولی با گذشت زمان و نزدیک شدن به عمق متعادل از سرعت توسعه آن کم گردیده و نهایتاً متوقف می‌شود [1].

منطقه جریان سه بعدی اطراف پایه پل به دلیل تفکیک و پیدایش گردابه‌های مختلف بسیار پیچیده است. پیچیدگی میدان جریان به خاطر فعل و انفعال دینامیکی بین جریان و مرز متحرک در طول توسعه حفره آبشستگی بیشتر نیز خواهد شد. جریان هم آغاز کننده و هم کنترل کننده الگوی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل است که با فعل و انفعال پیوسته بر جریان تاثیر می‌گذارد [7]. پیشگویی دقیق الگوی آبشستگی در اطراف پایه پل قویاً وابسته به حل مسئله ساختار جریان و مکانیسم انتقال رسوبات در داخل و خارج حفره آبشستگی در طول توسعه حفره آبشستگی است [8]. بیشتر مطالعات پیشین بر روی تخمین عمق آبشستگی متعادل و رابطه آن با جریان و پارامترهای ژئوتکنیکی با استفاده از آنالیز ابعادی و اطلاعات بدست آمده از آزمایشات در مقیاس کوچک، متمرکز می‌باشد. معادلات پیش بینی کننده عمق آبشستگی همیشه تقریب‌های قابل قبولی در شرایط صحرائی نمی‌دهند و حتی گاهی اوقات در شرایط آزمایشگاهی متفاوت هم نتایج متفاوتی می‌دهند. عدم درک صحیح و عدم محاسبات درست ساختار جریان بخشی از این مشکل می‌باشد [9].

تعداد زیاد پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی بر پیچیدگی آن می‌افزاید از این رو نیاز به یک مدل عددی توانمند که با استفاده از گسسته سازی معادلات حاکم بر میدان جریان و رسوب و اعمال یک سری فرضیات ساده کننده، روابط پیچیده حاکم بر این پدیده را به معادلات ساده و قابل حل تبدیل نماید، به طور جدی احساس می‌شود. از سوی دیگر در نظر گرفتن پارامتر زمان در طول فرآیند آبشستگی همواره مد نظر محققان بوده است ولی با توجه به اینکه در نظر گرفتن زمان در این رویداد مخرب بر جنبه‌های پیچیده قضیه می‌افزاید، نیاز به بررسی و تحقیق بیشتر و جامع تری در این رابطه می‌باشد. کد عددی سه بعدی SSIIM می‌تواند پاسخگوی بسیاری از نیازهای در زمینه‌های مختلف هیدرولیکی از جمله آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها باشد، خصوصاً اینکه این کد عددی قابلیت در نظر گرفتن زمان در طول فرایند آبشستگی را نیز دارد [1].

طیب زاده و همکاران (۱۳۸۴) جهت اندازه گیری عمق آبشستگی متعادل اطراف پایه‌های پل با مقطع دایره‌ای از مدل عددی SSIIM استفاده نمودند. نتایج مطالعات آنها بیانگر

۲-۲- معادلات حاکم بر میدان جریان

در این نرم افزار معادلات حاکم بر میدان جریان معادلات ناویر استوکس می باشند که جهت حل آن از مدل آشفتگی k-ε استفاده می شود. به علاوه کد عددی SIIM قابلیت استفاده از مدل های آشفتگی مختلف را نیز دارد. به هر حال معادلات ناویر استوکس برای سیالات تراکم ناپذیر با چگالی ثابت در حالت برداری به فرم زیر می باشد:

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

که در رابطه ی فوق ترم اول سمت چپ ترم گذار (تغییرات زمانی) و ترم بعدی ترم جابجایی می باشد. اولین ترم سمت راست ترم فشار و بعدی ترم مربوط به تنش رینولدز است. جهت ارزیابی ترم اخیر به یک مدل آشفتگی نیاز می باشد. جهت انفعال (گسسته سازی) از روش حجم محدود^۱ با استفاده از قاعده توانی یا الگوریتم جهتمند مرتبه دوم استفاده می شود.

روش SIMPLE نیز به عنوان پیش فرضی جهت تصحیح فشار به کار می رود که البته نرم افزار قابلیت استفاده از الگوریتم SIMPLEC را نیز داراست. بطور خلاصه می توان معادلات حاکم بر میدان جریان در حالت^۲ آشفته را معادله پیوستگی و معادله مونتوم دانست. اگر فرض شود که جریان دائمی است ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) و نوسانات جرم مخصوص صفر است ($\rho' = 0$) معادلات مونتوم و پیوستگی به ترتیب بصورت زیر قابل بیان هستند.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3)$$

U مولفه سرعت، ρ چگالی سیال و P فشار کل می باشد. ترم $-\overline{\rho u_i u_j}$ همان ترم تنش رینولدز است. طبق روابط (۲) و (۳) می توان سه معادله مونتوم و یک معادله پیوستگی نوشت که در آنها مجموعاً ۱۰ مجهول (سرعت در سه جهت u, v, w و فشار p و شش مولفه تنش رینولدز) وجود دارد که این بدان معناست که میدان معادلات حاکم بر جریان بسته نبوده و جهت بستن آنها باید از معادلات آشفتگی نیز استفاده نمود.

به نوع هیدرو گراف جریان وابسته است. این در حالی است که قسمت عمده آبشستگی در محل پایه پل در شاخه صعودی اتفاق می افتد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- معرفی مدل عددی SIIM

مدل SIIM یک نرم افزار سه بعدی جهت شبیه سازی حرکت آب و رسوب بوده و توسط Nils Reidar B. Olsen در دپارتمان مهندسی هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ توسعه یافت. SIIM مخفف *sediment simulation in water* intakes with multiblock option می باشد [11]. این مدل CFD سه بعدی بر مبنای روش حجم محدود بوده و معادلات ناویر- استوکس را بر مبنای مدل آشفتگی k-ε استاندارد حل می کند [12]. البته این مدل قابلیت استفاده از دیگر مدل های آشفتگی را نیز دارد که توسط کاربر قابل انتخاب است. زمینه استفاده از آن در مهندسی رودخانه، محیط زیست، هیدرولیک و رسوب می باشد. بعدها استفاده از این برنامه در سایر موضوعات هیدرولیکی نظیر مدل کردن سرریزها، افت در تونل ها، رابطه عمق و دبی در رودخانه ها و... نیز توسعه یافت. مزیت اصلی مدل SIIM در مقایسه با سایر برنامه های CFD توانایی مدل کردن انتقال رسوب در بستر متحرک در هندسه های پیچیده است. در سالیان اخیر از این مدل عددی در محاسبات کیفیت آب نیز استفاده شده است.

برنامه SIIM معادلات Navier-Stokes را با مدل استاندارد بر روی یک شبکه سه بعدی تقریباً نامتعامل حل می کند. برای مفصل سازی نیز از روش حجم کنترل به همراه الگوریتم توانی یا الگوریتم جهتمند مرتبه دوم استفاده می شود. روش SIMPLE جهت ارتباط ترم فشار و سرعت به کار می رود. با استفاده از یک روش حل ضمنی میدان سرعت در هندسه محاسبه شده و با استفاده از میدان سرعت محاسبه شده و با حل معادله ی پیوستگی رسوب به محاسبه ی تغییرات بستر می پردازد [11]. روند محاسبات میدان جریان و رسوب در مدل عددی SIIM در بخش های ۲-۲ تا ۲-۵ بصورت زیر می باشد [11]:

1. Finite Volume

۳-۲- مدل آشفتگی k-ε

متفاوتی محاسبه می‌شود که بعضی از آنها که به صورت پیش فرض نیستند، بایستی فراخوان گردند. با ید توجه داشت که بعضی از این الگوریتم‌ها نسبت به گام زمانی بسیار حساس هستند.

$$\Delta h_{ij} = \frac{1}{\rho g} (P_{ij} - P_{ref}) \quad (8)$$

در این روش ابتدا جابجایی عمودی برای سلول های سطح آب اعمال شده و بدین ترتیب سلول های پایین تر نیز دارای جابجایی خواهند بود که میزان آن متناسب با توزیع لایه ها در جهت عمودی می‌باشد به نحوی که نسبت اندازه سلول ها در جهت عمودی به عمق آب همواره مقدار ثابتی خواهد داشت.

۲-۵- معادلات حاکم بر جریان رسوب

اساس محاسبه دبی رسوب در مدل عددی SSIIM بر مبنای حل معادله انتقال- پخش^۲ رسوب استوار می‌باشد. در این حالت ابتدا غلظت رسوب در فاصله بین سطح آب تا سطح مینا محاسبه می‌گردد. تراز سطح مینا با توجه به ارتفاع زبری معادل در نظر گرفته می‌شود. حمل رسوب به دو نوع بار بستر و بار معلق تقسیم می‌شود.

بار معلق را می‌توان به کمک معادلات پخش- انتقال رسوب با محاسبه غلظت رسوب بصورت زیر تعیین کرد. در رابطه (۹)، W سرعت سقوط ذرات و Γ_T ضریب پخش می‌باشد که از معادله k-ε استاندارد بدست می‌آید.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j}) \quad (9)$$

در رابطه (۱۰) Sc عدد اشمیت بوده و بصورت پیش فرض ۱ در نظر گرفته می‌شود (Olsen, 2007). V_T نیز لزجت گردابه ای است که در رابطه‌ی (۵) نیز توضیح داده شده است.

$$\Gamma_T = \frac{V_T}{Sc} \quad (10)$$

رابطه (۱۱) توسط Van Rijn در سال ۱۹۸۷ جهت تعیین غلظت رسوب در نزدیکی بستر ارائه شده که در مدل عددی SSIIM از آن استفاده می‌شود.

در نرم افزار SSIIM به صورت پیش فرض از مدل آشفتگی k-ε جهت محاسبه تنش های رینولدز استفاده می‌گردد که معادله آن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + P_k - \epsilon \quad (11)$$

در این معادله V_T لزجت گردابه ای بوده که توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_T = C_\mu \frac{k}{\epsilon} \quad (12)$$

در رابطه‌ی (۱۱)، P_k به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$P_k = v_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} (\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (13)$$

در رابطه (۱۱)، ε بیانگر میزان اتلاف انرژی جنبشی (k) بوده و با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k + C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (14)$$

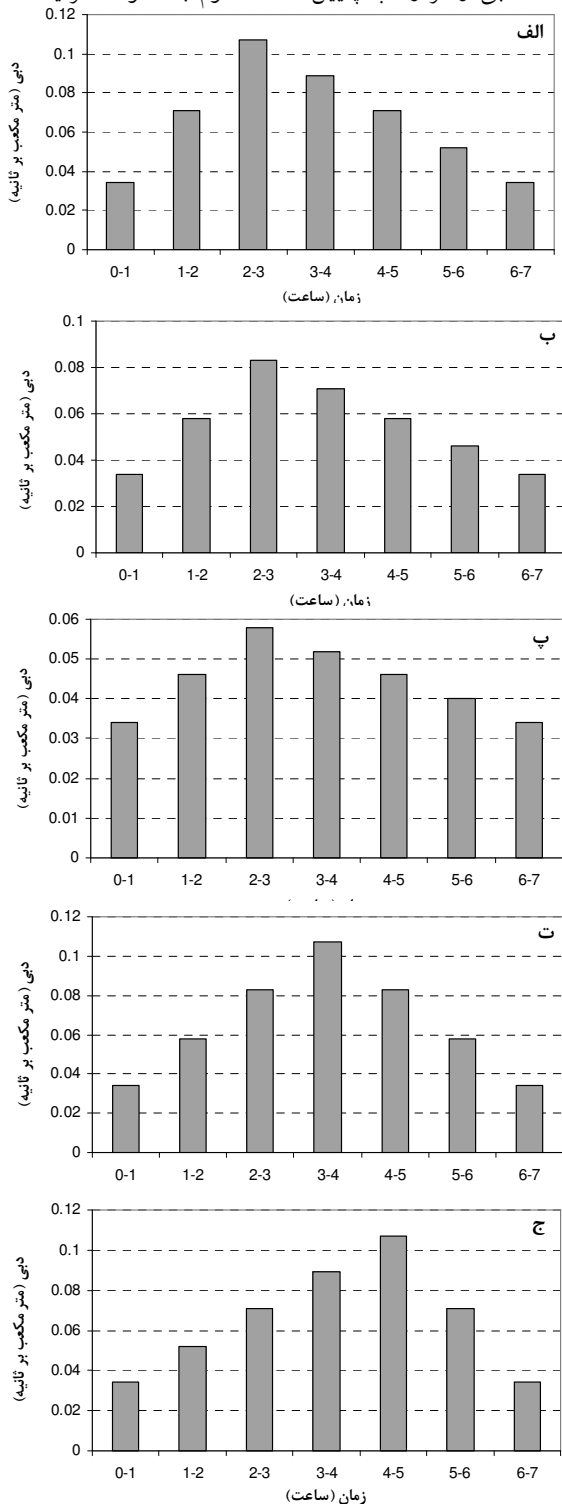
در معادلات بالا، C_۱ها ثابت هایی هستند که توسط کاربر قابل تغییر نمی‌باشند. مدل عددی سه بعدی SSIIM قابلیت استفاده از مدل های آشفتگی دیگری چون k-omega, RNG را نیز دارد که توسط کاربر قابل انتخاب هستند.

۲-۴- محاسبه پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب در این نرم افزار با استفاده از برون یابی فشار در سلول های داخلی نزدیک سطح آب تعیین می‌شود. یک سطح مرجع در یک سلول واقع در پایین دست داده می‌شود که در این سلول سطح آب ثابت و بدون تغییر مکان است. فشار در این سلول P_{ref} به عنوان فشار مرجع انتخاب می‌شود و سپس یک اختلاف فشار برای هر سلول با کم نمودن از این فشار مرجع محاسبه می‌شود. این اختلاف فشارهای محاسبه شده با استفاده از رابطه (۸) مقدار جابجایی را برای هر سلول بدست می‌دهند. محاسبات سطح آزاد آب^۱ با استفاده از یک روش Fixed-lid با گرادیان صفر برای تمام متغیرهای انجام می‌پذیرد. موقعیت و جابجایی در این روش با الگوریتم های

هر یک ساعت به کمک هیدروگراف پلکانی تقریب زده شده

است. دبی و تراز آب پایین دست فلوم به عنوان شرایط



شکل ۱. هیدروگراف های پلکانی به کار رفته در شبیه سازی عددی

$$C_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{a \left[\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، d قطر ذرات رسوبی، a تراز مرجع با توجه به ارتفاع زبری، τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی بستر برای جابجایی ذرات رسوبی باتوجه به دیاگرام شیلدنز، ρ_s و ρ_w چگالی آب و رسوب، v ویسکوزیته آب و g شتاب ثقل است. مدل عددی SSIM جهت محاسبه بار بستر در فاصله بار بستر تا سطح مینا از رابطه زیر استفاده می نماید.

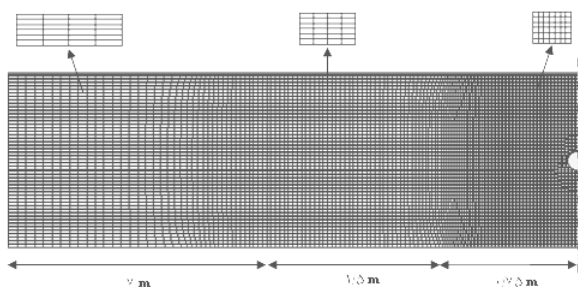
$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w}}} = 0.053 \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{D_{50}^{0.3} \left[\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، D_{50} سایز متوسط ذرات رسوبی است. بقیه پارامترها در روابط قبلی معرفی شده اند.

۳- داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در شبیه سازی عددی

به منظور کالیبراسیون و صحت سنجی نتایج مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی Chang et al. (2004) که در آزمایشگاه انستیتو تحقیقات Hydrotech دانشگاه ملی تایوان در تایپه بدست آمده، استفاده گردید. آزمایش ها در کانالی به طول ۳۶ متر و به عرض ۱ متر با مصالح بستر یکنواخت به قطر ۰/۷۱ میلیمتر در شرایط جریان آب صاف انجام شده است. یک پایه استوانه ای از جنس پلکسی گلاس (Plexiglass) و به قطر ۱۰ سانتیمتر در مرکز قسمت میانی کانال قرار داده شده است. تغییرات زمانی پروفیل سطح بستر اطراف پایه نیز به کمک دو دوربین با قطر لنز ۲ میلی متر که در داخل پایه کار گذاشته شده اند، اندازه گیری شده است. از آنجا که هدف شبیه سازی عددی آبشستگی حول پایه استوانه ای تحت شرایط جریان غیر دائمی و به کمک هیدروگراف جریان می باشد از هیدروگراف های شکل (۱) که به صورت پلکانی می باشد استفاده گردیده است.

با توجه به زمان تداوم هفت ساعته جریان در این هیدروگراف ها، شرایط مرزی دبی و تراز آب پایین دست در



شکل ۲. ساختار مش به کار رفته در شبیه سازی عددی و نمایش شماتیک ریز شدن سلول ها با نزدیک شدن به پایه.

تعداد مقاطع استفاده شده در پلان در جهت طولی و با توجه به طول در نظر گرفته شده فلوم ۵۵۰ و در جهت عرضی ۱۰۰ عدد بود. با توجه به اینکه در جهت قائم توزیع خطوط شبکه در ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۵۰٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪ عمق جریان بوده است، تعداد کل سلول ها در شبکه سه بعدی مدل ۳۸۵۰۰۰ عدد بوده است. با توجه به حساس بودن تغییرات سرعت در کف فلوم توزیع خطوط شبکه در نزدیکی بستر فشرده تر در نظر گرفته شده است.

پس از ساختن شبکه با اعمال شرایط مرزی دبی و تراز آب پایین دست مدل عددی اجرا شده و حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده توسط مدل عددی در زمان های متناظر با اندازه گیری های آزمایشگاهی ثبت گردید و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. از آنجا که محاسبات میدان جریان و رسوب در سه بعد و بصورت وابسته به زمان صورت می گیرد، شبیه سازی عددی توسعه حفره آبشستگی تحت هر کدام از هیدروگراف های جریان با توجه به گام زمانی که مدل کالیبره می گردد ممکن است چندین روز زمان ببرد.

۵- نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی

در شکل (۳) توسعه عمق حفره آبشستگی اطراف پایه استوانه ای نسبت به زمان در دو حالت آزمایشگاهی و عددی برای ساعت اول نشان داده شده است. در انتهای یک ساعت اول اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و مدل عددی به کمتر از ۲٪ می رسد که عملاً مقدار ناچیزی است. نمودار شکل (۳) گویای آن است که بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی عددی سازگاری خوبی وجود دارد و مقادیر کم خطا در این کد عددی سه بعدی و با در نظر گرفتن پارامتر زمان و حل معادلات بر مبنای آن، بیانگر توانمندی و دقت خوب آن می باشد. محور افقی زمان را بر حسب دقیقه و محور قائم مقدار عمق آبشستگی را بر حسب میلی متر نشان می دهد.

مرزی در ساعت اول به مدل عددی داده شده و سپس مدل عددی با گام های زمانی ۴ ثانیه ای و با تخصیص زیری مناسب کالیبره گردید. در مرحله بعد تغییرات تراز بستر ایجاد شده حاصل از ساعت اول، بعنوان پیش فرض برای ساعت دوم استفاده گردیده و شرایط مرزی جدید نیز در ساعت دوم به مدل عددی داده شد و این کار تا ساعت هفتم ادامه یافت. نهایتاً در پایان هر ساعت تغییرات بستر و مقدار حداکثر عمق آبشستگی ثبت گردید.

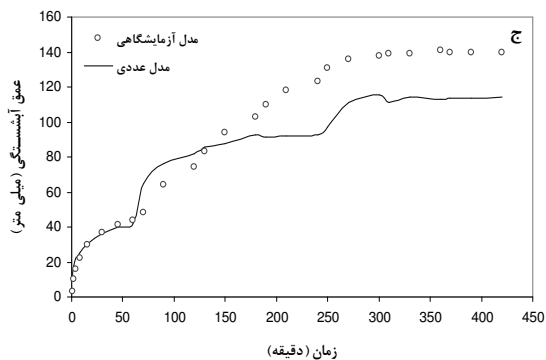
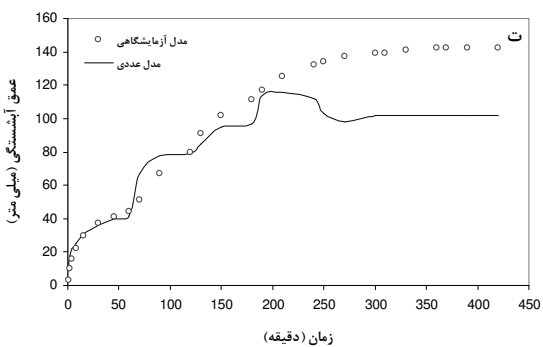
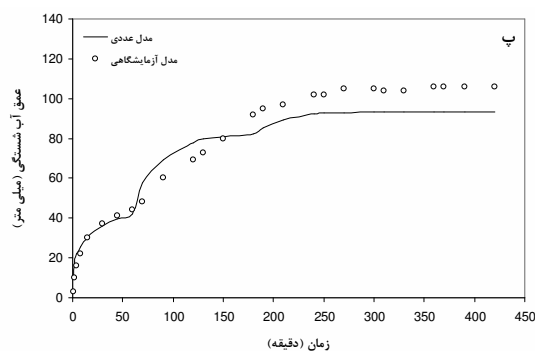
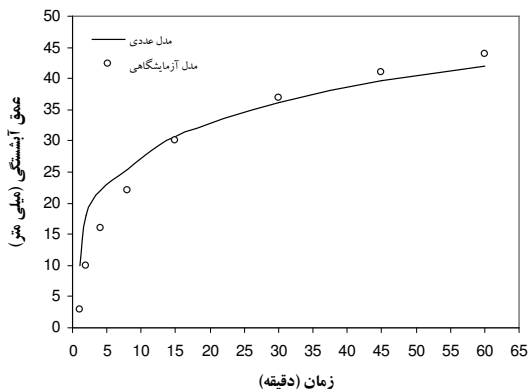
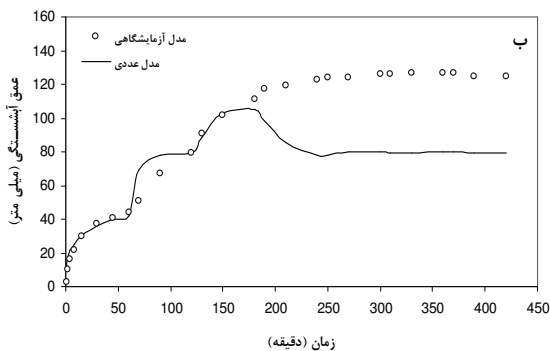
در شکل (۱) هیدروگراف های الف، ب و پ در ساعت سوم به دبی پیک می رسند و تفاوت آنها فقط در مقدار دبی پیک می باشد. هیدروگراف پ دارای کمترین مقدار دبی پیک در مقایسه با چهار هیدروگراف دیگر بوده و نسبت به دیگر هیدروگراف ها روند تغییرات دبی در گام های مختلف زمانی تدریجی و ملایم می باشد. هیدروگراف های الف، ت و ج دارای دبی پیک یکسانی بوده و تفاوت آن ها در زمان رسیدن به دبی پیک می باشد.

۴- شبیه سازی میدان جریان و رسوب در اطراف پایه پل تحت

جریان غیر دائمی با استفاده از مدل عددی SSIIM

اولین مرحله قبل از اجرای مدل عددی تقسیم بندی ناحیه مورد نظر به سلول هایی است که معادلات دیفرانسیلی حاکم بر میدان جریان و رسوب باید برای آن ها حل گردند. این فرایند مش بندی (شبکه بندی) نامیده می شود.

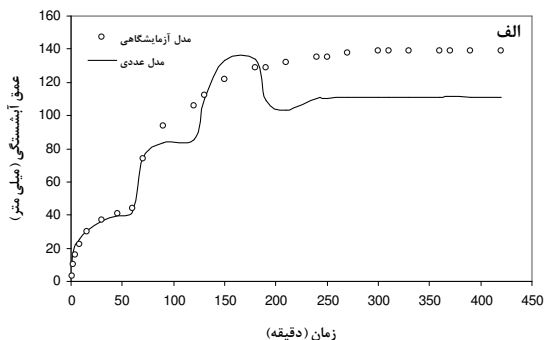
ساختن شبکه مناسب و قوی ترین فرآیند آماده سازی اطلاعات ورودی برای مدل عددی SSIIM می باشد که دقت محاسبات، همگرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می دهد. جهت کاستن زمان و حجم محاسبات و در عین حال افزایش دقت آن، شبکه ساخته شده توسط یک برنامه جداگانه تهیه شده توسط مؤلفین به زبان QBASIC در سه مرحله و بتدریج با نزدیک شدن به پایه پل ریز شده است. به طوریکه در فواصل دورتر از پایه اندازه سلول ها $5 \times 1 \text{ cm}$ و سپس با کمتر شدن فاصله $2/5 \times 1 \text{ cm}$ و نهایتاً در ۱/۵ متر میانی در اطراف پایه استوانه ای $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ تعیین شده است. شکل (۲) ریزتر شدن تدریجی شبکه را بصورت شماتیک و بدون مقیاس در نیمی از کانال نشان می دهد.



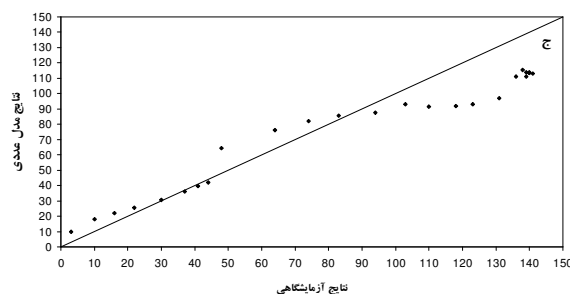
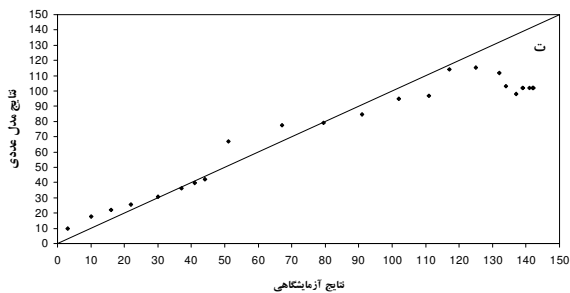
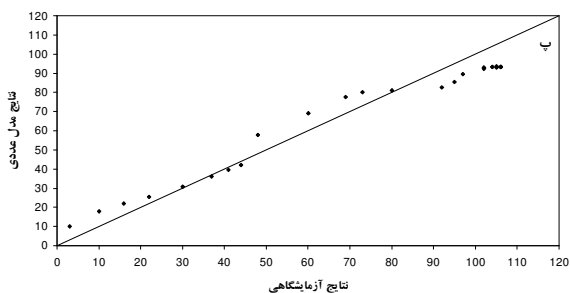
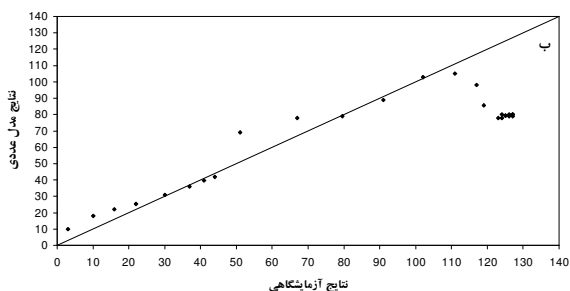
شکل ۳. تغییرات عمق آبشستگی اطراف پایه استوانه ای در یک ساعت اول به کمک نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی

قسمت اعظم آبشستگی در جریان های غیر دائمی تا هنگام رسیدن به دبی پیک هیدروگراف اتفاق می افتد و پس از آن در زمان فرو کش کردن هیدروگراف تا پایان زمان تداوم آن عمق آبشستگی به مقدار ناچیزی افزایش می یابد. این نتیجه بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی (Chang et al. (2004 بدست آمده است. شرایط مرزی دبی و تراز آب پایین دست برای تمام هیدروگراف ها در ساعت اول یکسان است. توسعه عمق حفره آبشستگی در طول زمان تداوم هیدروگراف ها مطابق با آنچه در بخش ۳ توضیح داده شد، به کمک نرم افزار SSIM شبیه سازی گردید. این نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۵ مقادیر آبشستگی اندازه گیری شده در برابر نتایج حاصل از شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار SSIM به ترتیب تحت هیدروگراف های جریان شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل به خوبی مقدار اختلاف مقادیر بدست آمده از نرم افزار و مقادیر آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۴. توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی حول پایه استوانه ای. الف) تحت هیدروگراف ۱-الف، ب) تحت هیدروگراف ۱-ب، پ) تحت هیدروگراف ۱-ج، ت) تحت هیدروگراف ۱-ت و ج) تحت هیدروگراف ۱-ج.

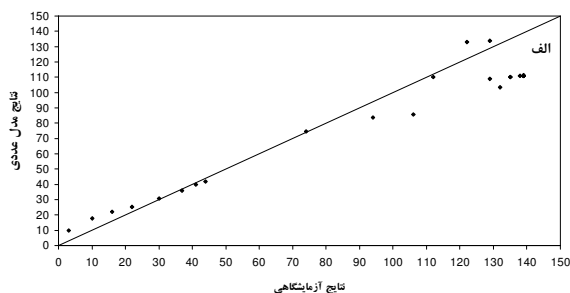


همان طور که از نتایج نشان داده شده در شکل ۴ مشخص است نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در شاخه صعودی تحت تمام هیدروگراف ها از تطابق بسیار خوبی برخوردار است.

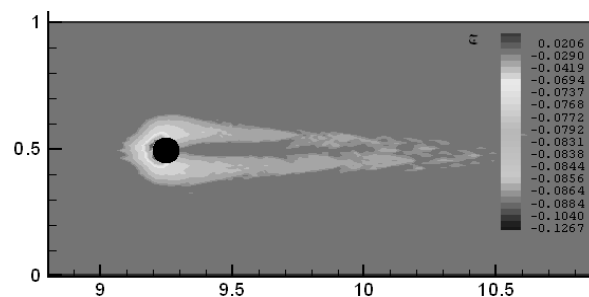
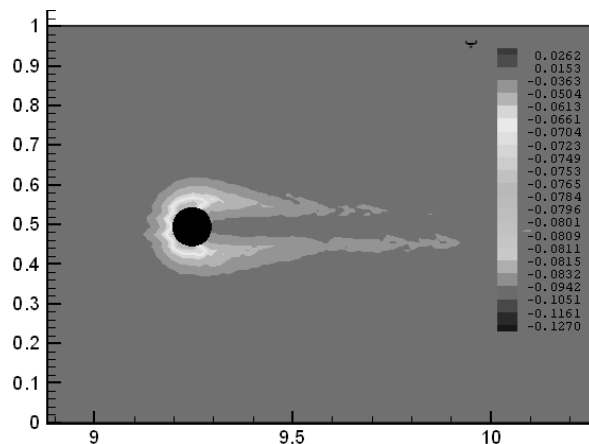
نتایج مدل عددی در شاخه نزولی نسبت به شاخه صعودی از دقت کمتری برخوردار است. میزان دقت نتایج مدل عددی در شاخه نزولی تحت هیدروگراف های پ و ج نسبت به سایر هیدروگراف های جریان بهتر است.

شکل های ۴ و ۵ نشان می دهند که بر اساس نتایج مدل عددی نیز قسمت عمده آبشستگی در پایان شاخه صعودی حاصل می شود به طوریکه بیش از ۸۰٪ عمق نهایی آبشستگی نهایی در پایان زمان رسیدن به دبی پیک رخ داده است. نتایج مدل عددی تحت هیدروگراف جریان شکل ۱-پ از دقت بسیار خوبی چه در شاخه نزولی و چه در شاخه صعودی برخوردار هستند. در این هیدروگراف اختلاف دبی پیک و حداقل نسبت به سایر هیدروگراف ها کمتر است. طبق نتایج بدست آمده تحت هیدروگراف های جریان شکل ۱-الف، ۱-ت و ۱-ج که در همه آنها مقدار دبی پیک یکسان است، مشاهده می شود در شرایط جریان شکل ۱-ج دقت نتایج در شاخه نزولی نسبت به دو هیدروگراف دیگر بهتر است. در هیدروگراف شکل ۱-ج دبی پیک در ساعت پنجم حاصل شده است در نتیجه اختلاف دبی در گام های متوالی در شاخه صعودی نسبت به دیگر هیدروگراف ها کمتر می باشد. به طور کلی در شاخه نزولی بعضی از هیدروگراف ها به دلیل تغییر ماهیت شرایط مرزی دبی و تراز سطح آب از حالت صعودی به نزولی، نتایج این تغییر شرایط با کمی تاخیر در مدل عددی ظاهر می شود و همین باعث ایجاد خطا خواهد شد. مقدار خطای نتایج مدل عددی در شاخه نزولی با میزان تغییرات دبی در گام های متوالی در شاخه صعودی نسبت مستقیمی دارد.

نرم افزار SSIIM می تواند مقاطع عرضی، طولی و الگوی جریان را در قسمت های مختلف مدل نمایش دهد.



شکل ۵. نمایش مقدار اختلاف مقادیر آبشستگی به دست آمده به کمک نرم افزار و نتایج آزمایشگاهی در زمان های متناظر. الف) تحت هیدروگراف ۱-الف، ب) تحت هیدروگراف ۱-ب، پ) تحت هیدروگراف ۱-پ، ت) تحت هیدروگراف ۱-ت و ج) تحت هیدروگراف ۱-ج.

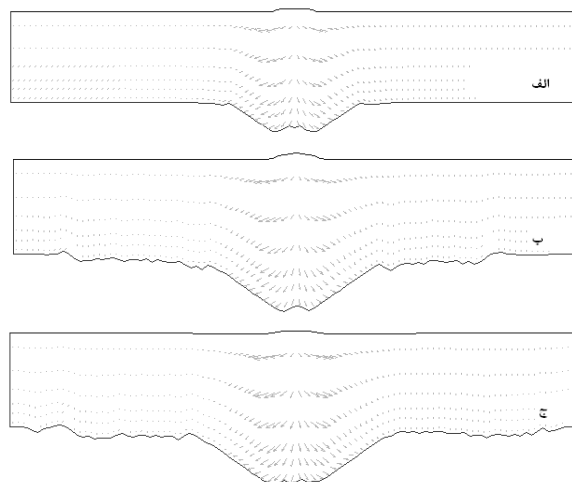


شکل ۷. شکل تراز بستر حول پایه استوانه ای تحت هیدروگراف شکل ۱-پ (الف) در انتهای ساعت اول، ب) در انتهای ساعت سوم و ج) در پایان ساعت هفتم.

۶- جمع بندی

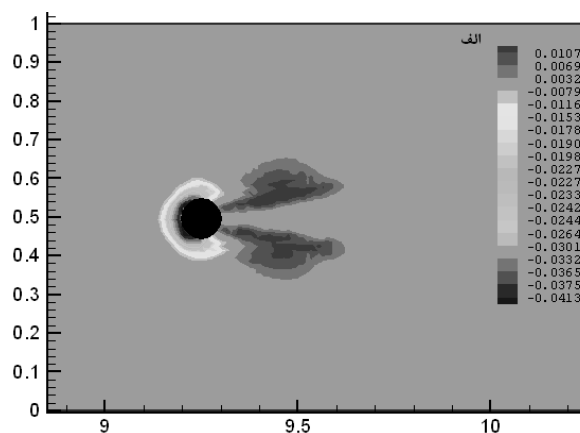
با توجه به خروجی های مدل عددی که در شکل های ۳ تا ۷ نشان داده شده اند نتایج زیر بدست می آید:

- مدل عددی سه بعدی SSIM توانایی مدل کردن توسعه عمق حفره آبشستگی در حالت وابسته به زمان تحت هیدروگراف جریان را داراست. دقت نتایج مدل عددی در شاخه صعودی هیدروگراف بسیار خوب است به طوریکه اختلاف نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در زمان های متناظر در شاخه صعودی کمتر از ۲۰٪ است.
- قسمت عمده عمق آبشستگی نهایی (بیش از ۸۰٪) در شاخه صعودی هیدروگراف جریان اتفاق می افتد. از این رو می توان در مقاصد عملی، توسعه عمق حفره آبشستگی را تا پایان شاخه صعودی هیدروگراف مدل نمود و با در نظر گرفتن ضریب اطمینانی آن را در طراحی پایه پل بکار برد.
- در شاخه نزولی بعضی از هیدروگراف ها به دلیل تغییر ماهیت



شکل ۶. مقطع عرضی بلافاصله بالادست پایه پل و جهت جریان های ثانویه تحت هیدروگراف شکل ۱-پ (الف) در انتهای ساعت اول، ب) در انتهای ساعت سوم و ج) در پایان ساعت هفتم.

در شکل ۶ مقطع عرضی بلافاصله بالادست پایه پل و جریان های ثانویه رو به پایین در پایان ساعت های اول، سوم و هفتم تحت هیدروگراف شکل ۱-پ نشان داده شده است. روند توسعه عمق حفره آبشستگی حول پایه استوانه ای و پس زدگی آب در بالادست پایه در این شکل ها کاملاً مشهود است. در شکل ۷ تغییرات تراز بستر حول پایه استوانه ای تحت هیدروگراف جریان شکل ۱-پ به ترتیب در پایان ساعت های اول، سوم و هفتم نشان داده شده است. در این شکل ها مشاهده می گردد که به تدریج با گذشت زمان شکل گردابه های نعل اسبی اطراف پایه ها حفظ شده اند ولی امتداد آن ها تا فاصله دورتری پشت پایه کشیده شده است.



movements in water intakes with multiblock option," User's manual .

12. Olsen, N.R.B., Jimenes, O.F., Abrahamsen, L., and Lovoll, A., (1999), "3D CFD modeling of water and sediment flow in a hydropower reservoir," International Journal of Sediment Research, Vol. (14), No.1.
13. Chang, W.Y., Lai, J.S., and Yen, C.L., (2004), "Evolution of scour depth at circular bridge piers," J. Hydr. Engrg, ASCE, 130(9), pp 905-913.
14. Mia, M.F., and Nago, H., (2003), "Design model of time-dependent local scour at circular bridge piers," J. Hydr. Engrg., ASCE, 130(6), pp 420-427.

شرایط مرزی دبی و تراز سطح آب از حالت صعودی به نزولی، نتایج این تغییر شرایط با کمی تاخیر در مدل عددی ظاهر می‌شود و همین باعث ایجاد خطا خواهد شد.

۷- مراجع

۱. اسماعیلی، ت.، خرقانی، س. و دهقانی، ا.ا.، (۱۳۸۸)، " شبیه سازی عددی آب شستگی موضعی در پایه پل‌های استوانه‌ای تحت جریان‌های غیر دائمی، " مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۲. زرآتی، امیررضا، (۱۳۸۱)، " نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل ها، " دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
۳. شفاعی بجستان، محمود.، (۱۳۸۴)، " هیدرولیک رسوب، " دانشگاه شهید چمران، اهواز.
4. Murillo, J.A., (1987), "The scourge scour," J. Hydr. Engrg., ASCE, 57(7), pp 66-69.
5. Roheds, J., and Trent, R.E., (1999). "Economic of floods, scour and bridge failures," ASCE, pp 1013-1018.
6. Conaway, J.S., (2004), "Summary and Comparison of Multiphase Streambed scour Analysis at Selected Bridge Sites in Alaska," U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey Publication, Scientific Investigation Report 2004-5066, 34 p.
7. Raudkivi, A.J., and Ettema, R., (1985), "Scour at cylindrical bridge piers in armoured beds," J. Hydr. Engrg., ASCE, 111(4), pp 713-731.
8. Mendoza-Cabrera, C., (1993), "Computation of flow past a pier mounted on a flat plate, " Proceeding of ASCE Water Resources Engineering Conference, July 25-30, pp 899-904.
9. Ahmed, F., and Rajaratnam, N., (1998), "Flow around bridge piers," J. Hydr. Engrg., ASCE, 124(3), pp 288-300.
10. Yanmaz, A.M., (2006), "Temporal variation of clear water scour at cylindrical bridge piers," Can. J. Eng, 33, pp 908-1102.
11. Olsen, N.R.B., (2007), "A three dimensional numerical model for simulation of sediment