



## بررسی صفحات مستغرق در مسیر رودخانه با استفاده از نرم افزار SSIIM

کورس نکوفر<sup>۱</sup>، مریم ثقفی<sup>۲\*</sup>، مهرناز روزبهانی<sup>۳</sup>

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، دانشکده فنی و مهندسی، مازندران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، دانشکده فنی و مهندسی، مازندران، ایران

۳- کارشناس ارشد، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: nekoufar@iauc.ac.ir

### چکیده

مسئله کنترل فرسایش و رسوب گذاری در رودخانه‌ها از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. هر ساله با وقوع سیلاب در رودخانه‌ها، تعداد زیادی از پل‌ها تخریب می‌شوند. یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها، آبشستگی اطراف پایه‌های پل است که خسارت‌های جانی و مالی زیادی به بار می‌آورد. صفحات مستغرق، سازه‌هایی هستند که در کف رودخانه با زاویه‌ای نسبت به جریان اصلی و برای جلوگیری از فرسایش کناره رودخانه‌ها، پیچ‌ها و پایه سازه‌های درون آب و اصلاح مسیر آب و مرفولوژی بستر نصب می‌شوند که سبب تولید گرداب ثانویه و تغییر الگوی جریان در کف رودخانه و در نتیجه، تغییر روند انتقال رسوب و فرسایش خواهند شد. شناخت میدان جریان اطراف صفحات می‌تواند مهندسان را در کاربرد بهتر آنها در رودخانه‌ها یاری کند. از این‌رو، در این‌رو، در این تحقیق اثر صفحات مستغرق بر پایه‌های استوانه‌ای در مسیر رودخانه با استفاده از نرم‌افزار SSIIM بررسی و در همین راستا سه حالت قرارگیری صفحات مد نظر قرار گرفته است.

### کلمات کلیدی

صفحات مستغرق، رودخانه، رسوب، جریان ثانویه، مدل SSIIM

تاریخ دریافت مقاله: ۷ مهر ۱۳۹۶

تاریخ پذیرش: ۱۰ آبان ۱۳۹۶

## ۱- مقدمه

یکی از مشکلات مهم در مدیریت رودخانه‌ها، مسئله فرسایش و رسوب است. آبستتگی پدیده‌ای است که بر اثر فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد بستر توسط نیرویی به وجود می‌آید که این جریان به مواد بستر وارد می‌کند. بررسی موضوع آبستتگی پایه-های پل و به کار بردن روش‌ها و تجهیزاتی برای کاهش آبستتگی اطراف پایه‌ها بسیار ضروری است. تاکنون روش‌های مختلفی برای جلوگیری یا کاهش آبستتگی اطراف پایه پل ارائه شده است. استفاده از صفحات مستغرق و غیرمستغرق از جمله روش‌هایی است که مورد توجه محققان قرار گرفته است. این صفحات، سازه‌های کوچک هدایت‌کننده جریان هستند که برای اصلاح الگوی جریان مجاور بستر طراحی می‌شوند که به صورت گروهی نصب و با تغییر الگوی جریان مجاور بستر موجب انتقال رسوبات در مقاطع عرضی رودخانه و در نتیجه، تغییر وضعیت مرفولوژیک در مقاطع عرضی بستر رودخانه می‌شوند؛ طوری که کف رودخانه در یک مقطع عرضی بالا می‌آید و در قسمت دیگر فرو می‌افتد. مزیت این روش آن است که موجب تغییرات موضعی در پروفیل سرعت و توپوگرافی بستر می‌شود، ولی تغییرات چشمگیری در سطح مقطع جریان، شیب خط انرژی و میزان انتقال رسوب به پایین دست را سبب نخواهد شد. یعنی با ایجاد تغییر در توپوگرافی و مسیر انتقال رسوب، رژیم طبیعی رودخانه همچنان محفوظ باقی می‌ماند. لذا کاربرد آن به تدریج توسعه یافته است و در کنترل فرسایش اطراف سازه‌ها، اصلاح مسیر پیچان رودی، کنترل انتقال رسوبات به آبگیر، سدها و ... استفاده می‌شود [۱-۲]. هدف این تحقیق، به کارگیری صفحات مستغرق عمود بر جریان و بررسی عملکرد آنها بر میزان آبستتگی در اطراف پایه پل با کمک نرم‌افزار SSIM است.

## ۲- معرفی مدل عددی SSIM

مدل SSIM یک برنامه عددی با زمینه کاربرد در مهندسی رودخانه، محیط‌زیست، هیدرولیک و رسوب است و هدف اولیه از ساختن این برنامه نیز شبیه‌سازی کردن حرکت رسوب در هندسه رودخانه و کانال بوده است. بعدها استفاده از این برنامه در دیگر موضوعات هیدرولیکی مانند مدل کردن سرریزها، افت در تونل‌ها، رابطه عمق و دبی در رودخانه‌ها و ... نیز توسعه یافت. مزیت اصلی مدل SSIM در مقایسه با دیگر برنامه دینامیک سیالات محاسباتی، توانایی مدل‌سازی انتقال رسوب در بستر متحرک در هندسه‌های پیچیده است.

برنامه SSIM معادلات ناویراستوکس را با مدل  $K-\epsilon$  استاندارد روی یک شبکه سه‌بعدی تقریباً نامتعامل حل می‌کند. برای منفصل‌سازی نیز از یک روش حجم کنترل همراه الگوریتم توانی یا الگوریتم جهتمند مرتبه دوم استفاده می‌شود. روش سیمپلر برای ارتباط ترم فشار و سرعت به کار می‌رود. با استفاده از یک روش حل ضمنی میدان سرعت در هندسه محاسبه خواهد شد و این سرعت‌ها نیز زمانی استفاده می‌شوند که معادلات انتقال - پخش برای اندازه‌های مختلف رسوب حل شده باشند. برنامه SSIM برای تسهیل ساختن فایل ورود اطلاعات از جعبه‌های محاوره‌ای استفاده می‌کند.

در شبکه‌های ساختار یافته سه‌بعدی، هر سلول در شبکه سه شاخص دارد که مشخص کردن موقعیت شبکه را آسان می‌کند. موقعیت دیواره‌ها و سطوح دبی ورودی و خروجی، در فایل اطلاعات ورودی مشخص می‌شود. در شبکه‌های بدون ساختار هر سلول یک شاخص دارد که آن هم به طور تصادفی ساخته می‌شود و کاربر باید محدوده‌های جریان ورودی و خروجی را با یک ویرایشگر دبی گرافیکی مشخص کند. این ویرایشگرهای گرافیکی در شبکه‌های ساختاریافته وجود ندارند. ویرایشگر شبکه امکان ساختن و ارتباط بلوک‌های چندگانه متعدد را در شبکه‌های بدون ساختار فراهم می‌کند. ویرایشگر شبکه دارای ساختار، فقط روی یک بلوک کار می‌کند.

البته سرعت محاسبات برای نسخه‌های با شبکه ساختاریافته با وجود محاسبه‌گرهای سریع‌تر بهتر خواهد بود. همچنین، شبکه‌های با ساختار حافظه کمتری را برای سلول‌ها مصرف می‌کند، چون اتصال بین سلول‌ها، سطح‌ها و نقاط هندسی ساده‌تر است. مزیت عمده شبکه‌های بدون ساختار علاوه بر دارا بودن الگوریتم محاسبه کیفیت آب و رسوب توانایی ویژه آنها در مدل کردن هندسه‌های پیچیده و الگوریتم برای در نظر گرفتن تر و خشک شدن متوالی است. البته باید یادآوری کرد که می‌توان یک شبکه را در SSIM1 ساخت و آن را به SSIM2 انتقال داد یا بر عکس عمل کرد.

در این تحقیق، از صفحات مستغرق برای کنترل و کاهش عمق آبستگي پایه‌های پل استفاده و توسط نرم‌افزار SSIIM مدل‌سازی خواهد شد. ابتدا با استفاده از روابط مربوط به فرسایش بستر رودخانه و تئوری‌های ارائه‌شده در رابطه با هیدرولیک پل‌ها و آبستگي آنها، یک مدل عددی تهیه می‌شود. پس از این مرحله و با توجه به مدل عددی، برای پل مورد نظر یک مدل رایانه‌ای ساخته می‌شود که قابل انطباق با شرایط و حالات مختلف باشد.

## ۲-۱- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات ناویراستوکس در حالت جریان آشفته به کمک مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد برای رسیدن به سرعت و تنش برشی آشفته در یک هندسه سه-بعدي کلی در مدل عددی SSIIM حل شده است. به علاوه، مدل SSIIM قابلیت استفاده از مدل آشفته را نیز دارد که در فایل Control در مجموعه اطلاعاتی F24 قابل تعیین است. معادله ناویراستوکس برای جریان‌های غیرقابل تراکم با چگالی ثابت می‌تواند به صورت زیر است:

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

اولین ترم سمت چپ ترم گذار، ترم بعدی ترم انتقال (هدایت) است. اولین ترم در سمت راست، ترم فشار و دومین ترم، ترم تنش رینولدز است. برای ارزیابی این ترم، یک ترم آشفته مورد نیاز است. برای انفعال (گسسته‌سازی) از روش حجم کنترل با استفاده از قاعده‌توانی یا الگوریتم جهتمند مرتبه‌دوم استفاده می‌شود. روش سیمپلر نیز به عنوان پیش‌فرضی برای تصحیح فشار به کار می‌رود. روش سیمپلر قابل فراخوانی توسط مجموعه اطلاعات K9 در فایل control است. قاعده توانی و الگوریتم جهتمند مرتبه دوم مورد استفاده برای منفصل‌سازی نیز در مجموعه اطلاعاتی k6 در فایل control قابل دسترسی است. مدل SSIIM به طور پیش فرضی ترم گذار را نادیده می‌گیرد. البته این شرایط در فایل control درست اطلاعاتی F33 قابل تغییر است.

## ۲-۲- تقریب بوسینسک از لزجت گردابه‌ای

ویسکوزیته (لزجت گردابه‌ای) توسط بوسینسک برای تقریب ترم تنش رینولدز ارائه شده است. این تقریب به صورت رابطه (۲) است:

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

اولین ترم سمت راست معادله ترم پخش‌شونده در معادله ناویراستوکس است. ترم دوم معمولاً نادیده گرفته می‌شود، ولی در SSIIM1.0 می‌توان در مجموعه اطلاعاتی F100 در فایل control در نظر گرفته شود. ترم سوم در سمت راست نیز مربوط به فشار و بسیار کوچک است و اهمیت زیادی ندارد.

مدل آشفته  $k - \varepsilon$

مدل  $k - \varepsilon$  لزجت گردابه‌ای را به صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (3)$$

K انرژی جنبشی آشفته‌گی است که طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$K = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (4)$$

معادله دیفرانسیلی مربوط به K این طور بیان می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + p_k - \varepsilon \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $p_k$  به طبق رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$p_k = \nu_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

$\varepsilon$  بیانگر میزان اتلاف k بوده که به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

در معادلات بالا، Cها ثوابتی هستند که توسط کاربر قابل تغییر نیستند. به طور خلاصه می‌توان معادلات حاکم بر میدان جریان در حالت آشفته را معادله پیوستگی و معادله مومنوم دانست. اگر فرض شود که جریان دائمی است ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ) و نوسانات جرم مخصوص صفر است ( $p' = 0$ ) معادلات پیوستگی و مومنوم به ترتیب طبق روابط (۸) و (۹) تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i u_j) \quad (9)$$

که  $u$  مؤلفه سرعت،  $p$  چگالی سیال و  $P$  فشار کل است. ترم  $\rho u_i u_j$  همان ترم تنش رینولدز است. طبق معادلات (۸) و (۹) می‌توان سه معادله مومنوم و یک معادله پیوستگی نوشت که در آنها ۱۰ مجهول (سرعت در سه جهت  $u, v, w$  و فشار  $p$  و شش مؤلفه تنش رینولدز) وجود دارد که این بدان معناست که میدان معادلات حاکم بر جریان بسته نیست و تنش‌های رینولدز باید با استفاده از روش‌های ریاضی مدل‌سازی شوند. از این‌رو، برای بستن میدان معادلات حاکم از معادلات آشفتگی استفاده خواهد شد.

### ۲-۳- تأثیر تغییرات چگالی

تأثیر تغییرات چگالی روی منطقه جریان آب با معرفی لزجت گردابه‌ای بهینه‌شده مشخص می‌شود. در این حالت لزجت گردابه‌ای مدل  $k - \varepsilon$  در یک ضریب، ضرب می‌شود.

$$v_T = v_{T,0} \left[ 1 + \beta \left( -\frac{g}{p} \frac{\frac{\partial p}{\partial z}}{\left\langle \frac{\partial u}{\partial z} \right\rangle^2} \right) \right]^a \quad (10)$$

در این معادله  $\beta$  یک ثابت برابر ۱۰،  $\rho$  چگالی مخلوط آب و رسوب،  $u$  سرعت،  $z$  متغیر هندسی در جهت عمودی،  $g$  شتاب ثقل و  $a$  یک ثابت برابر ۵/۰- است.

### ۲-۴- قانون دیوارها

تغییرات سرعت در دیوار گاهی بسیار سریع است. از این‌رو، اگر پارامتر سرعت بخواد در شبکه حل شود به سلول‌های زیادی در آنجا نیاز خواهد بود. به جای آن از قانون دیوار استفاده می‌شود. در این قانون فرض شده است که پروفیل سرعت آب از یک تابع مشخص تجربی استفاده می‌کند. معادلاتی که حل می‌شوند، هم معادلات ناویراستوکس و هم معادلات آشفتگی دارای ترم‌های مجزا در حوزه اصلی محاسبات هستند. قانون دیوار عموماً برای سلول‌هایی به کار می‌رود که نزدیک دیوار هستند و یک عبارت تحلیلی برای ترم‌های مرجع ارائه می‌دهند که تابعی از معادلات تجربی هستند که برای قانون دیوارها به کار می‌روند. قانون دیوار پیش‌فرض در مدل SSIM مطابق رابطه (۱۱) و یک فرمول تجربی برای دیوارهاست:

$$\frac{U}{u_x} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{30y}{K_s} \right) \quad (11)$$

که  $u_x$  سرعت برشی و  $k$  ثابتی است و تقریباً برابر ۰/۴ است.  $y$  فاصله تا دیوار و  $K_s$  قطر ذرات روی بستر است. این اطلاعات در مجموعه اطلاعاتی F16 در فایل Control وارد می‌شود و در صورتی که زبری در بستر تغییر کند، می‌توان یک زبری در هر سلول بستر در فایل bedrough وارد کرد. در SSIM استفاده از قانون دیوار برای مرزهای صاف امکان‌پذیر است که در مجموعه اطلاعاتی F15 در فایل Control قابل دستیابی است. تابع زیر برای این منظور استفاده می‌شود:

$$\frac{U}{u_x} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{E y u_x}{n} \right) \quad (12)$$

E یک پارامتر تجربی و برابر ۹ است.

## ۲-۵- تأثیر غلظت رسوب بر جریان آب

دو تئوری در این زمینه وجود دارد که هنوز هیچ‌یک از آنها به طور کلی تصدیق نشده است. طبق تئوری اول رسوبات نزدیک بستر با پریدن به داخل جریان جابجا و دوباره ته‌نشین می‌شوند. این قضیه سبب می‌شود که آب نزدیک بستر مقداری از سرعت خود را از دست بدهد، چون مقداری از انرژی آن صرف جابجایی رسوبات می‌شود. این قضیه می‌تواند یک زبری اضافی در نظر گرفته شود. اینستن و نینگ چن (۱۹۵۵)، یک مجموعه از تجربیات کلاسیک خود را ارائه دادند. در تحقیقات آنها یک توزیع سرعت اصلاح‌شده به عنوان تابعی از غلظت رسوب به دست آمده بود [۳]. این تابع ثابت  $k$  را در قانون دیوار در معادله (۱۱) به صورت رابطه (۱۳) اصلاح می‌کند که به صورت کد در SSIIM وجود دارد و وقتی استفاده می‌شود که غلظت رسوب در محاسبات جریان آب مقداری بیش از صفر داشته باشد:

$$K = K_0 \frac{1}{(1 - 2.5C)} \quad (13)$$

در تئوری دوم فرض می‌شود که تمرکز رسوب چگالی سیال را افزایش و کاراکتر جریان را تغییر می‌دهد. این تأثیر به عنوان یک ترم اضافی در معادلات ناویراستوکس اضافه شده است:

$$p_s g \frac{\partial c}{\partial z} \quad (14)$$

این ترم به طور خودکار فراخوان نمی‌شود و کاربر باید آن را با استفاده از مجموعه اطلاعاتی F18 در فایل control فراخوان کند.

## ۲-۶- معادلات حاکم بر جریان رسوب

برای تعیین جریان رسوب در فایل control می‌توان از مجموعه اطلاعاتی I یا G5 استفاده کرد. به علاوه، مجموعه‌های اطلاعاتی N,B نیز در این محاسبات دخالت دارد. روند محاسبات در مدل عددی SSIIM به این صورت است که ابتدا با حل معادله پخش - انتقال رسوب، غلظت رسوب را در فاصله بین سطح آب تا سطح مینا محاسبه می‌کند. تراز سطح مینا با توجه به ارتفاع زبری معادل در نظر گرفته می‌شود. حمل رسوب به صورت سنتی به بار بستر و بار معلق تقسیم می‌شود. بار معلق می‌تواند با استفاده از معادلات پخش - انتقال با محاسبه غلظت رسوب تعیین شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (15)$$

که سرعت سقوط ذرات توسط  $W$  مشخص شد و  $\Gamma_T$  ضریب پخش است که از معادله  $k - \varepsilon$  استاندارد به دست می‌آید.

$$\Gamma_T = \frac{u_T}{S_c} \quad (16)$$

$S_c$  عدد اشمیت است که به طور پیش‌فرض برابر ۱ و در مجموعه اطلاعاتی F12 در فایل Control قابل تغییر است. وان ریجن یک رابطه برای تعیین غلظت رسوب در نزدیکی بستر ارائه داد که به صورت زیر است:

$$C_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3}}{a} \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{\left[ \frac{(p_s - p_w)g}{p_w u^2} \right]^{0.1}} \quad (17)$$

که  $d$  قطر ذرات رسوبی،  $a$  تراز مرجع با توجه به ارتفاع زبری،  $\tau$  تنش برشی بستر،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی بستر برای جابجایی ذرات رسوبی با توجه به دیگرام شیلدز،  $p_s$ ،  $p_w$  چگالی آب و رسوب،  $u$  ویسکوزیته آب و  $g$  شتاب ثقل است. پارامتر تجربی برابر ۰/۰۱۵ در معادله می‌تواند در مجموعه اطلاعات F6 در فایل control تغییر کند. معادله ۱۷ غلظت رسوب را در نزدیکی بستر تعیین می‌کند و طبق این رابطه غلظت در آنجا ثابت خواهد بود. برای محاسبات وابسته به زمان از یک الگوریتم دیگر در مجموعه اطلاعاتی F37 در فایل control استفاده می‌شود.

در مدل SSIIM یک ضریب کاهش تنش برشی بحرانی برای رسوبات در بستر شیب‌دار استفاده می‌شود که توسط بروکز ارائه شده است:

$$K = -\frac{\sin \phi \sin \alpha}{\tan \theta} + \sqrt{\left( \frac{\sin \phi \sin \alpha}{\tan \theta} \right)^2 - \cos^2 \phi \left[ 1 - \left( \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right)^2 \right]} \quad (18)$$

در این رابطه،  $\alpha$  زاویه بین جهت جریان و خط عمود بر بستر،  $\varphi$  زاویه شیب و  $\theta$  پارامتر شیب است. فاکتور  $k$  محاسبه و در تنش برشی بحرانی سطح افقی ضرب می‌شود. مدل عددی SSIIM برای محاسبه بار بستر در فاصله بار بستر تا سطح مبنا از رابطه زیر استفاده می‌کند:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(p_s - p_w)g}{p_w}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{D_{50}^{0.3} \left[ \left( \frac{(p_s - p_w)g}{p_w U^2} \right) \right]^{0.1}} \quad (19)$$

مقدار تجربی  $0.053$  قابل تغییر در مجموعه اطلاعات F83 در فایل control است. ارتفاع بستر  $\Delta$  با استفاده از معادله وان ریجن (۱۹۸۷) به صورت زیر تعیین و سپس، زبری مؤثر با توجه به  $\Delta$  به دست آمده محاسبه می‌شود:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(p_s - p_w)g}{p_w}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{D_{50}^{0.3} \left[ \left( \frac{(p_s - p_w)g}{p_w U^2} \right) \right]^{0.1}} \quad (20)$$

$$k_s = 3D_{90} + 1.1\Delta \left( 1 - e^{-\frac{25\Delta}{\lambda}} \right) \quad (21)$$

در معادلات فوق  $d$  عمق آب،  $u$  لزجت سینماتیکی و  $\lambda$  طول بستر است که به صورت  $7.3d$  محاسبه می‌شود. طبق هیدرولیک رسوب رابطه (۲۲) برقرار خواهد بود:

$$\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} = \frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{u_{*c}^2} \quad (22)$$

در این روابط  $u_*$  سرت رسوب در بستر و  $u_{*c}$  سرعت بحرانی رسوب طبق نمودار شیلدز است که مقدار آن از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$u_* = \sqrt{gRS} \quad (23)$$

در این رابطه  $R$  شعاع هیدرولیکی بوده و در کانال عریضی همان عمق جریان ( $y$ ) است و  $S$  شیب کف بستر است. معادله انتقال و پخش غلظت رسوب شرایط پیوستگی رسوب را ارضاء می‌کند، مگر آنکه ترم زمان در معادله وجود داشته باشد. بنابراین، در سلولی که معادله انتقال و پخش حل شده باشد، هیچ غلظت (تجمع) رسوبی وجود نخواهد داشت. ولی برای سلول‌های مجاور بستر که در آنها بار بستر از رابطه (۱۹) محاسبه خواهد شد، معادله انتقال و پخش حل نمی‌شود و معمولاً در این سلول‌ها پیوستگی رسوب ارضاء نخواهد شد که این به معنای رسوب‌گذاری یا فرسایش در این سلول‌هاست. با اعمال معادله پیوستگی رسوب در سلول‌های مذکور، مقادیر عددی اختلاف پیوستگی رسوب در هر سلول مشخص خواهد شد که اساس محاسبه تغییرات تراز بستر است. با این روش هر دو فرایند رسوب‌گذاری و فرسایش با الگوریتم مشابهی مدل‌سازی خواهند شد. معادله پیوستگی رسوب به صورت زیر است.

$$y_s \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

در این رابطه  $y_s$  وزن مخصوص رسوب،  $y$  تراز بستر،  $t$  زمان  $q_s$  دبی رسوب در واحد عرض،  $x$  فاصله تا پایین دست است.

## ۷-۲- انفصال معادلات حاکم بر میدان جریان آب و رسوب

منظور از منفصل‌سازی (گسسته‌سازی) آن است که در یک تحلیل عددی اطلاعات ممتد در حل دقیق معادلات با مقادیر منفصل از یکدیگر تعویض شود. در این حالت توزیع پارامتر دخیل در معادله دیفرانسیل در میدان به صورت ناپیوسته انجام می‌شود. در مدل عددی SSIIM از روش حجم-محدود برای منفصل‌سازی استفاده می‌شود. مزیت این روش آن است که سبب بقای هر خاصیت سیال از جمله جرم روی حجم کنترل می‌شود. در روش حجم محدود ابتدا دامنه مورد نظر به تعدادی حجم کنترل غیرهمپوشان تقسیم خواهد شد، طوری که هر حجم حول یک گره از میدان قرار می‌گیرد و آنگاه از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال‌گیری و معادلات به فرم عددی منفصل می‌شود. در این روش انفصال، تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط مجزا ایده اصلی نیست بلکه شرط برقراری اصل بقای جرم بسیار مهم است. پس از انتگرال‌گیری روی حجم کنترل مربوط به هر گره، معادله انتقال - پخش باید طوری منفصل شود که رابطه حاصل پایدار و دقیق باشد.

۸-۲- انفصال معادله انتقال - پخش

معادله حاکم بر کمیت  $\phi$  که چگونگی انتشار آن را مشخص می کند به صورت رابطه (۲۵) است:

$$\frac{\partial(p\phi)}{\partial t} + \text{div}(p\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}(\phi)) + S \quad (25)$$

در سمت چپ، ترم دوم بیانگر انتقال متغیر  $\phi$  و ترم اول سمت راست معادله به عنوان ترم پخش متغیر  $\phi$  است. انفصال ترم انتقال به روش های مختلفی امکان پذیر است. در این بین الگوی جهتمند مرتبه دوم و قاعده توانی برای انفصال معادلات انتقال - پخش در برنامه SSIIM به کار می رود.

۹-۲- الگوی قاعده توانی

قاعده توانی در مقایسه با حل دقیق، تقریبی خیلی دقیق به شمار می آید. این روش توسط پاتانکار ارائه شد. روابط حاکم بر این روش به صورت زیر است:

$$\frac{a_E}{D_e} = \begin{cases} -P_e & P_e < 10 \\ (1+0.1P_e)^5 - P_e & -10 \leq P_e \leq 0 \\ (1-0.1P_e)^5 & 0 \leq P_e \leq 10 \\ 0 & P_e > 10 \end{cases} \quad (26)$$

در این روابط  $P_e$  عدد پکلت است که به صورت نسبت قدرت انتقال به پخش تعریف می شود.

$$P_e = \frac{(pu)}{(\Gamma/L)} \quad (27)$$

در رابطه فوق  $L$  طول دامنه محاسبات است. دیگر پارامترها به صورت زیر تعریف می شود:

$$a_E = D_e \left\| 0, (1-0.1|P_e|)^5 \right\| + \left\| -F_e, 0 \right\| \quad (28)$$

$$a_w = D_w \left\| 0, (1-0.1|P_w|)^5 \right\| + \left\| F_w, 0 \right\| \quad (29)$$

$$a_p = a_E + a_w + F_e - F_w \quad (30)$$

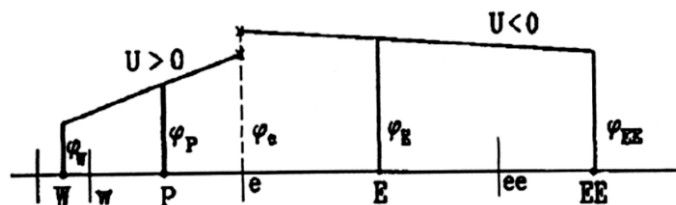
$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_i \phi_i \quad (31)$$

۱۰-۲- الگوی جهتمند مرتبه دوم

دقت این روش از درجه دوم است و برای تخمین مقادیر روی وجه یک سلول از برون یابی دو گره مجاور در بالادست استفاده می کند. بنابراین، با توجه به شکل (۱) مقدار  $\phi_e$  از روابط زیر تخمین زده می شود:

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_E + (\phi_E - \phi_{EE}) \frac{eP}{EEE} & F_e < 0 \\ \phi_p + (\phi_p - \phi_w) \frac{P_e}{WP} & F_e > 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_E + (\phi_E - \phi_{EE}) f_{1E} & F_e < 0 \\ \phi_p + (\phi_p - \phi_w)(1-f_{1w}) & F_e > 0 \end{cases} \quad (33)$$



شکل ۱: موقعیت گره های مجاور گره مرکزی در طرح مرتبه دوم

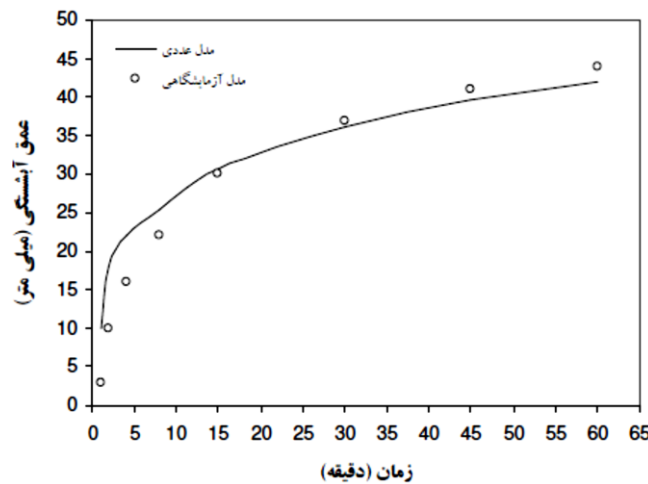
۳- روش تحقیق

در این تحقیق، اثر صفحات مستغرق بر پایه های استوانه ای در مسیر رودخانه بررسی و در همین راستا سه حالت قرارگیری صفحات مد نظر قرار گرفته و توسط نرم افزار SSIIM مدل سازی شده است. مدل سازی به کمک نرم افزار SSIIM با استفاده از داده هایی مثل مقطع رودخانه یا کانال،

عمق جریان، سرعت جریان، ابعاد صفحات غیرمستغرق و نیز ضخامت آنها، تعداد صفحات و آرایش قرار دادن آنها و نیز، فاصله آنها از یکدیگر و همچنین، فاصله صفحات از پایه‌های پل و حتی شکل و اندازه مقطع پایه‌های پل انجام و در نهایت، نتایج به دست آمده تحلیل می‌شود. با توجه به اینکه شبیه‌سازی توسعه عمق حفره آبشستگی به کمک هیدروگراف جریان می‌تواند آبشستگی را تحت شرایط واقعی نشان دهد از یک مدل آزمایشگاهی برای نشان دادن توانایی کد عددی SSIIM در این زمینه استفاده شد. کد عددی SSIIM قابلیت در نظر گرفتن پارامتر زمان در محاسبات جریان آب و رسوب و حل معادلات بر مبنای آن را داراست.

پیش از این، آزمایش‌های تجربی زیادی درخصوص مسئله آبشستگی انجام شده است. میا و ناگو در آزمایشگاه هیدرولک دانشگاه اوکایاما ژاپن مطالعاتی روی توسعه عمق آبشستگی در طول زمان تحت جریان دائمی با دبی‌ها و ترازهای آب مختلف انجام دادند [۴]. موحدی و همکاران، در پژوهشی آبشستگی اطراف گروه پایه‌های دوتایی با تغییر فاصله بین پایه‌ها را ارزیابی و سپس، تأثیر پی پیوسته بر مکانیزم و میزان آبشستگی بررسی کردند [۵]. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آبشستگی کاهش و در  $G/D = 6$  به تک‌پایه نزدیک می‌شود. همچنین، با به‌کارگیری پی پیوسته عمق آبشستگی جلوی پایه تا ۵۵ درصد کاهش می‌یابد و در پایین دست پی نیز دو حفره متقارن شکل می‌گیرد که محل حداکثر عمق آبشستگی را به پایین دست منتقل و از سازه دور می‌کند.

در تحقیقات اسماعیلی، با در نظر گرفتن فاکتور زمان، حداکثر عمق آبشستگی متناظر با هیدروگراف سیلاب با استفاده از نرم‌افزار SSIIM محاسبه شد [۶]. آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های استوانه‌ای تحت جریان‌های غیردائمی براساس نتایج آزمایشگاهی بررسی و مطابق شکل (۲) مشخص شد در صورتی که اختلاف دبی حداقل و حداکثر کم (کمتر از ۲ برابر) باشد، حتی در صورتی که دبی حداکثر در کمتر از نصف زمان تداوم حاصل شود، نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی هم، در شاخه صعودی و هم، در شاخه نزولی تطابق خوبی دارد و در صورتی که اختلاف دبی حداکثر و حداقل زیاد باشد (بیش از ۲ برابر)، نتایج مدل عددی در صورتی در شاخه صعودی و نزولی تطابق نسبتاً خوبی خواهد داشت که تغییرات دبی و تراز آب پایین دست در شاخه صعودی بسیار تدریجی و ملایم باشد و دبی پیک پس از گذشت نصف زمان تداوم هیدروگراف حاصل شود. در غیر این صورت، نتایج مدل عددی در شاخه صعودی رضایت‌بخش خواهد بود، ولی در شاخه نزولی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و از دقت نتایج کاسته می‌شود.



شکل ۲: مقایسه عمق آبشستگی مدل عددی و آزمایشگاهی

اثر تغییر پارامتر هندسی قطر پایه و همچنین، تغییر در شکل پایه با ایجاد شکاف در پایه استوانه‌ای به کمک نرم‌افزار SSIIM شبیه‌سازی شد. مطابق انتظار اندازه قطر پایه استوانه‌ای با عمق آبشستگی متعادل رابطه مستقیم داشت، ولی با ۲ برابر شدن قطر پایه عمق آبشستگی متعادل اطراف پایه کمتر از ۶۰٪ افزایش داشت. ایجاد شکاف در پایه استوانه‌ای نیز از جمله ایده‌های مطرح شده با هدف کاهش عمق آبشستگی متعادل است که نتایج شبیه‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی حاکی از تطابق خوب نتایج بود. نمودار حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌داد که در جریان‌های مستقیم با افزایش طول شکاف از سطح آب، عمق آبشستگی متعادل کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که مدل عددی SSIIM توانایی مدل کردن توسعه عمق حفره آبشستگی در حالت وابسته به زمان تحت هیدروگراف جریان را دارد. دقت نتایج مدل عددی در شاخه صعودی هیدروگراف بسیار خوب است، طوری که اختلاف نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در زمان‌های متناظر در شاخه صعودی کمتر از ۲۰ درصد است.



قسمت عمده عمق آبشستگی نهایی در شاخه صعودی هیدروگراف جریان اتفاق می‌افتد. از این‌رو، می‌توان در مقاصد عملی، توسعه عمق حفره آبشستگی را تا پایان شاخه صعودی هیدروگراف مدل کرد و با در نظر گرفتن ضریب اطمینانی آن را در طراحی پایه پل به کار برد. بیشتر مطالعات پیشین روی تخمین عمق آبشستگی متعادل و رابطه آن با جریان و پارامترهای ژئوتکنیکی با استفاده از آنالیز ابعادی و اطلاعات به دست‌آمده از آزمایش‌ها در مقیاس کوچک، متمرکز است. معادلات پیش‌بینی‌کننده عمق آبشستگی همیشه تقریب‌های قابل قبولی در شرایط صحرائی نمی‌دهد و حتی گاهی اوقات در شرایط آزمایشگاهی متفاوت هم، نتایج متفاوتی حاصل می‌شود. عدم درک صحیح و عدم محاسبات درست ساختار جریان، بخشی از این مشکل است.

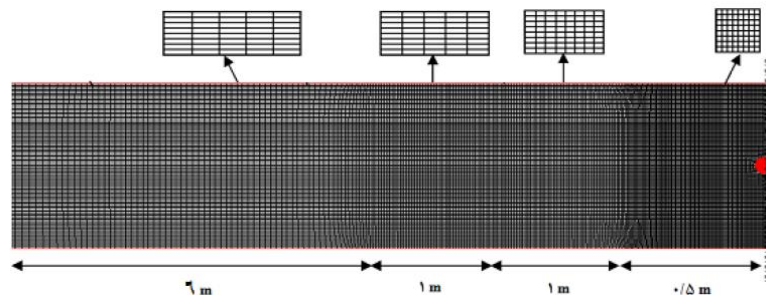
تعداد زیادی از پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی بر پیچیدگی آن می‌افزاید. از این‌رو، به یک مدل عددی توانمند نیاز است که با استفاده از گسسته‌سازی معادلات حاکم بر میدان جریان و رسوب و اعمال یک سری فرضیات ساده‌کننده، روابط پیچیده حاکم بر این پدیده را به معادلات ساده و قابل حل تبدیل کند. از طرف دیگر، در نظر گرفتن پارامتر زمان در طول فرایند 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، به بررسی و تحقیق بیشتر و جامع‌تری در این رابطه احتیاج است که مدل عددی سه‌بعدی SSIIM می‌تواند پاسخگوی بسیاری از نیازها در زمینه‌های مختلف هیدرولیکی از جمله آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها باشد، به‌خصوص اینکه این مدل عددی قابلیت در نظر گرفتن زمان در طول فرایند آبشستگی را نیز دارد.

پیش‌بینی قابل اطمینان عمق آبشستگی مربوط به ویژگی‌های هیدرولوژیکی مانند دبی اوج و زمان مربوط به عمق تعادل آبشستگی، برای طراحی کارآمد پایه پل ضروری است.

یک مجموعه آزمایش‌های طولانی با استفاده از پایه‌های استوانه‌ای در کانال با بستر یکنواخت تحت شرایط آب زلال در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اوکایاما در ژاپن انجام شد که در این تحقیق از داده‌های یکی از این آزمایش‌ها به منظور شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی SSIIM استفاده شده است. در این آزمایش تراز سطح آب ۲۰۰ میلی‌متر، دبی  $Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ، زمان آبشستگی ۱۴۰ دقیقه و عمق آبشستگی ۷۸ میلی‌متر است [۷-۱۰].

### ۳-۱- بررسی میزان آبشستگی و تغییرات ارتفاع بستر اطراف پایه بدون حضور صفحه‌ها

اولین مرحله قبل از اجرای مدل عددی، این فرایند مش‌بندی (شبکه‌بندی) است. برای کاستن زمان و حجم محاسبات و افزایش دقت آن، شبکه ساخته‌شده توسط یک برنامه جداگانه تهیه‌شده به زبان QBASIC در سه مرحله و به تدریج با نزدیک شدن به پایه پل ریز شده است، طوری که در فواصل دورتر از پایه، اندازه سلول‌ها  $2/5 \text{ cm} \times 0/5 \text{ cm}$  و سپس، با کمتر شدن فاصله  $2 \text{ cm} \times 0/5 \text{ cm}$  و  $1 \text{ cm} \times 0/5 \text{ cm}$  و در نهایت، در ۱م میانی در اطراف پایه استوانه‌ای  $0/5 \text{ cm} \times 0/5 \text{ cm}$  تعیین شده است. شکل (۳) ریز شدن تدریجی شبکه را به صورت شماتیک و بدون مقیاس با نزدیک شدن به پایه در نیمی از کانال نشان می‌دهد.



شکل ۳: ساختار مش به کاررفته در شبیه‌سازی عددی

تعداد مقاطع استفاده‌شده در پلان در جهت طولی و با توجه به طول در نظر گرفته‌شده فلووم ۹۴۰ و در جهت عرضی ۱۲۰ عدد بود. با توجه به اینکه در جهت قائم توزیع خطوط شبکه در ۰، ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰، ۳/۰، ۵/۰، ۷/۰، ۹/۰ و ۱۰۰٪ عمق جریان بوده است، تعداد کل سلول‌ها در شبکه سه‌بعدی مدل ۹۰۲۴۰۰ عدد است. با توجه به حساس بودن تغییرات سرعت در کف فلووم توزیع خطوط شبکه در نزدیکی بستر فشرده‌تر در نظر گرفته شده است. پس از ساختن شبکه با اعمال شرایط مرزی بین دبی و تراز آب پایین‌دست مدل عددی اجرا و حداکثر عمق آبشستگی شده توسط مدل عددی در زمان‌های متناظر با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ثبت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. از آنجا که محاسبات میدان جریان و رسوب در سه بعد و به صورت وابسته به زمان انجام می‌شود، ممکن است شبیه‌سازی عددی توسعه حفره آبشستگی با توجه به گام زمانی که مدل کالیبره می‌شود، چند روز زمان ببرد. از آنجا که هدف، شبیه‌سازی عدد آبشستگی حول پایه استوانه‌ای است، دبی و تراز آب پایین‌دست فلووم به عنوان

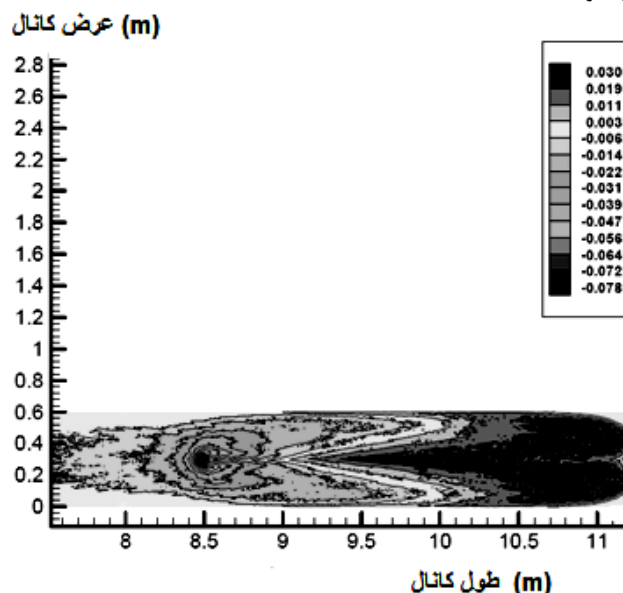
شرایط مرزی به مدل عددی وارد و سپس، مدل عددی یا گام‌های زمانی ۴s و با تخصیص ضریب زبری مناسب طبق مراحل مشروح ذیل کالیبره می‌شود. نتایج به دست‌آمده از کالیبراسیون عددی مدل‌های مختلف با گام‌های زمانی ۴s و معیار همگرایی ۰/۱ و ضریب زبری‌های متفاوت حدسی در جدول (۱) فهرست شده است.

جدول ۱. نتایج به دست‌آمده از کالیبراسیون عددی مدل‌های مختلف

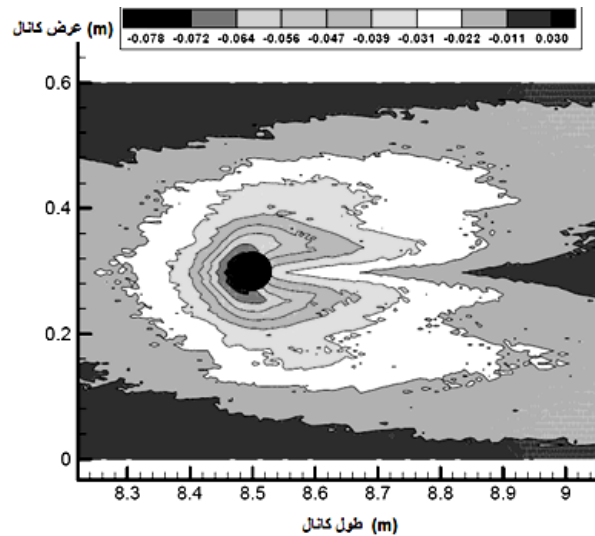
مدل	ضریب زبری	حداکثر تراز بستر، رسوب (mm)	حداقل تراز بستر، آبشستگی (mm)
۱	6d <sub>50</sub>	۲۲/۶	۶۸
۲	76d <sub>50</sub>	۲۷/۳	۷۰/۸
۳	8d <sub>50</sub>	۲۷/۴	۷۳/۲
۴	10d <sub>50</sub>	۲۹/۹	۷۸/۱

نتایج نشان می‌دهد که در مدل شماره ۴ اختلاف بین مقادیر آبشستگی آزمایشگاهی و مدل عددی به کمتر از ۲٪ می‌رسد که عملاً مقدار ناچیزی است و گویای آن است که بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی سازگاری خوبی وجود دارد و مقادیر کم خطا در این مدل عددی سه-بعدی و با در نظر گرفتن پارامتر زمان و حل معادلات بر مبنای آن، بیانگر توانمندی و دقت خوب این نرم‌افزار در شبیه‌سازی فرایند آبشستگی و نشست رسوبات جریان اطراف پایه‌های پل است.

نرم‌افزار SSIIM می‌تواند مقاطع عرضی، طولی، و الگوی جریان را در قسمت‌های مختلف مدل نشان دهد. برای نمایش خروجی‌های به دست‌آمده از مدل عددی سه‌بعدی SSIIM، از نرم‌افزار Tecplot8.0 استفاده شده است. برنامه SSIIM برای نمایش گرافیکی مناسب‌تر نتایج خود از این نرم‌افزار سود می‌برد. شکل‌های (۴) و (۵) تغییرات تراز بستر اطراف پایه استوانه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که عمق حفره آبشستگی با نزدیک شدن به پیشانی پایه استوانه‌ای به تدریج افزایش می‌یابد و مطابق شکل (۴) اطراف پایه کاهش تراز بستر و آبشستگی مشاهده می‌شود که به دو طرف پایه کشیده شده و ناشی از عبور گرداب‌هایی است که با جریان اصلی از کنار پایه عبور می‌کنند و این فرسایش آبی اطراف پایه ۰/۰۴ تا ۰/۰۷۸ متر متغیر است و در بیشترین میزان خود به ۰/۰۷۸ می‌رسد که با در نظر گرفتن ارتفاع پایه که ۰/۲ متر و قطر آن که ۰/۰۶ متر است، می‌تواند سبب خرابی آن شود.

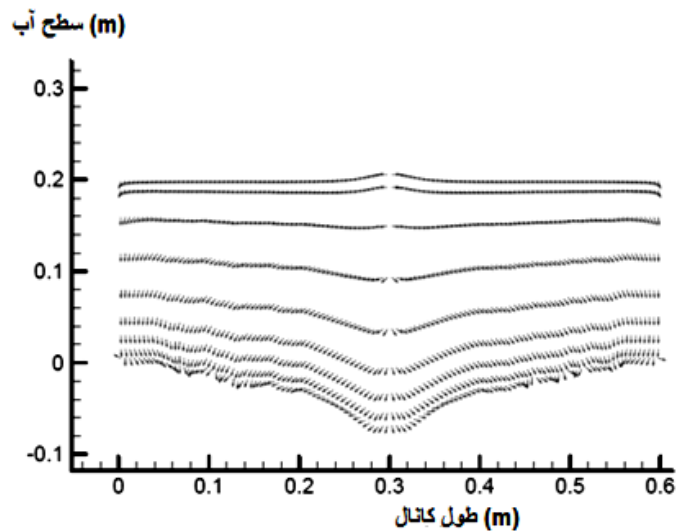


شکل ۴: تغییرات تراز بستر حول پایه استوانه‌ای

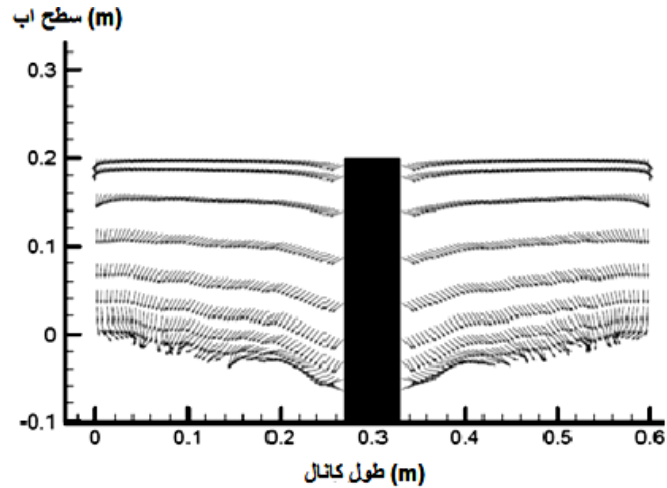


شکل ۵: مقادیر آبشستگی حول پایه‌ی استوانه‌ای

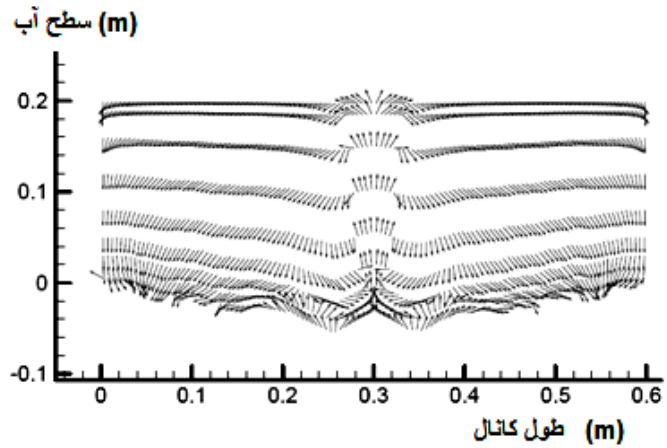
بردارهای عمودی سرعت در سه مقطع عرضی بلافاصله پایین دست پایه، مرکز پایه و بلافاصله بالادست پایه استوانه‌ای در شکل‌های (۶) تا (۸) نشان داده شده‌اند. در این خروجی‌های برداری، جریان‌های ثانویه رو به پایین در کناره‌های پایه پل به وضوح قابل تشخیص هستند. این جریان‌ها در ایجاد و توسعه حفره آبشستگی نقش اساسی ایفا می‌کنند. همچنین، بالآمدگی سطح جریان آب در مقطع عرضی بلافاصله بالادست پایه استوانه‌ای واضح است که توانایی این مدل عددی سه‌بعدی را در محاسبات میدان جریان اطراف سازه‌هایی مثل پایه پل را نشان می‌دهد که در مقابل جریان اصلی قرار می‌گیرند. فرار گرفتن مانعی مانند پایه پل در برابر جریان سبب تغییر الگوی جریان و در نتیجه، موجب فرسایش در زیر این سازه‌ها می‌شود. این فرسایش تنها در اطراف سازه یادشده رخ می‌دهد، از این‌رو، فرسایش حاصل را موضعی می‌خوانند. در حقیقت، این فرسایش حاصل از جریان آشفته سه‌بعدی است که بر اثر شتاب جریان عبوری و شکل‌گیری گرداب‌های پیچیده حادث می‌شود. این نوع فرسایش با حفره‌ای که در اطراف سازه شکل می‌گیرد، شناسایی می‌شود و این حفره در صورت گسترش در عمق می‌تواند سبب بروز خرابی و در نهایت، ریزش پل شود. همچنین، گسترش سطحی این حفره موجب می‌شود تا به حفره پایه مجاور بپیوندد و آبشستگی را تشدید کند.



شکل ۶: مقطع عرضی بلافاصله بالادست پایه پل و جهت جریان‌های ثانویه

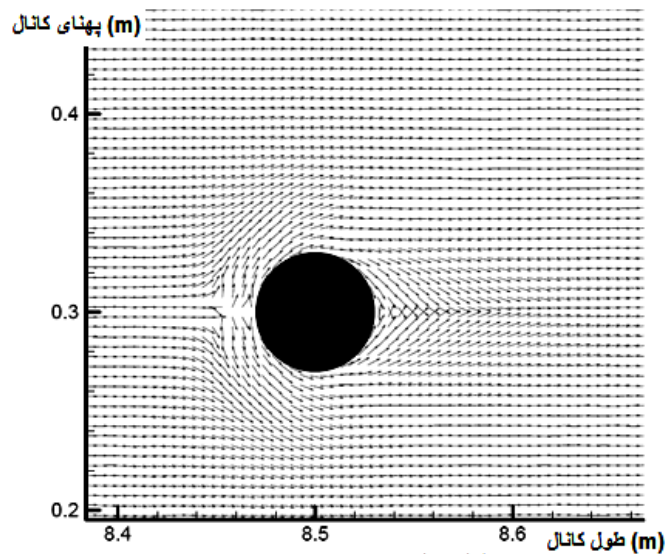


شکل ۷: مقطع عرضی مرکز پایه پل و جهت جریان‌های ثانویه



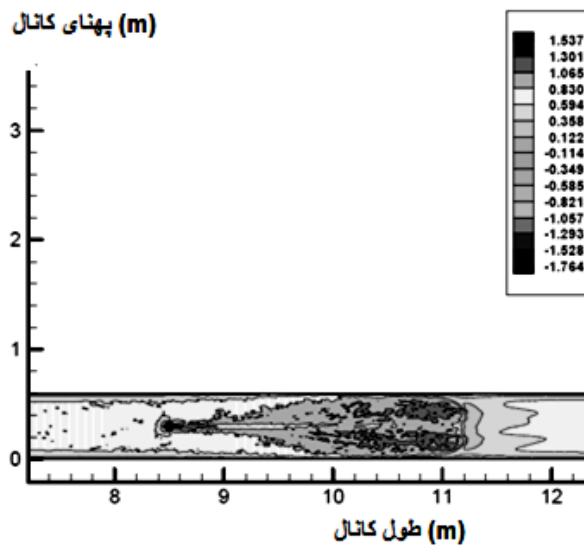
شکل ۸: مقطع عرضی بلافاصله پایین دست پایه پل و جهت جریان‌های ثانویه

شکل (۹)، بردارهای افقی سرعت هنگام برخورد جریان آب به پایه و جهت جریان اطراف پایه را نشان می‌دهد که در برخورد به پایه به اطراف متمایل می‌شود و جریان منحرف‌شده را به پایین دست انتقال می‌دهد و موجب آبستنگی دو طرف پایه پل می‌شود.



شکل ۹: بردارهای افقی سرعت هنگام برخورد جریان آب به پایه

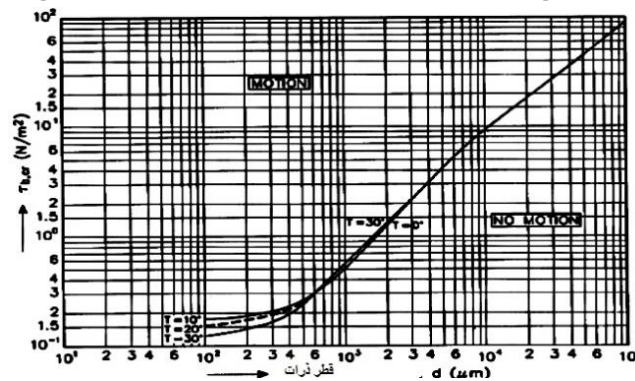
تنش برشی کف کانال که بیشترین تنش برشی است، به کمک مدل عددی تحت جریان غیردائمی محاسبه و در شکل (۱۰) نمایش داده شده است که نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تنش اطراف پایه و در بالادست پایه بر اثر برخورد مستقیم جریان با پایه اتفاق می‌افتد که حدود  $N/m^2$  تا  $۰/۶-۱/۷$  است. در این محدوده آبشستگی رخ می‌دهد و در پایین دست پایه یک محدوده با تنش برشی در محدوده  $۰/۸-۱/۵ N/m^2$  مشاهده می‌شود که رسوبات برداشته شده از بالا دست در این ناحیه نشست می‌کند.



شکل ۱۰: تنش برشی اطراف پایه استوانه‌ای با استفاده از مدل عددی

به طور کلی، از لحظه‌ای که ذرات در آستانه حرکت قرار گیرند، فرسایش آغاز می‌شود. این حرکت منجر به جابجایی ذرات خواهد شد طوری که ذرات در نهایت به جای خود برنگردند. برای تشخیص شروع فرسایش از منحنی شیلدز استفاده شده است (شکل ۱۱). محدوده زیر منحنی شیلدز نشان‌دهنده بستر پایدار، محدوده بالای منحنی نشان‌دهنده بستر ناپایدار و منحنی معرف آستانه حرکت است. محور عمودی تنش برشی کف کانال و محور افقی قطر ذرات است.

مقادیر تنش برشی کف کانال و قطر ذرات به ترتیب برابر  $۱/۵۳۷ N/m^2$  و  $۰/۰۱۲۸ m$  است. با توجه به منحنی اصلاح شده شیلدز مشاهده می‌شود که محل تلاقی مقادیر فوق، بالای منحنی افتاده است که به معنای امکان حرکت ذرات و آبشستگی یا فرسایش آبی است.



شکل ۱۱: منحنی اصلاح شده شیلدز

### ۲-۳- بررسی میزان آبشستگی و تغییرات ارتفاع بستر اطراف پایه با وجود سه اندازه متفاوت صفحه‌ها

روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش آبشستگی وجود دارد. استفاده از هرکدام از این روش‌ها، به نظر طراح، موقعیت طرح و شرایط اقتصادی بستگی دارد. روشی که هم، از لحاظ اقتصادی به صرفه باشد و هم، میزان آبشستگی را تا حد زیادی کاهش دهد، می‌تواند بررسی شود که در نهایت در طراحی پایه پل نقش به‌سزایی ایفا خواهد کرد. در تحقیق حاضر، پیشنهاد شده است که از صفحات غیرمستغرق استفاده شود که تقریباً به شکل سرریزهای لبه تیز طراحی می‌شوند. این صفحات با آرایش‌های مختلف مدل‌سازی می‌شوند و در نهایت، با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل

عددی، از بین آرایش‌های مختلف، حالت بهینه انتخاب می‌شود. سپس، از این صفحات در جلوی پایه پل استفاده می‌شود و از نتایج به دست آمده می‌توان مقدار کاهش آبستگي را بر اثر استفاده از این صفحات محاسبه کرد. برای بررسی تغییرات طول صفحات در کاهش آبستگي، صفحات با طول‌های ۶ سانتی‌متر و ۱۲ سانتی‌متر و ۱۸ سانتی‌متر مدل‌سازی شده که نتایج آنها در جدول (۲) فهرست شده است.

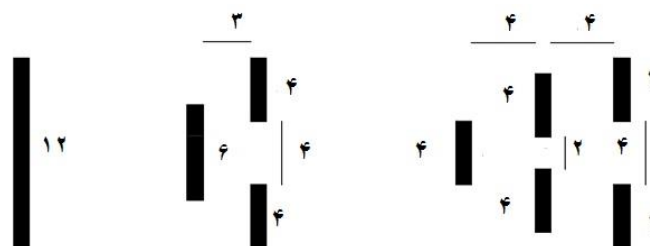
جدول ۲. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی صفحات با طول‌های مختلف

مدل	طول صفحات (cm)	حداکثر آبستگي (mm)	حداکثر رسوب (mm)
۱	۶	۹۸/۸	۳۷/۹
۲	۱۲	۱۶۰/۵	۵۰/۶
۳	۱۸	۲۱۸/۹	۵۹

همان‌طور که انتظار می‌رفت هرچه طول صفحات بیشتر باشد، سطح تماس آنها با بستر بیشتر می‌شود و در نتیجه، رسوب بیشتری تولید می‌کنند. مشخص است که ایجاد رسوب بیشتر مستلزم آبستگي بیشتر خود صفحه است. با توجه به نتایج به دست آمده این‌طور برداشت می‌شود، با اینکه تمام شرایط هر سه مدل یکسان است، اما به ازای افزایش طول صفحه‌ها، روند افزایش آبستگي و نیز ایجاد رسوب خطی نیست.

### ۳-۳- بررسی میزان آبستگي و تغییرات ارتفاع بستر اطراف پایه با وجود سه آرایش متفاوت صفحه‌ها

صفحات باید طوری طراحی شوند که علاوه بر اینکه سبب تولید رسوب بیشتری می‌شوند، خود نیز دچار آبستگي کمتری شوند. برای بررسی آرایش‌های مختلف و تعیین حالت بهینه، شکل‌های مختلفی از چیدمان صفحات مدل‌سازی می‌شوند که مشابه شکل (۱۲) هستند. طبق مشخصات آزمایش، چون قطر پایه استوانه‌ای ۶ سانتی‌متر است، طول پوشش صفحات در جلوی پایه ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.



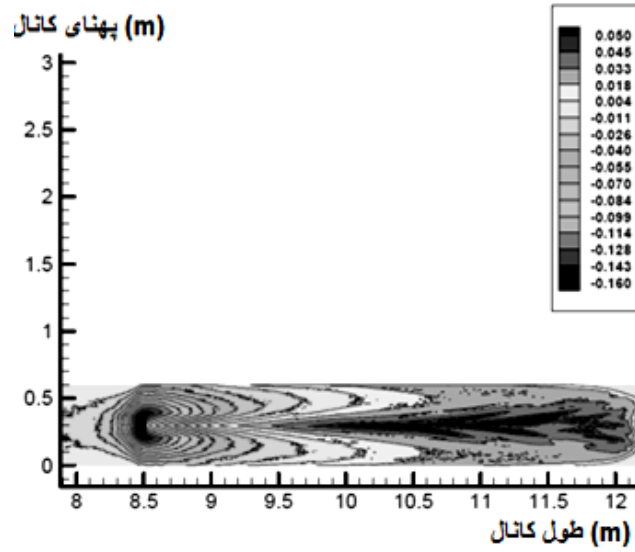
شکل ۱۲: آرایش‌های مختلف صفحات

نتایج حاصل از مدل‌سازی حالت‌های فوق در جدول (۳) درج و برای بررسی بیشتر آنها خروجی‌های مدل‌ها در شکل‌های مختلف نشان داده و روی آنها بحث شده است.

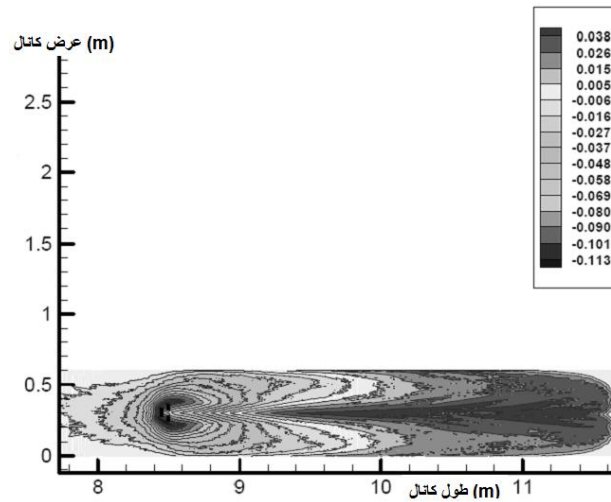
جدول ۳. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی آرایش‌های مختلف صفحات

مدل	نوع آرایش	حداکثر آبستگي (mm)	حداکثر رسوب (mm)
۱	تک صفحه‌ای	۱۶۰/۵	۵۰/۶
۲	سه صفحه‌ای	۱۱۳/۳	۳۸/۶
۳	پنج صفحه‌ای	۱۰۰/۲	۳۶

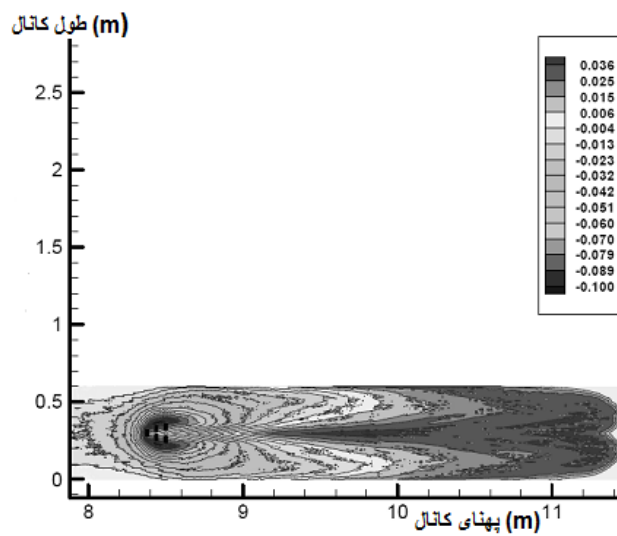
نتایج خروجی‌های به دست آمده از مدل‌های فوق، در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: تغییرات تراز بستر برای مدل شماره ۱



شکل ۱۴: تغییرات تراز بستر برای مدل شماره ۲

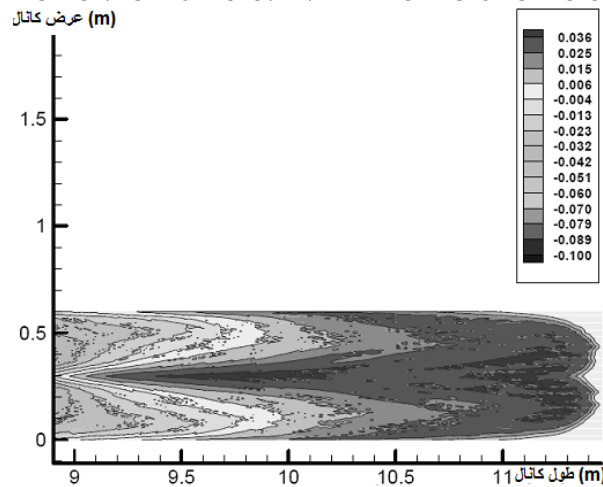


شکل ۱۵: تغییرات تراز بستر برای مدل شماره ۳

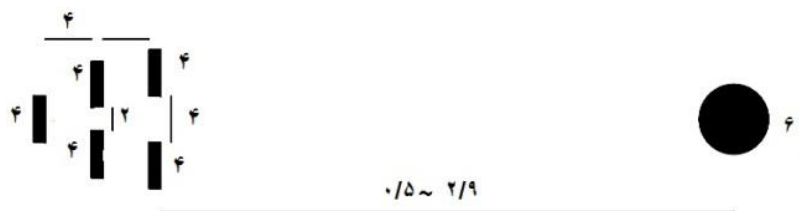
با توجه به میزان ارتفاع رسوب و عمق آبستنگی، باید حالتی را در نظر گرفت که به ازای عمق آبستنگی کم، میزان رسوب بیشتری حاصل شود. طبق نتایج به دست آمده از جدول (۳) و شکل‌های (۱۳) تا (۱۵)، در مدل شماره ۳، عمق آبستنگی برابر  $100/2$  میلیمتر و میزان رسوب برابر ۳۶ میلیمتر است که به نسبت بهتر از دو حالت دیگر تک‌صفحه‌ای با ۱۶۰ میلیمتر آبستنگی و سه صفحه‌ای با ۱۳۳ میلیمتر آبستنگی است. با توجه به نتایج به دست آمده از تغییر آرایش صفحه‌ها، میزان رسوبات با افزایش آبستنگی در هر حالت افزایش می‌یابد. در مقایسه دو حالت ۱ و ۳، در حالت ۳ و با قرارگیری پنج صفحه در فواصل مشخص، ۴۰ درصد کاهش آبستنگی و ۳۰ درصد کاهش رسوبات مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد که حالت ۳ قرارگیری صفحه‌ها در این تحقیق، حالت بهینه قرارگیری صفحه‌هاست و در نتیجه بهتر است، برای بررسی تأثیر بهینه صفحات مستغرق در کاهش آبستنگی پایه استوانه‌ای از مدل شماره ۳ استفاده شود.

### ۳-۴- بررسی اثر تغییر فاصله صفحات بر تغییرات ارتفاع بستر اطراف پایه استوانه‌ای

با توجه به شکل (۱۶)، مشاهده می‌شود که ناحیه ته‌نشین رسوب در محدوده ۹-۱۱/۴ متری از ابتدای کانال مورد نظر است. حال می‌توان تشخیص داد که محدوده حداکثر رسوب در محدوده ۱۰-۱۱ متری از ابتدای کانال است و بنابراین، صفحات را باید در فاصله ۰/۵-۲/۹ متر از مرکز پایه استوانه‌ای و در بالادست آن تعبیه کرد تا جریان مخرب و فرسایش‌دهنده به پایه پل نرسد و تأثیر ناچیزی بر بستر اطراف پل داشته باشد.



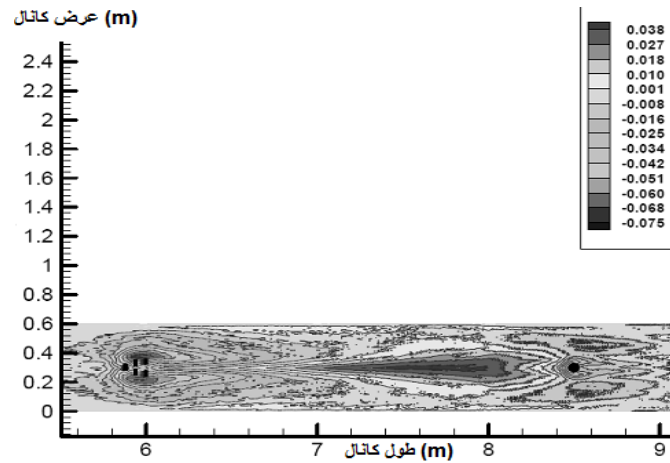
شکل ۱۶: ناحیه ته‌نشین رسوب بستر در مدل شماره ۳



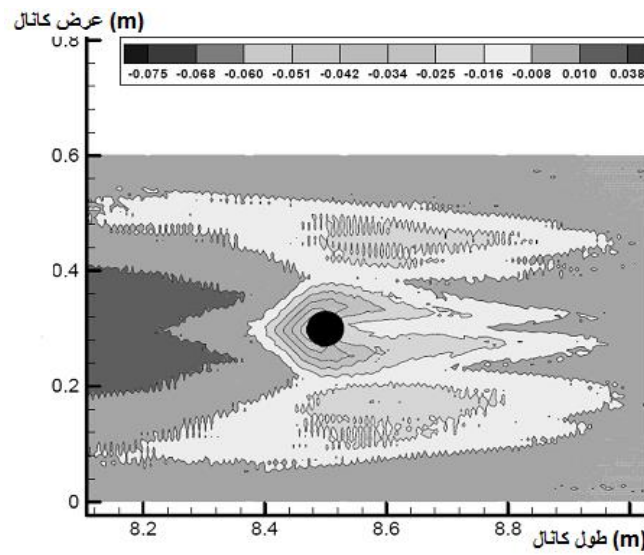
شکل ۱۷: محدوده تعبیه صفحات در بالادست پایه استوانه‌ای

با توجه به نتایج به دست آمده بهترین نقاط استقرار صفحات در فاصله‌های ۱/۵-۲/۵ متری از مرکز پایه استوانه‌ای و در بالادست آن تشخیص داده شده است. نتایج خروجی حاصل از مدل‌سازی در صورت تعبیه صفحات در فواصل یادشده و بالادست پایه استوانه‌ای، به شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) نمایش داده می‌شود. در حالت اول مطابق شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) که حداکثر آبستنگی اطراف پایه استوانه‌ای در فاصله ۲/۵ متر از پایین‌دست صفحات برابر ۰/۰۵۱ متر و عمق آبستنگی اطراف خود صفحات برابر ۰/۰۶۸ متر است، مشاهده می‌شود که آبستنگی پایه استوانه‌ای حدود ۳۵ درصد نسبت به حالت اولیه کاهش یافته است.

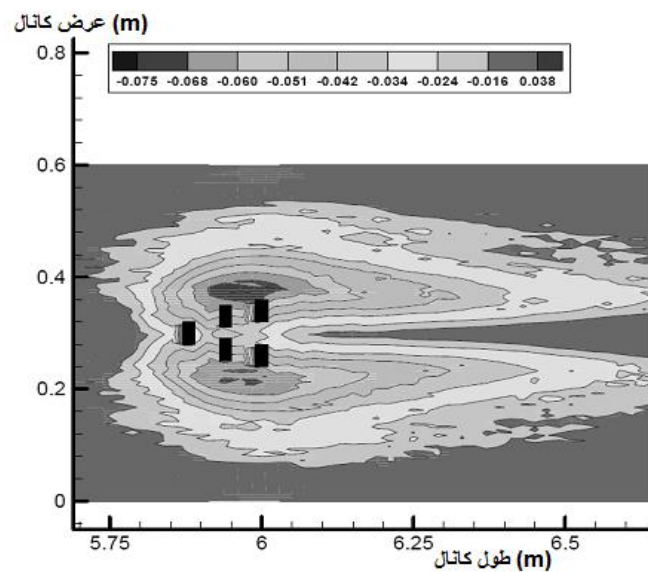




شکل ۱۸: تغییرات تراز بستر در صورت استقرار صفحات در فاصله  $2/5m$  از مرکز پایه استوانه‌ای و بالادست آن

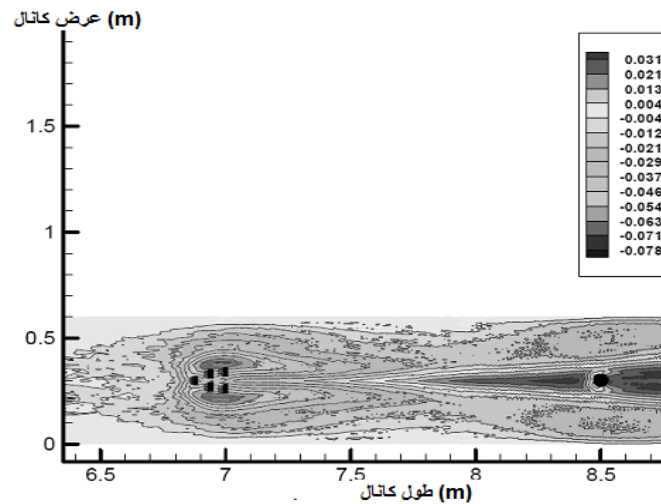


شکل ۱۹: تغییرات تراز بستر حول پایه استوانه‌ای در صورت استقرار صفحات در فاصله  $2/5m$  از مرکز پایه و بالادست آن

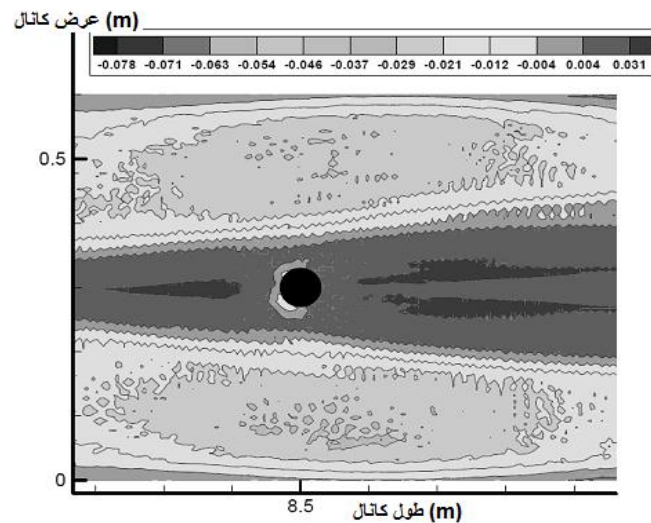


شکل ۲۰: تغییرات تراز بستر حول صفحات در صورت استقرار آنها در فاصله  $2/5m$  از مرکز پایه و بالادست آن

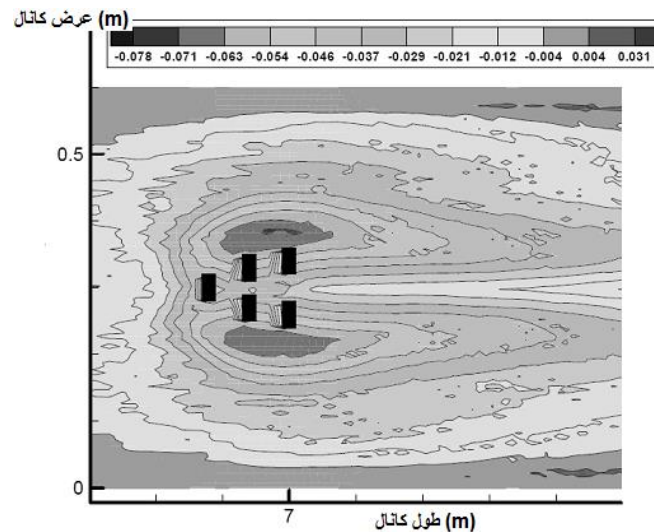
در حالت دوم مطابق شکل‌های (۲۱) تا (۲۳)، حداکثر آبشستگی اطراف پایه استوانه‌ای در فاصله ۱/۵ متر از پایین‌دست صفحات قرار گرفته است که برابر ۰/۰۰۴ متر و حداکثر عمق آبشستگی اطراف خود صفحات برابر ۰/۰۶۳ متر است که این مقدار آبشستگی تنها در گوشه یکی از صفحات دیده می‌شود. در این حالت مشاهده می‌شود در اطراف پایه پل آبشستگی ناچیزی وجود دارد و نزدیک به صفر است. از طرفی خود صفحات نیز آبشستگی کمتری نسبت به حالت اولیه پایه دارند. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می‌شود که وجود صفحات غیرمستغرق قبل از پایه پل، ایجاد رسوب کرده است و موجب پوشش آبشستگی حول پایه می‌شود.



شکل ۲۱: تغییرات تراز بستر در صورت استقرار صفحات در فاصله ۱/۵m از مرکز پایه استوانه‌ای و بالادست آن



شکل ۲۲: تغییرات تراز بستر حول پایه استوانه‌ای در صورت استقرار صفحات در فاصله ۱/۵m از مرکز پایه و بالادست آن



شکل ۲۳: تغییرات تراز بستر حول صفحات در صورت استقرار آنها در فاصله  $1/5m$  از مرکز پایه و بالادست آن

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر به شرح زیر است:

۱. مدل عددی SSIM توانایی مدل کردن توسعه عمق حفره آبستگي در حالت وابسته به زمان تحت هیدروگراف جریان را دارد.
۲. اختلاف بین مقادیر آبستگي آزمایشگاهی و مدل عددی کمتر از ۲٪ است که بیانگر توانمندی و دقت خوب این نرم افزار در شبیه سازی فرایند آبستگي و نشست رسوبات جریان اطراف پایه های پل است.
۳. عمق حفره آبستگي با نزدیک شدن به پیشانی پایه استوانه ای به تدریج افزایش می یابد و در اطراف پایه کاهش تراز بستر و آبستگي مشاهده می شود که به دو طرف پایه کشیده شده است و می تواند سبب خرابی آن شود.
۴. بیشترین مقدار تنش اطراف پایه و در بالادست پایه بر اثر برخورد مستقیم جریان با پایه اتفاق می افتد که در این محدوده آبستگي اتفاق می افتد و نشست رسوبات برداشته شده از بالادست، در پایین دست پایه رخ می دهد.
۵. مقادیر تنش برشی کف کانال و قطر ذرات به ترتیب برابر  $1/537 N/m^2$  و  $0/00128m$  است که با توجه به منحنی اصلاح شده شیلدز امکان حرکت ذرات و آبستگي وجود دارد.
۶. در حالت پنج صفحه ای، عمق آبستگي برابر  $10/2$  میلی متر و میزان رسوب برابر  $36$  میلی متر است که بهتر از دو حالت دیگر تک-صفحه ای و سه صفحه ای است.
۷. میزان رسوبات با افزایش آبستگي در هر حالت افزایش می یابد و در مقایسه دو حالت یک صفحه ای و پنج صفحه ای، با فرارگیری پنج صفحه در فواصل مشخص، ۴۰ درصد کاهش آبستگي و ۳۰ درصد کاهش رسوبات مشاهده می شود.
۸. بهترین محل قرارگیری صفحه ها، فاصله  $0/5$  تا  $2/9$  متر از مرکز پایه استوانه ای و در بالادست آن است تا جریان فرسایش دهنده به پایه پل نرسد و تأثیر ناچیزی بر بستر اطراف پل داشته باشد.
۹. وجود صفحه ها قبل از پایه پل، تولید رسوب می کند و سبب پوشش آبستگي حول پایه می شود.

## منابع

- [1] Samimi, T., et.al, "Laboratory Study of the Effects of Submerged Vans on Scour At Bridge Elements", The National Conference on Irrigation and Drainage Networks Managements, Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty Of Water Siences Engineering, 2006 (in Persian).
- [2] Rostam abadi, M., and Salehi neyshaboori A., "Simulation of the Flow Pattern Around a submerged Van in a Rectangular Channel", Students Conference on Civil Engineering, 2008 (in Persian).
- [3] Shen, H. W., Schneider, V. R., and Karaki, S. S., "Further results to time-dependent local scour at bridge elements", J. Hydraul. Div. , 95 (6), pp. 1919 - 1940, 1969.
- [4] Mia, M. F., and Nago, H.. "Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier." J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)0733- 9429(2003)129:6(420), 420-427, 2003
- [5] Movahedi, N, Dehghani, A. A., Arabi, M.J., Zahiri, A.R, Temporal Evolution of Local Scour Depth around Side-by-side Piers, J. Civil Eng. Urban, 3(3),pp. 82-86, 2013.
- [6] Esmaeaili T., Hydraulic numerical simulation of scouring at the base of concrete bridges, Master's Thesis, Islamic Azad universitysouth Tehran branch,2009 , (in Persian).
- [7] Chang, W. Y., Lai, J. S., and Yen, C. L.,(2004), "Evolution of scour depth at circular bridge piers." J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9429 130:9(905), pp. 905-913.
- [8] Chreties, C., Simarro, G., and Teixeira, L., (2008), "A new experimental method to find equilibrium scour at bridge piers." J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9429,134:10(1491), pp. 1491-1497.
- [9] Lu, J. Y. Z. S. Z., Hong, J. H., Lee, J. J., and Raikar, R. V.,(2011), "Temporal variation of scour depth at non-uniform cylindrical piers." J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000272, pp. 45-56.
- [10] Simarro, G., Fael, C. M. S., and Cardoso, A., (2011) "Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies." J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000410, pp. 1089-109

## Study of submerged vanes in the river with using SSIIM software

Korous Nekoufar<sup>1</sup>, Maryam Saghafi<sup>2\*</sup>, Mehrnaz Roozbahani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University faculty member, Islamic Azad University, Chalous Branch, Iran.

<sup>2</sup>MSc Student, Islamic Azad University, Chalous Branch, Iran.

<sup>3</sup>MSc, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

\*E-mail: nekoufar@iauc.ac.ir

### ABSTRACT

The problem of erosion control and sedimentation in rivers has long been considered by humans. Every year a large number of bridges and flood in the river, at a time when they are most needed, are destroyed. One of the most effective agents of this destruction, scour around the base of the bridge, which creates a lot of human and financial losses. vanes submerged and non-submerged, structures that are at the bottom of the river with an angle to the main flow and in order to prevent the erosion of as rivers and screws and the base structure and morphology of the water and the river bed are correct. The secondary vortex structures cause's changes in the flow pattern of the river bottom sediment and erosion are the result of the transition. System, number, space, geometry and angle of the screen can be effective in the sediment of the front legs. Understanding the flow field plates can help engineers to better use them in rivers. So, in this thesis examined the effect of submerged vanes on the cylinder of the river has been using the software SSIIM and in this regard the placement of three vanes is studied in this research.

### KEYWORDS

Submerged Vanes, River Sediment, Secondary Flow, SSIIM.