

# بررسی تأثیر قطر پایه پل مربعی شکل به روش صفحات مستغرق بر میزان آبستگی با استفاده از نرم افزار SSIIM

کورس نکوفر<sup>۱\*</sup>، آرمین حلاجیان<sup>۲</sup>

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، ایران

nekoufar@iauc.ac.ir

۲- دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲

## چکیده

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکارترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند که از دیرباز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سه راهکار متداول برای مقابله با پدیده آبستگی در اطراف پایه‌های پل عبارتست از قرار دادن پی در تراز پایین‌تر از عمق گودال فرسایشی، کاهش قدرت گرداب تولیدشده در اطراف پایه، به‌کارگیری پوشش حفاظتی سنگ‌چین یا استفاده از طوق، شکاف یا صفحات مستغرق در اطراف پایه پل‌ها. 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. در این تحقیق، تأثیر قطر پایه پل مربعی شکل و اثر حضور صفحات مستغرق بر میزان آبستگی با استفاده از نرم‌افزار SSIIM بررسی می‌شود.

کلیدواژه‌های فارسی: آبستگی، پایه پل مربعی، صفحات مستغرق، نرم‌افزار SSIIM

۱- مقدمه

تغییر می‌دهند و به صورت موضعی سبب آبستگی در این محدوده می‌شوند. برای مقابله با پدیده آبستگی در اطراف پایه‌های پل سه راهکار عمده زیر متداول است:

- ۱) قرار دادن پی در تراز پایین‌تر از عمق گودال فرسایشی
- ۲) کاهش قدرت گرداب ایجادشده در اطراف پایه با استفاده از ایجاد شکل ایرودینامیکی در پایه‌ها
- ۳) ایجاد پوشش حفاظتی سنگچین یا استفاده از طوق، شکاف یا صفحات مستغرق در اطراف پایه در مواردی که عمق فرسایش پیش‌بینی شده از ۶ متر تجاوز کند از روش اول استفاده خواهد شد و برای فرسایش‌های کمتر از ۶ متر روش کاهش قدرت گرداب یا یکی از راهکارهای روش سوم توصیه می‌شود. [۳].

به‌کارگیری صفحات مستغرق یکی از روش‌هایی است که با تغییر در رژیم حرکت بار بستر این امکان را فراهم می‌سازد تا محل رسوب‌گذاری و فرسایش قابل کنترل باشد. صفحات مستغرق، سازه‌های هدایت جریان با نسبت طول به ارتفاع کمی هستند که به صورت عمودی با زاویه‌ای نسبت به جهت جریان در

آبستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگری است که ممکن است بر اثر تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر رخ دهد. آبستگی از جنبه‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شود:

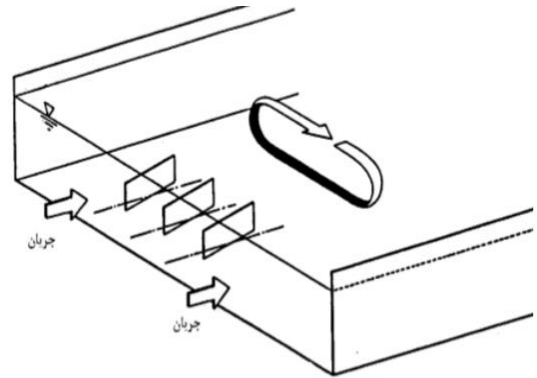
- ۱) آبستگی از نظر علت به وجود آمدن آن که شامل آبستگی عمومی، آبستگی ناشی از تنگ-شدگی مقطع و آبستگی موضعی است. از مجموع این سه آبستگی، عمق آبستگی کل مرتبط با یک سازه مشخص به دست می‌آید [۱].

- ۲) آبستگی از نظر وضعیت حمل رسوب که شامل آبستگی در حالت آب زلال و آبستگی در حالت آب حاوی رسوب است [۲].

- ۳) آبستگی از نظر وضعیت ذرات رسوب در حفره آبستگی شامل آبستگی استاتیکی و دینامیکی می‌شود [۱].

سازه‌های هیدرولیکی که به صورت مانعی در برابر جریان قرار می‌گیرند، الگوی جریان در نزدیکی خود را

بستر رودخانه نصب می‌شوند و مطابق شکل ۱ با ایجاد چرخش ثانویه در جریان سبب اصلاح الگوی جریان نزدیک بستر، توزیع مجدد جریان و انتقال رسوب در عرض کانال خواهند شد [۳].



شکل ۱- شکل شماتیک جریان بر اثر استفاده از

### صفحات مستغرق [۳]

از آنجایی که یکی از دلایل عمده شکست پل‌ها، آبشستگی موضعی پایه پل است، بنابراین مهندسان طراح پل باید درخصوص پیدایش و میزان آن پیش‌بینی‌های لازم را مبذول دارند. با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم بر این پدیده، نیاز به ساخت مدل‌های آزمایشگاهی و عددی که بتوانند جواب‌هایی نزدیک به واقعیت ارائه دهند به شدت احساس می‌شود.

امروزه کاربرد مدل‌های عددی در زمینه‌های مهندسی بسیار رایج شده است و با توجه به اهمیت آبشستگی و خسارات ناشی از این پدیده از انواع مدل‌های عددی برای محاسبه آبشستگی استفاده

می‌شود. یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در زمینه مدل‌سازی و تحلیل پدیده آبشستگی، نرم‌افزار SSIIM است که به کمک این نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی انجام می‌شود.

در این تحقیق، تأثیر قطر پایه پل مربعی‌شکل به روش صفحات مستغرق بر میزان آبشستگی با استفاده از نرم‌افزار SSIIM مدل‌سازی و تأثیر استفاده از صفحات مستغرق بر الگوی آبشستگی و حداکثر عمق آبشستگی حول پایه پل بررسی و نتایج ارائه خواهد شد.

### ۲- معرفی نرم‌افزار SSIIM

مدل SSIIM یک برنامه عددی با زمینه کاربرد در مهندسی رودخانه، محیط زیست، هیدرولیک و رسوب است و هدف اولیه از ساختن این برنامه شبیه‌سازی کردن حرکت رسوب در هندسه رودخانه و کانال بوده است. بعدها استفاده از این برنامه در دیگر موضوعات هیدرولیکی مانند مدل‌کردن سرریزها، افت در تونل‌ها، رابطه عمق و دبی در رودخانه‌ها و ... نیز توسعه یافت. مزیت اصلی مدل SSIIM توانایی مدل‌کردن انتقال رسوب در بستر متحرک<sup>۱</sup> در هندسه‌های پیچیده است [۴-۵].

1 Live bed

برنامه SSIIM معادلات ناویر استوکس را با مدل  $k - \epsilon$  استاندارد روی یک شبکه سه بعدی تقریباً نامتعامل حل می‌کند. برای منفصل سازی نیز از یک روش حجم همراه الگوریتم توانی یا الگوریتم جهت مند مرتبه دوم استفاده می‌شود. روش SIMPLE برای ارتباط ترم فشار و سرعت به کار می‌رود. با استفاده از یک روش حل ضمنی میدان سرعت در هندسه محاسبه و این سرعت‌ها نیز زمانی استفاده می‌شوند که معادلات انتقال - پخش<sup>۳</sup> برای اندازه‌های مختلف رسوب حل شده باشند.

### ۳- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات ناویراستوکس در حالت جریان آشفته به کمک مدل  $k - \epsilon$  استاندارد برای رسیدن به سرعت و تنش برشی آشفتگی در یک هندسه سه بعدی کلی در مدل عددی SSIIM حل شده است. به علاوه، مدل SSIIM قابلیت استفاده از مدل آشفتگی Simpler را نیز دارد که در فایل Control در مجموعه اطلاعاتی F24 قابل تعیین است. معادله ناویراستوکس برای جریان‌های غیرقابل تراکم با چگالی ثابت مطابق رابطه ۱ است:

برنامه SSIIM برای تسهیل ساختن فایل ورود اطلاعات<sup>۱</sup> از جعبه‌های محاوره‌ای<sup>۲</sup> استفاده می‌کند. دو نسخه از مدل عددی SSIIM وجود دارد. SSIIM 1 از شبکه ساختاریافته استفاده می‌کند، ولی SSIIM 2.0 از شبکه بدون ساختار برای مدل کردن بهره‌برداری می‌کند که در هندسه‌های پیچیده کار را ساده‌تر خواهد کرد.

احمد شکیبائی‌نیا و همکاران با استفاده از نرم‌افزار SSIIM 2.0 کاربرد مدل سازی عددی سه بعدی در شبیه سازی پدیده‌های پیچیده مهندسی رودخانه را بررسی و نقاط ضعف و قوت این نرم‌افزار را مشخص کردند [۶]. اسماعیلی و همکاران، عمق حفره آبشستگی در طول زمان هیدروگراف‌های مختلف در اطراف پایه استوانه‌ای را به کمک مدل عددی SSIIM شبیه سازی کردند [۷]. طیب‌زاده و همکاران برای اندازه‌گیری عمق آبشستگی متعادل اطراف پایه‌های پل با مقاطع دایره‌ای از مدل عددی SSIIM استفاده کردند. نتایج مطالعات آنها نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل عددی SSIIM در محاسبه عمق آبشستگی در شرایط جریان دائمی بود [۸].

3 Convection-diffusion

1 Input file  
2 Dialog box

$$\overline{-u_i u_j} = v_T \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad ۲$$

اولین ترم سمت راست معادله ترم پخش شونده در معادله ناوراستوکس است. ترم دوم معمولاً نادیده گرفته می‌شود ولی در SSIM1.0 می‌تواند در مجموعه اطلاعاتی F1001 در فایل control در نظر گرفته شود. ترم سوم در سمت راست نیز مربوط به فشار و بسیار کوچک است و اهمیت زیادی ندارد.

### ۲-۳- مدل آشفتگی $k-\varepsilon$

مدل  $k-\varepsilon$  لزجت گردابه‌ای را طبق رابطه ۳ محاسبه می‌کند:

$$v_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad ۳$$

K انرژی جنبشی آشفتگی است:

$$K = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad ۴$$

معادله دیفرانسیلی مربوط به K طبق رابطه ۵ معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_K} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + p_k - \varepsilon \quad ۵$$

در این رابطه فوق  $p_k$  مطابق فرمول ۶ تعیین خواهد شد:

$$p_k = v_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad ۶$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial x_j} (-p \delta_{ij} - \overline{p u_i u_j}) \quad ۱$$

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 آشفتگی مورد نیاز است. برای انفصال (گسسته‌سازی) از روش حجم کنترل با استفاده از قاعده توانی<sup>۱</sup> یا الگوریتم جهتمند مرتبه دوم استفاده می‌شود. روش SIMPLE نیز به عنوان پیش‌فرضی برای تصحیح فشار به کار می‌رود. روش SIMPLEC قابل فراخوانی توسط مجموعه اطلاعات K9 در فایل Control است. قاعده توانی و الگوریتم جهتمند مرتبه دوم استفاده شده برای منفصل‌سازی نیز در مجموعه اطلاعاتی k6 در فایل control در دسترس است. مدل SSIM به طور پیش-فرض ترم گذار را نادیده می‌گیرد. البته این شرایط در فایل control درست اطلاعاتی F33 قابل تغییر است.

### ۱-۳- 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:

روش‌های ریاضی مدل‌سازی شوند. از این‌رو، برای بستن میدان معادلات حاکم از معادلات آشفتگی استفاده خواهد شد.

### ۳-۳- 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.

$$v_T = v_{T,0} \left[ 1 + \beta \left( -\frac{g}{P} \frac{\frac{\partial p}{\partial z}}{\left\langle \frac{\partial u}{\partial z} \right\rangle^2} \right)^a \right] \quad ۱۰$$

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.

### ۳-۴- قانون دیوارها

تغییرات سرعت در دیوار گاهی بسیار سریع است. از این‌رو، اگر پارامتر سرعت بخواهد 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

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

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad ۷$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (p u_j) = 0 \quad ۸$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (p u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-p u_i u_j) \quad ۹$$

که  $u$  مؤلفه سرعت،  $p$  چگالی سیال و  $P$  فشار کل است. ترم  $-p u_i u_j$  همان ترم تنش رینولدز است. طبق معادلات ۸ و ۹ می‌توان سه معادله مومنتوم 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

### ۳-۵- 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<sup>۲</sup> (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 [۹]. 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

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 **SSIIM** 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  $0.4$  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 **SSIIM 1.0** استفاده از قانون دیوار برای مرزهای صاف<sup>۱</sup> 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.

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

$$\Gamma_T = \frac{u_T}{S_c} \quad ۱۶$$

$S_c$  عدد اشمیت<sup>۱</sup> است که به طور پیش فرض برابر ۱ و در مجموعه اطلاعاتی F12 در فایل Control قابل تغییر است.

### ۳-۷- انفصال معادلات حاکم بر میدان جریان آب و رسوب

منظور از منفصل سازی (گسسته سازی) 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 منفصل سازی 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

می‌دهد. این تأثیر به عنوان یک ترم اضافی در معادلات ناویراستوکس اضافه شده است:

$$p_s g \frac{\partial c}{\partial z} \quad ۱۴$$

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

### ۳-۶- 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 مبنا محاسبه می‌کند. تراز سطح مبنا 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:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad ۱۵$$



توسط پاتانکار<sup>۱</sup> ارائه شد. روابط حاکم بر این روش به صورت زیر است:

$$\frac{a_E}{D_e} = \begin{cases} -P_e & P_e < 10 \\ (1+0.1P_e)^5 - P_e & -10 \leq P_e \leq 0 \\ (1-0.1P_e)^5 & 0 \leq P_e \leq 10 \\ 0 & P_e > 10 \end{cases} \quad ۱۸$$

در این روابط  $P_e$  عدد پکلت است که به صورت نسبت قدرت انتقال به بخش تعریف می‌شود.

$$P_e = \frac{(pu)}{(\Gamma/L)} \quad ۱۹$$

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

$$a_E = D_e \left\| 0, (1-0.1|P_e|)^5 \right\| + \left\| -F_e, 0 \right\| \quad ۲۰$$

$$a_w = D_w \left\| 0, (1-0.1|P_w|)^5 \right\| + \left\| F_w, 0 \right\| \quad ۲۱$$

$$a_p = a_E + a_w + F_e - F_w \quad ۲۲$$

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_i \phi_i \quad ۲۳$$

### ۳-۱۰- الگوی جهتمند مرتبه دوم

دقت این روش از درجه دوم است و برای تخمین مقادیر روی وجه یک سلول از برون‌یابی دو گره مجاور در بالادست استفاده می‌کند. بنابراین، با توجه به شکل ۲ مقدار  $\phi_e$  از روابط زیر تخمین زده می‌شود:

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_E + (\phi_E - \phi_{EE}) \frac{\bar{eP}}{EEE} & F_e < 0 \\ \phi_p + (\phi_p - \phi_w) \frac{\bar{P}_e}{WP} & F_e > 0 \end{cases} \quad ۲۴$$

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.

### ۳-۸- انفصال معادله انتقال - پخش

معادله حاکم بر کمیت  $\phi$  که چگونگی انتشار آن را مشخص می‌کند به صورت رابطه ۱۷ است:

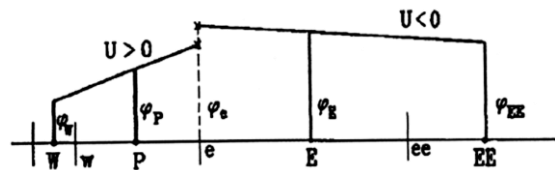
$$\frac{\partial(p\phi)}{\partial t} + \text{div}(p\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}(\phi)) + S \quad ۱۷$$

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 روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. در این بین الگوی جهتمند مرتبه دوم و قاعده توانی برای انفصال معادلات انتقال - پخش در برنامه SSIIM به کار می‌رود.

### ۳-۹- الگوی قاعده توانی

قاعده توانی در مقایسه با حل دقیق، تقریبی خیلی دقیق به شمار می‌آید. این روش در سال ۱۹۸۰

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_E + (\phi_E - \phi_{EEE})f_{1E} & F_e < 0 \\ \phi_p + (\phi_p - \phi_w)(1 - f_{1w}) & F_e > 0 \end{cases} \quad 25$$



شکل (۲) - موقعیت گره‌های مجاور گره

#### مرکزی در طرح مرتبه دوم

#### ۴- روش تحقیق

در تحقیق حاضر، تأثیر قطر پایه پل مربعی شکل به روش صفحات مستغرق بر میزان آبستگي با استفاده از نرم‌افزار بررسی و تأثیر استفاده از صفحات مستغرق بر الگوی آبستگي و حداکثر عمق آبستگي حول پایه پل بررسی و نتایج ارائه شده است.

#### ۴-۱- مدل‌سازی هندسه پایه پل در SSIIM

مدل SSIIM یک مدل عددی و سه‌بعدی برای شبیه‌سازی میدان جریان و رسوبات است و بنابراین، برای شبیه‌سازی میدان جریان و رسوبات، هندسه مسئله به صورت یک شبکه محاسباتی به شرح ذیل به مدل معرفی شد.

مدل‌سازی در یک فلوم به طول ۱۶ m و عرض ۶۰ cm انجام شد. آزمایش‌ها بر مبنای آبستگي آب زلال با  $u/u_c = 0.9$  انجام شد تا حداکثر عمق آبستگي رخ دهد. زیرا بر اساس

تجربه محققان در شرایط آبستگي آب زلال، حداکثر عمق آبستگي در نسبت سرعت‌های برشی ۰/۹ تا ۱ رخ می‌دهد. برای مدل پایه، از یک لوله استوانه‌ای شکل به قطر ۶ cm استفاده شد. همان‌طور که در شکل مشخص است، مدل پایه روی یک صفحه افقی متصل و در فاصله ۸۰۰ cm از ابتدای کانال واقع شده است. اندازه متوسط ذرات رسوب با قطر  $D50 = 1.28 \text{ mm}$  و انحراف هندسی استاندارد  $\sigma_g = 1.29$  پر شد.

معیار زمان تعادل در این تحقیق، معیار ویتال و همکاران (۱۹۹۴) است. زمان تعادل آبستگي، مدت زمانی است که تغییرات در عمق آبستگي در یک بازه زمانی یک ساعته کمتر از ۱ mm باشد [۱۰].

#### ۴-۱-۱- مش محاسباتی

در شکل (۳) هندسه مش استفاده‌شده برای تحلیل آبستگي حول پایه پل در فلوم نشان داده شده است. ابعاد مش محاسباتی در چهار مرحله متفاوت بوده است طوری که در فواصل دور از پایه اندازه سلول‌ها  $۲/۵ \text{ cm} \times ۰/۵ \text{ cm}$  و به تدریج با نزدیک شدن به پایه پل اندازه آنها  $۲ \text{ cm} \times ۰/۵ \text{ cm}$  و  $۱ \text{ cm} \times ۰/۵ \text{ cm}$  و در نهایت، در منطقه بستر متحرک به فاصله نیم متر بالادست و پایین‌دست پایه اندازه سلول‌ها  $۰/۵ \text{ cm} \times ۰/۵ \text{ cm}$  در نظر

گرفته شده است. در راستای ارتفاع نیز شبکه به ۹ قسمت تقسیم بندی شده است. با توجه به اینکه در جهت طولی ۹۴۰ و در جهت عرضی ۱۲۰ سلول وجود دارد، در شبکه سه بعدی ۱۱۲۸۰۰ سلول در هر سطح و مجموع ۹۰۲۴۰۰ سلول برای شبیه سازی عددی به کار رفته است.

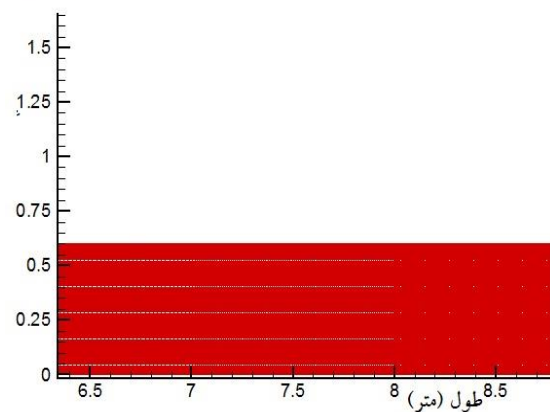
گرفته شده است. در راستای ارتفاع نیز شبکه به ۹ قسمت تقسیم بندی شده است. با توجه به اینکه در جهت طولی ۹۴۰ و در جهت عرضی ۱۲۰ سلول وجود دارد، در شبکه سه بعدی ۱۱۲۸۰۰ سلول در هر سطح و مجموع ۹۰۲۴۰۰ سلول برای شبیه سازی عددی به کار رفته است.

### جدول (۱) - نتایج حاصل از کالیبراسیون

عددی مدل های مختلف			
مقدار آبستگي	حداکثر	تراز	ضریب
(میلی متر)	بستر، رسوب		زبری
	(میلی متر)		
۹۸	۳۷	۱۲d۵۰	
۸۷	۳۳	۱۰d۵۰	
۷۶	۲۹	۸d۵۰	
۷۹	۳۰	۹d۵۰	

نتایج تغییرات الگوی آبستگي حول پایه پل در شکل های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود الگوی آبستگي کاملاً متقارنی حول پایه پل شکل گرفته است طوری که فرسایش در مناطق اطراف و پایه پل شدید است و چاله فرسایشی دو طرف آن تولید می شود و در پشت پایه پل نیز تجمع رسوبات رخ می دهد.

عرض (متر)



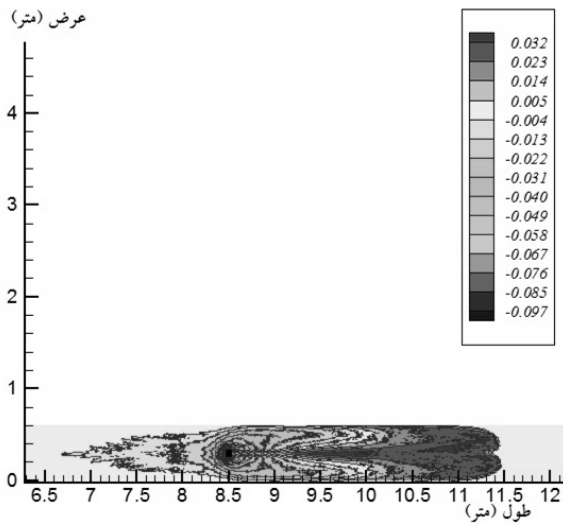
شکل ۳- نمای قسمتی از مش تولید شده

### ۲-۴ نتایج شبیه سازی میدان جریان حول پایه

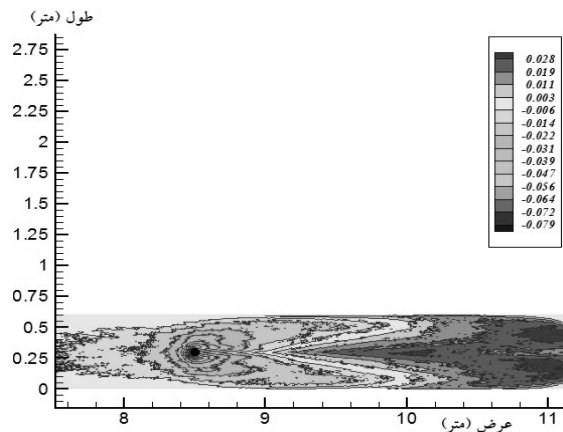
#### پل ساده

در این قسمت نتایج مدل سازی عددی سه بعدی آبستگي حول پایه پل ساده ارائه شده است. برای کالیبراسیون مدل عددی با تخصیص زبری مناسب انتخاب می شود. نتایج به دست آمده از کالیبراسیون عددی مدل های مختلف با گام های زمانی ۶S و ضرایب زبری متفاوت حدسی ۱۰d۵۰، ۱۲d۵۰

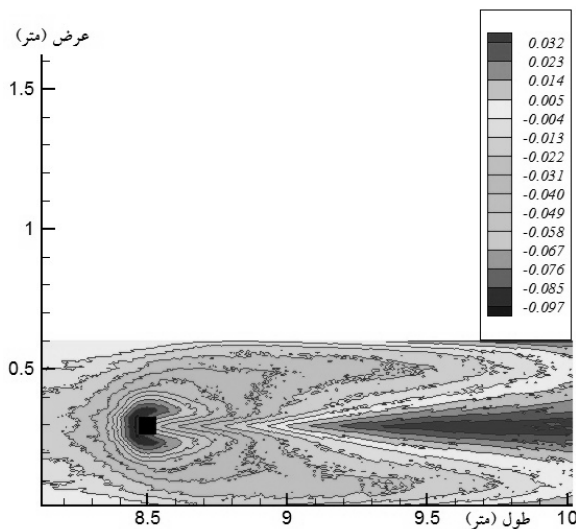
به نتایج جدول ۲، آبستنگی حول پایه مربعی با ضلع ۶cm نسبت به حالت دایره‌ای با قطر به اندازه ۶cm حدود ۲۲٪ افزایش داشته است.



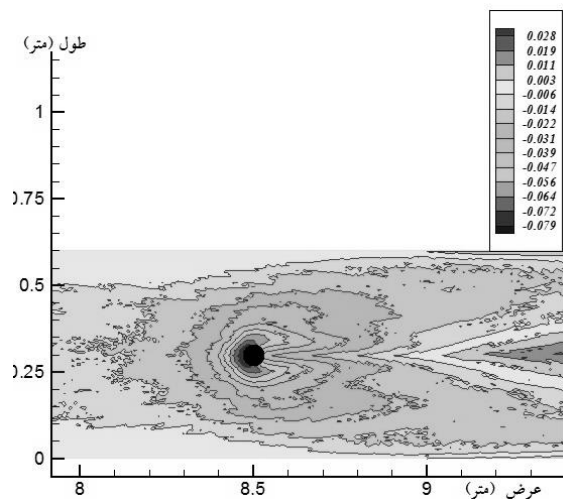
شکل ۴- الگوی فرسایش حول پایه پل استوانه‌ای



شکل ۶- الگوی فرسایش حول پایه پل مربعی



شکل ۵- مقادیر فرسایش حول پایه پل استوانه‌ای



شکل ۳-۴- شبیه‌سازی میدان جریان حول پایه به شکل مربع

شکل (۷)- مقادیر فرسایش حول پایه پل مربعی

جدول ۲- میزان آبستنگی حول پایه پل با

شکل‌های مختلف

شکل پایه	مقدار آبستنگی (میلی‌متر)
استوانه‌ای	۷۹
مربعی	۹۷

در این مرحله پایه پل به شکل مربع با اضلاع ۶cm در کانال تولید شده است. نتایج تغییرات الگوی آبستنگی حول پایه پل در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. پس از انجام محاسبات، آبستنگی حول پایه ۹۷mm مشخص شد. با توجه

#### ۴-۴-۲- آبستگي با وجود صفحات مستغرق در

##### يک طرف پايه

در قسمت قبلی نتایج مدل‌سازی عددی و سه‌بعدی الگوی جریان و آبستگي حول پایه پل استاندارد و بدون وجود صفحات مستغرق ارائه شد. در این قسمت یک صفحه مستغرق در یک متر بالادست پایه‌های پل به شکل مربعی با اضلاع مختلف ۶cm، ۷cm و ۸cm به مدل عددی معرفی شده است.

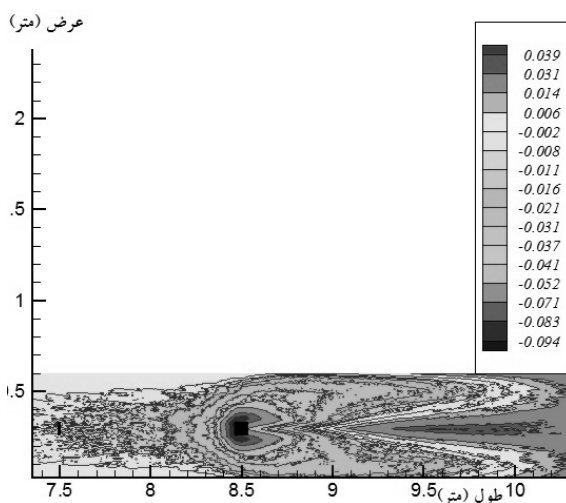
#### ۴-۴-۱- پایه به شکل مربع با اضلاع ۶cm

در این مرحله، صفحه‌ای با ابعاد ۱cm×۶cm با فاصله یک متر بالادست پایه پل مربعی با اضلاع ۶cm در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۸ نتایج آبستگي تعبیه صفحه مستغرق در بالادست پایه پل نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، آبستگي حول پایه مربعی با ضلع ۶cm تحت تأثیر حضور صفحه مستغرق، ۸۷mm شده است که در این حالت نسبت به حالت بدون صفحه حدود ۱۰٪ کاهش یافته است.

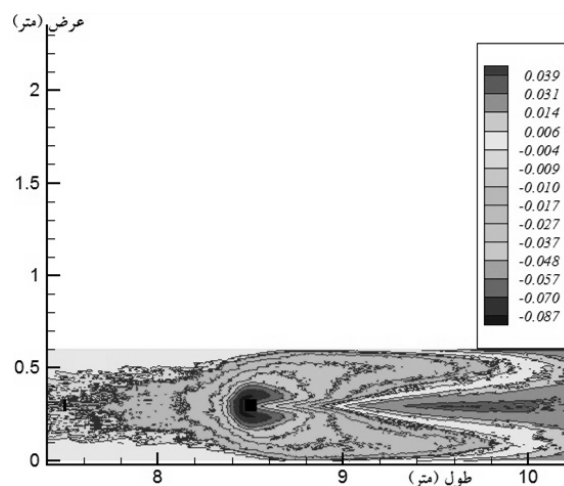
#### ۴-۴-۲- پایه به شکل مربع با اضلاع ۷cm

در مرحله دیگر، صفحه با ابعاد ۱cm×۷cm به فاصله یک متر بالادست پایه پل مربعی با اضلاع ۷cm در نظر گرفته شده است. نتایج آبستگي حول پایه پل در شکل ۹ نشان می‌دهد که آبستگي حول پایه مربعی با ضلع ۷cm با وجود صفحه مستغرق در بالادست آن، ۹۴mm شده است. آبستگي در این حالت نسبت به پایه مربعی با ضلع ۶cm حدود ۸٪ افزایش یافته است.



شکل ۹- الگوی فرسایش حول پایه پل مربعی

با ضلع ۷cm

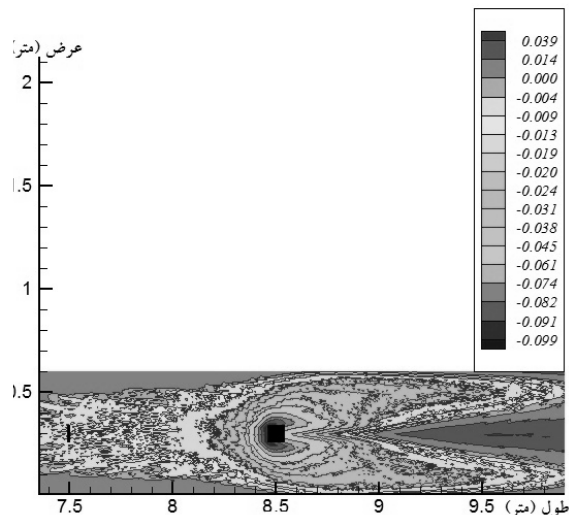


شکل ۸- الگوی فرسایش حول پایه پل مربعی

با ضلع ۶cm

### ۳-۴-۴- پایه به شکل مربع با اضلاع ۸cm

در مرحله پایانی، صفحه با ابعاد ۸cm×۱cm به فاصله یک متر بالادست پایه پل به شکل مربع با اضلاع ۸ cm در نظر گرفته می‌شود. پس از انجام محاسبات رسوب در نرم‌افزار، خروجی به دست‌آمده در شکل ۱۰ نمایش داده شده است که میزان آبشستگی حول پایه مربعی ۹۹mm است. در این حالت مقدار عمق آبشستگی نسبت به پایه مربعی با ضلع ۷cm حدود ۵٪ و نسبت به پایه مربعی با ضلع ۶cm حدود ۱۱٪ افزایش یافته است.



شکل ۱۰- الگوی فرسایش حول پایه پل مربعی با ضلع ۸cm

در جدول ۳ خلاصه نتایج به دست‌آمده فهرست شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان، آبشستگی حول پایه مربعی نسبت به پایه استوانه‌ای بیشتر است. البته حضور صفحه مستغرق در بالادست پایه پل سبب کاهش و

کنترل آبشستگی می‌شود. به نظر می‌رسد با افزایش ضلع پایه مربعی همراه صفحات مستغرق متناسب، آبشستگی افزایش می‌یابد.

### جدول ۳- مقدار آبشستگی حول پایه‌های

#### مربعی با اضلاع مختلف همراه صفحه با ابعاد

##### متناسب

میزان عمق آبشستگی (میلی‌متر)	اندازه اضلاع پایه مربعی (میلی‌متر)
۸۷	۶۰
۹۴	۷۰
۹۹	۸۰

در تحقیق حاضر، تأثیر حضور صفحات مستغرق در بالادست پایه مربعی با اضلاع مختلف مدل‌سازی شد. نتایج حاصل در این پژوهش نشان می‌دهد که مدل عددی استفاده شده در شبیه‌سازی جریان، محاسبه سطح آزاد و محاسبه تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه مقادیری قابل قبول را پیش‌بینی می‌کند و با اینکه در نواحی دارای جریان‌های چرخشی شدید، در بعضی نقاط خطای محاسبه سرعت زیاد می‌شود، مدل می‌تواند توزیع سرعت و جریان‌های چرخشی را به خوبی مدل‌سازی کند. از مدل‌های ارائه‌شده استنتاج می‌شود که تحت شرایط یکسان، آبشستگی حول پایه مربعی نسبت به پایه استوانه‌ای بیشتر است.

در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی و مدل‌های SSIIM سعی شده است که راهکار مناسبی برای مقابله با پدیده یادشده ارائه شود. با توجه به نتایج حاصله، استفاده از صفحات مستغرق، روشی مناسب برای کنترل و کاهش پدیده است. آبستنگی حول پایه مربعی با ضلع ۶cm نسبت به حالت دایره‌ای با قطر به اندازه ۶cm حدود ۲۲٪ افزایش داشته است. آبستنگی حول پایه مربعی با ضلع ۶cm تحت تأثیر حضور صفحه مستغرق، نسبت به حالت بدون صفحه حدود ۱۰٪ کاهش یافته است. میزان آبستنگی حول پایه مربعی با ضلع ۸cm همراه صفحه مستغرق مستقر در یک متر بالادست آن، نسبت به پایه مربعی با ضلع ۷cm حدود ۵٪ و نسبت به پایه مربعی با ضلع ۶cm حدود ۱۱٪ افزایش یافته است. در بررسی تأثیر اندازه پایه پل مربعی این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش ضلع پایه مربعی همراه صفحات مستغرق متناسب، آبستنگی افزایش می‌یابد.

## مراجع

۱. اسماعیلی، ت. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی عددی هیدرولیکی- هندسی آبستنگی در پایه پل‌های بتنی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران جنوب.
۲. سلیمانی، م. ۱۳۹۱. امکان‌سنجی کاهش آبستنگی پایه‌ی پل به‌وسیله صفحات مستغرق با استفاده از نرم‌افزار SSIIM، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لار.
۳. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی. ۱۳۸۱. راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، نشریه شماره ۲۶۰.
۴. شکیبائی‌نیا، ا. ا.ر. وزراتی و م.ر. مجدزاده طباطبایی. ۱۳۸۷. کاربرد مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده مهندسی رودخانه، نشریه دانشکده فنی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۵. صمیمی، ت. و همکاران. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آب‌ستنگی پایه پل‌ها، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.
۶. طهماسبی بیرگانی، ی. ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های محاسبه آبستنگی در پایه پل‌ها با بکارگیری داده‌های اندازه‌گیری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۷. طیب‌زاده، م. و همکاران. ۱۳۸۴. شبیه‌سازی عددی میزان آبستتگی اطراف پایه‌های پل با مقطع دایره‌ای، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر.

8. Mia, M. F., and Nago H. 2003. "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
9. Reidar N, B.Olsen. 2011. A Three-Dimensional Numerical Model For Simulation Of Sediment movements In Water Intakes with Multiblock Option" version 1 & 2.
10. Shen, H. W., Schneider, V. R., and Karaki, S. S. 1969. "Further Results to Time-Dependent Local Scour at Bridge Elements", J. Hydraul. Div., 95(6), pp.1919–1940



## The Effect of Submerged Plates on the Square Bridge Pier scours Using Software SSIIM

Kouros Nekoufar<sup>1\*</sup>, Armin Haljian<sup>2</sup>

1- University faculty member, Islamic Azad University, Chalous Branch, Iran.

nekoufar@iauc.ac.ir

2- MSc Student, Islamic Azad University, Chalous Branch, Iran

### Abstract

Bridges are among the most important and most prolific river structures ever used. The three commonly used methods to deal with the scouring phenomenon around the bridges are to place the piers in a lower level than the depth of the erosive pit, to reduce the power of the vortex produced around the base, to use the shrub protection cover, or to use a collar, gaps, or submerged plates around the base bridges. Submerged plates are structures that are installed at the bottom of the river with an angle to the main stream and to prevent river erosion, rivets and base structures of the water and waterway reformation and morphology of the bed, which produces a secondary vortex and Changing the flow pattern in the river bed and, consequently, changing sediment transport and erosion. In this research, the effect of square cross-sectional diameter and the effect of submerged panels on scouring are investigated using SSI-IM software.

**Keywords:** *Scour, Bridge Pier, Submerged Vanes, Software SSIIM*