

شبیه‌سازی عددی الگوی جریان پیرامون پایه پل منفرد با حضور صفحات مستغرق بالادستی در قوس ۱۸۰ درجه تند با بستر آبرفتی تحت تأثیر فاصله صفحات مستغرق از هم و پایه پل

چنور عبدی چوپلو^{۱*}، محمد واقفی^۲، یاسر صفرپور^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

۳. دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

*a.chonoor@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۵/۰۳

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۲۶

چکیده

در این پژوهش از مدل عددی SSIIM برای بررسی الگوی جریان، کانتورهای سرعت، قدرت جریان و پارامترهای آشفتگی در اطراف پایه پل عمودی با حضور صفحات مستغرق با طول هم‌پوشانی مختلف، و قرارگیری صفحات مستغرق از پایه‌ی پل و از یکدیگر در شش فاصله مختلف، در قوس ۱۸۰ درجه تند استفاده شد و مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی انجام شد. هماهنگی داده‌های عددی و آزمایشگاهی بیانگر عملکرد مناسب مدل عددی SSIIM در مدل‌سازی الگوی جریان در مسئله مورد بررسی می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که محدوده قدرت جریان ثانویه، در تمامی مدل‌های با حضور صفحات مستغرق از ۱۰/۵ تا ۱۲ در صد اندازه‌گیری شد. در حالتی که صفحات مستغرق هم‌پوشانی با هم نداشتند و استقرار صفحات مستغرق در فاصله‌ی ۲/۵ برابر قطر پایه از پایه و فاصله معادل ۲ برابر قطر پایه از همدیگر و در بالادست پایه بوده کمترین مقدار و در حالت هم‌پوشانی ۱۰۰ در صد صفحات، در آرایش استقرار صفحات مستغرق در فاصله ۵ برابر قطر پایه از آن و فاصله ۲ برابر قطر پایه از همدیگر و در بالادست پایه بیشترین مقدار خود را داشته است. همچنین تغییرات تنش برشی بعد از ایجاد آبشستگی موضعی محاسبه شد. تنش برشی ماکزیمم از ابتدای قوس تا نزدیکی خروجی قوس به سمت جداره داخلی قوس متمایل بود و در محدوده خروجی قوس تنش برشی ماکزیمم به سمت میانه قوس و سپس نیمه دوم قوس منتقل شد.

واژگان کلیدی: پایه پل، صفحات مستغرق، الگوی جریان، قوس ۱۸۰ درجه، مدل عددی SSIIM

پل‌ها یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های روخانه‌ای

۱- مقدمه

جریان پرداخته‌اند. ویلسون و همکاران^(۲۰۰۳) با استفاده از مدل عددی SSIIM به بررسی الگوی جریان و چگونگی پخش ماده رنگی در کانال آزمایشگاهی مناندی پرداختند [9]. احترام و مهدوی (۲۰۱۵) جریان و رسوب در محل تنگ-شدگی پل را با استفاده از نرم‌افزار SSIIM2، به صورت سه-بعدی، مدل‌سازی نمودند [10]. نتایج پژوهش اسدالهی و همکاران (۲۰۱۹)، نشان داد که از مدل SSIIM می‌توان با دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی الگوی آبشستگی و جریان در قوس با و بدون پایه‌های پل استفاده کرد [11]. راسائی و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی آبشستگی با استفاده از مدل عددی SSIIM پرداختند [12]. اسدالهی و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی عددی الگوی جریان و الگوی آبشستگی پیرامون پایه‌های پل با استفاده از نرم‌افزار عددی SSIIM پرداختند [13] با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط پژوهشگران در سال‌های گذشته بررسی عددی الگوی جریان پیرامون پایه پل مستقر در قوس ۱۸۰ درجه تند با حضور صفحات مستغرق بالادستی بررسی نشده است. پس در این پژوهش این موضوع مورد مطالعه قرار گرفته شده است. بنابراین مطالعه حاضر دو هدف اساسی زیر را در دنبال می‌کند:

- ۱) درستی آزمایی، نتایج مدل شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی در دسترس در حالت استقرار صفحات مستغرق در بالادست پایه پل
- ۲) بررسی تغییرات طول‌پوشانی صفحات مستغرق، فاصله صفحات مستغرق از پایه و فاصله صفحات مستغرق از همدیگر بر الگوی جریان پیرامون پایه پل منفرد مستقر در یک قوس تند ۱۸۰ درجه با مدل عددی SSIIM 1.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل عددی و معادله‌های حاکم بر جریان:

مدل عددی SSIIM، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) سه‌بعدی بر مبنای روش حجم محدود و معادلات ناویراستوکس در حالت جریان آشفته به کمک مدل K-ε

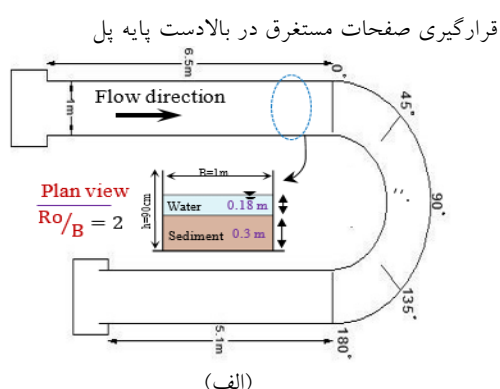
هستند که از دیرباز مورد استفاده بشر قرار گرفته‌اند. الگوی غالب برای شکل رودخانه در پلان پیچانرودی است. با وارد شدن جریان در قوس رودخانه توزیع سرعت آن عوض می‌شود، به گونه‌ای که در قوس رودخانه‌ها توزیع سرعت به صورت لگاریتمی نیست. الگوی جریان اطراف یک پایه استوانه‌ای مستقر در قوس بسیار پیچیده است و این پیچیدگی با پیشرفت حفره آبشستگی بیشتر می‌شود. با احداث پایه‌های پل در مسیر جریان رودخانه‌ها، گرداب‌هایی ایجاد شده و این گرداب‌ها باعث خواهد شد که مواد بستر در اطراف پایه‌های پل، شسته شده و به پایین‌دست حمل شوند. روش‌های متعددی برای کاهش آبشستگی حول پایه پل وجود دارد که یکی از این روش‌ها استفاده از صفحات مستغرق در بالادست آن است. وقتی که یک صفحه مستغرق در بستر رودخانه با زاویه کوچکی نسبت به امتداد جریان نصب شوند، به علت اختلاف فشار موجود در دو طرف صفحه، گرداب و گردش القایی در اطراف صفحه به وجود می‌آید. تغییرات فشار عمودی در دو طرف سطح صفحه منجر به جریان چرخشی می‌شود. ترکیب چرخش ایجاد شده با سرعت در جهت جریان، سبب ایجاد یک حرکت مارپیچی در پایین‌دست صفحات می‌شود. این حرکت مارپیچی یک تنش برشی عرضی به بستر رودخانه القا می‌کند. تکنیک استفاده از صفحات مستغرق در اوایل دهه هشتاد میلادی توسط ادگارد و کندی^(۱۹۸۳) به منظور حفاظت سواحل خارجی پیچ رودخانه استفاده شد [1]. جانسون و همکاران^(۲۰۰۱)، واقفی و همکاران^(۲۰۱۸)، زارعی و همکاران^(۲۰۱۹) و صفری‌پور و همکاران^(۲۰۲۰) اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی اطراف پایه پل را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد که به طور کلی این صفحات منجر به کاهش آبشستگی پیرامون پایه پل می‌شوند [2-5]. در زمینه الگوی جریان در قوس، پژوهشگرانی مانند گیری و همکاران^(۲۰۰۴)، ناجی ابهری و همکاران^(۲۰۱۰) و کاسوی و همکاران^(۲۰۱۷) مطالعات متعددی انجام دادند [6-8]. پژوهشگران بسیاری با مدل عددی SSIIM به بررسی ساختار

تغییر نیستند [14].

۲-۲- مدل آزمایشگاهی

میدان مورد نظر برای شبیه‌سازی عددی، نتایج مربوط به مطالعات آزمایشگاهی عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۱۸) [۱۵]، که شامل یک کانال قوسی شکل با زاویه ۱۸۰ درجه تند با شعاع انحنای نسبی ۲ متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه خلیج فارس است. عرض کانال ۱ متر است که در بالادست و پایین‌دست کانال یک قسمت مستقیم به طول ۶/۵ و ۵/۱ متر قرار داشته و ارتفاع کانال ۹۰ سانتی‌متر و جنس دیواره‌ها شیشه نشکن است. در آزمایش‌ها از یک لایه ماسه به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و با قطر متوسط ۱/۵ میلی‌متر و ضریب انحراف ۱/۳ پوشیده شده است. دبی جریان ثابت و برابر با ۷۰ لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب در قسمت ورودی کانال ۰/۱۸ متر و عدد فرود نیز ۰/۳ است. برای مدل پایه، از یک لوله استوانه‌ای شکل به قطر ۵ سانتی‌متر استفاده کردند. صفحات مستغرق مورد استفاده در تحقیق آنان، صفحاتی با ضخامت معادل ۲۰ درصد قطر پایه و به طول ۱/۵ برابر قطر پایه و با درصد استغراق ۷۵٪ با زاویه قرارگیری با خط افقی ۲۵ درجه بود. به منظور اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت در آزمایشگاه نیز از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی Vectrino استفاده شده است. در شکل (۱) نمایی از پلان کانال به همراه بزرگنمایی از قرارگیری صفحات مستغرق در بالادست پایه پل آورده شده است. در این شکل قطر پایه با نماد D ، طول هم‌پوشانی صفحات با نماد L_{cv} و فاصله صفحات از پایه و از یکدیگر به ترتیب با نمادهای L_{vp} و L_{vv} نشان داده شده است.

شکل ۱. نمایی از الف) پلان کانال به همراه ب) بزرگنمایی از



استاندارد برای رسیدن به سرعت و تنش برشی آشفتگی در یک هندسه سه‌بعدی حل می‌کند. معادلات ناویر-استوکس برای جریان‌های غیرقابل تراکم با چگالی ثابت و جریان دائمی می‌تواند به صورت زیر بیان شود [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

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

که در آن x بیانگر فاصله و U بیانگر سرعت در سه جهت هستند، ρ چگالی سیال، P نشانگر فشار کل و δ_{ij} دلتای کرونکر است که در حالت $i=j$ برابر واحد و در غیر این صورت صفر است. در رابطه فوق اولین جمله سمت چپ معرف تغییرات جریان نسبت به زمان و دومین جمله معرف انتقال جریان در مسافت معینی است. جمله اول در سمت راست بیانگر تغییرات فشار در سیستم و جمله دوم نیز تنش رینولدز را بیان می‌کند.

۲-۱-۱- مدل آشفتگی K-ε

مدل K-ε، لزجت گردابه‌ای را به صورت زیر محاسبه می‌نماید [14]:

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

در رابطه فوق K انرژی جنبشی آشفتگی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

معادله دیفرانسیلی مربوط به k به صورت زیر بیان

می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (5)$$

در رابطه فوق P_k به فرم زیر تعیین می‌شود:

$$P_k = v_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

ε بیانگر میزان اتلاف k بوده و به صورت زیر مشخص

می‌شود [14]:

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

در معادلات بالا، C ها ثوابتی هستند که توسط کاربر قابل

۳- اعتبارسنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

برای اعتبارسنجی این مدل از نتایج آزمایشگاهی که توسط عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۱۸) [۱۵] انجام شده است، استفاده شد. شکل‌های (۳ و ۴) نمونه‌هایی از مقایسه توزیع سرعت‌های جریان را در مقاطع عرضی گذرانده از محل استقرار صفحات مستغرق و پایه پل را برای هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این اشکال مشاهده می‌شود، سرعت‌های جریان در این دو بسیار به هم نزدیک بوده و نتایج عددی و آزمایشگاهی از هماهنگی مناسبی برخوردار هستند.

شکل ۳. مقایسه عددی و آزمایشگاهی توزیع سرعت‌های الف)

مماسی ب) شعاعی ج) عمقی در محل استقرار صفحات مستغرق

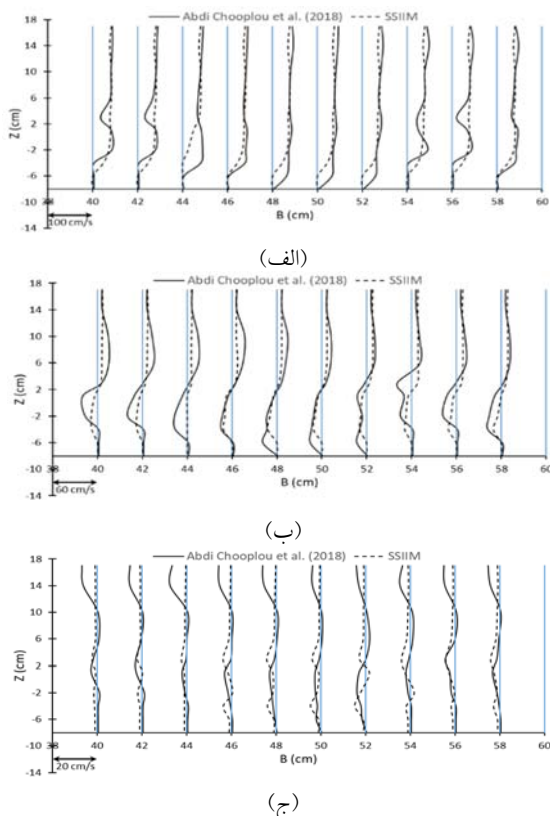


Fig. 3. Numerical and laboratory comparison of velocities distribution a) tangential b) radial c) vertical at the position of the submerged vanes

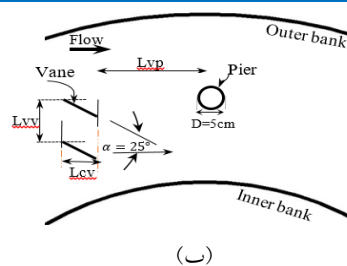


Fig. 1. View of a) Plan of the channel with b) magnification of the submerged vanes at the bridge pier upstream

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SSIIM، کانالی مشابه با کانال آزمایشگاه مدل شده و سرعت‌های سه‌بعدی جریان مقایسه شده‌اند. به منظور بررسی بهترین شبکه برای اجرای مدل مش‌بندی‌های گوناگونی با اندازه‌های مختلف ساخته و برخی از مدل‌ها با آن اجرا شد. نتیجه نشان داد اگرچه مش یکنواخت با اندازه‌های ریز دقت بالایی داشته و مقدار سرعت‌های سه‌بعدی در مدل عددی را به مقدار آزمایشگاهی خیلی نزدیک می‌کند اما زمان ران‌گیری را خیلی زیاد می‌کند. در شبکه‌بندی مورد استفاده دارای مش‌بندی غیریکنواخت است به گونه‌ای که در محدوده نزدیک به پایه پل و صفحات مستغرق سلول‌ها ریزتر می‌شود. تعداد مقاطع استفاده شده در پلان در جهت طولی ۴۵ و در جهت عرضی ۵۵ عدد است. در شکل (۲) نمایی از مش‌بندی در کل قوس و پلان اطراف پایه و صفحات مستغرق ارائه شده است.

برای مرزهای مدل‌سازی در نرم‌افزار عددی SSIIM کلیه مرزها مانند پایه پل یا صفحات مستغرق به صورت صلب نمودن مرزها با معرفی پارامترهای مربوط در منوی کنترل برنامه تعریف می‌شوند.

شکل ۲. نمایی از شبکه‌بندی نقاط در برداشت الگوی جریان در کل قوس به همراه پلان در اطراف پایه و صفحات مستغرق

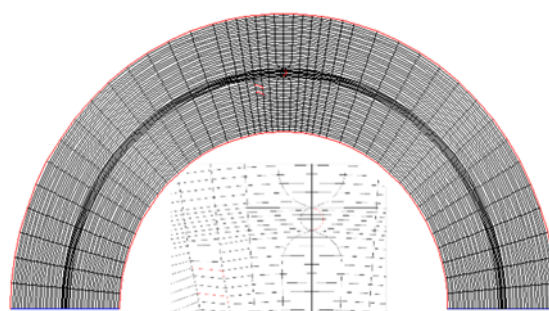


Fig. 2. A view of the points mesh in flow pattern collection throughout the bend with in the plan around the pier and submerged vanes

با توجه به شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی SSIIM به خوبی الگوی جریان در کانال‌های قوسی شکل، همراه با سازه‌های هیدرولیکی مانند پایه پل و صفحات مستغرق را شبیه‌سازی می‌کند.

همان‌گونه که ذکر شد، یکی از روش‌های کنترل آبشستگی پیرامون پل، استفاده از صفحات مستغرق است. در مرحله دوم ۲۷ مدل با استقرار تعداد ۲ صفحه مستغرق در بالادست پایه پل و در فاصله معادل ۴۰ در صدی عرض کانال از ساحل داخلی با هدف بررسی تغییرات طول پو شانی صفحات مستغرق (۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد هم‌پوشانی)، فاصله صفحات مستغرق از پایه (۲/۵، ۵ و ۷/۵ برابر قطر پایه) و فاصله صفحات مستغرق از همدیگر (۱، ۲/۵، ۲ برابر قطر پایه)، انجام شد. به منظور مقایسه نتایج تأثیر استقرار صفحات مستغرق بالادستی پایه‌ی پل با مدل پایه پل بدون صفحات مستغرق بالادستی، مدل پایه پل تنها (P) شبیه‌سازی شد. در تمامی مدل‌ها پایه پل در رأس قوس مستقر شد. برای بیان حالت مدل‌ها از نماد $PV(Lcv)-(Lvp/D)-(Lv/D)$ استفاده می‌شود که در آن P و V نشان دهنده حضور پایه و صفحات مستغرق در مدل‌ها است، عدد اول در صد هم‌پوشانی صفحات مستغرق و عدد دوم و سوم به ترتیب فاصله بی‌بعد شده صفحات از پایه پل و از همدیگر هستند.

بنابراین با استفاده از نرم افزار SSIIM میدان جریان حول پایه استوانه شکل با حضور صفحات مستغرق بالادستی را شبیه‌سازی و آثار آبشستگی موضعی بر الگوی جریان را بررسی نموده و برای به دست آوردن ترم‌های آشفتگی در معادلات ناویر استوکس در این پژوهش از میان مدل‌های آشفتگی مختلفی که در مدل عددی SSIIM کدگذاری شده‌اند از مدل آشفتگی k-ε استفاده شده است.

۴- نتایج و بحث

با توجه به اینکه در مسیرهای قوسی شکل خطوط جریان به صورت منحنی‌های موازی نیستند، به بررسی خطوط جریان آشفته در پلان پرداخته شده است. نمونه‌ای از خطوط جریان و کانتورهای سرعت‌های مماسی و شعاعی در مقاطع پلان در نزدیکی بستر و سطح جریان برای بررسی چگونگی توزیع سرعت

شکل ۴. مقایسه عددی و آزمایشگاهی توزیع سرعت‌های (الف)

مماسی (ب) شعاعی (ج) عمقی در محل استقرار پایه پل

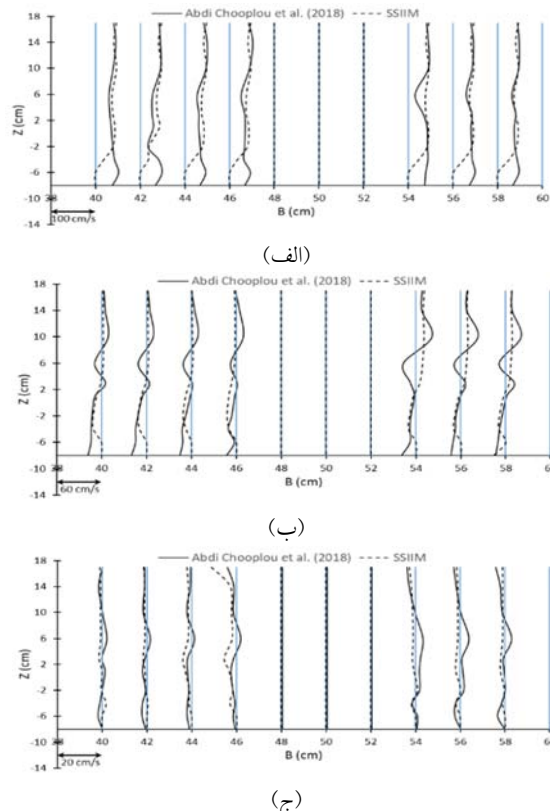


Fig. 4. Numerical and laboratory comparison of velocities distribution a) tangential b) radial c) vertical at the position of the bridge pier

در شکل (۵) نمودار مربوط به مجذور میانگین مربعات خطا مطابق رابطه (۸) برای بررسی خطای مدل عددی SSIIM نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی استفاده شد.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{Lab} - V_{SSIIM})^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

در رابطه بالا V_{SSIIM} مقدار محاسبه شده سرعت در مدل عددی SSIIM است و V_{Lab} مقدار اندازه‌گیری شده سرعت در آزمایشگاه و N تعداد کل داده‌های موجود، معادل تعداد نقاط موجود در مش مورد نظر است.

شکل ۵. خطای مدل عددی SSIIM نسبت به مدل آزمایشگاهی

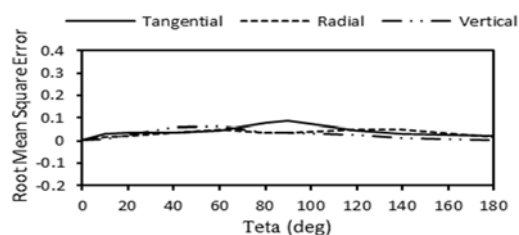


Fig. 5. Error of in SSIIM numerical model compared to the experimental model

شکل ۷. نمونه‌ای از کانتور سرعت شعاعی همراه با خطوط

جریان در تراز نزدیک الف) کف بستر ب) سطح جریان

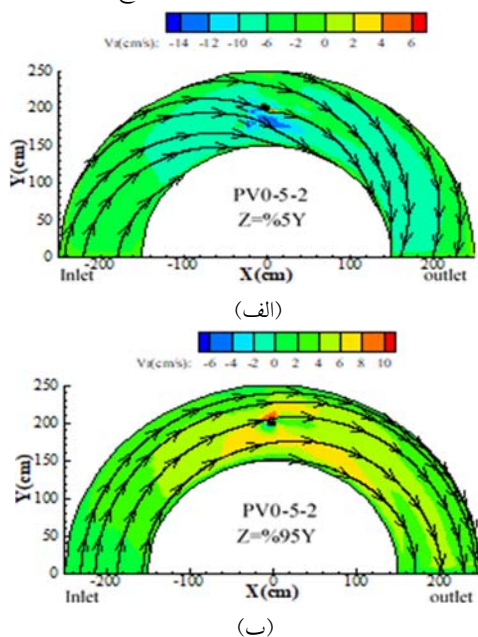


Fig. 7. Sample of a Radial velocity contour with flow lines in close level of a) bed b) flow surface

همچنین با مقدار مثبت این پارامتر در سطح جریان، یک سلول چرخشی در کل مقطع شعاعی به وجود می‌آید که در نزدیکی کف کانال به طرف ساحل داخلی و در نزدیکی سطح جریان به طرف ساحل خارجی است. همان‌گونه که در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن از بستر به سطح آب، مقدار بیشینه سرعت شعاعی مثبت افزایش پیدا می‌کند که بدین معناست که قدرت حرکت به سمت ساحل خارجی در سطح آب از تراز نزدیک به بستر بیشتر می‌باشد. مشخص است که بیشینه سرعت‌های شعاعی در تمامی حالات و ترازها در اطراف پایه ایجاد شده‌اند.

در شکل (۸) نمونه‌ای از الگوی میدان جریان در مقطع

عرضی گذرانده از صفحات مستغرق نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که جریان چرخشی ناشی از تغییرات فشار عمودی در دو طرف سطح صفحه وجود دارد. فشار جریان در وجه پرفشار از پایین صفحه به سمت بالای آن کم‌تر می‌شود. اما در وجه کم‌فشار صفحه، فشار از پایین صفحه به سمت بالای آن افزایش می‌یابد. در واقع، سیال در سمت پر فشار صفحه دارای مؤلفه سرعت رو به بالا و در سمت کم‌فشار دارای مؤلفه سرعت رو به پایین است؛ ترکیب چرخش ایجاد شده با سرعت در جهت جریان، سبب ایجاد یک حرکت

در عمق، در شکل‌های (۶ و ۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود بیشینه سرعت مماسی در نزدیکی کف، تا قبل از رسیدن به پایه، در مجاورت ساحل داخلی رخ می‌دهد که این رویداد به علت افزایش گرادیان فشار در نزدیکی ساحل داخلی است. با نزدیک شدن به پایه، ناحیه حداکثر سرعت در حال فاصله گرفتن از ساحل داخلی است و به اطراف پایه منتقل می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع از بستر، بیشینه سرعت‌های مماسی مثبت نیز افزایش می‌یابند که به دلیل کاهش اثر زبری بستر است. در ابتدای قوس، بیشینه سرعت مماسی در مجاورت ساحل داخلی و در سطح آب رخ می‌دهد که این رویداد به علت افزایش گرادیان فشار در نزدیکی ساحل داخلی است.

جریان ثانویه در نزدیکی بستر به سمت ساحل داخلی و در سطح آب به سمت ساحل خارجی است که انتظار می‌رود مولفه‌های سرعت شعاعی نیز به همان طریق در نزدیکی بستر و سطح آب در دو جهت نمایش داده شوند. مقدار منفی سرعت شعاعی در بستر کانال باعث حرکت رسوبات خروجی از چاله آبستنگی به طرف ساحل داخلی می‌شود (شکل ۷-الف).

شکل ۶. نمونه‌ای از کانتور سرعت مماسی همراه با خطوط

جریان در تراز نزدیک الف) کف بستر ب) سطح جریان

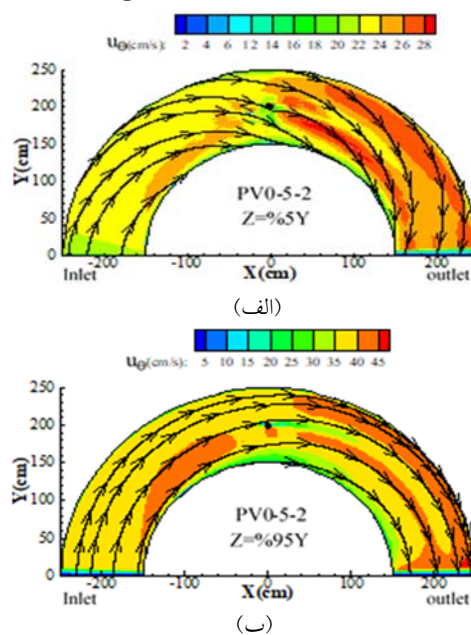


Fig. 6. Sample of a tangential velocity contour with flow lines in close level of a) bed b) flow surface

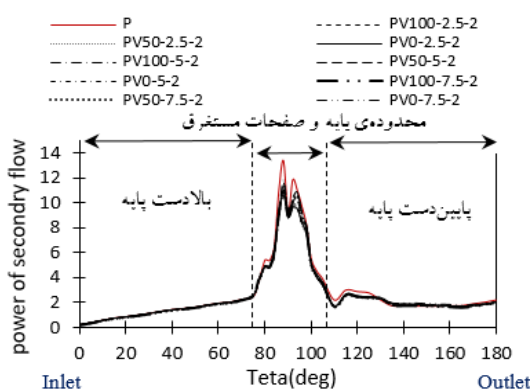
جدول ۱. درصد کاهش ماکزیمم قدرت جریان ثانویه نسبت به مدل

P	P			
	Lcv (%)	Lvp/D =2.5	Lvp/D =5	Lvp/D =7.5
0	1	16.5	13	17
	1.5	18	18	19
	2	21	13	17
50	1	18	13	16
	1.5	17	17	20.5
	2	19.5	14	17
100	1	17	13	15
	1.5	15	17	16
	2	18	12	18

Table. 2. Reduction percentage of maximum secondary flow power compared to model P

شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که مقادیر درصد کاهش ماکزیمم قدرت جریان ثانویه همگی مثبت هستند که بیانگر تأثیر صفحات مستغرق در بالادست پایه پل، بر کاهش قدرت جریان ثانویه است. کمترین و بیشترین درصد کاهش قدرت جریان ثانویه به ترتیب در مدل PV100-5-2 و PV0-2.5-2 است

شکل ۹. نمونه‌ای از تغییرات قدرت جریان ثانویه

**Fig. 9.** Sample of secondary flow power changes

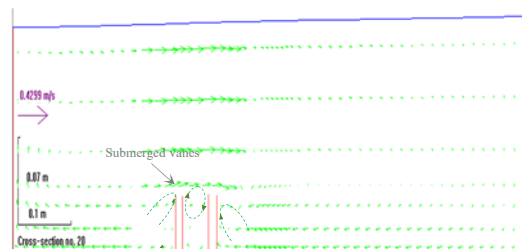
تنش برشی کلی بستر بر اساس مجموع تنش برشی متوسط و تنش‌های برشی رینولدزی بر اساس معادلات شماره (۱۰) تا (۱۲) محاسبه می‌شود که τ_b تنش برشی بستر، τ_r و τ_θ به ترتیب برابر با تنش برشی بستر در جهت طولی و شعاعی هستند. u', v', w' نوسانات مولفه‌های سرعت در سه جهت، $\rho \overline{u'w'}, \rho \overline{v'w'}, \rho \overline{u'v'}$ تنش‌های رینولدزی در نزدیک بستر و ρ دانسیته سیال است [17].

$$\tau_b = \sqrt{\tau_\theta^2 + \tau_r^2} \quad (10)$$

$$\tau_\theta = -\rho (\overline{w'u'} + \overline{v'u'}) \quad (11)$$

مارپیچی در پایین‌دست صفحات شده و این حرکت مارپیچی یک تنش برشی عرضی به بستر رودخانه القا می‌کند که منتج به انتقال رسوب در جهت عرضی می‌شود.

شکل ۸. نمایش الگوی جریان پیرامون صفحات مستغرق

**Fig. 8.** shows the flow pattern around submerged vanes

برای محاسبه قدرت جریان ثانویه از روش شکری استفاده شده است. این مقدار بر اساس معادله (۹) تعریف می‌شود [16].

$$Sx = \frac{v^2 + w^2}{u^2 + v^2 + w^2} \times 100 \quad (9)$$

در رابطه بالا Sx قدرت جریان، u و v و w مؤلفه‌های سرعت در امتداد x ، y و z است.

نمونه‌ای از روند تغییرات قدرت جریان ثانویه در طول قوس در شکل (۹) ارائه شده است.

بر اساس شکل (۹) مشاهده شد قدرت جریان ثانویه از ابتدای قوس تا مقطع ۷۵ درجه سیر صعودی داشته اما با رسیدن به محل استقرار صفحات به طور ناگهانی کاهش یافته است. با برخورد جریان به صفحات یک محدوده جریان بازگشتی با سرعت کم ایجاد می‌شود و باعث کاهش قدرت جریان ثانویه می‌شود. پس از آن در رأس قوس، محل استقرار پایه، به بیشترین مقدار خود رسیده است و بلافاصله پس از پایه پل قدرت جریان ثانویه کاهش یافته زیرا به دلیل تشکیل گردابه‌های میدان پایه، جریان‌های رو به پایین تضعیف شده، پس قدرت جریان ثانویه کاهش می‌یابد. با نزدیک شدن به انتهای قوس به تدریج دوباره بر شدت جریان ثانویه افزوده شده است. دلیل آنرا می‌توان چگونگی تغییرات توپوگرافی بستر و تأثیر مسیر مستقیم پایین‌دست دانست. همچنین مشاهده می‌شود با تغییر موقعیت صفحات مستغرق محل بیشینه قدرت جریان ثانویه تغییری نکرده ولی مقدار آن بستگی به موقعیت صفحات مستغرق دارد. بنابراین در جدول (۱) درصد کاهش ماکزیمم قدرت جریان ثانویه نسبت به مدل P، در تمامی مدل‌ها با حضور صفحات مستغرق بیان

شکل ۱۱ نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر

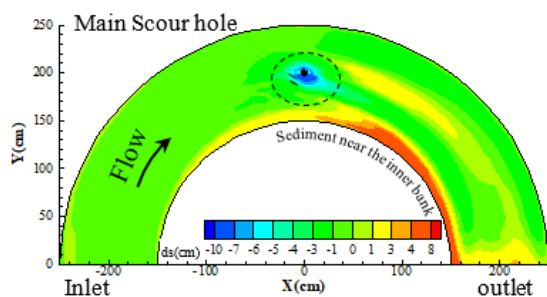


Fig. 11. Sample of bed topography

همان‌گونه که بیان شد بدیهی است که تغییرات تنش برشی به چگونگی حرکت مصالح بستر و وقوع آبستگي و رسوب-گذاري در آن بستگی دارد. به عبارت دیگر بیشینه تنش برشی باید در مناطقی تشکیل شده باشند که توده‌های رسوبي تشکیل شود و به تبع آن مساحت سطح حداقل مقدار بوده و محل کمینه تنش برشی نیز در مناطق وقوع آبستگي صورت پذیرفته باشد. مقایسه شکل (۱۰ با ۱۱) نشان می‌دهد که توزیع تنش برشی بعد از بستر تعادل یافته با سازوکار آبستگي و رسوبگذاری در قوس همخوانی داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح ذیل است: از مدل عددی SSIM می‌توان با دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی الگوی جریان در کال‌های قوسی شکل همراه با سازه‌های هیدرولیکی مانند پایه پل و صفحات مستغرق استفاده کرد. با نزدیک شدن به محدوده استقرار صفحات و پایه به مقدار سرعت مماسی افزوده شده است، به گونه‌ای که سرعت مماسی بیشینه در مقطع گذرنده از پایه رخ داده است، و با افزایش ارتفاع از بستر، بیشینه سرعت‌های مماسی مثبت افزایش می‌یابند که به دلیل کاهش اثر زبری بستر است. در تراز نزدیک بستر، تمامی جریان شعاعی منفی بوده است که این بدان معنا است که در قوس در نزدیکی بستر جریان به سمت ساحل داخلی است. بیشترین اختلاف بین مرز بالا و پایین سرعت‌های شعاعی بر عکس سرعت مماسی، در تراز نزدیک بستر مشاهده می‌شود.

بیشترین تغییرات سرعت شعاعی در حالت بدون طول هم-پوشانی در آرایش صفحات مستغرق در فاصله برابر ۵ برابر قطر

$$\tau_r = -\rho(\overline{u'v'} + \overline{w'v'}) \quad (12)$$

نمونه‌ای از تغییرات تنش برشی بستر در شکل (۱۰) ارائه شده است. تغییرات تنش برشی بعد از ایجاد آبستگي موضعی است، به همین دلیل در مقاطع اطراف پایه و صفحات مستغرق، به دلیل وجود چاله آبستگي، سطح مقطع بزرگتر و سرعت کمتر شده و در نتیجه تنش برشی کم می‌شود. همچنین بررسی این تغییرات نشان می‌دهد که در بخش مرکزی ساحل داخلی، تنش برشی بستر مقداری بیشتر داشته است و با وجود استقرار تنش برشی ماکزیمم در نزدیکی جداره داخلی قوس تا نزدیکی خروجی قوس در محدوده خروجی قوس تنش برشی ماکزیمم به نیمه دوم قوس منتقل می‌شود. هر چقدر میزان رسوبگذاری بستر بیشتر باشد مقدار تنش برشی بستر می‌تواند بیشتر شود. در تمام حالات، بیشینه تنش برشی در نزدیکی بالادست و در پایین‌دست پایه، بیشترین مقدار را دارد و تغییرات در تنش برشی بستر بیشتر شده است. بیشینه تنش برشی ساحل داخلی بیشتر نمایان می‌شود و کمینه تنش برشی نیز بیشتر در میانه عرض کانال و اطراف سازه‌ها مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰. نمونه‌ای از تغییرات تنش برشی بستر

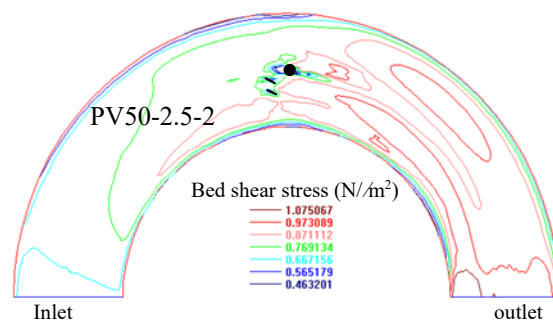


Fig. 10. Sample of bed shear stress changes

برای تایید مطالب بالا نمونه‌ای از توپوگرافی بستر، حاصل از آزمایش آبستگي پس از تعادل می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. مشاهده می‌شود در ساحل داخلی رسوبگذاری و پیرامون سازه‌ها آبستگي رخ داده است، و انتقال وقوع رسوبگذاری از جداره داخلی به سمت محور کانال و جداره خارجی در حوالی خروجی قوس در این شکل مشاهده می‌شود.

- پایه از پایه مشاهده می‌شود.
<https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1837144>
- [6] Giri S. Shimizu Y. & Surajata B. 2004. Laboratory measurement and numerical simulation of flow and turbulence in a meandering-like flume with spurs. *Flow Measurement and Instrumentation*, **15**(5-6), pp.301-309.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2004.05.002>
- [7] Naji Abhari M. Ghodsian, M. Vaghefi, M. & Panahpur, N. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90-degree bend. *Flow Measurement and Instrumentation*, **21**(3), pp.292-298.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.03.002>
- [8] Kasvi E. Laamanen L. Lotsari, E. & Alho P. 2017. Flow patterns and morphological changes in a sandy meander bend during a Flood-Spatially and temporally intensive ADCP measurement approach. *Water*, **9**(2), pp.106. <https://doi.org/10.3390/w9020106>
- [9] Wilson C.A.M.E., Boxall J. B. Guymer I. & Olsen N. R. B. 2003. Validation of a three dimensional numerical code in the simulation of pseudo-natural meandering flows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **129**(10), 758-767. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:10\(758\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:10(758))
- [10] Ehteram M Mahdavi Meymand A. 2015. Numerical modeling of scour depth at side piers of the bridge. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **280**, pp.68-79. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.11.039>
- [11] Asadollahi M. Vaghefi, M & Tabibnejad Motlagh M.J 2019. Experimental and Numerical Comparison of Flow and scour Patterns around a Single and Triple Bridge Piers Located at a sharp 180 degrees Bend. *Scientia Iranica*. doi:10.24200/SCI.2019.5637.1391
- [12] Rasaei M. Nazari S. & Eslamian, S. 2020. Experimental and numerical investigation the effect of pier position on local scouring around bridge pier at a 90° convergent bend. *Journal of Hydraulic Structures*, **6**(1), pp.55-76. doi: 10.22055/JHS.2020.32753.1134
- [13] Asadollahi M. Vaghefi, M & Akbari M. 2020. Effect of the position of perpendicular pier groups in a sharp bend on flow and scour patterns: numerical simulation. *Journal of the*
- بیشترین مقدار قدرت جریان ثانویه در راس قوس، محل قرارگیری پایه پل، است.
 آرایش PV100-5-2 و PV0-2.5-2 به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار قدرت جریان ثانویه را داشته‌اند این مقادیر به ترتیب منجر به کاهش ۲۱ و ۱۲ درصدی قدرت جریان ثانویه نسبت به مدل P شده‌اند.
 بیشینه تنش برشی در ساحل داخلی بیشتر نمایان می‌شود و کمینه تنش برشی نیز بیشتر در میانه عرض کانال و اطراف سازه‌ها (پایه پل و صفحات مستغرق) مشاهده می‌شود.

۶- منابع

- [1] Odgaard A.J. & Kennedy J.F. 1983. River-Bend Bank Protection by Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(8), pp.1161-1173.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:8\(1161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:8(1161))
- [2] Johnson P.A. Hey R.D. Tessier M. & Rosgen DL. 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **127**(9), pp.772-778. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:9\(772\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:9(772))
- [3] Vaghefi M. Safaripour N. Zarei E. Mahmoudi A. & Hashemi S.Sh. 2018. Experimental investigation on the effect of overlapping upstream submerged vanes on bend topography with a bridge pier. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, **15**(2), pp.245-255. "(In Persian)"
- [4] Zarei E. Vaghefi M. & Hashemi. S.Sh. 2019. Bed topography variations in bend by simultaneous installation of submerged vanes and single bridge pier. *Arabian Journal of Geosciences*, **12**(6), pp.1-10. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4342-z>
- [5] Safaripour N. Vaghefi M. & Mahmoudi. A. 2020. Experimental Study of the Effect of Submergence Ratio of Double Submerged Vanes on Topography Alterations and Temporal Evaluation of the Maximum Scour in a 180-Degree Bend with a Bridge Pier Group. *International Journal of River Basin Management*, pp.1-34.

- Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **42**(8), pp.1-15.
<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02503-2>
- [14] Olsen N.R.B. 2014. A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multi-block option, *Department of Hydraulic and environmental Engineering*, Norwegian University of Science and Technology, User's manual, Norway, pp.172-173.
- [15] Abdi Chooplou Ch. Vaghefi M. & Meraji S.H. 2018. Study of Streamlines under the Influence of Displacement of Submerged Vanes in Channel Width, and at the Upstream Area of a Cylindrical Bridge Pier in a 180 Degree Sharp Bend. *Journal of Hydraulic Structures*, **4**(1), pp.55-74. doi: 10.22055/JHS
- [16] Shukry A. 1950. Flow around Bends in an open Flume. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **115**(1), pp.751-779.
<https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006426>
- [17] Barbhuiya A.K. & Dey S. 2003. Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the sidewall of a rectangular channel, *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, **15**(2), pp.87-96.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2003.11.002>

Numerical simulation of the flow pattern around a single bridge pier with upstream of submerged vanes in sharp 180-degree bend with an alluvial bed under the influence of submerged vanes and the bridge pier

Ch. Abdi Chooplou^{1*}, M. Vaghefi² and Y. Safarpour³

1. Ph.D. Candidate, Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor of Hydraulic Structures, Civil Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.
3. M.Sc. Graduate Student of Hydraulic Structures, Civil Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

*a.chonoor@modares.ac.ir

Abstract

In this research, the SSIIM numerical model is investigated to investigate the flow pattern, velocity meters, current strength and turbulence parameters around the pier of the vertical bridge with submerged vanes. The parameters of different overlap length, and the distance of the submerged vanes upstream from the pier of the bridge and from each other in sharp 180-degree bend in the steep-ratio hydraulic radius 2 with a height of 90 cm and a width of 100 cm and a length of straight direction upstream and downstream of the bend respectively 6.5 m and 5 m, were analyzed. SSIIM software was used to investigate the flow field around the around the cylindrical bridge pier and upstream submerged vanes. The K- ϵ turbulence model was also used to solve the Navier-Stokes equations. In order to validate, the results of the simulated model were compared with the available experimental data in the case of submerged vanes located upstream of the bridge pier. The match between the numerical and experimental data indicated the proper performance of the SSIIM numerical model in modeling the flow pattern in the problem under study. The results showed that the range of secondary flow power was measured in all models with the presence of upstream submerged vanes from 10.5 to 12%. Shear stress changes after local scouring were also calculated. The maximum shear stress from the beginning of the bend to near the bend exit was inclined towards the inner bank of the bend and in the bend output range the maximum shear stress was transferred to the middle of the bend and then the second half of the bend. The results also showed that the tangential velocity was increased as the immersion range of the submerged vanes and the pier approached, so that the maximum tangential velocity occurred in the passage through the pier. As the height from the initial bed increases, the maximum positive tangential velocities increase. The results also showed that at the level near the bed, the radial flow is towards the inner bank. The greatest difference in radial velocities, as opposed to tangential velocities, is observed near the bed. The highest changes in the maximum landing number are related to models with submerged vanes at a distance of 7.5 times the pier diameter, which by changing the distance between the vanes from 1 to 1.5 times the pier diameter from each other, an increase of 12.5% And by changing the distance of the submerged vanes to 2 times the pier diameter from each other, it decreases by 11%.

Keywords: Bridge pier, Submerged vanes, Flow pattern, 180-degree bend, SSIIM numerical model