

شبیه‌سازی الگوی جریان اطراف گروه پایه کج با استفاده از مدل عددی FLOW-3D

ملیحه سادات جعفری¹ - سید علی ایوب زاده^{2*} - مهدی اسمعیلی ورکی³ - محمد رستمی⁴

تاریخ دریافت: 1394/05/17

تاریخ پذیرش: 1395/03/30

چکیده

یکی از مسائل مهم در طراحی پل‌ها، آگاهی از اندرکنش جریان و بستر فرسایش‌پذیر رودخانه با پایه‌های آن و برآورد مناسب عمق آبستنگی پیرامون پایه‌ها می‌باشد. از این رو شناخت الگوی جریان اطراف پایه‌های پل می‌تواند نقش مهمی در پیش‌بینی مقدار عمق آبستنگی داشته باشد. در تحقیق حاضر رفتار هیدرودینامیکی جریان اطراف گروه پایه کج مستقر بر روی پی، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفت. گروه پایه کج مورد بررسی در این تحقیق شامل دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض $2/5$ و $3/5$ سانتی‌متر بود که با زاویه 28 درجه بر روی پی مستطیلی به طول و عرض 16 و 10 سانتی‌متر و در ترازهای کارگذاری مختلف بالاتر از بستر، هم‌تراز بستر و زیر بستر کار گذاشته شده بود، نصب گردید. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی از داده‌های سرعت برداشت شده به روش پردازش تصویر استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد که رقوم کارگذاری پی تأثیر معنی‌داری بر مشخصات هیدرودینامیکی و الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل دارد. با افزایش ارتفاع کارگذاری پی از 1 - به $0/5$ گردابه‌های تشکیل شده در پایین‌دست گروه پایه شدت بیشتری یافت که مطابقت مناسبی با نتایج الگوی آبستنگی آزمایشگاهی در اطراف گروه پایه در هر سه تراز قرارگیری دارد. بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری پی در تراز بستر رخ داده و با کاهش ارتفاع کارگذاری به شرایط پایین‌تر از بستر بیشینه تنش برشی وارد بر بستر 17 درصد کاهش و در شرایط کارگذاری بالاتر از بستر، 53 درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، رقوم کارگذاری پی، روش پردازش تصویر، گروه پایه کج، مدل ریاضی FLOW-3D

مقدمه

ترکیب‌شده و گردابه نعل اسبی را به وجود می‌آورد. گردابه‌های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه پل فعالیت دارند. در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل، گردابه برخاستگی ایجاد می‌شوند. این نوع سیستم گردابی مانند یک گردباد عمل می‌کند و رسوبات را از کف به سمت بالا حرکت می‌دهد. بعبارت دیگر جهت حرکت این سیستم گردابی رو به بالا می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای را در ایجاد حفره آبستنگی اطراف پایه پل دارند (13).

تاکنون محققین زیادی مسئله آبستنگی پایه‌های پل را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیقات جنبه‌های مختلف از پارامترهای اثرگذار بر آبستنگی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات انجام شده در رابطه با تأثیر پارامترهای هندسی پایه نظیر قطر پایه، یکنواختی سطح مقطع و زاویه آن در صفحه قائم و موازی جریان نشان داد که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، حداکثر عمق آبستنگی تا $2/4$ برابر قطر پایه خواهد رسید (2 و 13). در شرایطی که سطح مقطع متفاوت باشد، نظیر شرایطی که پایه بر روی پی قرار گرفته است، بسته به رقوم کارگذاری پی مقدار آبستنگی متفاوت

پل‌ها یکی از مهم‌ترین و پر هزینه‌ترین اجزاء ارتباطی در سامانه‌های حمل و نقل محسوب شده و نیاز به آنها در مواقع خاص مانند سیل و زلزله جهت دسترسی به مناطق آسیب دیده بسیار حائز اهمیت است. یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌های احداث شده در رودخانه‌ها، آبستنگی در اطراف پایه‌های آن می‌باشد. از این رو شناخت مکانیزم جریان اطراف پایه‌های پل و عوامل تأثیرگذار بر مقدار آبستنگی از اهمیت زیادی برخوردار است (3).

در اثر برخورد آب به پایه، کاهش فشار از سطح آزاد جریان به سمت بستر رخ داده و جریان‌های رو به پایین ایجاد می‌شود. این جریان‌های رو به پایین پس از برخورد به بستر با جریان اصلی

1 و 2- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد و دانشیار گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* - نویسنده مسئول: (Email: ayyoub@modares.ac.ir)

3- استادیار گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه گیلان

4- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی

کاهش آبستتگی اطراف پایه می‌باشند. دشت‌پیما و همکاران (3)، الگوی جریان در اطراف گروه پایه‌های پل با مقاطع و هندسه‌های مختلف با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$, RNG و LES در نرم افزار FLOW-3D شبیه‌سازی نمودند. گزینه‌های مورد آزمایش شامل تک پایه، دو پایه کنار هم با مقاطع دایره و مربع و دو پایه متوالی دایره‌ای، بود. مقایسه نتایج نشان داد که در حالات مختلف مدل عددی تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

با توجه به ساختار سه بعدی گروه پایه‌های کج مورد بررسی در این تحقیق و چگونگی تغییرات الگوی جریان اطراف آن برای شرایط مختلف استقرار پایه‌ها بر روی پی مستطیلی شکل، هدف از این تحقیق شبیه‌سازی سه بعدی الگوی جریان اطراف گروه پایه کج با مدل FLOW-3D که مبتنی بر روش حجم محدود است تحت شرایط مختلف رقم کارگذاری پی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، اندازه‌گیری سرعت به روش پردازش تصویر انجام شد. همچنین از داده‌های آزمایش‌های آبستتگی موسی‌پور (1390) که به منظور بررسی تأثیر عوامل هندسی و هیدرولیکی بر مشخصات آبستتگی اطراف گروه پایه‌های کج با فونداسیون انجام شد، برای تحلیل نتایج مدل عددی استفاده گردید. آزمایش‌ها در فلومی به طول 8/15 متر، عرض 0/92 و عمق 1 متر که دارای دیواره‌های از جنس شیشه و کف پلاکسی گلاس بود، انجام شد. گروه پایه کج مورد بررسی از دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض 2/5 و 3/5 سانتی‌متر که با زاویه 28 درجه بر روی پی مستطیلی شکل به طول و عرض 10 و 16 سانتی‌متر نصب شده بودند، تشکیل شد. ابعاد پایه نمونه به مقیاس 1:190 رفته از پل هشتم اهواز می‌باشد. در انتخاب مقیاس سعی شد که ابعاد نهایی پایه به گونه‌ای باشد که ضوابط ارائه شده توسط محققین در رابطه با عدم تأثیرپذیری مقدار آبستتگی از عرض فلوم رعایت گردد. طبق نظر رادکیوی و اتما (1983) اگر نسبت عرض فلوم به عرض پایه از 6/25 بیشتر باشد، دیواره‌های فلوم تأثیری بر مقدار آبستتگی نخواهند داشت. مقدار این نسبت برای پایه و فونداسیون پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با 26 و 10 بود.

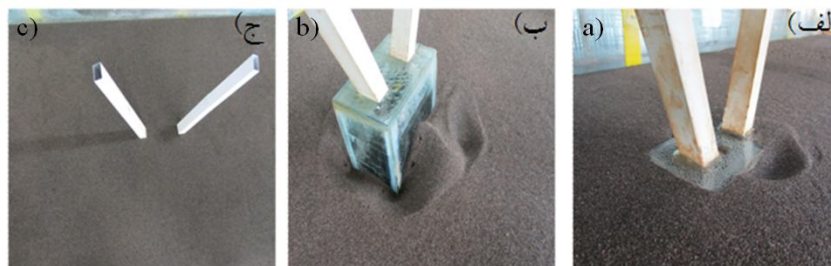
گروه پایه مورد بررسی در این تحقیق در سه تراز ارتفاعی پی (Z) شامل هم‌تراز بستر ($Z/W=0$)، 5 سانتی‌متر بالاتر از بستر ($Z/W=0.5$) و 10 سانتی‌متر پایین‌تر از تراز بستر ($Z/W=-1$) قرار داده شد.

می‌باشد (8 و 18). نتایج تحقیقات نشان داد برای شرایطی که پی در عمقی کمتر از حداکثر آبستتگی برای تک پایه قرار گیرد، حداکثر عمق آبستتگی کاهش می‌یابد. علت این موضوع به کاهش سطح آبستتگی در عمق و در نتیجه عدم توانایی جریان برای گسترش چاله آبستتگی و تعمیق بیشتر وقتی که به پی می‌رسد، نسبت داده شد (1 و 10). همچنین در شرایطی که تراز کارگذاری پی بالاتر از بستر است، عمق آبستتگی نسبت به تک پایه افزایش می‌یابد (11). تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که با کج‌شدگی پایه در صفحه موازی با جریان و به سمت بالادست، بر مقدار حداکثر آبستتگی افزوده خواهد شد (5).

امروزه با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال گوناگونی بوده که از جمله آنها می‌توان به پل‌ها با گروه پایه کج اشاره نمود. فرآیند آبستتگی در حضور گروه پایه تحت تأثیر عامل تقویت‌کننده در پایه جلویی که باعث افزایش عمق آبستتگی در مجاورت آن می‌گردد و عامل حفاظ بودن که منجر به کاهش سرعت مؤثر و عمق آبستتگی برای پایه پایین‌دست می‌شود، می‌باشد. مقایسه‌های انجام شده در خصوص تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبستتگی اطراف گروه پایه کج نشان داد که مقدار آبستتگی در گروه پایه کج از حالت تک پایه بیشتر بوده که این موضوع به دلیل تأثیر توأم دو پایه و نیز کج‌شدگی آن به سمت بالادست می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب پایه‌ها بر روی پی که در زیر بستر و بالاتر از حداکثر عمق آبستتگی به ازای تک پایه قرار دارد، مقدار حداکثر عمق آبستتگی کاهش می‌یابد (5).

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در رابطه با شناخت مکانیزم آبستتگی و پارامترهای اثرگذار بر آن، تلاش‌های زیادی جهت شبیه‌سازی الگوی جریان و آبستتگی اطراف پایه‌های پل صورت رفته است. تیسنگ و همکاران (17)، الگوی جریان اطراف پایه‌های دایره‌ای و مستطیلی با مدل LES شبیه‌سازی نمودند. آنها اظهار داشتند که جریان پایین‌رونده در مقابل پایه شکل می‌گیرد و این پدیده باعث تشکیل گرداب نعل‌اسبی می‌گردد. صلاح‌الدین و همکاران (16)، با استفاده از مدل سه بعدی فلوتنت به بررسی جداسازی جریان آشفته اطراف پایه پل دایره‌ای در حالت آب زلال پرداختند. آنها محاسباتشان را با استفاده از مدل‌های متفاوت انجام دادند. مقایسه نتایج نشان داد مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ مساحتی را که در آن آبستتگی آغاز می‌شود بیشتر از حد واقعی برآورد می‌کنند.

حسن زاده و همکاران (6)، الگوی جریان اطراف پایه‌های با مقاطع دایره، دوکی، بیضی، مستطیلی، مربعی و مستطیلی گردگوشه (مستطیل - دایره) را به صورت سه بعدی با نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی کردند. مقایسه نتایج حاکی از آن است که مقطع دوکی و بیضی شکل بهترین نوع مقطع در کاهش تنش برشی و در نتیجه



شکل 1- نمایشی از گروه پایه کج کارگذاری شده در ترازهای مختلف، الف) $Z/W=0$ ، ب) $Z/W=0.5$ و ج) $Z/W=-1$

Figure 1- View of the inclined bridge group pier setting at different levels a) $Z/W=0$, b) $Z/W=0.5$ and c) $Z/W=-1$

مربوط به نوع سیستم مختصات بوده در مختصات کارترین $R=1$ و $\xi=0$ می‌باشد. معادلات حرکت ناویر- استوکس سیال با مؤلفه‌های سرعت u, v, w در مختصات سه بعدی به شکل زیر نمایش داده می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

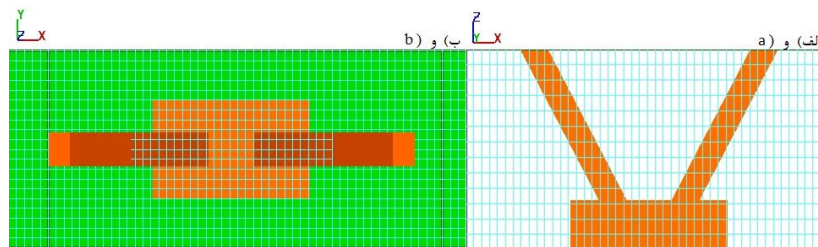
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

در این معادلات (G_x, G_y, G_z) مؤلفه‌های شتاب جرم، (f_x, f_y, f_z) و مؤلفه‌های شتاب لزجت دینامیکی می‌باشند (14).

تعریف محدوده هندسی، ایجاد شبکه و تعیین شرایط مرزی

جهت ساخت هندسه مدل آزمایشگاهی گروه پایه، ابتدا بصورت سه بعدی در نرم‌افزار AutoCAD ترسیم و سپس در مدل عددی فراخوان شد. فلوم شبیه‌سازی شده در مدل عددی به طول 8 متر، عرض 0/9 متر و عمق 0/2 متر می‌باشد. گروه پایه در فاصله 4/5 متری از ورودی کانال قرار داده شد. برای افزایش دقت در شبیه‌سازی هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان در محدوده پایه پل، شبکه‌بندی میدان حل در این محدوده با استفاده از صفحات مش کوچکتر انجام پذیرفت.



شکل 2- نمایشی از مش‌بندی الف) نیم‌رخ و ب) پلان، گروه پایه پل

Figure 2- View of the mesh a) profile and b) plan, bridge group pier

معرفی مدل عددی FLOW-3D

مدل محاسباتی FLOW-3D، یک مدل مناسب برای مسائل پیچیده سیالات بوده و دارای کاربرد وسیعی می‌باشد. این مدل برای جریان‌های سه بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند، کاربرد دارد. در این مدل از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی استفاده می‌شود. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل گسسته‌سازی معادله‌های دو تکنیک روش حجم سیال یا (VOF)، که برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR)، که برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مانند مرزهای هندسی کاربرد دارد، برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند. معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله‌ی تعادل جرم برای یک المان سیال بدست می‌آید. بصورت کلی این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\partial \rho u A_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

که در آن، V_F نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و ρ چگالی سیال است. مؤلفه‌های سرعت u, v, w در جهات X, Y, Z هستند. A_x نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت x است، A_y و A_z به طور مشابه نسبت سطوح جریان در جهات y و z هستند. R و ξ

بتدریج از ورودی فلوم وارد جریان گردید. در نهایت با تنظیم سرعت شاتر لنز دوربین از حرکت ذرات در جریان تصویربرداری صورت گرفت. در شکل 4 محدوده برداشت داده‌های سرعت طولی جریان و نیز تصویری از ذرات آشکارسازی شده نشان داده شد. داده‌های سرعت طولی جریان در سه مقطع عرضی (با فاصله 4، 6 و 14 سانتی‌متری از خط مرکزی کانال)، چهار مقطع طولی (در فاصله 20 سانتی‌متری قبل از لبه پی) و در کل عمق جریان آب برداشت شد.

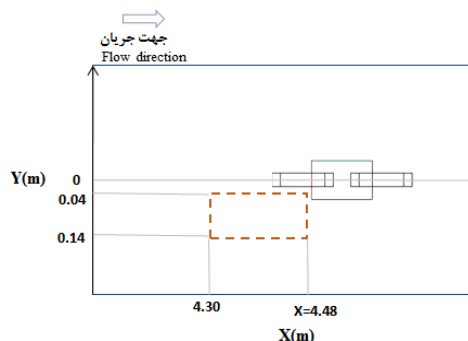
بعد از آماده‌سازی مدل برای هندسه پایه پل مورد نظر، مدل اجرا گردید. در نرم‌افزار FLOW-3D پنج مدل آشفتگی شامل مدل آشفتگی طول اختلاط پراتل، معادلات آشفتگی تک معادله‌ای انرژی آشفتگی، معادله آشفتگی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ ، مدل آشفتگی RNG و شبیه‌سازی گردابی بزرگ، در نظر گرفته شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل، نتایج نیمرخ سرعت جریان در محدوده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با نتایج متناظر آن در مدل عددی برای شرایط مختلف مدل‌های آشفتگی مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که از میان مدل‌های آشفتگی مورد بررسی، مدل آشفتگی RNG دارای تطابق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد (شکل 5 و جدول 1).

شرایط مرزی در مدل عددی با توجه به شرایط مدل آزمایشگاهی انتخاب شد. شرط مرزی ورودی از نوع دبی با ارتفاع جریان و شرط مرزی خروجی از نوع فشار ایستا در نظر گرفته شد. همچنین سقف دامنه به صورت هم‌فشار و فشار صفر در نظر گرفته شد که بیانگر حالت کانال باز است.

صحت‌سنجی مدل عددی

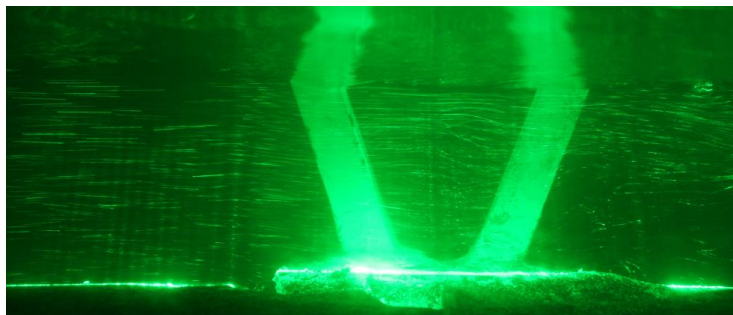
با پیشرفت تجهیزات اپتیکی در دو دهه اخیر روش‌هایی مبتنی بر پردازش تصاویر برای اندازه‌گیری میدان سرعت ابداع شده‌اند که شامل سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی تعقیب ذرات می‌باشد (9). در این تحقیق از روش الگوریتم‌برداری تعقیب ذرات برای اندازه‌گیری نیمرخ سرعت جریان نزدیک‌شونده به پایه پل استفاده شد. این الگوریتم شامل دو بخش شناسایی ذرات در نرم‌افزار لب ویو و به زبان گرافیکی جی و بخش تعقیب ذرات در نرم‌افزار متلب می‌باشد.

برای تعیین سرعت با استفاده از روش الگوریتم‌برداری، پس از تنظیم دوربین (Canon EOS 50D مجهز به سنسور APS-C CMOS) در محدوده پایه پل، ماده پلاستیکی PVC با آب مخلوط و



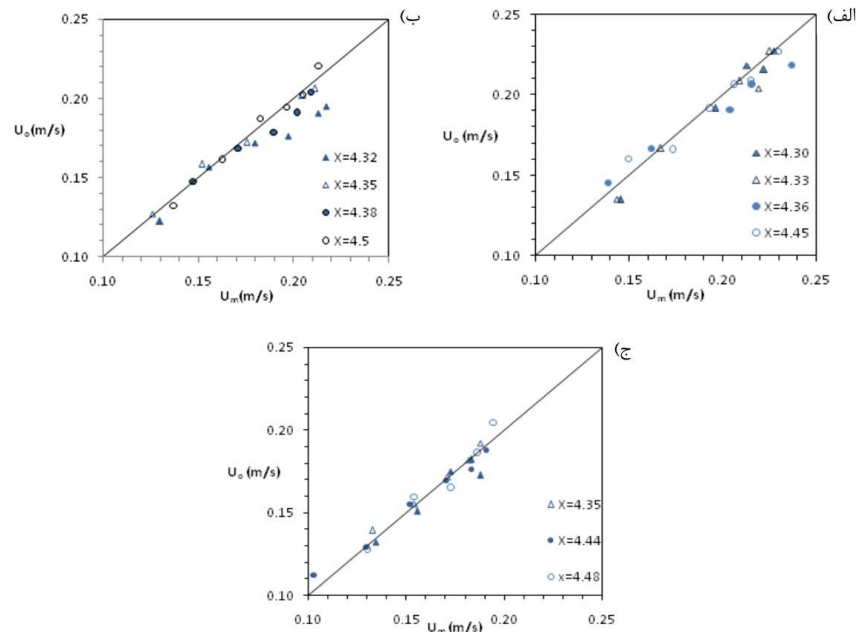
شکل 3- نمایی از پلان محدوده برداشت تصاویر سرعت طولی جریان

Figure 3- Plan view of the bounding box of taken images of longitudinal flow velocity



شکل 4- نمونه‌ای از تصویرهای برداشت شده در آزمایشگاه از جریان اطراف گروه پایه پل

Figure 4- Samples of images taken in the laboratory of flow around the bridge group pier



شکل 5- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی نیمرخ طولی سرعت جریان در شرایط پی هم‌تراز بستر در فاصله‌های عرضی معین نسبت به خط مرکزی جریان، الف) $Y=0.04$ m ، ب) $Y=0.06$ m و ج) $Y=0.14$ m

Figure 5- Comparison of experimental and numerical values of longitudinal flow velocity in the situation of the foundation at the bed level and at intervals of various lateral distances in respect to the flow center line a) $Y=0.04$ m ، b) $Y=0.06$ m و c) $Y=0.14$ m

جدول 1- مقادیر RMSE و R^2 نیمرخ سرعت طولی در مدل عددی و آزمایشگاه در سه مقطع عرضی

Table 1- The RMSE and R^2 values for profiles of longitudinal flow velocity in numerical models and Experiments at three cross-sections

Y (m)	R^2 min	R^2 max	RMSE min(m/s)	RMSE max (m/s)
0.04	0.85	0.85	0.01	0.014
0.06	0.80	0.80	0.005	0.018
0.14	0.83	0.83	0.004	0.01

نتایج و بحث

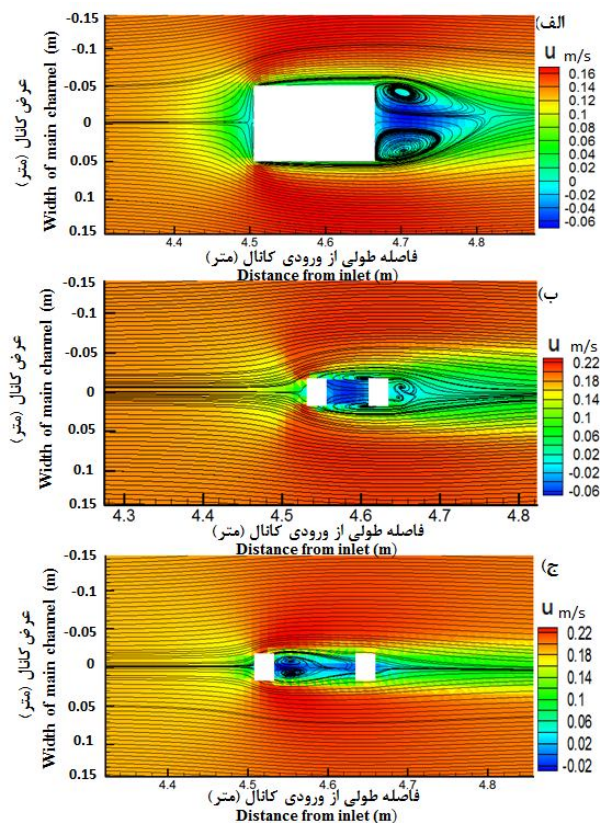
الگوی جریان اطراف گروه پایه‌ها نسبت به تک پایه بسیار متفاوت است و نتایج الگوی جریان اطراف تک پایه به دلیل غیرخطی بودن و اندرکنش دیگر پدیده‌ها قابل تعمیم دادن به گروه پایه نیست. در گروه پایه‌ها، پایه بالادستی با برهم زدن جریان مانند یک ژنراتور تولیدکننده‌ی آشفتگی و پایه پایین‌دست مانند یک وسیله کاهش مقاومت عمل می‌کند. نتایج حاصل از میدان جریان در صفحات x-y و x-z و تنش برشی در اطراف گروه پایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Tecplot، در شکل‌های (6) تا (11) نشان داده شد.

در همه ترازهای کارگذاری پی، مؤلفه طولی سرعت جریان با رسیدن به پایه اول پیرامون آن افزایش می‌یابد. این افزایش در این ناحیه و امتداد آن به سمت پایین‌دست ناشی از تنگ‌شدگی جریان به علت قرار گرفتن پایه و ناحیه چرخشی گردابه برخواستگی در

پایین‌دست می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد (شکل‌های 7، 9 و 11) در بین گروه پایه به دلیل تشکیل گردابه‌ها و جریان‌های پایین‌رونده سرعت جریان منفی می‌گردد.

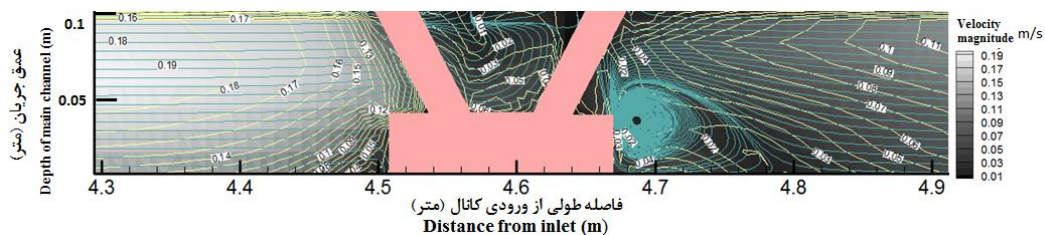
در حالت قرارگیری پی بالاتر از بستر (شکل‌های 6 و 7) گردابه‌های تشکیل شده در بین پایه اول و دوم گروه پایه در عمق‌های میانی نزدیک سطح آب کل فاصله بین دو پایه را در بر گرفته است. در پایین‌دست گروه پایه گردابه‌های جریان از نزدیک بستر تا عمق میانی جریان گسترش یافته است که با نتایج آزمایشگاهی آبشستگی در این ناحیه مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. در شرایط پی هم‌تراز بستر از نزدیک بستر تا عمق میانی جریان، جریان‌های چرخشی در فاصله بین دو پایه توسعه می‌یابد، در حالی که در نزدیک سطح آب و در بالادست پایه دوم خطوط جریان موازی با بستر می‌شود. در شرایط پی پایین‌تر از بستر به دلیل افزایش فاصله

پایه‌ها از یکدیگر جریان‌های چرخشی در هر سه عمق جریان در پایین‌دست پایه اول تمرکز بیشتری دارد به طوری که خطوط جریان در بالادست پایه دوم تقریباً موازی با بستر می‌شود.



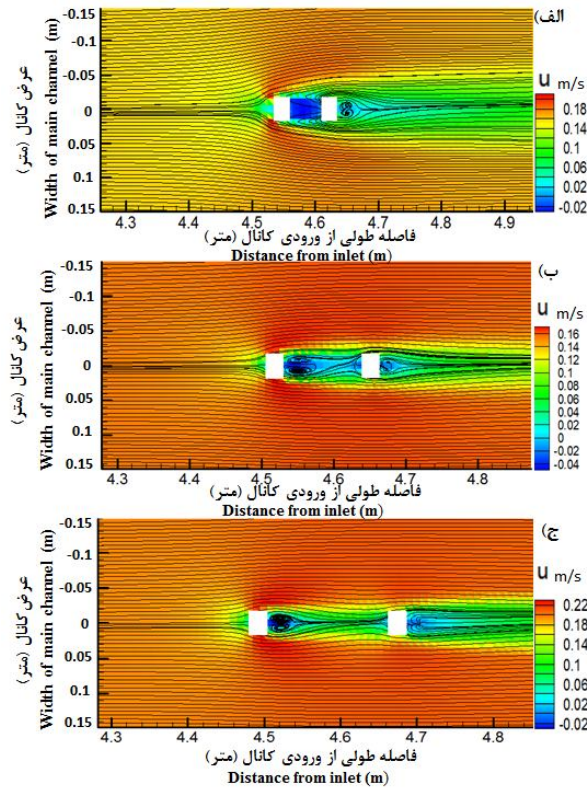
شکل 6- خطوط جریان در صفحه x-y در شرایط پی بالاتر از بستر و در عمق جریان الف) نزدیک بستر ($Z_w = 0.5$ cm) ، ب) میانی ($Z_w = 5$ cm) و ج) نزدیک سطح آب ($Z_w = 9.5$ cm)

Figure 6- Stream lines on the plate x-y in the situation of foundation above the bed and in the flow a) near bed ($Z_w = 0.5$ cm), b) middle ($Z_w = 5$ cm) and c) near the surface water ($Z_w = 9.5$ cm)



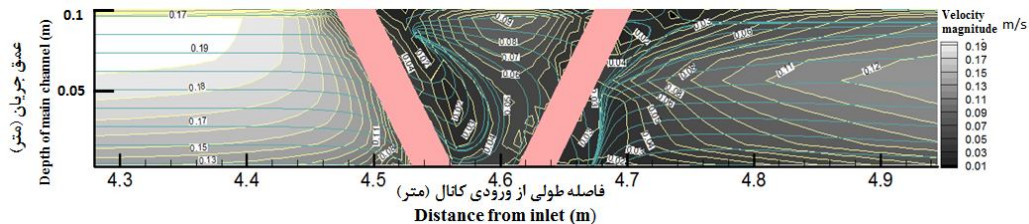
شکل 7- خطوط جریان در صفحه x-z در شرایط پی بالاتر از بستر

Figure 7- Stream lines on the plate x-z in the situation of foundation above the bed



شکل 8- خطوط جریان در صفحه x-y در شرایط پی هم تراز بستر و در عمق جریان الف) نزدیک بستر ($Z_w = 0.5 \text{ cm}$)، ب) میانی ($Z_w = 5 \text{ cm}$) و ج) نزدیک سطح آب ($Z_w = 9.5 \text{ cm}$)

Figure 8- Stream lines on the plate x-y in the situation of the foundation at bed level and in the flow a) near bed ($Z_w = 0.5 \text{ cm}$), b) middle ($Z_w = 5 \text{ cm}$) and c) near the surface water ($Z_w = 9.5 \text{ cm}$)



شکل 9- خطوط جریان در صفحه x-z در شرایط پی هم تراز بستر

Figure 9- Stream lines on the plate x-z in the situation of the foundation at the bed level

بستر بیشینه تنش برشی وارد بر بستر 17 درصد کاهش و در شرایط کارگذاری بالاتر از بستر، 53 درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج حداکثر عمق آبستنگی در شرایط مشابه نشان داد که با کاهش ارتفاع کارگذاری پی به هم تراز بستر، حداکثر عمق آبستنگی 33 درصد کاهش و در شرایط کارگذاری پی در زیر تراز کارگذاری مقدار حداکثر عمق آبستنگی 78 درصد کاهش یافت.

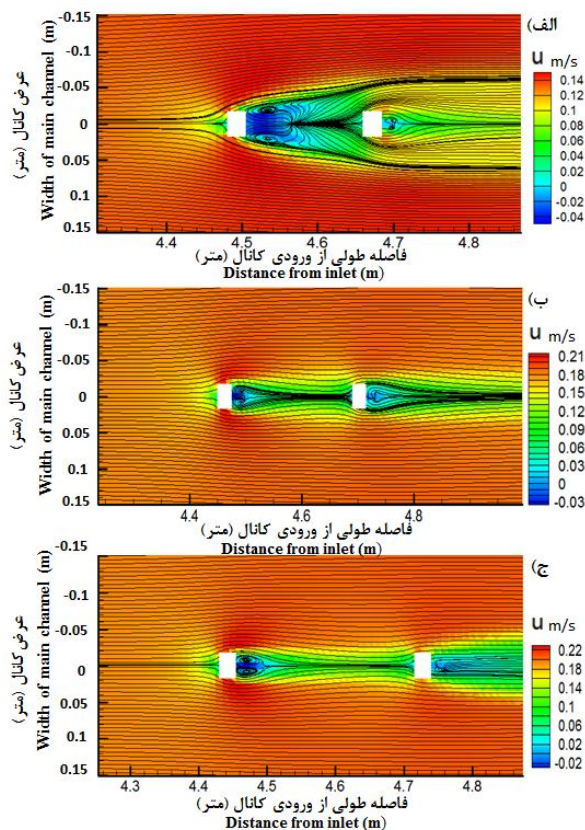
همانطور که در شکل 12 ملاحظه می‌گردد، اگرچه حداکثر تنش برشی در اطراف پایه‌ها برای شرایط استقرار پی هم تراز بستر بیشتر

در شکل 12 منحنی‌های هم تراز تنش برشی همراه با نتایج تصاویری از آبستنگی نهایی در شرایط آزمایشگاهی نشان داده شد. مقایسه نتایج تغییرات تنش برشی کل نشان داد که در محدوده عرضی جریان، تغییرات تنش برشی در شرایط کارگذاری پی بالاتر از بستر بیشتر از دو حالت دیگر است.

مقایسه نتایج تغییرات تنش در شرایط کارگذاری پی در ترازهای مختلف نشان داد که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری پی در تراز بستر رخ داده و با کاهش ارتفاع کارگذاری به شرایط پایین تر از

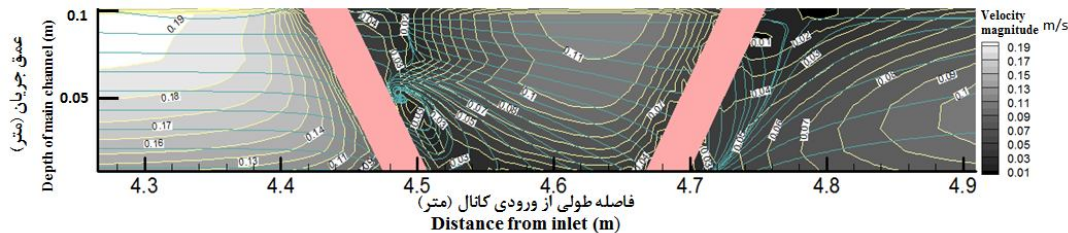
بستر، افزایش فاصله بین گروه پایه سبب شده تأثیر وجود پایه دوم در الگوی جریان تشکیل شده در گروه پایه کاهش یابد و می‌توان گفت در شرایط پایین‌تر از بستر تا حد زیادی گروه پایه به صورت دو پایه مستقل در الگوی جریان شکل گرفته، تأثیرگذار می‌باشد.

است ولی به دلیل آنکه در این تراز کارگذاری پی، سطح رویی آن مانند طوقه می‌گردد و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد، در نتیجه مقدار حداکثر عمق آبستنگی در این شرایط نسبت به استقرار پی بالاتر از بستر 33 درصد کاهش می‌یابد. در شرایط قرارگیری پی هم‌تراز بستر نسبت به حالت پایین‌تر از



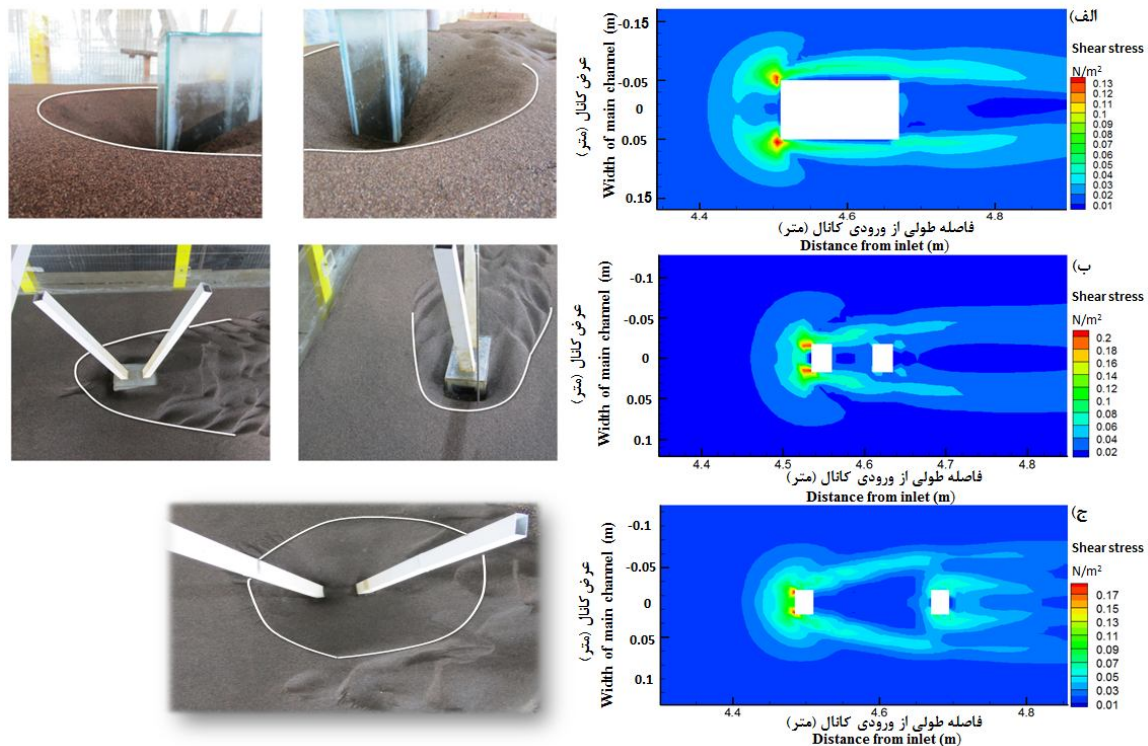
شکل 10- خطوط جریان در صفحه x-y در شرایط پی پایین‌تر از بستر و در عمق جریان الف) نزدیک بستر ($Z_w = 0.5$ cm)، ب) میانی ($Z_w = 5$ cm) و ج) نزدیک سطح آب ($Z_w = 9.5$ cm)

Figure 10- Stream lines on the plate x-y in the situation of foundation below the bed and in the flow a) near bed ($Z_w = 0.5$ cm), b) middle ($Z_w = 5$ cm) and c) near the surface water ($Z_w = 9.5$ cm)



شکل 11- خطوط جریان در صفحه x-z در شرایط پی پایین‌تر از بستر

Figure 11- Stream lines on the plate x-z in the situation of foundation below the bed



شکل 12- تنش برشی کل در بستر جریان به همراه تصاویر وضعیت آبنسستگی نهایی در ترازهای مختلف پی الف) بالاتر از بستر، ب) هم تراز بستر و ج) پایین تر از بستر

Figure 12- The total shear stress in the flow bed along with images scour situation final, at different levels of the foundation a) above, b) at and c) below the bed

$$I = \frac{u'}{U} \quad \text{که در آن:} \quad (5)$$

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3} (u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3} K} \quad \dots\dots (6)$$

$$U = \sqrt{(U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)} \quad \dots\dots (7)$$

در عبارت بالا u' ریشه دوم میانگین حسابی نوسانات سرعت درمی جریان در جهت های X ، Y و Z و K انرژی آشفتگی جریان می باشد. U_x ، U_y و U_z میانگین مؤلفه های سرعت در جهت های X ، Y و Z هستند.

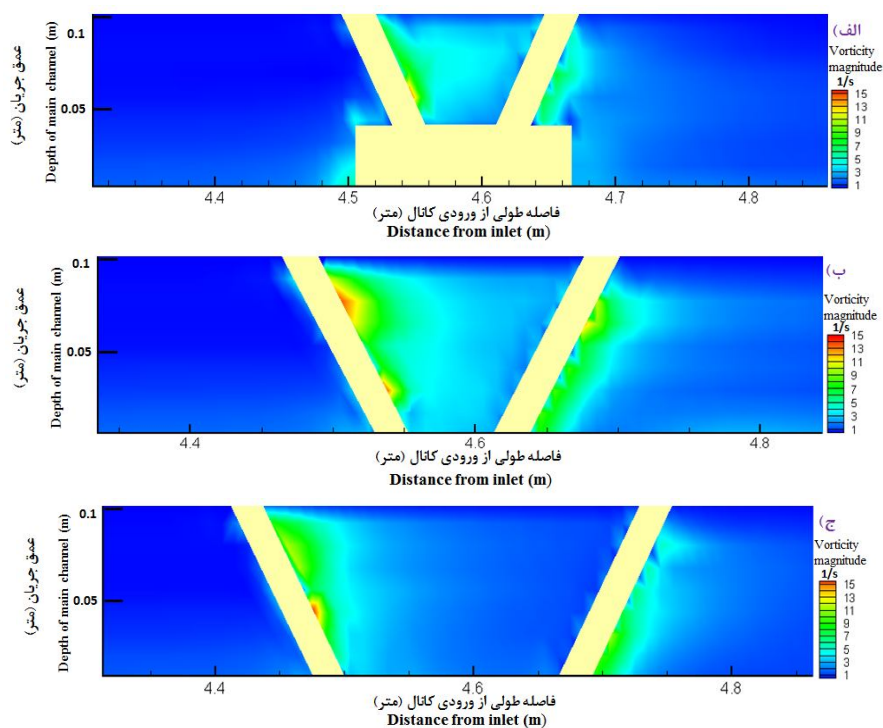
شدت درمی جریان (I) در سه سطح تقسیم بندی می شود. سطح بالا شدت درمی حالتی است که شدت درمی 5-20 درصد، برای حالت متوسط این مقدار 1-5 درصد و در موارد با شدت درمی پایین مقدار این پارامتر کمتر از 1 درصد می باشد.

در جدول (2) مقادیر شدت درمی جریان در مرکز گروه پایه پل (بین پایه اول و دوم) و در مقطع عرضی $3W$ (در محدوده $-0/15$ تا $0/15$ محور Y) و در سه عمق جریان نزدیک به بستر، عمق میانی و نزدیک سطح آب ارائه شد.

در شکل 13 مقدار گردابه های جریان در صفحه $Y=0$ در هر سه تراز قرارگیری پی نشان داده شد. با توجه به هندسه گروه پایه سبب شده که در هر سه تراز قرارگیری پی، در پایین دست پایه اول و دوم مقدار گردابه های جریان افزایش یافته است. در شرایط پی بالاتر از بستر به دلیل بزرگتر بودن حجم گروه پایه نسبت به دو حالت دیگر، در بالادست گروه پایه و نزدیک بستر مقدار گردابه های جریان افزایش یافت. در شرایط هم تراز، مقادیر و محدوده توسعه گردابه های جریان در فاصله بین پایه اول و دوم نسبت به حالت پایین تر از بستر، بیشتر است که می توان دلیل آن را تاثیر بیشتر پایه دوم بر الگوی جریان گروه پایه در حالت هم تراز بستر عنوان کرد.

جریان آشفتگی دارای طبیعتی سه بعدی و غیردائمی است. حرکت توده های سیال در چنین جریانی تابع گردابه هایی است که در ابعاد مختلف تشکیل شده و سپس مستهلک می شوند و به این دلیل مشخصه های جریان، دارای نوسان های لحظه ای می باشند. شدت آشفتگی یک معیار بی بعد از نوسان های متلاطم سرعت سطحی است که معرف میزان تلاطم و اغتشاش در جریان می باشد.

معادله شدت آشفتگی جریان را می توان به صورت زیر نوشت:



شکل 13- مقدار گردابه‌های جریان در صفحه $x-z$ ($Y=0$) در ترازهای مختلف قرارگیری پی الف) بالاتر از بستر، ب) هم‌تراز بستر و ج) پایین‌تر از بستر

Figure 13- The amount vortex flow on the screen in different levels of the setting foundation a) above, b) at and c) below the bed

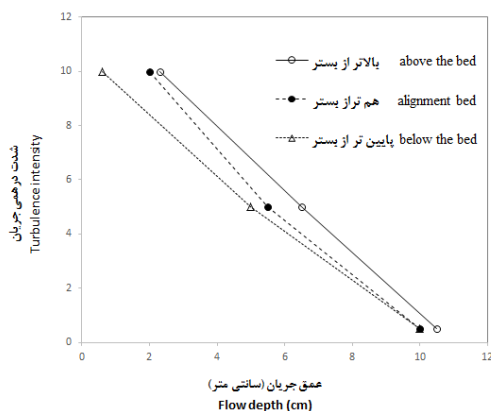
سمت سطح آب تغییر جهت می‌دهند و سبب تشکیل جریان چرخشی و شدت درهمی بالا در این ناحیه می‌گردند. با توجه به شکل 11 در نزدیک سطح آب و در مرکز گروه پایه خطوط جریان به صورت موازی با بستر بوده و سبب شده سطح شدت درهمی در این محدوده پایین باشد.

مقایسه نتایج نشان داد که شدت درهمی جریان در عمق‌های نزدیک بستر و میانی جریان در هر سه تراز قرارگیری پی، در محدوده جریان‌های با سطح بالایی شدت درهمی قرار دارد. عامل این شدت درهمی را می‌توان با توجه به نمودارهای خطوط جریان در صفحه $X-Z$ در شکل‌های 7، 9 و 11 تحلیل نمود. خطوط جریان در محدوده بین گروه پایه به صورت پایین‌رونده بوده و پس از برخورد با بستر به

جدول 2- شدت درهمی در سه عمق جریان

Table 2- Turbulence intensity at three given flow depths

تراز نسبی پی Level of respective foundation	درصد شدت درهمی جریان Flow turbulence intensity percent		
	نزدیک بستر Near bed	عمق میانی Middle depth	نزدیک سطح آب Near the surface water
	$Z/W = 0.5$	10.5	6.5
$Z/W = 0$	10	5.5	2
$Z/W = -1$	10	5	0.6



شکل 14- بررسی شدت درهمی در سه عمق جریان نزدیک بستر، میانی و نزدیک سطح آب و سه تراز قرارگیری پی
Figure 14- Evaluation of the turbulence intensity in three flow depth near bed, middle and near the surface water and three levels of setting foundation

آزمایشگاهی آبستگي در این ناحیه مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای تنش برشی نشان داد که در تراز قرارگیری پی بالاتر از بستر نسبت به دو حالت دیگر، به دلیل افزایش سطح برخورد گروه پایه با جریان عبوری محدوده عرضی وسیع‌تری از کانال تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری پی هم‌تراز بستر رخ داده و در مقایسه با شرایط کارگذاری بالاتر از بستر بیشینه تنش برشی وارد بر بستر، 53 درصد کاهش و در شرایط پایین‌تر از بستر، 17 درصد کاهش می‌یابد.

در هر سه تراز قرارگیری پی بیشینه مقدار گردابه‌های جریان برابر می‌باشد. در شرایط کارگذاری بالاتر از بستر مقدار گردابه‌های جریان در بالادست گروه پایه بیشتر از دو حالت دیگر است که با نتایج آبستگي مطابقت دارد. در حالت هم‌تراز بستر گردابه‌های جریان در فاصله بین گروه پایه توسعه یافته در حالی که در شرایط پایین‌تر از بستر، گردابه‌های جریان در پایین‌دست پایه اول تمرکز دارد. خطوط پایین‌رونده جریان در محدوده بین گروه پایه سبب تشکیل ناحیه چرخشی و افزایش شدت درهمی جریان می‌گردد.

نتیجه‌گیری

پل‌ها با گروه پایه کج از جمله سازه‌های با هندسه پیچیده بوده که ساختار جریان پیرامون آن سه بعدی و ناشناخته می‌باشد. از این رو شناخت الگوی جریان پیرامون آن می‌تواند نقش مهمی در پیش‌بینی پایداری سازه و تغییرات بستر در طول زمان بهره‌برداری از آن داشته باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل عددی FLOW-3D رفتار هیدرودینامیکی جریان اطراف گروه پایه کج در سه شرایط مختلف تراز کارگذاری پی بالاتر از بستر، هم‌تراز بستر و پایین‌تر از بستر، مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی نتایج نشان داد که رقوم کارگذاری پی تأثیر معنی‌داری بر مشخصات هیدرودینامیکی و الگوی جریان دارد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع کارگذاری پی از 1- به 0/5 گردابه‌های تشکیل شده در پایین‌دست گروه پایه، شدت بیشتری دارد و با کاهش ارتفاع کارگذاری پی، جریان‌های چرخشی بین گروه پایه در پایین‌دست پایه اول تمرکز بیشتری می‌یابد. در حالت قرارگیری پی بالاتر از بستر در پایین‌دست گروه پایه، گردابه‌های جریان از نزدیک بستر تا عمق میانی جریان گسترش یافته است که با نتایج

منابع

- 1- Ataie-Ashtiani B., Baratian-Ghorghi Z., and Beheshti A. 2010. Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour of Compound Piers. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 136(6). 343-351.
- 2- Breusers H. N. C., and Raudkivi A. J. 1991. Scouring. A. A. Balkema Rotterdam, Brookfield. 143pp.
- 3- Dashtpeyma H. 2013. Investigation numerical flow pattern around the piers of dual bridge. Master thesis. Sharif University of Technology. Civil Faculty. (In Persian with English abstract).
- 4- Dargahi B. 1990. "Controlling Mechanism of Local Scouring", Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 116(10), 1197-1214.
- 5- Esmailivaraki M., Mosapoor S., and Hatamjafari M. 2014. Investigation laboratory Influence factors geometric and hydraulic characteristics of scour around the inclined bridge group pier with foundation. Magazine Research Water Iran. Seventh year, thirteenth Number. (141-151). (In Persian)

- 6- Hasanzadeh Y., Hakimzadeh H., and Ayyari Sh. 2012. Investigation forms the pier of the bridge on the flow pattern around it using software Fluent. Iran Water Resources Research. Seventh year. Fourth Number. (In Persian with English abstract).
- 7- Jafari M. 2014. Simulation of Scouring around Inclined Bridge Group Pier Using Software Flow-3D and Physical Model. Master thesis. Tarbiat Modarres University. Faculty of Agriculture. (In Persian with English abstract).
- 8- Jones J. S., Kilgore R. T., and Misitichelli M. P. 1992. Effect of footing location on bridge pier scour. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 118(2):280-290.
- 9- Khosrooghahi M. 2012. Development A Measuring Method For 2-D Flow Velocity and Vertical Distribution of Turbulent Shear Stress using Image Processing and Particle Tracking Velocimetry Algorithm. Master thesis. Tarbiat Modarres University. Faculty of Agriculture. (In Persian with English abstract).
- 10- Lu J.Y., Shi Z.Z., Hong Z.H., Lee J.J., and Raikar R.V. 2011. Temporal Variation of Scour Depth at Nonuniform Cylindrical Piers. J. Hydr. Engin. ASCE. 137(1):45-56.
- 11- Melville B. W., and Raudkivi A. J. 1996. Effect of foundation geometry on bridge pier scour, Journal of Hydraulic Engineering. 122(4):203-209.
- 12- Melville B.W., and Chiew Y.M. 1999. Time scale for local scour depth at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.125, No.1, pp.59-65.
- 13- Melville B.W., and Sutherland A.J. 1988. Design method for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114(10), pp. 1210-1226.
- 14- Rostami F. 2007. Numerical study of subcritical and supercritical flow from the lake Dam to the spillway shut leading up to the hydraulic jump stilling basin. Master thesis. K.N.Toosi University of Technology. Civil Faculty. (In Persian with English abstract).
- 15- Raudkivi A.J., and Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3), pp. 339-350.
- 16- Salaheldin T.M., Imran J., and Chaudhry M.H. 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. Journal of hydraulic engineering, A.S.C.E., 130(2), pp. 91-100.
- 17- Tseng M., Yen C.L., and Song C.C.S. 2000. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. International Journal for Numerical Method in Fluids, Vol. 34, pp.207-227.
- 18- Vittal N., Kothiyari U. C., and Haghghat M. 1994. Clear-water scour around bridge pier group. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 120(11):1309-13.

Simulation of Flow Pattern around Inclined Bridge Group Pier using FLOW-3D Software

M. Jafari¹– S. A. Ayyoubzadeh^{2*}– M. Esmaili Varaki³– M. Rostami⁴

Received: 08-08-2015

Accepted: 19-06-2016

Introduction: Bridges are certainly one of the most important structures but costly service elements in a transport system. The bridges are very required to access the damaged areas in emergency situations such as floods and earthquakes. Scour around the foundations of bridge piers exposed to the flowing water than can destroy the bridge itself is a subject of major concern. Flow pattern is known as responsible for all changes in stream bed. Any obstacle in the channel can form new flow patterns causing additional shear stress exerted on the bed than the equilibrium condition of the absence of the obstacle. Appropriate shaping of flow pattern and proper selecting of pier geometry and the location of bridge piers can be one of the proper methods in reduction of scour amount which is the main subject of the present study.

Materials and Methods: Inclined bridge group pier is a type of bridges with modern geometry based on development in building technology of structures. Many of these bridges have been built all around the world and the 8th bridge built crossing the Karun River in Ahvaz is a sample of the Iranian ones considered in this research. Hydrodynamic behavior of flow is investigated around the inclined bridge group pier settled on foundation using the FLOW-3D numerical model. Inclined bridge group pier investigated in this study, includes two rectangular piers which are 2.5 cm long and 3.5 cm wide and set in an angle of 28 degree on rectangular foundation which is 16 cm long and 10 cm wide and installed in three different foundation levels namely at, above and below the bed levels. The physical model of prototype pier considered in this study was constructed to the scale of 1:190 of the Ahvaz 8th bridge. In order to verify the accuracy of the numerical model, velocity data obtained from image processing technique were used.

Results and Discussion: Due to non- linearity and interactions between various phenomena involved, flow pattern around the piers group is entirely different than that for a single pier and consequently the outcomes of the flow pattern around single pier cannot be generalized to the pier group. At all levels of foundation setting, longitudinal component of flow velocity increases surrounding the first pier. The increase in the area and its extension towards downstream is caused by the constriction the flow due to the pier and area rotating of the wake vortex in downstream. When the pier foundation is set at the stream bed, the bed rotating flows extend to a distance between the two piers from near the bed up to the middle of flow depth while in upstream of the second pier and near water surface, the stream lines become parallel to the bed. The comparison of the results of the changes in bed shear stress in the situations of foundation setting in different levels showed that the maximum shear stress occurred when the foundation level is at the bed level and the maximum shear stress exerted on the bed decreases by factors of 17% and 53% in the cases of foundation level to be below and above bed levels, respectively. In addition, the results showed that, the amount of vortex flows increased in upstream piers group and near bed in the case of setting the foundation above the bed. This is because of the fact that the volume of piers group acted as obstacle against flow was more than other level settings. Furthermore, based on the obtained results, in the case of foundation level is set at the bed, the quantity and development zone of vortex flow are much higher than those observed when the setting foundation is below the bed level. This can be attributed to the higher effect of the second pier on the flow pattern being between the first and the second piers. Stream lines turn downward in the range between piers group, and after the collision to bed turn upward to water surface and cause to form rotating flow and hence high turbulence intensity in the area. In the near water surface and the center of group piers, stream lines were observed to be parallel to the bed and caused low turbulence intensity in this area.

Conclusions: The results showed that the levels of setting foundation have a significant effect on hydrodynamic characteristics and flow pattern around the piers. By increasing the dimensionless height of the setting foundation from -1 to 0.5 vortices formed in the downstream piers group is strengthen more and the

1 and 2- M.Sc. Graduated and Associate Professor, Water Structures Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran (*- Corresponding Author Email: ayyoub@modares.ac.ir)

3- Assistant Professor, Water Structures Engineering Department, Guilan University

4- Assistant Professor, Institute of Soil and Water Conservation

results from the numerical model are consistent with the results of experimental scour around piers group in all three levels of setting foundations. When the foundation setting is at the bed level, the maximum bed shear stress is observed. The maximum bed shear stress is decreased by factors of 17 and 53 percent when the foundation to be set below and above bed levels, respectively.

Keywords: Ahvaz 8th bridge, Flow pattern, Foundation level, Image processing method, Inclined bridge group pier, Numerical model FLOW-3D