

Research Paper

مقاله پژوهشی

Numerical Study of the Flow Skew Angle Impact on the Flow Pattern of Complex Bridge Piers

شبیه‌سازی عددی تأثیر زاویه برخورد جریان بر الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب

Masoume Rostamabadi^{1*}, Hamidreza Sama² and Seyed Hossein Mohajeri³

معصومه رستم‌آبادی^{۱*}، حمیدرضا سما^۲ و سیدحسین مهاجر^۳

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Buin Zahra Branch, Islamic Azad University, Buin Zahra, Iran

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران.

2- Ph.D. Graduate, Department of Water Engineering, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

*Corresponding Author, Email: Rostamabadi@iau.ac.ir

*نویسنده مسئول، ایمیل: Rostamabadi@iau.ac.ir

Received: 16/12/2024

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

Revised: 03/03/2025

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

Accepted: 12/03/2025

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

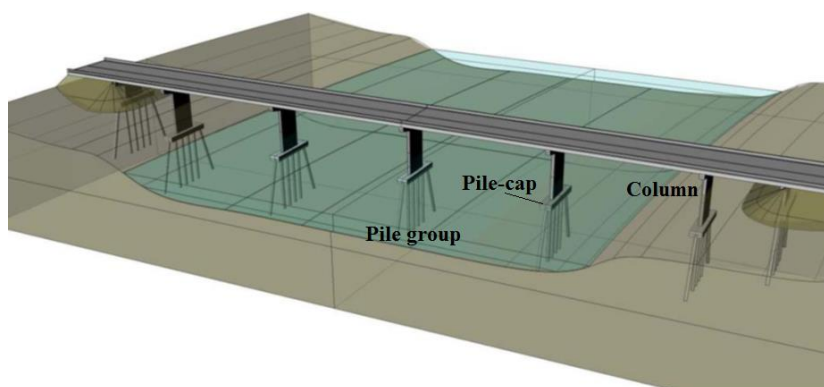
Most studies on complex bridge piers have focused on scour around the piers, with less attention paid to the turbulent flow pattern resulting from changes in the flow impact angle. In the present study, a numerical simulation of the flow pattern around composite bridge piers was conducted for angles of 10, 30, 50, 70, and 90 degrees relative to the flow direction. The simulations were performed using Flow-3D software. After verifying the numerical model, the flow pattern and shear stress around the piers were examined. Velocity vector analysis showed that four regions can be distinguished around the column for all angles. First, the stagnation region, where the flow hits the column. Second and Third, regions on both sides of the column, where vortex flow is formed around the vertical axis; and Fourth, the saddle region, which is formed at the boundary between region two and the downstream flow. The change in the flow impact angle affected the extent and position of these areas; at an angle of 90 degrees, areas 2 and 3 are entirely similar, and at an angle of 10 degrees, area 4 is not formed. The investigation of shear stress showed that, in general, the shear stress around the piers increased with increasing angle. Specifically, compared to the zero-degree angle, the bed shear stress increased by 65, 135, 170, 173, and 202 percent for angles of 10 to 90 degrees, respectively. The shear stress around the first-row piers is always higher than that around the second-row piers; for an angle of 90 degrees, the average shear stress around the second-row piers is 45 percent of that around the first-row piers. However, this ratio is higher for other angles, reaching up to about 58 percent.

اکثر مطالعات مربوط به پایه‌های پل مرکب بر آب‌شستگی حول پایه‌ها متمرکز بوده است و توجه کم‌تری بر الگوی جریان آشفته با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه‌ها معطوف شده است. در مطالعه حاضر شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب با زوایای ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه نسبت به جهت جریان انجام شده است. برای این منظور، شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Flow3D انجام شد و پس از صحت‌سنجی مدل عددی، الگوی جریان و تنش برشی حول پایه‌ها بررسی شد. برای کلیه زوایا، بررسی بردارهای سرعت نشان‌داد در اطراف ستون چهار ناحیه قابل تشخیص است. اول ناحیه سکون در محل برخورد جریان به ستون است، نواحی ۲ و ۳ در دو طرف ستون که جریان گردابی حول محور قائم در آن‌ها شکل گرفته است و ناحیه چهار که ناحیه زینی است و در مرز ناحیه شماره ۲ و جریان پایین دست به وجود آمده است. تغییر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها، گستردگی و موقعیت این نواحی را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که در زاویه ۹۰ درجه نواحی ۲ و ۳ کاملاً مشابه و برای زاویه ۱۰ درجه، ناحیه ۴ تشکیل نشده است. بررسی تنش برشی نشان داد به طور کلی تنش برشی حول پایه‌ها با افزایش زاویه، بیش‌تر شده است؛ به طوری که از زاویه ۱۰ تا ۹۰ درجه به ترتیب ۶۵، ۱۳۵، ۱۷۰، ۱۷۳ و ۲۰۲ درصد تنش برشی بستر نسبت به زاویه صفر درجه افزایش یافته است. همواره تنش برشی حول پایه‌های ردیف اول بیش‌تر از تنش برشی حول پایه‌های ردیف دوم است؛ به طوری که به‌ازای زاویه ۹۰ درجه، تنش برشی متوسط حول پایه‌های ردیف دوم نسبت به پایه‌های ردیف اول ۴۵ درصد است، اما به‌ازای زوایای دیگر این نسبت بیش‌تر و تا حدود ۵۸ درصد است.

Keywords: Complex Bridge Piers, Shear Stress, Piers Skewed Angle, Flow3D.

کلمات کلیدی: پایه‌پل مرکب، تنش برشی، زاویه برخورد جریان با پایه‌ها، Flow3D.

راستای گروه پایه‌های پل که عمود بر راستای عرشه هستند با جهت جریان زاویه‌دار می‌شوند. در این حالت زاویه برخورد جریان به گروه پایه‌ها از پارامترهای مهمی است که الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. محققان متعددی، درخصوص جریان و آب‌شستگی پایه‌های پل مرکب مطالعاتی انجام داده‌اند. برخی محققان روند آب‌شستگی و عمق آن با تغییر تعداد و فاصله بین پایه‌ها، شکل و فاصله سرشمع از بستر را بررسی کرده‌اند (Amini et al., 2011, Yang et al., 2018, 2024; Ferraro et al., 2013; 2012; Sheppard et al., 2023؛ خالدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ محمدپور و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۱- پل چنددهنه و پایه‌های پل مرکب روی سرشمع (Ettema et al., 2017)

اطراف پایه پل‌های مرکب انجام دادند. دو نوع مختلف از پایه‌های پل، بر مبنای پلهایی که در چند دهه اخیر در نیوزیلند خراب شدند، ساخته شد. ۹ تراز گوناگون برای سرشمع و هفت زاویه مختلف برای برخورد جریان با پایه‌ها انتخاب شد. زاویه‌ها از صفر تا ۹۰ درجه با فواصل ۱۵ درجه بود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد تراز سرشمع و زاویه پایه‌های پل نسبت به مسیر جریان بر روی عمق آب‌شستگی تأثیر به‌سزایی دارد.

همان‌گونه که مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد، بیش‌تر پژوهش‌ها در زمینه پایه‌های پل مرکب بر تحلیل آب‌شستگی حول پایه‌ها و اثر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر روند آب‌شستگی متمرکز بوده است و توجه کمی بر الگوی جریان و تأثیر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها بر الگوی جریان معطوف شده است. بررسی دقیق اثر زاویه پایه‌ها بر الگوی جریان و نیز مطالعه تنش‌های برشی بستر اطراف گروه پایه‌ها با تغییر زاویه به درک بهتر رفتار این سازه‌ها در مقابل جریان و تصمیم‌گیری درباره تعیین زاویه نصب پایه‌های پل منجر می‌شود. لذا در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب با تغییر زاویه پرداخته شده است و پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تغییرات سرعت و تنش برشی بستر با تغییر زاویه مورد بررسی قرار گرفته است. پنج زاویه مختلف از ۱۰ تا ۹۰ درجه با فواصل ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است.

ترکیبی از یک ستون دیوارمانند، یک سرشمع در زیر دیوار و گروهی از پایه‌های پل در زیر سرشمع، پایه پل مرکب^۱ نامیده می‌شود (Yang et al., 2024). در شکل ۱ طرح شماتیک یک جاده و پایه‌های پل مرکب روی آن نشان داده شده است. عبور جاده و یا راه‌آهن از روی رودخانه‌ها در محل‌های خاصی است که توسط مسیر کلی راه مشخص می‌شود. گاهی به دلیل شرایط جغرافیایی و مسیر راه، امکان عبور پل به صورت عمود بر مسیر جریان در رودخانه میسر نیست و عرشه پل، به صورت مورب عرض رودخانه را طی نموده و

مطالعاتی در زمینه بررسی الگوی جریان اطراف پایه‌های پل مرکب انجام شده است (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹؛ اسدی پرتو و همکاران، بهروزی و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج مطالعات بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۹)، نشان داد جریان با برخورد به سرشمع در راستای قائم به دو قسمت تقسیم شده و بخشی به سمت ستون و بخش دیگر به سمت پایین سرشمع و پایه‌ها منحرف می‌شود. یک گردابه شبه‌نعل‌اسبی در کنار سرشمع و با محور چرخش در راستای جریان مشاهده شد. هم‌چنین دو گردابه با جهت چرخش مخالف در گوشه‌های بالادست و پایین‌دست سرشمع دیده شد. نتایج مطالعات اسدی پرتو و همکاران (۱۳۹۵)، نشان داد در مقایسه با پایه‌های ساده، جریان در نزدیکی سرشمع بسیار پیچیده است و جریان بسیار آشفته و گرداب‌های مختلفی ایجاد می‌شود که در اطراف پایه‌های ساده مشاهده نشده است. برخی محققان اثر زاویه گروه پایه‌ها را بر آب‌شستگی مورد بررسی قرار دادند (Nazariha, 1996; Yang et al., 2020; Sheppard et al., 2005). پورقاسم‌زاده و قمیشی (۱۴۰۱) با شبیه‌سازی فیزیکی، اثر زاویه گروه پایه‌های پل با جهت جریان بر حداکثر عمق آب‌شستگی گروه پایه‌ها را در زاویه‌های صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش زاویه، حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. (Yang et al. (2018) آزمایشاتی را برای بررسی آب‌شستگی

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

که t و p : به ترتیب زمان و فشار هستند. ρ : دانسیته سیال، σ_T : ضریب کشش سطحی، τ_{ij} : تنش رینولدز، ν_T : لزجت گردابه‌ای، k : انرژی جنبشی آشفتگی و δ_{ij} : دلتای کرونگر هستند (Flow Science Inc., 2016).

۲-۱- معرفی مدل عددی

Flow3D از مدل‌های سه‌بعدی شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی جریان است و دقت و سرعت خوبی برای پیش‌بینی جریان‌های با سطح آزاد دارد. در این مدل از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم استفاده شده و معادلات حاکم بر جریان حل می‌شوند. همچنین مدل‌های آشفتگی مختلف مانند مدل طول اختلاط پرائنتل LES، $k-\epsilon$ و RNG برای حل ترم‌های آشفتگی در معادلات حاکم بر جریان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، مدل آزمایشگاهی بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۹) به کار رفته است. مطابق شکل ۲، مدل آزمایشگاهی مذکور شامل دو ردیف چهارتایی پایه پل با یک سرشمع مستطیلی و یک ستون مستطیلی روی سرشمع، در کانالی مستقیم به طول ۱۵ متر، عرض ۱/۲۵۴ متر و عمق ۰/۹ متر و به فاصله ۱۰ متری از بالادست کانال است.

به‌طور کلی مطالعه عددی الگوی جریان با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه‌ها، نوآوری پژوهش حاضر است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور شبیه‌سازی، از مدل عددی Flow3D استفاده شد. در مدل عددی مذکور معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهات x ، y و z هستند. در پژوهش حاضر، الگوی جریان در بستر صلب شبیه‌سازی شده، لذا معادلات انتقال رسوب ارائه نشده است.

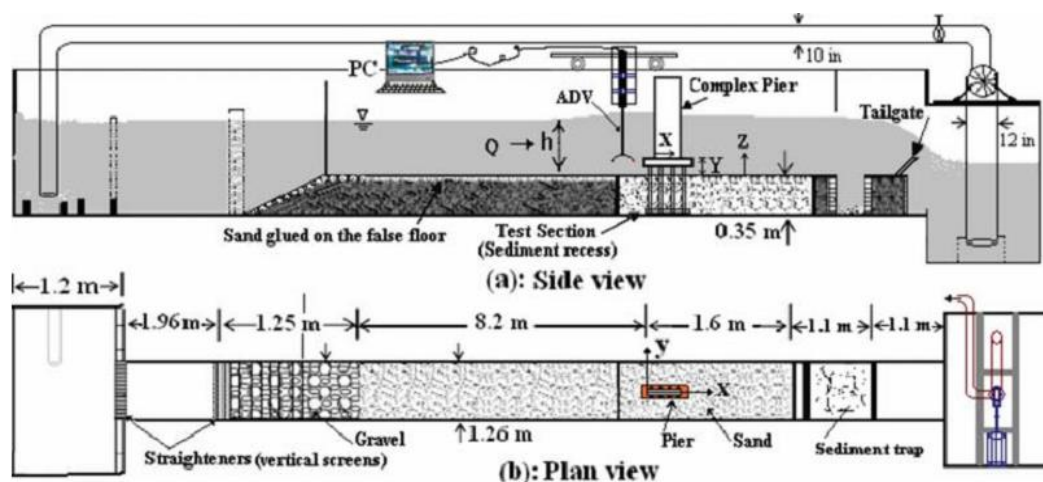
رابطه (۱) معادله پیوستگی با فرض تراکم ناپذیری جریان را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial a_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

که a_i : به‌ازای $i=1, 2, 3$ به ترتیب مؤلفه‌های سرعت u ، v و w در راستای x_i یعنی x ، y و z هستند.

معادله اندازه حرکت با فرض ثابت بودن ویژگی‌های سیال در امتداد محور x ها براساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

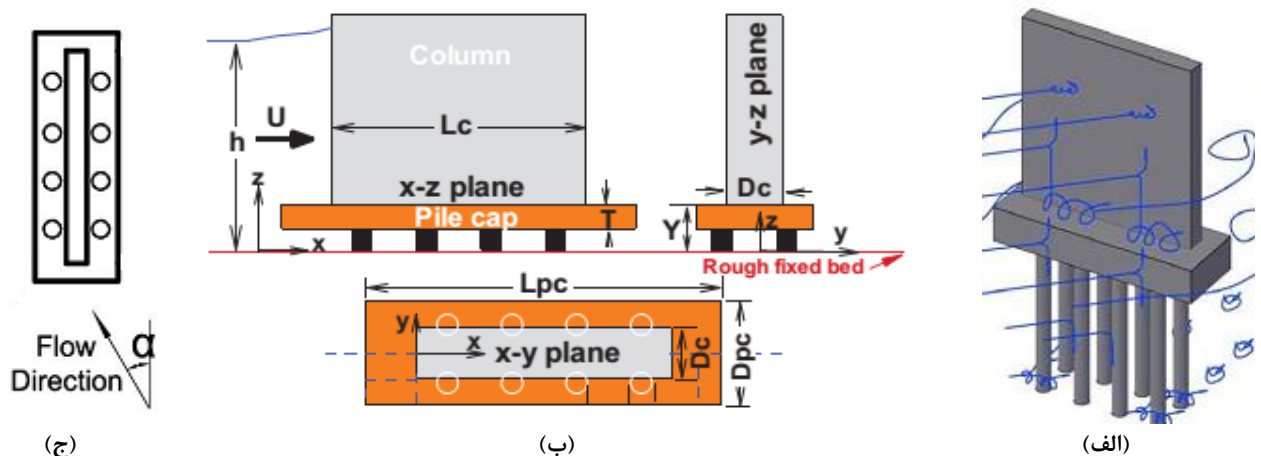
$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial a_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial a_i}{\partial x_j} + \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\tau_{ij}}{\rho} \right] + \frac{\sigma_T K \gamma}{\rho} \frac{\partial \gamma}{\partial x_i} \quad (2)$$



شکل ۲- طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۹): (a) مقطع طولی؛ و (b) پلان

سرشمع، L_c : طول ستون، D_c : عرض ستون، B_p : قطر هر پایه، G/B_p : فاصله پایه‌ها از هم، U : سرعت متوسط جریان در بالادست و h : عمق جریان است. Y : فاصله سرشمع تا کف کانال که ۶/۱۵ cm است، لذا ارتفاع پایه پل در زیر سرشمع ۲/۷۹ cm است.

در شکل ۳ هندسه پایه‌های پل، سرشمع و ستون نشان داده شده است. زاویه برخورد جریان با پایه‌ها صفر درجه است. مشخصات هندسی پایه‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۱، T : ضخامت سرشمع، L_{pc} : طول سرشمع، D_{pc} : عرض



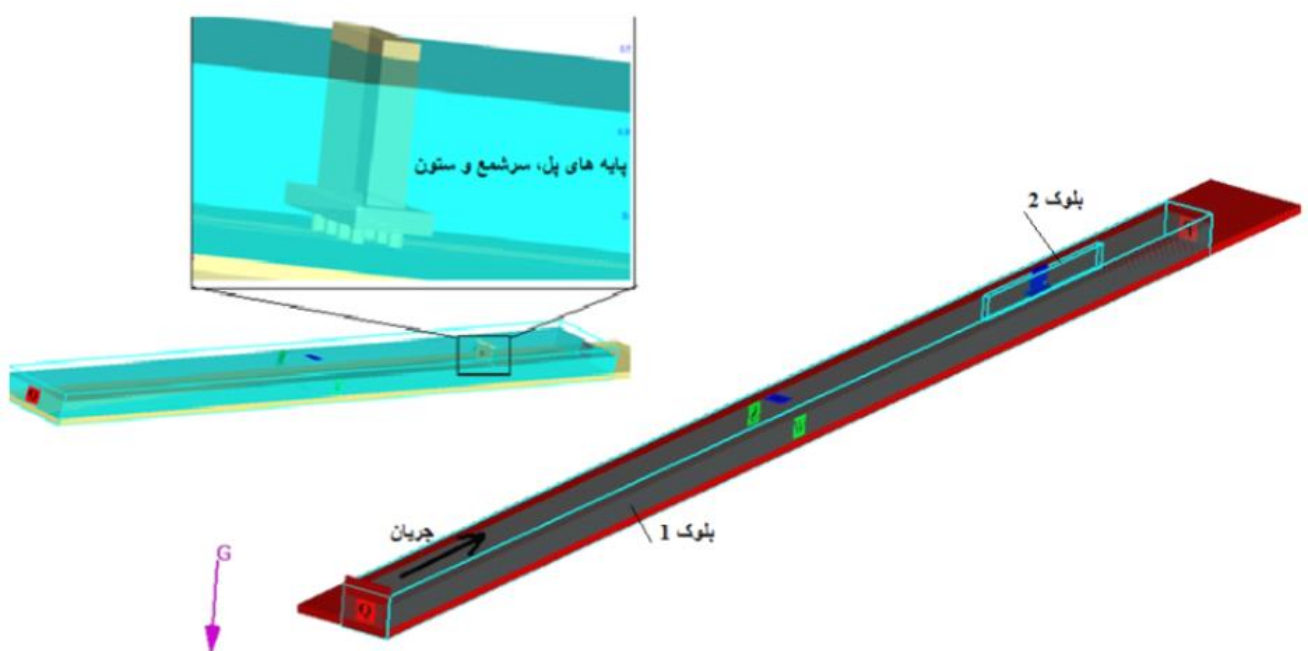
شکل ۳- پایه‌های پل مرکب با سرشمع و ستون: (الف) هندسه کلی؛ (ب) نمای طولی و پلان؛ و (ج) زاویه برخورد جریان با پایه‌ها (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹)

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹)

$n \times m$	G/bp	Bp (cm)	Y (cm)	T (cm)	Lpc (cm)	Dpc (cm)	Lc (cm)	Dc (cm)	U (ms^{-1})	h (cm)
۲×۴	۲	۲/۵۴	۶/۱۵	۳/۳۶	۴۲	۱۴	۳۰/۳	۶/۸	۰/۳۷	۲۸/۵۳

کانال برهم منطبق شد (به دلیل رعایت اختصار از ارائه جزئیات خودداری شده است). لذا در شبیه‌سازی کانال دارای پایه‌های پل، طول کانال قبل از پایه‌ها ۱۵ متر در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی مدل عددی، دو بلوک شبکه تو در تو^۳ در نظر گرفته شد. بلوک اصلی کل هندسه مدل را دربرمی‌گیرد، درحالی‌که بلوک دوم به منظور تقویت شبکه‌بندی اطراف هندسه پایه پل با هدف بهبود وضوح هندسه پایه‌ها و اجتناب از افزایش قابل توجه تعداد سلول‌های شبکه‌بندی به کار گرفته شد.

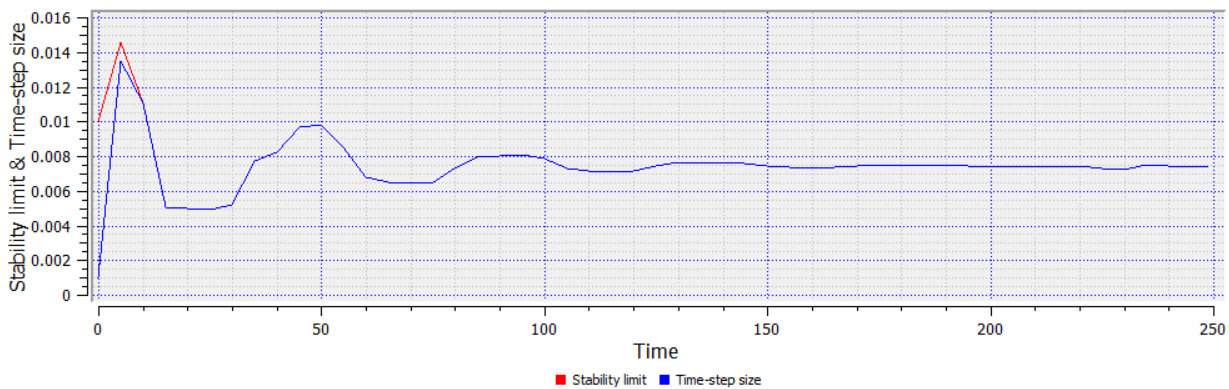
به منظور شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌ها، هندسه پایه‌های مرکب مدل آزمایشگاهی در اتوکد ترسیم شد و به صورت فایلی با پسوند stl به Flow3d فراخوانی شد. شکل ۴ هندسه کانال و پایه‌ها در مدل عددی را نشان می‌دهد. ابتدا به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان قبل از رسیدن به گروه پایه‌ها، یک کانال ساده بدون در نظر گرفتن پایه‌های پل به طول ۲۰ متر برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد و پروفیل‌های بدون بعد شده سرعت جریان در فواصل طولی مختلف از ابتدای کانال با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد پروفیل بی‌بعد سرعت در فواصل ۱۲ و ۱۴ متری از ابتدای



شکل ۴- هندسه پایه‌های پیچیده و شرایط مرزی در مدل عددی

در نظر گرفتن فشار اتمسفر روی سطح آزاد استفاده شد. برای بلوک دوم که در محدوده اطراف پایه‌ها است از شرط مرزی تقارن استفاده شد. در بخش تنظیمات مدل عددی، برای حل جملات آشفتگی در معادلات حاکم بر جریان از مدل آشفتگی RNG که در جریان‌های دارای جدایی از مرزها و جریان‌های چرخشی عملکرد بهتری از مدل k-ε دارد (Omara and Tawfik, 2018; Sicilian et al., 1987;) رستم‌آبادی و کاظمی، (۱۴۰۱) استفاده شد. بیشینه زمان شبیه‌سازی ۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در شکل ۵ نمودار همگرایی مدل عددی نشان داده شده است. براساس شکل ۵، مدل عددی پس از حدود ۲۴۰ ثانیه به پایداری رسید و حل معادلات جریان متوقف شد. زمان اجرای مدل حدود ۱۲ ساعت طول کشید.

لازم است با انتخاب گام زمانی کوچک، استفاده از ضرایب زیرتخفیف مناسب و شرط مرزی مناسب بین دو بلوک، مانع از ناپایداری مدل عددی در مراحل اولیه شبیه‌سازی شد. نکته مهم دیگر در استفاده از شبکه‌های تودرتو، رعایت نسبت اندازه سلول‌های دو شبکه روی هم است که این نسبت نباید بیش‌تر از ۲ باشد؛ یعنی اندازه سلول‌های شبکه درشت‌تر، نمی‌تواند بیش‌تر از دو برابر اندازه سلول‌های شبکه ریزتر باشد؛ در غیر این صورت منجر به ناپایداری مدل عددی خواهد شد. شرایط مرزی به کار گرفته شده در مدل حاضر نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. در بالادست کانال از شرط مرزی دبی، در خروجی کانال شرط مرزی فشار معادل با عمق پایاب، برای دیواره‌های جانبی شرط مرزی دیواره و برای کف از شرط مرزی دیواره با زبری مشخص معادل با مقدار آزمایشگاهی و در نهایت برای مرز مشترک آب و هوا شرط مرزی تقارن برای



شکل ۵- نمودار همگرایی مدل عددی در شبیه‌سازی الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب (برگرفته از Flow3D)

جریان تحت تأثیر پایه‌ها نیست و جریان یکنواخت است. پروفیل سرعت مستقل از اندازه سلول‌های شبکه شده است. در مقطع پایین دست پایه‌ها ($x/D_c = 14.7$)، تفاوت زیادی بین نتایج شبکه‌بندی ۱ با دو شبکه دیگر وجود دارد، اما با تغییر شبکه‌بندی از ۲ به ۳، تغییر قابل توجهی در نتایج خروجی از شبیه‌سازی اتفاق نیفتاده است و نتایج نزدیک به یکدیگر هستند. مقدار کمی خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی (مقدار آزمایشگاهی منهای مقدار عددی تقسیم بر مقدار آزمایشگاهی) محاسبه و متوسط آن در جدول ۲ ارائه شده است.

در هر شبیه‌سازی عددی لازم است نتایج شبیه‌سازی مستقل از شبکه محاسباتی به دست آید. بدین منظور مشخصات سه شبکه‌بندی متفاوت به شرح جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه شبکه‌بندی‌های مذکور، مؤلفه افقی سرعت در راستای قائم در دو مقطع بالادست و پایین دست پایه‌های پل در شکل ۶ ترسیم شده است. در این شکل D_c عرض ستون و x فاصله طولی از شروع ستون (مطابق شکل ۳) است. در مقطع بالادست پایه‌ها ($x/D_c = -14.7$) پروفیل‌های سرعت در شبکه‌بندی ۱، ۲ و ۳ کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند. در واقع در بالادست پایه‌ها که الگوی

جدول ۲- مشخصات شبکه‌های محاسباتی برای بررسی نتایج مستقل از شبکه

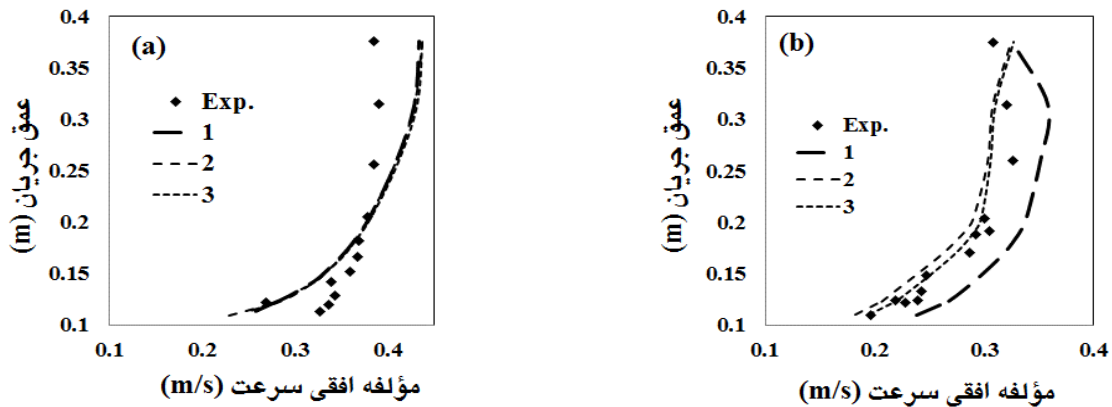
شماره شبکه	اندازه سلول شبکه در بلوک‌های ۱ و ۲ (متر)	تعداد کل سلول‌ها	زمان محاسباتی	درصد خطا
۱	۰/۰۲۵ و ۰/۱۲۵	۳۸۸۱۰۰	۲ ساعت و ۲۱ دقیقه	۱۳/۶
۲	۰/۰۲۱ و ۰/۱۰۵	۶۸۸۴۸۲	۴ ساعت	۶/۹
۳	۰/۰۱۸۵ و ۰/۰۹۲۵	۹۲۷۹۷۶	۷ ساعت و ۳۳ دقیقه	۳/۶

حدود ۳ درصد بهبود داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل عددی تحت تأثیر اندازه سلول شبکه‌بندی ۲ و ۳ قرار

نرخ کاهش خطای شبکه‌های محاسباتی بین شبکه ۱ با ۲ بیش‌تر از شبکه ۲ با ۳ است و با تغییر شبکه از ۲ به ۳، خطاها

متری بالادست لبه سرشمع قرار گرفته است. مطابق شکل ۷ به‌طور کلی روند نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی یکی است. در فاصله‌های ۰/۵ متری و ۱ متری بالادست سرشمع، پروفیل‌های سرعت طولی در مدل عددی و آزمایشگاهی انطباق بسیار خوبی دارند. در مقطع $x/Dc = -0/86$ یعنی در فاصله ۵ سانتی‌متری بالادست سرشمع نیز انطباق بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در این مقطع در مدل آزمایشگاهی فقط در ترازهای بالاتر از سرشمع مؤلفه سرعت برداشت شده بود. لذا امکان مقایسه پروفیل سرعت از تراز سرشمع تا نزدیکی بستر وجود نداشت و فقط نتایج مدل عددی نشان داده شده است.

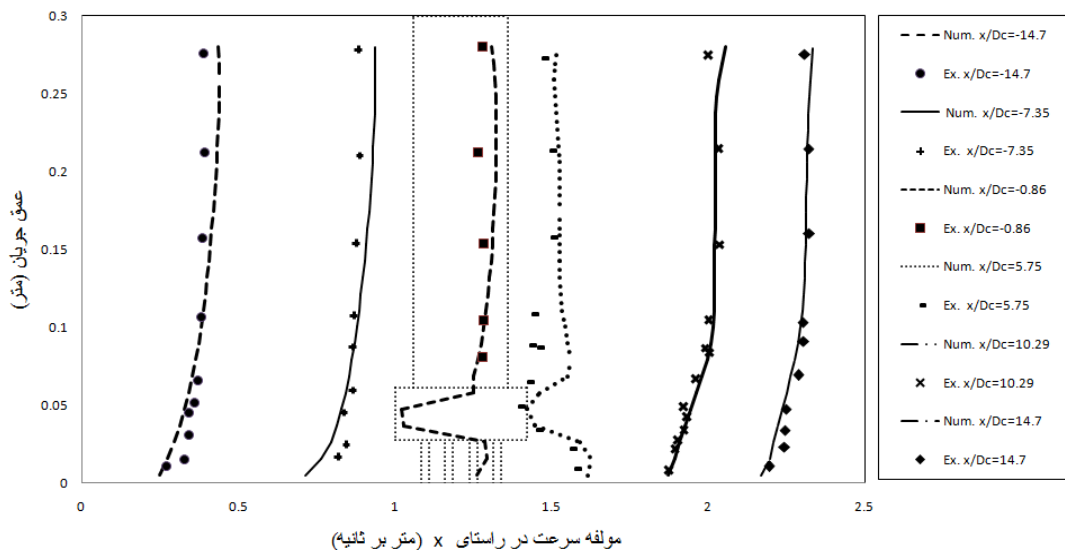
نمی‌گیرد. از طرفی زمان اجرای شبیه‌سازی در شبکه ۳ حدود ۸۷ درصد نسبت به زمان شبیه‌سازی شبکه ۲ بیش‌تر شده است. لذا در این پژوهش برای شبیه‌سازی‌های بعدی، شبکه‌بندی ۲ در نظر گرفته شد. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، پروفیل‌های سرعت طولی مدل عددی برای مقاطع بالادست و پایین‌دست پایه‌های مرکب در خط مرکزی کانال با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه و در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل موقعیت پایه‌ها، سرشمع و ستون نیز نشان داده شده است. پروفیل‌ها در x/Dc ‌های متفاوت ترسیم شده است. Dc : عرض ستون و معادل $6/8$ سانتی‌متر است. لذا $x/Dc = -14/7$ یعنی مقطعی که به فاصله یک



شکل ۶- بررسی نتایج مستقل از شبکه: (a) ۱ متری بالادست پایه‌ها؛ و (b) ۱ متری پایین‌دست پایه‌ها

مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی در مقاطع شکل ۷ به‌ترتیب از چپ به راست برابر $0/26$ ، $0/29$ ، $0/25$ ، $0/38$ ، $0/115$ و $0/115$ است. با توجه به دقت قابل قبول مدل عددی در پیش‌بینی سرعت طولی، نتایج مدل عددی در پیش‌بینی مکانیزم جریان اطراف پایه‌های پل با تغییر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

در پایین‌دست پایه‌ها نیز مدل عددی با دقت بسیار خوبی پروفیل سرعت طولی را پیش‌بینی نموده است. تنها مقطعی که پروفیل‌های سرعت عددی و آزمایشگاهی کمی اختلاف دارند، در لبه پایین‌دست ستون و در نزدیکی سرشمع است که می‌تواند به‌خاطر وجود جریان‌های گردابی در دنباله ستون و استفاده از مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای در شبیه‌سازی عددی باشد. بررسی کمی خطا با روش میانگین جذر مربعات نشان داد متوسط خطای



شکل ۷- مقایسه پروفیل سرعت طولی در مقاطع مختلف در مدل عددی و آزمایشگاهی (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹)

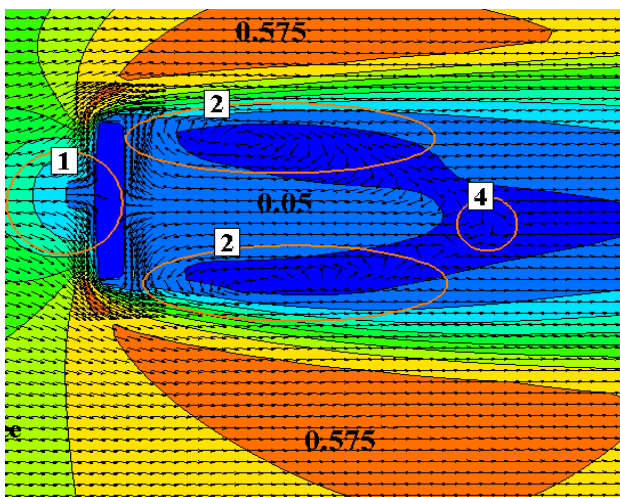
۳- نتایج و بحث‌ها

۳-۱- بررسی مکانیزم جریان با تغییر زاویه

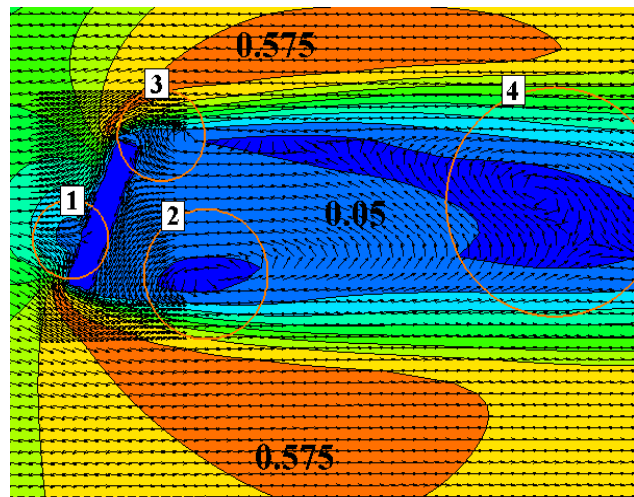
به‌منظور بررسی مکانیزم جریان، ابتدا بردارها و کانتورهای سرعت در ترازهای مختلف با تغییر زاویه مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸ بردارها و کانتورهای سرعت در نزدیک سطح آزاد (به‌فاصله ۹۰ درصد عمق جریان از بستر) و در شکل ۹ بردارها و کانتورهای سرعت در زیر سرشمع (به فاصله ۱۰ درصد عمق جریان از بستر) نشان داده شده است. مطابق شکل ۸-۸ در زاویه ۹۰ درجه، با برخورد جریان به ستون که مانند مانعی در مقابل جریان است، و انحراف متقارن جریان به دو طرف چپ و راست، ناحیه زینی در وسط طول ستون تشکیل می‌شود (این ناحیه با شماره ۱ در شکل نشان داده شده است). این ناحیه همان ناحیه سکون^۴ است که در آن با برخورد جریان به ستون و توقف جریان، سرعت تبدیل به فشار شده و ناحیه با سرعت کمینه را شکل می‌دهد. جریان منحرف شده به سمت چپ و راست به پشت ستون کشیده می‌شود و ناحیه گردابی را در هر دو

سمت چپ و راست به‌صورت متقارن به‌وجود می‌آورد. این ناحیه با شماره ۲ در شکل نشان داده شده است. در مرز دو ناحیه شماره ۲ و جریان پایین‌دست نیز ناحیه زینی دیگری شکل گرفته است که با شماره ۴ در شکل قابل مشاهده است.

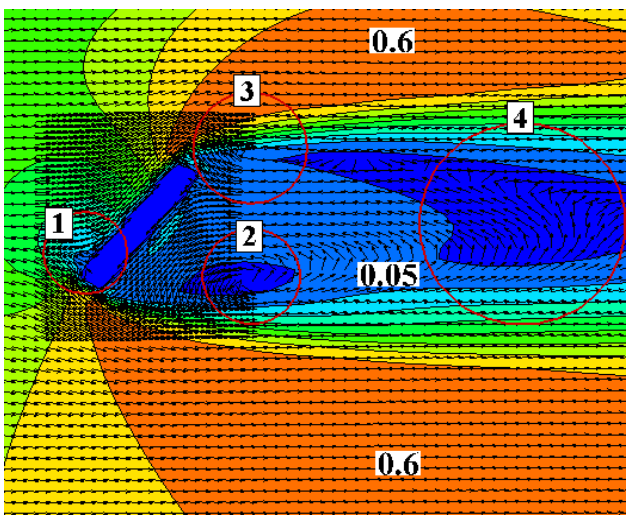
به‌ازای زوایای ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درجه، برای جریان برخوردکننده به ستون، چهار ناحیه در اطراف ستون قابل تفکیک است. مانند زاویه ۹۰ درجه، ناحیه ۱ در محل برخورد جریان با ستون است و پس از آن جریان به دو طرف راست و چپ منحرف می‌شود. ناحیه دوم که از گوشه سمت راست ستون شروع شده، همان جریان منحرف شده از ناحیه ۱ به سمت راست است که به سمت پشت ستون کشیده می‌شود و جریان گردابی را به‌وجود می‌آورد. این جریان با برخورد به پشت ستون به سمت چپ هدایت می‌شود و با جریان منحرف شده به سمت چپ ناحیه ۱ تلاقی می‌کند و مجدداً یک جریان گردابی به‌وجود می‌آید، در قسمت‌های مختلف شکل ۸ به نام ناحیه شماره ۳ نشان داده شده است.



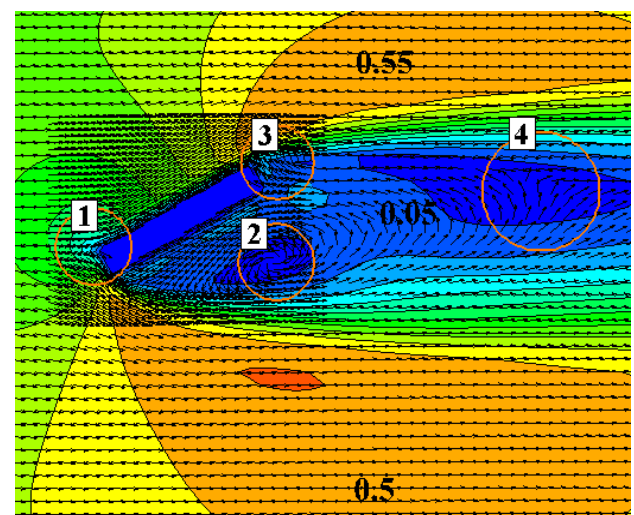
a) 90°



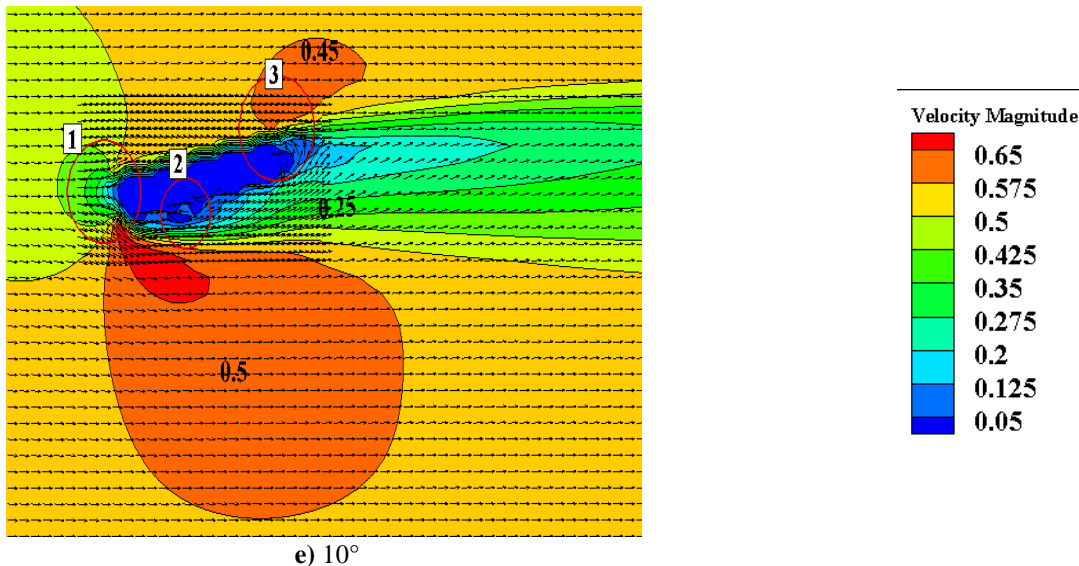
b) 70°



c) 50°



d) 30°

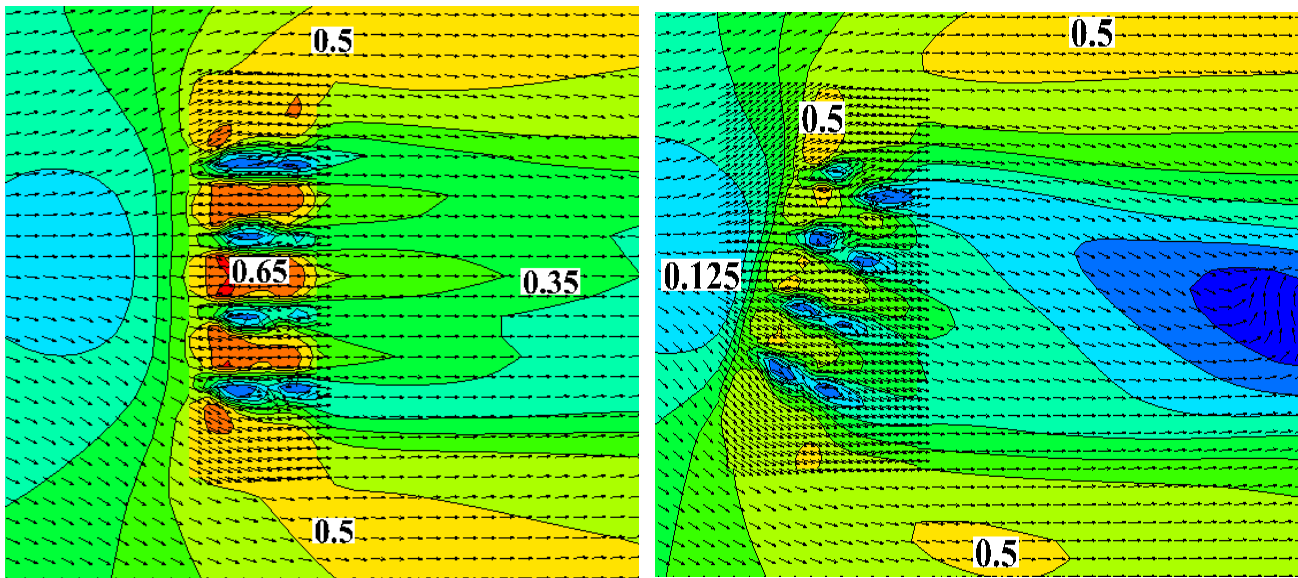


شکل ۸- بردارها و کانتورهای سرعت در نزدیک سطح آزاد

آبرفتی بیش‌ترین آب‌شستگی بین پایه‌های پل با زاویه ۹۰ درجه رخ دهد. از زاویه ۷۰ تا ۱۰ درجه در پایین‌دست پایه‌ها، ناحیه کم‌سرعت جریان مشاهده می‌شود که محل آن با کاهش زاویه، به پایه‌ها نزدیک‌تر شده است. در زاویه ۹۰ درجه این ناحیه کم‌سرعت دیده نمی‌شود. این قسمت می‌تواند در حالت بستر آبرفتی محل تجمع رسوب باشد.

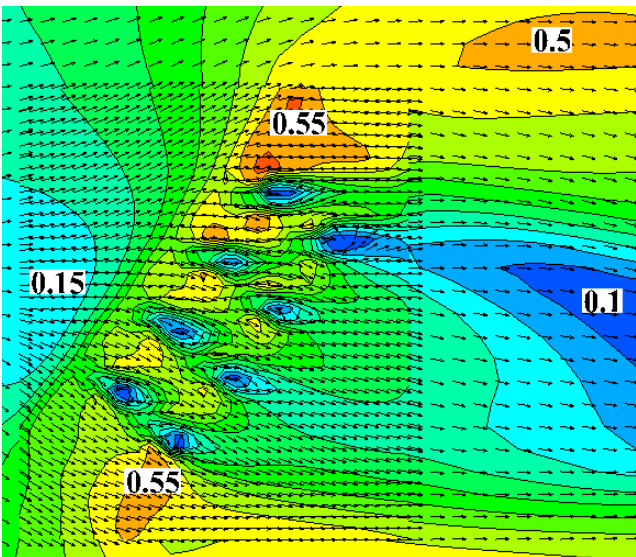
به‌منظور مقایسه کمی مقدار سرعت برآیند جریان برخوردی به هر پایه، در شکل ۱۰ تغییرات سرعت جریان برخورد کننده به هر پایه در زوایای مختلف نشان داده شده است. پایه‌های ردیف اول به ترتیب از سمت راست با شماره ۱ الی ۴ و پایه‌های ردیف دوم با شماره‌های ۵ الی ۸ نام‌گذاری شده‌اند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد در زاویه ۹۰ درجه، بیش‌ترین سرعت جریان در نزدیکی پایه‌های ۲ و ۳ رخ داده است؛ در پایه ۱ و ۴ سرعت جریان یکسان است. کم‌ترین مقدار سرعت جریان برخوردی مربوط به پایه ۸ در زاویه ۹۰ درجه است. به ازای زوایای ۱۰ تا ۷۰ درجه، سرعت جریان در پایه‌های ۱ و ۲ کم است و با پیشروی جریان به سمت پایه‌های ۳ و ۴، سرعت افزایش یافته است، اما از پایه ۴ به ۵ یعنی از ردیف اول به ردیف دوم، کاهش محسوس سرعت جریان نزدیک به پایه‌ها دیده می‌شود. در زوایای ۱۰ تا ۷۰ درجه، بیش‌ترین مقدار سرعت جریان مربوط به پایه شماره ۴ است. به‌طور کلی، همواره سرعت جریان در ردیف دوم پایه‌ها کم‌تر از ردیف اول است که نشان‌دهنده پدیده حفاظتی^۵ پایه‌های ردیف اول روی ردیف دوم است. در مطالعات Nazariha (1996) نشان داده شد برای پایه‌های در راستای جریان، پایه‌های آخری توسط پایه‌های بالادست حمایت می‌شوند که منجر به کاهش سرعت جریان برخوردی به آن‌ها و کاهش عمق آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پایین‌دست می‌شود.

در پایین‌دست ستون نیز مجدداً در مرز ناحیه ۲ و جریان پایین‌دست، ناحیه زینی شکل گرفته که با شماره ۴ نشان داده شده است. با کاهش زاویه از ۹۰ به ۱۰ درجه با توجه به تغییر محل برخورد جریان به ستون، محل ناحیه ۱ از وسط طول ستون به سمت راست ستون جابه‌جا شده است و به تبع آن ناحیه ۲ دارای سرعت کم‌تر و گردابه کوچک‌تری است که محدوده تحت‌تأثیر آن نیز محدودتر شده است. به‌طوری‌که در زاویه ۱۰ درجه ناحیه ۲ بسیار محدود است، اما در زاویه ۹۰ درجه محدوده وسیعی را در دو طرف ستون و به‌طور متقارن دربر گرفته است. به‌علت تقارن ناحیه ۲ در زاویه ۹۰ درجه، ناحیه ۳ وجود ندارد. هم‌چنین در زاویه ۱۰ درجه به‌دلیل محدود بودن ناحیه ۲، ناحیه ۴ دیده نمی‌شود. بررسی کانتور سرعت نشان می‌دهد، برخورد جریان به ستون و انحراف آن به طرفین، منجر به تشکیل ناحیه سکون با سرعت بسیار کم در محل برخورد جریان با ستون و ناحیه با سرعت زیاد در دو طرف ستون شده است. در پشت ستون که مانند مانعی در برابر جریان است ناحیه کم‌سرعت گسترده‌ای به‌وجود می‌آید که تا پایین‌دست کشیده شده است. با کاهش زاویه گسترده‌گی، ناحیه کم‌سرعت کاهش یافته و اختلاف سرعت بین ناحیه کم‌سرعت پشت ستون و ناحیه پرسرعت طرفین کم‌تر شده است. در شکل ۹ بررسی کانتورها و بردارهای سرعت در تراز زیر سرشمع نشان می‌دهد نواحی اشاره شده برای جریان برخوردکننده به ستون دیده نمی‌شود و فقط پایه‌ها مانند مانعی در برابر جریان هستند. جریان از لابلای پایه‌ها عبور می‌کند و تغییر زاویه پایه‌ها منجر به تغییر جهت جریان برخورد کننده به پایه‌ها شده است. بیش‌ترین سرعت جریان بین پایه‌های با زاویه ۹۰ درجه وجود دارد و با کاهش زاویه و تغییر مسیر جریان، سرعت جریان بین پایه‌ها کم شده است. لذا انتظار می‌رود در بستر

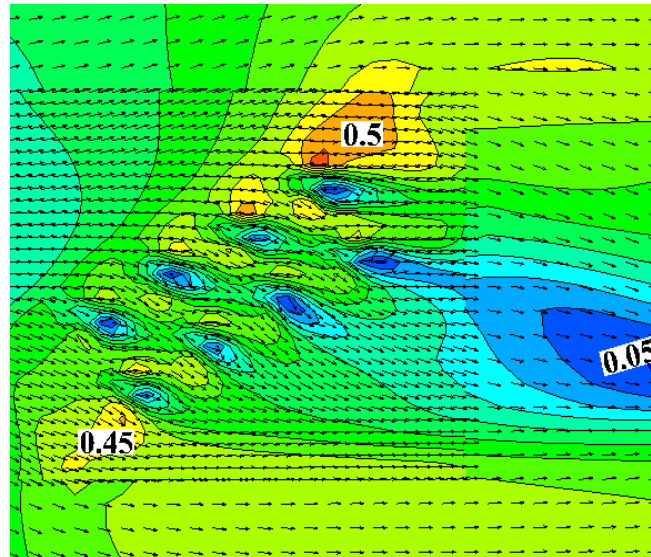


a) 90°

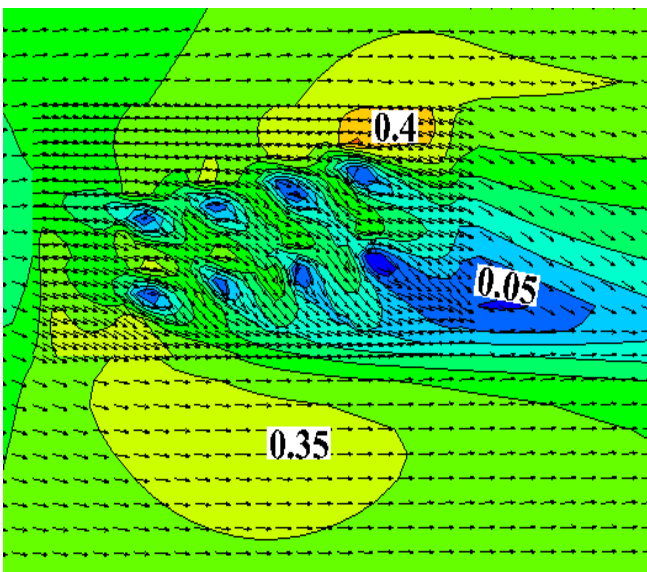
b) 70°



c) 50°

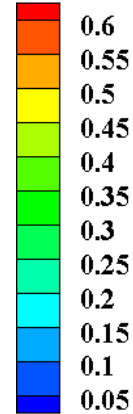


d) 30°

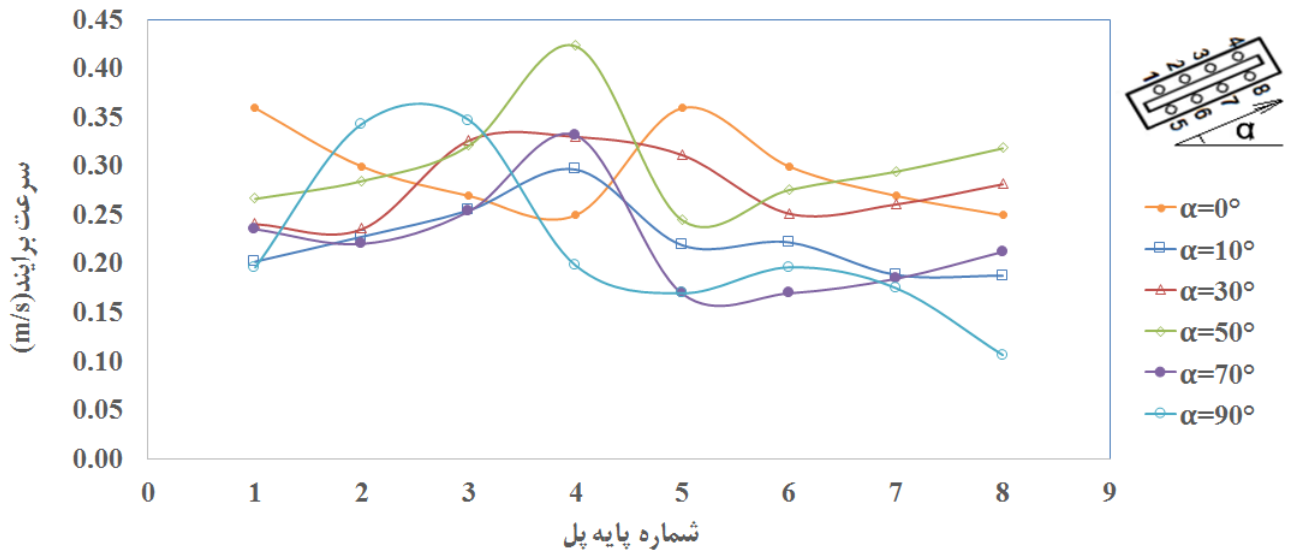


e) 10°

Velocity Magnitude



شکل ۹- بردارها و کانتورهای سرعت در زیر سرشمع

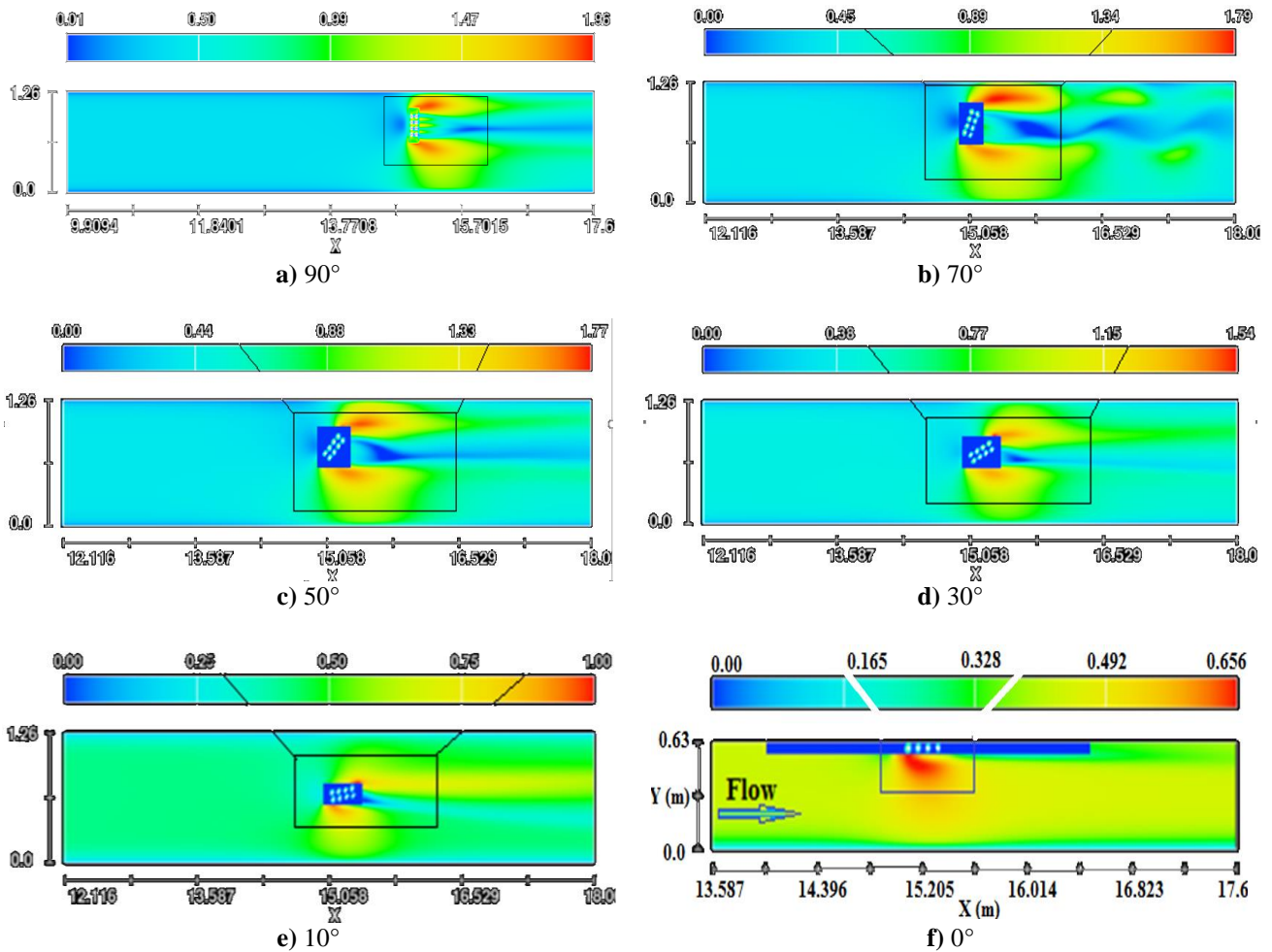


شکل ۱۰- تغییرات سرعت جریان نزدیک پایه‌ها

بستر، در شکل ۱۱ کانتورهای تنش برشی بستر نشان داده شده است.

۲-۳- بررسی تنش برشی کف

به منظور بررسی اثر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها بر تنش برشی



شکل ۱۱- کانتور تنش برشی بستر در زوایای متفاوت برخورد جریان به گروه پایه‌ها

در حالتی که بستر آبرفتی باشد، بیشترین آبشستگی در اطراف سرشمع رخ دهد و کناره‌های هر پایه کم‌تر از اطراف سرشمع دچار

به‌ازای زوایای مختلف، تنش برشی بستر در دو طرف سرشمع، بیش‌تر از تنش برشی بستر حول پایه‌ها است؛ لذا انتظار می‌رود

در شکل ۱۳ تغییرات تنش برشی بستر اطراف هر پایه با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه‌های مرکب نشان داده شده است. بیشترین تنش برشی بستر حول پایه‌های پل با زاویه برخورد ۹۰ درجه و کمترین آن به‌ازای زاویه ۱۰ درجه رخ داده است. پایه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ در معرض بیشترین تنش برشی بستر در زوایای مختلف هستند. جریان برخورد کننده به این پایه‌ها دارای سرعت بیشتری نسبت به پایه‌های ردیف بعدی است؛ لذا به‌ازای همه زاویه‌ها، پایه‌های ردیف دوم (پایه‌های شماره ۵ الی ۸) تنش برشی بستر کمتری نسبت به پایه‌های ردیف اول (پایه‌های شماره ۱ الی ۴) دارند. علت این مسئله همان پدیده حفاظتی پایه‌های بالادست روی پایه‌های پایین دست است که مانع برخورد جریان پرسرعت به پایه‌های پایین دست شده و تنش اطراف آن‌ها را کاهش می‌دهد. با افزایش زاویه برخورد جریان به پایه‌ها، اختلاف تنش برشی بستر ردیف اول با ردیف دوم، بیش‌تر شده است. بررسی کاهش تنش برشی بستر متوسط ردیف دوم نسبت به ردیف اول به‌ازای زوایای مختلف از ۱۰ تا ۹۰ درجه نشان داد به‌ازای زوایای ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه، نسبت تنش برشی بستر متوسط حول پایه‌های ردیف دوم به ترتیب ۴۵، ۵۵، ۵۷، ۵۸/۳ و ۵۸ درصد تنش برشی بستر متوسط حول پایه‌های ردیف اول است. به‌طور کلی چون تنش برشی بستر به ازای زاویه ۱۰ درجه کم‌تر از زوایای دیگر است، می‌توان نتیجه گرفت برای نصب پایه پل زاویه‌دار با جهت جریان، پایه‌های با زوایای کم‌تر با مسیر جریان در معرض تنش برشی بستر کم‌تری هستند و انتظار می‌رود در شرایط بستر آبرفتی، دچار آب‌شستگی کم‌تری شوند.

آب‌شستگی شود. علت بیش‌تر بودن تنش در اطراف سرشمع نسبت به پایه‌ها مانع بودن ستون و سرشمع در مقابل جریان و انحراف کامل جریان به طرفین است؛ درحالی‌که پایه‌ها ممانعت کم‌تری نسبت به سرشمع و ستون برای جریان ایجاد می‌کنند و سرعت اطراف آن‌ها کم‌تر از اطراف سرشمع است.

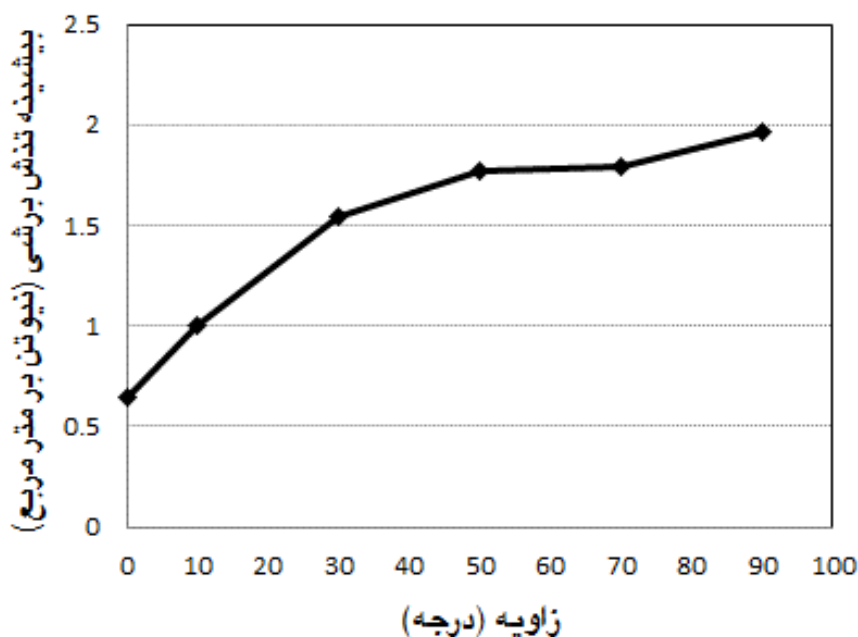
ناحیه با تنش برشی بستر بسیار کم در پایین دست پایه‌ها وجود دارد و با افزایش زاویه برخورد جریان با پایه‌ها، محل آن از پایه‌ها دورتر شده است و به پایین دست انتقال یافته است. علت دور شدن این ناحیه با افزایش زاویه، آن است که در زاویه‌های بیش‌تر، زاویه انحراف جریان نیز بیش‌تر خواهد بود و اتصال مجدد جریان دو طرف پایه‌ها در پایین دست در فاصله دورتری از پایه‌ها رخ می‌دهد. لذا انتظار می‌رود در حالتی که بستر آبرفتی باشد، آب‌شستگی پس از گروه پایه‌ها رخ ندهد و حتی این ناحیه کم سرعت و کم تنش، ناحیه‌ای برای تجمع رسوبات ایجاد شده باشد. به‌منظور مقایسه کمی مقدار تنش برشی بستر در کانال در حالت‌های مختلف زاویه گروه پایه‌ها، در شکل ۱۲ بیشینه تنش برشی بستر در کانال ترسیم شده است که با توجه به آن می‌توان نوشت:

الف) با افزایش زاویه نصب گروه پایه‌ها، تنش برشی بستر نیز افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که از زاویه ۱۰ تا ۹۰ درجه به ترتیب ۶۵، ۱۳۵، ۱۷۰، ۱۷۳ و ۲۰۲ درصد تنش برشی بستر نسبت به زاویه صفر درجه افزایش نشان داده است.

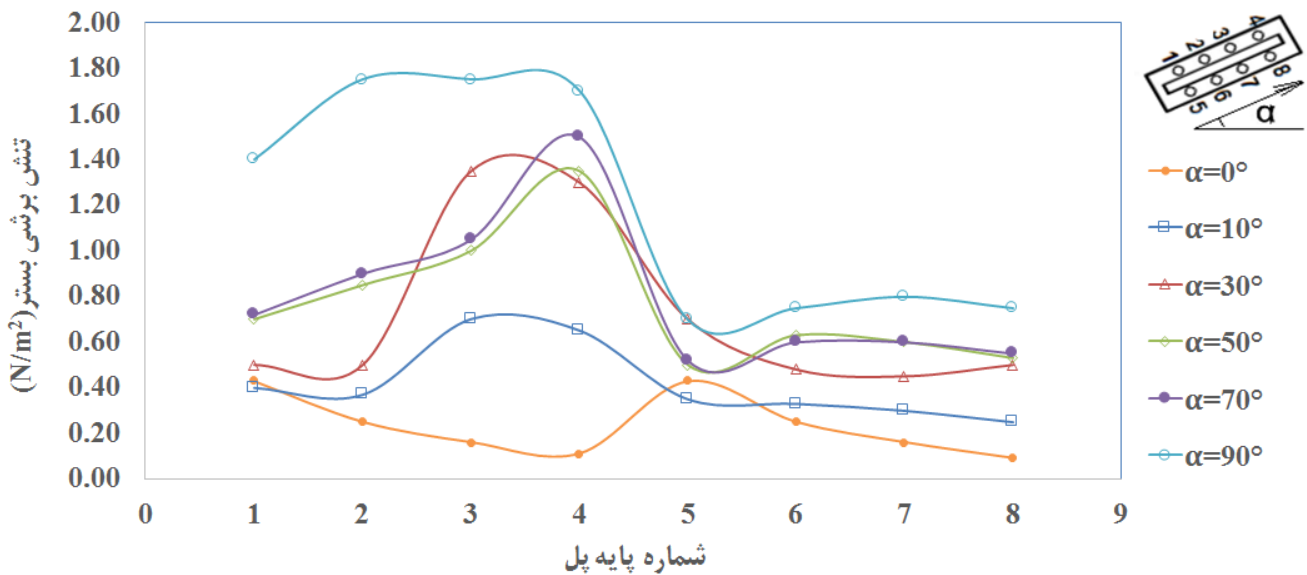
ب) از زاویه صفر درجه تا زاویه ۵۰ درجه، تغییرات بیشینه تنش برشی بستر بسیار زیاد و نمودار با شیب تند صعودی است.

ج) بیشینه تنش برشی بستر در زوایای ۵۰ و ۷۰ درجه بسیار

به هم نزدیک است.



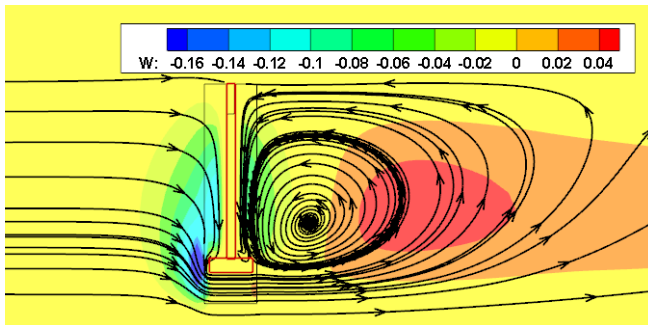
شکل ۱۲- تغییرات بیشینه تنش برشی بستر در کل کانال



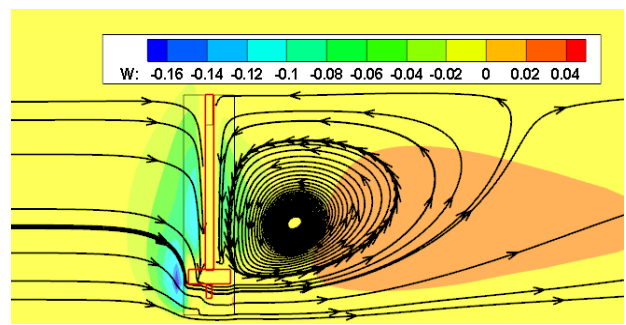
شکل ۱۳- تنش برشی بستر اطراف هر پایه با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه های مرکب

و مؤلفه عمودی سرعت مثبت است. این جریان منحرف شده به سمت سطح تحت تأثیر مکش پس از ستون قرار گرفته و منجر به تولید جریان گردابی حول محور عرضی در پایین دست ستون شده است. مطابق شکل ۱۴ بیشترین مقدار منفی مؤلفه عمودی سرعت مربوط به جریان پایین‌رونده زیر سرشمع است که در حالت بستر آبرفتی، می‌تواند منجر به آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل شود.

۳-۲-۱- بررسی میدان جریان اطراف پایه‌ها به ازای زاویه ۹۰ درجه به منظور بررسی بیش‌تر میدان جریان، در شکل ۱۴ در مقاطع طولی بین دو پایه مجاور (شکل ۱۴-الف) و در محل هر پایه (شکل ۱۴-ب) خطوط جریان و کانتورهای مؤلفه عمودی سرعت به‌ازای بیش‌ترین زاویه پایه (۹۰ درجه) نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴، در تراز بالای سرشمع، جریان با برخورد به ستون به سمت سرشمع و بستر منحرف می‌شود و لذا مؤلفه عمودی سرعت مقدار منفی دارد. پس از پایه‌ها، جریان به سمت سطح منحرف می‌شود



ب) در مقطع عرضی گذرنده از درون هر پایه



الف) در مقطع عرضی گذرنده از حد فاصل بین پایه‌ها

شکل ۱۴- تغییرات مؤلفه عمودی سرعت در برخورد جریان به پایه‌ها با زاویه ۹۰ درجه

- در نزدیکی سطح آزاد با برخورد جریان به ستون، چهار ناحیه در اطراف ستون قابل‌تفکیک است. ناحیه ۱ در محل برخورد جریان با ستون است. ناحیه دوم و سوم به‌ترتیب در گوشه سمت راست و چپ ستون هستند که دارای جریان گردابی هستند. در پایین‌دست ستون نیز در مرز ناحیه ۲ و جریان پایین‌دست، ناحیه زینی به‌نام ناحیه ۴ شکل گرفته است
- بررسی سرعت جریان در نزدیکی پایه‌ها نشان داد سرعت جریان بین پایه‌های با زاویه ۹۰ درجه بیش‌تر از زوایای دیگر است. بیش‌ترین

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر الگوی جریان اطراف پایه‌های پل مرکب با زوایای مختلف نسبت به جهت جریان با استفاده از مدل عددی Flow3D بررسی شد. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه‌های پل مرکب با ۵ زاویه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد:

مرکب"، دانش آب و خاک، ۲۶ (۲)، ۱-۱۲.

بهروزی، ز، حمیدی‌فر، ح، و زمردیان، م.ع.، (۱۴۰۰)، "شبیه‌سازی عددی سرعت جریان در اطراف پایه‌های پل تکی و دو قلو با چیدمان‌های مختلف با استفاده از مدل فلوئنت"، نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر، ۵۳(۹)، ۳۸۸۳-۳۸۹۶ <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18136.6777>.

خالدی، و.، امینی، ع.، و بهرامی، ج.، (۱۳۹۹)، "اثر شکل سرشمع در ابعاد حفره آب‌شستگی در پایه پل‌ها با هندسه مرکب"، پژوهش آب/ایران، ۱۴(۲)، ۱۰۱-۱۰۹.

محمدپور، ر.، تقی شاهبازی، ع.، سبزواری، ت.، و کرمی مقدم، م.، (۱۳۹۹)، "بررسی تغییرات زمانی آب‌شستگی در اطراف پایه‌های مرکب مستطیلی"، تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۱(۸۱)، ۲۵-۴۶. <https://doi.org/10.22092/idser.2021.341672.1424>.

Abadi, M.R., and Mohsenabadi, S.K., (2022), "Numerical study of the weir angle on the flow pattern and scour around the submerged weirs", *International Journal of Modern Physics C*, 33(08), 2250110. <https://doi.org/10.1142/S0129183122501108>.

Amini, A., Melville, B.W., Ali, T M., and Ghazli, A.H., (2012), "Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(2), 177-185, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000488](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000488).

Ata Amini, S., Mohammad, T.A., Aziz, A.A., Ghazali, A.H., and Huat, B.B., (2011), "A local scour prediction method for pile caps in complex piers", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 164(2), 73-80, Thomas Telford Ltd, <https://doi.org/10.1680/wama.900064>.

Beheshti, A.A., and Ataie-Ashtiani, B., (2010), "Experimental study of three-dimensional flow field around a complex bridge pier", *Journal of Engineering Mechanics*, 136(2), 143-154, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000073](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000073).

Ettema, R., Constantinescu, G., and Melville, B.W., (2017), "Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch", *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 03117006, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001330).

Ferraro, D., Tafarajnoruz, A., Gaudio, R., and Cardoso, A.H., (2013), "Effects of pile cap thickness on maximum scour depth at a complex pier", *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 482-491. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000704](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000704).

Flow Science Inc., (2016), *FLOW-3D V 11.2 user's manual*, Santa Fe, New Mexico.

Ghods, H., Najafzadeh, M., Khanjani, M.J., and Beheshti, A., (2021), "Effects of different geometric

تنش برشی بستر حول پایه‌های پل به‌ازای زاویه برخورد ۹۰ درجه و کم‌ترین آن به‌ازای زاویه برخورد ۱۰ درجه رخ داده است.

بررسی تغییرات سرعت جریان و تنش برشی بستر در نزدیکی هر پایه در زوایای مختلف نشان‌داد به‌علت پدیده حفاظتی پایه‌های ردیف اول روی ردیف دوم، همواره سرعت جریان و تنش برشی بستر در ردیف دوم پایه‌ها کم‌تر از ردیف اول است.

به‌ازای زوایای مختلف، بیشینه تنش برشی بستر در دو طرف سرشمع بیش‌تر از تنش برشی بستر حول پایه‌ها است؛ لذا انتظار می‌رود در شرایط آبرفتی، کناره‌های هر پایه کم‌تر از اطراف سرشمع دچار آب‌شستگی شود و پایداری گروه پایه‌ها بهتر حفظ شود. هم‌چنین ناحیه با تنش برشی بستر بسیار کم در پایین‌دست پایه‌ها وجود دارد که در شرایط بستر آبرفتی می‌تواند محلی برای تجمع رسوب باشد.

همواره مقدار بیشینه تنش برشی بستر اطراف پایه‌ها از بیشینه تنش برشی بستر در کل کانال کم‌تر است. این پدیده نشان می‌دهد با وجود سرشمع برای گروه پایه‌ها، بیشینه تنش برشی بستر اطراف پایه‌ها نسبت به تنش برشی بستر در کانال کم‌تر شده است؛ لذا انتظار می‌رود در حالت بستر آبرفتی آب‌شستگی اطراف پایه‌ها کم‌تر از آب‌شستگی کل کانال باشد که منجر به پایداری گروه پایه‌های پل می‌شود. به‌منظور تأیید یا رد این نتیجه، لازم است الگوی جریان اطراف گروه پایه‌ها بدون سرشمع شبیه‌سازی شود؛ لذا این امر می‌تواند به عنوان پیشنهادی برای ادامه کار مطرح شود.

۵- قدردانی

مقاله حاضر بخشی از طرح پژوهشی است که با حمایت مالی دانشگاه خوارزمی انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از دانشگاه خوارزمی اعلام می‌دارند.

۶- پی‌نوشت

- 1- Complex Bridge Pier
- 2- Large Eddy Simulation
- 3- Nested
- 4- Stagnation Point
- 5- Sheltering

۷- مراجع

اسدی پرتو، ا.، امینی، ع.، اقبال‌زاده، ا.، و جوان، م.، (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی عددی میدان جریان اطراف پایه پل با هندسه

- parameters of complex bridge piers on maximum scour depth: Experimental study”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 147(5), 04021021, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000645](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000645).
- Nazariha, M., (1996), “Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups”, Ph.D. Dissertation, University of Ottawa, Canada.
- Omara, H., and Tawfik, A., (2018), “Numerical study of local scour around bridge piers”, In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (151(1), 012013), IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/0>.
- Pourghasemzadeh, B., and Ghomeshi, M., (2022), “Experimental investigation of the angle effect of the cylindrical bridge group piers relative to the flow direction on the maximum scour depth of the piers”, *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), 131-145, <https://doi.org/10.22055/jise.2017.19147.1379>.
- Sheppard D.M., and Renna R., (2005), “Bridge scour manual”, Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida.
- Sheppard, D.M., Yang, Y., and Melville, B., (2023), “Method for estimating clear-water local scour rate at complex piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(10), 04023039, <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13656>.
- Sicilian, J.M., Hirt C.W., and Harper R.P., (1987), “FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers”, Report FSI-87-00-1, Flow Science. Los Alamos. NM, US.
- Yang, Y., Melville, B.W., Sheppard, D.M., and Shamseldin, A.Y., (2018), “Clear-water local scour at skewed complex bridge piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(6), 04018019, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001458).
- Yang, Y., Melville, B.W., Macky, G.H., and Shamseldin, A.Y., (2020), “Temporal evolution of clear-water local scour at aligned and skewed complex bridge piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(4), 04020026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001732](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001732).
- Yang, Y., Li, J., Zou, W., and Chen, B., (2023), “Numerical investigation of flow and scour around complex bridge piers in wind-wave-current conditions”, *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 23, <https://doi.org/10.3390/jmse12010023>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.