

مدل‌سازی عددی میدان جریان اطراف پایه پل با هندسه مرکب

اکرم اسدی پرتو^{1*}، عطا امینی²، افشین اقبال زاده³، میترا جوان³

تاریخ دریافت: 93/07/06 تاریخ پذیرش: 94/06/22

¹ کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران- آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

² استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سندج، کردستان

³ استادیار گروه مهندسی عمران- آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، مرکز تحقیقات پیشرفته آب و فاضلاب، دانشگاه رازی کرمانشاه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.asadiparto@gmail.com

چکیده

ایجاد و گسترش آبهستگی در پایه پل‌ها از عمده‌ترین عوامل آسیب و تخریب پل‌ها می‌باشند. شناخت فرآیند آبهستگی جهت پیش‌بینی نحوه ایجاد، گسترش و وضعیت نهایی گودال آبهستگی در اطراف پایه پل‌ها الزامی است. در دهه‌های اخیر استفاده از پایه‌های مرکب به جای پایه‌های ساده در ساخت پل‌ها، توسعه یافته است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، نحوه شکل‌گیری سرعت در اطراف پایه پل‌ها با هندسه مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی حاصل از این مدل با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهند که این مدل قابلیت پیش-بینی الگوی سه‌بعدی جریان را دارا می‌باشد و می‌تواند به صورت مؤثر درک بهتری از مطالعات آزمایشگاهی ارائه دهد. نتایج همچنین بیان‌گر پیچیده بودن جریان آشفته در نزدیکی سرشمع است، به طوری که این جریان‌ها به تمام جهات منحرف می‌شوند. بر خلاف تک پایه که سرعت بیشینه مثبت در طرفین پایه رخ می‌دهد، در پایه‌های با هندسه مرکب این سرعت در پایین‌تر از محل سرشمع و در مرکز پایه مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، پایه مرکب، شبیه‌سازی عددی، FLOW-3D

Numerical Modeling of Flow Field around Bridge Pier with Compound Geometry

A Asadi Parto ^{1,*}, A Amini ², A Eghbalzadeh ³, M Javan ³

Received: 28 September 2014 Accepted: 13 September 2015

¹ M.Sc. in Hydraulic Engineering, Dept. of Civil Eng., Faculty of Engineering, Razi University, Kermansha, Iran

² Assit. Prof., Kurdistan Agric., and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

³ Assit. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

*Corresponding Author, Email: a.asadiparto@gmail.com

Abstract

Scour generation and its development around bridge piers are the main causes of bridges damage and failure. Understanding the scour mechanism is essential to predict the scour and equilibrium scour hole status around bridge piers. In the recent decades, the use of compound bridge piers instead of the simple piers in construction of bridges, has been developed. In this study, using the FLOW-3D software, process of the formation and development of the scour around bridge pier with compound geometry has been investigated. Numerical results obtained from this model were compared with available experimental data. The results showed that this model had the capability to predict the three-dimensional flow field and could effectively provide a better understanding of the experimental studies. The results also indicated the complexity of turbulent flow near pile cap so that these flows were deflected in all directions. On contrary to the simple pier, in which the positive maximum velocity occurred in the sides of pier, in the case of piers with compound geometry this velocity occurred in the center of the pier and downstream of the pile cap.

Keywords: Compound pier, FLOW-3D, Flow pattern, Numerical simulation

مقدمه

توسعه می‌یابد (دی و همکاران 2008، ژاو و همکاران 2010). از این رو بعضاً، گروه شمع‌ها نیز در معرض جریان و آبشستگی قرار خواهند گرفت. امینی و همکاران (2010) گروه شمع‌ها را در دو حالتی که شمع‌ها مستغرق یا غیرمستغرق باشند، بررسی کرده و با منظور نمودن فاصله بین آن‌ها، روشی برای محاسبه آبشستگی گروه شمع‌ها ارائه کردند. رولاند و همکاران (2005) مکانیزم آبشستگی را برای گروه شمع‌ها با فواصل مختلف، تشریح کرده‌اند. بر طبق نتایج تحقیقات ایشان، آبشستگی اطراف گروه شمع به‌علت دو مکانیزم اتفاق می‌افتد: (1) مکانیزمی که باعث آبشستگی موضعی در پایه‌های منفرد می‌شود و (2) مکانیزمی که باعث آبشستگی عمومی به‌صورت سراسری در تمام ناحیه‌ای که گروه شمع قرار دارد، می‌شود (کاهش کلی ارتفاع بستر). چنانچه فاصله بین پایه‌ها کاهش یابد، حفره‌های آبشستگی در سرتاسر پایه‌های منفرد و در اطراف آن،

پایه پل با هندسه مرکب عموماً از گروه شمع، سرشمع و پایه اصلی تشکیل می‌شود که هر سه عضو پایه ممکن است در معرض جریان واقع شوند. پیش‌بینی نحوه ایجاد، گسترش و وضعیت نهایی گودال آبشستگی از مهمترین موارد در طراحی هیدرولیکی پل‌ها است (عطایی آشتیانی و بهشتی 2006). بر خلاف پایه‌های ساده، آبشستگی در پایه‌های با هندسه مرکب، کمتر بررسی شده است (شیپرد و گلاسر 2004، رولاند و همکاران 2005، عطایی آشتیانی و بهشتی 2006، امینی و همکاران 2010 و 2013). این سازه‌ها می‌توانند محدوده‌ای از شرایط بستر رودخانه و دریا که ممکن است در معرض آبشستگی قرار گیرند را تحمل کنند. در پایه‌های مرکب، در زمان ساخت، معمولاً سرشمع پایین‌تر از بستر روخانه قرار دارد. حال آنکه در اثر آبشستگی موضعی و عمومی، در طول زمان، حفره ایجاد شده در اطراف پایه عمیق شده و به زیر سرشمع

مواد و روش ها

معادلات حاکم بر جریان

در تحقیق حاضر از نرم افزار FLOW-3D به منظور شبیه سازی میدان جریان استفاده می شود. در این نرم افزار معادلات ناویراستوکس رینولدزی برای تحلیل سه بعدی در حالت سیال تراکم ناپذیر در دستگاه مختصات کارتزین (X,Y,Z) به صورت زیر می باشند:

$$V_F \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial (r u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial (r v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial (r w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} \quad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial (u A_x)}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + f_x \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial (v A_x)}{\partial x} + u A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + f_y \quad [3]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial (w A_x)}{\partial x} + u A_y \frac{\partial w}{\partial y} + v A_z \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z + f_z \quad [4]$$

که در آن (u, v, w) مولفه های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (g_x, g_y, g_z) شتاب جرمی و (f_x, f_y, f_z) شتاب لزجت در جهت های (X,Y,Z)، چگالی سیال، ρ R_{SOR} ترم چشمه، V_F کسری از حجم مرتبط با جریان و P فشار، می باشند.

روش حل معادلات حاکم

در نرم افزار FLOW-3D برای شبیه سازی میدان جریان، معادلات ناویراستوکس با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک شبکه جابه جا شده، حل می شوند. در شبیه سازی سطح آزاد از روش TruVOF استفاده شده است. در این روش با حل معادله جابه جایی زیر، F به عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه می شود:

[5]

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(\frac{\partial (F u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial (F v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial (F w A_z)}{\partial z} \right) = 0$$

در صورتی که F=0 باشد، سلول پر از هوا و در صورتی که F=1 باشد، سلول پر از آب می باشد. برای مدل سازی آشفتگی در تحقیق حاضر از مدل

ترکیب می شوند و یک حفره بزرگ آبشستگی را تشکیل می دهند. ریچاردسون و دیویس، (2001) و شیپرد و رنا (2005) روش هایی برای پیش بینی عمق آبشستگی در پایه پل های مرکب معرفی کرده اند. در این روش ها پیشنهاد شده است که عمق آبشستگی کل با روش برهم نهی 1 محاسبه شود.

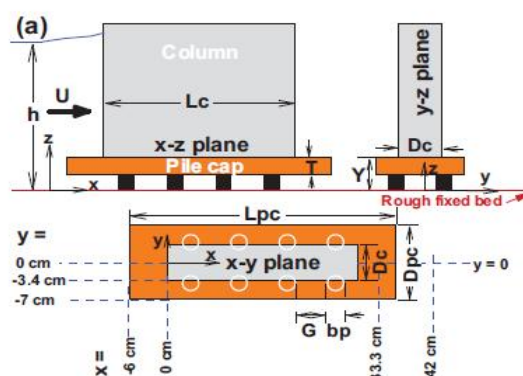
امینی و همکاران (2010) با انجام آزمایش هایی روی اجزای تشکیل دهنده پایه های مرکب و ترکیبی از این اجزاء از جمله دو ترکیب شامل سرشمع و ستون و نیز سرشمع، ستون و گروه شمع ها، نقش این اجزاء را در ایجاد آبشستگی در یک پایه مرکب بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که برای محدوده ای از نسبت قطر ستون به قطر سرشمع (Dc/Dpc)، با افزایش ارتفاع مدل از بستر اولیه، آبشستگی به طور قابل توجهی تغییر می کند. همچنین آن ها ضمن ارائه روشی برای محاسبه عمق آبشستگی توسط سرشمع به عنوان تأثیرگذارترین جزء یک پایه مرکب، عدم کارایی روش برهم نهی برای پیش بینی عمق آبشستگی را متذکر شده اند. علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، شبیه سازی های عددی نیز به منظور شناخت مکانیزم آبشستگی در پایه پل ها توسط محققین زیادی مورد استفاده قرار گرفته اند (پاسیوک و استیجر 2010، اسماعیلی و همکاران، 2009). اسدی و همکاران (1392) به بررسی الگوی جریان اطراف پایه های شکاف دار پرداختند که نتایج آن ها کارایی شبیه سازی عددی در شناخت الگوی جریان را در این گونه پایه ها نشان داد. هدف از این تحقیق استفاده از قابلیت نرم افزار FLOW-3D برای شبیه سازی جریان اطراف پایه های پل با هندسه مرکب به منظور پیش بینی میدان جریان در اطراف این پایه ها می باشد. نتایج این تحقیق می تواند با شناسایی الگوی جریان در اطراف این نوع پایه ها، منجر به درک بهتر مکانیزم آبشستگی در پل ها شده و به طراحی دقیق تر آن ها کمک نماید.

0/71 میلی‌متر پوشیده شده، استفاده کردند. جریان آب با دبی 134 لیتر بر ثانیه و 28/5 سانتی‌متر عمق و سرعت متوسط 0/37 متر بر ثانیه در کانال برقرار است. آزمایش‌ها در شرایط آستانه حرکت رسوبات نزدیک بستر انجام شده است، $u_b/u_{bc} \approx 1$ که u_b سرعت برشی بستر است و از نیمرخ سرعت اندازه‌گیری شده در بالادست جریان محاسبه می‌شود و $u_{bc} (= 0.14 \text{ ms}^{-1})$ سرعت برشی بحرانی مصالح بستر است که از روش پیشنهادی توسط بهشتی و عطایی آشتیانی (2008) محاسبه شده است. در مدل عددی با استفاده از سرعت برشی به‌عنوان ورودی، سطح بستر زبر در نظر گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی به‌صورت سه‌بعدی انجام شده است. شبکه‌بندی به صورت غیریکنواخت می‌باشند و مش‌ها در اطراف پایه‌ها ریزتر شده‌اند. شکل 1 جزئیات پایه با هندسه مرکب در حالی که سرشمع بالاتر از بستر اولیه قرار گرفته است، را نشان می‌دهد. مشخصات و پارامترهای پایه مرکب مورد استفاده نیز در جدول 1 آورده شده است.

آشفته‌گی $k-\epsilon$ RNG استفاده شده است. این مدل نسبت به مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد به ثابت‌های تجربی کمتری نیاز داشته و برای شبیه‌سازی نواحی دارای جداسدگی جریان، عملکرد بهتری نشان داده است (سیسیلیان و همکاران 1987). معادلات مربوط به این مدل در راهنمای نرم‌افزار FLOW-3D به‌طور کامل ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه جریان بالادست پایه پل توسعه یافته است، در شبیه‌سازی عددی ابتدا جریان در کانال باز بدون پایه به‌طول 20 متر مدل شد تا در انتهای کانال، نیمرخ سرعت جریان توسعه یافته ایجاد شود. سپس از این نیمرخ سرعت به‌عنوان شرط مرزی ورودی کانال با پایه پل استفاده شد.

میدان محاسباتی

در این تحقیق جهت صحت‌سنجی مدل عددی پایه‌های مرکب، از داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط عطایی آشتیانی و بهشتی (2010) استفاده شده است. مشخصات میدان حل در شبیه‌سازی عددی مشابه کار آزمایشگاهی است. آن‌ها از یک فلوم آزمایشگاهی به‌طول افقی 15 متر به‌عرض 1/254 متر و به‌ارتفاع 0/9 متر با بستری که از ماسه یکنواخت با اندازه متوسط



شکل 1- جزئیات پایه با هندسه مرکب استفاده شده در آزمایش‌های عطایی و همکاران (2010).

جدول 1- مشخصات پایه با هندسه مرکب.

n×m	G/b_p	(cm) b_p	Y(cm)	T(cm)	(cm) L_{pc}	D_{pc} (cm)	L_c (cm)	D_c (cm)
42	2	2/54	6/15	3/36	42	14	30/3	6/8

معادل در پایه مرکب می باشد و با روش پیشنهادی شپیرد و گلاسر (2004) محاسبه شده است. فاصله اولین سلول از دیوارها طوری انتخاب شد که از محاسبات در زیر ناحیه لزج اجتناب شود. برای این منظور اولین گره در محلی قرار داده شد که پارامتر بدون بعد y^+ که بر اساس رابطه 6 تعریف می شود، در محدوده 30 قرار گیرد (بی نام 2011).

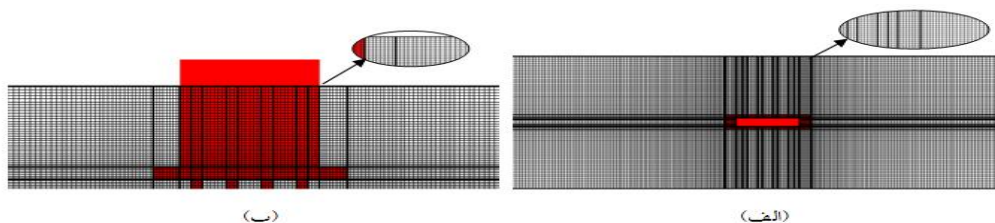
$$y^+ = \frac{y_p \cdot u_*}{\nu} \quad [6]$$

که در آن y_p فاصله اولین گره از دیواره در جهت عمود بر آن، u_* سرعت برشی دیواره و ν لزجت سینماتیکی می باشند. در جدول 2 تعداد مش های استفاده شده در شبیه سازی عددی آورده شده است.

جدول 2- تعداد سلول های مورد استفاده در شبیه سازی عددی.

تعداد سلول در راستای z	تعداد سلول در راستای y	تعداد سلول در راستای x	نوع شبکه بندی
50	90	400	غیریکنواخت

شبکه بندی که خطای نتایج آن نسبت به نتایج آزمایشگاهی کمتر باشد و مانع بهتر مدل شود، ملاک عمل قرار خواهد گرفت. سلول ها مستطیل شکل بوده و نسبت ابعاد دو سلول مجاور نباید از 1/2 بیشتر باشد.



شکل 2- شبکه بندی میدان محاسباتی: (الف) پلان، (ب) نمای عرضی.

برای مرز ورودی از سرعت ثابت، استفاده شده است. با استفاده از روش شروع مجدد برنامه² مدل برای

در جدول 1 D_{pc} قطر ستون، L_c طول ستون، D_{pe} قطر سر شمع، L_{pe} طول سر شمع، T ضخامت سر شمع، Y ارتفاع بالای سر شمع از بستر، b_p قطر شمع ها در فونداسیون، G فاصله بین شمع ها، n تعداد شمع های قرار گرفته در جهت عمود بر جریان و m تعداد شمع های قرار گرفته هم جهت با جریان می باشند. نسبت T/D_{pe} و D_{pe}/D_c ، L_c/D_c ، L_{pe}/D_{pe} در محدوده تحقیقات گذشته توسط کلمن (2005) استفاده شده است. شرایط لازم برای پایه های همگن استوانه ای $h/D \geq 2/3$ و $D/h_c \geq 10$ می باشد. با این فرضیات شرایط تعادل برای یک پایه با هندسه مرکب $h/D_c \geq 2/3$ و $D_c/d_c \geq 10$ می باشد که توسط ملویل و رادکیوی (1996) برای پایه های غیرهمگن استوانه ای به دست آورده شده است که $D_c (= 0.86 \text{ cm})$ قطر

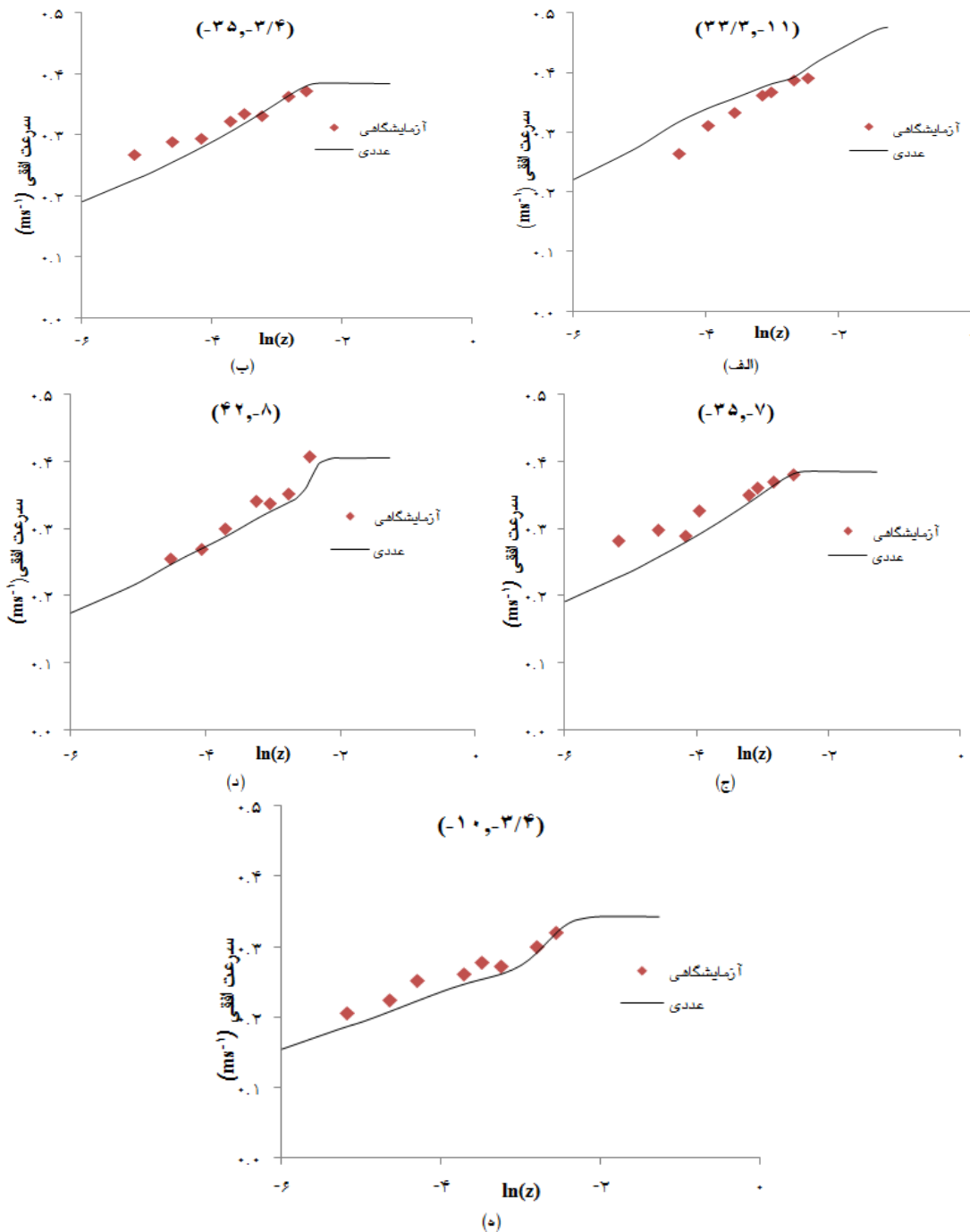
شرایط مرزی

برای ایجاد سرعت توسعه یافته، ابتدا کانال بدون پایه را مدل و اجرا کرده تا به حالت دائمی برسد. در این حالت

² Restart

ارتفاع آب 28/5 سانتی‌متر؛ در مرز فوقانی، شرط مرزی تقارن و در کف کانال و دیواره‌های اطراف آن از شرط مرزی دیواره استفاده شده است.

ادامه طول کانال با وجود پایه اجرا شده است. در این حالت، در مرز ورودی، برای انتقال داده‌های ورودی از کانال بدون پایه به این کانال، از شرط مرزی شبکه پوششی؛ در مرز خروجی، شرط مرزی فشار ثابت با



شکل 3- مقایسه عددی و آزمایشگاهی سرعت افقی در راستای طولی در نقاط مختلف اطراف پایه.

و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (u_{exp} - u_{num})^2}{N-1}} \quad [7]$$

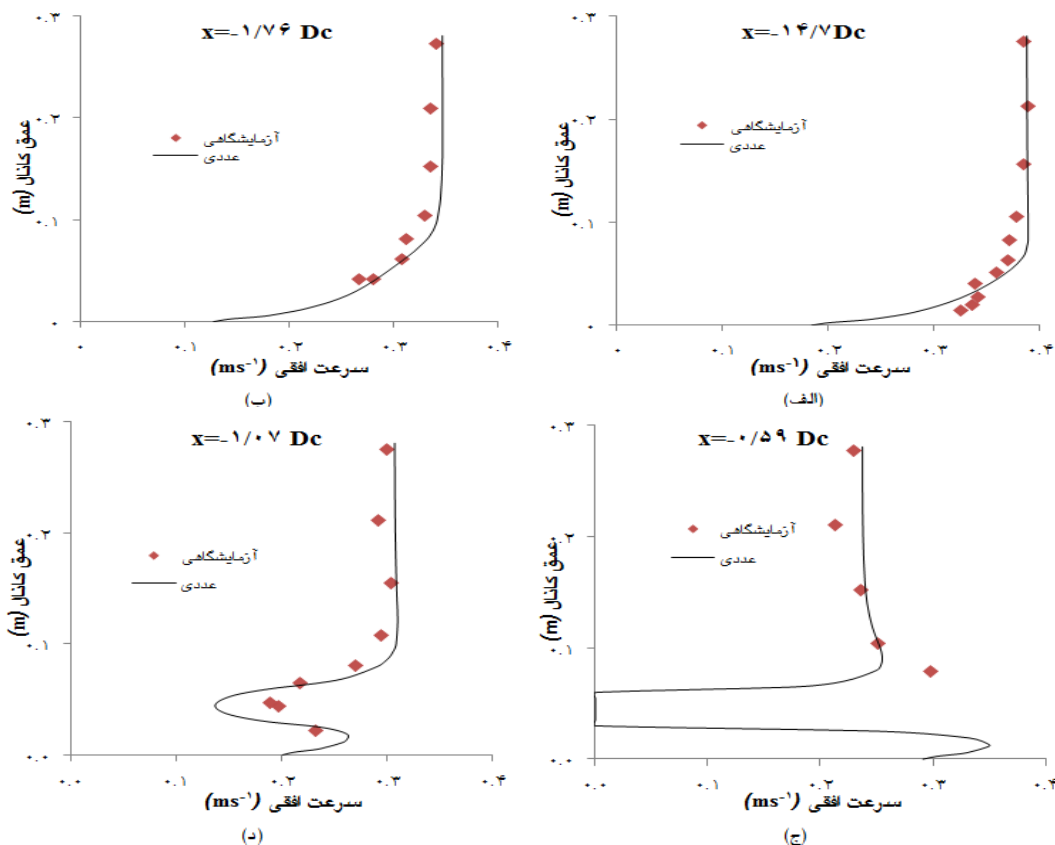
$$MAE = \frac{1}{N} \sum |u_{exp} - u_{num}| \quad [8]$$

که N تعداد نقاط و مقدار سرعت مربوط به کار آزمایشگاهی و مقدار سرعت مربوط به کار عددی می‌باشد. مقادیر خطاهای مربوط به این نمودارها نیز در جدول 3، آورده شده است. همان‌طور که مقادیر خطاها نشان می‌دهند تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در بالادست پایه مرکب برقرار می‌باشد. در پایین‌دست پایه مرکب، نسبت به بالادست پایه مقادیر خطاها افزایش یافته است. ولی در اطراف سرشمع نتایج عددی حاصل از مدل، دقت بیشتری را نشان می‌دهند.

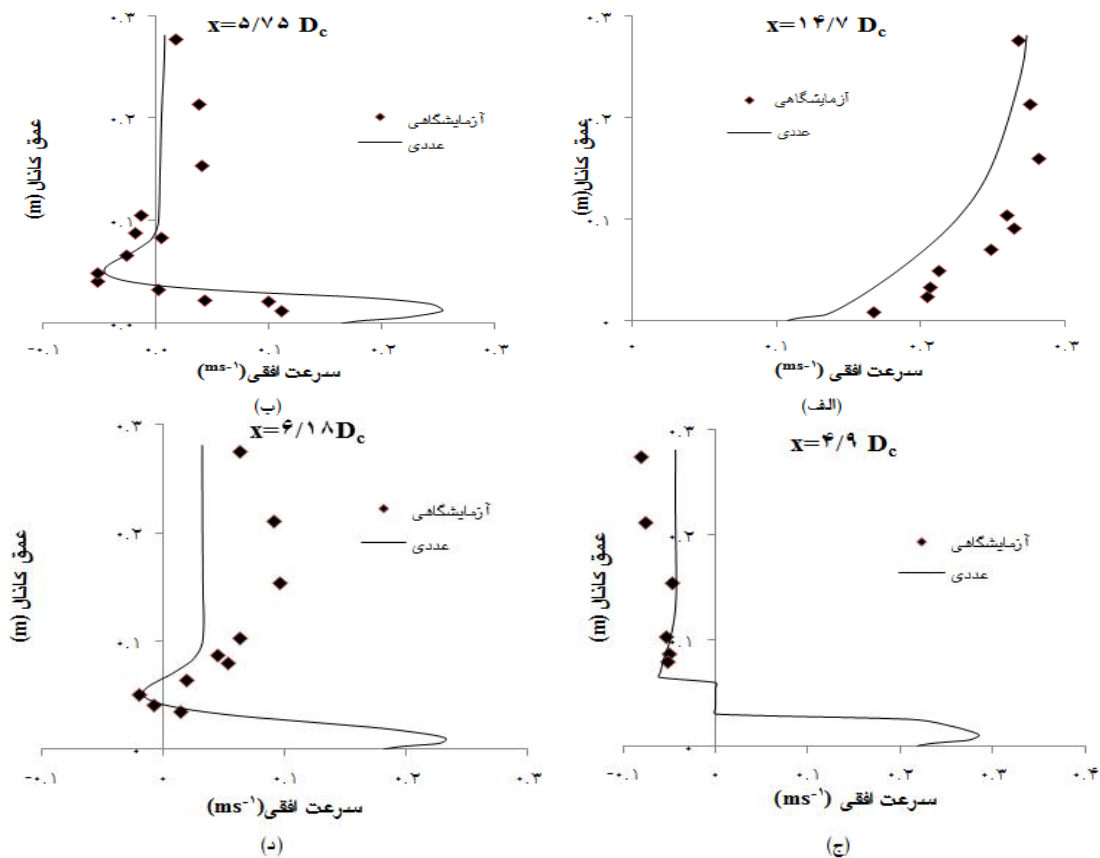
واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی

شکل 3 بررسی مقایسه عددی و آزمایشگاهی سرعت افقی در راستای طولی در نقاط مختلف اطراف پایه (شکل 1) شامل بالادست پایه، پایین‌دست پایه و سرشمع را نشان می‌دهد. شکل 3-الف و 3-د مربوط به پایین‌دست پایه و شکل‌های 3-ب، 3-ج و 3-ه مربوط به بالادست پایه می‌باشند. مقایسه عددی و آزمایشگاهی توزیع سرعت افقی در راستای قائم در بالادست و پایین‌دست پایه مرکب به ترتیب در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است.

در شکل‌های 3 و 4 اعداد داخل پرانتز مختصات نقطه‌ای است که سرعت آن‌ها مد نظر قرار گرفته است. شکل‌های 3 تا 5 بیانگر تطابق خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی است. به‌منظور مشخص نمودن دقت و کارایی مدل عددی به‌کار رفته در این تحقیق، مقادیر خطاها به دو روش جذرمیانگین مربعات خطا (RMSE)



شکل 4- مقایسه عددی و آزمایشگاهی سرعت افقی در راستای قائم در بالادست پایه با هندسه مرکب.



شکل 5- مقایسه عددی و آزمایشگاهی سرعت افقی در راستای قائم در پایین دست پایه مرکب.

جدول 3- خطاهای اندازه‌گیری شده در سرعت افقی.

راستای طولی اطراف پایه					
(42,-8)	(-10,-3.4)	(-35,-7)	(-35,-3.4)	(33,-11)	موقعیت نقاط
%1/9	%1/69	%14	%2/02	%1/7	RMSE
%1/6	%1/45	%2	%1/29	%1/5	MAE
راستای قائم در بالادست پایه					
X=14/7 D_c	X=1/79 D_c	X=0/59 D_c	X=1/07 D_c		موقعیت نقاط
%1/77	%1/11	%2/56	%3/1		RMSE
%1/36	%0/94	%1/75	%2/4		MAE
راستای قائم در پایین دست پایه					
X=14/7 D_c	X=6/18 D_c	x=5/75 D_c	X=4/9 D_c		موقعیت نقاط
%3/46	%3/6	%7/34	%2/1		RMSE
%3/19	%3/24	%5/02	%1/5		MAE

0/089، 0/0477، 0/0109 متر از بستر اندازه‌گیری شده‌اند. همان‌طور که از شکل پیداست، در صفحه زیر سرشمع (شکل 6-الف) جریان چرخشی در اطراف شمعه وجود دارد ولی اثری از گردابه‌ها مشاهده

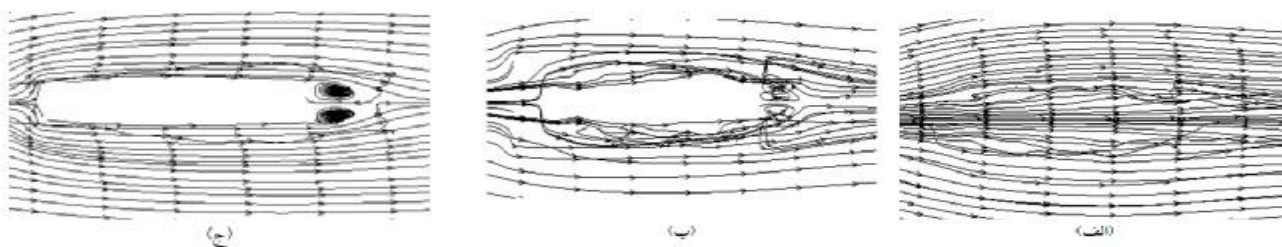
نتایج و بحث

پیش‌بینی الگوی جریان

شکل 6 خطوط جریان را در صفحه‌های زیر، وسط و بالای سرشمع نشان می‌دهد که به ترتیب در ارتفاع‌های

شده و در پایین‌دست ستون دو گردابه مشاهده می‌شود که به مفهوم افزایش قدرت گردابه‌های تشکیل شده در ارتفاع بالاتر است.

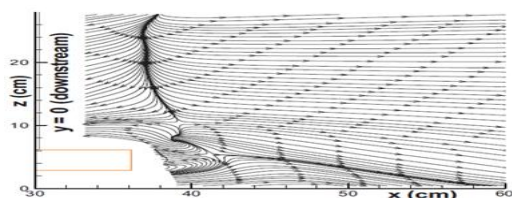
نمی‌شود. در صفحه وسط سرشمع (شکل 6-ب)، پیچیدگی جریان بیشتر شده و در پایین‌دست سرشمع (شکل 6-ج) دو گردابه تشکیل شده است. در صفحه بالای سرشمع، از پیچیدگی جریان اطراف ستون کاسته



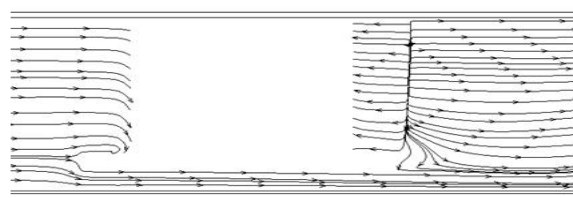
شکل 6- بررسی خطوط جریان در صفحه‌های: الف) زیر (1/09 سانتی‌متر)، ب) وسط (4/77 سانتی‌متر) و ج) بالای سرشمع (8/9 سانتی‌متری از بستر).

گردابه با جهات مختلف چرخش در بالاترین و پایین‌ترین گوشه‌های سرشمع مشاهده شده است. جریان برگشتی از پشت سرشمع به سمت بالا تقویت می‌شود که در نتیجه یک جریان ثانویه در پشت ستون ایجاد می‌شود.

شکل 7 مقایسه آزمایشگاهی و عددی خطوط جریان در مقطع $y=0$ را نشان می‌دهد. سرعت‌های اندازه‌گیری شده در اطراف پایه مرکب نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه مقدار سرعت در اطراف سرشمع در پایین‌دست لبه ستون در موقعیت $x=0$ اتفاق می‌افتد. همچنین دو



(ب)

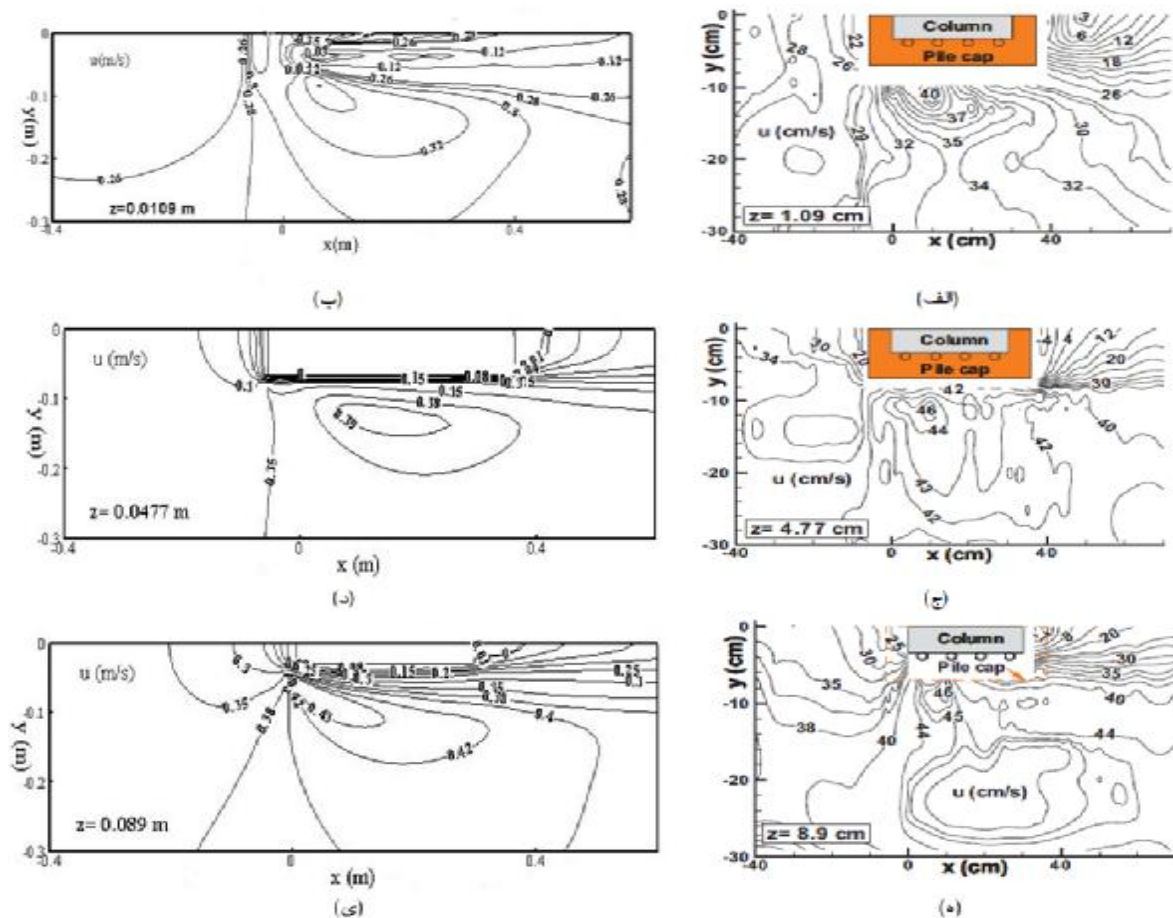


(الف)

شکل 7- بررسی خطوط جریان الف) عددی ($y=0$)، ب) آزمایشگاهی.

افزایش عمق کانال سرعت طولی افزایش می‌یابد. مقادیر بیشینه سرعت مثبت در صفحه بالای سرشمع، در اطراف سرشمع در پایین‌دست لبه ستون اتفاق می‌افتد که مقادیر آزمایشگاهی نیز این مطلب را تأیید می‌کند. در صفحه زیر سرشمع نزدیک بستر، جریان برگشتی (سرعت طولی منفی) دیده نمی‌شود.

شکل 8 مقایسه عددی و آزمایشگاهی کانتورهای مؤلفه سرعت طولی در صفحه‌های زیر، وسط و بالای سرشمع پایه مرکب را نشان می‌دهد. مقادیر آزمایشگاهی بر حسب سانتی‌متر و مقادیر عددی بر حسب متر می‌باشند. مقادیر خطاها در جدول 3 نشان می‌دهد که مقادیر عددی همخوانی خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. بررسی نتایج عددی نشان می‌دهد با



شکل 8- مقایسه عددی و آزمایشگاهی کانتورهای مؤلفه سرعت افقی در صفحه‌های زیر، وسط و بالای سرشمع.

رخ می‌دهد، در پایین‌دست سرشمع و در مرکز پایه مشاهده گردید.

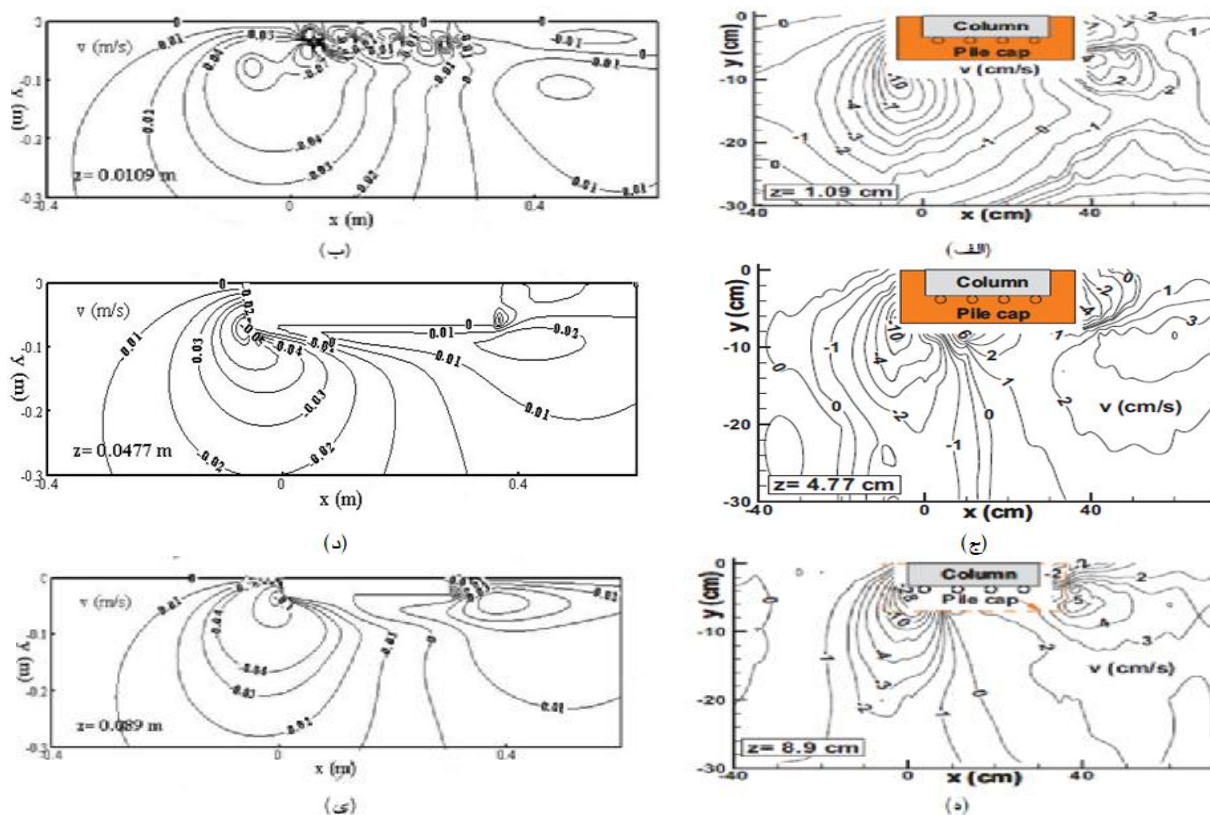
نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان اطراف پایه با هندسه مرکب به کمک نرم‌افزار FLOW-3D انجام شده است. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد:

- مقایسه عددی و آزمایشگاهی سرعت طولی در راستای عمود بر جریان، در نقاط مختلف اطراف پایه شامل بالادست و پایین‌دست پایه و سرشمع و در راستای قائم در بالادست پایه مرکب بررسی شده است. همان‌طور که مقادیر خطاها نشان می‌دهند تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در بالادست پایه مرکب وجود دارد. در پایین‌دست پایه مرکب، نسبت به بالادست پایه مقادیر خطاها افزایش یافته است. ولی در اطراف سر

شکل 9 مقایسه عددی و آزمایشگاهی کانتورهای مؤلفه سرعت (v) در صفحه‌های زیر، وسط و بالای سرشمع پایه مرکب را نشان می‌دهد. مقادیر آزمایشگاهی بر حسب سانتی‌متر و مقادیر عددی بر حسب متر می‌باشند. کانتورهای به‌دست آمده در کار عددی و مقایسه آن با کانتورهای کار آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقادیر عددی تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. بیشینه سرعت برگشتی (منفی) نزدیک لبه گوشه سرشمع برای صفحات زیر و وسط سرشمع می‌باشد و برای صفحه بالای سرشمع در بالادست گوشه ستون اتفاق می‌افتد. جریان رو به پایین تولید شده در بالادست گوشه‌ها، جریان برگشتی قوی در بالادست گوشه سرشمع و ستون ایجاد می‌کند. بیشینه سرعت مثبت بر خلاف تک‌پایه که در طرفین پایه و نزدیک جداره کانال

شمع نتایج عددی حاصل از مدل، دقت بیشتری را نشان می‌دهند.



شکل 9- مقایسه عددی و آزمایشگاهی کانتورهای سرعت مؤلفه v در صفحه‌های زیر، وسط و بالای سرشمع.

دارند که ناشی از شکل‌گیری جریان قوی در بالادست سرشمع می‌باشد.

- در مقایسه با پایه‌های ساده، جریان در نزدیکی سرشمع بسیار پیچیده است، چنان‌که جریان به جهت‌های مختلف منحرف شده و تشکیل جریانی بسیار آشفته و گردابه‌های مختلفی می‌دهند که در اطراف پایه‌های ساده مشاهده نشده است.

ایجاد حفره آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها نتیجه تداخل جریان آب با پایه و تغییر الگوی جریان است. در ساخت پل با پایه مرکب، ترکیب و ابعاد اجزای پایه (ستون، سرشمع و گروه پایه‌ها) باید به نحوی باشد که کمترین مقدار آبشستگی ایجاد نماید. در تحقیق حاضر مؤلفه‌های سرعت و الگوی جریان هنگام برخورد با پایه‌های مرکب بررسی گردید. نتایج حاصله می‌تواند منجر به شناخت مکانیسم

- سرعت‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند که بیشترین مقدار سرعت جریان در پایه با هندسه مرکب، در اطراف سرشمع در پایین‌دست لبه ستون ($x=0$) اتفاق می‌افتد.

- مقادیر کمینه سرعت در صفحه‌های زیرین و میانی سرشمع، در بالادست سرشمع اتفاق می‌افتد. در صفحه بالای سرشمع، این مقادیر در بالادست ستون تشکیل می‌شوند.

- برخورد جریان به پایه باعث می‌شود جریان روبه بالا در سرشمع با جریان رو به پایین در جلوی ستون ترکیب شده و یک جریان قوی و رو به پایین در اطراف سرشمع ایجاد شود.

- در پایین‌دست پایه و در صفحه زیر سرشمع، هیچ جریان برگشتی مشاهده نمی‌شود. در این محدوده، محل وقوع سرعت کمینه، فاصله یکسانی از پایه

می‌تواند با داده‌های بیشتر و نیز به‌منظور پیشنهاد بهترین ترکیب اجزای پایه‌های مرکب که کمترین آبخستگی را ایجاد نماید تکرار شود.

آبخستگی و به تبع آن طراحی مطمئن و مقرون به صرفه پل‌ها با این نوع پایه‌ها گردد. کمبود داده در مورد آبخستگی پایه‌های مرکب محدودیت‌هایی را در ساخت و اجرای مدل ایجاد کرد. این تحقیق

منابع مورد استفاده

- اسدی پرتو، اقبال زاده ا و جوان م، 1393. بررسی عددی اثر عرض شکاف بر الگوی جریان اطراف پایه پل. نشریه دانش آب و خاک، جلد 24، شماره 1، صفحه‌های 103 تا 114.
- Amini A, Melville BW, Thamer M and Ghazali H, 2013. Clear water local scour around pile groups in shallow water flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 138 (2): 177-185.
- Amini A, Mohd T, Ghazali H, Huat B and Aziz A, 2010. A local scour prediction method for pile cap in complex piers. *ICE-Water Management* 164: 73-80.
- Anonymous, 2011. FLOW 3D User's Manual. Version 10.0. Flow Science Inc. in the USA and other countries.
- Ataie-Ashtiani B and Beheshti AA, 2006. Experimental investigation of clear water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 132(10): 1100-1104.
- Ataie-Ashtiani B, Baratian Ghorghi Z and Beheshti AA, 2010. Experimental investigation of clear water local scour of compound piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 136 (6): 343-352.
- Beheshti AA and Ataie-Ashtiani B, 2008. Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement. *Coastal Engineering* 55(5): 423-430.
- Coleman SE, 2005. Clearwater local scour at complex pier. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 131 (4): 330-333.
- Dey S, Raikar RV and Roy A, 2008. Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 134(1): 105-109.
- Esmaili T, Dehghani AA, Zahiri AR, and Suzuki K, 2009. 3D Numerical simulation of scouring around bridge piers (Case Study: bridge 524 crosses the Tanana River). *World Academy of Science, Engineering and Technology* 58 (34): 1028-1032.
- Melville BW and Raudkivi AJ, 1996. Effects of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 122(4): 203-209.
- Pasiok R and Stilger-Szydlo E, 2010. Sediment particles and turbulent flow simulation around bridge piers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10(2): 66-79.
- Richardson EV and Davis SR, 2001. Evaluating scour at bridge. Federal Highway Administration. *Hydraulic Engineering Circular No.18, FHWA/NHI-01-001, FDOT, FL, US.*
- Roulund A, Sumer BM, Fredsøe J and Michelsen J, 2005. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics* 53(4): 351-401.
- Sheppard DM and Glasser T, 2004. Sediment scour at piers with complex geometries. *Proc. 2nd Int. Conf. on Scour and Erosion, World Scientific, Singapore.*
- Sheppard DM and Glasser T, 2004. Large scale clear-water local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 130(10): 957-963.
- Sheppard DM and Renna R, 2005. Bridge scour manual. Florida Department of transportation, FDOT. FL, US.
- Sicilian JM, Hirt CW and Harper RP, 1987. FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers. Report FSI-87-00-1, Flow Science. Los Alamos. NM, US.
- Zhao M, Cheng L and Zang Z, 2010. Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents. *Coastal Engineering* 57: 709-721.