

R. Sobhkhiz

Civil Engineering
Department, Engineering
Faculty, Islamic Azad
University of Lahijan

e-mail: sobhkhizarman@yahoo.co.uk

A. Mardookhpour*

Civil Engineering
Department, Engineering
Faculty, Islamic Azad
University of Lahijan

e-mail: alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

Numerical Simulation of the Effect of Pile Geometry and Foundation on Local Scour in Inclined Bridge Group Pier

In this research, due to the importance of identifying the mechanisms affecting the scouring on this types of bridge piers, the effect of the geometric shape of the piles installed under the inclined piers and also the effect of the pile cap leveling in the sedimentary bed have been investigated and the properties of the scouring around the inclined pier group was studied numerically using the FLOW-3D software. The study of total shear stress in the flow bed at different leveling of the pile caps shows that the highest shear stress is created when the pile cap position is at the same level as the river bed; by installing the pile cap at a lower level than the river bed, the maximum shear stress decreases. This may be due to the fact that in this case, the distance between the pier group increases and the presence of the second pier decreases the flow rate in the pier group and different pier in the one pier group acts as the two independent piers in the formation of the flow pattern. By comparing the final longitudinal sections of the scouring at different leveling of the pile cap, it is concluded that the largest reduction in scouring depth occurs in aerofoil-shaped pile caps and pile caps with the sharper nose and better aerodynamic shapes are good options to control the horseshoe vortices and will reduce the scouring depth around the inclined pier group.

Keywords: scouring hole, FLOW-3D software, bridge, pile; Numerical simulation.

* Corresponding author

Received 23 April 2019, Revised 21 August 2019, Accepted 30 August 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4278.1149

شبیه‌سازی عددی تأثیر هندسه شمع و فونداسیون بر روی آبشستگی موضعی در اطراف گروه‌پایه کج

با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال مدرنی می‌باشیم که از جمله آنها می‌توان به پل‌های با گروه‌پایه‌های کج اشاره کرد. با توجه به اهمیت شناخت مکانیزم‌های مؤثر بر آبشستگی این نوع از پایه‌های پل، در پژوهش حاضر به بررسی و شبیه‌سازی عددی تأثیر هندسه شمع و فونداسیون بر روی آبشستگی موضعی در اطراف گروه‌پایه کج با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. از طریق بررسی الگوی جریان اطراف گروه‌پایه‌ها مشخص گردید با تغییر تراز کارگذاری سرشمع در بستر رسوبی گردابه‌های تشکیل شده در بین پایه اول و دوم گروه‌پایه متفاوت بوده و هرچه تراز کارگذاری نزدیک به بستر و یا بالاتر از آن قرار گیرد، گردابه‌های تشکیل شده با قدرت بیشتری بر روی بستر اطراف گروه‌پایه کج تأثیر می‌گذارد. با بررسی پروفیل طولی آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج مشاهده گردید که شمع دوکی شکل نسبت به سایر شکل شمع‌ها اثر بهتری در کاهش آبشستگی از خود نشان می‌دهد. به طوری که، حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده در اطراف گروه‌پایه کج با حضور شکل دوکی شمع، مستطیلی و مستطیلی گردگوشه ۱۹/۶۱، ۱۴/۱۱ و ۶/۴۵ درصد نسبت به شکل استوانه‌ای شمع کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه اینکه، هرچه دماغه شمع آئرودینامیکی و تیز باشد، کنترل گرداب‌های نعل‌اسبی بهتر عمل می‌کند و این امر باعث کاهش عمق آبشستگی در اطراف گروه‌پایه کج می‌گردد.

واژگان کلیدی: پل‌ها، اثرات آبشستگی، شمع، نرم‌افزار Flow-3D، شبیه‌سازی عددی.

رامتین صبح خیز فومنی
کارشناس ارشد، دانشکده فنی
مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد لاهیجان.

پست الکترونیک:

Sobkhizarman@yahoo.co.uk

علیرضا مردوخ پور*

استادیار، دانشکده فنی مهندسی،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد
لاهیجان.

پست الکترونیک:

alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

۱- مقدمه

رودخانه‌ها، گردابه‌های پیچیده در اطراف پایه‌ها به وجود می‌آید که باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها شده که حفره آبشستگی نامیده می‌شود. توسعه این گودال در اطراف پایه‌ها و نفوذ به زیر پی سازه، تخریب پل را به دنبال خواهد داشت. دو عامل برخورد جریان به پایه و جدا شدن جریان از پایه پل، باعث ایجاد چنین گردابه‌هایی می‌شود. برخورد جریان به پایه پل، گردابه نعل‌اسبی را شکل داده و جدایی جریان از پایه سبب به وجود آمدن گردابه‌های برخاستگی می‌شود. در صورت کاربرد گروه‌پایه، مکانیزم‌های دیگری نیز در مقدار آبشستگی مؤثر هستند. مکانیزم‌های مؤثر در آبشستگی گروه‌پایه اثر تقویت کردن،

بحث آبشستگی قدمتی طولانی در علم هیدرولیک داشته و به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و هم‌چنین به جهت نبودن رابطه‌ای مناسب که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد، هم‌چنان مورد توجه خاص محققان علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه می‌باشد. با استقرار پایه‌های پل در مسیر جریان در

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸

(DOI): 10.22091/cer.2019.4278.1149 شناسه دیجیتال

اثر محافظت یا پناه دادن، گردابه‌های جاری و به‌هم‌فشرده‌گی گردابه‌های نعل اسبی می‌باشد [۱].
اثر تقویت کردن باعث افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی می‌شود. به‌علت وجود پایه پشتی، حفره‌های آبشستگی دو پایه ممکن است روی هم‌قرار گرفته و تراز بستر در پشت پایه جلویی پایین افتد. در نتیجه جریان به‌راحتی ذرات را از چاله آبشستگی پایه جلویی حرکت داده و عمق آبشستگی در جلو پایه عمیق‌تر می‌گردد [۲].

به‌جهت اهمیت مسأله آبشستگی اطراف پایه‌های پل، تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با پارامترهای اثرگذار بر آبشستگی انجام شده است. نتایج تحقیقات انجام‌شده در رابطه با تأثیر پارامترهای هندسی پایه نظیر قطر پایه و یکنواختی سطح مقطع نشان داد که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، بیشینه عمق آبشستگی تا $2/4$ برابر قطر پایه خواهد رسید [۲].

در شرایطی که سطح مقطع متفاوت باشد، نظیر شرایطی که پایه بر روی فونداسیون قرار گرفته است، بسته به تراز کارگذاری فونداسیون مقدار آبشستگی متفاوت می‌باشد [۲].

نتایج تحقیقات صورت‌گرفته حاکی از آن است برای شرایطی که فونداسیون در عمقی کمتر از بیشینه آبشستگی برای تک‌پایه قرار گیرد، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. علت این موضوع به کاهش سطح آبشستگی در عمق و در نتیجه عدم توانایی جریان برای تعریض چاله آبشستگی و تعمیق بیشتر وقتی که به فونداسیون می‌رسد، نسبت داده شد [۳].

همچنین در شرایطی که تراز کارگذاری فونداسیون بالاتر از بستر است، عمق آبشستگی نسبت به تک‌پایه افزایش می‌یابد [۴]. مطالعات انجام شده نشان داد که با کج‌شدگی پایه در صفحه موازی با جریان و به‌سمت بالادست، بر مقدار بیشینه آبشستگی افزوده

خواهد شد [۵]. مقایسه‌های انجام شده در خصوص تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج حاکی از آن است که مقدار آبشستگی در گروه‌پایه کج از حالت تک‌پایه بیشتر بوده که این موضوع به‌دلیل تأثیر توام دو پایه و نیز کج‌شدگی آن به‌سمت بالادست می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب پایه‌ها بر روی فونداسیونی که در زیر بستر و بالاتر از بیشینه عمق آبشستگی به‌ازای تک‌پایه قرار دارد، مقدار بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [۶]. در کنار مطالعه آبشستگی ناشی از پایه‌های پل، تأثیر آرایش شمع‌های مستقر در زیر فونداسیون نیز از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

شفرده^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۴، براساس مفهوم قطر مؤثر پایه، رابطه‌ای را برای تخمین عمق آبشستگی گروه‌پایه‌ها ارائه نمودند [۷]. عطائی آشتیانی و همکاران در سال ۲۰۱۰، روش‌های ارائه شده توسط HEC-18 و کولمن^۲ (۲۰۰۵) در تخمین عمق آبشستگی اطراف گروه‌شمع‌ها را مورد بررسی قرار داده و رابطه اصلاحی برای این منظور ارائه دادند [۸].

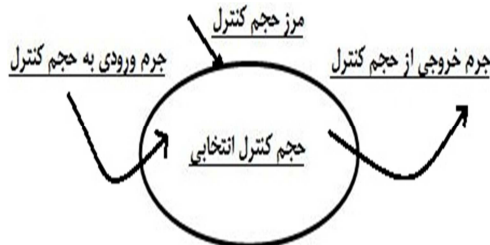
عبدالداغ^۳ و همکاران، به مقایسه گروه شمع در آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل، با تغییر تعداد و فاصله شمع در آرایش مربعی‌شکل در دو جهت طولی و عرضی جریان پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که برای گروه شمعی که در یک ردیف در جهت جریان قرار داده شود، در صورتی که نسبت فاصله شمع مساوی یا بزرگتر از $6/5$ برابر قطر شمع باشد، آبشستگی برای هر شمع به‌صورت منفرد عمل می‌نماید. همچنین زمانی که گروه شمع‌ها در چند ستون و ردیف مرتب شوند با افزایش فاصله بین شمع‌ها، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [۹].

1- Sheppard

2- Kolman

3- Abdeldayem

در رابطه (۱)، \dot{m}_{stored} بیانگر جرم ذخیره شده در داخل حجم کنترل، $\sum \dot{m}_{in}$ بیانگر مجموع جرم‌های ورودی از طریق سطوح حجم کنترل و $\sum \dot{m}_{out}$ نیز بیانگر مجموع جرم‌های خروجی از سطوح حجم کنترل است.



شکل ۱- حجم کنترل انتخابی و سطوح مرزی آن

چنانچه این معادله را به فرم انتگرالی و بر روی سطوح کنترل مورد نظر بیان شود، رابطه‌ی (۲) ایجاد خواهد شد:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int \rho dV \right) = - \int_A \rho (\vec{V}_{rel} \cdot d\vec{A}) \quad (2)$$

که در آن بردار سرعت نسبی \vec{V}_{rel} بیانگر اختلاف سرعت سیال و بردار سرعت حجم کنترل متحرک بوده و مثلاً سرعتی برابر با سرعت سیال داشته باشد، هیچگونه جرمی وارد آن یا از آن خارج نمی‌شود. اکنون ضروری است برای تبدیل انتگرال بر روی سطوح رابطه (۲)، به انتگرال بر روی حجم از تئوری دیورژانس^۵ استفاده نماییم. براساس تئوری دیورژانس، برای هر کمیت برداری مانند \vec{X} می‌توان رابطه (۳) را به‌عنوان تبدیل‌کننده انتگرال سطح به انتگرال حجم بیان نمود.

$$\int_A \vec{X} \cdot d\vec{A} = \int_V \text{div}(\vec{X}) dV \quad (3)$$

حال با فرض اینکه کمیت برداری \vec{X} برابر حاصلضرب یک کمیت اسکالر (مانند چگالی) و یک کمیت

در سال ۲۰۱۲، امینی و همکاران با مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی تحت شرایط مختلف فاصله بین شمع و تراز کارگذاری فونداسیون، رابطه‌ای برای تخمین عمق آبشستگی برای شرایط ارائه دادند [۱۰].

با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در خصوص بررسی آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج مستقر بر گروه شمع صورت نگرفته است، هدف از انجام این تحقیق، تراز تأثیر هندسه شمع‌ها از نظر اشکال مختلف دوکی، مستطیلی، مستطیلی گردگوشه و دایره‌ای بر مقدار بیشینه عمق آبشستگی در اطراف گروه‌پایه کج می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

اولین قدم در مسیر شبیه‌سازی جریان، به‌دست آوردن معادلات حاکم بر این پدیده می‌باشد. پایه و اساس تمام روش‌های حل عددی برای مدل‌سازی، حل معادلات جریان می‌باشد که شامل یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنوم در جهت محورهای سه‌گانه مختصات می‌باشند که به معادلات ناویر استوکس^۴ معروف هستند. در این بخش از تحقیق حاضر، سعی شده است این معادلات به‌صورت کلی بیان شود. معادله پیوستگی به‌عنوان یکی از معادلات اساسی مکانیک سیالات، بیانی از قانون بقای جرم بوده و نشان می‌دهد تغییر جرم سیال محتوی یک حجم کنترل طی یک بازه زمانی مشخص، برابر با اختلاف مجموع جرم‌های ورودی و خروجی حجم کنترل می‌باشد [۹].

با فرض یک حجم کنترل انتخابی مطابق شکل ۱، برای نوشتن معادله پیوستگی خواهیم داشت:

$$\dot{m}_{stored} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

⁵- Divergence Theorem

⁴- Navier Stocks Equation

معادله (۱۰) می‌تواند به فرم فشرده مطابق معادله (۱۱) نوشته شود:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (11)$$

در نهایت، معادله پیوستگی برای یک جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

۲-۱- تقریبات عددی در مدل عددی Flow-3D

نرم‌افزار Flow-3D، معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود، که برای هر سلول مقادیر میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند بجز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. موانع منحنی‌شکل، دیوارهای مرزی و سایر اشکال هندسی دیگر، به وسیله تعیین کسر مساحت وجوه و کسر حجم باز به جریان سلول، در شبکه در نظر گرفته شده جای می‌گیرند (روش کسر مساحت-حجم مانع^۶). روش دقت مرتبه اول^۷ نسبت به افزایش زمان و مکان، روش عددی اصلی مورد استفاده در Flow-3D می‌باشد. زمانی که شبکه مورد استفاده در روش حجم محدود، غیریکنواخت است، می‌بایست در انتخاب درجه دقت حل عددی توجه کرد. در این حالت، روش دقت مرتبه دو^۸ مناسب‌تر است. در همه حالات، حداقل می‌توان از دقت درجه یک برای شرایط مرزی استفاده کرد. مثلاً، در سلول‌هایی که بخشی از آن توسط مانع اشغال شده، روش FAVOR، معادل با درون‌یابی خطی برای شرایط مرزی می‌باشد. در هنگام مدل کردن سطح آزاد آب، این

برداری (مانند سرعت) می‌باشد، $\bar{X} = \rho \bar{V}$ با جایگذاری \bar{X} در رابطه (۳) و قرار دادن انتگرال حاصله در معادله (۲) به رابطه (۴) خواهیم رسید:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \rho dV \right) + \int_V \text{div}(\rho \bar{V}_{rel}) dV = 0 \quad (4)$$

در اعمال قضیه دیورژانس، فرض بر آن است که توابع چگالی ρ و سرعت \bar{V} توابعی کاملاً پیوسته می‌باشند. برای حالتی که تغییرات شکل حجم کنترل، نسبت به زمان ناچیز بوده و بتوان شکل حجم کنترل را ثابت فرض نمود تساوی (۵) برقرار است:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \rho dV \right) = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (5)$$

در این صورت رابطه (۴) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}_{rel}) \right] dV = 0 \quad (6)$$

حال چنانچه فرض کنیم که اندازه و ابعاد حجم کنترل به سمت صفر میل نماید، به طوری که دیگر تغییرات مکانی کمیت‌های موجود در داخل حجم کنترل قابل توجه نباشد، در این صورت خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}_{rel}) = 0 \quad (7)$$

برای حالتی که حجم کنترل ثابت باشد، سرعت نسبی \bar{V}_{rel} برابر با سرعت سیال بوده و معادله پیوستگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}) = 0 \quad (8)$$

این معادله برداری به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

6- FAVOR
7- 1st order
8- 2nd order

$$f_s + f_L = 1 \quad (14)$$

بار معلق، لزجت واقعی سیال را افزایش می‌دهد. این افزایش تا زمانی ادامه دارد که جزء حجمی ذرات جامد (f_s) به حد جزء حجمی چسبندگی (f_{SCO}^{13}) برسد. پس از آن افزایش بار معلق، سبب بالارفتن لزجت نشده، بلکه سبب می‌شود ذرات شروع به فعالیت با رفتار جامدگونه کنند. در این حالت، لزجت متوسط سیال از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\mu^* = \mu_f \left[1 - \frac{\min(f_s, f_{SCO})}{f_{SCR}} \right]^{1.5} \quad (15)$$

که در آن μ_f ویسکوزیته مولکولی سیال و f_{SCR} جزء بحرانی ذرات رسوب^{۱۴} می‌باشد که مقدار پیش‌فرض آن ۰/۶۷ انتخاب شد. μ^* ویسکوزیته افزایش یافته، به واسطه رسوبات معلق در سیال است که حداکثر آن، به‌ازای مقدار جزء بحرانی رسوبات برابر $18\mu_f$ می‌باشد. اگر کسر حجمی رسوب، بیشتر یا مساوی مقدار f_{SCR} باشد، دانسیته رسوب متراکم برابر با $f_{SCR} \times \rho_s$ می‌باشد که جزو شرایط اولیه مدل می‌باشد. چگالی ظاهری $\bar{\rho}$ به‌صورت یک تابع خطی از حجم رسوبات فرض می‌گردد:

$$\bar{\rho} = \rho_L + f_s(\rho_s - \rho_L) \quad (16)$$

ρ_L و ρ_s به‌ترتیب دانسیته ظاهری ذرات رسوب و سیال هستند. طبق تعریف، دریفت^{۱۵}، ته‌نشینی ذرات رسوب تحت اثر نیروهای شناوری مؤثر بر ذره رسوب است. در مدل آبستگي Flow-3D، ذرات رسوب به‌صورت کروی فرض شده که تحت اثر لزجت سیال قرار دارند. لذا مطابق رابطه زیر ضریب ته‌نشینی D_f به‌دست می‌آید:

$$D_f = \frac{d_{50}^2 \times (\rho_s - \rho_L)}{18\mu} \quad (17)$$

نرم‌افزار با استفاده از مدل حجم سیال^۹، جزء حجم سیال F را با استفاده از معادله (۱۳) که معادله جابه‌جایی حاکم بر جزء حجم سیال F نامیده می‌شود، تعیین می‌نماید:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(\frac{\partial}{\partial x}(FUA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(FVA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(FWA_z) \right) = 0 \quad (13)$$

F ، ضریبی است که بسته به میزان سیال در حجم کنترل، همواره مقداری بین صفر و ۱ دارد. به‌طوری‌که، اگر F برابر ۱ باشد، حجم کنترل (سلول محاسباتی) پر از سیال بوده و در صورتی که برابر صفر باشد، نشان‌دهنده این است که در سلول محاسباتی آبی وجود نداشته و کل حجم کنترل توسط هوا اشغال شده است [۱۱].

۲-۲- مدل فرسایش در مدل‌سازی آبستگي پایه پل

مدل فرسایش^{۱۰} در نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی انتقال، فرسایش و ته‌نشینی و تغییر وضعیت استقرار رسوبات (قابل تعریف برای کلیه مصالح با مشخصات فیزیکی خاص) در اثر جریان سیال می‌باشد. این مدل از دو میدان غلظت بار معلق و بار بستر استفاده می‌کند. جابه‌جایی و بلند شدن رسوبات معلق با سیال، در اثر تغییر گرادیان فشار محلی است. این رسوبات معلق ممکن است ناشی از جریان ورودی حاوی ذرات معلق و یا فرسایش بستر ایجاد شوند. رسوبات بستر توسط ذرات مجاور، محدود بوده و لذا به‌راحتی جابه‌جا نشده و فقط در صورتی که به‌صورت فرسایش یافته در سطح مشترک بستر و سیال به بار معلق تبدیل شوند، حرکت می‌کنند. بار معلق در صورتی که بار بستر تبدیل می‌شود، که سرعت ته‌نشینی بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشد. قسمتی از حجم کنترل که توسط ذرات جامد رسوب و سیال اشغال شده است، به‌ترتیب با نمادهای f_s^{11} و f_L^{12} تعریف می‌شود به‌طوری‌که:

9- VOF

10- Sediment Scour

11- Solid Volume Fraction

12- Liquid Volume Fraction

13- Cohesive Solid Fraction

14- Critical Solid Fraction

15- Drift

برشی جریان در آستانه حرکت ذره رسوب است. هدف از بسط و تشریح این مدل، تخمین و پیش‌بینی مقدار جریان رسوباتی است که از روی بستر مشترک، فرسایش یافته‌اند. به‌همین منظور، پارامتر سرعت برشی $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ برای اندازه‌گیری قدرت کف‌کنی جریان تعریف شده است و لذا سرعت کنده‌شدن رسوبات از بستر (u_{lift}) را می‌توان مطابق رابطه زیر ارائه کرد:

$$u_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{cr}}{\rho}} \quad (21)$$

که در آن n_s بردار نرمال سطح بستر، α پارامتر بی‌بعد معرف احتمال کنده شدن ذرات رسوب از بستر است که معمولاً برابر ۱ یا کمتر فرض می‌شود. زاویه استقرار طبیعی رسوبات در این مدل از رابطه (۲۲) حاصل می‌شود که در آن n بردار نرمال سطح و g بردار جاذبه است:

$$\theta = \frac{n}{|g|} \quad (22)$$

در جریان ساکن، زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب، میزان حداقل شبی که طی آن دیواره‌های حفره آبشستگی می‌تواند پایدار بماند را تعیین می‌کند. زاویه اصطکاک داخلی بالای رسوبات مانند رس، نشانگر پایداری دیواره در شیب تند است؛ اما در زوایای پایین مانند ماسه، دیواره تمایل بسیار برای ریزش و حرکت به جلو دارد.

تنش برشی بحرانی سطح شیب‌دار مؤثر در فرسایش مقطع در نرم‌افزار Flow-3D با تأثیر زاویه اصطکاک داخلی رسوبات که جزء ورودی مدل است توسط رابطه زیر ارائه می‌شود [۱۳]:

$$\tau_{cr} = \tau_{cr}^0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \xi}} \quad (23)$$

مطابق رابطه فوق هنگامی که شیب طبیعی رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی آنها برابر شود ($\varphi = \xi$)، تنش برشی بحرانی برابر صفر می‌گردد ($\tau_{cr} = 0$) و بدین معنی است که سطح بستر در اثر هر نوع تنش برشی

بنابراین برای محاسبه تنش‌بندی خواهیم داشت:

$$u_{dift} = D_f \times f_L \frac{\nabla p}{\rho} = \frac{f_L \times d_{50}^2}{18\mu} \frac{\nabla p}{\rho} (\rho_s - \rho_L) \quad (18)$$

در رابطه بالا، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب، μ لزجت سیال (آب)، $\frac{\nabla p}{\rho}$ گرادیان پتانسیل مکانیکی یا شتاب بدنه (ذرات رسوب) می‌باشد. $\frac{\nabla p}{\rho}$ تا ۱۰ برابر بزرگی شتاب ثقل قابل افزایش بوده تا تأثیرات نوسان عددی فشار محو شود. در مجاورت سطح آزاد سیال، شتاب بدنه با شتاب ثقل (g) جایگزین می‌شود. از آنجاکه رسوب‌گذاری، فقط با حضور ذرات جامد (رسوب) امکان‌پذیر است، لذا ضریب f_L در صورتی که حجم کنترل، پر از رسوبات باشد، برابر صفر بوده و بنابراین $u_{drift} = 0$ خواهد شد. همچنین مدل Flow-3D برای محاسبه نیروی شناوری و ضریب تنش‌بندی از رابطه زیر بهره می‌گیرد:

$$D_f = \begin{cases} \text{رابطه (۱۷) و (۱۸)} \\ \left[\frac{f_s - f_{SCR}}{f_{SCO} - f_{SCR}} \right]^{-2} \left[1 - \frac{f_s - f_{SCR}}{f_{SCO} - f_{SCR}} \right] \\ 0 \end{cases} \quad (19)$$

در سطح رسوبات بستر، تنش برشی فعال بوده و سبب فرسایش و جابه‌جایی رسوب در سطح بستر می‌شود. این فرسایش، تابعی از تنش برشی سیال در سطح، تنش برشی بحرانی و چگالی سیال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی، حداقل تنش برشی مورد نیاز برای بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد [۱۲].

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_L - \rho_s)d} \quad (20)$$

در رابطه فوق، θ_{cr} پارامتر شیلدز بحرانی و τ_{cr} تنش

مدل آبشستگی پایه پل کج با استفاده از معادلات فرسایش ارائه شده در این بخش قابل شبیه سازی می باشد.

۲-۳- معرفی مدل های مورد بررسی تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر، مدل سازی جریان و آبشستگی اطراف پایه پل کج قرار گرفته بر روی گروه شمع ها با اشکال هندسی متفاوت انجام گرفته است. با توجه به اینکه، یکی از مهم ترین بخش های تحقیقات حل عددی، صحت سنجی مدل شبیه سازی می باشد، بنابراین در این تحقیق نیز در بخش صحت سنجی مدل، از طریق مقایسه عمق آبشستگی اطراف پایه پل کج قرار گرفته بر روی فونداسیون مکعبی شکل، از نتایج شبیه سازی حاصل از نرم افزار Flow-3D و آزمایش های انجام شده توسط اسماعیلی ورکی و همکاران در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان استفاده شده است [۵].

با توجه به این که مدل آزمایشگاهی در مقیاس ۱/۱۹۰ نمونه واقعی پل هشتم اهواز انجام گرفته شده است، بدین ترتیب در تحقیق حاضر، جریان در کانالی به طول ۶، عرض ۰/۹۲ و ارتفاع ۰/۶ متر شبیه سازی و مطالعه شده است. شکل ۲، مشخصات کانال شبیه سازی شده به همراه مشخصات هندسی مدل های پایه پل قرار گرفته بر روی گروه شمع با اشکال هندسی متفاوت و جدول ۱، پارامترهای هیدرولیکی جریان در نظر گرفته شده تحقیق حاضر را نشان می دهد.

مقدار آبشستگی اطراف پایه های پل به پارامترهای متعددی بستگی دارد که هر کدام تأثیر خاص و متفاوتی بر مکانیزم آبشستگی داشته و باعث افزایش یا کاهش مقدار فرسایش بستر در اطراف پایه ها می گردد. پارامترهای مؤثر بر آبشستگی اطراف پایه های پل، مجموعه ای از پارامترهای توصیف کننده مشخصات نوع سیال و رسوب بستر، هندسه پایه پل و شرایط هیدرولیکی جریان را شامل می گردد که آنها را می توان به صورت رابطه نوشت:

وارده، دچار فرسایش می شود. همچنین هنگامی که $(\xi > \varphi)$ باشد، مقدار $(\tau_{cr} < 0)$ بوده و بدین معنی است که رسوبات بدون وجود تنش برشی، دچار فرسایش می شوند. همچنین رابطه (۲۳)، نشان می دهد که هرچه زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب بزرگ تر شود، دیواره حفره آبشستگی، در صورت عدم وجود تنش برشی، دچار فرسایش می شود $(\tau_{cr} = 0)$ که شیب دیواره φ بزرگتر می شود [۱۳]. حرکت رسوبات معلق در سیستم، به وسیله معادله همرفت- پخش بیان می شود، به گونه ای که با اضافه کردن جمله های ته نشینی (Drifting) و بلندشدگی (Lifting) رسوب، معادله مذکور مطابق رابطه زیر می باشد:

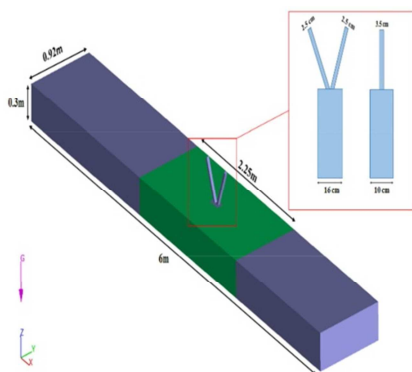
$$\left(\frac{\partial c_s}{\partial t} \right)_x + u \cdot \nabla c_s = D \nabla^2 c_s - u_{lift} \cdot \nabla c_s - u_{drift} \cdot \nabla c_s \quad (24)$$

که در آن، u سرعت محلی سیال (جریان) و u_{lift} و u_{drift} به ترتیب سرعت های مربوط به بلندشدگی و ته نشینی مصالح می باشند. در مجموع، مدل فرسایش در Flow-3D از یک رویکرد مستقیم و آسان برای مدل سازی فرسایش و رسوب گذاری در جریان سه بعدی بهره می برد. شبیه سازی انجام شده، نشان می دهد که در مدل سازی های مختلف در حالت تعادل، با نتایج تجربی به خوبی همخوانی دارند. در نسخه های قبلی این نرم افزار، محدودیت هایی در مدل آبشستگی وجود داشت که در نسخه جدید (v.11.2) برطرف شده است. در این محدودیت ها، ذرات درشت مصالح نمی توانست به درستی شبیه سازی شود؛ زیرا فرضیات حاکم بر بخش ته نشینی مدل نقض می شد. همچنین مدل نوعاً نیاز به مدل سازی بار بستر داشت که در آن ذرات رسوب بر روی بستر رسوبات متراکم، غلطش یا لغزش داشتند (یا این که در حین جریان سیال، معلق می شدند). همچنین برای بستر فرسایش پذیر، فقط یک نوع ذره برای مدل، قابل تعریف بود [۱۱]. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه،

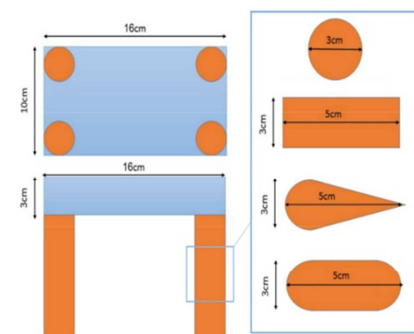
آن کوچک‌تر است، Z تراز کارگذاری سرشمع، U سرعت متوسط جریان، ρ چگالی آب، μ لزجت دینامیکی، g شتاب ثقل، α زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان، t زمان از شروع آبشستگی و t_e زمان تعادل آبشستگی می‌باشد.

$$f_1 = (y, d_s, D, D_p, T_p, d_p, l_m, l_n, D_{50}, Z, U, \rho, \mu, \alpha, t, t_e) \quad (25)$$

در این رابطه، y عمق جریان، d_s عمق آبشستگی، D عرض پایه پل، D_p عرض سرشمع، T_p ضخامت سرشمع، d_p قطر شمع، l_m فاصله شمع‌ها در یک ردیف، l_n فاصله شمع‌ها در یک ستون، D_{50} قطری که ۵۰ درصد ذرات از



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) مشخصات هندسی پایه پل کج و (ب) گروه شمع‌های قرار گرفته در زیر پایه

جدول ۱- مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرولیکی جریان در مدل‌های تحقیق حاضر

مدل	سرعت نسبی (U/U_c)	عمق نسبی جریان (y/D^*)	تراز نسبی قرارگیری فونداسیون (Z/T_{pc})
پایه پل کج بر روی فنداسیون مکعبی شکل	۰/۹۵	۱	هم سطح بستر
پایه پل کج بر روی گروه شمع استوانه‌ای	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع مستطیلی	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع مستطیلی گرد گوشه	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع دوکی شکل	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲

چگونگی وارد نمودن اطلاعات مربوط به مدل و جریان در نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. یکی از گزینه‌های مهم در اعمال شرایط فیزیکی در بحث آبشستگی و انتقال رسوب، وارد کردن اطلاعات ذرات رسوب بستر می‌باشد. این امکان از طریق بخش‌های رسوب در آبشستگی انجام می‌گیرد. در

در شکل ۳، پارامترهای هندسی مهم و تأثیرگذار گروه پایه کج ارائه شده است.

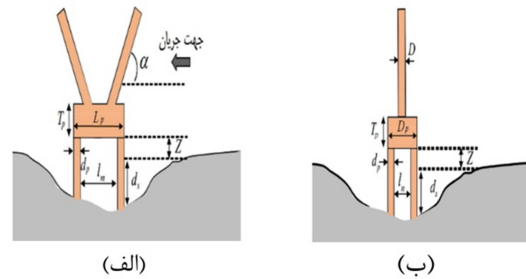
۲-۴- مراحل شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار Flow-3D

در این بخش به مراحل مختلف نحوه شبیه‌سازی مدل عددی آبشستگی پایه پل کج و

گام بعدی مدل‌سازی، پس از شبکه‌بندی مدل، اعمال شرایط مرزی در ۶ وجه مکعب شبکه حل می‌باشد. برای وجه بالادست کانال که ورودی جریان محسوب می‌شود، می‌توان از شرایط مرزی میزان حجم سیال^{۱۶}، فشار مخصوص^{۱۷} و سرعت مخصوص^{۱۸} استفاده کرد که برای تعریف جریان ورودی در آنها به ترتیب دبی، عمق جریان ورودی و سرعت اولیه جریان به نرم‌افزار داده می‌شود. در مدل مورد بررسی برای ورودی جریان از شرط مرزی میان حجم سیال، استفاده شده است و برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر اجزاء دبی ورودی مطابق جدول ۱ به نرم‌افزار معرفی شده است. برای قسمت خروجی کانال، شرایط مرزی دنباله‌دار^{۱۹} و جریان خروجی^{۲۰} به کار برده می‌شوند که در هر دو شرط، مشخصات جریانی که به این مرز می‌رسد، بدون هیچ تغییری به خارج از شبکه حل منتقل می‌شود. برای پایین‌دست کانال شبیه‌سازی شده، شرط مرزی جریان خروجی اعمال شده است.

برای جداره‌ها و کف شبکه حل که نقش دیواره‌ها و کف کانال را ایفا می‌کنند، از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. این شرط مرزی دقیقاً مشابه یک دیوار مجازی عمل می‌کند. لازم به ذکر است استفاده از تعریف شرط مرزی دیواره برای کف در شبکه حل، به‌عنوان کف کانال در صورتی صحیح می‌باشد که سطح کف کانال، کاملاً صاف و بدون زبری در نظر گرفته شود؛ در غیر این صورت بایستی در کف کانال، باکسی را تحت عنوان یک زیرمجموعه تعریف و زبری مورد نظر را بر آن اعمال نمود. کف کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان از جنس پلکس گلس صاف ساخته شده و در مدل شبیه‌سازی

جدول ۲ اطلاعات لازم برای اعمال مشخصات ذرات رسوبی بستر، مطابق با مشخصات ذرات رسوب آزمایش شده توسط اسماعیلی ورکی و همکاران وارد شده است [۵].

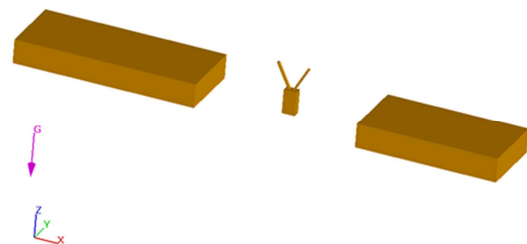


شکل ۳- تعریف پارامترهای هندسی گروه‌پایه کج (الف) در جهت جریان و (ب) در مقابل جریان

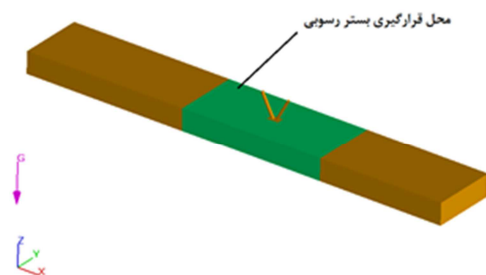
جدول ۲- اطلاعات ذرات رسوب بستر

۰/۰۰۰۷	قطر رسوب (متر)
۲۵۶۰	چگالی رسوب (کیلوگرم بر مترمربع)
۰/۰۳۲	عدد شیلدز بحرانی
۰/۷	ضریب جذب
۱۰	ضریب بار بستر
۳	زبری بستر

شکل‌های ۴ و ۵ هندسه سه بعدی کانال و باکس رسوب ماسه‌ای را نشان می‌دهند.



شکل ۴- هندسه سه بعدی کانال به‌همراه پایه پل کج در نرم‌افزار Flow-3D



شکل ۵- تعریف کل باکس ایجاد شده از رسوب ماسه‌ای

^{۱۶}- Volume flow rate

^{۱۷}- Specified Pressure

^{۱۸}- Specified Velocity

^{۱۹}- Continuitive

^{۲۰}- Outflow

۳-۱- آنالیز حساسیت مش‌بندی

در شبکه‌بندی مدل در محیط نرم‌افزار Flow-3D علاوه بر تعداد مش‌ها، اندازه آنها در هر راستا نیز می‌تواند بر روی نتایج مدل‌سازی تأثیرگذار باشد. برای حالتی که مش‌هایی با اندازه متغیر در یک راستا ایجاد می‌شود، نرم‌افزار به صورت خودکار تغییر اندازه مش‌ها در همان راستا را به صورت تدریجی اعمال می‌کند؛ ولی برای دو راستای متعامد، بایستی دقت نمود نسبت شکل یک سلول از شبکه حل، که از تقسیم بزرگ‌ترین بعد مکعب به کوچک‌ترین بعد آن به دست می‌آید، نباید بیشتر از ۳ باشد [۱۲]. برای مدل پایه کج مورد بررسی تحقیق، با شبیه‌سازی مدل در ۳ حالت مختلف و با اندازه مش‌های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آنها از روی داده‌های آزمایشگاهی و در نهایت مش‌بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. برای این کار طبق جدول ۳، نتایج حداکثر عمق نسبی آبشستگی (d_s/D) (نسبت حداکثر عمق آبشستگی به عرض فنداسیون) مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی اسماعیلی ورکی و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت و میانگین قدرمطلق درصد خطا ($MAPE^{24}$) و خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE^{25}$) برای هر یک محاسبه گردید. در روابط (۲۶) و (۲۷) نحوه محاسبه خطاها ارائه شده است.

$$MAPE (\%) = 100 \times \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{X_{exp} - X_{num}}{X_{exp}} \right| \quad (26)$$

$$RMSE (m^3/s) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (X_{exp} - X_{num})^2} \quad (27)$$

در این روابط، X_{exp} مقدار داده‌های آزمایشگاهی، X_{num} مقدار داده‌های عددی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

شده، سطح کف و دیواره‌های کانال صاف در نظر گرفته شده است.

برای مرز ارتفاع حداکثری نیز، شرط مرزی تقارن اعمال گردید. این نوع شرط مرزی، شرایط بیرون شبکه حل را دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر می‌گیرد. تا وقتی که جریان سیال به این مرز برخورد نکند، نرم‌افزار شرایط بالای سطح سیال تا بی‌نهایت را مشابه شرایط اتمسفر شبیه‌سازی می‌کند؛ ولی در حالتی که جریان سیال به این مرز برسد، شرایط بیرون شبکه حل، اشباع از سیال فرض شده و به طور غیرفیزیکی، جریان به صورت تحت فشار عمل خواهد کرد. به همین منظور، عدم برخورد جریان سیال با قسمت بالایی شبکه حل (ارتفاع کانال مدل در نرم‌افزار ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

پس از اعمال شرایط مرزی، شرایط اولیه برای مدل تعریف می‌شود. در این مرحله توزیع فشار در راستای Z هیدرواستاتیکی اعمال شد. همچنین به علت داشتن باکس ماسه‌ای (بستر رسوبی)، بایستی ناحیه‌های سیال و بستر رسوبی را به نرم‌افزار معرفی کرد. این ناحیه به نرم‌افزار مشخص می‌کند که ناحیه انتخابی، آب خالی نبوده و پوشیده از بستر رسوبی می‌باشد.

در بخش تعیین خروجی‌ها، پارامترهای قابل محاسبه توسط نرم‌افزار در شبیه‌سازی جریان، مشخص می‌شوند. در صورتی که در این قسمت، گام زمانی تعریف نشود، نرم‌افزار به صورت خودکار با گام‌های زمانی ۰/۱، زمان شبیه‌سازی نتایج را ذخیره می‌کند. در این مدل، گام زمانی ذخیره داده‌های خروجی نرم‌افزار، ۳ ثانیه و مهم‌ترین پارامترهای محاسباتی برای نرم‌افزار، داده هیدرولیکی^{۲۱}، فشار^{۲۲} و سرعت‌های سیال^{۲۳} تعریف شد.

۳- تحلیل و تفسیر نتایج

21- Hydraulic Data

22- Pressure

23- Fluid velocities

24- Mean Absolute Percentage Error

25- Root Mean Square Error

جدول ۳- آنالیز حساسیت مش بندی در شبکه محاسباتی

خطای جذر میانگین مربعات RMSE	درصد میانگین خطای مطلق MAPE (%)	حداکثر عمق نسبی آبشستگی (ds/D) در نتایج عددی FLOW-3D	حداکثر عمق نسبی آبشستگی (ds/D) توسط اسماعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۲)	نسبت ابعاد حداکثر یا نسبت شکل	تعداد مش	حالت
۰/۲۹۶	۲۹/۸۹	۰/۶۹۴	۰/۹۹۰	۱/۸۶	۸۹۱۲۶۰	۱
۰/۱۹۹	۲۰/۱۰	۰/۷۹۱	۰/۹۹۰	۱/۴۳	۱۲۸۱۵۶	۲
۰/۰۹۲	۹/۲۵	۰/۸۹۸	۰/۹۹۰	۱/۰۱	۱۸۶۰۰۰۰	۳
نیازمند سیستم با پردازش بالا و صرف زمان بیشتر برای شبیه سازی					بیشتر از ۱۸۶۰۰۰۰	۴

$(d_s / D)_E$ حداکثر عمق نسبی آبشستگی اندازه گیری شده می باشد. در این تحقیق، در بخش صحت سنجی مدل، از مقایسه نمودار توسعه زمانی آبشستگی در زمان های مختلف اطراف گروه پایه کج، حاصل از نتایج شبیه سازی نرم افزار FLOW-3D و آزمایش های انجام شده توسط اسماعیلی ورکی و همکاران در رقوم کارگذاری فونداسیون $Z/D=0$ (نسبت فاصله بستر جریان تا روی فونداسیون به عرض فونداسیون) استفاده شده است. شکل ۶ و ۷، به ترتیب مقایسه نمودار توسعه زمانی آبشستگی اطراف فونداسیون پایه کج در رقوم کارگذاری فونداسیون $Z/D=0$ و $U/U_c=0/95$ حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی و درصد خطای نسبی حاصل از مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی را نشان می دهد.

مشاهده می گردد که روند توسعه زمانی آبشستگی حاصل از نتایج عددی همانند روند نتایج آزمایشگاهی اسماعیلی ورکی و همکاران می باشد. با مشاهده شکل ۷ مقدار میانگین خطای نسبی حداکثر عمق نسبی آبشستگی نتایج حل عددی و مقدار خطای RMSE به ترتیب ۷/۳۴ درصد و ۰/۰۴۹ می باشد.

جدول ۴، مقادیر خطای نسبی و RMSE حداکثر عمق نسبی آبشستگی حاصل از نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی را برای زمان های مختلف نشان می دهد.

با توجه به خطاهای به دست آمده، حالت ۳ به عنوان مش بهینه با تعداد ۱۸۶۰۰۰۰ تعداد سلول محاسباتی انتخاب گردید. مش های ایجاد شده در هر راستای کانال به صورت یکنواخت با اندازه ۰/۹۹، ۰/۱ و ۰/۱ به ترتیب در راستای طولی، عرضی و ارتفاع انتخاب شده اند تا با ارائه بیشترین دقت محاسباتی، بهینه ترین زمان شبیه سازی را ایجاد نمایند. همچنین بیشترین نسبت شکل شبکه بندی در این مدل ۱/۰۱ به دست آمده که کوچک تر از ۳ می باشد. بنابراین از این نظر هم شبکه بندی استفاده شده، مناسب است. به منظور عدم تأثیرپذیری نتایج مدل، از تعداد و اندازه مش ها، شبکه بندی مدل های بررسی شده یکسان در نظر گرفته شده است.

۳-۲- صحت سنجی

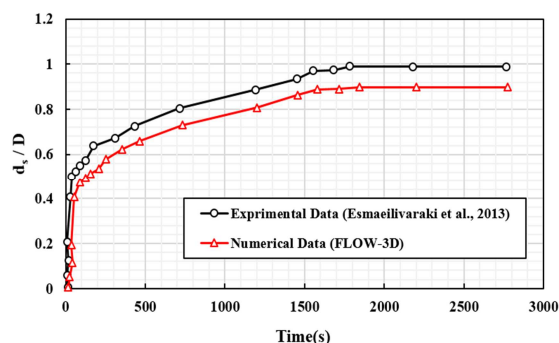
یکی از راه های صحت سنجی و مقایسه نتایج و همچنین تعیین محدوده درصد خطا بین داده های حاصل از نرم افزار FLOW-3D با داده های آزمایشگاهی استفاده از رابطه (۲۸) می باشد.

$$E = \frac{((d_s / D)_N - (d_s / D)_E)}{(d_s / D)_E} \times 100 \quad (28)$$

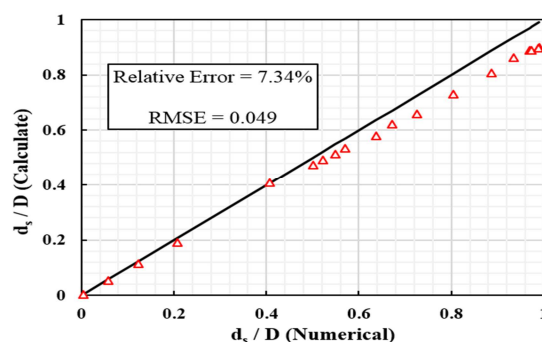
در رابطه فوق، E نشانگر درصد خطای نسبی، $(d_s / D)_N$ حداکثر عمق نسبی آبشستگی در حل عددی و

به‌ترتیب به مقدار ۹/۲۵ درصد و ۰/۰۹۱ می‌باشد. با این حال می‌توان نتیجه گرفت که تطابق نسبتاً خوبی بین مقادیر حل عددی و آزمایشگاهی وجود داشته و می‌توان سایر شرایط مدنظر را برای مدل اجرا نمود و نتایج مورد نیاز را تجزیه و تحلیل کرد.

شکل ۸، تنش برشی کل ایجاد شده در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع را نشان می‌دهد. با مقایسه تغییرات تنش در شرایط کارگذاری سرشمع در ترازهای مختلف مشاهده می‌شود که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری سرشمع در تراز بستر رخ می‌دهد ($Z/T_p = -1$) و با قرارگیری تراز کارگذاری سرشمع در تراز پایین‌تر از بستر ($Z/T_p = -2$)، بیشینه تنش برشی کاهش می‌یابد. علت این امر، می‌تواند ناشی از افزایش فاصله بین گروه‌پایه‌ها باشد، به‌طوری‌که وجود پایه دوم باعث کاهش الگوی جریان تشکیل شده در گروه‌پایه شده و عملکرد گروه‌پایه به‌صورت دو پایه مستقل در تشکیل الگوی جریان رفتار می‌کنند.



شکل ۶- مقایسه توسعه زمانی آبستگي نتایج عددی و آزمایشگاهی برای $U/U_c = 0.95$ و $Z/D = 0$



شکل ۷- برازش مقادیر عددی و آزمایشگاهی حداکثر عمق نسبی آبستگي (d_s/D)

با توجه به جدول، مشاهده می‌گردد که بیشترین درصد خطای نسبی و مقدار RMSE برای دقیقه ۱۷۸۴

جدول ۴- مقادیر خطای نسبی و RMSE حداکثر عمق نسبی آبستگي حاصل از نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

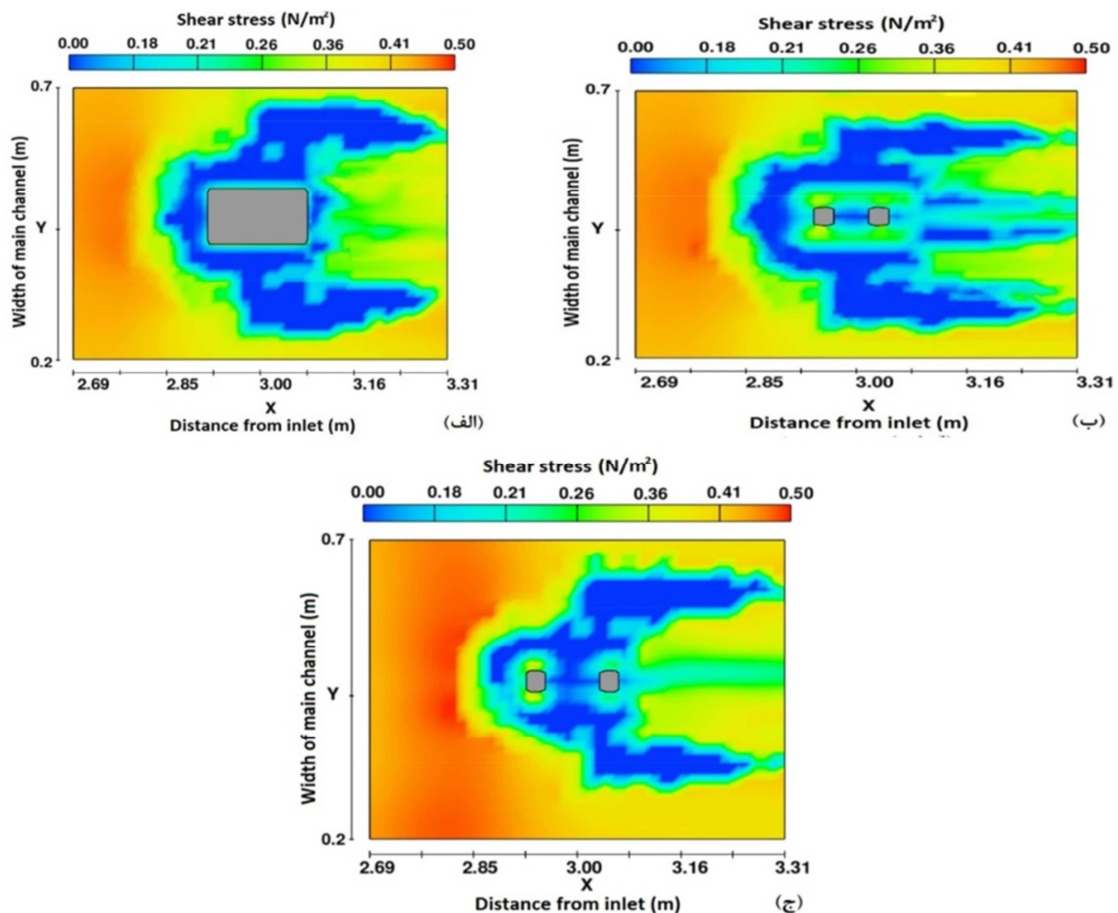
زمان (دقیقه)	حداکثر عمق نسبی آبستگي در نتایج عددی	حداکثر عمق نسبی آبستگي در نتایج آزمایشگاهی	درصد خطای نسبی (%)	RMSE
۱۷	۰/۱۱۵	۰/۱۲۳	۷/۲۰	۰/۰۰۸
۳۷	۰/۴۷۳	۰/۵۰۰	۵/۳۴	۰/۰۲۶
۸۹	۰/۵۱۳	۰/۵۴۸	۶/۴۹	۰/۰۳۵
۱۷۵	۰/۵۷۹	۰/۶۳۷	۹/۱۱	۰/۰۵۸
۳۱۲	۰/۶۲۳	۰/۶۷۲	۷/۲۶	۰/۰۴۸
۷۱۵	۰/۷۲۹	۰/۸۰۳	۹/۲۲	۰/۰۷۴
۱۵۵۳	۰/۸۸۸	۰/۹۶۹	۸/۳۳	۰/۰۸۰
۱۷۸۴	۰/۸۹۸	۰/۹۹۰	۹/۲۵	۰/۰۹۱
۲۷۶۷	۰/۸۹۸	۰/۹۸۸	۹/۱۲	۰/۰۹۰

تراز بالاتر از بستر هم صادق می‌باشد. علت آن به این شرح

کاهش تنش برشی در شرایط کارگذاری سرشمع در

جریان افزایش یابد. در شرایطی که تراز سرشمع بالاتر از بستر باشد، به دلیل بزرگتر بودن حجم گروه پایه نسبت به دو تراز دیگر، در بالادست گروه پایه و نزدیک بستر مقدار گردابه‌های جریان افزایش می‌یابد. در شرایط هم‌تراز بودن سرشمع با بستر رسوبی، مقادیر و محدوده توسعه گردابه‌های جریان در فاصله بین پایه اول و دوم نسبت به شرایط کارگذاری سرشمع در تراز پایین بستر، بیشتر می‌باشد که علت آن می‌تواند به خاطر تأثیر بیشتر پایه دوم بر الگوی جریان گروه پایه در حالت هم‌تراز بودن با بستر عنوان کرد.

است که در تراز کارگذاری سرشمع در شرایط بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد. بنابراین با بررسی تغییرات تنش برشی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع، انتظار می‌رود که مقدار حداکثر عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج در تراز هم‌سطح بستر روی دهد. در شکل ۹، مقدار گردابه جریان در صفحه X-Z در هر سه تراز کارگذاری سرشمع را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که هندسه گروه پایه، باعث شده است که در هر سه تراز کارگذاری سرشمع، در پایین دست پایه اول و دوم، مقدار گردابه‌های



شکل ۸- تنش برشی کل در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع (الف) بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، (ب) هم‌تراز بستر ($Z/T_p=-1$) و (ج) پایین تر از بستر ($Z/T_p=-2$)

تغییرات توسعه زمانی عمق آبشستگی اطراف گروه شمع برای شکل هندسی مختلف و تراز کارگذاری سرشمع ۱، ۲، ۳ در شکل ۱۰ نشان داده شده

۳-۳ توسعه زمانی آبشستگی تحت شرایط مختلف تراز کارگذاری سرشمع

R_1 = شمع مستطیلی

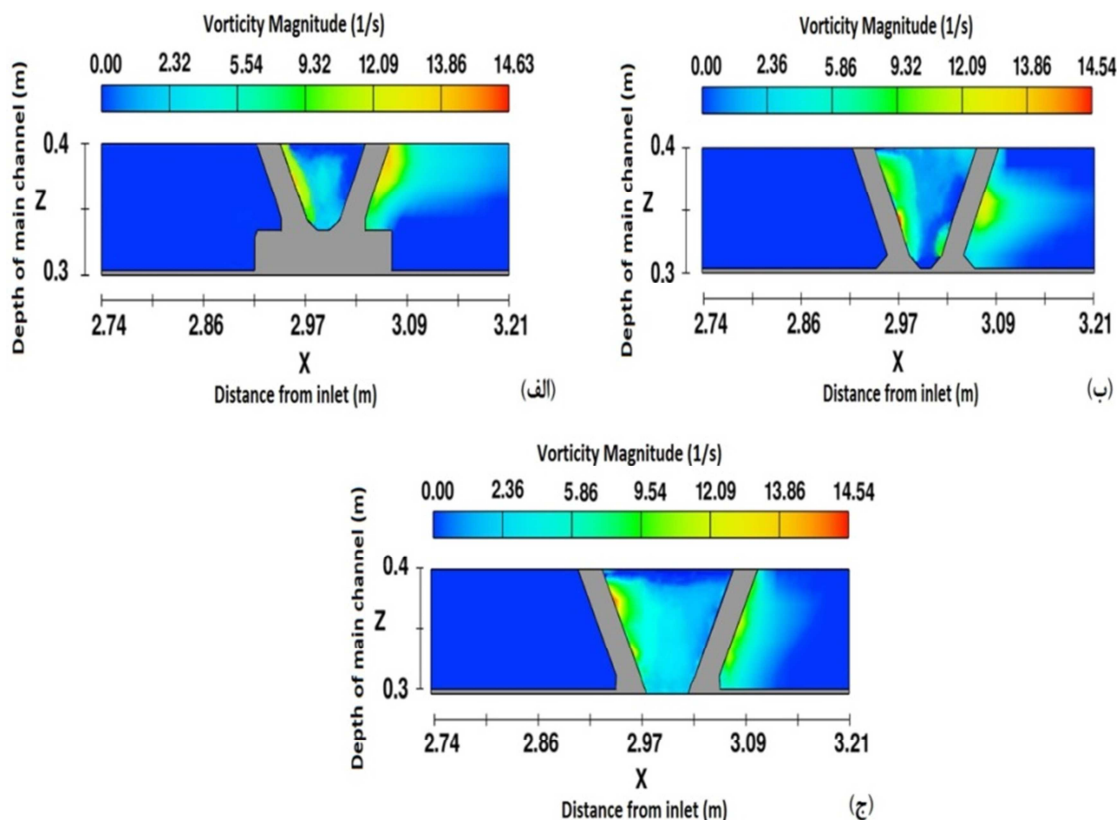
P_1 = شمع مستطیلی گردگوشه

A_1 = شمع‌های دوکی‌شکل

است. برای تفهیم بهتر، نام هندسی شمع‌های زیر گروه‌پایه

کج به صورت زیر می‌باشد:

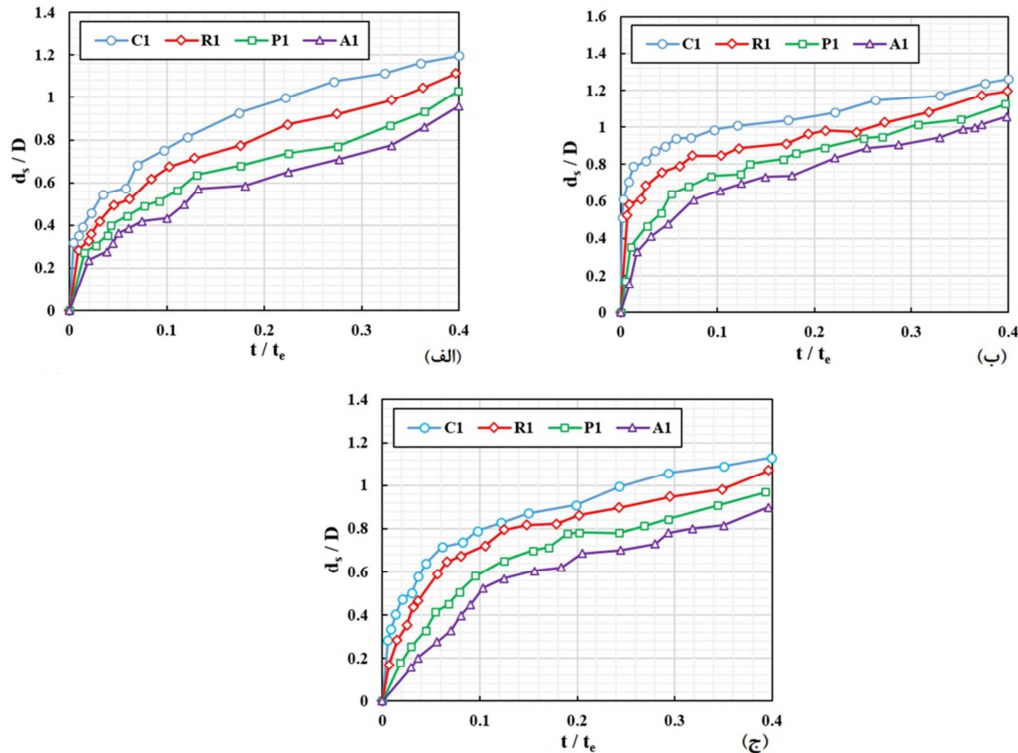
C_1 = شمع استوانه‌ای



شکل ۹- مقدار گردابه‌های جریان در صفحه $x-z$ در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع (الف) بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، (ب) هم‌تراز بستر ($Z/T_p=-1$) و (ج) پایین‌تر از بستر ($Z/T_p=-2$)

بخش فرسایشی زیر سرشمع در شکل دوکی شمع‌ها اتفاق می‌افتد. برای حالتی که سرشمع بالاتر از بستر می‌باشد ($Z/T_p=0$) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد و باعث می‌شود که نسبت به شرایط هم‌ترازی سرشمع با بستر، چاله و عمق آبشستگی کمتری ایجاد گردد. در شرایط قرارگیری سرشمع پایین‌تر از بستر ($Z/T_p=-2$) نیز به علت فاصله زیاد فضای زیر شمع با بستر جریان و کاهش قدرت نفوذی و گردابه‌های جریان به فضای زیر سرشمع، مقدار فرسایش و آبشستگی در فضای زیر سرشمع نسبت به دو تراز کارگذاری سرشمع دیگر کمتر می‌باشد.

مشاهده می‌شود که در هر سه تراز کارگذاری سرشمع تقریباً در مدت زمان کمتر از ۳۰ درصد حالت تعادل، بیشترین مقدار آبشستگی اتفاق افتاده است و بعد از آن از روند آبشستگی کاسته شده و تقریباً ثابت می‌گردد. در بین شرایط کارگذاری سرشمع بیشترین مقدار آبشستگی در حالتی که سرشمع هم‌تراز با بستر می‌باشد ($Z/T_p=-1$) اتفاق می‌افتد. در این شرایط، به تدریج با خالی شدن فضای زیر سرشمع، بخشی از جریان به این بخش نفوذ کرده و باعث فرسایش و آبشستگی اطراف گروه شمع‌ها می‌گردد. نکته قابل ذکر این است که در این حالت، تأثیر شکل هندسی گروه شمع‌ها بر کاهش آبشستگی و فرسایش زیر سرشمع مؤثر بوده؛ به طوری که در شرایط یکسان کارگذاری سرشمع، کمترین چاله و



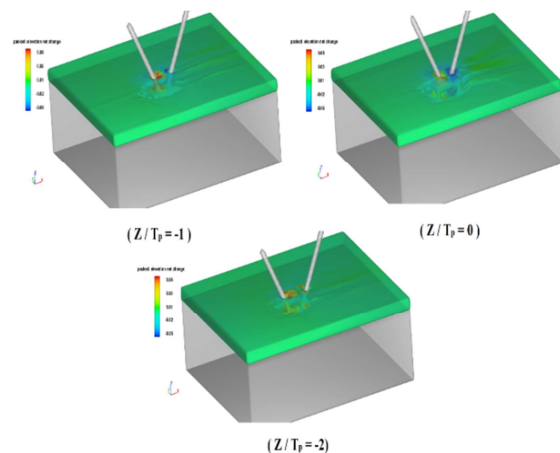
شکل ۱۰- توسعه زمانی آبستگي برای شکل‌های هندسی شمع و در تراز مختلف کارگذاری سرشمع (الف) بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، (ب) هم‌تراز بستر ($Z/T_p=-1$) و (ج) پایین‌تر از بستر ($Z/T_p=-2$)

در شکل ۱۲، مقایسه نیم‌رخ طولی نهایی آبستگي در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع ارائه شده است. مقایسه نتایج بیشینه عمق آبستگي در تراز کارگذاری مختلف سرشمع حاکی از آن است که در شرایط کارگذاری یکسان، بیشترین کاهش عمق آبستگي برای شکل هندسی حالت دوکی شکل شمع‌ها اتفاق می‌افتد.

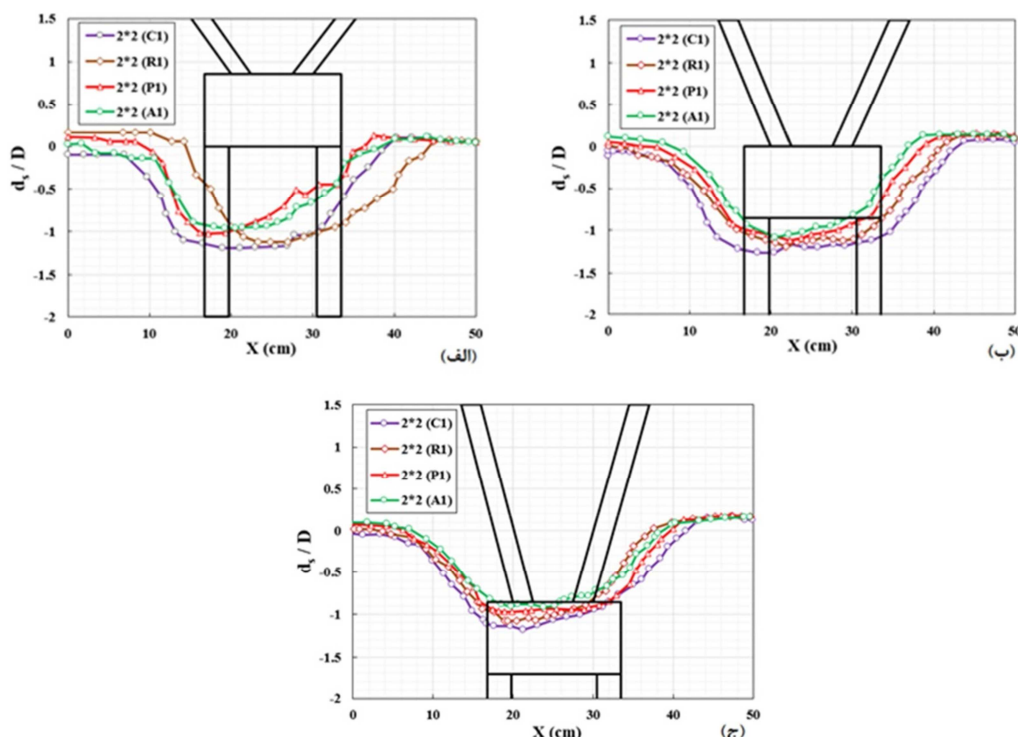
۴- نتیجه‌گیری

یکی از اقدامات مقابله با آبستگي و تخریب پایه‌های پل کاهش قدرت گردابه‌ها در مجاورت پایه و یا شمع‌های زیر آن، ایجاد و اصلاح هندسه آنها می‌باشد. در این تحقیق سعی گردید تأثیر شکل هندسی شمع‌های قرار گرفته در زیر پایه‌های کج و رقوم کارگذاری سرشمع در بستر رسوبی بر روی مشخصات آبستگي اطراف گروه پایه کج به صورت عددی و با نرم‌افزار FLOW-3D مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. بدین منظور، نتایج در این زمینه ارائه شده است.

شکل ۱۱، گودال آبستگي ایجاد شده در اطراف گروه پایه کج و زیر سرشمع در تراز کارگذاری مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل نیز واضح است که میزان آبستگي و گودال فرسایش در شرایطی که تراز کارگذاری سرشمع هم‌تراز با بستر و در زیر بستر قرار گرفته، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۱۱- گودال آبستگي اطراف گروه پایه کج با تراز کارگذاری سرشمع مختلف



شکل ۱۲- نیم‌رخ طولی نهایی آبستگي در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع (الف) بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$), (ب) هم‌تراز بستر ($Z/T_p=-1$) و (ج) پایین‌تر از بستر ($Z/T_p=-2$)

آبستگي ایجاد شده در اطراف گروه‌پایه کج با حضور شمع دوکی‌شکل $3/36$ سانتی‌متر می‌باشد. این در حالی است که برای شمع‌های استوانه‌ای، مستطیلی و مستطیلی گردگوشه حداکثر عمق آبستگي به ترتیب $4/18$, $3/91$, $3/59$ سانتی‌متر می‌باشد. علت نقش مؤثرتر شکل دوکی‌شکل در کاهش آبستگي، می‌تواند ناشی از نوع شکل هندسی آن در کاهش گرداب‌های برخاستگی باشد.

۳- با بررسی تغییرات توسعه زمانی عمق آبستگي اطراف گروه شمع برای شکل هندسی مختلف و تراز کارگذاری سرشمع -2 ، -1 ، $Z/T_p=0$ مشاهده گردید که در هر سه تراز کارگذاری سرشمع، تقریباً در مدت زمان کمتر از 30 درصد حالت تعادل، بیشترین مقدار آبستگي اتفاق افتاده است و بعد از آن از روند آبستگي کاسته شده و تقریباً ثابت می‌گردد.

۱- با بررسی تنش برشی کل ایجاد شده در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع مشاهده گردید که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری سرشمع در تراز بستر ($Z/T_p=-1$) رخ می‌دهد و با قرارگیری تراز کارگذاری سرشمع به تراز پایین‌تر ($Z/T_p=-2$) از بستر، بیشینه تنش برشی کاهش می‌یابد. علت این امر، می‌تواند ناشی از افزایش فاصله بین گروه‌پایه‌ها باشد، به طوری که وجود پایه دوم باعث کاهش الگوی جریان در گروه‌پایه شده و عملکرد گروه‌پایه به صورت دو پایه مستقل در تشکیل الگوی جریان رفتار می‌کنند.

۲- با بررسی پروفیل طولی آبستگي اطراف گروه‌پایه کج با شکل هندسی مختلف شمع‌ها، مشاهده شد که شمع دوکی‌شکل نسبت به سایر شکل شمع‌ها، اثر بهتری در کاهش آبستگي از خود نشان می‌دهد. به طوری که حداکثر عمق

نیز به علت فاصله زیاد فضای زیر شمع با بستر جریان و کاهش قدرت نفوذی و گردابه‌های جریان به فضای زیر سرشمع، مقدار فرسایش و آبستتگی در فضای زیر سرشمع نسبت به دو تراز کارگذاری سرشمع دیگر کمتر باشد.

۶- با مقایسه نیم‌رخ طولی نهایی آبستتگی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع مشاهده گردید که در شرایط کارگذاری یکسان، بیشترین کاهش عمق آبستتگی برای شکل هندسی حالت دوکی شکل شمع‌ها اتفاق می‌افتد و هرچه دماغه شمع آئرویدینامیکی و تیز باشد، در کنترل گردابه‌های جریان بهتر عمل می‌کند و این امر باعث کاهش عمق آبستتگی می‌گردد. همچنین در شرایط تراز کارگذاری سرشمع به صورت هم‌ترازی با بستر به علت تأثیر بیشتر و قدرت نفوذ بیشتر جریان به فضای زیر سرشمع و طبعاً قدرت فرسایشی بالا، مقدار حداکثر عمق آبستتگی در این تراز اتفاق می‌افتد.

۴- در بین شرایط کارگذاری سرشمع، بیشترین مقدار آبستتگی، در حالتی که سرشمع هم‌تراز با بستر می‌باشد ($Z/T_p = -1$) اتفاق می‌افتد. در این شرایط، به تدریج با خالی شدن فضای زیر سرشمع، بخشی از جریان به این بخش نفوذ کرده و باعث فرسایش و آبستتگی اطراف گروه شمع‌ها می‌گردد. نکته قابل توجه در این حالت، تأثیر شکل هندسی گروه شمع‌ها بر کاهش آبستتگی و فرسایش زیر سرشمع مؤثر بوده است؛ به طوری که در شرایط یکسان کارگذاری سرشمع، کمترین چاله و بخش فرسایشی زیر سرشمع در شکل دوکی شمع‌ها اتفاق می‌افتد.

۵- برای حالتی که سرشمع بالاتر از بستر بوده ($Z/T_p = 0$) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد و باعث می‌شود که نسبت به شرایط هم‌ترازی سرشمع با بستر، چاله و عمق آبستتگی کمتری ایجاد گردد. در شرایط قرارگیری سرشمع پایین‌تر از بستر ($Z/T_p = -2$)

مراجع

- [1] Breusers, H. N. C., & Raudkivi, A. J. (1991). IAHR hydraulic structures design manual: Scouring, Vol. 2. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [2] Melville, B. W., & Sutherland, A. J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226.
- [3] Parola, A. C., Mahavadi, S. K., Brown, B. M., & El Khoury, A. (1996). "Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(1), 35-40.
- [4] Jones, J. S., Bertoldi, D., & Stein, S. (1995). Alternative scour countermeasures. In *Stream Stability and Scour at Highway Bridges: Compendium of Stream Stability and Scour Papers Presented at Conferences Sponsored by the Water Resources Engineering (Hydraulics) Division of the American Society of Civil Engineers* (pp. 854-854). ASCE.
- [5] Esmaili Varaki, M., Sadat Jafari, M., Ayoubzadeh, A., & Rostami, M. (2016) "Simulation of the flow pattern around the inclined pier group using the Flow-3D numerical model", 30(6), 1860-1873
- [6] Melville, B. W., & Raudkivi, A. J. (1996). "Effects of foundation geometry on bridge pier scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(4), 203-209.
- [7] Sheppard, D. M., Melville, B., & Demir, H. (2013). "Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23.
- [8] Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z., & Beheshti, A. A. (2010). "Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(6), 343-351.
- [9] Abdeldayem, A. W., Elsaed, G. H., & Ghareeb, A. A. (2011). "The effect of pile group arrangements on local scour using numerical models", *Advances in Natural and Applied Sciences*, 5(2), 141-146.

- [10] Amini, A., Melville, B. W., Ali, T. M., & Ghazali, A. H. (2011). "Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 177-185.
- [11] Sheppard, D. M., Melville, B., & Demir, H. (2013). "Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23.
- [12] Ghasemzadeh, F., & Shinyzadeh, p. (2015). Simulation of hydraulic issues in Flow-3D. *Innovative publishing. Tehran. Iran*
- [13] Maroosi, M., Roshan, R., & Sarkordeh, H. (2014). Analysis and design with Flow-3D software, *Fadak isatist publication, First printing, Tehran, Iran* (in farsi)
- [14] Khaple, S., Hanmaiahgari, P. R., Gaudio, R., & Dey, S. (2017). "Interference of an upstream pier on local scour at downstream piers", *Acta Geophysica*, 65(1), 29-46.
- [15] Hoang, N. D., Liao, K. W., & Tran, X. L. (2018). "Estimation of scour depth at bridges with complex pier foundations using support vector regression integrated with feature selection", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(3), 431-442.