

## Numerical Study of the Impact of Distance and Placement of the Adjacent Piers on the Flow Pattern and Local Scour around Bridge Piers in Sandy Bed

YOUSEF HASSANZADEH<sup>1</sup>, NAZILA KARDAN<sup>2\*</sup>, ALI TAMIZI<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

3. Department of Coastal Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Melbourne, Melbourne, Australia.

(Received: Feb. 2, 2020- Revised: Apr. 8, 2020- Accepted: Apr. 25, 2020)

### ABSTRACT

Utilizing adjacent piers is one of the cost reduction factors in bridge construction. The impact of turbulent flow around piers on each other, piers distance and the amount of scouring in the adjacent piers are of great importance. In this research, it is tried to present a convenient and efficient combination of adjacent piers in order to reduce the amount of scour by analyzing the placement of these piers in two different shapes and various distances from each other and its impact on the amount of local scouring and the bed erosion pattern. Numerical simulation is done by FLOW3D software. Designed models for two cylindrical and combined shapes of piers in two specific placements, side by side and tandem, and in 6 different distance between the two piers for each state, totally 26 simulation models were simulated and investigated. It is found that the scouring depth increases significantly by decreasing distance between piers which creates a wider obstacle against the flow and water jet between the piers. The flow depth is decreased by increasing this distance and the adjacent piers have no impact on the amount and pattern of scouring in  $S=4D$  and higher distances away from each other and the most suitable distance was obtained at  $S=2.75D$ . In the tandem cases, it was found that the piers distance does not have any impact on the amount of scouring at the upstream and just the middle part experiences quantitative changes in the bed level; this impact is low by decreasing the distance and obvious by increasing the distance. All the mentioned items are correct in the combined pier, but the amount of scouring shows reduction.

**Keywords:** Scouring, Bridge Pier, Adjacent Piers, Numerical Simulation, Flow3d Software.

---

\* Corresponding Author's Email: [n.kardan@azaruniv.ac.ir](mailto:n.kardan@azaruniv.ac.ir)

## مطالعه عددی تأثیر فاصله و نحوه قرارگیری پایه‌های مجاور بر الگوی جریان و فرسایش بستر ماسه‌ای پیرامون پایه‌های پل

یوسف حسن‌زاده<sup>۱</sup>، نازیلا کاردان<sup>۲\*</sup>، علی تمیزی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

۳. گروه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ملبورن، ملبورن، استرالیا.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۶)

### چکیده

یکی از عوامل کاهش هزینه ساخت پل‌ها، استفاده از پایه‌های مجاور می‌باشد. در پایه‌های مجاور تأثیر جریان‌های متلاطم پیرامون پایه‌ها بر یکدیگر، فاصله پایه‌ها و میزان آبشستگی حائز اهمیت می‌باشند. در این پژوهش با تحقیق در مورد نحوه قرارگیری پایه‌های مجاور با دو مقطع هندسی و با فواصل متفاوت و بررسی تأثیر آن بر مقدار آبشستگی موضعی پایه‌ها و الگوی فرسایش بستر، سعی در ارائه ترکیب مناسب و کارآمد از پایه‌های مجاور در راستای کاهش میزان آبشستگی شده است. مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار Flow3D انجام شده است. مدل‌های طراحی‌شده در دو مقطع هندسی دایره‌ای و مرکب و در دو حالت چیدمان پایه‌های مجاور عمود بر جهت جریان و موازی جهت جریان در شش فاصله متغیر برای هر حالت می‌باشد که در کل تعداد ۲۶ مدل شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با بررسی تغییرات در فاصله بین پایه‌ها در دو حالت مشخص شد که با کاهش فاصله، به دلیل ایجاد مانع وسیع‌تر در برابر جریان و ایجاد جت آب در میان پایه‌ها، آبشستگی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله، این عمق کاهش یافته و در فاصله  $S=4D$  و بیشتر پایه‌های مجاور، تأثیری بر میزان و الگوی آبشستگی نداشته و مناسب‌ترین فاصله  $S=2.75D$  به دست آمد. در حالت پایه‌های موازی جریان، مشخص شد که فاصله تأثیری بر میزان آبشستگی پایه بالادست نداشته و فقط بخش میانی با افزایش فاصله دچار تغییرات کمی می‌شود که با کاهش فاصله این تأثیر کم و با افزایش فاصله مشهود می‌باشد. در پایه مرکب، تمام موارد ذکر شده صادق بوده ولی میزان آبشستگی‌ها با کاهش همراه است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، پایه پل، پایه‌های مجاور، شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار Flow3D.

### مقدمه

با گسترش شبکه حمل و نقل و ارتباطات جاده‌ای و ریلی، احداث پل‌های جدید بر روی مسیر رودخانه‌ها و حفظ و نگهداری این سازه‌های راهبردی محسوس می‌باشد. مهم‌ترین عامل در امر طراحی پل‌های واقع در مسیر رودخانه‌ها مقابله با آبشستگی می‌باشد (Kardan et al., 2014). میزان عمق آبشستگی با استفاده از روابط تجربی و یا مدل‌های فیزیکی و عددی تعیین می‌شود. برآورد بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه‌های پل رودخانه‌ای برای طراحی بهینه و قابل اطمینان آن‌ها ضروری است. طراحی و ساخت پایه‌های پل به دلیل عدم دست بودن تئوری واحدی برای محاسبه و برآورد عمق آبشستگی با ضریب اطمینان بالا، امری دشوار بوده و با پذیرش ریسک‌پذیری در خطای محاسبات همراه است. با در نظر گرفتن شرایط مختلفی که در وقوع آبشستگی دخیل هستند و استفاده از روابط متعدد موجود برای

محاسبه عمق آبشستگی، الزاماً نتایج یکسانی در تعیین این عمق به دست نمی‌دهد. اکثر مطالعات انجام‌شده در این زمینه در آزمایشگاه‌ها بر روی بستر ماسه‌ای و در شرایط متعادل انجام‌شده و کاربرد این نتایج در شرایط مختلف نیاز به دخیل کردن ضریب اطمینان بالا دارد. لذا به‌کارگیری روش‌هایی برای کاهش عمق آبشستگی در پیرامون پایه‌ها برای کاهش عمق قرارگیری پی پایه‌ها و کاهش هزینه ساخت می‌تواند قابل تأمل و ضروری باشد (Aghaee-Shalmani and Hakimzadeh, 2015).

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در مورد نحوه و ماهیت پدیده آبشستگی و راهکارهای کنترل و کاهش آن انجام شده است و با تغییرات در شکل و زاویه قرارگیری پایه در مسیر جریان و استفاده از ابزارهای کنترل‌کننده همچون طوقه، راه‌حل‌هایی برای کاهش میزان آبشستگی ارائه شده است.

Breusers et al. (1977) نشان دادند که شکل پایه در

استفاده از مدل آشفتگی سه‌بعدی  $k-\varepsilon$ ، جریان و الگوی آبشستگی را در پیرامون پایه استوانه‌ای بررسی کرده و به ارزیابی تأثیر گردابه‌ها و رسوب معلق در این مدل‌سازی پرداخته‌اند. Guemou *et al.* (2016) به بررسی عددی تأثیر شکل آیرودینامیک پایه بر میزان نیروی برشی بستر پرداخته و پارامترهای ابعادی پایه را برای کاهش میزان این نیرو بررسی کرده‌اند و نتیجه گرفتند که شکل آیرودینامیک پایه، نقش بسیار مهمی در کاهش نیروی برشی بستر پیرامون پایه دارد.

Mohammadi (2006) به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر مقطع هندسی پایه بر آبشستگی اطراف پایه پل پرداخت. پایه‌های مورد استفاده در این تحقیق، پایه با مقطع دایره‌ای، مستطیلی، بیضی و دوکی‌شکل بودند. نتایج نشان داد مقاطعی که آشفتگی زیادی به وجود نمی‌آورند و جریان به آرامی از کنار آن‌ها می‌گذرد، عملکرد بهتری دارند. با توجه به نتایج حاصله مقاطع بیضی و دوکی‌شکل به‌عنوان بهترین سطح مقطع در کاهش آبشستگی اطراف پایه معرفی شدند. Hassanzadeh *et al.* (2012) تأثیر اشکال مختلف پایه پل بر الگوی جریان را در نرم‌افزار فلوننت مورد بررسی قرار دادند. Kardan *et al.* (2014) به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی پارامترهای هیدرودینامیک اطراف پایه استوانه‌ای با مدل‌های آشفتگی مختلف پرداخته‌اند. Hassanzadeh *et al.* (2015) به بررسی عددی در رابطه با تأثیر مدل‌های ترکیبی تعدیل‌کننده آبشستگی اطراف پایه پل، بر میزان کاهش تنش‌های برشی آغازکننده آبشستگی پرداخته‌اند.

آبشستگی پیرامون پایه پل با قطر مؤثر پایه که در جهت عمود بر جریان باشد، ارتباط مستقیم داشته و با افزایش قطر مؤثر، عمق گودال آبشستگی افزایش می‌یابد. این امر ضرورتی برای بررسی ساخت پل‌هایی با پایه‌هایی است که دارای حداقل قطر مؤثر ممکن بوده و مشکلی در کارایی پل ایجاد نمی‌کنند تا این امر کمکی بر کاهش میزان آبشستگی پیرامون پایه باشد. همچنین ساخت پل‌هایی با پایه‌های بزرگ بسیار هزینه‌بر بوده و نیز اجرای ابعاد بزرگ این سازه‌ها مشکلات دوجندان ایجاد می‌کند. از این رو، در پژوهش حاضر به بررسی جایگزین کردن یک پایه با قطر مؤثر بزرگ با دو پایه با قطر مؤثر کوچک‌تر و مطالعه در مورد مزایا و معایب این راه‌حل و بررسی تأثیر فاصله پایه‌های جایگزین بر میزان آبشستگی پرداخته شده است. سعی بر آن بوده که مطالعات عددی پیرامون مسائل مختلف مطرح در این بحث همچون الگوی جریان در منطقه قرارگیری پایه‌ها و نحوه عملکرد تغییر فاصله پایه‌ها در دو الگوی قرارگیری هم‌راستا و عمود بر جریان، در ۵ فاصله مختلف مرکز به مرکز پایه‌ها و ۲ نوع مقطع پایه متفاوت با قطر مؤثر برابر بررسی شود. مدل‌سازی عددی تحت نرم‌افزار

تشکیل گردابه نعل اسبی نقش بسزایی دارد؛ به‌طوری‌که هر چه میزان انطباق جریان با شکل پایه بیشتر باشد، گرادیان فشار معکوس کمتر بوده و در نتیجه قدرت گردابه‌های نعل اسبی کمتر خواهد بود. Tseng *et al.* (2000) جریان پیرامون پایه‌های دایره و مربعی شکل را به‌صورت عددی و با استفاده از مدل آشفتگی LES شبیه‌سازی نموده‌اند. Ali and Karim (2002) از نرم‌افزار فلوننت برای پیش‌بینی مشخصات سه‌بعدی جریان مجاور پایه با مقطع استوانه‌ای استفاده نموده و نشان دادند مقدار تنش برشی بستر پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار فلوننت تطابق قابل قبولی با مقدار تنش‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری سرعت در مجاورت بستر دارد. Salaheldin *et al.* (2004) جریان سه‌بعدی پیرامون پایه‌های پل دایره‌ای شکل را به‌صورت عددی مدل‌سازی نموده‌اند. Duc and Rodi (2008) آبشستگی در حالت آب زلال را برای حالات مختلف مورد بررسی قرار داده و برای این کار کدنویسی عددی انجام داده و پس از مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی و صحت‌سنجی آن‌ها، عمق آبشستگی را در زمان‌های مختلف به دست آوردند. در این پژوهش از مدل  $K-\varepsilon$  به‌عنوان مدل آشفتگی استفاده شده است. Drysdale (2008) به‌صورت آزمایشگاهی و عددی تأثیر پایه دوکی‌شکل در کاهش گردابه‌های نعل اسبی و گردابه‌های برخاستگی را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد گردابه‌های نعل اسبی در جلوی پایه دوکی به مقدار زیادی نسبت به پایه استوانه‌ای کاهش یافته است. در مقابل مقطع دوکی‌شکل تأثیری در فرسایش گردابه‌های نعل اسبی نداشته و آبشستگی ایجادشده در مقابل پایه، مشابه حفره آبشستگی تشکیل‌شده در اطراف پایه‌ی استوانه‌ای می‌باشد. Khosronejad *et al.* (2012) با توسعه یک مدل عددی، پدیده آبشستگی در پیرامون پایه پل را برای اشکال مختلف پایه‌ها بررسی نموده‌اند. حالات در نظر گرفته شامل پایه‌های با مقطع دایره‌ای، مربع و لوزی بوده و برای حل معادله انتقال رسوب در بستر از روش حجم محدود استفاده شده است. نتایج نشان داد پایه‌های لوزی شکل پاسخ بهتری نسبت به سایر واریانت‌ها داشته و همچنین نتایج تحقیق مستقل از اندازه شبکه بوده ولی نسبت به شکل پایه حساس می‌باشد.

Kim *et al.* (2014) به بررسی تأثیر کاربرد پایه‌های جفت با مقطع دایره‌ای، بر میزان آبشستگی و الگوی جریان پرداخته و مدل عددی تهیه‌شده را با نتایج آزمایش‌های Khosronejad *et al.* (2012) مقایسه نموده‌اند. ایشان نشان دادند کاربرد پایه‌های جفت تأثیر مثبتی در کاهش عمق حفره آبشستگی دارد و همچنین با افزایش فاصله پایه‌ها مجاور در راستای عمود بر جریان عمق حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. Baykal *et al.* (2015) با

شامل انتقال رسوبات بستر و رسوبات معلق می‌باشد. با فرض جریان دو فاز ذرات رسوب در سیال و برقراری رابطه مومنتم در فاز پیوسته سیال، معادله (۳) و فاز ناپیوسته ذرات رسوبی معادله (۴)، و از تفاضل معادله (۳) و معادله (۴)، رابطه (۵) حاصل می‌شود (Smith and Foster, 2005):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + F \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_s = -\frac{1}{\rho_s} \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\frac{\partial u_{diff}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_{diff} = \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در این روابط،  $u_s$  سرعت ذرات رسوب،  $\bar{u} (= (1-f_s)u + f_s u_s)$  سرعت متوسط حجمی سیال،  $F$  نیروهای وزنی،  $u_r (= u_s - \bar{u})$  سرعت نسبی ذرات رسوب و سیال،  $u_{diff} (= u_s - \bar{u})$  سرعت رانشی ذرات رسوب می‌باشد. رابطه بقای جرم برای جریان با سرعت متوسط حجمی سیال  $\nabla \bar{u} = 0$  نیز باید برقرار باشد. پارامتر شیلدز بحرانی  $\theta_{cr}$  کمینه تنش برشی جهت بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد (Brethour and Burnham, 2010):

$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g(\rho_s - \rho)d_n} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$d_n$  قطر ذره رسوب و اندیس  $n$  به  $n$  امین ذره رسوب اشاره دارد. مقدار عدد شیلدز بحرانی در بسترهای صاف افقی برابر مقدار ثابت  $0.05$  در نظر گرفته شده و یا با استفاده از رابطه سالبوی و وایت‌هاوس مقدار دقیق آن قابل تعریف است. فرم بی‌بعد معادله انتقال رسوب برای ذره رسوب  $n$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{\left[ g(S_n - 1)d_n^3 \right]^{1/2}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$q_{b,n}$  نرخ انتقال رسوب حجمی به ازای واحد عرض بستر و  $\Phi_n$  بر اساس معادله میسرپیتر-مولر (۱۹۸۴) محاسبه می‌شود (Flow Science Inc., 2008):

$$\Phi_n = B_n (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} c_{b,n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$B_n$  ضریب بار بستر بوده و مقدار آن برای نرخ انتقال رسوب پایین بین ۵ تا  $5/7$ ، برای نرخ انتقال متوسط حدود ۸ و برای نرخ انتقال بالا برابر ۱۳ اختیار می‌شود.  $c_{b,n}$  جزء حجمی ذره رسوب  $n$  در بستر است:

$$\sum_{n=1}^N c_{b,n} = 1 \quad (\text{رابطه ۹})$$

Flow3D انجام شده و تعداد ۲۶ مورد مدل‌سازی انجام یافته است. نتایج مدل‌سازی عددی حاصل شده با داده‌های آزمایشگاهی موجود در متون فنی مقایسه شده و صحت‌سنجی صورت پذیرفته است.

## مواد و روش‌ها

### نرم‌افزار Flow3D

جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر جریان‌های آشفتنه، از بسته نرم‌افزاری Flow3D استفاده شده است که توانایی محاسبات بالا در جریان کانال‌های باز را داراست. در این مدل عددی، معادلات حاکم بر جریان با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌شوند. در این روش میدان محاسباتی به شبکه‌هایی با سلول‌های مستطیلی تقسیم‌بندی شده که برای هر سلول میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد؛ یعنی تمامی متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی حجم سیال<sup>۱</sup> و روش کسر مساحت-حجم مانع<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی هندسی مرزها استفاده می‌شود. روش حجم سیال برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد آب (مرز آب و هوا) و روش کسر مساحت-حجم مانع برای شبیه‌سازی سطوح و مرزهای هندسی احجام صلب (مرز آب و جامد) کاربرد دارد.

مدل هیدرودینامیک بر مبنای حل معادلات ناویر استوکس سه‌بعدی و معادله پیوستگی می‌باشد. معادلات ناویر استوکس و پیوستگی مورد استفاده در Flow3D برای جریان‌های غیرقابل تراکم در ادامه آمده است (Flow Science Inc., 2008):

$$\frac{\partial}{\partial X_i} u_i A_i = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_j} + G_i + f_i - k u_i \quad (\text{رابطه ۲})$$

که؛  $u_i$  سرعت متوسط،  $P$  فشار،  $A_i$  کسر مساحت باز برای جریان در راستای  $i$   $V_f$  کسر حجم باز برای جریان،  $G_i$  شتاب ناشی از نیروهای وزنی،  $f_i$  شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز،  $k$  ترم دراگ بین ذرات رسوب و  $\rho$  دانسیته سیال می‌باشد.

مدل آبشستگی نرم‌افزار Flow3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادله انتقال رسوب پخش (انتشار) - انتقال<sup>۳</sup>، میزان انتقال رسوب و آبشستگی بستر را برآورد می‌کند و با استفاده از روش کسر حجم سیال، ارتفاع سطح بستر در هر سلول محاسباتی را پیش‌بینی می‌نماید. مدل آبشستگی این نرم‌افزار

۰/۲۸ متر بر ثانیه به دست آمده است که برای برقراری آبشستگی آب زلال نسبت  $u/u_{cr}$  برابر ۰/۹ انتخاب شده است. لذا سرعت میانگین جریان در مدل‌های عددی ۰/۲۵ متر بر ثانیه وارد شده است.

فرآیند تولید شبکه در مسائل مدل‌سازی عددی دارای اهمیت فراوان بوده و تولید شبکه مناسب تأثیر مستقیم بر روی صحت و دقت نتایج به‌دست‌آمده و همچنین زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات خواهد داشت. شبکه‌بندی مورد استفاده در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن عدم دخالت سلول‌های موجود در ابتدا و انتهای کانال به صورت مکعب مستطیلی نامنظم در نظر گرفته شده است. در بخش میانی کانال و محل قرارگیری پایه‌ها، سعی در ایجاد شبکه منظم در دو راستای طول و عرض کانال برای جلوگیری از هرگونه اختار و یا توقف محاسبات در زمان شبیه‌سازی شده است. با در نظر گرفتن شش نوع شبکه‌بندی و بررسی زمان لازم برای محاسبات با تعداد شبکه‌های مفروض و صحت‌سنجی نهایی بر اساس نتایج آزمایشگاهی موجود، شبکه‌بندی مناسب بر اساس ابعاد شبکه‌های میانی و بقیه شبکه‌بندی متأثر از آن انتخاب شده‌اند. در جدول (۱) مشخصات این شبکه‌ها آورده شده است.

$N$  تعداد کل ذرات رسوب می‌باشد. رابطه Van Rijn (1984) برای محاسبه ضخامت لایه رسوبی  $h_n$  مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$h_n = 0.3d_n d_{*,n}^{0.7} \left( \frac{\theta_n}{\theta_{cr,n}} - 1 \right)^{0.5} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

### ساخت مدل در نرم‌افزار

هندسه مدل عددی، بر اساس فلوم آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه تبریز می‌باشد. هدف از این مدل‌سازی امکان صحت‌سنجی نتایج عددی و اطمینان از درستی آن‌ها است. در داخل کانال بستر مورد نظر به طول ۲ متر به حالت بستر صلب، در ادامه به طول ۲ متر بستر رسوبی و سپس طول ۲ متر بعدی به حالت بستر صلب مطابق مدل آزمایشگاهی، مدل‌سازی شد. عرض کانال ۱ متر و ارتفاع رسوب ۰/۲ متر می‌باشد. مصالح بستر، ماسه غیر چسبنده با اندازه میانگین ذرات ۰/۷ میلی‌متر، چگالی نسبی دانه‌ها ۲/۶۵ و زاویه ایستایی ذرات ۳۲ درجه است. پارامتر شیلدز از محاسبات برابر ۰/۰۵ به دست آمد. در تمام مدل‌ها، دبی جریان ۵۰ لیتر بر ثانیه، عمق جریان برابر با ۲۰ سانتی‌متر و عدد فرود ۰/۱۸ است. سرعت آستانه حرکت از محاسبات و از مشاهدات عینی در آزمایشگاه برابر

جدول ۱- شبکه‌بندی‌های تولیدشده

تعداد کل شبکه‌ها	ابعاد شبکه‌های میانی $X \times Y \times Z$ (cm)	محدوده بخش مرکب شبکه (m)	ردیف
۹۶۸۰۰۰	۱×۱×۰/۲	X ۰-۲/۷، ۲/۷-۳/۳، ۳/۳-۶	۱
		Y ۰-۰/۳، ۰/۳-۰/۷، ۰/۷-۱	
		Z ۰-۰/۱، ۰/۱-۰/۳، ۰/۳-۰/۵	
۷۰۱۳۳۴	۱×۱×۰/۳	X ۰-۲/۷، ۲/۷-۳/۳، ۳/۳-۶	۲
		Y ۰-۰/۳، ۰/۳-۰/۷، ۰/۷-۱	
		Z ۰-۰/۱، ۰/۱-۰/۳، ۰/۳-۰/۵	
۵۶۸۰۰۰	۱×۱×۰/۴	X ۰-۲/۷، ۲/۷-۳/۳، ۳/۳-۶	۳
		Y ۰-۰/۳، ۰/۳-۰/۷، ۰/۷-۱	
		Z ۰-۰/۱، ۰/۱-۰/۳، ۰/۳-۰/۵	
۴۸۸۰۰۰	۱×۱×۰/۵	X ۰-۲/۷، ۲/۷-۳/۳، ۳/۳-۶	۴
		Y ۰-۰/۳، ۰/۳-۰/۷، ۰/۷-۱	
		Z ۰-۰/۱، ۰/۱-۰/۳، ۰/۳-۰/۵	
۲۱۳۵۰۰	۲×۲×۰/۴	X ۰-۲/۷، ۲/۷-۳/۳، ۳/۳-۶	۵
		Y ۰-۰/۳، ۰/۳-۰/۷، ۰/۷-۱	
		Z ۰-۰/۱، ۰/۱-۰/۳، ۰/۳-۰/۵	
۲۸۵۴۲۰	۱/۵×۱/۵×۰/۴	X ۰-۲/۷، ۲/۷-۳/۳، ۳/۳-۶	۶
		Y ۰-۰/۳، ۰/۳-۰/۷، ۰/۷-۱	
		Z ۰-۰/۱، ۰/۱-۰/۳، ۰/۳-۰/۵	

میلی‌متر برای مقدار Z شبکه میانی انتخاب شد. با توجه به تعداد

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در ردیف‌های ۱ تا ۴، اندازه ۴

مؤثر پایه‌ها  $(S/D) D$  برابر با ۰/۲۵، ۰/۸۷۵، ۱/۵، ۲/۷۵، ۴ و ۵ می‌باشد. پایه مبنا استوانه‌ای با قطر ۷ سانتی‌متر می‌باشد و به منظور تعدیل اثرات آبشستگی، پایه با مقطع هندسی بهینه بررسی شده است که جزئیات هندسه‌ی پایه در شکل ۲ (پ) آورده شده است. در مجموع تعداد ۲۶ مدل ساخته شد که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

زمان یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در گسترش آبشستگی می‌باشد. با توجه به زمان بر بودن شبیه‌سازی در مدل‌های عددی، تعیین بازه زمانی مناسب اهمیت بالایی دارد. در این پژوهش انجام چندین شبیه‌سازی و بررسی نتایج به‌دست‌آمده در زمان‌های مختلف، به انتخاب بازه زمانی شبیه‌سازی ۲۰۰۰ ثانیه انجامیده که این مدت زمان از شبیه‌سازی، در حدود ۴۰ ساعت به اتمام رسید. میزان زمان تعادلی برای مقاطع مختلف متفاوت بوده و با کاهش قطر مؤثر در مقابل جریان و همچنین بهینه‌شدن شکل هندسی پایه، زمان تعادل کاهش می‌یابد. بعد از گذشت ۱۲۰۰ ثانیه از شبیه‌سازی در پایه استوانه‌ای مبنا، میزان افزایش عمق حفره آبشستگی تا ۲۰۰۰ ثانیه در حدود ۸ میلی‌متر است و نهایتاً آبشستگی در ۲۰۰۰ ثانیه به مقدار ۶۴ میلی‌متر رسیده است.

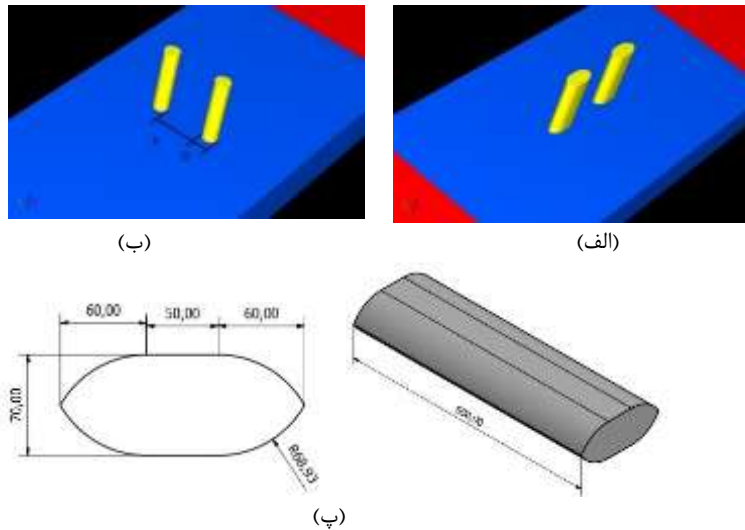
شبکه‌ها و نتایج به‌دست‌آمده مقدار ۱۵ میلی‌متر برای مقادیر  $X$  و  $Y$  در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی عددی علاوه بر شبکه‌بندی میدان محاسباتی، تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه مناسب نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. شرایط مرزی مفروض برای این پژوهش، به‌صورت wall برای دیواره‌ها و کف کانال، به‌صورت symmetry برای بخش فوقانی کانال، دبی ورودی معادل ۵۰ لیتر بر ثانیه و عمق آب ۲۰ سانتی‌متر در ورودی و دبی خروجی در خروجی کانال انتخاب شده است. شرایط اولیه با در نظر گرفتن حالت فشار هیدرواستاتیک مطابق با ارتفاع آب موجود در کانال و همچنین تعیین محدوده سیال و مصالح بستر رسوبی که امکان جابجایی در طول مدل‌سازی را دارند، می‌باشد. تعیین سرعت اولیه سیال نیز در این بخش مورد نظر می‌باشد که برابر ۰/۲۵ متر بر ثانیه وارد شده است.

#### مشخصات مدل پایه‌ها

پژوهش انجام‌شده برای تعیین تأثیر فاصله پایه‌ها بر نحوه توسعه و تغییرات حفره آبشستگی و همچنین بررسی شرایط ایجادکننده این تغییرات می‌باشد. پایه‌های مجاور با دو نوع چیدمان عمود بر جهت جریان و موازی جهت جریان در ۶ فاصله سطح به سطح پایه‌ها  $S$  قرار داده شده‌اند (شکل ۱). نسبت این فاصله به قطر

جدول ۲- مدل‌های مورد بررسی

پایه با مقطع مرکب				پایه با مقطع دایره‌ای			
ردیف	نام مدل	نحوه چیدمان	نسبت فاصله $S/D$	ردیف	نام مدل	نحوه چیدمان	نسبت فاصله $S/D$
۱	A	منفرد	---	۱۴	B	منفرد	---
۲	AS-1		۰/۲۵	۱۵	BS-1		۰/۲۵
۳	AS-2		۰/۸۷۵	۱۶	BS-2		۰/۸۷۵
۴	AS-3	عمود بر جهت	۱/۵	۱۷	BS-3	عمود بر جهت	۱/۵
۵	AS-4	جریان <sup>۱</sup>	۲/۷۵	۱۸	BS-4	جریان	۲/۷۵
۶	AS-5		۴	۱۹	BS-5		۴
۷	AS-6		۵	۲۰	BS-6		۵
۸	AT-1		۰/۲۵	۲۱	BT-1		۰/۲۵
۹	AT-2		۰/۸۷۵	۲۲	BT-2		۰/۸۷۵
۱۰	AT-3	موازی جهت	۱/۵	۲۳	BT-3	موازی جهت	۱/۵
۱۱	AT-4	جریان <sup>۲</sup>	۲/۷۵	۲۴	BT-4	جریان	۲/۷۵
۱۲	AT-5		۴	۲۵	BT-5		۴
۱۳	AT-6		۵	۲۶	BT-6		۵



شکل ۱- (الف) چیدمان پایه‌ها عمود بر جریان (ب) چیدمان پایه‌ها موازی جریان و مفاهیم D و S (پ) مشخصات پایه مرکب بهینه طراحی شده (واحد میلی‌متر)

می‌باشد. با معلوم بودن عمق و زمان تعادلی آبهستگی، تغییرات

زمانی عمق آبهستگی بیشینه از رابطه (۱۳) حاصل می‌شود:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{U_c}{U} \ln \left( \frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

زمانی عمق آبهستگی در زمان  $t$  می‌باشد. مقایسه منحنی تغییرات عمق آبهستگی بی بعد شده  $(d_s/d_{se})$  برای نتایج آزمایشگاهی (Melville (1975)، مدل عددی در پژوهش حاضر (مدل مبنا) و نتایج حاصله از رابطه (۱۳) در شکل (۲) نشان داده شده است.

متوسط اختلاف عمق آبهستگی آزمایشگاهی و مقدار حاصله از رابطه (۱۳) برابر ۳/۴۵ درصد، متوسط اختلاف نتایج عددی با نتایج رابطه (۱۳) برابر ۶/۸۳ درصد و متوسط اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی برابر ۲/۸۷ درصد است. این اختلاف نشان می‌دهد که نتایج عددی، تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی و نتایج محاسباتی داشته و می‌توان با اطمینان به نتایج مدل عددی استناد نمود.

### صحت‌سنجی

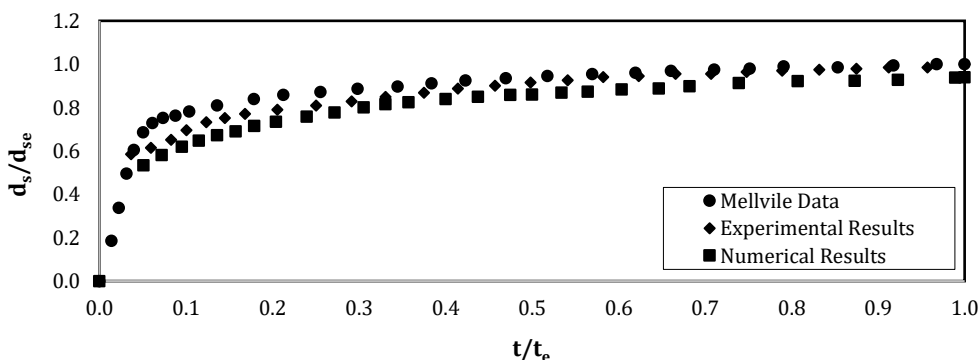
به منظور بررسی صحت عمق آبهستگی اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف آزمایش و در مدل عددی، نمودار تغییرات زمانی عمق فرسایش بستر با مقادیر محاسباتی از رابطه Melville and Chiew (1999) مقایسه شده است. برای این منحنی، عمق تعادلی آبهستگی و زمان تعادلی آبهستگی باید محاسبه شوند که این مقادیر به ترتیب از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند:

$$d_{se} = k_{yD} k_I k_d k_s k_\theta \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که  $d_{se}$  عمق تعادلی آبهستگی،  $k_{yD}, k_I, k_d, k_s, k_\theta$  به ترتیب ضریب زاویه برخورد جریان، ضریب شکل، ضریب عرض پایه، ضریب شدت جریان و ضریب عمق جریان می‌باشند.

$$t_e (\text{days}) = \begin{cases} 30.89 \frac{D}{U} \left( \frac{U}{U_c} \right) \left( \frac{y}{D} \right)^{0.25} & \frac{y}{D} \geq 6 \\ 48.26 \frac{D}{U} \left( \frac{U}{U_c} - 0.4 \right) & \frac{y}{D} < 6 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که  $U$  سرعت جریان،  $U_c$  سرعت بحرانی جریان،  $y$  عمق جریان،  $D$  قطر پایه و  $t_e$  زمان تعادلی آبهستگی بر حسب روز

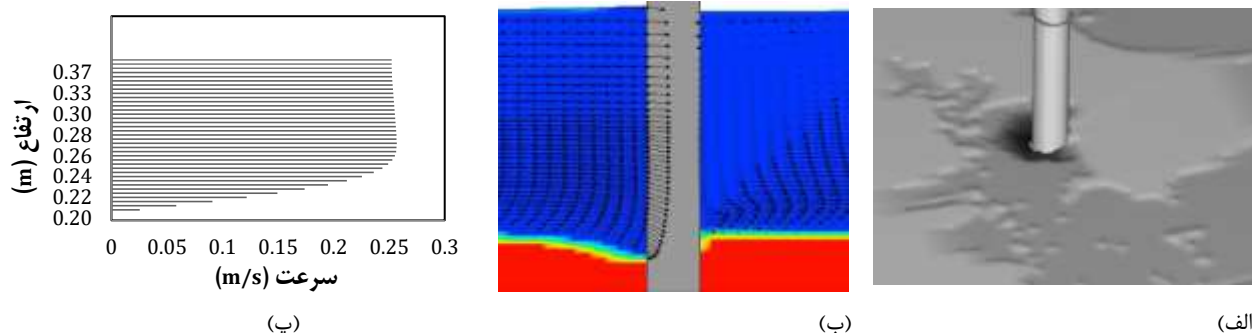


شکل ۲- مقایسه منحنی تغییرات زمانی عمق آبهستگی تجربی (Melville (1975)، نتایج حاصله از رابطه Melville and Chiew (1999)، و مدل عددی حاضر

## نتایج و بحث

### مدل مبنا

بر اساس مدل ساخته شده، شرایط اولیه و مرزی تعیین شده، فرم سه بعدی حفره آبشستگی، الگوی جریان پیرامون پایه پل مدل مبنا (کانتور آبی مربوط به سیال آب و کانتور قرمز مربوط به بستر



شکل ۳- الف) فرم سه بعدی حفره آبشستگی، ب) الگوی جریان پیرامون پایه پل، پ) منحنی سرعت

بوده و حفره آبشستگی تقریباً به عمق تعادلی خود رسیده است.

شکل (۶) نشان دهنده گسترش زمانی حفره آبشستگی برای پایه‌های مجاور  $S=4D$  می‌باشد. در زمان ۱۰۰ ثانیه آبشستگی در پیرامون پایه شروع شده و در جناحین پایه با زاویه‌ای تقریباً ۴۵ درجه نسبت به بالادست پایه‌ها، در حال گسترش یافتن می‌باشد. در زمان ۳۰۰ ثانیه آبشستگی در حال گسترش و منتقل شدن به بخش پایینی پایه می‌باشد. در زمان ۱۴۰۰ ثانیه حفره آبشستگی به طور کامل توسعه یافته و حفره‌های آبشستگی به شکل مستقل در اطراف هر پایه تشکیل می‌شوند بدون اینکه بر حفره آبشستگی پایه‌ی مجاور تأثیر بگذارند. همچنین در این زمان، عمق آبشستگی به عمق نهایی بسیار نزدیک شده است. در زمان ۲۰۰۰ ثانیه تغییرات محسوسی در الگو و عمق نهایی حفره آبشستگی صورت نگرفته و تنها در بخش‌های سطح بستر تغییرات بسیار کمی دیده می‌شود. در جدول (۳) بیشینه عمق آبشستگی در انتهای زمان ۲۰۰۰ ثانیه برای مدل‌های گروه AS ارائه شده است.

در مدل AS-1، به دلیل فاصله کمی پایه‌ها، جریان نمی‌تواند از فاصله بین پایه‌ها عبور کرده و سطح تماس بزرگتری در مقابل جریان تشکیل شده و جدایش جریان از سطح پایه‌ها با شدت بسیار زیادی رخ می‌دهد. لذا عمق آبشستگی نسبت به حالت منفرد به میزان ۳۲ میلی‌متر افزایش داشته است. با افزایش فاصله بین پایه‌ها (مدل AS-2)، فضای بیشتری برای عبور جریان فراهم شده و عمق آبشستگی نسبت به مدل با فاصله  $S=0.25D$ ، حدود ۱۶ میلی‌متر کاهش یافته است.

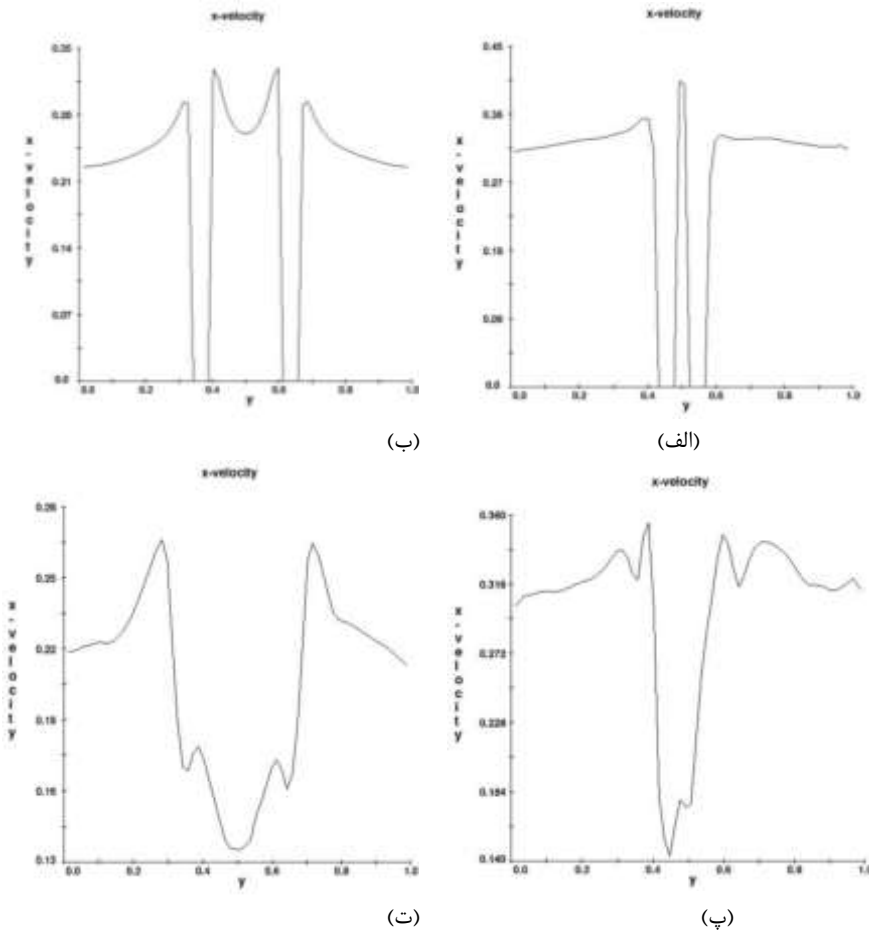
### مدل‌های گروه AS

منحنی سرعت جریان و تغییرات آن در ۲ مقطع عرضی کانال، در راستای قرارگیری پایه‌ها ( $y=0$ ) و در ۴D به سمت پایین دست از محل پایه‌ها ( $y=-4D$ ) برای دو فاصله  $S=0.25D$  و  $S=4D$  بررسی شده است (شکل ۴).

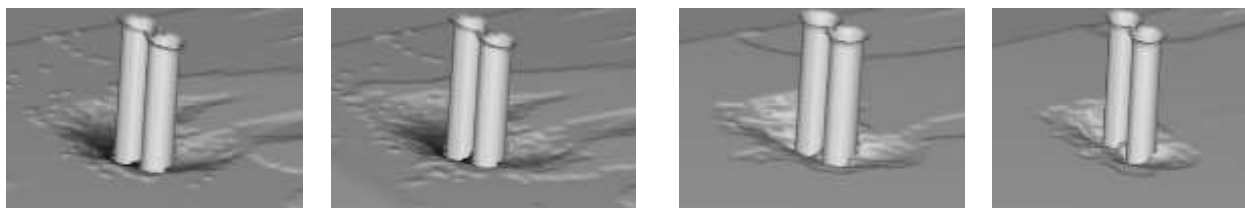
با توجه به نتایج می‌توان گفت که در فاصله  $S=0.25D$ ، سرعت میان پایه‌ها افزایش می‌یابد و در ادامه با تداخل نوسانات، این تغییرات کاهش می‌یابد. این مقطع در ارتفاعی از بستر در نظر گرفته شده است که هیچ‌گونه مداخله رسوب در آن دیده نمی‌شود. بیشینه مقدار سرعت در فاصله  $S=0.25D$  به مقدار ۲۵ درصد بیشتر از بیشینه سرعت حالت  $S=5D$  است لذا این سرعت بالا نشان دهنده به وجود آمدن جریان جت آب در فاصله‌های کم می‌باشد که موجب افزایش عمق آبشستگی می‌شود.

فرم سه بعدی گسترش زمانی حفره آبشستگی برای پایه‌های مجاور در فاصله  $S=0.25D$  در شکل (۵) آورده شده است. در ۱۰۰ ثانیه اول آبشستگی در کناره‌ها و بالادست پایه‌ها دیده شده لیکن حفره آبشستگی به طور کامل در اطراف پایه‌ها تشکیل نشده است. در زمان ۳۰۰ ثانیه حفره آبشستگی شروع به گسترش و شکل‌گیری نموده و با تجمع رسوبات در پشت پایه، بالادستی رسوبات در پایین دست حفره آبشستگی مشاهده می‌شود. در زمان ۱۴۰۰ ثانیه حفره آبشستگی بسیار بزرگتر و عمیق‌تر شده و تغییرات کمی در عمق حفره آبشستگی دیده می‌شود؛ این در حالی است که فرم کامل و متقارن حفره تقریباً حاصل شده است. در زمان ۲۰۰۰ ثانیه الگوی آبشستگی با تغییرات کوچکی همراه

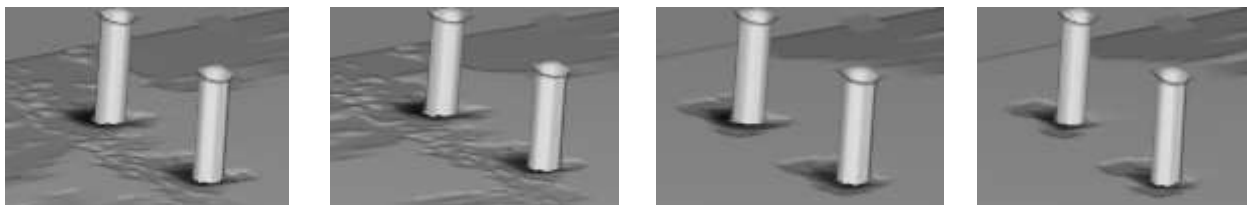




شکل ۴- نمودارهای تغییر سرعت (m/s) در عرض کانال (m) در مدل‌های (الف) AS-1 و در مقطع  $y=0$  (ب) AS-5 و در مقطع  $y=0$  (پ) AS-1 و در مقطع  $y=-5D$  (ت) AS-5 و در مقطع  $y=-5D$



شکل ۵- گسترش زمانی آبشستگی مدل‌های گروه AS در فاصله قرارگیری  $S=0.25D$  در زمان‌های (الف) ۱۰۰ (ب) ۳۰۰ (پ) ۱۴۰۰ و (ت) ۲۰۰۰ ثانیه.



شکل ۶- گسترش زمانی آبشستگی مدل‌های گروه AS در فاصله قرارگیری  $S=4D$  در زمان‌های (الف) ۱۰۰ (ب) ۳۰۰ (پ) ۱۴۰۰ و (ت) ۲۰۰۰ ثانیه

که برابر با مقدار عمق آبشستگی برای پایه‌ی منفرد است. این مقادیر نشان می‌دهد در فاصله‌ی  $2/75$  برابر قطر پایه، اثر پایه‌ی مجاور کاملاً از بین رفته و تأثیر آن حذف شده است. در مدل AS-

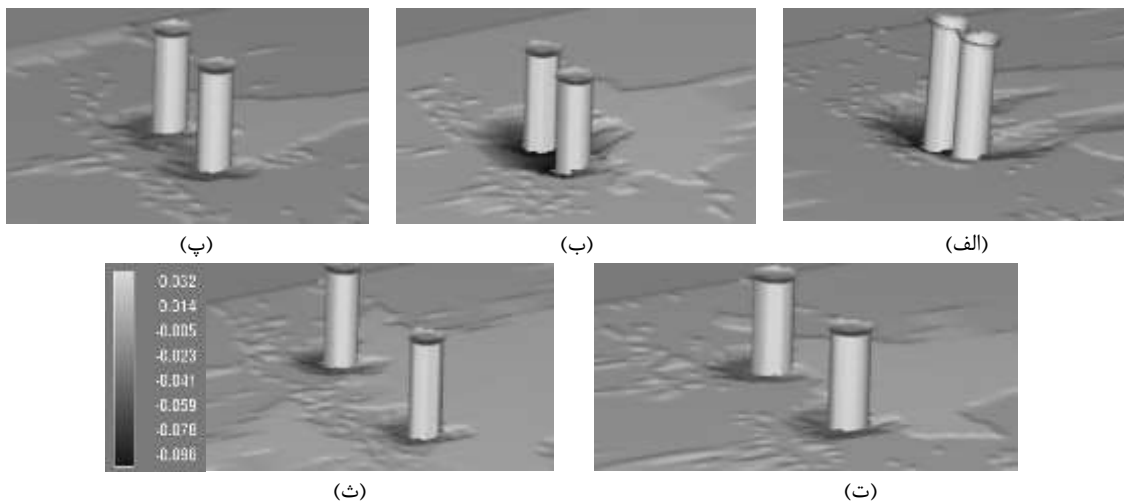
روند کاهش عمق آبشستگی با افزایش فاصله، در مدل‌های AS-3 و AS-4 نیز دیده می‌شود؛ به طوری که کمترین عمق آبشستگی در مدل AS-4 با مقدار ۶۴ میلی‌متر به دست آمده است

سرعت جریان می‌شود. در نتیجه عمق آبشستگی نسبت به حالت پایه‌ی منفرد روند افزایشی به خود می‌گیرد. شکل (۷) مقایسه حفره آبشستگی پیرامون پایه‌ها را در مدل‌های گروه AS نشان می‌دهد.

5 با وجود افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها به ۵ برابر قطر، عمق آبشستگی بیشتر شده است. دلیل این امر اثر دیواره‌های کناری بر روند آبشستگی است؛ بدین صورت که گرچه با افزایش فاصله پایه‌ها، اثر آن‌ها بر هم کم می‌شود لیکن پایه‌ها به دیواره‌ی کناری نزدیک‌تر شده و این دیواره موجب کاهش عرض عبوری و افزایش

جدول ۳- بیشینه مقدار عمق آبشستگی برای مدل‌های گروه AS

نام مدل	نحوه چیدمان	نسبت فاصله S/D	بیشینه عمق آبشستگی (mm)
A	منفرد	---	۶۴
AS-1		۰/۲۵	۹۶
AS-2		۰/۸۷۵	۸۰
AS-3	عمود بر جهت جریان	۱/۵	۶۸
AS-4		۲/۷۵	۶۴
AS-5		۴	۶۶
AS-5		۵	۶۸



شکل ۷- الگوی آبشستگی حالت چیدمان عمود بر جریان در مدل‌های (الف) AS-1 (ب) AS-2 (پ) AS-3 (ت) AS-4 (ث) AS-5

و جریان فرصت ایجاد گردابه نعل اسبی در بالادست پایه دوم را ندارد. در حالت  $S=4D$  جریان در حدود ۴۰ درصد سرعت میانگین را به خود گرفته و در ادامه با سرعتی کمتر به پایه پشتی برخورد می‌کند که باعث ایجاد گردابه نعل اسبی ضعیف‌تر می‌شود. سپس رسوبات فرسایش‌یافته از بالادست، توسط جریان به داخل حفره آبشستگی پایه پشتی منتقل شده و عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد.

در بررسی الگوی جریان در محور میانی مدل‌ها (شکل ۹)، در حالت  $S=0.25D$ ، در فاصله‌ی بین دو پایه جریان با شیبی شدید رو به بالا شروع شده و تلاطم شدیدی به دلیل عدم وجود گردابه نعل اسبی در بالادست پایه دوم به وجود می‌آید. وجود پایه‌ی دوم در در پایین‌دست پایه‌ی اول، تأثیری بر آشفتگی جریان در

#### مدل‌های گروه AT

نتایج حاصل از شبیه‌سازی پایه‌های مجاور استوانه‌ای که با چیدمان موازی جهت جریان آرایش داده شده‌اند، در ادامه ارائه شده است.

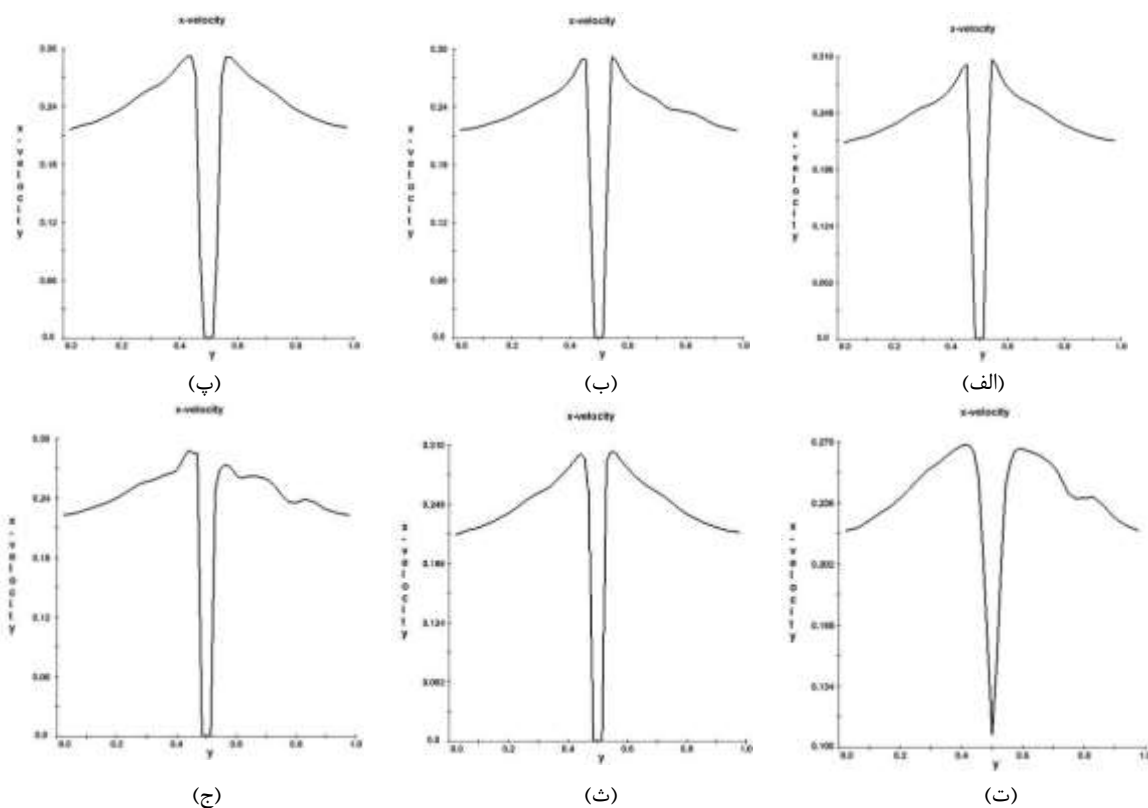
#### منحنی جریان

منحنی سرعت جریان و تغییرات آن در ۳ مقطع عرضی کانال، یکی منطبق بر قطر پایه اول ( $y=0$ )، یکی در وسط فاصله پایه‌ها ( $y=S/2$ ) و دیگری منطبق بر قطر پایه دوم ( $y=S$ )، برای دو حالت فاصله  $S=0.25D$  و  $S=4D$  در شکل (۸) آورده شده است.

در حالت  $S=0.25D$  به دلیل نزدیک بودن پایه‌ها به هم بعد از برخورد جریان به پایه اول امکان تشکیل ادامه جریان وجود نداشته و لذا میزان سرعت در محل میانی پایه‌ها صفر باقی می‌ماند

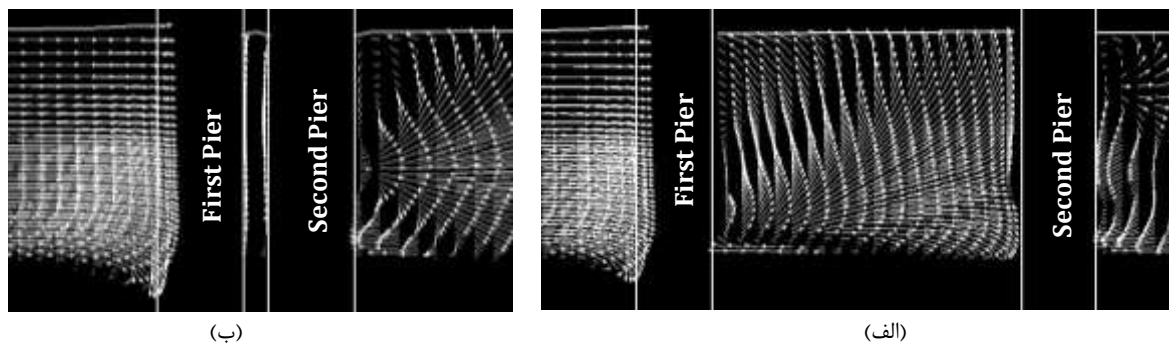
از آشفتگی جریان پشت پایه اول بیشتر بوده و گردابه‌های قوی-تری تشکیل می‌شود.

پیرامون پایه‌ی اول ندارد. در حالت  $S=4D$  آشفتگی جریان در پشت پایه دوم به دلیل تأثیر آشفتگی جریان در پیرامون پایه اول،



شکل ۸- نمودارهای تغییرات سرعت (m/s) در عرض کانال (m)

(الف) فاصله  $S=0.25D$  در مقطع  $y=0$  (ب)  $S=4D$  در مقطع  $y=0$  (پ) فاصله  $S=0.25D$  در مقطع  $y=-0.125D$  (ت) فاصله  $S=4D$  در مقطع  $y=-0.125D$  (ث) فاصله  $S=0.25D$  در مقطع  $y=-0.25D$  (ج) فاصله  $S=4D$  در مقطع  $y=-0.25D$



شکل ۹- الگوی جریان در محور میانی طولی (الف) در مدل AT-5 (ب) در مدل AT-1

### گسترش زمانی آبشستگی

چندانی در ابعاد حفره‌ی آبشستگی صورت نگرفته و فقط در بخش سطحی بستر تغییرات اندکی دیده می‌شود. در واقع در حالت وجود فاصله‌ی کم بین پایه‌ها، دو پایه شبیه به پایه منفرد عمل کرده و وجود پایه‌ی دوم در پایین‌دست به کاهش جداسازی جریان و عبور راحت جریان از کناره‌ی پایه‌ها کمک کرده و آبشستگی نسبت به حالت پایه‌ی منفرد کمتر می‌شود.

گسترش زمانی آبشستگی برای فاصله در مدل  $S=0.25D$  در شکل (۱۰) آورده شده است. در زمان ۱۰۰ ثانیه آبشستگی به شکل نرمال آغاز می‌شود. در زمان ۳۰۰ ثانیه، گسترش ناچیز آبشستگی در امتداد پایه دوم صورت می‌گیرد. در زمان ۱۴۰۰ ثانیه گسترش آبشستگی برای پایه اول در بالادست کامل شده و در پایین‌دست میزان کمی انباشتگی دیده می‌شود. در زمان ۲۰۰۰ ثانیه تغییر



(الف) (ب) (پ) (ت)

شکل ۱۰- گسترش زمانی آبشستگی مدل‌های گروه AT در فاصله قرارگیری  $S=0.25D$  در زمان‌های (الف) ۱۰۰ (ب) ۳۰۰ (پ) ۱۴۰۰ و (ت) ۲۰۰۰ ثانیه

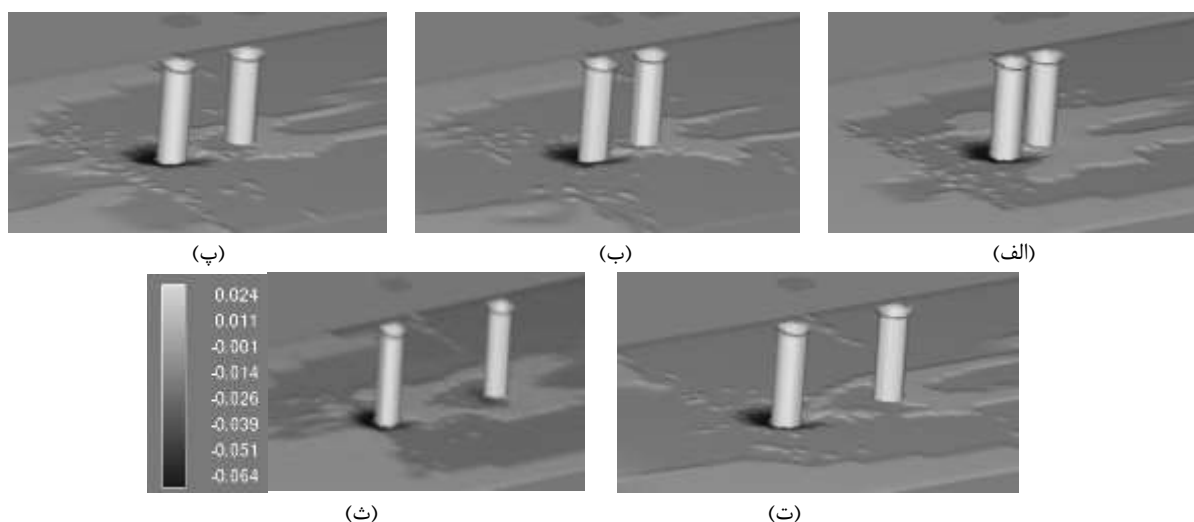
در میان پایه‌ها و امکان انتقال رسوبات شسته شده بالادست در داخل حفره آبشستگی پایه دوم، عامل مهم در کاهش چشمگیر آبشستگی پیرامون پایه دوم می‌باشد. در جدول (۴) بیشینه عمق آبشستگی را برای مدل‌های این گروه آورده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در هر فاصله‌ای، پایه‌ی دوم کاملاً بر پایه‌ی اول بی‌اثر است.

جدول ۴- بیشینه مقدار عمق آبشستگی برای مدل‌های گروه AT

نام مدل	نحوه چیدمان	نسبت فاصله S/D	بیشینه عمق آبشستگی (mm)
A	منفرد	---	۶۴
AT-1	موازی جهت جریان	۰/۲۵	۶۴
AT-2		۰/۸۷۵	۶۴
AT-3		۱/۵	۶۴
AT-4		۲/۷۵	۶۴
AT-5		۴	۶۴
AT-6		۵	۶۴

در بررسی زمانی گسترش زمانی آبشستگی برای مدل‌های با فاصله  $S=4D$ ، در زمان ۱۰۰ ثانیه آبشستگی برای پایه اول و دوم شروع شده لیکن آبشستگی بالادست پایه‌ی دوم به مراتب کمتر از پایه‌ی اول است. در زمان ۳۰۰ ثانیه، آبشستگی در پایه اول گسترش یافته ولی در پایه دوم با سرعت کمتری رشد می‌کند. در زمان ۱۴۰۰ ثانیه، آبشستگی پایه اول ادامه می‌یابد ولی آبشستگی در بالادست پایه دوم همچنان ناچیز است. این امر به دلیل پر شدن حفره آبشستگی پایه‌ی دوم با رسوبات شسته شده از بالادست و همچنین کاهش سرعت جریان در بخش میانی پایه‌ها می‌باشد. در زمان ۲۰۰۰ ثانیه، تغییر چندانی در عمق و ابعاد حفره‌ی آبشستگی دیده نمی‌شود.

در شکل (۱۱) الگوی آبشستگی و نحوه تأثیر حضور پایه‌های مجاور به شکل سه‌بعدی آورده شده است. در این حالت میزان بیشینه عمق آبشستگی با تغییر در فاصله بین پایه‌ها تغییر نکرده ولی میزان بالآمدگی بستر در فاصله‌ی بین پایه‌ها با افزایش فاصله افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که عامل کم‌بودن سرعت



شکل ۱۱- الگوی آبشستگی حالت چیدمان راستای جریان در مدل‌های (الف) AT-1 (ب) AT-2 (پ) AT-3 (ت) AT-4 (ث) AT-5

### منحنی جریان

منحنی سرعت جریان و تغییرات آن در ۲ مقطع عرضی کانال، یکی بر راستای قرارگیری پایه‌ها ( $y=0$ ) و دیگری در ۵D به سمت پایین دست ( $y=-5D$ ) برای دو حالت فاصله  $S=0.25D$  و  $S=4D$

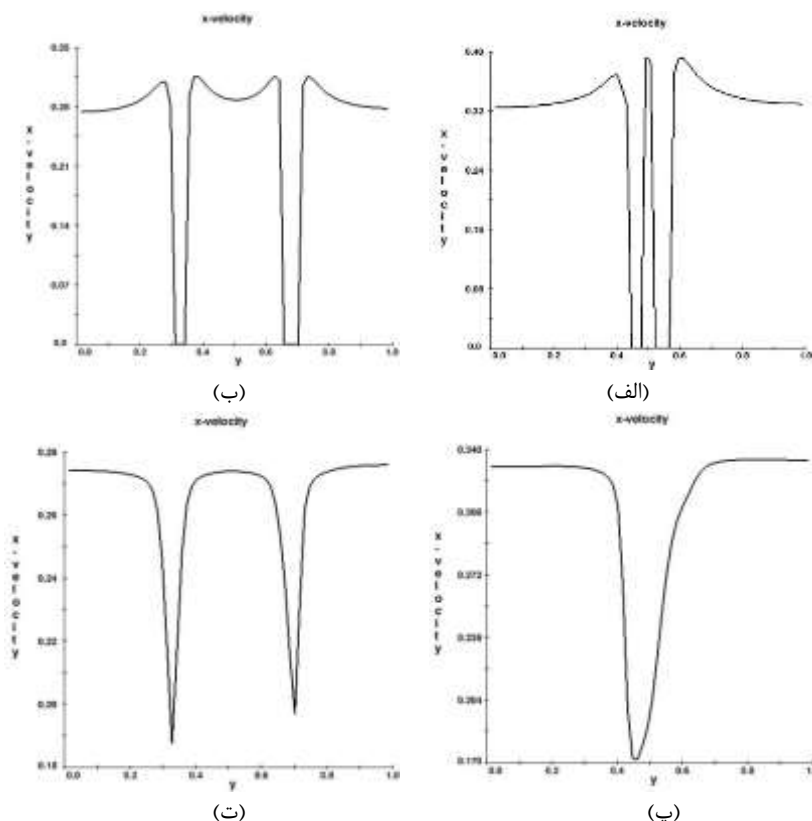
### مدل‌های گروه BS

نتایج حاصل از شبیه‌سازی پایه‌های مجاور مرکب که با چیدمان عمود بر جهت جریان آرایش داده شده‌اند، به شرح زیر می‌باشند.

$S=5D$  نیز جریان در حال ادغام و برگشت به حالت نرمال است. در حالت  $S=4D$  تغییرات سرعت به نسبت کمتر بوده و در فاصله  $S=5D$  از مرکز، به دلیل طول زیاد پایه‌ها و کم شدن آشفتگی جریان در میان پایه‌ها تا انتهای پایه‌ها، جریان به صورت شکافته شده در طول بیشتری امتداد یافته است که نشان‌دهنده کاهش آشفتگی جریان در پشت پایه‌ها می‌باشد.

بررسی شده است (شکل ۱۲).

مقدار سرعت جریان در حالت  $S=0.25D$  در راستای قرارگیری پایه‌ها تغییرات زیادی نسبت به میانگین سرعت جریان داشته و در محل فاصله همچنان میزان سرعت بیشتر از دیگر نقاط می‌باشد ولی مدل مرکب، در مقایسه با پایه استوانه‌ای به دلیل طول بیشتر پایه این مقدار کمی تعدیل شده است. در فاصله



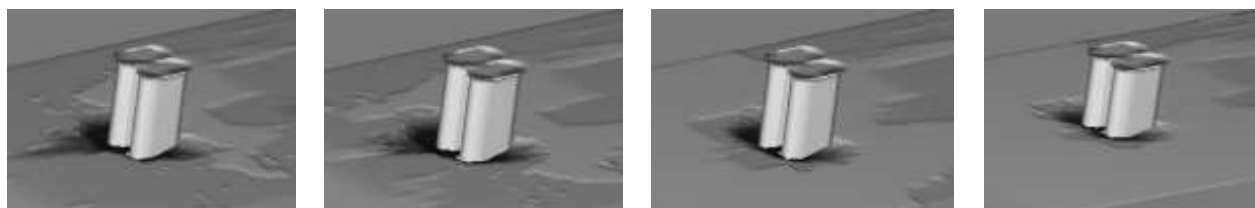
شکل ۱۲- نمودارهای تغییرات سرعت (m/s) در عرض کانال (m) (الف) فاصله  $S=0.25D$  در مقطع  $y=0$  (ب) فاصله  $S=4D$  در مقطع  $y=0$  (پ) فاصله  $S=0.25D$  در مقطع  $y=5D$  (ت) فاصله  $S=4D$  در مقطع  $y=5D$

پایه با الگوی جریان، جدایش بسیار اندک جریان از پایه رخ داده و حفره‌ی آبشستگی به سمت کناره‌های پایه کشیده می‌شود. در زمان ۱۴۰۰ ثانیه، آبشستگی الگوی خود را کامل به دست آورده و تشدید می‌یابد. در این مدل‌ها، در زمان کم به دلیل طول زیاد پایه و فرم هندسی آن، آبشستگی در پایین دست پایه رخ نمی‌دهد و رسوبات فرسایش یافته از بالادست در جناحین پایه تجمع یافته و رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. با سپری شدن زمان و رسیدن به زمان ۲۰۰۰ ثانیه، جابجایی رسوبات تجمع یافته در جناحین پایه رخ داده و ضمن رسوب‌گذاری در پایین دست پایه، آبشستگی اندکی نیز در وجه پایینی پایه‌ها ایجاد می‌شود. در جدول (۵) بیشینه مقدار عمق آبشستگی برای این مدل‌ها ارائه شده است.

### گسترش زمانی آبشستگی

در پایه‌های مجاور با فاصله  $S=0.25D$ ، به دلیل فرم پایه آبشستگی در زمان‌های اولیه شروع شبیه‌سازی کم بوده و تغییرات زمانی آن نیز کم می‌باشد. در این گروه، زمان‌های گسترش آبشستگی با تغییر ۱۰۰ ثانیه به ۲۰۰ ثانیه و ۳۰۰ ثانیه به ۶۰۰ ثانیه در شکل (۱۳) آورده شده است.

در این مدل، آبشستگی در زمان ۲۰۰ ثانیه شروع شده و با تغییرات بسیار اندکی گسترش یافته و در طول پایه کشیده شده است. در زمان ۶۰۰ ثانیه (شکل ۱۳-ب)، عمق حفره آبشستگی در بخش میانی دو پایه افزایش یافته و آبشستگی در حال امتداد به پایین دست است. در پایه‌های مرکب به دلیل انطباق خوب فرم



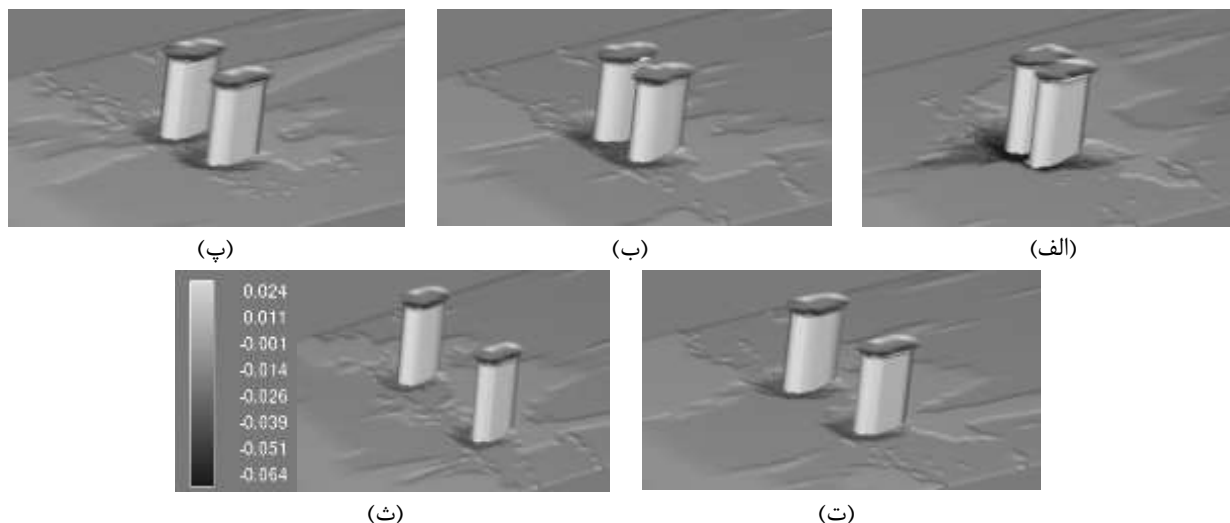
شکل ۱۳- گسترش زمانی آبشستگی مدل‌های گروه BS در فاصله قرارگیری  $S=0.25D$  در زمان‌های (الف) ۲۰۰ (ب) ۶۰۰ (پ) ۱۴۰۰ و (ت) ۲۰۰۰ ثانیه

پایه‌های منفرد، آبشستگی را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد. در مدل پایه‌های گروهی، برای مدل BS-1 که کمترین فاصله بین دو پایه وجود دارد، آبشستگی شدیداً افزایش یافته و به مقدار ۶۴ میلی‌متر رسیده است. این امر به دلیل افزایش مانع عرضی در برابر جریان است که باعث افزایش آبشستگی می‌شود. با افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها، فضای بیشتری برای عبور جریان ایجاد شده و از شدت فرسایش کاسته می‌شود. نهایتاً در دو فاصله‌ی ۲/۷۵ و ۴ برابر قطر پایه، عمق آبشستگی برابر با عمق آبشستگی پایه منفرد می‌شود. با افزایش فاصله به مقدار ۵ برابر قطر پایه، اثر دیواره‌های کناری آشکار شده و عمق آبشستگی شروع به افزایش می‌نماید. در شکل (۱۴) الگوی آبشستگی و نحوه تأثیر حضور پایه‌های مجاور به شکل سه‌بعدی آورده شده است.

جدول ۵- بیشینه مقدار عمق آبشستگی برای مدل‌های گروه BS

نام مدل	نحوه چیدمان	نسبت فاصله S/D	بیشینه عمق آبشستگی (mm)
B	منفرد	---	۴۴
BS-1	عمود بر راستای جریان	۰/۲۵	۶۴
BS-2		۰/۸۷۵	۵۲
BS-3		۱/۵	۴۸
BS-4		۲/۷۵	۴۴
BS-5		۴	۴۴
BS-6		۵	۴۶

در مدل مرکب، مقدار عمق آبشستگی نسبت به مدل منفرد با مقطع استوانه‌ای، ۲۰ میلی‌متر کاهش یافته است؛ به عبارتی تغییر مقطع هندسی پایه و انطباق آن با الگوی جریان می‌تواند در



شکل ۱۴- الگوی آبشستگی برای مدل‌های گروه BS در مدل‌های (الف) BS-1 (ب) BS-2 (پ) BS-3 (ت) BS-4 (ث) BS-6

کم‌بودن فاصله بین پایه‌ها، جریان نمی‌تواند در بین پایه‌ها رشد کند. در حالت  $S=4D$ ، گردابه‌های برخاسته به دلیل طول پایه و انحنای سطح پایین‌دست پایه، به شکل کامل‌تری گسترش یافته و با دوره‌ی تناوب معینی به‌صورت نوسانی در پشت پایه تولید، رشد و مستهلک می‌شوند. در این حالت سرعت جریان در حدود ۶۷ درصد سرعت میانگین جریان نرمال خواهد بود. در شکل (۱۵) جریان‌های روبه پایین و جریان‌های نعل اسبی ایجاد شده دیده

#### مدل‌های گروه BT

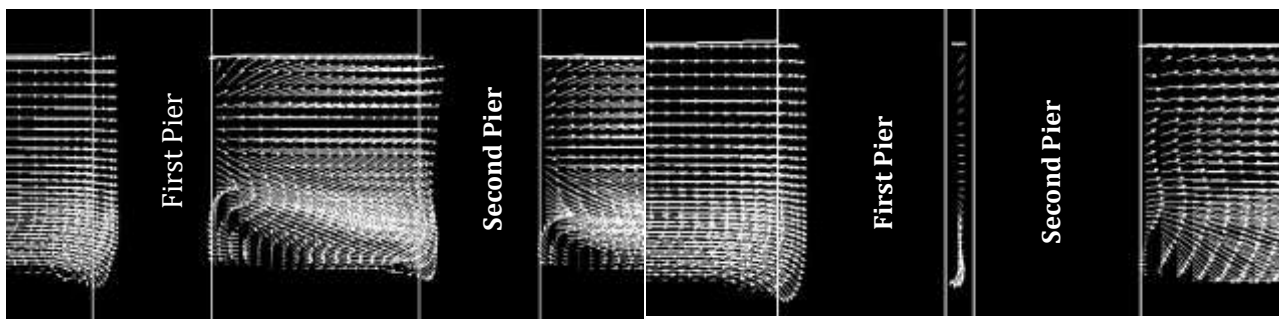
نتایج حاصل از شبیه‌سازی پایه‌های مجاور استوانه‌ای که با چیدمان موازی جهت جریان آرایش داده شده‌اند، به شرح زیر می‌باشند.

#### منحنی جریان

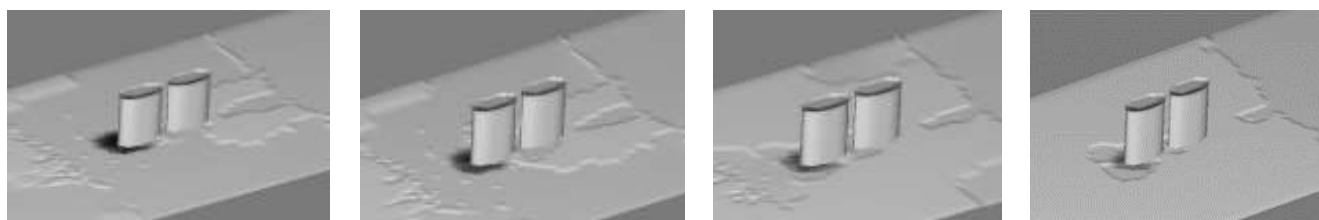
مشابه پایه‌های استوانه‌ای در حالت قرارگیری  $S=0.25D$  به دلیل

گسترش زمانی آبستگی  
گسترش زمانی آبستگی برای پایه‌های مجاور در فاصله  $S=0.25D$  در شکل (۱۶) آورده شده است.

می‌شود. در حالت  $S=0.25D$  به دلیل عدم حضور گردابه نعل اسبی در ابتدای پایه دوم، جریان رو به بالا با شدت بیشتری حضور دارد.



شکل ۱۵- الگوی جریان در محور میانی طولی (الف) در مدل BT-1 (ب) در مدل BT-4



شکل ۱۶- گسترش زمانی آبستگی مدل مرکب موازی جریان با فاصله  $S=0.25D$  در زمان‌های (الف) ۲۰۰ (ب) ۶۰۰ (پ) ۱۴۰۰ و (ت) ۲۰۰۰ ثانیه

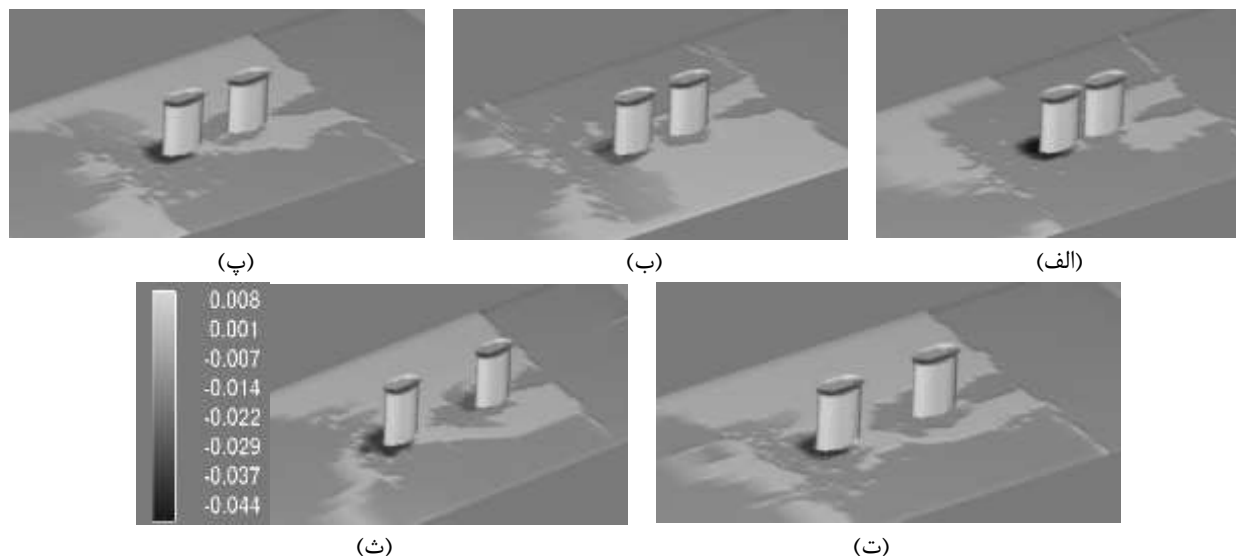
آبستگی ایجاد نمی‌شود. این حالت، نتیجه یکنواخت شدن جریان آشفته در طول زیاد پایه بوده و جریان با تلاطم کم به محل بین پایه‌ها می‌رسد. در جدول (۶) بیشینه عمق آبستگی برای مدل‌های گروه BT ارائه شده است.

در زمان ۲۰۰ ثانیه، آبستگی در بالادست پایه اول شروع می‌شود. در همین زمان مقدار آن در بخش میانی پایه‌ها بسیار ناچیز بوده و در پشت پایه‌ی دوم آبستگی دیده نمی‌شود. در زمان ۶۰۰ ثانیه، آبستگی گسترش یافته ولی به بخش پایین‌دست پایه‌ی دوم نرسیده است. در زمان ۱۴۰۰ ثانیه، آبستگی کاملاً در ناحیه‌ی اطراف هر دو پایه گسترش یافته و حفره‌ی آبستگی در بالادست پایه‌ی اول و پایین‌دست پایه‌ی دوم مشاهده می‌شود. در زمان ۲۰۰۰ ثانیه تغییرات ناچیز در سطح حفره آبستگی دیده می‌شود.

در شکل (۱۷) الگوی آبستگی و نحوه تأثیر حضور پایه‌های مجاور به شکل سه‌بعدی آورده شده است. با افزایش فاصله، الگوی آبستگی پیرامون پایه دوم شکل می‌گیرد. زمانی که فاصله برابر با  $S=0.25D$  باشد، پایه‌ها همانند یک پایه یکپارچه عمل کرده و در پایین‌دست پایه اول و بالادست پایه دوم هیچ‌گونه

جدول ۶- بیشینه مقدار عمق آبستگی برای مدل‌های گروه BT

نام مدل	نحوه چیدمان	نسبت فاصله S/D	بیشینه عمق آبستگی (mm)
B	منفرد	---	۴۴
BT-1	موازی جهت جریان	۰/۲۵	۴۴
BT-2		۰/۸۷۵	۴۴
BT-3		۱/۵	۴۴
BT-4		۲/۷۵	۴۴
BT-5		۴	۴۴
BT-6		۵	۴۴



شکل ۱۷- الگوی آبخستگی برای مدل‌های گروه BT در مدل‌های (الف) BT-1 (ب) BT-2 (پ) BT-3 (ت) BT-4 (ث) BT-6

### نتیجه‌گیری

یکی از راهکارها برای کاهش هزینه‌های ساخت و آبخستگی، استفاده از پایه‌های مجاور می‌باشد. میزان آبخستگی حاصل در پایه‌های مجاور به شدت تحت تأثیر نحوه چیدمان پایه‌ها می‌باشد؛ به طوری که در حالت قرارگیری پایه‌های موازی جهت جریان، میزان عمق آبخستگی حاصل برابر با حالت تک پایه می‌باشد ولی در حالت چیدمان عمود بر جهت جریان آبخستگی، به شدت تحت تأثیر فاصله بین پایه‌ها است. در حالت چیدمان پایه‌ها عمود بر جهت جریان، بیش‌ترین میزان آبخستگی در کمترین فاصله مورد بررسی ( $S=0.25D$ ) به دست آمده و با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آبخستگی کاهش یافت. در حالت  $S=0.25D$ ، پایه‌های عمود بر جهت جریان با توجه به پروفیل عرضی سرعت، وجود سرعت بالای جریان در فاصله بین دو پایه که به عنوان جت آب آورده شده است و نیز حضور مانعی با قطر مؤثر عمود بر راستای جریان بزرگتر (قطر دو پایه)، عمق آبخستگی در حدود ۶۰ درصد افزایش یافت. در حالت  $S=2.75D$ ، پایه‌های عمود بر جهت جریان، میزان

آبخستگی به دست آمده کمترین مقدار بوده و با توجه به الگوی آبخستگی در پایه‌های استوانه‌ای، جریان‌های متلاطم با تعدیل اثرات خود در اثر برخورد با یکدیگر باعث کاهش عمق آبخستگی شدند. در حالت چیدمان پایه‌های مجاور موازی جهت جریان در حالت کمترین فاصله می‌توان گفت پایه‌ها به طور یکپارچه عمل کرده و هیچ‌گونه تغییر در بستر در فاصله بین پایه‌ها ایجاد نشده است. پایه‌های مرکب به دلیل داشتن طول زیاد در جهت جریان، مقداری از آشفتنی ایجاد شده در جریان مجاور پایه را مستهلک کرده و به این دلیل میزان آبخستگی در پایین دست آن‌ها کمتر از پایه استوانه‌ای می‌باشد. در حالت پایه‌ها با چیدمان موازی جهت جریان، در فاصله  $S=0.25D$ ، جریان‌های شدید رو به بالا ایجاد شد که امکان ایجاد گردابه نعل اسبی در بالادست پایه دوم وجود نداشته و با افزایش فاصله، از شدت این جریان‌ها به دلیل به وجود آمدن گردابه در بالادست پایه دوم کاسته شد. با بررسی نتایج تمام مدل‌ها، پایه‌های مجاور با فاصله  $S=2.75D$  و مقطع مرکب به عنوان بهترین مدل انتخاب شدند.

### REFERENCES

- Aghaee-Shalmani, Y. and Hakimzadeh, H. (2015). Experimental investigation of scour around semi-conical piers under steady current action. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(6), 717-732.
- Ali, K.H.M. and Karim, O. (2002). Simulation of flow around piers. *J. Hydraulic research, IAHR*, 40(2), 161-174.
- Baykal, C., Sumer, B.M., Fuhrman, D.R., Jacobsen, N.G. and Fredsøe, J. (2015). Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 373(2033).
- Brethour, J. and Burnham, J. (2010). Modeling Sediment Erosion and Deposition with the FLOW-3DSedimentation and Scour Model. Flow Science Inc., Technical Note No. 85.
- Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen, H.W. (1977). Local scour around cylindrical piers, *J. Hydraulic Research*, 15(3), 211-252
- Drysdale, D.M. (2008). The Effectiveness of an Aerofoil Shaped Pier in Reducing Downstream Vortices and Turbulence. University of Southern Queensland.
- Duc, B.M. and Rodi, W. (2008). Numerical simulation



- of contraction scour in an open laboratory channel. *J. Hydraulic Engineering*, 134(4), 367-377.
- Flow Science, Inc., "FLOW-3D User's Manual", Flow Science, Inc, 2008.
- Guemou, B., Seddini, A. and Ghenim, A.N. (2016). Numerical investigations of the round-nosed bridge pier length effects on the bed shear stress. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 16(5), 313-321.
- Hassanzadeh, Y., Hakimzadeh, H. and Ayari, SH. (2012). Study the effects of bridge pier shape on the flow pattern using the Fluent. *Iran Water Recourses Research*, 7(4), 95-105 (In Persian).
- Hassanzadeh, Y., Kardan, N. and Hakimzadeh, H. (2015). 3D Numerical studying into combined models of pier shape and slot in reducing the bed shear stresses starter of scouring around the bridge pier. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44(4), 39-50 (In Persian).
- Kardan, N., Hakimzadeh, H. and Hassanzadeh, Y. (2014). 3D numerical simulation of hydrodynamic parameters around the bridge piers using various turbulence models. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 37(4), 39-54 (In Persian).
- Khosronejad, A., Kang, S. and Sotiropoulos, F. (2012). Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers. *Advances in Water Resources*, 37, 73-85.
- Kim, H.S., Nabi, M., Kimura, I. and Shimizu, Y. (2014). Numerical investigation of local scour at two adjacent cylinders. *Advances in Water Resources*, 70, 131-147.
- Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(1), 59-65.
- Mohammadi, R. (2006). Investigating the local scouring phenomenon around cylindrical piers under steady currents using physical models. MS.C Thesis in Marine Structures, Faculty of Civil Engineering, Sanad University of Technology, Tabriz, Iran.
- Salaheldin, T.M., Imran, J. and Chaudhry, H. (2004). Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 130(2), 91-99.
- Smith, H. and Foster, D. (2005). Modeling of flow around a cylinder over a scoured Bed. *J. waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 1(14), 101-118.
- Tseng, M.H., Yen, C.L. and Song, C.C.S. (2000). Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. *International J. for Numerical Methods in Fluids*, 34(3), 207-217.
- Van Rijn, L.C. (1984). Sediment transport, Part I: bed load transport. *J. Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.