

# Effects of the simultaneous presence of bridge pier and abutment on the change of erodible bed using FLOW-3D

Mahmood Nemati Qalee Maskan<sup>1</sup>, Khosrow Hosseini<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Master Graduated in Hydraulic Structures, Civil engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Water Department, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

\*Corresponding Author: [khoseini@semnan.ac.ir](mailto:khoseini@semnan.ac.ir)

Received: 5 Sep. 2021  
Accepted: 13 Jan. 2022



Homepage: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)

**Abstract:** In this study, FLOW-3D numerical model was used to simulate the scour pattern and the changes on the bed induced by the impact of the pier in the vicinity of the rectangular abutment for two spacing. The verification tests revealed that the numerical model could predict the maximum scour depth of about 74 and 86 percent of the actual scour depth for abutment and pier, respectively. Also, the LES model is more accurate than K- $\epsilon$  and RNG models. In addition, the results showed that closer pier to the abutment, more increase on scour depth, which is compatible with previous studies. Furthermore, by increasing  $u/ucr$ , the local scour depth around each structure and the scouring pattern has no considerable changes. Moreover, an average of 70% scouring occurs in 20% of the initial scouring time.

**Keywords:** Scouring, Abutment, Pier, Interaction, Numerical modeling.

**Introduction:** The scouring mechanism at the abutment is very similar to the pier of a bridge; such that the decrease in current intensity near the upstream of the abutment, a vertical pressure gradient is created, this pressure gradient moves downwards to become the initial vortex, the size of which expands with the development of the scour cavity (Melville, 1997).

The bridge pier near the abutment causes deepening of the scour near the support (Hong, 2005). However, the scouring depth is determined prominently by the scouring of the abutment and that this value may be greater than the scouring depth of a pedestal alone. (Oben-Nyarko and Ettema, 2011; Karami et al., 2017).

The length of the abutment has an essential effect on its scouring depth, such that by doubling the length of the abutment, the scouring increases by about 18 times and decreases with decreasing abutment distance (Arab and Zomorodian, 2016; Anjomrooz et al., 2018).

In the present study, we applied FLOW-3D to build a numerical model to investigate the effect of changing the piers' distance from the abutment on the scour depth and scour rate around the two piers.

**Material and Methods:** Flow-3D is one of the most potent applications in computational fluid dynamics. This research makes applications to solve the mean Navier-Stokes equations of time (Reynolds equations) using the finite volume method under a rectangular grid on the base of the Eulerian theory.

The flow continuity equation is written as Equation (1). FLOW-3D calculates the load transport of each sediment type, including bedload transport, separately. FLOW-3D calculates the load transport of each sediment type, including bedload transport, separately. The dimensionless form of the bed load transfer rate in terms of  $n$  is written by Equation (2), in which  $d_n$  is obtained from Equation (3).

We used the laboratory results obtained from the research conducted by (Hosseini et al., 2016) to validate the numerical model and adopted the study undertaken by (Khosronejad et al., 2012) to model the pier scour.

A rectangular channel with a length of 6 meters, a width of 1.21 meters, and a height of 0.45 meters; was used to model the bridge pier and abutment. Fig. 2 shows the rectangular channel a pier and abutment placed in, and Table one describes the model configuration.

**Results and Discussion:** For the three-dimensional simulation of flow, the geometry of the field was discretized into a fine mesh. Fig. 2 shows the boundary conditions assigned to the numerical model. Then, three turbulence models, K- $\epsilon$ , RNG, and LES have been investigated to compare the maximum scour depth in the rectangular channel for a flow rate of 0.052 m<sup>3</sup>/s, and their results are shown in Table 3.

The results indicate that the LES turbulence model can estimate the maximum scour depth for the bridge pier and the abutment. Although the LES turbulence model takes more time to run, it is more accurate and presents a scouring pattern similar to the following laboratory sample justifying the computational costs. The maximum scour depth at the bridge abutment estimated by the LES model is about 74% of the measured value, while its maximum scour depth measured at the bridge's pier is 87%.

Fig. 3 and Fig. 4 illustrate the bed changes around the abutment and the bridge pier for the numerical and laboratory model. Comparing the bed changes and the location of maximum scour depth for the numerical model of pier and abutment and results of laboratory models shows that the numerical model has a good capability in simulating bed changes and local scour around each of the abutment structures and bridge pier.

Comparison of scour time development resulting from numerical models around the abutment and bridge pier with laboratory models, Fig. 6, shows that 70% of the maximum scour depth in the abutment area occurs in 20% of the initial scour time, which is relatively consistent for both numerical and laboratory models.

Examination of substrate changes, Fig. 7-Fig. 11, shows that a deep scouring depth occurred for the abutment and at the upper-right edge of the forehead. And by reducing the pier distance from the abutment in the models, the maximum scours depth around the pier, and abutment structures have undergone significant changes.

**Conclusion:** Comparing the scour pattern and the location at which the maximum scour-depth for pier and abutment resulted by the numerical model with experimental, shows that the numerical model procured using FLOW-3D can well simulate bed changes and local scour around the bridge pier and abutment. Furthermore, increasing the relative velocity of the flow, strengthening the eddy currents around the pier and abutment, consequently arising the scour depth; as the relative velocity increases by 10%, the scour depth increases by about 50%. Moreover, when the distance from the base to the abutment decreases, the scouring depth around the rectangular abutment increases.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# مطالعه عددی اثر حضور توامان پایه پل و تکیه‌گاه مستطیلی بر روی تغییرات بستر فرسایش پذیر با استفاده از مدل عددی FLOW-3D

محمود نعمتی قلعه مسکن<sup>۱</sup>، خسرو حسینی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

\*پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [khoseini@semnan.ac.ir](mailto:khoseini@semnan.ac.ir)

وب‌گاه نشریه: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

## چکیده

تحقیقات بسیاری برای برآورد عمق آبشستگی پایه و تکیه‌گاه پل انجام شده است. الگوی فرسایش در مجاورت یک سازه می‌تواند تاثیرگذار و یا متاثر از فرسایش سازه‌های مجاور باشد که بستگی زیادی به فاصله آن‌ها دارد. بررسی تحقیقات پیشین نشان داد که بررسی تاثیر حضور توامان دو سازه پایه و تکیه‌گاه پل بر روی تغییرات بستر نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد. از همین رو در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار FLOW-3D به تحقیق و بررسی الگوی آبشستگی و روند تغییرات بستر تحت اثر حضور پایه در مجاورت تکیه‌گاه مستطیلی برای دو فاصله قرارگیری متفاوت پرداخته شد. صحت سنجی برای هریک از سازه‌ها نشان داد که مدل عددی قادر است، عمق آب شستگی را با دقت ۷۴ و ۸۷ درصد نسبت به مدل آزمایشگاهی به ترتیب برای دو سازه تکیه‌گاه و پایه پل پیش بینی نماید. مدل آشفتگی LES از نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی برخوردار است. در خصوص چینش پایه در مجاورت تکیه‌گاه با کاهش فاصله پایه از تکیه‌گاه عمق آبشستگی برای هر دو سازه افزایش یافته که با مطالعات پیشین در این رابطه تطابق دارد. همچنین افزایش سرعت نسبی نیز باعث افزایش عمق آبشستگی موضعی در اطراف هریک از سازه‌ها شده و تغییر محسوسی در الگوی آبشستگی ایجاد نکرده است. تاثیر افزایش سرعت نسبی بر افزایش آبشستگی تکیه‌گاه بر مراتب بیشتر از پایه پل می‌باشد. بررسی توسعه زمانی آبشستگی در مجاورت پایه و تکیه‌گاه نشان داد که به طور متوسط ۸۰ درصد آبشستگی در ۲۰ درصد زمان ابتدایی آبشستگی رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، تکیه‌گاه پل، پایه پل، اندرکنش، مدل‌سازی عددی

## ۱- مقدمه

تحقیقات زیادی با تمرکز بر روی خصوصیات جریان در اطراف دو سازه پایه و تکیه‌گاه و مکانیزم آبشستگی در اطراف این دو سازه انجام شده است. مطالعه انجام شده بر روی رفتار جریان در اطراف تکیه‌گاه نشان می‌دهد، مکانیزم آبشستگی

پدیده آبشستگی یکی از شایع‌ترین علل تخریب و کاهش عمر پل‌ها می‌باشد. مهمترین دلیل ایجاد این پدیده تاثیر مستقیم سازه پل بر خصوصیات هیدرودینامیک جریان بوده و تاکنون

(Crood, 1989).

هانگ، در پژوهشی تأثیر حضور پایه در نزدیکی تکیه‌گاه و تأثیر آن بر فرسایش بستر را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیقات این محقق نشان داد که حضور پایه روی عمیقتر شدن آبشستگی در نزدیکی تکیه‌گاه تأثیر گذاراست (Hong, 2005). نیارکو و اتما، اندرکنش دو سازه‌ی تکیه‌گاه پل و پایه‌ی مجاور آن را در مرزی غیرچسبنده حول محور آبشستگی بررسی و عمق آبشستگی، محدوده آبشستگی و داده‌های عمق‌سنجی برای دو نوع تکیه‌گاه متداول دیوار باله‌ای و سرریزی را تعیین کردند. نتایج ترکیبات پایه و تکیه‌گاه، نشان داد که حضور پایه منجر به افزایشی اساسی در مقدار عمق آبشستگی تکیه‌گاه نمی‌گردد، حتی اگر چنانچه پایه در نزدیکی پنجه شیب سرریز یک تکیه‌گاه سرریزی باشد، عمق آبشستگی را کاهش نیز می‌دهد، به عبارتی در محدوده آبشستگی، پایه نقش سنگ‌های ریپرپ را ایفا می‌کند، اگرچه عمق آبشستگی در یک پایه پلی که در مجاورت تکیه‌گاه تعبیه شده است، بطور برجسته از طریق آبشستگی تکیه‌گاه تعیین می‌شود و اینکه این مقدار ممکن است بیش از مقدار عمق آبشستگی یک پایه به تنهایی باشد (Oben- Nyarko and Ettema, 2011).

عرب و زمردیان، پژوهشی را به منظور بررسی تأثیر طول تکیه‌گاه و شکل پایه بر روی عمق آبشستگی انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد طول تکیه‌گاه تأثیر مهمی در عمق آبشستگی آن دارد به نحوی که با دو برابر شدن طول تکیه‌گاه (در این پژوهش از ۲۵ به ۵۰ سانتی متر) آبشستگی در حدود ۱۸ برابر افزایش می‌یابد و با کم شدن فاصله تکیه‌گاه و پایه عمق آبشستگی برای هر سه تکیه‌گاه مورد بررسی عمق آبشستگی افزایش می‌یابد (Arab and Zomorodian, 2016).

انجم روز و همکاران، تحقیقی را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D برای مدل‌سازی عددی در یک کانال مستطیلی شامل یک تکیه‌گاه مستطیلی در دو وضعیت حضور تک پایه و جفت پایه استوانه‌ای انجام دادند. افزایش پارامتر تنش برشی بستر نسبت به مدل شاهد در مدل شامل تکیه‌گاه مستطیلی

در تکیه‌گاه شباهت بسیار زیادی به پایه پل دارد؛ به طوری که به دلیل افت شدت جریان در نزدیکی بالادست تکیه‌گاه، یک گرادیان عمودی فشار ایجاد شده و این گرادیان فشار جریان را به سمت پایین حرکت داده تا تبدیل به گرداب اولیه<sup>۱</sup> شود که اندازه آن با توسعه حفره آبشستگی گسترش می‌یابد (Melville, 1997). حضور توامان دو سازه پایه و تکیه‌گاه در مسیر جریان و اثر اندرکنش این دو سازه تغییرات قابل توجهی در خصوصیات جریان، گردابه‌های تشکیل شده و در نتیجه در میزان آبشستگی موضعی دارد. از این رو مطالعه تأثیر حضور همزمان این دو سازه بر روی تغییرات بستر از اهمیت بالایی برخوردار است.

در خصوص تحقیقات انجام شده در رابطه با آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه، حسینی و همکاران، با شبیه‌سازی سه بعدی حفره آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره قائم با نرم‌افزار FLOW-3D، به بررسی بهترین مدل آشفتگی در تعیین مقدار عمق میانگین جریان و مقدار بیشینه عمق آبشستگی و محل وقوع آن پرداختند. نتایج کار آنها حاکی از آن بود که مدل مذکور، موارد فوق را با دقت خوبی در قیاس با نتایج داده‌های آزمایشگاهی پیش بینی می‌کند (Hosseini et al., 2014).

کرمی و همکاران، الگوی جریان و تغییرات خصوصیات هیدرولیکی جریان اطراف تکیه‌گاه مستطیلی پل را بررسی و تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنها مبنی بر آن بود که صحت‌سنجی مدل آزمایشگاهی و عددی نتایج مطلوبی داشته و هیدرولیک و هیدرودینامیک جریان در اطراف سازه تکیه‌گاه نسبت به سایر نواحی دچار تغییرات و آشفتگی‌های بیشتری می‌باشد (Karami et al., 2017).

در مورد تحقیقات صورت گرفته توسط حضور همزمان دو سازه پایه و تکیه‌گاه، کراد رابطه تقریبی  $d_{spier} = 0.9d_{smax}$  را برای پیش بینی عمق آبشستگی پایه قرار گرفته در مجاورت تکیه‌گاه پیش بینی می‌کند که در این رابطه  $d_{smax}$  حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه و  $d_{spier}$  عمق آبشستگی در اطراف پایه می‌باشد. ولی این رابطه بسیار کلی بوده و نوع تکیه‌گاه و فاصله قرارگیری پایه‌ها در آن مشخص نیست

<sup>1</sup> Primary Vortex

مومن‌توم (ناویر استوکس) و بقای انرژی است که حل این معادلات. به شکل دیفرانسیلی توسط روش‌های عددی صورت می‌گیرد، معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید و به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

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

در معادله فوق  $\rho$  دانسیته سیال،  $u, v, w$  به ترتیب مولفه‌های سرعت در راستای  $x, y$  و  $z$  و مقادیر  $A_x, A_y$  و  $A_z$  برابر با سطح مقطع‌های تفاضلی برای جریان در جهت‌های  $x, y$  و  $z$  می‌باشد. مقدار  $\xi$  بسته به نوع سیستم مختصات در سیستم مختصات کارترزین،  $R$  برابر ۱ و  $\xi$  برابر صفر است.

در نرم افزار FLOW-3D همه محاسبات مربوط به فرآیندهای حمل و انتقال رسوب شامل حمل بار بستر، حمل بار را برای هر نوع رسوب به طور مجزا انجام می‌شود. شکل بی بعد شده نرخ انتقال بار بستر بر حسب  $n$  به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{\left|g(s_n - 1)d_n^3\right|^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

در معادله فوق مقدار  $q_{b,n}$  برابر است با دبی حجمی انتقال بار بستر در واحد عرض بوده و مقدار  $\Phi_n$  با معادله میر پیتز و مولر<sup>۱</sup> طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\Phi_n = B_n (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} c_{b,n} \quad (3)$$

به طوری که در رابطه فوق  $B_n$  برابر است با ضریب بار بستر و مقدار آن برای نرخ انتقال پایین در حدود ۵ تا ۵/۷ و برای نرخ انتقال متوسط و بالا به ترتیب برابر ۸ و ۱۳ می‌باشد که مقدار آن در نرم افزار FLOW-3D به صورت پیش فرض ۸ در نظر گرفته شده است. مقدار  $c_{b,n}$  کسر حجمی<sup>۲</sup> بر حسب مقدار  $n$  در مصالح بستر می‌باشد (Wei et al., 2014).

## ۱-۲- نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده

به منظور صحت سنجی مدل عددی FLOW-3D با نتایج

در مجاورت تک پایه بیشینه و ۶ برابر برآورد شد. بررسی پارامتر فاصله بین دو سازه تکیه گاه مستطیلی و پایه پل با لحاظ مدل شاهد و نتیجه کارهای قبلی محققین نشان داد که فاصله نزدیک از ایمنی خوبی برخوردار است (Anjomrooz et al., 2018).

بررسی پیشینه تحقیقات انجام شده در خصوص آبشستگی پایه و تکیه‌گاه پل نشان می‌دهد که تا کنون تحقیقات کمی در خصوص اثر حضور تومان پایه و تکیه‌گاه پل بر روی الگوی تغییرات بستر صورت گرفته است. مجاورت پایه و تکیه‌گاه پل و تاثیر فاصله همجواری این سازه‌ها بر فرسایش از چالش‌های مهندسی در طراحی آنها میباشد. تاثیر شدت جریان بر الگوی آبشستگی و حداکثر عمق آبشستگی برای ترکیب پایه و پل نیز از مواردی است که کمتر مورد توجه واقع شده است.

در پژوهش حاضر پس از حصول اطمینان از عملکرد مدل عددی در پیش بینی الگو و میزان آبشستگی در اطراف دو سازه پایه و تکیه‌گاه، به بررسی اثر تغییر فواصل پایه از تکیه‌گاه بر روی عمق آبشستگی و نرخ آبشستگی در اطراف دو سازه پرداخته شده است.

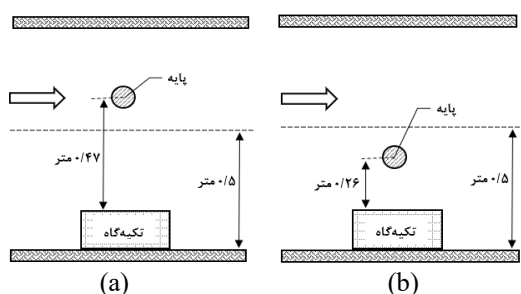
## ۲- مواد و روش‌ها

Flow-3D از جمله نرم افزارهای کاربردی و قدرتمند در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی بوده که کمک شایانی به تحقیق در زمینه رفتار دینامیکی سیالات می‌نماید. در این برنامه برای حل معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر-استوکس (معادلات رینولدز) از روش حجم محدود تحت یک شبکه مستطیلی با رویکرد اویلری استفاده می‌شود. شبیه‌سازی آشفتگی در Flow-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلال پرانتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دومعادله‌ای  $k-\epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ Large eddy صورت می‌گیرد.

معادلات حرکت سیال، شامل معادلات بقای جرم، بقای

<sup>2</sup> Volume Fraction

<sup>1</sup> Meyer-Peter and Muller



**Fig. 1** Layout of pier and abutment for (a) A.P.F and (b) A.P.N  
**شکل ۱** جانمایی پایه و تکیه‌گاه پل برای ترکیب (a) A.P.F و (b) A.P.N

$$d_{*,n} = d_n \left[ \frac{g(s_n - 1)}{v_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $s_n = \rho_n / \rho_f$  و  $v_f$  لزجت سینماتیکی جریان می‌باشد. با توجه به رابطه فوق مقدار پارامتر شیلدز برای مدل عددی پایه برابر  $0.03$  و برای مدل تکیه‌گاه برابر  $0.031$  به‌دست آمده است.

در پژوهش حاضر جهت مدل‌سازی حضور همزمان پایه و تکیه‌گاه پل از مشخصات فلوم مستطیل مورد استفاده در صحت‌سنجی تکیه‌گاه استفاده شده و تنها مرز دیواره در مقابل تکیه‌گاه از شرط مرزی تقارن جهت از بین بردن اثر دیواره در آبشستگی در اثر تنگ‌شدگی، استفاده شده است. قطر پایه نیز برابر با  $0.08$  متر در نظر گرفته شده است. تعیین فواصل قرارگیری پایه از تکیه‌گاه با استناد به تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققین (Oben-Nyarko and Ettema, 2011) و همچنین بررسی دامنه تاثیر هر یک از سازه‌ها بر روی تغییرات بستر، تعیین گردیدند. مطابق با شکل ۱ دو محدوده برای قرارگیری پایه‌ها نسبت به تکیه‌گاه در کانال در نظر گرفته شده است. ترتیب مدل‌سازی‌های انجام شده بر حسب مقدار دبی و نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی ( $u/u_{cr}$ ) مطابق با جدول ۱ می‌باشد. در این جدول حروف (A) به اولین حرف تکیه‌گاه<sup>۱</sup>، حرف (P) به اولین حرف

آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان و آبشستگی تکیه‌گاه، از نتایج به‌دست آمده از پژوهش انجام گرفته توسط حسینی و همکاران استفاده شده (Hosseini et al., 2016) و جهت مدل‌سازی آبشستگی پایه پل از پژوهش انجام گرفته توسط خسرونژاد و همکاران استفاده شده است (Khosronejad et al., 2012).

برای ایجاد مدل تکیه‌گاه مستطیلی در نرم‌افزار، کانالی به طول ۵ متر، ارتفاع  $0.9$  متر و عرض ۱ متر و از تکیه‌گاه مستطیلی در فاصله  $2.7$  متری از ابتدای کانال واقع شده و طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب برابر با ۳۰، ۱۵ و ۴۰ سانتی‌متر استفاده شده است. جریان سیال موجود در کانال، آب با دمای  $20$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در محدوده مورد مطالعه در خصوص آبشستگی، قطر میانگین ذرات  $d_{50}$  بستر برابر با  $0.0091$  متر بوده و برای نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی  $0.95$  و  $0.85$  با عمق جریان  $0.15$  متر با در نظر گرفتن آستانه حرکت ذرات بستر، دبی جریان به ترتیب  $46$  و  $52$  لیتر بر ثانیه به‌دست آمده است.

به منظور مدل‌سازی پایه پل از کانالی مستطیلی به طول ۶ متر، عرض  $1.21$  متر و ارتفاع  $0.45$  متر استفاده شده است. ارتفاع بستر فرسایش‌پذیر در کانال فوق  $0.2$  متر بوده و قطر میانگین ذرات  $d_{50}$  برابر  $0.0085$  متر می‌باشد. به منظور مدل‌سازی پایه پل، از یک پایه استوانه‌ای به قطر  $0.165$  متر در فاصله  $3/2$  متر از ابتدای کانال استفاده شده است. تمامی سطوح صلب این آزمایش شامل دیواره‌ها و پایه استوانه‌ای نیز دارای سطحی صاف و بدون زبری می‌باشد. دبی ورودی به کانال مستطیلی برابر با  $58$  لیتر بر ثانیه و عمق جریان ورودی به کانال نیز برابر با  $0.18$  متر است. مقدار پارامتر شیلدز برای هر دو سازه پایه و تکیه‌گاه از رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه شده است.

$$\theta_{cr,n} = \frac{0.3}{1 + 1.2d_{*,n}} + 0.055 \left( 1 - e^{-0.002d_{*,n}} \right) \quad (4)$$

در رابطه فوق مقدار  $d_{*,n}$  مقدار بی‌بعد شده ابعاد دانه می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود

<sup>1</sup> Abutment

ابعاد مش برای مدل‌سازی مدل پایه و تکیه‌گاه پل، از شبکه‌های حل مکعبی تو در تو با ابعاد مش ریز تر در محدوده سازه استفاده شده است. ترکیب دو مش بلاک خارجی و داخلی با مجموع تعداد مش ۱۴۶۲۰۰۰ برای مدل تکیه‌گاه و ۱۹۴۰۹۵۰ برای مدل پایه به دست آمد. لذا برای مدل‌سازی عددی از تعداد ۱۹۴۰۹۵۰ مش استفاده گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- صحت سنجی مدل عددی

برای مدل‌سازی عددی جریان، سه مدل آشفتگی  $K-\epsilon$ ، RNG و LES جهت مقایسه حداکثر عمق آبشستگی در کانال مستطیلی برای دبی  $0/052$  متر مکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. همانگونه که از نتایج جدول پیداست، مدل آشفتگی LES از نتایج بهتری در برآورد حداکثر عمق آبشستگی برای هر دو مدل پایه و تکیه‌گاه پل برخوردار است. اگرچه اجرای نرم افزار با انتخاب مدل آشفتگی LES زمان بیشتری را برای

**جدول ۲** مقایسه حداکثر عمق آبشستگی تکیه‌گاه و پایه پل برای مدل‌های مختلف آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی به همراه زمان اختصاص یافته برای هر اجرا

**Table 2** Comparison of Maximum Scour Depth in Abutment and Pier for Different Turbulence Models and Experimental Results, considering consumed simulation time.

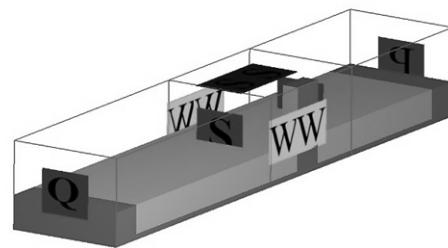
	Experimental Model	Turbulence Model		
		K- $\epsilon$	RNG	LES
Abutment	0.27	0.18	0.173	0.20
Simulation Time (hr)		3:20	6:15	8:30
Pier	0.077	0.048	0.042	0.067
Simulation Time (hr)		4:40	7:15	10:30

اجرا صرف نموده است، لیکن محاسبات دقیقتر و همچنین ارائه الگوی آبشستگی مشابه نمونه آزمایشگاهی که در ادامه آمده است، هزینه‌های محاسباتی را توجیه پذیر می‌نماید.

جدول ۱ مدل‌های ساخته شده بر اساس فاصله پایه از تکیه‌گاه و نسبت  $(u/u_{cr})$

**Table 1** Models provided based on distance from abutment and  $(u/u_{cr})$

Model	$u/u_{cr}$	Distance from abutment
A.P.F.85	0.85	0.47
A.P.F.95	0.95	0.47
A.P.N.85	0.85	0.26
A.P.N.95	0.95	0.26



**Fig. 2** Boundary conditions used in numerical model  
شکل ۲ شرایط مرزی مورد استفاده در مدل عددی

فاصله پایه از تکیه‌گاه اشاره دارد.

#### ۳-۲- مدل‌سازی عددی

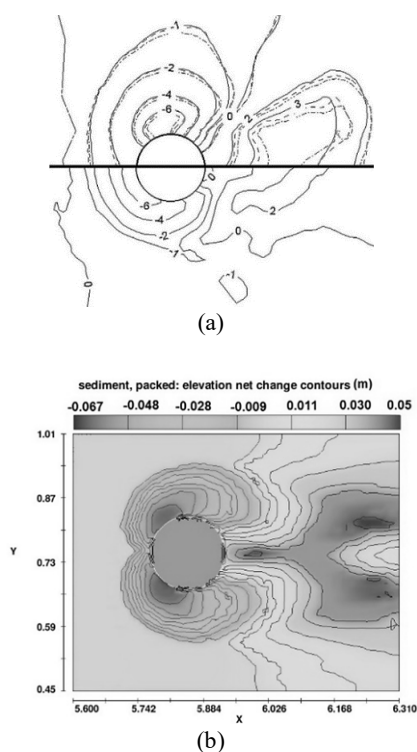
برای شبیه‌سازی سه بعدی جریان، هندسه میدان تقسیم به مش با ابعاد ریز می‌گردد. جهت افزایش دقت مدل عددی پایه و تکیه‌گاه دو محدوده مش تو در تو با ابعاد ریزتر در محدوده سازه پایه و تکیه‌گاه، در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی اختصاص داده شده به مدل عددی مطابق با شکل ۲، برای دیواره‌ها یا طرفین کانال و سطح زیرین مدل شرط مرزی دیوار<sup>۱</sup> ( $w$ ) اختصاص داده شده است این مرز دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می‌کند. برای سطح فوقانی کانال که در تماس با جریان هوای آزاد قرار گرفته شرط مرزی تقارن<sup>۲</sup> ( $S$ ) در نظر گرفته شده است. برای جریان شرایط مرزی جریان ورودی<sup>۳</sup> ( $Q$ ) در نظر گرفته شده که این شرط عموماً برای تعریف دبی ورودی یک مرز در نظر گرفته می‌شود. در مرز خروجی شرط فشار<sup>۴</sup> ( $P$ ) در نظر گرفته شده است شرایط مرزی در محدوده مش بلاک دوم به صورت تو در تو و در ناحیه قبل و بعد از تکیه‌گاه شرط مرزی تقارن ( $S$ ) گیری تکیه‌گاه اعمال شده است کاملاً منطبق با شرایط مرزی اعمال شده در مش بلوک اول می‌باشد. جهت یافتن بهترین

<sup>3</sup> Volume flow rate

<sup>4</sup> Specified pressure

<sup>1</sup> Wall

<sup>2</sup> Symmetry



**Fig. 4** Plan view of scour depth around the pier (a) Experimental model (Khosronejhad et al., 2012) (b) Numerical model

**شکل ۴** نمایش افقی آبشستگی در اطراف پایه پل (a) مدل آزمایشگاهی (خسرو نژاد و همکاران، ۲۰۱۲) و (b) مدل عددی

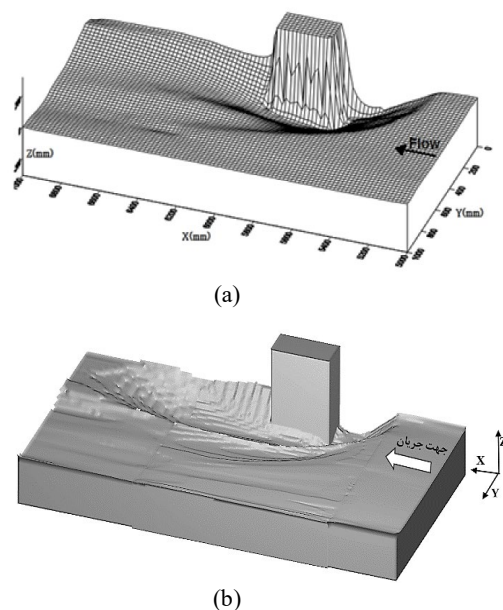
برخوردار است. تغییرات پروفیل طولی تغییرات بستر در محدوده تکیه‌گاه مطابق با شکل ۵ نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبشستگی در مدل عددی همانند مدل آزمایشگاهی در لبه جلویی تکیه‌گاه اتفاق افتاده است. همچنین برای بررسی بهتر نتایج در مدل عددی از ضریب همبستگی ( $R^2$ ) استفاده شد که میزان آن برابر با ۷۸ درصد به دست آمد.

بررسی توسعه زمانی آبشستگی در اطراف مدل تکیه‌گاه و پایه پل و مقایسه آن با مدل‌های آزمایشگاهی با توجه به شکل ۶ نشان می‌دهد که ۷۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی در محدوده تکیه‌گاه در ۲۰ درصد زمان ابتدایی آبشستگی اتفاق می‌افتد. همچنین، روند آبشستگی تا به تعادل رسیدن تغییرات بستر برای هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی تطابق نسبی برخوردار است. همچنین برای مدل پایه توسعه آبشستگی تا رسیدن به ۷۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی از

مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای هر دو مدل پایه و تکیه‌گاه نشان می‌دهد که پیش بینی حداکثر عمق آب شستگی در تکیه‌گاه پل توسط مدل عددی حدود ۷۴ درصد مقدار اندازه گیری شده می‌باشد. همچنین بیشینه عمق آب شستگی در پایه پل در مدل عددی ۸۷ درصد مقدار اندازه گیری شده می‌باشد.

### ۳-۲- الگوی آبشستگی در مدل عددی

نمای سه بعدی تغییرات بستر در اطراف تکیه‌گاه برای مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین نمای دوبعدی تغییرات بستر در اطراف پایه پل برای مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۴ آمده است. مقایسه تغییرات بستر و محل ایجاد حداکثر عمق آبشستگی برای مدل عددی پایه و تکیه‌گاه و مقایسه آن با مدل‌های آزمایشگاهی، گویای آن است که مدل عددی از قابلیت و توانمندی مناسبی در شبیه‌سازی تغییرات بستر و آبشستگی موضعی در اطراف هر یک از سازه‌های تکیه‌گاه و پایه پل



**Fig. 3** 3D view of scour depth around a rectangular abutment. (a) Experimental Model (Hosseini et al., 2014) (b) Numerical Model.

**شکل ۳** نمایش سه بعدی آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی در (a) مدل آزمایشگاهی (حسینی و همکاران ۲۰۱۵) و (b) مدل عددی

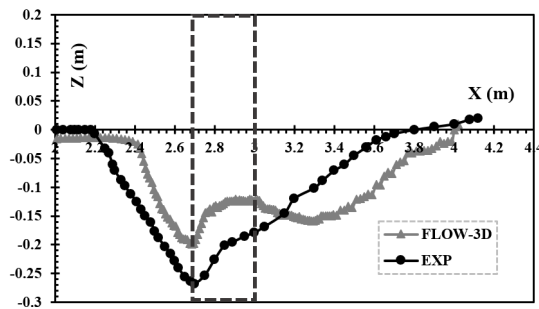


Fig. 5 Variation of longitudinal profile around rectangular abutment in numerical and experimental model  
شکل ۵ تغییرات پروفیل طولی بستر در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی در مدل عددی و آزمایشگاهی

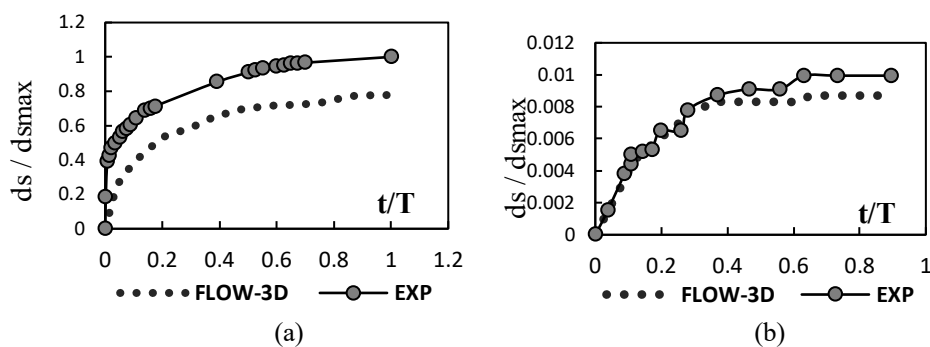


Fig. 6 Temporal variation of scour in numerical and experimental model (a) at abutment (b) at pier  
شکل ۶ توسعه زمانی آبشستگی در مدل عددی و آزمایشگاهی (a) تکیه‌گاه، (b) پایه پل

عمق آبشستگی در اطراف دو سازه پایه و تکیه‌گاه تغییرات عمده‌ای داشته است. همچنین به بررسی تغییرات طولی و عرضی بستر در ترکیب پایه و دلیل اندرکنش جریان و فشردگی گردابه‌ها در حد فاصل بین دو سازه پایه و تکیه‌گاه آبشستگی موضعی در اطراف این دو سازه به صورت ناحیه‌ای پیوسته در آمده است.

با بررسی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه و پایه پل برای ترکیبات A.P.F و A.P.N، برای سرعت نسبی ۰/۸۵ و ۰/۹۵ مشاهده می‌شود که افزایش شدت جریان، تغییرات ناچیزی بر روی الگوی آبشستگی در اطراف دو سازه پایه و تکیه‌گاه داشته و تنها موجب افزایش عمق آبشستگی در اطراف این دو سازه شده است. تغییرات پروفیل طولی تغییرات بستر در اطراف تکیه‌گاه برای ترکیبات A.P.N.85,95 و A.P.F.85,95 مطابق با نمودارهای شکل ۹ نمایش داده شده است. بررسی میزان آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه نشان می‌دهد با کاهش فاصله پایه از تکیه‌گاه عمق آبشستگی افزایش نسبی داشته است. به گونه‌ای که بیشینه

انطباق کامل بر خوردار بوده و پس از آن تا به تعادل رسیدن عمق آبشستگی از روند یکسانی همانند با مدل عددی برخوردار است.

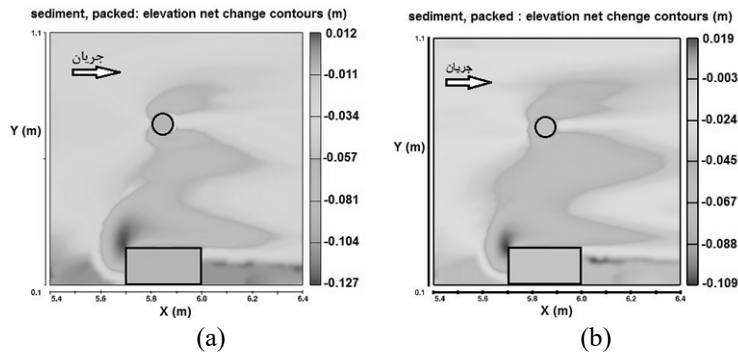
### ۳-۳- تحلیل الگوی آبشستگی در ترکیب پایه و تکیه‌گاه

نتایج حاصل از برداشت تغییرات بستر به صورت کانطورهای رنگی در نمای دو بعدی، در شکل ۷ و شکل ۸ برای دو ترکیب A.P.F (تکیه‌گاه و پایه با فاصله دور) و ترکیب A.P.N (تکیه‌گاه و پایه با فاصله نزدیک) به ترتیب برای دو مقدار  $u/u_{CF}=0/85$  و  $u/u_{CF}=0/95$  در محدوده پایه و تکیه‌گاه نمایش داده شده است.

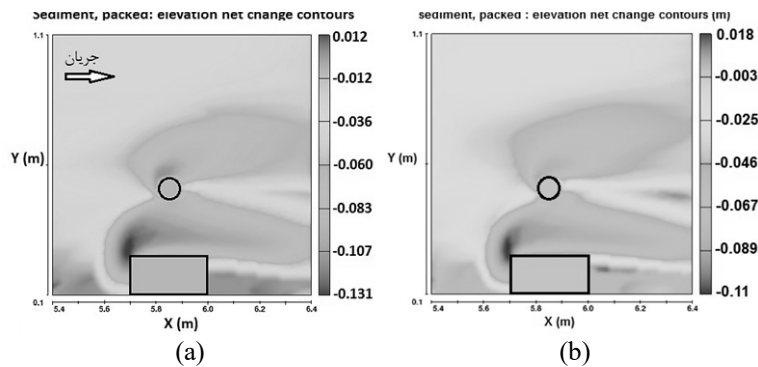
برای مدل A.P.F، بررسی تغییرات بستر برای ترکیبات فوق نشان دهنده این است که بیشینه عمق آبشستگی برای تکیه‌گاه و در لبه راست بالادست پیشانی رخ داده است. و با کاهش فاصله پایه از تکیه‌گاه در مدل‌های A.P.N.85,95 بیشینه

نسبت به مدل A.P.F.95، ۱۸ درصد افزایش در حداکثر عمق آبخستگی مشاهده می‌شود. مقایسه تغییرات بستر در حد فاصل بین پایه و تکیه‌گاه مطابق با نمودارهای شکل (۱۰) نشان دهنده این است که، کاهش فاصله پایه و تکیه‌گاه

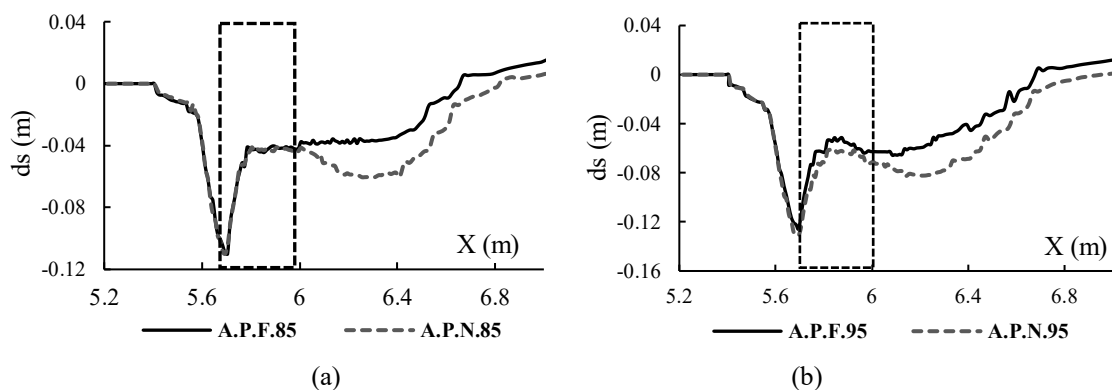
عمق آبخستگی برای ترکیب A.P.N.85 برابر با ۰/۱۱ متر بوده و نسبت به مدل A.P.F.85 تکیه‌گاه ۲ درصد افزایش داشته است. همچنین میزان حداکثر عمق آبخستگی تکیه‌گاه برای ترکیب متناظر A.P.N.95، برابر با ۰/۱۳ متر به دست آمده و



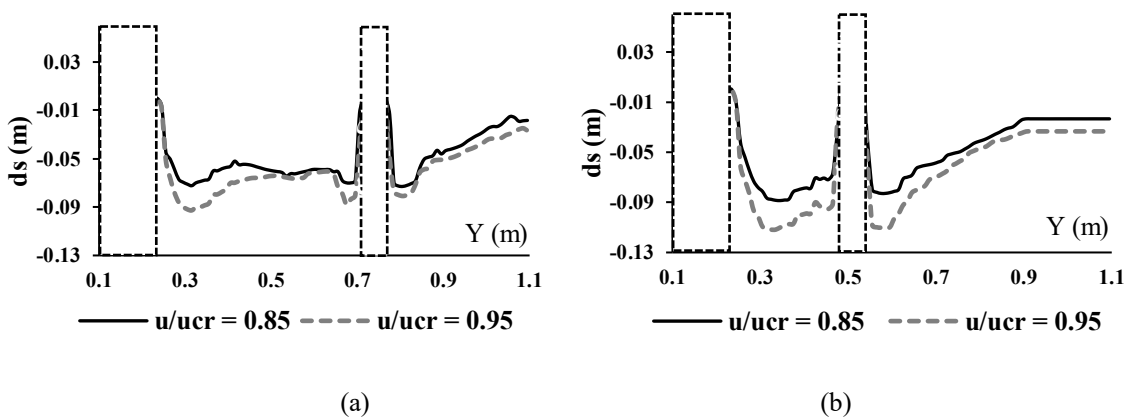
**Fig. 7** Plan view of bed variation for A.P.F model (a)  $u/u_{cr} = 0.85$  (b)  $u/u_{cr} = 0.95$   
 شکل ۷ تغییرات دو بعدی بستر (a)  $u/u_{cr} = 0.85$  (b)  $u/u_{cr} = 0.95$  برای مدل A.P.F



**Fig. 8** Plan view of bed variation for A.P.N model (a)  $u/u_{cr} = 0.85$  (b)  $u/u_{cr} = 0.95$   
 شکل ۸ تغییرات دو بعدی بستر (a)  $u/u_{cr} = 0.85$  (b)  $u/u_{cr} = 0.95$  برای مدل A.P.N



**Fig. 9** Longitudinal profile of bed around abutment (a)  $u/u_{cr} = 0.85$  (b)  $u/u_{cr} = 0.95$   
 شکل ۹ پروفیل طولی تغییرات بستر در اطراف تکیه‌گاه برای (الف)  $u/u_{cr} = 0.85$  (ب)  $u/u_{cr} = 0.95$



**Fig. 10** Sectional bed variations in the vicinity of pier and abutment (a) A.P.F (b) A.P.N  
**شکل ۱۰** پروفیل عرضی تغییرات بستر در محدوده پایه و تکیه‌گاه برای ترکیبات، (a) A.P.F (b) A.P.N

تدریج سرعت آبشستگی با توجه به شیب نمودار، کاهش یافته و پس از زمان  $0.8$ ، فرآیند آبشستگی به تعادل نسبی می‌رسد. توسعه زمانی عمق حفرة آبشستگی در اطراف پایه نیز با توجه به نمودارهای شکل (۱۳-ب) نشان می‌دهد توسعه حفرة آبشستگی تا زمان  $0.2$  با شیب تند ادامه داشته، سپس نرخ آن تا زمان  $0.8$  رونده کاهشی می‌یابد و پس از آن، فرآیند آبشستگی در اطراف پایه به تعادل نسبی رسیده است. بررسی توسعه زمانی آبشستگی نشان می‌دهد که کاهش فاصله پایه از تکیه‌گاه موجب سریع تر شدن تغییرات بستر در اطراف هر دو سازه می‌شود. همچنین فرآیند آبشستگی در محدوده تکیه‌گاه پس از مدت زمان بیشتری نسبت به پایه پل به تعادل می‌رسد. با توجه به نمودار شکل (۱۳) تا زمان  $0.2$  آبشستگی در محدوده تکیه‌گاه و پایه به بیش از  $80$  درصد از حداکثر عمق آبشستگی خود رسیده است.

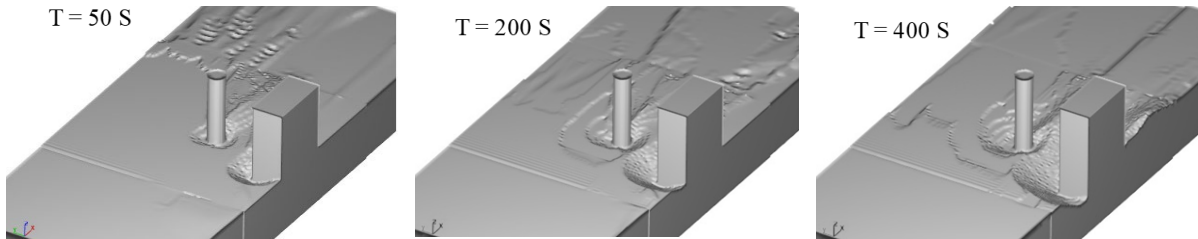
#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی تغییرات بستر در اطراف دو سازه پایه و تکیه‌گاه تحت اثر حضور توامان آنها در مسیر جریان از مدل عددی FLOW-3D استفاده گردید. صحت سنجی مدل عددی برای دو سازه تکیه‌گاه و پایه پل نشان داد که بهترین مدل آشفتگی در برآورد حداکثر عمق آبشستگی برای پایه پل و تکیه‌گاه مستطیلی مدل آشفتگی LES می‌باشد.

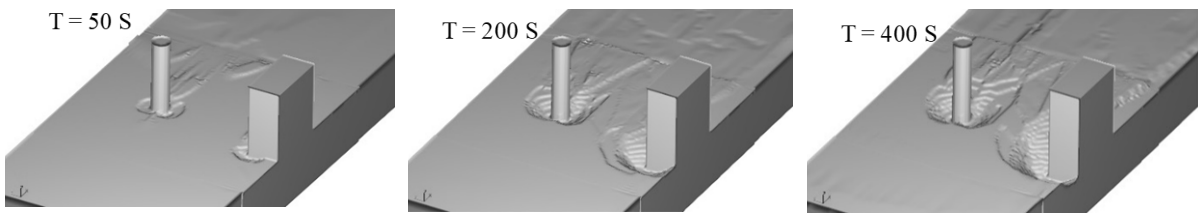
تأثیر قابل توجهی در افزایش عمق آبشستگی اطراف پایه داشته است. به نحوی که برای ترکیب A.P.N.85 میزان حداکثر عمق آبشستگی برابر  $0.08$  متر بوده که نسبت به مدل متناظر A.P.F.85، با حداکثر عمق آبشستگی  $0.07$  متر، به  $14$  درصد افزایش داشته است. همچنین حداکثر عمق آبشستگی برای ترکیب A.P.N.95، برابر با  $0.11$  متر به دست آمده و نسبت به مدل متناظر A.P.F.95،  $22$  درصد افزایش در حداکثر عمق آبشستگی مشاهده می‌شود. مقایسه عمق آبشستگی در ناحیه پایه، نشان دهنده افزایش عمق آبشستگی در اطراف این سازه به واسطه کاهش فاصله آن از تکیه‌گاه است همچنین با افزایش فاصله پایه از تکیه‌گاه حداکثر عمق آبشستگی برای دو سازه پایه و تکیه‌گاه به صورت دو ناحیه مستقل از هم ایجاد شده است.

#### ۳-۴- بررسی توسعه زمانی آبشستگی

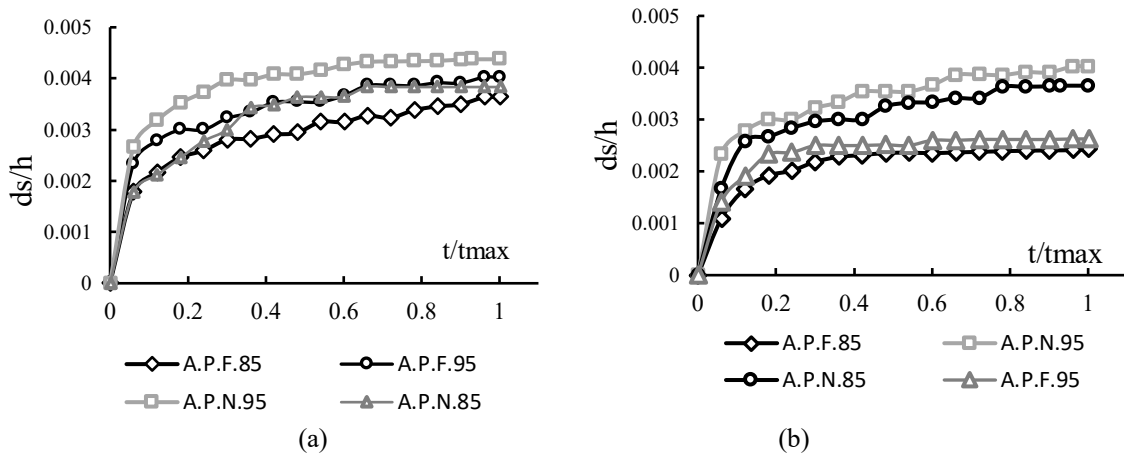
نتایج مدل‌سازی عددی مطابق با شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد که شروع آبشستگی تحت تأثیر جریان پایین رونده برای تکیه‌گاه در لبه بالادست پیشانی و پایه استوانه‌ای با  $45$  درجه زاویه نسبت به جهت جریان شروع برای شده و با گذشت زمان، حفرة آبشستگی گسترش یافته است. با توجه به شکل (۱۳-الف)، نمودارهای بی بعد توسعه زمانی آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه برای مدل‌های A.P.F و A.P.N نمایش داده شده است. عمق آبشستگی در محدوده تکیه‌گاه تا زمان  $0.3$  پس از شروع مدل‌سازی شیب تندی داشته و به



**Fig. 11** Temporal bed variations around pier and abutment in A.P.N model  
 شکل ۱۱ روند زمانی تغییرات بستر در اطراف سازه پایه و تکیه‌گاه پل در مدل A.P.N



**Fig. 12** Temporal bed variations around pier and abutment in A.P.F model  
 شکل ۱۲ روند زمانی تغییرات بستر در اطراف سازه پایه و تکیه‌گاه پل در مدل A.P.F



**Fig. 13** Temporal scour depth around structure (a) Abutment (b) Pier  
 شکل ۱۳ توسعه زمانی عمق آبشستگی در اطراف سازه (a) تکیه‌گاه، (b) پایه پل

است؛ به گونه‌ای که توانسته است برای مدل آشفتگی منتخب، حداکثر عمق آبشستگی در پایه پل و تکیه‌گاه را به ترتیب تا ۸۷٪ و ۷۴٪ میزان آبشستگی را پیش بینی نماید.

۲. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت نسبی جریان با تقویت جریان‌های گردابی حول دو سازه پایه و تکیه‌گاه عمق آبشستگی افزایش داشته؛ به گونه‌ای که با افزایش ۱۰ درصدی سرعت نسبی، عمق آبشستگی حدود ۵۰

نتایج به دست آمده از تغییرات بستر تحت اثر اندرکنش پایه و تکیه‌گاه مستطیلی به شرح زیر می‌باشد.

۱. مقایسه الگو آبشستگی و محل ایجاد حداکثر عمق آبشستگی برای مدل عددی پایه و تکیه‌گاه و مقایسه آن با مدل‌های آزمایشگاهی، گویای آن است که مدل عددی FLOW-3D از قابلیت و توانمندی مناسبی در شبیه‌سازی تغییرات بستر و آبشستگی موضعی در اطراف هر یک از سازه‌های تکیه‌گاه و پایه پل برخوردار

سرعت جریان  $u, v, w$   
 $\left(\frac{m}{s}\right)$   
 لزجت سینماتیکی  $\nu_f$

درصد افزایش می‌یابد. تاثیر افزایش سرعت نسبی بر روی الگوی آبشستگی در مقاطع طولی و عرضی کانال بسیار ناچیز می‌باشد.

## References

## منبع‌ها

- Anjomrooz S, Karami H, Hoseini K, Farzin S. 2018. Numerical study of the effect of interaction of bridge pier and rectangular abutment on flow characteristics. *Irrigation & Water Engineering*, 8(31):62-.  
 URL:<https://www.magiran.com/paper/1858510> [in Persian].
- Arab M, Zomorodian MA. 2016. Interaction of Bridge Pier and Abutment on Local Scour Around Them. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(1):131-142.  
 URL:<https://www.magiran.com/paper/1536587> [in Persian].
- Croad RN. 1989. Investigation of the pre-excavation of the abutment scour hole at bridge abutments. Central Laboratories, Works and Development Services Corporation,
- Hong S. 2005. Interaction of bridge contraction scour and pier scour in a laboratory river model. Georgia Institute of Technology.
- Hosseini H, Hataf N, Talebbeydokht N. 2014. 3-D simulation of scour hole at vertical-wall bridge abutment. *Sharif Journal, Civil Engineering Transaction*, 30(2):7. [in Persian].
- Hosseini K, Karami H, Hosseinjanzadeh H, Ardeshtir A. 2016. Prediction of time-varying maximum scour depth around short abutments using soft computing methodologies-A comparative study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(5):2070-2081.
- Karami H, Hosseini K, Farzin S, Nikpour M, Anjomrooz S. 2017. Three-dimensional Analysis of the Effect of Attached-Abutment to the Channel Wall on the Hydraulic Parameters of Flow, Using Flow-3D Software. *Irrigation & Water Engineering*, 7(27):16-.  
 URL:<https://www.magiran.com/paper/1726391> [in Persian].
- Khosronejad A, Kang S, Sotiropoulos F. 2012. Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers. *Advances in Water Resources*, 37(73-85).
- Melville BW. 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of hydraulic Engineering*, 123(2):125-136.
- Oben-Nyarko K, Ettema R. 2011. Pier and abutment scour interaction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12):1598-1605.

۳. با کاهش فاصله پایه از تکیه‌گاه مشاهده می‌شود که عمق آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی افزایش می‌یابد. این افزایش در حدود ۲۰ درصد می‌باشد. این نتیجه با پیشینه مطالعات انجام شده در این رابطه مطابقت دارد.

۴. بررسی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف سازه پایه نشان می‌دهد که با کاهش فاصله پایه از تکیه‌گاه پل باعث افزایش میزان عمق آبشستگی در اطراف پایه می‌شود. این افزایش عمق آبشستگی در پایه پل در حدود ۱۰ درصد می‌باشد.

۵. روند توسعه زمانی آبشستگی در اطراف هر دو سازه پایه و تکیه‌گاه نشان می‌دهد که به تعادل رسیدن فرآیند آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پس از مدت زمان بیشتری نسبت به پایه پل اتفاق می‌افتد. این اثر را می‌توان ناشی از وجود گوشه‌های تیز در تکیه‌گاه پل دانست.

۶. کاهش فاصله پایه از تکیه‌گاه موجب تسریع در روند آبشستگی برای هر دو سازه و همچنین افزایش مدت زمان به تعادل رسیدن فرآیند آبشستگی می‌شود.

## ۵- فهرست علائم

$\Phi_n$	نرخ انتقال بار بستر بر حسب	$\rho \left(\frac{m^3}{s}\right)$	دانشیته سیال
$n$			
$\theta$	پارامتر شیلدز	$A (m^2)$	سطح مقطع جریان