Research Article





Predicting local scour depth of bridge piers using hybrid particle swarm optimization and gray wolf optimizer

Mehran Sarabi, Seyed Abbas Hosseini*

Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding author email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir © The Author(s) 2024

Received: 05 Nov 2023

Accepted: 01 Jan 2024

Published: 09 Mar 2024

Extended Abstract

Introduction

Bridge pier foundations are costly to construct, and local scour around them can lead to instability and, if not properly addressed, eventual structural failure. Therefore, a detailed study to understand this phenomenon and the factors influencing it is essential. This research proposes an equation to estimate local scour depth around bridge piers based on an extensive dataset of field measurements. An optimization model was defined, and its decision variables were estimated using a hybrid metaheuristic algorithm combining Grey Wolf Optimizer (GWO) and Particle Swarm Optimization (PSO) (HPSGWO). Various equations were evaluated, and the best-performing model was selected based on error metrics such as RMSE, RSR, NSE, PBIAS, and CC. The results indicate that the proposed equation is reliable and outperforms existing empirical methods. The equation shows that scour depth is directly proportional to the Froude number and the ratio of pier width to flow depth, and inversely proportional to the ratio of median sediment size to flow depth.

Materials and Method

The study utilized a dataset of 540 field measurements of local scour depth around bridge piers, collected under various hydraulic and sediment conditions. The dataset included parameters such as pier width, flow velocity, flow depth, sediment size, and Froude number. An optimization model was formulated to minimize the root mean square error (RMSE) between observed and calculated scour depths. The hybrid HPSGWO algorithm was employed to solve the optimization problem, combining the exploration capabilities of GWO with the exploitation strengths of PSO. The model was evaluated using error metrics, including RMSE, RSR, NSE, PBIAS, and CC, to ensure accuracy and reliability.

Results and Discussion

The results demonstrated that the proposed equation, derived using the HPSGWO algorithm, provided accurate estimates of local scour depth. The best-performing model (SF13) achieved an RMSE of 0.504 m, an NSE of 0.729, and a CC of 0.734, indicating a strong correlation between observed and predicted values. The model showed that scour depth increases with the Froude number and the ratio of pier width to flow depth, while it

Technical Strategies in Water Systems https://sanad.iau.ir/journal/tsws ISSN (Online): 2981-1449 Winter 2024: Vol 1, Issue 3 https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783464



decreases with the ratio of median sediment size to flow depth. The proposed equation outperformed existing empirical methods, such as those by Sharafi et al. (2016), which achieved an RMSE of 0.507 m and an NSE of 0.711. The study highlights the importance of considering sediment characteristics and flow conditions in scour depth estimation.

Conclusion

This research presents a reliable equation for estimating local scour depth around bridge piers, derived from a comprehensive field dataset and optimized using the HPSGWO algorithm. The proposed model outperforms existing empirical methods, providing more accurate and robust predictions. The results underscore the significance of incorporating sediment size and flow parameters in scour depth calculations. The equation can be used as a practical tool for engineers and researchers to assess scour risk and design more stable bridge foundations. Future studies could explore the application of this approach to other hydraulic structures and under varying flow conditions to further validate its effectiveness.

Keyword: Local scour, Gray wolf - particle swarm algorithm, Bridge Pier, Field data

Research Article





Predicting local scour depth of bridge piers using hybrid particle swarm optimization and gray wolf optimizer

Mehran Sarabi, Seyed Abbas Hosseini^{*}

Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* *Corresponding author* email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir © The Author(s) 2024

Received: 05 Nov 2023

Accepted: 01 Jan 2024

Published: 09 Mar 2024

Abstract

Construction of bridge piers is expensive, and scouring near them can lead to instability. Without a suitable solution, it can ultimately result in the structure's destruction. Therefore, a detailed study is required to understand this phenomenon and the factors affecting it. This research entails utilizing extensive field data to measure the local scour depth around bridge piers. It proposes an equation comprising scour-affecting parameters and defines an optimization model to establish this relationship. The decision variables of this model were determined using a meta-heuristic algorithm called the hybrid gray wolfparticle swarm (HPSGWO). For this purpose, various relationships were established to ascertain scour depth, and subsequently, the local scour depth of the bridge piers was calculated, based on these equations. Root Mean Square Error (RMSE), Relative Square Root (RSR), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent Bias (PBIAS), and Correlation Coefficient (CC) were employed as error measurement indices to evaluate the relationships. Upon comparison of the error measurement indices for the obtained relationships, the best input parameter combination and mathematical relationship for calculating scour depth were determined. These indices for the superior model are equal to 0.504 m, 0.52, 0.73, 7.7%, and 0.734 for RMSE, RSR, NSE, PBIAS, and CC, respectively. These values show that the equation presented in this research is suitable for calculating scour depth and is more reliable than the presented experimental methods. In the proposed relationship, scour depth is directly proportional to the Froude number and the ratio of base width to water depth while inversely proportional to the average size of bed particles to water depth.

Keyword: Local scour, Gray wolf - particle swarm algorithm, Bridge Pier, Field data

مجله راهبردهای فنی در سامانههای آبی https://sanad.iau.ir/journal/tsws شاپا الكترونيكي: ۱۴۴۹–۲۹۸۱ زمستان ۱۴۰۲، دوره یک، شماره۳، ۱۹۳–۱۷۷ https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783464

مقاله پژوهشی



ییش بینی عمق موضعی آبشستگی پایه های پل با استفاده از ترکیب الگوریتم های بهینهسازی ازدحام ذرات و گرگ خاکستری

مهران سرابی، سیدعباس حسینی*

دانشكده مهندسي عمران، واحد علوم و تحقيقات، دانشگاه آزاد اسلامي، تهران، ايران

ايميل نويسنده مسئول:^{*} abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir © The Author(s) 2024

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱

چاپ: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

چکیدہ

ساخت پایههای پل یک کار پرهزینه بوده و آبشستگی در نزدیکی پایههای پل باعث ناپایداری آنها و در صورت عدم اتخاذ راهکاری مناسب در نهایت موجب تخریب این سازه می گردد. بنابراین مطالعه دقیق جهت شناخت این پدیده و عوامل موثر بـر آن الزامـی است. لـذا در ایـن تحقیق، بر اساس مجموعه وسیعی از دادههای صحرایی برای انـدازهگیـری عمـق آبشسـتگی موضـعی پایـههـای پـل، معادلـهای متشـكل از یارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی پیشنهاد گردید، برای تعیین این رابطه یک مدل بهینهسازی تعریف شد و متغیرهای تصمیم این مـدل را با الگوريتم فرا ابتكارى تركيبى گرگ خاكسترى- ازدحام ذرات (HPSGWO) برآورد گرديد. براى اين منظور روابط مختلفى براى تعيين عمق آبشستگی تعیین شد. بر اساس معادلههای مختلف تعیین شده، عمق آبشستگی موضعی پایههای پل محاسبه شد. برای ارزیابی روابط از شاخصهای اندازه گیری خطا PBIAS ،NSE ،RSR ،RMSE و CC استفاده شد. با مقایسه شاخصهای اندازه گیری خطا برای روابط بدست آمده، بهترین ترکیب ورودی از پارامترها و رابطه ریاضی بهترین مدل برای محاسبه عمق آبشستگی تعیین شد. این شاخصها برای مدل برتر به ترتیب برابر ۰/۵۰۴m، ۰/۵۲، ۰/۷۳، ۰/۷۳، ۱/۷۳۴ است. این مقادیر نشان میدهد معادله ارائه شده در این تحقیق برای محاسبه عمق آبشستگی مناسب و نسبت به روشهای تجربی ارائه شده قابل اعتمادتر است. در رابطه پیشنهادی عمق آبشستگی با عدد فرود و نسبت عرض پایه به عمق آب نسبت مستقیم و با اندازه متوسط ذرات بستر نسبت به عمق آب نسبت معکوس دارد.

کلمات کلیدی: آبشستگی موضعی، الگوریتم ازدحام ذرات- گرگ خاکستری، پایههای پل، دادههای صحرایی



۱– مقدمه

موضوع جریان رودخانه و مسائل مربوط به آن از جمله سیل، انتقال رسوبات، تغییر شکل بستر رودخانه ها و آبشستگی از مهمترین موضوعات در مدیریت رودخانه ها هستند (Annandale, 1995). تخریب پل ها در سراسر دنیا باعث خسارات جانی و مالی شدید می شود (;Annandale, 2020; Maddison, 2012; Carnacina et al., 2019; Link et al., 2020; Maddison, 2012 و مالی شدید می شود (;Wardhana & Hadipriono, 2003). یخریب پل های بایه های پل، امری مهم برای محافظت از و اژگونی و آسیب دیدگی پل ها است. یکی از مهمترین علل خرابی پایه های پل ها، آبشستگی بستر است که ناشی از برخورد جریان با پایه ها یا تکیه گاه ها است. سرعت موضعی و آشفتگی جریان با وجود پایه های پل در مسیر جریان، به ویژه در هنگام سیل افزایش می یابد (2014).

الگوی جریان در اطراف پایههای پل بسیار پیچیده بوده که این پیچیدگی با تشکیل حفره آبشستگی در اطراف پایه تشدید می شود. جریان گردابی پیچیدهای در اطراف پایه به وجود می آید، که عملکرد آنها باعث حفر گودالی در اطراف پایهها شده که حفره آبشستگی نامیده می شود. توسعه این گودال در اطراف پایهها باعث خالی شدن زیر پی ها و در نتیجه خرابی آنها و خرابی پل می شود. الگوی جریانی که در اطراف پایه پل شکل می گیرد به طور مستقیم یا غیرمستقیم با برخورد جریان به پایه و جدا شدن جریان از پایه پل در ارتباط است. برخورد جریان به پایه گردابه ثانویه را شکل داده و جدایی جریان از پایه باعث به وجود آمدن گردابههایی می شود. الگوی جریان در اطراف یک پایه سبب فرسایش بستر رودخانه در اطراف پایه به ویژه در تراز می می مود. پس از برخورد جریان آب به دماغه پل، روی پایه به تناسب سرعت جریان، فشار ایجاد می شود و به دلیل توزیع سرعت عمودی جریان که سرعت از بستر رودخانه به طرف سطح آب زیاد می شود، فشاردینامیکی بیشتری نیز در باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلو پایه می شود. همچنین در رودخانه، سرعت در سطح آب زیاد می شود. این گرادیان فشار باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلو پایه می شود. همچنین در رودخانه، سرعت در سطح آب حداکثر نیست، بلکه فشار ایجاد می شود. این گرادیان قرار به پایه وجود آمدن گرادیان فشار روی پایه از بالا به پایین می شود. این گرادیان فشار فشار ایجاد می مود در به پایین در جلو پایه می شود. همچنین در رودخانه، سرعت در سطح آب حداکثر نیست، بلکه مداکثر مقدار آن کمی پایین تر از سطح آب به وجود می آید. در نتیجه در این قسمت نیز یک توزیع سرعت و به تبع آن توزیع می در از می مود که باعث حرکت آب رو به بالا شده و در سطح آب در نوک پایه موجی به نام موج کمانی ایجاد می شود. فشار ایجاد می شود که باعث حرکت آب رو به بالا شده و در سطح آب در نوک پایه موجی به نام موج کمانی ایجاد می شود. هنگام برخورد جریان رودخانه با پایه پل فرآیند آبشستگی اتفاق می افتد (شکل ۱) و در اطراف پایه تحت تأثیر عوامل هنگام برخورد جریان رودخانه با پایه پل فرآیند آبشستگی ایجاد می شود (۳۵۰ ای ای ور اطراف پایه تحت تأثیر عوامل



Fig 1. Some Influential Parameters on Local Scour around Bridge Pier

از سال ۱۹۵۰ مطالعات متعددی بر روی آبشستگی پایههای پلها انجام شدهاست که بر اساس نتایج آنها روشهای پیشبینی عمق آبشستگی موضعی بهطور قابل ملاحظهای بهبود یافته است (Sheppard et al., 2014).

متداولترین روش های مورد استفاده برای پیش بینی عمق آبشستگی تعادلی روش هایی از قبیل روش اکلند^۱ (,Moreno et al.) و روش دپارتمان حمل 2017)، روش Dey et al., 2008; Arneson et al., 2012; Yorozuya & Ettema, 2015) HEC-18) و روش دپارتمان حمل و نقل فلوریدا^۲ (Sheppard & Renna, 2010) است. روابط متعددی در ارتباط با تخمین عمق آبشستگی موضعی اطراف پایههای پل ارائه شده است. برخی از این روابط برای تخمین آبشستگی موضعی در جدول (۱) ارائه شده اند.

در سالهای اخیر با استفاده از روشهای محاسبات نرم پیشبینی عمق آبشستگی انجام شده است. (Najafzadeh et al., 2015) با استفاده از روش شبکههای GMDH عمق آبشستگی موضعی پایه پل را در بستری با رسوبات درشت دانه پیشبینی کردند. نتایج نشان داد که کارایی و دقت عمل شبکههای GMDH نسبت به روابط تجربی مناسبتر است. (Mohammadpour 2017) از روشهای شبکههای عصبی مصنوعی، درخت M5 و GEP برای محاسبه عمق آبشستگی استفاده کردند.

M5 (Kashefipour & Zahiri, 2018) برای شبیه سازی حداکثر عمق چاله آبشستگی اطراف تکیه گاه پل از الگوریتم درختی M5 استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم M5 کارآیی بالایی در محاسبه عمق آبشستگی دارد. بر اساس نتایج ضریب عمق طول بیشترین تأثیر بر عمق آبشستگی را دارد. (ELM) (ELM) با استفاده از روش ماشین یادگیری نهایی (ELM) اقدام به پیش بینی آبشستگی گروه پایه ها پل کردند. آن ها نتایج به دست آمده از مرحله ارزیابی این روش را با روش ماشین هاد که الگوریتم M5 کارآیی بالایی در محاسبه عمق آبشستگی دارد. بر اساس نتایج ضریب عمق بطول بیشترین تأثیر بر عمق آبشستگی را دارد. (ELM) (ELM) و ماشین یادگیری نهایی (ELM) اقدام به پیش بینی آبشستگی گروه پایه ها پل کردند. آن ها نتایج به دست آمده از مرحله ارزیابی این روش را با روش ماشین ماشین بردار پشتیبان (Majedi Asl & Valizadeh , 2019) مقایسه کردند. (ANN) مقایسه کردند. (وال و ماسی کار با روش ماشین بردار پشتیبان (Majedi Asl & Valizadeh , 2019) مقایسه کردند. (در سه نوع شرایط آزمایشگاهی متفاوت) های بردار پشتیبان (Ani می شدیکه های عصبی مصنوعی (Ani مقایسه کردند. (وال و ماسی قرار مایش کاهی منهان و می بیش بینی عمق آبشستگی اطراف پایه پل ۲۰۱ سری داده آزمایشگاهی مختلف (در سه نوع شرایط آزمایشگاهی متفاوت) برای پیش بینی عمق آبشستگی اطراف پایه پل ۲۰۱ سری داده آزمایشگاهی مختلف (در سه نوع شرایط آزمایشگاهی متفاوت) با استفاده از ماشین بردار پشتیبان³ مورد تحلیل قرار دادند. ایشان برای پیش بینی عمق آبشستگی از دو سناریو بعددار و بی بعد استفاده کردند و استفاده از داده های ورودی در سناریو دو (حالت بابعد) در پیش بینی عمق آبشستگی دول تک پایه قائم برآورد دقیق تری نسبت به سناریو اول (حالت بی بعد) ارائه داد. (Rady 2020) تحمین عمق آبشستگی از روش های ANFIS و مان و P0 استفاده کرد. نتایج، برتری مدل GP را نسبت به ANFIS در تحمین عمق آبشستگی نشان داد.

(LGP) را با معادلات Ger (LWLR) عملکرد روش برنامهریزی ژنتیکی خطی⁶ (LGP) را با معادلات GEP، رگرسیون خطی وزنی محلی⁷ (LWLR)، رگرسیون چند خطی و معادلات تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان دهنده برتری روش LGP در عمق آبشستگی پل بود.(LWLR)، رگرسیون چند خطی و معادلات تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان دهنده برتری روش GP در عمق بررسی کردند. نتایج نشان داد که ANFIS از نظر تمامی معیارهای آماری برتر بود و GMDH2-SCE، ANN GMDH2-HS، رای پیش SVM و GEP به ترتیب در رتبههای بعدی قرار گرفتند. و در پایان استفاده از MDD ها را به عنوان ابزاری قدرتمند برای پیش بینی عمق آبشستگی پایه پل ها پیشنهاد گردید.

ترکیب الگوریتمهای فرا ابتکاری با روشهای هوش مصنوعی نیز برای محاسبه عمق آبشستگی مورد استفاده محققین قرار گرفته است. (Karkheiran et al., 2021) از روشهای ANN-PSO و ANN-GA برای پیش بینی عمق آبشستگی استفاده کردند. (Rezazadeh et al., 2019) برای تخمین عمق آبشستگی در خاکهای چسبنده مبتنی بر هوش مصنوعی ارائه کردند. نتایج نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی و بهینه کردن آن با الگوریتم ژنتیک در تخمین عمق آبشستگی پایههای پل در

¹ Auckland

² Florida Department Of Transportation

³ Extreme Learning Machines

⁴ Support vector machine (SVM)

⁵ linear genetic programming

⁶ locally weighted linear regression

⁷ Data Driven Models (DDMs)

بسترهای با رسوبات چسبنده در مقایسه با معادلات تجربی عملکرد بسیار بهتری دارد. (Dang et al., 2021) الگوریتمهای بهینهسازی ازدحام ذرات و کرمشبتاب برای بهینهسازی مدلهای شبکه عصبی مصنوعی (ANN) را جهت بهبود پیشبینی عمق آبشستگی اطراف پایههای دایرهای پیشنهاد کردند.

Table 1. Scour Depth Estimation Relationships around Bridge Piers					
ارائه دهنده	رابطه	توضيحات			
(Laursen & Toch, 1956)	$\frac{d_s}{y} = 1.35 \left(\frac{D}{y}\right)^{0.7}$	ds عمق أبشستگی، y عمق أب بالادست، D عرض پایه _			
(Arunachalam, 1965)	$\frac{\mathrm{d_s}}{\mathrm{y}} = 1.95 \left(\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{y}}\right)^{\frac{1}{6}} - 1$				
(Riahi-Madvar et al., 2019)	$\frac{d_{s}}{D} = 2.42 \left(2 \frac{V}{V_{c}} - 1 \right) \left(\frac{V}{gD} \right)^{\frac{1}{3}}$	ds عمق أبشستگی، V سرعت متوسط، D عرض پایه، Vc سرعت بحرانی			
(Melville & Sutherland, 1988)	$\frac{d_s}{D} = K_1 K_D K_y K_\alpha K_S$	$\begin{cases} K_{1} = 2.4 \left \frac{V - (V_{a} - V_{c})}{V_{c}} \right & \frac{V - (V_{a} - V_{c})}{V_{c}} < 1 \\ K_{1} = 2.4 & \frac{V - (V_{a} - V_{c})}{V_{c}} > 1 \end{cases}$ $\begin{cases} K_{y} = 1 & \frac{y}{D} > 2.6 \\ K_{y} = 0.78 \left(\frac{y}{D}\right)^{0.225} & \frac{y}{D} < 2.6 \\ K_{d} = 1 & \frac{D}{d_{50}} > 25 \\ K_{d} = 0.57 \log \left(2.24 \frac{D}{d_{50}}\right) & \frac{D}{d_{50}} < 25 \end{cases}$			
(Johnson, 1992)	$\frac{d_s}{y} = 2.02\sigma^{-0.98} Fr^{0.21} \left(\frac{D}{y}\right)^{0.98}$				
(Richardson & Davis, 2001) $\frac{d_s}{y} = 2.6 \left(\frac{D}{y}\right)^{0.43} Fr^{0.65}$		ds عمق آبشستگی، y عمق آب بالادست، D عرض پایه، Fr عدد فرود			
HEC-18(Mohamed et al., 2005)	$\frac{d_s}{y} = 2.1 \left(\frac{D}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$	-			
(Azamathulla et al., 2010)	$\frac{d_s}{y} = 1.82\sigma^{-0.03159} Fr^{0.42} \left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{0.042} \left(\frac{D}{y}\right)^{-0.28} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.37}$	ds عمق أبشستگی، y عمق آب بالادست، D عرض پایه، Fr عدد فرود، σ درجهبندی رسوب			
Sheppard & Renna,) (2005	$\begin{aligned} \mathbf{d}_{s} &= 2.5 \ \overline{f_{1} f_{2} f_{3} k_{s} D} & 0.4 \leq \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_{c}} < 1 \\ \mathbf{d}_{s} &= f_{1} \left[2.2 \left(\frac{\mathbf{V}_{c}}{\mathbf{V}_{c}} - 1 \right) + 2.5 \left(\frac{\mathbf{V}_{p}}{\mathbf{V}_{c}} - \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_{c}} \right) \right] k_{s} D & 1 \leq \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_{c}} < \frac{\mathbf{V}_{p}}{\mathbf{V}_{c}} \\ \mathbf{d}_{s} &= 2.2 \ f_{1} k_{s} D & \frac{\mathbf{V}_{p}}{\mathbf{V}_{c}} > \frac{\mathbf{V}_{p}}{\mathbf{V}_{c}} \end{aligned}$	$f_{1} = tanh \left[\frac{y}{k_{s}D} \right]$ $f_{2} = 1 - 1.2 (\ln \frac{V}{V_{c}})^{2}$ $f_{3} = \frac{\frac{k_{s}D}{d_{50}}}{0.4 \left(\frac{k_{s}D}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{k_{s}D}{d_{50}} \right)^{-0.13}}$			
(Sharafi et al., 2016)	$\frac{d_s}{y} = 0.28\sigma^{0.13} Fr^{0.47} \left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{-0.1} \left(\frac{D}{y}\right)^{0.44} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.23}$	sb عمق آبشستگی، y عمق آب بالادست، D عرض پایه، Fr عدد فرود ، d ₅ 0 اندازه دانههایی که ۵۰٪ مواد بستر از آن ریزترند، L طول پایه			
(Gao et al., 1993)	$\frac{d_s}{y} = 0.78K_s D^{0.6} y d_{50}^{-0.07} \left(\frac{V - V_C'}{V_{C(d50)} - V_C'} \right)^{\frac{5}{6}}$	b معق آبشستگی، V سرعت متوسط، D عرض پایه، Vc سرعت بحرانی، d ₅₀ اندازه دانههایی که ۵۰٪ مواد بستر از آن ریزترند			

اطراف پايەھاى پل	عمق آبشستگی ا	جدول ۱. روابط تخمين
------------------	---------------	---------------------

اساس روابط پیشبینی عمق آبشستگی در بیشتر تحقیقات قبلی روشهای هوش مصنوعی و معادلات تجربی است. روشهای هوش مصنوعی معادله عمق آبشستگی را برای استفاده از آن در شرایط دیگر ارائه نمیدهند و روشهای تجربی معمولاً بر اساس دادههای آزمایشگاهی و یا تعداد کمی از دادهها تعیین شدهاند، لذا دقت کافی ندارند. بنابراین در این مقاله رابطه عمق آبشستگی موضعی پایههای پل بصورت یک مسئله بهینهسازی بیان شدهاست. برای حل مسأله بهینهسازی از الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات (PSO) و گرگ خاستری (GWO) استفاده شد و برای محاسبه عمق آبشستگی رابطه جدیدی ارائه گردید. از این رابطه در شرایط دیگر نیز می توان استفاده کرد، چون دادههای مورد استفاده در این رابطه از رودخانههای مختلفی برداشت شده است. در صورتی که روشهای هوش مصنوعی معادله عمق آبشستگی را برای استفاده از آن در شرایط دیگر ارائه نمی دهند و اکثراً بر اساس دادههای آزمایشگاهی هستند.

۲ مواد و روش

۲-۱- مجموعه داده های مورد استفاده

دادههای مورد استفاده جهت مدلسازی عمق آبشستگی موضعی از دادههای اندازه گیری شده توسط پژوهشگران است. این دادهها توسط بندیکت و کالدول ارائه شده است (Benedict & Caldwell, 2014). در این مجموعه داده ۵۶۰ داده صحرایی مربوط به اندازه گیری عمق آبشستگی به همراه مشخصات مواد بستری رودخانه و جریان (هیدرولیکی) وجود دارد. این دادها در سالهای مختلف (۲۰۰۷–۱۹۰۰) در شرایط مختلف هیدرولیکی رودخانه (در طول رویداد جریان و پس از سیل) اندازه گیری شده است. مشخصات آماری دادههای مختلف هیدرولیکی و بستری در جدول (۲) بیان شده است.

جدول ۲. مشخصات آماری دادههای مورد استفاده Table 2. Statistical Specifications of Employed Data

پارامتر	انحراف معيار	میانگین	ماكزيمم	مينمم
D (m)	3.2209	2.5072	16.8639	0.3048
L (m)	3.9927	10.6915	27.4320	0.9754
V (m/s)	0.7697	1.3839	4.4806	0.0884
y (m)	3.0917	3.8871	20.0254	0.1524
d ₅₀ (m)	0.0259	0.0183	0.1080	0.000008
σ	2.5973	3.2269	20.3400	1.200
ds (m)	0.9693	0.8625	7.8943	0.0610
Fr	0.1774	0.2769	1.1843	0.0269
d/y	2.7223	1.1850	50.2979	0.0723
d ₅₀ /y	0.0241	0.0117	0.2264	0.0000005
L/y	6.3452	5.3992	81.8182	0.5853
ds/y	0.2690	0.2914	3.400	0.0227

D عرض پایه، L طول پایه، V سرعت جریان آب، γ عمق جریان آب بالادست، d₅₀ اندازه دانههایی که ۵۰٪ مواد بستر از آن ریزترند، σ انحراف معیار هندسی توزیع ذرات بستر ، ds عمق آبشستگی و F_r عدد فرود جریان.

۲-۲- پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی

پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی شامل ویژگیهای جریان، رسوب، سیال و هندسه پل است. برای استخراج رابطه ریاضی مربوط به یک پدیده از آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر بر آن پدیده را مورد بررسی قرار می دهند. بنابراین اجزای اصلی موثر بر عمق آبشستگی در شرایط صحرایی را می توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد: $d_{s} = f(\rho, \mu, \sigma, V, g, y, d_{50}, L, D)$ (۱) در این رابطه ρ چگالی سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، σ انحراف معیار هندسی توزیع ذرات بستر، V سرعت نزدیک شدن جریان به پایه، g شتاب ثقل، y عمق جریان در بالادست پایه، d₅₀ قطری که ٥٠ درصد ذرات بستر از آن ریزترند، L طول پایه و D عرض پایه هستند. برای تعیین پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی از تحلیل ابعادی استفاده می شود. با استفاده از تحلیل ابعادی و تئوری π باکینگهام عمق آبشستگی بصورت رابطه (۲) تعریف می شود:

$$\frac{d_s}{y} = func\left(\sigma, Fr, \frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}, \frac{L}{y}\right) \Rightarrow$$
(Y)

$$\frac{d_s}{y} = c(\sigma)^{p_1} (Fr)^{p_2} \left(\frac{D}{y}\right)^{p_3} \left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{p_4} \left(\frac{L}{y}\right)^{p_5}$$
(7)

که در این رابطه Fr عدد فروداست. ^{ds} حاصل تقسیم عمق آبشستگی بر عمق جریان است که از رابطه (۳) تعیین می شود. این رابطه دارای ضریب c و توانهای p4 ،p3 ،p2 ،p1 و p5 است. این پارامترها مجهول های مسئله هستند که با استفاده از الگوریتم HPSGWO تعیین می شود.

۲–۳– بهینهسازی مدل ریاضی آبشستگی موضعی

تعریف رابطه ریاضی عمق آبشستگی پایههای پل بهصورت مدل بهینهسازی که شامل تابع هدف، قیود، حداقل و حدکثر مجهولهای مسأله است، انجام شد. تابع هدف بصورت کمینهسازی جذر میانگین خطا بین دادههای اندازهگیری شده و محاسباتی بهصورت روابط (٤) و (٥) تعریف می شود:

$$OF = \min\left\{ \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{d_y^0}{y} - \frac{d_y^c}{y}\right)^2}{N} \right]} \right\} \Rightarrow (\varepsilon)$$

$$OF = \min\left\{ \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{d_y^0}{y} - c(\sigma)^{p_1}(Fr)^{p_2}\left(\frac{D}{y}\right)^{p_3}\left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{p_4}\left(\frac{L}{y}\right)^{p_5}\right)^2}{N}} \right\}$$

$$(\varepsilon)$$

در این رابطه ^{4g} نسبت مقادیر عمق آبشستگی موضعی محاسبه شده به عمق جریان (y) و ^{4g} نسبت مقادیر اندازه گیری شده عمق آبشستگی به عمق جریان است. برای تعیین متغیرهای تصمیم مدل بهینهسازی آبشستگی از الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات و گرگ خاکستری که در زیر به آنها اشاره شدهاست، استفاده گردید.

۲-٤- الگوريتم بهينهسازي ازدحام ذرات

الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات یک روش هوش گروهی است که توسط ابرهارت و کندی در سال ۱۹۹۵ توسعه یافت. الگوریتم PSO یک روش جستجوی ذره مبتنی بر جمعیت است و یک الگوریتم قوی برای بهینهسازی است که بر اساس مشاهده رفتارهای ازدحام در برخی از سیستمهای اکولوژیکی پیشنهاد شد. در الگوریتم SO هر یک از راهحلهای مسئله به عنوان یک ذره در در نظر گرفته می شود، این ذرات دارای دو بردار: بردار موقعیت و بردار سرعت هستند و با استفاده از این دو بردار در فضای جستجو به وضعیت تکامل (بههنگام) می شوند. در طول اجرای الگوریتم بروزسانی بردارهای موقعیت و سرعت ذره توسط روابط (۸) و (۹) انجام می شود. I

$$P_{\text{best}_{i}}^{t} = X_{i}^{*} \left| f(X_{i}^{*}) = \min_{k=1,2,\dots,t} \left(\left\{ f(X_{i}^{k}) \right\} \right), \ i \in \{1, 2, \dots, N\}$$
(7)

$$\mathbf{g}_{\text{best}}^{t} = \mathbf{X}_{*}^{t} \left[\mathbf{f}(\mathbf{X}_{*}^{t}) = \min_{i=1,2,\dots,N} \left(\left\{ \mathbf{f}(\mathbf{X}_{i}^{k}) \right\} \right), \tag{V}$$

$$V_{i}^{t+1} = \omega V_{i}^{t} + c_{1} r_{1} \left(P_{best_{i}}^{t} - X_{i}^{t} \right) + c_{2} r_{2} \left(g_{best}^{t} - X_{i}^{t} \right)$$

$$X_{i}^{t+1} = X_{i}^{t} + V_{i}^{t+1}$$
(A)
(9)

در این روابط i نشان دهنده شاخص ذره است، t عدد تکرار فعلی، f تابع هدف است که باید کمینه شود (به حداقل میرسد)، X بردار موقعیت، و N تعداد کل ذرات جمعیت است. معادلات (۸) و (۹)، در هر تکرار فعلی t+۱، سرعت V و موقعیت X هر ذره i را بهروز میکنند. V نشان دهنده بردار سرعت است، ۵ وزن اینرسی است که برای متعادل کردن استخراج محلی و اکتشاف سراسری استفاده می شود، r1 و r2 بردارهای تصادفی هستند که به طور یکنواخت در محدوده ^D[0, 1] توزیع شدهاند. (D ابعاد فضای جستجو است.)، و c1 و c2 که ضرایب شتاب نامیده می شوند، ثابتهای مثبت هستند.

۲–٥– الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری

الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری^۸ (GWO) از الگوریتم های فراابتکاری است که در سال ۲۰۱٤ توسط میرجلیلی و همکاران ارائه شد (Mirjailil et al., 2014). الگوریتم گرگ خاکستری از سلسله مراتب رهبری و ساز و کار شکار گرگهای خاکستری در طبیعت تقلید می نماید. تعداد متوسط گرگهای هر گله بین پنج تا ۱۲ است. در هر گله چهار رتبه اصلی وجود دارد. گرگهای رهبر گروه آلفا (α)، که می تواند مذکر یا مونث باشد این گرگها برگله مسلط هستند. گرگهای بتا (β) به گرگهای آلفا در فرآیند تصمیم گیری کمک نموده و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آنها هستند. گرگهای داتا (δ) پایین تر از گرگهای بتا و شامل گرگهای پیر، شکارچیها و گرگهای مراقبت کننده از نوزادان هستند و گرگهای امگا (ω) پایین ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب هستند که کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند. یکی دیگر از رفتارهای میشود، در مرحله دوم تلاش برای محاصره و خسته کردن طعمه تا زمانی که حرکت آن متوقف شود، مدنظر است و در می شود، در مرحله دوم تلاش برای محاصره و خسته کردن طعمه تا زمانی که حرکت آن متوقف شود، مدنظر است و در می شود.

$$D = |C \times X_P(t) - X(t)|$$

$$X(t+1) = X_P(t) - A \times D$$
(11)

که در این معادلات t تکرار فعلی الگوریتم، A و C بردارهای ضریب، X_p بردار موقعیت طعمه، D بردار فاصله گرگ فعلی تا \hat{Z} گهای رهبر و X بیانگر بردار موقعیت گرگ خاکستری است. بردارهای A و C از روابط ۱۲ تا ۱۶ محاسبه می شوند: $A = |2 \times a \times r_1 - a(t)|$ $C = 2 \times r_2$ $a(t) = 2 - \frac{(2 \times t)}{Maxter}$

⁸ Grey Wolf Optimizer

ضریب a بهصورت خطی و کاهشی در بازه [0,2] در مراحل تکرار الگوریتم تغییر میکند و r₁ و r₂ نیز بردارهای تصادفی در بازه [0,1] هستند. t تکرار جاری و MaxIter حداکثر تعداد تکرار است. شکار معمولاً توسط گرگ آلفا (α) هدایت میشود، البته احتمال شرکت گرگهای بتا (β) و دلتا (δ) نیز در شکار وجود دارد. در فضای جستجو دانشی در مورد موقعیت شکار یا راهحل بهینه [(xp(t) وجود ندارد. از این رو موقعیت شکار همان موقعیت گرگ آلفا در نظر گرفته میشود. برای شبیه سازی ریاضی رفتار شکار گرگهای خاکستری، فرض میشود که گرگهای ۵، م و ه، دانش بهتری در مورد موقعیت بالقوه شکار دارند. بنابراین، سه مورد اول از بهترین راه حلهای به دست آمده موجود است و عوامل دیگر جستجو (از جمله امگاها) به منظور به روزرسانی موقعیت شان، با توجه به موقعیت بهترین عوامل جستجو، ملزم به پیروی از آنها هستند. روابط ۲۵ تا ۱۷ در این زمینه پیشنهاد شده است:

$$\begin{cases} D_{\alpha} = |C_{1} \times X_{\alpha} - X(t)| \\ D_{\beta} = |C_{2} \times X_{\beta} - X(t)| \\ D_{\delta} = |C_{3} \times X_{\delta} - X(t)| \\ \{X_{1} = |X_{\alpha} - A_{1} \times D_{\alpha}| \\ X_{2} = |X_{\beta} - A_{2} \times D_{\beta}| \\ X_{3} = |X_{\delta} - A_{3} \times D_{\delta}| \\ X(t+1) = \frac{X_{1} + X_{2} + X_{3}}{3} \end{cases}$$
(10)

که C₁، C₁ و C₃ از رابطه ۱۳ محاسبه میشوند. مقادیر A₁، A₂ و A₃ از رابطه ۱۲ و مقادیر D_β، D_α و D_β رو D_β از رابطه ۱۵ تعیین میشوند (Mirjalili et al., 2014).

۲-۲- هیبرید الگوریتمهای PSO و HPSGWO) GWO)

الگوریتم ترکیبی PSO-GWO (PSG-WO) بدون تغییر عملکرد کلی الگوریتمهای PSO و GWO توسعه یافته است. الگوریتم PSO تقریباً در تمام مسائل دنیای واقعی می تواند به نتایج موفقیت آمیزی دست یابد. با این حال، راه حلی برای کاهش احتمال به دام افتادن الگوریتم PSO در بهینه موضعی لازم است. در این روش، از الگوریتم GWO برای پشتیبانی از الگوریتم PSO برای کاهش احتمال به دام افتادن الگوریتم PSO در بهینه موضعی لازم است. در این روش، از الگوریتم GWO برای پشتیبانی از الگوریتم PSO برای پشتیبانی از الگوریتم PSO برای کاهش احتمال به دام افتادن در بهینه موضعی لازم است. در این روش، از الگوریتم GWO برای پشتیبانی از الگوریتم PSO برای کاهش احتمال به دام افتادن در بهینه موضعی استفاده می شود. الگوریتم PSO برای جلوگیری از مینممهای موضعی، برخی از ذرات را به موقعیتهای تصادفی با امکان کمتر هدایت میکند. این جهتها ممکن است خطراتی داشته باشند که باعث دور شدن از بهینه سراسری شود. توانایی بالای اکتشاف الگوریتم GWO برای جلوگیری از این مشکلات با هدایت برخی از ذرات مدن از بهینه سراسری شود. توانایی بالای اکتشاف الگوریتم GWO برای جلوگیری از این مشکلات با هدایت برخی از ذرات مدن از بهینه سراسری شود. توانایی بالای اکتشاف الگوریتم GWO برای جلوگیری از این مشکلات با هدایت برخی از ذرات مدن از بهینه سراسری شود. توانایی بالای اکتشاف الگوریتم GWO برای جلوگیری از این مشکلات با هدایت برخی از ذرات مدن از بهینه سراسری شود. توانایی بالای اکتشاف الگوریتم GWO برای جلوگیری از این مشکلات با هدایت برخی از ذرات معن از ذرات را به موقعیتهای که تا حدی توسط الگوریتم GWO بهبود یافتهاند به جای هدایت آنها به موقعیتهای تصادفی استفاده می شود. زمان طولانی تر برای حل مسأله بهبنه بازی در مقایسه با روشهای GWO و GWO با توجه به موفقیت نتایج را می توان می وران می وران وران می و GWO و GWO و GWO و GWO با توجه به موفقیت نتایج را می توان می می وران مولانی تر برای حل مسأله بهبنه بازی در مقایسه با روش های GWO و GWO و GW با توجه به موفقیت نتایج را می توان قابل تحمل دانست (Guo 2010).

۲-۷- شاخصهای ارزیابی خطا

برای ارزیابی مدل آبشستگی از شاخصهای جذرمیانگین خطا (RMSE)، معیار نش- ساتکلیف^۹ (NSE)، شاخص نسبت مربعات خطا به انحراف معیار استاندارد دادههای اندازهگیری^{۱۰} (RSR)، ضریب همبستگی (CC) و درصد بایاس (PBIAS)

⁹ Nash-Sutcliffe efficiency

¹⁰ RMSE-observations standard deviation ratio

بصورت روابط ۱۸ تا ۲۲ است. در این روابط PBIAS بهینه برابر صفر و مقدار بهینه NSE و CC برابر یک هستند. مقدار RMSE نیز که بر حسب متر است، هرچه به صفر نزدیکتر باشند بهتر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (ds_i^o - ds_i^c)^2}$$
(1A)

NSE = 1 -
$$\frac{\sum_{t=1}^{N} (ds_{i}^{o} - ds_{i}^{c})^{2}}{\sum_{t=1}^{N} (ds_{i}^{o} - \overline{ds_{i}^{o}})^{2}}$$
 (19)

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{ds_i^c}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (ds_i^o - ds_i^c)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (ds_i^o - \overline{ds_i^o})^{2^2}}}$$
(7.)

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^{N} [(ds_{t}^{c} - ds_{t}^{c})(ds_{t}^{o} - ds_{t}^{o})]}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N} (ds_{t}^{c} - \overline{ds_{t}^{o}})^{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (ds_{i}^{o} - \overline{ds_{t}^{o}})^{2}}}$$
(71)

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{N} (ds_{i}^{0} - ds_{i}^{0})}{\sum_{i=1}^{N} ds_{i}^{0}} \times 100$$
(17)

در این روابط ds^o عمق آبشستگی اندازهگیری شده، ds^c عمق آبشستگی محاسباتی، i شمارنده دادهها وN تعداد دادهها، ds^o و و ds^c به ترتیب میانگین عمقهای آبشستگی اندازهگیری شده و محاسبه شده هستند.

۳– نتايج و بحث

مدل ریاضی بهینه سازی مدل آبشستگی با استفاده از الگوریتم HPSGWO حل شد. برای تدوین مدل آبشستگی و رابطه آن ابتدا الگوریتم HPSGWO در متلب کد شد. در مرحله بعد محاسبات مربوط به عمق آبشستگی بصورت یک تابع در نرمافزار متلب تعریف شد. داده های ورودی مدل شامل سه گروه است. گروه اول: داده های اندازه گیری شده عمق آبشستگی، پارامترهای هیدرولیکی جریان، مشخصات پایه پل و مشخصات مواد رسوبی رودخانه است. گروه دوم: پارامترهای تنظیم الگوریتم ها است و گروه سوم: حدود متغیرها و تعداد متغیرها است. در قبل به داده های گروه اول پرداخته شد. داده های گروه دوم و سوم نیز در جدول (۳) ارائه شده است.

برای تعیین رابطه ریاضی عمق آبشستگی با ترکیب ورودیهای مختلف از اعداد بی بعد مؤثر بر عمق آبشستگی مدلهای مختلفی تعریف شد. مقادیر شاخصهای اندازه گیری خطا RSR ،NSE ،CC ،RMSE و PBIAS برای ارزیابی مدلهای مختلف در جدول (٤) ارائه شده است. مقادیر آبشستگی اندازه گیری شده در مقابل آبشستگی محاسباتی برای مدلهای SF₁ تا SF₁₄ در شکل (۲) ترسیم شده است.

نتایج محاسبات برای مدلهای مختلف SF₁₄ تا SF₁ مشخص شد. نتایج در جدول (٤) بیان شده است. بر اساس این نتایج مدل SF₁ با پارامترهای ورودی Fr, D/y و σ , Fr, D/y و مدل SF₁ RSF با پارامترهای ورودی Fr, D/y و σ , SSR ، NSE ، SSR ، SSE ، SSE با پارامترهای اندازه گیری خطا SSR ، SSE ، SSE ، SSE ، SSE و SSR ، SSE ، SSE و SSS هستند. مقادیر شاخصهای اندازه گیری خطا SSR ، SSE ، SSE ، SSE ، SSE و SSS ، SSE و SSS ، SSE ، SSE و SSS ، SSE ، SSE و SSS ، SSE ، SSE و SSS ، SSE ، SSE و SSS ، SSE ، SSS و SSS ، SSE و SSS ، SSE و SSS ، SSE ، SSS و SSS ، SSE و SSS ، SSE > SSS > SSS ، SSE > SSS >

(SF13) نشان میدهد. معادلات مدلهای SF2 و SF13 که ضریب و توانهای آنها با استفاده از الگوریتم HPSGWO تعیین شده است به ترتیب بصورت روابط (۲۳) و (۲٤) هستند:

$$\frac{d_s}{v} = 0.3928 \times (\sigma)^{-0.1482} (Fr)^{0.4721} \left(\frac{D}{v}\right)^{0.4083} \left(\frac{d_{50}}{v}\right)^{-0.0983}$$
(177)

$$\frac{d_{\rm s}}{y} = 0.3626 \times ({\rm Fr})^{0.5139} \left(\frac{\rm D}{\rm y}\right)^{0.3896} \left(\frac{d_{50}}{\rm y}\right)^{-0.051}$$
(Yi)

جدول ۳. پارمترهای تنظیم الگوریتم HPSGWO و مقادیر کمینه و بیشینه متغیرها

Table 3. HPSGWO algorithm setting parameters and minimum and maximum values of variables

مقدار	پارامتر
٥٠	جمعيت اوليه
۱۰۰۰	تعداد تكرار
بصورت خطی و کاهشی در بازه [۲تا۰]	А
۲ و ۲	C ₁ , C ₂
•/٦	W _{min}
٠/٩	W _{max}
٦	تعداد متغيرها
[-1,1]	حدود متغيرها

جدول٤. نتایج مدلهای مختلف آبشستگی Table 4. Results of Different Scour Models

مدل	ورودیهای مدل	RMSE(m)	СС	NSE	RSR	PBIAS (%)
SF ₁	$\sigma, Fr, \frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}, \frac{L}{y}$	0.594	0.6435	0.6241	0.6131	-2.0834
SF_2	$\sigma, Fr, \frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}$	0.527	0.7103	0.7038	0.5443	8.508
SF_3	$\sigma, Fr, \frac{D}{y}, \frac{L}{y}$	0.728	0.5231	0.4343	0.7521	-4.7496
\mathbf{SF}_4	$\sigma, Fr, \frac{d_{50}}{y}, \frac{L}{y}$	0.691	0.5123	0.4911	0.7133	-8.418
SF_5	$\sigma, \frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}, \frac{L}{y}$	0.683	0.5468	0.5027	0.7052	-3.8862
SF_6	$Fr, \frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}, \frac{L}{y}$	0.590	0.6523	0.6284	0.6096	-2.8789
SF_7	$\sigma, Fr, \frac{D}{y}$	0.626	0.6068	0.5822	0.6464	4.3190
SF_8	$\sigma, Fr, \frac{d_{50}}{y}$	0.666	0.5912	0.5266	0.6880	20.6509
SF ₉	$\sigma, Fr, \frac{L}{y}$	0.825	0.3409	0.2748	0.8516	-11.1568
SF_{10}	$\sigma, \frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}$	0.633	0.5831	0.5726	0.6538	11.0561
SF_{11}	$\sigma, \frac{D}{y}, \frac{L}{y}$	0.734	0.5119	0.4256	0.7579	-4.9210
SF_{12}	$Fr, \frac{D}{y}, \frac{L}{y}$	0.727	0.5287	0.4359	0.7510	-5.0064
S F ₁₃	$Fr, \frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}$	0.504	0.7339	0.7291	0.5205	7.7300
SF_{14}	$\frac{D}{y}, \frac{d_{50}}{y}, \frac{L}{y}$	0.688	0.5463	0.4946	0.7109	-5.2023









ادامه شکل ۲. مقادیر آبشستگی اندازه گیری شده در مقابل آبشستگی محاسبهشده در مدل.های SF₁ تا SF₁₄ تا

Fig 2. Measured Scour Values Versus Calculated Scour Values in SF_1 to SF_{14} models



شکل ۳. مقایسه آبشستگی اندازه گیری شده و آبشستگی محاسبه شده برای بهترین مدل

Fig 3. Comparison of Measured Scour and Calculated Scour for the Best Model

برای ارزیابی بیشتر مدل SF₁₃ با استفاده از برخی روشهای تجربی در جدول (۱) محاسبه عمق آبشستگی انجام شد. نتایج محاسبه را با استفاده از شاخصهای اندازه گیری خطا ارزیابی شد. روابط تجربی مختلف و شاخصهای ارزیابی در جداول (۵) و (٦) ارائه شده است. بر اساس شاخصهای اندازه گیری خطا نتایج روش(Sharafi et al., 2016) در مقایسه با روشهای دیگر تجربی مناسب تر است. در پایان مدل برتر روشهای تجربی(Sharafi et al., 2016) با مدل SF₁₃ در جدول (۵) مقایسه شد. مقایسه دو روش برتری مدل SF₁₃ را نشان میدهد.

ندون کا کتابیج روابط تجربی برای محاشبه عمق ابسستگی	أبشستكى	عمق	محاسبه	تجربي براي	روابط	٥. نتايج	جدول
--	---------	-----	--------	------------	-------	----------	------

نام رابطه	رابطه رياضي	RMSE(m)	CC(m)	NSE	RSR	PBIAS (%)
-HEC-18(Mohamed et al., 2005)	$\frac{d_{s}}{y} = 2.1 \left(\frac{D}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$	2.3189	0.4018	-5.04	2.4579	212.7919
(Richardson & Davis, 2001)	$\frac{d_{s}}{y} = 2.2 Fr^{0.43} \left(\frac{D}{y}\right)^{0.65}$	2.465	0.4018	-5.83	2.613	227.69
(Azamathulla et al., 2010)	$\frac{d_s}{y} = f(\sigma, Fr, \frac{d_{50}}{y}, \frac{D}{y}, \frac{L}{y})$	2.862	0.3304	-8.205	3.034	204.55
(Sharafi et al., 2016)	$\frac{d_s}{y} = f(\sigma, Fr, \frac{d_{50}}{y}, \frac{D}{y}, \frac{L}{y})$	0.5074	0.7151	0.7107	0.5378	3.5245

 Table 5. Results of Empirical Relationships for Calculating Scour Depth

جدول۲. شاخصهای ارزیابی خطا برای مدل SF₁₃ و روش (Sharafi et al., 2016)

Table 6. Error Eval	uation Indices	for Model SF ₁₃	Using Sharafi et al.	(2016) Method
---------------------	----------------	----------------------------	----------------------	---------------

مدل			صهای ارزیابی خطا	شاخ	
	RMSE(m)	CC	NSE	RSR	PBIAS (%)
(Sharafi et al., 2016)	0.5074	0.7151	0.7107	0.5378	3.5245

٤- نتيجه گيري

اکثر روابط تجربی محاسبه عمق آبشستگی پایه پل ها بر اساس تعداد کمی از دادههای آزمایشگاهی توسعه داده شده اند. روابط تجربی دارای فرمول بندی ساده هستند و با هزینه محاسبه ای کمی می توان عمق آبشستگی را بر آورد کرد. بنابراین احتمال بر آورد عمق آبشستگی با دقت کم توسط این روابط وجود دارد. در این پژوهش تلاش شد، با استفاده از دادههای وسیع صحرایی رابطه جدیدی برای محاسبه عمق آبشستگی ارائه گردد. برای این منظور جذر میانگین خطا بین مقادیر عمق آبشستگی اندازه گرد. برای این منظور جذر میانگین خطا بین مقادیر عمق آبشستگی اندازه گیری شده و محاسبه ای بعنوان تابع هدف انتخاب شد و از الگوریتم HPSGWO برای کمینه سازی تابع هدف آبشستگی اندازه گیری شده و محاسبه ای بعنوان تابع هدف استخاب شد و از الگوریتم HPSGWO برای کمینه سازی تابع هدف استفاده شد. ضرایب معادله که شکل کلی آن با استفاده از تئوری π باکینگهام و تحلیل ابعادی تعیین شد، با استفاده از الگوریتم HPSGWO برای محاسبه عمق آبشستگی با ستفاده شد. ضرایب معادله که شکل کلی آن با استفاده از تئوری π باکینگهام و تحلیل ابعادی تعیین شد، با استفاده از الگوریتم HPSGWO برای محاسبه عمق آبشستگی با سنهاده شد. ضرایب معادله که شکل کلی آن با استفاده از تئوری π باکینگهام و تحلیل ابعادی تعیین شد، با استفاده از الگوریتم HPSGWO بدست آمد. بر اساس پارامترهای بی بعد مؤثر بر عمق آبشستگی روابط مختلفی برای محاسبه عمق آبشستگی بر اساس داده های وسیع صحرایی بدست آمد. بهترین رابطه بدست آمده با برخی از روش های تجربی محاسبه عمق آبشستگی بر مطاسه داده های در و نتایج با استفاده از شاخصهای اندازه گیری خطا نشان داد که روش محاسبه عمق آبشستگی در این مطالعه مقایسه شد و نتایج با استفاده از شاخصهای اندازه گیری خطا نشان داد که روش محاسبه عمق آبشستگی در این مطالعه تحمین دقیق تری از عمق آبشستگی ارائه می دهد. شاخصهای اندازه داده محروش محاسبه عمق آبشستگی در این مطالع و تقریری برابر m محروی از عمق آبشستگی ارائه می دهد. شاخصهای برای روش تجربی(300 محاسه) به ترتیب برابر با روش تجربی(300 محاسه) می دهد. ماده این نتایج نشان می دهد معادله ارائه شده در این مقاله برای ترتیب برابر با می مرده. محاره، ۵.50 مرحال است. همین شاخصها برای روش تجربی(300 محاصه) مقاله برای ترتیب برابر با می مرحاله می در 3.50 است. است. همین شاخصها برای روش تجربی(300 محاه) می مرا

محاسبه عمق آبشستگی مناسب و نسبت به روشهای تجربی ارائه شده قابل اعتمادتر است. از مهمترین مزایای این تحقیق استفاده از مجوعه دادههای وسیع صحرایی برای محاسبه عمق آبشستگی و استفاده از الگوریتم HPSGWO است. نتایج این پژوهش بهصورت خلاصه در زیر بیان می شود.

- معادله بدست آمده برای بررسی های عمق آبشستگی صحرایی با در نظر گرفتن شاخص های اندازه گیری خطا از معادلات موجود بهتر عمل می کند.
- مؤثر ترین پارامترها بر اساس داده های صحرایی عبار تند از عدد فرود، نسبت عرض پایه به عمق جریان، اندازه متوسط دانه های بستر به عمق جریان و همچنین دانه بندی رسوب به عنوان موثر ترین پارامترها برای فرآیند عمق آبشستگی تشخیص داده شد.
- رابطه عمق آبشستگی با عدد فرود و نسبت عرض پایه به عمق جریان نسبت مستقیم و با شاخص دانهبندی رسوب،
 اندازه متوسط ذرات به عمق آبشستگی نسبت معکوس دارد.

٥- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام میدارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

٦- مراجع

Annandale, G. (1995). Erodibility. *Journal of hydraulic research*, *33*(4), 471-494. https://doi.org/10.1080/00221689509498656

Arneson, L., Zevenbergen, L., Lagasse, P., & Clopper, P. (2012). Evaluating scour at bridges (HEC-18). *Technical Rep. No. FHWA (Federal Highway Administration) HIF-12-003, Washington, DC.*

Arunachalam, K. (1965). Scour around bridge piers. Journal of the Indian Roads Congres .29(2), 189-207.

Azamathulla, H. M., Ghani, A. A., Zakaria, N. A., & Guven, A. (2010). Genetic programming to predict bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, *136*(3), 16. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000133

Bateni, S. M., Borghei, S., & Jeng, D. S. (2007). Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(3), 401-414. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.06.012

Benedict, S. T., & Caldwell, A. W. (2014). A pier-scour database: 2,427 field and laboratory measurements of pier scour. US Geological Survey Data Series, 845. https://doi.org/10.3133/ds845

Boothroyd, R. J., Williams, R. D., Hoey, T. B., Tolentino, P. L., & Yang, X. (2021). National-scale assessment of decadal river migration at critical bridge infrastructure in the Philippines. *Science of the Total Environment*, 768, 144460. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144460

Carnacina, I., Pagliara, S., & Leonardi, N. (2019). Bridge pier scour under pressure flow conditions. *River Research and Applications*, 35(7), 844-854. https://doi.org/10.1002/rra.3451

Dang, N. M., Tran Anh, D., & Dang, T. D. (2021). ANN optimized by PSO and Firefly algorithms for predicting scour depths around bridge piers. *Engineering with Computers*, *37*(1), 293-303. https://doi.org/10.1007/s00366-019-00824-y

Dey, S., Chiew, Y. M., & Kadam, M. S. (2008). Local scour and riprap stability at an abutment in a degrading bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, *134*(10), 1496-1502.

Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Moradi, F., Gharabaghi, B., & Khozani, Z. S. (2018). An integrated framework of extreme learning machines for predicting scour at pile groups in clear water condition. *Coastal Engineering*, *135*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.10.00

Gao, D., Posada, G., & Nordin, C. F. (1993). Pier scour equations used in China. Hydraulic engineering , ASCE, 1031-1036.

Hassan, W. H. (2019). Application of a genetic algorithm for the optimization of a location and inclination angle of a cut-off wall for anisotropic foundations under hydraulic structures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2), 883-895. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0658-9

Jamei, M., & Ahmadianfar, I. (2020). Prediction of scour depth at piers with debris accumulation effects using linear genetic programming. *Marine Georesources & Geotechnology*, *38*(4), 468-479. https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1595793

Johnson, P. A. (1992). Reliability-based pier scour engineering. *Journal of Hydraulic engineering*, *118*(10), 1344-1358. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:10(1344)

Karkheiran, S., Kabiri-Samani, A., Zekri, M., & Azamathulla, H. M. (2021). Scour at bridge piers in uniform and armored beds under steady and unsteady flow conditions using ANN-APSO and ANN-GA algorithms. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(sup1), 220-228. https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1617796

Keshavarzi, A., Melville, B., & Ball, J. (2014). Three-dimensional analysis of coherent turbulent flow structure around a single circular bridge pier. *Environmental Fluid Mechanics*, 14(4), 821-847. https://doi.org/10.1007/s10652-013-9332-1

Kult, J., Choi, W., & Choi, J. (2014). Sensitivity of the Snowmelt Runoff Model to snow covered area and temperature inputs. *Applied Geography*, 55, 38-3. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.011

Laursen, E. M., & Toch, A. (1956). Scour around bridge piers and abutments (Vol. 4). Iowa Highway Research Board Ames, IA.

Link, O., García, M., Pizarro, A., Alcayaga, H., & Palma, S. (2020). Local scour and sediment deposition at bridge piers during floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, *146*(3), 04020003. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001696

Maddison, B. (2012). Scour failure of bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering*, 165(1), 39-52. https://doi.org/10.1680/feng.2012.165.1.39

Majedi Asl, M., & Valizadeh, S. (2019). Application of SVM Algorithm in Predicting Vertical Pier Scour Depth [Research]. *Journal of Water and Soil Science*, 23(4), 165-181. https://doi.org/10.47176/jwss.23.4.37872

Melville, B., & Sutherland, A. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210)

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007

Mohamed, T. A., Noor, M., Ghazali, A. H., & Huat, B. (2005). Validation of some bridge pier scour formulae using field and laboratory data. *American Journal of Environmental Sciences*, 1(2), 119-125. https://doi.org/10.3844/ajessp.2005.119.125

Mohammadpour, R. (2017). Prediction of local scour around complex piers using GEP and M5-Tree. *Arabian Journal of Geosciences*, *10*(18), 1-11. https://doi.org/10.1007/s12517-017-3203-x

Moreno, M., Maia, R., Couto, L., & Cardoso, A. H. (2017). Subtraction approach to experimentally assess the contribution of the complex pier components to the local scour depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, *143*(4), 06016030

Najafzadeh, M., Barani, G-.A., & Hessami-Kermani, M.-R. (2015). Evaluation of GMDH networks for prediction of local scour depth at bridge abutments in coarse sediments with thinly armored beds. *Ocean Engineering*, 104, 387-396. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.016

Qaderi, K., Javadi, F., Madadi, M. R., & Ahmadi, M. M. (2021). A comparative study of solo and hybrid data driven models for predicting bridge pier scour depth. *Marine Georesources & Geotechnology*, *39*(5), 589-599. https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1735589

Rady, R. A. E.-H. (2020). Prediction of local scour around bridge piers: artificial-intelligence-based modeling versus conventional regression methods. *Applied Water Science*, *10*(2), 1-11. https://doi.org/10.1007/s13201-020-1140-4

Rezazadeh, r., barani, g., & naseri, a. (2019). Application of Artificial Neural Networks in Estimation of Scour Depth around the Bridge Pier with Sticky Sediments. *Journal of Hydraulics*, 14(1), 141-149. https://doi.org/10.30482/jhyd.2019.139956.1307

Riahi-Madvar, H., Dehghani, M., Seifi, A., Salwana, E., Shamshirband, S., Mosavi, A., & Chau, K.w. (2019).

Comparative analysis of soft computing techniques RBF, MLP, and ANFIS with MLR and MNLR for predicting grade-control scour hole geometry. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 529-550. https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1618396

Richardson, E., & Davis, S. (2001). Evaluating scour at bridges: Hydraulic engineering circular No. 18. *Rep. FHwA NHI*, 01-001.

Şenel, F. A., Gökçe, F., Yüksel, A. S., & Yiğit, T. (2019). A novel hybrid PSO–GWO algorithm for optimization problems. *Engineering with Computers*, 35(4), 1359-1373. https://doi.org/10.1007/s00366-018-0668-5

Sharafi, H., Ebtehaj, I., Bonakdari, H., & Zaji, A. H. (2016). Design of a support vector machine with different kernel functions to predict scour depth around bridge piers. *Natural Hazards*, 84, 2145-2162. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2540-5

Sheppard, D., Melville, B., & Demir, H. (2014). Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000800

Sheppard, D., & Renna, R. (2005). Bridge scour manual. florida department of transportation. 605 Suwannee Street. *Tallahassee. Florida*.

Sheppard, D., & Renna, R. (2010). Bridge scour manual .605 Suwannee Street. Tallahassee, FL, 32399-30450.

Wardhana, K., & Hadipriono, F. C. (2003). Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of performance of constructed facilities*, *17*(3), 144-150. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:3(144)

Yorozuya, A., & Ettema, R. (2015). Three abutment scour conditions at bridge waterways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(12), 04015028. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001053

Zahiri, J., & Kashefipour, S. M. (2018). Predicting maximum scour depth around bridge abutment using M5 model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), 1-16. https://doi.org/10.22055/jise.2018.13543