



Numerical simulation of scouring downstream of horizontal apron

Ali Babeli¹ , Ali Arman^{2✉} , Elham Darvishi³

¹ M. Sc Student of Water structures, Department of Water and Science Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: ali.babeli@yahoo.com

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: a.arman@razi.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: e.darvishi@razi.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Scouring occurs when the shear stress of the flow in the river is greater than the critical shear stress of the materials forming the bed. One of the kinds of scouring is the scouring of the bottom of the horizontal apron. The horizontal apron is one of the in-river structures, which is used downstream of stilling basin and as a bed for in-river structures. One of the most important problems of using aprons is their downstream scouring. Because the stream flows after passing through the aprons erodes the alluvial bed of the river and causes the erosion to intensify after that. Therefore, before using this protective structure, an accurate estimate of the erosion rate should be obtained.

Methodology

In this research, the numerical simulation downstream of the horizontal apron using the Flow3D model, for three Manning's roughness coefficients of 0.025, 0.02 and 0.014, five Froude numbers were 0.32, 0.3, 0.25, 0.2, and 0.15 and also for a particle diameter of 1.8 mm, a total of 15 currents tests were simulated. After comparing the data of this research with the laboratory data of Valizadeh et al. (1401), the validation of the model done accepted according to numerous implementations, finally Nelson's sediment transport model with the k- ϵ turbulence model had the most accuracy with the laboratory results.

Results and discussion

According to the results of the numerical model, it was observed that in all the scenarios related to the roughness coefficients, with the increase of the roughness coefficient of the apron, the amount of the maximum amount of scouring decreases. The reason for this is the increase in resistance to the flow in the aprons area, which reduces the scouring rate in the downstream. Also, with the increase of Froude number, the starting point of the scour hole has become closer to the bottom of the apron, and with the decrease of the Froude number, the scour hole has occurred in a place further away from the bottom of the apron. The reason for this is related to the strength of the flow in higher Froude numbers. In addition, with the increase in velocity, the amount of shear stress has decreased. According to Manning's equation, velocity decreases with increasing depth; As a result, it increases the shear stress in the scouring area. It was also demonstrated that the shear stress decreases with the increase of Froude number and decrease of bed depth.

Conclusions

The results showed that with the increase of the roughness factor of the horizontal apron, the amount of the maximum scour hole decreases. Also, with the increase of Froude number, the starting place of the scour pit has become closer to the bottom of the horizontal apron, and with the decrease of the Froude number, the scour hole has occurred in a place further away from the bottom of the apron.

Also, the results show that the rate of erosion increases with the increase in velocity along the apron. According to Manning's equation, velocity increases with decreasing depth; As a result, it increases the erosion along the horizontal apron. It was also observed that with the decrease of Froude number and increase of bed depth, erosion decreases and subsequently sedimentation increases.

Keywords: Manning's roughness coefficient, shear stress, horizontal apron, Flow 3D, bed depth, sediment load

Article Type: Research Article

Article history: Received: 22 November 2022 Revised: 05 January 2023 Accepted: 15 January 2023 ePublished: 28 February 2023

Cite this article: Babeli, A., Arman, A., Darvishi, E. (2023). Numerical simulation of scouring downstream of horizontal apron, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(4), 35 -49. DOI: 10.22126/ATWE.2023.8834.1038

Publisher: Razi University

© The Author(s).





شبیه‌سازی آبشستگی پایین دست کف‌بند افقی با استفاده از مدل عددی

علی بابلی^۱، علی آرمان^۲، الهام درویشی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: ali.babeli@yahoo.com
^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: a.arman@razi.ac.ir
^۳ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: e.darvishi@razi.ac.ir

چکیده

یکی از مهمترین عوامل آسیب و تخریب سازه‌های هیدرولیکی، وقوع آبشستگی موضعی است. در بررسی و مطالعه سازه‌های هیدرولیکی درون رودخانه‌ای، تعیین میزان فرسایش و رسوب گذاری امری ضروری است. تعیین مقدار فرسایش و یا رسوبگذاری در زمانی که یک سازه هیدرولیکی اجرا شده است، می‌تواند از تخریب سازه و تغییر ژئومورفولوژی رودخانه ممانعت بعمل آورد و باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی شود. در این تحقیق کارایی مدل عددی Flow 3D به منظور شبیه‌سازی آبشستگی پایین دست کف بند افقی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج صحت سنجی این مدل عددی با مدل آزمایشگاهی ولی زاده و همکاران نشان‌دهنده قابلیت مدل مذکور در شبیه سازی پدیده مورد نظر بود. با توجه به ماهیت بستر و کارایی کف‌بند افقی، از سناریوهای مختلف شبیه سازی استفاده شد که این سناریوها شامل پنج عدد فرود، سه ضریب زبری مانینگ و یک قطر ذره به میزان ۱٫۸ میلی‌متر برای پایین دست کف بند افقی می باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که با افزایش ضریب زبری، سرعت جریان گذرنده و آبشستگی پایین دست نیز کاهش یافته است. علاوه بر این، نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش ضریب زبری، رسوب گذاری و تنش برشی افزایش یافته است. با توجه به تاثیر پذیری پدیده آبشستگی و رسوبگذاری نسبت به عدد فرود، نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود نیز آبشستگی افزایش یافت.

واژگان کلیدی: ضریب زبری مانینگ، تنش برشی، کف‌بند افقی، نرم افزار Flow 3D، آبشستگی، رسوبگذاری

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱ آذر ۱۴۰۴ اصلاح: ۱۵ دی ۱۴۰۱ پذیرش: ۲۵ دی ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۹ اسفند ۱۴۰۱

استناد: بابلی، ع، آرمان، ع، و درویشی، ا. (۱۴۰۱). شبیه‌سازی آبشستگی پایین دست کف‌بند افقی با استفاده از مدل عددی، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۲(۴)، ۳۵-۴۹. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.8834.1038



مقدمه

آبشستگی زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی جریان عبوری در رودخانه از تنش برشی بحرانی مصالح تشکیل دهنده بستر بیشتر باشد. یکی از انواع آبشستگی، آبشستگی پایین دست کف‌بند افقی می‌باشد. کف‌بند افقی ممکن است به عنوان بخشی از یک طرح نگهداری تراز آب یا کنترل تراز بستر در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. کف‌بند افقی در عرض رودخانه معمولاً به گونه‌ای ساخته می‌شود که تراز تاج آن با تراز بستر تقریباً یکسان یا بالاتر و کف بستر در بالادست و پایین دست سازه تقریباً برابر باشد. این سازه ممکن است از مصالح سنگی، شمع کوبی یا سپری، بتنی، گابیون یا توری سنگی و یا به صورت ترکیبی از آنها ساخته شود.

کف بند افقی یکی از سازه‌های درون رودخانه‌ای می‌باشد که در پایین دست حوضچه‌های آرامش و بعنوان بستر سازه‌های درون رودخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهمترین معضلات استفاده از کف بندها، آبشستگی پایین دست آنها می‌باشد. زیرا جریان رودخانه پس از گذر از کف بند، بستر آبرفتی رودخانه را دچار فرسایش می‌نماید و باعث تشدید فرسایش پس از آن می‌گردد. بنابراین قبل از استفاده از این سازه حفاظتی، لازم است تخمین دقیقی از میزان فرسایش پس از آن حاصل گردد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

حمیدی‌فر و امید (۱۳۸۹)، اثر نوع رس بر آبشستگی رسوبات چسبنده در پایین دست دریچه کشویی را با استفاده از دو نوع رس با اندازه‌های ۰/۷۳ و ۱/۸۵ میلیمتر در پایین دست کف‌بند بررسی نمودند. نتایج آزمایشهای این تحقیق نشان داد که به ازای میزان رس ثابت، حداکثر عمق آبشستگی در رسوبات با اندازه کوچکتر بیشتر است اما در مقادیر زیاد رس، چون ذرات رس کنترل رفتار فرسایشی خاک را در اختیار می‌گیرند، گسترش گودال در ذرات ریزدانه کمتر شده است.

کوچک و شفاعی بجستان (۱۳۹۱) با تحقیق بر روی چهار مدل کف بند، ضریب زبری و اعداد فرود متفاوت، آزمایشهایی را انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش ارتفاع زبری و همچنین افزایش قطر ذرات بستر می‌توان طول آبشستگی را در پنجه کف بند را کاهش داد. شهرکی و همکاران (۱۳۹۲) تاثیر آبشستگی و حمل رسوب بر اثر جت افقی از زیر دریچه را با استفاده از مدل آزمایشگاهی به انجام رساندند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش طول کف می‌توان میزان آبشستگی در پایین دست کف بند افقی را کاهش داد. قادری و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG در شرایط زیر بحرانی، شبیه سازی بر روی شیب شکن های قائم انجام دادند و مقایسه بین حالت تنگ شدگی و نرمال صورت را انجام دادند. در این مطالعه روابط عمق نسبی آب پایاب، عمق نسبی آب حوضچه در پایین شیب شکن و میزان انرژی نرمال با ضرایب همبستگی مورد قبول ارائه شد و میزان همبستگی روابط ارائه شده با مدل عددی مقایسه گردید.

فروهودی و اسمیت^۲ (۱۹۸۵)، در آزمایش‌های خود تشابه هندسی موجود در پروفیل‌های آبشستگی پایین دست پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند و نمودارهای بی‌بعدی برای تعیین پروفیل حفره آبشستگی در سه سطح عمق پایاب زیاد، متوسط و کم ارائه دادند.

لیم و یو^۳ (۲۰۰۲)، پدیده‌ی آبشستگی پس از یک دریچه کشویی در پایین دست کف‌بند را مورد بررسی قرار دادند. آنها با انجام چندین آزمایش و نیز جمع‌آوری یافته‌های محققین پیشین، یک معادله تجربی برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی در حالت تعادلی در حضور کف‌بند ارائه نمودند.

¹ Horizontal Apron

² Farhoudi & Smith

³ Lim & Yu

درگاهی^۱ (۲۰۰۳)، به بررسی توسعه حفره آبستتگی در انتهای کفبند واقع در پایین‌دست یک سرریز پرداخت. وی هیچگونه تشابهی بین پروفیل‌های حفره آبستتگی، آنگونه که در گزارشات محققین پیشین از قبیل فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) آمده بود، مشاهده نکرد. همچنین نتایج آزمایش‌های وی، نشان‌دهنده عدم تقارن در عرض حفره آبستتگی بود.

ادیوس و اسکورتینو^۲ (۲۰۰۶)، به مطالعه عددی و آزمایشگاهی آبستتگی ناشی از جت متلاطم افقی پرداختند. اندازه‌گیری سرعت توسط آنها نشان داد که ساختار جریان بر روی کفبند، مشابه توزیع سرعت یک جت دیواره‌ای است. در حالیکه بلافاصله بعد از کفبند توزیع سرعت به جت آزاد تغییر می‌یابد. همچنین با افزایش دبی جریان، انطباق بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی افزایش می‌یافت، زیرا در دبی‌های بالا، پروفیل آبستتگی به وضعیت دو-بعدی نزدیکتر می‌شد.

قادری و همکاران (۲۰۲۰) به شبیه‌سازی عددی پرش‌های هیدرولیکی آزاد و مستغرق بر روی حالت‌های مختلف ضریب زبری و شرایط گوناگون عدد فرود پرداختند. مدل‌ها با استفاده از سه شکل زبری اجرا گردیدند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل عددی به خوبی قادر به شبیه‌سازی ویژگی‌های پرش آزاد و مستغرق است.

کامکیوم و ایسپایر^۳ (۲۰۲۲) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و عددی نسبت‌های اتلاف انرژی بلوک‌های ساخته شده در حوضچه آرامش نوع III با اشکال هندسی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین این مطالعات را در برنامه نرم افزاری Flow 3D مورد بررسی قرار دادند و نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی را با هم مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاصل از اجرای مدل عددی نشان داد که حدود ۵ درصد خطا با نتایج مدل آزمایشگاهی وجود دارد.

باتوجه به توضیحات فوق و اهمیت مطالعه آبستتگی پایین دست کف بند افقی، در این تحقیق به شبیه‌سازی آبستتگی پایین دست این سازه تحت سناریوهای مختلف پرداخته شده است.

روش پژوهش

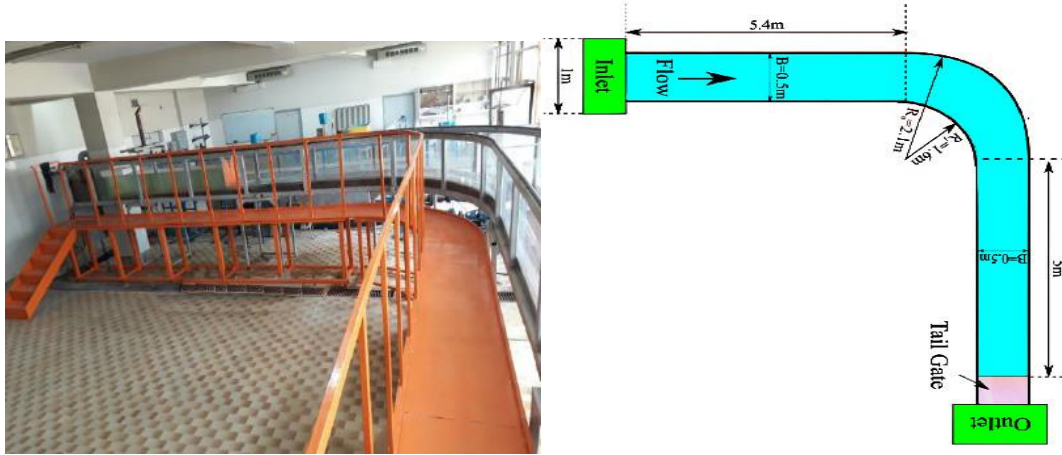
در پروژه‌های مهندسی رودخانه چنانچه هندسه مجرای جریان پیچیده نباشد، می‌توان از مدل‌های عددی بهره برد. مدل‌های فیزیکی در مقایسه با مدل‌های عددی دارای دقت بیشتری هستند اما بدلیل خطاهای ناشی از اثر مقیاس، هزینه ساخت و زمان انجام آزمایشها، معمولاً مورد توجه مهندسين هیدرولیک نمی‌باشند و در هندسه‌های ساده مجرا می‌توان از مدل‌های عددی بهره برد. در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی در پایین دست کفبند افقی با استفاده از مدل Flow3D، با ازای سه ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲۵، ۰/۰۲ و ۰/۰۱۴، پنج عدد فرود به مقادیر ۰/۳، ۰/۲۵، ۰/۲ و ۰/۱۵ و همچنین به ازای یک قطر ذره ۱/۸ میلی‌متر، مجموعاً ۱۵ آزمون جریان شبیه‌سازی شد که بعد از تطبیق داده‌های این پژوهش با داده‌های آزمایشگاهی ولی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) صحت سنجی مدل انجام پذیرفت.

مدل آزمایشگاهی که صحت سنجی سناریوهای این تحقیق بر آن بنا شده است، شامل یک کانال قوسی شکل در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه رازی می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این فلوم قوسی شکل طول بازه بالادست ۵/۴ متر، طول بازه پایین دست ۴/۵ متر، شعاع داخلی ۱/۶ متر، شعاع خارجی ۲/۱ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و پهنای کف ۰/۵ متری باشد. صحت سنجی مدل عددی به کمک داده‌های شبیه‌سازی آزمایشگاهی صورت گرفته در ناحیه مستقیم بالادست انجام پذیرفت.

¹ Dargahi

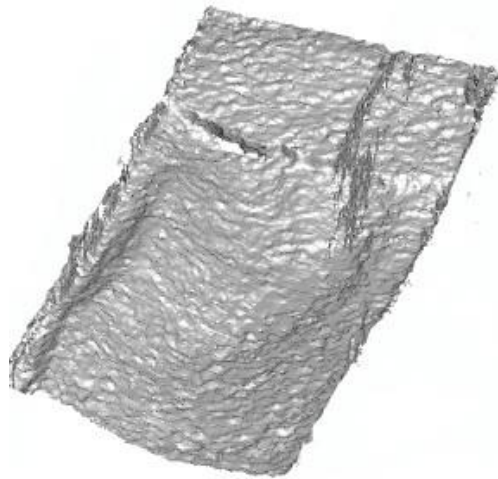
² Adduce & Sciortino

³ Kumcu & Ispir



شکل ۱. نمایی از فلوم آزمایشگاهی

به‌منظور برداشت پروفیل‌های آبستگي و رسوب‌گذاري از دستگاه اسکنر سه‌بعدي استفاده شد. اين اسکنر سه‌بعدي شامل یک دوربین Kinect ، کابل‌های رابط دوربین به PC و همچنین برنامه‌های مخصوص برای پردازش تصویر می‌باشد. این دوربین با دقت یک میلی‌متر می‌تواند توپوگرافی و جسم سه‌بعدي را اسکن نماید. شکل ۲ نمایانگر آبستگي برداشت شده جهت صحت سنجی مدل عددي با استفاده از دوربین Kinect است.



شکل ۲. آبستگي برداشت شده جهت صحت سنجی مدل عددي

برای محاسبه فرسایش و رسوب گذاری در پنجه کف بندهای افقی در رودخانه‌ها و همچنین تعیین الگوی مقاومت جریان از روابط مانینگ (n)، شزی (c) و دارسی ویسباخ (f) استفاده می شود و در مسائل حاکم بر رژیم جریان در رودخانه‌ها و در تمامی مدل‌های ریاضی که برای اجرای شبیه‌سازی جریان مانند سرعت، عمق، تنش برشی و... کاربرد فراوانی دارند.

این روابط پیوستگی بین سرعت متوسط (V) مقاومت جریان هیدرولیکی و هندسی رودخانه‌ها را بیان می‌کنند (ین؛ ۲۰۰۲).

$$V=C\sqrt{R_s f} \quad (۱) \text{ شزی}$$

$$V=\frac{K}{n}R^{\frac{2}{3}}S_f^{1/2} \quad (۲) \text{ مانینگ}$$

$$V=\sqrt{\frac{8g}{f}}\sqrt{R_s f} \quad (۳) \text{ دارسی-ویسباخ}$$

C: ضریب شزی، n: ضریب مانینگ و f: ضریب دارسی-ویسباخ، g: شتاب ثقل، K: ضریبی که مقدار آن در سیستم انگلیسی ۱/۴۸۶ و در سیستم SI برابر ۱ است، S_f: شیب خط انرژی، R: شعاع هیدرولیکی و V: سرعت متوسط جریان می‌باشد. در این تحقیق از رابطه مانینگ جهت شبیه سازی استفاده شده است.

معرفی نرم‌افزار Flow 3D

دینامیک سیالات محاسباتی یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتم‌های عددی، مسائل مشتعل بر شاخه‌های سیالاتی را تجزیه و تحلیل می‌کند. این شاخه از مکانیک سیالات، مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی متصل می‌کند. روابط حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج در وضعیت آشفته، رابطه پیوستگی (بقای جرم) و رابطه مومنتم (حرکت) توسط ناویر استوکس متوسط گیری شده و رینولدز (RANS) نام‌گذاری شده است.

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۴)$$

معادله مومنتم

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (۵)$$

در روابط فوق:

P : فشار کل، u_i : پارامتر سرعت در جهت x_i ، g_i : شتاب ثقل در جهت x_i ، ρ : چگالی سیال، τ_{ij} : تنش برشی جریان آشفته که در معادله ۶ ارائه می‌گردد:

$$\tau_{ij} = \rho(v - v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho(k + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (۶)$$

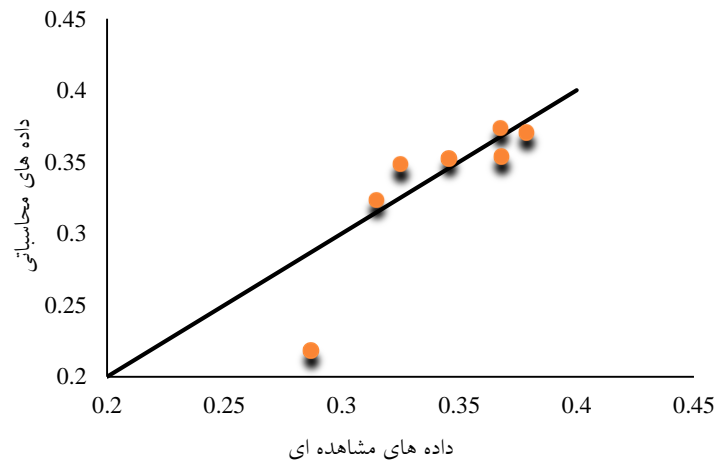
در حالتی که جریان آشفته باشد، تنش برشی در دو مرحله بیان می‌شود یک تنش برشی متأثر از پارامتر متوسط جریان. دوم تنش برشی ناشی از پارامتر نوسانی سرعت که در طول مسیر حرکت سیال ایجاد می‌شود به تنش‌های رینولدزی معروف بوده و در معادله ۷ بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (۷)$$

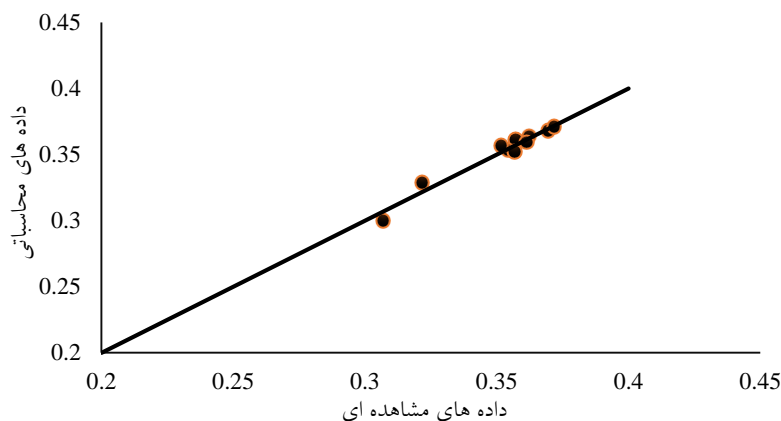
v_t : لزوجت گردابه‌ای است که تابع خصوصیت جریان و آشفتگی سیال می‌باشد و مقدار آن از یک سیال نسبت به سیال دیگر و در نقاط مختلف مسیر جریان باهم متفاوت می‌باشد. δ_{ij} : برای بیان لزوجت گردابه‌ای کاربرد دارد. k : انرژی جنبشی تلاطم در واحد جرم نامیده می‌شود و در معادله ۸ ارائه گردیده است:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad \text{و} \quad \begin{cases} \delta_{ij} = 0 & i \neq j \\ \delta_{ij} = 1 & i = j \end{cases} \quad (۸)$$

در پژوهش حاضر مدل عددی بر اساس روش‌های انتقال رسوب میر پیتر - مولر، نلسون و وان راین و مدل‌های آشفتگی RNG و $k-\epsilon$ اجرا شد. باتوجه به اجراهای متعدد با سه معادله انتقال رسوب یاد شده، در نهایت مدل انتقال رسوب نلسون با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ بیشترین دقت را با نتایج آزمایشگاهی دارا بود. در اشکال ۳ و ۴ نتایج حاصل از مقایسه میزان حداکثر گودال آبشستگی در شرایط آزمایشگاهی و معادله انتقال رسوب نلسون با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و $k-\epsilon$ ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه نتایج حاصل از مدل رسوبی آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفتگی RNG



شکل ۴. مقایسه نتایج حاصل از مدل رسوبی آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفستگی k-ε

به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های آشفستگی RNG و k-ε، از پارامترهای آماری ریشه مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق متوسط (MAE) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\tau_0) - (\tau_i)]^2} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|\tau_0 - \tau_i|)}{n} \quad (10)$$

جدول ۱ مقایسه نتایج حاصل از مدل های آشفستگی را نشان می دهد.

جدول ۱. مقایسه مدل‌های آشفستگی

مدل	RMSE	MAE	مدت زمان شبیه سازی (ساعت)
k-ε	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵۵	۲۷
RNG	۰/۰۶	۰/۰۱۱	۳۲

به منظور یافتن مش بهینه در این شبیه‌سازی از سه سایز ۶، ۴ و ۲ سانتیمتر استفاده شده است که مش ۴ سانتیمتری دارای نتایج بهتری بود. در کلیه شبیه سازی ها، زمان شبیه‌سازی ۲۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج مدل ریاضی با مدل آزمایشگاهی نشان داد که این شبیه سازی عددی قابلیت تطبیق مناسبی برای پیش‌بینی مدل دو بعدی جریان و فرسایش کفبند افقی دارد. در جدول ۲، مقایسه نتایج سه سایز مش ۲، ۴ و ۶ سانتی متری ارائه شده است.

¹ Root Mean Square Error

² Mean Absolute Error

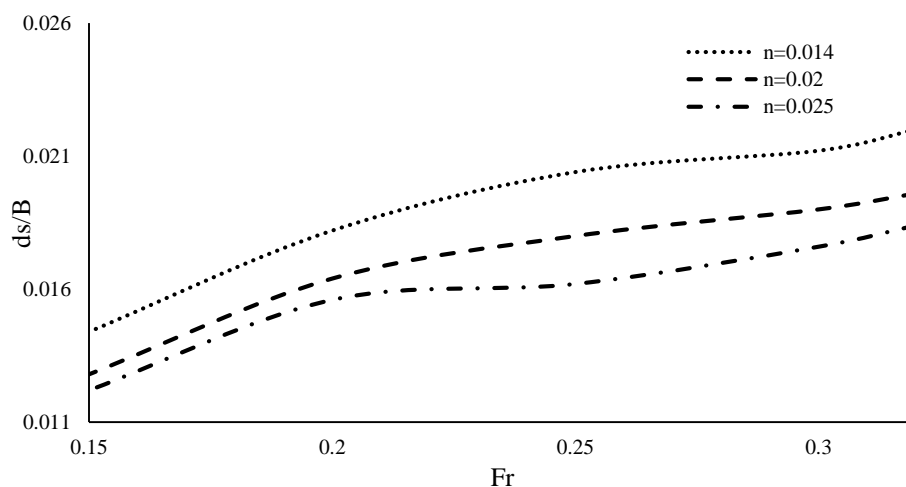
جدول ۲. مقایسه شبکه مش بندی

مدت زمان شبیه سازی (ساعت)	MAE	RMSE	سایز مش (سانتی متر)
۷۶	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۵	۲
۲۷	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۷	۴
۶	۰/۰۱۱	۰/۰۶	۶

همانگونه که از جدول ۲ مشخص است، چنانچه ابعاد میدان جریان کوچکتر از ۴ سانتی متر گردد، عملاً تاثیر زیادی بر روی نتایج حاصل شده ندارد و مدت زمان شبیه سازی بیشتر می گردد. بنابراین در این تحقیق در کلیه شبیه سازی ها ابعاد مش ها ۴ سانتی متر در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

شکل ۵ بیانگر نمودار تغییرات عمق آبشستگی نسبت به عدد فرود در ضرایب زبری متفاوت کف بند افقی به ازای قطر ذره ۱/۸ میلی متر می باشد.

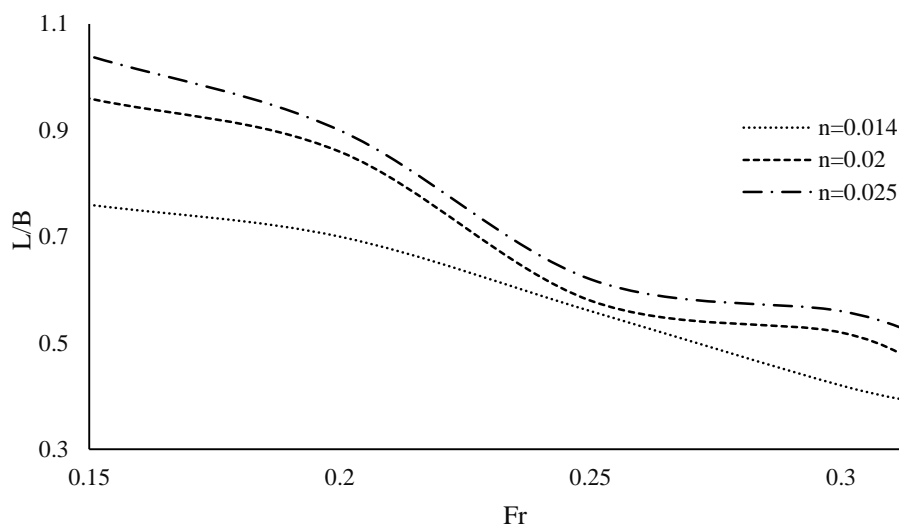


شکل ۵. نمودار تغییرات نسبت عمق آبشستگی به عرض کانال در برابر عدد فرود در ضرایب زبری متفاوت کف بند افقی

باتوجه به نمودار فوق مشاهده می شود که در تمامی سناریوهای مربوط به ضرایب زبری، با افزایش ضریب زبری کف بند، میزان حداکثر مقدار آبشستگی کاهش می یابد. علت این امر، افزایش مقاومت در برابر جریان در محدوده کف بند می باشد که باعث می شود در پایین دست میزان آبشستگی کاهش یابد. در عدد فرود ۰/۳۲، میزان نسبت عمق آبشستگی به عرض کف کانال در ضرایب زبری ۰/۰۱۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵ به ترتیب برابر ۰/۰۲۲، ۰/۰۱۹۶ و ۰/۰۱۸۴ می باشد. به بیان دیگر افزایش ضریب زبری کف بند از ۰/۰۱۴ به ۰/۰۲۵ باعث می شود که میزان نسبت عمق آبشستگی به عرض کف کانال ۱۷ درصد کاهش یابد.

با توجه به اینکه با تغییر عدد فرود انتظار می رود محل حفره آبشستگی تغییر کند، در ادامه به بررسی تاثیر عدد فرود بر حفره آبشستگی در سناریو های مختلف شبیه سازی پرداخته شده است.

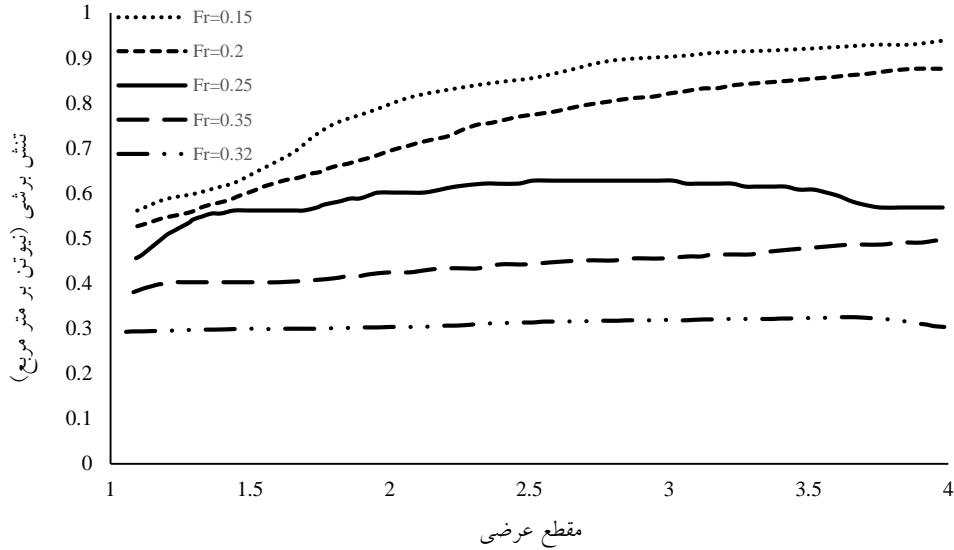
شکل ۶ بیانگر تاثیر عدد فرود بر محل حفره آبستگی به ازای ضرایب متفاوت زبری کف بند افقی می باشد.



شکل ۶. تاثیر عدد فرود بر محل حفره آبستگی به ازای ضرایب متفاوت زبری کف بند افقی

همانطور که در نمودار بالا مشاهده می گردد، با افزایش عدد فرود محل شروع گودال آبستگی به کف بند نزدیک تر شده است و با کاهش عدد فرود، گودال آبستگی در محل دورتری از کف بند اتفاق افتاده است. علت این امر به قدرت جریان در اعداد فرود بیشتر مرتبط می باشد. به بیان دیگر در ضریب زبری کف بند معادل ۰/۰۱۴، میزان نسبت طول حداکثر آبستگی به عرض کانال برابر ۰/۷۶ بوده است و در عدد فرود ۰/۳۲ این میزان به ۰/۴۲ رسیده است. به بیان دیگر با افزایش عدد فرود، میزان نزدیک شدن گودال آبستگی به کف بند افقی ۵۵ درصد اولیه می باشد. این میزان نزدیک شدن حفره آبستگی در ضرایب زبری ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵ به ترتیب برابر ۴۵ درصد و ۴۸ درصد می باشد.

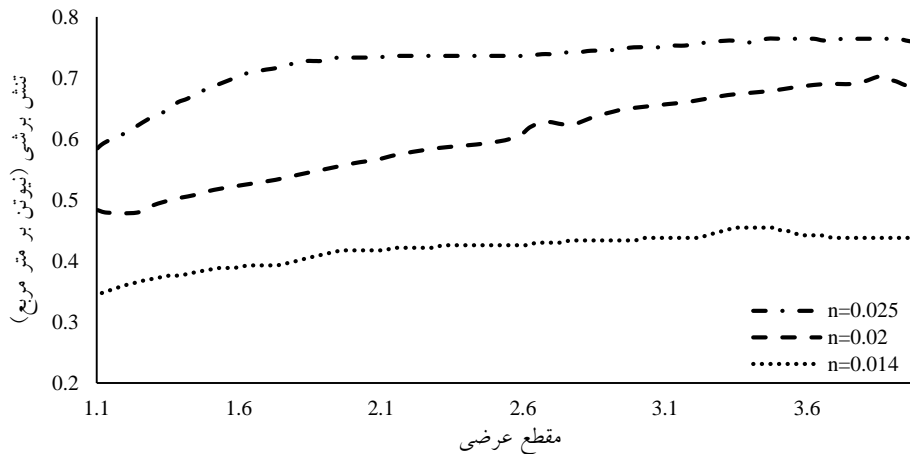
یکی دیگر از پارامترهای حائز اهمیت در آبستگی، تنش برشی می باشد. شکل ۷ بیانگر نمودار تغییرات تنش برشی نسبت به طول کف بند افقی با ضریب زبری ۰/۰۱۴ و اعداد فرود متفاوت به ازای قطر ذره ۱/۸ میلی متر می باشد.



شکل ۷. نمودار تغییرات تنش برشی نسبت به عدد فرود در ضریب زبری یکسان کف بند افقی

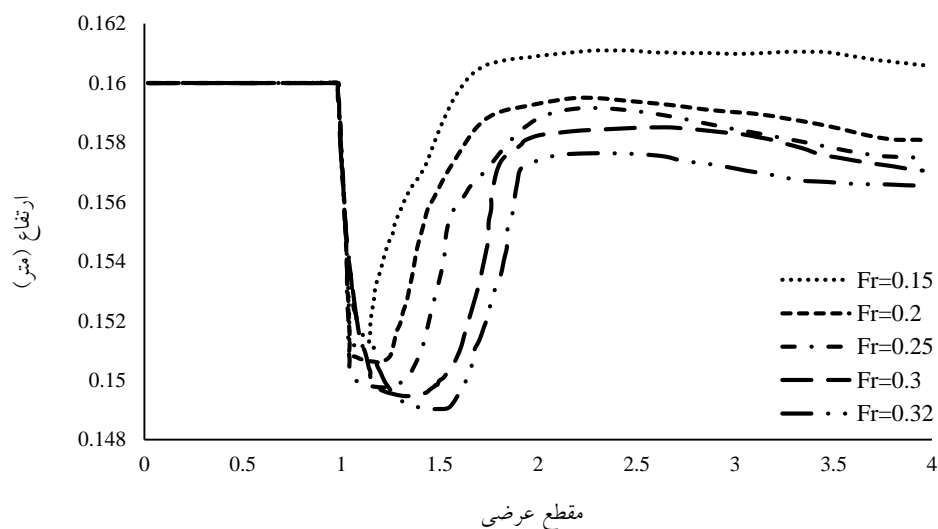
همانطور که در نمودار بالا مشاهده می‌گردد، با افزایش سرعت در طول کف بند، میزان تنش برشی کمتر شده است. با توجه به معادله مانینگ با افزایش عمق سرعت کاهش می‌یابد؛ در نتیجه باعث افزایش تنش در محل آبشستگی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود و کاهش عمق آب، تنش کاهش پیدا می‌کند؛ بطوریکه به ازای ضریب زبری کف بند افقی به میزان 0.14 با افزایش عدد فرود از 0.15 به 0.2 میزان تنش برشی 67 درصد افزایش یافته است. این میزان افزایش به ترتیب برای اعداد فرود 0.2 ، 0.25 ، 0.3 و 0.32 به ترتیب برابر 64 درصد، 22 درصد، 20 درصد و 3 درصد می‌باشد.

شکل ۸ نمودار تغییرات تنش برشی نسبت به طول کف بند افقی با ضرایب زبری متفاوت و عدد فرود 0.3 به ازای قطر ذره $1/8$ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۸. تغییرات تنش برشی نسبت به طول کف بند افقی با ضرایب زبری متفاوت و عدد فرود 0.3

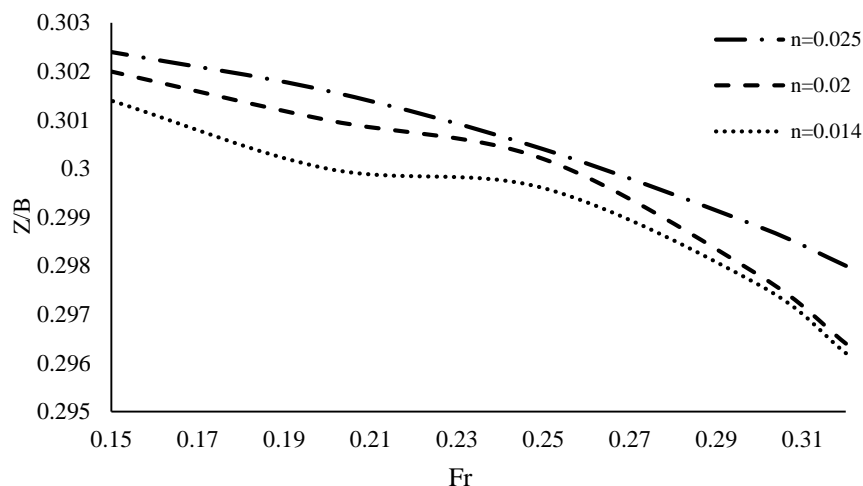
شکل (۹) بیانگر نمودار تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری نسبت به طول کف بند افقی با ضریب زبری ۰/۰۲۵ و اعداد فرود متفاوت به ازای قطر ذره ۱/۸ میلی متر می باشد.



شکل ۹. نمودار تغییرات فرسایش به عدد فرود در ضریب زبری ۰/۰۲۵ کف بند افقی

همانطور که در نمودار بالا مشاهده می گردد، با افزایش سرعت در طول کف بند، میزان فرسایش افزایش پیدا می کند. با توجه به معادله مانینگ با کاهش عمق سرعت افزایش می یابد؛ در نتیجه باعث افزایش فرسایش در طول کف بند می شود. همچنین مشاهده شد که با کاهش عدد فرود و افزایش عمق آب فرسایش کاهش می یابد و متعاقباً رسوب‌گذاری افزایش پیدا می کند بطوریکه به ازای ضریب زبری کف بند افقی به میزان ۰/۰۲۵ با افزایش عدد فرود از ۰/۰۱۵ به ۰/۳۲ میزان فرسایش به میزان ۲۰ درصد افزایش یافته است.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات نسبت ارتفاع آبستگي به عرض کانال در برابر عدد فرود جریان به ازای قطر ذره ۱/۸ میلی متر را نشان می دهد. در این حالت مشاهده می شود با افزایش عدد فرود در تمامی سناریوهای مربوط به ضریب زبری، میزان حداکثر مقدار عمق آبستگي افزایش یافته است. بطوریکه در سناریوی مربوط به ضریب زبری ۰/۰۲۵ به ۰/۰۲ به میزان ۳ درصد و با کاهش ضریب زبری کف بند از ۰/۰۲ به ۰/۰۱۴ به میزان ۲ درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۰. نمودار تاثیر عدد فرود بر عمق آبشستگی در ضرایب زبری متفاوت کف بند افقی

بحث

یکی از مهمترین عوامل آسیب و تخریب سازه‌های هیدرولیکی، وقوع آبشستگی موضعی است. در بررسی و مطالعه سازه‌های هیدرولیکی درون رودخانه‌ای، تعیین میزان فرسایش و رسوب گذاری امری ضروری است. تعیین مقدار فرسایش و یا رسوبگذاری در زمانی که یک سازه هیدرولیکی اجرا شده است، می‌تواند از تخریب سازه و تغییر ژئومورفولوژی رودخانه ممانعت بعمل آورد و باعث کاهش هزینه های اقتصادی شود در این تحقیق از نرم افزار Flow 3D که با مدل آزمایشگاهی ولی زاده و همکاران (۱۴۰۱) صحت سنجی گردیده، استفاده شده است. در این تحقیق ۱۵ آزمون با استفاده از نرم افزار Flow 3D بمنظور تعیین میزان آبشستگی، رسوبگذاری و تنش برشی انجام شد. شبیه سازی های این تحقیق شامل پنج عدد فرود به مقادیر ۰/۳۲، ۰/۳، ۰/۲۵، ۰/۲ و ۰/۱۵ و سه ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲۵، ۰/۰۲ و ۰/۰۱۴ برای یک دانه بندی ۱/۸ میلی‌متر می باشد. پس از صحت سنجی مدل، حاصل شد که مدل انتقال رسوب نلسون به همراه مدل آشفتگی k-ε بیشترین تطابق را با داده های آزمایشگاهی دارد.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که با افزایش ضریب زبری کف بند افقی، میزان حداکثر گودال آبشستگی کاهش می یابد. همچنین با افزایش عدد فرود، محل شروع گودال آبشستگی به کف بند نزدیک تر شده است و با کاهش عدد فرود، گودال آبشستگی در محل دورتری از کف بند اتفاق افتاده است. همچنین نتایج بیانگر این مهم است که با افزایش سرعت در طول کف بند، میزان فرسایش افزایش پیدا می کند. با توجه به معادله مانینگ با کاهش عمق سرعت افزایش می یابد؛ در نتیجه باعث افزایش فرسایش در طول کف بند می شود. همچنین مشاهده شد که با کاهش عدد فرود و افزایش عمق آب فرسایش کاهش می یابد و متعاقباً رسوب گذاری افزایش پیدا می کند.

- حمیدی فر، حسین، و امید، محمد حسین. (۱۳۸۹). بررسی آزمایشگاهی رسوبات غیر چسبیده در پایین دست کف بند. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۱۱(۲)، ۱۷-۲۸. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26454531.1389.11.2.2.3.17-28>
- شهرکی، نیما، فرسادی زاده، داود، و شهرکی، توحید. (۱۳۹۲). بررسی آزمایشگاهی آبستگي ناشی از جت مستغرق در پایین دست کف بند افقی. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان. <https://civilica.com/doc/216870>
- فتح الهی، سیاوش، اسماعیل لو، شیرین، و میرشاهی، دانیال. (۱۳۹۴). مطالعه آزمایشگاهی تاثیر اندازه ذرات رسوبی بر سرعت برشی. اولین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران. <https://sid.ir/paper/869410/fa>
- قادری، امیر، دسینه، مهدی، و عباسی، سعید. (۱۳۹۷). بررسی تاثیر تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با استفاده از مدل عددی. مجله علمی-پژوهشی، زنجان. <https://sid.ir/paper/124243/fa>
- کوچک، پریسا، و شفاعی بجستان، محمود. (۱۳۹۱). بررسی تغییرات طول آبستگي پایین دست کف بند افقی زبر. نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز. <https://civilica.com/doc/186664/>
- ولی زاده، رضوان، آرمان، علی، قبادیان، رسول. (۱۴۰۱). بررسی تاثیر کف بند مایل حفاظت کننده بر میزان آبستگي زیر لوله نیمه مدفون در قوس ۹۰ درجه ملایم. بیست و یکمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز. <https://conf.iha.ir/paper?manu=58378>

References

- Adduce, C., & Sciortino, G. (2006). Scour due to a horizontal turbulent jet: Numrecul and experimental investigation. *J. hydra. Res*, 44(5), 663-673. <https://doi.org/10.1080/00221686.2006.9521715>
- Dargahi, B. (2003). Scour downstream of a spillway. *J. hydra. Res*, 41(4), 417-426. <https://doi.org/10.1080/00221680309499986>
- Farhodi, J., & Smith, K. V. H. (1985). Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *J. Hydraul. Res*, 23(4), 342-358. <https://doi.org/10.1080/00221688509499344>
- Fath Elahi, S., Ismail Lu, sh., & Mirshahi, D. (2014). Laboratory study of the effect of sediment particle size on shear rate. The first national congress of irrigation and drainage of Iran. <https://sid.ir/paper/869410/fa>. [in Persian]
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Aristodemo, F., & Ghahramanzadeh, A. (2020). Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses. *Journal of Hydroinformatics*, 22 (6), 1554–1572. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.298>. [in Persian]
- Hamidifar, H., & Omid, M. H. (2018). Noncohesive Sediment Scour Downstream of an Apron. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11(2), 7-28. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26454531.1389.11.2.2.3>. [in Persian]
- Koochack, P., & Shafa'i Bejestan, M. (2011). Investigation of the changes in scour length downstream of the rough horizontal pavement. The 9th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz. <https://civilica.com/doc/186664/>. [in Persian]
- Kumcu, S. Y., & Ispir, K. (2022). Experimental and numerical modeling of various energy dissipater designs in chute channels. *Journal of Applied Water Science*, 12, 266. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01792-3>
- Lim, S., & Yu, G. (2002). Scouring Downstream of Sluice Gate. First International Conference of Scour Foundation, Texas Transportation Institute, Texas A and M University, Texas, USA, 17-20. <https://core.ac.uk/download/pdf/326240612.pdf>

- Shahraki, N., Farsadizadeh, d., & Shahraki, T. (2012). Laboratory investigation of scouring caused by submerged jet downstream of horizontal weir. 7th National Congress of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, Zahedan. <https://civilica.com/doc/216870>. [in Persian]
- Valizadeh, R., Arman, A., & Ghobadian, R. (1401). Investigation of the effect of the protective inclined floor on the amount of scour under the semi-buried pipe in a mild 90-degree bend. 21st Iranian Hydraulic Conference, Shahid Chamran University of Ahvaz. <https://conf.iha.ir/paper?manu=58378>. [in Persian]
- Yen, B. C. (2002). Open Channel Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 20-39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:1\(20\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(20))