

waterjournal

Experimental Investigation of Gabion Grade Control Structures on Hyporheic Exchanges

Mohammad Mohammad alizade ¹,

Mahdi Meftah halaghi ^{2*},

Amir Ahmad Dehghani ³

, Abdolreza Zahiri ⁴ Khalil Ghorbani ⁵

¹ Phd student Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

² Associate Professor of Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Gorgan, Iran.

³ Associate Professor of Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Gorgan, Iran.

⁴ Associate Professor of Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Gorgan, Iran.

⁵ Associate Professor of Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Gorgan, Iran.



[10.22125/IWE.2023.367734.1683](https://doi.org/10.22125/IWE.2023.367734.1683)

Received:

October 31, 2022

Accepted:

January 14, 2023

Available online:

December 30, 2023

Keywords:

Hyporheic Flow, Gabion Spillway, Interaction Flow Rate, Retention Time, Muse Model.

Abstract

The hyporheic zone is a region immediately beneath the riverbed where surface and subsurface water mix. This zone plays a crucial role in the river's ecology by facilitating the self-purification of the river's flow. Consequently, this research seeks to identify methods to increase the sedimentation rate in sedimentation basins, as sediments flowing into irrigation channels cause numerous issues. To this end, this study aims to (i) examine the effect of creating submerged walls on the efficiency of sediment trapping compared to a simple sediment basin, (ii) evaluate the influence of variation in wall height on sediment trapping efficiency, and (iii) study the effect of the number of walls on sediment trapping efficiency. The effect of the gabion stabilizer on the river's hyporheic flow was investigated using several tests on a laboratory flow. The laboratory flow's length, width, and height were 5 m, 30 cm, and 0.5 m, respectively. The experiments were performed at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources on a one-, two-, and three-step gabion spillway. Notably, three distinct basin lengths were used in the 3-step case test. To this end, three types of experiments were conducted: Through Flow Gabion Weir (TFGW), Clinging Nappe Flow Gabion (CNGW) and Plunging Nappe Flow Gabion Weir (PNGW). Afterward, numerical modeling was employed to analyze the experimental findings. According to the results of the gabion spillway, as the number of steps increment, sedimentation rate, sequestration, and consequently flow retention time increase. Analysis of

* Corresponding Author: Mahdi Meftah halaghi

Address: Associate Professor of Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Email: meftahhalaghi@gmail.com

Tel: 09113759614

dimensionalized total flow rate (q^*) in all three spillways revealed that this parameter decreases as the Reynolds number increases. In addition, the obtained power law for this parameter in terms of Reynolds number demonstrated correlations of 81, 88, and 98 for one-step, two-step, and three-step spillways, respectively. This study demonstrated that the presence of a hydraulic jump alongside a gabion stabilizer increased hyporheic interactions. As a result, increasing the flow rate increases the hyporheic interaction rate while decreasing the flow retention time.

1. Introduction

The hyporheic zone is a region immediately beneath the riverbed where surface and subsurface water mix. This zone plays a crucial role in the river's ecology by facilitating the self-purification of the river's flow. Consequently, this research seeks to identify methods to increase the sedimentation rate in sedimentation basins, as sediments flowing into irrigation channels cause numerous issues. To this end, this study aims to (i) examine the effect of creating submerged walls on the efficiency of sediment trapping compared to a simple sediment basin, (ii) evaluate the influence of variation in wall height on sediment trapping efficiency, and (iii) study the effect of the number of walls on sediment trapping efficiency.

2. Materials and Methods

The effect of the gabion stabilizer on the river's hyporheic flow was investigated using several tests on a laboratory flow. The laboratory flow's length, width, and height were 5 m, 30 cm, and 0.5 m, respectively. The experiments were performed at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources on a one-, two-, and three-step gabion spillway. Notably, three distinct basin lengths were used in the 3-step case test. To this end, three types of experiments were conducted: through flow gabion weir (TFGW), Clinging Nappe Flow Gabion (CNGW) and Plunging Nappe Flow Gabion Weir (PNGW). Afterward, numerical modeling was employed to analyze the experimental findings.

3. Results

According to the results of the gabion spillway, as the number of steps increment, sedimentation rate, sequestration, and consequently flow retention time increase. Analysis of dimensionalized total flow rate (q^*) in all three spillways revealed that this parameter decreases as the Reynolds number increases. In addition, the obtained power law for this parameter in terms of Reynolds number demonstrated correlations of 81, 88, and 98 for one-step, two-step, and three-step spillways, respectively.

4. Discussion and Conclusion

This study demonstrated that the presence of a hydraulic jump alongside a gabion stabilizer increased hyporheic interactions. As a result, increasing the flow rate increases the hyporheic interaction rate while decreasing the flow retention time.

5. Six important references

- 1) Movahedi, N., Dehghani, A.A., Trat, N., Meftah Halqi, M. Laboratory and numerical study of hyperic exchange in the presence of pool and riffle bed form. 2019. *J. Echo Hydrology*, Vol. 6(1), pp. 191-204.
- 2) O'Connor, B. L. and Harvey, J. W. Scaling hyporheic exchange and its influence on biogeochemical reactions in aquatic ecosystems. 2008, *Water Resour. Res.*, Vols. W12423, p.44. doi:10.1029/2008WR00716.
- 3) Packman, A., Salehin, M. and Zaramella, M. Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. s.l. : *J. Hydraul. Eng.*, 2004. pp. 130(7), 647– 656.

- 4) Stanford JA, Lorang MS, Hauer FR. 2005. The shifting habitat mosaic of river ecosystems. *Travaux Association internationale de Limnologie theorique et appliquee* 29: 123–136.
- 5) Chanson, H. (2009), Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results, *Eur. J. Mech. B., Fluids*, 28(2), 191– 210.
- 6) Edwards RT. 1998. The hyporheic zone. In *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*, Naiman RJ, Bilby RE (eds). Springer-Verlag: New York; 399–429.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی آزمایشگاهی تاثیر سازه‌های تثبیت‌کننده گابیونی بر روی تبادلات هایپریک

محمد محمد علیزاده^۱، مهدی مفتاح هلقی^{۲*}، امیر احمد دهقانی^۳، عبدالرضا ظهیری^۴، خلیل قربانی^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴

مقاله پژوهشی

چکیده

منطقه هایپریک ناحیه‌ای بلافاصله زیر بستر رودخانه است که اختلاط آب‌های سطحی پایین رونده با آب زیرسطحی در آن اتفاق می‌افتد. این منطقه نقش بسیار حیاتی در اکولوژی رودخانه دارد و سبب خودپالایی جریان رودخانه می‌شود. از آنجایی که ورود رسوبات به درون کانال‌های آبیاری باعث مشکلات فراوانی می‌گردد، لذا یافتن راه‌حلی جهت کاهش میزان رسوب‌گذاری در حوضچه‌های رسوبگیر هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. به‌طور خلاصه این پژوهش دارای دو هدف است. هدف اول تحقیق بررسی الگوی جریان هایپریک در اطراف سرریز گابیونی است و هدف دوم بررسی تاثیر تغییر تعداد پله‌های سرریز گابیونی بر مشخصات جریان هایپریک و بررسی تغییرات با تله‌اندازی رسوب با تغییر در تعداد پله‌ها می‌باشد. به منظور بررسی آزمایشگاهی تاثیر سازه تثبیت‌کننده گابیونی بر روی جریان هایپریک رودخانه، ابتدا آزمایشاتی روی فلوم آزمایشگاهی به طول ۵ متر، عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۰/۵ متر در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت. آزمایشات بر روی سرریز گابیونی با تعداد یک، دو و سه پله انجام گرفت. ابتدا آزمایشات شامل سه نوع جریان درون‌گذر (TFGW)، جریان ریزشی (CNGW) و جریان با پرش هیدرولیکی (PNGW) و سپس با استفاده از مدل عددی نتایج مورد آنالیز قرار گرفت. طبق بررسی‌های به عمل آمده از نتایج مدل سرریز گابیونی با افزایش تعداد پله‌های سرریز گابیونی، میزان رسوبگذاری و در نتیجه‌ی افزایش زمان ماند جریان افزایش می‌یابد. با بررسی دبی تبدالی کل بی‌بعد شده (Q^*) در هر سه نوع سرریز گابیونی با افزایش عدد رینولدز این پارامتر روند کاهشی نشان داد. نتایج نشان می‌دهد وجود پرش هیدرولیکی در حضور سازه‌های تثبیت‌کننده گابیونی باعث افزایش تبادلات هایپریک شده است. با افزایش دبی جریان، میزان تبادل هایپریک افزایش و زمان ماندگاری کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: جریان هایپریک، سرریز گابیونی، دبی تبدالی، زمان ماندگاری، مدل میوز.

^۱ دانشجوی دکتری رشته مهندسی آب، سازه‌های آبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

m_mohammadalizadeh889294@yahoo.com

^۲ * دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

meftahhalaghi@gmail.com، گرگان، ایران.

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

amirahmad.dehghani@gmail.com

^۴ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

zahiri.areza@gmail.com

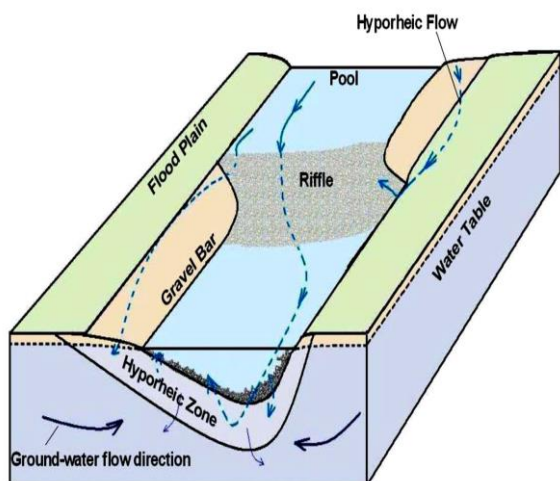
^۵ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

ghorbani.khalil@gmail.com

مقدمه

سرریزهای گابیونی^۱ از پرکاربردترین سازه‌ها در اجرای بندهای انحرافی و سازه‌های حفاظتی رودخانه‌ها هستند. در عمده‌ی طرح‌های اجرایی به‌خصوص در سازه‌های حفاظتی و مهندسی رودخانه بالادست این فرم از سازه‌ها در سال‌های اولیه بهره‌برداری از رسوبات انباشته می‌شود. انباشت رسوب در طرح‌های آبخیزداری به عنوان یکی از اهداف اجرایی این سازه‌ها است. ناحیه هایپریک، یک ناحیه اشباع بینابینی زیر بستر رودخانه و جداره‌های آن می‌باشد که شامل بخشی از جریان رودخانه بوده که بداخل بستر نفوذ کرده است. هنگامی که جریان در مسیر رودخانه حرکت می‌کند، تبادلی بین جریان رودخانه و بستر زیر رودخانه بوجود می‌آید که تبادلات هایپریک نامیده می‌شود. تبادل جریان هایپریک نیز عبارت است از اختلاط جریان سطحی و جریان زیر سطحی در محیط متخلخلی که زیر و اطراف مجرای گذر آب را احاطه کرده است (ادواردز و همکاران، ۱۹۹۸). این تبادل جریان تحت تاثیر خصوصیات متغیر آبراهه مانند فشار در کف، حرکت بستر، حجم آبرفت و هدایت هیدرولیکی به طور زمانی و مکانی تغییر می‌کند (واکس ۱۹۶۸، بولتون ۱۹۹۸، استنفورد و همکاران ۲۰۰۵، استنفورد ۲۰۰۶، کاردناس و ویلسون ۲۰۰۷، تونینا و بافینگتن ۲۰۰۹). اختلاط هایپریک به صورت متناوب از جریان‌های رو به پایین^۲ به داخل بستر متخلخل و بازگشت دوباره به جریان سطحی که رو به بالا^۳ است اتفاق می‌افتد. مقیاس زمانی و مکانی اختلاط هایپریک به وسعت منطقه هایپریک بستگی دارد که ممکن است محدود یا محصور در رودخانه‌های کوچک محدود شده به سنگ بستر و یا وسیع و نامحدود در سیلاب‌دشت‌ها^۴ باشد. همچنین وسعت این مناطق می‌تواند به طور فصلی تغییر کند. در دهه‌های اخیر اهمیت تبادلات جریان هایپریک در رابطه با تاثیر آن در

مباحث ژئومورفولوژی^۵ آبرفت‌ها، آبهای زیرزمینی و زیست-بوم^۶ موجودات آبی در بقاء، مدیریت و احیای^۷ رودخانه‌ها بسیار پررنگ شده است. شکل ۱ نمای از جریان هایپریک در رودخانه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شمائی کلی از جریان‌های هایپریک (ویتینگ و همکاران، ۱۹۹۸)

تبادل جریان هایپریک تأثیر چندگانه بر روی زیست بوم رودخانه‌ای دارد. جریان‌های رو به پایین مواد محلول و آب سطحی را به داخل رسوبات بستر برده و باعث اصلاح غلظت مواد محلول در رسوبات می‌شوند، در نتیجه بر روی محیط زیست موجودات مختلفی که در محیط بستر رودخانه زندگی می‌کنند، تأثیر می‌گذارند. این موجودات نیز به نوبه خود غلظت مواد محلول را تغییر می‌دهند، قسمتی از مواد محلول آورده شده را مصرف می‌کنند و هدر رفت بیولوژیکی خود را به آب می‌دهند که توسط آب دوباره به جریان سطحی برمی‌گردد. جریان رو به پایین حاوی اکسیژن محلول در آب است که محیط هوازی در لایه کم عمق منطقه هایپریک ایجاد می‌کند و جانوران آبی می‌توانند در

⁵ Geomorphology

⁶ Ecosystem

⁷ Restoration

¹ Gabion Steeped Spillways

² Downwelling

³ Upwelling

⁴ Floodplains



مقاله حاضر به بررسی تاثیر سازه تثبیت کننده گابیونی بر مشخصات هایپرریک در شرایط مختلف هیدرولیکی می پردازد و همچنین تاثیر وجود و یا عدم وجود پله ها و تعداد آنها بر میزان ترسیب سرریز گابیونی را نیز مورد بررسی قرار می دهد. موحدی و همکاران (۱۳۹۹) به مقایسه تبادلات هایپرریک در خیزآب و چالاب دو بعدی و سه بعدی پرداختند. آنها دریافتند که با افزایش تقریباً ۵۰ درصدی دامنه فرم بستر، دبی تبادلات هایپرریک هم در حالت دو بعدی و هم در حالت سه بعدی ۲۶ درصد افزایش و زمان ماندگاری در مدل دو بعدی ۳۶ درصد و در مدل سه بعدی ۴۱ درصد کاهش می یابد. همچنین، مقایسه نتایج خیزآب - چالاب سه بعدی با مدل دو بعدی معادل آن نشان می دهد که دبی تبادلات هایپرریک و زمان ماندگاری به ترتیب ۳ و ۴ درصد افزایش می یابند. موحدی (۲۰۱۹) تاثیر فرم بستر خیزآب - چالاب بر تبادلات هایپرریک را مورد بررسی قرار داد. این تحقیق با به کارگیری روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، تغییرات فشار روی بستر شبیه سازی عددی شد و سپس مدل آب های زیرزمینی و روش ردیابی ذرات برای شبیه سازی جریان در ناحیه هایپرریک به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که حل کننده ی اینترفوم با مدل شبیه سازی به روش گردابه های بزرگ به خوبی قادر است شرایط آزمایشگاهی را مدل سازی کند. بررسی مشخصات ناحیه هایپرریک در این تحقیق نشان داد با افزایش عدد رینولدز، تبادلات هایپرریک افزایش یافته و زمان ماندگاری کاهش می یابد.

موحدی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تبادل جریان هایپرریک در بسترهای رسوبی با طول و عرض موجی شکل پرداختند. آنها دریافتند که تبادلات هایپرریک با تغییر در بستر عرضی رودخانه ها نیز ایجاد می شود. همچنین آنها اعلام داشتند که عمق جریان هایپرریک، ارتفاع نفوذ آب سطحی به داخل بستر را نشان می دهد. این عمق از نظر زیست بوم رودخانه حائز اهمیت است. در مورفولوژی های طبیعی که بیشتر سه بعدی هستند، گسترش جانبی منطقه هایپرریک هم می تواند مورد توجه باشد.

این محیط تکثیر شوند. با این وجود مواد آلی جهت تجزیه در منطقه هایپرریک، اکسیژن مصرف می کند و باعث ایجاد اختلاف غلظت اکسیژن می شوند که بسته به زمان واکنش، غلظت اولیه اکسیژن، سرعت جریان، طول مسیرهای جریان هایپرریک تغییر می کند. جریان های هایپرریک اساساً از تعامل بین جریان رودخانه ای و مورفولوژی بستر رودخانه - های محلی مانند تپه ها، مانع ها، چالاب ها (هاروی و بنسالا ۱۹۹۳، الیوت و بوروکز ۱۹۹۷، ماریون و همکاران ۲۰۰۲، تونینا ۲۰۰۵، کاردناس و ویلسون ۲۰۰۷، تونینا و بافینگتن ۲۰۰۷) سرریزها (هستر و دویل ۲۰۰۸)، سدهای کوچک (فانلی و لاوتز ۲۰۰۸)، راه ماهی ها (تونینا و بافینگتن ۲۰۰۹) ایجاد می شوند. تبادل هایپرریک توسط چندین محرک فیزیکی ناپیوسته می تواند تنظیم شود، این محرک ها شامل انتشار، انتقال و مومنتوم است (کاسر و همکاران ۲۰۰۹، اکونور و هاروی ۲۰۰۸، پاکمن و همکاران ۲۰۰۴). تبادل انتقال توسط هد هیدرولیکی، $h(m)$ که از هد ارتفاع $z(m)$ ، هد فشاری $hp = P/\rho g$ و هد سرعت $u^2/2g$ تشکیل شده است، به وجود می آید.

$$h = z + h_p + \quad (1)$$

$$C \frac{U^2}{2g}$$

P فشار داخلی (Pa) است، ρ چگال (kg/m^3) ، g شتاب گرانشی و U سرعت (m/s) و C ضریب ثابت است. بیشتر تحلیل های قبلی تبادلات هایپرریک در موانع رودخانه، با استفاده از یک پروفیل سطح آب هیدرواستاتیک، بدون توجه به فرآیندهای هیدرودینامیکی و تغییرات هد سرعت پیش بینی شده اند (گوسف و همکاران ۲۰۰۶، هاروی و بنسالا ۱۹۹۳، کاساهارا و وندزل ۲۰۰۳، لاوتز و سیگل ۲۰۰۶). ترکیب هد ارتفاع و هد فشار هیدرواستاتیک به طور معمول به عنوان هد پیزومتریک شناخته می شود. تجزیه و تحلیل هیدرواستاتیک فرض می کند که هد پیزومتریک می تواند محرک هایپرریک غالب باشد. تحقیقات فلوام آزمایشگاهی یک توالی چالاب و خیزآب نشان داده است که سطح پیزومتریک مبتنی بر پروفیل سطح آب می تواند یک پیش بینی ناچیز از الگوهای مکانی از تبادل هایپرریک در امتداد جریان رودخانه ای باشد، به دلیل اینکه سرعت و فشار رفتار هیدرودینامیکی دارند (تونینا و بافینگتن ۲۰۰۷).

فلزی، به طول ۵ متر، عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۰/۵ متر در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت. یک سازه تثبیت‌کننده گابیونی در فاصله ۱۴۰ سانتیمتر از ابتدای کانال با دو حالت ۲ پله و ۳ پله با ارتفاع ۱۰ سانتیمتر روی هم قرار گرفته و مطابق جدول ۱ برای انجام آزمایش استفاده شده است.

مواد و روش

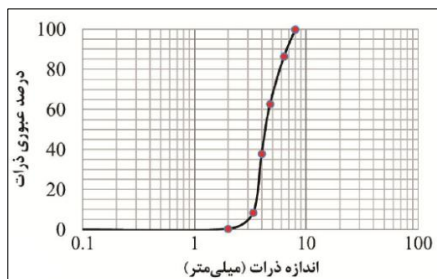
به منظور بررسی الگوی جریان هایپرپیک مطالعات به صورت آزمایشگاهی انجام شد. در ادامه، مشخصات کانال آزمایشگاهی و شیوه انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

کانال آزمایشگاهی

مطابق شکل ۲، آزمایش‌ها در یک فلوم شیب‌پذیر مستطیلی است که جنس دیواره آن سکوریت و جنس کف



شکل (۲): فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل (۳): منحنی دانه‌بندی مورد استفاده

قبل از شروع آزمایش‌ها و برقراری جریان آب در فلوم، سطح رسوبات بستر در بالادست و پایین دست سرریز گابیونی به صورت یک سطح صاف با شیب ۱ درصد اجرا شد.

تعیین هدایت هیدرولیکی

به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی رسوبات، پس از صاف نمودن بستر رسوبی، جریان به داخل کانال برقرار می‌گردد، سپس طبق رابطه (۴)، هدایت هیدرولیکی محاسبه خواهد شد (تونینا و بافینگتن، ۲۰۰۷).

$$K = \frac{Q}{AS_f} \quad (2)$$

رسوبات کف کانال آزمایشگاهی

به منظور بررسی اثر جریان هایپرپیک بر روی رسوبات از یک نوع دانه‌بندی با قطر متوسط (d50)، به میزان ۴/۳۲ میلیمتر استفاده شده است. پس از دانه‌بندی ذرات رسوب برخی پارامترهای مهم شامل هدایت هیدرولیکی (K) و تخلخل (ϕ) محاسبه گردید. در شکل ۳ منحنی دانه‌بندی رسوبات کف بستر ارائه شده است.

رسوبات ذرات داخل سازه گابیونی از قلوه‌سنگ‌هایی با حداقل ۱/۵ برابر چشمه‌های توری برای لایه‌های حفاظتی و توری سنگی‌های بیرونی باید استفاده شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۵). بنابراین در این تحقیق رسوبات موانع گابیونی ۶/۸ میلیمتر انتخاب شد.



رسوب گابیونی بیشتر از قطر ذرات بستر است و در نتیجه خلل و فرج بیشتری هم دارد به همین دلیل ضریب هدایت هیدرولیکی ذرات گابیونی بیشتر از ذرات کف بستر بوده است.

برداشت پروفیل سطح جریان و اندازه گیری دبی فوم

برای اندازه گیری دبی جریان از کنتور حجمی استفاده شده است. این کنتور از جنس چدنی با اندازه ۶۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از خطای احتمالی، حداکثر و حداقل دبی جریان در این نوع کنتور به ترتیب، حدود ۱۳/۸۸ و ۰/۸۸ لیتر بر ثانیه می باشد.

شیوه تزریق مواد رنگی

در محل های قبل و بعد از پرش هیدرولیکی و در عمق های مختلف برای بررسی بهتر مسیر جریان هایپریک ماده رنگی پر منگنات پتاسیم تزریق شد که هم زمان نیز از مسیر حرکت ماده رنگی نیز فایل تصویری با استفاده از یک دستگاه دوربین در موقعیت های مختلف محل تزریق در پایین دست مانع برای محاسبه دقیق زمان حرکت جریان هایپریک تهیه شد.

مانع سرریز گابیونی در مسیر جریان

به منظور بررسی اهداف مورد نظر در این تحقیق آزمایشات با یک پله به ارتفاع ۱۵ سانتیمتر، دو پله به ارتفاع ۷/۵ سانتیمتر، سه پله به ارتفاع ۵ سانتیمتر و دبی ثابت انجام می شود. لازم به ذکر است که ابعاد سازه تثبیت کننده گابیونی و میزان تخلخل آن در طول آزمایش در حالات ۲ پله و ۳ پله ثابت می باشد. شکل ۴ شماتیک سرریزهای گابیونی را نمایش می دهد.

که در آن Q دبی جریان در محیط متخلخل، A سطح مقطع رسوبات اشباع و S_f شیب خط انرژی است. مقدار هدایت هیدرولیکی در این تحقیق برای ذرات بستر ۴/۳۲ میلیمتر و ذرات گابیونی ۶/۸ میلیمتر به ترتیب برابر با ۰/۱۹۶۲ و ۰/۴۰۲۲ متر بر ثانیه به دست آمد. قطر ذرات

از پارامتر هدایت هیدرولیکی در شبیه سازی عددی هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی در مدل های Flow 3D و Model muse استفاده شده است.

تعیین تخلخل ذرات

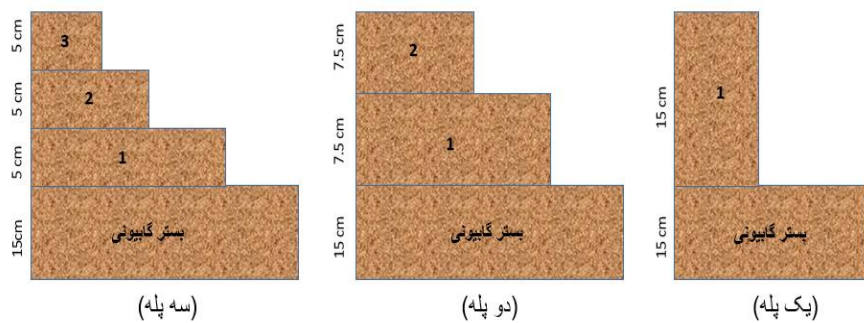
یکی از مهمترین پارامترهایی که می تواند در جریان هایپریک تاثیرگذار باشد، پارامتر تخلخل ذرات می باشد. اندازه گیری این پارامتر از روش حجمی استفاده شده است. بدین منظور ظرفی به حجم ۱۵ لیتر را به طور کامل از آب پر نموده، پس از آن در ظرفی دیگر به گنجایش ۵ لیتر از خاک مورد نظر تهیه و در نهایت با مخلوط نمودن دو ظرف مخلوطی از آب و خاک به دست آمد. پس از اشباع نمودن کامل خاک، میزان آب خارج شده از ظرف را اندازه گیری کرده و در معادلات زیر قرار دادیم.

$$V_f = V_t + V_w - V_s \quad (3)$$

$$V_f = V_t + V_{w2} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{V_f}{V_t} \times 100 \quad (5)$$

در روابط فوق V_f حجم خلل و فرج، V_w حجم آب ظرف اولیه، V_s حجم مخلوط آب و رسوب، V_t حجم کل خاک و V_{w2} حجم آب خارج شده پس از تزریق رسوب (همه حجم ها بر حسب لیتر) و ϕ هم مقدار تخلخل بر حسب درصد می باشد. مقدار تخلخل برای ذرات بستر ۴/۳۲ میلیمتر و ذرات گابیونی ۶/۸ میلیمتر به ترتیب برابر با ۰/۲۵۵ و ۰/۳۵۷ به دست آمد. از پارامتر تخلخل در شبیه سازی عددی هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی در مدل های Flow 3D و Model muse استفاده شده است.



شکل (۴): شماتیک ابعاد سازه تثبیت کننده گابیونی جریان در فلوم آزمایشگاهی

انتقالی بررسی کند. مدل Modpath قادر است مسیر جریان را به صورت سه بعدی با استفاده از خروجی جریان آب زیرزمینی و باتوجه به داده‌های خروجی مدل Modflow شبیه‌سازی کند. این مدل جریان آب زیرزمینی را براساس معادله داری و روش تفاضل محدود حل می‌کند.

مسیر حرکت ذره با ردیابی ذره از یک سلول به سلول مجاور تا رسیدن به یک مرز مشخص همچون چاه یا چشمه یا شرایط انتهایی دیگر مشخص می‌شود. داده‌های ورودی به مدل Modpath، ترکیبی است از داده‌های خروجی Modflow که شامل هد و جریان هستند. خروجی Modpath شامل فایل‌های خروجی متعددی همچون فایل مختصاتی مسیر ذره است که این داده‌های خروجی توسط برنامه‌های دیگر قابل آنالیز و بررسی بوده و نتایج به روش‌های مختلف قابل نمایش است. علاوه بر محاسبه مسیر خطوط جریان، Modpath زمان انتقال حرکت ذرات را نیز محاسبه می‌کند. با معرفی دقیق موقعیت‌های شروع حرکت ذره در مدل Modpath، این امکان وجود دارد که در محدوده وسیعی از ناحیه مورد آنالیز، مسیر محل تزریق و شبکه جریان را ترسیم کند. شکل ۵ نمایی از مش‌بندی و هندسه سرریز گابیونی دو پله در مدل میوز را نشان می‌دهد.

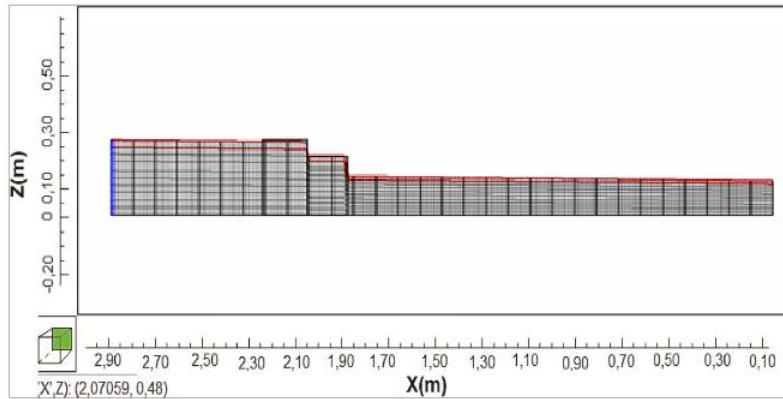
شبیه‌سازی الگوی جریان هایپرریک با مدل آب زیر زمینی

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و ردیابی ذرات از نرم‌افزار Model Muse استفاده شد.

Modflow (۲۰۰۵) نوعی مدل سه بعدی آب‌های زیرزمینی است که جریان پایدار و ناپایدار درون لایه آبخوان را به صورت محدود، محصور نشده و یا ترکیبی از محدود و آزاد را شبیه‌سازی می‌کند. با معرفی داده‌های مربوط به توپوگرافی بستر رسوب، شبکه پایه‌ای مطابق با هندسه مسئله ایجاد شده و سپس، پروفیل سطحی جریان برداشت شده به عنوان شرط مرزی به مدل معرفی شد.

برای ایجاد هندسه مدل، اندازه مش در راستای طولی و عرضی کانال یک سانتیمتر و تعداد لایه‌ها در راستای Z متناسب با ابعاد مش در نظر گرفته شده در حالت هیدرواستاتیک معادل ۲۰ لایه انتخاب شد. در نهایت، با اعمال شرایط مرزی فشار برای ورودی و خروجی، مدل مادفلو اجرا شد و سپس، مدل Modpath برای ردیابی ذرات و تعیین مشخصات جریان هایپرریک استفاده شد.

الگوریتم ردیابی ذرات که توسط مدل Modpath قابل اجراست، می‌تواند ناحیه جریان را در حالت ماندگار یا



شکل (۵): نمایی از هندسه و مش بندی سرریز دو پله در Model Muse

تبادل هایپرریک و زمان ماند

جریان‌هایی به طور کلی، جریان‌های زیرسطحی درون محیط متخلخل به چهار دسته تقسیم می‌شوند: الف) جریان‌هایی که به دلیل تغییرات فرم بستر از جریان سطحی وارد محیط متخلخل شده و دوباره از آن خارج می‌شوند و به جریان سطحی بر می‌گردند که به آنها جریان‌های هایپرریک گفته می‌شود. ب) جریان‌هایی که از آب سطحی وارد محیط متخلخل می‌شوند و دیگر بر نمی‌گردند که در این حالت به سفره آب زیرزمینی می‌پیوندند که به این جریان‌ها جریان از دست رفته گویند. پ) جریان‌هایی که به عکس حالت دوم هستند و در واقع از منبع آب زیر زمینی وارد جریان سطحی می‌شوند که جریان دریافتی نامیده می‌شوند. ت) جریان‌هایی هستند که از بالادست و به موازات جریان سطحی در محیط متخلخل جریان دارند و هیچ برخوردی با جریان سطحی ندارند که از آنها به عنوان جریان آب زیرزمینی یاد می‌شود (جمالی و همکاران، ۱۳۹۸). در ساختارهای طبیعی بسته به موقعیت مکانی ممکن است همه این جریان‌ها و یا بخشی از آنها وجود داشته باشد.

برای اینکه بتوان دبی تبدلی آزمایش‌های مختلف را با هم مقایسه کرد، شاخص‌های جریان سطحی و زیرسطحی به صورت بی‌بعد تعریف می‌شوند. دبی تبدلی

نرمال شده (q^*) ، زمان ماندگاری بی‌بعد شده (t^*) ، درصد دبی تبدلی (Q_p) ، چگونگی محاسبه آنها در روابط زیر ارائه شده است.

$$q^* = \frac{Q_{ex}}{K \times A_s} \quad (6)$$

$$t^* = \frac{Rt \times K}{Lm} \quad (7)$$

$$Q_p = \frac{Q_{ex}}{Q} \times 100 \quad (8)$$

که در این روابط K هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل، A_s مساحت سطح تماس جریان سطحی و محیط متخلخل، Rt زمان ماندگاری، Q_{ex} دبی تبدلی کل، Lm طول موثر جریان هایپرریک در محدوده مانع گابیونی، و Q دبی جریان است. دبی تبدلی و زمان ماندگاری بی‌بعد شده در مطالعات زیادی به عنوان شاخص‌های مناسب ارائه شده است (تسوتسومی و همکاران، ۲۰۱۷).

نتایج و بحث

پروفیل سطح جریان

سه سری آزمایش در مجموع ۲۷ سری آزمایش بر روی فلوم مورد نظر انجام شد. ملنغ گلیبونی ۱۵ سانتی‌متری، به صورت سه سرریز، یک، دو و سه پله، مطابق مشخصات جدول ۱ به صورت نفوذ کامل درون بستر نصب گردید.



جدول (۱): مشخصات آزمایش

ردیف	حالات	ارتفاع پله (Cm)	نوع آزمایش	دبی (L/S)	تعداد تکرار	تعداد کل آزمایش در هر سری
۱	یک پله	۱۵	سری اول	۳/۵۶	۳	۹
			سری دوم	۶/۴		
			سری سوم	۹/۵		
۲	دو پله	۷/۵	سری اول	۳/۵۶	۳	۹
			سری دوم	۶/۴		
			سری سوم	۹/۵		
۳	سه پله	۵	سری اول	۳/۵۶	۳	۹
			سری دوم	۶/۴		
			سری سوم	۹/۵		

جهت به سمت بالادست جریان و متمایل به سطح رسوبات^۲، جهت به سمت پایین دست جریان و متمایل به سمت کف فلوم^۳ و جهت به سمت بالادست جریان و متمایل به سمت کف فلوم^۴ می باشد. در آزمایش سری اول که مشخصات هیدرولیکی آن در جدول ۲ آورده شده، پرش هیدرولیکی و آب شستگی توامان تشکیل شد و در این سری آزمایش مانع گابیونی سرریز گابیونی به صورت کامل در کف فلوم نصب گردید. شکل های ۶ تا ۸ به عنوان نمای کلی از ۳ آزمایش یاد شده آورده شده است که در آن مسیر خطوط هایپرریک در سه حالت یک پله، دو پله و سه پله گابیونی با سه دبی متفاوت (۳/۵۶، ۶/۴ و ۹/۵ لیتر بر ثانیه) که در فاصله ۳۰ سانتیمتری که از بالادست قرار گرفته شده، نشان داده شده است.

به منظور بررسی پروفیل سطح آب در سه حالت ۱، ۲ و ۳ پله با ارتفاع های ثابت به ترتیب، ۱۵، ۷/۵ و ۵ سانتیمتری، از عمق سنج دیجیتالی با دقت ± 0.1 میلیمتر استفاده شد. محدوده برداشت پروفیل در بالادست سازه سرریز گابیونی ۱/۲ متر و در پایین دست سازه گابیونی ۱/۹ متر می باشد. سازه های سرریز گابیونی در بین حد فاصل بالادست و پایین دست به طول ۰/۵ متر قرار گرفته است.

مسیر خطوط هایپرریک به دست آمده از نتایج

مدل عددی

در کلیه آزمایش ها چهار نوع مسیر جریان هایپرریک در پایین دست مانع شناسایی شد. که شامل: جهت به سمت پایین دست و متمایل به سمت سطح رسوبات^۱،

³ Downstream-directed downwelling (DD)

⁴ Upstream-directed downwelling (UD)

¹ Downstream-directed upwelling (DU)

² Upstream-directed upwelling (UU)

جدول (۲): مشخصات دبی تبادلی و زمان ماندگاری بی بعد، جریان هایپرریک در سه حالت مختلف جریان

ردیف	حالات سرریز گابیونی	ارتفاع پله (cm)	نوع آزمایش	دبی (L/S)	عدد رینولدز (Re)	دبی تبادلی بی بعد شده (q*)	درصد دبی تبادلی (%Qp)	زمان ماند بی بعد شده (t*).avg
۱	یک پله	۱۵	سری اول	۳/۵۶	۲۵۳۲	۰/۰۰۹	۱۷	۴
			سری دوم	۶/۴	۱۹۰۶۴	۰/۰۱۲	۲۸	۹
			سری سوم	۹/۵	۲۵۳۵۸	۰/۰۱۶	۴۵	۱۱
۲	دو پله	۷/۵	سری اول	۳/۵۶	۳۲۹۹	۰/۰۱۰	۱۸	۴
			سری دوم	۶/۴	۱۴۸۳۶	۰/۰۱۲	۲۳	۱۱
			سری سوم	۹/۵	۲۰۱۷۳	۰/۰۱۷	۴۵	۱۵
۳	سه پله	۵	سری اول	۳/۵۶	۲۸۱۵	۰/۰۱۹	۲۰	۴
			سری دوم	۶/۴	۱۵۶۸۲	۰/۰۱۳	۳۲	۱۲
			سری سوم	۹/۵	۲۱۰۳۶	۰/۰۱۱	۶۰	۱۸

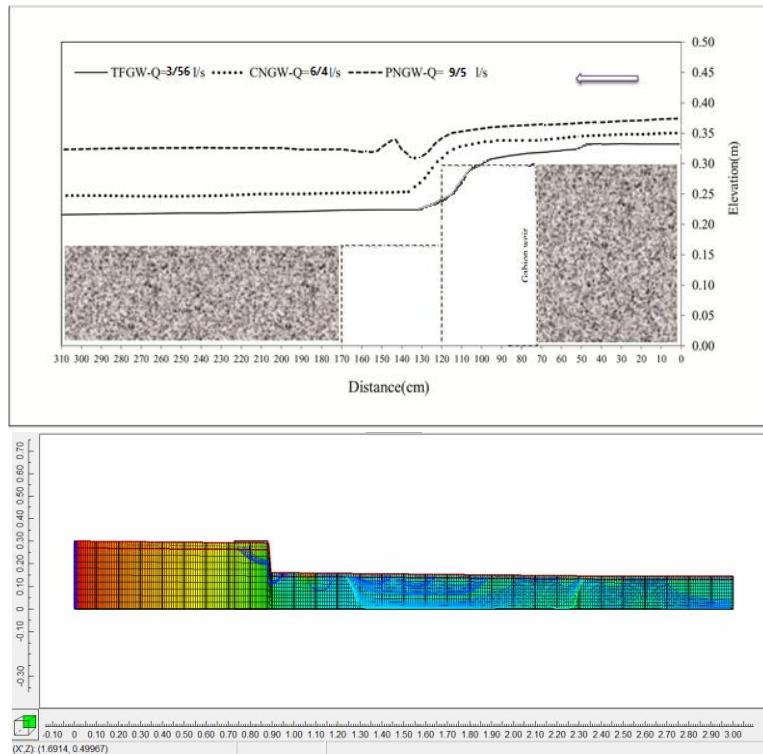
در هر یک از آزمایش‌های انجام شده که در آن پرش هیدرولیکی تشکیل شده بود، آشفتگی جریان زیاد بود، با این حال در این مقاله مشابه کار ایندرونی و همکاران (۲۰۱۱) فقط الگوهای تبادلی مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر پخشیدگی در تبادلات هایپرریک مورد بررسی قرار نگرفت.

با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایش‌های در سرریز دو پله با سه دبی ۳/۵۶، ۶/۴ و ۹/۵ لیتر بر ثانیه که در شکل ۷ نمایش داده شده است، پرش هیدرولیکی و آب‌شستگی به صورت توامان تشکیل شد. با مقایسه مسیره‌های هایپرریک در این مدل آزمایشگاهی و مدل هیدرواستاتیک برای حالت سرریز یک پله ایجاد پرش و آب شستگی توامان بوده است و در تمامی نواحی هایپرریک مطابقت دارند. فقط در محدوده زیر محل ریزش از سرریز مطابقت نداشتند زیرا محل قرارگیری پرش به کمی پایین‌تر از پای سرریز قرار گرفت که می‌توان علت آن را ناشی از حجم هوای محبوس شده در زیر محل ریزش دانست که مدل میوز آن را به درستی شبیه‌سازی نمی‌کند. در بین سه دبی مورد آزمایش (۳/۵۶، ۶/۴ و ۹/۵)، در بیشترین، دبی ۹/۵ لیتر بر ثانیه، نوع پرش آن به دلیل اینکه بین دو منحنی قرار گرفته است، از نوع سطحی و در آزمایش‌های دیگر که با دبی‌های کمتر انجام شد، به دلیل اینکه نقاط متناظر این دو حالت در زیر منحنی پرش آزاد

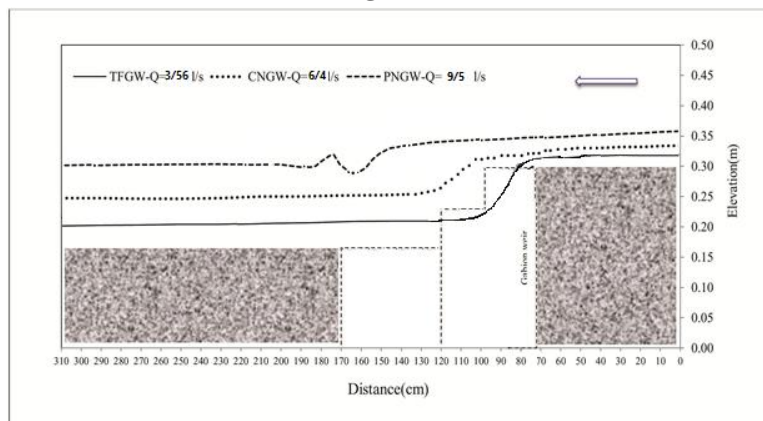
طبق بررسی‌های انجام شده از مدل هیدرواستاتیکی در شکل‌های ۶ تا ۸ مشخص شده که، الگوی جریان در ناحیه هایپرریک در حالت شبیه‌سازی شده با مدل آزمایشگاهی هم‌خوانی خوبی دارند. با تزریق رنگ در قبل از سازه سرریز گابیونی مشاهده می‌شود که ذره تزریق شده در محیط متخلخل بلافاصله بعد از سازه سرریز گابیونی با طی کردن مسیری به محیط آب سطحی وارد می‌گردد. در شکل ۶ در حالت یک پله پروفیل سطح آب در سه دبی ۳/۵۶ لیتر بر ثانیه به صورت درون‌گذر از ذرات گابیونی، در دبی ۶/۴ لیتر بر ثانیه به صورت روگذر و در ماکزیمم دبی ۹/۵ لیتر بر ثانیه به صورت پرش هیدرولیکی مشاهده شده است که این پرش هیدرولیکی در پای سرریز اتفاق افتاده است. این حالت به دلیل تغییر بار هیدرولیکی از محیط بالادست به سمت محیط پایین‌دست می‌تواند اتفاق بیافتد. اما در پایین‌دست سازه سرریز گابیونی خطوط جریان به دلیل تغییرات بار هیدرولیکی مسیره‌هایی را طی می‌کنند و به محیط آب سطحی وارد می‌شوند. ایجاد پرش هیدرولیکی سبب آب شستگی رسوبات شده است و موجب حرکت رسوبات گشته که محدوده ایجاد پرش هیدرولیکی در حالت‌های وجود آب‌شستگی حد فاصل X برابر ۰/۹۳ متر تا X برابر ۱/۲۸ متر و برای حالت بدون ایجاد آب‌شستگی حد فاصل X برابر ۰/۹ متر تا X برابر ۱/۲۵ متر اتفاق افتاد.

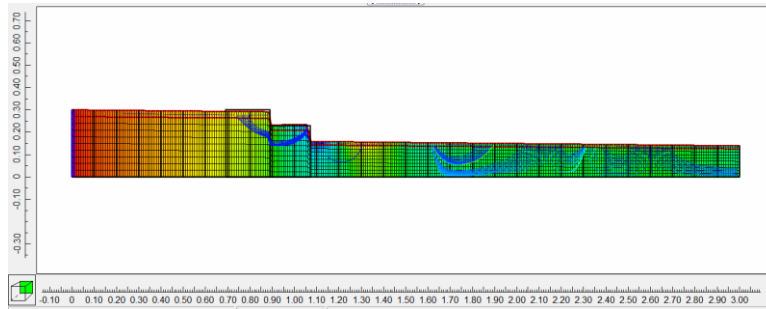
آزمایش پرش و آب‌شستگی توانان تشکیل شد و در این سری آزمایش سرریزهای گابیونی در هر تعداد پله به صورت کامل مغروق شده است.

قرار گرفته بود، پرش از نوع آزاد شکل گرفت. در هریک از آزمایش‌های مربوط به سری سوم (دبی ۹/۵ لیتر برثانیه) آشفتگی جریان زیاد بود، در این سری

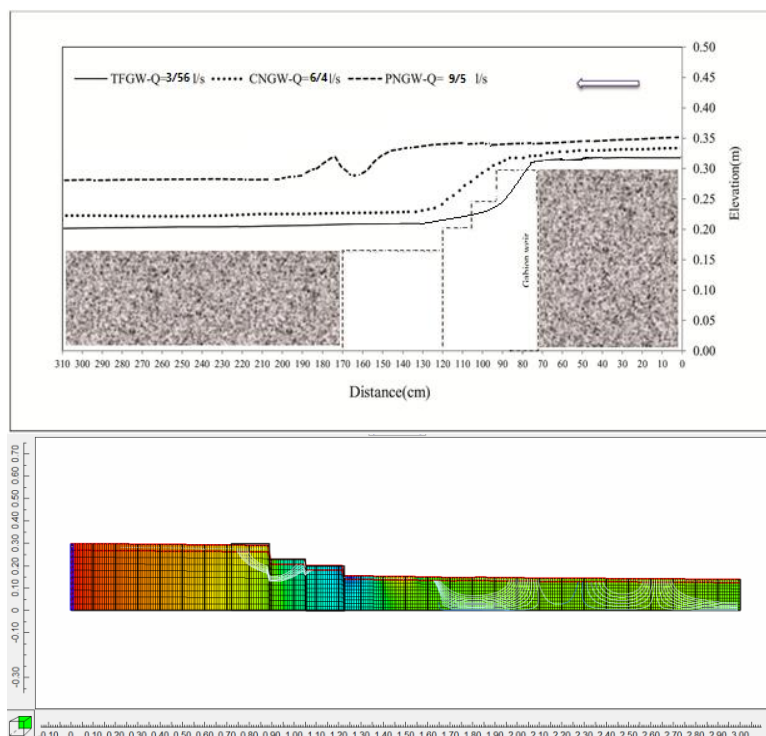


شکل (۶): پروفیل سطح آب برای سازه سرریز گابیونی یک پله برای سه حالت مختلف جریان درونگذر، روگذر (ریزشی) و پرش هیدرولیکی

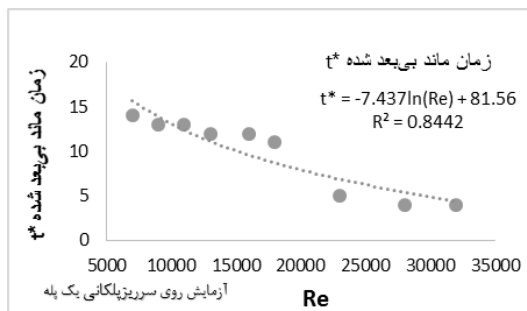




شکل (۷): پروفیل سطح آب برای سازه سرریز گابیونی دو پله برای سه حالت مختلف جریان درونگذر، روگذر (ریزشی) و پرش هیدرولیکی



شکل (۸): پروفیل سطح آب برای سازه سرریز گابیونی سه پله برای سه حالت مختلف جریان درونگذر، روگذر (ریزشی) و پرش هیدرولیکی



(الف)

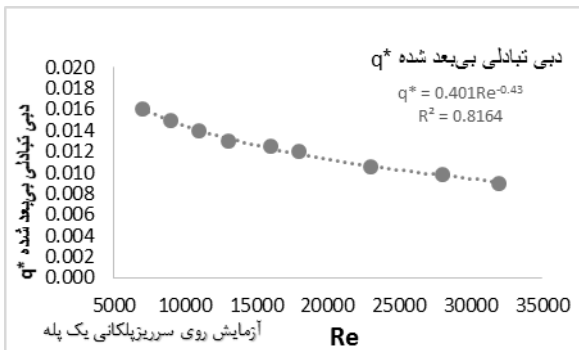
بررسی زمان ماندگاری جریان هایپرپریک (t^*)

یکی از مشخصات مهم ناحیه هایپرپریک زمان ماند است. در شکل‌های ۹ زمان ماند برای سه حالت یک پله، دو پله و سه پله سرریز گابیونی ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالت‌های مختلف جریان (درون‌گذر، ریزشی و پرش هیدرولیکی) به‌طور کلی با افزایش عدد رینولدز جریان، زمان ماند کاهش می‌یابد.

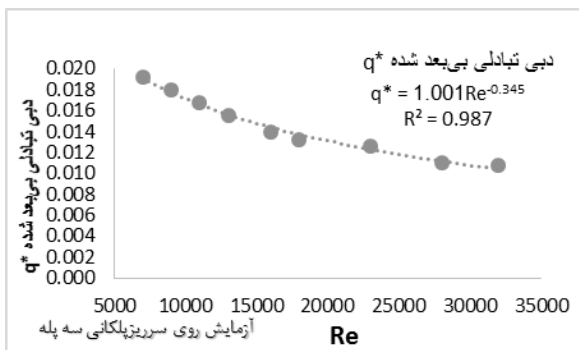
رسوبگذاری و انجام واکنش‌های شیمیایی خواهد داشت ولی برای زمانی که جریان در دبی‌های بالاتر به حالت پرش هیدرولیکی است زمان ماند کمتری را دارا می‌باشد.

بررسی دبی تبدالی بی‌بعد شده جریان هایپرریک (q^*)

با بررسی نمودارهای شکل‌های ۱۰، دبی تبدالی کل بی‌بعد شده (q^*) مشاهده شد که تغییرات دبی تبدالی وابسته گرادیان فشار است که از تغییرات سرعت، گردابه‌های جریان و اختلاف هد استاتیکی جریان به وجود می‌آید. دبی تبدالی کل جریان هایپرریک بی‌بعد شده در هر سه حالت ریزشی، جریان روگذر و جریان با پرش هیدرولیکی، با افزایش عدد رینولدز روند کاهشی داشت. دامنه تغییرات مقدار دبی تبدالی بی‌بعد شده کل در دامنه‌های بین ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۱۶ بوده است. که بیشترین مقدار برای سرریز گابیونی سه پله و کمترین مقدار برای سرریز گابیونی یک پله می‌باشد.

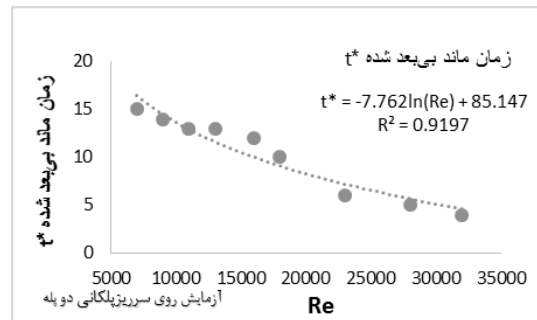


(الف)

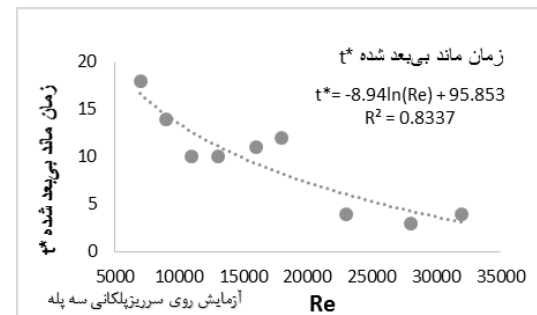


(ج)

شکل (۱۰): دبی تبدالی بی‌بعد شده در سه حالت در سه حالت سرریز گابیونی (الف) یک پله، (ب) دو پله و (ج) سه پله جمالی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به بررسی این پارامتر



(ب)



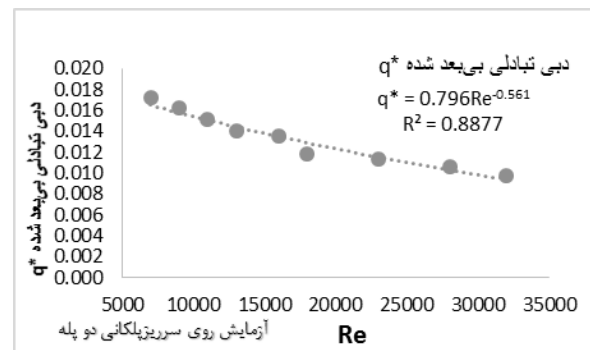
(ج)

(۹) زمان ماند بی‌بعد شده در سه حالت مختلف از سرریز

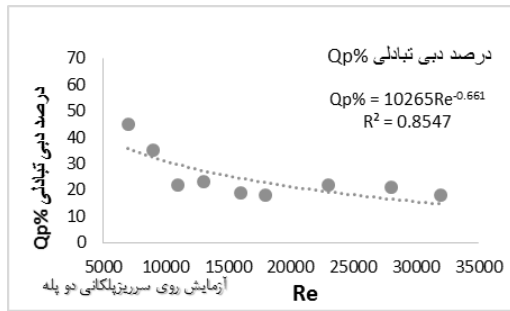
گابیونی (الف) یک پله، (ب) دو پله و (ج) سه پله

مارزادری و همکاران (۲۰۱۰) نیز که به بررسی نیمه تحلیلی جریان هایپرریک روی پشته‌های رسوبی پرداخته بودند، به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی جریان روی پشته رسوبی، زمان ماند کاهش می‌یابد.

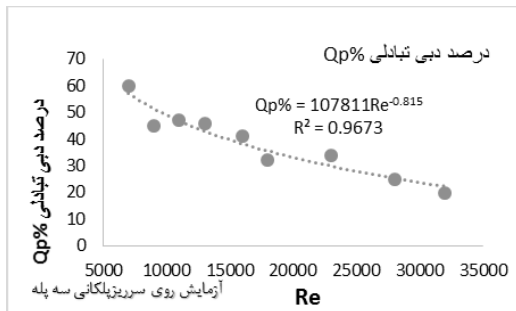
می‌توان تفسیر کرد که در زمان کم‌آبی و زمانی که جریان آشفته نیست یعنی در حالت جریان روگذر و ریزشی مقادیر مدت زمان طولانی‌تری مواد در ناحیه هایپرریک باقی می‌مانند در نتیجه فرصت بیشتری برای



(ب)



(ب)



(ج)

شکل (۱۱): درصد بی تبدالی در سه حالت مختلف از سرریز

گابیونی (الف) یک پله، (ب) دو پله و (ج) سه پله

نتیجه گیری

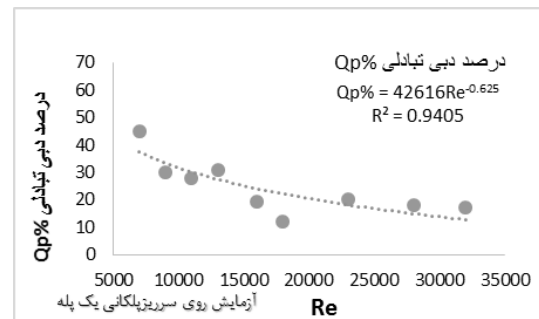
- طبق بررسی‌های به عمل آمده از نتایج مدل سرریز گابیونی با تغییر تعداد پله‌ها میزان رسوبگذاری و ترسیب در نتیجه‌ی افزایش زمان ماند جریان افزایش می‌یابد.
- با بررسی دبی تبدالی کل بی‌بعد شده (Q^*) در سه نوع سرریز گابیونی با افزایش دبی این پارامتر روند کاهش نشان داد. زیرا با افزایش میزان دبی میزان عدد رینولدز جریان نیز افزایش یافته و سبب اختلاط دبی گشته است. همچنین رابطه توانی به‌دست آمده از این پارامتر نسبت به عدد رینولدز دارای همبستگی ۸۱ در سرریز گابیونی یک پله، ۸۸ در دو پله و ۹۸ در سه پله درصد بوده است.
- نتایج نشان داد بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج به‌دست آمده از مدل عددی همخوانی بسیار خوبی برقرار است.
- با بررسی روند تغییرات زمان ماند نسبت به عدد رینولدز جریان یک رابطه توانی بین آن‌ها برای هر یک از سرریزهای گابیونی با پله‌های مختلف

پرداختند. نتیجه پژوهش این محقق نشان دهنده این موضوع بود که با افزایش دبی جریان، شاخص بی‌بعد دبی تبدالی بین جریان سطحی و زیر سطحی روند کاهشی را از خود نشان داد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

بررسی درصد دبی تبدالی کل جریان هایپریک ($Q_p\%$)

شکل‌های ۱۱ به بررسی درصد دبی تبدالی نسبت به تغییرات عدد رینولدز می‌پردازد. درصد دبی تبدالی کل جریان هایپریک از نسبت دبی کل جریان هایپریک (Q_{ex}) به دبی جریان ورودی از فلوم آزمایشگاهی (Q) به‌دست می‌آید. با بررسی این پارامتر در جدول ۲ مشاهده شد که در تمامی حلات‌های مورد آزمایش با افزایش عدد رینولدز جریان مقدار درصد دبی تبدالی کل جریان هایپریک روند کاهشی داشته است که با نتایج تراث و همکاران (۲۰۱۵) نیز همخوانی دارد.

مطابق نتایج جدول ۲ بیشترین درصد اختلاط جریان سطحی با محیط زیرسطحی با توجه به دبی جریان عبوری در آن با ۶۰/۳ درصد در سرریز گابیونی سه پله رخ داده است و کمترین درصد اختلاط نیز به حالت سرریز گابیونی یک پله با ۱۰/۴ درصد دبی تبدالی بود. همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد دبی تبدالی جریان با عدد رینولدز نیز رابطه توانی دارند. برای درصد دبی تبدالی جریان هایپریک (Q_p) در مقابل عدد رینولدز (Re) و همبستگی در سرریز پلکانی یک پله ۹۴، در دو پله ۸۵ و در سه پله ۹۶ درصد بین آن‌ها برقرار است.



(الف)



آمده درصد دبی تبدالی در مقابل عدد رینولدز دارای ضریب همبستگی ۹۴ درصد برای سرریز گابیونی یک پله، ۸۵ درصد برای دو پله و ۹۶ درصد برای سه پله بود.

به دست آمد که از رابطه به دست آمده می توان تخمین مناسبی از زمان ماند ارائه داد.

- با بررسی پارامتر درصد دبی های تبدالی مشاهده شد که در تمامی حالتها با افزایش عدد رینولدز جریان مقدار درصد دبی تبدالی جریان هایپریک روند کاهشی داشت که رابطه توانی به دست

منابع

- Boulton AJ, Findlay S, Marmonier P, Stanley EH, Valett HM. 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29: 59–81.
- Cardenas MB, Wilson JL. 2007. Exchange across a sediment–water interface with ambient groundwater discharge. *Journal of Hydrology* 346: 69–80. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.019>.
- Chanson, H. (2009), Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results, *Eur. J. Mech. B., Fluids*, 28(2), 191–210.
- Edwards RT. 1998. The hyporheic zone. In *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*, Naiman RJ, Bilby RE (eds). Springer-Verlag: New York; 399–429.
- Elliott A. Brooks NH. 1997b. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: theory. *Water Resources Research* 33: 123–136.
- Elliott, A.H., Brooks, N.H., 1997. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed form: Laboratory experiment. 33(1): 137-51.
- Endreny, T., Lautz, L., Siegel, D. I. 2011a. Hyporheic flow path response to hydraulic jumps at river steps: Flume and hydrodynamic models. *Water Resources Research*. 47: W02517. DOI, 10.1029/2009WR008631.
- Fanelli RM, Lautz L. 2008. Patterns of water, heat, and solute flux through streambeds around small dams. *Ground Water* 46: 671–687.
- Gooseff, M. N., J. K. Anderson, S. M. Wondzell, J. LaNier, and R. Haggerty (2006), A modeling study of hyporheic exchange pattern and the sequence, size and spacing of stream bedforms in mountain stream networks, Oregon, USA, *Hydrol. Proc.*, 20(11), 2443–2457.
- Harvey JW, Bencala KE. 1993. The effect of streambed topography on surface–subsurface water exchange in mountain catchments. *Water Resources Research* 29: 89–98.
- Hester ET, Doyle MW. 2008. In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange. *Water Resources Research* 44: W03417.
- Kaser, D. H.; Binley, A.; Heathwaite, A. L.; Krause, S. Spatiotemporal variations of hyporheic flow in a riffle-step-pool sequence. s. I. *Hydrol. Proc.*, 2009, pp. 23(15), 2138–2149.
- Kasahara, T., and S. M. Wondzell (2003), Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams, *Water Resour. Res.*, 39(1), 1005, doi:10.1029/2002WR001386.
- Lautz, L. K., and D. I. Siegel (2006), Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D, *Adv. Water Resour.*, 29, 1618–1633.
- Marion A, Bellinello M, Guymer I, Packman AI. 2002. Effect of bed form geometry on the penetration of nonreactive solutes into a streambed. *Water Resources Research* 38: 1209. DOI: 10.1029/2001WR000264.
- Marzadri, A., Tonia, D., Bellin, A., Vignoli, G and Tubino, M. Semianalytical analysis of hyporheic flow induced by alternate bars. *Water Resour. Res.*, 2010. Vols. 46, W07531. Doi: 10.1029/2009WR008285.
- Movahedi, N., Dehghani, A.A., Trat, N., Meftah Halqi, M. Laboratory and numerical study of hyperic exchange in the presence of pool and riffle bed form. 2019. *J. Echo Hydrology*, Vol. 6(1), pp. 191-204.



Movahedi, N.; Dehghani, A.A.; Schmidt, C.; Trat, N.; Pasternack, G.B.; Stewardson, M.J.; Meeftah Halghi, M. Hyporheic exchanges due to channel bed and width undulations. 2021, *Water res*, Vol. 149(2), p. 103857. doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103857.

O'Connor, B. L. and Harvey, J. W. Scaling hyporheic exchange and its influence on biogeochemical reactions in aquatic ecosystems. 2008, *Water Resour. Res.*, Vols. W12423, p.44. doi:10.1029/2008WR00716.

Packman, A., Salehin, M. and Zaramella, M. Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. *J. Hydraul. Eng.*, 2004. pp. 130(7), 647–656.

Stanford JA, Lorang MS, Hauer FR. 2005. The shifting habitat mosaic of river ecosystems. *Travaux Association internationale de Limnologie theorique et appliquee* 29: 123–136.

Stanford JA. 2006. Landscapes and riverscapes. In *Methods in Stream Ecology*, 2nd edn, Hauer R, Lamberti GA (eds). Academic Press: Burlington, MA, USA; 3–21.

Tonina D, Buffington JM. 2007. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: laboratory experiments and threedimensional modeling. *Water Resources Research* 43: W01421. DOI: 10.1029/2005WR004328.

Tonina D, Buffington JM. 2009a. Hyporheic exchange in mountain rivers I: mechanics and environmental effects. *Geography Compass* 3: 1063–1086.

Tonina D, Buffington JM. 2009. A three-dimensional model for analyzing the effects of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66: 2157–2173.

Tonina D. 2005. Interaction between river morphology and intra-gravel flow paths within the hyporheic zone. Unpublished Ph.D. dissertation, University of Idaho, Boise, ID: 129 pp.

Trauth, N, Schmidt, C, Vieweg, M, Oswald, S.E. 2015. Hydraulic controls of in-stream gravel bar hyporheic exchange and reaction. *Fleckenstein JHJWRR*, Vol. 51(4), pp. 2243-63.

Tsutsumi, D., Laronne, J.B., 2017. *Gravel-Bed River. Process and Disasters*: John Wiley & Sons.

Vaux, W. 1968. Intragavel flow and interchange of water in a streambed. *Fishery Bulletin* 66: 479–489.

Whiting, P. J., Stamm, J. F., Moog, D. B., Orndorff, R. L. 1999. Sedimenttransporting flows in headwater streams. *Geological Society of American Bulletin*. 111(3): 450-466