



## Numerical Solution of Free Surface Flow in Homogeneous Rockfill Dam under Non-hydrostatic Pressure Distribution Condition

Amir Gord-Noshahri<sup>1</sup>, Ebrahim Amiri Tokaldany<sup>2✉</sup>, Mohammad Sedghi-Asl<sup>3</sup>

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: [agnoshahri@ut.ac.ir](mailto:agnoshahri@ut.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: [amiri@ut.ac.ir](mailto:amiri@ut.ac.ir)

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran, Email: [msedghi@yu.ac.ir](mailto:msedghi@yu.ac.ir)

---

---

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** July. 13, 2022

**Revised:** Aug. 21, 2022

**Accepted:** Sep. 20, 2022

**Published online:** Nov. 22, 2022

**Keywords:**

Rockfill Dam,  
Non-Darcy Flow,  
Longitudinal Profile Of Water  
Surface,  
Non-Hydrostatic Pressure  
Distribution.

Due to environmental considerations, application of rockfill in designing of hydraulic structures, such as rockfill dams is increased. According to hydraulic principles, by increasing water surface and bed slope as well as significant curvature of streamlines, the vertical pressure distribution is deviated from hydrostatic state. Therefore, because of severe energy loss and big difference between upstream and downstream water surface elevation in rockfill porous media, pressure distribution is expected to be non-hydrostatic. In this study, using the distribution of non-hydrostatic pressure, the energy equation and considering the quadratic form of friction loss for non-Darcy flows, the equation representing the longitudinal profile of the water surface inside the rockfill dam is presented. In order to check the accuracy of this equation, experiments on homogeneous rockfill dams consisting of round river materials with average diameters of 1.68, 2.27, 4.07 and 4.84 cm and in two lengths of dams (50 and 100 cm), were performed in the hydraulic laboratory of the Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran. Numerical solution of the equation representing the free surface flow inside the rockfill dam in comparison with the laboratory observations show that the equation is well able to calculate the longitudinal profile of the water surface in rockfill dams at low and high discharges. Statistical analysis of the results shows that the average relative error of estimates is 3.96%.

---

Cite this article: Gord-Noshahri, A., Amiri Tokaldany, E., Sedghi-Asl, M. (2022) Numerical solution of free surface flow in homogeneous rockfill dam under non-hydrostatic pressure distribution condition, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345220.669318>, 53 (9), 2175-2190.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345220.669318>



## حل عددی نیمرخ طولی سطح آب سد سنگریزه‌ای همگن در شرایط توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک

امیر گرد نوشهری<sup>۱</sup>، ابراهیم امیری تکلدانی<sup>۲\*</sup>، محمد صدقی اصل<sup>۳</sup>۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: [agnoshahri@ut.ac.ir](mailto:agnoshahri@ut.ac.ir)۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: [amiri@ut.ac.ir](mailto:amiri@ut.ac.ir)۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران، ایمیل: [mseidghi@yu.ac.ir](mailto:mseidghi@yu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	استفاده از سنگریزه‌ها در طراحی سازه‌های آبی نظیر سدهای سن‌گریزه‌ای، با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی روز به روز به افزایش است. مطابق مبانی هیدرویک، با افزایش شیب سطح آب و بستر و یا ایجاد انحنای قابل ملاحظه در خطوط جریان، توزیع فشار عمودی از حالت هیدرواستاتیک خارج می‌شود. در نتیجه در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای به دلیل افت شدید انرژی و اختلاف زیاد بین تراز آب بالادست و پایین دست محیط، توزیع فشار از نوع غیر هیدرواستاتیک مورد انتظار است. در این تحقیق با استفاده از رابطه نحوه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک، معادله انرژی و با در نظر گرفتن رابطه افت اصطکاک در محیط‌های سنگریزه‌ای، یک رابطه برای تعیین نیمرخ طولی سطح آب در داخل سدهای سنگریزه‌ای ارائه شده است. به منظور بررسی صحت معادله، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران بر روی یک سد سنگریزه‌ای همگن متشکل از مصالح سنگریزه‌ای رودخانه‌ای گرد گوشه با قطر متوسط ۱/۶۸، ۲/۲۷، ۴/۰۷ و ۴/۸۴ سانتی‌متر و در دو طول سد سنگریزه‌ای ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر، مورد استفاده قرار گرفت. حل عددی معادله معرف تغییرات سطح آزاد جریان در داخل سد سنگریزه‌ای و مقایسه نتایج با مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل به خوبی قادر به محاسبه نیمرخ طولی سطح آب، توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک،
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۲۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۵/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۹	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۱	
واژه‌های کلیدی: سد سنگریزه‌ای، جریان غیر داری، نیمرخ طولی سطح آب، توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک.	

استناد: گرد نوشهری، امیر، امیری تکلدانی، ابراهیم، صدقی اصل؛ محمد، (۱۴۰۱) حل عددی نیمرخ طولی سطح آب سد سنگریزه‌ای همگن در شرایط توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۹)، ۲۱۹۰-۲۱۷۵.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345220.669318>

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

ملاحظات زیست محیطی موجب شده است که در طراحی سازه‌های کنترل سیلاب در مسیر رودخانه‌ها، استفاده از سازه‌های تشکیل شده از محیط متخلخل به طور گسترده‌ای مورد استقبال مهندسان رودخانه قرار گیرد. این سازه‌ها بر اساس ابعاد مصالح تشکیل دهنده بخش جامد به دو دسته درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم شده، هیدرولیک جریان در هر کدام از آن‌ها متفاوت بوده و جریان در آن‌ها به ترتیب غیرآرام و آرام است. قانون دارسی در محدوده شرایط جریان آرام معتبر بوده و با افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش اثر نیروی اینرسی نسبت به نیروی لزجت، دیگر معادله مذکور مبین هیدرولیک جریان نخواهد بود. به عبارت دیگر در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه که سرعت جریان زیاد بوده و حتی در محیط‌های متخلخل ریزدانه‌ای که سرعت جریان زیاد است (نظیر ناحیه اطراف چاه‌ها)، جریان از نوع غیرآرام بوده و رابطه بین گرادیان فشار و سرعت ظاهری از نوع غیرخطی می‌باشد. جریان در این شرایط تحت عنوان جریان غیرخطی، جریان غیردارسی یا جریان با عدد رینولدز بالا در محیط متخلخل نامیده می‌شود.

از جمله سازه‌های دارای محیط متخلخل، سدهای تاخیری سنگریزه‌ای هستند که آب را در زمان سیلابی کنترل کرده و به تدریج پس از فروکش کردن سیل با دبی مطمئنی جریان را آزاد و باعث کاهش خطرات سیل در پایین دست می‌گردند. معمولاً این نوع سدها به منظور تاخیر، پخش و حداقل نمودن خطرات سیلاب طراحی و اجرا می‌شوند. از جمله پارامترهای مهم هیدرولیکی این سازه‌ها می‌توان به افت اصطکاک و نیمرخ آزاد سطح آب در طول سد سنگریزه‌ای اشاره کرد. در خصوص تعیین مقدار افت اصطکاک در شرایط غیردارسی، تحقیقات متعددی انجام شده که در مطالعات (Hansen, 1981)، (Hannoura & Barends, 1972)، (Bear, 1969)، (Ahmed & Sunada, 1969)، (Li et al., 1995)، (Sedghi-Asl et al., 2014) و (Tayyebi & Amiri Tokaldany, 2016) تعدادی از روابط بدست آمده توسط محققین ارائه شده است. این در حالی است که به نیمرخ آزاد سطح آب کمتر پرداخته شده است. نیمرخ آزاد سطح آب در سدهای سنگریزه‌ای به دو علت مورد توجه است (Hansen, 1992):

- ۱- عمق جریان خروجی از سد سنگریزه‌ای، معرف مقداری از وجه پایین دست است که به ازای یک دبی مشخص مستغرق می‌شود. اگر برای دبی حداکثر مورد نظر در طراحی، مقدار ارتفاع خروجی محاسبه شده کوچک باشد، طول نشت کوتاه بوده و پتانسیل فرسایش ذرات سنگریزه در وجه پایین دست سد کم می‌باشد.
- ۲- شکل سطح آزاد یکی از شرایط مرزی مورد نیاز برای مدل‌سازی فشار حفراهی است. با دانستن موقعیت سطح آزاد، محاسبه فشار حفراهی ساده می‌شود.

برای محاسبه نیمرخ سطح آب در جریان متغیر تدریجی در آبراهه‌های روباز از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)،  $y$ ، عمق جریان (m)؛  $x$ ، فاصله در راستای جریان (m)؛  $S_0$ ، شیب بستر آبراهه (-)؛  $S_f$ ، شیب خط انرژی (-) و  $Fr$ ، عدد فرود جریان (-) است. در استخراج رابطه (۱) فرض شده است که جریان ماندگار، توزیع فشار هیدرواستاتیک، آبراهه منشوری، شیب بستر آبراهه ناچیز و ضریب تصحیح انرژی معادل ۱ می‌باشد.

اگرچه تئوری جریان متغیر تدریجی معمولاً در جریان آبراهه‌های روباز به کار می‌رود اما اولین بار (Wilkins, 1955) از آن برای مدل‌سازی نیمرخ آزاد سطح آب در سدهای سنگریزه‌ای استفاده کرد. وی عدد فرود جریان در محیط‌های متخلخل را به صورت رابطه زیر باز تعریف کرد.

$$Fr_p = \left( \frac{Q^2 T}{n^2 g A^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن  $Q$ ، دبی جریان ( $m^3/s$ )؛  $g$ ، شتاب گرانش زمین ( $m/s^2$ )؛  $A$ ، سطح مقطع جریان ( $m^2$ )؛  $T$ ، عرض فوقانی جریان (m) و  $n$ ، تخلخل محیط (-) است. با قرار دادن شکل توانی رابطه گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان در محیط‌های متخلخل به جای عبارت شیب خط انرژی در رابطه (۱)، (Wilkins, 1955) این معادله را به روش گام به گام مستقیم و با فرض مقداری برای عمق خروجی، به سمت بالادست حل کرد و نیمرخ سطح آب را به دست آورد. (Parkin, 1963) نیز از روش جریان متغیر تدریجی استفاده کرد و نشان داد که تطابق خوبی بین سطوح آزاد مشاهده‌ای و محاسباتی وجود دارد. تنها ابتکار پیشنهادی (Wilkins, 1955) و (Parkin, 1963)، جایگذاری عبارت گرادیان هیدرولیکی جریان عبوری از محیط متخلخل به جای عبارت شیب خط انرژی در آبراهه روباز بود.

Basak (1976) با در نظر گرفتن شکل دو جمله‌ای درجه دوم رابطه گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان و بر اساس فرض دوپویی و همچنین در نظر گرفتن شیب کف صفر، ناچیز بودن بار سرعت و منشوری و مستطیلی بودن آبراهه، رابطه (۱) را به صورت تحلیلی حل کرده و رابطه زیر را برای به دست آوردن نیمرخ سطح آب در داخل محیط‌های متخلخل درشت دانه ارائه کرد (به نقل از Hansen, 1992):

$$L - x = \frac{b}{a^2}(y_L - y) + \frac{y^2 - y_L^2}{2aq} + \frac{b^2q}{a^3} \text{Ln} \left( \frac{ay + bq}{ay_L + bq} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)،  $q$ ، دبی در واحد عرض ( $m^2/s$ )؛  $y_L$ ، عمق جریان در انتهای محیط متخلخل ( $m$ )؛  $x$ ، فاصله از ابتدای محیط متخلخل ( $m$ )؛  $L$ ، طول محیط متخلخل ( $m$ ) و  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت رابطه دو جمله‌ای درجه دوم بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان است. Stephenson (1979) با فرض شیب صفر برای کف فلوم، عمق بحرانی به عنوان عمق خروجی و در نظر گرفتن رابطه توانی درجه دو بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان و در نهایت جایگذاری آن به جای  $S_f$  در رابطه (۱)، حل تحلیلی نیمرخ سطح آب را به صورت زیر ارائه کرد:

$$\frac{3(1-n)}{K_t^2 n D_{50}} (L - x) = \left( \frac{y}{y_c} \right)^3 - 3 \text{Ln} \left( \frac{y}{y_c} \right) - 1 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که  $K_t$ ، ضریب تجربی معادل  $0.75$  برای سنگریزه‌های گوشه‌دار و  $y_c$ ، عمق بحرانی ( $m$ ) در انتهای محیط متخلخل است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$y_c = \left( \frac{q^2}{gn^2} \right)^{1/3} \quad \text{رابطه (۵)}$$

Hansen (1992)، روش Basak (1976) را با در نظر گرفتن بار سرعت در معادله انرژی که در عبارت عدد فرود رابطه (۱) ظاهر می‌شود، اصلاح کرد و معادله زیر را برای نیمرخ سطح آب به دست آورد:

$$L - x = \frac{b}{a^2}(y_L - y) + \frac{y^2 - y_L^2}{2aq} + \frac{b^2q}{a^3} \text{Ln} \left( \frac{ay + bq}{ay_L + bq} \right) + \frac{1}{gn^2 b} \text{Ln} \left( \frac{y_L}{y} \cdot \frac{ay + bq}{ay_L + bq} \right) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این معادله چون اثر بار سرعت در معادله انرژی لحاظ شده است، یک عبارت از رابطه Basak (1976) بیشتر دارد و از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین چون از شکل درجه دوم رابطه گرادیان هیدرولیکی استفاده شده است، قابلیت استفاده برای جریان‌های با سطح تلاطم کم را نیز دارا خواهد بود. در حالیکه رابطه Stephenson (1979) تنها برای جریان‌های کاملاً غیرآرام توسعه یافته است. Hansen (1992) صحت سه رابطه ارائه شده فوق برای نیمرخ سطح آب را با نتایج آزمایشگاهی خود مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد. در این آزمایشات یک سد سنگریزه‌ای با سطوح بالادست و پایین دست شیب‌دار مورد استفاده قرار گرفت و عمق خروجی معادل عمق بحرانی (رابطه (۵)) در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که:

- ۱- فرض عمق خروجی معادل عمق بحرانی، تنها در دبی‌های نسبتاً کم صادق است.
  - ۲- صحت هر سه روش با افزایش دبی، کاهش می‌یابد و مقدار سطح آب را بسیار بیشتر برآورد می‌کنند.
  - ۳- روش Stephenson (1979) نتایج بهتری را در مقایسه با دو روش دیگر ارائه می‌کند و دو روش Basak (1976) و Hansen (1992) که از شکل درجه دوم رابطه گرادیان هیدرولیکی استفاده کرده‌اند، نتایج تقریباً یکسانی را حاصل می‌کنند. به عبارتی دیگر تاثیر لحاظ کردن بار آبی سرعت، ناچیز است زیرا مقادیر بار آبی سرعت در مقایسه با عمق جریان بسیار اندک می‌باشد.
- در سه روش فوق با وجود اصلاحات در نظر گرفته شده، همچنان فرضیات محدود کننده‌ای وجود دارد. این فرضیات عبارتند از: (۱) برقراری فرض دوپویی و در نتیجه ناچیز بودن شیب سطح آب، (۲) ناچیز بودن شیب بستر و (۳) منشوری و مستطیلی بودن مقطع عرضی جریان.

Hosseini (1997) به منظور رفع دو محدودیت دوم و سوم فوق، با فرض برقراری شرایط دوپویی، معادله (۱) را برای مقاطع غیرمنشوری، غیرمستطیلی و دارای شیب بستر قابل ملاحظه، به صورت عددی حل کرد. وی فرض کرد که عمق خروجی در صورت کمتر بودن عمق کانال پایاب از عمق بحرانی در داخل محیط متخلخل، برابر عمق بحرانی است و در غیر این صورت معادل عمق پایاب می‌باشد. نتایج حل عددی به روش فوق با مقادیر حاصل از حل تحلیلی با استفاده از روش Hansen (1992)، رضایت بخش بودند.

Bari & Hansen (2003) مدل هیدرولیکی <sup>۱</sup>FABS را برای شبیه سازی نیمرخ طولی سطح آب در جریان‌های غیرداریسی یک بعدی توسعه دادند. در این مدل فرض می‌شود که رفتار جریان عبوری از درون محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای مشابه جریان عبوری از درون کانال‌های روباز است، با این تفاوت که نیمرخ طولی جریان تابعی از زبری بستر نیست، بلکه مشخصات فیزیکی سنگریزه‌ها بر روی جریان تأثیرگذار هستند. برای این منظور دو شمای حل عددی حل جریان متغیر تدریجی (شمای Prasad و روش گام به گام استاندارد) در کانال‌های روباز به منظور انعکاس خصوصیات خاص جریان غیرداریسی اصلاح گردید. مدل از معادلات Wilkins (1955) و Stephenson (1979) برای محاسبه تلفات بار آبی استفاده می‌کند و نتایج نشان داد که هر دو معادله به خوبی برای شبیه سازی نیمرخ‌های آزمایشگاهی سطح آب عمل می‌کنند. عملکرد مدل با استفاده از روش‌های مختلف میانگین‌گیری شیب اصطکاکی نیز ارزیابی شد و ملاحظه شد که اختلاف قابل ملاحظه‌ای در نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مختلف وجود ندارد.

Bazargan & Shoaei (2006) با استخراج داده‌های سطح آب نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در تحقیق Bari & Hansen (2003) و فرض برقراری شرایط هیدرواستاتیک اقدام به محاسبه گرادیان هیدرولیکی و سرعت ظاهری در هر مقطع از جریان کردند و نتایج را با نتایج معادلات Wilkins (1955) و Stephenson (1979) مقایسه کردند. با توجه به اختلاف قابل ملاحظه بین این نتایج در مجموع روش توسعه یافته توسط این محققین را زیر سوال بردند.

Bazargan & Shoaei (2010) با توجه به سادگی و قابلیت در نظر گرفتن اهم عوامل موثر در جریان، از تئوری جریان متغیر تدریجی در تحلیل جریان غیرداریسی استفاده کردند. در این تحقیق نیز مشابه Bari & Hansen (2003) معادله جریان متغیر تدریجی در کانال‌های روباز با استفاده از جایگزینی رابطه‌ای به فرم دو جمله‌ای فرشه‌ایم برای شیب خط انرژی که در این تحقیق توسعه یافت، به صورت عددی حل گردید و نیمرخ طولی سطح آب به دست آمد. نتایج نشان دادند که همخوانی بین نیمرخ‌های محاسباتی و مشاهداتی به جز در انتهای محیط متخلخل، مناسب است. علت عدم همخوانی نیمرخ‌ها در انتهای محیط متخلخل به دلیل معنی‌داری شیب خطوط جریان، تشخیص داده شد.

Soualmia *et al.* (2015)، با در نظر گرفتن شیب بستر و همچنین برقراری فرض دوپویی، رابطه (۱) را برای یک آبراهه مستطیلی و منشوری به صورت تحلیلی حل کردند. این محققان برای شیب خط انرژی از رابطه دو جمله‌ای درجه دوم استفاده کردند و با بی‌بعد سازی پارامترهای محیط متخلخل بر اساس عمق بحرانی (رابطه (۵)) و همچنین در نظر گرفتن عمق ابتدای محیط متخلخل به عنوان شرایط اولیه، در نهایت رابطه تحلیلی معرف نیمرخ آزاد سطح آب را ارائه نمودند.

Chabokpour & Amiri Tokaldany (2018) با استفاده از حل عددی معادله جریان متغیر تدریجی در کانال‌های روباز به روش‌های اوپلر، اوپلر اصلاح شده و رانگ کوتا مرتبه ۴ اقدام به مدل‌سازی نیمرخ طولی جریان در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده، کردند. در این پژوهش از رابطه Wilkins (1955) برای محاسبه شیب خط انرژی و استفاده از آن در حل عددی معادله جریان متغیر تدریجی استفاده گردید. نتایج نشان دادند که روش رانگ کوتا مرتبه ۴ با وجود اینکه بهترین برآورد از نیمرخ طولی سطح آب را حاصل می‌کند، اما در مناطق نزدیک به خروجی جریان از محیط متخلخل، به دلیل شیب زیاد نیمرخ طولی، خطای محاسبات افزایش می‌یابد.

باید توجه داشت که روابط گرادیان هیدرولیکی استفاده شده، برای جریان‌های یک بعدی هیدرواستاتیک که نرخ تغییر بار پیرومتری در طول محیط متخلخل، معادل گرادیان هیدرولیکی است، توسعه یافته‌اند. این فرض که به عنوان فرض دوپویی شناخته می‌شود، زمانی تقریب خوبی از گرادیان هیدرولیکی را حاصل خواهد کرد که شیب سطح آب ناچیز باشد. در این حالت شیب سطح آب، گرادیان هیدرولیکی و شیب خط انرژی یکسان خواهند بود. اما با توجه به شیب زیاد سطح آب در حین عبور از داخل محیط متخلخل سنگریزه‌ای و انحنا قابل توجه خطوط جریان، خصوصاً در بخش انتهایی، انتظار می‌رود که توزیع فشار از نوع هیدرواستاتیک نباشد و لذا نیاز است که معادلات نیمرخ سطح آب بر این اساس بازنگری شوند. Gord-Noshahri *et al.* (2019) ارزیابی و تحلیل حساسیت معادلات افت اصطکاکی جریان با سطح آزاد درون محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای را در شرایط توزیع عمودی فشار غیرهیدرواستاتیک انجام دادند. در این مطالعه با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک محیط متخلخل به طول ۱ متر و شامل سه نوع سنگریزه با قطرهای متوسط ۱/۶۸، ۲/۲۷ و ۴/۸۴ سانتی‌متر و در دو دمای متفاوت آب به بررسی درستی برآورد مقدار افت انرژی جریان توسط معادلات مختلف جریان غیرداریسی پرداخته شده است. با افزایش دبی و تجاوز زاویه سطح آب از ۶ درجه، اختلاف بین عمق آب و فشار پیرومتری افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس تحلیل آماری،

مناسب‌ترین معادله افت اصطکاکی در جریان غیرداریسی با سطح آزاد، معادله Li *et al.* (1998) معرفی شد به طوری که خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و تابع هدف نرمال شده (NOF) آن در برآورد گرادیان هیدرولیکی نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۱۴۵ و ۰/۰۲۲ می‌باشد. تحلیل حساسیت نشان داد که معادلات Li *et al.* (1998) و Stephenson (1979) کمترین حساسیت را به پارامترهای ورودی دارند و به ترتیب تخلخل، سرعت ظاهری جریان، قطر متوسط ذرات، لزجت سینماتیک بیشترین تاثیر را بر نتایج دارند. Gord-Noshahri *et al.* (2017) توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک جریان با سطح آزاد در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای را مطالعه و با استفاده از تئوری پای باکینگهام و تحلیل رگرسیون، رابطه زیر را برای نیمرخ طولی سطح آب در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای ارائه نمودند:

$$y = \left[ 1 - 0.141 \left( \frac{x}{L} \right) - 1.735 \left( \frac{x}{L} \right)^2 + 2.103 \left( \frac{x}{L} \right)^3 - 1.225 \left( \frac{x}{L} \right)^4 \right] [y_0 - y_L] + y_L \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن  $y_0$  عمق جریان در ابتدای محیط متخلخل (m) است. همچنین با استفاده از معادله اولر و با در نظر گرفتن اثرات شیب زیاد و انحنای عمودی خطوط جریان، رابطه توزیع فشار عمودی در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای در شرایط غیرهیدرواستاتیک به صورت زیر به دست آمد.

$$\left( \frac{p}{\gamma} \right)_{z_s} = \frac{z_\eta - z_s}{1 + y'^2} + \frac{q^2 y''}{g y^3 n^2 (1 + y'^2)} \left( \frac{z_\eta^2 - z_s^2}{2} \right) \quad \text{(رابطه ۸)}$$

که  $z_s$  موقعیت عمودی خط جریان مفروض،  $z_\eta$  تراز سطح آب و  $y'$  و  $y''$  به ترتیب مشتق اول و دوم سطح آب است. با قرار دادن  $z_s = z_b$  در رابطه فوق و ساده سازی، رابطه زیر برای فشار وارد بر بستر به دست می‌آید:

$$\left( \frac{p}{\gamma} \right)_{z_b} = \frac{y}{1 + y'^2} + \frac{q^2 y''}{2 g y n^2 (1 + y'^2)} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان داد که نیمرخ طولی فشار وارد بر کف در محیط متخلخل سنگریزه‌ای با قطر متوسط ذرات ۱/۶۸ سانتی‌متر و دو طول ۰/۵ و ۱/۰ متری تطابق خوبی با رابطه ارائه شده دارد، به طوری که خطای نسبی بین ۵/۳- تا ۸/۲ درصد متغیر و مقدار متوسط قدرمطلق خطای نسبی آن برابر با ۱/۷۱ درصد می‌باشد.

به طوری که ملاحظه می‌گردد، تمرکز اصلی در اکثر مطالعات انجام شده در خصوص نیمرخ سطح آب در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای بر روی فرض هیدرواستاتیک بودن جریان بوده است. لذا در این تحقیق سعی شده که نیمرخ سطح آزاد آب در شرایط غیرهیدرواستاتیک بررسی و تحلیل گردد.

## مواد و روش‌ها

### تئوری مسئله

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، محققان مختلف با در نظر گرفتن شرایط جریان ماندگار متغیر تدریجی، سعی در ارائه روابطی برای تخمین موقعیت سطح آزاد در سدهای سنگریزه‌ای کردند. فرض اولیه در توسعه این روابط، تغییرات اندک شیب سطح آب و در نتیجه هیدرواستاتیک بودن فشار در داخل جریان است. در حالی که با توجه به شیب زیاد سطح آب و همچنین انحنای خطوط جریان در داخل سدهای سنگریزه‌ای خصوصاً در قسمت انتهایی آن، چنین شرایطی برقرار نخواهد بود.

بر اساس نتایج Hansen (1992) در خصوص بررسی دقت روابط به دست آمده بر اساس فرضیات جریان متغیر تدریجی، مشخص گردید که صحت برآورد چنین معادلات تخمین نیمرخ آزاد سطح آب، با افزایش دبی کاهش می‌یابد. به عبارتی چون در آزمایشات صحت سنجی صورت گرفته، طول سد سنگریزه‌ای ثابت بوده است، با افزایش دبی میزان اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست سد نیز افزایش یافته و در نتیجه در مجموع شیب سطح آب در داخل محیط سنگریزه‌ای زیاد شده و ضمن غیرهیدرواستاتیک شدن توزیع فشار، شرایط جریان متغیر تدریجی نیز دیگر برقرار نبوده است.

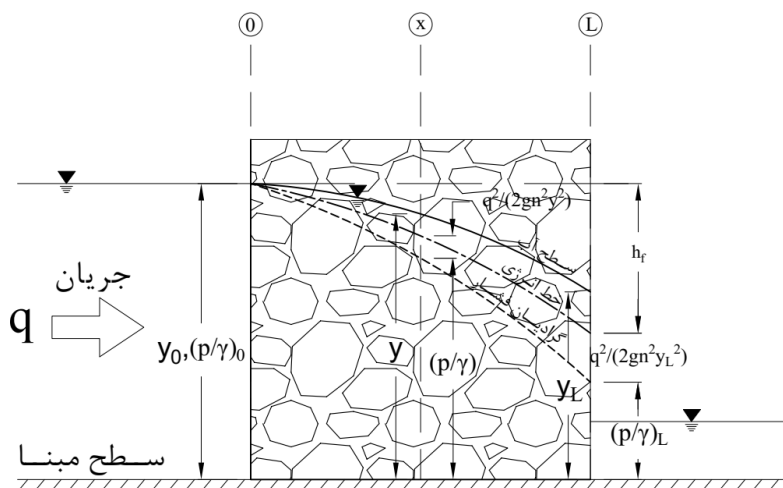
برای این منظور در ادامه با استفاده از رابطه توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک به دست آمده در تحقیق Gord-Noshahri *et al.* (2017) (رابطه ۹)) و همچنین معادله انرژی، سعی در ارائه روشی برای محاسبه نیمرخ واقعی سطح آب شده است.

بر اساس رابطه برنولی برای جریان دائمی یک سیال تراکم ناپذیر، انرژی مخصوص جریان با سطح آزاد در یک محیط متخلخل با بستر افقی به صورت زیر تعریف می‌شود (شکل ۱):

$$E = \frac{p}{\gamma} + \frac{q^2}{2gn^2y^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که  $E$ ، بار آبی کل جریان  $(m)$ ؛  $p/\gamma$ ، بار آبی معادل انرژی فشاری  $(m)$  و  $q^2/(2gn^2y^2)$ ، بار آبی معادل انرژی جنبشی جریان  $(m)$  است. گرادیان انرژی با مشتق‌گیری از رابطه (۱۰) در جهت طولی به دست می‌آید:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{d\left(\frac{p}{\gamma}\right)}{dx} - \frac{q^2}{gn^2y^3} \frac{dy}{dx} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$



شکل ۱- انرژی جریان آزاد غیرداری درون محیط متخلخل

عبارت سمت چپ رابطه (۱۱) معرف شیب خط انرژی است و با  $-S_f$  نمایش داده می‌شود. در سمت راست رابطه (۱۱) اولین عبارت معرف گرادیان فشار بوده و به همراه مقدار شیب بستر که در این تحقیق معادل صفر است، در مجموع گرادیان هیدرولیکی  $i$  نامیده می‌شود. عبارت دوم سمت راست رابطه (۱۱) معرف تغییرات بار سرعت در طول جریان است که به علت ناچیز بودن سرعت در محیط‌های متخلخل ریزدانه، عمدتاً قابل چشم‌پوشی می‌باشد. عبارت  $dy/dx$  نیز بیانگر شیب سطح آب بوده و با  $-S_w$  نشان داده می‌شود.

از آنجا که رابطه (۱۱) برای کل مقطع جریان بوده و در واقع سطح مبنا منطبق بر بستر مسطح و صلب سد سنگریزه‌ای در نظر گرفته شده است، لذا برای عبارت بار فشاری می‌توان از رابطه (۹) استفاده کرد. با مشتق‌گیری از رابطه (۹) نسبت به  $x$ ، می‌توان نوشت:

$$\frac{d\left(\frac{p}{\gamma}\right)}{dx} = \frac{y'(1+y'^2) - 2yy'y''}{(1+y'^2)^2} + \frac{yy'''(1+y'^2) - [y'(1+y'^2) + 2yy'y'']y''}{(1+y'^2)^2} - \frac{q^2}{2gn^2y^2} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

با توجه به وجود مشتقات مرتبه بالا در عبارت دوم سمت راست رابطه فوق به عنوان ضریب بار آبی سرعت، که هر دو در شرایط جریان درون محیط متخلخل سنگریزه‌ای دارای مقادیر کوچکی نسبت به عمق جریان هستند، می‌توان از این عبارت صرف‌نظر کرده و در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\frac{d\left(\frac{p}{\gamma}\right)}{dx} \approx \frac{y'(1+y'^2) - 2yy'y''}{(1+y'^2)^2} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

با جایگذاری رابطه (۱۳) در رابطه (۱۱) خواهیم داشت:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{y'(1+y'^2) - 2yy'y''}{(1+y'^2)^2} - \frac{q^2}{gn^2y^3} y' \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

با فرض برقراری رابطه دو جمله‌ای درجه دوم بین افت انرژی و سرعت در محیط متخلخل سنگریزه‌ای، به صورت زیر:

$$\frac{dE}{dx} = -i = aV + bV^2 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

و جایگذاری آن در رابطه (۱۴) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$-aV - bV^2 = \frac{y'(1+y'^2) - 2yy'y''}{(1+y'^2)^2} - \frac{q^2}{gn^2y^3} y' \quad \text{رابطه ۱۶}$$

از آنجا که بر اساس معادله پیوستگی جریان،  $V=q/y$  می‌باشد، می‌توان نوشت:

$$-a\frac{q}{y} - b\frac{q^2}{y^2} = \frac{y'(1+y'^2) - 2yy'y''}{(1+y'^2)^2} - \frac{q^2}{gn^2y^3} y' \quad \text{رابطه ۱۷}$$

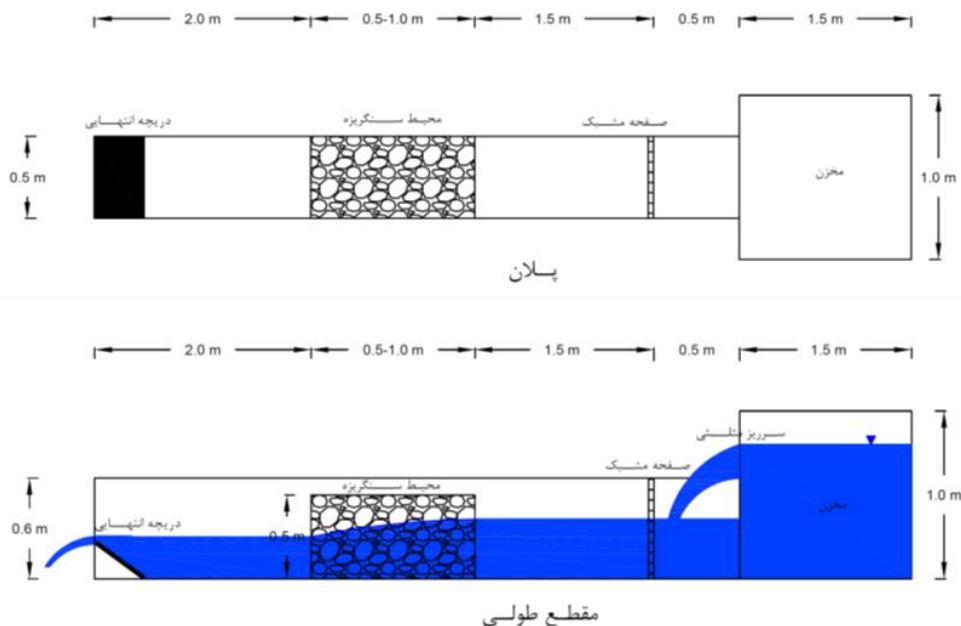
با مرتب سازی این رابطه در نهایت معادله دیفرانسیلی زیر بدست می‌آید:

$$y'' = \frac{1+y'^2}{2y} + \frac{aq(1+y'^2)^2}{2y^2y'} + \frac{bq^2(1+y'^2)^2}{2y^3y'} - \frac{q^2(1+y'^2)^2}{2gn^2y^4} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

این معادله دیفرانسیل معمولی از مرتبه دوم و غیرخطی می‌باشد و با حل آن بر اساس شرایط مرزی مشخص در بالادست یا پایین دست سد سنگریزه‌ای و همچنین مشخصات جریان و محیط متخلخل، نیمرخ آزاد سطح آب در سد سنگریزه‌ای در شرایط غیرهیدرواستاتیک بودن توزیع فشار به دست خواهد آمد.

### تجهیزات آزمایشگاهی

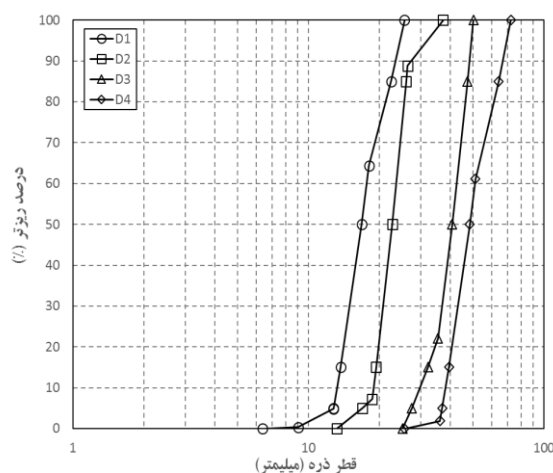
مجموعه آزمایش‌های این تحقیق در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و طول ۶ متر که در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران وجود دارد، انجام گرفت (شکل ۲). سرریز مثلثی موجود در ابتدای فلوم، وظیفه اندازه‌گیری دبی جریان را دارد. کف فلوم از جنس پلاکسی گلاس و دیواره‌ها از جنس شیشه است که امکان مشاهده جریان را فراهم می‌کند. ۲۴ پیزومتر با فواصل تقریبی ۸ سانتی‌متری در کف فلوم تعبیه شده است که برای ثبت نیمرخ طولی فشار استفاده می‌شوند. به منظور ایجاد محیط متخلخل سنگریزه‌ای، از محفظه‌ای با طول متغیر ۰/۵ و ۱/۰ متر، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر که از شبکه توری با منافذ مربعی ۱/۰ سانتی‌متری ساخته شده، استفاده گردید. وجه بالادست و پائین دست این محفظه به صورت عمودی بوده و وجود قاب فلزی در اطراف آن باعث شد که در طی آزمایشات شکل خود را حفظ کند.



شکل ۲- نمای پلان و نیمرخ طولی مدل آزمایشگاهی

۴ نوع سنگریزه مورد استفاده در این تحقیق از نوع مصالح رودخانه‌ای گرد گوشه با قطر متوسط ذرات برابر با ۱/۶۸، ۲/۲۷، ۴/۰۷ و ۴/۸۴ سانتی‌متر است که به ترتیب D-1، D-2، D-3 و D-4 نام‌گذاری شده‌اند (شکل ۳). مقدار متوسط تخلخل اندازه‌گیری شده برای این چهار نوع سنگریزه به ترتیب برابر با ۳۹/۱، ۳۹/۷، ۴۱/۱ و ۴۱/۸ درصد به دست آمد.





شکل ۳- منحنی دانه‌بندی سنگریزه‌های مورد استفاده

### روش انجام آزمایش‌ها

ابتدا محفظه برای طول مورد نظر محیط متخلخل (۰/۵ یا ۱/۰ متری) تنظیم شده و در داخل فلوم قرار می‌گرفت. پس از پر کردن محفظه با سنگریزه، جریان آب با دبی‌های مختلف از درون محیط متخلخل عبور داده شده و پس از متعادل شدن جریان و برقراری شرایط جریان ماندگار در فلوم، نیمرخ فشار در داخل بدنه و طرفین محفظه حاوی سنگریزه‌ها با استفاده از پیزومترهای موجود قرائت می‌شد. همچنین برای تعیین نیمرخ سطح آب در داخل محیط سنگریزه، از روش عکس برداری از دیواره کناری فلوم با استفاده از دوربین عکاسی استفاده شد. به این صورت که با استفاده از مازیک سطح آب بر روی دیواره شیشه‌ای کناری فلوم علامت‌گذاری گردیده و با دوربین عکاسی از آن عکس برداری و در نهایت با استفاده از نرم افزار Grapher رقومی‌سازی به عمل آمده است (شکل ۴).



شکل ۴- عکس دیواره کناری فلوم برای تعیین عمق جریان عبوری از داخل محیط متخلخل

برای اندازه‌گیری دمای آب در طی انجام آزمایش‌ها، از یک دما سنج جیوه‌ای با دقت ۰/۵ درجه که در داخل جریان قرار گرفته بود، استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### معادله افت انرژی

از آنجا که معادله افت انرژی در فرآیند محاسبه نیمرخ آزاد سطح آب در سد سنگریزه‌ای با استفاده از حل معادله (۱۸) مورد استفاده قرار می

گیرد و با توجه به اینکه در معادلات مختلف پیشین ارائه شده برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی و در نتیجه افت انرژی در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای، شرایط توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک بوده و اختلاف بین عمق جریان و عمق پیژومتری در محاسبه انرژی جریان و سرعت ظاهری در هر مقطع لحاظ نشده است، لذا در ادامه بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات این تحقیق سعی در توسعه روابطی به فرم رابطه بدست آمده توسط *Li et al.* (1998) که بر اساس نتایج *Gord-Noshahri et al.* (2019) بهترین نتایج را حاصل کرده است، خواهد شد.

برای این منظور معادله *Li et al.* (1998) با داده‌های مربوط به سد سنگریزه‌ای با طول ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر به صورت جداگانه با دو سوم داده‌های آزمایشگاهی واسنجی شده و ضرایب ثابت معادله بر اساس تحلیل رگرسیون به دست آمده و در نهایت درستی روابط ارائه شده با یک سوم باقیمانده داده‌ها مورد صحت سنجی قرار گرفت.

معادله واسنجی شده با ۱۷۷ داده مربوط به سد سنگریزه‌ای ۵۰ سانتی‌متری در نرم افزار SPSS به صورت زیر می‌باشد:

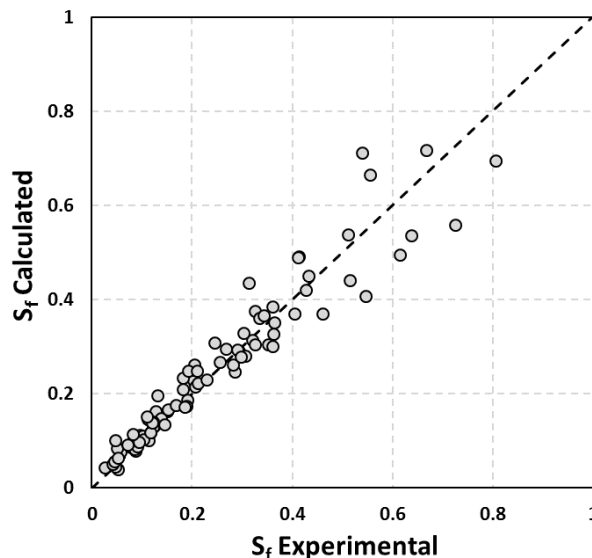
$$S_f = \frac{3.342}{gn^2 D_{50}} V^2 \quad R^2 = 0.922 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

و همچنین با واسنجی رابطه ارائه شده توسط *Li et al.* (1998) بر اساس ۶۰۰ داده سد سنگریزه‌ای ۱۰۰ سانتی‌متری رابطه زیر به

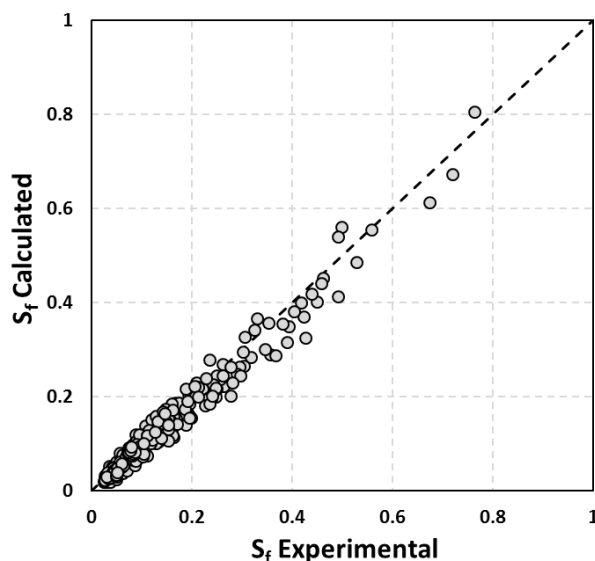
دست آمد:

$$S_f = \frac{1025.297 v}{gnD_{50}^2} V + \frac{3.648}{gn^2 D_{50}} V^2 \quad R^2 = 0.971 \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

که در این روابط  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات سنگریزه (m)؛  $v$  لزجت سینماتیک آب (m<sup>2</sup>/s) و  $V$  سرعت متوسط جریان در مقطع عرضی (m/s) است. جهت بررسی درستی هر یک از روابط (۱۹) و (۲۰) از یک سوم باقیمانده داده‌هایی که در فرآیند واسنجی به کار نرفتند، استفاده گردید. بر اساس تحلیل آماری خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میانگین خطای نسبی (MRE) رابطه (۱۹) به ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۱۶ بوده و برای رابطه (۲۰) به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۱۲ است. همچنین در شکل‌های ۵ و ۶ مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی افت انرژی دو رابطه (۱۹) و (۲۰) ترسیم شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود در مجموع روابط (۱۹) و (۲۰) از درستی قابل قبولی در برآورد افت انرژی در سدهای سنگریزه‌ای این تحقیق برخوردار می‌باشند.



شکل ۵- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی افت انرژی رابطه (۱۹)



شکل ۶- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی افت انرژی رابطه (۲۰)

### نیمرخ سطح آزاد آب

همان طور که اشاره شد با در نظر گرفتن گرادیان فشار غیرهیدرواستاتیک طبق رابطه (۱۳) و با در نظر گرفتن رابطه‌ای به شکل درجه دوم برای افت انرژی در محیط متخلخل سنگریزه‌ای، در نهایت یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم غیرخطی (رابطه (۱۸)) بدست آمده که معرف تغییرات سطح آزاد جریان آب در داخل سد سنگریزه‌ای می‌باشد. با اعمال تغییر متغیر  $z_1=y$  و  $z_2=y'$  در رابطه (۱۸)، دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول به شرح زیر بدست می‌آید:

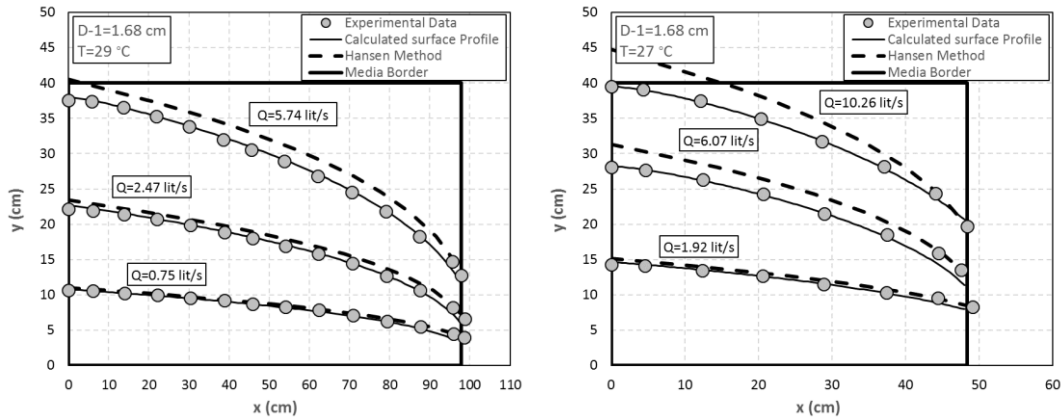
$$\begin{cases} z_1' = z_2 \\ z_2' = \frac{1+z_2^2}{2z_1} + \frac{aq(1+z_2^2)^2}{2z_1^2z_2} + \frac{bq^2(1+z_2^2)^2}{2z_1^3z_2} - \frac{q^2(1+z_2^2)^2}{2gn^2z_1^4} \end{cases} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

با حل عددی این دستگاه معادله، مقادیر عمق آب و شیب سطح آب در هر مقطع از سد سنگریزه‌ای به دست خواهد آمد. حل این دستگاه نیازمند دو شرط مرزی است که با توجه به شرایط مسئله تنها این دو شرط برای وجه بالادست سد مشخص می‌باشند. در وجه بالادست سد سنگریزه‌ای عمق آب مشخص بوده و همچنین می‌توان سطح آب را افقی در نظر گرفت و در نتیجه شیب سطح آب در بالادست معادل صفر خواهد بود. با این دو شرط مرزی و مشخص بودن ضرایب  $a$  و  $b$  رابطه افت انرژی در محیط متخلخل سنگریزه‌ای، نیمرخ طولی سطح آزاد آب در سد سنگریزه‌ای با استفاده از روش رانگ-کوتا-فلبرگ به صورت عددی حل خواهد شد.

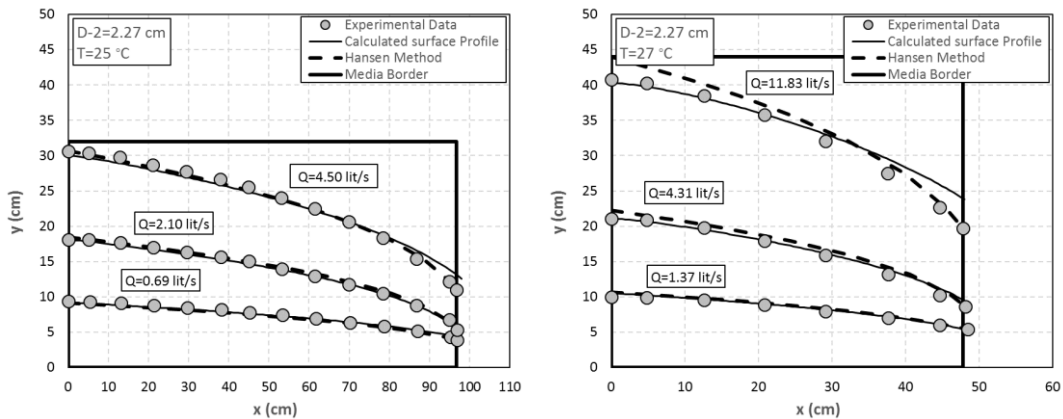
با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) که در بخش قبل برای محاسبه افت انرژی به ترتیب در سد ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری به دست آمد، ضرایب  $a$  و  $b$  برای هر یک از چهار نوع سنگریزه مورد نظر در این تحقیق به دست آمد. باید توجه داشت که در رابطه (۱۹) مقدار ضریب  $a$  معادل صفر است. در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نمودارهای نیمرخ طولی محاسباتی و مشاهداتی در چهار نمونه سنگریزه مورد نظر در این تحقیق برای دو طول مختلف سد سنگریزه‌ای و در سه دبی مختلف نشان داده شده است.

در سه روش Basak (1976)، Stephenson (1979) و Hansen (1992) برای محاسبه نیمرخ طولی سطح آب در محیط‌های سنگریزه‌ای که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، فرض بر برقراری شرایط دوپوئی و هیدرواستاتیک بودن فشار بوده است. در هر سه این روش‌ها، معادلات توسعه یافته بر اساس شیب صفر بستر بوده و در معادله Basak (1976) و Hansen (1992) از شکل درجه دوم معادله افت انرژی استفاده شده است. روش Hansen (1992) تاثیر بار آبی سرعت را نیز لحاظ نموده و از این لحاظ کامل‌ترین روش در بین سه روش فوق می‌باشد. همچنین طبق تحقیقات Hansen (1992) عمق خروجی معادل عمق بحرانی، تنها در دبی‌های نسبتاً کم قابل قبول است و لذا Hansen (1992) در توسعه مدل خود از این فرض استفاده نکرده است. در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نتایج حاصل از معادله Hansen (1992) نیز ارائه شده است. برای حل معادله Hansen (1992)، نیاز به مشخص بودن عمق خروجی جریان از محیط متخلخل می‌باشد، لذا در هر آزمایش مقدار عمق خروجی اندازه‌گیری شده و مقدار آن در معادله Hansen (1992) قرار گرفته است. همچنین ضرایب  $a$  و  $b$  استفاده شده در روش Hansen (1992)، از روابط (۱۹) و (۲۰) به دست آمده است. از آنجا که در رابطه (۱۹) مقدار ضریب  $a$  معادل صفر است و

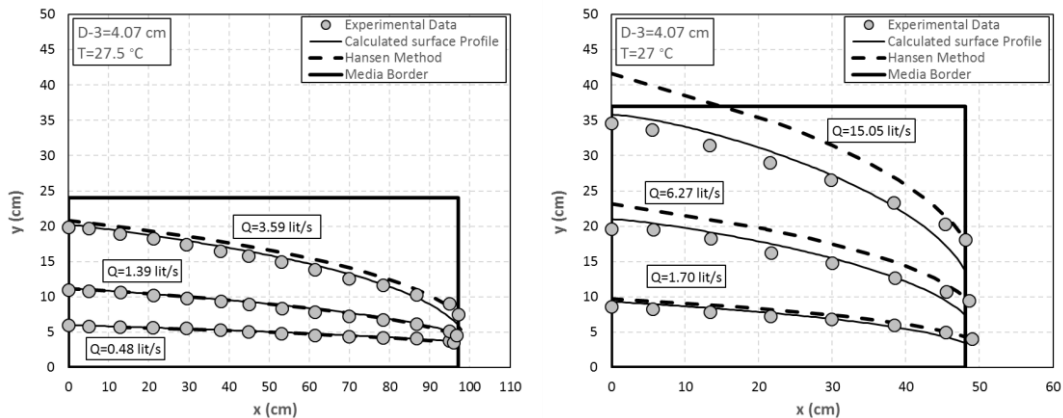
در حل معادله Hansen (1992) قرار دادن این مقدار باعث عدم امکان حل معادله می‌شود، لذا در حالت سد سنگریزه‌های ۵۰ سانتی‌متری، مقداری کوچک و غیر صفر برای ضریب  $a$  لحاظ شده است. در رابطه Hansen (1992) مقدار صریح عمق جریان به ازاء طول مشخصی از محیط سنگریزه‌های قابل محاسبه نبوده و در واقع به ازاء مقدار مشخصی از عمق جریان، فاصله به سمت بالادست از انتهای سد سنگریزه‌های را حاصل می‌کند. لذا با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای عمق جریان (مقادیری بزرگ‌تر از عمق خروجی جریان در پایین دست و کوچک‌تر از عمق آب بالادست سد سنگریزه‌ای)، مقادیر  $X$  محاسبه شده‌اند.



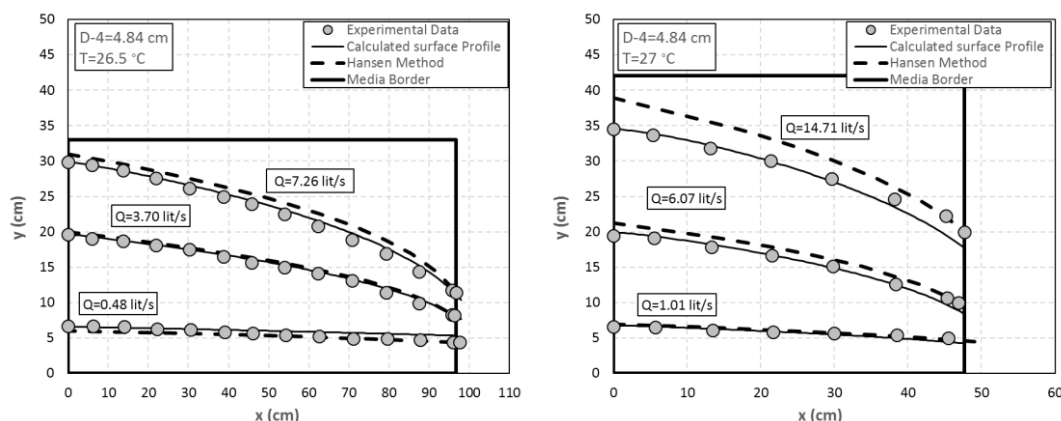
شکل ۷- نیمرخ طولی محاسباتی و مشاهداتی سطح آب در محیط متخلخل D-1



شکل ۸- نیمرخ طولی محاسباتی و مشاهداتی سطح آب در محیط متخلخل D-2



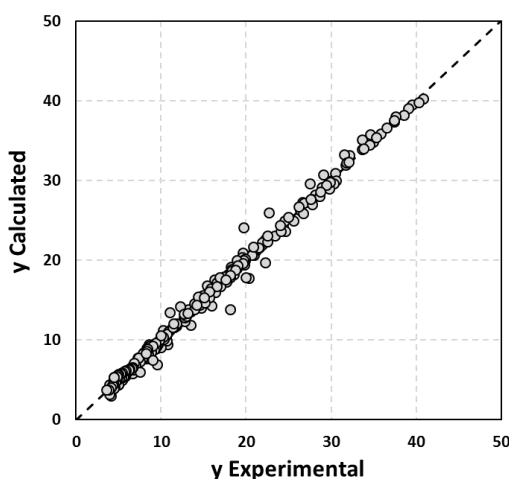
شکل ۹- نیمرخ طولی محاسباتی و مشاهداتی سطح آب در محیط متخلخل D-3



شکل ۱۰- نیمرخ طولی محاسباتی و مشاهداتی سطح آب در محیط متخلخل D-4

به طوری که در شکل‌های ۷ تا ۱۰ مشاهده می‌شود، مدل به خوبی قادر به محاسبه نیمرخ طولی سطح آب در سدهای سنگریزه‌ای در دبی‌های کم و زیاد می‌باشد. خطاهای جزئی موجود در نیمرخ‌های محاسباتی، خصوصاً در بخش انتهایی سد سنگریزه‌ای ناشی از خطای برآورد افت اصطکاکی توسط روابط (۱۹) و (۲۰) و همچنین خطای اندازه‌گیری عمق سطح آب به علت ریزشی بودن جریان در بخش انتهایی سد سنگریزه‌ای می‌باشد. پیزومترهای انتهایی محیط متخلخل، در اثر نزدیکی به سطح نش و اهمیت اثر دیواره در وجه خروجی، دچار خطای قابل ملاحظه در اندازه‌گیری فشار می‌شوند. همچنین در بخش انتهایی، با توجه به قطر ذرات و نزدیکی به دیواره انتهایی محفظه نگهدارنده ذرات، می‌توان انتظار داشت که تخلخل در این ناحیه بیشتر از مقدار اندازه‌گیری باشد. لذا مشاهده می‌شود که این اثرات به صورت خطا در رابطه محاسبه افت انرژی (روابط (۱۹) و (۲۰))، خصوصاً در مقادیر زیاد افت انرژی که مربوط به بخش انتهایی و خروجی سد سنگریزه‌ای است و متعاقباً در محاسبه نیمرخ طولی سطح آب ظاهر می‌شوند.

در شکل ۱۱ نمودار مقادیر محاسباتی در مقابل مشاهداتی عمق آب در طول نیمرخ سطح آب سد سنگریزه‌ای نشان داده شده که حاکی از درستی قابل قبول برآوردها است. بر اساس تحلیل آماری نتایج میانگین خطای نسبی تخمین‌ها در سد سنگریزه‌ای ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری به ترتیب ۴/۶ و ۳/۵ درصد و در مجموع آزمایش‌ها معادل ۳/۹۶ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی عمق آب در طول سد سنگریزه‌ای

مقایسه بین نیمرخ محاسباتی به روش Hansen (1992) با مقادیر آزمایشگاهی در شکل‌های ۷ تا ۱۰ به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش گرادیان انرژی و شیب سطح آب، اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی افزایش یافته و مقادیر سطح آب بیشتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است. همان‌طور که اشاره شد در این روش، گرادیان فشار معادل شیب سطح آب در نظر گرفته شده است. این فرض مشابه فرضیات به کار رفته در توسعه معادله جریان متغیر تدریجی در آبراهه‌های روباز است که شیب بستر و سطح آب و همچنین انحنای خطوط جریان ناچیز است. این فرض که در مبحث محیط‌های متخلخل تحت عنوان فرض دوپویی شناخته



می‌شود، تنها زمانی معتبر و قابل قبول است که شیب سطح آب زیاد نباشد. بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش شیب سطح آب و غیرهیدرواستاتیک شدن شرایط جریان، خطای برآوردهای روش Hansen (1992) نیز افزایش می‌یابد. همچنین باید مد نظر داشت که در اینجا در محاسبات روش Hansen (1992) از معادلات تجربی افت انرژی (۱۹) و (۲۰) استفاده شده است که در آن شرایط غیرهیدرواستاتیک جریان لحاظ شده است. بدیهی است در صورت استفاده از روابط متداول گرادیان هیدرولیکی، خطای برآوردها بیشتر نیز خواهد شد.

## نتیجه‌گیری

با جایگزینی رابطه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک به دست آمده در تحقیق Gord-Noshahri *et al.* (۲۰۱۷) در معادله انرژی و در نظر گرفتن رابطه درجه دوم بین افت انرژی و سرعت متوسط، معادله معرف نیمرخ آزاد سطح آب در محیط‌های سنگریزه‌ای (رابطه (۱۸)) ارائه گردید. حل این معادله به صورت صریح ممکن نبوده و برای حل عددی نیاز به ضرایب ثابت (a و b) معادله تجربی درجه دوم افت انرژی در محیط‌های سنگریزه‌ای و دو شرط مرزی می‌باشد.

لذا بر اساس واسنجی ضرایب معادله Li *et al.* (1998) با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر، دو رابطه (۱۹) و (۲۰) برای محاسبه افت انرژی در سدهای سنگریزه‌ای ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری ارائه گردید که بر اساس تحلیل آماری، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میانگین خطای نسبی (MRE) رابطه (۱۹) به ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۱۶ بوده و برای رابطه (۲۰) به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۱۲ است. همچنین عمق آب در مقطع ورودی و شیب ناچیز سطح آب در این مقطع (تقریباً معادل صفر) به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شد. پس از حل عددی معادله دیفرانسیل مرتبه دوم غیر خطی (رابطه (۱۸)) که معرف تغییرات سطح آزاد جریان آب در داخل سد سنگریزه‌ای است، نتایج با مقادیر آزمایشگاهی و روش Hansen (1992) مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان دادند که مدل به خوبی قادر به محاسبه نیمرخ طولی سطح آب در سدهای سنگریزه‌ای در دبی‌های کم و زیاد بوده و بر اساس تحلیل آماری، نتایج میانگین خطای نسبی تخمین‌ها معادل ۳/۹۶ درصد می‌باشد. در حالی که در نیمرخ محاسباتی به روش Hansen (1992) با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش گرادیان انرژی و شیب سطح آب، اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی افزایش یافته و مقادیر سطح آب بیشتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است.

## نمادها

a و b ضرایب ثابت رابطه دو جمله‌ای درجه دوم بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان

A سطح مقطع جریان

$D_{50}$  قطر متوسط ذرات سنگریزه

E بار آبی کل جریان

Fr عدد فرود جریان

g شتاب گرانش زمین

$K_t$  ضریب تجربی معادل ۰/۷۵ برای سنگریزه‌های گوشه‌دار

L طول محیط متخلخل

MARE متوسط قدرمطلق خطای نسبی

n تخلخل محیط

p فشار

q دبی در واحد عرض

Q دبی جریان

RE درصد خطای نسبی

$S_0$  شیب بستر آبراهه

$S_f$  شیب خط انرژی

$S_w$  شیب سطح آب

T عرض فوقانی جریان  
 V سرعت ظاهری در محیط متخلخل  
 x فاصله در راستای جریان از ابتدای محیط متخلخل  
 y عمق جریان  
 y' مشتق اول سطح آب  
 y'' مشتق دوم سطح آب  
 y<sub>0</sub> عمق جریان در ابتدای محیط متخلخل  
 y<sub>c</sub> عمق بحرانی  
 y<sub>L</sub> عمق جریان در انتهای محیط متخلخل  
 Z<sub>b</sub> موقعیت بستر نسبت به سطح مبنا  
 Z<sub>s</sub> موقعیت عمودی خط جریان مفروض نسبت به سطح مبنا  
 Z<sub>η</sub> تراز سطح آب  
 γ وزن مخصوص آب  
 ν لزجت سینماتیک آب

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Ahmed, N. and Sunada, D.K. (1969). Nonlinear flow in porous media. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(6), 1847–1858.
- Bari, R. and Hansen, D. (2002). Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 673-683.
- Bazargan, J. and Shoaee, S. M. (2006). Discussion on Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams.
- Bazargan, J. and Shoaee, S. (2010). Analysis of Non-Darcy Flow in Rock Fill Materials Using Gradually Varied Flow Method. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, 44(2), 131-139. (In Farsi)
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, INC. New York.
- chabokpour, J., Amiri Tokaldany, E. (2018). Experimental-Numerical Simulation of Longitudinal Water Surface Profile Through Large Porous Media. *Iranian Water Researches Journal*, 11(3), 81-90. (In Farsi)
- Gord-Noshahri, A., Amiri Tokaldany, E., Sedghi-Asl, M. (2017). Study of non-hydrostatic pressure distribution of free surface flow in a rockfill porous media. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(4), 917-928. (In Farsi)
- Gord-Noshahri, A., Amiri Tokaldany, E., Sedghi-Asl, M. (2019). Evaluation and Sensitivity Analysis of Head-Loss Equations of Free Surface Flow through Rockfill Porous Media. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 20(74), 41-58. (In Farsi)
- Hannoura, A.A. and Barends, F.B.J. (1981). Non-Darcy flow; a state of the art. *Flow and transport in porous media*, 37–51.
- Hansen, D. (1992). *The behaviour of flow through rockfill dams*, Ph. D. dissertation, University of Ottawa (Canada).
- Hansen, D., Garga, V.K. and Townsend, D.R. (1995). Selection and application of a one-dimensional non-Darcy flow equation for two-dimensional flow through rockfill embankments. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(2), 223–232.
- Hosseini, S.M. (1997). Development of an Unsteady Non-linear Model for Flow Through Coarse Porous Media. Ph. D. dissertation, The University of Guelph.
- Li, B., Garga, V.K. and Davies, M.H. (1998). Relationships for non-Darcy flow in rockfill. *Journal of hydraulic Engineering*, 124(2), 206–212.
- Parkin, A.K. (1963). *Rockfill dams with inbuilt spillways: I-hydraulic characteristics*. Bulletin 6, Water



Research Foundation of Australia.

- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. and Salehi, R. (2014). Non-Darcy Flow of Water Through a Packed Column Test. *Transport in Porous Media*, 101(2), 215–227.
- Soualmia, A., Jouini, M., Masbernat, L., & Dartus, D. (2015). An analytical model for water profile calculations in free surface flows through rockfills. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53(1), 209-215.
- Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*, Elsevier Scientific, New York.
- Tayyebi, M. M. and Amiri Tokaldany, E. (2016). Introducing a Relationship to Estimate Hydraulic Gradient in Non-Darcy Turbulent Flow in Porous Media. *Journal of Water and Soil*, 29(4): 908-918. (In Farsi)
- Wilkins, J.K. (1955). The flow of water through rock fill and its application to the design of dams. *In 2nd Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Institution of Professional Engineers, New Zealand, 10(11), 382-387.