

## Longitude Profile Analysis of Water Table in Rockfill Materials Using Gradually Varied Flow Theory with Consideration of Drag Force

MOHAMMAD GUDARZI<sup>1</sup>, JALAL BAZARGAN<sup>1\*</sup>, SEYED MOHAMMAD SHOAEE<sup>1</sup>

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran.

(Received: Aug. 25, 2019- Revised: Nov. 3, 2019- Accepted: Nov. 23, 2019)

### ABSTRACT

The flow analysis in rockfill materials is often fulfilled by solving differential equations that combine non-linear equation [ $i=mv^n$ ] and continuity equation. This differential equation has first been developed by Parkin. It's solution by finite difference method is massive and time consuming, proportion to boundary conditions at this particular case. These calculations would end up with more significant problems where the water table profile is not specified inside the rockfill material. For flow analysis in rockfill material, another method can be used which is based on the gradually varied flow theory. This method is very simple and less massive. Literature review shows a significant error in parts of flow in which the curvature of the streamlines is high, if drag force is not considered in the gradually varied flow theory. In the current study for the first time, using experimental data of different rockfill materials, the effect of drag force on water profile calculation accuracy was investigated considering gradually varied flow theory. The results show by considering drag force, the calculation accuracy of water profile at permanent flow, especially in high flow curve, would significantly increase and a promising results could be obtained.

**Keywords:** Porous media, Rockfill materials, Gradually varied flow, Non-Darcy flow, Drag force.

---

\* Corresponding Author's Email: [gudarzi\\_mohammad@znu.ac.ir](mailto:gudarzi_mohammad@znu.ac.ir)

## تحلیل نیمرخ طولی سطح آب درون مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از تئوری جریان متغیر تدریجی با در نظر گرفتن نیروی درگ

محمد گودرزی<sup>۱</sup>، جلال بازرگان<sup>۱\*</sup>، سید محمد شعاعی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۸/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۹/۲)

### چکیده

تحلیل جریان در درون مصالح سنگریزه‌ای اغلب با حل معادله دیفرانسیلی که از ترکیب رابطه غیرخطی  $[i=mv^n]$  و معادله پیوستگی به دست می‌آید، انجام می‌گیرد. این معادله دیفرانسیلی اولین بار توسط پارکین توسعه داده شده و حل آن به روش تفاضل محدود و متناسب با اعمال شرایط مرزی مسائل مورد نظر، به نسبت حجیم و وقت‌گیر است. این محاسبات در شرایطی که نیمرخ سطح آب در درون مصالح سنگریزه‌ای مشخص نباشد، با مشکلات بیشتری روبه‌رو خواهد بود. برای تحلیل جریان در مصالح سنگریزه‌ای می‌توان از روش دیگری که متکی به تئوری جریان متغیر تدریجی است، استفاده کرد. محاسبات در این روش در مقایسه با روش قبلی بسیار ساده‌تر و کم حجم‌تر است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که عدم در نظر گرفتن نیروی درگ در تئوری جریان‌های متغیر تدریجی باعث ایجاد خطای بزرگ در بخش‌هایی از جریان که انحنای خطوط جریان و سطح آب زیاد است، می‌گردد. در پژوهش حاضر، برای اولین بار با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط نگارندگان مقاله روی انواع مختلف مصالح سنگریزه‌ای، به بررسی تاثیر نیروی درگ بر روی دقت محاسبات نیمرخ سطح آب با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن نیروی درگ، دقت محاسبات نیمرخ سطح آب در جریان ماندگار به‌ویژه در بخش‌هایی که انحنای جریان زیاد است به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و می‌توان به جواب‌های امیدوارکننده‌ای دست یافت.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، مصالح سنگریزه‌ای، جریان متغیر تدریجی، جریان غیرداریسی، نیروی درگ.

### مقدمه

یکی از رابطه‌های غیرخطی مانند رابطه (۲) و معادله پیوستگی به شکل رابطه (۳) به دست می‌آید (Bazargan & Byatt, 2003):

$$i = mV^n \quad (\text{رابطه } ۲)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{رابطه } ۳)$$

که مقادیر  $m$  و  $n$  به خصوصیات فیزیکی مصالح و سیال و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بستگی دارد. این معادله دیفرانسیلی که به شکل یک معادله دیفرانسیلی جزئی است، جانشین معادله لاپلاس برای تحلیل غیرخطی جریان‌های غیرداریسی به‌شمار می‌رود، اولین بار توسط پارکین به شکل رابطه (۴) توسعه داده شده است:

(رابطه ۴)

$$(\varphi_{xx} + \varphi_{yy})(\varphi_x^2 + \varphi_y^2) + (N-1)\left\{(\varphi_x^2)\varphi_{xx} + 2\varphi_x\varphi_y\varphi_{xy} + (\varphi_y^2)\varphi_{yy}\right\} = 0$$

در رابطه (۴)،  $N = \frac{1}{n}$  و  $\varphi$  یک تابع اسکالری است که

طبق معادله‌ی  $\varphi = \left(\frac{1}{m}\right)h$  بیان می‌شود که در آن  $h$  ارتفاع

در حالت کلی، جریان آب در محیط‌های متخلخل، می‌تواند به دو صورت شکل بگیرد. در محیط‌های متخلخل با مصالح ریزدانه از قبیل خاک رس و سیلت، با توجه به کم بودن سرعت، جریان به‌طور آرام و لایه‌ای بوده و برای تحلیل این نوع جریان‌ها و به دست آوردن مشخصات آن‌ها از قبیل سرعت، دبی، تراز انرژی و سطح آزاد آب، از رابطه داریسی که به شکل رابطه (۱) استفاده می‌گردد (McWhorter & Sunada, 1977):

$$i = \left(\frac{1}{k}\right)V \quad (\text{رابطه } ۱)$$

که در آن  $v$ : سرعت جریان،  $k$ : قابلیت هدایت هیدرولیکی که بستگی به خصوصیات فیزیکی ذرات و مشخصات جریان دارد و  $i$ : گرادیان هیدرولیکی است. اما در محیط‌های متخلخل دانه درشت از قبیل شن و قلوه سنگ، سرعت جریان افزایش یافته و جریان به‌طور آرام نخواهد بود. در این نوع جریان‌ها، رابطه داریسی کارایی خود را از دست داده (Bazargan & Byatt, 2002; Hansen et al., 1995)، تحلیل جریان در این‌گونه محیط‌ها به‌طور معمول با حل معادله دیفرانسیلی امکان‌پذیر است که از ترکیب

### مبانی نظری

یکی از فرض‌های اساسی در تحلیل جریان متغیر تدریجی این است که توزیع فشار در هر مقطع هیدرواستاتیک فرض می‌شود. این مطلب از تعریف جریان با تغییر تدریجی سطح آب حاصل می‌گردد. چون تغییرات تدریجی انحنای سطح آب باعث می‌شود تا از شتاب‌های عمودی صرف‌نظر شود (Sedghi Asl et al., 2011). همانطور که گفته شد،  $S_f$  شیب خط انرژی بوده که در جریان درون محیط‌های متخلخل به این ترتیب نشان داده می‌شود:

$$S_f = \frac{d\left(y + z + \frac{w^2}{2g}\right)}{dx} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن  $y$ : عمق جریان،  $z$ : ارتفاع کف لایه متخلخل از خط مبنا،  $w$ : سرعت واقعی کل جریان و  $g$ : شتاب ثقل است. همچنین کارهای بری و هنسن، بازرگان و شعاعی، استفسون و لپس نشان می‌دهد که اغلب به دلیل کم بودن میزان سرعت جریان در محیط متخلخل، مقدار هد سرعت در مقایسه با جملات دیگر ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر کردن است (Bazargan & Hansen, 2002; Stephenson, 1979; Shaoei, 2006, 2007). در این حالت مقدار تغییرات هد سرعت نیز قابل چشم‌پوشی بوده و می‌توان شیب خط انرژی را معادل گرادیان هیدرولیکی دانست:

$$i = S_w = S_f \quad (\text{رابطه ۷})$$

در محیط متخلخل روابط پایه و تجربی جریان غیرخطی آب فرش‌هایمر، برای اولین بار، در سال ۱۹۰۱، بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد، در جریان‌های ناآرام گرادیان هیدرولیکی علاوه بر توان اول سرعت، با توان دوم آن نیز ارتباط مستقیم پیدا می‌کند (Wang & Liu, 2004). در رابطه پیشنهادی فرش‌هایمر، ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان به صورت زیر بیان شده است:

$$i = aw + bw^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن  $a$  و  $b$  ضرایب ثابتی می‌باشند که به خصوصیات محیط متخلخل و خصوصیات جریان بستگی دارند. در سرعت‌های پایین تأثیر عبارت با توان دوم کم می‌شود و رابطه به سمت معادله دارسی متمایل می‌گردد و در سرعت‌های بالا عبارت با توان دوم غالب می‌گردد (Hosseni, 2000). به موازات مطالعه روی توصیف نظری و فیزیکی جریان غیرخطی، مطالعات گسترده‌تری برای مرتبط کردن ضرایب معادلات پایه با خصوصیات جریان و محیط متخلخل انجام شده است. در این زمینه روابط تجربی زیادی با استفاده از کارهای آزمایشگاهی و تجربی به وجود آمده‌اند. در جدول (۱) روابط توصیه شده توسط برخی از محققین آورده شده‌است:

پیزومتری می‌باشد. همچنین  $\Phi_x$  و  $\Phi_y$  مشتقات تابع  $\Phi$  را به ترتیب در جهات  $x$  و  $y$  نشان می‌دهند (Curtis & Lawson, 1967).

جهت حل مسائل مهندسی و تحلیل جریان‌های یک‌بعدی می‌توان از معادله جریان‌های متغیر تدریجی استفاده نمود، که از این طریق می‌توان نیمرخ سطح آب را در مقاطع مختلف محاسبه نمود. سپس مقدار سرعت متوسط و عمق در مقاطع مختلف به دست می‌آید، که بر مبنای آن گرادیان و فشار قابل محاسبه می‌باشد. لذا استفاده از روابط جریان متغیر تدریجی در تحلیل جریان‌های ماندگار غیرداری روش قابل قبول مهندسی است که حجم معادلات بسیار کمتری نسبت به معادله پارکین و حل مسئله دو بعدی دارد (Bazargan & Shaoei, 2010). نمونه‌ای از این جریان‌ها در زهکش‌های سنگی سدهای خاکی، لایه‌های محافظ مرکب از مصالح درشت دانه، سدهای سنگریزه‌ای و گابیونی، جریان سیالات (آب، نفت، گاز و...) در نزدیکی چاه‌های بهره‌برداری، جریان در سازندهای سخت و درشت و غیره رخ می‌دهد که در کارهای مهندسی، جایگاهی ویژه دارند (Bazargan & Shaoei, 2010). رابطه (۵)، رابطه مورد استفاده در جریان‌های متغیر تدریجی به این ترتیب است:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{\cos^2 \theta - Fr_p^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $S_0$  شیب کف کانال،  $Fr_p$ : عدد فرود منفذی و  $S_f$ : شیب خط انرژی می‌باشد. انصاری و همکاران با استفاده از نرم افزار Seep/w به بررسی نیمرخ سطح آب درون محیط متخلخل پرداختند، به این ترتیب مشاهده می‌شود که نیمرخ محاسباتی دقت قابل قبولی ندارد (Ansari et al., 2016).

چابک‌پور و امیری-تکلدانی با استفاده از تئوری جریان متغیر تدریجی و دو روش رانگ کوتا مرتبه چهار و روش اویلر اصلاح شده با جهت محاسبه از پایین دست اقدام به محاسبه نیمرخ سطح آب نمودند. به این ترتیب نتیجه می‌شود که نیمرخ محاسباتی در بالادست دارای اختلاف با نیمرخ مشاهداتی می‌باشد (Chabokpour & Amiri-Tokaldani, 2017).

قابل ذکر است که برخی محققین همچون بری، هنسن، استفسون، بازرگان، صدقی اصل و چابک‌پور در این زمینه تحقیقات شایان توجهی انجام داده‌اند، با این حال در هیچکدام از این محاسبات نیروی درگ برای محاسبه نیمرخ سطح آب مورد استفاده قرار نگرفته است (Ansari et al., 2016; Bari & Hansen, 2002; Bazargan & Shaoei, 2010; Chabokpour & Amiri-Tokaldani, 2017; Hansen et al., 1995; Stephenson, 1979).

جدول ۱- روابط دوجمله‌ای پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف

محقق	رابطه
ارگان و ارنینگ (Ergun & Orning, 1949)	$i = 150 \frac{v(1-n)^2}{d^2 gn^3} V + 1.75 \frac{(1-n)}{gdn^3} V^2$
انگلاند (Engelund, 1953)	$i = \frac{1500(1-n)^3 v}{n^2 gd^2} V + \frac{3.6(1-n)}{n^3 gd} V^2$
ایرمی (Irmay, 1958)	$i = \frac{\alpha(1-n)^2 \mu}{D^2 (n_w - n)^3} V + \frac{\beta(1-n)}{gD(n_w - n)^3} V^2$
اشیدگر (Scheidegger, 1958)	$i = C_1 \frac{vT^2}{gn} V + C_2 \frac{T^3}{gn^2} V^2$
وارد (Ward, 1964)	$i = \frac{v}{gk} V + \frac{C'_w}{g\sqrt{k}} V^2$
احمد و سونادا (Ahmed & Sunada, 1969)	$i = \frac{\mu}{\rho gk} V + \frac{1}{g\sqrt{ck}} V^2$
مک‌کرکدایل و همکاران (Mccorquodale et al., 1978)	$i = 70 \frac{v}{gnR_h^2} V + \frac{0.81}{gn^{0.5}R_h} V^2$
استفنسون (Stephenson, 1979)	$i = 1300 \frac{v}{gd^2 n} V + \frac{3.84}{gdn^2} V^2$
جوی و همکاران (Joy et al., 1991)	$i = 11(d_{10})^{-1.12} V + 256(d_{10})^{-1.34} V^2$
کدلس و نایت (Kadlec & Knight, 1996)	$i = \frac{255v(1-n)}{gn^{3/7}D^2} V + \frac{2(1-n)}{gn^3D} V^2$
سیدروپولو و همکاران (Sidiropoulou et al., 2007)	$i = \frac{4.6v}{gnd^2} V + \frac{0.79}{gn^{0.5}d}, \text{ Re} < 500$
	$i = \frac{70v}{gnd^2} V + \frac{0.54\lambda}{gn^{0.5}d} V^2, \text{ Re} \geq 500$
صدقی اصل و همکاران (SedghiAsl et al., 2011)	$i = 10.84b' \left( \frac{1-n}{n} \right)^{4/3} \frac{v}{d^3} V + \frac{10.84a'(1-n)^{4/3}}{n^{7/3}} V^2$
	$a' = 0.89 - \frac{12.84}{d}, \quad b' = \frac{1}{0.00098 - 9.733d^{3.385}}$

نیروی درگ را می‌توان به صورت حاصل ضرب ضریب درگ ( $C_D$ ) و فشار دینامیک  $\frac{\rho V^2}{2}$  بیان کرد. بر این اساس نیروی درگ را به صورت زیر نمایش می‌دهند.

$$F_d = C_D \frac{\rho V_0^2}{2} A \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در این رابطه  $A$  تصویر جسم روی صفحه عمود بر جریان سیال،  $V_0$  سرعت جریان آزاد،  $\rho$  چگالی سطح می‌باشند.  $C_D$  به عنوان ضریب درگ نامیده می‌شود که یک عدد بی‌بعد می‌باشد. همچنین محققین با انجام آزمایشات متعدد ضریب درگ را به ترتیب برای ذرات مختلف مطابق جدول (۲) به دست آورده‌اند:

در جدول (۱)،  $v$ : لزجت سینماتیکی سیال،  $n$ : تخلخل محیط سنگدانه،  $d$ : قطر متوسط ذرات تشکیل‌دهنده محیط متخلخل،  $R_h$ : شعاع هیدرولیکی محیط،  $C_1$  و  $C_2$ : ضرایبی هستند که به توزیع اندازه ذرات بستگی دارند،  $V$ : سرعت جریان،  $T$ : انحنای مسیر و  $C_w$ : ثابت می‌باشد.

سیال در حال حرکت نیرویی به جسم وارد می‌کند که دارای دو مولفه می‌باشد. مؤلفه در راستای حرکت این نیروی درگ (نیروی پسا) و مؤلفه عمود بر جهت جریان نیروی برا نامیده می‌شوند. برا و درگ بر اثر کنش دینامیکی سیال متحرک ایجاد می‌شوند و نیروهایی مانند وزن و شناوری در آن‌ها دخالتی ندارند.

جدول ۲- روابط ضریب درگ پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف

محقق	ضریب درگ	مواد مورد آزمایش
حیدر و لوینسپیل (Haider & Levenspiel, 1989)	$C_D = \frac{24}{Re} (1 + A Re^B) + \frac{C}{1 + D Re^{-1}}$ $A = \exp(2.3288 - 6.4581\Phi + 2.4486\Phi^2)$ $B = 0.0964 + 0.5565\Phi$ $C = \exp(4.905 - 13.8944\Phi + 18.4222\Phi^2 - 10.2599\Phi^3)$ $D = \exp(1.4681 + 12.2584\Phi - 20.7322\Phi^2 + 15.8855\Phi^3)$ $\Phi = \frac{A_{sph}}{A_p}$	ذرات با اشکال منظم و سطوح صاف مانند: کره، جامدات ایزومتریک، مکعب‌ها، هشت‌وجهی
گانسر (Ganser, 1993)	$\frac{C_D}{K_N} = \frac{24}{Re K_S K_N} (1 + 0.1118(Re K_S K_N)^{0.6567}) + \frac{0.4305}{1 + \frac{3305}{Re K_S K_N}}$ <p>Isometric particles :</p> $K_S = \left( \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \Phi^{-\frac{1}{2}} \right)^{-1} - 2.25 \frac{d_{eq}}{D}, K_N = 10^{1.8148(-\log \Phi)^{0.5743}}$ <p>Non - isometric particles :</p> $K_S = \left( \frac{1}{3} \frac{d_a}{d_{eq}} + \frac{2}{3} \Phi^{-\frac{1}{2}} - 1 \right)^{-1} - 2.25 \frac{d_{eq}}{D}, K_N = 10^{1.8148(-\log \Phi)^{0.5743}}$ $\Phi = \frac{A_{sph}}{A_p}$	ذرات با اشکال منظم و سطوح صاف مانند: کره، جامدات ایزومتریک، مکعب‌ها، هشت‌وجهی
چین (Chien, 1994)	$C_D = \left( \frac{30}{Re} \right) + \left( \frac{67.289}{e^{5.03\Phi}} \right)$ $0.2 \leq \Phi \leq 1.0$ $\Phi = \frac{A_{sph}}{A_p}$	ذرات طبیعی مانند: شن کوارتز در آب، شیشه و سنگ با شکل‌های متفاوت در آب
سوامی و اوچها (Swamee & Ojha, 1991)	$C_D = \left[ \frac{48.5}{(1 + 4.5\beta^{0.35})^{0.8} Re^{0.64}} + \left\{ \left( \frac{Re}{Re + 100 + 1000\beta} \right)^{0.32} \frac{1}{\beta^{18} + 1.05\beta^{0.8}} \right\} \right]^{1.25}$ <p>Corey shape factor : <math>\beta = \frac{d_s}{\sqrt{d_l d_m}}</math></p> <p>where <math>d_s</math>, <math>d_m</math>, and <math>d_l</math> is respectively the short, medium and long axes of the particle.</p>	رسوبات طبیعی و قطعه سنگ خرد شده
چنگ (Cheng, 1997)	$C_D = \frac{4 D_*^3}{3 Re^2}$ $Re = \frac{U_t d_{eq}}{v} = (\sqrt{25 + 1.2 D_*^2} - 5)^{1.5}, D_* = d_{eq} \left[ \frac{(g/v^2)(\rho_p/\rho_f - 1)}{v} \right]^{\frac{1}{3}}$ <p>where <math>U_t</math> is settling velocity of the particle; <math>v</math> is kinematic viscosity of fluid; <math>d_{eq}</math> is the diameter of a sphere with the same volume as the particle</p>	ذرات کوارتزی

در جدول (۲) مساحت سطح ذره و  $A_{sph}$  مساحت کره هم حجم با ذره می‌باشد.

### برآورد نیروی درگ

در پژوهش حاضر نیروی درگ با استفاده از روابط ارائه شده توسط احمد و سونادا که جهت برآورد گرادیان هیدرولیکی به شرح روابط (۱۱) و (۱۲) ارائه شده، برآورد شده است. در محاسبات انجام شده در پژوهش حاضر، افت انرژی ایجاد شده در طول مسیر که با رابطه (۱۷) قابل برآورد است، معادل افت اصطکاکی ناشی از وجود نیروی درگ که با رابطه (۱۸) قابل تعیین است، در نظر گرفته شده و با لحاظ کردن نسبت عمودی سرعت جریان و معادل قرار دادن عمق جریان در راستای عمود بر امتداد جریان با طولی که نیروی درگ به مصالح سنگریزه‌ای وارد می‌شود، روابط (۱۷) الی (۲۱) مرتب شده‌اند.

با توجه به جدول (۱) ضرایب  $a$  و  $b$  رابطه فرس‌هایمر در مدل پیشنهادی احمد و سونادا به شرح روابط (۱۰) الی (۱۲) خواهد بود. شایان ذکر است ایشان روابط خود را از معادله ناویر استوکس استخراج نموده‌اند.

$$a = \frac{\mu}{\rho g k} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$b = \frac{1}{g \sqrt{ck}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$k = cd^2 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن  $\mu$ : گرانروی دینامیکی سیال،  $\rho$ : جرم مخصوص سیال،  $k$ : نفوذپذیری ذاتی مصالح،  $c$ : ثابت بی‌بعد مصالح و  $d$ : پارامتر مشخصه طول که بیانگر قطر موثر خلل و فرج محیط متخلخل است. همچنین به‌همین ترتیب مقدار ضریب  $f$  نیز به‌صورت رابطه (۱۳) تعیین می‌گردد:

$$f = \frac{1}{Re} + 1 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$V = w \sin \psi \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

که در آن  $Re$ : عدد رینولدز،  $V$ : تصویر سرعت واقعی عمود بر خط جریان،  $\psi$ : میانگین زاویه خطوط مختلف جریان با افق می‌باشد. از رابطه (۱۶) افت اصطکاکی محاسبه می‌گردد:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

و همچنین  $L$ : مشخصه طول (که در اینجا معادل طول لوله

فرضی افت می‌باشد)،  $D$ : قطر هیدرولیکی (قطر حفره‌های محیط متخلخل) می‌باشد. جهت تعیین نیروی درگ و ضریب درگ با استفاده از مدل احمد و سونادا، هد نظیر نیروی درگ و ضریب درگ در روابط (۱۷) الی (۲۰) آورده شده است.

$$h_{dr} = C_d \frac{V^2}{2g} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$C_d = f \frac{L}{d} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$L = y \cos \psi \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$C_d = \left( \frac{1}{Re} + 1 \right) \frac{y \cos \psi}{d} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

که در آن  $h_{dr}$ : افت نظیر درگ،  $L$ : مسیری از جریان است که نیروی درگ در راستای آن بر سنگریزه اثر نموده و از نیروی وزن سیال می‌کاهد. شایان ذکر است که  $Re$  تعریف شده در مدل احمد و سونادا از رابطه (۱۴) و  $d$  از رابطه (۱۲) قابل محاسبه می‌باشد. به‌عبارتی هد نظیر افت در مصالح سنگریزه‌ای معادل هد نیروی درگ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به رابطه‌ی انرژی در جریان متغیر تدریجی می‌توان نوشت:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{w_1^2}{2gn^2} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{w_2^2}{2gn^2} + h_f \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$\Delta z = S_0 \Delta x \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

که در آن  $\Delta x$ : اختلاف طولی بین دو عمق متوالی می‌باشد. به‌همین ترتیب برای روابط (۲۳) و (۲۴) می‌توان نوشت:

$$\frac{p}{\gamma} = y \cos^2 \theta - h_{dr} \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

$$E = \frac{p}{\gamma} + \frac{w^2}{2gn^2} = y \cos^2 \psi - h_{dr} + \frac{w^2}{2gn^2} \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

که در آن  $E$ : مقدار هد کل،  $\theta$ : زاویه بستر با افق می‌باشد. به این ترتیب رابطه (۲۵) به‌دست می‌آید که همان معادله جریان متغیر تدریجی می‌باشد. در این پژوهش شرط مرزی، عمق آب در بالادست کانال بوده، همچنین جهت محاسبات از بالادست به سمت پایین دست می‌باشد.

$$(\text{رابطه ۲۵})$$

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{S_0 - \bar{i}} = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - \bar{i}} = \frac{\left( y \cos^2 \psi - h_{dr} + \frac{w^2}{2gn^2} \right)_2 - \left( y \cos^2 \psi - h_{dr} + \frac{w^2}{2gn^2} \right)_1}{S_0 - \bar{i}}$$

$$\bar{i} = \frac{(i_1 + i_2)}{2} \quad (\text{رابطه ۲۶})$$

تعداد ۲۳ پیزومتر با فواصل ۱۰ سانتی متری در کف فلوم تعبیه شده است که برای ثبت نیمرخ طولی فشار استفاده می‌شوند. به منظور ایجاد محیط متخلخل سنگریزه‌ای، از دو دیواره متخلخل از جنس پلاستیک در ابتدا و انتهای محیط متخلخل استفاده گردید. وجوه بالادست و پایین دست این محفظه به صورت عمودی بوده و وجود دیواره‌ها در اطراف آن باعث می‌شود که در طی آزمایش‌ها شکل خود را حفظ کند. در شکل (۲)، شکل شماتیک کانال آورده شده است.

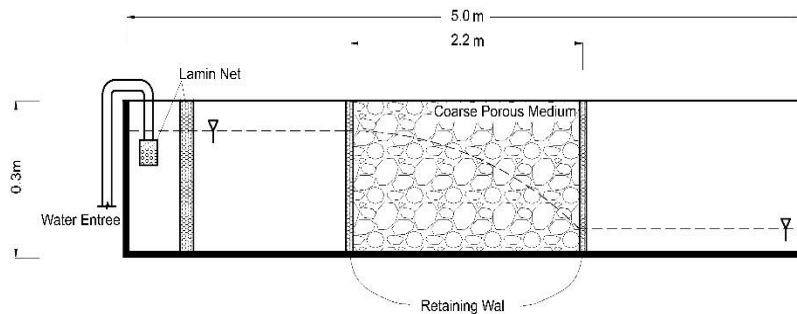
## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز، یک فلوم آزمایشگاهی شیب‌پذیر با مقطع مربعی به عرض و ارتفاع ۰/۳ متر و طول ۵ متر در دانشکده فنی دانشگاه زنجان طراحی و راه‌اندازی شده است (شکل ۱). اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از سرریز لبه تیز مستطیلی انجام می‌گیرد. کف فلوم و دیواره‌ها از جنس پلکسی گلاس است که امکان مشاهده جریان را فراهم می‌کند.



شکل ۱- کانال مورد استفاده برای انجام تست‌های آزمایشگاهی



شکل ۲- نمای نیمرخ طولی مدل آزمایشگاهی

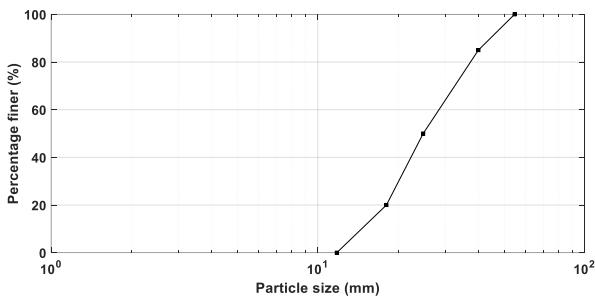
نیمرخ فشار در داخل بدنه و طرفین محفظه حاوی سنگریزه‌ها با استفاده از پیزومترهای موجود قرائت می‌شود. همچنین برای تعیین نیمرخ سطح آب در داخل محیط سنگریزه با استفاده از عکسبرداری از دیوار کناری کانال و رقوم‌سازی آن انجام پذیرفت.

مصالح مورد استفاده به عنوان سنگریزه‌های محیط متخلخل از نوع گرد گوشه و شکسته شده بود. محدود  $d_{50}$  مصالح بین ۷ تا ۲۶ میلیمتر می‌باشد. در شکل (۳) منحنی دانه‌بندی ذرات شکسته و در شکل (۴) منحنی دانه‌بندی ذرات گرد گوشه آورده شده‌است. همچنین دامنه تغییرات دبی آزمایشات بین ۰/۲۲ تا ۱/۹ لیتر بر ثانیه می‌باشد.

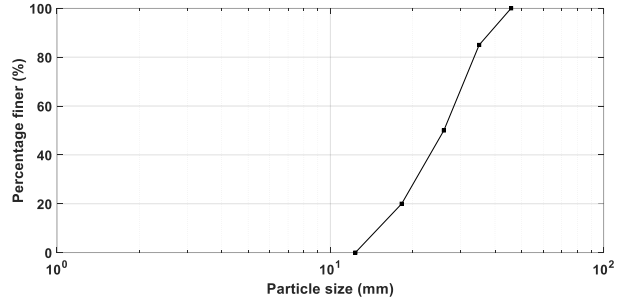
مصالح مورد استفاده به عنوان سنگریزه‌های محیط متخلخل از نوع دانه‌ای گرد گوشه و دانه‌ای شکسته بود. برای تهیه دانه‌بندی یکنواخت سنگریزه‌ها از روش الک کردن استفاده گردید. سپس جهت به‌دست آوردن منحنی دانه‌بندی از روش نمونه برداری مطابق با استانداردهای ASTM D422-63 و AASHTO T88-70 استفاده شد.

### روش انجام آزمایش

قبل از پر کردن کانال از مصالح سنگریزه‌ای، دیواره‌هایی در ابتدا و انتهای بازه مورد آزمایش قرار داده شد، سپس درون محفظه مورد نظر مصالح سنگریزه‌ای ریخته شد. پس از آن جریان آب با دبی‌های مختلف از درون محیط متخلخل عبور داده می‌شد و پس از متعادل شدن جریان و برقراری شرایط جریان ماندگار در فلوم،



شکل ۴- منحنی دانه بندی ذرات گرد گوشه

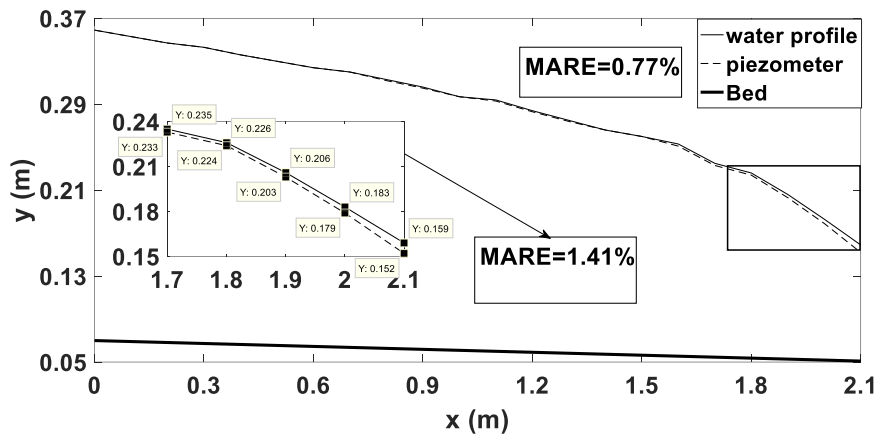


شکل ۳- منحنی دانه بندی ذرات شکسته

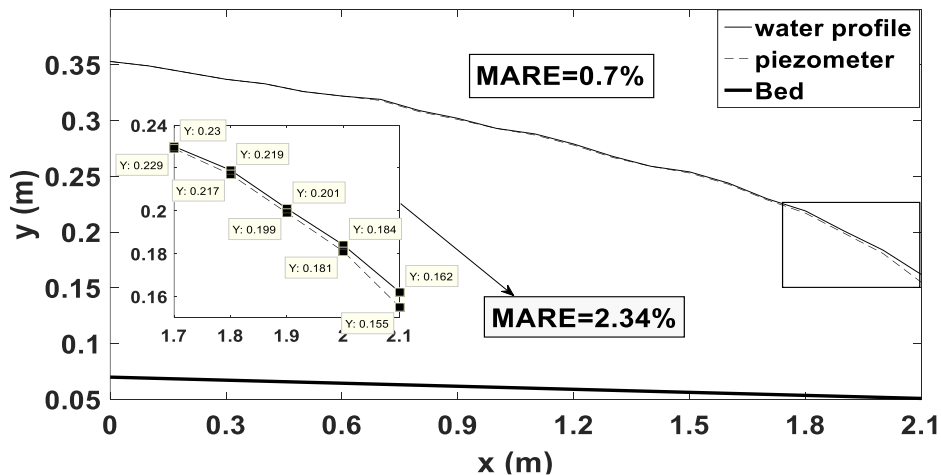
### نتایج آزمایشگاهی

وارد بر کف را نشان می‌دهد. این در حالی است که یکی از فرض‌های اصلی برای حل رابطه‌ی جریان متغیر تدریجی برابر بودن فشار وارد بر کف با عمق آب می‌باشد. همچنین با توجه به کوچک بودن سرعت و همچنین هد نظیر سرعت تاثیر عواملی همچون شتاب گریز از مرکز منتفی بوده و برای اصلاح این اختلاف وجود عاملی ضروری است که این عامل نیروی درگ می‌باشد. همچنین در جدول (۳) مقادیر متوسط اختلاف نیمرخ سطح آب و نیمرخ فشار وارد بر کف آورده شده است.

پژوهش حاضر با توجه به نتایج آزمایش‌های متعدد روی ۸ نمونه مختلف و هرکدام ۳ دبی متفاوت صورت پذیرفته است. سپس با استفاده از تحلیل‌های آماری، مقادیر ضرایب نفوذپذیری  $a$  و  $b$  محاسبه گردید. در اشکال (۵) و (۶) نمونه‌هایی از نیمرخ سطح آب و فشار وارد بر کف در محیط متخلخل آورده شده است. به‌طوریکه با توجه به این شکل‌ها اختلاف نیمرخ سطح آب و فشار



شکل ۵- مقادیر آزمایشگاهی نیمرخ طولی سطح آب و نیمرخ فشار وارد بر کف برای دبی ۱/۹ لیتر بر ثانیه و مصالح شکسته با قطر متوسط ۲۶ میلی‌متر



شکل ۶- مقادیر آزمایشگاهی نیمرخ طولی سطح آب و نیمرخ فشار وارد بر کف برای دبی ۱/۲۷ لیتر بر ثانیه و مصالح گردگوشه با قطر متوسط ۲۶ میلی‌متر



جدول ۳- مقادیر متوسط اختلاف نیمرخ سطح آب و نیمرخ فشار وارد بر کف

برای مصالح شکسته شده				برای مصالح گردگوشه			
دبی ۱/۹ لیتر بر ثانیه		دبی ۱/۰۴ لیتر بر ثانیه		دبی ۱/۶۳۷ لیتر بر ثانیه		دبی ۰/۹۷۱ لیتر بر ثانیه	
کل	زاویه سطح بیش از ۷ درجه	کل	زاویه سطح بیش از ۷ درجه	کل	زاویه سطح بیش از ۷ درجه	کل	زاویه سطح بیش از ۷ درجه
۰/۰۷۷	۱/۰۴۱	۰/۰۳۴	۱/۰۰۷	۰/۰۰۷	۲/۰۳۴	۰/۰۲۴	۱/۰۰۵

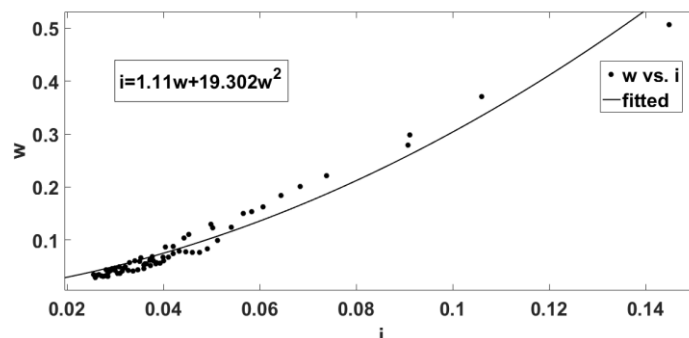
### نتایج و بحث

#### محاسبه نیمرخ سطح آب

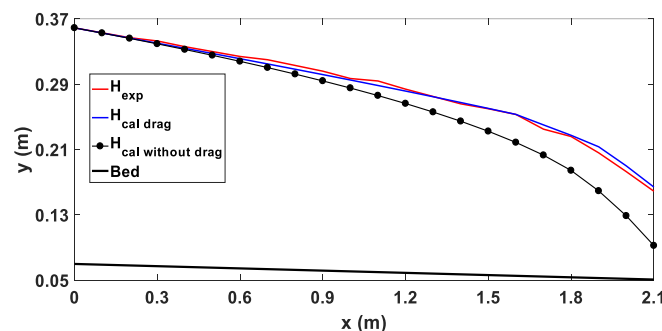
تحلیل نیمرخ طولی سطح آب درون مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از روابط (۲۵) الی (۲۷) صورت می‌گیرد. چنانچه در رابطه (۲۵) ملاحظه می‌شود، محاسبه مقدار انرژی ویژه (E) در هر مقطعی به مقدار زاویه  $\psi$  (میانگین زاویه خطوط مختلف جریان) و مقدار عمق جریان (y) بستگی دارد. بدیهی است که مقدار  $\psi$  در حد فاصل زاویه سطح آب ( $\alpha$ ) و زاویه کف کانال ( $\theta$ ) بوده و مقدار آن با افزایش طول مسیر (x) یا انحنا سطح آب افزایش پیدا می‌کند.

در شکل (۷) به عنوان نمونه نمودار تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت واقعی در مصالح شکسته آورده شده است.

در شکل (۸) نیمرخ مقادیر آزمایشگاهی سطح آب، نیمرخ محاسباتی سطح آب با در نظر گرفتن نیروی درگ و نیمرخ محاسباتی سطح آب بدون در نظر گرفتن نیروی درگ برای مصالح سنگریزه‌ای شکسته و با قطر متوسط ۲۶ میلی‌متر و دبی جریان ۱/۹ لیتر بر ثانیه آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نیمرخ آب بدون در نظر گرفتن نیروی درگ خطای فاحشی در بخش‌های انتهایی دارد.



شکل ۷- نمودار تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت واقعی در مصالح شکسته با قطر متوسط ۲۶ میلی‌متر و دبی ۱/۹ لیتر بر ثانیه



شکل ۸- مقادیر آزمایشگاهی نیمرخ سطح آب، مقادیر محاسباتی همراه با نیروی درگ و مقادیر محاسباتی بدون در نظر گرفتن نیروی درگ

$$MARE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Ex_i - C_i}{Ex_i} \right| \quad (\text{رابطه } ۲۸)$$

که در آن  $Ex_i$  مقدار آزمایشگاهی،  $C_i$  مقدار محاسباتی و  $N$  تعداد داده‌ها است. در ادامه در جدول (۴) مقادیر عددی اعماق

به‌منظور تعیین دقت رابطه (۲۵) مقادیر درصد خطای نسبی (RE) و متوسط قدر مطلق خطای نسبی (MARE) به‌ترتیب براساس روابط (۲۷) و (۲۸) محاسبه شد.

$$RE = \frac{Ex_i - C_i}{Ex_i} * 100 \quad (\text{رابطه } ۲۷)$$

آزمایشگاهی، محاسباتی بدون درگ و محاسباتی با نیروی درگ  
نسبت سرعت عمودی به سرعت جریان و مقادیر خطای نسبی و  
مطلق ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر عددی اختلاف انرژی و مقادیر خطاهای نمونه شکسته با دبی ۱/۹ لیتر بر ثانیه

فاصله از مبدا (متر)	قدر مطلق $\Delta E$ محاسباتی بدون درگ و آزمایشگاهی (متر)	قدر مطلق $\Delta E$ محاسباتی با درگ و آزمایشگاهی (متر)	فاصله از مبدا (متر)	$v/w$	RE % محاسباتی بدون نیروی درگ	RE % محاسباتی با نیروی درگ
۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۱	۰/۰۵۳	۰/۱۱۸	۰/۰۸۴
۰/۱۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۲	۰/۰۵۳	۰/۳۰۲	۰/۱۷۴
۰/۲۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۳	۰/۰۵۴	۱/۲۸۴	۰/۹۹۷
۰/۳۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۴	۰/۰۵۴	۱/۲۷۷	۰/۷۵۷
۰/۴۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۵	۰/۰۵۴	۱/۷۲۹	۰/۸۹۴
۰/۵۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۶	۰/۰۵۵	۲/۲۹۵	۱/۰۵۳
۰/۶۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۷	۰/۰۵۵	۳/۷۵۱	۲/۰۱۰
۰/۷۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۸	۰/۰۵۶	۴/۲۳۱	۱/۵۸۲
۰/۸۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۹	۰/۰۵۶	۴/۸۸۱	۱/۷۱۵
۰/۹۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۱	۰/۰۵۷	۴/۹۳۵	۰/۷۷۱
۱/۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۱/۱	۰/۰۵۷	۷/۶۳۱	۲/۳۷۰
۱/۱۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	۱/۲	۰/۰۵۸	۷/۸۳۲	۱/۰۵۴
۱/۲۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۴	۱/۳	۰/۰۵۹	۸/۷۸۰	۰/۱۴۳
۱/۳۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۴	۱/۴	۰/۰۵۹	۱۰/۱۹۴	-۰/۷۷۸
۱/۴۵	۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۱/۵	۰/۰۶۰	۱۳/۵۳۲	-۰/۲۰۶
۱/۵۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵	۱/۶	۰/۰۶۲	۱۷/۳۲۰	-۰/۰۳۲
۱/۶۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۱/۷	۰/۰۶۳	۱۷/۶۴۱	-۲/۸۸۸
۱/۷۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۶	۱/۸	۰/۰۶۳	۲۴/۱۱۵	-۰/۸۵۵
۱/۸۵	۰/۰۲۴	۰/۰۰۶	۱/۹	۰/۰۶۳	۳۰/۳۹۲	-۴/۸۴۱
۱/۹۵	۰/۱۳۵	۰/۰۰۷	۲	۰/۰۶۴	۴۱/۲۲۷	-۵/۳۶۷
۲/۰۵	۰/۱۴۵	۰/۰۱۰	۲/۱	۰/۰۶۵	۶۱/۵۲۶	-۴/۷۲۴
					MARE % بدون درگ	MARE % با نیروی درگ
					۱۲/۰۴۵۱	۱/۵۲۵۷

متوسط ۲۶ میلی‌متر و دبی ۱/۶۴ لیتر بر ثانیه نیز نتایج مشابه  
آزمایش انجام شده بر روی مصالح شکسته را داراست. با این تفاوت  
که متوسط خطای نیمرخ محاسباتی بدون نیروی درگ برای برابر  
۵/۳ درصد و متوسط خطای نیمرخ محاسباتی با در نظر گرفتن  
نیروی درگ برابر ۱/۵ درصد به دست آمده است. شایان ذکر است  
که مقادیر خطاهای مذکور برای شرایطی که زاویه سطح آب بیش  
از ۷ درجه است، به ترتیب ۱۴/۴۶٪ و ۲/۰۹٪ است. در جدول (۵)  
مقادیر متوسط قدر مطلق خطای نسبی برای دبی‌های دیگر آورده  
شده است. همچنین در جدول (۶) مقادیر متوسط قدر مطلق  
خطای نسبی برای دبی‌های دیگر زمانیکه زاویه سطح آب بیش از  
۷ درجه باشد، آورده شده است.

نتایج ارائه شده در جدول (۴) نشان می‌دهد با افزایش فاصله  
از ابتدای کانال اولاً نسبت  $\frac{V}{W}$  یا نسبت عمودی سرعت جریان  
به سرعت کل زیادتر می‌شود، ثانیاً مقدار قدر مطلق اختلاف انرژی  
مقاطع متوالی افزایش می‌یابد. به همین ترتیب می‌توان مشاهده  
نمود که مقدار متوسط قدر مطلق خطای نسبی برای عمق  
محاسباتی بدون درگ و با درگ به ترتیب برابر با ۱۲/۰۵٪ و  
۱/۵۳٪ می‌باشد. شایان ذکر است که مقادیر خطاهای مذکور برای  
شرایطی که زاویه سطح آب بیش از ۷ درجه است، به ترتیب  
۴۴/۳۸٪ و ۴/۹۷٪ است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که  
محاسبات مربوط به آزمایش مصالح سنگریزه‌ای گردگوشه با قطر

جدول ۵- متوسط قدر مطلق خطای نسبی برای کل طول کانال

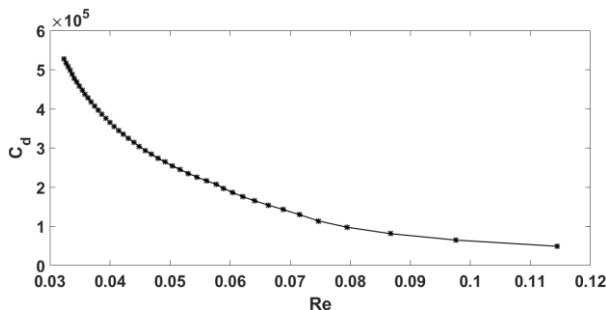
برای مصالح شکسته شده				برای مصالح گردگوشه			
دبی ۰/۷۴۵ لیتر بر ثانیه		دبی ۱/۰۴ لیتر بر ثانیه		دبی ۰/۶۴۹ لیتر بر ثانیه		دبی ۰/۹۷۱ لیتر بر ثانیه	
بدون نیروی درگ	با نیروی درگ	بدون نیروی درگ	با نیروی درگ	بدون نیروی درگ	با نیروی درگ	بدون نیروی درگ	با نیروی درگ
٪۳/۳۲	٪۱۲/۰۸	٪۱/۶۱	٪۸/۸	٪۰/۹۳	٪۸/۰۴	٪۰/۵۲	٪۲/۸۹

جدول ۶- متوسط قدر مطلق خطای نسبی برای زاویه سطح آب بیش از ۷ درجه

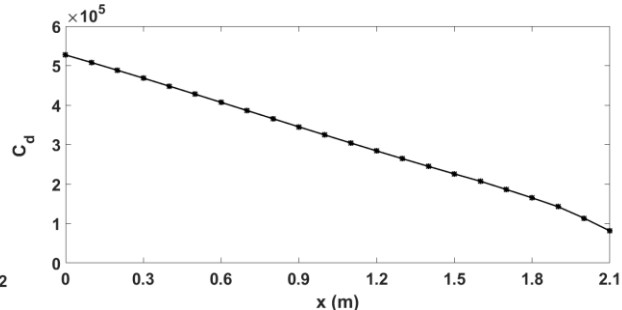
برای مصالح شکسته شده				برای مصالح گردگوشه			
دبی ۰/۷۴۵ لیتر بر ثانیه		دبی ۱/۰۴ لیتر بر ثانیه		دبی ۰/۶۴۹ لیتر بر ثانیه		دبی ۰/۹۷۱ لیتر بر ثانیه	
بدون نیروی درگ	با نیروی درگ	بدون نیروی درگ	با نیروی درگ	بدون نیروی درگ	با نیروی درگ	بدون نیروی درگ	با نیروی درگ
٪۲/۹۷	٪۳۸/۳۱	٪۱/۹۱	٪۲۴/۰۷	٪۰/۲۲	٪۳۳/۷۴	٪۰/۴۲	٪۹/۷۷

در شکل (۱۰) مقادیر ضریب درگ در مقابل اعداد رینولدز مختلف رسم شده است. به این ترتیب از شکل (۱۰) نتیجه می‌شود که با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب درگ کاهش می‌یابد. در شکل (۱۱) مقادیر زاویه سطح آب برای در طول کانال رسم شده است. در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از ابتدای کانال زاویه سطح آب افزایش می‌یابد.

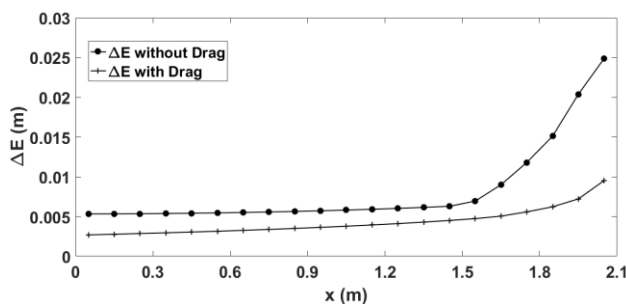
افزایش اختلاف متوسط قدر مطلق خطاهای نسبی در شرایطی که زاویه سطح آب بیش از ۷ درجه می‌باشد نسبت به مقادیر آن در کل طول کانال، نشان می‌دهد که مقدار نیروی درگ در شرایطی که زاویه سطح آب بیش از ۷ درجه است، افزایش پیدا می‌کند. در شکل (۹) مقادیر ضریب درگ برای مقاطع مختلف در طول کانال را نشان می‌دهد.



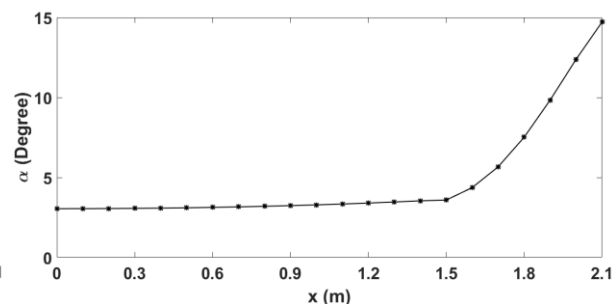
شکل ۱۰- مقادیر ضریب درگ در مقابل عدد رینولدز



شکل ۹- مقادیر ضریب درگ در مقابل طول کانال



شکل ۱۲- نرخ تفاضل انرژی مقاطع متوالی در مقابل طول کانال



سطح آب و خطوط جریان زیاد است، تفاوت اختلاف انرژی مقاطع متوالی در طول کانال در شرایط لحاظ کردن نیروی درگ و بدون در نظر گرفتن آن افزایش می‌یابد. همچنین در جدول (۷) مقادیر کمی اختلاف بین نیمرخ محاسباتی با در نظر گرفتن نیروی درگ و بدون در نظر گرفتن آن آورده شده است.

در شکل (۱۲) مقادیر تفاضل انرژی مقاطع متوالی در مقابل طول کانال رسم شده است و همانطور که مشاهده می‌شود روند هر دو گراف صعودی بوده و تفاوتی که در آن‌ها مشاهده می‌شود اختلاف زیاد آن‌ها در انتهای کانال می‌باشد. به عبارتی شکل (۱۲) نشان می‌دهد که در بخش انتهایی نیمرخ سطح آب که انحنای

جدول ۷- اختلاف عمق‌های محاسباتی با در نظر گرفتن نیروی درگ و بدون در نظر گرفتن نیروی درگ

مصالح شکسته شده		مصالح گردگوشه		
دبی ۱/۹ لیتر بر ثانیه	دبی ۱/۰۴ لیتر بر ثانیه	دبی ۱/۶۳۷ لیتر بر ثانیه	دبی ۰/۹۷۱ لیتر بر ثانیه	
طول (متر)	اختلاف عمق (متر)	اختلاف عمق (متر)	اختلاف عمق (متر)	اختلاف عمق (متر)
۰	۰	۰	۰	۰
۰/۱	۰	۰	۰	۰
۰/۲	۰/۰۰۰۴	۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲
۰/۳	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴
۰/۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۷
۰/۵	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۲
۰/۶	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۷
۰/۷	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۴
۰/۸	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۳۱
۰/۹	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۴۱
۱	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۴۷
۱/۱	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۵۴
۱/۲	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۵۸
۱/۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۱	۰/۰۱	۰/۰۰۶۵
۱/۴	۰/۰۲۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۷
۱/۵	۰/۰۲۸	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۶
۱/۶	۰/۰۳۴	۰/۰۲	۰/۰۱۳	۰/۰۰۸۳
۱/۷	۰/۰۳۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۸
۱/۸	۰/۰۴۳	۰/۰۲۴	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۰۹
۱/۹	۰/۰۵۴	۰/۰۳۱	۰/۰۱۵	۰/۰۱
۲	۰/۰۶۱	۰/۰۳۷	۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۱
۲/۱	۰/۰۷۱۶	۰/۰۵۱	۰/۰۲۱۵	۰/۰۱۶۵

محاسباتی به روشی که در آن هد نظیر نیروی درگ لحاظ نشده است، خطای فاحشی را دارد. این در حالی است که با لحاظ کردن نیروی درگ در محاسبات، نیمرخ طولی سطح آب بهبود می‌یابد. به عبارتی محاسبات نشان می‌دهد که لحاظ کردن نیروی درگ در مصالح شکسته بیش از ۸۷٪ و در مصالح گردگوشه بیش از ۷۱٪، باعث افزایش دقت نیمرخ سطح آب نسبت به شرایطی که نیروی درگ در نظر گرفته نمی‌شود، می‌گردد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که لحاظ نمودن نیروی درگ موجب بهبود دقت محاسبات در نتایج آزمایشگاهی شده است.

همانطور که در جدول مشاهده می‌شود در قسمت‌های انتهایی کانال اختلاف عمق‌های محاسباتی با یکدیگر افزایش می‌یابد.

### نتیجه گیری

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که اگر محاسبات انجام شده در پژوهش‌های پیشین از بالادست به سمت پایین دست به شکل دقیق انجام گیرد همه‌ی نیمرخ‌های مشاهداتی از نیمرخ محاسباتی در بخش انتهایی به شکل معنی‌داری پایین تر قرار خواهد گرفت. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود نیمرخ

### REFERENCES

- Ahmed, N. & Sunada, D.K. (1969). Nonlinear flow in porous media. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(6), 1847-1858.
- Ansari, E., SedghiAsl, M. & Mansoori, P. (2016). Evaluation of the accuracy of the SEEP/W computer code in estimating flow rate and water profile in coarse-grained porous media. *Journal of Iran Soil and Water Research*, 47(2), 355-362. (In Farsi)
- Bari, R. & Hansen, D. (2002). Application of gradually-

- varied flow algorithms to simulate buried streams. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 673-683.
- Bazargan, J. & Byatt, H. (2002). A new method to supply water from the sea through rockfill intakes. *Paper presented at the 5th international conference on coasts, ports and marine structures (ICOPMAS)*. (In Farsi)
- Bazargan, J., & Byatt, H. (2003). Determination of roughness coefficient of rockfill materials using of resolution method. *Paper presented at the 6th international conference on civil engineering (ICCE 2003)*. (In Farsi)
- Bazargan, J., & Shoaie, M. (2010). Analysis of non-darcy flows in rockfills using gradually varied flow theory. *Journal of Civil Engineering and Surveying*, 44(2). (In Farsi)
- Bazargan, J. & Shoaie, M. (2006). Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams.
- Bazargan, J. & Shoaie, M. (2007). Investigation of velocity head efficacy in analyzing of Non-Darcy flow in rockfill materials. *Paper presented at the 6th Iranian conference of hydraulics*, Shahrekord, Iran. (In Farsi)
- Chabokpour, J., & Amiri-Takaldani, E. (2017). Numerical-Laboratory Modeling of Longitudinal Profile of Water in Coarse Porous Media. *Journal of Iranian Water Research*, 11(26), 81-90. (In Farsi)
- Cheng, N. (1997). Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particle. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), 149-152.
- Chien, S.F. (1994). Settling velocity of irregularly shaped particles. *SPE Drilling & Completion*, 9(04), 281-289.
- Curtis, R. P., & Lawson, J. D. (1967). Flow over and through rockfill banks. *Journal of the Hydraulics Division*.
- Ergun, S., & Orning, A. A. (1949). Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(6), 1179-1184.
- Ganser, G. H. (1993). A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles. *Powder technology*, 77(2), 143-152.
- Haider, A., & Levenspiel, O. (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder technology*, 58(1), 63-70.
- Hansen, D., Garga, V. K., & 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.
- Hosseni, M. (2000). Statistical evaluation of the empirical equation that estimate hydraulic parameters flow through rockfill. *Stoch. Hydraulics*.
- Joy, DM, Lennox, WC., & Kouwen, N. (1991). Particulate transport in a porous media under non-linear flow conditions. *Journal of Hydraulic Research*, 29(3), 373-385.
- Kadlec, R. H., & Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*.
- McWhorter, D. B., & Sunada, D. K. (1977). *Ground-water hydrology and hydraulics*: Water Resources Publication.
- Scheidegger, A. E. (1958). The physics of flow through porous media. *Soil Science*, 86(6), 355.
- SedghiAsl, M., Rahimi, H., Farhoudi, J., & Vali-samani, J. M. (2011). Analysis of flow profiles within coarse-grained porous media. *Journal of Iranian Water Research*, 4. 81-88,(7). (In Farsi)
- Sidiropoulou, M. G., Moutsopoulos, K. N., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Determination of Forchheimer equation coefficients a and b. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(4), 534-554.
- Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering* (Vol. 27): Elsevier.
- Swamee, P. K., & Ojha, Ch. Sh. P. (1991). Drag coefficient and fall velocity of nonspherical particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), 660-667.
- Wang, X. H., & Liu, Zh.F. (2004). The Forchheimer equation in two-dimensional percolation porous media. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 337(3-4), 384-388.
- Ward, JC. (1964). Turbulent flow in porous media. *Journal of the Hydraulics Division*, 90(5), 1-12