

Research Article

Investigating changes in coefficients of the non-Darcy flow exponential relationship within rockfill materials under different flow conditions

Mohsen Safarian¹, Jalal Bazargan^{2*}

1- PhD candidate in Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2- Assoc. Prof. Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Abstract

Introduction: As we know, the calculation of hydraulic gradient is highly important in the analysis of steady flow inside rockfill materials. Binomial and exponential relationships are used to calculate the hydraulic gradient based on the non-Darcy flow velocity, and the binomial relationship is more accurate and efficient than the exponential relationship.

Since it is necessary to use an exponential relationship in the two-dimensional analysis of non-Darcy flow in coarse porous media, in the past, researchers have provided relationships to calculate the coefficients m and n of the exponential relationship based on the coefficients a and b of the binomial relationship. In some previous studies, Vmax= 1 has been considered, even though the maximum flow velocity depends on the physical characteristics of the pebbles and the characteristics of the flow and is not necessarily equal to one. For this reason, in this research, by designing and equipping the laboratory and recording the laboratory data, the maximum velocity based on the values of a, b and Re of the analytical model of Ahmed and Sunada (1969) is proposed.

As mentioned above, various researchers tried to calculate the coefficients of the exponential relationship using the values of a and b in the binomial relationship. One of the most important relationships is presented by George and Hansen (1992) as follows.

$$n = \frac{5a + 6bV_{max}}{5a + 3bV_{max}}$$
(1)
$$m = \frac{(5a + 4bV_{max})(4a + 3bV_{max})}{4(5a + 3bV_{max})(V_{max})^{n-1}}$$
(2)

Further, by stating that in the coarse-grained porous medium, the slope of the energy line (Sf) is equal to the hydraulic gradient (i), it can be stated that one of the most important parameters in the investigation of the flow in the gravel medium in free flow and under pressure is the calculation of it is a hydraulic gradient. In this research, using the coefficients of the binomial relationship, we presented a solution to calculate the values of m and n in the exponential relationship with better accuracy. Therefore, considering that the exponential relationship is used in the two-dimensional analysis of the non-Darcy flow in porous gravel media, this can play a significant role in reduction of the error of hydraulic gradient calculation.

Methodology: In the current research, the laboratory data recorded in the hydraulic laboratory of the Faculty of Civil Engineering of Zanjan University were used. For this purpose, an attempt was made to design and set up a test device and perform tests on different gravel materials. Experiments were carried out in a laboratory flume with the ability to tilt, with

Journal of Hydraulics ??(?), ???? 1

Investigating changes in coefficients ...

dimensions of 1m×1m and a length of 15m, and the length of 2.2m of the mentioned flume is filled with rockfill. The walls of the flume are made of plexiglass, and to measure the piezometric height along the porous media, 23 piezometers are used on the bottom of the channel, which are arranged at certain distances from each other and along them. The water flow in the channel is created by a pump with a maximum flow capacity of 90 liters per second. In order to create a porous media, three types of rockfill materials with small, medium and large diameters have been used in the experiments. During the tests, to ensure a stable flow, the pump was working for about 10 minutes with the desired flow and after the stability of the flow, the desired parameters were measured. These parameters include the piezometric height at the location of 23 piezometers as well as the water depth at the location of each piezometer. Piezometric values are read using a calibrated table. The water depth was also measured and recorded directly by a ruler.

Results and Discussion: Since the exponential relationship is only accurate for a certain range of Reynolds numbers and the user area recommended for this relationship by its providers is only non-quiet flow conditions, therefore, if the exponential relationship is used in the two-dimensional solution of the equations, there will be a large error will enter the calculations. To avoid this problem, various researchers have tried to convert the binomial relationship into an exponential relationship. If the minimum flow velocity Vmin and the maximum flow velocity Vmax in the conversion area of the binomial relationship is in the form of an exponential relationship. In order to convert the two mentioned relations, relations (1) and (2) can be used. According to the conducted tests, in most cases, Vmin is considered zero and Vmax value is assumed to be equal to one, while the maximum flow velocity depends on the physical characteristics of the pebbles and the characteristics of the flow and is not necessarily equal to one. Therefore, Vmax can be calculated from the following relationship according to Ahmed and Sunada's (1969) analytical model and the definition of the Reynolds number as Re= QVd/μ .

$$V_{max} = Re_{max} \frac{a}{h}$$

By using relations (1), (2) and (3), it is possible to take advantage of the accuracy of the binomial relation and the practical property of the exponential relation in the two-dimensional analysis in porous media.

(3)

If relations (1) and (2) are used in the calculation of the coefficients of the exponential relationship of steady flow in gravel materials, the average relative error between the calculated and recorded hydraulic gradients in the laboratory assuming Vmax=1 (according to previous research) in fine gravel materials, medium and coarse are calculated to be 21.95%, 22.98% and 21.97%, respectively. While if relation (3) is used (the solution presented in the current research), the average relative error values of the hydraulic gradient are equal to 11.39, 14.69 and 19.72%, respectively.

Conclusion: In general terms, by using relations (1) and (2) and using the relation proposed in the present study instead of Vmax=1, the average values of the relative error of the hydraulic gradient in fine, medium and coarse rockfill materials have decreased to 10.56, 8.29 and 2.25%, respectively, which indicates the high accuracy and efficiency of the proposed solution.

Keywords: Non-Darcy flow, exponential relation, binominal relation, rockfill, hydraulic gradient.



بررسی تغییرات ضرایب رابطهی نمایی جریان غیردارسی درون مصالح سنگریزهای تحت شرایط مختلف جریان

محسن صفریان^۱، جلال بازرگان^{۲*}

مقاله پژوهشی

https://doi.org/

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازههای هیدرولیکی، دانشکدهی مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان. ۲- دانشیار، دانشکدهی مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان.

چکیده: محاسبه ی گرادیان هیدرولیکی در تحلیل جریان ماندگار درون مصالح سنگریزه ای اهمیت بالایی دارد. برای محاسبه ی گرادیان هیدرولیکی بر اساس سرعت جریان غیردارسی از روابط دوجمله ای و نمایی استفاده می شود که رابطه ی دوجمله ای نسبت به نمایی از دقت و کارایی بالاتری برخوردار است. از آنجا که در تحلیل دوبُعدی جریان غیردارسی در محیطهای متخلخل درشت استفاده از رابطه ی نمایی ضرورت دارد، محققین در گذشته روابطی را جهت محاسبه ی ضرایب m و n رابطه ی نمایی بر اساس ضرایب a و d رابطه ی دو جمله ای ارائه داده اند. در برخی از پژوهش های قبلی ۱ = ۲۰ در نظر گرفته شده است، این در حالی است که حداکثر سرعت جریان به خصوصیات فیزیکی سنگریزه ها و ویژگی های جریان بستگی داشته و لزوما معادل واحد نیست. در پژوهش حاضر محاسبه ی سرعت حداکثر بر مبنای مقادیر a و d و ع n مدل تحلیلی احمد و سونادا پیشنهاد شده است. نتایج نشان می دهد که برای محاسبه ی ضرایب m و n رابطه ی نمایی با استفاده از ضرایب a و d و با فرض ۱ =۲۰۰۷ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که برای محاسبه ی ضرایب m و n رابطه ی نمایی با آزمایشگاه برای مصالح ریز، متوسط و درشت به ترتیب برابر با ۲۲/۹۸، ۲۱/۹۹ و ۲۰/۹۲ درصد به دست آمده است. در حالی که بر مبنای شرابطه ی پیشنهادی، مقادیر میانگین خطای نسبی در مصالح ریز، متوسط و درشت به ترتیب برابر با ۱۹/۱۳، ۱۹/۹۹ و ۲۹/۹۲ در شده است. به بیان دیگر، راهکار پیشنهادی باعث افزایش دقت محاسبه ی گرادیان هیدرولیکی محاسباتی و ثبت شده در شده است. به بیان دیگر، راهکار پیشنهادی باعث افزایش دقت محاسبه ی گرادیان هیدرولیکی با استفاده از مقادیر a و مر و مر مرای ۹ ۳۱/۲۰

واژههای کلیدی: جریان غیردارسی، رابطهی نمایی، رابطهی دوجملهای، مصالح سنگریزهای، گرادیان هیدرولیکی

۱– مقدمه

دانش حرکت آب یا همان علم هیدرولیک را میتوان در چهار دسته اصلی هیدرولیک مجاری باز، هیدرولیک مجاری تحت فشار، هیدرولیک محیطهای متخلخل و هیدرولیک دریاها و اقیانوسها طبقهبندی کرد. از میان موارد فوق، جریان آب در خاک یا همان هیدرولیک محیطهای متخلخل از اهمیت و حساسیت خاصی برخوردار است و همواره مورد توجه محققین بوده است. در حالت کلی، جریان آب در محیطهای متخلخل، میتواند به دو صورت شکل بگیرد. در محیطهای متخلخل با مصالح ریزدانه از قبیل خاک رس با توجه به کم بودن سرعت، جریان به صورت آرام و لایهای^۱ بوده و برای تحلیل این نوع جریانها و به دست آوردن مشخصات آنها از قبیل سرعت، کریان انرژی و سطح آزاد آب، از رابطهی (1856) Darcy

که به شکل زیر تعریف شده است استفاده می شود (McWhorter and Sunada, 1997)

 $i = \left(\frac{1}{k}\right) V$ که در رابطهی فوق: V سرعت جریان، K قابلیت هدایت هیدرولیکی که به خصوصیات فیزیکی ذرات و خواص سیال بستگی دارد و i: گرادیان هیدرولیکی میباشد.

در حالی که در محیط درشتدانه به دلیل وجود منافذ، سرعت جریان بالا بوده و جریان تمایل به آشفتگی دارد (, Hansen Garga, and Townsend,1995)، به همین دلیل رابطهی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان به صورت غیرخطی بوده و از قانون غیردارسی تبعیت می کند. به دلیل اهمیت این نوع جریانها در کاربریهای مختلف مهندسی از آن، در طول سالهای گذشته تحقیقات گستردهای در زمینهی جریانهای

¹.Laminar

غیرخطی در محیطهای متخلخل انجام شده است و پژوهشگران در رشتههای گوناگون علوم و مهندسی از قبیل شیمی، فیزیک، عمران، معدن، نفت و گاز و غیره، به کار تحقیقاتی در این زمینه با روشهای تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی پرداختهاند و مدلهای مختلفی را نیز ارائه دادهاند. مدلها و رابطههای ارائه شده جهت تحلیل جریان در محیطهای متخلخل درشتدانه معمولاً به دو شکل رابطههای نمایی و دو جملهای قابل بیان میباشند که در ادامه به تعدادی از مهم ترین آنها اشاره شده است.

۱–۱– مدلهای نمایی

در تحلیل جریان در محیطهای متخلخل درشتدانه، مدلهای مختلفی بهصورت نمایی ارائه شده است که اهم آنها به صورت زیر میباشد:

 $i = mV^n$

۱-۱-۱- مدل میس باخ

(Missbach (1937، رابطهی ذیل را ارائه نمود:

(۲)

که در آن m و n به خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل و سیال و ویژگیهای جریان بستگی دارد (Bazargan, 2002). (and Stephenson, 1969).

T-I-I- مدل لپس (۱۹۳3) د نیز رابطهی پیشنهادی خود را به شکل زیر بیان کرد: (۳) $V = C. r^{0.5}. i^{0.54}$ در رابطهی فوق، C عدد ثابت تجربی که به شکل و زبری سنگدانهها و وزن مخصوص و گرانروی آب بستگی دارد و مقدار آن از ۳۳ برای شن شکسته تا ۴۶ برای سنگ مرمر

صیقلی متغیر است، r شعاع هیدرولیکی متوسط و i گرادیان هیدرولیکی میباشد (Bazargan, 2002 and Leps, 1973).

۲-۱-۱- مدل ویل کینز
۲-۱-۱- مدل ویل کینز
۲-۱-۳ (باطه پیشنهادی (Wilkin (1995)، ۱۹٬۰ (۳)
۷ = C · μ^{a'} · r^{b'} · i^{n'}
۲ (۴)
۲ میانگین سرعت سیال در محیط متخلخل، ۲ فریب شکل محیط متخلخل، ۳ گرانروی دینامیک سیال،
۲ شعاع متوسط هیدرولیکی محیط متخلخل درشتدانه،
۲ میاع متوسط هیدرولیکی محیط متخلخل درشتدانه،
۱ میاع میدرولیکی و ۵، م ۱۹ ثابتهای تجربی میباشند
(Bazargan, 2002 and Venkatarman and Rao, 1998)

۲-۱- مدلهای دو جملهای

یکی از مهم ترین مدل های ارائه شده به صورت دو جملهای رابطهی پیشنهادی (Forchheimer (1901، بوده که به شکل زیر میباشد:

(4) (4) بعد از ایشان نیز این رابطه توسط محققین متعددی همچون بعد از ایشان نیز این رابطه توسط محققین متعددی همچون Ward (1964) ،Linquist (1965) ،Schieidgger (1963) و غیره مورد Muskat (1949) ،Ahmed & Sunnada (1969) پذیرش و تأیید اعتبار تئوریک قرار گرفت. محققین مختلف پذیرش و تأیید اعتبار تئوریک قرار گرفت. محققین مختلف در تحقیقات خودشان، سعی نمودهاند که ضرایب a و d را به خصوصیات فیزیکی سیال و محیط متخلخل ارتباط دهند و نتیجهی تحقیقات آنها به صورت رابطههای متعددی به دست آمده است که تعدادی از آنها در جدول ۱ آورده شده است (Bazargan, 2002 and Leps, 1973).

روابط جدول ۱ و روابط متعدد دیگری از جمله روابط ارائه شده توسط (Rahi-Asl and ،Stephenson (1979) فشده توسط (2011) Rahimi (2011) دو جملهای (a,b)، در شرایط جریان ماندگار ارائه شده است Stephenson, 1969 and Sedghi-Asl and Rahimi,) (2011). در یک مقایسهی کلی بین رابطههای دو جملهای (رابطهی ۵) و نمایی (رابطهی ۲)، وجوه تمایز دو رابطه به شرح زیر بیان می شوند:

- تک جملهای بودن رابطهی نمایی سبب میشود که این رابطه فقط در دامنهی محدودی از تغییرات اعداد رینولدز (یا سرعت) قابل استفاده باشد.

رابطهی دو جملهای با استفاده از مطالعات ابعادی و
معادلهی ناویر-استوکس و همچنین با نتایج آزمایشهای
تعداد بسیار زیادی از محققان قابل تطابق است (,1974

- تفکیک اثرات خصوصیات جریان و ویژگیهای مصالح متخلخل و حتی خواص سیال در رابطهی دو جملهای امکانپذیر است، در حالی که در رابطهی نمایی چنین نیست (Bazargan and Bayat, 2002).

- رابطهی دو جملهای به شکل رابطهی دارسی ویسباخ و با استفاده از عدد رینولدز و ضریب اصطکاک جریان قابل تعریف است، در حالی که رابطهی نمایی چنین نیست (Stephenson, 1969 and Leps, 1973).

Table 1 The coefficients of the Foreintennet equation obtained by some researchers									
Forchheimer equation	coefficients	Researcher							
$a = \frac{\mu}{\rho g k}$	$b = \frac{1}{g\sqrt{ck}}$	Ahmed and Sunada, (1969)							
$a = \frac{v}{gk}$	$b = \frac{C'_W}{g\sqrt{k}}$	Ward (1964)							
$a=\frac{150(1-n)^2\upsilon}{n^3gd^2}$	$b = 1/75 \frac{(1-n)}{n^3 gD}$	Ergun's (1952)							
$a = \frac{1500(1-n)^3}{n^2} \frac{\upsilon}{gd^2}$	$b = \frac{3/6(1-n)}{n^3} \frac{1}{gd}$	Engelund (1953)							
$a = \frac{144\nu(1-n)^2}{gn^3d^2}$	$\mathbf{b} = \frac{2/4 \ (1-\mathbf{n})}{\mathbf{g}\mathbf{n}^3 \mathbf{d}}$	Kovacs, (1980)							
$a = 70 \frac{0}{gnR_h^2}$	$b = \frac{0/81}{gn^{0/5}R_h}$	McCorcoudale et al. (1978)							
$a = \frac{255\upsilon(1-n)}{gn^{3.7}d^2}$	$b = \frac{2(1-n)}{gn^3d}$	Kadlec and Knigth (1996)							
$a = \frac{4/6\nu}{\text{gnd}^2}$	$b = \frac{0/79}{gn^{0.5}d}$	Sidiropoulou et al. (2007) for low Re, $\text{Re} \le 500$							
$a = \frac{70v}{gnd^2}$	$b = \frac{0/54 \lambda}{g n^{0.5} d}$	Sidiropoulou et al. (2007) for high Re, Re > 500							

n :

جدول ۱ ضرايب معادلهٔ فُرشهايمر به دست آمده توسط برخی محققين (Burcharth and Andersen, 1995 and Shokri and Sabour, 2014)

با توجه به مطالب گفته شده محققین مختلفی سعی در محاسبهی ضرایب رابطهی نمایی با استفاده از مقادیر a و b در رابطهی دو جملهای نمودند. یکی از مهمترین این روابط توسط (George & Hansen (1992) به صورت زیر ارائه شده است:

$$=\frac{5a+6bV_{max}}{5a+3bV_{max}}$$
([†])

$$m = \frac{(5a + 4bV_{max})(4a + 3bV_{max})}{4(5a + 3bV_{max})(V_{max})^{n-1}}$$
(^V)

در دیگر تحقیقات انجام شده، (2011) در معادلهی تأثیر شکل و اندازهی مصالح سنگریزهای در معادلهی فُرشهایمر را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر مصالح کروی سهم حفرات برای جریان عبوری کاهش پیدا کرده و همچنین با کاهش سرعت، میزان قبفتگی جریان کمتر میشود و پارامتر غیرخطی b در معادلهی فُرشهایمر کاهش مییابد. همچنین (2002) Bazargan and Bayat, با استفاده از

دادههای آزمایشگاهی ضرایب معادلهی فُرشهایمر را واسنجی نمودند و برای پیهای آبرفتی درشتدانه در شرایط صحرایی معادلات واسنجی شده را پیشنهاد کردند.

(2014), Sedghi-Asl et al.، با آزمایشهای جریان آب با سرعت بالا بر روی مصالح دانهای، رفتار گرادیان هیدرولیکی را بررسی کردند. (2001) Chen et al.، نیز معادلهی فُرشهایمر را از تئوری همگنسازی به دست آوردند.

در ادامه با بیان این موضوع که در محیط متخلخل درشتدانه، شیب خط انرژی (S_f) برابر با گرادیان هیدرولیکی (i) میباشد، میتوان اظهار داشت که یکی از مهم ترین پارامترها در بررسی جریان در محیط سنگریزهای در حالت جریان آزاد و تحت فشار، محاسبه ی گرادیان Stephenson, 1969 and Bari and Shoaei, 2006 (Hansen, 2002 and Bazargan and Shoaei, 2006).

همانطور که میدانیم در تحلیل جریان درون مصالح سنگریزهای و حل معادلهی انرژی، لازم است که بتوان افت اصطکاکی جریان در طول مسیر را تعیین نمود. لذا روابط مختلفی برای برآورد i (یا افت انرژی در واحد طول مسیر جریان) بر حسب سرعت متوسط جریان یا v (مشابه جریان در درون لولهها و کانالها)، توصیه شده است که در حالت کلی تمامی روابط توصیه شده را به صورت رابطهی دوجملهای فُرشهایمر و رابطهی نمایی، چنان که قبلاً نیز به آنها اشاره شد، میتوان دستهبندی کرد (Sunada, 1997 آنها اشاره شد، میتوان دستهبندی دو جملهای a و d ضرایب ثابت مربوط به مصالح، i گرادیان هیدرولیکی و v سرعت ظاهری جریان در داخل مصالح متخلخل میباشد. همچنین در مورد

رابطهی نمایی که در آن n، n توسط محققین مختلف به شکلهای گوناگونی تعریف شدهاند در حالت کلی می توان گفت که مقادیر m و n به خصوصیات مصالح و سیال و سرعت جریان (یا عدد رینولدز) بستگی دارند و در هر مصالح خاص و برای محدودهی نسبتاً مشخصی از عدد رینولدز با تقریب مناسبی می توان ضریب m و n را ثابت در نظر گرفت (Curtis and Lawson, 1969).

اما از آنجایی که رابطه ینمایی (رابطه ۲) فقط برای دامنه ی خاصی از اعداد رینولدز دارای دقت مناسب میباشد و ناحیهی کاربری توصیه شده برای این رابطه از سوی ارائه کنندگان آن، تنها شرایط غیر آرام جریان است، لذا در صورت استفاده از رابطهی نمایی در حل دو بعدی معادلات، خطای زیادی وارد محاسبات خواهد شد. برای پرهیز از این مشکل محققین مختلفی سعی در تبدیل رابطهی دوجملهای (رابطه ۵) به شکل رابطهی نمایی (رابطه ۲) نمودهاند، در صورتی که حداقل سرعت جریان Vmin و حداکثر سرعت جریان V_{max} در ناحیهی تبدیل رابطهی دو جملهای به شکل رابطهی نمایی باشد. جهت تبدیل دو رابطهی مذکور (روابط دو جملهای و نمایی)، همانطور که از قبل هم گفته شد می توان از روابط (۶) و (۷) استفاده کرد. با توجه به آزمایشهای انجام شده در اغلب موارد V_{min} را صفر در نظر گرفته و مقدار V_{max} را معادل واحد فرض می کنند (George and Hansen, 1992)، در حالی که حداکثر سرعت جریان به خصوصیات فیزیکی سنگریزهها و ویژگیهای جریان بستگی داشته و لزوماً معادل یک نیست. بنابراین را می توان به شرح زیر محاسبه کرد، اگرچه تعدادی V_{max} از محققین این مقدار را برای V_{max} مقداری بالادست مى دانند (George and Hansen, 1992).

در ادامه با توجه به مدل تحلیلی احمد و سونادا می توان گفت: تعریف عدد رینولدز به صورت $\frac{\rho Vd}{\mu} = Re$ بوده که در آن، d معادل قطر مؤثر حفرات مصالح متخلخل بوده و به وسیلهی رابطهی $K = cd^2$ به نفوذپذیری ذاتی مصالح (K) مرتبط می شود، μ گرانروی دینامیکی سیال و ρ جرم مخصوص سیال است. در رابطهی اخیر (K²) = K)، ضریب م به خصوصیات مصالح متخلخل بستگی دارد. برای به دست آوردن c و k می توان از رابطههای پیشنهادی احمد و سونادا به شرح زیر استفاده نمود.

$$k = \frac{\mu}{\rho. \, g. \, a} \tag{A}$$

$$=\frac{1}{\mathbf{k},\mathbf{g}^2,\mathbf{b}^2}\tag{9}$$

لذا مقدار b نیز از رابطهی $\frac{\mu b}{\rho a} = d$ قابل محاسبه خواهد بود؛ بنابراین با داشتن مقادیر a و b می توان مقدار b را به دست آورد. به عبارتی می توان نتیجه گرفت که:

- $V = \frac{\text{Re } \mu}{\text{od}} \tag{1.1}$
- $V = \operatorname{Re}\frac{a}{b}$ (11)

بنابراین میتوان نوشت: V_{max} = Re_{max} $\frac{a}{b}$ (۱۲)

با توجه به مطالب بیان شده و با استفاده از رابطههای ۶، ۷ و ۱۲ میتوان از دقت رابطهی دو جملهای (رابطهٔ ۵) و خاصیت کاربردی رابطهی نمایی (رابطهٔ ۲) در تحلیل دوبُعدی در محیطهای متخلخل بهره گرفت.

در این پژوهش با استفاده از ضرایب رابطهی دو جملهای راهکاری ارائه کردیم که بتوان مقادیر m و n در رابطهی نمایی را با دقت بهتری محاسبه کرد. لذا با توجه به اینکه در تحلیل دوبعدی جریان غیردارسی در محیطهای متخلخل سنگریزهای از رابطهی نمایی استفاده می شود، این امر می تواند نقش بسزایی در کاهش خطای محاسبهی گرادیان هیدرولیکی داشته باشد.

۲- مواد و روشها

۲-۱-تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایشها در پژوهش حاضر از دادههای آزمایشگاهی ثبت شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکدهی عمران دانشگاه زنجان استفاده شده است. به همین منظور نسبت به طراحی و راهاندازی دستگاه آزمایش و انجام آزمایشها بر روی سه نوع مصالح سنگریزهای مختلف، اقدام به عمل آمد. آزمایشها در فلوم آزمایشگاهی با قابلیت شیب پذیری، به ابعاد ۱m ×۱m و طول ۱۵m انجام شده که طول ۲/۲m از فلوم مذکور با سنگریزه پر شده است. دیوارههای فلوم از جنس شیشه و پلکسی گلس بوده و جهت اندازه گیری بلندای پیزومتریک در طول محیط متخلخل از ۲۳ عدد پیزومتر در کف کانال استفاده شده که چیدمان قرار گیری آنها با فواصل مشخصی از هم و در امتداد یکدیگر میباشند، به طوریکه اولین پیزومتر در فاصلهی ۶/۸cm از ابتدای محیط متخلخل و در ادامهی آن پیزومترهای دوم تا هفتم با فاصلهای در حدود ۱۵cm، پیزومترهای هشتم تا سیزدهم حدوداً ۱۰cm و پیزومترهای چهاردهم تا بیست و سوم نیز در حدود ۵cm، از یکدیگر قرار گرفتهاند. جریان آب در کانال توسط یک پمپ با حداکثر توان تولید دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه ایجاد شده

С

که در این تحقیق دبی جریان از ۸/۵ تا ۲۷/۵ لیتر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین برای آرام کردن جریان، یک توری فلزی در ابتدای فلوم به کار گرفته شده است. شکل ۱ نمای کلی از فلوم آزمایشگاهی مورد نظر را نشان میدهد.



Fig. 1 Overview of laboratory flume شکل ۱ نمای کلی فلوم آزمایشگاهی

در انجام آزمایشها به منظور ایجاد محیط متخلخل سه نوع مصالح سنگریزهای با قُطرهای ریز، متوسط و درشت، مورد استفاده قرار گرفتهاند. این مصالح از یک معدن در روستای نیکویه واقع در ۴۰ کیلومتری شمالغرب شهر قزوین تهیه شده است. جنس سنگریزهها از نوع آذرین بوده که مشخصات آورده شدهاند. شکل ۳ نیز تصویری از انجام مراحل دانهبندی در آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت عمران بتن شهر زنجان نشان میدهد. لازم به ذکر است که برای پُر و خالی کردن کانال از سنگریزهها، از یک جرثقیل سقفی با قابلیت حرکت در طول کانال بهره گرفته شده است.

در جدول زیر، ضریب یکنواختی (C_u) برابر با $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ و ضریب انحنا (C_u) برابر با $\frac{(D_{30}^2)}{D_{10}*D_{60}}$ است.

جدول ۲ مشخصات مصالح آزمایشگاهی Table 2 Specifications of laboratory motorial

Table 2 Specifications of faboratory materials										
Porosity (-)	Curvature coefficient (C _c)	Coefficient of uniformity (C _u)	d100 (mm)	d60 (mm)	d50 (mm)	d30 (mm)	d10 (mm)	do (mm)	Rockfill materials	
0.42	0.83	2.61	54.93	17.7	13.99	9.97	6.78	3.94	fine	
0.39	1.22	6.79	56.97	28.56	23.89	12.1	4.21	7.46	medium	
0.28	1.42	3.05	50.8	35.02	31.97	23.89	11.49	3.34	coarse	





Journal of Hydraulics ??(?), ????



Fig. 3 The stages of granulation of rockfill materials in the quality control laboratory of Omran Beton Zanjan Company شکل ۳ مراحل انجام دانهبندی مصالح سنگریزهای در آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت عمران بتن زنجان

> جهت اندازه گیری دبی ایجاد شده توسط پمپ، دو فلومتر مغناطیسی و اُلتراسونیک مورد استفاده قرار گرفتهاند که تصویری از آنها در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور ایجاد دبیهای مورد نظر از یک اینورتر استفاده به عمل آمد و عملکرد آن اینگونه بود که توسط نرمافزار مربوطه، فرکانس مورد نیاز برای تولید دبی، به پمپ ارسال میشد. لازم به ذکر است که جهت اطمینان از عملکرد صحیح اینورتر^۱، از دو فلومتر نام برده، استفاده گردید.



Fig. 4 Magnetic and ultrasonic flowmeters used in the laboratory شکل ۴ فلومترهای مغناطیسی و اُلتراسونیک استفاده شده در آزمایشگاه

در طول انجام آزمایشها برای حصول اطمینان از ایجاد جریان ماندگار، حدود ۱۰ دقیقه پمپ با دبی مورد نظر مشغول به کار بوده و پس از پایداری جریان، پارامترهای مورد نظر اندازه گیری شدهاند. این پارامترها شامل بلندای پیزومتریک در محل ۲۳ پیزومتر و همچنین عمق آب در محل هر پیزومتر می باشد. مقادیر بُلندای پیزومتریک با استفاده از یک تابلوی مُدرج قرائت شده که تصویر آن در شکل ۵ نشان داده شده است. در هر آزمایش عمق آب نیز به صورت مستقیم (در نقاطی که پیزومترها واقع شدهاند) اندازه گیری و ثبت گردید. در اینجا می توان به این نکته نیز اشاره کرد که پیش از انجام هر آزمایش، سطح آب داخل مخزن کنترل شده و در تراز مشخصی تنظیم می گردید تا همه ی آزمایشها در شرایط کاملاً مشابهی صورت پذیرند.



Fig. 5 Scaled board for piezometric height reading in the bottom and body of the laboratory flume

¹. Calibration

سنگریزهای را برابر با شیب خط انرژی (Sf) می توان در نظر شکل ۵ تابلوی مُدرج جهت قرائت بلندای پیزومتریک در کف و گرفت (Stephenson, 1969 and Bari and Hansen, 2002 بدنهی فلوم آزمایشگاهی and Bazargan and Shoaei, 2006). از طرفي محاسبهي ۳- نتایج و بحث گرادیان هیدرولیکی در تحلیل جریان ماندگار (استفاده از دو روش تئوری جریانهای متغیر تدریجی که جریان را به استفاده از مصالح سنگریزهای در سازههای آبی به دلیل صورت یک بُعدی تحلیل می کند و حل معادله ی پار کین که خصوصیات ویژهی آنها روز به روز رو به افزایش میباشد. جریان را به صورت دوبُعدی تحلیل مینماید) و جریان به طورىكه امروزه از اين مصالح جهت فيلتراسيون، ساخت غيرماندگار (حل معادلات سنت ونانت) از اهميت بالايي گابیون، پوشش کانالها، حوضچههای آرامش و سدهای برخوردار است. پارهسنگی استفاده میشود. در علوم مهندسی برای ارزیابی در ادامه نمودارهای مربوط به گرادیان هیدرولیکی (i) رفتار سازههای ساحلی و طراحی صحیح این سازههای برحسب سرعت جریان (V) برای انواع مصالح سنگریزهای حجیم و سنگین لازم است از تئوریهای محیط متخلخل در شکلهای ۶، ۷ و ۸ و مقادیر ضرایب روابط دو جملهای درشتدانه سنگریزهای با مفهوم جریان غیرخطی استفاده (d و a) و نمایی (n و m) در جدول ۳ ارائه شدهاند. نمود. با توجه به اینکه در اغلب شرایط ارتفاعِ نظیر سرعتِ جریان در مقایسه با ^م ناچیز است، گرادیان هیدرولیکی در مصالح Q=8.51 lit/s Q=10.05 lit/s 0.6 0.6 $V = 23.563x^2 + 1.192x$ $y = 33.807x^2 + 1.2194x$ $R^2 = 0.9643$ 0.5 $R^2 = 0.9488$ 0.5 $y = 23.175 x^{1.7765}$ $y = 38.336x^{1.8756}$ Hydraulic gradient $R^2 = 0.9471$ Hydraulic gradient 0.4 $R^2 = 0.9483$ 0.4 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1 0.1 0 0 0 0.02 0.04 0.06 0.08 0.1 0.12 0 0.02 0.04 0.06 0.08 0.1 0.12 flow velocity (m/s) flow velocity (m/s)



Fig. 6 Hydraulic gradient versus flow velocity by laboratory data for small rockfill شکل ۶ گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان توسط دادههای آزمایشگاهی برای سنگریزهی ریز





Fig. 7 Hydraulic gradient versus flow velocity by laboratory data for medium rockfill **شکل ۲** گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان توسط دادههای آزمایشگاهی برای سنگریزهی متوسط



Journal of Hydraulics ??(?), ???? 11

Fig. 8 Hydraulic gradient versus flow velocity by laboratory data for coarse rockfill شکل ۸ گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان توسط دادههای آزمایشگاهی برای سنگریزهی درشت

Table 3 Values of binomial and exponential relationship coefficients obtained using laboratory data										
Type of material	discharge (li/s)	a (s/m)	b (s²/m²)	m	n					
	8.51	1.19	23.56	23.18	1.78					
amall real-fill	10.05	1.22	33.81	38.34	1.88					
Sillali TOCKIIII	14.15	1.17	65.24	61.70	1.88					
	20.62	1.99	140.74	145.64	1.93					
	11.61	1.58	28.25	27.22	1.76					
Madium malifill	13.46	2.11	39.71	48.68	1.85					
Medium rockim	15.78	1.59	80.30	108.14	1.99					
	17.81	1.44	125.01	148.83	1.99					
	16.47	0.86	41.44	54.79	2.00					
Coore and left	23.92	2.32	47.48	73.31	1.97					
Coarse rockilli	26.36	2.77	49.13	68.86	1.91					
	27.46	2.45	57.76	74.57	1.92					

جدول ۳ مقادیر ضرایب رابطهی دو جملهای و نمایی حاصل شده با استفاده از دادههای آزمایشگاهی

در این پژوهش پس از انجام آزمایشها و ثبت مشاهدات آزمایشگاهی برای سه نوع مصالح سنگریزهای ریز، متوسط و درشت به تحلیل آنها یرداخته شد و پس از محاسبهی ضرایب رابطهی دو جملهای (b و a) برای مصالح ذکر شده، مقادیر رابطهی نمایی (n و m) بر مبنای ضرایب a و h به دست آمد. پس از آن جهت مقایسهی نتایج حاصل شده از مشاهدات ثبت شده در آزمایشگاه به محاسبهی مقادیر m و $V_{max} = 1$ با استفاده از روابط ۶ و Y در دو حالت Nیر داخته شد. $V_{max} = \text{Re}_{max} \frac{a}{b}$

با توجه به رابطهی بیان شده مقدار Re_{max} در مقطع خروجی جریان از محیط سنگریزهای یعنی شرایطی که سرعت حداكثر و عمق حداقل است، بهدست مى آيد. به همین منظور در پژوهش حاضر مقدار سرعت حداکثر برای مقطع مذکور در نظر گرفته شده است. با توجه به توضیحات داده شده، میانگین خطای نسبی (MRE) بین گرادیان هیدرولیکی محاسباتی و ثبت شده در آزمایشگاه در حالتهای مختلف محاسبه گردید که به تفکیک مصالح سنگریزهای در جدولهای ۴، ۵ و ۶ آورده شدهاند.

جدول ۴ ضرایب رابطهی نمایی با استفاده از روابط محاسباتی و مشاهداتی و میانگین خطای نسبی گرادیان هیدرولیکی برای مصالح سنگریز های ریز

¶Table 4 Exponential relationship coefficients using computational and observational relationships and the mean relative error of hydraulic gradient for small rockfill materials.

Type of	discharge		$V_{max} = 1$		Experimental observations $V_{max} = Re_{max} a/b$					
material	(lit/s)	m	n	MRE%	m	n	MRE%	m	n	MRE%
	8.51	24.66	1.92	30.29	12.09	1.54	10.68	23.17	1.77	9.41
small	10.05	34.93	1.94	24.83	18.34	1.61	13.88	38.33	1.87	11.19
rockfill	14.15	66.32	1.97	17.20	42.04	1.74	10.02	61.69	1.88	8.65
	20.62	142.57	1.98	15.49	89.98	1.76	10.99	145.64	1.92	9.45

جدول ۵ ضرایب رابطهی نمایی با استفاده از روابط محاسباتی و مشاهداتی خطای نسبی گرادیان هیدرولیکی برای مصالح سنگ بز وای متوسط

Table 5 Exponential relationship coefficients using computational and observational relationships and the mean relative error of hydraulic gradient for medium rockfill materials.

						<u> </u>				
Type of	discharge	$V_{max} = 1$			Experimental observations $V_{max} = Re_{max} a/b$		Experime			
material	(lit/s)	m	n	MRE%	m	n	MRE%	m	n	MRE%
	11.61	29.70	1.92	29.60	15.12	1.54	14.87	27.22	1.76	12.67
Medium	13.46	41.66	1.92	29.37	21.14	1.55	16.04	48.68	1.85	12.37
rockfill	15.78	81.76	1.97	17.44	50.84	1.73	14.22	10.14	1.99	11.64
	17.81	126.33	1.98	15.50	89.38	1.82	13.64	148.83	1.99	12.03

Journal of Hydraulics ??(?), ???? 12

هيدروليک

جدول ۶ ضرایب رابطهی نمایی با استفاده از روابط محاسباتی و مشاهداتی و میانگین خطای نسبی گرادیان هیدرولیکی برای مصالح سنگریزهای درشت

Table 6 Exponential relationship coefficients using computational and observational relationships and the mean relative error of hydraulic gradient for coarse rockfill materials.

Experimental observations		V _{max}	$V_{max} = Re_{max} \frac{a}{b}$ $V_{max} = 1$				discharge	Type of		
MRE%	n	m	MRE%	n	m	MRE%	n	m	(lit/s)	material
16.00	2.00	54.79	17.15	1.77	29.38	17.29	1.97	42.24	16.47	
15.24	1.97	73.31	20.76	1.59	27.80	23.27	1.93	49.62	23.92	Coarse
16.81	1.91	68.86	21.91	1.55	27.20	24.95	1.91	51.69	26.36	rockfill
15.05	1.92	74.57	19.04	1.61	33.25	22.35	1.93	60.01	27.46	

چنانچه از روابط ۶ و ۷ در محاسبه ی ضرایب رابطه ی نمایی (n و m) جریان ماندگار در مصالح سنگریزه ای استفاده شود، مطابق جداول ۴ تا ۶ متوسط میانگین خطای نسبی بین گرادیان هیدرولیکی محاسباتی و ثبت شده در آزمایشگاه با فرض ۱ = ۲۳ (طبق پژوهش های قبلی) در مصالح سنگریزه ای ریز، متوسط و درشت به ترتیب برابر با ۲۱/۹۵ ۲۲/۹۸ و ۲۱/۹۷ درصد محاسبه شده است. در حالی که اگر از رابطه ی ۱۲ (راهکار ارائه شده در پژوهش حاض استفاده شود، مقادیر میانگین خطای نسبی گرادیان هیدرولیکی به ترتیب برابر با ۱۹/۱۲، ۱۹/۹۶ و ۱۹/۷۲ درصد به دست آمده است.

۴- نتیجهگیری

محاسبه یگرادیان هیدرولیکی در تحلیل یک بعدی (تئوری جریان های متغیر تدریجی) و دوبعدی (حل معادله ی پارکین) جریان ماندگار درون مصالح سنگریزه ای اهمیت بالایی دارد. رابطه ی دو جمله ای نسبت به رابطه ی نمایی در محاسبه ی تغییرات گرادیان هیدرولیکی بر اساس سرعت جریان از کارایی و دقت بالاتری برخوردار می باشد. این در حالی است که برای تحلیل دوبعدی جریان درون مصالح سنگریزه ای می بایست از رابطه ی نمایی استفاده شود. به همین دلیل در پژوهش های قبلی روابطی برای محاسبه ی ضرایب m و n (روابط ۶ و ۷) رابطه ی نمایی بر اساس ضرایب a و d رابطه ی دو جمله ای ارائه شده است.

در پژوهش حاضر با استفاده از مُدل تحلیلی احمد و سونادا و عدد بی بعد رینولدز راهکاری جهت افزایش دقت پارامترهای m و n در رابطهی نمایی ارائه شده است. بهطورکلی نتایج حاصل شده از این تحقیق شامل موارد زیر می باشد:

۱- چنانچه ضرایب m و n رابطهی نمایی با استفاده از
دادههای آزمایشگاهی و رابطهی ۲ محاسبه شود، متوسط

میانگین خطای نسبی بین گرادیان هیدرولیکی محاسباتی و ثبت شده در آزمایشگاه برای مصالح سنگریزهای ریز، متوسط و درشت به ترتیب برابر با ۹/۶۸، ۱۲/۱۸ و ۱۵/۷۸ درصد محاسبه شده است.

۲- چنانچه از روابط ۶ و ۷ برای محاسبهی ضرایب m و n استفاده شود و طبق پژوهشهای قبلی ۱ = V_{max} در نظر گرفته شود، مقادیر متوسط میانگین خطای نسبی گرادیان هیدرولیکی برای مصالح مذکور به ترتیب برابر با ۲۱/۹۵، ۲۲/۹۸ و ۲۱/۹۷ درصد به دست آمده است.

۳- در شرایطی که اگر طبق راهکار ارائه شده در این تحقیق $V_{max} = \operatorname{Re}_{max} rac{a}{b}$ لحاظ شود، مقادیر متوسط میانگین خطای نسبی گرادیان هیدرولیکی به ترتیب برابر با ۱۱/۳۹، ۱۴/۶۹ و ۱۹/۷۲ درصد محاسبه شده است.

به عبارت دیگر با استفاده از روابط ۶ و ۷ و به کار بردن رابطهی پیشنهادی پژوهش حاضر به جای ۱ = ۷_{max}، مقادیر متوسط میانگین خطای نسبی گرادیان هیدرولیکی در مصالح سنگریزهای ریز، متوسط و درشت، به ترتیب به میزان ۱۰/۵۶ و ۲/۲۵ درصد کاهش یافتهاند که این مهم بیانگر دقت و کارایی بالای راهکار پیشنهادی میباشد.

۵- منابع

Bari R, Hansen D. (2002). Application of graduallyvaried flow algorithms to simulate buried streams. *Journal of Hydraulic Research*. 40(6): 673-683.

Bazargan J, Bayat H. (2002). Determination of the Nonlinear Equation Coefficients for Flow through Coarse Alluvium Foundations. *Esteghlal*, pp:101-113. [In Persian]

Bazargan J, Bayat H. (2002). A new method to supply water from the sea through rockfill intakes. 5th international conference on coasts, *ports and marine structures (ICOPMAS)*, October 14-17, Ramsar, Iran, Book of Extended Abstracts. 276-279.

Burcharth H. F, Andersen O. H. (1995). On the onedimensional steady and unsteady porous flow equations, *Coastal Engineering*, 24(3), 233-257.

Chen Z, Stephen L, Lyons, Guan Q. (2001). Derivation of the Forchheimer law via homogenization. Transport in porous media. 44(2), 325-335.

Curtis R. P, Lawson J. D. (1969). Flow Over and Through Rockfill Banks. J. Hydra. *Div. ASCE*. (93) 9: 1-12.

Sedghi-Asl M, Rahimi H. (2011). Adoption of Manning's equation to 1D non-Darcy flow problems. *Journal of Hydraulic Research*. 49(6), 814-817.

Shokri M, Sabour M.R. (2014). Experimental Study of Unsteady Turbulent Flow Coefficients through Granular Porous Media and Their Contribution to the Energy Losses. *KSCE Journal of Civil Engineering*. pp: 706-717.

Stephenson D. (1969). Rockfill in hydraulic engineering. *Elsevier scientific*, Amsterdam, Nether Lands.

Venkatarman P, Rao P. R. M. (1998). Darcian, transitional and turbulent flow through porous media. *J. Hydra. Eng.*, *ASCE*. 124(8):840-846

Ward, J. C. (1964). Turbulent flow in porous media, J. Hydra. Div. ASCE, (95) 6:1-11.

Bazargan J, Shoaei S. M. (2006). Discussion, Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams. *IAHR J. of Hydraulic Research*, (44)1: 138-141.

Bazargan J. (2002). Investigation of rockfill water draw off design basics. PhD thesis. Amir Kabir industrial University, Civil engineering faculty, Tehran. Iran. [In Persian]

Bazargan J. Zamani Sabzi H, Eskandari H. (2011). Experimental investigation of rockfill size and shape effect on hydraulic parameters of fluid inside the rockfill dams. The 6th National congress of Civil Engineering, *Semnan university, Semnan*, Iran. [In Persian]

George G. H, Hansen D. (1992). Conversion between quadratic and power law for non-Darcy flow. J. *Hydra, Engineering*. (118)5: 792-797.

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.

Leps, T. M. (1973). *Flow through rockfillembankment dam engineering*, Casagrande volume, Edited by Hirschfield, R. C. and Paulo's, S. J., John Wiley and Sons, New York, 87-107.

McWhorter D. B, Sunada D. K. (1997). Groundwater Hydrology and hydraulics. Water Resources Publication, *Fort Colins, Colorado, USA*. 65-73.

Sedghi-Asl M, Rahimi H, Salehi R. (2014). Non-Darcy flow of water through a packed column test. *Transport in porous media*. (101)2: 215-227.