

EXTENDED ABSTRACT

Assessing the Equivalent Hydraulic Conductivity of Rockfill Dam in Vertical and Horizontal Arrangements

K.Hasanvand^{1*} and J. M.V.Samani²

1* - Corresponding Author, Ph. D., Department of Water Structure Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University. (*k.hasanvand@gmail.com*).

2- Professor, Department of Water Structure Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University.

Received: 4 April 2017

Revised: 16 October 2017

Accepted: 22 October 2017

Keywords: Equivalent Hydraulic Conductivity, Two Layered Rockfill Dam, Control Volume Method.

DOI: 10.22055/jise.2017.21668.1556.

Introduction

Rockfill dams are considered as detention structures, used to control floods. Due to rocks' size and large pores in between, Darcy's law is invalid in these dams.

Many studies have been conducted to investigate the non-linear flow in homogenous coarse porous media. Wilkins (1955), Ahmed and Sonada (1969), and Stephenson (1979) tried to introduce appropriate coefficients of the non-linear flow equation. Other studies have been also conducted to investigate the flow in heterogeneous rockfill structures, such as Hosseini and Joy (2007), introducing a one-dimensional model for non-linear flow in homogenous and heterogeneous coarse porous media. Realizing the importance of layered rockfill dams and the few conducted studies in this field, flow through layered rockfill dam, and horizontal and vertical arrangement of layers have been modeled in the current study. In this regard, a two-dimensional numerical model solving the governing equations by finite volume method has been developed.

Principles and methodology

In order to investigate the developed model, experimental data were collected.

Experiments

The experiments were carried out in a plexiglass flume, 30cm flume width, 50cm height, and 10m length, in the hydraulic laboratory of Tarbiat Modares University. Different experiments with different layer arrangements were conducted. In each experiment, upstream and downstream depths and discharge flow were measured. The characteristics of the conducted physical models have been shown in tables (1) and (2) for horizontal and vertical arrangements, respectively.

Table 1- Characteristics of the designed horizontal two-layered dam

parameter	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Rocks diameter (m)	Ratio of low layer to dam height	Ratio of downstream to Upstream
Range of changes	0.8	0.3	0.2,0.32,0.4	0.02-0.1*	0.33,0.5,0.75	0.25,0.4,0.6

Table 2- Characteristics of the designed vertical two-layered dam

Parameter	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Rocks diameter (m)	Ratio of first layer length to dam length	Ratio of downstream to upstream
Range of changes	0.68,0.76,0.90,1.04,1.32	0.3	0.4	0.02-0.1*	0.1, 0.3, 0.5 0.7, 0.9	0.2, 0.4, 0.6

Numerical Model

In porous media, the continuity equation in the steady-state condition is as follows:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \Delta x\right) \Delta y + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \cdot \Delta y\right) \Delta x = 0 \quad (1)$$

In which, u and v are flow velocity components in horizontal and vertical directions, respectively. To solve equation (1) using the finite volume method, the equation should be discretized. Considering the abcd control volume (figure (1)), grids N, W, S, E surrounded grid P. Integrating equation (1) using the control volume of the figure (1), replacing flow velocities from non-linear equations, and applying some mathematical manipulations, the two-dimensional flow equation through coarse porous media will be obtained:

$$H_{(i,j)} = \frac{A_E H_{(i+1,j)} + A_W H_{(i-1,j)} + A_S H_{(i,j+1)} + A_N H_{(i,j-1)}}{A_E + A_W + A_S + A_N} \quad (2)$$

$$A_E = \alpha' \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H_{(i,j)} - H_{(i+1,j)}}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (3)$$

$$A_W = \alpha \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H_{(i-1,j)} - H_{(i,j)}}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (4)$$

$$A_S = \alpha' \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j+1)}}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (5)$$

$$A_N = \alpha' \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H_{(i-1,j)} - H_{(i,j)}}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (6)$$

where H is the hydraulic head of each node. Therefore, by applying the boundary conditions and solving the obtained equations for all the domain grid points, the hydraulic head of each grid point will be obtained.

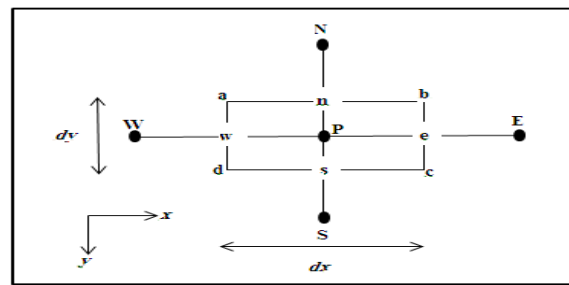


Fig 1- Two-dimensional control volume

Discussion and analysis

Analyzing the horizontal two-layered dam

In order to analyze the results, the effect of layers' thickness with various hydraulic conductivity and the effect of downstream depth on equivalent hydraulic conductivity are separately investigated.

The effect of layers' thickness with various hydraulic conductivity on an equivalent hydraulic conductivity in a dam with horizontal layers

In order to investigate the effect of layers' thickness with various hydraulic conductivity, the ratio of equivalent hydraulic conductivity to the summation of layers hydraulic conductivity $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)$ has been sketched versus the ratio of lower layer hydraulic conductivity to the upper layer one $\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)$. What is concluded from the figure is that by increasing $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$, the equivalent hydraulic conductivity is also increased.

The effect of the downstream water level on hydraulic conductivity

In order to investigate the effect of downstream water level on equivalent hydraulic conductivity, $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1+\alpha_2}\right)$ versus $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ are sketched for ratios 0.4 and 0.6 of downstream depth to upstream, respectively. Increasing the ratio of lower layer hydraulic conductivity to the upper one increases the equivalent hydraulic conductivity.

Vertical two-layered dam

Also, for the vertical arrangement of layers, same as the horizontal one, for different lengths and different rock sizes in each layer, the passing discharge of each vertical two-layered dam was calculated using the numerical model.

The Effect of layers' length on the equivalent hydraulic conductivity

In order to investigate the effect of layers' length on the equivalent hydraulic conductivity, for $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.2$ and for different ratios of $\left(\frac{L_1}{L_{Total}}\right)$, the value of $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1+\alpha_2}$ versus $\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)$ has been illustrated. It has been seen that in a vertically layered dam, unlike the horizontal one, increasing $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ doesn't always increase $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1+\alpha_2}$.

The effect of the downstream water level on the hydraulic conductivity

In order to observe the effect of downstream water level on the equivalent hydraulic conductivity in a vertical two-layered dam case, for $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.4$ and $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.6$, and also, for different ratios of $\frac{L_1}{L_2}$, the value of $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1+\alpha_2}$ versus $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ has been investigated. It has been seen that lengthening the coarser layer causes the equivalent hydraulic conductivity to increase. Moreover, with increasing the ratio of $\frac{H_{DW}}{H_{UP}}$, the difference of hydraulic conductivity in various ratios of $\frac{L_1}{L_2}$ will be raised.

Conclusion

Horizontal multi-layered and vertical multi-layered dams were investigated in the current study. Given the results of the study, it turned out that in the horizontal two-layered dam, the lower layer plays a bigger role in passing the discharge flow by affecting the equivalent hydraulic conductivity. Increasing the downstream water level also increases hydraulic conductivity in these dams. In case of the vertical two-layered dam, the investigations also show that the order of small and large layers' arrangement doesn't have a significant effect on changing the hydraulic conductivity. The effective factor is the length of each layer.

References

- 1-Ahmed, N., and Sunada, D.K. 1969. Nonlinear flow in porous media. *J. Hydraul. Div.*, 95(HY6), pp. 1847-1857.
- 2- Hosseini, S.M. and Joy, D.M. 2007. Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous media applicable to valley fills. *International Journal of River Basin Management*, 5(4), pp.253-265.
- 3- Stephenson, D. 1979. *Rockfill in Hydraulic Engineering*. Elsevier Scientific, Amsterdam.
- 4- Wilkins, J. 1956. Flow of water through rockfill and its application to the design of dams. *2nd Australia New*.



تعیین ضریب آب‌گذری معادل در سدهای پاره سنگی دو لایه افقی و دو لایه عمودی

کلثوم حسونند^{۱*} و جمال محمدولی سامانی^۲^{۱*} - نویسنده مسئول، دکتری سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. K.hasanvand@gmail.com^۲ - استاد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۳۰

بازنگری: ۱۳۹۶/۷/۲۴

دریافت: ۱۳۹۶/۱/۱۵

چکیده

سدهای پاره‌سنگی لایه‌ای با لایه‌های افقی و لایه‌های عمودی دو نوع از سدهای ناهمگن هستند که در کنترل سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این سدها اختلاف ضریب آب‌گذری لایه‌ها که به سبب اختلاف خصوصیات مصالح در هر لایه ایجاد می‌شود، سبب پیچیده‌تر شدن محاسبات می‌شود. بنابراین با یافتن یک ضریب آب‌گذری معادل، می‌توان سد را به صورت همگن در نظر گرفت که محاسبات آن نیز راحت‌تر انجام‌پذیر است. در تحقیق حاضر یک مدل عددی دوبعدی، برای بررسی جریان عبوری از سدهای پاره‌سنگی دولایه تهیه شده است. براساس نتایج به دست آمده، در سدهای دولایه با لایه‌های افقی، لایه پایینی نسبت به لایه بالایی تاثیر بیشتری بر ضریب آب‌گذری معادل دارد به طوری که در صورت استفاده از سنگدانه‌های درشت‌تر در این لایه می‌توان ضریب آب‌گذری معادل را افزایش داد. در حالیکه در سد با لایه‌های عمودی ترتیب قرارگیری لایه‌های ریز و درشت مهم نیست اما طول لایه‌ها مهم است و هر چه لایه درشت‌دانه‌تر طول بیشتری نسبت به لایه ریزدانه‌تر داشته باشد ضریب آب‌گذری معادل نیز بیشتر می‌شود. پس از تحلیل نتایج به دست آمده، روابط جداگانه‌ای جهت تخمین ضریب آب‌گذری معادل در سدهای دولایه ارائه شده است. ضرایب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای این روابط برابر با 0.9422 و 0.16 برای سد با لایه‌های افقی و 0.9602 و 0.36 برای سد دولایه با لایه‌های عمودی است.

کلید واژه‌ها: روندیابی سیلاب، سد پاره سنگی ناهمگن، روش احجام محدود.

مقدمه

سدهای پاره‌سنگی نمونه‌ای از سازه‌های تأخیری هستند که به منظور کنترل سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سدها معمولاً با انباشته کردن مصالح سنگی بستر رودخانه و یا مصالح سنگی اطراف، در مسیر رودخانه احداث می‌شوند. بزرگی منافذ این سدها که در نتیجه بزرگ بودن مصالح مصرفی است سبب می‌شود جریان عبوری از محیط سد دارای سرعت بالایی باشد. به همین دلیل محققان برای بررسی جریان در محیط‌های سنگ‌ریزه‌ای از روابط دیگری که در آن رابطه بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی غیرخطی است، استفاده کرده‌اند. اولین بار Forchheimer (1901) با در نظر گرفتن تابعی از درجه دوم سرعت سعی کرد تاثیر نیروی اینرسی را در بررسی جریان غیرداری در نظر بگیرد (Zeng and Grigg, 2006). به طور کلی روابط حاکم بر محیط درشت دانه به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- دسته‌ای از معادلات که بیانگر رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان می‌باشند (روابط ۱ و ۲):

$$i = \alpha V^\beta \quad (1)$$

$$i = \alpha' V + \beta' V^2 \quad (2)$$

در این معادلات i گرادیان هیدرولیکی، V سرعت جریان و $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ ضرایب ثابتی هستند که تابع خصوصیات سیال و سنگدانه‌ها می‌باشند.

۲- دسته‌ای از معادله‌ها که براساس شبیه‌سازی جریان از درون محیط سنگ‌ریزه‌ای با جریان عبوری از لوله‌های تحت فشار به دست آمده‌اند. در این روش معادلات مربوطه بیانگر رابطه بین ضریب اصطکاک داری-ویسباخ و عدد رینولدز می‌باشند (روابط ۳ و ۴):

$$f = \alpha R_e^b \quad (3)$$

$$f = \frac{\alpha'}{R_e} + \beta' \quad (4)$$

در این روابط f ضریب اصطکاک، R_e عدد رینولدز و $\alpha, b, \alpha', \beta'$ ضرایب ثابتی هستند که تابع خصوصیات سیال و سنگدانه‌ها می‌باشند. محققان زیادی جریان عبوری از محیط سنگ‌ریزه‌ای را بررسی کرده‌اند. Ergun (1951)، Wilkins (1956)، Stephenson (1979)، Sedghi Asi et al. (2011) از جمله این محققان هستند. نمونه‌ای دیگر، تحقیقات Samani et al. (2004, 2003) می‌باشد که مدلی نرم‌افزاری برای تحلیل

$$i = \frac{aR_e^b V^2}{(d_{50}-\sigma) 2g} \quad (۷)$$

و اگر عدد رینولدز جریان درون محیط متخلخل به صورت $R_e = \frac{V(d_{50}-\sigma)}{\vartheta}$ باشد، مقدار سرعت برای محیط درشت‌دانه از رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$V = \alpha' i_y^\beta \quad (۸)$$

که در آن:

$$\alpha' = \left[\frac{2g\vartheta^b}{a(d_{50}-\sigma)^{b-1}} \right]^\beta \quad (۹)$$

$$\beta = \frac{1}{b+2} \quad (۱۰)$$

در این روابط g : شتاب ثقل، ϑ : لزجت سینماتیک آب، d_{50} : قطر سنگ‌دانه‌ها، σ : انحراف معیار سنگ‌دانه‌ها و a و b ضرایب ثابتی هستند که به خصوصیات سیال و محیط وابسته‌اند. از دیگر سو معادله پیوستگی در حالت ماندگار به صورت رابطه (۱۱) می‌باشد:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \Delta x \right) \Delta y + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \cdot \Delta y \right) \Delta x = 0 \quad (۱۱)$$

که در آن u و v اجزای سرعت در جهت افقی و عمودی می‌باشند. برای حل معادله (۱۱) با استفاده از روش احجام محدود، باید معادله گسسته‌سازی شود. حجم کنترل $abcd$ را در نظر بگیرید (شکل ۱). همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نقاط N, W, S, E نقطه P را احاطه کرده‌اند. اگر از معادله (۱۱) روی حجم کنترل شکل (۱) انتگرال گرفته شود و مقادیر سرعت از رابطه (۸) در آن جایگزین شود، پس از پاره‌ای عملیات ریاضی، معادله جریان دو بعدی از درون محیط متخلخل درشت‌دانه به دست می‌آید:

$$H_{(i,j)} = \frac{A_E H_{(i+1,j)} + A_W H_{(i-1,j)} + A_S H_{(i,j+1)} + A_N H_{(i,j-1)}}{A_E + A_W + A_S + A_N} \quad (۱۲)$$

$$A_E = \alpha' \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H_{(i,j)} - H_{(i+1,j)}}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (۱۳)$$

$$A_W = \alpha' \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H_{(i-1,j)} - H_{(i,j)}}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (۱۴)$$

$$A_S = \alpha' \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j+1)}}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (۱۵)$$

جریان در سدهای پاره‌سنگی تهیه و برای دو حالت جریان یک بعدی و دوبعدی، به ترتیب روابط (۵) و (۶) را ارائه کرده‌اند:

$$f = 54R_e^{-0.077} \quad (۵)$$

$$f = 80R_e^{-0.034} \quad (۶)$$

همچنین Roshanfekar et al (2009) با به کار بردن معادله آرگون و با استفاده از تحلیل‌های ریاضی معادلاتی جهت محاسبه مستقیم ضرایب معادله حاکم بر جریان غیرداری ارایه کردند، برای بررسی جریان در محیط‌های سنگ‌ریزه‌ای ناهمگن نیز پاره‌ای تحقیقات انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیق انجام شده توسط Hosseini و Joy (2007) اشاره کرد که مدلی یک‌بعدی برای تحلیل جریان غیرخطی در محیط متخلخل درشت‌دانه همگن و ناهمگن تهیه نمودند. در تهیه این مدل ریاضی از ترکیب معادلات سنت و نانت و معادله فورشمایمر استفاده کردند و ناهمگن بودن محیط را به وسیله تغییر در تخلخل آن مدل کردند. همچنین Shayannejad و Ashjazadeh (2014) با تهیه یک مدل ریاضی یک بعدی و با استفاده از ترکیب رابطه بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز با معادله پیوستگی جریان از سد پاره‌سنگی دو لایه را توصیف کردند. در تحقیق مذکور سد دو لایه را یکبار با لایه‌های افقی و بار دیگر با لایه‌های عمودی مدل کردند. با به کارگیری این مدل‌ها در روندیابی مخزن ملاحظه شد که دبی اوج هیدروگراف خروجی به دست آمده از سد دو لایه با لایه‌های عمودی در مقایسه با دیگر سدها افت بیشتری پیدا کرده است. Asiaban et al (2014) نیز سعی کردند تاثیر سد پاره‌سنگی دو لایه که لایه زیرین آن درشت‌دانه‌تر از لایه بالایی باشد را در بحث انتقال بار بستر بررسی کنند و در این راستا رابطه‌ای را جهت تخمین بار عبوری از مصالح درشت‌دانه ارائه دادند.

به‌طور کلی سدهای پاره‌سنگی لایه‌ای را از جهات مختلف می‌توان مورد بررسی قرار داد. در تحقیق حاضر سعی شده با شناخت عوامل موثر بر ضریب آب‌گذری معادل در این سدها رابطه‌ای جهت تخمین ضریب آب‌گذری معادل ارایه شود. به این منظور یک برنامه عددی در محیط MATLAB تهیه شد که در آن با استفاده از روش احجام محدود جریان از درون سد لایه‌ای، یکبار با لایه‌های افقی و بار دیگر با لایه‌های عمودی مدل‌سازی شده‌اند. پس از مقایسه نتایج حاصله از مدل با داده‌های آزمایشگاهی و اطمینان از صحت مدل، روابطی برای تخمین ضریب آب‌گذری معادل در سدهای دو لایه ارایه شد.

مواد و روش‌ها

برای به دست آوردن معادله حاکم بر محیط‌های سنگ‌ریزه‌ای باید معادله (۳) یا (۴) را با معادله داری و سیساک ترکیب کرد. از آنجا خواهیم داشت:

$$A_W = \left(\frac{\alpha'_1 + \alpha'_2}{2} \right) \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H(i-1,j) - H(i,j)}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (18)$$

$$A_N = \alpha'_2 \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H(i-1,j) - H(i,j)}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (16)$$

$$A_N = \alpha'_2 \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H(i-1,j) - H(i,j)}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (19)$$

$$A_S = \alpha'_1 \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H(i,j) - H(i,j+1)}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (20)$$

در سد دولایه با لایه‌های عمودی (شکل ۲-ب) نیز، هنگام نوشتن معادلات برای گره‌های واقع در هر لایه از ضریب آب-گذری همان لایه استفاده می‌شود و در مرز دو لایه، برای نوشتن ضرایب بالایی و پایینی هر گره از ضریب آب‌گذری دو لایه میانگین‌گیری کرده و برای محاسبه ضرایب غربی و شرقی به ترتیب از ضریب آب‌گذری لایه (۱) و لایه (۲) استفاده خواهد شد.

$$A_E = \alpha'_2 \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H(i,j) - H(i+1,j)}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (21)$$

$$A_W = \alpha'_1 \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H(i-1,j) - H(i,j)}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (22)$$

$$A_N = \left(\frac{\alpha'_1 + \alpha'_2}{2} \right) \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H(i-1,j) - H(i,j)}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (23)$$

$$A_S = \left(\frac{\alpha'_1 + \alpha'_2}{2} \right) \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H(i,j) - H(i,j+1)}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \quad (24)$$

در این روابط H پتانسیل کل هر نقطه است. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن شرایط مرزی و حل معادلات به دست آمده برای تمام نقاط شبکه، می‌توان مقدار پتانسیل را در کلیه نقاط به دست آورد. اما با توجه به این که در سدهای لایه‌ای، دو لایه با مشخصات مختلف وجود دارد برای هر لایه باید از مشخصات مربوط به آن استفاده شود. به عبارت دیگر در سد دولایه با لایه‌های افقی (شکل ۲-الف)، هنگام نوشتن معادلات برای گره‌های واقع در لایه پایینی از ضریب آب‌گذری لایه (۱) و هنگام نوشتن معادلات برای لایه بالایی از ضریب آب‌گذری لایه (۲) استفاده می‌شود. همچنین در مرز دو لایه نیز هنگام نوشتن ضرایب بالایی و پایینی هر گره (A_N و A_S) به ترتیب از ضریب آب‌گذری لایه بالایی و ضریب آب‌گذری لایه پایینی استفاده می‌شود در صورتی که برای محاسبه ضرایب غربی و شرقی (A_E و A_W) باید از ضریب آب‌گذری دو لایه میانگین‌گیری کرده، محاسبات را با استفاده از ضریب آب‌گذری به دست آمده انجام داد. بنابراین ضرایب معادل (۱۲) در مرز دو لایه افقی به صورت زیر نوشته می‌شوند (در اینجا این فرض برقرار است که روی مرز دو لایه گره‌هایی وجود دارد).

$$A_E = \left(\frac{\alpha'_1 + \alpha'_2}{2} \right) \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H(i,j) - H(i+1,j)}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad (17)$$

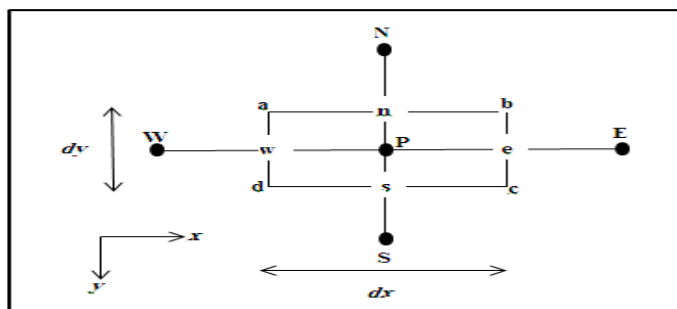


Fig.1- Two-dimensional control volume

شکل ۱- حجم کنترل جریان دوبعدی

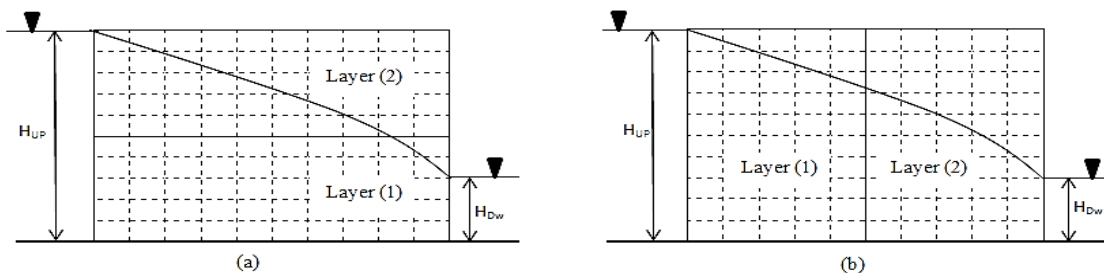


Fig. 2- Two layered dam. (a) Horizontal layered dam (b) Vertical layered dam

شکل ۲- شمای کلی سد دولایه ، (الف) با لایه‌های افقی (ب) با لایه‌های عمودی

آزمایش‌های عددی

محاسبه ضریب آب‌گذری این سد در واقع ضریب آب‌گذری معادل در سد دولایه تخمین زده شد. سپس با بررسی عوامل موثر بر ضریب آب‌گذری در این سدها سعی شد رابطه‌ای جهت تخمین ضریب آب‌گذری معادل در سدهای دولایه ارائه شود.

نتایج و بحث

بعد از تهیه هر مدل عددی برای این‌که بتوان با اطمینان از آن استفاده کرد، ابتدا باید مدل صحت‌سنجی و واسنجی شود و دقت آن مورد بررسی قرار گیرد. لذا در ادامه ابتدا به این مباحث پرداخته می‌شود و سپس به تحلیل نتایج پرداخته خواهد شد.

صحت‌سنجی مدل

پس از تهیه مدل، صحت آن با موارد زیر به تایید رسید:

۱- با کوچک در نظر گرفتن ابعاد سد پاره سنگی افت جریان کمتر می‌شود. در مدل حاضر به‌ازای عرض سد خیلی کوچک، مقدار عمق آب در پایاب با اختلاف کمی نسبت به عمق سراب به دست آمد.

۲- وقتی که تراز سطح آب در بالادست و پایین‌دست سد با هم برابر باشد، به‌دلیل این‌که اختلاف پتانسیلی بین بالادست و پایین‌دست سد وجود ندارد انتظار می‌رود دبی محاسبه شده توسط مدل برابر با صفر باشد. پس از اجرای مدل دبی $0/0002$ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد که بسیار ناچیز می‌باشد.

پس از تهیه مدل، در مجموع ۳۰۰ آزمایش عددی انجام شد. محدوده تغییر پارامترها برای هر دو نوع سد در جداول (۱) و (۲) آورده شده است.

در این آزمایش‌ها، ابتدا سعی شد پارامترهای موثر بر ضریب آب‌گذری معادل در سدهای دولایه شناسایی شود. این پارامترها در سد با لایه‌های افقی شامل ضریب آب‌گذری هر لایه، ارتفاع هر لایه و تراز آب در سرآب و پایاب سد می‌باشند و در سد با لایه‌های عمودی ضریب آب‌گذری هر لایه، طول هر لایه و تراز آب در سرآب و پایاب سد می‌باشد. برای بررسی تاثیر این عوامل، پارامترهای موثر به نسبت‌های بدون بعد تبدیل شد و میزان تاثیر آن‌ها در ضریب آب‌گذری معادل بررسی شد. در سد با لایه‌های افقی تاثیر نسبت ضریب آب‌گذری لایه‌ها $(\frac{\alpha_1}{\alpha_2})$ ، نسبت ضخامت لایه پایینی به ارتفاع سرآب $(\frac{H_1}{H_{Up}})$ و نسبت تراز پایاب به سرآب $(\frac{H_{Dw}}{H_{Up}})$ بر روی نسبت ضریب آب‌گذری معادل به مجموع ضرایب آب‌گذری لایه‌ها $(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2})$ بررسی شد. در سد با لایه‌های عمودی نیز تاثیر $(\frac{\alpha_1}{\alpha_2})$ ، تاثیر $(\frac{H_{Dw}}{H_{Up}})$ و تاثیر نسبت طول لایه اول به طول لایه دوم $(\frac{L_1}{L_2})$ ، روی $(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2})$ بررسی شد. در هر آزمایش ابتدا سد به صورت دولایه در نظر گرفته شد و با توجه اطلاعات مساله، دبی عبوری از سد محاسبه شد در مرحله بعد یک سد همگن با همان اطلاعات در نظر گرفته شد و با

جدول ۱- مشخصات سدهای طراحی شده دو لایه با لایه های افقی

Table 1- Characteristics of designed horizontal two layered dam

parameter	Length (m)	Width (m) h	Height (m)	Rocks diameter (m)	Ratio of low layer to dam height	Ratio of downstream to Upstream
Range of changes	0.8	0.3	0.2,0.32,0.4	0.02-0.1*	0.33,0.5,0.75	0.25,0.4,0.6

جدول ۲- مشخصات سدهای طراحی شده دو لایه با لایه های عمودی

Table 2- Characteristics of designed vertical two layered dam

Parameter	Length (m)	Width h (m)	Height (m)	Rocks diameter (m)	Ratio of first layer length to dam length	Ratio of downstream to Upstream
Range of changes	0.68,0.76,0.90,1.04,1.32	0.3	0.4	0.02-0.1*	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9	0.2, 0.4, 0.6

- Note: D50 of rocks has been considered equal in each layer but this diameter is different in various experiments, ranging from 2 to 10cm.

واسنجی مدل

برای توسعه مدل عددی و استفاده از آن، ابتدا باید ضرایب معادله (۳) تعیین شود. همانگونه که قبلا اشاره شد Samani et al. (2003) پس از انجام بهینه‌سازی‌های مربوطه معادله $f = 80R_e^{-0.034}$ را برای جریان دوبعدی سد پاره‌سنگی پیشنهاد دادند. در تحقیق حاضر نیز با قسمتی از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده صحت این ضرایب بررسی شد. برای این منظور دبی به دست آمده از مدل عددی و دبی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی با هم مقایسه شد و پس از محاسبه مجموع مربعات خطا و ناچیز بودن آن، مقدار این ضرایب مناسب تشخیص داده شد و در انجام تحقیق حاضر نیز از آن‌ها استفاده شد.

بررسی دقت مدل عددی

در این قسمت نتایج به دست آمده از مدل با نتایج حاصل از آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفته که در آن دبی عبوری، تراز آب در پایاب و پروفیل سطح آب در محیط متخلخل با هم مقایسه شده اند. در این مقایسه‌ها چند نمونه سد دولایه با لایه‌های افقی و چند نمونه سد با لایه‌های عمودی در آزمایشگاه ساخته شد که در ادامه یک نمونه از این مقایسه‌ها آورده شده است.

سد دو لایه با لایه های افقی

آزمایش ۱- یک سد مستطیلی با دو لایه افقی به طول ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ضخامت لایه پایینی ۱۲ سانتی‌متر است و اندازه متوسط سنگ‌دانه‌های آن ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع لایه بالایی نیز ۱۸ سانتی‌متر است که با سنگ‌دانه‌هایی به قطر ۵ سانتی‌متر پر شده است. تراز آب در سرآب ۳۰/۰ سانتی‌متر است. هدف پیدا کردن دبی عبوری از سد و عمق پایاب می‌باشد. پس از اجرای مدل، مقدار دبی ۲/۱۸۴ لیتر بر ثانیه و تراز آب در پایاب ۸/۲۳ سانتی‌متر پیش‌بینی شد. دبی در آزمایشگاه به روش حجمی اندازه‌گیری شد که معادل ۲/۲۰۲ لیتر بر ثانیه بود. و تراز آب در پایاب نیز ۸/۲۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. در شکل (۳) نمودار سطح آزاد آب پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در این شکل برای به دست آوردن پروفیل سطح آزاد

آب در مدل عددی، با توجه به این که فشار در سطح آزاد برابر با صفر است، با محاسبه فشار کلیه گره‌های محاسباتی، نقاطی که در آن فشار صفر بود مشخص شد و از وصل کردن این نقاط به هم نمودار سطح آزاد آب مشخص شد.

سد دو لایه با لایه های عمودی

آزمایش ۲- یک سد مستطیلی دو لایه با طول ۸۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این سد از دو لایه عمودی تشکیل شده است طول لایه اول ۳۰ سانتی‌متر و اندازه متوسط سنگ‌دانه‌های آن ۳ سانتی‌متر است. طول لایه دوم ۵۰ سانتی‌متر و قطر سنگ‌دانه‌های آن ۸ سانتی‌متر است. تراز آب در سرآب ۴۰ سانتی‌متر است. پس از اجرای مدل، مقدار دبی ۵/۹۳۶ لیتر بر ثانیه محاسبه شد که دبی در آزمایشگاه ۶/۱۲۱ لیتر بر ثانیه به دست آمد. تراز آب توسط مدل در پایاب ۱۰/۰ سانتی‌متر پیش‌بینی می‌شود که در آزمایشگاه ۱۰/۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. در شکل (۴) نمودار سطح آزاد آب به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

تحلیل نتایج در سد دولایه با لایه های افقی

به منظور تحلیل نتایج، تاثیر ضخامت لایه‌ها با ضرایب آب‌گذری مختلف و تاثیر عمق پایاب بر ضریب آب‌گذری معادل به طور جداگانه بررسی و پس از آن سعی شد رابطه‌ای برای تخمین ضریب آب‌گذری معادل در سدهای دولایه با لایه‌های افقی ارایه شود.

تأثیر ضخامت لایه ها با ضرایب آب گذری مختلف روی

ضریب آب گذری معادل در سد با لایه های افقی

به منظور بررسی تاثیر ضخامت لایه‌های با ضرایب آب‌گذری مختلف، در شکل (۵) نسبت ضریب آب‌گذری معادل به مجموع ضریب آب‌گذری دو لایه $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)$ در مقابل نسبت ضریب آب‌گذری لایه پایینی به ضریب آب‌گذری لایه بالایی $\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)$ رسم شده است.

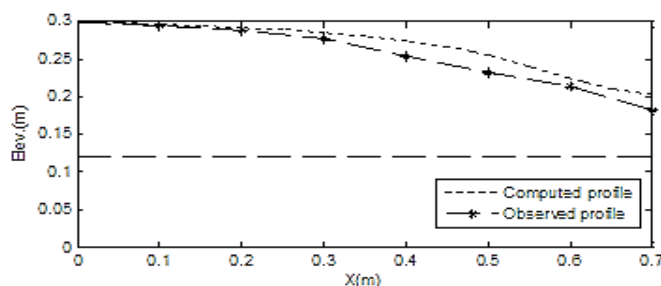


Fig. 3- Comparison between free water surfaces, obtained from model and the experimental one for horizontal layered dam

شکل ۳- مقایسه منحنی سطح آزاد آب به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی برای سد دولایه با لایه‌های افقی

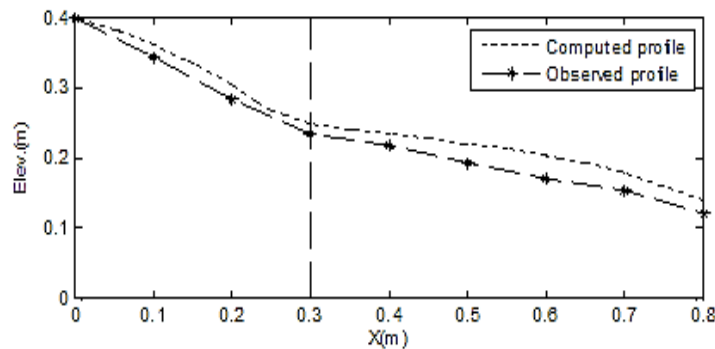


Fig. 4. Comparison between free water surfaces ,
obtained from model and the experimental one for Vertical layered dam

شکل ۴- مقایسه منحنی سطح آزاد آب به دست آمده از مدل با داده های آزمایشگاهی برای سد دولایه با لایه های عمودی

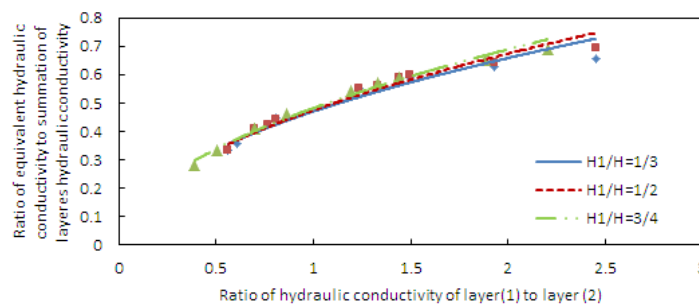


Fig. 5. Trend of equivalent hydraulic conductivity changes versus the ratio of two layers
hydraulic conductivity for $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.25$

شکل ۵- نحوه تغییرات ضریب آب گذاری معادل در برابر نسبت ضریب آب گذاری دو لایه برای $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.25$

نیز بیشتر می شود. به عبارت دیگر می توان نتیجه گرفت که هنگام محاسبه ضریب آب گذاری معادل میزان تاثیر ضریب آب گذاری لایه پایینی از میزان تاثیر ضریب آب گذاری لایه بالایی بیشتر است.

تأثیر تراز پایاب در ضریب آب گذاری

به منظور بررسی تأثیر تراز پایاب بر ضریب آب گذاری معادل در شکل (۶)، $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)$ در مقابل $\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)$ که به ترتیب برای نسبت عمق پایاب به سراب برابر با 0.4 و 0.6 است، رسم شده است. در این جا نیز، افزایش نسبت ضریب آب گذاری لایه پایینی به لایه بالایی سبب افزایش ضریب آب گذاری معادل می شود. اگر مقایسه ای هم بین شکل های (۶ و ۵) انجام شود، ملاحظه می شود هر چه عمق پایاب بیشتر می شود ضریب آب گذاری در حالت های مختلف ضخامت لایه ها اختلاف بیشتری با هم دارد. به عنوان نمونه در شکل (۶) قسمت (ب) که نسبت عمق پایاب به سراب برابر با 0.6 است، برای نسبت های مختلف ضخامت لایه پایینی به ارتفاع کل سد، ضریب آب گذاری معادل خیلی با هم تفاوت بیشتری دارد نسبت به آنچه در شکل (۵) برای نسبت عمق پایاب به سراب 0.4 بود. به طور کلی اگر ضریب آب گذاری لایه پایینی کمتر از ضریب

شکل (۵) مربوط به قسمتی از داده هاست که در آن نسبت عمق پایاب به سراب برابر با 0.25 است $\left(\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.25\right)$. آنچه از نمودار مشهود است این است که با افزایش $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ ، ضریب آب گذاری معادل نیز افزایش می یابد. به عنوان مثال حالتی را در نظر بگیرید که نسبت ضخامت لایه پایینی به ارتفاع کل سد برابر با یک سوم باشد. حال دو قسمت مختلف نمودار را در نظر بگیرید، قسمت اول $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} < 1$ یعنی لایه پایینی ریزدانه تر است. همان طور که مشاهده می شود در این قسمت $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)$ هم کم است و با افزایش $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ ، مقدار $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)$ هم افزایش می یابد. در قسمت دوم نمودار $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} > 1$ و در واقع ضریب آب گذاری لایه پایینی بیشتر از لایه بالایی است که در این قسمت $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)$ بیشتر از قسمت اول نمودار است. در این جا اگر چه ضخامت لایه پایینی کمتر از لایه بالایی است اما تاثیر آن روی ضریب آب گذاری معادل بیشتر از لایه بالایی است و هر چه نسبت ضریب آب گذاری آن به ضریب آب گذاری لایه بالایی بیشتر می شود، ضریب آب گذاری معادل هم افزایش می یابد. از طرف دیگر با مقایسه بین نسبت ضخامت های مختلف لایه پایینی به ارتفاع کل سد مشاهده می شود که هر چه نسبت ضخامت لایه پایینی به ارتفاع کل سد افزایش می یابد ضریب آب گذاری معادل

لایه پایینی است. علاوه بر آن ضخامت لایه پایینی و همچنین عمق پایاب نیز از عوامل موثر بر ضریب آب‌گذری معادل هستند. از این رو ترکیبات مختلفی (شامل نسبت عمق پایاب به سراب، نسبت ضخامت لایه پایینی به ارتفاع سراب و ضریب آب‌گذری هر لایه) برای به‌دست‌آوردن رابطه ضریب آب‌گذری معادل مورد بررسی و آنالیز خطی و غیرخطی قرار گرفت و با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی این روابط، در نهایت رابطه (۲۵) که بیشترین ضریب همبستگی را داشت، انتخاب شد ضریب همبستگی این رابطه ۰/۹۴۲۲ با سطح معنی داری ۰/۹۹ و خطای جذر میانگین مربعات آن ۰/۰۳۶ است. در شکل (۷) ضریب آب‌گذری معادل به دست آمده از مدل و ضریب آب‌گذری محاسبه شده با فرمول (۲۵) با هم مقایسه شده‌اند.

$$\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0.88 \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)^{1.65} + 0.21 \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)^{0.9} + 0.06 \left(\frac{H_1}{H_{UP}} \right)^{-0.28} + 0.16 \left(\frac{H_{DW}}{H_{UP}} \right)^{1.5} \quad (25)$$

آب‌گذری لایه بالایی باشد، ضریب آب‌گذری معادل هم کم است و هر چه ضخامت لایه پایینی بیشتر باشد تغییر ضریب آب‌گذری معادل هم بیشتر می‌شود. به‌طوری‌که در شکل (۶) قسمت (ب) میزان تغییرات $\left(\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)$ برای وقتی که نسبت $\frac{H_1}{H_{Total}} = \frac{1}{3}$ حدود ۰/۵ است اما این تغییرات برای حالتی که $\frac{H_1}{H_{Total}} = \frac{3}{4}$ از ۰/۳۱ تا ۰/۶۴ می‌باشد.

آنالیز حساسیت در سد دو لایه با لایه های افقی

در این قسمت به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر ضریب آب‌گذری معادل آنالیز حساسیت انجام شده است. بدین منظور مقدار متوسط تغییرات ضریب آب‌گذری معادل به مجموع ضریب آب‌گذری دو لایه به ازای تغییر هر پارامتر محاسبه شده است (جدول ۳). همان‌طور که ملاحظه می‌شود ضریب آب‌گذری لایه پایینی و نسبت ضخامت این لایه به ارتفاع سد بیشترین تاثیر را بر ضریب آب‌گذری معادل دارند.

رابطه ضریب آب‌گذری معادل با عوامل موثر در سد با لایه‌های افقی

با توجه به تحلیل‌های بحث‌شده، در سد با لایه‌های افقی ضریب آب‌گذری معادل به مقدار زیادی متاثر از ضریب آب‌گذری

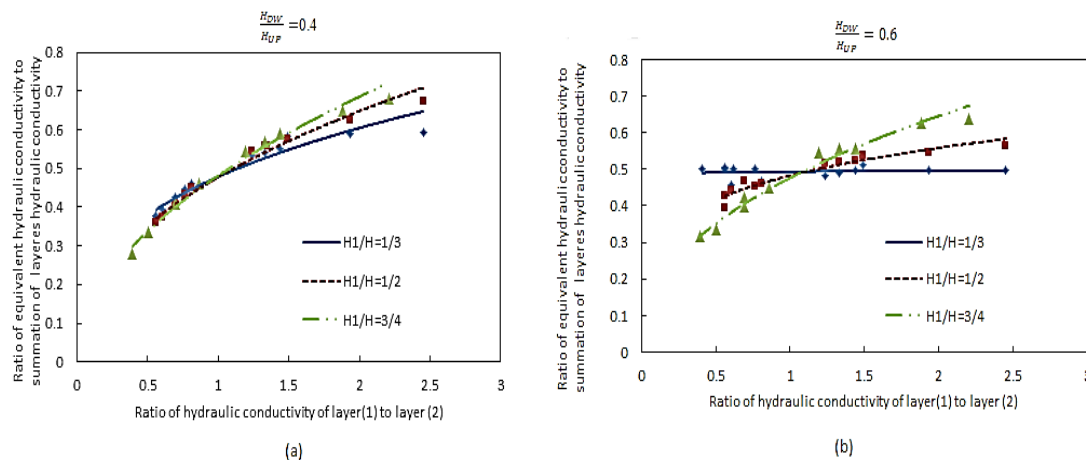


Fig. 6. Changes of equivalent hydraulic conductivity versus the ratio of two layers hydraulic conductivity

شکل ۶- تغییرات ضریب آب‌گذری معادل در برابر نسبت ضریب آب‌گذری دو لایه (الف) $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.4$

(ب) $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.6$

جدول ۳- آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف در سد دو لایه با لایه های افقی

Table 3. Sensitivity analysis of different parameters in horizontal two layered dam

Parameter	$\frac{H_{DW}}{H_{UP}}$	$\frac{H_1}{H_{UP}}$	$\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$	$\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$
Parameter change	0.2	0.2	0.25	0.25
Changing in % $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}$	0.222	3.107	1.653	5.467

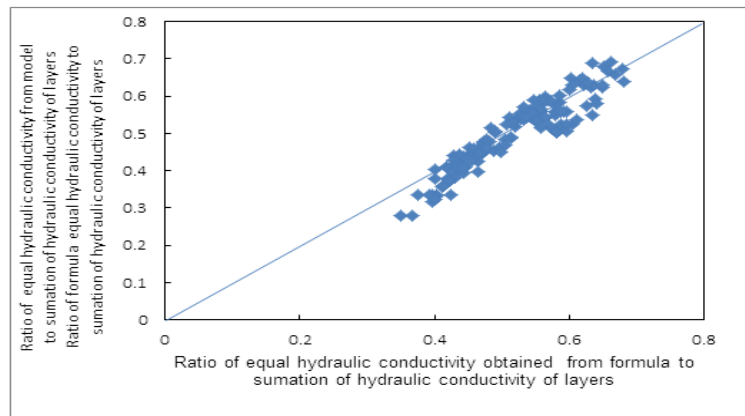


Fig 7. Comparison of hydraulic conductivity obtained from model and hydraulic conductivity obtained from equation (25)

شکل ۷- مقایسه ضریب آب‌گذری معادل به دست آمده از مدل و ضریب آب‌گذری محاسبه شده با رابطه (۲۵)

سد دولایه با لایه‌های عمودی

برای چیدمان عمودی لایه‌ها نیز همانند آنچه در مورد چیدمان افقی انجام شده بود، به‌ازای طول‌های متفاوت و اندازه سنگ‌دانه‌های مختلف در هر لایه، دبی عبوری از هر سد دولایه با لایه‌های عمودی توسط برنامه عددی محاسبه شد. سپس مقدار ضریب آب‌گذری معادل برای هر سد نیز محاسبه شد که در ادامه نتایج به‌دست‌آمده تحلیل شده است.

تأثیر طول لایه‌ها در ضریب آب‌گذری معادل

در شکل (۸) برای $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.2$ و برای نسبت‌های مختلف طول لایه اول به طول کل سد $\left(\frac{L_1}{L_{Total}}\right)$ مقدار $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}$ در برابر $\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)$ رسم شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در سد با لایه‌های عمودی، برخلاف سد با لایه‌های افقی، این‌گونه نیست که افزایش $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ همواره افزایش $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}$ را در بر داشته باشد. نکته‌ای که در نمودار به طور چشمگیری نمایان است، این است که وقتی $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} < 1$ است یا به عبارت دیگر لایه اول ریزدانه‌تر از لایه دوم است، هر چه نسبت طول آن به طول کل سد بیشتر می‌شود، مقدار $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}$ یا در واقع ضریب آب‌گذری معادل هم کمتر می‌شود. این بدان معنی است که بر خلاف چیدمان افقی که ضخامت لایه پایینی و اندازه سنگ‌دانه‌های آن تأثیر بیشتری روی ضریب آب‌گذری معادل داشت، در چیدمان عمودی آن‌چه که بیشتر باعث افزایش ضریب آب‌گذری معادل می‌شود طول لایه درشت‌تر است و نه ترتیب

قرارگیری آن. همچنین وقتی $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} > 1$ است، با افزایش طول لایه اول ضریب آب‌گذری معادل هم بیشتر می‌شود.

تأثیر عمق آب پایاب در ضریب آب‌گذری

برای مشاهده تأثیر عمق آب پایاب در ضریب آب‌گذری معادل در سد دولایه با لایه‌های عمودی، به ازای $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.4$ و $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.6$ نیز برای نسبت‌های مختلف $\frac{L_1}{L_2}$ ، مقدار $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}$ در برابر $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ رسم شده است (شکل ۹). همان‌طور که دیده می‌شود هر چه طول لایه درشت‌دانه‌تر بیشتر باشد ضریب آب‌گذری معادل هم بیشتر است. علاوه بر آن برای سدهای با مشخصات لایه‌های یکسان هر چه نسبت تراز آب پایاب به سراب بیشتر باشد، ضریب آب‌گذری سد بیشتر می‌شود. نکته چشم‌گیر دیگری که از بررسی این اشکال ملاحظه می‌شود، نحوه تغییر نمودارها در $\frac{L_1}{L_2} \geq 0.5$ است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود به ازای $\frac{L_1}{L_2} = 0.5$ ، $\frac{L_1}{L_2} = 0.7$ و $\frac{L_1}{L_2} = 0.9$ مقدار $\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}$ خیلی به هم نزدیک است. این روند در شکل (۹) نیز قابل مشاهده است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در سدهای دولایه با لایه‌های عمودی، از ابتدای سد تا یک سوم ابتدایی افت جریان چشم‌گیر است و بعد از آن افت ثابت می‌شود، پس وقتی که طول لایه اول از یک سوم طول سد بیشتر می‌شود دیگر با تغییر نسبت طول لایه اول به طول لایه دوم تغییر چشم‌گیری در ضریب آب‌گذری معادل به وجود نمی‌آید.

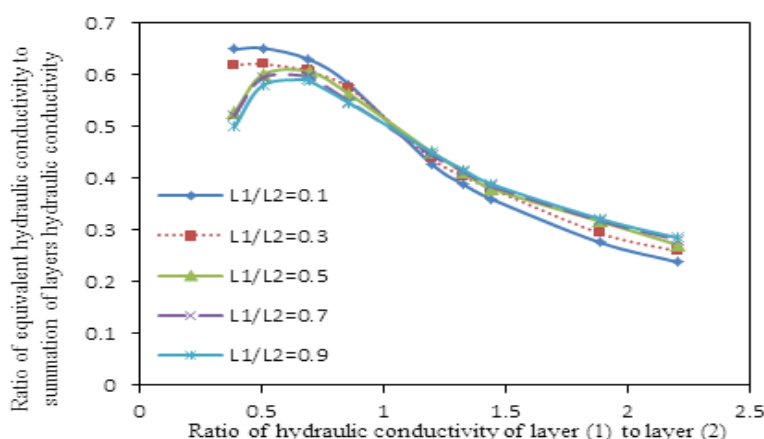


Fig. 8- The manner of equivalent hydraulic conductivity changes versus the ratio of hydraulic conductivity of two layers for $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.2$

شکل ۸- نحوه تغییرات ضریب آب گذری معادل در برابر نسبت ضریب آب گذری دو لایه برای $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.2$

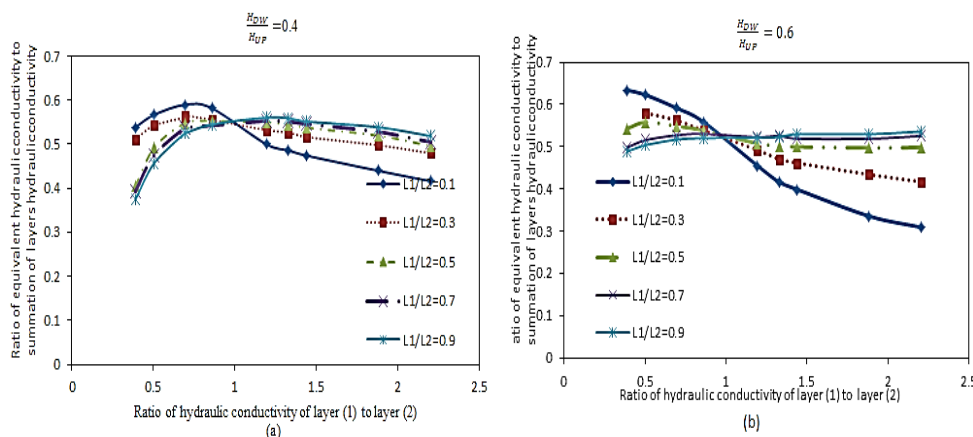


Fig. 9- The changes of equivalent hydraulic conductivity versus the ratio of hydraulic conductivity of two layers

شکل ۹- تغییرات ضریب آب گذری معادل در برابر نسبت ضریب آب گذری دو لایه (الف) $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.4$ (ب) $\frac{H_{DW}}{H_{UP}} = 0.6$

کل سد و ضریب آب گذری هر لایه) برای به دست آوردن رابطه ضریب آب گذری معادل در سد دولایه با لایه‌های عمودی مورد بررسی و آنالیز خطی و غیرخطی قرار گرفت و با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی این روابط در نهایت رابطه زیر با ضریب همبستگی 0.9602 و سطح معنی داری 0.99 و خطای جذر میانگین مربعات 0.036 ارایه شد:

$$\frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0.1 \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)^{1.1} \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \right) + 0.1 \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)^{0.9} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \right) + 0.12 \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{-0.2} \times \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{-0.9} + 0.3 \left(\frac{H_{DW}}{H_{UP}} \right)^{0.5} \quad (26)$$

در شکل (۱۰) ضریب آب گذری معادل به دست آمده از مدل و ضریب آب گذری محاسبه شده با فرمول (۲۶) با هم مقایسه شده‌اند.

آنالیز حساسیت در سد دولایه با لایه‌های عمودی

برای انجام آنالیز حساسیت در سدهای دولایه با لایه‌های عمودی، مقدار متوسط تغییرات ضریب آب گذری معادل به مجموع ضریب آب گذری دو لایه به‌ازای تغییر هر یک از پارامترها محاسبه شده است (جدول ۴). براساس نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز حساسیت، در سدهای دولایه با لایه‌های عمودی میزان تاثیر ضریب آب گذری لایه‌های مختلف بر روی ضریب آب گذری معادل تفاوت چندانی با هم ندارد. این مطلب می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که در سدهای دولایه با لایه‌های عمودی ترتیب قرارگیری لایه‌ها تاثیر چندانی بر مقدار ضریب آب گذری معادل ندارد.

رابطه ضریب آب گذری با عوامل موثر بر آن در چیدمان عمودی لایه‌ها

ترکیبات مختلفی از پارامترهای موثر بر ضریب آب گذری (شامل نسبت عمق پایاب به سراب، نسبت طول هر لایه به طول

جدول ۴- آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف درسد دو لایه با لایه های عمودی

Table 4. Sensitivity analysis of various parameters in vertical two layered dams

Parameter	$\frac{H_{DW}}{H_{UP}}$	$\frac{L_1}{L_{Total}}$	$\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$	$\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$
Parameter change	0,2	0.2	0.25	0.25
Changing in $\% \frac{\alpha_{eq}}{\alpha_1 + \alpha_2}$	3.888	1.925	1.196	1.753

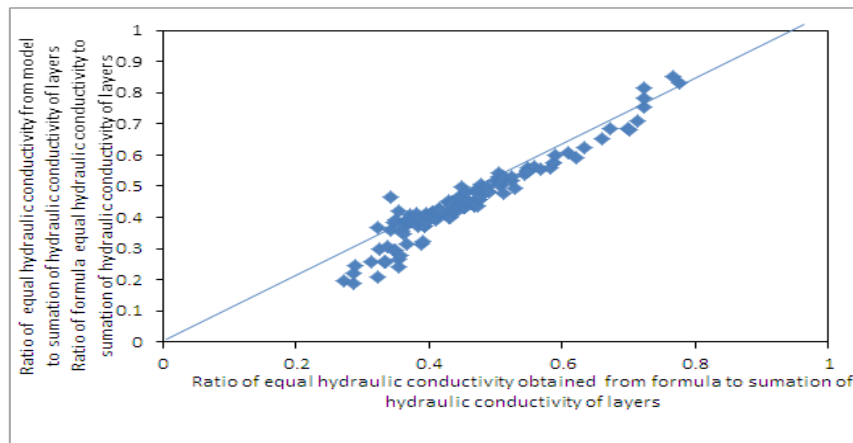


Fig 10. Comparison of hydraulic conductivity obtained from model and hydraulic conductivity obtained from equation (26)

شکل ۱۰- مقایسه ضریب آب‌گذری معادل به دست آمده از برنامه و ضریب آب‌گذری معادل محاسبه شده با رابطه (۲۶)

به طوری که وقتی طول لایه اول از یک سوم طول کل سد بیشتر می‌شود دیگر با تغییر نسبت طول لایه اول به تغییر طول لایه دوم تغییر چشم‌گیری در ضریب آب‌گذری معادل به وجود نمی‌آید. همچنین در سد دولایه با لایه‌های عمودی نیز هم‌مانند سد با لایه‌های افقی، هر چه نسبت تراز آب در پایاب به تراز آب در سراب بیشتر باشد، ضریب آب‌گذری معادل هم بیشتر می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده روابطی جهت تخمین ضریب آب‌گذری معادل در سدهای پاره‌سنگی دولایه ارائه شد و با مقایسه ضریب آب‌گذری معادل به دست آمده از این روابط با ضریب آب‌گذری محاسبه شده توسط مدل ضرایب همبستگی خوبی بین آن‌ها مشاهده شد به طوری که ضریب همبستگی رابطه ارائه شده برای سد با لایه‌های افقی 0.9422 و جذر مربعات میانگین خطای آن 0.016 می‌باشد و برای سد با لایه‌های عمودی نیز ضریب همبستگی رابطه ارائه شده 0.9602 و جذر مربعات میانگین خطای آن 0.036 می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با تهیه یک مدل عددی جریان از دورن سد پاره‌سنگی دولایه (با لایه‌های عمودی و با لایه‌های افقی) مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، در سدهای دولایه با لایه‌های افقی لایه پایینی تاثیر بیشتری روی ضریب آب‌گذری معادل دارد و هر چه سنگ‌دانه‌های این لایه درشت‌تر باشد و ضخامت این لایه نیز بیشتر باشد ضریب آب‌گذری معادل بیشتر خواهد بود. همچنین افزایش عمق پایاب نیز باعث افزایش ضریب آب‌گذری معادل در این سدها می‌شود. در مورد سدهای دولایه با لایه‌های عمودی نیز، بررسی‌ها نشان می‌دهد ترتیب قرارگیری لایه‌های ریز و درشت تاثیر چندانی در تغییر ضریب آب‌گذری معادل ندارد بلکه آنچه اثرگذار است طول هر لایه است یعنی هرچه لایه با سنگ‌دانه‌های درشت‌تر طول بیشتری داشته باشد ضریب آب‌گذری معادل هم بیشتر می‌شود اما این افزایش ضریب آب‌گذری معادل تا حد معینی از نسبت $\frac{L_1}{L_2}$ ادامه دارد

References

- 1- Asiaban, P.; Amiri Tokaldani, A. and Omid, M. H.; 2014. Investigation of Bed Load Transport Through Rockfill Dam. *Journal of Water Science and Engineering*, 38(3), pp.155-164 . (In Persian).
- 2- Ergun S. 1952. Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, 48(2), pp. 89-94.

- 3- Forchheimer, P.; 1901. Wasserbewegung durch boden . *Zeit. Ver. Deutsch. Ing.*, 45,pp. 1781–1788 (in German).
- 4- Hosseini, S.M. and Joy, D.M. 2007. Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous media applicable to valley fills. *International Journal of River Basin Management*, 5(4), pp.253-265.
- 5- Samani, H.M.V., Samani, J.M.V. and Shayannejad, M. 2003. Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), pp. 448–454.
- 6- Samani, J. M. V., Samani, H. M. V. and Shaiannejad, M. 2004. Reservoir routing with outflow through rockfill dams. *IAHR Journal of Hydraulic Research*, 42(4), pp. 435-439.
- 7- sedghi Asl, M., Rahimi, H.;Farhoodi, J. and Samani, J. M. V.,2011. Analysis of the Water Surface Profiles through Coarse Porous Medium. *Iranian Water Research Journal*, 4 (7), pp.77-84. (In Persian).
- 8- Shayannejad, M. and Ashjazadeh, S., 2014. A hydraulic investigation of flow through a two-layered rockfill dam using an experimental model. *International Bulletin of Water Resources and Development*. 3(6), pp. XVII-XIX.
- 9- Stephenson, D. 1979. *Rockfill in Hydraulic Engineering*. Elsevier Scientific, Publishing Co.,Amsterdam, the Netherlands.
- 10- Wilkins, J. 1956. Flow of water through rockfill and its application to the design of dams. *2nd Australia New Zealand Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering, Christchurch, New Zealand*.
- 11- Roshanfekar, A.; Zahiri , J. and Kashefipour, S. M.; 2009. Presenting Some Equations for Calculating the Non-Darcy Flow Coefficients in Rockfills. *Journal of Water and Soil*, 24 (5),pp.855-863. (In Persian).
- 12- Zeng Z. and Grigg R. 2006. A criterion for non-Darcy flow in porous media.*Transport In Porous Media*, 63, pp. 57-69.