

Numerical Investigation of Flow through Two Layered Rockfill Dam

KOLSOOM HASANVAND^{1*}, JAMAL MOHAMMAD VALI SAMANI²

1- Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Received: March. 14, 2020- Revised: July. 22, 2020- Accepted: June. 14, 2021)

ABSTRACT

Horizontal layered dams and vertical layered dams are two types of the heterogeneous rock fill dams which can be employed by many engineers for attenuation of peak discharge of flood hydrograph. In this study a two dimensional (2D) computer model has been developed to investigate the flow through two layered rock fill dams. After development of the computer model, its validation has been confirmed using experimental data. Then a series of experiments have been designed to evaluate the flow discharge through two layered rock fill dams. In these experiments, four cases of layered dam have been investigated. The results of this study indicate that in the horizontal two layered dams when the lower layer is made of the finer grained rocks, the flow discharge is less than the other arrangements. Also, in order to demonstrate the model sensitivity to grain size in each layer, a sensitivity analysis has been conducted. Also, the results indicate that in the horizontal two layered dam for each centimeter change in the rock size of the lower layer, flow discharge changes 9.96 percent, while each centimeter change in the rock size of the top layer leads to only 4.52 percent change in the discharge. In the vertical two layered dam, for each centimeter change in the rock size of the upstream and downstream layers, the flow discharge changes 11.72 and 12.04 percent, respectively.

Keywords: Rockfill dam, Heterogeneous dams, Finite volume method, Two layered dam

*Corresponding Author's Email: k.hasanvand@gmail.com



بررسی عددی جریان از درون سد پاره‌سنگی دولایه

کلثوم حسنونند^{۱*}، جمال محمد ولی سامانی^۱

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۱ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۲۴)

چکیده

سدهای پاره‌سنگی لایه‌ای با چیدمان لایه‌های عمودی یا افقی نوعی از سدهای پاره‌سنگی ناهمگن هستند که برای کنترل سیلاب استفاده می‌شوند. در تحقیق حاضر یک مدل عددی دوبعدی، برای بررسی جریان عبوری از درون سد پاره‌سنگی دولایه تهیه شده است. پس از صحت سنجی مدل چهار حالت مختلف از سد دولایه با چیدمان‌های افقی و عمودی در نظر گرفته شد و با طرح چند سری آزمایش، دبی عبوری از هر سد ارزیابی شد. با انجام بررسی‌ها مشخص شد چیدمان افقی لایه‌ها که در آن لایه ریزتر در پایین قرار دارد نسبت به سایر حالت‌ها کمترین مقدار دبی عبوری را دارد. همچنین با انجام آنالیز حساسیت نسبت به قطر سنگدانه‌های هر لایه مشخص شد در سد با لایه‌های افقی هر یک سانتی‌متر تغییر در قطر سنگدانه‌های لایه پایینی، ۹/۹۶ درصد تغییر در دبی را ایجاد می‌کند؛ در حالی که تغییر دبی ایجاد شده به ازای تغییر سنگدانه‌های لایه بالایی تنها ۴/۵۲ درصد بود. در چیدمان عمودی نیز به ازای هر یک سانتی‌متر تغییر در قطر سنگدانه‌های لایه‌ای که در سمت بالادست جریان است دبی عبوری ۱۱/۷۲ درصد تغییر می‌کند. این تغییر برای سنگدانه‌های لایه‌ای که در سمت پایین دست جریان است برابر با ۱۲/۰۴ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سد پاره‌سنگی، روش احجام محدود، سد دولایه

مقدمه

کنند. برخی دیگر از محققان با استفاده از روابط ارائه شده توسط سایرین، تحقیقات خود را پیش بردند.

معادلاتی که بیانگر رابطه بین ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ و عدد رینولدز است:

$$f = aR_e^b \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$f = \frac{a'}{R_e} + b' \quad (\text{رابطه ۴})$$

محققان زیادی نیز در پژوهش‌های خود از این معادلات استفاده کرده‌اند. از جمله می‌توان به کارهای انجام شده توسط Samani et al. (2003 and 2004) است که مدلی نرم افزاری برای تحلیل جریان در سدهای پاره سنگی تهیه و در نهایت برای دو حالت جریان یک‌بعدی و دوبعدی، رابطه‌ای بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داریسی ویسباخ به ترتیب به صورت زیر ارائه کرده‌اند:

$$f = 54R_e^{-0.077} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$f = 80R_e^{-0.034} \quad (\text{رابطه ۶})$$

به طور کلی با توجه به اینکه مطالعات زیادی تاکید بر این امر داشته است که در محیط متخلخل درشت‌دانه به ویژه در سرعت بالا، جریان داریسی برقرار نیست بلکه از نوع غیر داریسی است (Rivindra 2018b; and Hiller et al.2018; Ferdos and Dargahi, 2016a , 2016b) و نیز با توجه به اهمیت سازه‌های

امروزه از مصالح سنگریزه‌ای در ساخت سازه‌های آبی مختلف از جمله سدهای پاره‌سنگی استفاده می‌شود. محیط‌های سنگریزه‌ای از نوع محیط متخلخل درشت‌دانه هستند که در آنها جریان از حالت ورقه‌ای خارج شده و از قانون داریسی تبعیت نمی‌کند. بنابراین برای بررسی شرایط جریان در این محیط‌ها باید از روابطی استفاده کرد که در آن ارتباط سرعت و گرادیان هیدرولیکی غیر-خطی باشد. به طور کلی معادلات حاکم بر جریان متلاطم در محیط سنگریزه‌ای به دو دسته تقسیم می‌شوند:

معادلاتی که بیانگر رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت می‌باشند و به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$i = \alpha V^\beta \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$i = \alpha' V + \beta' V^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این معادلات $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ ضرایب ثابتی هستند که تابع خصوصیات سیال و سنگدانه‌ها می‌باشند. اولین بار Forchheimer (1901) سعی کرد تاثیر نیروی اینرسی را در جریان غیر داریسی در نظر بگیرد و پس از آن نیز محققان زیادی این دسته از معادلات را مورد بررسی قرار داده‌اند. Wilkins (1956) ، Stephenson (1979) سعی کردند ضرایب مناسبی برای روابط (۱) و (۲) معرفی

آزمایشات

آزمایشات در یک فلوم شیشه‌ای در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد عرض فلوم ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع آن ۵۰ سانتی‌متر و طول آن ۱۰ متر است. پس از انتخاب مصالح سنگریزه‌ای، برای نگهداری سنگدانه‌ها ابتدا سبدهای تور-سیمی گالوانیزه‌ای ساخته شد و سپس مصالح در آن قرار داده شد. در هر آزمایش عمق آب بالادست و عمق آب پایین دست با استفاده از عمق سنج اندازه گیری شد و همچنین دبی جریان نیز توسط دبی سنج مغناطیسی نصب شده بر روی بخش دهش پمپ، اندازه گیری شد.

روش عددی

برای تحلیل جریان دوبعدی در حالت جریان دائمی از معادله پیوستگی استفاده می‌شود:

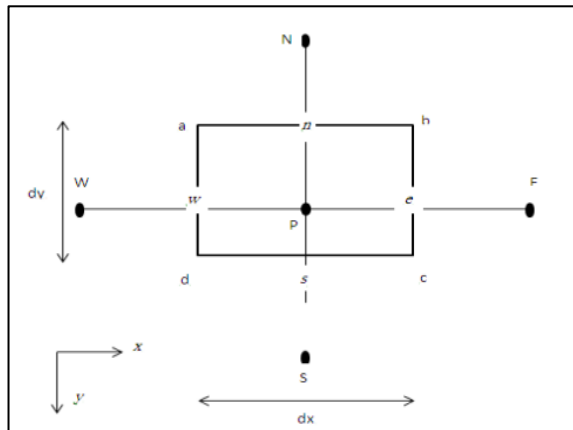
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{رابطه ۷})$$

اگر رابطه (۳) با معادله داری ترکیب شود، سرعت در محیط سنگریزه‌ای از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$u = \alpha' i_x^\beta; \quad V = \alpha' i_y^\beta \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن: $\alpha' = \left[\frac{2g\theta^b}{a(d_{50}-\sigma)^{b-1}} \right]^\beta$ و پارامترهای این روابط عبارتند از: g : شتاب ثقل، θ : لزجت سینماتیک آب، d_{50} : متوسط قطر سنگدانه‌های مصرفی، σ : انحراف معیار استاندارد سنگدانه‌های مصرفی و a و b ضرایب ثابتی هستند که به خصوصیات سیال بستگی دارند (Samani et al. 2013).

برای حل معادله دو بعدی جریان در محیط سنگریزه‌ای با استفاده از روش احجام محدود، ابتدا باید معادله گسسته‌سازی شود بدین منظور حجم کنترل $abcd$ به ابعاد $l \times dx$ در شکل دیده می‌شود نقاط N, W, S, E, P را احاطه کرده‌اند.



شکل ۱- حجم کنترل جریان دوبعدی

اگر از معادله (۷) روی حجم کنترل نشان داده شده در شکل (۱) انتگرال گرفته شود و مقادیر سرعت از رابطه (۸) در آن

سنگریزه‌ای، محققان زیادی از دیدگاه‌های مختلف به بررسی جریان غیر داری در این محیط‌ها پرداخته‌اند. Gord- (2019) Noshari et al. به تحلیل و ارزیابی معادلات افت اصطکاکی جریان با سطح آزاد در محیط سنگریزه‌ای پرداخت و بر اساس تحلیل آماری معادله‌ای برای افت اصطکاکی در این محیط‌ها ارائه کرد. تعدادی از مطالعات نیز تاثیر مشخصات مصالح نظیر دانه بندی و تخلخل را بر رفتار غیر خطی جریان مورد بررسی قرار دادند. از جمله می‌توان به کارهای انجام شده توسط Li (2017) et al.; Wang et al.; (2019) Li et al.; (2018) houben et al اشاره کرد که همگی این تحقیقات در محیط همگن انجام شده‌اند. در زمینه مطالعات انجام شده در محیط ناهمگن نیز می‌توان به تحقیق انجام شده توسط Shayannejad and Ashjazadeh (2014) اشاره کرد که یک مدل ریاضی یک‌بعدی برای توصیف جریان از سد پاره‌سنگی ناهمگن تهیه کردند. در تهیه این مدل از ترکیب رابطه بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز با معادله پیوستگی به عنوان معادله حاکم بر محیط درشت‌دانه بهره گرفتند و ضرایب معادله را با استفاده از مدل آزمایشگاهی تعیین کردند. آنها در تحقیق خود از دو نوع مصالح درشت‌دانه و ریزدانه استفاده کردند. یک سد ناهمگن را یکبار با لایه‌های افقی که لایه ریزدانه در پایین و لایه درشت‌دانه در بالا قرار داشت و بار دیگر با لایه‌های عمودی که لایه درشت‌تر در سمت بالادست سد قرار داشت، مدل کردند. سپس به مدل کردن سد یک لایه در سه حالت پرداختند به این صورت که یک سد ریزدانه، یک سد درشت‌دانه و یک سد را با ترکیب سنگدانه‌های ریز و درشت مدل کردند. بعد از آن هر کدام از این مدل‌ها را در روندیابی مخزن مورد ارزیابی قرار دادند. با مقایسه هیدروگراف خروجی از این مدل‌ها ملاحظه شد که دبی اوج هیدروگراف خروجی به دست آمده از سد ناهمگن با لایه‌های عمودی در مقایسه با دیگر سدها افت بیشتری پیدا کرده است.

با توجه به اهمیت سدهای پاره‌سنگی لایه‌ای و از طرفی کم بودن تحقیقات انجام شده در این زمینه، در تحقیق حاضر جریان عبوری از سد پاره‌سنگی لایه‌ای، با چیدمان افقی و عمودی لایه‌ها مدل‌سازی شده و پس از صحت سنجی مدل، تاثیر چیدمان‌های مختلف بر میزان دبی خروجی از سد بررسی شده است.

مبانی و روش کار

برای بررسی جریان دوبعدی از سدهای پاره‌سنگی ابتدا داده‌های آزمایشگاهی مورد نیاز جمع‌آوری شد و سپس مدل عددی تهیه شد. در این بخش پس از توضیح آزمایشات، به بررسی روابط حاکم بر جریان از سد پاره‌سنگی دولایه و حل آن با استفاده از روش احجام محدود پرداخته شده است.

مرز دو لایه وضعیت متفاوت است. در این مرز برای ضرایب بالایی و پایینی هر گره (A_N و A_S) به ترتیب از ضریب‌آبگذری لایه بالایی (لایه ۲) و ضریب‌آبگذری لایه پایینی (لایه ۱) استفاده می‌شود اما برای محاسبه ضرایب غربی و شرقی (A_W و A_E) باید از ضریب‌آبگذری دو لایه میانگین‌گیری شود بنابراین ضرایب معادله (۱۱) در مرز دو لایه افقی به صورت زیر نوشته می‌شوند (با این فرض که روی مرز دو لایه گره‌هایی مشترک وجود دارد):

(رابطه ۱۲)

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

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

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

همچنین در سد دولایه با لایه‌های عمودی (شکل ۲-ب)، هنگام نوشتن معادلات برای گره‌های واقع در هر لایه از ضریب‌آبگذری همان لایه استفاده می‌شود. اما در مورد مرز دو لایه، برای نوشتن ضرایب بالایی و پایینی هر گره (A_N و A_S) از ضریب‌آبگذری دو لایه میانگین‌گیری کرده و برای محاسبه ضرایب غربی و شرقی (A_W و A_E) به ترتیب از ضریب‌آبگذری لایه (۱) و ضریب‌آبگذری لایه (۲) استفاده خواهد شد.

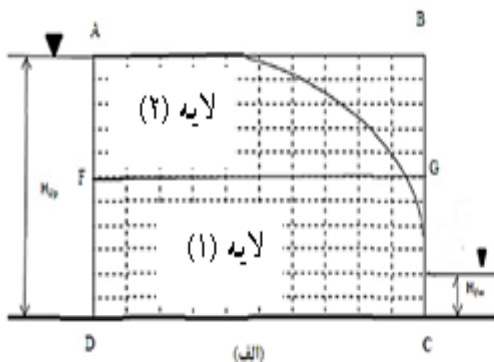
(رابطه ۱۳)

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

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

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

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



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

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صحت این ضرایب بررسی شد و دبی به دست آمده از مدل با دبی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. با توجه به ناچیز بودن مجموع مربعات خطا، این ضرایب مناسب تشخیص داده شد و در انجام تحقیق حاضر نیز از آنها استفاده شد.

جایگزین شود، با در نظر گرفتن اینکه $i_x = -\frac{dH}{dx}$ و $i_y = -\frac{dH}{dy}$ می‌توان نوشت:

(رابطه ۹)

$$\alpha' \left(\frac{H_P - H_E}{\Delta x} \right)^{\beta} \Delta y - \alpha' \left(\frac{H_W - H_P}{\Delta x} \right)^{\beta} \Delta y + \alpha' \left(\frac{H_P - H_S}{\Delta y} \right)^{\beta} \Delta x - \alpha' \left(\frac{H_N - H_P}{\Delta y} \right)^{\beta} \Delta x = 0$$

برای حل معادله (۹)، معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

(رابطه ۱۰)

$$\alpha' \left(\frac{H_P - H_E}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \left(\frac{H_P - H_E}{\Delta x} \right) \Delta y - \alpha' \left(\frac{H_W - H_P}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \left(\frac{H_W - H_P}{\Delta x} \right) \Delta y + \alpha' \left(\frac{H_P - H_S}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \left(\frac{H_P - H_S}{\Delta y} \right) \Delta x - \alpha' \left(\frac{H_N - H_P}{\Delta y} \right)^{\beta-1} \left(\frac{H_N - H_P}{\Delta y} \right) \Delta x = 0$$

و در نهایت معادله جریان دوبعدی از درون محیط متخلخل

درشت‌دانه مطابق زیر به دست می‌آید:

(رابطه ۱۱)

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

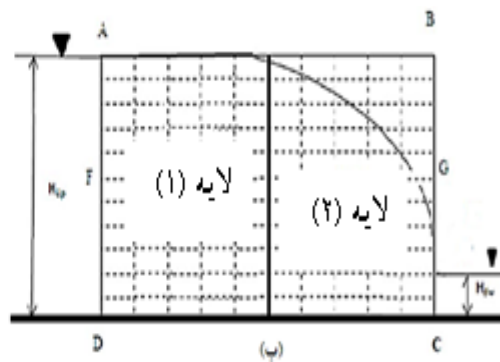
$$A_W = \alpha' \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H(i-1,j) - H(i,j)}{\Delta x} \right)^{\beta-1} \quad A_E = \alpha' \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H(i,j) - H(i+1,j)}{\Delta x} \right)^{\beta-1}$$

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

با توجه به شرایط مرزی و حل معادلات به دست آمده، مقدار پتانسیل در کلیه نقاط قابل محاسبه است.

نکته قابل ملاحظه، غیر همگن بودن سد است. با توجه به

اینکه در این نوع سد، دو لایه با مشخصات مختلف وجود دارد برای هر لایه باید از مشخصات مربوط به آن استفاده شود. بنابراین هنگام استفاده از معادله (۱۱) باید ضریب‌آبگذری برای هر لایه را به درستی تعیین کرد و در معادله مربوطه جایگذاری کرد. در سد دولایه با لایه‌های افقی (شکل ۲-الف)، برای گره‌های واقع در لایه پایینی از ضریب‌آبگذری لایه (۱) و هنگام نوشتن معادلات برای لایه بالایی از ضریب‌آبگذری لایه (۲) استفاده می‌شود. اما در مورد



واسنجی مدل

برای استفاده از مدل، باید ضرایب معادله (۳) تعیین شود. همانگونه که قبلاً اشاره شد سامانی و همکاران (۲۰۰۳) پس از انجام بهینه‌سازی‌های مربوطه معادله $f = 80R_e^{-0.034}$ را برای جریان دوبعدی از سد پاره‌سنگی پیشنهاد دادند. در تحقیق حاضر

صحت‌سنجی مدل

صحت مدل کامپیوتری تهیه شده با انجام موارد زیر به تایید رسید: با کوچک در نظر گرفتن ابعاد سد پاره سنگی افت جریان کمتر می‌شود. در مدل حاضر به ازای عرض سد خیلی کوچک، مقدار عمق آب در پایاب با اختلاف کمی نسبت به عمق سراب به دست آمد.

وقتی که تراز سطح آب در بالادست و پایین دست سد با هم برابر باشد، به دلیل اینکه اختلاف پتانسیلی بین بالادست و پایین دست سد وجود ندارد انتظار می‌رود دبی محاسبه شده توسط مدل برابر با صفر باشد. پس از اجرای مدل دبی ۰/۰۰۰۲ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد که بسیار ناچیز می‌باشد.

ارزیابی دقت نتایج

در این بخش نتایج حاصل از اجرای مدل برای جریان درون گذر در سدهای پاره‌سنگی دولایه با مقطع مستطیلی و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی بررسی می‌شود.

سد دولایه با لایه‌های افقی

آزمایش ۱- یک سد مستطیلی با دو لایه افقی، به طول ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه پایینی برابر با ۱۱ سانتی‌متر و قطر متوسط سنگدانه‌ها در این لایه ۲/۵ سانتی‌متر است. ارتفاع لایه بالایی نیز ۱۱ سانتی‌متر است که با سنگدانه‌هایی به قطر ۵

سانتی‌متر ساخته شده است. با اجرای مدل، مقدار دبی ۲/۱۰۹ لیتر بر ثانیه محاسبه شد که دبی در آزمایشگاه ۲/۲۷۰ لیتر بر ثانیه به دست آمده است. تراز آب توسط مدل در سراب ۲۲/۰ سانتی‌متر و در پایاب ۴/۲ سانتی‌متر پیش بینی می‌شود. این مقادیر در آزمایشگاه به ترتیب ۲۲/۰ سانتی‌متر و ۴/۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. در شکل (۳) نمودار سطح آزاد آب به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی برای آزمایش (۱) مقایسه شده است. در مورد این آزمایش $RMSE$ برابر با ۰/۰۰۹ متر می‌باشد که بسیار کم است و دقت بالای مدل را نشان می‌دهد. $RMSE$ که ریشه میانگین مربع خطاهاست معیاری است که پراکندگی داده‌های پیش‌بینی شده را نسبت به داده‌های مشاهده شده توصیف می‌کند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در این رابطه O_i داده‌های مشاهده شده، P_i داده‌های پیش‌بینی شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

جهت مقایسه بیشتر، در جدول (۱) تعداد دیگری از آزمایشات مربوط به سد با لایه‌های افقی آورده شده است لازم به ذکر است در همه این آزمایشات طول سد برابر با ۷۰ سانتی‌متر بوده است.

همچنین برای آزمایش‌های شرح داده شده در جدول (۱)، مقادیر مربوط به سطح آزاد آب درون سد، در جدول (۲) آورده شده است.

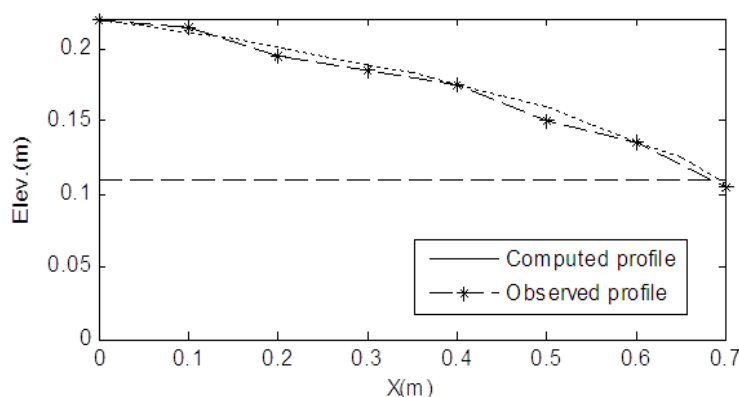
جدول ۱- آزمایش‌های انجام شده برای سد دولایه با لایه‌های افقی

| شماره آزمایش | مشخصات لایه (۱) | | H_{UP} (cm) | مشخصات لایه (۲) | | دبی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (لیتر بر ثانیه) | دبی به دست آمده از مدل (لیتر بر ثانیه) | درصد خطای نسبی |
|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|--|--|----------------|
| | ارتفاع (cm) | d_{50-1} (cm) | | ارتفاع (cm) | d_{50-2} (cm) | | | |
| ۱- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۱۲ | ۵ | ۱۱ | ۰/۲۴ | ۰/۲۵ | ۴/۱۵ |
| ۲- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۱۴ | ۵ | ۱۱ | ۰/۶۳ | ۰/۶۵ | ۳/۱۷ |
| ۳- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۱۷ | ۵ | ۱۱ | ۱/۱۵ | ۱/۲۰ | ۴/۸۰ |
| ۴- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۲۲ | ۵ | ۱۱ | ۲/۷۲ | ۲/۶۸ | ۱/۴۷ |
| ۵- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۲۰ | ۵ | ۱۹ | ۲/۷۱ | ۲/۶۳ | ۲/۹۵ |
| ۶- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۲۴ | ۵ | ۱۹ | ۳/۳۳ | ۳/۳۰ | ۰/۹۰ |
| ۷- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۲۶ | ۵ | ۱۹ | ۳/۸۵ | ۳/۷۷ | ۲/۰۸ |
| ۸- دولایه افقی | ۱۱ | ۲/۵ | ۳۰ | ۵ | ۱۹ | ۴/۴۵ | ۴/۳ | ۳/۳۷ |
| ۹- دولایه افقی | ۱۵ | ۳ | ۲۰ | ۸ | ۱۵ | ۲/۱۰ | ۱/۹۹ | ۰/۸۵ |
| ۱۰- دولایه افقی | ۱۵ | ۳ | ۲۴ | ۸ | ۱۵ | ۳/۱۱ | ۳/۱۱ | ۰/۲۶ |
| ۱۱- دولایه افقی | ۱۵ | ۳ | ۲۷ | ۸ | ۱۵ | ۴/۰۲ | ۳/۸۹ | ۲/۸۰ |
| ۱۲- دولایه افقی | ۱۵ | ۳ | ۳۰ | ۸ | ۱۵ | ۴/۶۱ | ۴/۵۸ | ۰/۶۵ |

جدول ۲- داده‌های مربوط به پروفیل سطح آب برای آزمایش های جدول (۱)

| شماره آزمایش | فاصله از ابتدای سد (cm) | عمق آب به دست آمده از مدل (cm) | عمق آب اندازه گیری شده در آزمایشگاه (cm) | درصد خطای نسبی میانگین درصد خطای نسبی |
|----------------|-------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|
| ۱- دولایه افقی | ۱۰ | ۱۲/۰ | ۱۲/۰ | ۰ |
| | ۲۰ | ۱۰/۸ | ۱۱ | ۱/۸۲ |
| | ۳۰ | ۹/۷ | ۹/۹ | ۲/۰۲ |
| | ۴۰ | ۷/۵ | ۷/۴ | ۱/۳۵ |
| | ۵۰ | ۶/۶ | ۶/۵ | ۱/۵۴ |
| | ۶۰ | ۵/۰ | ۴/۸ | ۴/۰۰ |
| ۷۰ | ۳/۸ | ۳/۸ | ۰/۰ | |
| ۲- دولایه افقی | ۱۰ | ۱۳/۶ | ۱۳/۰ | ۴/۶۲ |
| | ۲۰ | ۱۲/۰ | ۱۲/۵ | ۴/۰۰ |
| | ۳۰ | ۱۱/۴ | ۱۱/۱۰ | ۳/۶۴ |
| | ۴۰ | ۱۰/۰ | ۱۰/۲ | ۱/۹۶ |
| | ۵۰ | ۸/۷ | ۸/۵ | ۲/۳۵ |
| | ۶۰ | ۶/۲ | ۶/۴ | ۲/۸۱ |
| ۷۰ | ۵/۰ | ۴/۸ | ۴/۱۷ | |
| ۳- دولایه افقی | ۱۰ | ۱۶/۵ | ۱۶/۵ | ۰/۰۰ |
| | ۲۰ | ۱۵/۰ | ۱۵/۵ | ۳/۲۳ |
| | ۳۰ | ۱۴/۳ | ۱۴/۲ | ۰/۷۰ |
| | ۴۰ | ۱۲/۰ | ۱۲/۵ | ۴/۰ |
| | ۵۰ | ۹/۸ | ۱۰/۰ | ۱/۸۰ |
| | ۶۰ | ۷/۰ | ۷/۴ | ۵/۴۱ |
| ۷۰ | ۶/۰ | ۵/۸ | ۳/۴۵ | |
| ۴- دولایه افقی | ۱۰ | ۲۱/۰ | ۲۱/۵ | ۲/۳۳ |
| | ۲۰ | ۱۹/۰ | ۱۸/۰ | ۵/۵۶ |
| | ۳۰ | ۱۸/۰ | ۱۷۰/۲ | ۴/۶۵ |
| | ۴۰ | ۱۷/۰ | ۱۶/۸ | ۱/۱۹ |
| | ۵۰ | ۱۶/۰ | ۱۴/۸ | ۸/۱۱ |
| | ۶۰ | ۱۳/۰ | ۱۳/۰ | ۰/۰۰ |
| ۷۰ | ۱۱/۳ | ۱۰/۸ | ۴/۶۳ | |
| ۵- دولایه افقی | ۱۰ | ۱۹/۵ | ۱۹/۳ | ۱/۰۴ |
| | ۲۰ | ۱۸/۱ | ۱۸/۱ | ۰/۰۰ |
| | ۳۰ | ۱۷/۱ | ۱۶/۸ | ۱/۷۹ |
| | ۴۰ | ۱۶/۰ | ۱۶/۲ | ۱/۲۳ |
| | ۵۰ | ۱۴/۶ | ۱۴/۳ | ۲/۱۰ |
| | ۶۰ | ۱۲/۲ | ۱۲/۱ | ۰/۸۳ |
| ۷۰ | ۱۱/۱ | ۱۰/۴ | ۶/۷۳ | |
| ۶- دولایه افقی | ۱۰ | ۲۳/۱ | ۲۳/۰ | ۰/۴۳ |
| | ۲۰ | ۲۱/۸ | ۲۲/۱ | ۱/۳۶ |
| | ۳۰ | ۱۹/۷ | ۲۰/۲ | ۲/۴۸ |
| | ۴۰ | ۱۸/۵ | ۱۹/۱ | ۳/۱۴ |
| | ۵۰ | ۱۷/۱ | ۱۷/۳ | ۱/۱۶ |
| | ۶۰ | ۱۶/۲ | ۱۶/۰ | ۱/۲۵ |
| ۷۰ | ۱۵/۰ | ۱۵/۲ | ۱/۳۲ | |
| ۷- دولایه افقی | ۱۰ | ۲۵/۲ | ۲۵/۵ | ۱/۱۸ |
| | ۲۰ | ۲۴/۶ | ۲۴/۸ | ۰/۸۱ |
| | ۳۰ | ۲۳/۱ | ۲۳/۵ | ۱/۷۰ |
| | ۴۰ | ۲۱/۸ | ۲۲/۲ | ۱/۸۰ |
| | ۵۰ | ۲۰/۵ | ۲۰/۸ | ۱/۴۴ |
| | ۶۰ | ۱۹/۲ | ۱۹/۸ | ۳/۰۳ |
| ۷۰ | ۱۸/۰ | ۱۷/۹ | ۰/۵۶ | |
| ۸- دولایه افقی | ۱۰ | ۲۹/۳ | ۲۹/۰ | ۱/۰۳ |
| | ۲۰ | ۲۸/۴ | ۲۸/۱ | ۱/۰۷ |
| | ۳۰ | ۲۷/۴ | ۲۷/۱ | ۱/۱۱ |
| | ۴۰ | ۲۶/۲ | ۲۶/۰ | ۰/۷۷ |
| | ۵۰ | ۲۴/۰ | ۲۴/۲ | ۰/۸۳ |
| | ۶۰ | ۲۳/۱ | ۲۳/۰ | ۰/۴۳ |
| ۷۰ | ۲۲/۳ | ۲۲/۰ | ۰/۳۶ | |
| ۹- دولایه افقی | ۱۰ | ۲۰/۰ | ۲۰/۰ | ۰/۰۰ |
| | ۲۰ | ۱۹/۶ | ۲۰/۰ | ۲/۰۰ |
| | ۳۰ | ۱۹/۰ | ۱۹/۴ | ۲/۰۶ |
| | ۴۰ | ۱۸/۰ | ۱۸/۳ | ۱/۶۴ |
| | ۵۰ | ۱۶/۸ | ۱۷/۰ | ۱/۱۸ |
| | ۶۰ | ۱۵/۴ | ۱۵/۰ | ۲/۶۷ |
| ۷۰ | ۱۴/۳ | ۱۴/۵ | ۱/۳۸ | |
| ۱۰- دولایه | ۱۰ | ۲۳/۸ | ۲۴/۰ | ۰/۸۳ |

| | | | | | |
|------|------|-------|------|----|--------------------|
| | ۱/۳۰ | ۲۳/۰ | ۲۲/۷ | ۲۰ | افقی |
| | ۰/۴۶ | ۲۱/۷ | ۲۱/۶ | ۳۰ | |
| | ۱/۹۲ | ۲۰/۸ | ۲۰/۴ | ۴۰ | |
| | ۲/۰۵ | ۱۹/۵ | ۱۹/۱ | ۵۰ | |
| | ۲/۱۹ | ۱۸/۳ | ۱۷/۹ | ۶۰ | |
| | ۱/۷۶ | ۱۷/۱۰ | ۱۶/۷ | ۷۰ | |
| | ۰/۰۰ | ۲۷/۰ | ۲۷/۰ | ۱۰ | |
| | ۰/۳۸ | ۲۶/۶ | ۲۶/۵ | ۲۰ | |
| | ۰/۷۸ | ۲۵/۵ | ۲۵/۳ | ۳۰ | |
| ۰/۵۴ | ۱/۲۳ | ۲۴/۳ | ۲۴/۰ | ۴۰ | ۱۱- دولایه افقی |
| | ۰/۰۰ | ۲۳/۰ | ۲۳/۰ | ۵۰ | |
| | ۰/۴۵ | ۲۲/۰ | ۲۲/۱ | ۶۰ | |
| | ۰/۹۶ | ۲۰/۸ | ۲۱/۰ | ۷۰ | |
| | ۰/۰۰ | ۳۰/۰ | ۳۰/۰ | ۱۰ | |
| | ۰/۰۰ | ۲۹/۰ | ۲۹/۰ | ۲۰ | |
| | ۰/۳۶ | ۲۸/۰ | ۲۸/۱ | ۳۰ | |
| ۰/۴۴ | ۰/۷۴ | ۲۷/۱ | ۲۷/۳ | ۴۰ | ۱۲- دولایه افقی |
| | ۰/۷۷ | ۲۶/۰ | ۲۶/۲ | ۵۰ | |
| | ۰/۸۱ | ۲۴/۸ | ۲۵/۰ | ۶۰ | |
| | ۰/۴۱ | ۲۴/۱ | ۲۴/۰ | ۷۰ | |



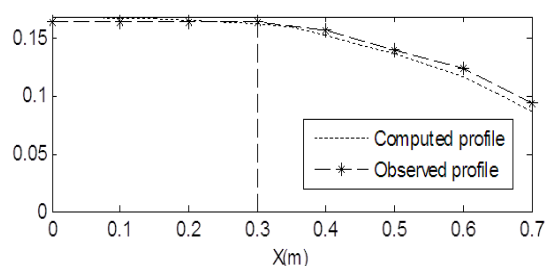
شکل ۳- مقایسه منحنی سطح آزاد آب به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی برای آزمایش ۱

سد دولایه با لایه‌های عمودی

آزمایش ۲- سد مستطیلی با طول ۷۰، عرض ۳۰ و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این سد از دو لایه عمودی تشکیل شده است طول لایه (۱) برابر با ۳۰ سانتی‌متر و قطر سنگدانه‌ها در این لایه ۵ سانتی‌متر است. طول لایه (۲) ۴۰ سانتی‌متر است که از سنگدانه‌هایی به قطر ۲ سانتی‌متر ساخته شده است. با اجرای مدل، دبی ۱/۱۶۲ لیتر بر ثانیه، تراز آب در سراب ۱۷/۰ سانتی‌متر و در پایاب ۲/۳ سانتی‌متر پیش‌بینی می‌شود. این مقادیر در آزمایشگاه به ترتیب ۱/۱۵۰ لیتر بر ثانیه، ۱۶/۵ سانتی‌متر و ۲/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. در شکل (۴) پروفیل سطح آب برای آزمایش (۲) رسم شده است؛ همانطور که مشاهده می‌شود در ۳۰ سانتی‌متر ابتدا، خط جریان با شیب کندتری افت می‌کند اما در طول ۴۰ سانتی‌متر دوم، این افت با شیب تندتری صورت می‌گیرد. در واقع در لایه دوم، به دلیل ریزدانه‌تر بودن مصالح، مقاومت در برابر جریان بیشتر است

و خط جریان در این لایه با شیب تندتری افت می‌کند. همچنین $RMSE$ برابر با ۰/۰۱۲ می‌باشد که بسیار کم است و دقت بالای مدل را نشان می‌دهد.

جهت مقایسه بیشتر، در جدول (۳) تعداد دیگری از آزمایشات مربوط به سد با لایه‌های عمودی آورده شده است. همچنین برای آزمایش‌های شرح داده شده در جدول (۳)، مقادیر عمق آب درون سد در جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۴- مقایسه منحنی سطح آزاد آب به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی برای آزمایش ۲

جدول ۳- آزمایش‌های انجام شده برای سد دولایه با لایه‌های عمودی

| شماره آزمایش | ارتفاع آب بالادست (cm) | مشخصات لایه (۱) | | مشخصات لایه (۲) | | دبی به دست آمده از مدل نسبی (لیتر بر ثانیه) | درصد خطای نسبی | دبی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (لیتر بر ثانیه) |
|------------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|--|-------------------|---|
| | | طول (cm) | d ₅₀₋₁ (cm) | طول (cm) | d ₅₀₋₂ (cm) | | | |
| ۱- دولایه عمودی | ۱۴ | ۳۰ | ۵ | ۴۰ | ۲ | ۰/۹۸ | ۳/۹۲ | ۱/۰۲ |
| ۲- دولایه عمودی | ۱۷ | ۳۰ | ۵ | ۴۰ | ۲ | ۱/۵۰ | ۲/۷۴ | ۱/۴۶ |
| ۳- دولایه عمودی | ۲۲ | ۳۰ | ۵ | ۴۰ | ۲ | ۲/۴۵ | ۰/۷۰ | ۲/۴۳ |
| ۴- دولایه عمودی | ۴۰ | ۴۰ | ۶ | ۴۰ | ۸ | ۶/۱۰ | ۰/۸۳ | ۶/۱۵ |
| ۵- دولایه عمودی | ۴۰ | ۶۰ | ۶ | ۲۰ | ۸ | ۳/۶۸ | ۳/۷۶ | ۵/۹۰ |
| ۶- دولایه عمودی | ۴۰ | ۴۰ | ۷ | ۴۰ | ۵ | ۴/۴۶ | ۳/۹۴ | ۴/۶۴ |
| ۷- دولایه عمودی | ۴۰ | ۶۰ | ۷ | ۲۰ | ۵ | ۴/۹۷ | ۱/۶۴ | ۵/۰۵ |
| ۸- دولایه عمودی | ۴۰ | ۳۰ | ۳ | ۳۰ | ۱۱ | ۸/۲۳ | ۱/۱۱ | ۸/۱۴ |
| ۹- دولایه عمودی | ۵۰ | ۳۰ | ۵ | ۳۰ | ۱۰ | ۱۰/۰۰ | ۱/۶۰ | ۹/۸۴ |
| ۱۰- دولایه عمودی | ۵۰ | ۵۰ | ۳ | ۳۰ | ۱۱ | ۶/۱۲ | ۱/۸۶ | ۶/۰۱ |
| ۱۱- دولایه عمودی | ۵۰ | ۵۰ | ۵ | ۳۰ | ۱۰ | ۶/۳۴ | ۱/۷۲ | ۶/۴۵ |

جدول ۴- داده‌های مربوط به پروفیل سطح آب برای آزمایش‌های جدول (۳)

| شماره آزمایش | فاصله از ابتدای سد (cm) | عمق آب به دست آمده از مدل (cm) | عمق آب اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (cm) | درصد خطای نسبی | میانگین خطای نسبی |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------|--|----------------|-------------------|
| ۱- دولایه عمودی | ۱۰ | ۱۴/۰ | ۱۴/۰ | -۰/۰۰ | ۲/۵۸ |
| | ۲۰ | ۱۳/۸ | ۱۴/۰ | ۱/۴۳ | |
| | ۳۰ | ۱۳/۵ | ۱۳/۰ | ۳/۸۵ | |
| | ۴۰ | ۱۲/۰ | ۱۱/۸ | ۱/۶۹ | |
| | ۵۰ | ۱۱/۲ | ۱۰/۶ | ۵/۶۶ | |
| | ۶۰ | ۱۰/۲ | ۱۰/۰ | ۲/۰۰ | |
| ۲- دولایه عمودی | ۱۰ | ۱۷/۰ | ۱۶/۸ | ۱/۱۹ | ۲/۴۱ |
| | ۲۰ | ۱۷/۰ | ۱۶/۶ | ۱/۱۹ | |
| | ۳۰ | ۱۶/۸ | ۱۶/۷ | -۰/۶۰ | |
| | ۴۰ | ۱۵/۰ | ۱۵/۲ | ۱/۳۲ | |
| | ۵۰ | ۱۳/۵ | ۱۳/۶ | -۰/۷۴ | |
| | ۶۰ | ۱۲/۰ | ۱۲/۴ | ۳/۲۳ | |
| ۳- دولایه عمودی | ۱۰ | ۲۲/۰ | ۲۲/۰ | -۰/۰۰ | ۱/۹۲ |
| | ۲۰ | ۲۱/۵ | ۲۲/۰ | ۲/۲۷ | |
| | ۳۰ | ۲۱/۰ | ۲۱/۰ | -۰/۰۰ | |
| | ۴۰ | ۱۹/۴ | ۲۰/۰ | ۳/۰۰ | |
| | ۵۰ | ۱۷/۰ | ۱۷/۵ | ۲/۸۶ | |
| | ۶۰ | ۱۵/۶ | ۱۶/۰ | ۲/۵۰ | |
| ۴- دولایه عمودی | ۱۰ | ۴۰/۰ | ۴۰/۰ | -۰/۰۰ | ۰/۸۲ |
| | ۲۰ | ۳۹/۰ | ۳۹/۱ | -۰/۲۶ | |
| | ۳۰ | ۳۷/۹ | ۳۷/۸ | -۰/۲۶ | |
| | ۴۰ | ۳۶/۵ | ۳۶/۲ | -۰/۸۳ | |
| | ۵۰ | ۳۵/۸ | ۳۵/۰ | ۲/۲۹ | |
| | ۶۰ | ۳۴/۹ | ۳۴/۴ | ۱/۴۵ | |
| ۵- دولایه عمودی | ۱۰ | ۴۰/۰ | ۴۰/۰ | -۰/۰۰ | ۱/۶۶ |
| | ۲۰ | ۳۹/۲ | ۳۷/۸ | ۳/۷۰ | |
| | ۳۰ | ۳۶/۹ | ۳۶/۰ | ۲/۵۰ | |
| | ۴۰ | ۳۴/۸ | ۳۵/۱ | -۰/۸۵ | |
| | ۵۰ | ۳۳/۰ | ۳۳/۵ | ۱/۴۹ | |
| | ۶۰ | ۳۲/۵ | ۳۲/۰ | ۱/۵۶ | |
| ۶- دولایه عمودی | ۱۰ | ۴۰/۰ | ۴۰/۰ | -۰/۰۰ | ۲/۰۵ |
| | ۲۰ | ۳۹/۰ | ۳۹/۵ | ۱/۲۷ | |
| | ۳۰ | ۳۶/۰ | ۳۸/۳ | ۱/۸۳ | |
| | ۴۰ | ۳۶/۰ | ۳۶/۶ | ۱/۶۴ | |
| | ۵۰ | ۳۵/۰ | ۳۳/۸ | ۳/۵۵ | |
| | ۶۰ | ۳۲/۰ | ۳۱/۵ | ۱/۵۹ | |

| | | | | | |
|------|------|------|------|----|------------------|
| | ۲/۹۹ | ۳۰/۱ | ۳۱/۰ | ۷۰ | |
| | ۳/۵۷ | ۲۸/۰ | ۲۹/۰ | ۸۰ | |
| | ۰/۰۰ | ۴۰/۰ | ۴۰/۰ | ۱۰ | |
| | ۱/۲۷ | ۳۹/۵ | ۴۰/۰ | ۲۰ | |
| | ۰/۰۰ | ۳۹/۰ | ۳۹/۰ | ۳۰ | |
| ۱/۷۷ | ۲/۶۳ | ۳۸/۰ | ۳۷/۰ | ۴۰ | ۷- دولایه عمودی |
| | ۲/۱۷ | ۳۶/۸ | ۳۶/۰ | ۵۰ | |
| | ۱/۴۳ | ۳۵/۰ | ۳۴/۵ | ۶۰ | |
| | ۳/۲۳ | ۳۱/۰ | ۳۲/۰ | ۷۰ | |
| | ۳/۴۵ | ۲۹/۰ | ۳۰/۰ | ۸۰ | |
| | ۲/۶۳ | ۳۸/۰ | ۳۹/۰ | ۱۰ | |
| | ۱/۶۴ | ۳۶/۵ | ۳۷/۱ | ۲۰ | |
| ۱/۹۷ | ۱/۴۹ | ۳۳/۵ | ۳۴/۰ | ۳۰ | ۸- دولایه عمودی |
| | ۰/۹۲ | ۳۲/۷ | ۳۳/۰ | ۴۰ | |
| | ۰/۹۴ | ۳۲/۰ | ۳۲/۳ | ۵۰ | |
| | ۲/۳۴ | ۳۱/۲ | ۳۱/۹ | ۶۰ | |
| | ۱/۸۴ | ۳۸/۰ | ۳۸/۷ | ۱۰ | |
| | ۲/۷۸ | ۳۶/۰ | ۳۷/۰ | ۲۰ | |
| | ۰/۰۰ | ۳۳/۰ | ۳۳/۰ | ۳۰ | |
| ۱/۹۹ | ۱/۳۱ | ۳۰/۶ | ۳۱/۰ | ۴۰ | ۹- دولایه عمودی |
| | ۳/۲۰ | ۲۸/۱ | ۲۹/۰ | ۵۰ | |
| | ۲/۹۴ | ۲۷/۲ | ۲۸/۰ | ۶۰ | |
| | ۲/۶۴ | ۲۶/۵ | ۲۷/۲ | ۷۰ | |
| | ۱/۲۰ | ۲۵/۰ | ۲۵/۳ | ۸۰ | |
| | ۲/۱۰ | ۴۸/۴ | ۴۸/۵ | ۱۰ | |
| | ۱/۰۸ | ۴۶/۵ | ۴۶/۰ | ۲۰ | |
| ۰/۸۰ | ۰/۶۸ | ۴۴/۳ | ۴۴/۰ | ۳۰ | ۱۰- دولایه عمودی |
| | ۱/۱۵ | ۴۳/۵ | ۴۳/۰ | ۴۰ | |
| | ۰/۹۴ | ۴۲/۶ | ۴۲/۲ | ۵۰ | |
| | ۰/۷۳ | ۴۱/۳ | ۴۱/۰ | ۶۰ | |
| | ۰/۴۲ | ۴۸/۱ | ۴۸/۳ | ۱۰ | |
| | ۰/۴۳ | ۴۶/۲ | ۴۶/۰ | ۲۰ | |
| | ۱/۱۴ | ۴۴/۰ | ۴۴/۵ | ۳۰ | |
| ۰/۶۰ | ۰/۴۸ | ۴۱/۸ | ۴۲/۰ | ۴۰ | ۱۱- دولایه عمودی |
| | ۱/۲۷ | ۳۹/۵ | ۴۰/۰ | ۵۰ | |
| | ۰/۵۲ | ۳۸/۸ | ۳۹/۰ | ۶۰ | |
| | ۰/۳۶ | ۳۸/۰ | ۳۸/۱ | ۷۰ | |
| | ۰/۲۷ | ۳۷/۳ | ۳۷/۲ | ۸۰ | |

نتایج و بحث

پس از تایید دقت مدل، تاثیر نحوه چیدمان لایه‌ها در سدهای دولایه افقی و عمودی بررسی شد. بدین منظور یک سد پاره‌سنگی به طول ۸۰ و عرض ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ۱۵ سری دو تایی از سنگدانه‌های مختلف در این تحقیق استفاده شد. این سنگدانه‌ها یک بار به صورت دو لایه افقی و بار دیگر به صورت دو لایه عمودی در ساخت سد استفاده شدند. آزمون‌های عددی برای سد با سه ارتفاع مختلف ۲۰، ۳۲ و ۴۰ سانتی‌متری انجام شد. در هر آزمون نیمی از سد با سنگدانه‌های درشت‌تر و نیم دیگر سد با سنگدانه‌های ریزتر پر می‌شد. نمونه‌ای از این آزمون‌ها در جدول (۵) آورده شده است.

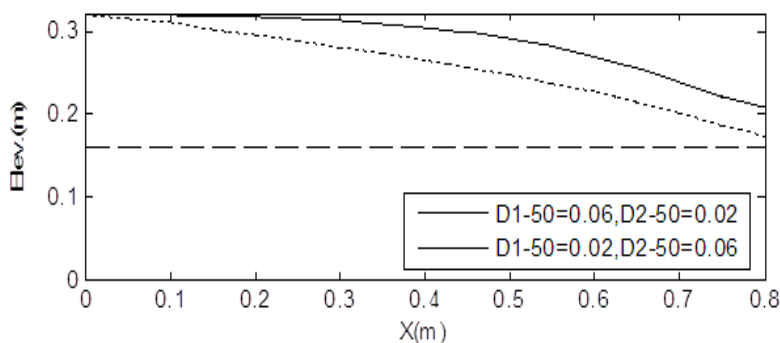
مقایسه نتایج به دست آمده از هر چیدمان

برای بحث پیرامون نتایج، به عنوان نمونه نتایج به دست آمده از سری (۲) در جدول (۵) را بررسی می‌کنیم. لازم به ذکر است که هر سری از آزمایش‌ها رفتاری مشابه را نشان داده‌اند.

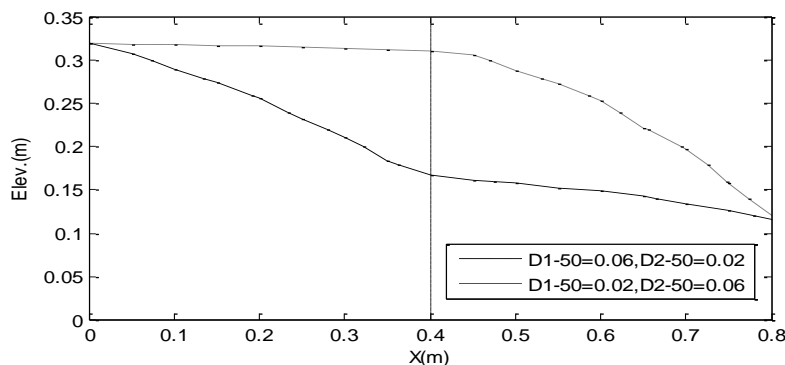
همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سد دو لایه افقی، وقتی که لایه پایینی ریزتر است نسبت به حالتی که این لایه درشت‌تر از لایه بالایی باشد، مقدار دبی کمتر می‌شود. زیرا قسمت عمده جریان درون سد از لایه پایینی عبور می‌کند پس وقتی این لایه از سنگدانه‌های ریزتر - که مقاومت بیشتری در برابر جریان دارند - تشکیل شود افت جریان بیشتر شده و دبی عبوری از سد کمتر می‌شود. نکته قابل توجه، تغییرات نمودار سطح آزاد آب است. وقتی سنگدانه‌های درشت‌تر در لایه پایینی و سنگدانه‌های ریزتر در لایه بالایی قرار دارند، نمودار سطح آزاد آب افت بیشتری دارد به دلیل اینکه سنگدانه‌های ریزتر لایه بالایی افت بیشتری ایجاد می‌کنند (شکل ۵). برای چیدمان عمودی لایه‌ها نیز همان‌گونه که در جدول (۵) دیده می‌شود، به ازای تراز آب بالادست ثابت، تفاوت کمتری بین دبی به دست آمده از دو مدل دیده می‌شود. همچنین در شکل (۶) نمودار سطح آزاد آب در این دو حالت با هم مقایسه شده است.

جدول ۵- نمونه‌های از آزمون‌های عددی انجام شده و داده‌های به دست آمده

| Q(Lit/s) | d _{50_2} (cm) | d _{50_1} (cm) | نوع چیدمان | H _{dam} (cm) |
|----------|------------------------|------------------------|------------|-----------------------|
| ۱/۱۱۷ | ۸ | ۲ | افقی | ۲۰ |
| ۲/۱۱۳ | ۲ | ۸ | | |
| ۱/۹۶۱ | ۸ | ۲ | عمودی | ۳۲ |
| ۲/۳۷۸ | ۲ | ۸ | | |
| ۱/۹۳۴ | ۶ | ۲ | افقی | ۴۰ |
| ۳/۶۶۶ | ۲ | ۶ | | |
| ۳/۴۲۷ | ۶ | ۲ | عمودی | ۴۰ |
| ۳/۹۲۵ | ۲ | ۶ | | |
| ۲/۶۴۱ | ۶ | ۲ | افقی | ۴۰ |
| ۵/۵۷۷ | ۲ | ۶ | | |
| ۵/۴۶۷ | ۶ | ۲ | عمودی | ۴۰ |
| ۵/۸۲۵ | ۲ | ۶ | | |



شکل ۵- مقایسه نمودار سطح آزاد آب برای چیدمان‌های افقی مختلف



شکل ۶- مقایسه نمودار سطح آزاد آب برای چیدمان‌های عمودی مختلف

لایه اول از سنگدانه‌های درشت‌تر و لایه دوم از سنگدانه‌های ریزتر تشکیل شده است این تغییرات کاملاً برعکس است. به عبارت دیگر در این حالت نمودار سطح آزاد در لایه اول به آرامی و به مقدار کم افت می‌کند زیرا سنگدانه‌های درشت‌تر این لایه مقاومت کمتری در برابر عبور جریان دارند و با رسیدن به لایه دوم به دلیل افزایش مقاومت سنگدانه‌های ریزتر این لایه در برابر جریان، نمودار سطح آزاد آب شدیداً افت می‌کند. این تغییرات در شکل (۶) با خط چین نشان داده شده است. به طور کلی با مقایسه چیدمان‌های مختلف در هر سری از آزمایش‌های

همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود نحوه تغییر نمودار سطح آزاد آب در دو حالت چیدمان عمودی لایه‌ها کاملاً با هم متفاوت است. در حالتی که لایه اول دارای سنگدانه‌های ریزتر است و لایه دوم سنگدانه‌های درشت‌تری دارد نمودار سطح آزاد آب در لایه اول با شیب زیادی شروع به افت می‌کند و وقتی به لایه دوم می‌رسد رفتار آن تغییر کرده و با شیب ملایم‌تری افت می‌کند. این تغییر شیب افت در مرز دو لایه به وضوح دیده می‌شود و سبب شده نمودار سطح آزاد آب در این مرز دارای شکستگی باشد. (نمودار خط کامل در شکل ۶). در حالیکه وقتی

و تغییر قطر سنگدانه‌های این لایه باعث می‌شود درصد تغییر دبی بیشتر باشد.

بررسی حساسیت مدل نسبت به قطر سنگدانه‌ها در سد دولایه با لایه‌های عمودی

همانند آنچه در مورد سد دولایه افقی بحث شد، برای سد دولایه عمودی نیز آنالیز حساسیت انجام شد. ابتدا حساسیت مدل نسبت به قطر سنگدانه‌های لایه‌ای که در سمت بالادست جریان قرار دارد (لایه ۱)، بررسی شد و پس از آن حساسیت مدل نسبت به قطر سنگدانه‌های لایه‌ای که در سمت پایین دست جریان قرار دارد (لایه ۲) مورد بررسی قرار گرفت و میزان دبی خروجی از سد توسط مدل پیش بینی شد. نتایج این بررسی نیز در جدول (۷) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در سد دولایه عمودی ترتیب قرارگیری لایه‌ها تاثیر چندانی در تغییر درصد دبی عبوری از سد ندارد.

جدول ۷- بررسی تغییرات دبی نسبت به تغییرات قطر سنگدانه‌های لایه‌های

| مختلف در سد دولایه عمودی | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| پارامتر متغیر | قطر سنگدانه‌های لایه (۱) | قطر سنگدانه‌های لایه (۲) |
| گام تغییرات (سانتی‌متر) | ۱ | ۱ |
| درصد تغییرات دبی (%) | ۱۱/۷۲ | ۱۲/۰۴ |

نتیجه‌گیری

ساخت سدهای پاره‌سنگی یکی از آسان‌ترین راه‌های کنترل سیلاب است. با توجه به اینکه مصالح مورد نیاز برای ساخت این سدها عموماً از سنگدانه‌های موجود در محل تامین می‌شود از نظر اقتصادی نیز استفاده از این سدها بسیار مقرون به صرفه است. یکی از راه‌های افزایش کارایی این سدها ساخت آن‌ها به صورت چند لایه است. در تحقیق حاضر سدهای دولایه با چیدمان افقی و چیدمان عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج تحقیق مشخص شد در سدهای دولایه هم قطر سنگدانه‌های مصرفی و هم نحوه چیدمان لایه‌ها در میزان دبی جریان بسیار موثر است. به نحوی که هر چه قطر سنگدانه‌های مصرفی کوچک‌تر باشد، دبی عبوری از سد کمتر می‌شود. این وضعیت در مورد هر کدام از لایه‌ها نیز تک به تک صادق است. یعنی با ثابت نگه داشتن قطر متوسط سنگدانه‌های یک لایه و افزایش قطر متوسط سنگدانه‌های لایه دیگر دبی عبوری از سد افزایش می‌یابد. علاوه بر آن در سد دولایه با لایه‌های افقی، لایه پایینی به دلیل اینکه نسبت به لایه بالایی بخش بیشتری از عبور جریان را در خود جای می‌دهد، تاثیر بیشتری روی جریان دارد. بطوری‌که وقتی لایه با دانه‌بندی ریزتر در پایین قرار می‌گیرد نسبت به حالتی که لایه

انجام شده (همانطور که در جدول (۵) نیز مشاهده می‌شود) چیدمان افقی وقتی که لایه ریزتر در پایین قرار می‌گیرد، کمترین دبی عبوری از سد را به دست می‌دهد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، به منظور افزایش کارایی سدهای پاره‌سنگی و تاثیر هر چه بیشتر آن در کاهش دبی سیلاب، می‌توان با بهره‌گیری صحیح از مصالح محل، سد پاره‌سنگی را دو لایه ساخت که در آن مصالح ریزدانه در پایین و مصالح درشت‌تر در بالا قرار داشته باشند. این چیدمان از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است و اگر مصالح ریزدانه برای ساخت سد همگن به اندازه کافی در اختیار نباشد نیازی به صرف هزینه اضافی و تهیه مصالح از محل دیگر نیست بلکه می‌توان با ساخت لایه ریزدانه با ضخامت کمتری و با استفاده از این چیدمان دبی عبوری از سد را کاهش داد از طرف دیگر با قرار دادن مصالح درشت‌دانه در لایه بالاتر می‌توان ارتفاع مورد نیاز برای سد را تامین کرد.

آنالیز حساسیت

در سدهای سنگریزه‌ای پارامترهای مختلف در میزان دبی موثر هستند. در این میان محققان نشان داده اند اندازه سنگدانه‌ها بیش از دیگر پارامترها اثرگذار است (سامانی و همکاران ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴). از این رو در این قسمت حساسیت مدل نسبت به قطر سنگدانه‌های لایه‌های مختلف در سد دولایه بررسی می‌شود.

بررسی حساسیت مدل نسبت به قطر سنگدانه‌ها در سد دولایه با لایه‌های افقی

در این قسمت برای بررسی حساسیت مدل نسبت به قطر سنگدانه‌های هر لایه ابتدا متوسط قطر سنگدانه‌های لایه بالایی از ۱ سانتی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر - یک سانتی‌متر به یک سانتی‌متر - تغییر داده شده است و با ثابت بودن قطر سنگدانه‌های لایه پایینی، دبی عبوری از سد ارزیابی شده است. در مرحله بعد قطر سنگدانه‌های لایه پایینی تغییر داده شده و قطر سنگدانه‌های لایه بالایی ثابت نگه داشته شده است. در جدول (۶) درصد تغییرات دبی به ازای تغییر قطر سنگدانه‌ها آورده شده است.

جدول ۶- بررسی تغییرات دبی نسبت به تغییرات قطر سنگدانه‌های لایه‌های

| مختلف در سد دولایه با لایه‌های افقی | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| پارامتر متغیر | قطر سنگدانه‌های لایه پایینی | قطر سنگدانه‌های لایه بالایی |
| گام تغییرات (سانتی‌متر) | ۱ | ۱ |
| درصد تغییرات دبی (%) | ۹/۹۶ | ۴/۵۲ |

با توجه به اینکه آب عبوری از سد از قسمت عمده‌ای از لایه پایینی را عبور می‌کند، این لایه تاثیر بیشتری روی دبی دارد

هر لایه انجام شد و مشخص شد به ازای هر یک سانتی‌متر تغییر در قطر سنگدانه‌های لایه‌ای که در سمت بالادست جریان قرار دارد دبی عبوری به طور میانگین ۱۱/۷۲ درصد تغییر می‌کند و این تغییر برای سنگدانه‌های لایه‌ای که در سمت پایین دست جریان قرار دارد برابر با ۱۲/۰۴ درصد است. با توجه به نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش کارایی سدهای پاره-سنگی دولایه در کاهش بیشتر دبی سیلاب و همچنین صرف هزینه کمتر در تامین مصالح، این سدها با چیدمان افقی که در آن سنگدانه‌های ریزتر در لایه پایین- با ارتفاع کمتری نسبت به سدهای همگن ریزدانه- و سنگدانه‌های درشت‌تر در لایه بالایی قرار دارند ساخته شوند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ferdos, F. and Dargahi, B., (2016a). "A study of turbulent flow in largescale porous media at high Reynolds numbers". Part I: numerical validation. *Journal of Hydraulics Research*, 54, pp.663–677.
- Ferdos, F. and Dargahi, B. (2016b). "A study of turbulent flow in largescale porous media at high Reynolds numbers". Part II: flow physics. *Journal of Hydraulics Research*, 54, pp.678–691.
- Forchheimer, P. H. (1901). "Wasserbewegung durch Boden" *Zeitschrift des vereinst Deutscher Ingenieure*. 49, pp.1736 – 1749 and 50, pp.1781 – 1788
- Hiller, PH., Aberle, J. and Lia, L. (2018). "Displacements as failure origin of placed riprap on steep slopes". *Journal of Hydraulics Research*, 56(2), pp. 141– 155.
- Houben, G.J., Wachenhausen, J. and Morel, C.R.G. (2018). "Effects of ageing on the hydraulics of water wells and the influence of non-Darcy flow". *Hydrogeology Journal*. 26(4), pp. 1285–1294 .
- Li, Z., Wan, J., Huang, K., Chang, W. and He, Y. (2017). "Effects of particle diameter on flow characteristics in sand columns". *International Journal of Heat Mass Transfer*. 104, pp. 533–536
- Li, Z., Wan, J., Zhan, H., Cheng, X., Chang, W. and Huang, K. (2019). "Particle size distribution on Forchheimer flow and transition of flow regimes in porous media". *Journal of Hydrology*. 574, pp. 1–11 .
- 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.
- 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.
- Samani, J. M. V., Moknatian, M. and Heidari, M. (2013). "Two-dimensional multi-rockfill detention dam flow model in reservoir routing" *Engineering and Computational Mechanics 166(EM2)*, pp. 59-67.
- Shayannejad, M. and Ashjzadeh, 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.
- Stephenson, D. (1979). "Rockfill in Hydraulic Engineering" *Elsevier Scientific, Amsterdam*.
- Wang, L., Li, Y., Zhao, G., Chen, N. and Xu, Y. (2019). "Experimental investigation of flow characteristics in porous media at low Reynolds numbers ($Re \rightarrow 0$) under different constant hydraulic heads". *Water* 11(11), 2317.
- Wilkins, J. (1956). "Flow of water through rockfill and its application to the design of dams" Paper presented at the 2nd Australia New Zealand Conference on soil Mechanics And Foundation Engineering, Christchurch, New Zealand.

درشت‌تر در پایین است مقدار دبی عبوری از سد کاهش می‌یابد. علاوه بر آن با انجام آنالیز حساسیت مشخص شد تغییر در پارامترهای لایه پایین تاثیر بیشتری بر دبی عبوری از سد می‌گذارد. به طوری که به ازای هر یک سانتی‌متر تغییر در قطر سنگدانه‌های لایه پایین، دبی جریان به طور متوسط ۹/۹۶ درصد تغییر می‌کرد در حالی که این تغییر برای قطر سنگدانه‌های لایه بالایی تنها ۴/۵۲ درصد بود. اما نحوه تغییرات نمودار سطح آزاد آب رفتاری متفاوت را نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر در مورد نمودار سطح آزاد اگر لایه بالایی ریزتر باشد افت بیشتر می‌شود. اما در سد دولایه با لایه‌های عمودی ترتیب لایه‌های ریز و درشت تاثیر چندانی در میزان دبی عبوری از سد ندارد. در سد دولایه با لایه‌های عمودی نیز آنالیز حساسیت نسبت به قطر سنگدانه‌های