



Investigation of seepage, uplift forces and hydraulic gradient under hydraulic structures with different configurations of dual-cutoff walls

F. Salmasi*, B. Nourani, R. Norouzi

University of Tabriz, Department of Water Engineering, Tabriz, Iran

ABSTRACT: In the design of hydraulic structures, cutoff walls are needed for the reduction of uplift force and exit hydraulic gradient. The upstream cutoff wall is used for the reduction of the uplift force and the downstream cutoff wall is used for the reduction of the exit hydraulic gradient. This study tends to numerically investigate the double-cutoff beneath the hydraulic structures with variation in their location, distance and depth. Governing equations with boundary conditions are solved using the finite element method (FEM). Results showed that if the downstream cutoff wall is deeper than the upstream cutoff wall, the resultant uplift force would be more than the uplift force without cutoff walls. With a constant value for hydraulic structures width (B), decreasing in the distance between two cutoffs (L), results in the reduction in uplift force. Increasing in impermeable depth (D) and reduction in B, yields lower uplift force. Increasing in downstream cutoff depth (d_2) and L, results in reduction in exit hydraulic gradient (GR). When the two cutoffs are located in the end of the hydraulic structure, GR is lower than that when the downstream cutoff is located in $L/B=0.33$ and $L/B=0.66$ from the upstream cutoff. Comparison between the available analytical solutions for two equal ending cutoffs with FEM, showed that FEM could predict PC and GR with a maximum 5% error.

Review History:

Received: Apr.15, 2021

Revised: Jul.12, 2021

Accepted: Aug.06, 2021

Available Online: Aug.14, 2021

Keywords:

Cutoff wall

uplift force

exit hydraulic gradient

hydraulic structures

finite element.

1- Introduction

If the piping phenomenon or scouring under the foundation is not stopped, it may lead to the collapse of the structure. Although the construction of a cutoff wall is one of the methods to reduce seepage from under earth dams, but the study of its effect on the position of the phreatic line and the amount of seepage discharge is of particular importance. Because the phreatic line is the boundary separating the saturated and unsaturated zone and determining its position is important in the stability of earth dams. The use of cutoff walls is one of the most common methods to deal with seepage in water storage structures such as dams, reservoirs, embankments and irrigation canals [1]. Nourani et al. [2] investigated the performance of foundation drains in reducing the uplift force in gravity dams. The results showed that increasing the drain diameter has little effect compared to other parameters in reducing the uplift force. The effect of relief well downstream of the earth dam on the reduction of uplift pressure was investigated by Salmasi et al. [3]. In that study, the depth of wells, their distance and diameter were considered variable and diagrams were provided for the design of such wells. Salmasi et al. [4] investigated the effect of inclined clay core on the earthen dam stability by LEM and FEM methods. The results showed that the stability of the upstream slope of the earth dam with an inclined clay core is higher than the vertical

clay core. A review of past researches has shown that most previous studies have been related to one cutoff wall under the structure and the effect of two cutoff walls of the structure has been done simultaneously at a limited level. Usually, in the design of hydraulic structures, two cutoff walls are required. The upstream cutoff wall is used to reduce seepage flow and uplift force, while the downstream cutoff wall is used to reduce the exit hydraulic gradient (piping phenomenon). Therefore, in the present study, the effect of the placement of the dual cutoff wall on the hydraulic structures in terms of position, distance and also the depth of their application in the amount of uplift force, seepage discharge from the structure and exit hydraulic gradient is investigated.

2- Methodology

In this study, SEEP/W software, which solves the differential equations along with boundary conditions using the finite element method (FEM), has been used for modeling flow in a porous medium. In order to investigate the effect of dual cutoff walls on the uplift force distribution, the resultant uplift force, exit hydraulic gradient and seepage discharge from hydraulic structures, 330 numerical models were simulated. The range of important parameters in this study is presented in Table 1.

In Table 1, d_1 is the upstream cutoff depth, d_2 is the

*Corresponding author's email: Salmasi@tabrizu.ac.ir



Table 1. Dimensionless parameter values in this study

Dimensionless parameters	Values					
(B/D)	0.7	0.9	1.25	1.5	1.75	2
(B/d ₂)	4	6	8	10	15	20
(L/B)	0.33	0.66	1	-	-	-
(d ₂ /d ₁)	0.66	1	2	-	-	-

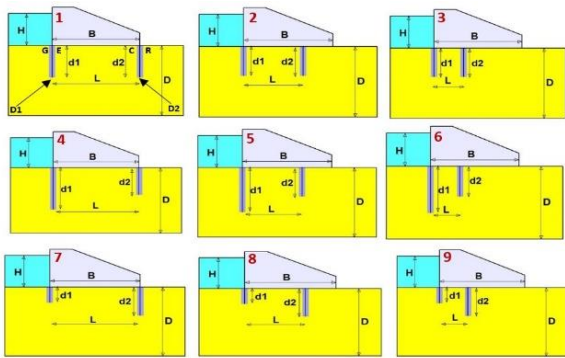


Fig. 1. Illustrations of different configurations of double cutoff walls under the hydraulic structure

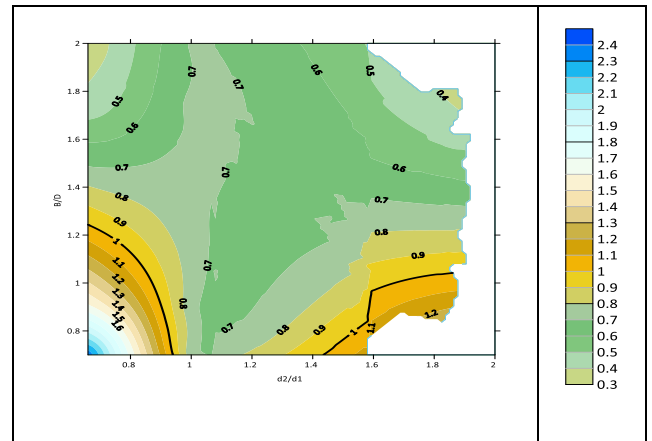


Fig. 2. Contours of U/U_o as a function of d_2/d_1 and B/D

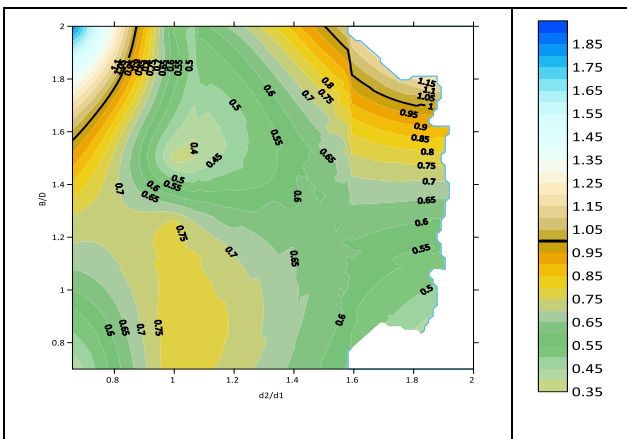


Fig. 3. Contours of GR/G_{Ro} as a function of d_2/d_1 and B/D_m

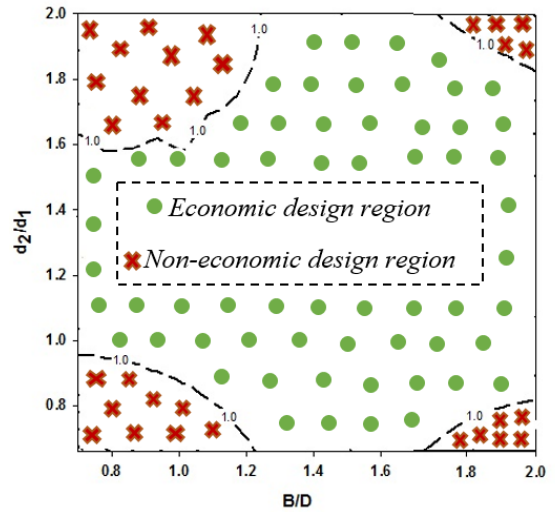


Fig. 4. The intersection of two Figures 2 and 3 to determine suitable and unsuitable areas for the design of two cutoff walls

downstream cutoff depth, L is the distance between the two cutoffs, D is the depth of permeable foundation, and B is the width of the apron. Figure 1 shows the position and location of cutoffs and the geometric parameters in the present study.

3- Results and discussion

Figure 2 shows the relative uplift force contours (U/U_0) against d_2/d_1 and B/D changes. Relative uplift force contours are highlighted to indicate the boundary between economic and non-economic design. This means that for a relative uplift force of less than one ($U/U_0 < 1$), the relative uplift force is reduced and therefore offers a cost-effective design. Figure 3 provides the exit hydraulic gradient (G_R/G_{RO}) against d_2/d_1 and B/D variations. In this case, for a relative hydraulic gradient of less than one ($G_R/G_{RO} < 1$), the relative hydraulic gradient decreases and therefore presents an economic plan. The intersection of Figures 2 and 3 refers the suitable and unsuitable ranges for the design of two cutoff walls (Figure

4- Conclusions

To the best knowledge of the authors, the effect of the combination of two cutoff walls under a hydraulic structure has not been fully studied until now. Most prior research comprises a single cutoff wall. Some existing studies have considered the two cutoff walls with equal depth and with fixed locations, one in the upstream portion and the other in the downstream region of a hydraulic structure. The present study has investigated the simultaneous effects of two cutoff walls under a hydraulic structure and their combined influence on uplift force (U) and exit hydraulic gradient (G_R). The main outcomes of the present study are summarized below:

-A comparison between the results of the analytical method presented by Jane and Reddy [5] and the numerical model of finite elements method (FEM) showed that the numerical method with an error of less than 5% could estimate the pore water pressure at the end of the structure and the exit hydraulic gradient.

-If the downstream cutoff wall is deeper than the upstream cutoff wall, it will increase the uplift force compared to the without cutoff wall state.

- For a fixed width for the structure, the uplift force decreases as the distance between the two cutoff walls decreases.

- By increasing the distance between the two cutoff walls and increasing the depth of the end cutoff wall, the exit hydraulic gradient decreases.

- By increasing the depth of the cutoff wall in downstream, the amount of seepage discharge through the structure decreases.

References

- [1] R. Norouzi, F. Salmasi, H. Arvanaghi, "Uplift pressure and hydraulic gradient in Sabalan Dam", *Applied Water Science*, 10, 111 (2020), 1-12, <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01195-2>
- [2] B. Nourani, F. Salmasi, A. Abbaspour, B. Oghati Bakhshayesh, "Numerical Investigation of the Optimum Location for Vertical Drains in Gravity Dams", *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, (2), (2017), 799-808.
- [3] F. Salmasi, B. Nourani, J. Abraham, R. Norouzi, "Numerical investigation of relief well performance for decreasing uplift pressure under embankment dams", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 2819-2830 (2021), <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03030-2>
- [4] F. Salmasi, R. Norouzi, J. Abraham, B. Nourani, S. Samadi, "Effect of Inclined Clay Core on Embankment Dam Seepage and Stability Through LEM and FEM", *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(6) (2020) 6571-6586, <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01455-7>
- [5] A.K. Jain, L.N. Reddi, "Finite depth seepage below flat aprons with equal end cutoffs", *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12) (2011) 1659-1667

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Salmasi, B. Nourani, R. Norouzi, *Investigation of seepage, uplift forces and hydraulic gradient under hydraulic structures with different configurations of dual-cutoff walls*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(4) (2022) 325-328.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19864.7274





بررسی نشت، نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی در زیر سازه های هیدرولیکی با ترکیب بندی مختلفی از دیوارهای آب بند دوگانه

فرزین سلماسی*، بهرام نورانی، رضا نوروزی

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

کلمات کلیدی:

دیوار آب بند

نیروی بالابرنده

گرادیان هیدرولیکی خروجی

سازه هیدرولیکی

المان محدود

خلاصه: در طراحی سازه های هیدرولیکی از دیوارهای آب بند، برای کنترل نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی استفاده می شود. در این تحقیق نحوه قرارگیری دیوار آب بند دوگانه در زیر سازه های هیدرولیکی از لحاظ موقعیت، فاصله و همچنین عمق کارگذاری آن ها به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. حل معادلات حاکم به همراه شرایط مرزی، به روش المان های محدود (FEM) انجام گرفت. نتایج نشان داد که اگر دیوار آب بند پایین دست از دیوار آب بند بالادست عمیق تر باشد، باعث افزایش برآیند نیروی بالابرنده نسبت به حالت بدون دیوار آب بند خواهد شد. به ازای یک عرض ثابت برای سازه، با کاهش فاصله دو دیوار آب بند نسبت به هم، نیروی بالابرنده (U) کاهش پیدا می کند. هر چه عرض سازه کمتر و یا عمق پی نفوذپذیر بیشتر باشد، نیروی بالابرنده کمتر خواهد بود. با افزایش فاصله دو دیوار آب بند نسبت به هم و افزایش عمق دیوار آب بند انتهایی، گرادیان هیدرولیکی خروجی (G_R) کاهش می یابد. مقدار G_R هنگامی که دو دیوار آب بند در ابتدا و انتهای سازه قرار داشته باشند، نسبت به حالتی که دیوار آب بند انتهایی در موقعیت $L/B = 0/33$ و $L/B = 0/66$ نسبت به دیوار آب بند ابتدایی باشد، کمتر خواهد شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج ارائه شده در تحقیقات قبلی برای یک شرایط یکسان نشان داد که حداکثر خطا در مدل عددی جهت برآورد فشار آب منفذی در انتهای سازه (Pc) و گرادیان هیدرولیکی خروجی (G_R) کمتر از ۰/۵٪ می باشد.

۱- مقدمه

فروپاشی سازه را در پی داشته باشد. بررسی موقعیت خط نشت آزاد^۲ و مقدار دبی نشتی در سدهای خاکی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به دلیل اینکه خط نشت آزاد، مرز جدا کننده منطقه اشباع و غیراشباع است و تعیین موقعیت آن در پایداری سدهای خاکی اهمیت دارد. استفاده از دیوارهای آب بند یکی از معمول ترین روش ها برای مقابله با نشت در سازه های ذخیره آب همچون سدها (خاکی و بتنی)، مخازن، بندها، خاک ریزها و کانال های آبیاری می باشند. دیوارهای آب بند همچنین برای اطمینان از استحکام سازه در مقابل پدیده جوشش ماسه و زیرشویی پی (پایپینگ) استفاده می شوند [۳]. سدهای بتنی نمونه ای از سدهای وزنی می باشند که مواد تشکیل دهنده آن ها از بتن است. امروزه با کمک روش های جدید تهیه بتن، بیشتر سدهای وزنی از بتن ساخته می شوند. عاملی که سبب مقاومت این دسته از سدها در مقابل نیروهای وارده به بدنه و پی آن ها است، وزن خود سد است. به عبارتی تعادل ایستایی این سدها به وزن آن ها بستگی دارد [۲]. در سدهای بتنی وزنی، نیروی بالابرنده جزو نیروهای مخرب و کاهش دهنده پایداری سد

سدهای وزنی به دلیل طراحی و اجرای نسبتاً ساده در مقایسه با انواع دیگر سدهای بتنی مورد توجه قرار گرفته اند. همچنین اجرای این نوع سدها نسبت به سایر سدهای بتنی اقتصادی تر است. این سدها در مناطق دره های تنگ یا دره هایی با شیب تند که امکان لغزش سدهای خاکی وجود دارد، جایگزین مناسبی محسوب می شوند [۱]. ساخت سد وزنی از سد خاکی پرهزینه تر است، اما در صورتی که مصالح کافی و مناسبی برای ساخت سد خاکی وجود نداشته باشد، سد وزنی گزینه مناسبی خواهد بود. این نوع سد در پی های محکم با هر ارتفاعی قابل اجرا بوده و به طور کلی نسبت به سدهای خاکی ایمن تر و پایدارتر است [۲]. یک سد وزنی در مقابل فشار آب و دیگر نیروها، توسط وزن خود مقاومت می کند. بنابراین پایداری سد وزنی بستگی به وزن آن دارد.

اگر پدیده پایپینگ^۱ یا آب شستگی زیر پی متوقف نشود، ممکن است

1 Piping phenomenon

2 Phreatic line

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Salmasi@tabrizu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



در پاشنه هسته است. سلماسی و همکاران [۱۱] به بررسی اثر هسته رسی مایل بر پایداری سد خاکی با روش‌های LEM و FEM پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که پایداری شیب بالادست سد خاکی با هسته رسی مایل بیشتر از هسته رسی قائم است. سلماسی و همکاران [۱۲] عملکرد چاه‌های فشارشکن برای کاهش نیروی بالابرنده در زیر سدهای خاکی را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که کاهش فاصله بین چاه‌های فشارشکن یا افزایش قطر چاه‌ها منجر به کاهش نیروی بالابرنده می‌شود. سپس نتایج به دست آمده توسط شبیه‌سازی‌های عددی متنوع، منجر به ارائه معادلات غیرخطی رگرسیونی برای برآورد دقیق نیروی بالابرنده شد.

بررسی تحقیقات انجام گرفته در گذشته نشان داده که اکثر مطالعات قبلی مربوط به یک دیوار آب‌بند در زیر سازه بوده است و تأثیر دو دیوار آب‌بند زیر سازه به طور هم‌زمان در سطح محدود انجام گرفته است. معمولاً در طراحی سازه‌های هیدرولیکی نیاز به دو دیواره آب‌بند است. دیوار آب‌بند بالادست جهت کاهش دبی نشتی و نیروی بالابرنده به کار می‌رود در حالی که دیواره آب‌بند پایین‌دست برای کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی (و عدم ایجاد پدیده جوشش ماسه) مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا در تحقیق حاضر تأثیر نحوه قرارگیری دیوار آب‌بند دوگانه در زیر سازه‌های هیدرولیکی از لحاظ موقعیت، فاصله و همچنین عمق کارگذاری آن‌ها در مقدار نیروی بالابرنده، جریان نشتی از زیر سازه و گرادیان هیدرولیکی خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار از روش عددی المان محدود استفاده گردید و برای صحت‌سنجی آن نیز از نتایج ارائه شده توسط محققان قبلی برای شرایط معین و یکسان بهره برده شد.

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

معادلات حاکم: معادله عمومی جریان در محیط‌های متخلخل همان معادله پیوستگی است که در تلفیق با رابطه دارسی برای دبی عبوری از یک محیط متخلخل به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن h بار آبی کل (L)، ρ چگالی سیال (M/L^3)، محتوای حجمی آب (L^3/L^3)، t زمان (T) و K ضریب هدایت هیدرولیکی محیط

است. یکی از روش‌هایی که برای بررسی نیروی بالابرنده در زیر سد استفاده می‌شود، رسم شبکه جریان است. شبکه جریان متشکل از خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل است. از آنجایی که رسم شبکه جریان، تقریبی و کم‌دقت است، در حال حاضر از روش‌های حل عددی استفاده می‌گردد [۴].

یوسفی و همکاران [۵]، به بررسی اثر موقعیت بهینه دیوار آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهترین مکان برای کنترل نشت و زیرشویی، به ترتیب در پاشنه و پنجه سد است.

آقاجانی و همکاران [۶] به بررسی موقعیت بهینه دیوار آب‌بند در سد خاکی با هسته شیب‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که چنانچه دیوار آب‌بند به کف با نفوذپذیری کم متصل نباشد، تأثیر موقعیت‌های مختلف دیوار آب‌بند بر میزان نشت ناچیز خواهد بود. اگر دیوار آب‌بند در پاشنه سد ساخته شود، کمترین میزان نشت اتفاق می‌افتد. زمانی که عمق دیوار آب‌بند برابر عمق نفوذپذیر پی باشد، میزان نشت از زیر سازه به طور کامل به موقعیت دیوار آب‌بند بستگی خواهد داشت. احتمالاً نویسندگان در کار تحقیقی خود، اشاره به نشت جزئی از محل اتصال به سنگ کف، یا نشت جزئی از خود دیوار آب‌بند و یا آب‌بند نبودن سد در صدی سنگ کف داشته‌اند.

نورانی و همکاران [۷] عملکرد زهکش‌های پی در کاهش نیروی بالابرنده در سدهای بتنی وزنی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش قطر زهکش تأثیر کمی نسبت به سایر پارامترها در کاهش نیروی بالابرنده دارد. به عبارت دیگر، انتخاب قطر زهکش‌ها تابع ملاحظات اجرایی است؛ اما کاهش فاصله زهکش‌ها از هم و کاهش فاصله از بالادست سد تا یک حد معینی می‌تواند نقش بسزایی در کاهش نیروی بالابرنده داشته باشد. سلماسی و نوری [۸] اثر پتوی رسی در بالادست سد خاکی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با تغییر دادن ضخامت، طول پتوی رسی و نفوذپذیری آن، مقدار دبی نشت از زیر پی سد را به دست آوردند. اثر چاهک‌های فشارشکن در پایین‌دست سد خاکی بر تقلیل نیروی بالابرنده توسط سلماسی و همکاران [۹] بررسی شد. در آن تحقیق، عمق چاهک‌ها، فاصله و قطر آن‌ها متغیر در نظر گرفته شد و نمودارهایی برای طراحی این‌گونه چاهک‌ها ارائه گردید. نوروزی و همکاران [۱۰] تأثیر دیوار آب‌بند بر گرادیان هیدرولیکی و نشت در سد سنگریزه‌ای سیلان را بررسی کردند. تغییر در موقعیت دیوار آب‌بند سد برای دستیابی به حداقل گرادیان هیدرولیکی نشان داد که محل بهینه به لحاظ حداقل گرادیان هیدرولیکی، پنجه هسته و به لحاظ کاهش دبی نشتی

- 1 Flow net
- 2 Cutoff wall

جدول ۱. محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی در تحقیق حاضر

Table 1. Dimensionless parameter values in this study

پارامترهای مورد بررسی	مقادیر پارامترهای مورد بررسی در مدل عددی					
نسبت عرض سازه به عمق پی سازه (B/D)	۰/۷	۰/۹	۱/۲۵	۱/۵۰	۱/۷۵	۲/۰
نسبت عرض سازه به عمق دیوار آببند انتهایی (B/d ₂)	۴	۶	۸	۱۰	۱۵	۲۰
نسبت فاصله دیوارهای آببند به عرض سازه (L/B)	۰/۳۳	۰/۶۶	۱	-	-	-
نسبت عمق دیوارهای آببند پایین دست به بالادست (d ₂ /d ₁)	۰/۶۶	۱	۲	-	-	-

۲-۲- تعیین هدایت هیدرولیکی و اعمال شرایط مرزی

برای انجام شبیه‌سازی عددی و بررسی اثر دیوارهای آببند دوگانه بر خصوصیات جریان نشستی از زیر سازه‌های هیدرولیکی، یک محیط متخلخل به صورت همگن^۱ و ایزوتروپ^۲ با ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع^۳ برابر با $10^{-5} \times 1$ متر در ثانیه در نظر گرفته شد. هدایت هیدرولیکی برای دیوارهای آببند در زیر سازه صفر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مربوط به تراز آب در بالادست و پایین دست سازه هیدرولیکی به صورت بار آبی ثابت به ترتیب برابر ۳۰ و صفر متر و مرزهای مربوط به کف سازه هیدرولیکی و هم‌چنین کف و دیواره محیط متخلخل زیر سازه هیدرولیکی به صورت جسم صلب (غیرقابل نفوذ^۴) در نظر گرفته شده است.

در تحقیق حاضر برای جلوگیری از تأثیر اندازه شبکه‌ها در حل معادلات حاکم، آزمون مستقل از شبکه (آنالیز حساسیت شبکه) صورت گرفت (شکل ۲) و تعداد شبکه مناسب انتخاب شد. در این شبیه‌سازی، تعداد شبکه مناسب در حدود ۱۵۰۰۰ به دست آمد (تعداد المان در هر متر مربع حدود ۱۱ عدد منظور شده است). شکل ۳ نحوه اعمال شرایط مرزی و نحوه شبکه‌بندی در پی سازه هیدرولیکی در شرایطی که نسبت عرض سازه (B) به عمق دیوارهای آببند (d₁ و d₂) برابر با ۴ باشد (B/d₁ = ۴) را نشان می‌دهد. ضمناً شکل ۳ برای حالت (d₂=d₁) صادق است.

متخلخل در جهت محور X، Y، Z (L/T) می‌باشند. در محیط‌های اشباع جریان ماندگار، میزان تغییرات آب موجود در واحد حجم خاک نسبت به زمان صفر است. همچنین در محیط‌های همگن و دارای خواص یکنواخت، ضریب نفوذپذیری در همه جهتها یکسان بوده (خاک ایزوتروپ) و در این صورت رابطه (۱) به رابطه (۲) تبدیل می‌شود که به معادله لاپلاس مشهور است:

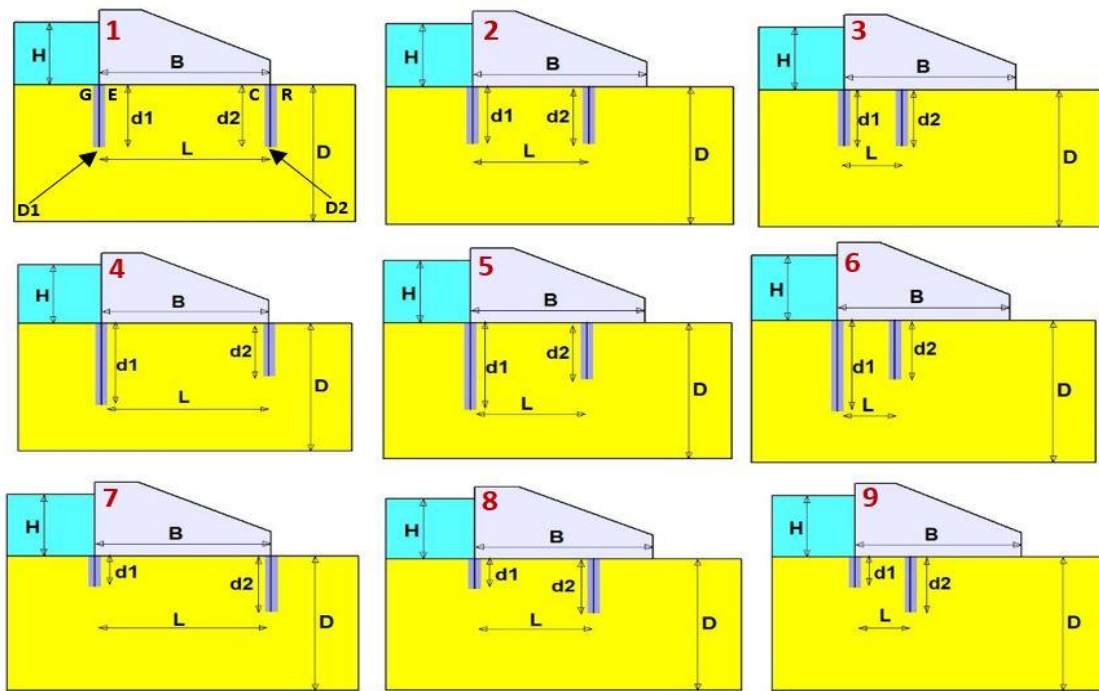
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

در این تحقیق برای حل معادله حاکم بر جریان در محیط متخلخل با توجه به شرایط مرزی مربوط به مسئله، از نرم‌افزار SEEP/W که به روش المان محدود (FEM) به حل مسائل می‌پردازد، استفاده شده است.

۲-۱- هندسه و ابعاد مدل

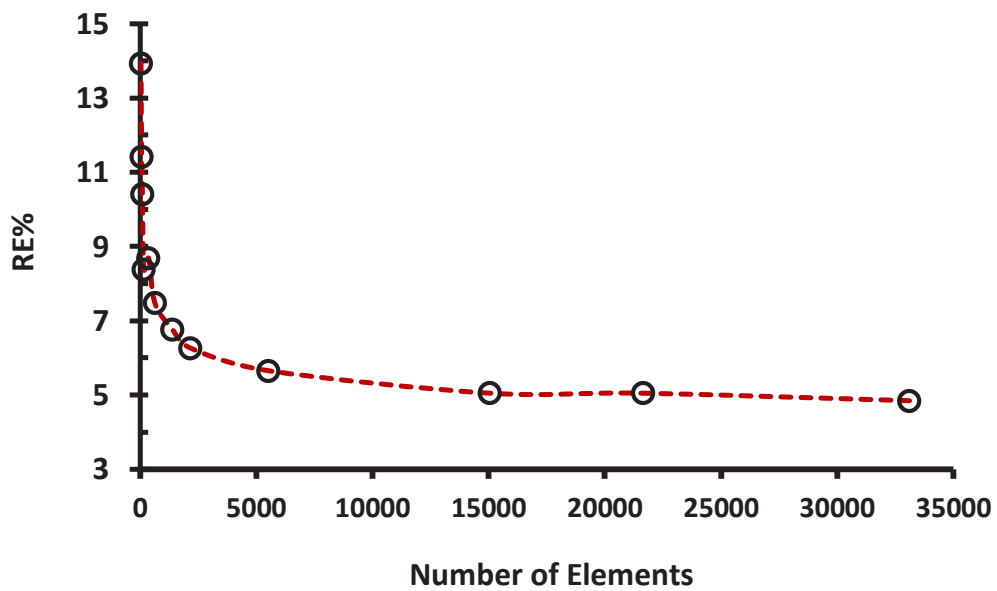
به منظور بررسی اثر دیوارهای آببند دوگانه بر توزیع نیروی بالابرنده، برآیند نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و دبی نشستی از زیر سازه‌های هیدرولیکی، برای تعداد ۳۳۰ مدل (تعداد ۳۲۴ مدل عددی در شرایط وجود دیوار آببند و ۶ مدل در حالت بدون دیوار آببند) شبیه‌سازی عددی انجام گرفت. محدوده پارامترهای مهم در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است در این تحقیق عمق پی (D) و بار آبی بالادست (H) به ترتیب ۱۵ و ۳۰ متر در کلیه مدل‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ موقعیت، نحوه قرارگیری و پارامترهای مورد مطالعه در تحقیق حاضر، نشان داده شده است.

- 1 Homogenous
- 2 Isotropic
- 3 Hydraulic conductivity
- 4 Impenetrable



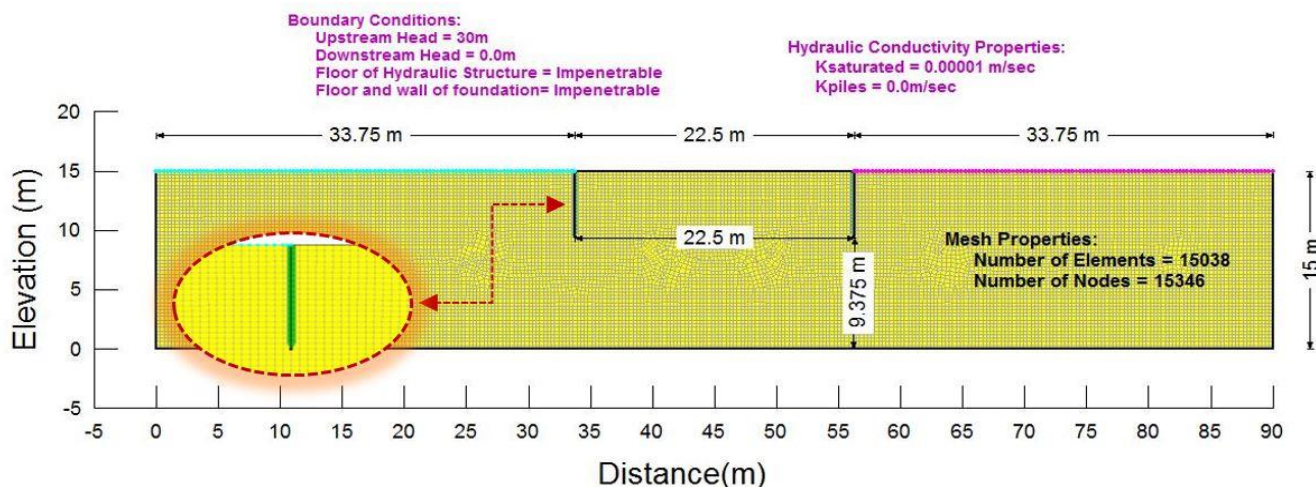
شکل ۱. نحوه قرارگیری دیوارهای آببند دوگانه در زیر سازه هیدرولیکی به همراه پارامترهای مورد بررسی

Fig. 1. Illustrations of different configurations of double cutoff walls under the hydraulic structure



شکل ۲. آزمون مستقل از شبکه بندی برای تحقیق حاضر

Fig. 2. The RE% for different number of elements



شکل ۳. اختصاص هدایت هیدرولیکی و شرایط مرزی به محیط متخلخل زیر سازه هیدرولیکی به همراه دیوار آببند دوگانه و نحوه شبکه‌بندی محیط برای شرایط $(L/B=1, B/d_2=4, d_2/d_1=1)$

Fig. 3. Boundary conditions for numerical simulation with $L/B=1, B/d_2=4$ and $d_2/d_1=1$.

شکل ۳- نتایج و بحث

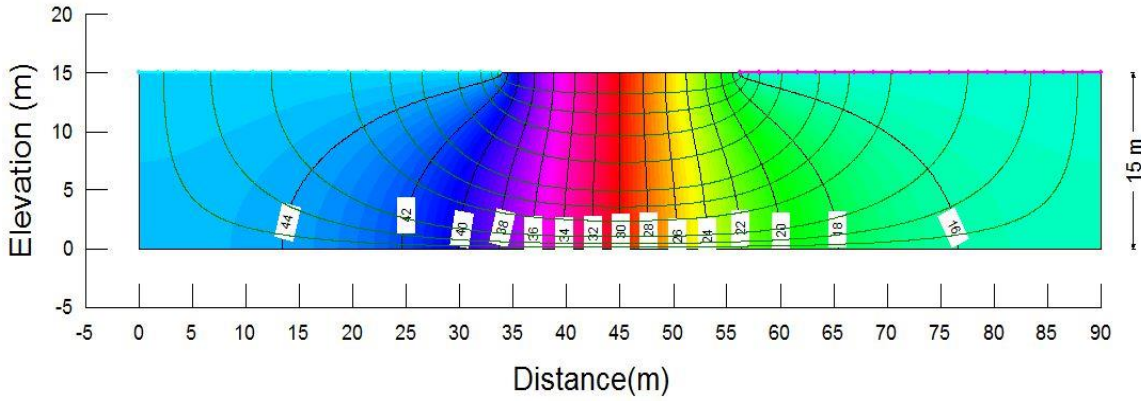
در شکل ۴ شبکه جریان متشکل از خطوط هم‌پتانسیل^۱ و خطوط جریان^۲ را

در حالت نمای دو بعدی در زیر سازه هیدرولیکی در شرایط بدون دیوار آببند و وجود دو دیوار آببند در شرایطی که $d_2/d_1 = 0.66, 1, 2$ باشد را نشان می‌دهد (در شرایط بدون دیوار آببند خطوط هم‌پتانسیل از معادله هذلولی^۳ و خطوط جریان از معادله بیضی^۴ پیروی می‌کنند). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با کارگذاری دیوارهای آببند خطوط جریان عبوری از زیر کف سازه هیدرولیکی فاصله گرفته و این نشان دهنده کارایی بهتر دیواره آببند دیوار آببند در پایین‌تر انداختن خطوط جریان زیر سازه هیدرولیکی و به تبع آن کاهش میزان نیروی بالابرنده وارد بر کف سازه هیدرولیکی و افزایش پایداری سازه هیدرولیکی است. به عبارت دیگر خطوط جریان، دیوار آببند را دور می‌زنند.

در شکل ۵ نحوه حرکت بردارهای جریان در اطراف دیوارهای آببند دوگانه هم عمق $(d_2/d_1 = 1)$ نشان داده شده است. مقدار جریان عبوری از زیر سازه هیدرولیکی و حداکثر سرعت هیدرولیکی برای حالت $(d_2/d_1 = 1)$

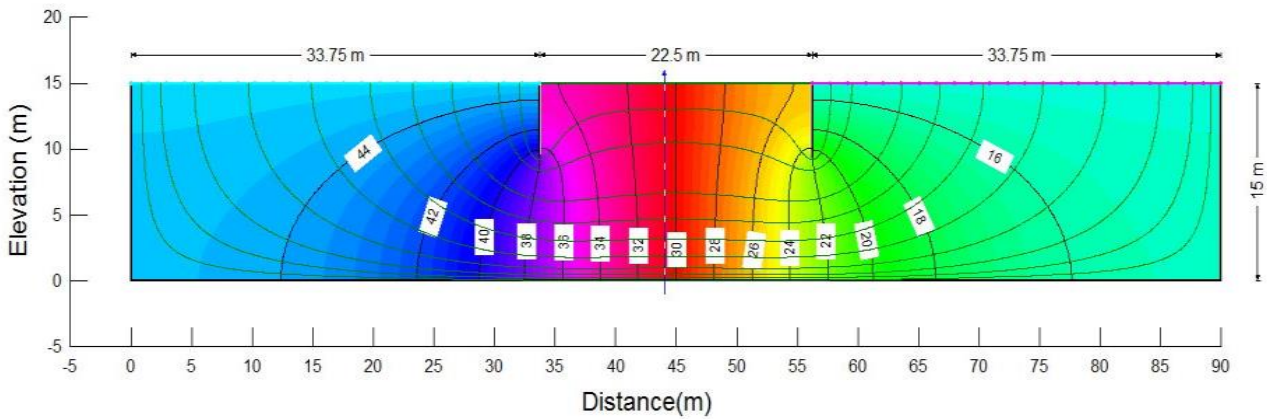
در شکل ۶ تغییرات بار آبی در زیر سازه هیدرولیکی در حالت با دیوار آببند و بدون دیوار آببند نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نحوه توزیع بار آبی در زیر سازه هیدرولیکی در حالت با دیواره آببند دوگانه نسبت به حالت بدون دیوار آببند تغییر پیدا کرده است. این فرایند باعث تغییراتی در مقدار نیروی بالابرنده و پایداری سازه می‌شود. بدین صورت که مقادیر بار آبی در حالت وجود دیوار آببند نسبت به حالت بدون دیوار آببند در قسمت‌های بالادست سازه کاهش و در قسمت پایین‌دست سازه هیدرولیکی افزایش پیدا کرده است. در شرایطی که عمق دیوار آببند بالادست بیشتر از عمق دیوار آببند پایین‌دست باشد، نسبت به سایر حالت‌ها تأثیر بیشتری در کاهش بار آبی در نقاط مختلف زیر سازه داشته است و این نشان می‌دهد که برای کاهش نیروی بالابرنده بهتر است عمق دیوار آببند بالادست نسبت به عمق دیوار آببند پایین‌دست باشد. بنابراین در صورتی که هدف از کارگذاری دیوار آببند، کاهش نیروی بالابرنده باشد، بیشتر بودن عمق دیوار آببند پایین‌دست نسبت به بالادست توصیه نمی‌گردد.

- 1 Equipotential line
- 2 Flow line
- 3 Hyperbolas
- 4 Ellipse



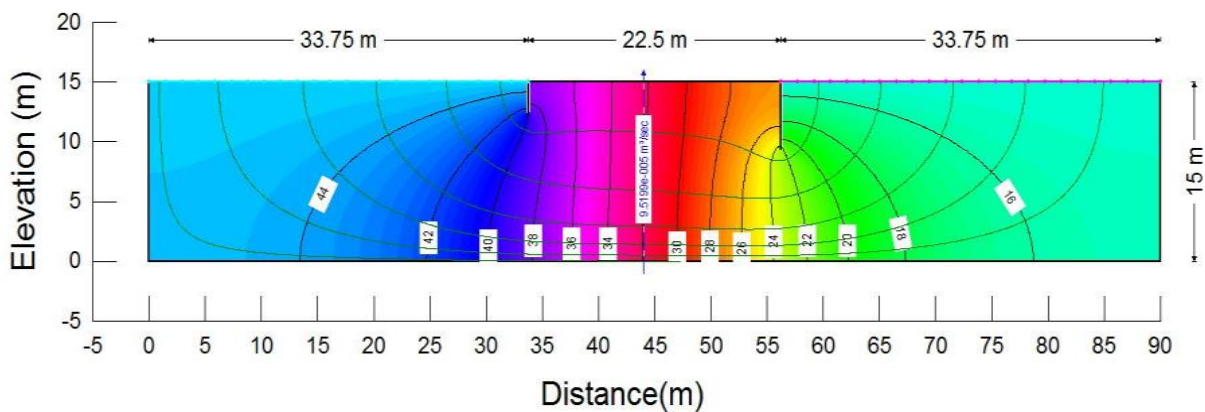
شکل ۴-الف. کنتورهای خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان در زیر سازه در شرایط بدون دیواره آب‌بند ($B/D=1/5$)

Fig. 4.a. Flow net under an apron without cutoff walls with $B/D=1.5$



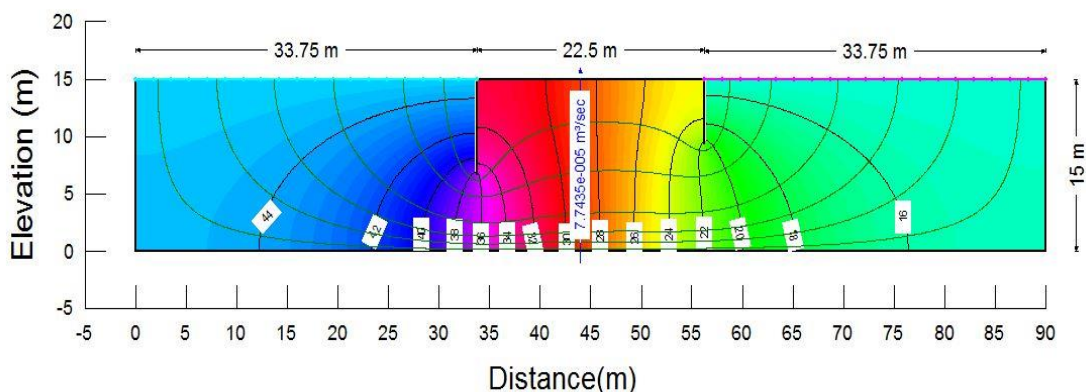
شکل ۴-ب. کنتورهای خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان در زیر سازه برای شرایط ($B/D=1.5$, $B/d_p=4$, $L/B=1$ and $d_p/d_1=0.66$)

Fig. 4.b. Flow net under an apron with two cutoff walls for $B/D=1.5$, $B/d_2=4$, $L/B=1$ and $d_2/d_1=0.66$



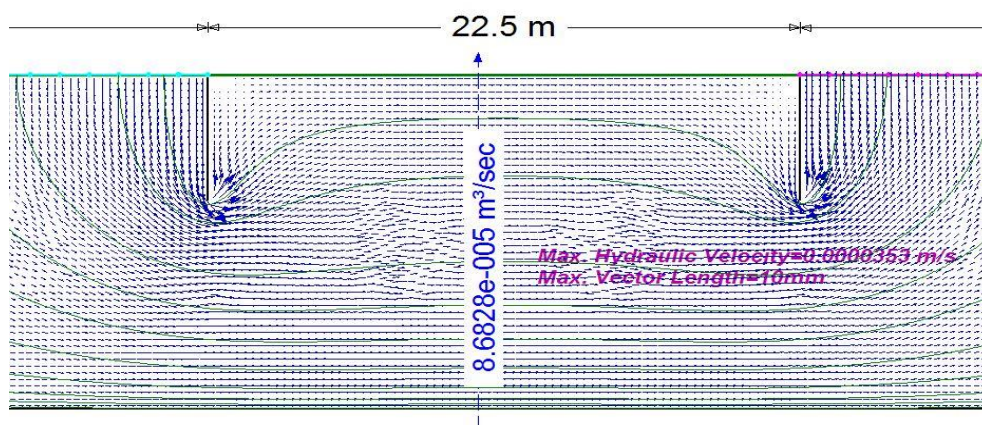
شکل ۴-ج. کنتورهای خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان در زیر سازه برای شرایط ($B/D=1.5$, $B/d_p=4$, $L/B=1$ and $d_p/d_1=1$)

Fig. 4.c. Flow net under an apron with two cutoff walls for $B/D=1.5$, $B/d_2=4$, $L/B=1$ and $d_2/d_1=1$



شکل ۴-د. کنتورهای خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان در زیر سازه برای شرایط $B/D=1.5$, $B/d_p=4$, $L/B=1$ and $d_p/d_1=2$

Fig. 4.d. Flow net under an apron with two cutoff walls for $B/D=1.5$, $B/d_p=4$, $L/B=1$ and $d_p/d_1=2$

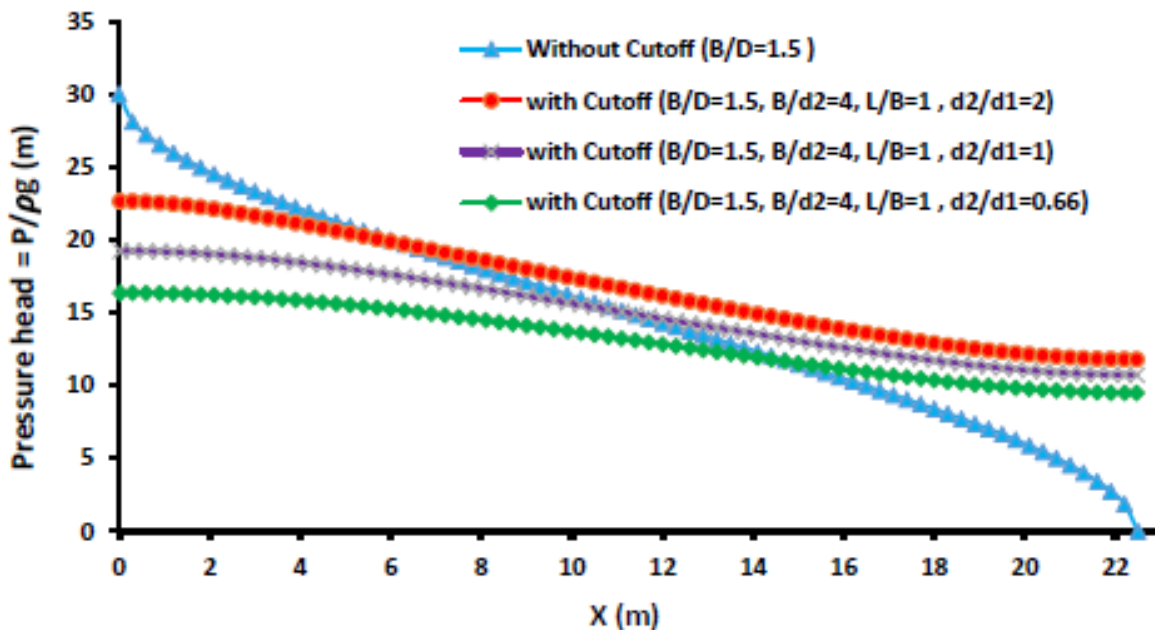


شکل ۵. خطوط و بردارهای جریان نشستی از زیر سازه برای شرایط $B/D=1.5$, $d_p/d_1=1$, $B/d_p=4$ and $L/B=1$

Fig. 5. Flow lines and velocity vectors under the apron with two cutoff walls for $B/D=1.5$, $d_p/d_1=1$, $B/d_p=4$ and $L/B=1$

دیوار آب‌بند به ترتیب ۱/۰۸۷۱، ۰/۹۶۷ و ۰/۸۴۶ به دست می‌آید که افزایش ۸/۷ درصدی و کاهش ۳/۳ و ۱۵/۴ درصدی را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت در صورتی که دیوار آب‌بند پایین دست از دیوار آب‌بند بالادست عمیق‌تر باشد، باعث افزایش نیروی بالابرنده خواهد شد و این مساله می‌تواند منجر به ناپایداری سازه هیدرولیکی گردد.

مقدار نیروی بالابرنده در زیر سازه برای شرایطی که هیچ‌گونه دیوار آب‌بندی کارگذاری نشده باشد، برابر ۵/۳۳۷ کیلو نیوتن در واحد طول سازه است. در صورت استفاده از دیوار آب‌بند دوگانه با شرایط $d_2/d_1=2$ ، $d_2/d_1=1$ و $d_2/d_1=0.66$ مقدار نیروی بالابرنده برای این سه حالت به ترتیب ۳۶۶/۹، ۳۲۶/۵۷ و ۲۸۵/۵ کیلو نیوتن خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نسبت نیروی بالابرنده در حالت با دیواره آب‌بند به بدون



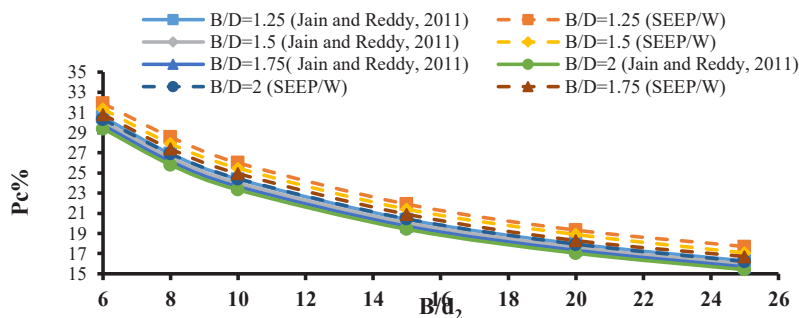
شکل ۶. تغییرات بار آبی در زیر سازه هیدرولیکی در حالت بدون دیوار آببند و وجود دیوار آببند دوگانه

Fig. 6. Uplift pressure distribution beneath the apron with and without cutoff walls

می‌کند که انتخاب محورهای عمودی در شکل ۷ بر طبق پارامترهای جین و ردی (۲۰۱۱) تنظیم گردید تا مقایسه نتایج راحت‌تر باشد. ایشان در مقاله خود جهت برآورد مقادیر معین، نمودارها را بر اساس چنین پارامترهایی رسم و روابطی هم بر اساس چنین حالتی استخراج نمودند.

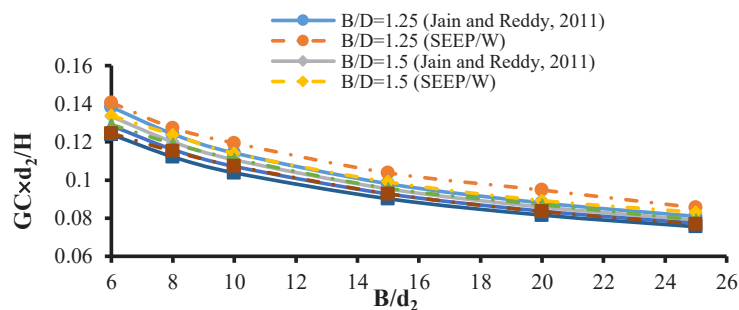
در شکل ۸ (الف، ب و ج) تغییرات نیروی بالابرنده نسبی (U/U_0) به ازای تغییرات عرض سازه هیدرولیکی به عمق دیوارهای آببند (B/d_2) در سه حالتی که دیوار آببند دوم نسبت به دیوار آببند اول در فاصله به ترتیب ۱، $0/۶۶$ و $0/۳۳$ برابری عرض سازه و عمق دو دیوار آببند یکسان باشد ($d_2=d_1$)، نشان داده شده است. ضمناً U برآیند نیروی بالابرنده با وجود دیواره آببند و U_0 برآیند نیروی بالابرنده بدون وجود دیواره آببند می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌گردد در صورتی $L/B = 1$ باشد، با افزایش یا کاهش عمق دیوار آببند بالادست و پایین‌دست در یک عرض ثابت و معین، نیروی بالابرنده نسبی ثابت بوده و تغییری نمی‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش عمق شالوده نفوذپذیر (D)، مقدار عددی B/D کاهش یافته و به تبع آن نیروی بالابرنده نیز کاهش می‌یابد.

جین و ردی [۱۳] روشی تحلیلی برای محاسبه نیروی بالابرنده در انتهای سازه و گرادیان هیدرولیکی خروجی در حالتی که دو دیواره آببند در دو انتهای سازه قرار گیرد را ارائه نمودند. این روش تحلیلی برای شرایط ساده که عمق دو دیوار آببند یکسان باشند، ارائه شده است. لازم به ذکر است که تاکنون روش تحلیلی برای شرایط دو دیوار آببند با عمق‌های نابرابر ارائه نشده است. به منظور صحت‌سنجی، مدل عددی تحقیق حاضر با نتایج حاصل از روش ارائه شده توسط جین و ردی [۱۳] برای شرایط معین، مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج این ارزیابی در نقطه کلیدی C^1 که محل اتصال دیوار آببند به کف سازه است با محاسبه پارامترهای معین برای شرایط یکسان، در شکل ۷ (الف، ب و ج) نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این شکل‌ها P_c درصد فشار نسبی در انتهای سازه یعنی بار فشاری در خروجی (h) به بار فشاری در بالادست (H) ضرب در 100 ، G_c گرادیان هیدرولیکی در انتهای سازه و q دبی نشستی از زیر سازه هیدرولیکی می‌باشند. نتایج نشان داد که مدل عددی با خطای کمتر از 5% می‌تواند فشار در انتهای سازه و گرادیان هیدرولیکی در نقطه کلیدی C را تخمین بزند. ضمناً یادآوری



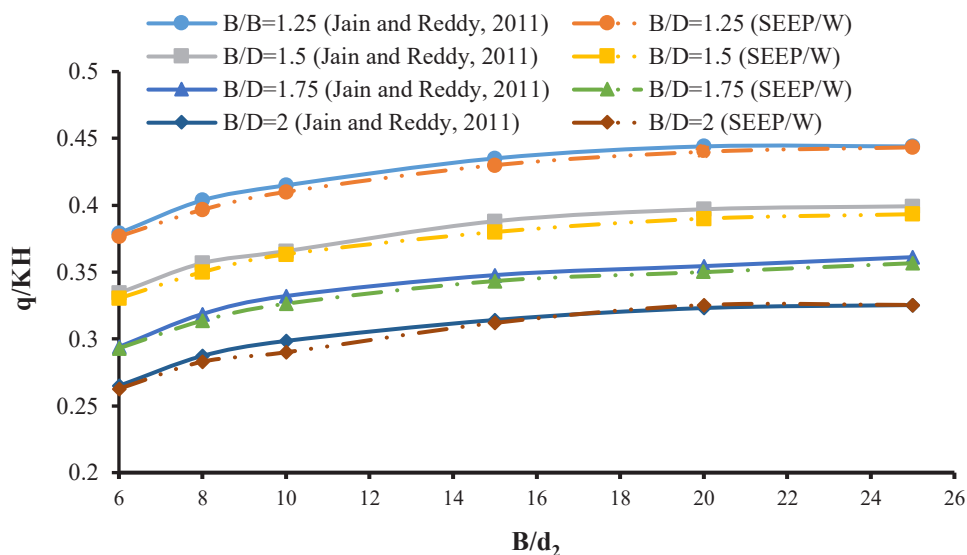
شکل ۷-الف. مقایسه نتایج روش عددی با روش تحلیلی در تعیین فشار بالابرنده در نقطه کلیدی C

Fig. 7.a. Percent relative pressure head comparison at key point C



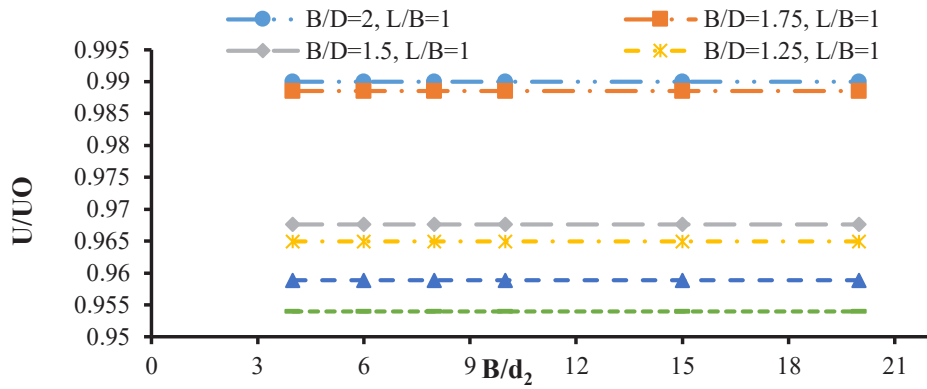
شکل ۷-ب. مقایسه نتایج روش عددی با روش تحلیلی در تعیین گرادیان هیدرولیکی در نقطه کلیدی C

Fig. 7.b. Relative hydraulic gradient comparison at key point C



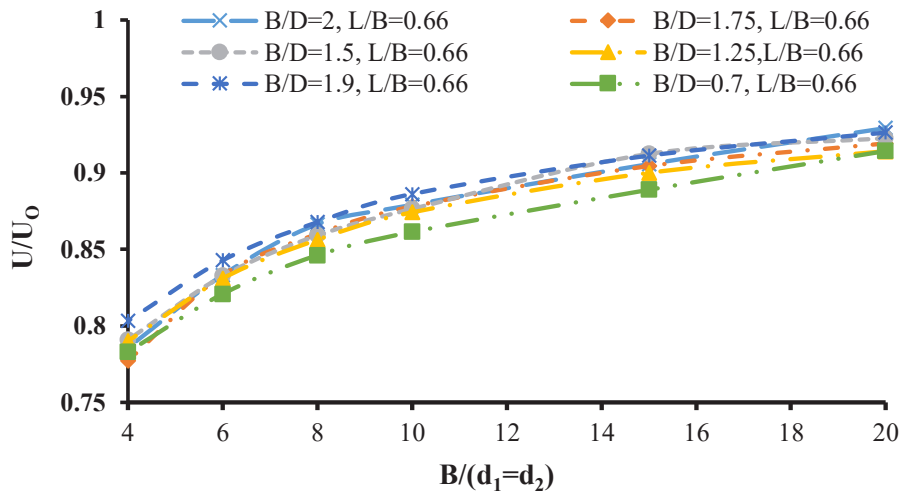
شکل ۷-ج. مقایسه نتایج روش عددی با روش تحلیلی در تعیین دبی عبوری از زیر سازه هیدرولیکی

Fig. 7.c. Comparison of the numerical simulation with the analytical solution of Jain and Reddi (2011) study (for $L/B=1$ and $d_2/d_1=1$)



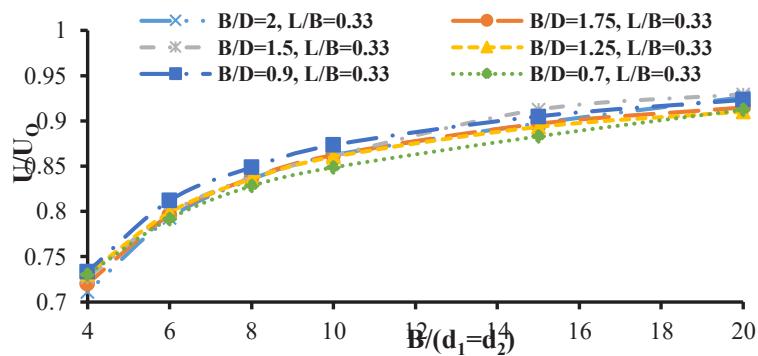
شکل ۸-الف. برای حالت $L/B=1$ ، $d_1/d_2=1$

Fig. 8.a. For the case of $L/B=1$



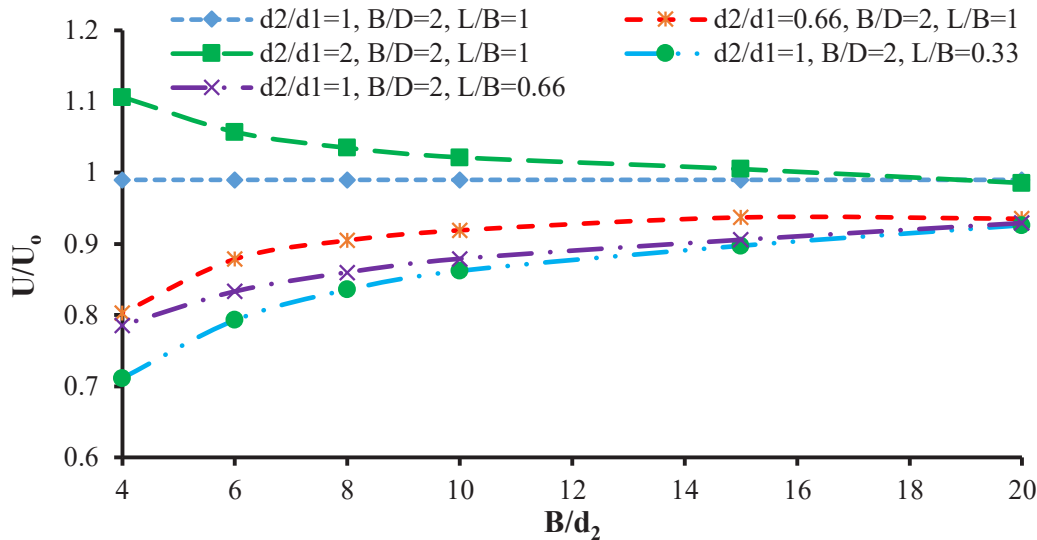
شکل ۸-ب. برای حالت $L/B=0.66$ ، $d_1/d_2=1$

Fig. 8.b. For the case of $L/B=0.66$



شکل ۸-ج. برای حالت $L/B=0.33$ ، $d_1/d_2=1$

Fig. 8.c. For the case of $L/B=0.33$



شکل ۹. تغییرات نیروی بالابرنده نسبی به ازای تغییرات نسبی عرض سازه به عمق دیوار آببند انتهایی برای شرایط (B/D=2)

Fig. 9. The variation of the relative uplift force (U/U_0) with B/d_2 for $B/D=2$

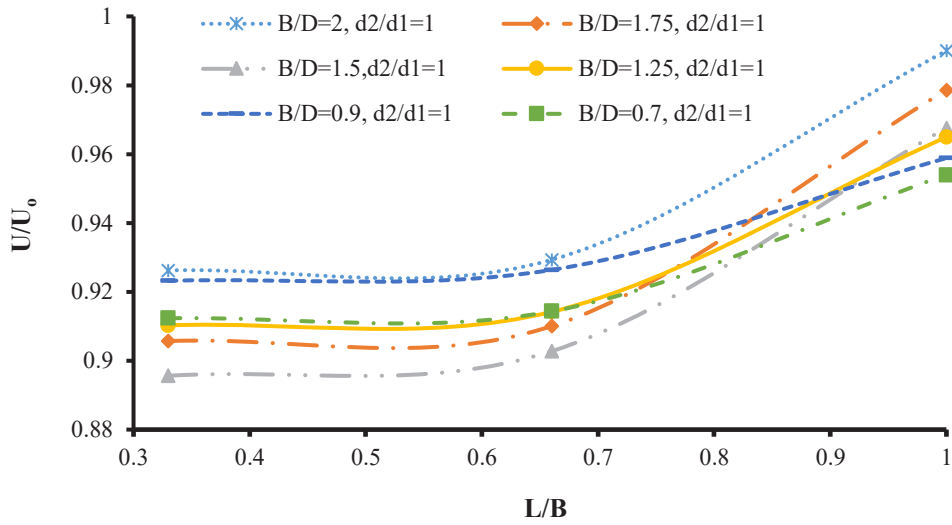
نیرو با افزایش عمق دیوار آببند بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که در صورتی که عمق دیوار آببند ابتدایی بیشتر از عمق دیوار آببند انتهایی باشد با افزایش عمق دیوار آببند انتهایی، مقدار B/d_2 کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروی بالابرنده کاهش پیدا می‌کند و بالعکس. اگر عمق دیوار آببند انتهایی نسبت به عمق دیوار آببند ابتدایی بیشتر باشد، با افزایش عمق دیوار آببند انتهایی، مقدار B/d_2 کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروی بالابرنده افزایش می‌یابد و این نحوه کارگذاری از دیوار آببند دوگانه می‌تواند نقش منفی در پایداری سازه داشته باشد.

شکل ۱۰ (الف و ب) تغییرات نیروی بالابرنده نسبی (U/U_0) نسبت به تغییرات فاصله دو دیوار آببند به عرض سازه (L/B) را نشان می‌دهد. به ازای یک عرض ثابت، با کاهش فاصله دو دیوار آببند نسبت به هم نیروی بالابرنده کاهش پیدا می‌کند. در نسبت

$L/B = 0.7$ شیب نیروی بالابرنده نسبی تغییر محسوسی می‌کند. بدین معنی که در شرایطی که $L/B > 0.7$ باشد، سازه از لحاظ پایداری در وضعیت خطرناک‌تری قرار خواهد گرفت. با مقایسه شکل ۸ (الف و ب) مشاهده می‌شود که با افزایش عمق دو دیوار آببند، شیب کاهشی نیروی بالابرنده افزایش می‌یابد.

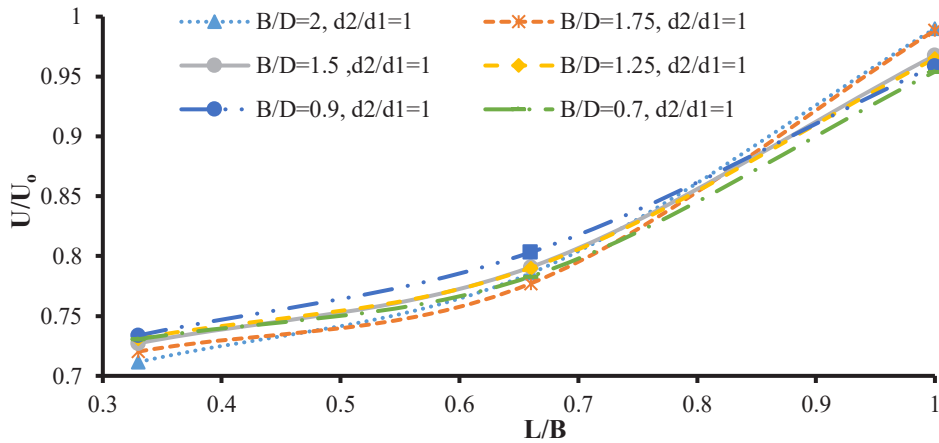
در شکل ۸ (ب و ج) نیز تغییرات نیروی بالابرنده نسبی به ازای تغییرات عمق دیوار آببند و عرض سازه به ترتیب برای حالتی که $L/B = 0.66$ و $L/B = 0.33$ باشد، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش عمق دیوار آببند، نیروی بالابرنده نسبی به ازای یک عرض معین کاهش می‌یابد و این کاهش در صورتی که دیوارهای آببند به هم نزدیک باشد، بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عمق دیوار آببند و کاهش عرض سازه شیب تغییرات نیروی بالابرنده نسبی بیشتر می‌گردد و این نشان می‌دهد که برای یک عرض ثابت و فاصله معین از دیوارها، استفاده از دیوار آببند عمیق‌تر شدت کاهش بیشتری در برآیند نیروی بالابرنده را نسبت به حالت معکوس فراهم می‌آورد.

شکل ۹ تغییرات نیروی بالابرنده نسبی (U/U_0) نسبت به تغییرات عرض سازه به عمق دیوار آببند انتهایی (B/d_2) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در حالتی که دو دیوار آببند با عمق یکسان ($d_2=d_1$) در بالادست و پایین‌دست سازه واقع شود، افزایش یا کاهش عمق دیوار آببند تأثیر بسزایی در مقدار نیروی بالابرنده ندارد. ولی در صورتی که دیوار آببند انتهایی به سمت دیوار آببند ابتدایی نزدیک‌تر گردد، مقدار نیروی بالابرنده نسبت به حالتی که دیوار آببند بالادست و پایین‌دست در دو انتهای سازه واقع شود، کاهش می‌یابد و این در حالی است که درصد کاهش این



شکل ۱۰-الف. برای حالت $B/d_2=20$

Fig.10.a. For the case of $B/d_2=20$

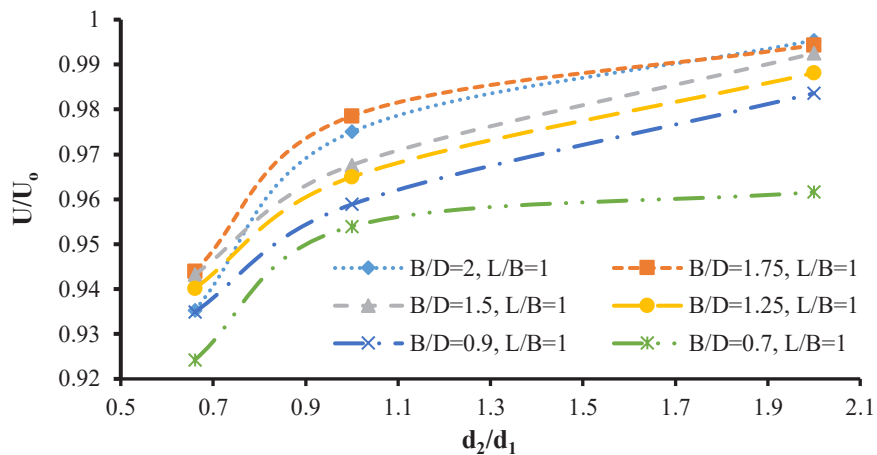


شکل ۱۰-ب. برای حالت $B/d_2=4$

Fig.10.b. For the case of $B/d_2=4$

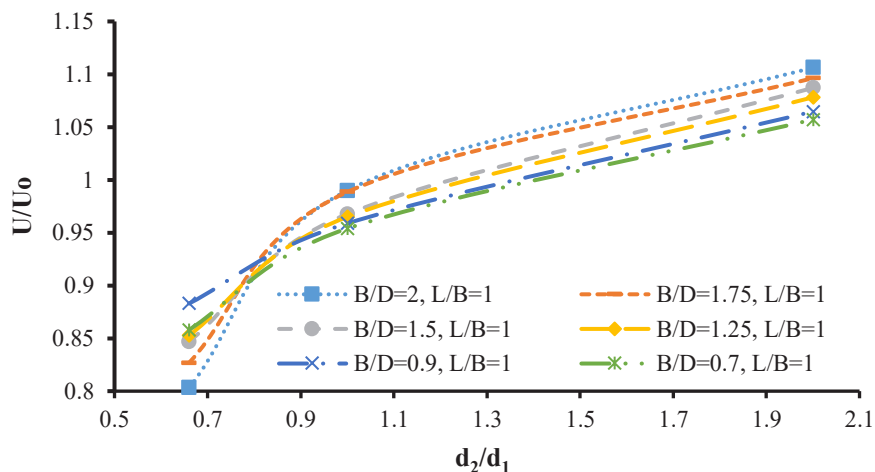
شکل ۱۰. تغییرات نیروی بالابرنده نسبی نسبت به تغییرات فاصله دو دیوار آببند به عرض سازه برای $d_2/d_1=1$

Fig.10. Variation of relative uplift force (U/U_0) with distance between the two cutoff walls (L) over the hydraulic structure width (B), for $d_2/d_1=1$



شکل ۱۱- الف. تغییرات نیروی بالابرنده نسبی نسبت به تغییرات عمق نسبی دو دیوار آببند برای شرایط $(B/d_2=20)$

Fig. 11.a. For the case of $B/d_2=20$

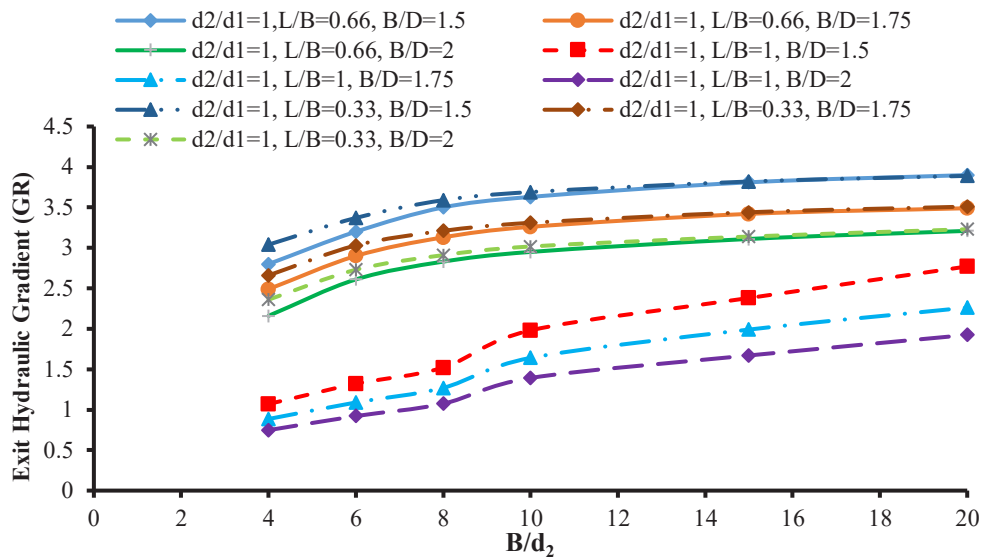


شکل ۱۱- ب. تغییرات نیروی بالابرنده نسبی نسبت به تغییرات عمق نسبی دو دیوار آببند برای شرایط $(B/d_2=4)$

Fig. 11.b. For the case of $B/d_2=4$

عمق پی نفوذپذیر بیشتر باشد، نیروی بالابرنده کمتر خواهد بود. همچنین از شکل ۱۱-ب می‌توان نتیجه گرفت که برای $d_2/d_1 > 20$ نیروی بالابرنده نسبی بزرگتر یک به دست می‌آید و نشان می‌دهد که مقدار نیروی بالابرنده در حالت با دیوار آببند نسبت به حالت مبنا یعنی بدون دیوار آببند بزرگتر بوده و این نحوه کارگذاری بر پایداری سازه اثر منفی داشته است که نباید در طراحی چنین ترکیبی از دیوار آببند دوگانه مورد استفاده مهندسان طراح قرار گیرد.

در شکل ۱۱ (الف و ب) تغییرات نیروی بالابرنده نسبی (U/U_0) نسبت به تغییرات عمق دو دیوار آببند (d_2/d_1) در شرایطی که فاصله آن‌ها برابر عرض سازه باشد $(L/B=1)$ ، نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش عمق دیوار آببند انتهایی در پایین دست، نیروی بالابرنده نسبی افزایش پیدا می‌کند و این نشان می‌دهد که برای کاهش نیروی بالابرنده باید عمق دیواره آببند در بالادست نسبت به پایین دست بیشتر باشد. همچنین به ازای $B/D = 0.7$ نیروی بالابرنده نسبی به میزان قابل توجهی کمتر از حالت $L/B = 1/75$ است که نشان می‌دهد هر چه عرض سازه کمتر و یا



شکل ۱۲. تغییرات گرادیان هیدرولیکی خروجی به ازای تغییرات نسبی عرض سازه به عمق دیوار آببند انتهایی برای شرایط $(d_2/d_1=1)$

Fig. 12. Exit hydraulic gradient (GR) for values of B/d_2 for $d_2/d_1=1$

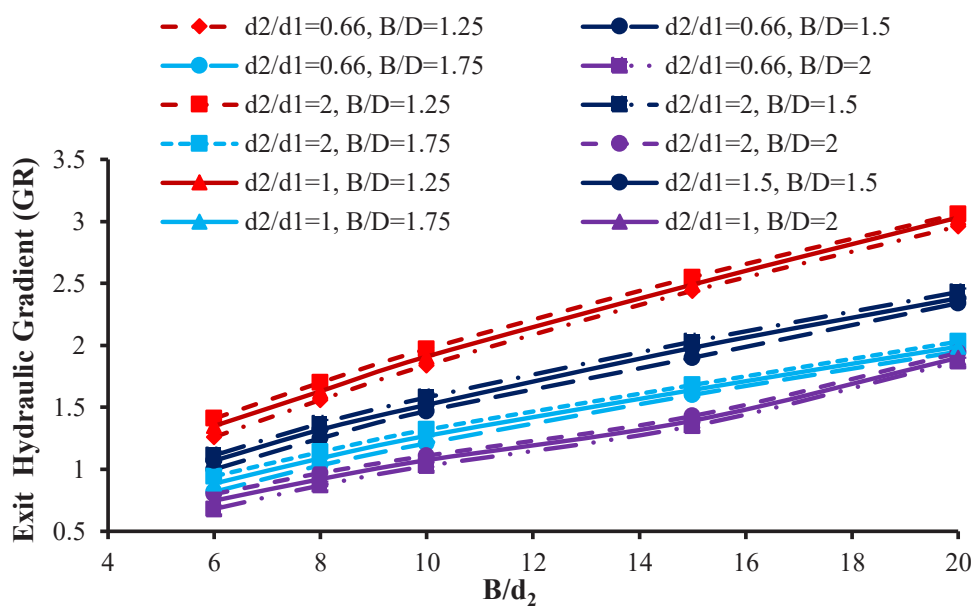
در شکل ۱۳ تغییرات گرادیان هیدرولیکی خروجی به ازای عمق نسبی دیوار آببند پایین دست نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش عمق دیوار آببند پایین دست، از گرادیان هیدرولیکی خروجی کاسته می شود. با افزایش عمق دیوار آببند انتهایی، طول مسیر خزشی جریان عبوری در زیر سازه هیدرولیکی افزایش و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی خروجی کاهش پیدا می کند.

در شکل ۱۳-ب تغییرات نسبی دبی جریان نشتی از زیر سازه (Q/Q_0) نسبت به تغییرات عرض سازه به عمق دیوار آببند انتهایی (B/d_2) به ازای عمق نسبی دو دیوار آببند (d_2/d_1) نشان داده شده است. با افزایش عمق دیوار آببند در پایین دست، مقدار جریان عبوری از زیر سازه کاهش پیدا می کند. همچنین به ازای $d_2/d_1 < 1$ وضعیت کاهش دبی نشتی بهتر می شود.

در شکل ۱۴ کانتورهای نیروی بالابرنده نسبی (U/U_0) در برابر تغییرات B/D و d_2/d_1 رسم شده است. کانتورهای نیروی بالابرنده نسبی برابر یک پررنگ شده تا مرز بین طراحی اقتصادی و غیراقتصادی مشخص گردد. بدین معنی که برای نیروی بالابرنده نسبی کمتر از یک $(U/U_0 < 1)$ ، شاهد کاهش نیروی بالابرنده نسبی بوده و لذا طرحی مقرون به صرفه را

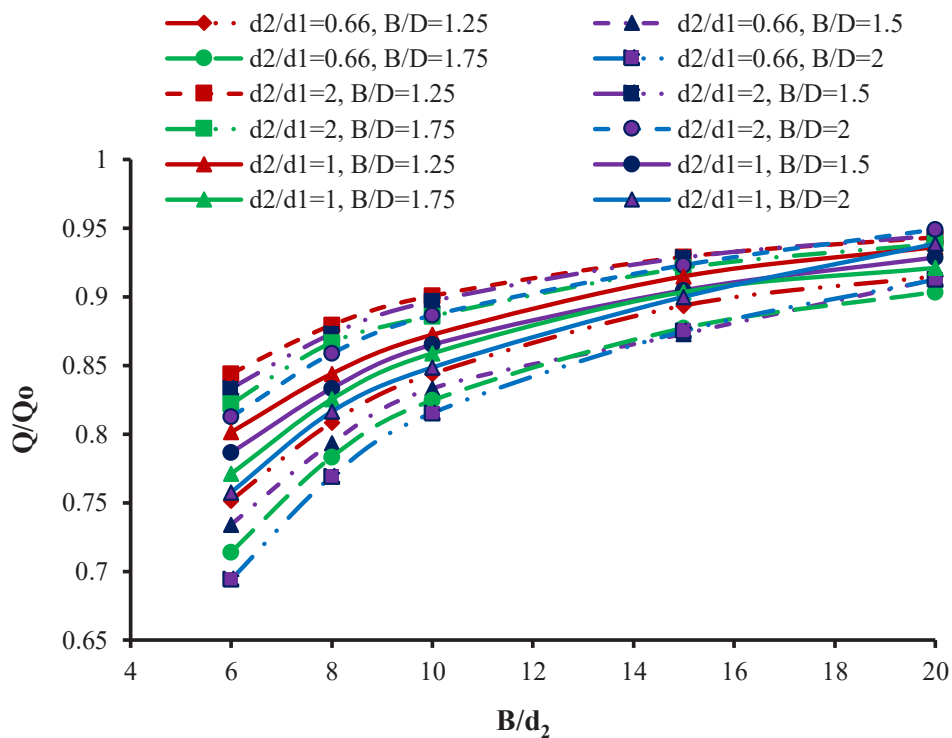
در شکل ۱۲ تغییرات گرادیان هیدرولیکی خروجی (G_R) در برابر نسبت عرض به عمق دیوار آببند انتهایی (B/d_2) نشان داده شده است. با کاهش فاصله دو دیوار آببند نسبت به هم و کاهش عمق دیوار آببند انتهایی، گرادیان هیدرولیکی خروجی افزایش می یابد. همچنین در شرایطی که فاصله دو دیوار آببند برابر عرض سازه باشد $(L/B = 1)$ یعنی دو دیوار آببند در ابتدا و انتهای سازه قرار داشته باشند، گرادیان هیدرولیکی خروجی نسبت به حالتی که دیوار آببند انتهایی در فواصل یک - سوم یا دو - سوم نسبت به دیوار آببند ابتدایی باشد، کمتر است.

در صورتی که دو دیوار آببند درست در ابتدا و انتهای سازه باشد، گرادیان هیدرولیکی خروجی نسبت به حالتی که دیوار آببند انتهایی در فواصل یک - سوم و دو - سوم نسبت به دیوار آببند ابتدایی باشد، کمتر است. در صورتی که دیوار آببندی درست در انتهای سازه قرار نگیرد، شیب دیاگرام فشار بالابرنده به سمت بی نهایت میل می کند و جهت نیروی نشت در انتهای سازه به سمت رو به بالا خواهد بود. این امر می تواند ذرات خاک پایین دست سازه را تحت شرایطی از جای خود جا به جا نماید؛ بنابراین می توان گفت وجود دیوار آببند انتهایی در انتهای سازه در جهت کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی برای افزایش ضریب اطمینان در برابر پدیده زیرشویی پی سازه و یا پایپینگ بسیار لازم و ضروری است.



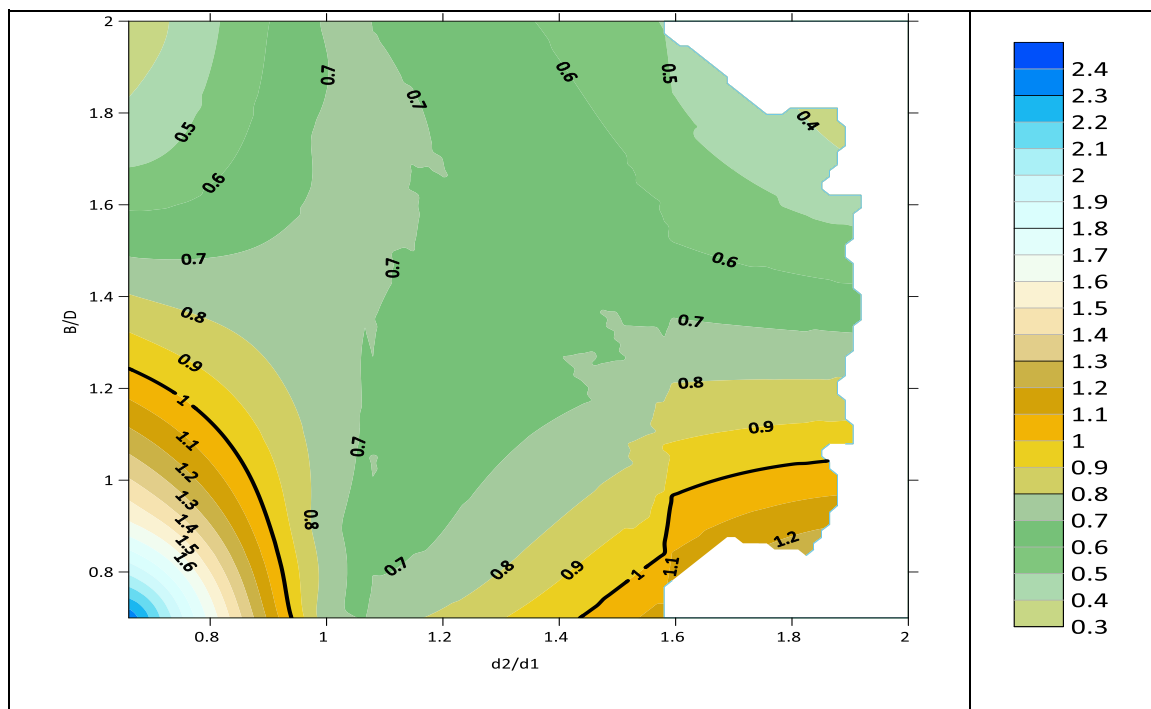
شکل ۱۳-الف. تغییرات گرادیان هیدرولیکی خروجی به ازای تغییرات نسبی عرض سازه به عمق دیوار آببند انتهایی

Fig. 13.a. Changes in Exit hydraulic gradient to changes in relative hydraulic structure width



شکل ۱۳-ب. تغییرات دبی نسبی جریان خروجی به ازای تغییرات نسبی عرض سازه به عمق دیوار آببند انتهایی

Fig. 13.b. Changes of the relative discharge seepage beneath the hydraulic gradient (Q/Q_0) with B/d_2



شکل ۱۴. کانتورهای نیروی بالابرنده نسبی (U/U_0) در برابر تغییرات d_2/d_1 و B/D

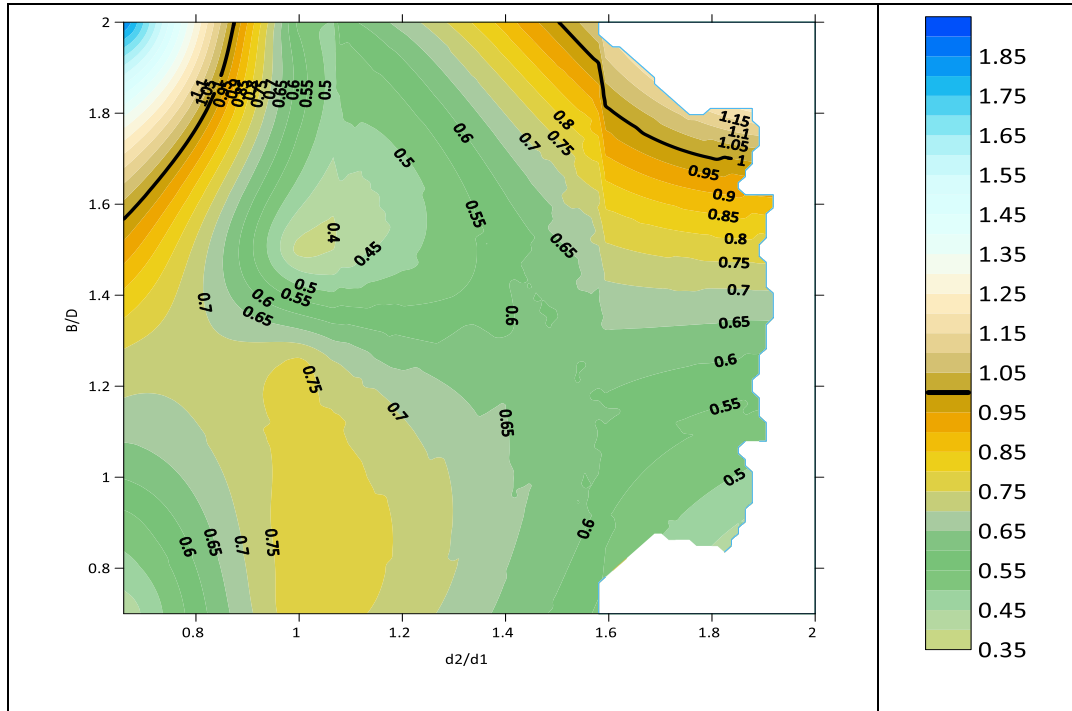
Fig. 14. Values of U/U_0 with the d_2/d_1 and B/D

در شکل ۱۷ نمودار پراکنندگی داده‌ها برای روابط رگرسیونی در تخمین نیروی بالابرنده نسبی برای هر یک از روابط ۱ تا ۹ در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که بیشتر نقاط بر روی یا نزدیکی خط نیمساز قرار ($y=x$) گرفته‌اند. این نشان می‌دهد که هر یک از روابط رگرسیونی در تخمین مقدار نیروی بالابرنده نسبی از دقت مناسبی برخوردار هستند. همچنین در این نمودار مشاهده می‌شود که کارگذاری دیوار آب‌بند دوگانه همیشه نمی‌تواند در کاهش نیروی بالابرنده مؤثر واقع شود، زیرا در برخی از شرایط شبیه‌سازی عددی، مقداری نیروی بالابرنده نسبی بزرگ‌تر از یک به دست می‌آید ($U/U_0 > 1$) و این نشان می‌دهد که تحت این شرایط به کارگیری دیوار آب‌بند دوگانه در پایداری سازه هیدرولیکی نه تنها مؤثر نبوده است، بلکه باعث افزایش نیروی بالابرنده نسبت به حالت بدون دیوار آب‌بند نیز شده است. لذا تحت این شرایط طراحی مقرون به صرفه نخواهد بود و بایستی در نحوه به کارگیری و کارگذاری دیوارهای آب‌بند از لحاظ عمق و فاصله تجدید نظر گردد.

ارائه می‌دهد. در شکل ۱۵ گرادیان هیدرولیکی خروجی (G_R/G_{RO}) در برابر تغییرات B/D و d_2/d_1 رسم شده است. در این حالت نیز برای گرادیان هیدرولیکی نسبی کمتر از یک ($G_R/G_{RO} < 1$)، شاهد کاهش گرادیان هیدرولیکی نسبی بوده و لذا طراحی اقتصادی را ارائه می‌دهد. فصل مشترک دو شکل ۱۴ و ۱۵ محدوده‌های مناسب و نامناسب برای طراحی دو دیواره آب‌بند را نشان می‌دهد (شکل ۱۶).

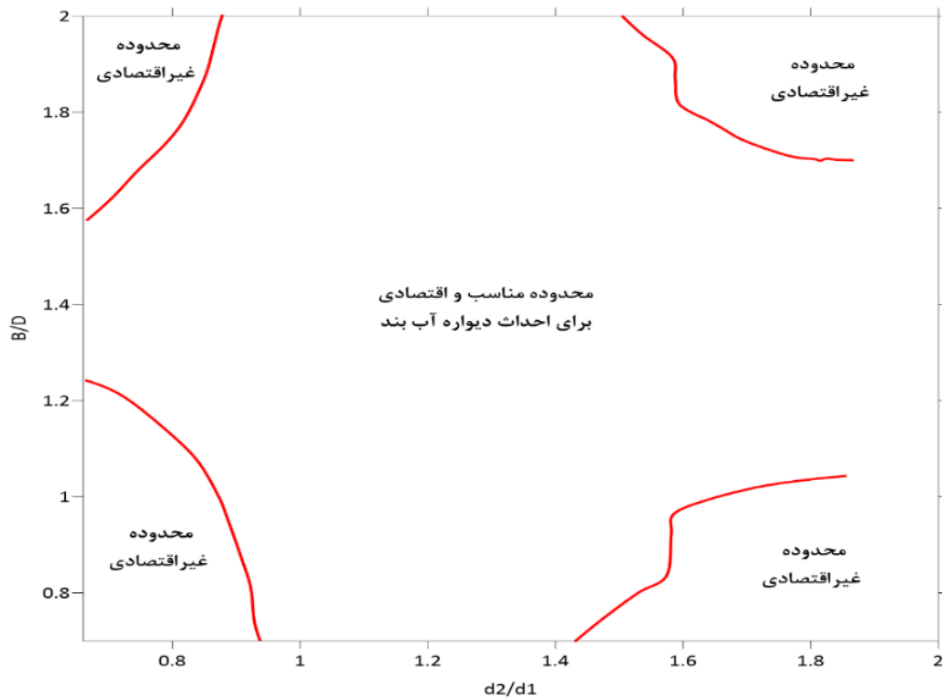
۳-۱- ارائه روابط رگرسیونی

برای محاسبه نیروی بالابرنده نسبی، روابط رگرسیونی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert Professional، استخراج گردید. نتایج این محاسبات در جدول ۲ نشان داده شده است. تعداد ۹ معادله به ازای مقادیر مختلف d_2/d_1 و L/B به دست آمد. معیارهای آماری مورد استفاده در تحقیق حاضر برای ارزیابی دقت روابط استخراجی محاسبه نیروی بالابرنده نسبی، ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای نسبی ($RE\%$) می‌باشند.



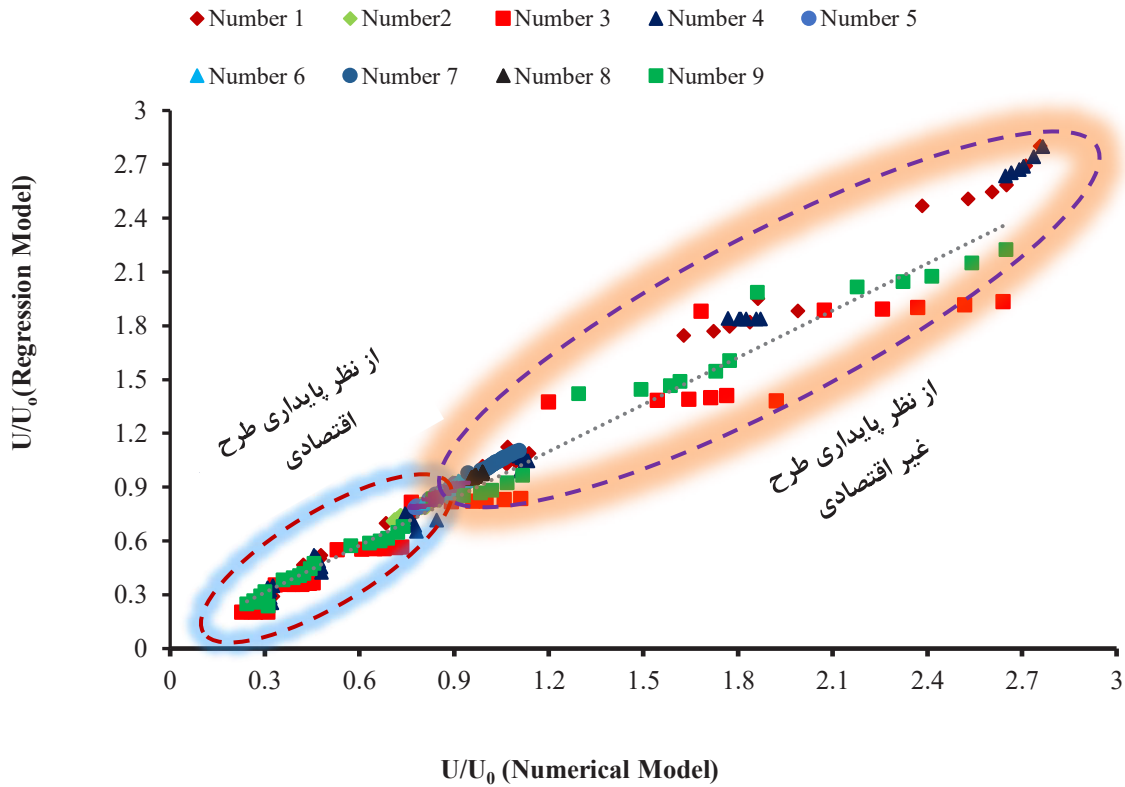
شکل ۱۵. کانتورهای گرادیان هیدرولیکی خروجی (GR/GRo) در برابر تغییرات d_2/d_1 و B/D

Fig. 15. Values of GR/GRo with the d_2/d_1 and B/D



شکل ۱۶. فصل مشترک دو شکل ۱۴ و ۱۵ برای تعیین منطقه‌های مناسب و نامناسب برای طراحی دو دیواره آب‌بند

Fig. 16. The four regions for economic and non-economic designs considering both uplift force and exit hydraulic gradient



شکل ۱۷. نمودار پراکنده داده‌ها برای نیروی بالابرنده نسبی در شرایط وجود دیوار آب‌بند دوگانه

Fig. 17. Scatter plot relating regression predictions and numerically simulated U/U_0 values.

جدول ۲. روابط رگرسیونی در تخمین نیروی بالابرنده نسبی

Table 2. Coefficient values used for estimating U/U_0

No.	Parameters		$\frac{U}{U_0} = \frac{(a + b \times \frac{B}{D} + c \times \frac{B}{d_2})}{(1 + e \times \frac{B}{D} + f \times \frac{B}{d_2})}$					Assessment Criteria		
	L/B	d_2/d_1	a	b	c	e	f	R^2	RE%	RMSE
1	0.33	0.66	3.56E+1	-1.37E+1	5.55E-2	1.41E+1	-5.97E-2	0.996	7.9	0.139
2	0.33	1	3.28E-1	-3.49E-1	4.44E-1	-4.28E-1	4.56E-1	0.986	0.65	0.0072
3	0.33	2	9.81E+0	-4.03E+0	3.89E-2	3.92E+0	-4.29E-2	0.976	6.2	0.108
4	0.66	0.66	3.94E+7	-1.36E+7	-2.23E+5	1.64E+7	-1.20E+5	0.964	5.6	0.155
5	0.66	1	6.34E-1	-2.18E-1	2.26E-1	-2.61E-1	2.32E-1	0.968	0.67	0.0076
6	0.66	2	2.1E+1	-8.24E+0	1.00E-1	9.85E+0	-7.57E-2	0.991	4.7	0.067
7	1	0.66	8.11E-1	-6.42E-1	1.94E-1	-7.17E-1	2.02E-1	0.964	0.58	0.0074
8	1	1	9.43E-1	-2.16E-1	1.59E-6	-2.42E-1	1.64E-6	0.927	2.66	0.0039
9	1	2	4.5E+3	1.57E+4	1.53E+4	1.20E+4	1.60E+4	0.966	0.35	0.0067

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل‌های مختلفی با وجود دو دیواره آب‌بند در زیر سازه بررسی گردید. تعداد مدل‌های عددی ۳۳۰ بوده (۶ مدل عددی برای حالت مبنا یعنی بدون دیوار آب‌بند) و حل معادلات حاکم به همراه شرایط مرزی، به روش المان‌های محدود (FEM) انجام گرفت. عمق دیواره آب‌بند و فاصله آن‌ها از یکدیگر از جمله متغیرها می‌باشند. هدف محاسبه مقدار نیروی بالابرنده، دبی نشستی از زیر سازه و گرادیان هیدرولیکی خروجی است. اهم نتایج به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

- مقایسه بین نتایج روش تحلیلی ارائه شده توسط جین و ردی [۱۳] و مدل عددی المان‌های محدود نشان داد که روش عددی با خطای کمتر از ۵٪ می‌تواند فشار آب منفذی در انتهای سازه و گرادیان هیدرولیکی خروجی را تخمین بزند.

- اگر دیوار آب‌بند پایین دست از دیوار آب‌بند بالادست عمیق تر باشد، باعث افزایش برآیند نیروی بالابرنده نسبت به حالت بدون دیواره آب‌بند خواهد شد. در غیر این صورت ($d_2/d_1 < 1$) باعث کاهش این نسبت خواهد شد. لذا توصیه می‌شود در طراحی، نسبت $d_2/d_1 < 1$ رعایت شود.

- به ازای یک عرض ثابت برای سازه، با کاهش فاصله دو دیوار آب‌بند نسبت به هم نیروی بالابرنده کاهش پیدا می‌کند. در نسبت ۰/۷ $L/B =$ شیب نیروی بالابرنده نسبتی تغییر محسوسی می‌کند. بدین معنی که در شرایطی که $L/B > 0.7$ باشد، سازه از لحاظ پایداری در وضعیت خطرناک تری قرار خواهد گرفت. همچنین نتایج نشان داد که هر چه عرض سازه کمتر و یا عمق پی نفوذپذیر بیشتر باشد، نیروی بالابرنده کمتر خواهد بود.

- با افزایش فاصله دو دیوار آب‌بند نسبت به هم و افزایش عمق دیوار آب‌بند انتهایی، گرادیان هیدرولیکی خروجی کاهش می‌یابد. هنگامی که دو دیوار آب‌بند در ابتدا و انتهای سازه قرار داشته باشند، گرادیان هیدرولیکی خروجی نسبت به حالتی که دیوار آب‌بند انتهایی در فواصل یک - سوم یا دو - سوم نسبت به دیوار آب‌بند ابتدایی باشد، کمتر است.

- با افزایش عمق دیوار آب‌بند در پایین دست، مقدار جریان عبوری از زیر سازه کاهش پیدا می‌کند. همچنین به ازای $d_2/d_1 < 1$ وضعیت کاهش دبی نشستی بهتر می‌شود. بر اساس مقدار نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی، مناطق مستعد برای طراحی دیواره‌های آب‌بند توصیه شد.

پیشنهادها

پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی دیوارهای آب‌بند چندگانه (بیش از دو دیواره آب‌بند) نیز مدنظر قرار گیرد. به عنوان مثال، استفاده از سه دیواره آب‌بند کم عمق به جای دو دیواره آب‌بند عمیق می‌تواند مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به مقادیر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی، مزیت یکی بر دیگری مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر عمق، فاصله سه دیواره آب‌بند از همدیگر یقیناً بر شرایط هیدرولیکی طرح تاثیرگذار بوده و می‌تواند به عنوان یک متغیر دیگر با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گیرد. ضمناً در عمل، طراحی سازه‌ها برای حالت نشست دائمی از پی صورت می‌گیرد که در این مطالعه هم مدنظر قرار گرفته است. لیکن بررسی نیروی بالابرنده در حالت جریان غیرماندگار (غیردائمی) نیز قابل پیشنهاد است. حالت اخیر در زمان وقوع سیل و یا فروکش آن اتفاق می‌افتد.

۵- فهرست علائم

U: نیروی بالابرنده در حالت وجود دیوار آب‌بند، kPpa
 U_0 : نیروی بالابرنده در حالت بدون دیوار آب‌بند، kPa
 Q: دبی جریان نشستی در حالت وجود دیوار آب‌بند، m^3/sec
 Q_0 : دبی جریان نشستی در حالت بدون دیوار آب‌بند، m^3/sec
 q: دبی جریان نشستی در واحد عرض سازه هیدرولیکی، m^2/sec
 GR: گرادیان هیدرولیکی خروجی، بی بعد
 GR_0 : گرادیان هیدرولیکی خروجی در حالت بدون دیوار آب‌بند، بی بعد
 GE: گرادیان هیدرولیکی در ابتدای سازه هیدرولیکی، بی بعد
 GC: گرادیان هیدرولیکی در انتهای سازه هیدرولیکی، بی بعد
 PC%: درصد بار فشاری در ابتدای سازه هیدرولیکی، بی بعد
 PE%: درصد بار فشاری در انتهای سازه هیدرولیکی، بی بعد
 B: عرض سازه هیدرولیکی، m
 L: فاصله دو دیوار آب‌بند، m
 d_2 : عمق دیوار آب‌بند انتهایی، m
 d_1 : عمق دیوار آب‌بند ابتدایی، m
 D: عمق پی سازه هیدرولیکی، m
 H: ارتفاع آب در پشت سازه هیدرولیکی، m
 K: هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، m/sec

- location for vertical drains in gravity dams, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(2) (2017) 799-808.
- [8] F. Salmasi, M. Nouri, Effect of upstream semi-impervious blanket of embankment dams on seepage, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(2) (2019) 143-152.
- [9] F. Salmasi, B. Mansuri, A. Raufi, Use of numerical simulation to measure the effect of relief wells for decreasing uplift in a homogeneous earth dam, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 48(1) (2015) 35-45.
- [10] R. Norouzi, F. Salmasi, H. Arvanaghi, Effect of cut off wall on hydraulic gradient and seepage in the Sabalan rock fill dam by numerical simulation, *Hydrogeology*, 2(1) (2017) 71-84 (In Persian).
- [11] F. Salmasi, R. Norouzi, J. Abraham, B. Nourani, S. Samadi, Effect of Inclined Clay Core on Embankment Dam Seepage and Stability Through LEM and FEM, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(6) (2020) 6571-6586, <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01455-7>
- [12] F. Salmasi, B. Nourani, J. Abraham, R. Norouzi, Numerical investigation of relief well performance for decreasing uplift pressure under embankment dams, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 2819–2830 (2021), <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03030-2>
- [13] A.K. Jain, L.N. Reddi, Finite-depth seepage below flat aprons with equal end cutoffs, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12) (2011) 1659-1667.
- [1] J. Abrishami, N. Vahhab Rajaei, Gravity concrete dams: design and construction, Published by Astan Quds Razavi, 2000 (In Persian).
- [2] A. Shamsaii, Design and construction of storage dams, Iran University of Science and Technology, 2003 (In Persian).
- [3] R. Ghobadian, A.F. Choghabaghi, S. Mohamadi, The Effect of cutoff curtain location on phreatic seepage line and seepage discharge by numerical finite volumes method, *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2(8) (2013).
- [4] M. Beirami, Water conveyance structures, Isfahan university Tecnology publication center, 2004, (In Persian).
- [5] M. Yousefi, M. Parvizi, M. Sedghi-Asl, Laboratory Investigation the effects of sheet pile on seepage control and sand boiling through alluvial foundation of hydraulic structures, *Amirkabir Journal of Science & Research Civil and Enviromental Engineering (ASJR-CEE)*, 48(3) (2016) 121-123.
- [6] H.F. Aghajani, M.M. Anzabi, Z. Sheikhi, R. Shokri, Selecting Optimum Cutoff Wall Position for Rehabilitation of an Inclined Core Earthfill Dam, in: *GeoShanghai International Conference*, Springer, 2018, pp. 252-260.
- [7] B. Nourani, F. Salmasi, A. Abbaspour, B. Oghti Bakhshayesh, Numerical investigation of the optimum

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Salmasi , B. Nourani, R. Norouzi , Investigation of seepage, uplift forces and hydraulic gradient under hydraulic structures with different configurations of dual-cutoff walls, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(4) (2022) 1631-1650.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19864.7274

