



شبیه سازی عددی تاثیر لوله های زهکش بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت در سد های وزنی

علی طاهری اقدم، فرزین سلماسی*، هادی ارونقی

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۸

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵

کلمات کلیدی:

سد وزنی

گرادیان هیدرولیکی خروجی

لوله زهکش

نشت

نیروی بالا برنده

خلاصه: در این تحقیق تاثیر قطر و موقعیت لوله های زهکش در پی سد های وزنی بر روی نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت مورد بررسی قرار گرفت. برای نیل به این هدف از نرم افزار Seep/w که متعلق به بسته نرم افزاری Geo-Studio می باشد استفاده و پی یک سد وزنی شبیه سازی گردید. نتایج نشان داد که وجود لوله های زهکش در زیر سد وزنی، باعث کاهش ۴، ۶ و ۹ برابری به ترتیب برای نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت می گردد. تعبیه همزمان دو لوله زهکش که یک چهارم عرض کف سد وزنی (25/L۰) از هم فاصله دارند، در پاشنه سد وزنی و در عمق 26/D کمترین نیروی بالابرنده را نتیجه داد (D عمق نفوذپذیر پی سد است). همچنین با مشخص شدن بهترین موقعیت برای تعبیه لوله های زهکش مشاهده گردید که کارگذاری لوله های زهکش در این موقعیت ها باعث کاهش ۴۱ تا ۶۷ درصدی در حجم سد وزنی مورد مطالعه و افزایش ۲ تا ۳ برابری ضریب اطمینان در مقابل واژگونی سازه مورد نظر می گردد. همچنین مشخص گردید که انتخاب قطر لوله زهکش تخلیه تاثیر کمتری بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت دارد و تابع ملاحظات اجرایی می باشد. برای اعتبار سنجی، روش عددی به کار رفته در این پژوهش با روش آزمایشگاهی دیگران نیز مقایسه گردید و تطابق مناسبی مشاهده شد.

۱- مقدمه

پیش بینی ها و تدارکاتی را در طراحی منظور داشت تا حتی الامکان میزان این نیرو را در پی سد کاهش داد. این عمل ممکن است با تعبیه گالری زهکش در بدنه سد صورت گیرد. در داخل گالری زهکش، چاهک های زهکش وجود دارند که نقش آن ها جمع آوری آب تراوش یافته از بدنه سد (درزهای انبساطی و اجرایی) و به خصوص از پی سد می باشند.

زهکش ها معمولا در سنگ های ترک خورده برای کاهش نیروی بالابرنده حفر می شوند. احداث زهکش ها در سنگ هایی که تزریق آن ها با مشکلاتی برخوردار است، می تواند کمک شایان توجهی در کاهش این مشکلات و حفظ پتانسیل هیدرولیکی در مقدار مناسب نماید. این زهکش ها معمولا در راستای قائم حفر می شوند اگر چه در مورد سدهای قوسی، برخی مهندسان ترجیح می دهند زهکش ها را به سمت بالادست مایل کنند [۱]. هنگامی که لنگر واژگونی حاصل از

نشت از پی سدها و به دنبال آن افزایش نیروی بالابرنده، یکی از عوامل مهم تخریب سدها به شمار می رود. تمامی سدها و سازه های نگهداری و ذخیره آب در معرض عبور آب از پی، کناره ها و بعضاً بدنه ی خود هستند. به این ترتیب که آب موجود در مخزن سد، هر لحظه تمایل دارد از درز و شکاف موجود در محل اتصال بدنه سد به پی آن و خلل و فرج موجود در خاک پی به صورت نشت آب از زیر سد جاری شده و در پایین دست ظاهر گردد. این جریان باعث اعمال نیرویی از پایین به بالا به بدنه سد می گردد که اصطلاحاً به نام نیروی بالابرنده^۱ خوانده می شود. نیروی بالابرنده گاهی به قدری زیاد است که موجب واژگونی سد حول پنجه می شود. از این رو لازم است

1 Uplift force

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



نیروی بالابرنده بر لنگر مقاوم حاصل از وزن غلبه کند، عمل واژگونی رخ می دهد. برای جلوگیری از وقوع این امر باید میزان نیروی بالا برنده به درستی معلوم شده و ابعاد متناسب با آن برای سازه سد در نظر گرفته شود.

گرادیان هیدرولیکی خروجی نیز مهم ترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیرشویی پی یا پایپینگ^۱ می باشد. از جمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیر فشار و همچنین کاهش گرادیان خروجی به کار می رود، ایجاد دیواره های آب بند می باشد. دیواره های آب بند که غالباً نفوذ ناپذیر و یا خیلی کم نفوذ پذیرند، باعث کند کردن حرکت آب و کاهش انرژی آب در زیر سازه می شوند و در نتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می کنند. کاهش شدت زیر فشار ناشی از ایجاد دیواره آب بند تحت عنوان فاکتور شدت بیان می شود. نسبت واقعی زیرفشار در حالتی که دیواره آب بند وجود دارد به شدت زیر فشار در حالت بدون دیواره آب بند را فاکتور شدت^۲ می نامند [۲]. منصوری و سلماسی [۳] تاثیر طول زهکش افقی و دیوار آب بند بر نشت و فشار بالابرنده در سد خاکی همگن را با شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول زهکش افقی، میزان نشت و گرادیان هیدرولیکی افزایش می یابد. همچنین با افزایش عمق دیواره آب بند، نشت از سد کمتر می شود. نصب دیوار آب بند در وسط فونداسیون منجر به کاهش ۱۹/۶۸ درصدی گرادیان هیدرولیکی نسبت به نصب دیواره آب بند در بالادست می شود. عزیزی و همکاران [۴] به تاثیر لوله ی بارباکان یا سوراخاب^۳ و دیوار آب بند بر نیروی زیر فشار در حوضچه آرامش سد انحرافی پرداختند. نتایج نشان داد که دیوار آب بند بالادست با عمق ۸ متر باعث کاهش نیروی بالابرنده در حدود ۶۳% و کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی ۷۹% نسبت به حالت بدون دیوار آب بند می شود. نورانی و همکاران [۵] عملکرد زهکش عمودی در سدهای وزنی در حالت پایدار را به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار دادند. از جمله عوامل موثر در بررسی اثرات زهکش ها: قطر، فاصله مرکز تا مرکز زهکش ها و فاصله از پاشنه بالادست سد می باشد که نقش به سزایی در مقدار نیروی بالابرنده و همچنین پایداری سد دارد. نتیجه نشان داد که افزایش قطر زهکش تأثیر

کمی نسبت به سایر پارامترها در کاهش نیروی بالابرنده دارد. کاهش فاصله زهکش ها از هم و کاهش فاصله از بالادست تا یک حد معینی می تواند نقش به سزایی در کاهش نیروی بالابرنده داشته باشد. با توجه به محدوده پارامترها، زهکش هایی با قطر ۱۵ سانتی متری و فاصله ۳ متری از هم بهترین عملکرد را از لحاظ کارایی در کاهش نیروی بالابرنده به دست داد. صدقی اصل و همکاران [۶] به بررسی اثر موقعیت بهینه پرده آب بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه های آبی با استفاده از مدل عددی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهترین مکان برای کنترل نشت و زیرشویی، پاشنه و پنجه سد می باشد.

مولندی و همکاران [۷] به منظور دستیابی به رفتار و شرایط مناسب زهکش ها از جمله شعاع (r)، زاویه (θ)، عمق (d) و فاصله از بالادست (s) در راستای کمینه کردن نیروی بالابرنده، معادله تراوش سه بعدی در حالت پایدار را به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار ANSYS ۵/۴ برای سد وزنی زاوین به عنوان مطالعه موردی، بررسی کردند. برای ایجاد مدل هندسی المان محدود، سد به همراه بخشی از سنگ بستر که در پلان از هر طرف سد به مقدار $H_{max}/2$ در اطراف آن و در عمق به مقدار H_{max} واقع است، انتخاب شد که در آن H_{max} ارتفاع بلندترین مقطع سد است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که با افزایش عمق زهکش ها تا عمقی معادل ۰/۸ ارتفاع سد در محل زهکش، کارایی آن ها قابل توجه بوده اما افزایش بیشتر از این، تاثیر چندانی در کارایی آن ها نخواهد داشت. هم چنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که میزان تاثیر افزایش زاویه زهکش با راستای قائم و متمایل کردن آن به سمت بالادست برای زهکش ها و بر حسب عمق متفاوت است. بدین مفهوم که در زهکش های کناری و در اعماق زیاد، مایل کردن به سمت بالادست، کارایی آن ها را افزایش می دهد، ولی برای زهکش های میانی، بهترین زاویه، بیشترین مقدار نخواهد بود. به عنوان نمونه در این سد که بیشترین زاویه ممکن از لحاظ اجرایی برای زهکش ها حدود ۲۳ درجه با راستای قائم است، در زهکش های واقع در کنسول مرکزی، زاویه ۱۵ درجه بهترین کارایی را در کاهش نیروی بالابرنده خواهد داشت. هم چنین مشخص گردید که افزایش قطر به مقدار ناچیزی در کارایی زهکش ها تاثیر خواهد داشت، به طوری که با تغییر قطر آن ها تا ۴ برابر کارایی در حدود ۱% تغییر کرده است. سلماسی و

1 Piping
2 Intensity factor
3 Weep hole

در بالا دست سدها، مسائل مربوط به تحکیم، تحلیل تنش در خاک و تحلیل پایداری سدها و شیب ها استفاده نمودند. هدف از این تحقیق، دستیابی به رفتار و موقعیت بهینه زهکش های لوله ای و افقی در زیر سد بتنی وزنی در راستای به حداقل رساندن نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشست می باشد. لذا در تحقیق حاضر برای شبیه سازی عددی، مقطع هندسی یک سد وزنی مد نظر قرار می گیرد. تاثیر قطر و موقعیت کارگذاری لوله های زهکش از لحاظ طولی و عمقی در زیر سد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مروری بر مطالعات گذشته نشان داد که بررسی زهکش های لوله ای و افقی در افزایش پایداری سدهای وزنی قبلا انجام نگردیده است. در برخی از مطالعات قبلی به نقش گالری زهکش در کاهش نیروی بالابرنده اشاره شده است ولی همان طوری که می دانیم در گالری زهکشی، لوله های زهکش به صورت عمودی در پی سد ایجاد می شوند. لذا پژوهش حاضر به اثر لوله های زهکش به صورت افقی می پردازد تا خلا موجود تحقیقاتی را پر نماید. در تحقیق حاضر بهترین موقعیت لوله زهکش ها به ازای حداقل نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشست تعیین می گردد و همچنین مقدار افزایش ضریب اطمینان در مقابل واژگونی نسبت به حالت بدون لوله زهکش و تاثیر احداث زهکش بر کاهش حجم سد وزنی تعیین و کلیه موارد با حالت بدون زهکش مقایسه می گردد. نمودارهای ارائه شده در این تحقیق می توانند مورد استفاده طراحان سدهای وزنی قرار گیرد.

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

۲-۱- معادلات حاکم

معادله نشست آب در محیط متخلخل به صورت رابطه ۱ است:

$$\frac{s}{B} \frac{\partial h}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm \frac{q}{B} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند:

K_x, K_y, K_z : هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در امتداد های x و y و z ; B : ضخامت لایه آبدار (m) ; q : دبی در واحد سطح لایه

همکاران [۸] تاثیر موقعیت لوله زهکش بر موقعیت سطح ایستابی و زیر فشار در زیر کانال های پوشش دار را به روش المان های محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از زهکش به عنوان عامل کارساز در حذف و تقلیل آثار سوء آب های زیر زمینی می تواند مطرح گردد. هم چنین هر چه زهکش ها در گوشه های تحتانی و عمق های پایین کف کانال قرار گیرند، سطح ایستابی در موقعیت پایین تری نسبت به کف کانال قرار گرفته و به تبع آن نیروی بالابرنده کمتر می شود. عابدی کوپایی [۲] مقادیر بار فشاری را با چهار روش بلای، لین، خوسلا و تفاضلات محدود بررسی کرد و به این نتیجه رسید که در دو روش بلای و لین زیر فشار کمتر از خوسلا می باشد و زیر فشار حاصل از تفاضل های محدود انطباق خوبی با روش خوسلا دارد. صیاد زاده و زمردیان [۹] خصوصیات جریان را در سدهای نفوذناپذیر با عرض متغیر و پرده سپری در عمق های مختلف پنجه پایین دست، روی خاک دو لایه و سه لایه بررسی کردند و نتایج به دست آمده را به صورت نمودارهای بی بعدی به نام منحنی های اسیلن ارائه دادند. پاکباز و همکاران [۱۰] با مدل SEEP-۳D به ارزیابی ساخت دیوار آب بند بتن پلاستیک در تکیه گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که با ساخت دیوار آب بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می یابد. رایموند و همکاران [۱۱]، نشان دادند که فشار بالابرنده در سدهای بتنی می تواند به روش تحلیل اجزاء محدود مدل سازی گردد. همچنین فشار بالابرنده در داخل تخته سنگ، بتن و فونداسیون در تحلیل رفتار ترک های داخل پی سد مؤثر خواهد بود. چاولا و همکاران [۱۲] نیز تأثیر مکان زهکش ها بر نیروی بالابرنده را بررسی کردند و بر طبق مطالعاتی که انجام دادند، بهترین موقعیت زهکش ها در پی سدهای وزنی را بر اساس نظریه نشست به روش تحلیلی ارائه دادند. به این ترتیب که مقادیر فشار بالابرنده در عرض پی سد وزنی در شرایطی که زهکش ها، قطر و فاصله برابر داشتند، به دست آمده و سپس به ازای فشار بالابرنده کل کمینه، موقعیت بهینه زهکش به دست آمده است. توفیق و اوریا [۱۳] به تحلیل غیرخطی جریان ناپایدار و تحکیم ناشی از نشست با استفاده از روش احجام محدود پرداختند و فرمول بندی احجام محدود را بر اساس معادلات تعادل و جریان دو بعدی به صورت کوپل و تابع زمان انجام دادند. لذا از این مدل جهت بررسی نشست تابع زمان، تأثیر تغییرات ارتفاع آب

حاضر و موقعیت لوله های زهکش در پی سد به همراه پارامترهای مورد مطالعه، نشان داده شده است. در شکل ۱، ارتفاع آب بالادست (حداکثر ارتفاع آب پشت سد ۷۶/۶ متر)، H_{dam} ارتفاع سد (۷۸/۳ متر)، ضخامت لایه ی نفوذپذیر (۳۰ متر)، L عرض کف سد (۶۱/۵ متر)، b عرض تاج سد (۴/۶ متر)، d قطر زهکش های تخلیه، Y_i موقعیت عمقی زهکش ها، X_i موقعیت طولی زهکش ها و t فاصله مرز های جانبی در سمت راست و چپ می باشند.

در تحقیق حاضر برای شبیه سازی عددی، از نرم افزار SEEP/W استفاده می گردد که محیط متخلخل خاک پی را به روش المان های محدود شبیه سازی می نماید. نرم افزار مذکور قادر است فشار آب منفذی در هر نقطه را با حل معادله لاپلاس و شرایط مرزی معین، محاسبه نماید [۱۴]. در شبیه سازی عددی امکان تاثیر فاصله مرزهای جانبی از جسم بتنی سد بر زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت وجود دارد. در این تحقیق که در حالت دو بعدی بررسی می شود، برای کاهش این تاثیر، نسبت فاصله این مرز ها از بدنه سد به ارتفاع آب پشت سد (t/H) متغیر و برابر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۸، ۱، ۱/۳، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲ و ۲/۵ در نظر گرفته شد و بهترین فاصله که مرزهای جانبی تاثیری بر نیروی زیر فشار، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت نداشته باشد، تعیین گردید. این موضوع در بخش نتایج و بحث ارائه شده است.

در این تحقیق برای بررسی و از بین بردن اثر تعداد المان بر نتایج

آبدار ($m^3/s/m^2$)، s : ضریب ذخیره (ضریب نگه داشت) لایه آبدار، h : بار آبی (m) و T : زمان (s).

اگر محیط همگن و ایزوتروپ باشد ($K_x = K_y = K_z$) خواهیم داشت:

$$\frac{s}{B} \frac{\partial h}{\partial T} = k \nabla^2 h \pm \frac{q}{B} \quad (2)$$

اگر هیچ جریانی به محیط خاک وارد و خارج نشود و در صورت دائمی بودن جریان می توان نوشت:

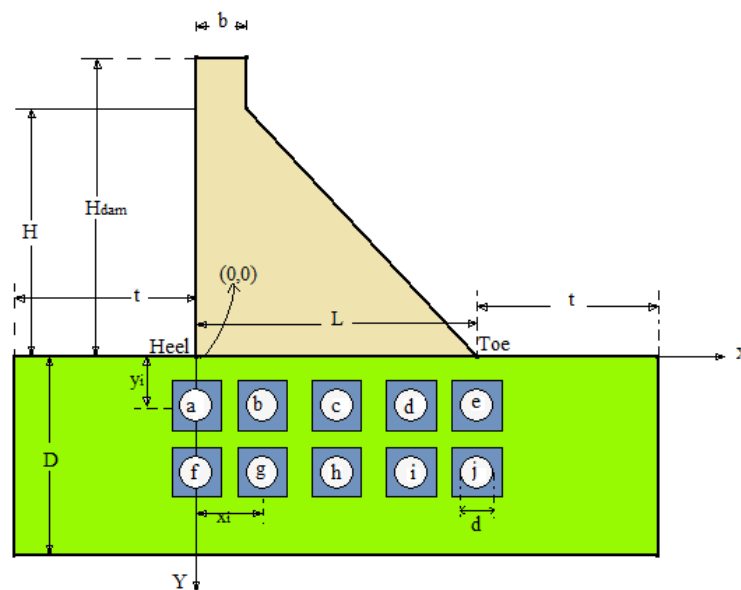
$$\frac{\partial h}{\partial T} = 0 \rightarrow k \nabla^2 h = 0 \quad (3)$$

می دانیم در محیط خاک $K \neq 0$ بنابراین معادله معروف لاپلاس مطابق رابطه ۴ حاصل می گردد:

$$\nabla^2 h = 0 \quad (4)$$

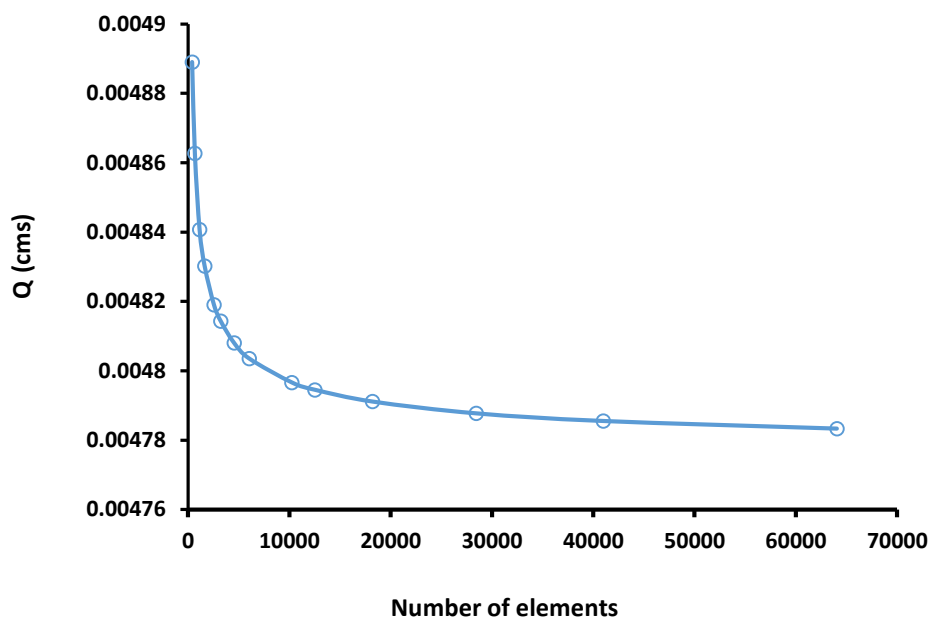
از معادله لاپلاس برای بررسی جریان نشت دائمی در محیط های همگن و ایزوتروپ استفاده می شود [۱].

در شکل ۱ مقطع هندسی سد وزنی مورد مطالعه در تحقیق



شکل ۱. نمای دو بعدی از سد وزنی و پی آن در تحقیق حاضر

Fig. 1. Two-dimensional view of the gravity dam and its foundation in the present study



شکل ۲. آزمون مستقل از المان
Fig. 2. The test of independent of element

سد (L/H) متغیر و برابر ۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۵ در نظر گرفته شده است. برای مقایسه میزان تاثیر موقعیت لوله زهکش و اندازه زهکش ها بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشست، مدل در حالت بدون لوله زهکش نیز برای حالت های مختلف (L/H) شبیه سازی گردید. در جدول ۱ محدوده تغییر پارامترهای بی بعد متغیر در تحقیق حاضر آورده شده است. ضمناً N تعداد زهکش می باشد.

در نرم افزار SEEP/W مدل های مختلفی برای حل مسئله موجود می باشد که بسته به شرایط تحقیق حاضر از مدل دو بعدی جهت شبیه سازی سد بتنی وزنی به همراه زهکش های افقی موجود در زیر آن استفاده گردیده است. جهت شبیه سازی عددی، شرایط مرزی^۱ در بالادست و پایین دست سد وزنی به ترتیب برابر با ارتفاع آب در مخزن و ارتفاع آب در پایاب سد به صورت بار فشاری^۲ تعریف گردیده است. لازم به ذکر است که به دلیل نبودن آب در پایین دست سد، شرط مرزی مربوطه به صورت بار آبی صفر^۳ در نظر گرفته شده است. همچنین برای زهکش های افقی در زیر سد وزنی بار آبی به صورت فشار صفر در نظر گرفته شده است. مصالح خاکی پی سد وزنی

حاصله، اندازه ی اضلاع المان ها متغیر در نظر گرفته شد و پس از اجرا کردن نرم افزار، نمودار شکل ۲ برای نمایش تاثیر تعداد المان ها در مقابل دبی خروجی رسم گردید و بهترین تعداد المان که المان های بیشتر از آن تاثیری بر مقدار دبی خروجی ندارند انتخاب گردید.

با توجه به شکل ۲ مشخص می شود که در حالتی که تعداد المان از ۳۵۰۰۰ المان در هر مدل بیشتر شود، تاثیر تعداد المان ها بر دبی نشستی خروجی از زیر پی ثابت می گردد. بنابراین در تمامی حالات مدل سازی، تعداد المان های موجود، از این تعداد المان بیشتر یا مساوی قرار داده شده است.

۲-۲- نحوه مدل سازی عددی

در شکل ۱ و جدول ۱ به ترتیب موقعیت و مختصات لوله های زهکش در پی سد وزنی نشان داده شده است. در این تحقیق ابتدا مدل عددی در حالتی که زهکش ها در مختصات ab، ac، ad، ...، ij تعبیه شده بودند به طور جداگانه با تغییر دادن قطر و پارامتر بی بعد L/H شبیه سازی گردید. به عبارت دیگر، موقعیت زهکش ها در ۴۵ حالت که در هر کدام قطر و پارامترهای بی بعد نیز تغییر می یافتند شبیه سازی شدند. برای عمومیت دادن نتایج حاصل از این شبیه سازی به اکثر سدها، نسبت عرض کف سازه به ارتفاع آب پشت

1 Boundary Condition
 2 Pressure Head
 3 Zero Pressure

جدول ۱. محدوده تغییرات عوامل بی بعد در تحقیق حاضر

Table 1. Range of dimensionless parameters changes in the present study

L/H	0.8	1	1.2	1.5	---
d/D	0.003	0.006	0.01	---	---
N	2	---	---	---	---
(x _i , y _i) (m,m)	a=(0,5) f=(0,8)	b=(15,5) g=(15,8)	c=(30.75,5) h=(30.75,8)	d=(45,5) i=(45,8)	e=(61.5,5) j=(61.5,8)

مرزها بر گرادیان هیدرولیکی خروجی بی تاثیر خواهد شد. با توجه به مطالب فوق در کلیه ی حالات مدل سازی در نرم افزار SEEP/W فاصله ی مرزهای جانبی از جسم بتنی سد ۲ برابر حداکثر ارتفاع آب بالادست در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مطابق بررسی منابع انجام گرفته توسط نویسندگان، تعیین حداقل فاصله مرزهای جانبی راست و چپ از بدنه سد قبلا در تحقیقات دیگران مشاهده نشد و همانطوری که اشاره گردید این امر برای شبیه سازی عددی لازم و ضروری است.

۳-۱- تاثیر قطر زهکش بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت

در شکل ۶ اثر قطر بر نیروی بالابرنده در حالت $L/H=1/5$ نشان داده شده است. ملاحظه می شود که مقدار نیروی بالابرنده به ازای $d/D=0/0.1$ بیشتر از مقدار نیروی بالابرنده به ازای $d/D=0/0.3$ می باشد. این تغییر نیروی بالابرنده به ازای تغییر قطر زهکش زیاد محسوس نمی باشد. بنابراین در اجرا، پیشنهاد می شود که انتخاب قطر زهکش با توجه به ملاحظات اجرایی صورت پذیرد. لازم به ذکر است که در شکل ۶، U/U_0 نشان دهنده ی نسبت برآیند نیروی بالابرنده در حالت وجود و عدم وجود زهکش در حالت های مختلف و d/D نسبت قطر زهکش به عمق لایه ی نفوذپذیر بستر می باشند که هر دو مورد بی بعد هستند. برای سایر موقعیت های تعبیه زهکش و حالت های مختلف L/H ، نمودار استخراجی مشابه نمودار شکل ۶، فقط با اختلاف میزان درصد کاهش نیروی بالابرنده می باشند. لذا برای اختصار، از آوردن بقیه نمودارها اجتناب شده است.

در شکل ۷ اثر قطر لوله زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی (در انتهای سد وزنی) در حالت $L/H=1/5$ نشان داده شده است.

در شکل ۷، i_e گرادیان هیدرولیکی خروجی می باشد. با توجه به

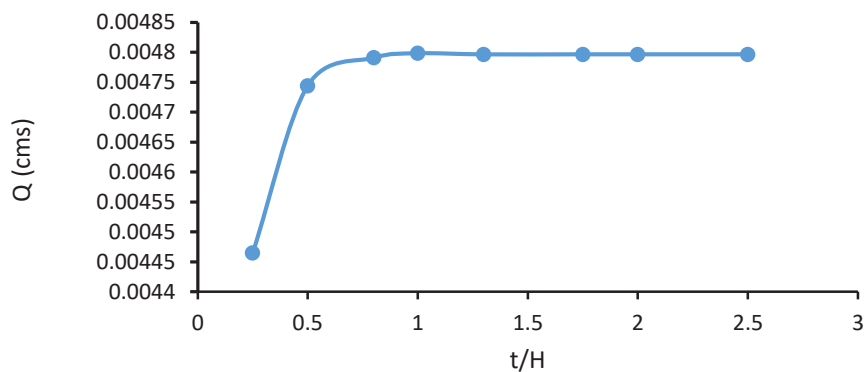
مورد مطالعه به صورت یک محیط متخلخل همگن^۱ و ایزوتروپ^۲ با ضریب هدایت هیدرولیکی، $0/0.002$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق لوله تخلیه داخل فیلتری مربعی به ضلع ۳۰ سانتی متر قرار دارد که ضریب هدایت هیدرولیکی آن ۱۰۰ برابر ضریب هدایت هیدرولیکی پی سد در نظر گرفته شده است تا سهولت تخلیه زه آبها میسر گردد.

۳- نتایج و بحث

بعد از حل معادله حاکم بر مسئله با شرایط مرزی مشخص شده، می توان نتایج حاصل از این مدل ها را استخراج نمود. برای از بین بردن اثر مرزهای جانبی در مدل عددی بر نتایج حاصله، نسبت فاصله این دیواره ها از بدنه سد به ارتفاع آب پشت سد (t/H) متغیر و برابر $0/25$ ، $0/5$ ، $0/8$ ، 1 ، $1/3$ ، $1/5$ ، $1/75$ ، 2 و $2/5$ در نظر گرفته شد و بهترین فاصله که مرزهای جانبی تاثیری بر نتایج مدل عددی نداشته باشد، مشخص گردید. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، وقتی نسبت فاصله مرزهای جانبی به ارتفاع آب از $1/3$ بیشتر می شود، فاصله مرزهای جانبی بر دبی نشتی خروجی بی تاثیر می گردد. در شکل ۴ و ۵ نیز تاثیر فاصله مرزهای جانبی به ترتیب برای نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی نشان داده شده است.

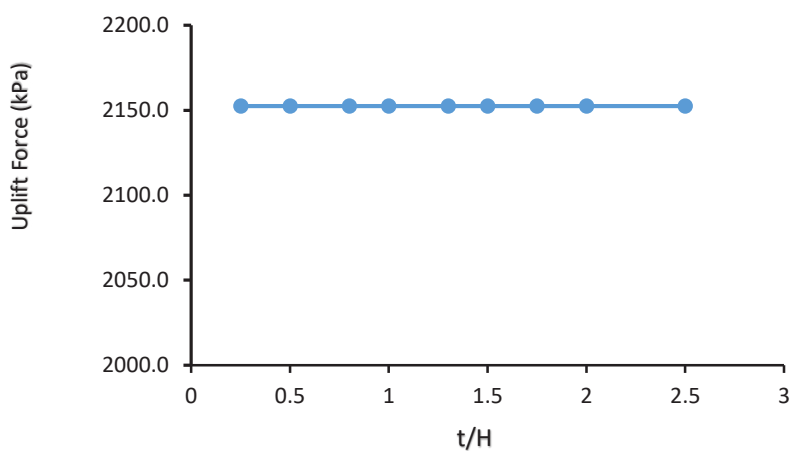
با توجه به شکل ۴ و شکل ۵ می توان اظهار داشت که فاصله ی مرزهای جانبی از جسم بتنی بدنه ی سد وزنی، بر نیروی زیر فشار بی تاثیر بوده ولی این فاصله بر گرادیان هیدرولیکی خروجی اثرگذار می باشد. با توجه به شکل ۵ اگر نسبت فاصله ی مرز جانبی به ارتفاع آب پشت سد بتنی وزنی (t/H) از $1/5$ بیشتر باشد، تاثیر فاصله ی

1 Homogenous
2 Isotropic



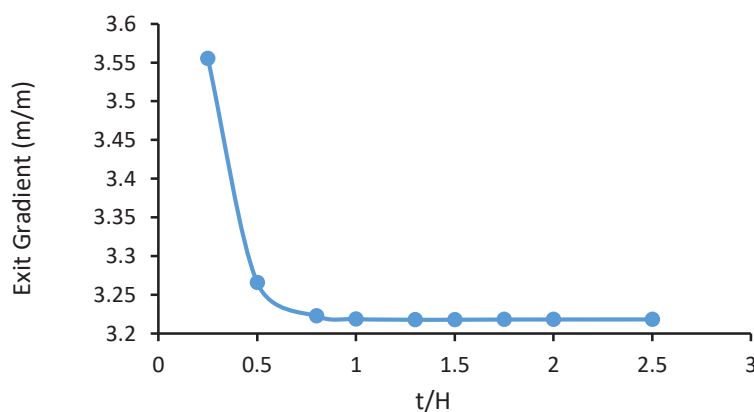
شکل ۳. تاثیر مرز های جانبی بر دبی نشتی خروجی

Fig. 3. The effect of lateral walls on the output seepage discharge



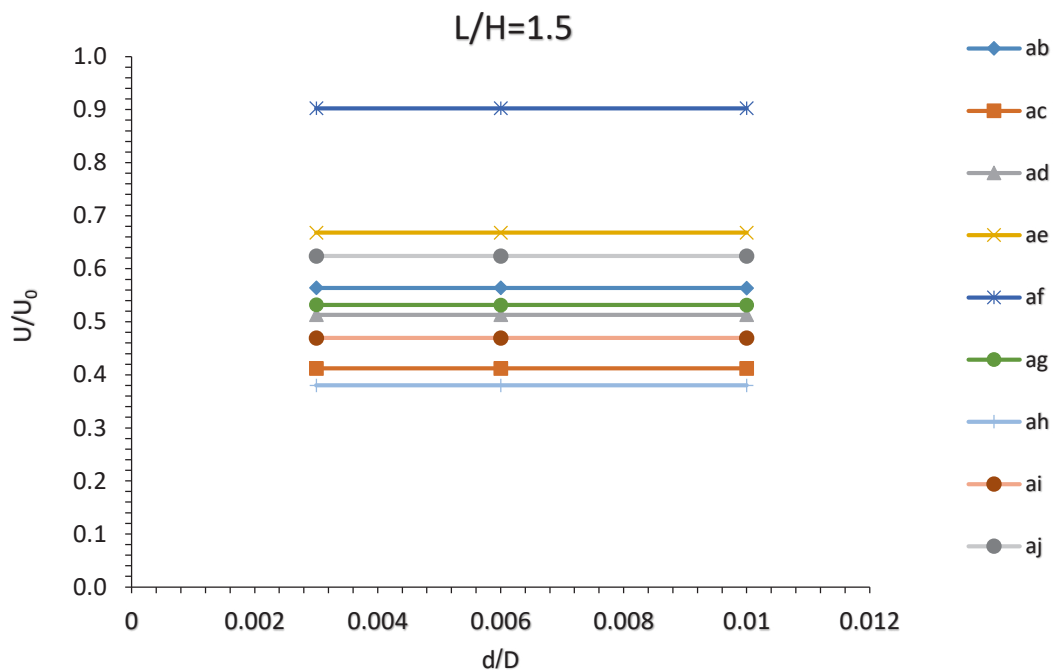
شکل ۴. تاثیر فاصله مرز های جانبی بر زیر فشار

Fig. 4. The effect of the side walls on the uplift force

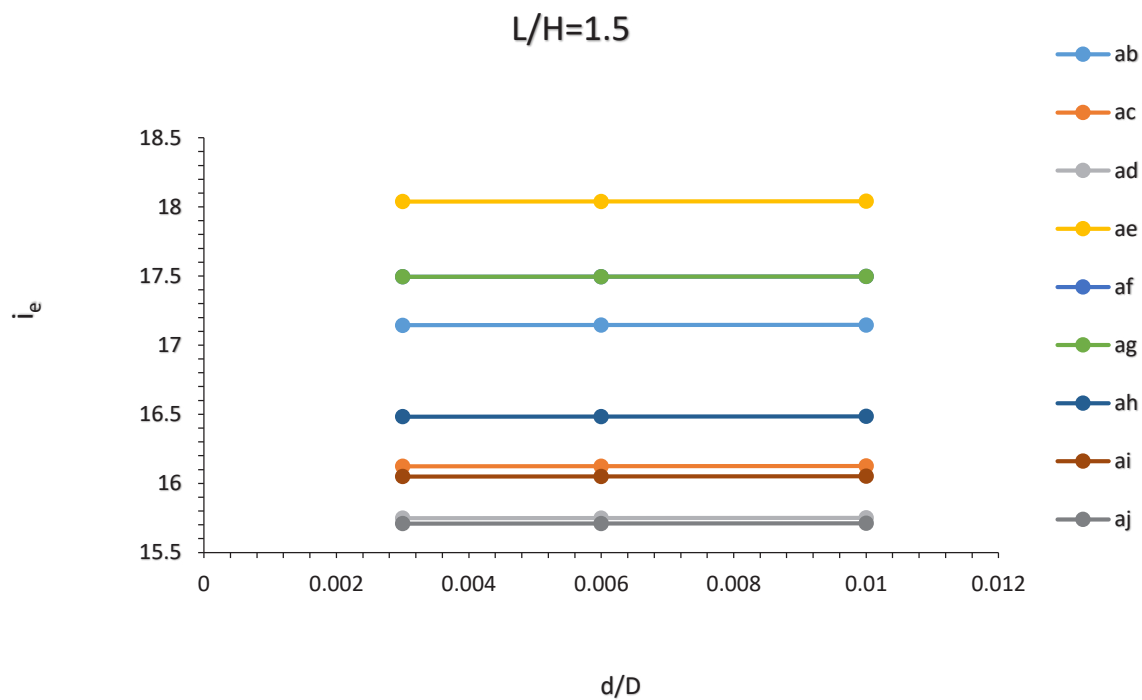


شکل ۵. تاثیر فاصله مرز های جانبی بر گرادیان هیدرولیکی خروجی

Fig. 5. Effect of the lateral side walls on the exit hydraulic gradient



شکل ۶. تاثیر قطر بر نیروی بالا برنده
Fig. 6. Effects of the drain pipe diameter on uplift force



شکل ۷. تاثیر قطر زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی
Fig. 7. Effects of drain pipe diameter on exit hydraulic gradient

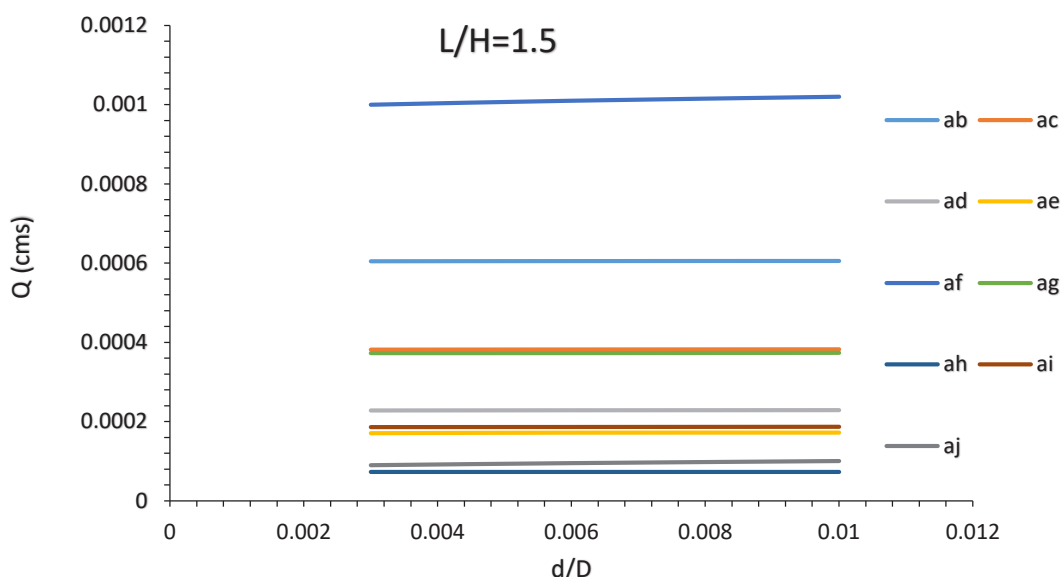
موقعیت های f و g قرار دارند کمترین مقدار خود را دارد. موقعیت fg در جدول ۲ نشان گر بهترین محل برای کاهش نیروی بالابرنده با ایجاد زهکش می باشد. همچنین با توجه به جدول ۲ ملاحظه می شود که با تغییر موقعیت زهکش در زیر سد وزنی، زمانی که زهکش ها به طور همزمان در موقعیت های d و h قرار دارند کمترین مقدار گرادیان هیدرولیکی خروجی اتفاق می افتد. موقعیت dh در جدول ۲ نشان گر بهترین محل برای کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی با ایجاد زهکش می باشد. به طور مشابه با توجه به جدول ۲ مشاهده می گردد که کمترین نشت از پی سد زمانی که زهکش ها به طور همزمان در موقعیت های g و h قرار دارند، اتفاق می افتد. همچنین با افزایش نسبت L/H (کاهش عمق آب بالادست) بیشترین کاهش U/U_0 ، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت در این نقطه ها اتفاق می افتد. برای حالت های مختلف L/H ، جدول استخراجی مشابه جدول فوق، فقط با اختلاف میزان درصد کاهش نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت برای هر حالت L/H می باشند. برای اختصار، از آوردن بقیه جدول ها اجتناب شده است.

شکل ۷، تاثیر قطر بر گرادیان هیدرولیکی خروجی مشابه تاثیر قطر بر نیروی بالابرنده می باشد. بنابراین تغییر قطر زهکش اثر کمی بر گرادیان هیدرولیکی خروجی و نیروی بالابرنده دارد. در شکل ۸ اثر قطر لوله زهکش بر نشت از پی سد وزنی در حالت $L/H=1.5$ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۸ مشاهده می گردد که تغییر قطر زهکش اثر زیادی بر نشت از پی سد وزنی ندارد. بنابراین تغییر این پارامتر تابع ملاحظات اجرایی می باشد.

۳-۲- تاثیر موقعیت زهکش بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت

جدول ۲ تاثیر موقعیت زهکش در زیر سد وزنی مورد مطالعه در تحقیق حاضر را بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت برای $L/H=1.5$ و $d/H=0.003$ نشان می دهد. با توجه به جدول ۲ ملاحظه می شود که با تغییر موقعیت زهکش در زیر سد وزنی نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود زهکش (U/U_0) زمانی که زهکش ها به طور همزمان در



شکل ۸. تاثیر قطر زهکش بر نشت از زیر سد وزنی
Fig. 8. Effects of drain pipe diameter on seepage under the gravity dam

جدول ۲. تاثیر موقعیت زهکش در زیر سد وزنی بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت

Table 2. Effect of drainage system position on uplift force, exit hydraulic gradient and seepage

Location	U/U ₀	i _e	Q (cms)	Location	U/U ₀	i _e	Q (cms)
ab	0.28	1.48	0.0014	cj	0.51	1.17	0.0025
ac	0.32	1.08	0.0011	de	0.68	1.10	0.0023
ad	0.40	0.73	0.0009	df	0.40	0.61	0.0008
ae	0.54	0.42	0.0007	dg	0.33	0.29	0.0007
af	0.42	2.26	0.0021	dh	0.46	0.28	0.0006
ag	0.28	1.17	0.0011	di	0.63	0.48	0.0009
ah	0.29	0.71	0.0007	dj	0.67	1.20	0.0027
ai	0.38	0.36	0.0006	ef	0.52	0.67	0.0031
aj	0.51	0.65	0.0006	eg	0.41	1.00	0.0022
bc	0.30	0.93	0.0010	eh	0.51	1.18	0.0019
bd	0.33	0.83	0.0007	ei	0.66	1.37	0.0018
be	0.41	0.77	0.0025	ej	0.87	0.87	0.0060
bf	0.27	1.99	0.0012	fg	0.26	1.03	0.0010
bg	0.33	1.08	0.0014	fh	0.30	0.58	0.0006
bh	0.28	0.94	0.0006	fi	0.37	0.46	0.0007
bi	0.31	0.79	0.0008	fj	0.50	0.80	0.0033
bj	0.39	0.77	0.0027	gh	0.28	0.41	0.0005
cd	0.47	0.49	0.0008	gi	0.31	0.64	0.0006
ce	0.52	0.35	0.0023	gj	0.39	1.15	0.0024
cf	0.32	0.95	0.0010	hi	0.45	0.65	0.0006
cg	0.30	0.83	0.0008	hj	0.50	1.31	0.0021
ch	0.46	0.61	0.0010	ij	0.65	0.81	0.0021
ci	0.46	0.51	0.0006				

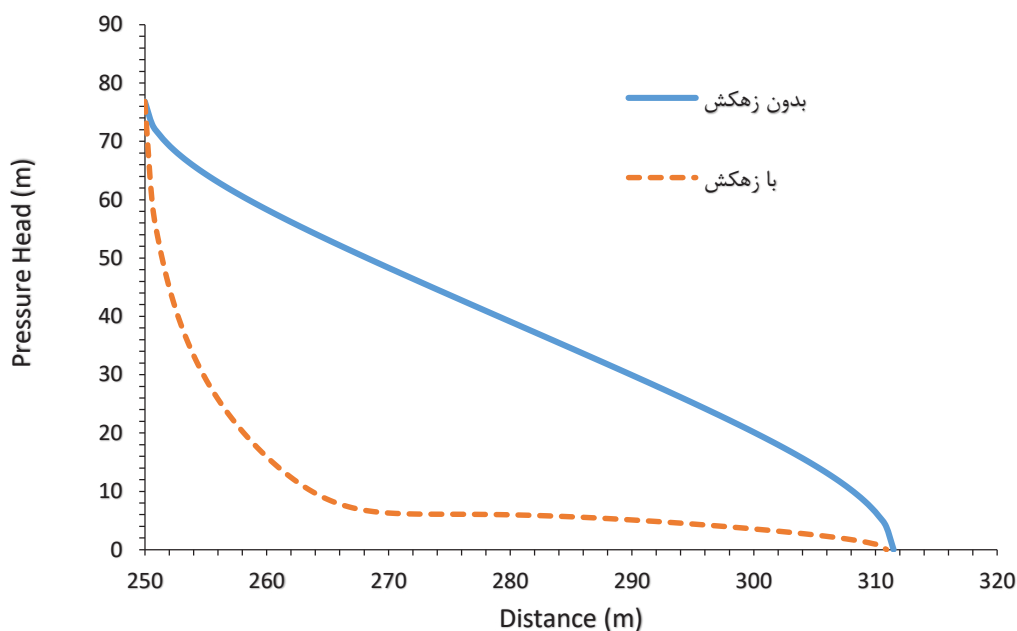
۳-۳- مقایسه ی وجود و عدم وجود زهکش بر نیروی بالابرنده،

گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت

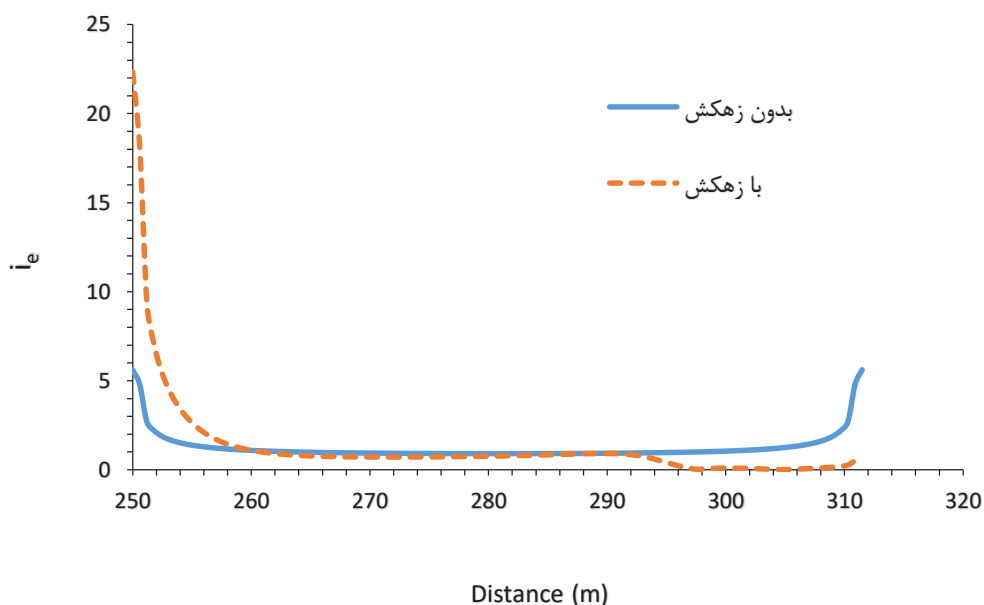
با توجه به مطالب ذکر شده، وجود زهکش در موقعیت f و g باعث کاهش مقدار قابل توجهی از نیروی بالابرنده می شود. برای مشاهده ی میزان این کاهش نیرو، نمودار توزیع نیروی بالابرنده در زیر سد وزنی در حالت وجود و عدم وجود زهکش رسم می گردد که در شکل ۹ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در نمودار شکل ۹، توزیع نیروی بالابرنده در زیر سد وزنی (محل اتصال سد به پی) رسم شده است.

در شکل ۹، مساحت ناحیه ی بین دو منحنی نیروی بالابرنده نشان گر میزان کاهش نیروی بالابرنده با کاربرد زهکش در زیر سد

وزنی می باشد که این مقدار برابر ۷۳/۹۳ درصد می باشد. شکل ۹ برای $L/H=0/8$ رسم شده است. برای حالت های مختلف L/H ، نمودارهای استخراجی مشابه نمودار فوق، فقط با اختلاف میزان درصد کاهش نیروی بالابرنده برای هر حالت L/H به دست آمدند. لذا برای اختصار، از آوردن بقیه نمودارها اجتناب شده است. با توجه به بررسی های انجام شده مشخص گردید که با افزایش L/H میزان U/U_0 ، کاهش پیدا می کند. لذا برای L/H های بزرگتر، مساحت بین دو نمودار در شکل ۹ بیشتر می گردد که نشان گر کاهش نیروی بالابرنده در اثر تعبیه ی زهکش می باشد. برای بررسی میزان تاثیر زهکش ها بر گرادیان هیدرولیکی خروجی در موقعیت های h و d در زیر سد وزنی، شکل ۱۰ برای حالت بدون زهکش و با زهکش رسم



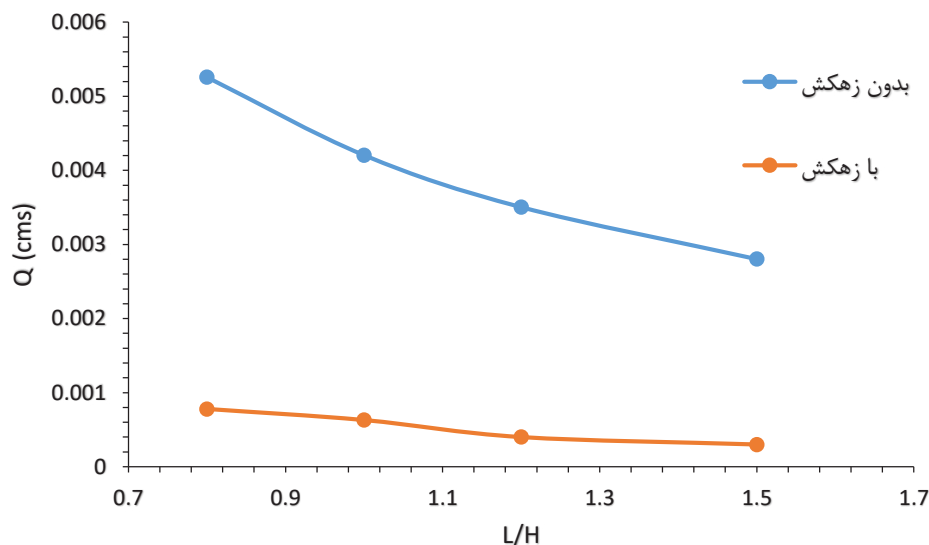
شکل ۹. مقایسه ی نحوه ی توزیع نیروی بالا برنده زیر سد وزنی در حالت وجود زهکش ها (در موقعیت f و g) با حالت عدم وجود زهکش
Fig. 9. Comparison the distribution of the uplift force under the gravity dam in the presence of the drain (in positions f and g) with the case of absence drain



شکل ۱۰. مقایسه گرادیان هیدرولیکی خروجی در حالت وجود و عدم وجود زهکش در موقعیت d و h
Fig. 10. Comparison of hydraulic gradient in the presence and absence of drain in positions d and h

شده است. ۳۱۱/۵ متری از پاشنه سد از ۵/۶۲ به ۰/۶۱ رسیده است. نمودار شکل ۱۰ برای حالت $L/H=0/8$ رسم شده است. برای سایر حالت های L/H نمودارهای استخراجی شبیه حالت فوق می باشند. با این تفاوت که، افزایش نسبت L/H باعث کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی

شده است. توجه به شکل ۱۰ مشاهده می شود که گرادیان هیدرولیکی خروجی در پنجه ی سد وزنی مورد مطالعه در تحقیق حاضر، مقدار قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده است. بدین معنی که i_e در فاصله



شکل ۱۱. مقایسه نشت در حالت وجود و عدم وجود زهکش در موقعیت h و g

Fig. 11. Comparison seepage rate in the presence and absence of drain in positions g and h

نیروی ناشی از وزن سازه (بار مرده) و F_p نیروی بالابرنده در زیر سازه هیدرولیکی می باشد. رابطه ضریب اطمینان در مقابل واژگونی با توجه به شکل ۱۲ به صورت زیر ساده سازی می گردد.

$$FS_{\text{overturning}} = \frac{\sum M_R}{\sum M_O} = \frac{F_2 \times T}{F_1 \times \frac{H}{3} + F_3 \times \frac{2L}{3}} = \frac{\rho_s \times V \times g \times T}{\gamma_w \times \frac{H^3}{6} + U \times \frac{2L}{3}} \quad (5)$$

در رابطه ۵، M_R لنگرهای مقاوم وارد بر سازه، M_O لنگرهای محرک وارد بر سازه ρ_s جرم مخصوص بتن که برابر $2/4$ تن بر متر مکعب می باشد، γ_w جرم مخصوص آب و برابر یک تن بر متر مکعب، U نیروی بالابرنده زیر سازه، V حجم سازه ی مورد نظر، g شتاب ثقل و $FS_{\text{overturning}}$ ضریب اطمینان در مقابل واژگونی می باشند. بقیه ی پارامترها روی شکل مشخص می باشند. برای محاسبه ی میزان تاثیر زهکش بر نیروی بالابرنده ابتدا با استفاده از رابطه ۵ برای تمامی حالات L/H میزان ضریب اطمینان در مقابل واژگونی محاسبه گردید. در مرحله ی بعد با تعبیه کردن زهکش در موقعیت f و g و کاهش نیروی بالابرنده و با در دست داشتن ضریب اطمینان در مقابل

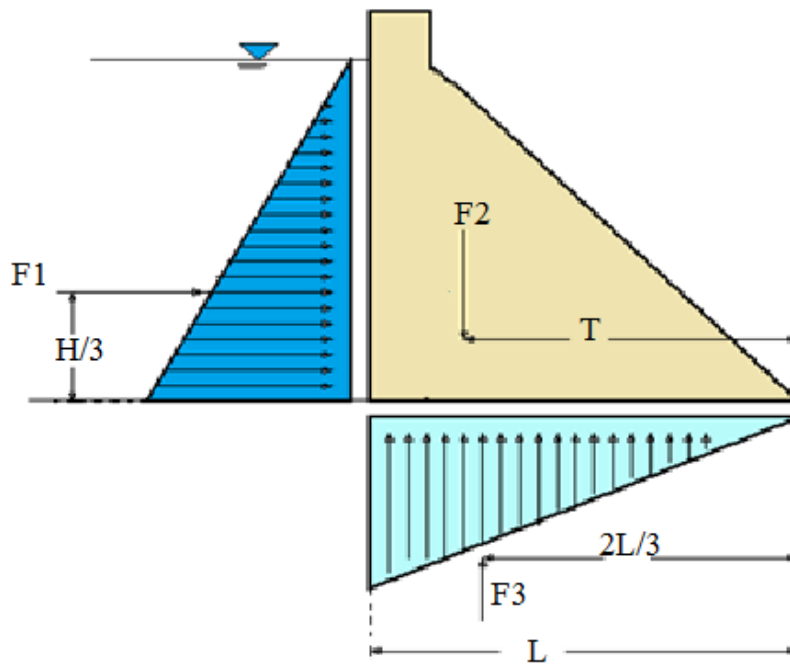
می گردد. لازم به ذکر است که افزایش مقدار L/H ناشی از کاهش عمق آب بالادست می باشد. برای مشاهده ی میزان تاثیر زهکش ها بر نشت، در موقعیت های g و h در زیر سد وزنی، شکل ۱۱ برای حالت بدون زهکش و با زهکش ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می شود که با افزایش L/H ، نشت از زیر سد وزنی مورد مطالعه کاهش پیدا می کند. همچنین با مقایسه ی مقدار عددی نشت در هر L/H مشاهده می گردد که نشت از زیر سد وزنی زمانی که زهکش ها به طور همزمان در دو موقعیت یاد شده قرار دارند کمتر از حالت بدون زهکش در همان L/H می باشد.

۳-۴- تاثیر وجود و عدم وجود زهکش بر حجم سد بتنی وزنی

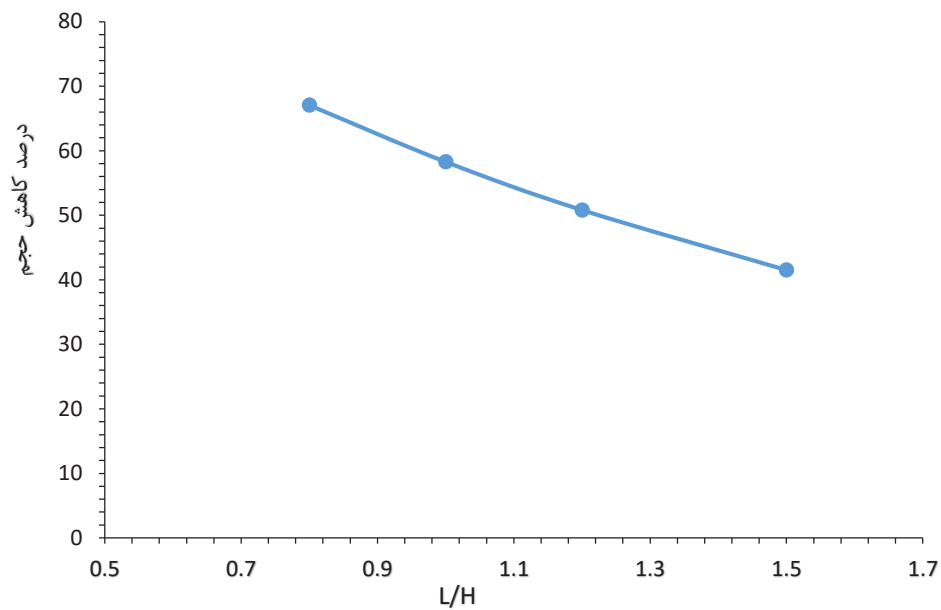
در این تحقیق ابتدا اثر زهکش در زیر سد وزنی بررسی شده و با جابجایی موقعیت آن ها و با تغییر پارامترهای موثر، میزان کاهش نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت ارزیابی گردید. در آخر بهترین موقعیت برای زهکش ها تعیین شد تا با به حداقل رساندن نیروی زیر فشار، گرادیان هیدرولیکی و نشت خروجی بتوان حجم سازه را تا رسیدن به ضریب اطمینان مطلوب کاهش داد. در زیر شکل شماتیک نیروهای اصلی وارده بر سازه هیدرولیکی مورد مطالعه در این تحقیق نشان داده شده است.

در شکل فوق، F_1 نیروی هیدرو استاتیک وارد بر سازه، F_p



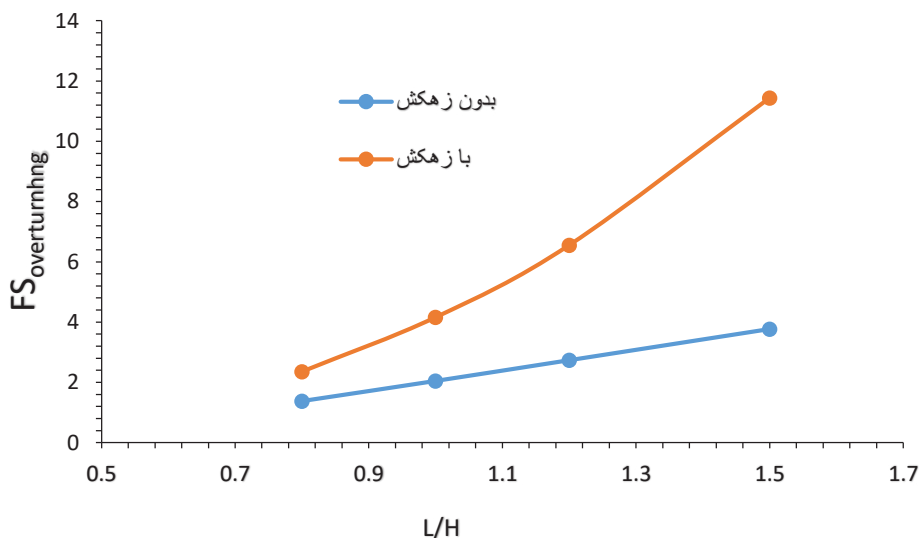
شکل ۱۲. شماتیک نیروهای اصلی وارد بر سد وزنی مورد مطالعه

Fig. 12. Schematic diagram of the main forces on the studied gravity dam



شکل ۱۳. تاثیر L/H بر کاهش حجم سازه

Fig. 13. The effect of L/H on structural volume reduction



شکل ۱۴. تاثیر L/H بر ضریب اطمینان در مقابل واژگونی در صورت وجود و عدم وجود زهکش
 Fig. 14. Effect of L/H on safety factor against overturning with and without of drains

نشت، معادلات رگرسیونی خطی و غیرخطی با استفاده از نرم افزار SPSS به دست آمد. در این محاسبات پارامتر U/U_0 (نسبت نیروی بالابرنده در حالت با لوله زهکش به حالت بدون لوله زهکش)، i_e (گرادین هیدرولیکی خروجی) و q/kH (نسبت دبی در واحد عرض به حاصل ضرب هدایت هیدرولیکی خاک پی و ارتفاع آب بالادست سد وزنی) به عنوان پارامتر وابسته و $\frac{L}{H}, \frac{F_1}{L}, \frac{F_2}{L}, \frac{F_1 L}{L H}, \frac{F_1}{L}, \frac{F_2}{L}, \frac{F_1}{L}$ به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شدند (از آنجایی که تاثیر پارامتر بی بعد d/D بر نیروی بالابرنده، گرادین هیدرولیکی خروجی و نشت ناچیز است، لذا در محاسبات رگرسیونی از این پارامتر استفاده نشده است). نتایج این محاسبات در جدول ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این معادلات برای محدوده شبیه سازی شده معتبر هستند. برای ارزیابی، توانایی و دقت معادلات تولید شده، از شاخص های آماری شامل ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

شکل ۱۵- الف و ب و ج پراکندگی داده ها برای نیروی بالابرنده، گرادین هیدرولیکی خروجی و نشت را نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می گردد که بیشتر نقاط بر روی یا در نزدیکی خط نیم ساز با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته اند که این مقبولیت هر

واژگونی با مجهول قرار دادن V در رابطه ی ۵ میزان تاثیر زهکش بر حجم سازه ی مورد نظر محاسبه گردید. در شکل ۱۳ نمودار تاثیر L/H بر میزان کاهش درصد حجم سد وزنی و در شکل ۱۴ نمودار منحنی ضریب اطمینان در مقابل واژگونی در حالت وجود و عدم وجود زهکش نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۳ می توان اظهار کرد که از آن جایی که افزایش نسبت L/H باعث کاهش نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود (U/U_0) می شود لذا افزایش L/H باعث کاهش درصد کاهش حجم سازه می گردد. کاهش حجم سازه با افزایش L/H کمتر می شود به عبارت دیگر هر چقدر عمق آب در پشت سد کمتر شود، حجم سد کمتر کاهش می یابد. با توجه به نمودار شکل ۱۴ مشخص است که وجود زهکش در زیر سد وزنی باعث افزایش ضریب اطمینان در مقابل واژگونی می شود. هم چنین افزایش نسبت L/H (کاهش ارتفاع آب در پشت سد وزنی) باعث افزایش ضریب اطمینان در مقابل واژگونی می گردد.

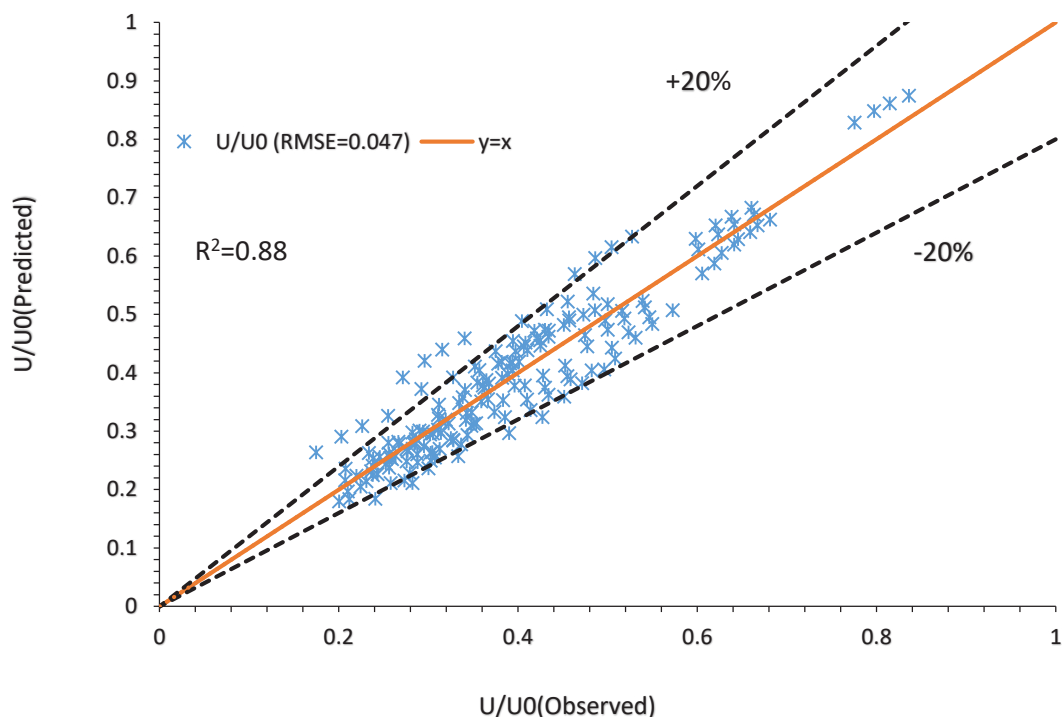
۳-۵- محاسبات رگرسیونی

به منظور برآورد نیروی بالابرنده، گرادین هیدرولیکی خروجی و

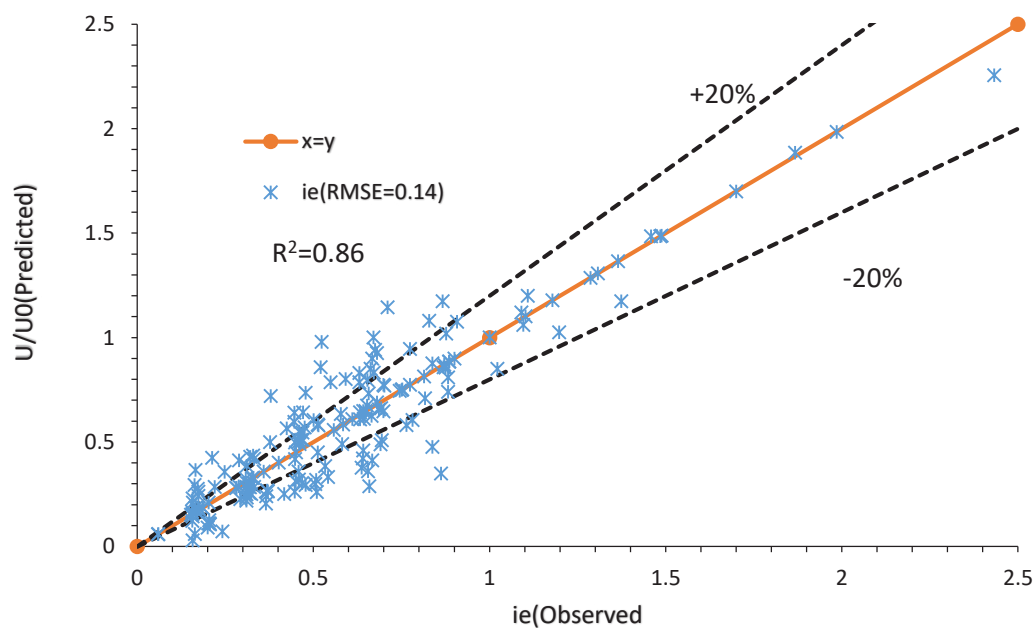
جدول ۳. معادله رگرسیونی خطی و غیر خطی برای محاسبه نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت با حضور دو زهکش در موقعیت های r1 و r2

Table 3. Linear and non-linear regression equation to obtain the uplift force, exit hydraulic gradient and seepage with two drains in positions of r1 and r2

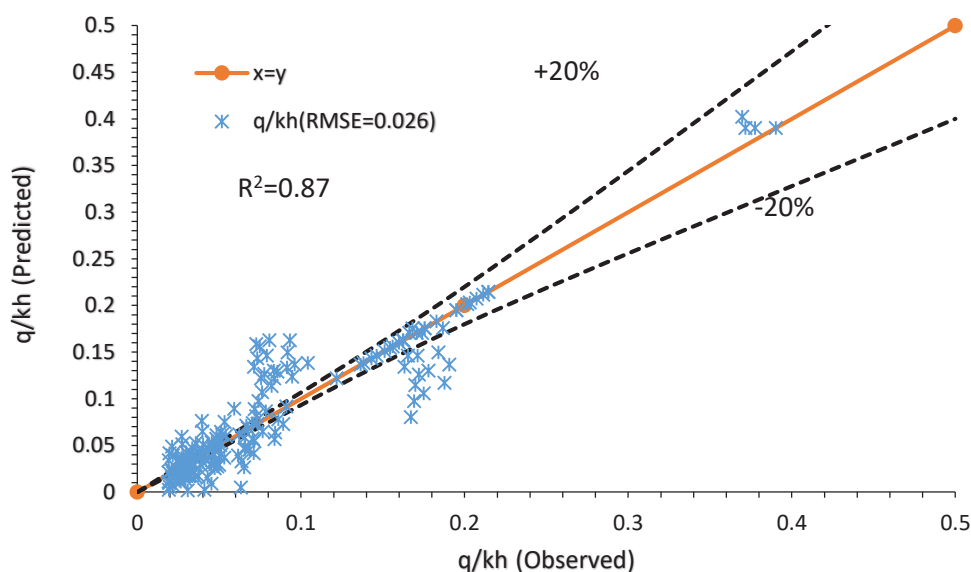
معادله	Eqs .No	R ²	RMSE
Uplift			
$\frac{U}{U_0} = \text{Exp}(-0.0047 \times \frac{L}{H} + 0.3819 \times \frac{r_1}{L} + 0.3476 \times \frac{r_2}{L} - 0.00138) + \frac{0.6584}{(r_1 \times r_2)^{0.1314}} - 1.9131$	(۶)	۰/۸۸	۰/۰۴۷
$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$			
$r_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$			
Exit hydraulic gradient			
$i_e = \text{Exp}(-0.7263 \times \frac{L}{H} + 2.3127 \times \frac{r}{L} - 1.2158) + \frac{0.227 \times \frac{L}{H}}{\frac{r}{L}} - 0.4636$	(۷)	۰/۸۶	۰/۱۴
$r = \frac{r_1 + r_2}{2}$			
Seepage			
$\frac{q}{kL} = 0.007 \times (\frac{L}{H})^{0.3538} + 0.4588 \times (\frac{r}{L})^{4.723} + 0.04 \frac{L}{H} - 0.206 \times \frac{r}{L} + \frac{0.08}{\frac{L}{H}}$	(۸)	۰/۸۷	۰/۰۲۶



شکل ۱۵ الف). پراکندگی داده ها برای نیروی بالابرنده با استفاده از رابطه ۶
Fig. 15. Scatter plot of the data points for uplift force using equation 6



شکل ۱۵ ب). پراکندگی داده ها برای گرادیان هیدرولیکی با استفاده از رابطه ۷
Fig. 15. Scatter plot of the data points for exit hydraulic gradient using equation 7



شکل ۱۵ (ج). مقایسه پراکندگی داده ها برای نشت با استفاده از رابطه ۸
Fig. 15. Scatter plot of the data points for seepage using equation 8

شکل ۱۵. مقایسه پراکندگی داده ها در دو حالت روش المان های محدود (محور افقی) و تخمین رگرسیونی (محور عمودی)

قرار گرفته باشند. مطابق جدول ۴ مشاهده می گردد که با ایجاد زهکش در زیر سد وزنی می توان نیروی بالابرنده، گرادبان هیدرولیکی خروجی و نشت از زیر سد را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. لازم به ذکر است که داده های جدول ۴ متفاوت از داده های استفاده شده برای استخراج روابط می باشند (قدوسی و همکاران ۱۳۹۵).

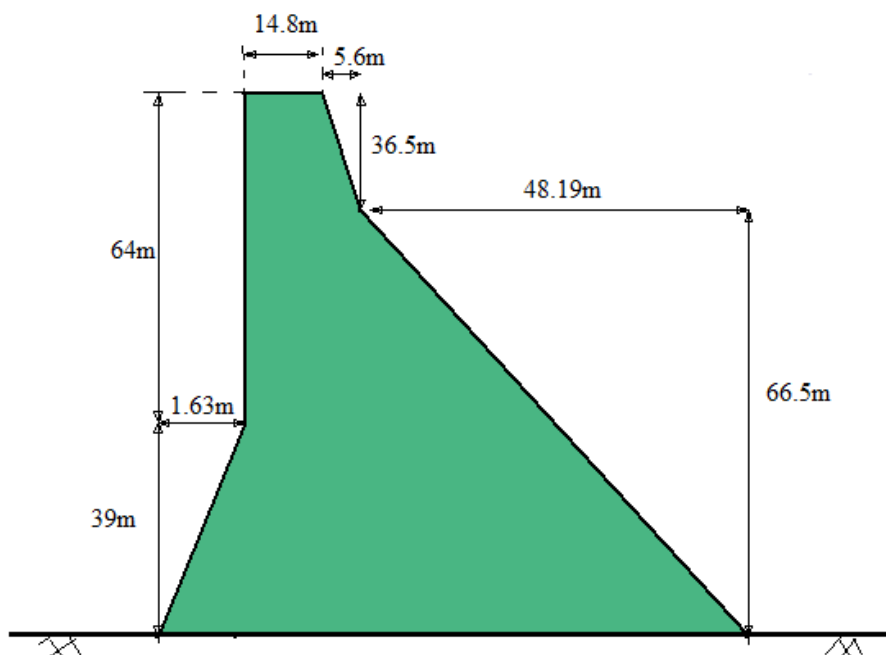
سه رابطه برای تخمین نیروی بالابرنده، گرادبان هیدرولیکی خروجی و نشت در زیر سد وزنی در صورت وجود زهکش در موقعیت های مختلف را نشان می دهد. در شکل ۱۵ محدوده اطمینان ۲۰ درصدی برای مجموعه نقاط رسم شده است.

۳-۶- مثال عددی

در این قسمت برای نشان دادن کاربرد روابط به دست آمده از رگرسیون (جدول ۳)، مثال عددی با استفاده از مشخصات سد کوینا ارائه می شود. سد بتنی وزنی کوینا ۱۰۳/۲ متر ارتفاع دارد و روی رودخانه کوینا در کشور هندوستان احداث شده است. ارتفاع تراز سیلابی و نرمال این سد به ترتیب برابر ۱۰۳ و ۹۱/۷۵ متر است. عرض تاج سد برابر ۱۴/۸ متر و حجم مخزن سد برابر ۲۷۹۷/۴ میلیون متر مکعب است. بهره برداری از این سد در سال ۱۹۶۴ آغاز شد. در شکل ۱۶ نمایی دو بعدی از سد بتنی وزنی کوینا نشان داده شده است. فرض می گردد که زهکش های لوله ای، با مشخصات مندرج در جدول ۴، در فواصل مختلف از هم دو به دو در زیر سد وزنی کوینا

۳-۷- مقایسه روش عددی با روش آزمایشگاهی صالحی هفشجانی و همکاران [۱۵]

صالحی هفشجانی و همکاران [۱۵] تاثیر موقعیت لوله های زهکش که به طور قائم در زیر سد وزنی قرار گرفته بودند را به روش آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد در حالتی که $a/L=0.4$ باشد، بهترین وضعیت برای قرار دادن زهکش های قائم برای کاهش نیروی زیر فشار است (a فاصله زهکش از پاشنه سد و L طول سد در پی است) که علت آن ایجاد فشار اتمسفریک در زیر پی سد است که خود سبب کاهش نیروی زیر فشار به مقدار چشمگیری می شود (شکل ۱۷).



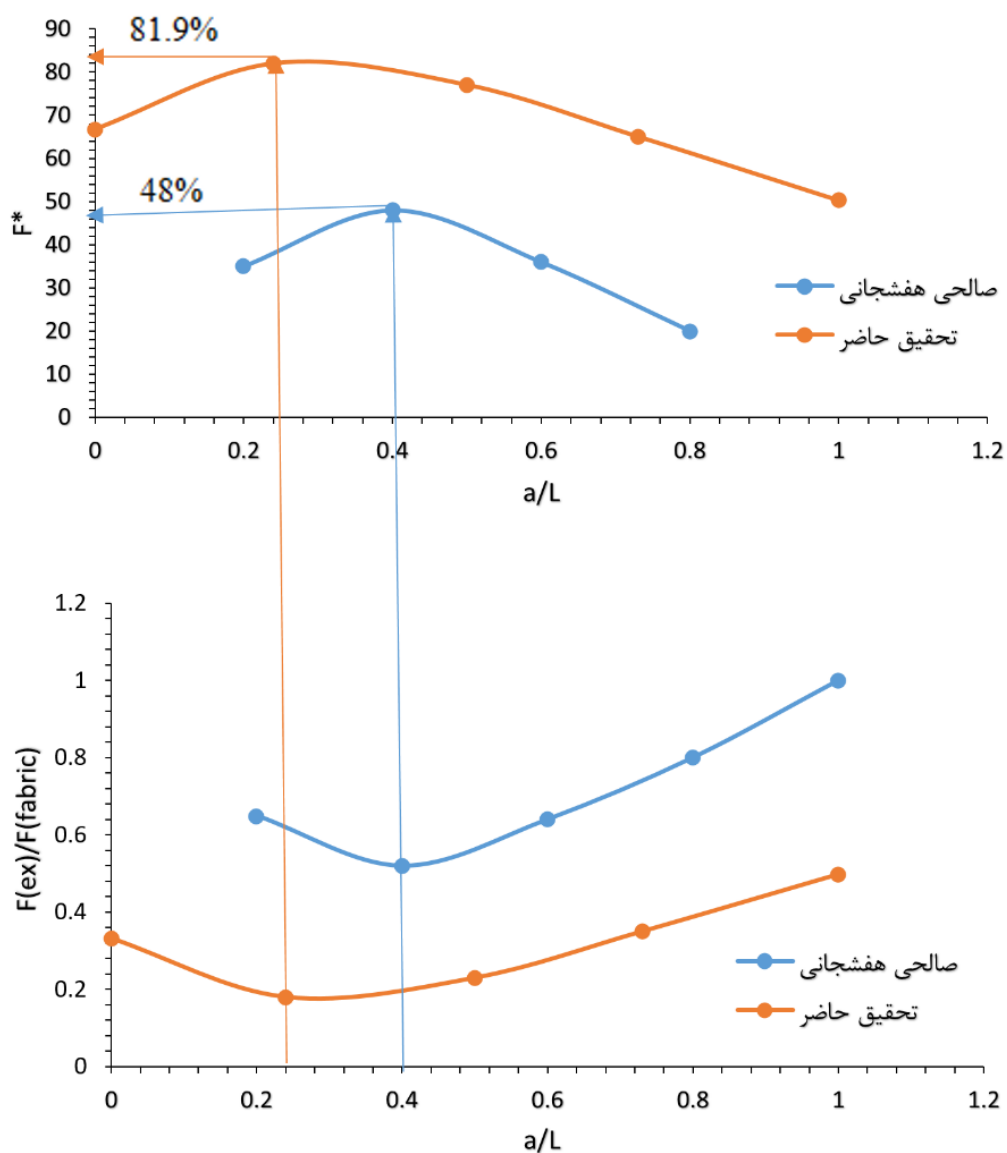
شکل ۱۶. نمایی دوبعدی از سد بتنی وزنی کوینا

Fig. 16. Two-dimensional view of the Koina gravity dam

جدول ۴. کاربرد روابط به دست آمده از رگرسیون در جدول ۳ برای محاسبه نسبت نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی (ie) و نشت در زیر سد وزنی

Table 4. Application of the regression equation obtained in table 3 to calculate the uplift force, exit hydraulic gradient (ie) and seepage under gravity dam

داده‌ها			بدون زهکش			با زهکش		
H (m)	r ₁ (m)	r ₂ (m)	Uplift (kN.m ⁻¹)*10 ³	i _e	Q (cms)	Uplift (kN.m ⁻¹)*10 ³	i _e	Q (cms)
100	8.00	17.00	35109.99	6.64	0.00622	11354.57	1.41	0.00189
100	35.90	45.28	35109.99	6.64	0.00622	14005.37	0.85	0.00129
100	15.81	35.90	35109.99	6.64	0.00622	10494.37	0.78	0.00115
90	8.00	17.00	31598.99	5.98	0.00560	9726.17	1.24	0.00155
90	35.90	45.28	31598.99	5.98	0.00560	12238.29	0.75	0.00101
90	15.81	35.90	31598.99	5.98	0.00560	9030.99	0.67	0.00088
80	8.00	17.00	28087.99	5.32	0.00498	8160.93	1.06	0.00125
80	35.90	45.28	28087.99	5.32	0.00498	10521.77	0.65	0.00077
80	15.81	35.90	28087.99	5.32	0.00498	7623.29	0.57	0.00065
70	8.00	17.00	24576.99	4.65	0.00435	6665.14	0.88	0.00100
70	35.90	45.28	24576.99	4.65	0.00435	8853.01	0.54	0.00058
70	15.81	35.90	24576.99	4.65	0.00435	6270.90	0.45	0.00048
60	8.00	17.00	21065.99	3.99	0.00373	5248.27	0.69	0.00080
60	35.90	45.28	21065.99	3.99	0.00373	7241.22	0.41	0.00044
60	15.81	35.90	21065.99	3.99	0.00373	4983.92	0.33	0.00035
50	8.00	17.00	17554.99	3.32	0.00311	3921.74	0.50	0.00064
50	35.90	45.28	17554.99	3.32	0.00311	5694.64	0.27	0.00034
50	15.81	35.90	17554.99	3.32	0.00311	3771.82	0.20	0.00026



شکل ۱۷. بهترین حالت a/L و کمترین میزان نیروی بالا برنده (صالحی هفشجانی و همکاران [۱۵])
 Fig 17. The best ratio of a/L and lowest uplift force (Salehi Hafshejani et al., 2007)

باعث کاهش نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت می گردد. تعبیه همزمان دو لوله زهکش که یک چهارم عرض کف سد وزنی (L/۲۵) از هم فاصله دارند، در پاشنه سد وزنی و در عمق D/۲۶ کمترین نیروی بالابرنده، تعبیه همزمان زهکش ها در فاصله سه چهارم عرض کف (L/۲۵) و یک دوم عرض کف (L/۵) از پاشنه به ترتیب در عمق های D/۱۶ و D/۲۶ کمترین گرادیان هیدرولیکی خروجی و تعبیه همزمان دو لوله زهکش در فاصله یک چهارم عرض کف سد (L/۲۵) و یک دوم عرض کف سد (L/۵) از پاشنه به ترتیب در عمق های D/۱۶ و D/۲۶ کمترین نشت از پی سد وزنی را خواهد داشت. همچنین مشخص گردید که انتخاب قطر لوله زهکش تخلیه تاثیر کمتری بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت دارد و تابع ملاحظات اجرایی می باشد. با مشخص شدن بهترین موقعیت برای تعبیه لوله های زهکش مشاهده گردید که کارگذاری لوله های زهکش در این موقعیت ها باعث کاهش ۴۱ تا ۶۷ درصدی در حجم سد وزنی مورد مطالعه و افزایش ۲ تا ۳ برابری ضریب اطمینان در مقابل واژگونی سازه مورد نظر می گردد. نتایج حاصل از این تحقیق با کار آزمایشگاهی سایر محققین نیز مطابقت قابل قبولی دارد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

B	ضخامت لایه آبدار ، m
b	عرض تاج سد، m
D	عمق لایه ی نفوذ ناپذیر ، m
d	قطر زهکش های تخلیه ، m
g	شتاب ثقل، m/s ^۲
h	بار آبی، m
Kx, Ky, Kz	هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در امتداد های x و y و z
H	ارتفاع آب بالادست ، m
H _{dam}	ارتفاع سد ، m
L	عرض کف سد، m
q	دبی در واحد سطح لایه آبدار ، m/s
S	ضریب ذخیره (ضریب نگه داشت) لایه آبدار

در نمودار شکل ۱۷ نشان دهنده ی نیروی زیر فشار به دست آمده در هر آزمایش، F_{fabric} نشان دهنده ی نیروی زیر فشار در حالت بدون زهکش و F* به صورت رابطه ۹ محاسبه می گردد.

$$F^* = 100 - \left(\frac{F_{ex}}{F_{fabric}} \right) \times 100 \quad (۶)$$

بمقایسه نمودارهای شکل ۱۷ که حاصل یک تحقیق آزمایشگاهی است و نتایج حاصل از این تحقیق که زهکش ها به صورت دوتایی و افقی در زیر سد وزنی شبیه سازی شده اند، مشاهده می گردد که با ایجاد زهکش در زیر سد وزنی می توان نیروی بالابرنده را به مقدار زیادی کاهش داد. شکل ۱۷ نمایانگر تطابق قابل قبول بین کار آزمایشگاهی انجام شده توسط صالحی هفشجانی و همکاران [۱۵] و کار عددی صورت گرفته در تحقیق حاضر می باشد. همچنین با مقایسه ی نمودارهای شکل ۱۷ و شبیه سازی های انجام گرفته در این تحقیق، می توان گفت که هر چقدر عرض کف سد وزنی بزرگ تر باشد، زهکش ها باید در نزدیکی پاشنه سد وزنی تعبیه شوند تا بیشترین تاثیر را بر نیروی بالابرنده داشته باشند. به همین دلیل نقاط حداقل و حداکثر نشان داده شده در شکل ۱۷، در تحقیق حاضر و تحقیق آزمایشگاهی صالحی هفشجانی و همکاران [۱۵] متفاوت از هم می باشند. همچنین وجود همزمان دو زهکش در زیر سد وزنی باعث کاهش بیشتر نیروی بالابرنده نسبت به وجود یک زهکش می شود.

۴- نتیجه گیری

یکی از نیروهای مخرب وارده به سدها ناشی از فشار بالابرنده است که به دلیل وجود آب در بالادست سد می تواند باعث کاهش مقاومت برشی بدنه و پی، ایجاد تنش کششی و یا واژگونی سد گردد. بنابراین برای رسیدن به یک طرح بهینه و کاهش ابعاد سد، اقداماتی در جهت کاهش نیروی بالابرنده انجام می شود که از جمله آن ها ایجاد زهکش در زیر پی سازه می باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از شبیه سازی عددی یک سد وزنی توسط نرم افزار Geo-Studio (SEEP/W)، موقعیت قرارگیری زهکش ها، میزان حداقل نیروی بالابرنده و گرادیان خروجی مشخص گردید. نتایج نشان داد که وجود لوله های زهکش در زیر سد وزنی،

- hydraulic conference, University of Kerman, 2005. (in Persian)
- [7] B. Melvandi, , Investigating the behavior of deep drainage in reducing lifting force in concrete concrete weights by solving three-dimensional drainage equation, in: 6th Iranian Hydraulic Conference, Shahrekord Iran 2007.
- [8] F. Salmasi, B. Nourani, B. Oghati, Numerical investigation of longitudinal drain effect under lined canal on uplift reduction, *Hydrogeology*, 1(2) (2017) 48-65. (in Persian)
- [9] F. Sayad zadeh, M.A. Zomorodian, Seepage analysis from layered soils using finite element method. . , in: 6th Iranian hydraulic conference, Shahrekord University, 2007. (in Persian)
- [10] M.S. Pakbaz, D. A., S. J., Evaluation of performance of plastic concert cutoff wall in Karkheh dam using 3-D Seepage analysis and measurement, *Journal of Applied Sciences*, 9(4) (2009) 724-730.
- [11] R. Raymond, R.W. , V. E., Uplift Modeling for Fracture Mechanics Analysis of Concrete Dams, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 120(10) (1994) 3025-3044.
- [12] A.S. Chawla, R. Thakur, K. Akhleash, , Optimum location of drain in concrete dams, *Energy Engineering, ASCE*, 116(7) (1990).
- [13] M. Tofigh, A. Oria, Nonlinear analysis of unstable flow and Consolidation caused by Seepage using the finite volume method. , in: Third national civil engineering congress, Tabriz University, 2007. (in Persian)
- [14] Anonymous, *Geo-Studio, Version 8.15.11236, User Manual*. GEOSLOPE International, Calgary, in, Alberta, Canada, 2012.
- [15] S.Salehi Hafshejani, S.H. Esmailzade, G.H. Panahi and K. Esmaili, Optimization of the drain position to reduce the uplift force in the foundation of dams, *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 22(4)(2017) 143-154. (in Persian).
- زمان، S T
 فاصله دیوار های ، m t
 حجم سازه ی مورد نظر ، m^3 V
 موقعیت طولی زهکش ها m Xi
 موقعیت عمقی زهکش ها ، m Yi
 علائم یونانی
 جرم مخصوص بتن برابر $2/4$ (ton/m^3) ρ_s
 جرم مخصوص آب و برابر ۱ (ton/m^3) ρ_w
- مراجع
- [1] R.S. Varshney, *Concrete Dams*, Oxford and IBH Publishing CO. New Delhi, 1982.
- [2] J. Abedi kopaye, Investigating effective factors in uplift pressure in sustainability of diversion dams Limited finite difference method, Tarbiat Modares University, 2001. (in Persian)
- [3] B. Mansuri, F. Salmasi, B. Oghati, Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam, *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(4) (2014) 1165-1173.
- [4] S. Azizi, F. Salmasi, A. Abbaspour, H. Arvanaghi, Weep hole and cut-off effect in decreasing of uplift pressure (case study: Yusefkand Mahabad diversion dam, *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 2(3) (2012) 97-101.
- [5] B. Nourani, F. Salmasi, A. Abbaspour, Numerical Investigation of Foundation Drains Performance in Decreasing Uplift Force of Concrete Gravity Dams, *Journal of Water and Soil Science*, 26(1/3) (2015) 113-125. (in Persian)
- [6] M. Sedghi asl, , Effect of optimal position cutoff wall to reduce Seepage and flow velocity under hydraulic structure using the numerical model, in: 5th Iranian

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Taheri Aghdam, F. Salmasi, H. Arvanaghi, Numerical Simulation of Effect of Drain Pipe in Uplift Force, Exit Hydraulic Gradient and Seepage in Gravity Dams. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53 (6) (2021) 2209-2230

DOI: [10.22060/ceej.2019.17183.6489](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.17183.6489)



