نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و هفتم /زمستان ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 27 / March 2021

شبیه‌سازی عددی تأثیر لوله زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی در سدهای وزنی

علی طاهری اقدم[۱]
فرزین سلماسی* [۲]
هادی ارونقی [۳]

چکیده

در این تحقیق تأثیر قطر و موقعیت لوله زهکش در پی سدهای وزنی بر روی نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی موردبررسی قرار گرفت. برای این کار، از یک مدل عددی با روش المان‌های محدود استفاده گردید و پی یک سد وزنی شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که وجود لوله زهکش در زیر سد وزنی، باعث کاهش نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌گردد. همچنین تعبیه لوله زهکش در فاصله یک‌چهارم عرض کف سد (۰/۲۵L) و سه‌چهارم عرض کف سد (۰/۷۵L) از پاشنه، به ترتیب کمترین نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی را خواهد داشت. تأثیر عمق کارگذاری لوله زهکش بر نیروی بالابرنده نیز بررسی گردید و مشاهده شد که ابتدا روند کاهشی و سپس روند افزایشی دارد. همچنین مشخص گردید که انتخاب قطر لوله زهکش تخلیه تابع ملاحظات اجرایی است. با مشخص شدن بهترین موقعیت برای تعبیه لوله زهکش مشاهده گردید ضریب اطمینان سازه در مقابل واژگونی افزایش ۱/۵ تا ۲ برابری دارد.

واژه‌های کلیدی:
سد وزنی، نیروی بالابرنده، لوله زهکش، گرادیان هیدرولیکی خروجی، المان‌های محدود.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز alitaheriagdam@gmail.com
۲*- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز Salmasi@tabrizu.ac.ir
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز arvanaghi.hadi@yahoo.com

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۷/ ۱۲/ ۶ تاریخ پذیرش: ۹۸/۸/۵

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

مقدمه

یکی از نیروهای مخرب وارده به سدها ناشی از فشار بالابرنده است که به دلیل وجود آب بالادست سد و نفوذ آن به بدنه و پی سد، در مقاطع مختلف می‌تواند نیروی رو به بالا را به وجود آورد که باعث کاهش مقاومت برشی محل اتصال بدنه و پی، ایجاد تنش کششی و واژگونی سد گردد. بنابراین برای رسیدن به یک طرح بهینه و کاهش ابعاد سد، اقداماتی در جهت کاهش نیروی بالابرنده انجام می شود که ازجمله آن‌ها ایجاد زهکش پی در پایین‌دست پرده آب‌بند است (ابریشمی و رجایی،۱۳۸۰). هنگامی‌که لنگر واژگونی حاصل از نیروی بالابرنده بر لنگر مقاوم حاصل از وزن سد غلبه کند، عمل واژگونی رخ می‌دهد. برای جلوگیری از وقوع این امر باید میزان نیروی بالابرنده به‌درستی معلوم شده و ابعاد متناسب با آن برای سازه سد در نظر گرفته شود. گرادیان هیدرولیکی خروجی نیز مهم‌ترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیر شویی پی یا پایپینگ[1] است. ازجمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیرفشار و همچنین کاهش گرادیان خروجی به کار می‌رود، ایجاد دیواره‌های آب‌بند است. دیواره‌های آب‌بند که غالباً نفوذ ناپذیر و یا خیلی کم نفوذ پذیرند، باعث کند کردن حرکت آب و کاهش انرژی آب در زیر سازه می‌شوند و درنتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می‌کنند. کاهش شدت زیرفشار ناشی از ایجاد دیواره آب‌بند تحت عنوان فاکتور شدت بیان می‌شود. نسبت واقعی زیرفشار در حالتی که دیواره آب‌بند وجود دارد به زیر فشار در حالت بدون دیواره آب‌بند را فاکتور شدت[2] می‌نامند (عابدی کوپایی،۱۳۸۰). منصوری و سلماسی در سال ۲۰۱۴ تأثیر طول زهکش افقی و دیوار آب‌بند بر نشت و فشار بالابرنده در سد خاکی همگن را با شبیه‌سازی عددی موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول زهکش افقی، میزان نشت و گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق دیواره آب‌بند، نشت از سد کمتر می‌شود. نصب دیوار آب‌بند در وسط فونداسیون منجر به کاهش ۱۹/۶۸درصدی گرادیان هیدرولیکی نسبت به نصب دیواره آب‌بند در بالادست می‌شود. عزیزی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر لوله‌ی بارباکان یا سوراخ[3] و دیوار آب‌بند بر نیروی بالابرنده در حوضچه آرامش سد انحرافی پرداختند. نتایج نشان داد که دیوار آب‌بند بالادست با عمق ۸ متر باعث کاهش نیروی بالابرنده در حدود ۶۳٪ و کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی ۷۹ ٪ نسبت به حالت بدون دیوار آب‌بند می‌شود. نورانی و همکاران در سال ۱۳۹۵ عملکرد زهکش در سدهای وزنی در حالت جریان پایدار را به کمک روش اجزاءمحدود موردبررسی قرار دادند. ازجمله عوامل مؤثر در بررسی اثرات زهکش‌ها قطر، فاصله مرکز تا مرکز زهکش‌ها و فاصله از پاشنه بالادست سد است که نقش بسزایی 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 زهکش‌ها از هم و کاهش فاصله از بالادست تا یک حد معینی می‌تواند نقش بسزایی در کاهش نیروی بالابرنده داشته باشد. با توجه به محدوده پارامترها، زهکش‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متری و فاصله ۳ متری از هم بهترین عملکرد را از لحاظ کارآیی در کاهش نیروی بالابرنده به‌دست می‌دهد. صدقی اصل و همکاران در سال ۱۳۸۰ به بررسی اثر موقعیت بهینه پرده 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 زیر شویی، پاشنه و پنجه سد است. سلماسی و همکاران در سال۱۳۹۵، تأثیر موقعیت لوله زهکش بر موقعیت سطح ایستابی (خط فریاتیک) و زیرفشار در زیر کانال‌های پوشش‌دار را به روش المان‌های محدود موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از زهکش به‌عنوان عامل کارساز در حذف و تقلیل آثار سوء آب‌های زیرزمینی می‌تواند مطرح گردد. هم‌چنین هرچه زهکش‌ها در گوشه‌های تحتانی و عمق‌های پایین کف کانال قرار گیرند، سطح ایستابی در موقعیت پایین‌تری نسبت به کف کانال قرارگرفته و به‌تبع آن نیروی بالابرنده کمتر می‌شود. ابول پور[4] در سال ۱۳۷۳ مدلی پیشنهاد نمود که زیر فشار وارده بر سازه‌های هیدرولیکی را

[1] -Piping
[2]- Intensity factor
[3] - Weep hole
[4] Abol Pour

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

با چند روش متفاوت محاسبه می‌کرد. وی در محاسبه میزان زیرفشار و زیر شویی از روش بلای، لین و خوسلا[1] و در محاسبه میزان نشت از روش خوسلا و شبکه جریان استفاده کرد. عابدی کوپایی در سال ۱۳۸۰ مقادیر بار فشاری را با چهار روش بلای، لین، خوسلا و تفاضلات محدود بررسی کرد. نتایج حاکی از آن بود که در دو روش بلای و لین زیرفشار کمتر از خوسلا است و زیرفشار حاصل از تفاضل‌های محدود انطباق خوبی با روش خوسلا دارد. صیاد زاده و زمردیان در سال ۱۳۸۶ خصوصیات جریان را در سدهای نفوذناپذیر با عرض متغیر و پرده سپری در عمق‌های مختلف پنجه پایین‌دست، روی خاک دولایه و سه لایه بررسی کردند و نتایج به‌دست‌آمده را به‌صورت نمودارهای بی‌بعدی به نام منحنی‌های اپسیلن[2] ارائه دادند. پاکباز و همکاران در سال ۲۰۰۹ با مدل SEEP-3D به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. رایموند و همکاران[3] در سال ۱۹۹۴، نشان دادند که فشار بالابرنده در سدهای بتنی می‌تواند به روش تحلیل اجزاءمحدود مدل‌سازی گردد. همچنین فشار بالابرنده در داخل تخته‌سنگ، بتن و فونداسیون در تحلیل رفتار ترک‌های داخل پی سد مؤثر خواهد بود. چاولا و همکاران[4] نیز در سال ۱۹۹۰ تأثیر مکان زهکش‌ها بر نیروی بالابرنده را بررسی کردند و بر طبق مطالعاتی که انجام دادند، بهترین موقعیت زهکش‌ها در پی سدهای وزنی را بر اساس نظریه نشت به روش تحلیلی ارائه دادند. به‌این‌ترتیب که مقادیر فشار بالابرنده در عرض پی سد وزنی در شرایطی که زهکش‌ها، قطر و فاصله برابر داشتند، به‌دست‌آمده و سپس به ازای فشار بالابرنده کل کمینه، موقعیت بهینه زهکش به‌دست‌آمده است. توفیق و اوریا در سال ۱۳۸۶ به تحلیل غیرخطی جریان ناپایدار و تحکیم ناشی از نشت با استفاده از روش احجام محدود پرداختند و فرمول‌بندی احجام محدود را بر اساس معادلات تعادل و جریان دوبعدی به‌صورت کوپل و تابع زمان انجام دادند. لذا از این مدل جهت بررسی نشت تابع زمان، تأثیر تغییرات ارتفاع آب در بالادست سدها، مسائل مربوط به تحکیم، تحلیل تنش در خاک و تحلیل پایداری سدها و شیب‌ها استفاده نمودند. چانگ و نیه[5] در سال ۱۹۹۶ عملکرد زهکش‌های ژئوکمپوزیت[6] استفاده شده در زیر پی سازه‌ها با سطح آب زیرزمینی بالا را بعد از سه سال موردمطالعه قرار دادند. در این بررسی، داده‌های برداشت شده از پیزومترها[7] نشان داد که زهکش‌ها فشار آب منفذی را تا حدود ۵۰٪ مقدار اولیه کاهش داده و هیچ‌گونه تغییری در عملکرد این زهکش‌ها بعدازاین مدت ایجاد نشده است. بهادری و همکاران در سال ۱۳۹۷ تأثیر افزودن پودر لاستیک به خاک ماسه‌ی اشباع را موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که دامنه شتاب پایه از عمق به سطح خاک افزایش می‌یابد. فشار آب حفره‌ای یکی از پارامترهای اساسی در تحلیل رفتار لرزه‌ای ماسه اشباع است. روانگرایی سبب کاهش مقاومت و سختی خاک در اثر افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. افزایش درصد پودر لاستیک سبب کاهش چشمگیر اضافه فشار آب حفره‌ای می‌گردد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش درصد پودر لاستیک، نسبت میرایی میانگین افزایش می‌یابد. مسلح‌سازی با پودر لاستیک تغییر شکل‌های ناشی از روانگرایی را کاهش می‌دهد.

در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی، مقطع هندسی یک سد وزنی مدنظر قرار می‌گیرد. تأثیر قطر و موقعیت کارگذاری لوله زهکش ازلحاظ طولی و عمقی در زیر سد، بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی موردبررسی قرار خواهد گرفت. بهترین موقعیت لوله زهکش به ازای حداقل نیروی بالابرنده و مقدار افزایش ضریب اطمینان در مقابل واژگونی نسبت به حالت بدون لوله زهکش تعیین می‌گردد.

مواد و روش‌ها

[1] Bligh, Lane and khosla
[2] Epsilon
[3] Raymond et al.
[4] Chawla et al.
[5] Chang and Nieh
[6] Geocomposite
[7] Piezometers

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

معادلات حاکم: معادله نشـــت آب در محیط متخلخل به‌صورت رابطه (۱) است:

رابطه (۱)

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

در رابطه (۱) پارامترها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

رابطه (۲)

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

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

رابطه (۳)

$$\frac{\partial h}{\partial T}=0\rightarrow k\nabla^2 h=0$$

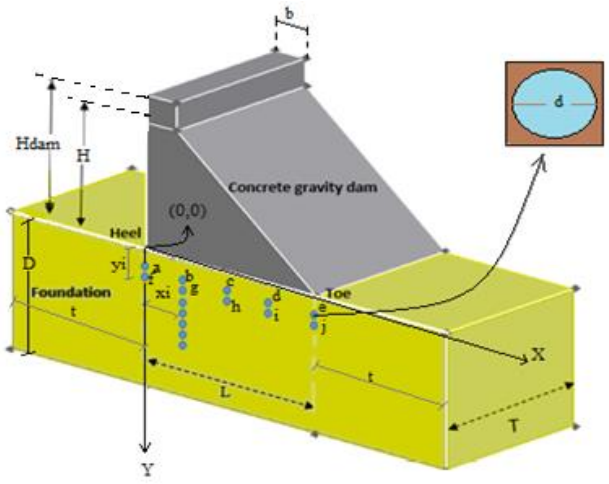
می‌دانیم در محیط خاک $K\neq 0$ بنابراین معادله معروف لاپلاس مطابق رابطه (۴) حاصل می‌گردد:

رابطه (۴)

$$\nabla^2 h=0$$

از معادله لاپلاس برای بررسی جریان نشت دائمی در محیط‌های همگن و ایزوتروپ استفاده می‌شود.

در شکل (۱) مقطع هندسی سد وزنی موردمطالعه در تحقیق حاضر و موقعیت لوله‌های زهکش در پی سد به همراه پارامترهای موردمطالعه، نشان داده‌شده است. در شکل (۱)، H ارتفاع آب بالادست (حداکثر ارتفاع آب پشت سد ۷۶/۶ متر)، H_{dam} ارتفاع سد (۷۸/۳ متر)، D ضخامت لایه‌ی نفوذپذیر (۳۰ متر)، L عرض کف سد (۶۱,۵ متر)، b عرض تاج سد (۴,۶ متر)، d قطر زهکش‌های تخلیه، Y_i موقعیت عمقی زهکش‌ها، X_i موقعیت طولی زهکش‌ها و t فاصله دیوارهای جانبی می‌باشند.



شکل (۱) : نمای سه‌بعدی از سد وزنی و پی آن در تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار SEEP/W استفاده می‌گردد که محیط متخلخل پی را به روش المان‌های محدود شبیه‌سازی می‌نماید. نرم‌افزار مذکور قادر است فشار آب منفذی در هر نقطه را با حل معادله لاپلاس و شرایط مرزی معین، محاسبه کند. نرم‌افزار SEEP/W از مجموعه نرم‌افزاری Geo-Studio2007 است که نسخه تجاری آن برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط شرکت Geo-Slope به بازار عرضه‌شده است که قادر است در تمامی شرایط ممکن با استفاده از روش قدرتمند المان محدود، جریان درون سد خاکی و فونداسیون سد بتنی را شبیه‌سازی کند. در نرم افزارSEEP/W برای حل معادلات دارسی[1]، لاپلاس[2] و درون‌یابی از روش عملگر ماتریس ژاکوب استفاده می‌گردد (بی‌نام، ۲۰۱۲).

در شبیه‌سازی عددی امکان تأثیر فاصله دیوارهای جانبی از جسم بتنی سد بر زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت وجود دارد. در این تحقیق که در حالت دوبعدی بررسی

[1] Darcy's equation

[2] Laplace

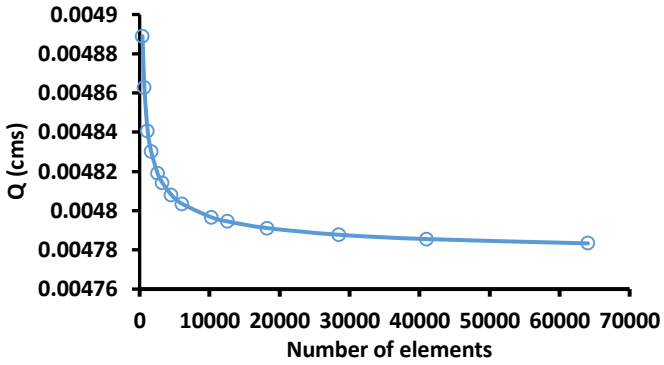
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

می‌شود، برای کاهش این تأثیر، نسبت فاصله این دیواره‌ها 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 دیوارهای جانبی تأثیری بر نیروی بالابرنده، گرادیان هیدرولیکی خروجی و نشت نداشته باشد، تعیین گردید. این موضوع در بخش نتایج و بحث ارائه‌شده است.

در این تحقیق برای بررسی و از بین بردن اثر تعداد المان بر نتایج حاصله، اندازه‌ی اضلاع المان‌ها متغیر در نظر گرفته شد و پس از اجرا کردن نرم‌افزار، نمودار شکل (۲) برای نمایش تأثیر تعداد المان‌ها در مقابل دبی خروجی رسم گردید و بهترین تعداد المان که المان‌های بیشتر از آن تأثیری بر مقدار دبی خروجی ندارند، انتخاب گردید.

(لازم به ذکر است که دبی در پنجه سد وزنی با مقطع زدن در نرم‌افزار SEEP/W به‌دست‌آمده است).



شکل (۲): تغییرات دبی نشتی از شالوده سد وزنی با تعداد المان‌ها (آزمون مستقل از المان)

با توجه به شکل (۲) مشخص می‌شود که در حالتی که تعداد المان‌ها از ۳۵۰۰۰ المان در هر مدل بیشتر شود، تأثیر تعداد المان‌ها بر دبی نشتی خروجی از زیر پی ثابت می‌گردد. بنابراین در تمامی حالات شبیه‌سازی‌های عددی، تعداد المان‌ها، بیشتر یا مساوی با این تعداد در نظر گرفته شد.

نحوه مدل‌سازی عددی: در شکل (۱) و جدول (۱) به ترتیب موقعیت و مختصات لوله‌های زهکش در پی سد وزنی نشان داده‌شده است. در این تحقیق ابتدا مدل عددی در هر یک از مختصات نوشته‌شده در جدول (۱) یعنی (a ، b، ...،g_5) با تغییر دادن قطر و پارامتر بی‌بعد L/H درصورتی‌که فقط یک زهکش وجود داشته باشد (N=۱) شبیه‌سازی گردید. برای عمومیت دادن نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به اکثر سدها، نسبت عرض کف سازه به ارتفاع آب پشت سد (L/H) متغیر و برابر ، ۰/۸ ، ۱، ۱/۲ و ۱/۵ در نظر گرفته‌شده است. برای مقایسه میزان تأثیر موقعیت لوله زهکش و اندازه زهکش‌ها بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی، مدل در حالت بدون لوله زهکش نیز برای حالت‌های مختلف (L/H) شبیه‌سازی گردید. در جدول (۱) محدوده تغییر پارامترهای بی‌بعد متغیر در تحقیق حاضر آورده شده است (N تعداد زهکش است).

جدول (۱): محدوده تغییرات عوامل بی‌بعد در تحقیق حاضر

L/H	۰،۸		۱		۱،۲		۱،۵		---	
d/D	۰،۰۰۳		۰،۰۰۶		۰،۰۱		---		---	
N	۱		---		---		---		---	
(x_i, y_i) (m,m)	a	(۰،۵)	b	(۱۵،۵)	c	(۳۰،۷۵،۵)	d	(۴۵،۵)	e	(۶۱،۵،۵)
	f	(۰،۸)	g	(۱۵،۸)	h	(۳۰،۷۵،۸)	i	(۴۵،۸)	j	(۶۱،۵،۸)
	g_1	(۱۵،۱۰)	g_2	(۱۵،۱۳)	g_3	(۱۵،۱۶)	g4	(۱۵،۲۰)	g_5	(۱۵،۲۳)

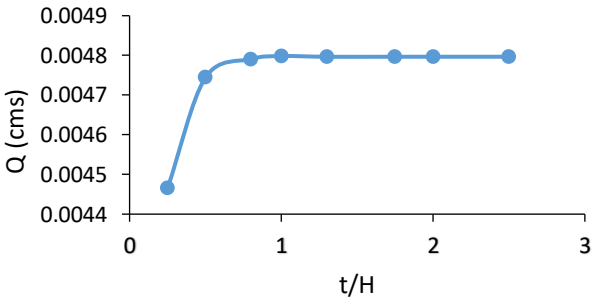
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

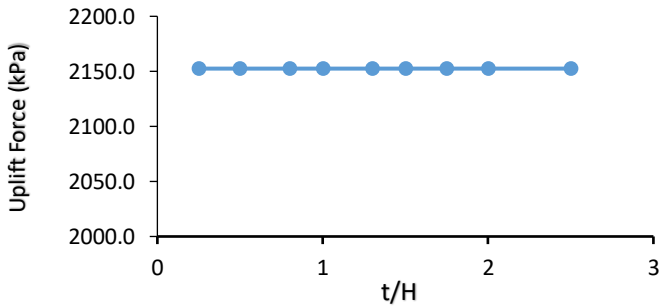
در نرم‌افزار SEEP/W مدل‌های مختلفی برای حل مسئله موجود است که بسته به شرایط تحقیق حاضر از مدل دوبعدی جهت شبیه‌سازی سد بتنی وزنی به همراه زهکش-های افقی موجود در زیر آن استفاده گردیده است. جهت شبیه‌سازی عددی، شرایط مرزی[1] در بالادست و پایین‌دست سد وزنی به ترتیب برابر با ارتفاع آب در مخزن و ارتفاع آب در پایاب سد به‌صورت بار فشاری[2] تعریف گردیده است. لازم به ذکر است که به دلیل نبودن آب در پایین‌دست سد، شرط مرزی مربوطه به‌صورت بار آبی صفر[3] در نظر گرفته‌شده گرفته‌شده است. همچنین برای زهکش‌های افقی در زیر سد وزنی بار آبی به‌صورت فشار صفر در نظر گرفته‌شده است. مصالح پی سد وزنی موردمطالعه به‌صورت یک محیط متخلخل همگن[4] و ایزوتروپ[5] با ضریب هدایت هیدرولیکی، ۰/۰۰۰۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته‌شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق لوله تخلیه، داخل فیلتری مربعی به ضلع ۳۰ سانتی‌متر قرار دارد که ضریب هدایت هیدرولیکی آن ۱۰۰ برابر ضریب هدایت هیدرولیکی پی سد در نظر گرفته‌شده است تا سهولت تخلیه آب‌های نشتی به‌درستی توسط فیلتر مدل‌سازی گردد.

نتایج و بحث

بعد از حل معادله حاکم بر مسئله با شرایط مرزی مشخص‌شده، می‌توان نتایج حاصل از این مدل‌ها را استخراج نمود. برای از بین بردن اثر دیواره‌های جانبی در مدل عددی بر نتایج حاصله، نسبت فاصله این دیواره‌ها 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 دیواره‌های جانبی تأثیری بر نتایج مدل عددی نداشته باشد، مشخص گردید. منظور از دیواره‌های جانبی همان مرزهای جانبی راست و چپ هنگام مدل‌سازی عددی است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده‌شده است، وقتی نسبت فاصله دیوارهای جانبی به ارتفاع آب از ۱/۳ بیشتر می‌شود، فاصله دیوارهای جانبی بر دبی نشتی خروجی بی تأثیر می‌گردد. در شکل‌های (۴) و (۵) نیز تأثیر فاصله دیواره‌های جانبی به ترتیب برای نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی نشان داده‌شده است.



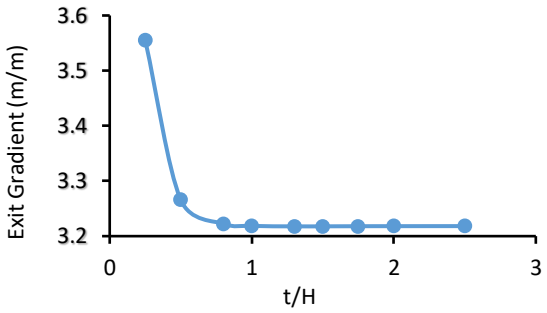
شکل (۳): تأثیر مرزهای جانبی بر دبی نشتی خروجی



شکل (۴): تأثیر فاصله مرزهای جانبی بر زیرفشار(فشار بالابرنده در پی سد)

[1]- Boundary Condition
[2]- Pressure Head
[3]- Zero Pressure
[4]- Homogenous
[5]- Isotropic

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

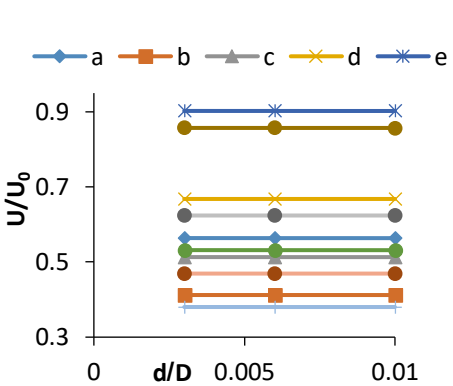


شکل (۵): تأثیر فاصله مرزهای جانبی بر گرادیان هیدرولیکی خروجی (در اولین نقطه خروجی جریان در پایاب سازه)

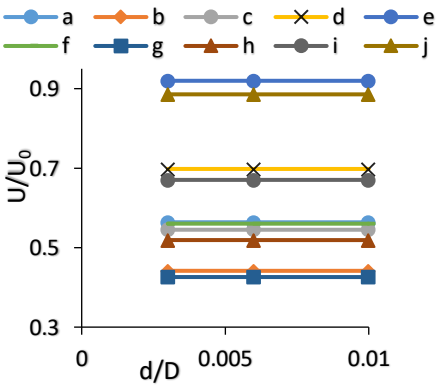
با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان اظهار داشت که فاصله‌ی مرزهای جانبی از جسم بتنی بدنه‌ی سد وزنی، بر نیروی زیر فشار بی‌تأثیر بوده ولی این فاصله بر گرادیان هیدرولیکی خروجی اثرگذار است. با توجه به شکل (۵) اگر نسبت فاصله‌ی مرزهای جانبی به ارتفاع آب پشت سد بتنی وزنی (t/H) از ۱/۵ بیشتر باشد، تأثیر فاصله‌ی مرزها بر گرادیان هیدرولیکی خروجی کنترل خواهد شد. با توجه به مطالب فوق در کلیه‌ی حالات مدل‌سازی، فاصله‌ی مرزهای جانبی از جسم بتنی سد ۲ برابر حداکثر ارتفاع آب بالادست در نظر گرفته شد.

تأثیر قطر زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی

در شکل (۶) (الف، ،ب، ج، د) اثر قطر بر نیروی بالابرنده در حالت‌های مختلف L/H نشان داده‌شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار نیروی بالابرنده به ازای d/D=۰/۰۰۳ بیشتر از مقدار نیروی بالابرنده به ازای d/D=۰/۰۱ است. این تغییر نیروی بالابرنده به ازای تغییر قطر زهکش زیاد محسوس نیست. بنابرین در اجرا، پیشنهاد می‌شود که انتخاب قطر زهکش با توجه به ملاحظات اجرایی صورت پذیرد. لازم به ذکر است که در شکل (۶)، U/U_0 نشان‌دهنده‌ی نسبت برآیند نیروی بالابرنده در حالت وجود و عدم وجود زهکش در حالت‌های مختلف و d/D نسبت قطر زهکش به عمق لایه‌ی نفوذپذیر بستر رودخانه می‌باشند که هر دو مورد بی‌بعد هستند.



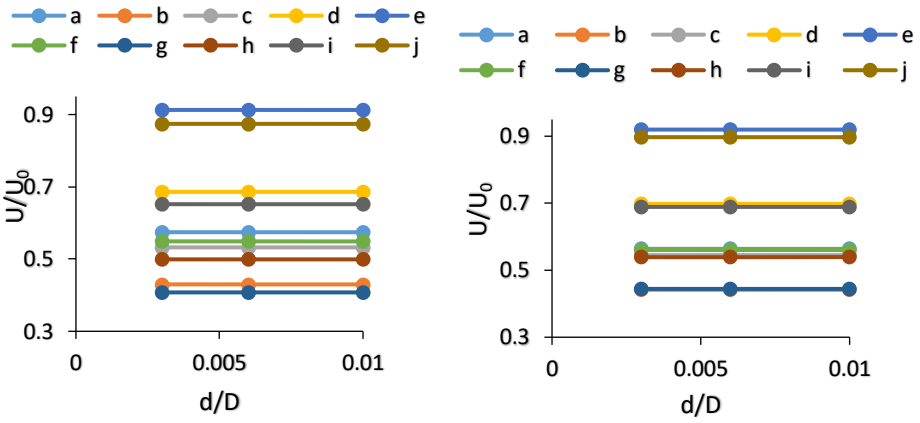
ب (L/H=1.2)



الف (L/H=1.5)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

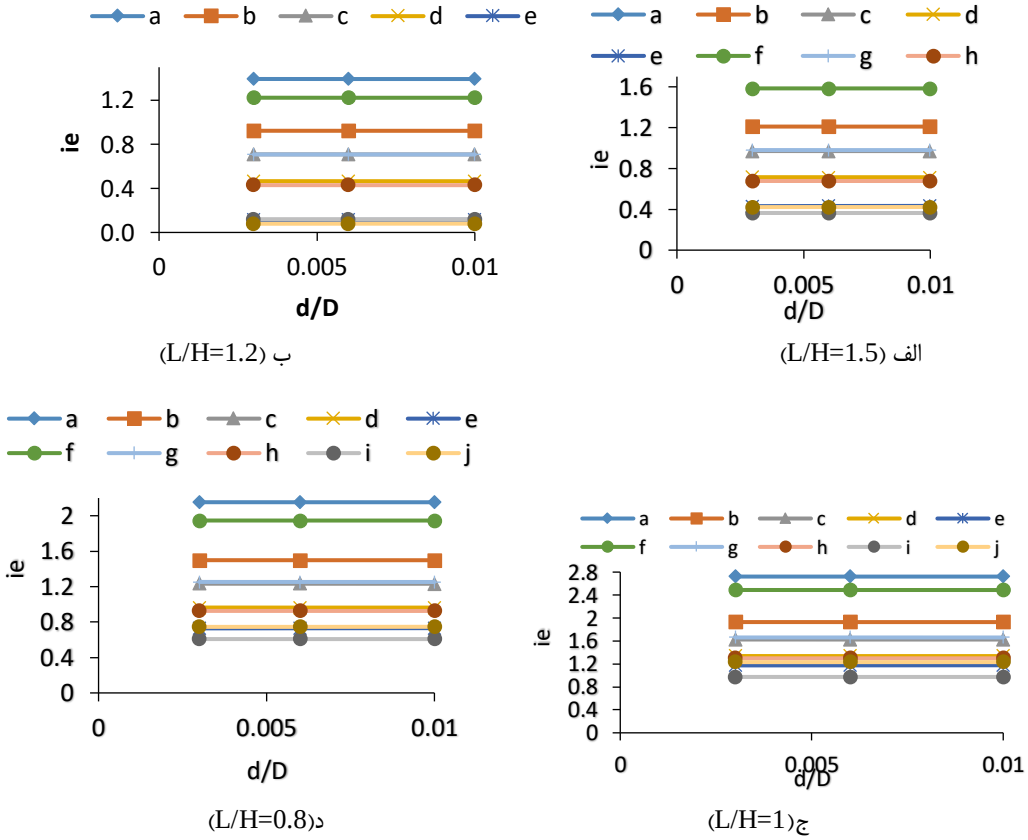
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]



د(L/H=0.8) ج(L/H=1)

شکل (۶): تأثیر قطر لوله زهکش بر نیروی بالابرنده زیر شالوده سد وزنی

در شکل(۷ – (الف، ،ب، ج، د)) اثر قطر لوله زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی (در انتهای سد وزنی) در حالت‌های مختلف L/H نشان داده‌شده است. گرادیان هیدرولیکی، افت بار هیدرولیکی در بین دونقطه مدنظر (طول مسیر جریان) است. در نرم‌افزار SEEP/W بعد از حل معادله حاکم بر جریان، می‌توان در خروجی نرم‌افزار، مقدار گرادیان هیدرولیکی را در نقاط مختلف به‌صورت گرهی و نموداری مشاهده نمود. ازآنجایی‌که هدف این تحقیق استخراج گرادیان هیدرولیکی در اولین نقطه خروجی جریان در پایاب سازه است، در این نقطه مقدار گرادیان استخراج گردید.



ب (L/H=1.2) الف (L/H=1.5)

د(L/H=0.8) ج(L/H=1)

شکل (۷): تأثیر قطر زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی (در پایاب سد وزنی)

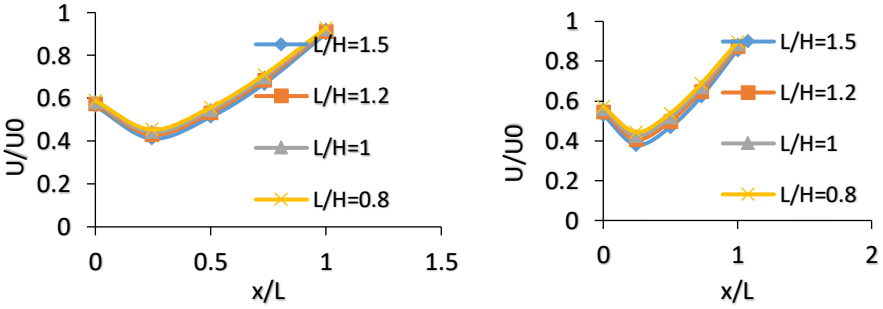
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

در شکل (۷) منظور از i_e گرادیان هیدرولیکی خروجی است. با توجه به شکل (۷)، تأثیر قطر زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی مشابه تأثیر قطر بر نیروی بالابرنده است. بنابرین تغییر قطر زهکش اثر کمی بر گرادیان هیدرولیکی خروجی و نیروی بالابرنده دارد.

تأثیر موقعیت زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی

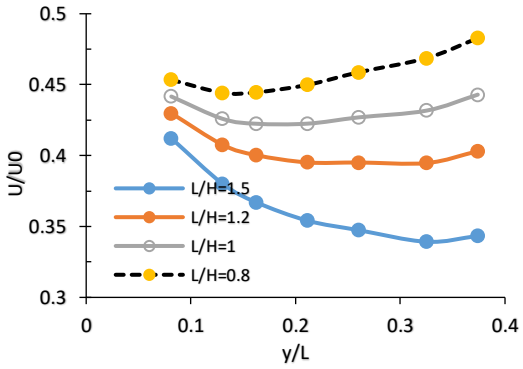
شکل (۸ – (الف)) تأثیر فاصله‌ی زهکش از محور yها (پاشنه‌ی سد) را در ردیف اول و شکل (۸ - (ب)) تأثیر فاصله‌ی زهکش از پاشنه‌ی سد را در ردیف دوم بر نیروی بالابرنده نشان می‌دهند.



الف (ردیف اول) ب (ردیف دوم)

شکل (۸): تأثیر فاصله‌ی افقی زهکش‌ها بر نیروی بالابرنده

با توجه به شکل (۸) ملاحظه می‌شود که با تغییر فاصله‌ی زهکش از پاشنه‌ی سد وزنی (بالادست) به‌طرف پنجه (پایین‌دست)، نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود زهکش (U/U_0) در حالت‌های مختلف نسبت L/H، ابتدا روند نزولی و سپس روند صعودی دارد. نقطه‌ی حداقل نسبی در نمودارهای شکل (۸ – (الف و ب))، نشانگر بهترین محل برای کاهش نیروی بالابرنده با ایجاد زهکش است. درواقع نقطه‌ی حداقل نسبی در نمودارهای شکل (۸)، در حالت الف مربوط به زهکشb و در حالت ب مربوط به زهکش g می‌باشند (مراجعه به شکل (۱)).



شکل (۹): تأثیر عمق زهکش بر نیروی بالابرنده

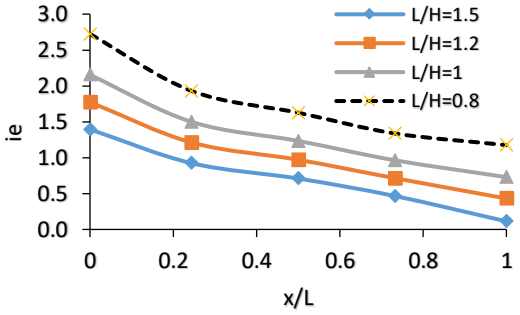
همچنین با افزایش نسبتL/H بیشترین کاهش U/U_0 در این نقطه‌ها اتفاق می‌افتد. با مقایسه‌ی نیروی بالابرنده در زهکش‌های b و g مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق زهکش، نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود زهکش در حالت‌های مختلف نسبت L/H، کاهش پیدا می‌کند. برای نشان دادن تأثیر عمق بر U/U_0 در حالت‌های مختلف L/H، با تغییر دادن عمق زهکش در امتداد زهکشb و g نمودار شکل (۹) به دست می‌آید. به‌بیان‌دیگر این بار به‌جای تغییر موقعیت زهکش در امتداد افقی، آن را در امتداد قائم جابجا می‌کنیم.

شکل (۹) نشان می‌دهد که افزایش عمق تعبیه‌ی زهکش در زیر سد بتنی وزنی، ابتدا باعث کاهش U/U_0 و سپس باعث افزایش U/U_0 می‌شود. نقطه‌ی حداقل نسبی، برای حالت-های مختلف L/H تغییر می‌کند. با توجه به نمودار شکل (۹) می‌توان گفت که هرچه نسبت عرض کف سد بتنی وزنی به ارتفاع آب آن (L/H) بیشتر باشد، نقطه‌ی حداقل نسبی در اعماق بیشتری اتفاق می‌افتد. به‌عبارت‌دیگر هرچه L/H افزایش یابد، باید زهکش در عمق بیشتری تعبیه شود تا بیشترین کاهش U/U0 اتفاق افتد.

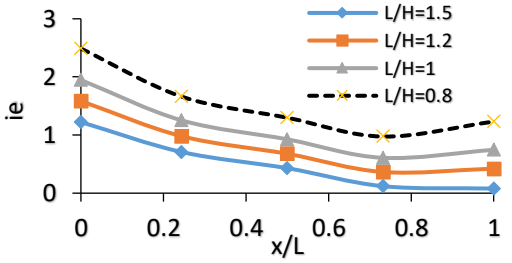
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

شکل (۱۰ – (الف)) تأثیر فاصله‌ی زهکش از پاشنه‌ی سد را در ردیف اول و شکل (۱۰ – (ب)) تأثیر فاصله‌ی زهکش از پاشنه‌ی سد را در ردیف دوم بر گرادیان هیدرولیکی خروجی نشان می‌دهند.



الف(ردیف اول)



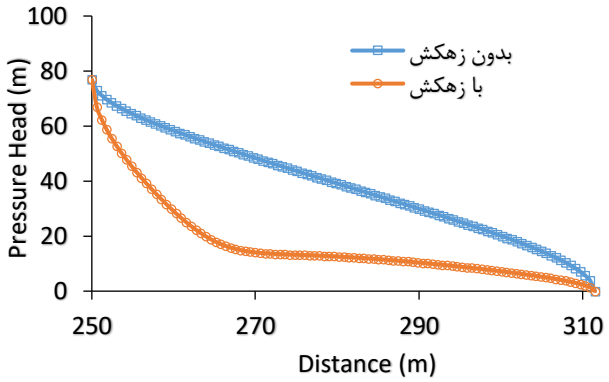
ب (ردیف دوم)

شکل (۱۰): تأثیر فاصله زهکش از پاشنه‌ی سد بر گرادیان هیدرولیکی خروجی

با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که با تغییر فاصله‌ی زهکش از پاشنه‌ی سد بتنی وزنی به‌طرف پنجه، گرادیان هیدرولیکی خروجی در حالت‌های مختلف نسبت L/H، در حالت الف (ردیف اول) روند اکیداً نزولی دارد. یعنی در ردیف اول با افزایش فاصله از پاشنه سد بتنی وزنی گرادیان هیدرولیکی خروجی کاهش پیدا می‌کند. همچنین در هر دو ردیف با افزایش نسبت L/H گرادیان هیدرولیکی خروجی بیشتر کاهش پیدا می‌کند. در ردیف دوم (شکل ۱۰ – (ب)) نمودار ابتدا حالت نزولی و سپس صعودی پیدا می‌کند. نقطه تغییر حالت نمودار از نزولی به صعودی در زهکش i اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که برای L/Hهای بیشتر این نقطه به‌طرف پنجه میل می‌کند. بهترین موقعیت برای کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی با استفاده از زهکش، طراحی زهکش در نقطه‌ی i است.

مقایسه‌ی وجود و عدم وجود زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی

با توجه به مطالب ذکرشده، وجود زهکش در موقعیت g باعث کاهش مقدار قابل‌توجهی از نیروی بالابرنده می‌شود. برای مشاهده‌ی میزان این کاهش نیرو، نمودار توزیع نیروی بالابرنده در زیر سد وزنی در حالت وجود و عدم وجود زهکش رسم می‌گردد که در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که در نمودار شکل (۱۱)، نیروی بالابرنده در زیر سد وزنی (محل اتصال سد به پی) رسم شده است.

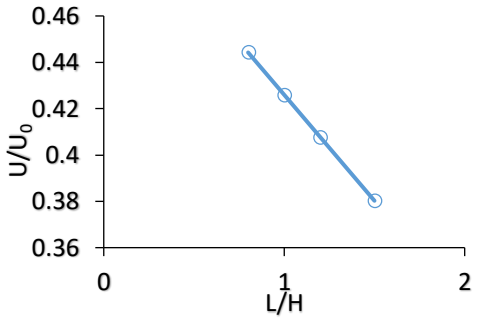


شکل (۱۱): مقایسه‌ی نحوه‌ی توزیع زیر فشار در زیر سد وزنی در حالت وجود زهکش (در موقعیت g) باحالت عدم وجود زهکش

در نمودار شکل(۱۱)، مساحت ناحیه‌ی بین دو نمودار نشانگر میزان کاهش نیروی بالابرنده در زیر سد وزنی است که این کاهش نیروی بالابرنده برابر ۵۵/۵۷ درصد است. شکل (۱۱) برای L/H=۰/۸ رسم شده است. برای حالت‌های مختلف L/H، نمودار استخراجی مشابه نمودار فوق، فقط با اختلاف میزان درصد کاهش نیروی بالابرنده برای هر حالت L/H می‌باشند. لذا برای اختصار، از آوردن بقیه نمودارها اجتناب شده است. تأثیر L/H بر میزان نیروی بالابرنده، در شکل

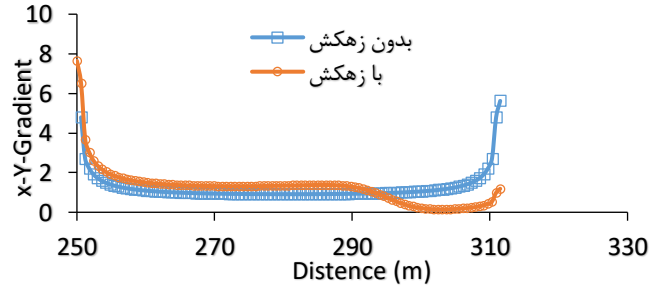
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

(۱۲) نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که محور افقی در شکل (۱۱) عرض کف سد (L) است.



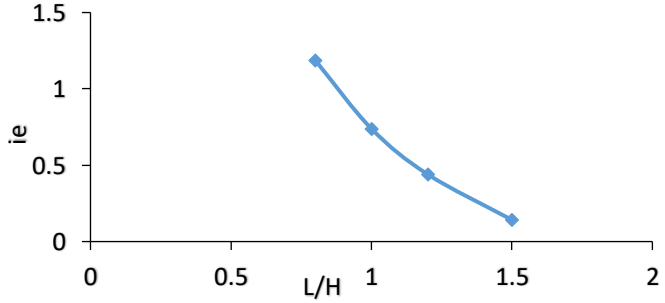
شکل (۱۲): تأثیر نسبت عرض کف سد بر ارتفاع آب بالادست بر نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود زهکش g

با توجه به شکل (۱۲) مشخص است که با افزایش L/H میزان U/U_0 در زهکش g کاهش پیدا می‌کند. لذا برای L/Hهای بزرگتر مساحت بین دو نمودار در شکل (۱۱) بیشتر می‌گردد که نشانگر کاهش نیروی بالابرنده در اثر تعبیه‌ی زهکش است. برای مشاهده‌ی میزان تأثیر زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی در زهکش i در زیر سد وزنی، نمودار شکل (۱۳) برای حالت بدون زهکش و با زهکش در حالتی که زهکش در موقعیت i قرار دارد، رسم شده است.



شکل (۱۳): توزیع گرادیان هیدرولیکی در حالت وجود و عدم وجود زهکش در موقعیت i

با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که گرادیان هیدرولیکی خروجی در پنجه‌ی سد وزنی موردمطالعه در تحقیق حاضر، مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش پیداکرده است (از ۵/۶۲ به ۱/۱۸ رسیده است). شکل (۱۳) برای حالت L/H=۰/۸ رسم شده است. برای سایر حالت‌های L/H نمودارهای استخراجی شبیه حالت فوق می‌باشند. در شکل (۱۴) تأثیر L/H بر گرادیان هیدرولیکی خروجی در نقطه‌ی i نشان داده شده است.



شکل (۱۴): تأثیر L/H بر گرادیان هیدرولیکی خروجی در نقطه‌ی i

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

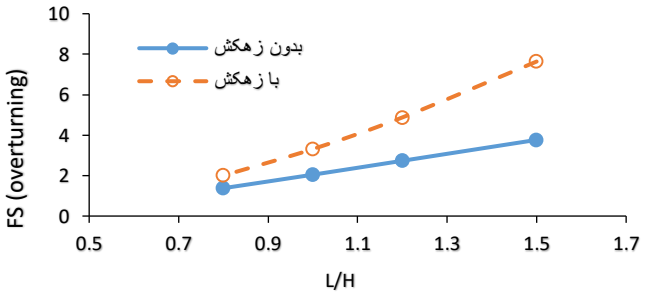
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌گردد که افزایش نسبت L/H باعث کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌گردد. لازم به ذکر است که افزایش مقدارL/H ناشی از کاهش عمق آب بالادست است.

تأثیر وجود و عدم وجود زهکش بر ضریب اطمینان در مقابل واژگونی

در این تحقیق ابتدا اثر زهکش در زیر سد وزنی بررسی‌شده و با جابجایی موقعیت آن و تغییر قطرهای زهکش‌ها، میزان کاهش نیروی بالابرنده و گرادیان خروجی ارزیابی گردید. سپس بهترین موقعیت برای زهکش‌ها تعیین شد تا با به حداقل رساندن نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی بتوان ضریب اطمینان در مقابل واژگونی را افزایش داد.

در شکل (۱۵) تغییرات ضریب اطمینان در مقابل واژگونی در حالت وجود و عدم وجود زهکش زیر پی سد نشان داده شده است.



شکل (۱۵): تأثیر L/H بر ضریب اطمینان در مقابل واژگونی در صورت وجود و عدم وجود زهکش

با توجه به نمودار شکل (۱۵) مشخص است که وجود زهکش در زیر سد وزنی باعث افزایش ضریب اطمینان در مقابل واژگونی می‌شود. هم‌چنین افزایش نسبت L/H (کاهش ارتفاع آب در پشت سد وزنی) باعث افزایش ضریب اطمینان در مقابل واژگونی می‌گردد.

محاسبات رگرسیونی

به‌منظور برآورد نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی، معادلات رگرسیونی خطی و غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS به‌دست‌آمده است. در این محاسبات پارامتر U/U_0 (نسبت نیروی بالابرنده در حالت با لوله زهکش به حالت بدون لوله زهکش) و i_e (گرادیان هیدرولیکی خروجی) به‌عنوان پارامتر وابسته و $\frac{r}{L}$، $\frac{d}{D}$ و $\frac{L}{H}$ به‌عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته‌شده‌اند. نتایج این محاسبات در جدول (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این معادلات برای محدوده شبیه‌سازی‌شده معتبر هستند. برای ارزیابی، توانایی و دقت در فرمول رگرسیونی در تعیین نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی از شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

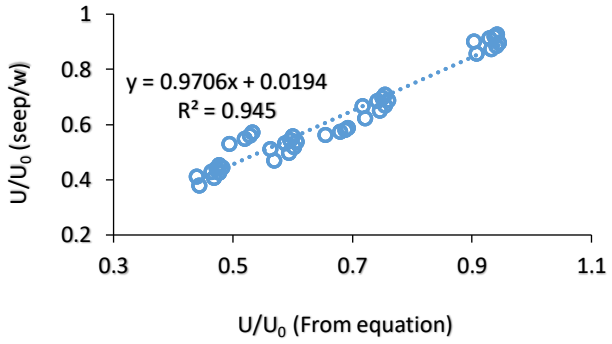
جدول(۲): معادلات رگرسیونی خطی و غیرخطی برای محاسبه نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی

معادله	R^2	RMSE
1: $\frac{U}{U0}=1.89\times\left(\frac{d}{D}\right)^{3}-0.007\times\left(\frac{L}{H}\right)^{4.16}+0.85\times\left(\frac{r}{L}\right)^{0.88}+\frac{0.045}{\frac{r}{L}}$ $r=\sqrt{x^2+y^2}$	۰/۹۴۵	۰/۰۳۸
2: $\frac{U}{U0}=\exp(-0.792-0.011\times\frac{d}{D}-0.0993\times\frac{L}{H}+0.74\times\frac{r}{L})$	۰/۷۷۴۷	۰/۰۷
3: $i_e=\exp(2.06-0.03\times\frac{d}{D}-1.255\times\frac{L}{H}-1.334\times\frac{r}{L})$	۰/۹۳۹	۰/۱۸
4: $i_e=3.43-0.01\times\frac{d}{D}-1.44\times\frac{L}{H}-1.357\times\frac{r}{L}$	۰/۸۹۹	۰/۲

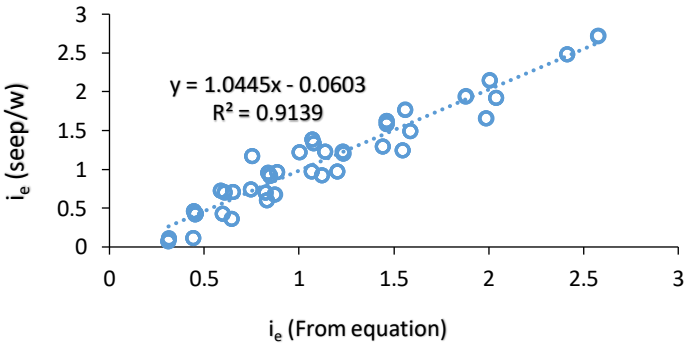
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

با توجه به جدول (۲) مشخص است که روابط غیرخطی شماره (۱) و (۳) خطای کمتری نسبت به روابط دیگر دارند. شکل‌های (۱۷ - (الف و ب)) پراکندگی داده‌ها برای نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی را نشان می‌دهند. با توجه به نمودار شکل‌های (۱۶- (الف و ب)) مشاهده می‌گردد که بیشتر نقاط بر روی یا نزدیکی خط نیم‌ساز با زاویه ۴۵ درجه قرارگرفته‌اند که این مقبولیت هر دو رابطه (۱) و (۳) برای تخمین نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی در زیر سد وزنی در صورت وجود زهکش در موقعیت‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل(۱۶-(الف)): پراکندگی داده‌ها برای نیروی بالابرنده



شکل(۱۶-(ب)): پراکندگی داده‌ها برای گرادیان هیدرولیکی خروجی

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، حاکی از آن است که فاصله‌ی مرزهای جانبی راست و چپ پی سد از جسم بتنی بدنه‌ی سد وزنی، بر نیروی زیر فشار بی‌تأثیر بوده ولی این فاصله بر گرادیان هیدرولیکی خروجی و دبی نشتی از پی اثرگذار است. لذا توصیه می‌شود در مدل‌سازی عددی، حداقل نسبت (t/H) برابر ۱/۵ در نظر گرفته شود. در این صورت مرز راست و چپ همانند مرز در بی‌نهایت رفتار خواهد کرد و بر نتایج عددی بی‌تأثیر خواهد بود. وجود لوله‌ی زهکش در زیر سد وزنی، باعث کاهش نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌گردد. تعبیه زهکش تخلیه در یک‌چهارم عرض کف سد بتنی وزنی (۰/۲۵L) از پاشنه، بهترین موقعیت برای کاهش نیروی بالابرنده است که قبل و بعدازآن، نیروی بالابرنده به ترتیب روند کاهشی و افزایشی دارد. همچنین تعبیه زهکش تخلیه در سه‌چهارم عرض کف سد بتنی وزنی (۰/۷۵L) از پاشنه، بهترین موقعیت برای کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی است. با افزایش قطر زهکش تخلیه، نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی کاهش می‌یابند ولی این کاهش محسوس نیست. به‌عبارت‌دیگر انتخاب قطر زهکش‌ها تابع ملاحظات اجرایی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

است. ازآنجایی‌که جهت بردار نیروی بالابرنده و نیروی ناشی از وزن بدنه‌ی سازه مخالف هم هستند، بنابرین با مشخص شدن بهترین موقعیت برای زهکش که باعث به حداقل رساندن میزان نیروی بالابرنده می‌گردد، می‌توان ضریب اطمینان در مقابل واژگونی را افزایش داد.

منابع و مآخذ

۱. ابریشمی، ج.، وهاب رجایی، ن.، (۱۳۸۰)،" سدهای بتنی"، طرح و اجرا، انتشارات آستان قدس رضوی.

۲. ابول پور، ب. (۱۳۷۳)، "روش های برآورد تراوش، زیرفشار و زیر شویی در سازه‌های هیدرولیکی با ارائه مدل کامپیوتری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه شیراز.

۳. بهادری، ه. فرضعلی زاده، ر. (۱۳۹۷)، "تأثیر پودر لاستیک بر رفتار دینامیکی و مقاومت روانگرایی ماسه‌های اشباع"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد۱۲ شماره۳ صفحات: ۴۳۹-۴۵۸.

۴. توفیق، م. و اوریا، ا. (۱۳۸۶)، "تحلیل غیرخطی جریان ناپایدار و تحکیم ناشی از نشت با استفاده از روش احجام محدود"، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

۵. سلماسی، ف. نورانی، ب. اوقاتی، ب. (۱۳۹۵)،" بررسی عددی اثر زهکش طولی در زیر کانال پوشش‌دار برای کاهش نیروی بالابرنده"، نشریه هیدروژئولوژی، سال اول، شماره ۲، صفحه‌های ۴۸ تا ۶۵.

۶. صدقی اصل، م. (۱۳۸۴)،" اثر موقعیت بهینه پرده آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی"، پنجمین اجلاس هیدرولیک ایران. دانشگاه کرمان.

۷. صیادزاده، ف. زمردیان، م. ع. (۱۳۸۶)،" آنالیز نشت از پی خاک‌های لایه دار با استفاده از روش المان محدود". ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهرکرد.

۸. عابدی کوپایی، ج. (۱۳۸۰)،" بررسی عوامل مؤثر بر زیر فشار در پایداری سدهای انحرافی به روش تفاضل محدود". پایان-نامه کارشناسی ارشد در رشته تاسیسات آبیاری، دانشگاه تربیت مدرس.

۹. نورانی، ب. سلماسی، ف. عباسپور، ا. (۱۳۹۵)،" بررسی عددی عملکرد زهکش‌های پی در کاهش نیروی بالابرنده سدهای بتنی وزنی"، نشریه دانش آب‌وخاک، جلد ۲۶ شماره ۳/۱ صفحه‌های ۱۱۳ تا ۱۲۵.

۱۰. صالحی هفشجانی، س. اسماعیل‌زاده، ش. پناهی، ق. اسماعیلی، ک. (۱۳۹۷)، "بهینه‌یابی موقعیت چاله زهکشی به‌منظور کاهش نیروی زیرفشار در پی سدها"، نشریه علوم آب‌وخاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۲۲، شماره ۴، صفحه‌های ۱۴۳ تا ۱۵۴.

11. Anonymous, (2012) Geo-Studio, Version 8.15.11236. User Manual. GEOSLOPE International, Calgary, in, Alberta, Canada.
12. Azizi, S., F. Salmasi, A. Abbaspour, H. Arvanaghi, (2012). “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): 97-101.
13. Chang, D., Y.C. Nieh, (1996). “Use of geosynthetics in the uplift pressure relief system for a raft foundation. Recent developments in geotextile filters and prefabricated drainage, Geocomposites”, ASTM. Special Technical Publication, 128: 196-221.
14. Chawla, A.S., R. Thakur, K. Akhleash, (1990). “Optimum location of drain in concrete dams”, Energy Engineering, ASCE, 116(7).
15. Mansuri, B., F. Salmasi, B. Oghati, (2014). “Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam”, Geotechnical and Geological Engineering, 32(4): 1165–1173.
16. Pakbaz, M.S., A. Dardaei and J. Salahshoor, (2009). “Evaluation of performance of plastic concert cutoff wall in Karkheh dam using 3-D Seepage analysis and measurement”, Journal of Applied Sciences, 9(4): 724-730.
17. Raymond, R., W. Ronald, and E. Victor, (1994). “Uplift Modeling for Fracture Mechanics Analysis of Concrete Dams”, Journal of Structural Engineering ASCE, 120(10): 3025-3044.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

Numerical Simulation of Effect of Drain Pipe in Uplift Force and Exit Hydraulic Gradient in Gravity Dams

Ali Taheri Aghdam [1]
Farzin Salmasi[*2]
Hadi Arvanaghi[3]

Abstract

In this study, the effects of diameter and location of drain pipe in uplift force and exit hydraulic gradient in the foundation of gravity dams are investigated. For this purpose, a numerical model of gravity dam foundation is simulated using finite elements method. The results indicate that drain pipe under the gravity dam reduces the uplift force and exit hydraulic gradient. Location of the drain pipe in 0.25*L* (*L* is the dam width), and 0.75*L* from the dam heel, causes to reduce for uplift force and exit hydraulic gradient in minimum value, respectively (optimum place). In addition with increasing the depth of drain, the uplift force at first decreases and then increases. The drain pipes diameter has little effect in uplift force and exit hydraulic gradient and thus its selection is dependent to construction cost considerations. By defining the best position for the location of drain pipes, it was observed that drainage pipes in these situations increase the safety factor up to 1.5 to 2 times against the overturning.

Keywords:
Drain Pipe, Exit Hydraulic Gradient, Finite Elements Method, Gravity Dam, Uplift Force.

1 Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
*2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz.
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]

نشریه علمی سد ونیروگاه برقآبی/ سال هفتم/ شماره بیست و هفتم.....۱۶

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]