

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

علی طاهری اقدام^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 مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، از یک مدل عددی با روش المان‌های محدود استفاده گردید و پی یک سد وزنی شبیه‌سازی 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

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 می‌شود که از جمله آن‌ها ایجاد زهکش پی در پایین‌دست پرده آب‌بند است (ابریشمی و رجایی، ۱۳۸۰). هنگامی که 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. گرا دیان هیدرولیکی خروجی نیز مهم‌ترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیر شویی پی یا پاپینگ^۱ است. از جمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیر فشار و همچنین کاهش گرا دیان خروجی به کار می‌رود، ایجاد دیواره‌های آب‌بند است. دیواره‌های آب‌بند که غالباً نفوذناپذیر و یا خیلی کم نفوذپذیرند، باعث کند کردن حرکت آب و کاهش انرژی آب در زیر سازه می‌شوند و در نتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می‌کنند. کاهش شدت زیر فشار ناشی از ایجاد دیواره آب‌بند تحت عنوان فاکتور شدت بیان می‌شود. نسبت واقعی زیر فشار در حالتی که دیواره آب‌بند وجود دارد به زیر فشار در حالت بدون دیواره آب‌بند را فاکتور شدت^۲ می‌نامند (عابدی کوپایی، ۱۳۸۰). منصوری و سلماسی در سال ۲۰۱۴ تأثیر طول زهکش افقی و دیوار آب‌بند بر نشست و فشار بالابرنده در سد خاکی همگن را با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول زهکش افقی، میزان نشست و گرا دیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق دیواره آب‌بند، نشست از سد کمتر می‌شود. نصب دیوار آب‌بند در وسط فونداسیون منجر به کاهش ۱۹/۶۸ درصدی گرا دیان هیدرولیکی نسبت به

نصب دیواره آب‌بند در بالادست می‌شود. عزیزی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر لوله‌ی بارباکان یا سوراخاب^۳ 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 گرا دیان 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 اجزاء محدود مورد بررسی قرار دادند. از جمله 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 کارایی در کاهش نیروی بالابرنده به دست می‌دهد. صدقی اصل و همکاران در سال ۱۳۸۰ به بررسی اثر موقعیت بهینه پرده آب‌بند قائم در کاهش نشست و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهترین مکان برای کنترل نشست و زیر شویی، پاشنه و پنجه سد است. سلماسی و همکاران در سال ۱۳۹۵، تأثیر موقعیت لوله زهکش بر موقعیت سطح ایستابی (خط فریاتیکی) و زیر فشار در زیر کانال‌های پوشش‌دار را به روش المان‌های محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از زهکش به عنوان 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 قرار گرفته و به تبع آن نیروی بالابرنده کمتر می‌شود. ابول پور^۴ در سال ۱۳۷۳ مدلی پیشنهاد نمود که زیر فشار وارده بر سازه‌های هیدرولیکی را

³ - Weep hole⁴ Abol Pour¹ -Piping²- Intensity factor

با چند روش متفاوت محاسبه می‌کرد. وی در محاسبه میزان زیر فشار و زیر شویی از روش بلای، لین و خوسلا^۱ 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 زیر فشار کمتر از خوسلا است و زیر فشار حاصل از تفاضلات 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^۲ 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^۳ در سال ۱۹۹۴، نشان دادند که فشار بالابرنده در سدهای بتنی می‌تواند به روش تحلیل اجزاء محدود مدل‌سازی گردد. همچنین فشار بالابرنده در داخل تخته‌سنگ، بتن و فونداسیون در تحلیل رفتار ترک‌های داخل پی سد مؤثر خواهد بود. چاولا و همکاران^۴ 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^۵ در سال ۱۹۹۶ عملکرد زهکش‌های ژئوکمپوزیت^۶ استفاده شده در زیر پی سازه‌ها با سطح آب زیرزمینی بالا را بعد از سه سال مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی، داده‌های برداشت شده از پیزومترها^۷ نشان داد که زهکش‌ها فشار آب منفذی را تا حدود ۵۰٪ مقدار اولیه کاهش داده و هیچ‌گونه تغییری در عملکرد این زهکش‌ها بعد از این مدت ایجاد نشده است. بهادری و همکاران در سال ۱۳۹۷ تأثیر افزودن پودر لاستیک به خاک ماسه‌ای اشباع را مورد بررسی 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 از لحاظ طولی و عمقی در زیر سد، بر نیروی بالابرنده و گرا دیان هیدرولیکی خروجی مورد بررسی 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

⁵ Chang and Nieh

⁶ Geocomposite

⁷ Piezometers

¹ Bligh, Lane and khosla

² Epsilon

³ Raymond et al.

⁴ Chawla et al.

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

رابطه (۳)

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

$$\nabla^2 h = 0$$

رابطه (۴)

از معادله لاپلاس برای بررسی جریان نشت دائمی در محیط-های همگن و ایزوتروپ استفاده می‌شود.

در شکل (۱) مقطع هندسی سد وزنی مورد مطالعه در تحقیق حاضر و موقعیت لوله‌های 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)، ارتفاع H_{dam} سد (۷۸/۳ متر)، ضخامت لایه نفوذپذیر (۳۰ متر)، L عرض کف سد (۶۱،۵ متر)، 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.

معادلات حاکم: معادله نشست آب در محیط متخلخل به صورت رابطه (۱) است:

رابطه (۱)

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

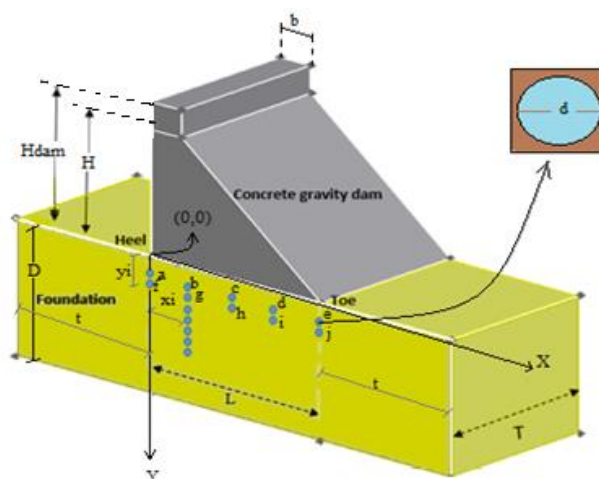
در رابطه (۱) پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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 (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:



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

ممکن با استفاده از روش قدرتمند المان محدود، جریان درون سد خاکی و فونداسیون سد بتنی را شبیه‌سازی کند. در نرم افزار SEEP/W برای حل معادلات دارسی^۱، لاپلاس^۲ و درون-یابی از روش عملگر ماتریس ژاکوب استفاده می‌گردد (بی‌نام، ۲۰۱۲).

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

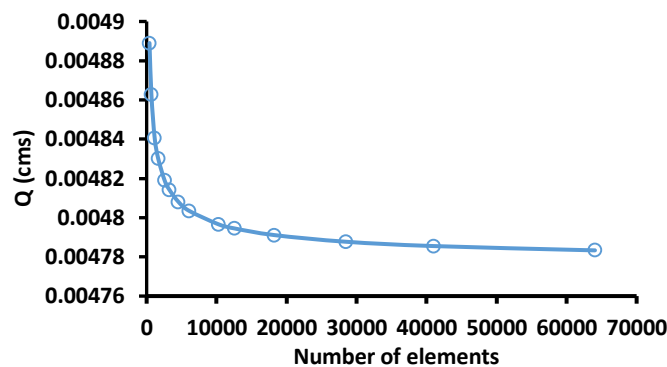
در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار SEEP/W استفاده می‌گردد که محیط متخلخل پی را به روش المان‌های محدود شبیه‌سازی می‌نماید. نرم‌افزار مذکور قادر است فشار آب منفذی در هر نقطه را با حل معادله لاپلاس و شرایط مرزی معین، محاسبه کند. نرم‌افزار SEEP/W از مجموعه نرم‌افزاری Geo-Studio2007 است که نسخه تجاری آن برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط شرکت Geo-Slope به بازار عرضه شده است که قادر است در تمامی شرایط

^۱ Darcy's equation

^۲ Laplace

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).

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 ، $۱/۳$ ، $۱/۵$ ، $۱/۷۵$ و ۲ و $۲/۵$ در نظر گرفته شد و بهترین فاصله که دیواره‌های جانبی تأثیری بر نیروی بالابرنده، 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 حاصله، اندازه‌ی اضلاع المان‌ها متغیر در نظر گرفته شد



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

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 گرفته شده 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).

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 داده شده است. در این تحقیق ابتدا مدل عددی در هر یک از مختصات نوشته شده در جدول (۱) یعنی (a ، b ، g_5) با تغییر دادن قطر و پارامتر بی‌بعد L/H در صورتی که فقط یک زهکش وجود داشته باشد ($N=1$) شبیه‌سازی گردید. برای

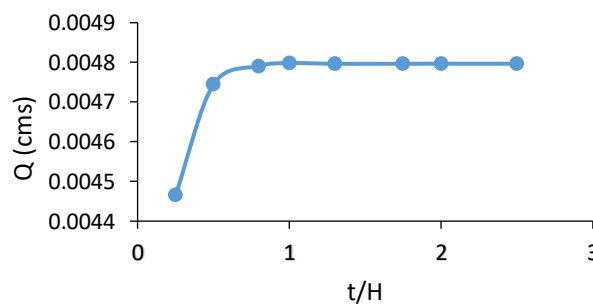
جدول (۱): محدوده تغییرات عوامل بی‌بعد در تحقیق حاضر

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)	g ₄	(۱۵,۲۰)	g ₅	(۱۵,۲۳)

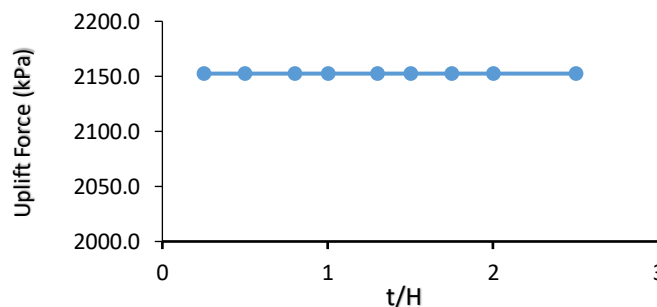
نتایج و بحث

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 دیواره های 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 $۰/۵$ ، $۰/۸$ ، $۱/۳$ ، $۱/۵$ ، $۱/۷۵$ ، ۲ و $۲/۵$ در نظر گرفته شد و بهترین فاصله که دیواره های جانبی تأثیری بر نتایج مدل عددی نداشته باشد، مشخص گردید. منظور از دیواره های جانبی همان مرزهای جانبی راست و چپ هنگام مدل سازی عددی است. همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، وقتی نسبت فاصله دیواره های جانبی به ارتفاع آب از $۱/۳$ بیشتر می شود، فاصله دیواره های جانبی بر دبی نشتی خروجی بی تأثیر می گردد. در شکل های (۴) و (۵) نیز تأثیر فاصله دیواره های جانبی به ترتیب برای نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی نشان داده شده است.

در نرم افزار SEEP/W مدل های مختلفی برای حل مسئله موجود است که بسته به شرایط تحقیق حاضر از مدل دوبعدی 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 گرفته شده است. همچنین برای زهکش های افقی در زیر سد وزنی بار آبی به صورت فشار صفر در نظر گرفته شده است. مصالح پی سد وزنی مورد مطالعه به صورت یک محیط متخلخل همگن^۴ و ایزوتروپ^۵ با ضریب هدایت هیدرولیکی $۰/۰۰۰۲$ 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 آب های نشتی به درستی توسط فیلتر مدل سازی گردد.



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



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

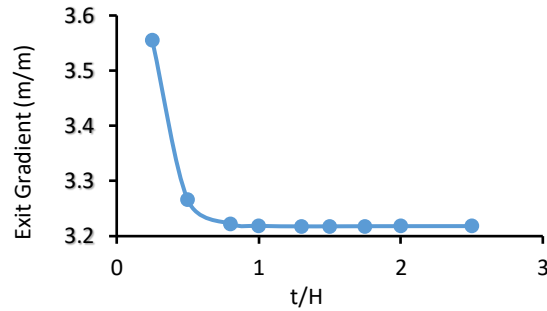
⁴- Homogenous

⁵- Isotropic

¹- Boundary Condition

²- Pressure Head

³- Zero Pressure

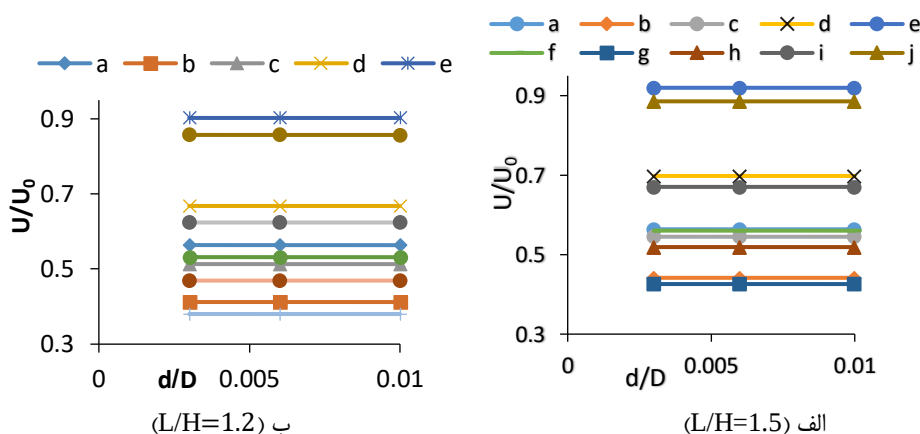


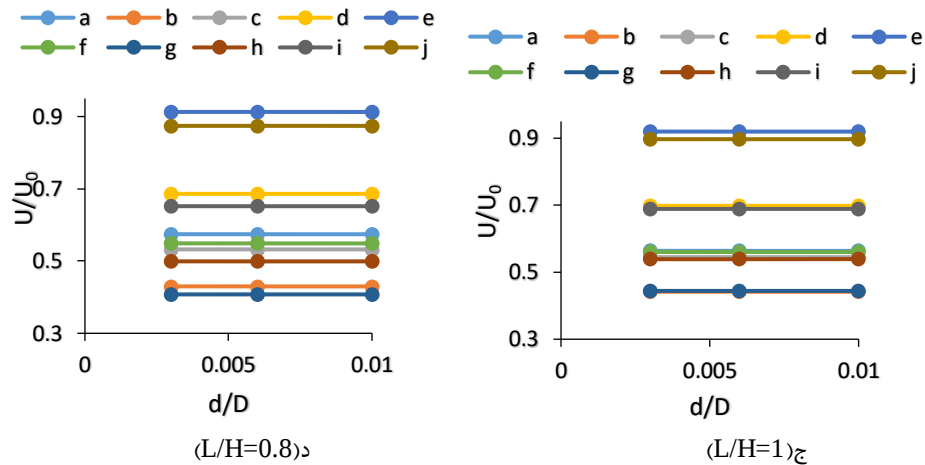
شکل (۵): تأثیر فاصله مرزهای جانبی بر گرادیان هیدرولیکی خروجی (در اولین نقطه خروجی جریان در پایاب سازه)

در شکل (۶) (الف، ب، ج، د) اثر قطر بر نیروی بالابرنده در حالت‌های مختلف L/H نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار نیروی بالابرنده به ازای $d/D=0.03$ بیشتر از مقدار نیروی بالابرنده به ازای $d/D=0.01$ است. این تغییر نیروی بالابرنده به ازای تغییر قطر زهکش زیاد محسوس نیست. بنابراین در اجراء 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.

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 $1/5$ 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.

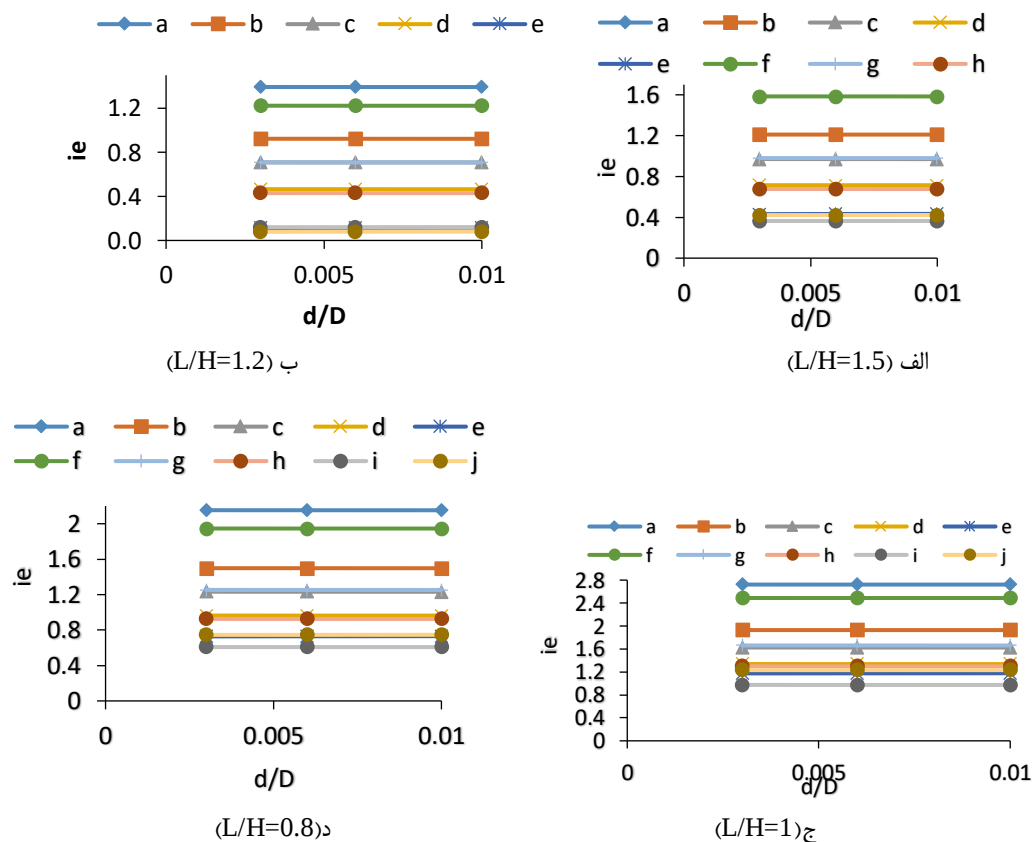
تأثیر قطر زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی





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

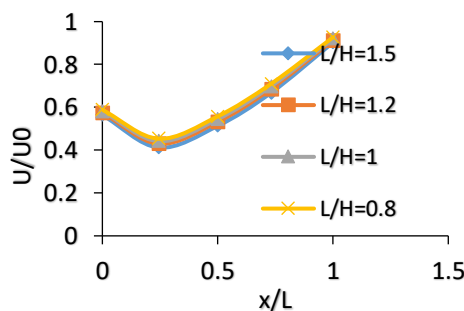
در شکل (۷) - (الف، ب، ج، د) اثر قطر لوله زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی (در انتهای سد وزنی) در حالت‌های مختلف L/H نشان داده شده است. گرادیان هیدرولیکی، افت بار هیدرولیکی در بین دونقطه مدنظر (طول مسیر جریان) است. در نرم افزار SEEP/W بعد از حل معادله حاکم بر جریان، می توان در خروجی نرم افزار، مقدار



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

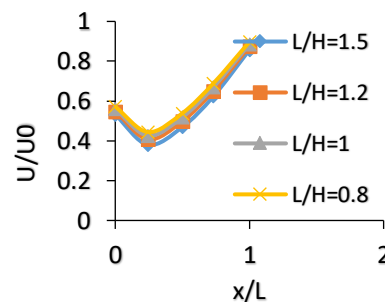
تأثیر موقعیت زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی

شکل (۸) - (الف) تأثیر فاصله‌ی زهکش از محور y ها (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.



ب (ردیف دوم)

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. بنابراین تغییر قطر زهکش اثر کمی بر گرادیان هیدرولیکی خروجی و نیروی بالابرنده دارد.



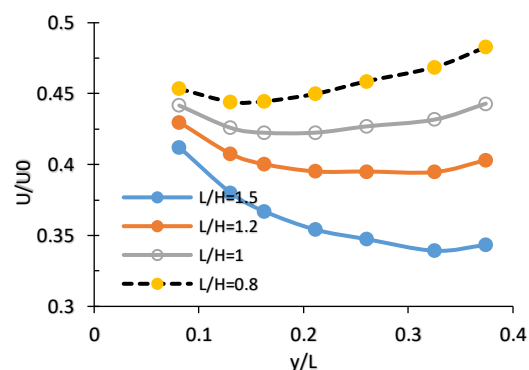
الف (ردیف اول)

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

همچنین با افزایش نسبت L/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 زهکش b و g نمودار شکل (۹) به دست می‌آید. به بیان دیگر این بار به جای 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 حالت‌های 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. به عبارت دیگر هرچه L/H افزایش یابد، باید زهکش در عمق بیشتری تعبیه شود تا بیشترین کاهش U/U_0 اتفاق افتد.

با توجه به شکل (۸) ملاحظه می‌شود که با تغییر فاصله‌ی زهکش از پاشنه‌ی سد وزنی (بالادست) به طرف 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 زهکش b و در حالت ب مربوط به زهکش g می‌باشند (مراجعه به شکل (۱)).



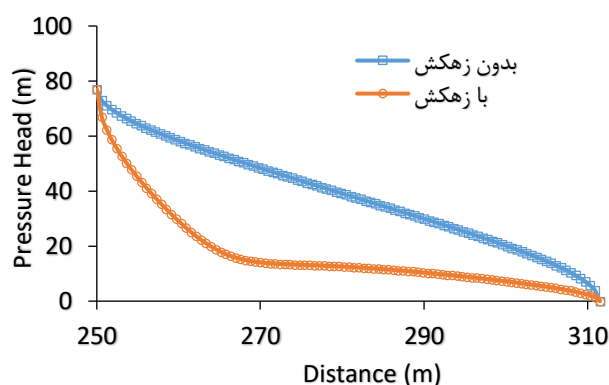
شکل (۹): تأثیر عمق زهکش بر نیروی بالابرنده

شکل (۱۰ - الف)) تأثیر فاصله زهکش از پاشنه سد را در ردیف اول و شکل (۱۰ - ب)) تأثیر فاصله زهکش از پاشنه سد را در ردیف دوم بر گرادیان هیدرولیکی خروجی نشان می‌دهند.

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/H ‌های بیشتر این نقطه به طرف پنجه میل می‌کند. بهترین موقعیت برای کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی با استفاده از زهکش، طراحی زهکش در نقطه i است.

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

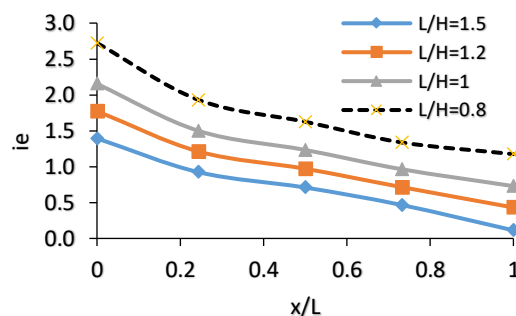
با توجه به مطالب ذکر شده، وجود زهکش در موقعیت g باعث کاهش مقدار قابل توجهی از نیروی بالابرنده می‌شود. برای مشاهده‌ی میزان این کاهش نیرو، نمودار توزیع نیروی بالابرنده در زیر سد وزنی در حالت وجود و عدم وجود زهکش رسم می‌گردد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در نمودار شکل (۱۱)، نیروی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



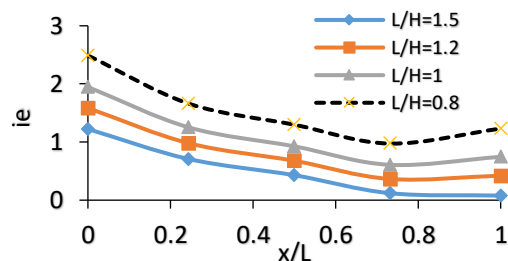
شکل (۱۱): مقایسه‌ی نحوه‌ی توزیع زیر فشار در زیر سد وزنی در حالت وجود زهکش (در موقعیت g) با حالت عدم وجود زهکش

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 $L/H=0/8$ رسم شده است. برای حالت‌های مختلف

در نمودار شکل (۱۰ - الف)) تأثیر فاصله زهکش از پاشنه سد را در ردیف اول و شکل (۱۰ - ب)) تأثیر فاصله زهکش از پاشنه سد را در ردیف دوم بر گرادیان هیدرولیکی خروجی نشان می‌دهند.



الف) (ردیف اول)



ب) (ردیف دوم)

شکل (۱۰): تأثیر فاصله زهکش از پاشنه سد بر گرادیان

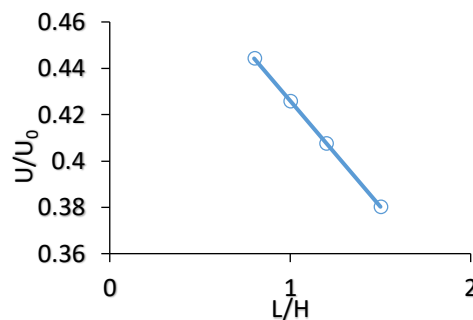
هیدرولیکی خروجی

با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که با تغییر فاصله زهکش از پاشنه سد بتنی وزنی به طرف پنجه، گرادیان

۱۱..... شبیه‌سازی عددی تأثیر لوله زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی

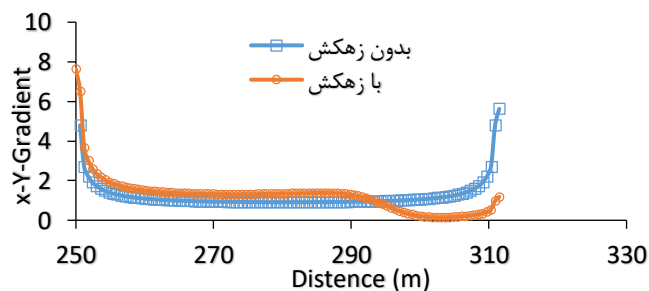
(۱۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که محور افقی

در شکل (۱۱) عرض کف سد ($\bar{L}$) است.



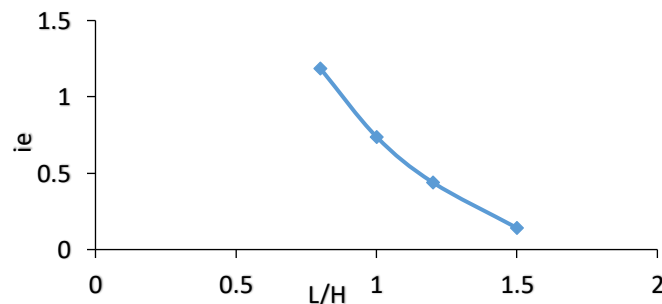
شکل (۱۲): تأثیر نسبت عرض کف سد بر ارتفاع آب بالادست بر نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود زهکش g

با توجه به شکل (۱۲) مشخص است که با افزایش L/H تعبیه‌ی زهکش است. برای مشاهده‌ی میزان تأثیر زهکش بر میزان U/U_0 در زهکش g کاهش پیدا می‌کند. لذا برای L/H های 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 مورد مطالعه در تحقیق حاضر، مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است (از $5/62$ به $1/18$ رسیده است). شکل (۱۳) برای حالت $L/H=0/8$ 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

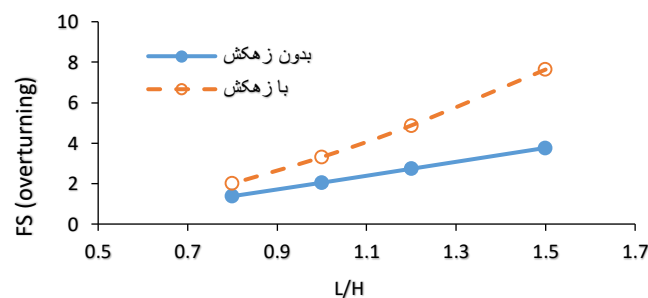
کاهش نیروی بالابرنده و گرادیان خروجی ارزیابی گردید. سپس بهترین موقعیت برای زهکش‌ها تعیین شد تا با به حداقل رساندن نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی بتوان ضریب اطمینان در مقابل واژگونی را افزایش داد.

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

با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌گردد که افزایش نسبت L/H باعث کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌گردد. لازم به ذکر است که افزایش مقدار L/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 بررسی شده و با جابجایی موقعیت آن و تغییر قطرهای زهکش‌ها، میزان



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

U/U_0 (نسبت نیروی بالابرنده در حالت با لوله زهکش به حالت بدون لوله زهکش) و i_e (گرادیان هیدرولیکی خروجی) به عنوان پارامتر وابسته و $\frac{L}{H}$ و $\frac{d}{D}$ و $\frac{r}{L}$ به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این محاسبات در جدول (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این معادلات برای محدوده شبیه‌سازی شده 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.

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

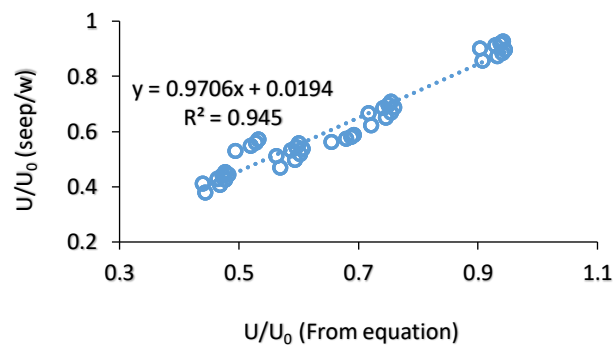
به منظور برآورد نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی، معادلات رگرسیونی خطی و غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS به دست آمده است. در این محاسبات پارامتر

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

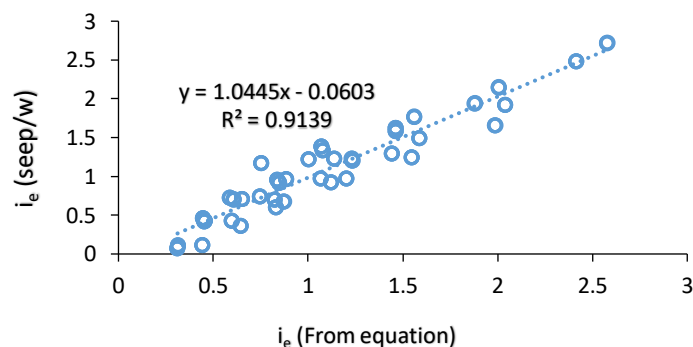
معادله	R^2	RMSE
1: $\frac{U}{U_0} = 1.89 \times \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 0.007 \times \left(\frac{L}{H}\right)^{4.16} + 0.85 \times \left(\frac{r}{L}\right)^{0.88} + \frac{0.045}{\frac{r}{L}}$ $r = \sqrt{x^2 + y^2}$	۰/۹۴۵	۰/۰۳۸
2: $\frac{U}{U_0} = \exp(-0.792 - 0.011 \times \frac{d}{D} - 0.0993 \times \frac{L}{H} + 0.74 \times \frac{r}{L})$	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

می‌گردد که بیشتر نقاط بر روی یا نزدیکی خط نیم‌ساز با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند 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.

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



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



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

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. به عبارت دیگر انتخاب قطر زهکش‌ها تابع ملاحظات اجرایی

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 ناشی 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

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 آب‌و خاک، 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 آب‌و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۲۲، شماره ۴، صفحه‌های ۱۴۳ تا ۱۵۴.

منابع و مآخذ

۱. ابریشمی، ج. و هاب رجایی، ن. (۱۳۸۰). "سدهای بتنی"، طرح و اجرا، انتشارات آستان قدس رضوی.
۲. ابول‌پور، ب. (۱۳۷۳). "روش‌های 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، جلد ۱۲ شماره ۳ 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.
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.

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

Ali Taheri Aghdam¹

Farzin Salmasi^{*2}

Hadi Arvanaghi³

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 $0.25L$ (L is the dam width), and $0.75L$ 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.

