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

چکیدہ

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 می گردد. همچنین تعبیه لوله زهکش در فاصله یکچهارم عرض کف سد (Lav) و سهچهارم عرض کف سد (۱۷۵۱) از پاشنه، به ترتیب کمترین نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی را خواهد داشت. تأثیر عمق کار گذاری لوله زهکش بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی را خواهد داشت. تأثیر عمق کار گذاری لوله زهکش بر نیروی بالابرنده نیز بررسی گردید و مشاهده شد که ابتدا روند کاهشی و سپس روند افزایشی دارد. همچنین مشـخص گردید که انتخاب قطر لوله زهکش تخلیه تابع ملاحظات اجرایی اسـت. با مشخص شدن بهترین موقعیت برای تعبیه لوله زهکش مشاهده گردید ضریب اطمینان سازه در مقابل

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

<u>alitaheriagdam@gmail.com</u> تبریز<u>alitaheriagdam@gmail.com</u> -۱ - دانشجوی دکتری سازههای آبی، دانشگاه تبریز

۲*- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز <u>Salmasi@tabrizu.ac.ir</u>

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 ســد، در مقاطع مختلف می تواند نیروی رو به بالا را به وجود آورد که باعث کاهش مقاومت برشیے محل اتصال بدنه و یی، 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). هنگامی که لنگر واژگونی حاصل از نیروی بالابرنده بر لنگر مقاوم حاصل از وزن سد غلبه کند، عمل واژگونی رخ مید هد. 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 یایپینگ است. ازجمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیرفشار و همچنین کاهش گرادیان خروجی به کار می رود، ایجاد دیوارههای آببند است. دیوارههای آببند که غالباً نفوذنا پذیر و یا خیلی کم نفوذ پذیرند، باعث کند کردن حرکت آب و کاهش انرژی آب در زیر سازه می سوند و درنتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می کنند. کاهش شدت زیرفشار ناشی از ایجاد دیواره آببند تحت عنوان فاكتور شدت بيان مي شود. نسبت واقعى زیرفشار در حالتی که دیواره آببند وجود دارد به زیر فشار در حالت بدون دیواره آببند را فاکتور شــدت 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 شبیه سازی عددی موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول زهکش افقی، میزان نشت و گرادیان هیدرولیکی افزایش می یابد. همچنین با افزایش عمق دیواره آببند، نشت از سد کمتر می شود. نصب دیوار آببند در وسط فونداسیون منجر به کاهش ۱۹/۶۸درصدی گرادیان هیدرولیکی نسبت به

¹-Piping

نصب دیواره آببند در بالادست می شود. عزیزی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر لولهی بارباکان یا سوراخاب^۳ و دیوار آببند بر نیروی بالابرنده در حوضے چه آرامش سـد انحرافي يرداختند. نتايج نشان داد كه ديوار 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 می شود. نورانی و همکاران در سال ۱۳۹۵ عملکرد زهکش در سـدهای وزنی در حالت جریان پایدار را به کمک روش اجزاءمحدود موردبرر سی قرار دادند. ازجمله عوامل مؤثر در برر سی اثرات زهکشها قطر، فا صله مركز تا مركز زهكشها و فاصله از پاشنه بالادست سد است که نقش بس_زایی در مقدار نیروی بالابر نده و همچنین پایداری سد دارد. نتیجه نشان داد که افزایش قطر زهکش تأثیر کمی نسبیت به سیایر پارامتر ها در کاهش نیروی بالابرنده دارد. کاهش فاصله زهکشها از هم و کاهش فاصله از بالادست تا یک حد معینی می تواند نقش بسیزایی 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، پا شنه 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 سے آبهای زیرزمینی میتواند مطرح گردد. همچنین هرچه زهکشها در گوشههای تحتانی و عمقهای پایین کف کانال قرار گیرند، سطح ایستابی در موقعیت پایین تری نسبت به کف کانال قرار گرفته و به تبع آن نیروی بالابرنده کمتر میشــود. ابول پور^۲ در ســال ۱۳۷۳ مدلی پیشنهاد نمود که زیر فشار وارده بر سازههای هیدرولیکی را

²- Intensity factor

³ - Weep hole

⁴ Abol Pour

محدود را بر اساس معادلات تعادل و جریان دوبعدی بهصورت کوپل و تابع زمان انجام دادند. لذا از این مدل جهت برر سی ناشت تابع زمان، تأثیر تغییرات ارتفاع آب در بالاد ست سدها، مسائل مربوط به تحکیم، تحلیل تنش در خاک و تحلیل پایداری سدها و شیبها استفاده نمودند. چانـگ و نیـه^۵ در ســـال ۱۹۹۶ عملکرد زهکشهـای ژئوکمپوزیت ٔ استفاده شده در زیر پی سازهها با سطح آب زیرزمینی بالا را بعد از سه سال موردمطالعه قرار دادند. در این برر سی، 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 زهکش ها 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 می یابد. 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 می شود. افزایش در صد يودر لاستيک سبب کاهش چشمگير اضافه فشار آب حفرهای می گردد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش درصد پودر لاستیک، نسبت میرایی میانگین افزایش می یابد. مسلح سازی با پودر لاستیک تغییر شکل های ناشی از روانگرایی را کاهش میدهد.

در این تحقیق برای شبیه سازی عددی، مقطع هندسی یک ســد وزنی مدنظر قرار می گیرد. تأثیر قطر و موقع یت کارگذاری لوله زهکش ازلحاظ طولی و عمقی در زیر سد، بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی موردبررسی قرار خوا هد گر فت. بهترین موقعیت لو له زهکش به ازای حداقل نیروی بالابرنده و مقدار افزایش ضریب اطمینان در مقابل واژگونی نسبت به حالت بدون لوله زهکش تعیین می گردد.

مواد و روشها

با چند روش متفاوت محاسبه می کرد. وی در محاسبه میزان زیرفشار و زیر شویی از روش بلای، لین و خو سلا^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 بررسیی 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 خصو صیات جریان را در سدهای نفوذناپذیر با عرض متغیر و پرده سری در عمقهای مختلف پنجه پاییندست، روی خاک دولایه و سه لایه بررسی کردند و نتایج بهدستآمده را بهصورت نمودارهای بیبعدی به نام منحنیهای ایسیلن^۲ ارائه دادند. یاکباز و همکاران در سال ۲۰۰۹ با مدل SEEP-3D به ارزیابی ساخت دیوار آببند بتن پلاستیک در تکیه گاه 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 می یابد. رایموند و همکاران^۳ در سال ۱۹۹۴، نشان دادند که فشار بالابرنده در سدهای بتنی می تواند به روش تحلیل اجزاءمحدود مدلسازی گردد. همچنین فشار بالابرنده در داخل تختهسنتگ، بتن و فونداسیون در تحلیل رفتار ترکهای داخل پی سـد 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. بهاین تر تیب 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 بهد ستآمده است. توفيق و اوريا در سال ۱۳۸۶ به تحليل غيرخطى جريان ناپايدار و تحكيم ناشى از نشت با استفاده از روش احجام محدود یرداختند و فرمول بندی احجام

⁵ Chang and Nieh

⁶ Geocomposite

⁷ Piezometers

¹ Bligh, Lane and khosla

² Epsilon

³ Raymond et al.

⁴ Chawla et al.

(۳) ابطه (۳)

(۴) ابطه

معادلات حاکم: معاد له نشـــت اب 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 می شوند: Kx, Ky, Kz هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در امتدادهای x و y و z B : ضخامت لایه آبدار (m)، p: دبی در واحد سطح لایه آبدار (s، (m³/s/m²) ، : 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:

$$\frac{s}{B}\frac{\partial h}{\partial T} = k \nabla^2 h \pm \frac{q}{B}$$
 (۲) رابطه (۲)

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



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

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

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

 $\nabla^2 h = 0$

میدانیم در محیط خاک K≠0 بنابراین معادله معروف

از معادله لاپلاس برای بررسی جریان نشت دائمی در محیط-

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

لایلاس مطابق رابطه (۴) حاصل می گردد:

های همگن و ایزوتروپ استفاده میشود.

دیوارهای جانبی میباشند.

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 در تحقیق حاضر برای شبیه سازی عددی، از نرم افزار SEEP/W استفاده می گردد که محیط متخلخل 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 کند. نرم افزار SEEP/W از مجموعه نرم افزاری Geo-Studio 2007 است که نسخه Geo-Studio یا برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط شرکت -Geo Slope به بازار عرضه شده است که قادر است در تمامی شرایط

¹ Darcy's equation

می شود، برای کاهش این تأثیر، نسبت فاصله این دیوارهها از بدنه سد به ارتفاع آب یشت سد (t/H) متغیر و برابر ۲۵/۰۰، 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 تأثير تعداد المانها در مقابل دبي خروجي رسم گرديد و بهترین تعداد المان که المانهای بیشتر از آن تأثیری بر مقدار دبی خروجی ندارند، انتخاب گردید. (لازم به ذكر است كه دبي در پنجه سد وزني 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)

عمومیت دادن نتایج حاصل از این شبیهسازی به اکثر سدها، نسبت عرض کف سازه به ارتفاع آب یشت 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) شبیه سازی گردید. در جدول (۱) محدوده تغییر پارامترهای بی بعد متغیر در تحقیق حاضر آورده شده است (N تعداد زهکش است). با توجه به شکل (۲) مشخص می شود 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 می گردد. 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 نوشته شده در جدول (۱) یعنی (g5،... ،b ، a) با تغییر دادن قطر و پارامتر بیبعد L/H درصورتی که فقط یک زهکش وجود داشته باشد (N=۱) شبیهسازی گردید. برای

L/H	٨, ٠	١	١,٢	۱,۵				
d/D	۰,۰۰۳	۰,۰۰۶	۰,۰۱					
N	١							
(x _i , y _i) (m,m)	$ \begin{array}{c} a \\ f \\ g_1 \\ (1 \Delta, 1 \cdot) \end{array} $	b (10.0) g (10.1) g ₂ (10.17)	с (٣٠,٧۵.Δ) h (٣٠,٧۵.Δ) g ₃ (١Δ.١۶)	d (fd.d) i (fd.d) g4 (10.7.)	е (۶1,۵.۵) j (۶1,۵.۸) g5 (1۵.7۳)			

جدول (۱): محدوده تغییرات عوامل بی بعد در تحقیق حاضر

نتايج 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 ۲/۲۵، ۵/۰، ۸/۰، ۱، ۳/۱، ۵/۱، ۵/۱، 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 ای جانبی به ارتفاع آب از ۱/۳ بیشتر می شود، فاصله دیواره ای 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

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 در بالادست و پاییندست 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 پاییندست سد، شرط مرزی مربوطه بهصورت بار آبی صفر^۳ 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 ً و ايزوتروپ⁶ با ضريب هدايت هيدروليکي، 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 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.



شکل (۴): تأثیر فاصله مرزهای جانبی بر زیرفشار (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 دادهشده است. ملاحظه می-شود که مقدار نیروی بالابرنده به ازای d/D=-/۰۰۳ بیشتر از مقدار نیروی بالابرنده به ازای d/D=۰/۰۱ است. این تغییر نيروى بالابرنده به ازاى تغيير قطر زهكش زياد محسوس نیست. بنابرین 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
دهندهی نسبت برآیند نیروی بالابرنده در حالت وجود و عدم وجود زهکش در حالتهای مختلف و d/D نسبت قطر زهکش به عمق لايهى نفوذپذير بستر رودخانه مىباشند كه هر دو مورد بى-بعد هستند.

با توجه به شکلهای (۴) و (۵) می توان اظهار داشت که فاصلهی مرزهای جانبی از جسم بتنی بدنهی سد وزنی، بر نيروى زير فشار بى تأثير بوده ولى اين فاصله بر گراديان هیدرولیکی خروجی اثر گذار 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.

تأثير قطر زهكش بر نيروي بالابرنده و گراديان هيدروليكي خروجى



Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2025-09-05]



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

رای بدیر عدر در سروع سه ورمی گرادیان هیدرولیکی را در نقاط مختلف به صورت گرهی و نموداری مشاهده نمود. از آنجایی که هدف این تحقیق استخراج گرادیان هیدرولیکی در اولین نقطه خروجی جریان در پایاب سازه است، در این نقطه مقدار گرادیان استخراج گردید.



در شکل (۷) منظور از ie 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 ۷ها (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.



با توجه به شکل (۸) ملاحظه می شود که با تغییر فاصله ی زهکش از پاشنه ی سد وزنی (بالادست) به طرف پنجه (پایین دست)، نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود زهکش (U/U) در حالت های مختلف نسبت L/H ابتدا روند نزولی و سپس روند صعودی دارد. نقطه ی حداقل نسبی در نمودارهای شکل (۸ – (الف و ب))، نشانگر بهترین محل برای کاهش نیروی بالابرنده با ایجاد زهکش است. درواقع نقطه ی حداقل نسبی در نمودارهای شکل (۸)، در حالت الف مربوط به زهکش d و در حالت ب مربوط به زهکش g می باشند (مراجعه به شکل (۱)).



همچنین با افزایش نسبتL/H بیشترین کاهش U/U_0 در این نقطهها اتفاق میافتد. با مقایسهی نیروی بالابرنده در زهکشهای $d \ e \ g$ مشاهده می *گ*ردد که با افزایش عمق زهکش، نسبت نیروی بالابرنده در حالت وجود زهکش به حالت عدم وجود زهکش در حالتهای مختلف نسبت L/Hحالت عدم وجود زهکش در حالتهای مختلف نسبت U/U_0 کاهش پیدا می کند. برای نشان دادن تأثیر عمق بر U/U_0 در حالتهای مختلف L/H با تغییر دادن عمق زهکش در امتداد زهکش $d \ e \ g$ نمودار شکل (۹) به دست می آید. بهبیان دیگر این بار به جای تغییر موقعیت زهکش در امتداد افقی، آن را در امتداد قائم جابجا می کنیم.

شکل (۹) نشان میدهد که افزایش عمق تعبیهی زهکش در زیر سد بتنی وزنی، ابتدا باعث کاهش U/U و سپس باعث افزایش U/U 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/U اتفاق افتد.

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.





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

با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می شود که با تغییر فاصلهی زهکش از پاشنهی سد بتنی وزنی بهطرف پنجه، گرادیان



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

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 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 می گردد 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.

(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

تعبیهی زهکش است. برای مشاهدهی میزان تأثیر زهکش بر گرادیان هیدرولیکی خروجی در زهکش i در زیر سد وزنی، حالتی که زهکش در موقعیت i قرار دارد، رسم شده است.

با توجه به شکل (۱۲) مشخص است که با افزایش L/H میزان U/U₀ در زهکش g کاهش پیدا می کند. لذا برای L/Hهای بزرگتر مساحت بین دو نمودار در شکل (۱۱) نمودار شکل (۱۳) برای حالت بدون زهکش و با زهکش در بیشتر میگردد که نشانگر کاهش نیروی بالابرنده در اثر



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

L/H رسم شده است. برای سایر حالتهای L/Hنمودارهای استخراجی شبیه حالت فوق میباشند. در شکل i باثیر L/H بر گرادیان هیدرولیکی خروجی در نقطهی نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می شود که گرادیان هیدرولیکی خروجی در پنجهی سد وزنی موردمطالعه در تحقيق حاضر، مقدار قابل ملاحظهای كاهش پيداكرده است (از ۵/۶۲ به ۱/۱۸ رسیده است). شکل (۱۳) برای حالت



نشریه علمی سد ونیروگاه برقآبی/ سال هفتم/ شماره بیست و هفتم..... ۲۲

با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می گردد که افزایش نسبت L/H باعث کاهش گرادیان هیدرولیکی خروجی می گردد. 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 می گردد.

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

انسبت نیروی بالابرنده در حالت با لوله زهکش به حالت بدون لوله زهکش) و i_e (گرادیان هیدرولیکی حالت بدون لوله زهکش) و $\frac{1}{D}$ ($\frac{L}{H}$ بهعنوان خروجی) بهعنوان پارامتر وابسته و $\frac{T}{D}$, $\frac{L}{D}$ بهعنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شده اند. نتایج این محاسبات در جدول (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این معادلات برای محدوده شبیه سازی 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) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

دلات رگرسیونی خطی و غیرخطی برای محاسبه نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروج	جدول(۲): معادلاً،
---	-------------------

معادله			RMSE
1:	$\frac{U}{U_0} = 1.89 \times \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 0.007 \times \left(\frac{L}{H}\right)^{4.16} + 0.85 \times \left(\frac{r}{L}\right)^{0.88} + \frac{0.045}{\frac{r}{L}}$	•/9۴۵	•/• ٣٨
	$r = \sqrt{x^2 + y^2}$		
2:	$\frac{U}{U_0} = \exp(-0.792 - 0.011 \times \frac{d}{D} - 0.0993 \times \frac{L}{H} + 0.74 \times \frac{r}{L})$	•/٧٧۴٧	•/•Y
3:	$i_e = \exp(2.06 - 0.03 \times \frac{d}{D} - 1.255 \times \frac{L}{H} - 1.334 \times \frac{r}{L})$	•/٩٣٩	•/١٨
4:	$i_e = 3.43 - 0.01 \times \frac{d}{D} - 1.44 \times \frac{L}{H} - 1.357 \times \frac{r}{L}$	•/४९१	•/٢

می گردد 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-(ب)): پراکندگی دادهها برای گرادیان هیدرولیکی خروجی

نتيجهگيري

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 بی تأثیر بوده ولی این فاصله بر گرادیان هیدرولیکی خروجی و دبی نشتی از پی اثر گذار است. لذا توصیه می شود در مدل سازی 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 بی تأثیر خواهد بود. وجود لولهی زهکش در زیر سد وزنی، باعث کاهش نیروی بالابرنده و

گرادیان هیدرولیکی خروجی می گردد. 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 خروجي كاهش مييابند ولي اين كاهش محسوس نيست. بهعبارتديكر انتخاب قطر زهكشها تابع ملاحظات اجرايي

است. از آنجایی که 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 می گردد، می توان ضریب اطمینان در مقابل واژ گونی را افزایش داد.

منابع و مآخذ

- ابریشمی، ج.، وهاب رجایی، ن.، (۱۳۸۰)،" سدهای بتنی"، طرح و اجرا، انتشارات آستان قدس رضوی.
- ۲. ابول پور، ب. (۱۳۷۳)، "روش های بر آورد تراوش، زیرفشار و زیر شویی در سازههای هیدرولیکی با ارائه مدل کامپیوتری"، پایان نامه 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 زمین شناسی مهندسی، جلد۱۲ شماره۳ صفحات: ۴۵۸-۴۳۹.
- 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 پوشش دار 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 شهر کرد.

- 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، ۱. (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.
- ۰۱. 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.
- Anonymous, (2012) Geo-Studio, Version 8.15.11236. User Manual. GEOSLOPE International, Calgary, in, Alberta, Canada.
- 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.
- 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.
- Chawla, A.S., R. Thakur, K. Akhleash, (1990). "Optimum location of drain in concrete dams", Energy Engineering, ASCE, 116(7).
- 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.
- 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.
- 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.

هيدر وليكي

Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2025-09-05

نشریه علمی سد ونیروگاه برقاًبی/ سال هفتم/ شماره بیست و هفتم.....

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.3.7]