

بررسی عددی عملکرد زهکش‌های پی در کاهش نیروی بالابرنده سدهای بتنی وزنی

بهرام نورانی^{1*}، فرزین سلماسی²، اکرم عباسپور³

تاریخ دریافت: 94/04/19 تاریخ پذیرش: 95/03/10

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

² دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

³ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Nourani.t_bahram@yahoo.com

چکیده

در طراحی پرده‌آب‌بند فرض بر این است که تراوش از پرده به صورت محدود صورت گیرد. برای کنترل این آب‌ها زهکش‌های پی به موازات پرده‌آب‌بند در پایین‌دست آن ایجاد می‌گردد. هدف از احداث زهکش‌های پی جمع‌آوری آب‌های نشستی از پرده آب‌بند و کاهش نیروی بالابرنده می‌باشد. تعداد، فاصله و قطر این زهکش‌ها نیاز به قضاوت فنی از خصوصیات سنگ داشته و عمق آن‌ها نیز تابعی از مشخصات پرده‌آب‌بند است. در این تحقیق عملکرد زهکش در سدهای بتنی وزنی در حالت پایدار به کمک روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار Seep/w مورد بررسی قرار گرفت. از جمله عوامل موثر در بررسی اثرات زهکش‌ها قطر، فاصله مرکز تا مرکز از یکدیگر و فاصله از پاشنه بالادست سد می‌باشد که نقش به‌سزایی در مقدار نیروی بالابرنده و همچنین پایداری سد دارد. در این مقاله پارامترهای مؤثر در نیروی بالابرنده بررسی شد و در نتیجه معین گردید که افزایش قطر زهکش تأثیر کمی نسبت به سایر پارامترها در کاهش نیروی بالابرنده دارد. به عبارت دیگر انتخاب قطر زهکش‌ها تابع ملاحظات اجرایی می‌باشد. اما کاهش فاصله زهکش‌ها از هم و کاهش فاصله از بالادست تا یک حد معینی می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش نیروی بالابرنده داشته باشد. با توجه به محدوده پارامترها، زهکش‌هایی با قطر 15 سانتی‌متری و فاصله 3 متری از هم بهترین عملکرد را از لحاظ کارایی در کاهش نیروی بالابرنده به دست می‌دهد. برای اعتبار سنجی، روش عددی به کار رفته در این پژوهش با روش تحلیلی دیگران نیز مقایسه گردید و تطابق مناسبی مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: اجزاء محدود، زهکش پی، سدهای وزنی، نیروی بالابرنده، Seep/w

Numerical Investigation of Foundation Drains Performance in Decreasing Uplift Force of Concrete Gravity Dams

B Nourani^{*1}, F Salmasi², A Abbaspour³

Received: 13 March 2015

Accepted: 10 July 2015

¹ M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Univ. of Tabriz, Iran

² Assoc. Prof, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

³ Assis. Prof, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, E-mail: Nourani.t_bahram@yahoo.com

Abstract

General assumption in designing cut off walls is that the seepage be held in a limited amount. In order to control the seepage, the foundation drains are located in parallel to cut off wall at downstream. The main aim of foundation drains construction is to collect seepage water and decrease uplift force. Numbers, distance, and diameters of these drains need technical judgment about characteristics of foundation stones. The depth of drains depends on cut off wall characteristics. In this study, the performance of drains in foundation of concrete gravity dam was investigated using finite element method (FEM) via Seep/w software. Among influential parameters in studying the drain effects, one might consider diameters, center to center distance, and distance of the drains from upstream of dam. In this paper effective parameters on uplift force were analyzed and it was found that increasing the drain diameter had lesser effect on decrease of the uplift force slightly compared to the other parameters. In the other words, selecting the best diameters depends on executive consideration. But decreasing the distance of drains and also their distance from upstream of dam would play an important role in decreasing the uplift force. Focusing to the simulated range of parameters, the drains with 15 centimeter diameter and distance of 3 meters had the optimum performance and the best operation in decreasing uplift force. For validation, the numerical method used in this research was compared with the other analytical methods and the proper agreement with them was observed.

Keywords: Finite element, Foundation drain, Gravity dams, Seep/w, Uplift force

مقدمه

از نیروهای مخرب وارده به سدها ناشی از فشار بالابرنده است که به دلیل وجود آب بالادست سد و نفوذ آن در بدنه و پی سد، در مقاطع مختلف می تواند نیروی رو به بالا را به وجود آورد که باعث کاهش مقاومت برشی 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

برای کنترل سیلاب و بهره برداری از آب های سطحی، احداث سد به عنوان یکی از بهترین راه کارها معرفی می شود. سدها به دلیل هزینه عملیات اجرایی و همچنین به جهت پیچیدگی تحلیل و طراحی، سازه هایی مهم به شمار می آیند و از این رو شناخت و برآورد دقیق نیروهای وارده به آنها باید مورد توجه قرار گیرد. یکی

کاهش فشار بالابرنده نشان داد. بر اساس تحقیقات گروه مزبور، پراکندگی و شکست نیروهای بالابرنده در سدهای قوسی بسیار بزرگتر و کاهش فشار با شدت کمتری در مقایسه با سدهای وزنی می‌باشد، که علت این اختلاف، قرار گرفتن زهکش‌ها بیشتر سدهای وزنی، بلافاصله پایین دست پرده آب‌بند و در سدهای قوسی در بخش پایین دست سد است (روگری 2004).

توزیع فشار زیر قاعده و فونداسیون سد به مکان گالری زهکش و مقدار تأثیر زهکش‌ها بستگی خواهد داشت که سه نمایندگی فدرال ایالات متحده شامل دسته مهندسی ارتش ایالات متحده (USACE)¹، USBR² و کمیسیون تنظیم انرژی (FERC)³، آیین‌نامه‌ای برای پایداری سدهای وزنی تهیه نمودند. گروه‌های مزبور، در حالت وجود زهکش، با تعریف کارایی زهکش (E)، مقدار فشار منفذی را در مقطع پی سد زیرخط زهکش نشان می‌دهند (ابلینگ و همکاران 2000). رایموند و همکاران (1994)، نشان دادند که فشار بالابرنده در سدهای بتنی می‌تواند به‌روش تحلیل اجزاء محدود مدل‌سازی گردد. همچنین فشار بالابرنده در داخل تخته سنگ، بتن و فونداسیون در تحلیل رفتار ترک‌های داخل پی سد مؤثر خواهد بود. چاولا و همکاران (1990) نیز 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. به این ترتیب که مقادیر فشار بالابرنده در عرض پی سد وزنی در شرایطی که زهکش‌ها، قطر و فاصله برابر داشتند، به‌دست آمده و سپس به‌ازای فشار بالابرنده کل کمینه، موقعیت بهینه زهکش به‌دست آمده است.

عبدالرزاق (1995) با استفاده از مدل ماسه‌ای موقعیت بهینه شیرهای فشارشکن⁴ در کانال‌های پوشش⁵ دار را بررسی کردند. همچنین در مورد محافظت

می‌شود که از جمله آن‌ها ایجاد زهکش پی در پایین دست پرده آب‌بند می‌باشد (ابریشمی و وهاب رجایی 1380). اگرچه در اثر اجرای مناسب پرده تزریق، مقدار تراوش کاهش می‌یابد اما گاهی به دلیل نفوذ جریان از طرف پرده آب‌بند میزان زیرفشار در زیر بدنه سد زیاد می‌شود. به این دلیل برای کاهش فشارهای بالابرنده در فونداسیون از تعدادی زهکش سود برده می‌شود که در یک و گاهی چند ردیف در پایین دست پرده آب‌بند احداث می‌شوند. گمانه‌های زهکش پی بایستی بعد از اتمام عملیات مربوط به تحکیم سنگ فونداسیون و از داخل گالری زهکش حفاری گردند. لازم به ذکر است که در برخی اوقات زهکشی فونداسیون سبب بهبود شرایط باربری سنگ فونداسیون گشته و در هر حال لازم است که آب زهکشی شده به بیرون از محوطه هدایت گردد. در مورد تأثیر زهکش‌ها در کاهش نیروی بالابرنده، نظریات مختلفی وجود دارد که بر اساس یکی از قدیمی‌ترین آن‌ها، نظریه براتز، بیشترین کاهش فشار بالابرنده مربوط به حالتی است که زهکش‌ها به پاشنه سد نزدیکتر باشند (یقینی 1379).

زهکش‌ها معمولاً در سنگ‌های ترک خورده برای کاهش نیروی بالابرنده حفر می‌شوند. احداث زهکش‌ها در سنگ‌هایی که تزریق آن‌ها از مشکلاتی برخوردار است، می‌تواند کمک شایان توجهی در کاهش این مشکلات و حفظ پتانسیل هیدرولیکی در مقدار مناسب کند. چنانچه نفوذپذیری سنگ بستر کم باشد، فاصله زهکش‌ها از یکدیگر نیز باید کمتر باشد. این زهکش‌ها معمولاً در راستای قائم حفر می‌شوند اگرچه در مورد سدهای قوسی، برخی مهندسان ترجیح می‌دهند زهکش‌ها را به سمت بالادست مایل کنند (وارشنی 1982). پژوهشی که توسط گروهی به نمایندگی از ده کشور بر اساس مدل‌سازی عددی، بر روی سدهای موجود در سرتاسر دنیا انجام گرفت، زهکش‌های عمقی را مؤثرترین روش

¹ United State Army Croup Engineering

² United State Bureau of Reclamation

³ Federal Energy Regulatory Commission

⁴ Relief valve

⁵ Lined canals

گردید. منصوری و همکاران (2014) به بررسی اثر موقعیت‌های مختلف دیوار آب‌بند با زاویه‌های مختلف در زیر یک سد فرضی بر میزان زیرفشار پرداختند و نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مایل نمودن دیواره آب‌بند باعث کاهش نیروی زیرفشار می‌گردد.

هف از این تحقیق بررسی اثرات قطر (d)، فاصله مرکز تا مرکز زهکش‌ها (n) و فاصله زهکش‌ها از پاشنه سد (s) بر میزان نیروی زیرفشار یا بالابرنده می‌باشد. به منظور تعیین اثرات هر یک از پارامترهای فوق الذکر زهکش‌های پی متصل به کف گالری در 3 قطر 5، 10 و 15 سانتی‌متر و همچنین فاصله مرکز تا مرکز زهکش‌های پی از یکدیگر 3، 4، 5 و 6 متر توسط نرم افزار Seep/w شبیه‌سازی شده است. جهت انجام شبیه‌سازی، پی سد به صورت یک محیط متخلخل ساده و ایزوتروپیک با ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع $2/7 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی، روش عددی به کاررفته در این پژوهش با روش تحلیلی چاولا و همکاران (1990) مقایسه خواهد شد.

مواد و روش‌ها

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

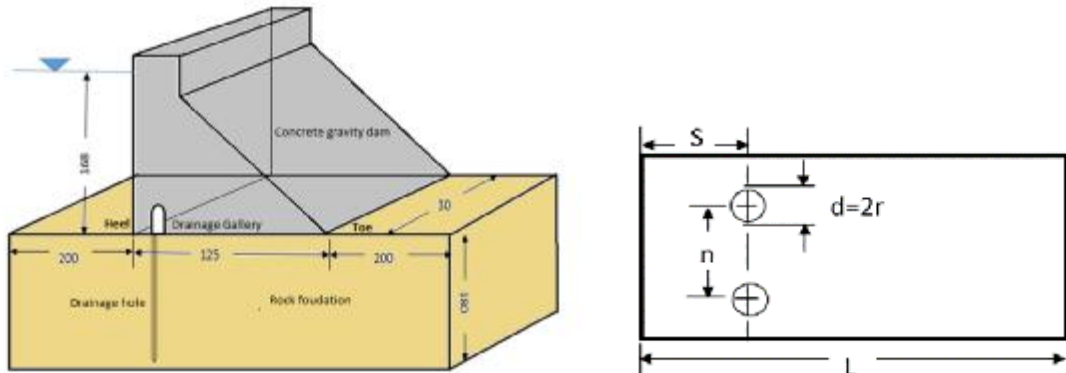
$$\frac{\partial M}{\partial t} = \rho \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \quad [1]$$

که در آن ρ چگالی سیال، M جرم عبوری، h پتانسیل هیدرولیکی و K ضریب هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در جهت محور X، Y، Z می‌باشد. در محیط‌های اشباع و در حالت تراوش دائم، میزان تغییرات آب موجود در واحد حجم نسبت به زمان صفر است. همچنین در محیط‌های همگن و دارای خواص یکنواخت در همه جهت‌ها ضریب نفوذپذیری یکسان بوده و در این صورت رابطه بالا به شکل زیر تبدیل می‌شود که به معادله لاپلاس مشهور می‌باشد.

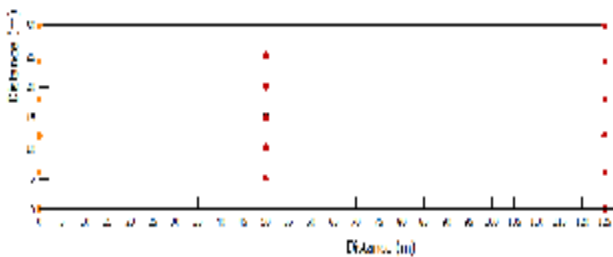
پوشش کانال‌ها در مقابل فشار بالابرنده با استفاده از شیرهای فشارشکن و خصوصیات رضایت بخش فیلترها را مورد ارزیابی قرار دادند. موهامد عبدالرزاق و ابواللا (2001)، به بررسی موقعیت گالری زهکش در زیر سد-های بتنی با استفاده از مدل آزمایشگاهی پرداختند. بر اساس نتایجی که بدست آمد، موقعیت گالری زهکش در زیر سازه سد در موقعیتی که بیشینه کاهش در نیروی بالابرنده به دست آمد، انتخاب شد که تحت این شرایط دبی نشت به داخل زهکش بیشینه مقدار خود را داشت. نصر و همکاران (2003) به بررسی اثر زهکش در پایین آوردن سطح آب زیرزمینی زیر کانال و در نتیجه کاهش نیروی هیدرواستاتیک پرداختند. برای این منظور از مدل فیزیکی Hele-Shaw و نیز مدل عددی اجزاء محدود برای شبیه‌سازی و بررسی موقعیت بهینه زهکش در کمینه کردن نیروی بالابرنده در زیر کانال پوشش‌دار استفاده شد. بیشینه اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی کمتر از 10 درصد بود.

در علم مهندسی سد، تغییر شکل و مقاومت سازه-های ژئوتکنیکی به طور چشم‌گیری، تحت تأثیر جریان نشت در داخل سد و پی آن هستند. به منظور کنترل جریان نشت و حذف تأثیرات ناخوشایند آن، سیستم‌های زهکش پیچیده شامل گالری زهکش، تونل‌های زهکش، و چاه‌های زهکش طراحی و گسترش یافته است. به منظور ارزیابی و بهینه‌سازی طراحی سیستم زهکش نیاز به بررسی عددی خواهد بود (شن و همکاران 2008). احمد و همکاران (2014) به تجزیه و تحلیل جریان 3 بعدی نشت در زیر سازه‌های هیدرولیکی با فیلترهای میانی پرداختند. آن‌ها یک فیلتر میانی در کف سازه هیدرولیکی معرفی کردند که 72% میزان زیرفشار را در کف پایین دست کاهش می‌دهد. بیشترین میزان کاهش زمانی رخ می‌دهد که نسبت فاصله فیلتر پایین دست از پرده آب‌بند به تغییرات بار آبی برابر 1 باشد. معرفی یک فیلتر اضافی دیگر باعث کاهش مضاعف گرادیان هیدرولیکی خروجی و زیرفشار شد که تحت این شرایط تا 90% موجب کاهش

نحوه مدل‌سازی عددی: در این تحقیق، سد وزنی با ابعاد نشان داده شده در شکل 1 فرض شده است. سطح آب بالادست در این شکل (H) 168 متر و عرض سد (L) 125 متر فرض شده است.



شکل 1- نمایی از نحوه قرارگیری زهکش‌های پی در مقطع سدهای وزنی بتنی.



شکل 2- نمای پلان پی سد بتنی وزنی به همراه بارآبی بالادست و پایین‌دست و زهکش پی (d=0.1 m, s=5.0 m).

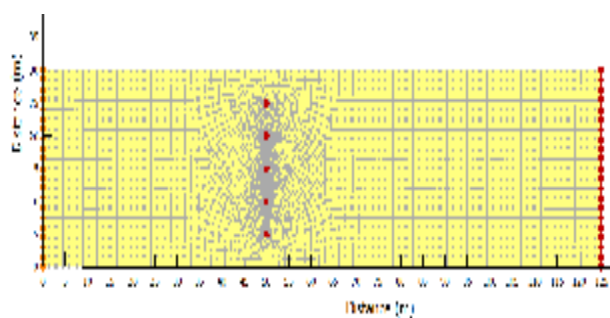
در تعیین شرایط مرزی بارآبی یا پتانسیل در بالادست و پایین‌دست به ترتیب 168 و 0 متر، همچنین برای زهکش‌های پی بارآبی به صورت فشار صفر در نظر گرفته شده است. همچنین مصالح خاکی پی سد وزنی مورد مطالعه به صورت همگن و ایزوتروپ فرض شده است. جهت انجام شبیه‌سازی، پی سد وزنی به صورت یک محیط متخلخل ساده‌ای با ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع $2/7 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (شکل 3).

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

برای حل معادله حاکم، در این تحقیق به روش اجزاء محدود از نرم‌افزار Seep/w که متعلق به بسته نرم‌افزاری Geo- Studio2007 می‌باشد، استفاده شده است (بی‌نام 2007).

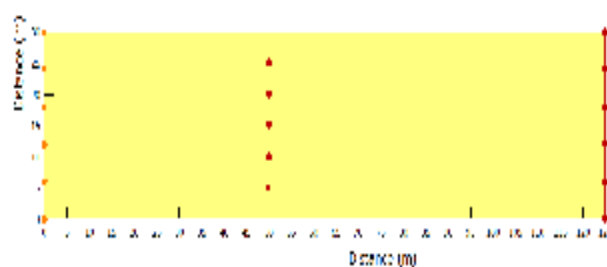
برای دست‌یابی به رفتار و شرایط بهینه زهکش‌ها از جمله قطر، فاصله زهکش‌ها از هم و فاصله از پاشنه بالادست در راستای کمینه کردن نیروی بالابرنده، مدل‌سازی به روش اجزاء محدود انجام شد. بدین منظور، علاوه بر شبیه‌سازی در حالت بدون زهکش پی تعداد 12 مدل دیگر با زهکش‌های پی در قطرهای متفاوت (d) 5، 10 و 15 سانتی‌متری که هرکدام از آنها نیز در 4 حالت به فاصله (n) 3، 4، 5 و 6 متری از هم هستند، در نظر گرفته شده است. همچنین به بررسی اثر فاصله زهکش‌ها از بالادست سد (s) نیز پرداخته شده که برای این منظور فاصله از بالادست سد در 10 موقعیت مختلف 5، 10، 15، 20، 25، 30، 40، 60، 80 و 100 متر فرض شده است. در شکل 1 نمای شماتیکی از موقعیت زهکش‌های پی و پارامترهای مورد مطالعه، دیده می‌شود.

شکل 2 نمای پلان سد بتنی وزنی و موقعیت زهکش‌های پی را که در فاصله 50 متری از بالادست قرار دارند در محیط نرم افزار Seep/w نشان می‌دهد.



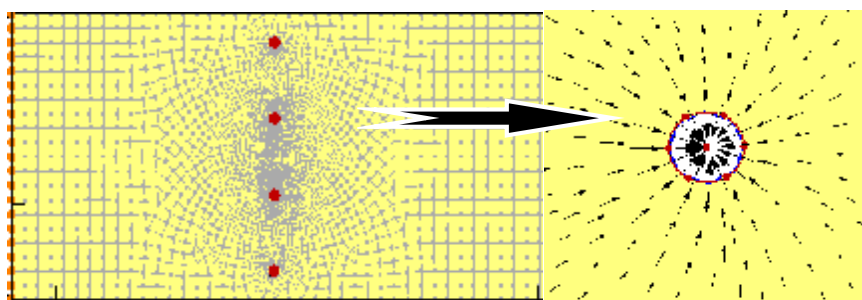
شکل 4- شبکه‌بندی نمای پلان زهکش‌های پی با قطر 10 سانتی‌متر و در فواصل 5 متری از یکدیگر.

مشاهده می‌گردد برای دقت بیشتر در اطراف زهکش‌ها از اجزای ریزتری استفاده شده است. در شکل 5 نیز مسیر بردارهای جریان آب در اطراف زهکش پی نشان داده شده است.



شکل 3- نمای پلان پی سد بتنی وزنی به همراه زهکش‌های پی، شرایط مرزی و هدایت هیدرولیکی ($d=0.1\text{ m}$, $s=5.0\text{ m}$)

شکل 4 شبکه‌بندی نمای پلان پی سد وزنی مورد مطالعه را نشان می‌دهد که دارای زهکش‌های پی با قطر 10 سانتی‌متر و فاصله از هم 5 متر می‌باشد که در فاصله 50 متری از بالادست سد قرار دارند. همان‌طور که



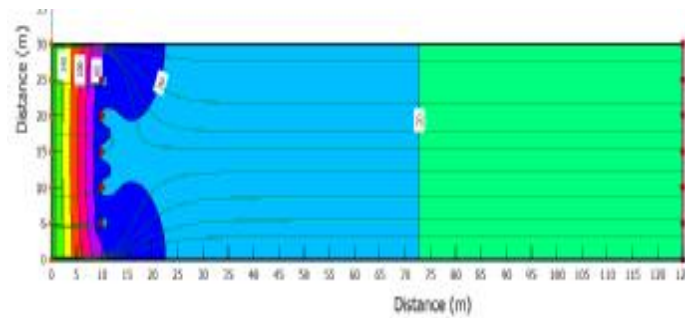
شکل 5- نمایی از بردارهای جریان در اطراف زهکش پی با قطر 10 سانتی‌متر.

فاصله زهکش از بالادست سد 25 متر باشد سطح زیر منحنی توزیع فشار بالابرنده نسبت به حالتی که زهکش‌های پی در فاصله 10 متری از بالادست قرار دارند بیشتر شده و این نشانگر افزایش نیروی بالابرنده می‌باشد. شکل‌های 8 (الف و ب) نمایانگر توزیع فشار بالابرنده سد همراه با زهکش‌های پی به قطر 10 سانتی‌متری برای شرایطی که فاصله زهکش‌های پی از بالادست به ترتیب 10 و 25 متر باشد را نشان می‌دهد. برآیند نیروی بالابرنده در شکل 8 (الف و ب) به ترتیب برابر 33324 و 35134 کیلونیوتن بر متر می‌باشد.

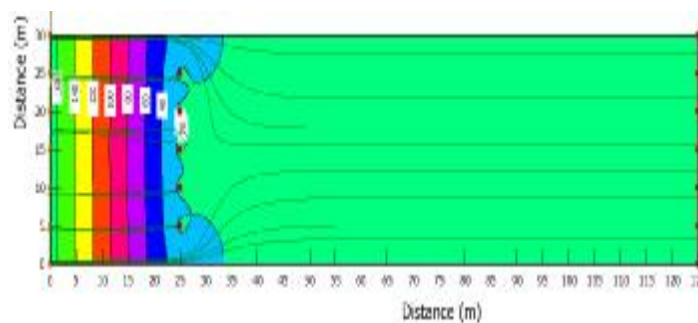
نتایج و بحث

بعد از شبیه‌سازی زهکش‌های پی و انجام تحلیل نمای پلان نرم‌افزار، می‌توان منحنی‌های هم‌پتانسیل و خطوط جریان را در پی سد مشاهده کرد. در شکل‌های 6 و 7 منحنی‌های هم‌پتانسیل برای زهکش با قطر 10 سانتی‌متری و برای حالتی که زهکش‌های پی در فاصله 5 متری از یکدیگر و سطح آب بالادست 168 متر باشد نشان داده شده است.

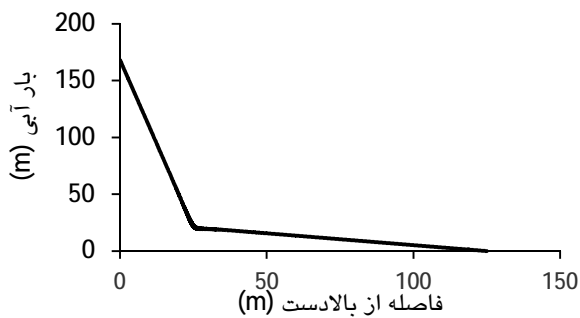
ملاحظه می‌شود با وجود اینکه خطوط هم‌پتانسیل در هر دو حالت روند کاهشی دارند، اما در شرایطی که



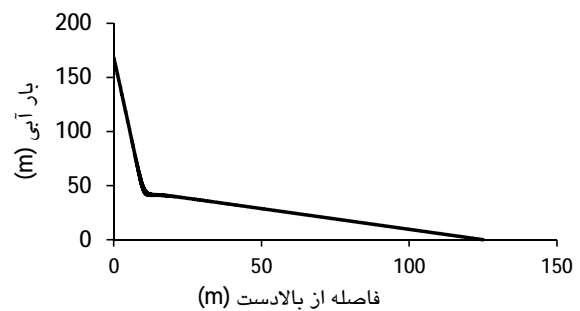
شکل 6- نمایش خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان در حالت پلان در پی سد وزنی همراه با زهکش پی
($s=10\text{ m}$, $n=5\text{ m}$, $d=0/1\text{ m}$)



شکل 7- نمایش خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان در حالت پلان در پی سد وزنی همراه با زهکش پی
($s=25\text{ m}$, $n=5\text{ m}$, $d=0/1\text{ m}$)



شکل 8- ب- اثر فاصله زهکش‌ها از بالادست ($s=30\text{ m}$) بر توزیع فشار بالابرنده ($n=5\text{ m}$, $d=0/1\text{ m}$)

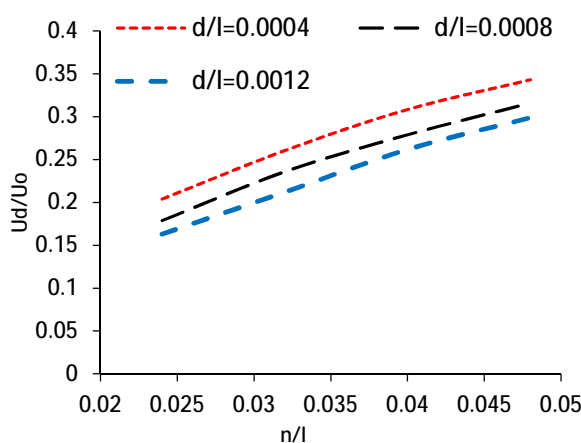


شکل 8- الف- اثر فاصله زهکش‌ها از بالادست ($s=10\text{ m}$) بر توزیع فشار بالابرنده ($n=5\text{ m}$, $d=0/1\text{ m}$)

بدون زهکش پی ($\frac{U_d}{U_0}$) می‌باشد. باتوجه به شکل 9 می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش قطر زهکش‌های پی، نیروی بالابرنده کل وارد بر زیر سد کاهش می‌یابد. همچنین هر چقدر فاصله زهکش‌های پی نسبت به هم کمتر باشد، نیروی بالابرنده کل وارد بر سد کاهش خواهد یافت و این مسئله سبب بهبود پایداری سد می‌گردد. در

شکل 9 حالت بی‌بعد شده نیروی بالابرنده کل را نشان می‌دهد. محور افقی بیانگر پارامتر بی‌بعد فاصله مرکز تا مرکز زهکش‌های پی نسبت به عرض سد ($\frac{n}{l}$) و محور عمودی بیانگر پارامتر بی‌بعد نیروی بالابرنده کل در حالت با زهکش پی نسبت به نیروی بالابرنده در حالت

واقع با توجه به محدوده پارامترهای شبیه‌سازی شده در این تحقیق، فاصله 3 متری زهکش‌های پی از هم مناسب‌ترین فاصله به‌منظور کاهش نیروی بالابرنده می‌باشد. این مسأله را در جدول 1 به وضوح می‌توان مشاهده کرد.



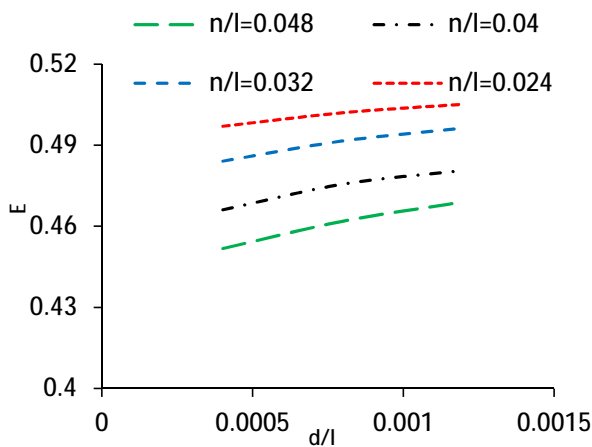
شکل 9- اثر قطر زهکش‌های پی سد بر نیروی بالابرنده نسبی.

جدول 1 - تأثیر فاصله زهکش‌ها از هم بر نیروی بالابرنده نسبی برای قطرهای مختلف.

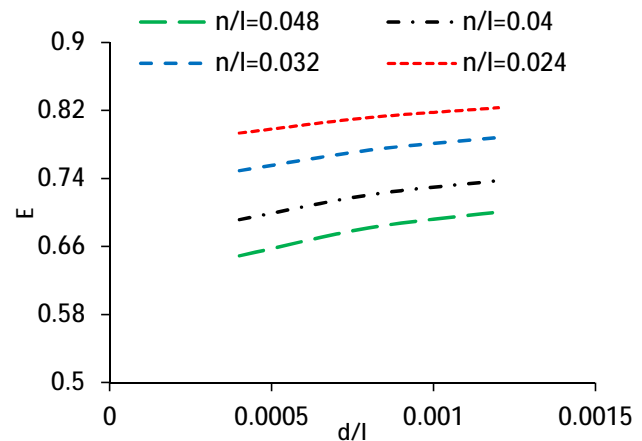
$d=0/15(m)$		$d=0/10(m)$		$d=0/05(m)$	
$d/l=0/0012$		$d/l=0/0008$		$d/l=0/0004$	
U_d/U_0	U_d/U_0	U_d/U_0	U_d/U_0	n/l	n
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(m)
0/163	0/179	0/204	0/224	0/024	3
0/212	0/236	0/261	0/281	0/032	4
0/262	0/279	0/309	0/329	0/040	5
0/299	0/316	0/343	0/363	0/048	6

بر اساس نتایجی که در نمودارهای بالا مشاهده می‌گردد افزایش قطر زهکش‌ها کارایی آن‌ها را به‌میزان مقدار ناچیزی افزایش می‌دهد به‌طوری که با تغییر قطر آن‌ها تا 3 برابر، کارایی آن‌ها به‌طور متوسط تا حدود 2 الی 3 درصد تغییر می‌یابد.

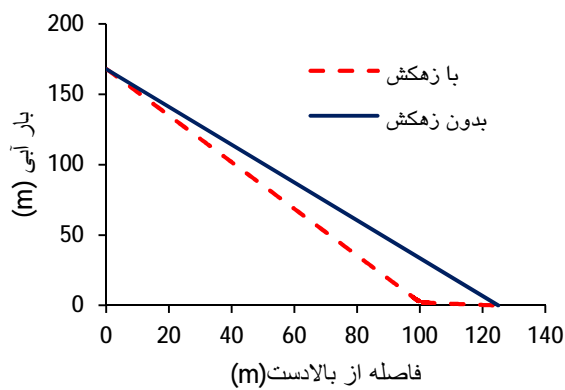
کارایی زهکش‌های پی در کاهش نیروی بالابرنده (E) در این تحقیق به‌صورت نسبت کاهش نیروی بالابرنده در شرایط جدید به نیروی بالابرنده در حالت بدون زهکش تعریف شده است. به‌منظور پی‌بردن به میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر کارایی، برای شرایط مختلف نیروی بالابرنده مورد تحلیل قرار گرفت (شکل 10 و 11).



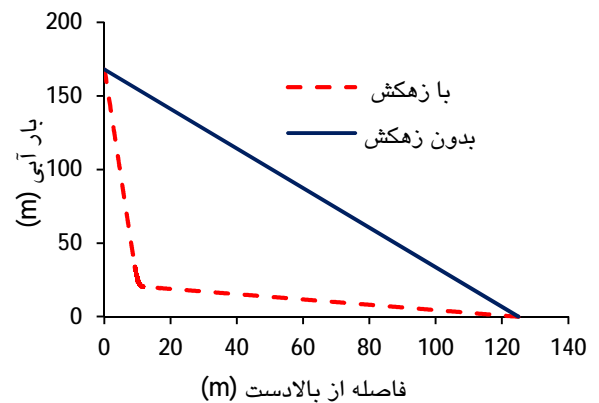
شکل 11- کارآیی زهکش‌های پی در کاهش نیروی بالابرنده
($s/l=0/48$)



شکل 10- کارآیی زهکش‌های پی در کاهش نیروی بالابرنده
($s/l=0/12$)



(ب) - موقعیت زهکش از بالادست 100 متر.



(الف) - موقعیت زهکش از بالادست 10 متر.

شکل 12- (الف و ب) نحوه توزیع فشار بالابرنده با تغییر موقعیت زهکش.

نیروی بالابرنده به 20 درصد حالتی که سد فاقد زهکش بوده، رسیده است (جدول 2). مقادیر فاکتور $\frac{Hd}{Hu}$ (بار فشاری در محل زهکش نسبت به بارآبی بالادست سد) برای پارامترهای $\frac{d}{l}$ ، $\frac{n}{l}$ و $\frac{s}{l}$ به دست آمده است. مقادیر $\frac{Hd}{Hu}$ برای $\frac{n}{l} = 0/048, 0/04, 0/032$ و $0/024$ ؛ و $\frac{d}{l} = 0/0004, 0/0008$ و $0/0012$ و مقادیر $\frac{s}{l}$ در محدوده بین 0 و 1 نیز به دست آمد که نتایج آن برای شرایطی که $\frac{d}{l} = 0/0004$ باشد، به صورت شکل 13 می‌باشد.

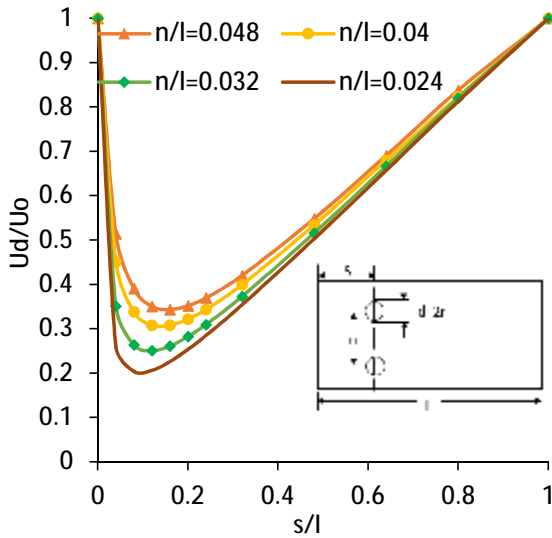
در شکل 12 نحوه توزیع فشار بالابرنده در فواصل 10 و 100 متری از بین 10 موقعیت مختلف برای حالتی که فاصله آن‌ها از هم و قطر به ترتیب 3 متر و 5 سانتی‌متر باشد آمده است، مشاهده می‌شود که هرچه مکان زهکش‌ها به پنجه (پایین‌دست سد) نزدیک گردد یا از بالادست سد دور شود تاثیر کمتری در کاهش زیرفشار خواهد داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای مقادیر فاصله از بالادست 12/5 متری بیشترین کاهش در مقدار فشار بالابرنده که برابر با 80 درصد می‌باشد اتفاق افتاده است و تحت این شرایط میزان

جدول 2- مقادیر عددی فشار بالابرنده با تغییر موقعیت زهکش‌های پی.

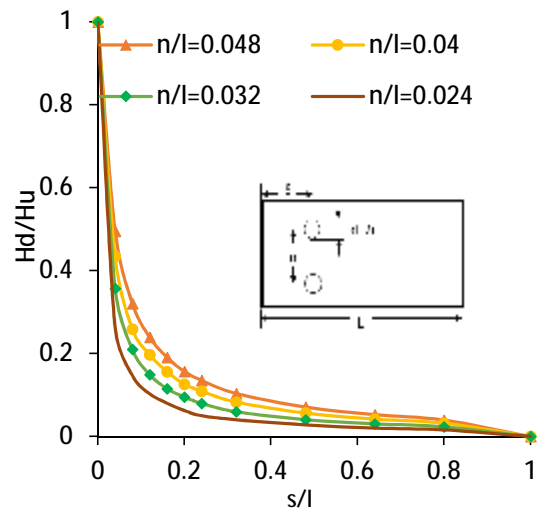
	D=5 (cm)	N=3(m)	L=125(m)	H=168(m)	U _o =10500(kN m ⁻¹)
U _d /U _o	U _d	H _d /H _u	H _d	S/L	S
(-)	(kN m ⁻¹)	(-)	(m)	(-)	(m)
0/261	2741/291	0/262	44/07	0/04	5
0/204	2143/67	0/147	24/65	0/08	10
0/206	2165/94	0/103	17/30	0/12	15
0/226	2373/63	0/080	13/48	0/16	20
/254	2661/86	0/063	10/50	0/20	25
0/285	2991/54	/050	8/4	0/24	30
0/354	3717/008	/040	6/8	0/32	40
0/503	5279/68	0/028	4/65	0/48	60
0/657	6899/562	0/020	3/4	0/64	80
0/813	8540/331	0/016	2/66	0/80	100

همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط فشار بالابرنده در محل زهکش‌های پی تابعی از قطر (d)، فاصله (n) و موقعیت زهکش‌ها (s) می‌باشد. بدین ترتیب که در صورتی که فاصله زهکش‌ها از پاشنه سد افزایش می‌یابد بار فشاری در مکانی که زهکش‌ها قرار می‌گیرند، کاهش پیدا می‌کند. با وجود این فشار بالابرنده کل ممکن است با افزایش در مقدار $\frac{s}{l}$ به وسیله انتقال موقعیت زهکش‌های پی به سمت پایین دست کاهش نیابد. همچنین در صورتی که زهکش‌ها در موقعیت خیلی نزدیکتری به بالادست سد نزدیک شوند ممکن است زهکش پی هیچ تأثیری در کاهش فشار بالابرنده نداشته باشند. از طرف دیگر منتقل شدن زهکش‌های پی به فاصله دور از وجه بالادست سد باعث افزایش نیروی بالابرنده می‌گردد. بنابراین موقعیت

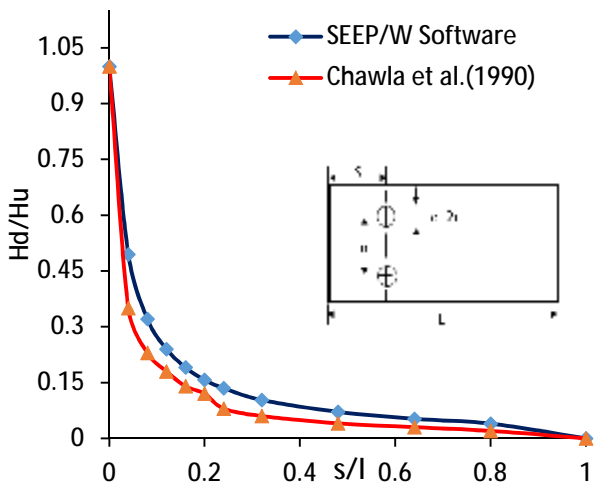
بهینه زهکش‌ها در مکانی که نیروی بالابرنده کل، کمینه مقدار خود را داشته باشد بایستی انتخاب گردد. بدین منظور مقادیر $\frac{U_d}{U_o}$ (نسبت نیروی بالابرنده کل در حالت با زهکش به حالت بدون زهکش) به ازای مقادیر $\frac{s}{l}$ برای $\frac{d}{l} = 0/0004$ ، $0/0008$ و $0/0012$ و $\frac{n}{l} = 0/04$ ، $0/048$ ، $0/032$ و $0/024$ به دست آمده است که نتایج آن در شکل 14 برای شرایطی که $\frac{d}{l} = 0/0004$ باشد آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی بالابرنده نسبی $(\frac{U_d}{U_o})$ با افزایش مقادیر $\frac{s}{l}$ تا یک مقدار به خصوصی از $\frac{s}{l}$ کاهش می‌یابد و سپس با افزایش مقادیر $\frac{s}{l}$ افزایش پیدا می‌کند. بنابراین بهترین موقعیت زهکش‌ها ثابت نبوده و به ازای شرایط معین قابل تعیین خواهد بود.



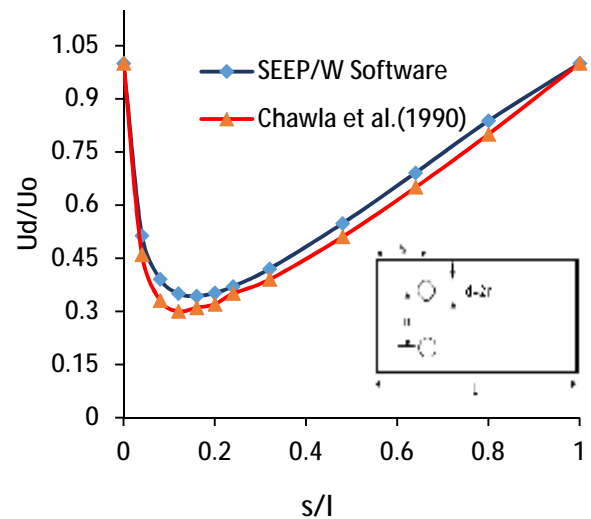
شکل 14 - نیروی بالابرنده کل نسبی نسبت به فاصله نسبی از بالادست ($d/L=0/0004$).



شکل 13- متوسط زیرفشار نسبی نسبت به فاصله نسبی از بالادست ($d/L=0/0004$).



(ب)



(الف)

شکل 15- نیروی بالابرنده کل نسبی (الف) و زیرفشار نسبی به ازای فاصله نسبی از بالادست (ب).

که انجام دادند، بهترین موقعیت زهکش در سدهای بتنی وزنی را به روش تحلیلی ارائه کرده‌اند. در شکل 15 (الف) و (ب) نیروی بالابرنده نسبی و متوسط زیرفشار برای شرایطی که پارامترهای بی‌بعد $\frac{n}{l}$ و $\frac{r}{l}$ در روش چاولا و

مقایسه روش عددی با روش تحلیلی چاولا و همکاران (1990)

چاولا و همکاران (1990) نیز تأثیر مکان زهکش بر نیروی بالابرنده را بررسی کردند و بر طبق مطالعاتی

زهکش‌های پی از هم کاهش یابد، کارآیی آن‌ها در کاهش زیرفشار بالابرنده، افزایش می‌یابد. موقعیت زهکش‌ها می‌تواند نقش به‌سزایی در پایداری سدها داشته باشد. به‌طورکلی می‌توان گفت که با نزدیک کردن زهکش‌ها تا یک مقدار حدی به بالادست، کارآیی آن‌ها افزایش می‌یابد اما نزدیک شدن بیش از آن مقدار به بالادست اثر معکوس دارد.

در این پژوهش شبیه‌سازی به‌صورت دوبعدی صورت گرفته است. در واقع بزرگترین مقطع سد وزنی در دره رودخانه مورد نظر بوده است. می‌توان با شبیه‌سازی عددی به حالت سه‌بعدی، کل سد و سیستم زهکشی آن را در عرض دره مورد بررسی قرار داد. علاوه بر آن می‌توان ملاحظات اقتصادی را نیز مد نظر قرار داد و با ترکیب ملاحظات هیدرولیکی به مقادیر بهینه قطر و فاصله از هم دست یافت. همچنین در صورت در اختیار داشتن اطلاعات سد واقعی با سیستم گالری زهکش می‌توان نتایج حاصل از مدل عددی را با مقادیر واقعی زیرفشار مقایسه کرد و در صورت نیاز مدل را واسنجی نمود.

همکاران (1990) به‌ترتیب برابر 0/0003 و 0/050 و در روش عددی با نرم‌افزار Seep/w به‌ترتیب برابر 0/0002 و 0/048 آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تطابق خوب بین روش عددی با روش تحلیلی چاولا و همکاران برقرار می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

به‌منظور تعیین بهترین موقعیت زهکش، زهکش‌های پی متصل به کف گالری زهکش در 3 قطر 5، 10 و 15 سانتی‌متر و هم‌چنین فاصله مرکز تا مرکز زهکش‌های پی 3، 4، 5 و 6 متر از یکدیگر توسط نرم‌افزار Seep/w شبیه‌سازی شد. نتایج این بررسی نشان داد که افزایش قطر زهکش‌ها کارآیی آن‌ها را به مقدار بسیار ناچیزی افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر عملاً قطر زهکش‌ها در کارآیی آن‌ها تأثیر چندانی ندارد به‌گونه‌ای که با تغییر قطر آن‌ها به میزان 3 برابر، کارآیی آن‌ها در حدود 2 الی 3 درصد تغییر می‌کند. بنابراین انتخاب قطر زهکش‌ها تابع ملاحظات اجرایی است. همچنین هرچه زهکش‌ها در موقعیت دورتری از پاشنه سد قرار داشته باشند، بار فشاری در محل زهکش‌ها کاهش خواهد یافت. در صورتی‌که فاصله مرکز تا مرکز

منابع مورد استفاده

- ابریشمی ج و وهاب رجایی ن، 1380. سدهای بتنی طرح و اجرا، چاپ اول انتشارات آستان قدس رضوی.
 یقینی ا، 1379. منطقه بهینه زهکش در سدهای بتنی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
 Abd El-Razek M, and Abo Elela M, 2001. Optimum position of drainage Gallery underneath Gravity dam. PP. 181-192. Sixth International Water Technology Conference, IWTC, Alexandria, Egypt.
 Anonymous, 2007 Geo-Slope. Version 7.1.0 User Manual. GEOSLOPE International, Calgary, Alberta, Canada.
 Abd El-Razek M, 1995. Optimal numbers and positions of the relief valves in lined canals, Alexandria. Engineering. Journal, 34 (5): 375-390.
 Ahmed A, McLoughlin S and Johnston H, 2015. 3D analysis of seepage under hydraulic structures with intermediate filters. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 141(1), 06014019.1-06014019.6.
 Chen Y, Zhou C and Zheng H, 2008. A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems. Computers and Geotechnics 35: 383-393.
 Chawla A, Thakur R and Akhlesh K, 1990. Optimum location of drain in concrete dams. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 116(7): 930-943.
 Ebeling RM, Nuss FT and Brand B, 2000. Evaluation and Comparison of Stability Analysis and Uplift Criteria for Concrete Gravity Dams Three Federal Agencies. U. S. Army Corps of Engineers, Washington.

- Mansuri B, Salmasi F and Oghati B, 2014. Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam. *Geotechnical and Geological Engineering* 32:1165–1173.
- Nasr RI, Zeydan BA, Bakry MF and Saloom MS, 2003. Uplift pressure relief on lined canals using tile drains. *Alexandria Engineering Journal* 42 (4) :497-507.
- Raymond R, Ronald W and Victor E, 1994. Uplift Modeling for Fracture Mechanics Analysis of Concrete Dams. *Journal of Structural Engineering ASCE* 120(10):3025-3044.
- Ruggeri G. 2004. Working group on uplift pressures under concrete dams. ICOLD Europe Club. Italy.
- Varshney RS, 1982. *Concrete Dams*. Oxford and IBH Publishing CO. New Delhi.