

بررسی عملکرد چاه‌های فشارشکن در کاهش فشار آب حفره‌ای در پی سدهای خاکی

فرزین سلماسی* ۱

بهرام نورانی ۲

علی طاهری اقدام ۳

چکیده

چاه‌های فشارشکن یکی از روش‌های کاهش زیرفشار و کنترل نشت در قسمت پایین دست سدهای خاکی است. طراحی این چاه‌های فشارشکن شامل تعیین فاصله آن‌ها از هم فاصله از بالادست سد، قطر و دبی ورودی به هر یک از آن‌ها است که در این تحقیق برای بررسی اثر این عوامل در میزان نشت و زیرفشار با شرایط مختلف قرارگیری چاه‌های فشارشکن در پایین دست سد خاکی از روش اجزاءمحدود با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W استفاده شد. برای اعتبار سنجی، روش اجزاءمحدود به کاررفته در این پژوهش با روش تحلیلی موجود نیز مقایسه گردید و تطابق مناسبی مشاهده شد. نتایج نشان داد که با افزایش قطر چاه فشارشکن، دبی نشتی به هر چاه بیشتر می‌شود. در ضمن هر چه فاصله چاه‌ها از هم بیشتر می‌شود، دبی نشتی وارده به هر چاه افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش فاصله و یا افزایش قطر چاه‌ها، نیروی زیرفشار وارد بر زیر سد کاهش می‌یابد. آرایش دو ردیفه چاه‌های فشارشکن نشان داد که ترتیب زیگزاگی چاه‌ها نسبت به ترتیب معمولی دو ردیفه عملکرد بهتری را دارد. روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی با دقت مناسب برای برآورد راحت‌تر مقدار زیرفشار ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی

سد خاکی، نشت، زیرفشار، چاه فشارشکن، اجزاءمحدود.

*۱. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز Salmasi@tabrizu.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز Nourani.t_bahram@yahoo.com

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز alitaheriagd@gmail.com

مقدمه

طراحی اکثر چاه‌های فشارشکن عمق لایه آبدار زیر پی بین ۶ تا ۹ متر در نظر گرفته شده و عمق چاه حدود نصف این مقدار مناسب خواهد بود. در بهترین شرایط عمق چاه فشارشکن با ارتفاع سد برابر گرفته می‌شود. همچنین چاه‌ها باید نزدیک هم قرار گیرند و به‌طور کلی معمولاً این فاصله برابر با ۱۵ متر در نظر گرفته می‌شود. ابوالحسنی در سال ۱۳۸۹ به مطالعه طراحی چاه‌های فشارشکن در سدهای خاکی پرداخت و به این نتیجه رسید که برای طراحی چاه‌های فشارشکن باید مقدار بار آبی را در محل خط نامحدود چاهک‌های فشارشکن بین دو چاهک محاسبه نمود و این مقدار باید با ضریب اطمینان مناسبی کمتر از مقدار بار آبی مجاز باشد. از این رو در طراحی سیستم خط نامحدود چاهک‌های فشارشکن با استفاده از اصل جمع آثار قوا باید در یک مرحله بار آبی را فقط تحت تأثیر جریان ناشی از گرادیان منطقه‌ای بین دو چاهک فشارشکن متوالی محاسبه نمود، بعلاوه مقدار بار آبی بین دو چاهک متوالی فقط تحت تأثیر جریان خروجی از چاهک با استفاده از اصول چاهک مجازی و سیستم چند چاهی با توجه به شرایط و فاصله قرارگیری منبع خطی و زهکش خطی تا سیستم چاهک‌ها است. مقدار ارتفاع کل به دست آمده از جمع دو ارتفاع فوق بایستی با احتساب ضریب اطمینان مناسبی کمتر از ارتفاع مجاز باشد. احمد و همکاران (۲۰۱۵) به تجزیه و تحلیل جریان سه بعدی نشت در زیر سازه‌های هیدرولیکی با فیلترهای میانی پرداختند. آن‌ها یک فیلتر میانی در کف سازه هیدرولیکی معرفی کردند که ۷۲٪ میزان زیر فشار 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 ۱ باشد. معرفی یک فیلتر اضافی دیگر باعث کاهش مضاعف گرادیان هیدرولیکی خروجی و زیر فشار شد که تحت این شرایط تا ۹۰٪ موجب کاهش گردید. منصور و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثر موقعیت‌های مختلف دیوار آب‌بند با زاویه‌های مختلف در زیر یک سد مخزنی بر میزان زیر فشار پرداختند و نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که

چاه‌های زهکش یا فشارشکن^۱ چاه‌هایی هستند که در امتداد پنجه پایین دست یک سد مخزنی یا به فاصله‌ای معین از آن به منظور کاهش فشار پیرومتریک در لایه آبرفتی پی و تخلیه آب‌های نشتی ایجاد می‌شوند. این چاه‌ها به صورت یک ردیفه و گاهی چند ردیفه و در سرتاسر طول سد در امتداد پنجه و عمود بر کف رودخانه احداث می‌شوند. بهتر است این چاه‌ها برای عملکرد مناسب در تمام عمق لایه نفوذپذیر ادامه یابند و جداره آن‌ها به گونه‌ای باشد که کمترین مقاومت را در مقابل جریان آب به داخل چاه ایجاد نماید. برای این منظور جداره آن‌ها از لوله‌های مشبک و همراه با فیلتر مناسب ساخته می‌شود (رحیمی، ۱۳۹۳).

در طراحی چاه‌های فشارشکن تعیین دبی نشتی به داخل آن‌ها و فاصله چاه‌ها از هم مهم و ضروری است. طبق مطالعات دریسکول^۲ در سال ۱۹۸۶ قطر چاه‌های فشارشکن حدود ۱۵ سانتی‌متر مناسب بوده و ضخامت لایه فیلتر اطراف لوله چاهک باید حداقل ۷/۵ و حداکثر ۲۰ سانتی‌متر باشد. معمولاً چاه‌ها در نزدیکی سطح زمین به یک لوله جمع‌آوری کننده متصل می‌شوند و آب نشت یافته از این طریق به پست‌ترین نقطه منطقه و یا رودخانه مجاور تخلیه می‌گردد. عملکرد چاه‌های فشارشکن شبیه عملکرد چاه‌های آرتزین (تحت فشار) در منابع آب زیرزمینی است که اصول محاسباتی آن بر مبنای روش تصویر چاه‌ها بنا شده و بعدها این نظریه توسط جرویس و میدلبروکس^۳ در سال ۱۹۹۷ اصلاح شد و رابطه (۱) برای محاسبه بار آبی بین دو چاه فشارشکن ارائه گردید:

$$\frac{H_m}{H} = 1 + \frac{\text{Ln}\left(\frac{2}{1 + \cosh(2 \times j \times s)}\right)}{2 \times \text{Ln}\left(\frac{e^{(j \times s)}}{j \times r}\right)}, j = \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، H بار آبی در مخزن سد، H_m بار آبی در وسط دو چاه، n فاصله چاه‌های فشارشکن از هم، S فاصله ردیف‌های زهکش از بالادست و r شعاع چاه‌های فشارشکن است. بررسی‌های لیل^۴ در سال ۲۰۰۳ نشان داد که در

۳. Middlebrooks and Jervis

۴. Lyle

۱. Relief well

۲. Driscoll

هیدرولیکی بر پدیده نشت غیرماندگار از بدنه سد خاکی ناهمگن را بررسی کردند. آن‌ها هدایت هیدرولیکی را در دو حالت مختلف به صورت تابعی از مقدار مکش و به صورت مقدار ثابت در نظر گرفتند. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی با داده‌های پی‌زومترهای نصب‌شده در بدنه سد نشان داد که با اعمال هدایت هیدرولیکی متغیر، مقدار خطا در پیش‌بینی فشار آب منفذی تا ده برابر کاهش پیدا می‌کند. همچنین مقایسه نتایج نشان داد در حالتی که هدایت هیدرولیکی به صورت تابع اعمال می‌شود، مقدار فشار آب منفذی حاصل از تحلیل، بیشتر از حالتی است که مقدار هدایت هیدرولیکی ثابت فرض شود. مقایسه مقادیر نشت محاسبه‌شده در حالت‌های مختلف نیز نشان داد که مقدار نشت در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر کمتر از حالتی است که هدایت هیدرولیکی به صورت ثابت اعمال می‌شود در برخی موارد این اختلاف بیش از بیست برابر است. بهادری و فرضعلی (۱۳۹۷) تأثیر افزودن پودر لاستیک به خاک ماسه-ی 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 حفره-ای 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. السوحیلی و همکاران^۱ (۲۰۱۷) اثر لوله‌ی تخلیه در زیر سازه‌های هیدرولیکی بر نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود لوله‌ی تخلیه در زیر سازه باعث کاهش نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی می‌شود. وجود لوله تخلیه در بالادست باعث کاهش گرادیان خروجی می‌شود این در حالی است که وجود این لوله در پایین‌دست باعث افزایش گرادیان خروجی می‌شود. کلاته و همکاران (۱۳۹۷) مقادیر فشار آب منفذی در حین ساخت سد درونگر را به وسیله کد نگاشته و در محیط برنامه‌نویسی

مایل نمودن دیواره آب‌بند باعث کاهش نیروی زیرفشار می‌گردد. عزیزی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر ویپ هول^۱ و دیوار آب‌بند بر کاهش نیروی بالابرنده و گرادیان هیدرولیکی خروجی سد انحرافی مهاباد با نرم‌افزار SEEP/W پرداختند و بررسی‌ها نشان داد که نصب ویپ هول در حوضچه آرامش پایین‌دست سد باعث کاهش ۸ و ۷۴ درصدی و همچنین وجود دیوار آب‌بند باعث کاهش ۶۳ و ۷۹ درصدی در مقدار زیرفشار و گرادیان خروجی شده است. نورانی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی موقعیت بهینه زهکش‌ها در سدهای وزنی با استفاده از مدل عددی المان محدود پرداختند و نتایج نشان داد که با کاهش فاصله زهکش‌ها از هم و افزایش قطر آن‌ها، نیروی زیرفشار وارده بر زیر سد کاهش پیدا می‌کند. با توجه به محدوده مدل‌سازی انجام‌گرفته، بهترین موقعیت گالری زهکش در فاصله معین از وجه بالادست که حداقل نیروی بالابرنده را ایجاد می‌کند، انتخاب گردید و معین شد که موقعیت بهینه زهکش‌های پی سد ثابت نبوده بلکه با افزایش در فاصله زهکش‌ها و کاهش قطر زهکش‌ها به طرف پایین‌دست منتقل می‌گردد و بالعکس. سلماسی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی عددی اثر زهکش طولی در زیر کانال پوشش‌دار برای کاهش نیروی بالابرنده پرداختند. 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 گیرد، سطح ایستابی در موقعیت پایین‌تری نسبت به کف کانال قرار می‌گیرد و به تبع آن نیروی بالابرنده وارده شده کمتر می‌گردد. عمق کارگذاری زهکش‌ها ثابت نبوده بلکه با بالا رفتن سطح ایستابی و کاهش قطر زهکش‌ها به تراز پایین‌تر منتقل می‌گردد و بالعکس. سلماسی و منصوری در سال ۲۰۱۶ به بررسی عددی موقعیت، عمق و شعاع زهکش‌های زیر حوضچه آرامش سد انحرافی تبریز با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W پرداختند و به این نتیجه رسیدند که وجود زهکش لوله‌ای در موقعیت‌های بالاتر و نزدیک به کف سازه و شعاع بیشتر تأثیر بسزایی در کاهش نیروی بالابرنده داشته است. احمدی و همکاران در سال ۱۳۹۶ تأثیر هدایت

۱. Weep hole

۲. Alsouhili

$$Q = kiA, \frac{\partial h}{\partial s} \quad (2)$$

که در آن Q دبی عبوری، k هدایت هیدرولیکی خاک، A سطح مقطع جریان و i شیب هیدرولیکی است. همچنین S طول مسیر حرکت آب بین دو نقطه درون محیط متخلخل و h بار آبی در نقطه معینی است. ترکیب رابطه داری با رابطه پیوستگی جریان، رابطه (۳) را نتیجه می‌دهد که به رابطه لاپلاس معروف است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

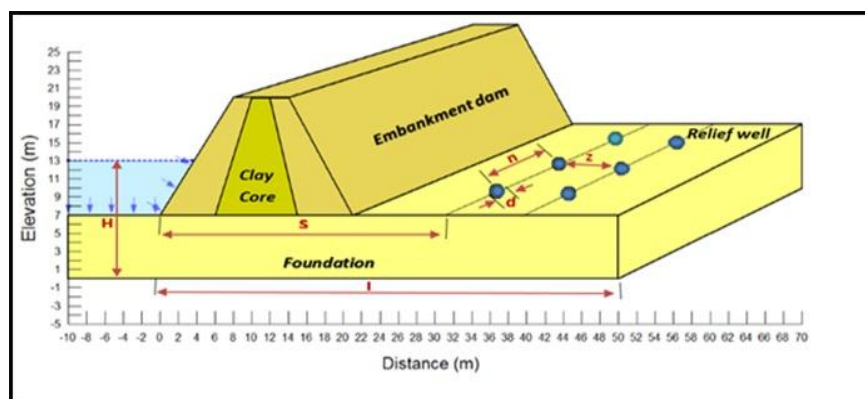
برای حل معادله حاکم بر جریان به روش اجزاءمحدود در این تحقیق از نرم‌افزار SEEP/W متعلق به بسته نرم‌افزاری GeoStudio2012 استفاده شده است.

۲- نحوه مدل‌سازی عددی: در این تحقیق یک سد خاکی با ابعاد نشان داده در شکل (۱) به صورت فرضی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که سطح آب در بالادست مخزن سد ۱۳ متر (H=۱۳m) فرض شده است.

فترن^۱ برآورد کردند و نتایج را با داده‌های ابزار دقیق مقایسه کردند. با استفاده از آنالیز بازگشتی مشخص گردید که با در نظر گرفتن نفوذپذیری افقی حدود ۱۰ برابر نفوذپذیری قائم، نتایج حاصل از تحلیل عددی مطابقت مناسبی با داده‌های ابزار دقیق دارد.

در این تحقیق به بررسی و تحلیل عملکرد چاه‌های فشارشکن به روش اجزای محدود پرداخته می‌شود و تأثیر قطر و فاصله آن‌ها از هم و فاصله از بالادست سد بر میزان زیرفشار و دبی نشتی با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W که جزئی از بسته نرم‌افزاری GeoStudio2012 است، مورد بررسی قرار می‌گیرد (بی‌نام، ۲۰۱۲). همچنین در این تحقیق به بررسی ترکیب چاه‌های فشارشکن دو ردیفه (به صورت زیگزاگی و در امتداد هم) پرداخته می‌شود که مطابق بررسی‌های انجام‌شده، تاکنون در مطالعه دیگری صورت نگرفته است.

۱- معادلات حاکم: حرکت آب در محیط‌های متخلخل در حالت اشباع توسط قانون داری به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.



شکل (۱): مقطع عرضی سد خاکی مورد مطالعه

گردید، لازم به ذکر است که در این مطالعه به دلیل دوبعدی بودن نرم‌افزار و استفاده از نمای پلان^۲ (دید از بالا) فقط پی سد خاکی شبیه‌سازی شده است و محاسبات صرف نظر از مقادیر جریان عبوری از بدنه سد انجام گردیده است. در جدول (۱) پارامترهای مورداستفاده در مدل عددی ارائه شده است.

الگوسازی نظری یا تجربی

به منظور بررسی تأثیر چاه‌های فشارشکن بر روی جریان آب نشتی عبوری از زیر پی و نیروی زیرفشار، این چاه‌ها در ابعاد مختلف قطر (d)، فاصله نسبت به هم (n) و فاصله از بالادست سد (s) هر کدام در سه حالت متفاوت شبیه‌سازی عددی

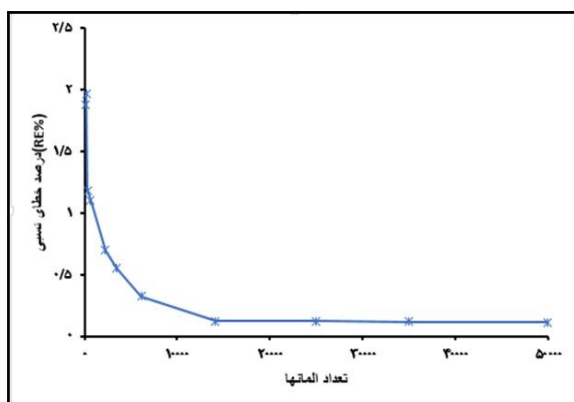
۱. Plan view

۳. Fortran

جدول (۱): پارامترهای مورد بررسی در مدل عددی

| پارامترهای مورد بررسی | مقادیر پارامترها در مدل عددی (m) | | |
|----------------------------------|----------------------------------|------|------|
| فاصله مرکز تا مرکز چاه‌ها (l) | ۱۰ | ۲۰ | ۴۰ |
| فاصله ردیف چاه‌ها از بالادست (S) | ۲۵ | ۳۰ | ۳۵ |
| قطر چاه‌ها (d) | ۰/۱۵ | ۰/۲۰ | ۰/۲۵ |
| فاصله چاه‌های دو ردیف از هم (Z) | ۳ | ۶ | ۹ |

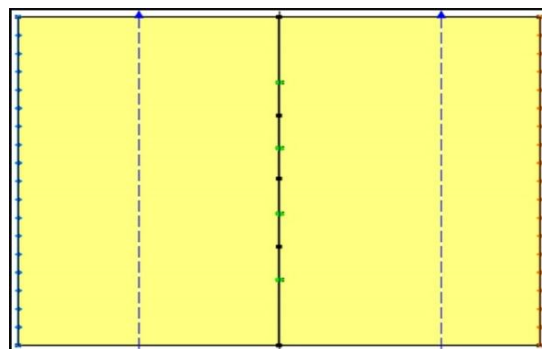
داده شده است. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌گردد که در تعداد المان‌های ۱۰۰۰۰ به بالا، میزان درصد خطا تقریباً ثابت شده و نتایج تقریباً یکسانی از نظر مقدار زیرفشار بالابرنده مشاهده خواهد شد، به همین دلیل در شبکه‌بندی مدل مورد مطالعه، از تعداد المان‌های ۱۰۰۰۰ استفاده شده است و نیازی به تعداد المان‌های زیاد نخواهد بود. محدوده مسئله با استفاده از شبکه‌های چهارضلعی و سه‌ضلعی با ابعاد ۰/۵ متری شبکه‌بندی شده است که تحت این شرایط تعداد گره‌ها و المان‌های مورد استفاده در نمای پلان محدوده مسئله به ترتیب ۱۰۲۰۱ و ۱۰۰۰۰ به دست آمده است.



شکل (۳): آزمون مستقل از شبکه‌بندی

شکل (۴) شبکه‌بندی نمای پلان پی سد مورد مطالعه را نشان می‌دهد که دارای چاه‌های فشارشکن با قطر ۲۵ سانتی‌متر و فاصله از هم ۱۰ متر بوده که در فاصله ۲۵ متری از بالادست سد قرار دارند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد برای دقت بیشتر، در اطراف زهکش‌ها از شبکه‌های ریزتری استفاده شده است.

شکل (۲) نمای پلان پی سد خاکی و موقعیت زهکش‌های فشارشکن را که در فاصله ۲۵ متری از بالادست سد قرار دارند را در محیط نرم‌افزار SEEP/W نشان می‌دهد. در تعیین شرایط مرزی، بار آبی یا پتانسیل کل در بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۱۳ و ۷ متر، همچنین برای زهکش‌های پی بار آبی کل ۷ متر در نظر گرفته شده است. همچنین مصالح خاکی پی سد خاکی مورد مطالعه به صورت همگن و ایزوتروپ فرض شده است ($k_x/k_y=1/0$). لازم به ذکر است که جهت انجام شبیه‌سازی، پی سد به صورت یک محیط متخلخل با ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع ۱ متر بر روز در نظر گرفته شده است (شکل (۲)). لازم به ذکر است که در نمای پلان نرم‌افزار SEEP/W فقط هدایت هیدرولیکی اشباع مورد استفاده قرار می‌گیرد و نیازی به تعریف تابع هدایت هیدرولیکی نمی‌باشد.

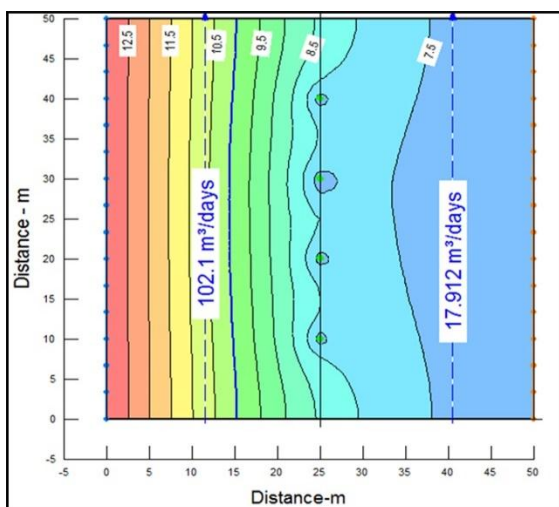


شکل (۲): نمای پلان پی سد خاکی به همراه بار آبی بالادست و پایین‌دست و زهکش پی ($d=0/25m$, $s=25m$).

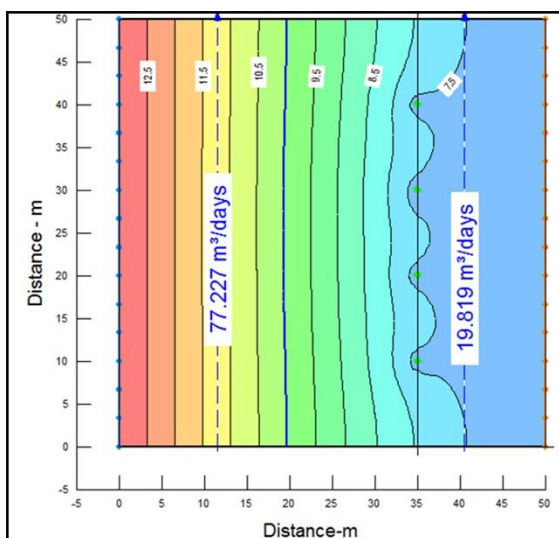
برای تعیین تعداد المان‌های مناسب برای شبکه‌بندی مدل، آزمون مستقل بودن المان‌بندی انجام گرفته شده است. برای این منظور، در تعداد المان‌های مختلف، میزان درصد خطا نسبی^۱ در تعیین زیرفشار در یکی از حالت‌های شبیه‌سازی، استخراج شد، نتیجه حاصل از این آزمون، در شکل (۳) نشان

۱. Percent relative error, RE%

شرایطی که چاه‌ها در فاصله ۱۰ متری از هم قرار گرفته‌اند و موقعیتشان از بالادست سد به ترتیب ۲۵ شکل (۵ الف) و ۳۵ شکل (۵ ب) متر است، نشان داده شده است.



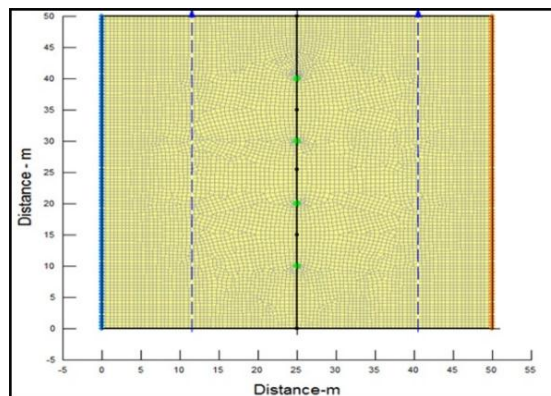
۵ الف: (d=۰/۲۰m, n=۱۰m, s=۲۵m).



۵ ب: (d=۰/۲۰m, n=۱۰m, s=۳۵m).

شکل (۵): منحنی‌های هم‌پتانسیل و مقدار دبی نشت در مقاطع مورد نظر (d=۰/۲۰m, n=۲۵m).

هدف اصلی از احداث چاه‌های فشارشکن کاهش نیروی زیرفشار است. فشار آب منفذی زیاد در زیر سد می‌تواند باعث پدیده پایپینگ^۳ گردد. برای بررسی نیروی زیرفشار، مساحت نمودار توزیع فشار استخراجی از نرم‌افزار در شرایط معین محاسبه شده است. در شکل (۶-الف) و (۶-ب) توزیع زیرفشار همراه با چاه‌های فشارشکنی به قطر ۲۰ سانتی‌متر



شکل (۴): شبکه‌بندی مقطع مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار (d=۰/۲۵m, s=۲۵m)

معیارهای ارزیابی

مطابق روابط (۴) و (۵) به کمک شاخص‌های آماری ضریب تبیین^۱ (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) مقایسه بین روش‌های عددی و تحلیلی برآورد میزان زیرفشار صورت می‌گیرد.

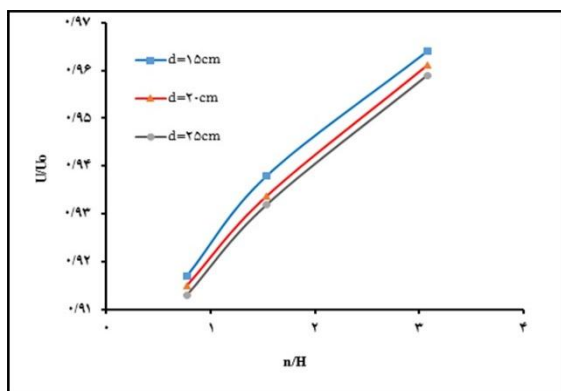
$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

در رابطه‌های فوق متغیرهای P_i و O_i به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، \bar{P} و \bar{O} به ترتیب متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و n تعداد کل داده‌ها است. هر چه مقدار شاخص RMSE کمتر باشد و همچنین هر چه مقدار R^2 بیشتر باشد، دقت روش بالاتر خواهد بود.

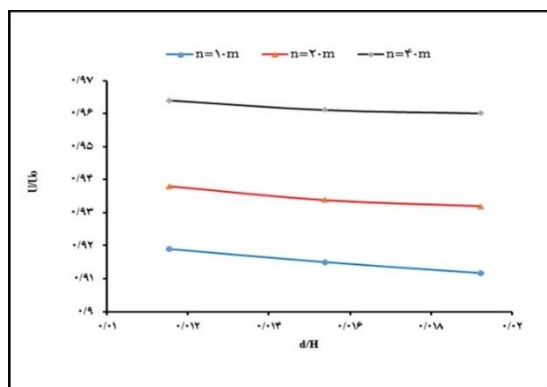
نتایج و بحث

بعد از حل معادله حاکم بر مسئله با شرایط مرزی مشخص شده، می‌توان نتایج حاصل از این مدل‌ها را استخراج نمود. در شکل (۵) منحنی‌های هم‌پتانسیل و دبی نشت در دو مقطع مورد نظر برای شعاع چاه ۲۰ سانتی‌متری در



شکل (۷): تغییرات نیروی بالابرنده نسبی به ازای فاصله چاه‌ها از هم
($s=30m$)

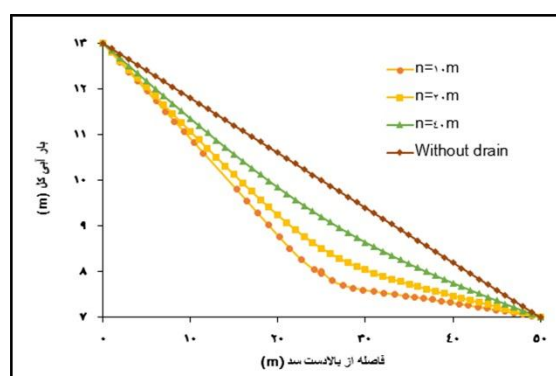
با توجه به شکل (۸) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش قطر چاه‌های فشارشکن، نیروی زیرفشار کل وارد بر سد کاهش می‌یابد. همچنین هر چه اندازه فاصله چاه‌های فشارشکن نسبت به هم کمتر باشد، نیروی زیرفشار کل وارده کمتر می‌گردد و این مسئله در پایداری سد بسیار مؤثر واقع می‌شود؛ بنابراین با توجه به محدوده پارامترهای شبیه‌سازی فاصله ۱۰ متری در این تحقیق مناسب‌ترین عملکرد را در کاهش نیروی زیرفشار خواهد داشت. همچنین از شکل (۸) نیز می‌توان به این نتیجه رسید که اثر قطر چاه‌ها در کاهش نیروی بالابرنده کمتر از فاصله چاه‌ها از هم است.



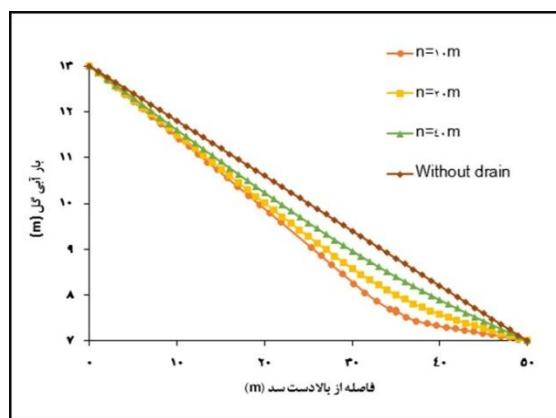
شکل (۸): منحنی تغییرات نیروی زیرفشار در مقابل قطر چاه‌های فشارشکن ($s=30m$)

در شکل (۹ الف و ب) نحوه توزیع زیرفشار در موقعیت وسط و روی چاه‌های فشارشکن در حالتی که فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۴۰ متر (شکل ۹ الف) و ۱۰ متر (شکل ۹ ب) است، نشان داده شده است. در شکل‌های مذکور فاصله چاه‌ها در ۲۵ متری از بالادست سد می‌باشند. با مقایسه شکل‌های ۹ الف و ب می‌توان مشاهده کرد که هر چه فاصله چاه‌های فشارشکن نسبت به هم کمتر می‌گردد، توزیع زیرفشار در

در حالتی که فاصله آن‌ها از بالادست ۲۵ و ۳۵ و فاصله آن‌ها از یکدیگر ۱۰ متر باشد، نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که هر چه اندازه فاصله چاه‌های فشارشکن به هم کمتر باشد نیروی زیرفشار وارد به زیر سد کاهش می‌یابد. در واقع تحت این حالت بهترین فاصله قرارگیری فشارشکن‌ها، فاصله ۱۰ متری است. البته بدیهی خواهد بود که نزدیک شدن چاه‌های فشارشکن موجب افزایش هزینه‌های اجرایی خواهد شد که نیاز به بررسی هم‌زمان دو جنبه هیدرولیکی (کاهش زیرفشار) و هزینه اجرایی دارد.



۶ الف: ($d=20m, n=10m, s=25m$)

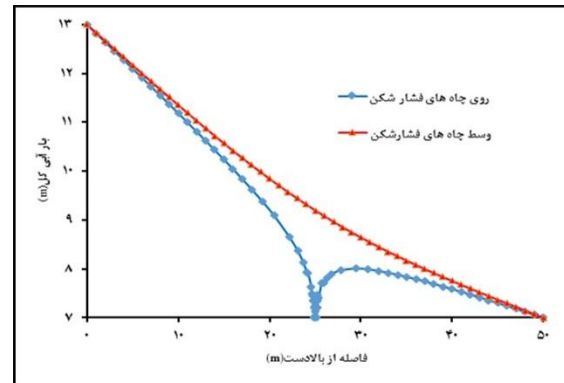
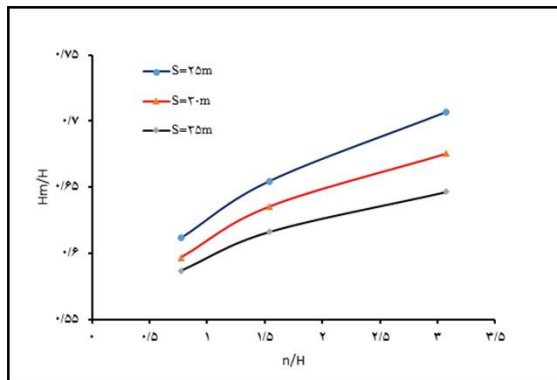


۶ ب: ($d=20m, n=10m, s=35m$)

شکل ۶ (الف و ب) - منحنی توزیع زیرفشار به ازای فاصله‌های مختلف چاه از بالادست سد

شکل (۷) حالت بدون بعد زیرفشار کل در زیر سد است. محور افقی بیانگر فاصله چاه‌ها نسبت به سطح آب بالادست (n/H) و محور عمودی بیانگر زیرفشار کل با چاه فشارشکن نسبت به نیروی زیرفشار کل در حالت بدون چاه است (U/U_0). با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌گردد هر چه فاصله چاه‌ها بیشتر می‌شود، نیروی زیرفشار نیز افزایش می‌یابد.

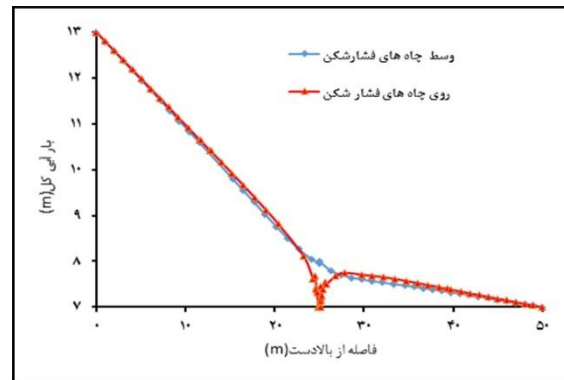
وسط دو زهکش به توزیع فشار روی زهکش نزدیک می‌گردد. در نتیجه می‌توان گفت با کاهش فاصله زهکش نسبت به هم، بار آبی در وسط دو زهکش به بار آبی در نزدیکی‌های زهکش نزدیک‌تر می‌شود.



۹- الف: (در وسط چاه‌های فشار شکن)

شکل (۱۰): تغییرات بار آبی در وسط دو زهکش به ازای فاصله زهکش‌ها از هم

همان‌طوری که قبلاً اشاره گردید، در طراحی چاه‌های فشار شکن فاصله چاه‌ها از هم مهم است. در جدول (۲) نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی و معادله تحلیلی جرویس و میدلبروکس (معادله (۱)) برای شرایطی که قطر چاه‌های فشار شکن ۲۰ سانتی‌متر است، در فاصله‌های مختلف از هم (n) و فاصله ردیف چاه‌های فشار شکن تا بالادست سد (S) ارائه شده است. در شکل (۱۱) نتایج حاصل از مدل عددی و روش میدلبروکس و جرویس در مقابل هم ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقاط حاصل در نزدیکی‌های خط نیمساز پراکنده شده‌اند و نشان می‌دهد که مدل عددی نتایج تقریباً مشابه با رابطه تحلیلی (۱) را داشته است.



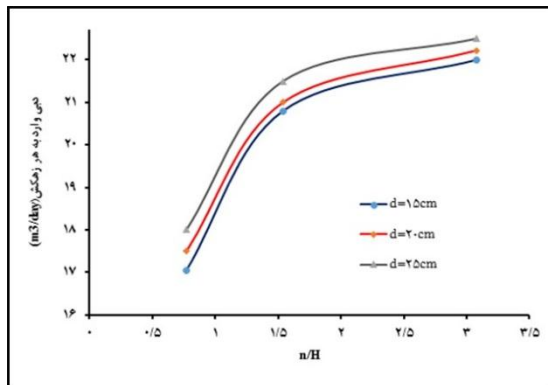
۹- ب: (روی چاه‌های فشار شکن)

شکل (۹): نحوه توزیع زیر فشار در وسط و روی چاه‌های فشار شکن در شکل (۱۰) تغییرات بار آبی نسبی در وسط دو زهکش در مقابل فاصله چاه‌های فشار شکن از هم نشان

جدول (۲): مقایسه نتایج مدل عددی و معادله میدلبروکس و جرویس برای بار آبی بین چاه‌های فشار شکن

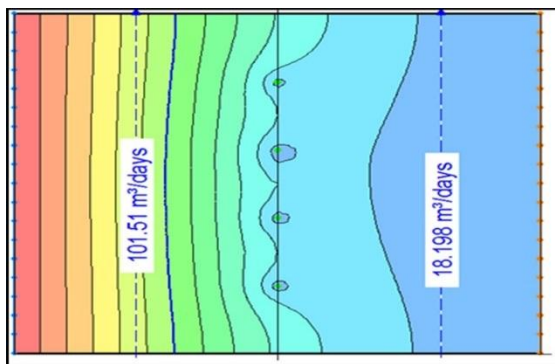
| قطر چاه‌ها (m) | فاصله چاه‌های فشار شکن (m) | فاصله‌ی ردیف چاه‌ها از بالادست (m) | $\frac{H_m}{H}$ (SE(P/W)) | $\frac{H_m}{H}$ (لبروکس و جرویس) |
|----------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| ۰/۲ | ۱۰ | ۲۵ | ۰/۶۱۱ | ۰/۶۱۵ |
| ۰/۲ | ۲۰ | ۲۵ | ۰/۶۵۴ | ۰/۶۶۸ |
| ۰/۲ | ۴۰ | ۲۵ | ۰/۷۰۷ | ۰/۷۵۵ |
| ۰/۲ | ۱۰ | ۳۰ | ۰/۵۹۷ | ۰/۶۰۶ |
| ۰/۲ | ۲۰ | ۳۰ | ۰/۶۳۵ | ۰/۶۵۲ |
| ۰/۲ | ۴۰ | ۳۰ | ۰/۶۷۵ | ۰/۷۳۲ |
| ۰/۲ | ۱۰ | ۳۵ | ۰/۵۸۶ | ۰/۶۰۱ |
| ۰/۲ | ۲۰ | ۳۵ | ۰/۶۱۶ | ۰/۶۴۲ |
| ۰/۲ | ۴۰ | ۳۵ | ۰/۶۴۶ | ۰/۷۱۴ |

هر چاه افزایش می‌یابد که روند این افزایش نیز به صورت سهمی است.

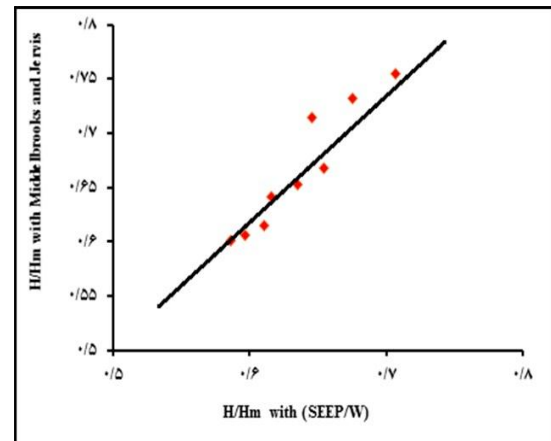
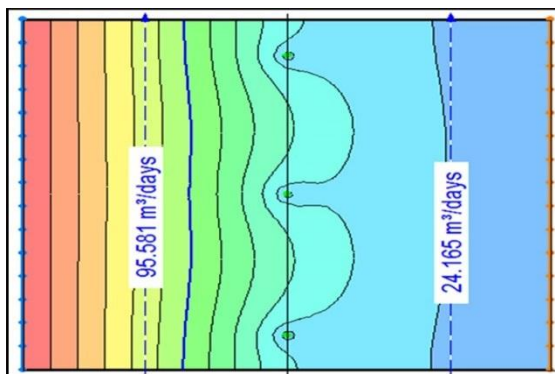


شکل (۱۳): تغییرات دبی نشتی به چاه‌های فشارشکن در مقابل فاصله چاه‌ها از هم (s=۳۰m)

در شکل‌های (۱۴ الف، ب و ج) نتایج شبیه‌سازی برای نشان دادن تأثیر فاصله چاه‌های فشارشکن که دارای بار آبی کل ۷ متر است برای فواصل ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری نشان داده شده است. همچنین مقدار جریان عبوری از دو مقطع قبل و بعد از چاه‌های فشارشکن و کنترلهای بار کل نشان داده شده است.



۱۴ الف: (n=۱۰m)

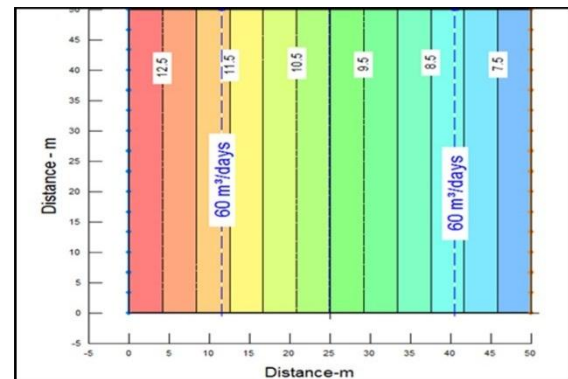


شکل (۱۱): مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با SEEP/W و روش تحلیلی میدلبروکس و جرویس

مقدار دبی جریان نشتی از پی سد در حالتی که هیچ‌گونه چاه فشارشکن در پایین دست وجود نداشته باشد را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود.

$$Q = KiA = 1 \times \frac{13 - 7}{50} \times (50 \times 10) = 60 \text{ m}^3/\text{day}$$

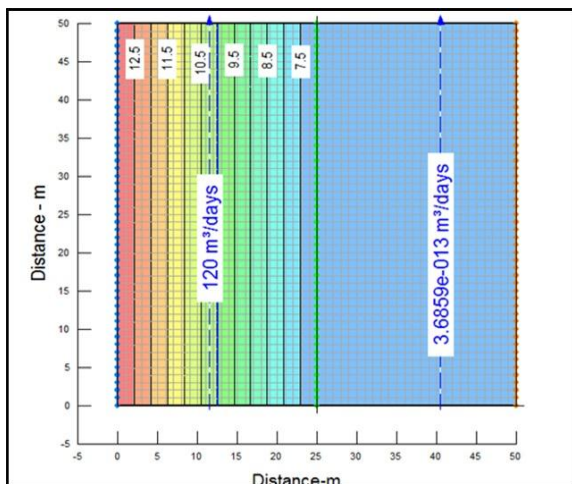
نتایج شبیه‌سازی عددی در این حالت و شمارگرهای^۱ بار آبی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



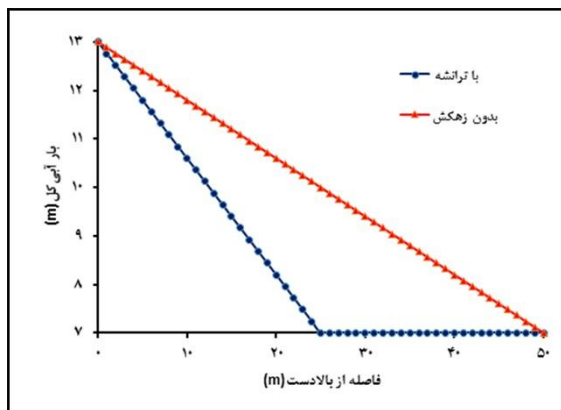
شکل (۱۲): منحنی‌های هم‌پتانسیل و مقدار جریان نشتی در حالت شرایط عدم وجود چاه فشارشکن

میران دبی نشت به هر چاه را می‌توان با به دست آوردن دبی در مقطع قبل و بعد چاه‌های فشارشکن محاسبه نمود. در شکل (۱۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای محاسبه دبی نشتی بر اساس قطر زهکش‌ها ارائه گردیده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر چاه‌های فشارشکن، دبی نشتی وارده به هر چاه نیز بیشتر می‌شود. ضمناً هر چه فاصله چاه‌های فشارشکن از هم بیشتر باشد، دبی نشتی وارده به

است و کل جریان نشتی از مخزن به ترانشه وارد می شود و بار آبی در محل ترانشه برابر با پتانسیل پایاب خواهد بود. تحت این شرایط مسیر جریان در حالتی که ترانشه در فاصله ۲۵ متری از بالادست سد قرار دارد به نصف تقلیل می یابد و در نتیجه میزان جریان نسبت به حالت قبل ۲ برابر می شود زیرا گرادیان هیدرولیکی ۲ برابر شده است (شکل (۱۶)).



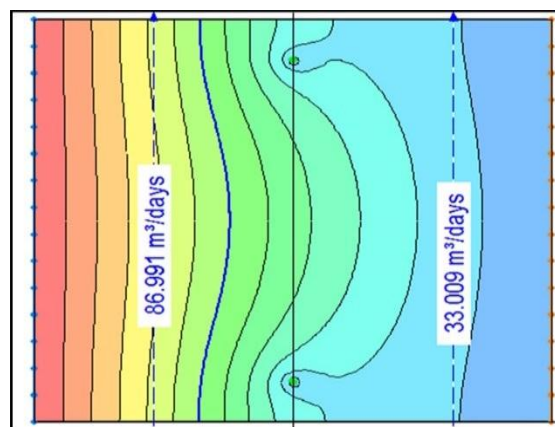
شکل (۱۵): منحنی های هم پتانسیل و مقدار دبی نشتی در حالت وجود ترانشه در پایین دست سد



شکل (۱۶): منحنی تغییرات زیر فشار به ازای فاصله از بالادست سد

در شکل (۱۷) نتایج حاصل از مدل عددی در صورتی که چاه های فشارشکن در پایین دست سد و به صورت دو ردیفه باشند، ارائه گردیده است. این بررسی برای دو حالتی که چاه ها در امتداد هم و به صورت زیگزاگی باشد، انجام گرفت. مدل سازی در شرایطی که فاصله دو ردیف از هم (Z) در ۴ حالت ۳، ۶، ۹ و ۱۲ متری بودند بررسی گردید. همان طور که در شکل (۱۸) مشاهده می شود، با افزایش فاصله چاه های ردیف دوم نسبت به ردیف اول (Z) در حالتی که چاه ها

۱۴ ب: (n = ۲۰m).



۱۴ ج: (n = ۴۰m).

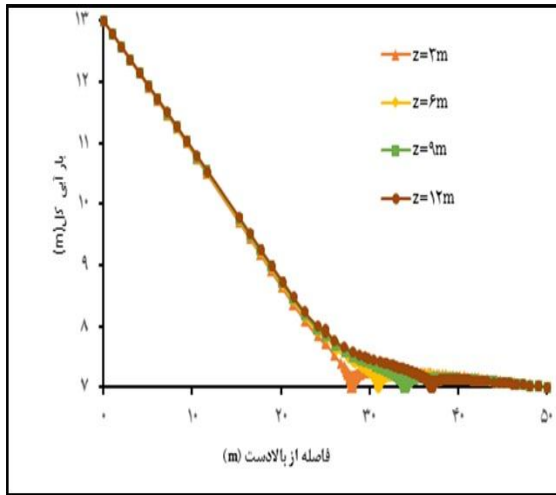
شکل (۱۴): منحنی های هم پتانسیل در فواصل مختلف چاه ها از هم (d=۰/۲۰m, n=۱۰ m, S=۳۵m)

همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می گردد، مجموع دبی عبوری از دو مقطع ۱۲۰ مترمکعب بر روز است و اختلاف بین این دو مقطع عبارت است از مقدار جریانی که به کل چاه های فشارشکن وارد گردیده است. در جدول (۳) مقدار جریان ورودی به هر زهکش فشارشکن به صورت درصدی از مجموع دو دبی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش فاصله چاه های فشارشکن مقدار جریان ورودی به هر چاه افزایش می یابد.

جدول (۳): مقدار جریان نسبی ورودی به هر چاه

| فاصله چاه ها از همدیگر (m) | جریان نسبی به هر چاه فشارشکن |
|----------------------------|------------------------------|
| ۴۰ | ۲۲/۵ |
| ۲۰ | ۱۹/۸ |
| ۱۰ | ۱۷/۳ |

در صورتی که فاصله چاه های فشارشکن به هم نزدیک گردد در این صورت این سیستم تخلیه مانند یک سیستم تخلیه ترانشه عمل می کند. برای شبیه سازی این حالت، بار آبی در محل چاه ها به صورت سرتاسری در عرض پی سد در نظر گرفته شده است. بعد از شبیه سازی می توان مقادیر دبی نشتی را در مقطع قبل و بعد از ترانشه را به دست آورد. همان طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده در این حالت در پایین دست ترانشه جریان تقریباً به سمت صفر میل کرده

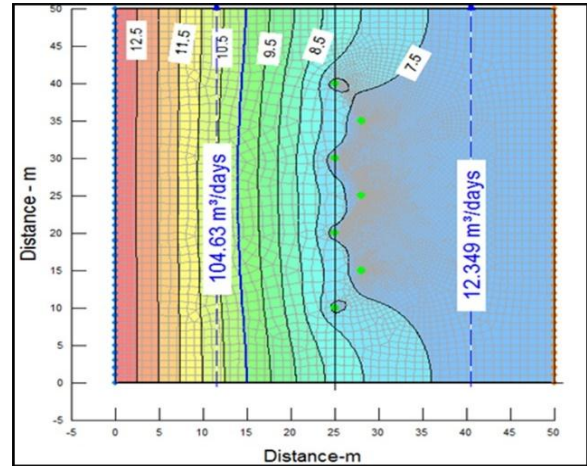


۱۸- ب: آرایش قرارگیری چاه‌ها به صورت زیگزاگی

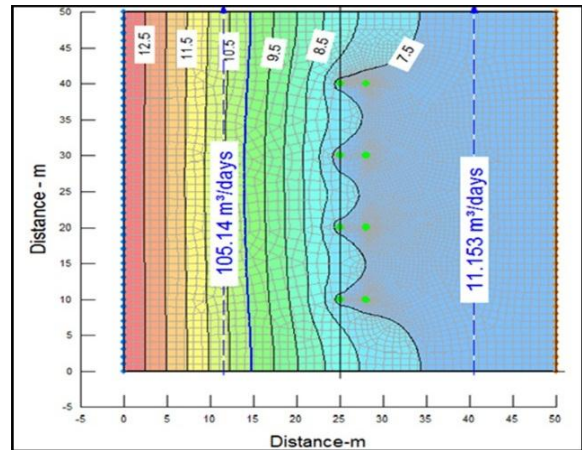
شکل (۱۸): منحنی‌های توزیع زیرفشار در حالت چاه‌های فشارشکن دو ردیفه ($d=0/20m, z=2m, n=10m$)

به منظور برآورد نیروی زیرفشار، معادلات رگرسیونی خطی و غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS22 به دست آمد. در این محاسبات پارامتر U/U_0 (نسبت نیروی بالابرنده در حالت با چاه فشارشکن به حالت بدون چاه فشارشکن) به عنوان پارامتر وابسته n/H ، s/H و d/H به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شدند که در آن‌ها d ، n و s به ترتیب قطر، فاصله مرکز تا مرکز چاه‌ها از یکدیگر و s فاصله ردیف‌های چاه از بالادست سد می‌باشند. نتایج این محاسبات در جدول (۴) و (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است این معادلات برای محدوده شبیه‌سازی شده یعنی $0/192 < \frac{d}{H} < 0/115$ ، $0/077 < \frac{n}{l} < 0/27$ و $1/9 < \frac{s}{l}$ به دست آمده است.

به صورت زیگزاگی قرار گرفته‌اند، تأثیر بیشتری در کاهش میزان زیرفشار ایجاد کرده است.

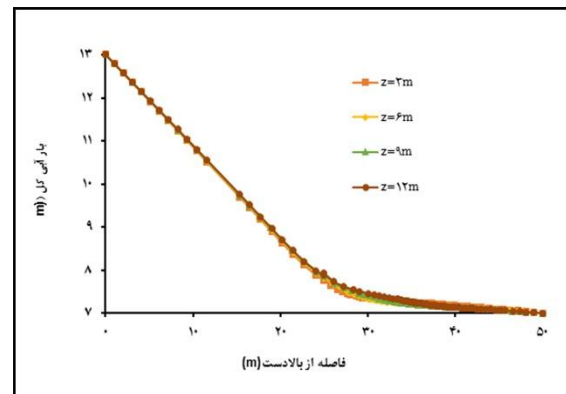


۱۷- الف: (زیگزاگی)



۱۷- ب: (در امتداد هم)

شکل (۱۷): منحنی‌های هم‌پتانسیل و مقدار جریان نشتی در حالت چاه‌های فشارشکن دو ردیفه ($d=0/20m, z=2m, n=10m$)



۱۸- الف: آرایش قرارگیری چاه‌ها در امتداد هم

جدول (۴): مقایسه نتایج حاصل از روابط رگرسیون خطی و غیرخطی با مدل عددی تحقیق حاصل در برآورد زیرفشار

| d/H | n/H | s/H | U/U _o (SEEP/W) | U/U _o (Linear) | U/U _o (Non-linear) |
|-------|-------|-------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| ۰/۸۶۵ | ۰/۸۸۰ | ۰/۸۸۰ | ۰/۸۶۵ | ۰/۸۸۰ | ۰/۸۸۰ |
| ۰/۸۸۸ | ۰/۸۹۶ | ۰/۸۹۷ | ۰/۸۸۸ | ۰/۸۹۶ | ۰/۸۹۷ |
| ۰/۹۱۲ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۲ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۳ |
| ۰/۸۹۲ | ۰/۸۹۸ | ۰/۹۰۲ | ۰/۸۹۲ | ۰/۸۹۸ | ۰/۹۰۲ |
| ۰/۹۱۰ | ۰/۹۱۵ | ۰/۹۲۰ | ۰/۹۱۰ | ۰/۹۱۵ | ۰/۹۲۰ |
| ۰/۹۲۸ | ۰/۹۳۱ | ۰/۹۳۶ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۳۱ | ۰/۹۳۶ |
| ۰/۹۵۰ | ۰/۹۳۵ | ۰/۹۳۷ | ۰/۹۵۰ | ۰/۹۳۵ | ۰/۹۳۷ |
| ۰/۹۶۲ | ۰/۹۵۲ | ۰/۹۵۴ | ۰/۹۶۲ | ۰/۹۵۲ | ۰/۹۵۴ |
| ۰/۹۷۴ | ۰/۹۶۸ | ۰/۹۷۰ | ۰/۹۷۴ | ۰/۹۶۸ | ۰/۹۷۰ |
| ۰/۸۸۹ | ۰/۸۸۷ | ۰/۸۸۸ | ۰/۸۸۹ | ۰/۸۸۷ | ۰/۸۸۸ |
| ۰/۹۱۱ | ۰/۹۰۴ | ۰/۹۰۶ | ۰/۹۱۱ | ۰/۹۱۴ | ۰/۹۰۶ |
| ۰/۹۲۲ | ۰/۹۲۰ | ۰/۹۲۲ | ۰/۹۲۲ | ۰/۹۲۰ | ۰/۹۲۲ |
| ۰/۹۱۴ | ۰/۹۰۶ | ۰/۹۱۱ | ۰/۹۱۴ | ۰/۹۰۶ | ۰/۹۱۱ |
| ۰/۹۳۴ | ۰/۹۲۲ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۳۴ | ۰/۹۲۲ | ۰/۹۲۸ |
| ۰/۹۵۳ | ۰/۹۳۹ | ۰/۹۴۴ | ۰/۹۵۳ | ۰/۹۳۹ | ۰/۹۴۴ |
| ۰/۹۵۰ | ۰/۹۴۳ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۵۰ | ۰/۹۴۳ | ۰/۹۴۵ |
| ۰/۹۶۱ | ۰/۹۵۶ | ۰/۹۶۳ | ۰/۹۶۱ | ۰/۹۵۹ | ۰/۹۶۳ |
| ۰/۹۵۹ | ۰/۹۷۶ | ۰/۹۷۹ | ۰/۹۵۹ | ۰/۹۷۶ | ۰/۹۷۹ |
| ۰/۸۸۹ | ۰/۸۹۵ | ۰/۸۹۵ | ۰/۸۸۹ | ۰/۸۹۵ | ۰/۸۹۵ |
| ۰/۹۱۲ | ۰/۹۱۱ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۲ | ۰/۹۱۱ | ۰/۹۱۳ |
| ۰/۹۳۶ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۳۶ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۲۸ |
| ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۸ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۱۸ |
| ۰/۹۳۲ | ۰/۹۳۰ | ۰/۹۳۵ | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۳۰ | ۰/۹۳۵ |
| ۰/۹۵۲ | ۰/۹۴۶ | ۰/۹۵۱ | ۰/۹۵۲ | ۰/۹۴۶ | ۰/۹۵۱ |
| ۰/۹۴۹ | ۰/۹۵۰ | ۰/۹۵۲ | ۰/۹۴۹ | ۰/۹۵۰ | ۰/۹۵۲ |
| ۰/۹۶۰ | ۰/۹۶۷ | ۰/۹۷۰ | ۰/۹۶۰ | ۰/۹۶۷ | ۰/۹۷۰ |
| ۰/۹۷۳ | ۰/۹۸۳ | ۰/۹۸۵ | ۰/۹۷۳ | ۰/۹۸۳ | ۰/۹۸۵ |

جدول (۵): معادله رگرسیونی خطی و غیرخطی برای به دست آوردن نیروی زیرفشار

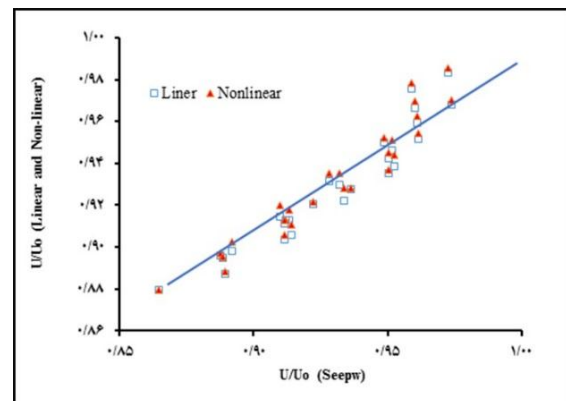
| معادله | R ² | RMSE |
|--|----------------|--------|
| $\frac{U}{U_o} = 1.952 \times \left(\frac{d}{H}\right) + 0.024 \times \left(\frac{n}{H}\right) + 0.043 \times \left(\frac{s}{H}\right) + 0.756$ | ۰/۹۱۹ | ۰/۰۰۸۳ |
| $\frac{U}{U_o} = 0.742 \times \left(\frac{d}{H}\right)^{0.05} + 0.05 \times \left(\frac{n}{H}\right)^{0.612} + 0.19 \times \left(\frac{s}{H}\right)^{0.383}$ | ۰/۹۲۵ | ۰/۰۰۸ |

به هر چاه بیشتر می‌شود. در ضمن هر چه فاصله آن‌ها از هم بیشتر می‌شود دبی نشتی وارده به هر چاه افزایش می‌یابد. با کاهش فاصله و یا افزایش قطر چاه‌ها، نیروی زیرفشار وارد بر زیر سد کاهش می‌یابد. شایان‌ذکر است که فاصله زهکش‌ها از هم نسبت به قطر زهکش‌ها تأثیر زیادتری در کاهش زیرفشار ایجاد می‌کند. برای استفاده در طراحی، روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی برای محاسبه میزان کاهش نیروی بالا برنده با حضور چاهک فشارشکن ارائه گردید. با توجه به محدوده شبیه‌سازی در این پژوهش، مناسب‌ترین فاصله قرارگیری چاه‌ها از یکدیگر، فاصله ۱۰ متری است که البته بایستی هزینه اجرایی طرح را نیز جهت انتخاب این فاصله مدنظر قرار داد. همچنین نشان داده شد که در حالت چاه‌های فشارشکن دو ردیفه، حالت قرارگیری چاه‌ها به صورت زیگزاگی تأثیر بیشتری در کاهش فشار آب حفره‌ای نسبت به حالتی که چاه‌ها در امتداد هم باشند، دارد. در این مطالعه خاک پی زیر سد خاکی همروند^۱ در نظر گرفته شد. پیشنهاد می‌شود تا در مطالعات آینده حالت غیرایزوتروپ نیز بررسی گردد.

مراجع

- ۱- ابوالحسنی مبارکه، ح، (۱۳۸۹)، "طراحی هیدرولیکی چاهک-های فشارشکن در سد خاکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۲- احمدی، ح. ابطی، ط؛ و آقازاده، ن، (۱۳۹۶). "تأثیر پارامترهای هیدرولیکی در تحلیل نشت ناپایدار از پی و بدنه سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد خاکی دریک)". مجله پژوهش آب ایران. جلد ۱۱ شماره ۴ صفحات ۱-۱۱.
- 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- رحیمی، ح، (۱۳۹۳)، سدهای خاکی، چاپ پنجم، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- ۵- کلاته، ف. حسین زاده، ف، (۱۳۹۷)، "به‌کارگیری روش المان محدود در تحلیل همبسته سدهای خاکی و برآورد فشار

مطابق معادلات ارائه‌شده در جدول (۵)، دقت دو رابطه خطی و غیرخطی نزدیک به هم بوده و چون استفاده از رابطه خطی راحت‌تر است، لذا استفاده از رابطه خطی برای محاسبه مقدار کاهش نیروی بالا برنده با کاربرد چاه فشارشکن پیشنهاد می‌گردد. برای بررسی پراکندگی داده‌ها حول خط رگرسیونی از نمودار مقادیر حاصل از معادلات خطی و غیرخطی به دست آمده به روش رگرسیونی در برابر روش مدل عددی برای ارزیابی فرمول‌ها استفاده شده است (شکل (۱۹)). با توجه به شکل (۱۹) مشاهده می‌شود که داده‌ها حول خط نیمساز ($y=x$) پراکنده شده‌اند؛ بنابراین روابط رگرسیونی جدول (۴) از دقت بالایی در تخمین نیروی زیرفشار برای محدوده مورد نظر برخوردار هستند.



شکل (۱۹): مقادیر نیروی زیرفشار حاصل از روش مدل عددی و معادلات رگرسیونی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی با هدف تأثیر عواملی همچون قطر، فاصله از هم و فاصله از بالادست سد چاه‌های فشارشکن در میزان دبی نشتی و زیرفشار مد نظر قرار گرفت. برای این منظور از روش اجزاءمحدود با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W استفاده شد. برای اعتبارسنجی، روش عددی به‌کاررفته در این پژوهش با روش تحلیلی میدلبروکس و جرویس نیز مقایسه گردید و تطابق مناسبی مشاهده شد. نتایج نشان داد که با افزایش قطر چاه فشارشکن، دبی نشتی

- 11- Lyle, J, (2003) "Earthen Dams for Small Catchments", CE 5993 Field Engineering in the Developing World.
- 12- Middlebrooks, T.A. and Jervis, H, (1997), "Relief wells for Dams and Levees Trans", American Society of Civil Engineers, (112), 1323-1336.
- 13- 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.
- 14- Salmasi, F. Khatibi, R, and Nourani, B, (2017), "Investigating reduction of uplift forces by longitudinal drains with underlined canals", ISH Journal of Hydraulic Engineering, 24(1) 81-91.
- 15- Salmasi, F and Mansouri B, (2016), "Numerical investigation of underground drain radius, depth and location on uplift pressure reduction (Case study: Tabriz diversion dam)" Vol (3) Issue 3, 58-65.
- 16- Nourani B, Salmasi F, Abbaspour A and Oghati B, (2016), "Numerical investigation of the optimum location for vertical drains in gravity dams", Geotechnical and Geological Engineering, 35(2) 799-808.
- آب منفذی"، فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، ۳۱/۲، صفحه ۲۵
- 6- 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.
- 7- Al-Suhili, R.H. Hussein, G.O, (2017), "Effect of the existence of under drain on Uplift pressure and exit gradient", Journal for Engineering Sciences, Volume 4 -53-66.
- 8- Anonymous, (2012), "Geo-Studio, Version 8.15.11236", User Manual. GEOSLOPE International, Calgary, in, Alberta, Canada.
- 9- Azizi, S. Salmasi, F. Abbaspour, A. and Arvanaghi, H, (2012), "Weep Hole and Cut-off Effect in Decreasing of Uplift Pressure (Case Study: Yusefkand Mahabad Diversion Dam)" Journal of Civil Engineering and Urbanism Volume 2, Issue 3: 97-101).
- 10- Driscoll, F.G, (1986), "Ground water and wells", Johnson Division SES, Inc. St. Paul, MN.