مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار ۱٤۰۰، جلد چهاردهم، شماره ۱، صفحه ٤۳ تا ٥٦

آنالیز نشت در پی و بدنه سد خاکی با استفاده از مدلسازی عددی-مطالعه موردی

هادی فتاحی* [۱]، محسن شاهمنصوری [۲]، حسین قائدی [۲]

دریافت مقاله: ۹۹/۰٤/۱۲ پذیرش مقاله: ۹۹/۰٦/۳۰

چکیده

یکی از مهمترین مسائل در طراحی سدهای خاکی که در مواردی احداث سد را در یک منطقه غیر قابل توجیه می‌نماید، مقدار فرار آب از مخزن سد از طریق پی و بدنه است. لذا محاسبه دقیق مقدار دبی نشت از بدنه و پی سد از جهات فنی و اقتصادی حائز اهمیت فراوانی است. آنالیز نشت در طراحی یک سد خاکی از لحاظ ایمنی سد نیز مهم می‌باشد زیرا جریان آب در بدنه و پی سد باعث بوجود آمدن فشار حفره‌ای و نیروهای تراوشی می‌شود، که اگر مقدار این نیروها در حد مجاز نباشد، پایداری مصالح بدنه و پی سد دچار مشکلات عمده‌ای از قبیل رگاب و آب شستگی خواهد شد، که در نتیجه به خرابی سد خواهد انجامید. بنابراین لازم است تا به منظور جلوگیری از خرابی‌های حاصل از زه آب، مقدار جریان زه در بدنه و شالوده سد خاکی به طور دقیق تعیین شود. در این مقاله به منظور آنالیز نشت در سد خاکی رودبار لرستان (مطالعه موردی) از مدلسازی عددی (روش المان محدود) در نرم‌افزار Slide استفاده شده است. نتایج حاصل از مدلسازی عددی و محاسبات زه آب عبوری از مقطع عرضی پی و بدنه سد رودبار لرستان نشان می‌دهد که به طور سالیانه برابر با ٦۲۹٥۸٤ متر مکعب برآورد می‌شود که معادل ۰/۲۷ درصد حجم آب سد (۱۷۲٤ متر مکعب در روز: سهم بدنه سد ۹۸ درصد و سهم پی سنگی ۲ درصد) می‌باشد که با توجه به جنس مصالح هسته قابل قبول ارزیابی می‌شود. همچنین مدلسازی انجام شده نشان می‌دهد سد خاکی رودبار لرستان دارای ضریب ایمنی بسیار بالایی در برابر پدیده رگاب است.

کلید واژه‌ها: *آنالیز نشت، نرم‌افزار* Slide*، سد خاکی رودبار لرستان، مدلسازی عددی*

۱. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک h.fattahi@arakut.ac.ir
۲. دانشجوی دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
* مسئول مکاتبات

١. مقدمه

صنعت سدسازی به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پیچیده‌ترین فعالیت‌های عمرانی و ژئوتکنیکی، همواره مدنظر جوامع مختلف بوده و از نظر اقتصادی نیز یکی از منابع مهم اقتصادی هر کشور محسوب می‌شود. بعلاوه طی سالیان اخیر در زمینه مهندسی دیواره‌های شیبدار (به ویژه سدسازی) در موضوعات مختلف مطالعات زیادی انجام شده است (Fattahi 2015 ; Fattahi 2016; Fattahi 2017a; Fattahi 2017b; Fattahi 2020; Fattahi et al. 2018). از طرفی با توجه به اینکه مسأله کمبود آب در قرن اخیر و قرن‌های آینده یکی از مشکلات اساسی جامعه بشری خواهد بود و کشور ایران نیز از این مسأله مستثنی نیست، از این‌رو در کشور ما نیز مطالعات اساسی برای مهار آب‌های روان بوسیله احداث سدها انجام شده است. یکی از این سدها، سد خاکی رودبار لرستان است که هدف از احداث این سد، ذخیره‌سازی آب رودخانه‌ای منطقه و استفاده از آن در جهت افزایش اراضی زیرکشت موجود در منطقه پایین دست و تولید جریان برق می‌باشد. تا حدود نیم‌قرن پیش طراحی و ساخت سدهای خاکی تنها براساس تجربه صورت می‌گرفت ولی امروزه در زمینه طراحی و ساخت سدهای خاکی، با این موضوع بصورت کاملاً علمی برخورد می‌شود. شایان ذکر است که عامل پیشرفت در زمینه طراحی و ساخت سدهای خاکی مربوط به مسئله نشت در سدها و تأثیر آن در پایداری سدهاست، که این موضوع برای اولین بار بعنوان یکی از علل خرابی سدها مورد توجه قرار گرفت و بعدها منجر به تدوین مسئله نشت و جریان آب در سدها گشت. مسئله نشت در سدها و تأثیر آن در پایداری سد یکی از موضوعات مهم در طراحی سدهای خاکی محسوب می‌شود. اگر گرادیان هیدرولیکی در قسمت نشت آب از شیب بدنه سد در قسمت پایین دست زیاد شود، ممکن است موجب شسته شدن خاک (بخصوص اگر عمل تراکم به خوبی انجام نشده باشد) شود. این عمل یک پدیده پیشرونده است بطوریکه ابتدا ریزترین ذرات شسته می‌شوند و با شسته شدن این ذرات، مقاومت خاک در برابر جریان کم شده و گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد. با افزایش گرادیان هیدرولیکی، ذرات درشت‌تر شسته می‌شوند و به تدریج عمل فرسایش با سرعت بیشتری انجام گرفته و موجب تشکیل تونلی در درون سد می‌شود و بعد از گذشت زمان، جریان آب موجب گشادتر شدن تونل می‌شود. در این مرحله سقف تونل فرو می‌ریزد و شکسته شدن کامل سد به وقوع می‌پیوندد. در طول سالیان اخیر، مطالعات زیادی بر روی آنالیز نشت سدهای خاکی انجام شده است که در این مقاله به مهمترین آنها اشاره خواهد شد. نیومن و ویترسپون در سال ١٩٧٠، به آنالیز نشت غیردائم از بدنه و پی سدهای خاکی با کمک روش اجزای محدود پرداختند. در واقع این محققین از جمله اولین کسانی بودند که موضوع نشت را به کمک روش اجزای محدود بررسی کردند(Neuman and Witherspoon 1970). کاسیم و سوفی در سال ٢٠٠٢، رفتار جریان نشت درون یک سد خاکی را با استفاده از آنالیز عددی شبیه‌سازی نمودند. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار Seep/W که از روش المان محدود در آنالیز نشت استفاده می‌نماید، استفاده کردند (Kasim and Fei 2002). ردی در سال ٢٠٠٣، به مطالعه بر روی نیروی نشت و توسعه آن پرداخت. او بر پایه قوانین دارسی با تحلیل مقدماتی لایه‌های نفوذناپذیر، معادلات بنیادی برای لایه‌های تحت فشار را استخراج نمودند (Reddi 2003). لی و ماو در سال ٢٠٠٤، از روش تفاضل محدود مبتنی بر مختصات مرزی انطباقی، برای بررسی نشت در پی‌ها و همچنین تحلیل نشت با سطح آزاد در یک سد، در حالت ماندگار استفاده کردند. در این تحقیق با استفاده از قانون زنجیره‌ای مشتقات جزئی، معادله حاکم و شرایط مرزی نشت از سیستم مختصات دکارتی به سیستم مختصاتی با مرزهای منحنی‌وار انطباقی، منتقل شدند. در این تحقیق نشان داده شد که با این روش، شبیه‌سازی محدوده‌های فیزیکی با مرزهای دارای هندسه پیچیده با دقت زیادی انجام می‌شود (Jie et al. 2004). سلیمانی‌بیگی و جعفرزاده در سال ٢٠٠٥، عوامل مؤثر بر نتایج نشت سد خاکی با هسته رسی قائم را بررسی کردند. در این مقاله سرعت تخلیه پایین‌دست، سطح فراتیک و گرادیان هیدرولیکی

را بررسی کردند و متغیرها به مدل اعمال شد تا وابستگی نتایج را ارزیابی کنند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات مشخصات مصالح و عمق پرده آب‌بند بر سرعت تخلیه آب هسته و پی تأثیرگذار است و تغییر طول پرده آب‌بند در یک لایه تغییر قابل توجهی در نتیجه جریان آب ندارد (Soleimanbeigi and Jafarzadeh 2005). رخشنده‌رو و باقریه در سال ۲۰۰٦، نحوه‌ی نشت در سد خاکی ۱۵ خرداد را پس از آبگیری اولیه، با روش حل عددی آنالیز نمودند. آنالیز اجزاء محدود برای سد، توسط نرم‌افزار Seep/3D تنها برای قسمت هسته‌ی سد صورت گرفت(Rakhshandehrou and Bagherieh 2006). چن و همکاران در سال ۲۰۰۸، برای حل مشکلات نشت با سیستم‌های زهکش سد، حلی عددی ارائه دادند که از روش المان محدود استفاده می‌کرد (Chen et al. 2008). موکاپادیای در سال ۲۰۰۸، در تحقیقی با عنوان تحلیل نشت در پی با استفاده از روش المان محدود و شبکه جریان، از ترکیب روش‌های شبکه جریان و المان محدود برای بررسی نشت استفاده کرد. در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش المان محدود، مقادیر پتانسیل گره‌ای در اجزاهای ٤ ضلعی و ٤ گره‌ای به دست آمد و سپس شبکه جریان براساس پتانسیل‌های گره‌ای به دست آمده از روش المان محدود ترسیم شد(Mukhopadhyay 2008). استرزلسکی و کاستسکی در سال ۲۰۰۸، میزان نشت را از یک سد خاکی همراه با یک پی نفوذپذیر و غیرصلب را در هنگام تحکیم آن مورد بررسی قرار دادند (Strzelecki and Kostecki 2008). سینگ در سال ۲۰۰۸، روند نشت در یک سد خاکی همگن دارای فیلتر پاشنه‌ای افقی را با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند و برای آسان‌سازی مسئله سد را ایزوتروپیک و واقع شده بر روی یک پی نفوذناپذیر و شرایط نشت را پایدار فرض نمودند. برای حل مسئله با روش عددی از برنامه‌های ANSYS، PLAXIS و Seep/w استفاده شد (Singh 2008). فوجونگ و شنگ در سال ۲۰۰۹، یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان نشت غیردائمی از سد ارائه کردند (Fu and Sheng 2009). شمسایی و همکاران در سال ۲۰۱۰، با استفاده از روش حجم محدود جریان عبوری از پی سد بتنی را مدل‌سازی کرد و صحت نتایج مدل پیشنهادی خود را با مقایسه با سه نرم‌افزار Seep/W، Msseep و Plaxis مورد تأیید قرار داد (Shamsai et al. 2010). بلیو و همکارانش در سال ۲۰۱۱، یک روش آزمایشگاهی جدید را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از یک پروتکل اندازه‌گیری خود پتانسیل همراه با تزریق آب نمک، برای مکان‌یابی نشت در سدهای خاکی و تعیین نفوذپذیری آن استفاده کردند (Boleve et al. 2011). نوری و همکاران در سال ۲۰۱۱، خط نشت و فشار آب منفذی در سد خاکی غیرهمگن دهوک را به کمک نرم‌افزار المان محدود Seep 2D و پایداری سد را به کمک نرم‌افزار STABIL2.3 انجام دادند. آنالیز و نتایج آن‌ها بیانگر دقت بالای هر دو مدل بود که بعد از صحت‌سنجی مدل‌ها تأثیر نسبت (K_x/K_y) را روی میزان نشت و پایداری سد بررسی کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش (K_x/K_y) میزان نشت افزایش و ضریب اطمینان پایداری سد کاهش می‌یابد (Noori et al. 2011). سلیمانی و اخترپور در سال ۲۰۱۱، در تحقیقی با آنالیز نشت سد مخزنی شوریجه با استفاده از روش اجزا محدود ارائه کرد و بیان کرد که کنترل نشت به منظور جلوگیری از فشار منفذی، پوسته شدن پایین‌دست، پدیده رگاب در بدنه سد خاکی و شیب پایین‌دست یک امر ضروری است(Soleymani and Akhtarpur 2011). بوچل قوم در سال ۲۰۱۱، به بررسی پدیده نشت در زمان حفاری پرداخت و ارزیابی‌ها در ارتباط با پدیده نشت در محیط‌های همسان بود. همچنین خاک چندلایه تحت جریان سیال در حالت متقارن را طی کدنویسی در محیط FLAC مورد بررسی قرار دادند (Bouchelghoum and Benmebarek 2011). صدقی اصل و همکاران در سال ۲۰۱۲، به بررسی مسئله نشت از پی سدهای ساحلی و کنترل پیزومتریک فشار بالابر توسط یک مدل آزمایشگاهی پرداختند (Sedghi-Asl et al. 2012). کاظم‌زاده و دانشمند در سال ۲۰۱۳، برای حل مشکلات نشت آزاد از روش المان محدود شبکه ثابت هموار سه‌بعدی استفاده کردند. همچنین آن‌ها، برای تسهیل راه‌حل مشکلات دامنه متغیر و

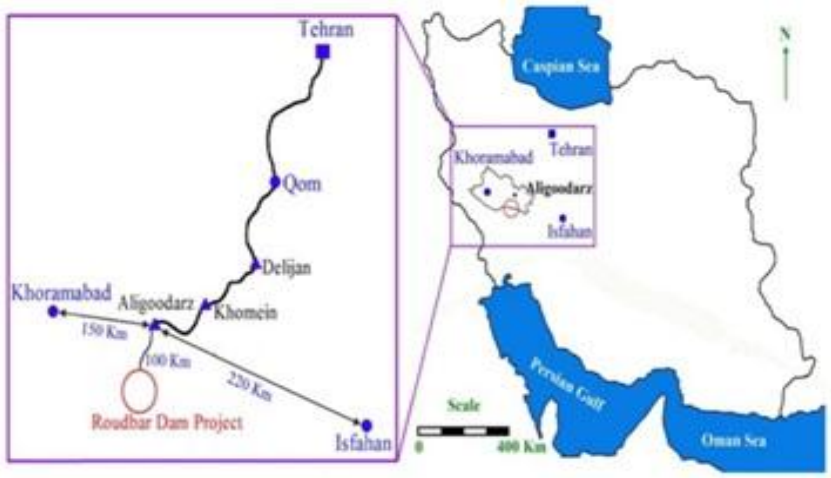
تقاطع المان‌ها در دقت بیان ریاضی شرایط مرزی را بهبود دادند(Kazemzadeh-Parsi and Daneshmand 2013). اسدی و خزائی در سال ٢٠١٤، به بررسی نشت در سد خاکی کمال‌صالح در استان مرکزی با استفاده از روش عددی پرداختند. در این تحقیق توپوگرافی حقیقی منطقه‌ی سد بوسیله نرم‌افزار Seep/3D با در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری واقعی اندازه‌گیری شده در بدنه، فونداسیون و تکیه‌گاه‌های چپ و راست، مدل‌سازی شد. آن‌ها همچنین به منظور صحت‌سنجی نتایج، یک مقطع دوبعدی با Plaxis و Seep/3D مدل‌سازی و نتایج آن با آنالیز سه‌بعدی مقایسه کردند (Asadi and Khazaei 2014). نورانی و همکاران در سال ٢٠١٤، در مقاله‌ای با عنوان شبیه‌سازی نشت دوبعدی غیرماندگار با استفاده از آنالوگ فیزیکی در سد خاکی ستارخان، پرداختند (Nourani et al. 2014). درخشانی و همکاران در سال ٢٠١٤، در مطالعه‌ای به مدل‌سازی عددی سد سنگریزه‌ای ونیار در ایران پرداختند. در این مدل‌سازی میزان نشت، فشار آب حفره‌ای و تنش کل برای ارزیابی رفتار کلی سد مورد ارزیابی قرار گرفت(Derakhshandi et al. 2014). فرزام‌پور و همکاران در سال ٢٠١٤، ضخامت بهینه هسته رسی سد را با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور از بسته نرم‌افزاری Geo-Studio جهت شبیه‌سازی عددی استفاده کردند(Farzampour et al. 2014). ژو و همکاران در سال ٢٠١٥، مدل‌سازی معکوس نشت از پی سد خاکی در مرحله ساخت را با استفاده از مدل جریان گذار، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک ارائه دادند (Zhou et al. 2015). محرمی و همکاران در سال ٢٠١٥، به صورت عددی به بررسی عملکرد دیوار آب‌بند بر فشار بالابر و پدیده رگاب در سدهای بتنی پرداختند(Moharrami et al. 2015). یوسفی و همکاران در سال ٢٠١٦، مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پرده آب‌بند بر کنترل نشت و پدیده جوشش در پی سازه‌های هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند (Yousefi et al. 2016).

در این مقاله، برای حل جریان نشت از بدنه سدهای خاکی از معادله لاپلاس استفاده می‌شود و از آنجا که حل معادله لاپلاس از طریق رسم شبکه جریان به روش ترسیمی و یا حل دستی فرآیندی بسیار پیچیده و وقتگیر است از نرم افزارهای کامپیوتر استفاده می‌شود. البته بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد بیشتر نرم افزارهای شبیه‌ساز نشت و تحلیل پایداری در سدهای خاکی که بر اساس روش المان محدود کار می‌کنند، توجه کمتری به موقعیت خط نشت آزاد و حجم توده اشباع سد (که در بررسی پایداری بسیار مهم است) شده است. از این‌رو در این تحقیق به منظور کسب دانش در تحلیل نشت سد خاکی رودبار لرستان با استفاده از نرم‌افزار Slide (روش المان محدود) به این مسئله توجه ویژه شده است.

٢. مشخصات و موقعیت محل اجرای پروژه

طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان به عنوان اولین سد بلند در حوضه رودخانه دز، بر روی رودخانه آب رودبار و در فاصله حدود ١٠٠ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز و در محدوده رشته کوه زاگرس در غرب ایران با طول جغرافیایی ´´٣٧´٤١°٤٩ و عرض جغرافیایی ´´٢٣´٥٤°٣٢ واقع شده است. رودخانه رودبار در مسیر عبوری خود رشته ارتفاعات U شکل منطقه زاگرس را دور زده و پس از طی طول تقریبی ٣٨ کیلومتر به رودخانه آلکن تغییر نام می‌دهد. رودخانه آب رودبار در زیر حوضه بختیاری- زالکی از حوضه آبریز رودخانه دز علیا واقع شده و دارای سه شاخه اصلی به نام‌های کاکلستان (خاک بتیه)، قلیان، هرگان و همچنین شاخه آب سفید است که در یک دره عمیق به سمت جنوب شرق با متوسط دبی سالیانه ٣٠/٢ مترمکعب در ثانیه در جریان می‌باشد. حداقل دبی ماهیانه رودخانه پس از برداشت‌های بالادست حدود٤/١ مترمکعب بر ثانیه و حداکثر آن حدود ٢٥/٥ مترمکعب بر ثانیه است. همچنین هدف از احداث سد استفاده از پتانسیل طبیعی منطقه به منظور تولید انرژی برقابی با ظرفیت ٤٥٠ مگاوات می‌باشد. با توجه به اختلاف ارتفاع در حدود ٣١٠ متری بین سد و محل نیروگاه، احداث نیروگاه در

پای سد موردنیاز نبوده، بلکه محل نیروگاه به صورت سطحی در فاصله حدود ۳/۵ کیلومتری از محور سد طراحی شده است. این مجموعه شامل یک بدنه خاکی با هسته رسی، نیروگاه، تونل انحراف آب و سیستم انتقال آب شامل یک تونل آب‌بر و دو تونل پنستاک و دو مخزن ضربه‌گیر با ارتفاع ۱۳۰ متر است. ارتفاع از پی این سد ۱۵۸ متر و با طول تاج ۲۱۱ متر و عرض تاج ۸ متر می‌باشد و طول دریاچه سد حدود ۲۰ کیلومتر است. شکل ۱ موقعیت و راه دسترسی به سد و نیروگاه رودبار لرستان را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت و راه دسترسی به سد و نیروگاه رودبار لرستان

همچنین شکل ۲ نمایی از ساختگاه سد خاکی رودبار لرستان و شکل ۳ قسمت ورودی تونل انحراف آب را نشان می‌دهد.

شکل۲. نمایی از ساختگاه سد رودبار لرستان

شکل۳. قسمت ورودی تونل انحراف آب

در جدول ۱مشخصه‌های عمومی و فنی سد خاکی رودبار لرستان ارائه شده است.

جدول۱. مشخصه‌های عمومی سد خاکی رودبار لرستان

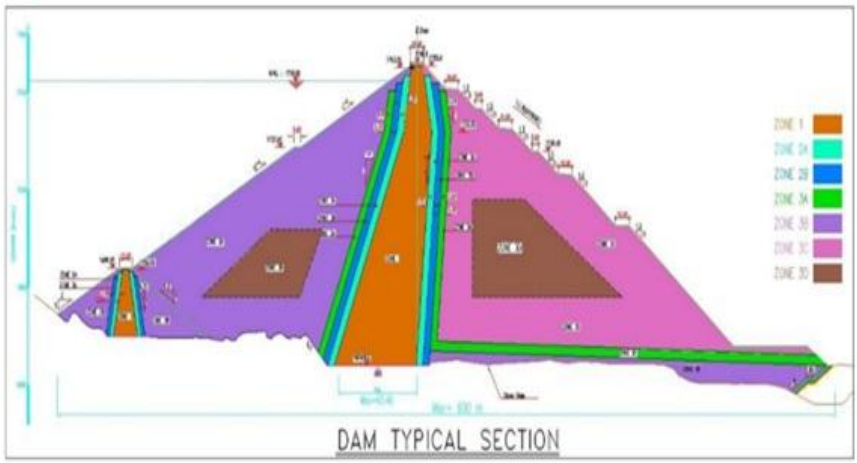
Properties	Value
Type of dam	Soil with clay core
Dam height from river floor	142 m
Dam height from foundation floor	156 m
River floor level	1624 m
Normal water level	1756 m
Dam crown level	1766 m
Crown length	185 m
Crown width in the highest figure	15 m
Free height relative to normal water level	10 m
Overflow level	1750 m
Thickness of upstream and downstream filters	Upstream 4m and downstream 5m Upstream 1m and downstream 0.5m
Thickness of rip rap	1.80:1
Upstream crust slope	1.30:1
Downstream crust slope	

لازم به ذکر است که سد رودبار لرستان سدی خاکی با هسته رسی می‌باشد. این گونه سدها بطور عمده از مصالح خاکی و سنگی با مشخصات ویژه ساخته شده و در مقابل نیروی رانش آب بطور وزنی عمل می‌کنند. این نوع از سدها بطور عمده از مصالح خاکی حاصل از منابع قرضه خاکی ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل می‌شوند. آب‌بندی آن‌ها معمولاً از طریق ایجاد هسته نفوذناپذیر در بخش مرکزی سد و از مصالح رسی کوبیده شده بدست می‌آید. در طرفین هسته‌ی مذکور دو لایه فیلتر از مصالح شنی و ماسه‌ای قرار داده می‌شود. وظیفه‌ی فیلترهای سمت راست سرآب جلوگیری از شستشوی هسته‌ی رسی در جریان تخلیه‌ی سریع مخزن بوده و فیلتر سمت پایاب برای جلوگیری از پدیده‌ی پای‌پینگ احداث می‌شود. برای ساخت بدنه سد از مصالح مختلفی استفاده شده است. هسته مرکزی از جنس رس متراکم بوده که مهمترین مشخصه آن نفوذپذیری بسیار پایین آن می‌باشد بطوریکه هدایت الکتریکی ان حدود $1e^{-8}$ متر بر ثانیه می‌باشد. فیلترهای و لایه‌های انتقال‌دهنده دارای نفوذپذیری بیشتری است. این فیلترها علاوه بر اینکه از شسته شدن رس متوسط جریان آب جلوگیری می‌کنند، وظیفه‌ی کاهش فشار آب منفذی درون هسته رسی را نیز ایفا می‌کنند. سنگریزه‌های بالادست و

پایین‌دست در نقش نگهدارنده هسته سد عمل می‌کند. این قسمت از مصالح درشت دانه‌تر تشکیل شده‌اند. شکل ٤ مصالح بکار رفته در سد خاکی رودبار لرستان را نشان می‌دهد. علاوه بر آن مشخصات مصالح تشکیل دهنده بدنه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول۲. مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده بدنه سد

Type of materials	Electrical conductivity(m/s)	φ (Degree)	C(KPa)	ρ(KN/m^3)	E(MPa)	ν
Clay core	$1e^{-8}$	25	0	19	12	0.4
Filter-transmitter	$1e^{-4}$	40	0	20	50	0.3
Main transmitter	$1e^{-3}$	42	0	21	45	0.3
Upstream gravel	$1e^{-3}$	44	0	22	45	0.3
downstream gravel	$1e^{-4}$	43	0	21	40	0.3



شکل٤. مصالح بکار رفته در سد خاکی رودبار لرستان

با توجه به مصالح سد و همچنین جدول بالا نفوذپذیری سد بسیار پایین است همچنین مطابق شکل ٤ سد خاکی رودبار لرستان با هسته GC (گراول و رس) است که مصالح مورد نیاز برای ساخت بدنه سد از معادنی که در فازهای قبلی پروژه مورد بررسی قرار گرفته است تأمین می‌شود. ازجمله معادن رس (C،B) که در ۷ کیلومتری سد قرار دارد و رس مورد نیاز جهت اتصال و هسته (GC) از این معادن تأمین می‌شود. همچنین برای مصالح فیلترها، ۳A را از مصالح رودخانه‌ای و برای تولید 2A ،2B را از سنگ شکن استفاده می‌شود. همچنین برای مصالح راکفیل جهت زون‌های(3D،3C،3B) از انفجارات معادن AX2،AX1 که در نزدیکی بدنه سد قراردارد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳. تئوری آنالیز نشت

یکی از مهمترین مسائل در طراحی سدهای خاکی که در مواردی احداث سد را در یک منطقه غیرقابل توجیه می‌نماید، مقدار فرار آب از مخزن سد از طریق پی و بدنه است. لذا محاسبه دقیق مقدار دبی نشت از بدنه و پی سد از جهات فنی و اقتصادی حائز اهمیت است. از آنجا که حل معادلات دیفرانسیل نشت به جز در موارد خاص، بطوری که اگر مصالح غیرهمگن و شرایط هندسی پیچیده باشد رسم شبکه

جریان از طریق روش ترسیمی، حل به صورت تحلیلی و یا حل عددی دستی به سادگی امکان‌پذیر نخواهد بود و دارای فرآیندی پیچیده و وقت‌گیر است. لذا در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های عددی در تحلیل نشت توسط محققین ژئوتکنیک بسیار معمول گشته است و جواب‌های دقیق‌تری نسبت به روش‌های اشاره شده دارد. در مدل‌های عددی از تقریب برای حل معادلات دیفرانسیل پیچیده که جربان آب زیرزمینی را بیان می‌کنند استفاده می‌شود. حل این مدل‌ها احتیاج به شبکه‌بندی منطقه و یا به عبارت دیگر تکه‌تکه کردن دامنه مسأله به ابعاد کوچکتر و حل این معادلات برای هر قسمت از این شبکه می‌باشد. به طور کلی دقت مدل‌های عددی بستگی به دقت داده‌های ورودی، ابعاد سلول، مراحل زمانی و روش حل مورد استفاده برای حل معادلات دارد. معادلات حل شده توسط مدل‌های عددی دیفرانسیل جزئی درجه دوم است که بار آبی در آن‌ها یک متغیر است. روش عددی المان محدود یکی از روش‌های عددی و بکار برده شده برای آنالیز نشت می‌باشد در این روش منطقه به یک سری المان تقسیم می‌شود. این المان‌ها توسط گره‌ها مشخص و شکل می‌گیرد. مساحت منطقه موردنظر به وسیله گره‌های درنظر گرفته شده تعیین می‌شود. این مسئله این امکان را می‌دهد تا بتوان محیط‌های غیرهمگن را تجزیه و تحلیل کرد. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی می‌باشد. یکی از مهمترین کاربردهای روش‌های عددی (المان محدود) برای سدهای خاکی مسئله تحلیل نشت از پی سدها می‌باشد و غالباً سدها با داشتن رقوم نرمال آب در این دوره زمانی قرار دارند. بر همین اساس بیشترین نشت پی سد در این دوره اتفاق می‌افتد. بنابراین معادلات حاکم بر نشت در خاک طبق قانون دارسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v = ki \qquad (۳)$$

$$Q = kiA \qquad (۴)$$

که در آن v سرعت جریان نشت، k ضریب نفوذپذیری، i گرادیان هیدرولیکی، A سطح مقطعی که آب درون آن نشت می‌کند و Q دبی نشت می‌باشد.

معادله حاکم بر نشت آب در یک محیط متخلخل در حالت جریان آرام که قانون دارسی نیز در آن معتبر باشد در حالت سه‌بعدی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right)Q=\frac{\partial \theta}{\partial t} \qquad (۵)$$

که در آن H انرژی کل، k_x هدایت هیدرولیکی در جهت x، k_y هدایت هیدرولیکی در جهت y، Q شار وارد شده از مرزهای محیط، θ رطوبت حجمی، و t زمان می‌باشد. مقدار رطوبت حجمی وابسته به تغییرات حالت تنش و خصوصیات فیزیکی خاک است. متغیرهای حالت تنش به صورت دو بخش $(\sigma-u_a)$ و $(\sigma-u_a)$ بیان می‌گردد که σ تنش کل، u_a فشار هوا و u_w آب منفذی می‌باشد. بنابراین از آنجایی که در حالت‌های اشباع و غیراشباع از بدنه سد رودبار لرستان مقدار تنش کل و فشار هوای منفذی ثابت می‌باشد، لذا تغییرات رطوبت حجمی متناسب با تغییرات فشار آب منفذی خواهد بود که این فشار خود بخشی از مقدار انرژی کل (H) در معادله ۵ می‌باشد. به این ترتیب تغییرات رطوبت حجمی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\partial\theta = m_w \partial u_w \qquad (۶)$$

که در رابطه فوق، m_w شیب تغییرات رطوبت حجمی نسبت به تغییرات فشار آب منفذی است.

چنانچه جریان دائمی باشد دبی حجمی سیال ورودی و خروجی از یک جزء حجمی در هر زمان یکسان هست. لذا معادله حاکم بر نشت آب در حالت سه‌بعدی معادله ۵ به صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial Z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial Z}\right)=0 \qquad (۷)$$

در صورتی که $K_x=K_y=K_z$ باشد رابطه ۷ به صورت رابطه ۸ تقلیل می‌یابد که به معادله لاپلاس معروف می‌باشد:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 H}{\partial Z^2}=0 \qquad (۸)$$

با تقسیم ناحیه پیوسته جریان به اجزاء کوچکتر و همچنین ساده‌سازی معادلات پیچیده حل مسئله محدود به بدست آوردن مقدار H در گره‌هایی می‌شود که از بهم متصل شدن اجزائ کوچک حاصل شده‌اند. پس از محاسبه مقدار گره‌ای H خطوط هم‌پتانسیل و جریان بدست آمده و از آنجا که می‌توان دبی نشت را محاسبه کرد در تحلیل نشت تمامی مراحل توسط اجزاء محدود انجام می‌شود. در این مقاله برای تجزیه و تحلیل نشت سد رودبار لرستان از نرم‌افزار المان محدود Slide استفاده شده است. مطابق با معادلات گفته شده، ضرایب نفوذپذیری مصالح برای سد خاکی رودبار لرستان در جدول ۳ ارائه شده است. این ضرایب براساس نتایج آزمایشگاهی، بازدید صحرایی و قضاوت کارشناسی بدست آمده‌اند.

جدول۳. پارامترهای مصالح در تحلیل نشت بدنه و پی

Type of materials	$K_x=K_y$(cm/s)
Central core	2.2×10^{-7}
Filter	5.74×10^{-5}
Crust	1×10^{-1}
Stone foundation	1×10^{-7}

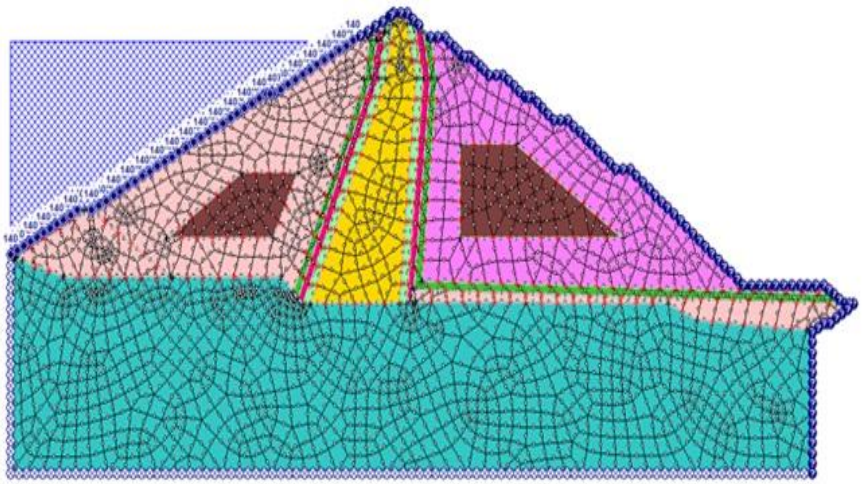
٤. معرفی نرم‌افزار Slide

نرم‌افزار Slide از مجموعه نرم‌افزارهای Rocsience می‌باشد که کارآیی آن در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و خاکی می‌باشد. این نرم‌افزار یکی از جامع‌ترین و کامل‌ترین نرم‌افزارهای در زمینه‌های تحلیل پایداری شیب به همراه تحلیل آب زیرزمینی به روش المان محدود، تحلیل نفوذپذیری، جریان درون سازه‌های خاکی، افت ناگهانی سطح آب، طراحی سیستم نگهداری، تحلیل احتمالاتی و تحلیل حساسیت است. تمامی انواع شیب‌های خاکی و سنگی، سدهای خاکی، خاکریزه‌ها، دیوارهای حائل، می‌توانند در این نرم‌افزار مورد تحلیل قرار گیرند. جریان‌ها، فشارها و شیب‌ها براساس شرایط مرزی هیدرولیکی تعیین شده محاسبه می‌شود. تجزیه و تحلیل نشت به طور کامل با تجزیه و تحلیل پایداری شیب یکپارچه شده و یا می‌تواند به عنوان یک ماژول مستقل استفاده شود. این نرم‌افزار قابلیت گسترده‌ای در تحلیل احتمالاتی دارد و امکان انتخاب نوع تحلیل احتمالاتی نیز برای کاربران امکان‌پذیر است. علاوه بر ویژگی‌های گفته شده در این نرم‌افزار امکان استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری و محاسبه ضریب ایمنی از قبیل: روش بیشاپ، روش جانبو، روش اسپنسر و سایر روش‌ها به طور همزمان وجود دارد. یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین ویژگی‌های این نرم‌افزار، امکان اصلاح شیب به روشی آسان و ساده است که با صرف کم‌ترین زمان می‌توان اصلاح شیب را بر روی مدل اعمال کرد.

۵. مدل‌سازی عددی نشت در بدنه و پی سد خاکی رودبار لرستان

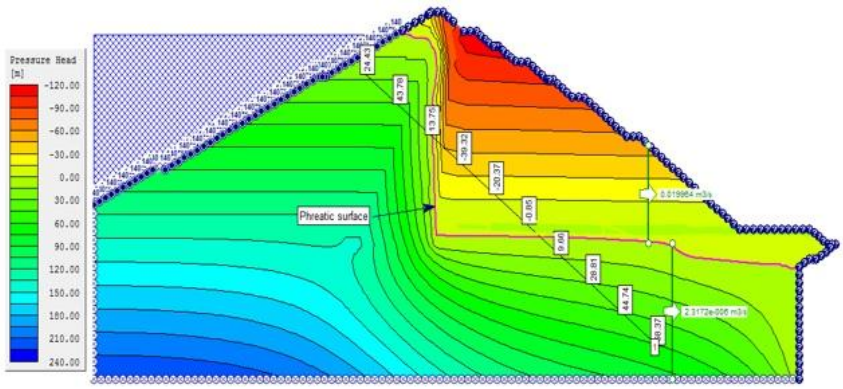
به منظور بررسی چگونگی استفاده از روش عددی ارائه شده المان محدود برای حل معادله لاپلاس حاکم بر نشت آب در بدنه سد خاکی رودبار لرستان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه سد رودبار لرستان از نوع سد سنگریزه‌ای با هسته خاکی است و همچنین با توجه به پارامترهای موجود از مشخصات مصالح از مدل رفتاری موهر-کولمب برای تحلیل استفاده شد. در این مقاله پس از بررسی مشخصات ژئوتکنیکی بدنه و پی سد، جهت محاسبه دبی خروجی از بدنه و پی سد، تعیین سطح آزاد جریان آب در هسته، خطوط هم‌پتانسیل و هم‌فشار آب، محاسبه گرادیان هیدرولیکی در هسته سد و نقاط تمرکز جریان، بررسی میزان تأثیر هسته مرکزی در کنترل نشت از پی و بدنه سد، دستیابی به تعیین بار آبی در محدوده نشت سد رودبار لرستان به کمک نرم‌افزار

Slide مدل‌سازی شده است. در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی سد، پس از تعریف هندسه مدل (شیب‌های بالادست و پایین‌دست، شیب هسته سد، عرض تاج سد)، مشخصات ژئوتکنیکی سد و تعریف شرایط مرزی از المان‌بندی هشت‌گرهی و مش‌بندی استفاده می‌شود. در این مدل ابتدا سعی بر این بوده است به منظور جلوگیری از هزینه‌های اضافی بدون هیچ‌گونه تمهیدات آب‌بندی مدل‌سازی انجام شود در صورتی که خروج آب از پی بیش از حد باشد می‌توان از پرده آب‌بند یا از پتوی رسی در سد استفاده کرد. مطابق با شکل ۵، مشخصات کلی و مش‌بندی مقطع عرضی نشان داده شده است. همچنین در این مدل نقاط دارای شرایط مرزی معلوم به صورت بار آبی معلوم در بالادست و پایین‌دست معرفی شده‌اند.

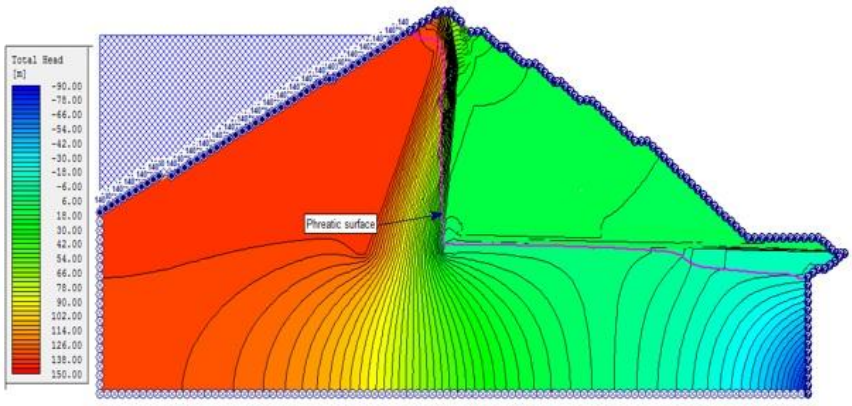


شکل۵. مقطع مش‌بندی شده پی و بدنه سد در تحلیل نشت سد رودبار لرستان

پس از مش‌بندی پی و بدنه سد، به منظور محاسبات نشت به صورت شبکه جریان شامل خطوط جریان و هم‌پتانسیل، بردارهای جریان و خطوط هم‌فشار ارتفاع آب در پی و بدنه مقطع عرضی سد در شکل ٦ نشان داده شده است. همچنین این نرم‌افزار قابلیت مدل کردن جریان در محیط‌های غیراشباع را نیز دارد. به این ترتیب که خطوط هم‌پتانسیل بالاتر از سطح آزاد جریان هم ادامه یافته‌اند. همچنین خط آزاد آب، خطوط هم‌پتانسیل در پی و بدنه سد در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل٦. مقطع مش‌بندی شده پی و بدنه سد در تحلیل نشت سد رودبار لرستان



شکل۷. خط آزاد آب و خطوط هم‌پتانسیل پی و بدنه سد رودبار لرستان

با توجه به شکل‌های ٦ و ۷، نتایج حاصل از محاسبات زه آب عبوری از مقطع عرضی پی و بدنه سد رودبار لرستان نشان می‌دهد میزان نشت یا آب عبوری از سد معادل ٤٤٧٩ مترمکعب در روز بوده که به طور سالیانه برابر ١٦٤١٦٠٠ متر مکعب برآورد می‌شود (معادل ۰/۷۲ درصد حجم آب مخزن سد) که در این حالت سهم بدنه سد حدود ۹۸ درصد و سهم پی سنگی حدود ۲ درصد از میزان کل نشت بوده است که با توجه به میزان نشت آب از بدنه و پی سنگی بیشترین گرادیان هیدرولیکی خروجی در هسته برابر با ۳ می‌باشد. این مقدار با توجه به جنس مصالح هسته قابل قبول ارزیابی می‌شود. گرادیان حداکثر هسته در اغلب سدهای ساخته شده کمتر از ۵ گزارش شده است. لذا ضرایب ایمنی در مقابل رگاب در ناحیه یاد شده در بسیار بالا خواهد بود و احتمال رگاب به صفر خواهد رسید. همانطور که نتایج نشان می‌دهد اجرای هسته مرکزی در کاهش دبی عبوری از بدنه و فیلترها و نیز کاهش گرادیان هیدرولیکی در بخش‌های مختلف بدنه و پی از اهمیت بسزایی برخوردار است.

٦. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همانگونه که اشاره شد تعیین و بررسی میزان نشت آب از بدنه و پی سد خاکی رودبار لرستان نقش بسیار مهمی را در حفظ پایداری و بقای سد ایفا می‌کند. از آنجا که معادله حاکم بر نشت آب در محیط متخلخل خاک، معادله لاپلاس و دارسی به جز در مواردی خاص و با شرایط مرزی ساده به توجه به میزان نشت آب در مقایسه با آب پشت سد این مقدار نشت در سال ناچیز بوده و از روش‌های کاهش نشت نظیر پرده آب‌بند، پتوی آب‌بند و سپرها می‌توان چشم‌پوشی کرد. همچنین با توجه به مشخصات بدنه سد در هسته و سنگریزه‌های بالادست و پایین‌دست که دارای نفوذپذیری بسیار پایینی است و بر اساس نتایج بدست آمده از محاسبات گرادیان هیدرولیکی در نقاط مختلف بدنه سد رودبار لرستان صورت تحلیلی قابل حل نمی‌باشد، لذا در این مقاله روش المان محدود به کمک نرم‌افزار Slide به دلیل دقت بالا و سادگی حل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته مشخص شد که نشت سالیانه آب از بدنه سد در مقابل ذخیره سالیانه آب پشت سد مقدار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است به طوری که میزان آب عبوری از سد به طور سالیانه ١٦٤١٦٠٠مترمکعب (سهم بدنه سد حدود ۹۸ درصد و سهم پی سنگی حدود ۲ درصد) است. این میزان نشت از بدنه و پی سد معادل ۰/۷۲ درصد حجم کل آب مخزن سد می‌باشد. بنابراین با توجه به میزان درصد کم نشت آب نسبت به حجم کل آب سد در سد رودبار لرستان نیازی به کاهش نشت با روش‌هایی نظیر پرده آب‌بند، سپرها و پتوی آب‌بند ندارد. همچنین براساس نتایج بدست آمده از محاسبات گرادیان هیدرولیکی در نقاط مختلف بدنه سد رودبار لرستان، با توجه به نشت آب از سد بیشترین گرادیان هیدرولیکی خروجی در هسته برابر ۳ است بنابراین دارای ضریب ایمنی

بالایی در مقابل رگاب در ناحیه یاد شده دارد. در نهایت با توجه به نتایج حاصله از مقادیر زه آب عبوری و گرادیان هیدرولیکی بیشینه در بخش‌های مختلف سیستم، طراحی ضخامت هسته و ناحیه‌بندی داخلی بدنه سد از نظر مهار نشت از بدنه و پی سد قابل قبول ارزیابی شده و نتایج این مقاله و شبیه‌سازی حاکی از بهینه بودن طراحی‌ها به لحاظ مهار نشت می‌باشد.

منابع

Asadi M., Khazaei J., 2014, Seepage analysis in body and foundation of Dam using the Seep/3D and Seep/W, Journal of Science and Today's World, 3: 457-461.

Boleve A., Janod F., Revil A., Lafon A., Fry J.-J., 2011, Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection, Journal of Hydrology, 403: 242-252.

Bouchelghoum F., Benmebarek N., 2011, Critical hydraulic head loss assessment for a circular sheet pile wall under axisymmetric seepage conditions, Studia Geotechnica et Mechanica, 33: 3-23.

Chen Y., Zhou C., Zheng H., 2008, A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems, Computers and Geotechnics, 35: 383-393.

Derakhshandi M., Pourbagherian H., Baziar M ,.Shariatmadari N., Sadeghpour A., 2014, Numerical analysis and monitoring of a rockfill dam at the end of construction (case study: Vanyar dam), International Journal of Civil Engineering, 12: 326-337.

Farzampour A., Salmasi F., Mansuri B., 2014, Optimum Size for Clay Core of Alavian Earth Dam by Numerical Simulation, Iranica Journal of Energy & Environment, 5: 240-246.

Fattahi H., 2015, Prediction of earthquake induced displacements of slopes using hybrid support vector regression with particle swarm optimization, Int J Optim Civil Eng, 5: 267-282.

Fattahi H., 2016, A hybrid support vector regression with ant colony optimization algorithm in estimation of safety factor for circular failure slope, International Journal of Optimization in Civil Engineering, 6: 63-75.

Fattahi H., 2017a, Prediction of slope stability using adaptive neuro-fuzzy inference system based on clustering methods, Journal of Mining and Environment, 8: 163-177.

Fattahi H., 2017b, Risk assessment and prediction of safety factor for circular failure slope using rock engineering systems, Environmental earth sciences, 76: 224.

Fattahi H., 2020, A new approach for evaluation of seismic slope performance, International Journal of Optimization in Civil Engineering, 10: 261-275.

Fattahi H ,.Babanouri N., Varmaziyari Z., 2018, A Monte Carlo simulation technique for assessment of earthquake-induced displacement of slopes, Journal of Mining and Environment, 9: 959-966.

Fu J.-f., Sheng J., 2009, A study on unsteady seepage flow through dam, Journal of Hydrodynamics, Ser B, 21: 499-504.

Jie Y., Jie G., Mao Z., Li G., 2004, Seepage analysis based on boundary-fitted coordinate transformation method, Computers and Geotechnics, 31: 279-283.

Kasim F., Fei W.S., 2002, Numerical parametric simulations for seepage flow behaviour through an earthfill Dam, Malaysian Journal of Civil Engineering, 14 :

Kazemzadeh-Parsi M.J., Daneshmand F., 2013, Generalized unconfined seepage flow model using displacement based formulation, Engineering Geology,, Vol. 166, pp. 140-151 :.

Moharrami A., Moradi G., Bonab M.H., Katebi J., Moharrami G., 2015, Performance of cutoff walls under hydraulic structures against uplift pressure and piping phenomenon, Geotechnical and Geological Engineering, 33: 95-103.

Mukhopadhyay S., 2 ,۰۰۸Seepage analysis through foundation using FEM and flownet, International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics,(IACMAG) :

Neuman S.P., Witherspoon P.A., 1970, Finite element method of analyzing steady seepage with a free surface, Water Resources Research, 6: 889-897.

Noori B., M A.I., Kh S., 2011, "Evaluation of seepage and stability of duhok dam.Al Rafidain Engineering," Vol, 19.No.1 :.

Nourani V., Aminfar M.H., Alami M.T., Sharghi E., Singh V.P., 2014, Unsteady 2-D seepage simulation using physical analog, case of Sattarkhan embankment dam, Journal of Hydrology, 519: 177-189.

Rakhshandehrou G.R., Bagherieh A., 2006, Three dimensional analysis of seepage in 15-Khordad dam after impoundment, Iranian journal of science and technology transaction b- engineering, 30: 55-68.

Reddi L.N. (2003) Seepage in soils: principles and applications. John Wiley & Sons ,

Sedghi-Asl M., Rahimi H., Khaleghi H., 2012, Laboratory investigation of the seepage control measures under coastal dikes, Experimental Techniques, 36: 61-71.

Shamsai A., Abdi Dezfuli E., Zebardast A., Vosoughifar H. A study of seepage under concrete dam using the finite volume method. In: Fourteenth International Water Technology Conference, Cairo, Egypt, 2010. Citeseer ,

Singh A., 2008, Analysis of flow in a horizontal toe filter, International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG): 2449-2455.

Soleimanbeigi A., Jafarzadeh F., 2005, 3D steady state seepage analysis of embankment Dams, Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE), 10 :

Soleymani S., Akhtarpur A. (2011) Seepage analysis for shurijeh reservoir dam using finite element method. In: Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. pp 3227-3234

Strzelecki T., Kostecki S., 2008, Seepage through dam and deformable soil medium with consolidation, Studia Geotechnica et Mechanica, 30: 71-84.

Yousefi M., Parvizi M., SEDGHI A.M., 2016, Laboratory Investigation the Effects of sheet pile on Seepage Control and sand boiling through Alluvial Foundation of hydraulic structures :

Zhou C.-B., Liu W., Chen Y.-F., Hu R., Wei K., 2015, Inverse modeling of leakage through a rockfill dam foundation during its construction stage using transient flow model, neural network and genetic algorithm, Engineering Geology, 187: 183-195.