

## مدل سازی نشت از پی و بدنه‌ی سدهای خاکی با استفاده از روش اجزا محدود

سیما اوحدی<sup>۱\*</sup>، غلام عباس بارانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲۱

### چکیده

در این تحقیق، به بررسی نشت، تعیین سرعت و توزیع فشار آب منفذی در قسمت‌های مختلف سد خاکی ماشکید در استان سیستان و بلوچستان پرداخته شد. برای مدل سازی سد مذکور و ارزیابی نتایج مربوط به حرکت آب در محیط متخلخل، از نرم افزار آباکوس استفاده شد که از روش قدرتمند اجزا محدود جهت پیش برد برنامه بهره می گیرد. طبق نتایج حاصل، بیشترین سرعت حرکت سیال برابر با  $2/47 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه در زهکش سد، برآورد شد. سپس سه مقطع کنترل در سازه به منظور تعیین میزان نشت، مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، حداکثر دبی نشت از داخل هسته سد برابر  $7/07 \times 10^{-6}$  مترمکعب بر ثانیه است. در مرحله بعد تاثیر پارامتر وزن مخصوص سیال در میزان نشت و فشار آب حفره‌ای در سد ماشکید ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش وزن مخصوص آب، میزان نشت کاهش و فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** بررسی نشت، سد ماشکید، نرم افزار آباکوس

### مقدمه

به خصوص سدهای خاکی<sup>۳</sup> نقش مهمی در پایداری این سازه‌ها دارد، زیرا با وجود این که در شرایط معمول، پدیده‌ی نشت<sup>۴</sup> تا حدودی در تمامی سدهای خاکی اتفاق می‌افتد، اما اگر از مقدار قابل قبولی تجاوز کند، خطرناک بوده و پیامدهایی از قبیل رگاب<sup>۵</sup>، شکست سد و در نهایت خرابی سازه را به دنبال دارد (Nicolini et al., 2014). تحقیقات در این زمینه نشان می‌دهد که پدیده‌ی نشت عامل اصلی ۵۰ درصد شکست کل سدهای خاکی است (Beheshti et al., 2013). از این رو مهندسين معتقدند که بررسی تراوش آب در سدهای خاکی و تصمیم‌گیری در رابطه با روش مناسب جهت کنترل آن، اولین گام در طراحی سازه‌های آب‌گیر به حساب می‌آید. در این راستا، تاکنون روش‌های متعددی بر پایه قوانین بنیادی نشت، برای کنترل میزان نفوذ آب در سدها مورد استفاده قرار گرفته است.

تجزیه، تحلیل و آنالیز جریان آب در محیط متخلخل اولین بار در سال ۱۸۵۶ میلادی هم‌زمان با معرفی قانون داریسی آغاز شد. پس از آن نشان داده شد که جریان آب در محیط متخلخل ایزوتروپیک، توسط قانون داریسی قابل بررسی و مطالعه است و قانون داریسی پایه و اساس مطالعات نشت آب در محیط متخلخل را تشکیل می‌دهد (فدایی کرمانی و همکاران، ۱۳۹۰). معادله‌ی لاپلاس حاکم بر نشت آب، به جز در مواردی با شرایط مرزی بسیار ساده و خاص، به صورت تحلیلی قابل حل نمی‌باشد. به همین دلیل پژوهشگران به روش‌های

شرایط اقلیمی کشور و نیاز آن به احداث سازه‌های ذخیره آب، احداث سدهای مخزنی بزرگ و کوچک را در دستور کار برنامه‌ریزان قرار داده است. این سدها به عنوان سازه‌های مهارکننده آب‌های سطحی و کنترل سیلاب، امکان استفاده بیش‌تر از آب رودخانه‌ها را فراهم می‌نمایند. از دید مهندسی، سدها به‌عنوان سازه‌های زنده به حساب می‌آیند، زیرا عواملی چون تغییرات زمین‌شناسی و سایر معیارهای سد باعث تغییر در رفتار این سازه‌ها می‌شود. آگاهی از این تغییرات، مستلزم شناخت سد و تعیین ویژگی‌های محیط پیرامون آن می‌باشد. اگرچه سدها نقش موثری در تامین نیازهای آبی بر عهده دارند، اما خطرات بالقوه‌ای برای مناطق پایین‌دست خود ایجاد می‌کنند. لیکن نظارت بر پایداری سازه‌های ذخیره‌ی آب، مسئله‌ی مهمی در رابطه با حفظ امنیت ساکنین حومه و پایین‌دست این سازه‌ها به حساب می‌آید (Beheshti et al., 2013).

از جمله مشکلات اساسی در بهره‌برداری از سدها، مسئله نفوذ آب در بدنه، پی و تکیه‌گاه‌های سد است، که علاوه بر ضرر اقتصادی موجب کاهش ذخیره آب پشت سد می‌گردد. فرار آب از مخزن سد

۱- دانشجوی دکترای مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

\* - نویسنده مسئول: (Email: ohadi\_sima@pgs.usb.ac.ir)

3- Earth Dam

4- Seepage

5- Piping

بالا در مدل‌سازی شرایط حاکم، بیش‌تر مورد توجه محققین قرار گرفت. اسدی و خزاعی به بررسی نشت در سد خاکی کمان‌صالح واقع در استان مرکزی با روش المان محدود پرداختند. در این تحقیق توپوگرافی حقیقی منطقه‌ی سد به‌وسیله‌ی نرم‌افزار Seep/3D با در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری واقعی اندازه‌گیری شده مدل‌سازی شد (Asadi and Khazaei., 2014). چنان‌که بینگ‌ژو و همکاران، مدل‌سازی معکوس نشت از پی سد خاکی در مرحله‌ی ساخت را با استفاده از مدل جریان گذرا، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک ارائه دادند. روش پیشنهاد شده مزایایی از روش طراحی متعامد، تحلیل‌های المان محدود، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک گرفته که باعث کاهش محاسبات در کاربردهای مهندسی خواهد شد (Zhou et al., 2015).

همان‌طور که گفته شد به علت زمان‌بر و پرهزینه بودن روش‌های تجربی، به مرور تمایل به استفاده از روش‌های عددی در بررسی مسئله نشت گسترش پیدا کرد. از طرف دیگر روش المان محدود به علت دقت بالا و توانایی اثبات شده در اعمال دقیق شرایط مرزی و اولیه حاکم بر مدل، به عنوان مطرح‌ترین روش در مباحث هندسی شناخته شده است. از جمله برنامه‌هایی که بر پایه روش المان محدود طراحی و تولید شده‌اند، نرم‌افزار قدرتمند آباکوس<sup>۱</sup> می‌باشد. اگرچه تاکنون از نرم‌افزارهای اجزا محدودی مختلفی جهت بررسی نشت استفاده شده است، اما تئوری کامل نرم‌افزار آباکوس که مبتنی بر تحلیل غیرخطی المان محدود پیشرفته است، سبب تمایز آن نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه شده است. ویژگی‌های متمایز برنامه مذکور سبب شده مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس کاملاً با شرایط واقعی و مدل موردنظر مطابقت داشته و در نتیجه خروجی حاصل دقیق و قابل استناد باشد. نظر به توضیحات داده شده، در این تحقیق نیز از روش المان محدود جهت مدل‌سازی نشت از پی و بدنه سد و نیز بررسی تاثیر پارامترهای محیطی بر نتایج حاصل، بهره گرفته شده است. از سوی دیگر، از جمله متغیرهای تاثیرگذار بر میزان نشت، ویژگی‌های سیال نفوذ است. با توجه به آبراهه‌های مختلف منتهی به مخزن سد، تغییرات دامنه وزن مخصوص سیال در فصول مختلف آب‌گیری دور از انتظار نیست. از این رو از مهم‌ترین اهداف این پژوهش کنترل تاثیر پارامتر وزن مخصوص سیال بر میزان دبی تراوش و فشار آب منفذی از سد خاکی ماشکید می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### روابط حاکم بر حرکت آب در محیط متخلخل

در سال ۱۸۵۶، داری<sup>۲</sup> معادله‌ی خود را برای سرعت جریان آب

تجربی، ترسیمی و اخیراً روش‌های عددی متوسل شده‌اند. با توجه به این‌که معادله‌ی لاپلاس در پدیده‌های فیزیکی دیگر چون انتقال حرارت و جریان الکتروسیسته نیز حاکم است، پاولوسکی در سال ۱۹۱۸ برای اولین بار روش همسان‌های الکتریکی را که برگرفته از این تشابه است، برای حل مسئله‌ی نشت پیشنهاد کرد (فدائی‌کرمانی و همکاران، ۱۳۹۰). ردی مطالعه‌ی بر روی نیروی نشت و توسعه‌ی آن پرداخت. او بر پایه قوانین داریسی با تحلیل مقدماتی لایه‌های نفوذپذیر، معادلات بنیادی برای لایه‌های تحت‌فشار را استخراج نمود (Reddi., 2003). آفلاگر و همکارانش به روش‌های آزمایشگاهی روی آورده و به بررسی توانایی روش فیبر نوری در تشخیص مسئله‌ی نشت پرداختند. متکی بودن روش پالس حرارت به منبع حرارت تعبیه شده‌ی داخلی، به‌عنوان مزیت اصلی این روش در بررسی نشت به حساب می‌آید. آن‌ها در تحقیق خود، حساسیت روش پالس حرارت نسبت به سرعت‌های مختلف جریان سیال در محیط متخلخل را به اثبات رساندند (Aufleger et al., 2005). در ادامه‌ی پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی نشت، آلن‌کت و همکارانش برای تشخیص نشت ناشی از نقص احتمالی در دیواره‌ی سد Peribonka، از سیستم نظارت بر اساس تغییرات درجه حرارت با استفاده از کابل‌های فیبر نوری بهره گرفتند. سیستم نظارت بر اساس پالس حرارت، مقاومت حرارتی خاک را اندازه‌گیری می‌کند، که از ایجاد اغتشاش حرارتی به‌وسیله خطوط الکتریکی منبع حرارت تشکیل شده است (Cote et al., 2007). در ادامه، فوجونگ‌فنگ و جین‌شنگ مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان نشت غیردایمی از سد ارائه کردند. آنالیز عددی سدهای خاکی، روشی است که در آن، مسئله همان‌طور که در شرایط واقعی جهان ظاهر می‌شود، نشان داده شده و در شکل کوچک مجسم می‌شود. آن‌ها نشت از سد را در محیط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. با مقایسه نتایج دو روش، صحت و دقت روش عددی در شبیه‌سازی جریان غیردایمی نشت به اثبات رسید (Jun-feng and Sheng., 2009; MS Abhilasha and Antony Balan., 2005). از دیگر روش‌های عددی، روش تفاضلات محدود است که که فدایی‌کرمانی و همکاران (۱۳۹۰) این روش را در حل عددی معادله‌ی حاکم بر نشت از بدنه سد خاکی مورد بررسی قرار دادند. قبادیان (۱۳۹۰)، در تحقیق خود تاثیر دیوار آب‌بند بر موقعیت خط نشت آزاد و دبی تراوش در سدهای خاکی را با استفاده از روش عددی احجام محدود مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، مدلی کامپیوتری تهیه شد که در آن معادله عمومی جریان آب در خاک در شرایط اشباع غیرهمسان به روش احجام محدود متفصل و دستگاه معادلات به روش گوس - سایدل حل گردید. نتایج نشان داد بیش‌ترین تاثیر دیوار آب‌بند زمانی است که طول آن بیش‌تر از ۹۰٪ ضخامت پی نفوذپذیر باشد. در میان روش‌های عددی، روش المان محدود به علت توانایی

1- Abaqus

2- Henri Darcy

در خاک اشباع، به صورت رابطه ۱ منتشر کرد.

$$v = ki \quad (1)$$

که در آن،  $k$  ضریب نفوذپذیری<sup>۱</sup>،  $i$  گرادیان هیدرولیکی<sup>۲</sup> و  $v$  سرعت جریان می‌باشد، که عبارت است از مقدار آبی که در واحد زمان از واحد سطح عمود بر امتداد جریان، عبور می‌کند.

رابطه‌ی داری برای محاسبه‌ی جریان آب عبوری از خاک، یک رابطه‌ی یک‌بعدی است. حال آن‌که در بسیاری از حالات، جریان آب در خاک نه تنها در یک امتداد نیست، بلکه در تمام سطح عمود بر امتداد جریان نیز یکنواخت نمی‌باشد. در چنین حالاتی، محاسبه‌ی جریان آب زیرزمینی توسط نموداری انجام می‌شود، که به آن نمودار شبکه‌ی جریان<sup>۳</sup> می‌گویند. مفهوم شبکه‌ی جریان بر پایه‌ی روابط پیوستگی لاپلاس که شرایط جریان دائمی را برای یک نقطه در توده‌ی خاک تعریف می‌کنند، قرار دارد (طاحونی، ۱۳۸۹). اگر خاک از نظر نفوذپذیری، ایزوتروپیک باشد، رابطه‌ی پیوستگی برای جریان دوبعدی را می‌توان به صورت معادله ۲ که به معادله‌ی لاپلاس<sup>۴</sup> معروف است، نوشت.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

رابطه‌ی لاپلاس، نشان‌دهنده‌ی دو خانواده‌ی منحنی متعامد است، که نام یکی خطوط جریان و نام دیگری خطوط هم‌پتانسیل است. از شبکه‌ی جریان برای محاسبات جریان آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود (طاحونی، ۱۳۸۹).

### معرفی نرم‌افزار اجزای محدودی آباکوس

به طور کلی برای حل مسایل فیزیکی سه روش دقیق، عددی و تجربی وجود دارد. در حل دقیق، همان‌طور که از نام آن مشخص است، به محاسبه‌ی دقیق پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان‌های فیزیکی می‌پردازند. در حالی که روش عددی، روشی تقریبی بوده که ناشی از یک سری ساده‌سازی‌هایی در حل مسئله می‌باشد. هم‌چنین روش تجربی و آزمایشگاهی با توجه به این‌که مبتنی و برگرفته از خود واقعیت می‌باشد، روش مناسبی محسوب می‌گردد. روش عددی، ضعف عمده‌ی روش آزمایشگاهی که پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد را ندارد و در مسایلی که روش حل دقیق از تحلیل مدل‌های با هندسه‌ی پیچیده عاجز است، این روش می‌تواند موثر باشد. با توجه به مزایای گفته شده، برای مدل‌سازی و تحلیل نشت آب در بدنه و پی سدهای خاکی در این تحقیق، از این روش و از

نرم‌افزار آباکوس که بر پایه روش اجزای محدود است، استفاده شد. این نرم‌افزار شامل کتابخانه گسترده‌ای از المان‌هاست که می‌تواند هر نوع هندسه‌ای را به صورت مجازی مدل‌سازی کند. هم‌چنین این برنامه شامل لیست گسترده‌ای از مدل‌های رفتار ماده است که می‌تواند رفتار اغلب مصالح مهندسی مانند فلزات، لاستیک، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح، فوم‌های شکننده و مصالح ژئوتکنیکی مثل خاک و سنگ را نیز شبیه‌سازی کند.

آباکوس قابلیت‌های گسترده‌ای را برای شبیه‌سازی در کاربردهای خطی و غیرخطی فراهم می‌کند. مسایلی که دارای اجزای متعدد و مصالح مختلف هستند را می‌توان با تعریف هندسه هر جزو و اختصاص دادن مصالح تشکیل‌دهنده آن و سپس تعریف اندرکنش بین این اجزا شبیه‌سازی کرد. در تحلیل‌های غیرخطی، آباکوس به صورت خودکار، هم‌گرایی مناسب را انتخاب و به طور پیوسته در طول تحلیل این پارامترها را تنظیم می‌کند تا از به دست آمدن نتایج دقیق اطمینان حاصل شود (اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۰، ضیایی و پیغاله، ۱۳۸۸).

مراحل حل در این برنامه را می‌توان در چهار گام اصلی بیان نمود. مرحله‌ی اول تقسیم کل به جز است. به عبارتی، ارایه‌ی دامنه‌ها با هندسه‌های پیچیده را به صورت ترکیبی از دامنه‌های ساده‌ی هندسی امکان‌پذیر می‌سازد. گام بعدی شامل استخراج توابع تقریب برای هر جز است. توابع تقریب اغلب چندجمله‌ای‌های جبری هستند که با استفاده از نظریه‌ی میان‌یابی استخراج می‌گردند. در گام سوم معادله حاکم بر مسئله که همان معادله حرکت آب (رابطه ۲) است، بر هر جز اعمال می‌شود. گام آخر، شامل جمع‌بندی اجزا بر اساس پیوستگی حل و توازن شارهای داخلی می‌باشد.

### صحت‌سنجی

مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای یک نمونه سد خاکی همگن، که میزان نشت از بدنه‌ی آن توسط میرزایی، با نرم‌افزار Seep/W برآورد شده (میرزایی، ۱۳۹۲)، انجام گرفته است. نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس یک نرم‌افزار بدون واحد است و هیچ واحد پیش‌فرض و قابل‌تغییری ندارد. واحد کمیت‌های مختلف بر اساس مقادیر اعداد ورودی به برنامه تعیین می‌شوند. در این مدل‌سازی، از سیستم اندازه‌گیری SI متریک برای اعداد ورودی و خروجی در برنامه‌ی آباکوس به صورت جدول ۱ استفاده شد.

مشخصات ساختار سد مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است (میرزایی، ۱۳۹۲)، که در آن  $E$  مدول الاستیسیته،  $\rho$  چگالی،  $v$  نسبت پواسون و  $K$  ضریب هدایت هیدرولیکی می‌باشد. مشخصات ساختار سد موردنظر در نرم‌افزار آباکوس در ماثول Property تعریف شده و رفتار سازه در حالت الاستیک به صورت ایزوتروپیک در نظر گرفته شد. پس از انجام مدل‌سازی، مطابق شکل ۱ سرعت سیال نشت برای قسمت‌های مختلف مدل بدست می‌آید.

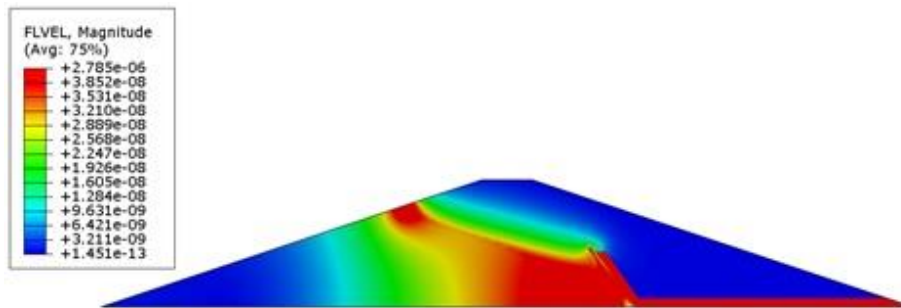
- 1- Coefficient of Permeability
- 2- Hydraulic Head Gradient
- 3- Flow Net
- 4- Laplace Equation

جدول ۱- واحدهای مفروض برای کمیت‌های مختلف سد خاکی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

کمیت	طول	نیرو	جرم	زمان	فشار	چگالی
واحد	m	N	kg	s	N / m <sup>2</sup>	kg / m <sup>3</sup>

جدول ۲- مشخصات بدنه و زهکش سد خاکی همگن (میرزایی، ۱۳۹۲)

مصالح	E(Pa)	$\rho(kg/m^3)$	v	K(m/s)
بدنه	$\times 11.0^7$	۱۴۰۰	۰/۳	$\times 11.0^{-7}$
زهکش	$\times 11.0^7$	۱۶۰۰	۰/۳	$\times 11.0^{-7}$



شکل ۱- سرعت نشت آب در بخش‌های مختلف مدل

هندسه‌ی مدل است، که این اطلاعات مطابق شکل ۲ از دفتر فنی طراحی و ساخت سد، اخذ شد. با توجه به مصالح موجود در پروژه، پارامترهای مربوط به قسمت‌های مختلف سد، به‌گونه‌ای که نماینده‌ی مصالح نرمال مورد استفاده در پروژه باشد، به صورت جدول ۳ است که این مشخصات در نرم‌افزار به هر بخش نسبت داده شد.

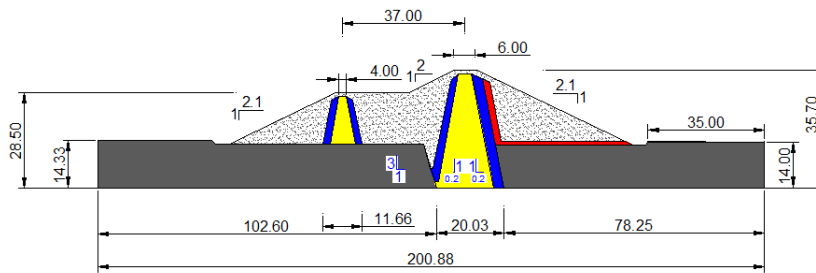
در مرحله بعد به منظور مش‌بندی مدل ساخته شده در نرم‌افزار، از مش‌بندی آزاد استفاده شد. ابعاد مش‌بندی  $0.5 \times 0.5$  متر انتخاب گردید، که در نهایت مدل به  $17310$  المان تقسیم شد. قابل ذکر است، در این مدل‌سازی نوع شبکه به صورت چهارگره‌ی و کرنش مسطح به نام CPE4P در نظر گرفته شد.

سپس بارهای وارد بر قسمت‌های مختلف سازه و همچنین شرایط مرزی لازم، بر مدل اعمال شد. ابتدا بار وزن بر تمام قسمت‌های مدل وارد شد. در بیان شرایط مرزی، از جابه‌جایی گره‌ها در دو جهت افقی و عمودی صرف‌نظر شد و فشار هیدرواستاتیک بصورت تابع  $(\gamma)$   $f(x) = 9/81 \times 981 \times (28/5)$ ، به شیب بالادست سد وارد گردید. تراز آب بالادست سد در ارتفاع  $28/5$  متری قرار دارد و در این مرحله از مدل‌سازی وزن مخصوص آب  $(N/m^3)$   $9810$  در نظر گرفته شد.

در ادامه، به منظور اطمینان از صحت روش مدل‌سازی و تحلیل اجزا محدود، نمونه‌ی مدل‌شده در نرم‌افزار آباکوس با مدل ساخته شده توسط میرزایی (۱۳۹۲) در نرم‌افزار Seep/W مقایسه گردید. به منظور تعیین دبی در بدنه، مقطعی در فاصله‌ی  $43/5$  متری بالادست سد در نظر گرفته شد. با داشتن مقادیر مربوط به سرعت نشت برای هر گره روی مقطع مذکور، میزان دبی نشت در واحد عرض برای مقطع مورد نظر حاصل شد. مقدار دبی سیال نشت برای سد شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس برابر با  $2/59 \times 10^{-7} (m^3/s)$  می‌باشد، که با دقت مناسبی با میزان بدست‌آمده از نرم‌افزار Seep/W در تحقیق میرزایی که  $2/012 \times 10^{-7} (m^3/s)$  است، تطابق دارد (میرزایی، ۱۳۹۲). با توجه به نتایج حاصل، صحت مدل‌سازی و توانایی نرم‌افزار آباکوس در برآورد میزان دبی نشت در محیط متخلخل نشان داده شد. بدیهی است که این نتایج قابل‌تعمیم به بررسی نشت در سد خاکی غیرهمگن نیز می‌باشد.

### ارزیابی نشت از سد ماشکید

در مرحله‌ی نخست مدل‌سازی ابتدا باید واحد موردنظر داده‌های ورودی به نرم‌افزار تعیین و تا پایان، ثابت در نظر گرفته شود. طبق جدول ۱، از سیستم اندازه‌گیری SI متریک برای داده‌های ورودی و خروجی نرم‌افزار استفاده شد. از دیگر ملزومات اولیه، تعیین دقیق



شکل ۲- مشخصات هندسی سد خاکی ماشکید

جدول ۳- مشخصات فنی مصالح سد خاکی ماشکید

مصالح	E(Pa)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\nu$	K(m/s)
هسته	$1 \times 10^7$	۲۱۴۰	-۰/۳	$5 \times 10^{-7}$
زهکش	$1 \times 10^7$	۲۲۹۳	-۰/۳	$1 \times 10^{-7}$
فیلتر	$1 \times 10^7$	۲۳۴۴	-۰/۳	$1 \times 10^{-6}$
پی	$1 \times 10^7$	۴۱۲۸	-۰/۳	$1/5 \times 10^{-6}$
بدنه	$1 \times 10^7$	۲۲۴۲	-۰/۳	$1 \times 10^{-5}$

## نتایج و بحث

پس از انجام مدل‌سازی، نتایج که مبین ویژگی‌های نشت در سد موردنظر می‌باشد، بدست آمد، که در ادامه به توضیح هر کدام پرداخته شد. در شکل ۳، سرعت نشت سیال در قسمت‌های مختلف سازه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیال از ارتفاع ۲۸/۵ متری در مجاورت سطح آزاد آب بالادست با سرعت قابل ملاحظه‌ای در حدود  $2 \times 10^{-5}$  (m/s) شروع به تراوش در بدنه‌ی سد خاکی می‌کند. طبق قانون دارسی، سرعت تراوش در هر قسمت از سد، تابعی از نفوذپذیری آن قسمت می‌باشد. بدنه‌ی سیلتی<sup>۱</sup> سد که وظیفه‌ی اصلی آن حفظ پایداری سد است، نفوذپذیری بالایی دارد. همین مهم سبب می‌شود که سیال، هم‌چنان با سرعت بالا در بدنه نفوذ کند. طبق شکل ۳، با رسیدن جریان به هسته‌ی رسی، به‌موجب پایین بودن ضریب نفوذپذیری رسی، سرعت سیال به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد. در این ناحیه به سبب تغییر نفوذپذیری در مرز دو لایه، بردار سرعت جریان شکست پیدا می‌کند، به‌طوری‌که مرز هسته‌ی رسی و بدنه‌ی سد از روی کانتور سرعت کاملاً قابل مشاهده است. جریان در مسیر حرکت در هسته، به‌تدریج به زهکش تعبیه شده در بدنه نزدیک می‌شود. زهکش، لایه‌ای درشت‌دانه از جنس شن و ماسه است که طبق جدول ۳ از نفوذپذیری بالایی برخوردار است. این عامل سبب می‌شود که جریان رسیده به زهکش، با سرعت بالا از آن خارج شود. آب نشتی به‌طور کامل زهکشی می-

شود و در ادامه جریانی در بدنه وجود ندارد، که کاملاً در شکل ۳ مشهود است.

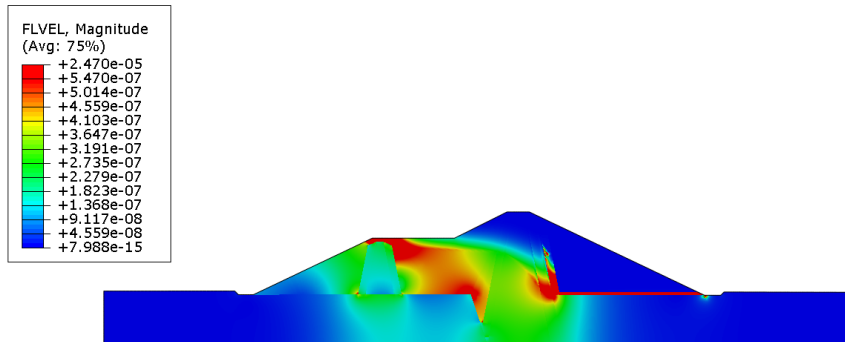
از دیگر پارامترهای مورد بررسی در این مدل‌سازی، فشار آب منفذی در بخش‌های مختلف سد ماشکید است که مقادیر آن در شکل ۴ نشان داده شده است. در توجیه نتایج این قسمت، باید یادآور شد که سطح آزاد آب بالادست در ارتفاع ۲۸/۵ متری در نظر گرفته شد. در نتیجه پی سد در قسمت بالادست، فشار آب حفره‌ای بیش‌تری را تحمل می‌کند. با شروع حرکت سیال در محیط متخلخل در مجاورت سطح آزاد آب، به‌تدریج از ارتفاع آب کاسته می‌شود، که این خود عامل اصلی در کاهش تدریجی فشار آب منفذی در بدنه و پی سد است. سپس آب جریان یافته با رسیدن به زهکش، از محیط خارج می‌شود و طبق شکل ۴، فشار آب منفذی در این ناحیه نسبت به بالادست سد ناچیز است.

با توجه به این‌که دبی نشت باید برای مساحتی معلوم محاسبه شود، سه مقطع کنترل برای این منظور در نرم‌افزار تعریف شده است. طبق شکل ۵، این مقاطع در درون هسته، پی و بدنه‌ی سد در نظر گرفته شد. با داشتن سرعت حرکت سیال برای تمامی گره‌ها، نمودار سرعت بر حسب ارتفاع برای این سه مقطع بدست می‌آید. توجه شود که در رسم نمودارهای شکل ۶ الی شکل ۸، سرعت در جهت افق یعنی عمود بر مقاطع در نظر گرفته شد.

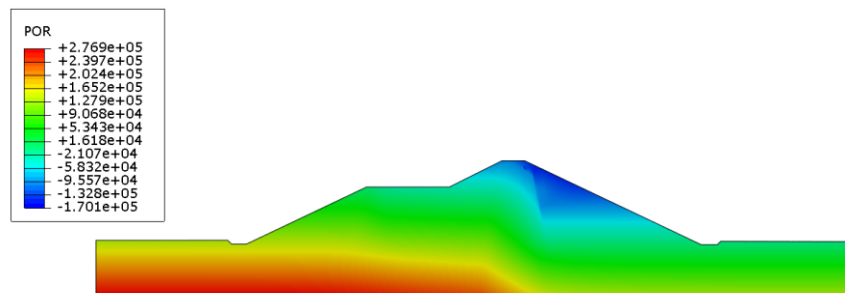
پس از تعیین سرعت سیال در مقاطع کنترل موردنظر، تغییرات فشار آب منفذی در این مقاطع مورد بررسی قرار گرفت. طبق نمودار شکل ۹ که تغییرات فشار آب حفره‌ای برای ارتفاع‌های مختلف را در

مقطع با افزایش ارتفاع، هد فشار کاهش یافته که سبب کاهش فشار آب منفذی می شود.

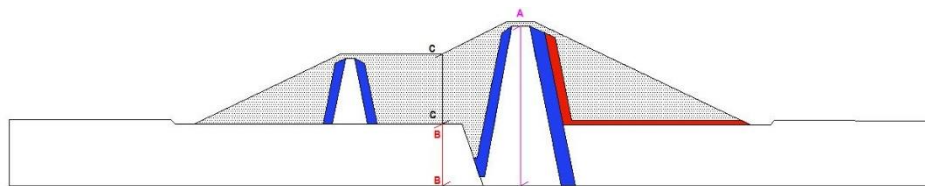
سه مقطع کنترل نشان می دهد، با افزایش ارتفاع فشار آب حفره ای کاهش می یابد. با توجه به این که فشار آب حفره ای در حالت تراوش تابعی از وزن مخصوص سیال و هد فشار در هر نقطه است، در هر



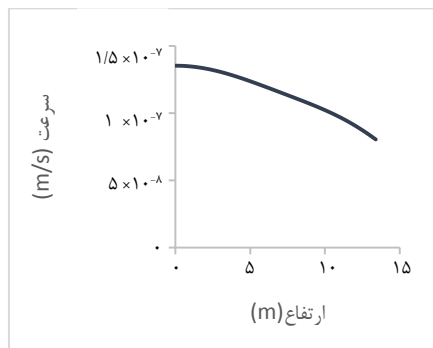
شکل ۳- سرعت نشت آب در بخش های مختلف سد ماشکید



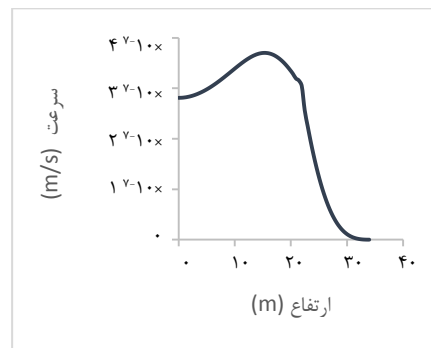
شکل ۴- فشار آب حفره ای در بخش های مختلف سد ماشکید



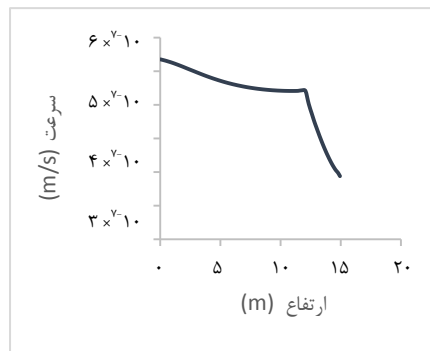
شکل ۵- مقاطع کنترل جهت محاسبه دبی



شکل ۷- نمودار سرعت بر حسب ارتفاع برای مقطع B-B



شکل ۶- نمودار سرعت بر حسب ارتفاع برای مقطع A-A

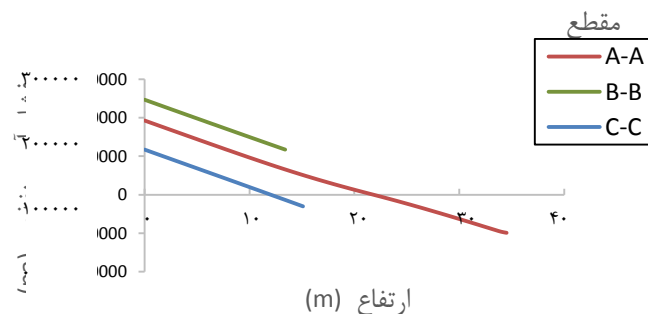


شکل ۸- نمودار سرعت بر حسب ارتفاع برای مقطع C-C

کنترل، با انتگرال‌گیری سطح زیر نمودار سرعت بر حسب ارتفاع برای هر مقطع، دبی نشت به ازای واحد عرض برای مقطع موردنظر محاسبه می‌شود. مقادیر دبی عبوری برای هر مقطع در جدول ۴ نشان داده شده است. به‌منظور در نظر گرفتن منطقه‌ی اشباع در محاسبه‌ی نشت، لازم است که سطح زیر نمودار تنها تا ارتفاعی از مقطع که فشار آب منفذی به صفر می‌رسد و پس از آن ناحیه‌ی مکش وجود دارد، در نظر گرفته شود.

از طرف دیگر، با توجه به این‌که جنس خاک در هر مقطع کنترل ثابت است، فشار آب منفذی به‌صورت خطی تغییر می‌کند که کاملاً صحیح می‌باشد. نکته‌ی قابل ذکر دیگر در رابطه با نمودار شکل ۹، وضعیت آب‌گذری هر منطقه است که فشارهای مثبت و منفی را به دنبال دارد. در ترازهایی که وضعیت آب‌گذری در خاک حالت مکش را ایجاد می‌کند، فشار آب منفذی منفی و در سایر ترازها فشار آب مثبت می‌باشد.

پس از بدست آوردن نمودار سرعت و فشار آب منفذی در مقاطع



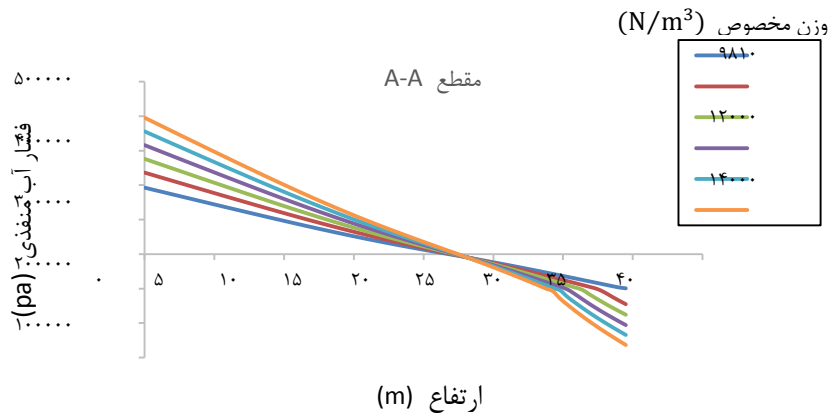
شکل ۹- نمودار فشار آب منفذی بر حسب ارتفاع برای مقاطع کنترل

جدول ۴- مقادیر دبی عبوری از مقاطع کنترل

C-C	B-B	A-A	مقطع
$5/48 \times 10^{-6}$	$1/54 \times 10^{-6}$	$7/07 \times 10^{-6}$	دبی عبوری ( $m^3/s$ )

میزان فشار آب حفره‌ای در سازه افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که فشار آب حفره‌ای در حالت تراوش رابطه‌ی مستقیم با وزن مخصوص سیال و هد فشار دارد، در نتیجه افزایش وزن مخصوص سیال در نهایت به افزایش فشار آب حفره‌ای می‌انجامد. توجه شود که در وزن مخصوص‌های بالا که فشار آب حفره‌ای به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، بررسی پدیده‌ی جوشش در پایین‌دست سد ضروری است.

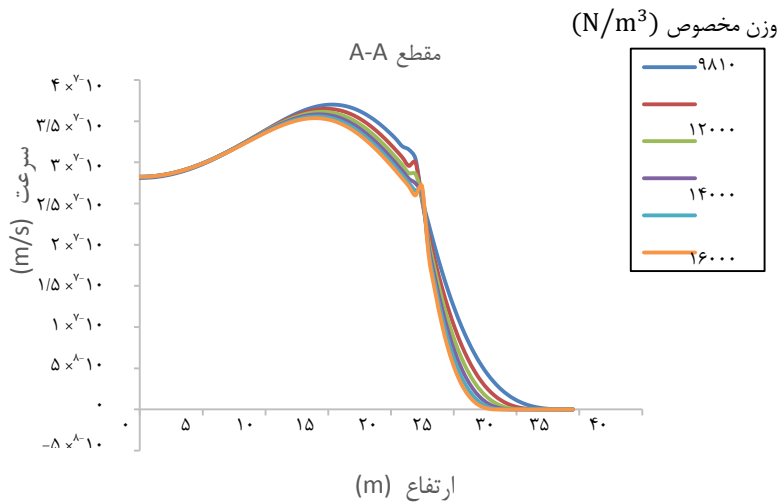
در ادامه به‌منظور تعیین میزان تاثیر پارامتر وزن مخصوص سیال بر روی دبی نشت، مدل‌سازی در پنج مرحله برای وزن‌های مخصوص متفاوت تکرار شد. در شکل ۱۰ و ۱۱ تاثیر حاصل از این تغییر بر روی سرعت و فشار آب حفره‌ای در مقطع کنترل A-A نشان داده شده است. با دقت در نمودار شکل ۱۰ که تغییرات فشار آب حفره‌ای در مقطع مورد بررسی را برای وزن‌های مخصوص مختلف سیال نشان می‌دهد، مشاهده شد که با افزایش وزن مخصوص در هر مرحله،



شکل ۱۰- تغییرات فشار آب منفذی برحسب ارتفاع برای وزن های مخصوص مختلف سیال در مقطع A-A

هیدرولیکی در بدنه و پی سد می‌گردد. بر اساس رابطه‌ی داریسی، کاهش گرادیان هیدرولیکی منجر به کاهش سرعت سیال در محیط متخلخل می‌شود که نمودار شکل ۱۱ این کاهش را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱، تغییرات سرعت برحسب ارتفاع در مقطع A-A را برای سیال با وزن مخصوص های مختلف نشان می‌دهد. طبق رابطه‌ی برنولی با افزایش وزن مخصوص سیال، هد فشار و در نتیجه‌ی آن بار آبی کل کاهش می‌یابد، که این امر منجر به کاهش گرادیان

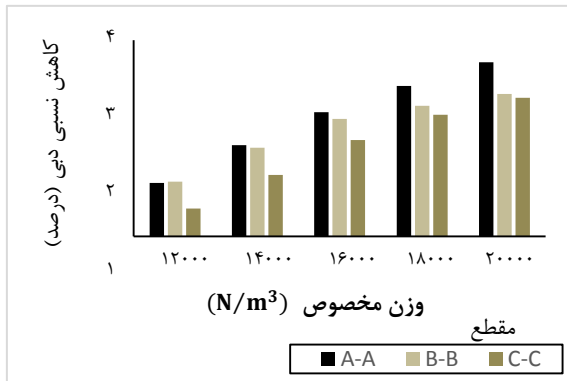


شکل ۱۱- تغییرات سرعت بر حسب ارتفاع برای وزن های مخصوص مختلف سیال در مقطع A-A

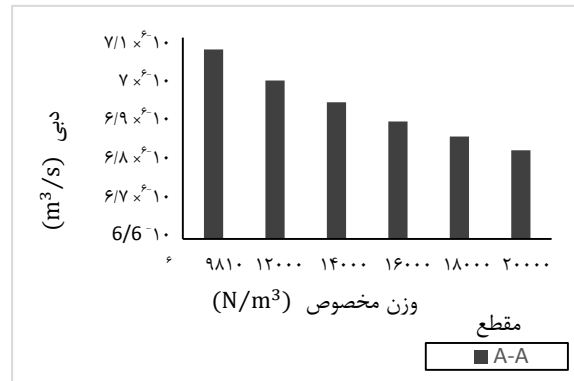
شده، با افزایش وزن مخصوص به تدریج دبی نشت در مقطع کاهش می‌یابد که با توجه به توضیحات داده شده در رابطه با تغییرات سرعت در مقطع و رابطه‌ی مستقیم دبی عبوری با سرعت سیال، نتایج حاصل صحیح می‌باشد.

پس از تعیین مقادیر سرعت سیال بر حسب ارتفاع در مقطع A-A، میزان دبی به ازای وزن مخصوص های مختلف سیال محاسبه شد. در محاسبه‌ی دبی، ارتفاع مقطع تا ترازوی که فشار آب حفره‌ای به صفر می‌رسد، در نظر گرفته شد. مطابق آنچه در شکل ۱۲ نشان داده





شکل ۱۳- درصد کاهش نسبی دبی نشت در هر مرحله نسبت به دبی پایه برای مقاطع کنترل



شکل ۱۲- میزان دبی عبوری در مقطع A-A به ازای وزن‌های مخصوص مختلف سیال

### منابع

اصفهانی، ت.، قارایی، ر.، شاه‌نظری، ا. و نجات‌بخش، ح. ۱۳۹۰. راهنمای جامع مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS. انتشارات عابد. ضیایی، م. و پیغاله، ا. ۱۳۸۸. راهنمای مدل‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS. انتشارات انگیزه.

طاحونی، ش. ۱۳۸۹. اصول مهندسی ژئوتکنیک. موسسه انتشاراتی پارس آیین.

فدایی کرمانی، ا.، پورابراهیم، غ. و قائینی‌حصاروثیه، م. ۱۳۹۰. کاربرد روش تفاضلات محدود در حل عددی معادله حاکم بر نشت آب از بدنه سد خاکی. سومین همایش ملی مهندسی عمران. دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر. اصفهان. ایران.

قبادیان، ر. ۱۳۸۹. اثر دیوار آب‌بند بر موقعیت خط نشت آزاد و دبی تراوش در سدهای خاکی با استفاده از روش عددی احجام محدود. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان. سمنان. ایران.

میرزایی، ز. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی پارامترهای زهکش مایل و افقی در سدهای خاکی همگن با استفاده از الگوریتم PSO. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.

Asadi, M and 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. 10: 457-461.

Aufleger, M., Conrad, M., Perzlamaier, S and Porras, P. 2005. Improving fiber optics for monitoring dam leakage. Hydro Review Worldwide. 4: 18-23.

Beheshti, A., Kamanbedast, A.A and Akbari, H. 2013. Seepage analysis of rock-fill dam subjected to water

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور بررسی و ارزیابی نشت در سد خاکی غیرهمگن به روش اجزا محدود، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. در مرحله‌ی اول، صحت‌سنجی نرم‌افزار به منظور اطمینان یافتن از نتایج حاصل انجام گرفت، سپس میزان دبی نشت و فشار آب حفره‌ای در قسمت‌های مختلف سد خاکی ماشکید به روش اجزا محدود محاسبه شد. به منظور بحث و ارزیابی نتایج، سه مقطع کنترل در درون هسته، بدنه و پی سد مذکور انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج حاصل بیش‌ترین سرعت نشت  $2/47 \times 10^{-5}$  (m/s) تعیین شد که در زهکش سد موردنظر اتفاق می‌افتد و حداکثر دبی نشت در میان مقاطع کنترل، برابر  $7/07 \times 10^{-6}$  (m<sup>3</sup>/s) است که در مقطع درون هسته مشاهده شد. همچنین طبق محاسبات انجام شده، بیش‌ترین فشار آب حفره‌ای به میزان  $2/76 \times 10^5$  (pa) در پی سد مورد بررسی برآورد شد.

در گام بعدی، تأثیر افزایش پارامتر وزن مخصوص سیال نشت بر نتایج مدل‌سازی بررسی شد. طبق نمودارهای حاصل، با افزایش وزن مخصوص سیال میزان فشار آب حفره‌ای سازه افزایش می‌یابد که به‌طور کلی امکان رخداد پدیده‌ی جوشش در پایین دست سد را به دنبال دارد. افزایش مرحله‌ای پارامتر موردنظر همچنین کاهش دبی نشت در مقاطع کنترل را نتیجه می‌دهد، نظر به نتایج حاصل، حداکثر کاهش به ازای بیش‌ترین وزن مخصوص سیال ۳/۵٪ است که در مقطع درون هسته‌ی سد پیش‌بینی شد. از طرف دیگر مشاهده شد که درصد کاهش دبی نشت در هر گام نسبت به گام قبل رو به کاهش است. به عبارت دیگر، تغییرات در وزن مخصوص‌های پایین‌تر تأثیر بیش‌تری روی دامنه تغییرات دبی دارد.

- International Organization of Scientific Research Journal of Mechanical and Civil Engineering. 13-23.
- Nicolini,M., Giacomello,C., Scarsini,M and Mion,M. 2014. Numerical modeling and leakage reduction in the water distribution system of Udine. *Procedia engineering*. 70: 1241-1250.
- Reddi,L.N. 2003. *Seepage in soils principles and applications*. John Wiley and Sons inc.
- Zhou,C.B., Liu,W., Chen,Y.F., Hu,R and 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.
- level fluctuation:A case study on Gotvand-Olya dam. *Iranica Journal of Energy and Environment*. 4: 155-160.
- Cote,A., Carrier,B., Leduc,J., Noel,P., Beauchemin,R., Soares,M., Garneau,C and Gervais,R. 2007. Water leakage detection using optical fiber at the Peribonka dam. *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Boston.
- Jun-feng,F. and Sheng,J. 2009. A study on unsteady seepage flow through dam. *Journal of hydrodynamics*. 21: 499-504.
- MS Abhilasha,P.S and Antony Balan,T.G. 2005. Numerical analysis of seepage in embankment dams.

## Modeling of Seepage From Foundation and Body of Earth Dams by Finite Element Method

S. Ohadi<sup>1\*</sup>, Gh.A. Barani<sup>2</sup>

Recived: Jul.04, 2018

Accepted: Oct.13, 2018

### Abstract

In this study, seepage investigation through earthen dam, its velocity and distribution of pore water pressure on the Mashkyd dam in Sistan and Baluchestan province has been studied. In order to modeling and analyzing of the results from the movement of water in porous media, the Abaqus software is used which is based on the powerful numerical method finite element method. According to the results, the maximum velocity is  $2.47 \times 10^{-5}$  (meter per second) which is estimated in drain. Then for leakage detection, three sections of mashkyd dam were considered. The results show that seepage through the core that encompasses all the leakage flow is  $7.07 \times 10^{-6}$  (cubic meter per second). In the next step, the influence of specific weight of fluid on the leakage and pore pressure in the mashkyd dam was evaluated. According to the results, by increasing the specific weight of water, leakage decreases and pore water pressure increases.

**Keywords:** Abaqus software, Mashkyd Dam, Seepage investigation.

---

1- PHD Student of Water Resources Management, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Professor of Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(\*- Corresponding Author Email: ohadi\_sima@pgs.usb.ac.ir)