

تحلیل احتمالاتی تراوش در سد خاکی با بهره‌گیری از روش مونت کارلو و با رویکردی بر نفوذپذیری مصالح و هندسه بدنه

فرهود کلاته^{۱*} و میلاد خیری قوجه بیگلو^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار؛ و دانشجوی دکترای عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۰

چکیده

مسائل مهندسی مرتبط با خاک دارای درجه‌ای از عدم قطعیت در ذات خود هستند و همین امر اخیراً توجه مهندسان را به روش‌های احتمالاتی، به جای رویکردهای تعینی و سنتی، جلب کرده است. هدف این تحقیق بررسی عوامل دخیل در تراوش از سد خاکی، با بهره‌گیری از مفاهیم احتمالاتی الگوریتم مونت کارلو و اجزای محدود است و به این منظور کد تراوش در زبان برنامه‌نویسی فرترن توسعه داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل تعینی برای تغییرات ارتفاع آب پایین دست به ارتفاع مخزن (H_d/H_{up}) در بازه بین ۰/۰۲ و ۰/۷۹ روی مقدار نشست نشانگر این است که با افزایش این نسبت، مقدار تراوش به‌طور خطی سیر کاهشی دارد ولی لزوماً این تغییرات به‌صورت اکیداً نزولی نیست. مقایسه توابع توزیع فراوانی (PDF) و توابع توزیع تجمعی (CDF) به‌دست‌آمده برای تحلیل عدم قطعیت با روش مونت کارلو برای نسبت‌های متغیر از H_d/H_{up} نیز مؤید نتیجه‌گیری قبلی است. در بررسی هندسی سد خاکی نیز نتایج نشان می‌دهد که با جابه‌جایی تاج در جهت بالادست میانگین دبی نشست احتمالاتی کاهش می‌یابد و با کاهش عرض تاج، این مقدار افزایش پیدا می‌کند. در همه مدل‌ها، دبی تراوش در حالت تعینی محافظه‌کارانه و حداکثر ۲۷۰ درصد بیشتر از دبی تراوش در تحلیل مونت کارلو است.

واژه‌های کلیدی

تحلیل عدم قطعیت، خاک اشباع و غیراشباع، زبان برنامه‌نویسی فرترن، محیط متخلخل اجزای محدود

مقدمه

حدود ۸۳ درصد) از این نوع است (Kalateh & Hosseinnejad, 2018; Ashnab Advisor Company, 2014).

تغییرات اقلیمی، افزایش خطر نقصان آب، رشد جمعیت، جابه‌جایی جمعیتی و شهرنشینی در حال حاضر چالش‌های بزرگی برای سیستم‌های ذخیره آب ایجاد کرده است (Chopan et al., 2020) و لازم است سدها و به‌طور اعم سازه‌های کنترل جریان با

سد از جمله عظیم‌ترین سازه‌های ساخته دست بشر است که به‌طور مستقیم با آب و نیروی قدرتمند آن در تماس است. سدها را به دو دسته کلی بتنی و خاکی تقسیم‌بندی می‌کنند. سدهای خاکی و سنگریزه‌ای به‌واسطه مزیت‌های نسبی‌شان، جایگاه و فراوانی بالاتری نسبت به سدهای بتنی دارند و بخش عمده‌ای از سدهای احداث‌شده در سطح جهان (در

دیگری تئوری امکان^۳ که بر اساس تئوری فازی است. اغلب از تئوری احتمالاتی برای نمایش عدم قطعیت‌های تصادفی (وابسته به بخت و شانس)^۴ و شناختی (وابسته به دانش موجود در مورد یک مسئله)^۵ استفاده می‌شود (Helton, 1997)، و از تئوری امکان برای نمایش عدم قطعیت شناختی استفاده می‌شود. البته از روش‌های مرسوم دیگر مانند تئوری دمپستر شافر، تجزیه و تحلیل بازه‌ها، مجموعه‌های فازی نیز می‌توان برای تحلیل عدم قطعیت شناختی استفاده کرد (Helton & Johnson, 2011; Helton et al., 2011; Helton, 2011).

کنترل تراوش در خاک، به جهت نقش آن در صرفه جویی آبی در مخازن سدها و کانال‌ها از مهم ترین مسائل اندرکنش سیال و سازه به حساب می‌آید که زمانی که به صورت کنترل نشده جریان یابد می‌تواند منجر به رگاب، جوشش ماسه در پایین دست، نشست در پی سازه‌های هیدرولیکی، ناپایداری و تخریب خاکریزها و سدهای خاکی شود. محاسبه دقیق میزان نشت عبوری از سد خاکی عاملی مهم در تأمین ایمنی و پایداری آن است و از طرف دیگر نتایج تحلیل تراوش نیز در محاسبه ابعاد زهکش و فیلترهای سد، بررسی ضرورت وجود چاهک کاهنده فشار و پرده آب‌بند، تحلیل پایداری خاکریزها و تحلیل تنش-تغییر شکل بسیار اهمیت دارد (Kalateh & Afshari, 2018; Jafarzadeh & Asadnia, 2005; Giglou et al., 2019). به‌طور کلی متغیرهای دخیل در مسئله تراوش، مقادیر ثابت و معین ندارند و مقادیر عددی برای توصیف رفتار آب در آن اعم از هندسه، نفوذپذیری، دانه‌بندی خاک با عدم قطعیت همراه هستند.

توجه به شرایط ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی هر منطقه به‌طور صحیح و اصولی انتخاب شوند تا در آینده دچار مشکل نشوند. از طرف دیگر، هزینه ساخت و اجرای سدهای بتنی و خاکی بسیار بالاست و شکست آن می‌تواند بسیار مخاطره‌آمیز باشد (Kheiry & Pilpayeh, 2019; 2020)، تلفات انسانی و اقتصادی زیانباری را موجب شود و تهدیدی بزرگ برای جان افراد ساکن در پایین دست باشد؛ از این رو در محاسبات مربوط به طراحی سد باید دقت بیشتری بشود (Kalateh & Afshari, 2018).

خاک به‌عنوان محیط چند فازی، ذره‌ای، پراکنده و متخلخل مستعد عبور جریان سیال است که ماهیت تصادفی خاک، تحلیل حرکت زه‌آب را پیچیده می‌کند و این خود دلیلی است محکم برای ضرورت استفاده از رویکردهای احتمالاتی در تحلیل این حرکت. وجود عدم قطعیت در مؤلفه‌های ژئوتکنیکی در برخی موارد منجر به استفاده از ضریب‌های اطمینان زیاد، محافظه کارانه و تحمیل هزینه اضافی در طرح‌های فنی مهندسی می‌شود. در صورتی که سازنده بخواهد احتمال خرابی سازه به حداقل مقدار خود برسد و در کنار آن طرح از نظر اقتصادی نیز بهینه شود، امکان استفاده از عوامل قطعی به‌عنوان ورودی به دلایلی وجود نخواهد داشت و در نتیجه متوسل به استفاده از ضریب‌های اطمینان زیاد و در بعضی موارد غیراقتصادی شدن می‌شود. درواقع در تحلیل عدم قطعیت، نمایش عدم قطعیت پاسخ خروجی ناشی از عدم قطعیت در عوامل ورودی است (Jafarian & Nasri, 2016). تاکنون دو روش اساسی برای برخورد ریاضی با عدم قطعیت‌ها توسعه داده شده است، یکی تئوری احتمالاتی^۱ که مبتنی است بر قضیه کالماگروف^۲ و

نسبت به مدل دوبعدی تقریباً دو برابر است. این محققان بر اساس تحقیقات قبلی (Dagan, 1976; Gelhar, 1976; Bekr, 1976) و مشاهدات، دریافتند که مدل احتمالاتی یک‌بعدی منجر به «اغراق در برآورد پاسخ»^۴ بار هیدرولیکی در پی سد می‌شود.

گریفیس و فنتون (Griffiths & Fenton, 1993) با بررسی اثرهای تغییرپذیری مشخصات خاک بر جریان نشت، از روش میانگین محلی تقسیم‌شده^۵ (LAS) برای بررسی نفوذپذیری تصادفی خاک (با میانگین، انحراف معیار و همبستگی مشخص) در مدل‌سازی تراوش استفاده کردند. این محققان تأثیر پرده آب‌بند را در مدل‌سازی احتمالاتی تراوش از پی سد نظر گرفتند. روش میانگین محلی تقسیم‌شده^۶ توسط فنتون و وانمارکه (Fenton & Vanmarcke, 1990) ارائه شد که بر پایه مفاهیم احتمالاتی پژوهش‌های قبلی فورنیر و همکاران (Fournier et al., 1982) و کارپنتر (Carpenter, 1980) است. این روش موجب بهبود عملکرد مدل‌سازی پدیده‌های تصادفی به روش اجزای محدود شد.

چن و ژانگ (Chen & Zhang, 2006) با شبیه‌سازی سه‌بعدی تراوش در سد سنگریزه‌ای، با در نظر گرفتن تئوری خاک اشباع-غیراشباع، نشان دادند که الگوی جریان تراوش به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر لایه‌بندی خاک قرار دارد. نتیجه‌گیری آنها بیانگر این است که در نزدیکی سد، تراوش سریع‌تر و گرادیان هیدرولیکی بزرگ‌تر از نواحی دور از سازه است و خروج آب از شیب پایین‌دست، شکست ناشی از نشت را در لایه‌های مختلف سد را تقویت می‌کند.

جمشیدی چناری و بهفر (JamshidiChenari &

Casagrande, 1937) بر پایه روش گرافیکی راه‌حلی بر مسئله تراوش ابداع کرد. او برای توصیف وضعیت نشت پایدار در خاک «شبکه جریان» را در خاک رسم کرد و برای شرایط مرزی و شرایط ساده خاک از روش شبکه جریان بهره برد (Lam et al., 1987).

وینوف و هار (Dvinoff & Harr, 1971) از روش عددی اجزای محدود^۱ برای حل مسئله تراوش در خاک اشباع استفاده کردند. دسای (Desai, 1972) تراوش در خاک اشباع را با استفاده از تئوری اجزای محدود در شرایط تخلیه سریع مخزن بررسی کرد. چانگ (Chang, 1987) نیز از روش اجزای مرزی برای تعیین خط تراوش در شرایط تخلیه مخزن استفاده کرد.

فریز (Freeze, 1971) و نیومن (Neuman, 1973) اولین محققانی بودند که تراوش گذرا^۲ از خاک اشباع‌نشده را تجزیه و تحلیل کردند (Lam et al., 1987). نیومن (Neuman, 1973) می‌گوید که روش کلاسیک (اشباع صرف) برای مطالعه نشت آب از خاک همیشه مناسب نیست و مسئله نشت از نوع مدل اشباع-غیراشباع را با روش اجزای محدود گالرکین حل کرد.

اسمیت و فریز (Smith & Freeze, 1979a; 1979b) با استفاده از تحلیل احتمالاتی جریان پایدار تراوش در خاک را با استفاده از روش مونت کارلو^۳ در هندسه یک‌بعدی بررسی کردند. پس از آن در مقاله دوم به بررسی دوبعدی نشت در آب زیر سد نفوذناپذیر و محصور در بلوک مربعی پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که انحراف استاندارد برای بار هیدرولیکی در مدل یک‌بعدی

1- Finite Element
3- Monte Carlo
5- local average subdivision

2- Transient
4- Overestimate
5- LAS

توجه به عدم قطعیت و با استفاده از زنجیره‌های مارکوف مونت کارلو (MCMC) بررسی کردند.

فوکوموتو و همکاران (Fukumoto et al., 2021) جریان تراوش و جوشش خاک ماسه‌ای اشباع به علت نشت را با کوپل شبکه بولتزمن و روش اجزای مجزا^۱ و در حالت دوبعدی حل کردند. هدف آنها از این مطالعه شبیه‌سازی عددی جوشش خاک در اطراف یک ورق عمودی و مقایسه نتایج با مدل آزمایشگاهی بود.

به‌طور کلی در تحقیق حاضر دو هدف موردنظر است: الف) برآورد اثر هندسه سد بر مقدار تراوش با لحاظ عدم قطعیت. ب) برآورد اثر نفوذپذیری بدنه سد بر مقدار تراوش با لحاظ عدم قطعیت.

مواد و روش‌ها

برای حل عددی رابطه تراوش در محیط خاکی، اسمیت و گریفیثس (Smith & Griffiths, 2004) کدی را در زبان برنامه‌نویسی فرترن نگارش کرده‌اند که دبی نشت و بار فشاری (پیزومتری) را در بدنه سد خاکی همگن و ناهمگن محاسبه می‌کند. این کد فرترن برای حل معادلات تراوش مشابه کد معادلات مکانیک جامدات است. در این کد، با الهام از حل معادلات تعادل استاتیکی و دینامیکی در مکانیک جامدات و با استفاده از روش اجزای محدود، رابطه دیفرانسیل لاپلاس حل می‌شود با این تفاوت که به‌جای مؤلفه‌های جابه‌جایی و نیرو در مسائل مکانیک جامدات از دبی نشت و بار هیدرولیکی استفاده می‌شود. کد مذکور بر اساس معادلات لاپلاس نگاشته شده است که در بخش بعدی توضیح

(Behfar, 2017) تأثیر نفوذپذیری خاک بر میزان جریان تخلیه نشت را بررسی کردند. این محققان نفوذپذیری خاک زیرزمینی را به‌عنوان یک متغیر تصادفی با توزیع غیرنرمال فرض کردند و از کد نرم‌افزار اجزای محدود (FLAC) برای شبیه‌سازی احتمالاتی تراوش در هر دو خاک همسانگرد و ناهمسانگرد بهره‌گرفتند.

جوهری و حیدری (Johari & Heydari, 2018) با ترکیب شرط مرزی مقیاس‌بندی شده و اجزای محدود تصادفی^۱، به مطالعه قابلیت اعتماد سد خاکی در برابر تراوش پرداختند. به عبارت دقیق‌تر، به روش اجزای محدود تصادفی با شرط مرزی مقیاس بندی شده^۲ تأثیر تغییرپذیری فضایی نفوذپذیری خاک را بر گرادیان خروجی، دبی نشت و ضریب ایمنی در برابر رگاب^۳ مطالعه کردند.

لیو و همکاران (Liu et al., 2018) تأثیر تغییرپذیری فضایی ضریب هدایت هیدرولیکی بر سرعت جریان محلی^۴ نشت از پی و بدنه یک خاک‌ریز را بررسی کردند و بر پایه اجزای محدود تصادفی تأثیر عدم قطعیت در هدایت هیدرولیکی خاک را بر احتمال وقوع رگاب نشان دادند.

احمد و همکاران (Ahmed et al., 2020) می‌گویند تولید جریان و میدان الکتریکی یکی از اثرهای جریان عبور جریان تراوش از محیط متخلخل است که با ردیابی آن می‌توان مسیر و خطوط نشت و مقدار سرعت نشت را برآورد کرد. طرح آنها استفاده از «روش خود پتانسیل»^۵ و بر پایه مفهوم الکتریکی به نام «میدان پتانسیل جریان»^۶ برای اندازه‌گیری جریان آب زیرزمینی از راه دور^۷ است. این محققان مسیر و سرعت نشت در سد خاکی را با

1- RFEM

3- Piping

5- local average subdivision

6- The Self-Potential method (SP)

8- discrete element method (DEM)

2- Random Field Scaled Boundary Finite-Element Method (RFSBFEM)

4- local velocity

5- Streaming Potential field

7- Remote

داده می‌شود.

معادلات حاکم

رابطه لاپلاس برای توصیف پدیده جریان تراوش در سازه‌های متخلخل یکی از روابط اصلی است. فرمی از رابطه لاپلاس، که در مسائل ژئومکانیک مطرح می‌شود، برای تحلیل جریان آب زیرزمینی (جریان تراوش آب) از ناحیه زیرین سازه نگه‌دارنده یا از بدنه لایه خاک مثل بدنه سد خاک ریز و سنگ ریز به کار می‌رود.

در حالت کلی، رابطه حاکم بر جریان سیال رابطه پواسن است که شکل بسط یافته رابطه لاپلاس است:

$$k_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = q \quad (1)$$

در این رابطه، K_x و K_y به ترتیب هدایت هیدرولیکی خاک در دو جهت افقی و قائم (متر بر ثانیه)، h پتانسیل آب در خاک (متر) و q دبی جریان ورودی به خاک (مترمکعب بر ثانیه در واحد سطح) است. اگر دبی ورودی به توده خاک وجود داشته باشد علامت q مثبت است و برعکس اگر دبی خروجی وجود داشته باشد، علامت q منفی خواهد بود. رابطه بالا برای جریان در شرایط دائمی و خاک همگن حاکم است.

برای شرایط غیردائمی رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

در جریان غیردائمی $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ تغییرات حجمی رطوبت نسبت به زمان است. می‌توان رابطه لاپلاس را برای مسائل تراوش پایدار به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$k_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

که در آن،

$\emptyset$ = تابع پتانسیل جریان سیال و یا بار آبی کلی؛ و K_x و K_y = ضریب‌های هدایت هیدرولیکی یا نفوذپذیری در جهت‌های x و y .
با استفاده از روش اجزای محدود و گسسته سازی رابطه بالا، رابطه دیفرانسیل پاره‌ای فوق به دستگاه معادلات جبری زیر تبدیل می‌گردد:

$$[K_c]\{\varphi\} = \{q\} \quad (4)$$

در رابطه ۴، $[K_c]$ ماتریس ضریب‌های متقارن و $\{\varphi\}$ بردار مقادیر گرهی مجهول بار آبی و $\{q\}$ بردار جریان‌های ورودی یا خروجی از گره‌های مرزی قلمرو حل هستند. با استفاده از روش اجزای محدود گالرکین می‌توان نوشت:

$$\varphi = [N]\{\varphi\} \quad (5)$$

تابع وزن و تابع شکل یکسان است ($W_i = N_i$)، به همین دلیل فرم کلی ماتریس $[K_c]$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\iint (k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y}) dx dy = 0 \quad (6)$$

همچنین می‌توان ماتریس ضریب‌ها را به صورت زیر نوشت:

$$[K_c] = \iint ([T]^T [K] [T]) dx dy \quad (7)$$

در رابطه ۷، ماتریس خواص مصالح $[K]$ مشابه ماتریس تنش - کرنش $[E]$ در مسائل مکانیک جامدات است:

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

ماتریس ضریب‌ها به دست می‌آید.

صحت سنجی مدل عددی

مدل‌های عددی برای کسب اطمینان از اعتبار خروجی روند حصول نتایج، نیازمند مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی هستند. در تحقیق حاضر برای صحت‌سنجی از مدل آزمایشگاهی کوه‌پیما و همکاران (Kouhpeyma, 2021) استفاده شد که در یک فلوم به ابعاد ۱، ۱ و ۰/۱۵ متر به ترتیب برای طول، ارتفاع و عرض تانک اجرا شده بود. ابعاد مدل‌سازی فیزیکی به صورت کوچک‌مقیاس ولی دانه‌بندی بر مبنای مصالح واقعی انتخاب شد. برای مدل‌سازی تراوش از مخزن آبی استفاده گردید که مجهز به ۱۱ پیژومتر به فاصله‌های افقی ۱۰ سانتی-متر از یکدیگر در کف و دو سرریز لوله‌ای در مخزن‌های پایین دست و بالادست برای تنظیم تراز آب است (شکل ۱ و ۲).

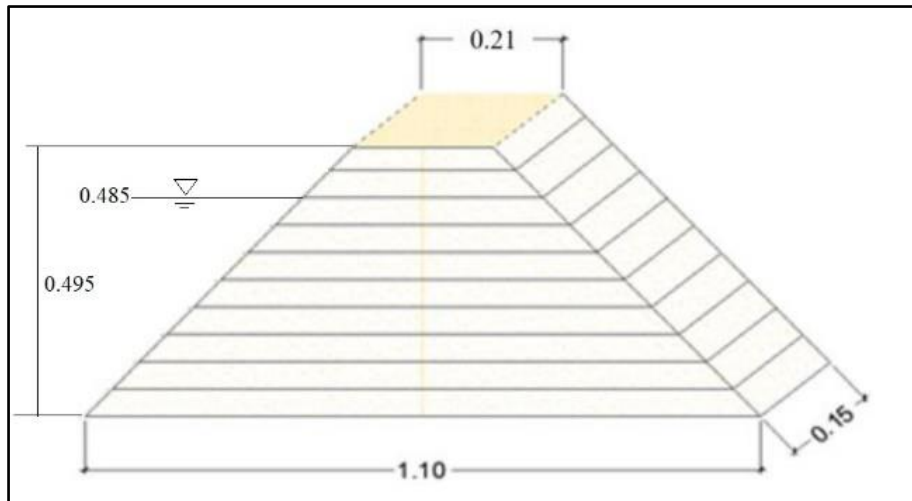
با این فرض که محورهای اصلی تانسور نفوذپذیری منطبق بر محورهای x و y هست، ماتریس $[T]$ نیز مشابه ماتریس $[B]$ در مکانیک جامدات است به طوری که برای یک المان چهارگره‌ای با رابطه زیر مشخص می‌گردد:

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

می‌توان ماتریس ضریب‌ها را با توجه به روش انرژی نیز به دست آورد. در این روش، عبارتی که معادل انرژی ذخیره شده در یک المان است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\iint \left[\frac{1}{2} k_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} k_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (10)$$

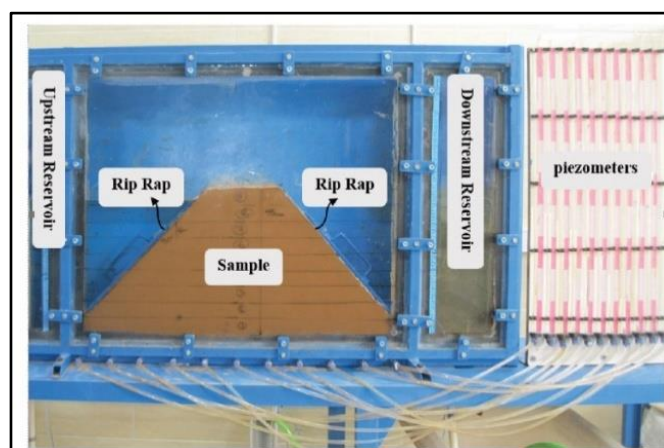
با کمینه کردن عبارت فوق برای تمامی $\phi(x, y)$



شکل ۱- نمای سه بعدی مدل فیزیکی مطروح در صحت سنجی

Fig 1- Three-dimensional view of the physical model presented in the validation

تحلیل احتمالاتی تراوش در سد خاکی با بهره‌گیری از روش مونت کارلو...

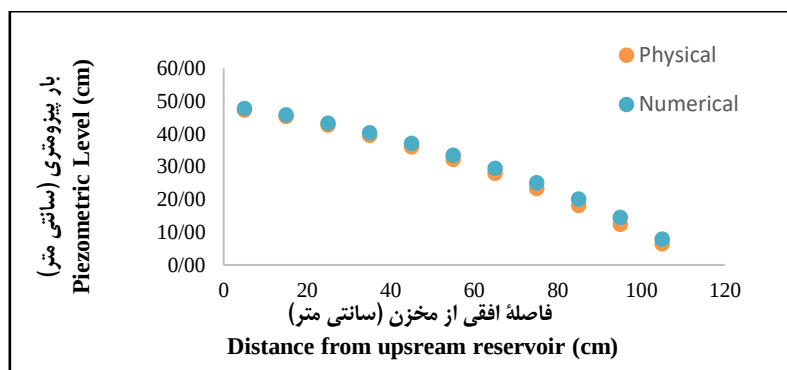


شکل ۲- نمای کلی از مدل آزمایشگاهی کوه‌پیما و همکاران (Kouhpeyma, 2021)

Fig 2- View of the laboratory model of Kouhpeyma et al. (2021)

میزان نشت در ارتفاع ۰/۴۹۵ متر از کف مخزن و برای بدنه سد با مشخصات شکل ۱ محاسبه و نتایج با مدل‌های به‌دست‌آمده از کد فرترن مقایسه شد. همچنین، بار فشاری (پیزومتری) مدل عددی و

آزمایشگاهی مقایسه شد (شکل ۳). مطابق جدول ۱، اختلاف بین مقادیر عددی به‌دست‌آمده از برنامه فرترن و داده آزمایشگاهی برای مؤلفه نشت از سد بسیار جزئی و در حدود ۰/۳۱ درصد است.



شکل ۳- مقایسه نتایج بار فشاری (پیزومتری) حاصل از مدل آزمایشگاهی کوه‌پیما و همکاران (Kouhpeyma, 2021) با نتایج عددی تحقیق حاضر

Fig 3- Comparison of piezometric head obtained from the laboratory model of Kouhpeyma et al (2021) with the numerical results of the present study

جدول ۱- مقایسه نتایج مقدار نشت در سد خاکی با مدل آزمایشگاهی

Table 1: Comparison of Seepage rate results in earthen dam with laboratory model

دبی نشت مدل عددی تحقیق حاضر (مترمکعب بر ثانیه) Seepage discharge (numerical model of the present study) $\times 10^{-7} \times \text{m}^3/\text{s}$	دبی نشت مدل آزمایشگاهی (مترمکعب بر ثانیه) Seepage flow (laboratory model) $\times 10^{-7} \times \text{m}^3/\text{s}$	اختلاف مقادیر دبی (مترمکعب بر ثانیه) Differences in flow rates $\times 10^{-7} \times \text{m}^3/\text{s}$	درصد خطا percentage error %
۴/۸۳	۴/۸۵	۰/۰۲	۰/۳۱

روش مونت کارلو

مسائل حرکت آب در ذات خود دارای پیچیدگی ساختاری هستند و مدل‌سازی و یافتن پاسخ بهینه نیازمند بهره‌گیری از الگوریتم تصادفی است که ماهیت غیرقطعی آن را بتوان تفسیر کرد (Emami *et al.*, 2020). امروزه تلاش‌های گسترده‌ای برای استفاده از الگوریتم مونت کارلو شده است که یکی از روش‌های اصلی تحلیل احتمالاتی شناخته می‌شود.

الگوریتم مونت کارلو الگوی ریاضی-آماري و شامل دو قسمت کلی تعیین پذیر و تصادفی، برای متغیر موردبررسی است و هدف شبیه‌سازی مونت کارلو پیش‌بینی متغیر با قبول درجه‌ای از اطمینان یا ریسک است. به عبارت دیگر، این روش بر مبنای کشف ویژگی‌های آماری متغیر Y که دارای توزیع احتمالی ناشناخته است در ارتباط با متغیر یا متغیرهای تصادفی دیگر به نام X است که توزیع آماری مشخص و معینی دارد (Salami, 2003).

اولین مرحله برای شبیه‌سازی مونت کارلو، انتخاب تابع عملکرد قطعی است. مرحله بعد، تعریف متغیرهای ورودی برای تابع عملکرد و انتخاب توزیع احتمال برای هر یک از متغیرهاست، به مانند توابع توزیع احتمال بتا، گاما، نرمال، غیر نرمال، یکنواخت که با استفاده از تولیدکننده اعداد تصادفی برای هر یک از متغیرهای ورودی یک مقدار تصادفی انتخاب می‌شود. سپس از مقادیر تصادفی انتخاب‌شده برای هر یک از متغیرها در حل تابع عملکرد استفاده می‌شود. مجدداً عدد تصادفی دیگری برای ورودی انتخاب و دوباره سیستم بر اساس آن تحلیل می‌شود. با تکرار چندین باره این پروسه به تعداد n بار، n جواب تصادفی برای مسئله حاصل و در انتها برای پاسخ‌های حاصل نمودارهای تابع چگالی احتمال^۱ و

تابع تجمعی احتمال^۲ رسم می‌شود و احتمال خرابی تعیین می‌گردد (Jafarian & Nasri, 2016). شیوه عملی روش مونت کارلو دارای مراحل زیر است:

الف) ابتدا، با یک «دستگاه مولد» سری اعدادی تصادفی از یک توزیع احتمالاتی یکنواخت با یک مقدار اولیه تولید می‌شوند. (به وسیله برنامه‌هایی مثل الگوریتم پسدو^۳)

ب) این اعداد به سری اعدادی با توزیع احتمال یکنواخت بین صفر و یک تبدیل می‌شود.

ج) از نتایج مرحله دو برای ایجاد سری اعدادی تصادفی با هر نوع توزیع احتمال شناخته‌شده دیگر استفاده می‌شود (X).

د) این سری اعداد تصادفی به عنوان داده ورودی رابطه تئوری برای تولید متغیری به کار گرفته می‌شود که توزیع ناشناخته دارد (Y).

ز) (Y) به عنوان نمونه‌ای از جامعه اصلی به حساب می‌آید و از این طریق می‌توان پارامترهای مربوط به ویژگی‌های توزیع آن را تخمین زد.

بالین همه، تبدیل اعداد تصادفی به داده‌های ورودی و در ادامه به داده‌های خروجی می‌تواند به حدی پیچیده باشد که مدل احتمالاتی داده‌های خروجی (از دید دشوار بودن بررسی آن) همچنان ناشناخته باقی بماند. به همین دلیل و برای رفع این خطا از روش مونت کارلو برای محاسبه ویژگی‌های توزیع احتمال استفاده می‌شود (Salami, 2003).

در کد فرتن مربوط به تحقیق حاضر، در چند قسمت از حلقه‌های تکرار استفاده‌شده است که یکی از بخش‌های اساسی، حلقه تکرار اعمال شبیه‌سازی مونت کارلو است. همچنین مطابق شکل ۴ برای بررسی همگرایی زیر برنامه‌ای برای همه اجزا

ایجاد شد، در بررسی ارتفاع سطح آب ۱۲ سطح متفاوت از مخزن آب و پایین‌دست مدل‌سازی شد و در بررسی نفوذپذیری خاک به تعداد ۱۵ نسبت نفوذپذیری افقی عمودی بدنه سد ایجاد شد و مدل هر یک در کد فرترن اجرایی گردیده است. در آخر نیز نتایج تعیینی (بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت) و احتمالاتی (با در نظر گرفتن عدم قطعیت) مقایسه شدند.

در مقاله حاضر برنامه‌ای بر اساس روش اجزای محدود در محیط فرترن توسط نگارنده توسعه داده شده است که رابطه‌های لاپلاس برای تعیین دبی نشت سد خاکی را با فرض عدم قطعیت مؤلفه‌های ورودی و خروجی حل می‌کند. درواقع، در کد قبلی مربوط به تراوش، نفوذپذیری خاک به صورت قطعی و تعیینی در نظر گرفته شده است که در این تحقیق به صورت احتمالاتی بررسی می‌شود.

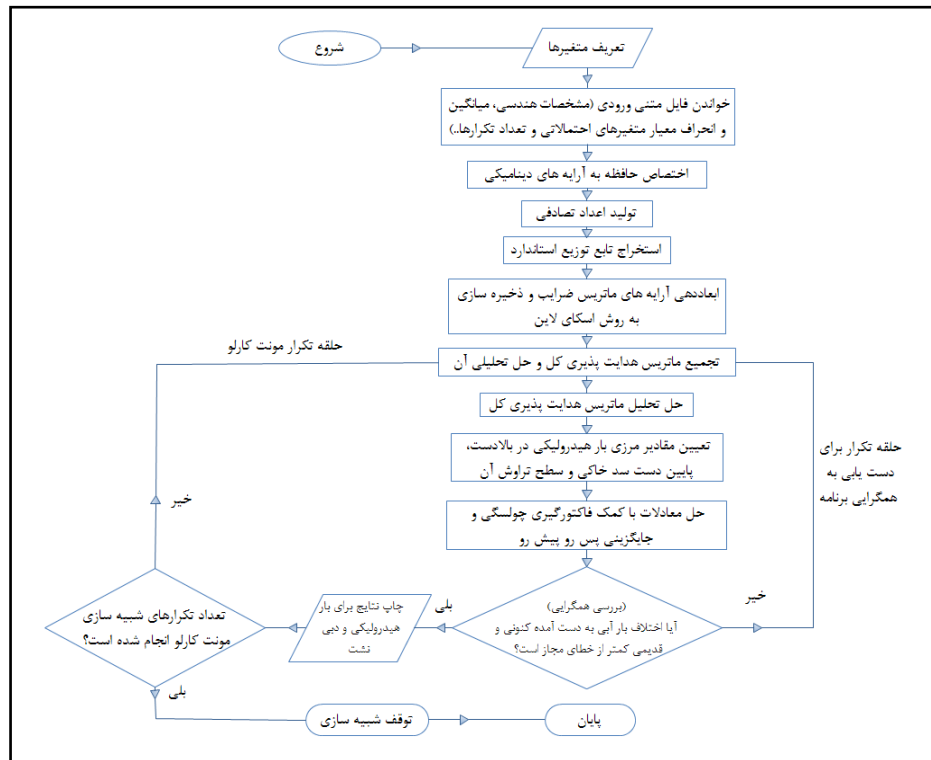
در برنامه عددی این تحقیق، نوعی شرط مرزی بررسی شده است که معمولاً در مسائل ژئومکانیکی مرتبط با جریان تراوش آب از داخل بدنه سدهای خاکی مطرح می‌گردد. مسئله جریان با سطح آزاد شامل یک مرز فوقانی است، به طوری که موقعیت این مرز از قبل مشخص نیست (اولین خط جریان یا جبهه تراوش) از این رو یک فرآیند تکراری برای یافتن چنین مرزی لازم خواهد بود. در حقیقت، نامعلوم بودن موقعیت یکی از مرزهای قلمرو حل موجب غیرخطی شدن مسئله می‌گردد. به طور مثال، یک مش بندی اجزای محدود ثابت می‌تواند استفاده شود و گره‌ها به دو ناحیه گره‌های فعال و غیرفعال، برحسب اینکه سیال در آن گره موجود است یا نه، تقسیم شوند. روش دیگر روشی است که در برنامه حاضر به کار رفته

(المان‌ها) به صورت پیوسته حلقه‌ای ایجاد شده است که اختلاف بار هیدرولیکی به دست آمده در تکرار n ام را با مقدار متناظر آن در تکرار $n-1$ مقایسه می‌کند و در صورتی که این اختلاف از خطای مجاز کمتر باشد برنامه متوقف می‌شود و خاتمه می‌یابد. درواقع این روند بررسی همگرایی، برای هر اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو پردازش می‌شود که موجب افزایش زمان دستیابی به نتایج نسبت به حالت تعیینی می‌گردد.

مدل عددی تحقیق

این مقاله به طور کلی در جهت بررسی احتمالاتی تراوش در سد خاکی نگاشته شده است که به جای تحلیل سنتی و تعیینی سعی بر این است که کد تراوش به زبان فرترن، با در نظر گرفتن عدم قطعیت، توسعه یابد. روش مونت کارلو یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه تحلیل عدم قطعیت است و لازم خواهد بود پیش از اجرای کد میانگین و انحراف معیار متغیر تصادفی تعیین شود. متغیر تصادفی ورودی ضریب هدایت‌پذیری خاک و بقیه متغیرهای ورودی قطعی هستند که همچنین متغیر خروجی تصادفی، دبی تراوش از سد است. در تحقیق حاضر مؤلفه هدایت‌پذیری خاک به عنوان متغیر غیرقطعی دارای میانگین و انحراف معیاری است. شبیه‌سازی مونت کارلو با ۲۰۰۰ تکرار اجرا شده است و برخلاف تحلیل تعیینی (که یک مقدار برای خروجی منتج می‌شود) به اندازه تعداد تکرارها مقادیر خروجی دبی تراوش به دست آمده است که برای نمایش این نتایج نیاز به استفاده از تابع توزیع فراوانی (PDF) است. مقاله در سه فاز مدل‌سازی شده است: هندسه، ارتفاع سطح آب مخزن و پایین‌دست، نفوذپذیری خاک. در فاز هندسه ۶ مدل با هندسه متفاوت به منظور بررسی تأثیر مؤلفه‌های هندسی سد خاکی

است، به صورتی که تغییر مش‌بندی اجزای محدود فوقانی مش‌بندی به سطح آزاد جریان منطبق در گام‌های زمانی اتفاق می‌افتد و در نهایت سطح گردد.



شکل ۴- روند نمای شبیه‌سازی مونته‌کارلو در مدل اجزای محدود تحقیق حاضر

Fig 4- Monte Carlo simulation procedure in the finite element model of present study

در حالت تعینی آنالیز با فرض یک موقعیت اولیه معلوم برای سطح آزاد آغاز می‌گردد و حل رابطه لاپلاس مقادیر بار آبی کلی را در گره‌های واقع بر امتداد سطح آزاد جریان مشخص می‌سازد که در حالت کلی با تراز سطح فوقانی مش اجزای محدود یکسان نیستند. بنابراین، تراز گره‌های واقع بر امتداد مرز سطح فوقانی مش اجزای محدود با مقادیر بار آبی محاسبه‌شده در این مرحله برابر قرار داده می‌شوند و به عبارت دیگر مختصات گرهی نقاط واقع بر مرز فوقانی سطح آزاد جریان اصلاح می‌گردد و با بار آبی کلی به دست آمده از حل رابطه لاپلاس برابر قرار داده می‌شود. به منظور جلوگیری از اجزا یا المان‌های درهم‌فرورفته، از سابروتین

freemurf_geom استفاده می‌شود، به طوری که با استفاده از این سابروتین از توزیع هموار و یکنواخت گره‌های واقع در ناحیه زیرین سطح فوقانی مطمئن خواهیم بود. این سابروتین هندسی برای حل مسئله جریان با سطح آزاد با قلمرو اولیه مش‌بندی به شکل دوزنقه و شمارش گره‌ها و اجزا در امتداد محور x تهیه شده است. سپس آنالیز، حل رابطه لاپلاس، برای مش‌بندی جدید تکرار می‌شود. از آنجایی که مختصات بسیاری از نقاط گرهی موجود در مش‌بندی اجزای محدود تغییر می‌کند، ماتریس ضریب‌های تمامی اجزا باید مجدداً محاسبه شود و برای تشکیل ماتریس ضریب‌های کلی روی هم گذاری شوند. برای پرهیز از انتگرال‌گیری

برای حل مسائل معادلات دیفرانسیل جزئی^۵ مانند تراوش و به روش اجزای محدود تعینی^۶ فقط متوسط داده‌های ورودی به‌دست‌آمده از نتایج قبلی (آزمایشگاهی) در نظر گرفته می‌شود و متغیر خروجی داده‌ای واحد^۷ و منحصر به فرد است. در این حالت خروجی، قادر به تبیین دقیقی از عدم قطعیت‌های ناشی از مؤلفه‌های ورودی و تنوع ذاتی آنها نیست (Silva et al., 2016; Kalateh, et al., 2022).

در حالت تعینی خروجی برنامه شامل سه ستون است که عبارت‌اند از: شماره گره، بار آبی و دبی تخلیه گره که در یک فایل متنی^۸ چاپ می‌شود؛ اما در حالت احتمالاتی به دلیل کاهش حجم فایل خروجی دبی تراوش ورودی و خروجی برای هر گام تکرار ایجاد و مقدار دبی به تعداد تکرارها منتشر می‌شود.

یکی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر در دقت نتایج حاصل در روش‌های احتمالاتی مبتنی بر روش مونت کارلو، تعداد تکرار شبیه‌سازی است که بر اساس میانگین متحرک نتایج حاصل از تحلیل‌ها و برای سطح مشخصی از خطای مورد قبول انتخاب می‌شود (Sharafati & Mirfakhraee, 2019). همه تحلیل‌ها در این تحقیق تعداد تکرارها ۲۰۰۰ است که سطح خطای مورد نظر را ارضا می‌کند.

برای بررسی مدل‌ها از ابعاد یک سد خاکی با مشخصات شکل ۵ استفاده شد. جنس مصالح سد از نوع شنی رسی (SC) است که میانگین مؤلفه نفوذپذیری آن برابر با $10^{-7} \times 3/33$ است.

مش‌بندی اجزای محدود همه مدل‌های تحقیق دارای ۲۰۰ المان ۴ گرهی هستند که برای شرایط مرزی بالادست از نقاط پتانسیل گرهی ثابت به‌اندازه

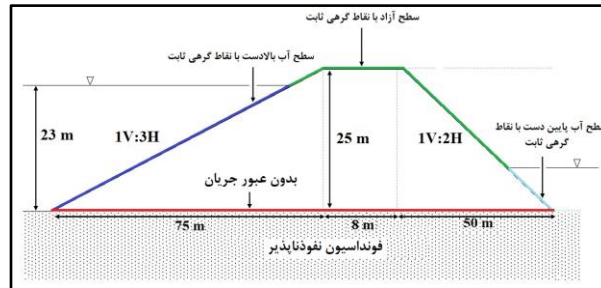
عددی در تعیین مقادیر درایه‌های ماتریس ضرایب هر یک از اجزاء، از روش تحلیلی^۱ (محاسباتی) به‌وسیله سابروتین seep4 استفاده می‌شود. روی هم‌گذاری اجزاء به روش متداول برای تشکیل ماتریس ضرایب کلی kv با استفاده از روش اسکای لاین صورت می‌گیرد. حل مسئله با مش‌بندی اصلاح‌شده جدید منتج به دسته جدید از مقادیر گرهی بار آبی کلی^۲ می‌گردد و در نتیجه اصلاح مجددی برای مختصات گرهی مش‌بندی اجزای محدود اعمال می‌شود. این فرآیند و روند محاسباتی تا زمانی ادامه خواهد یافت که تغییرات در مقادیر بار آبی محاسبه‌شده در گام تکرار جدید، در مقایسه با گام تکرار قبلی، از مقدار ورودی مشخص تحمل‌پذیری برنامه در برابر خطا^۳ کوچک‌تر شود. کنترل دستیابی به همگرایی در هر گام تکرار توسط سابروتین checon صورت می‌گیرد که به‌صورت متغیر منطقی^۴ بیان می‌شود در صورتی که این متغیر True باشد کد اجرایی همگراست.

در این برنامه سابروتینی برای تولید مش و مختصات گرهی قلمرو مورد حل قرار داده نشده است از این رو در فایل ورودی باید مختصات تک‌تک نقاط گرهی coord_g و همچنین الگوی اتصال نقاط گرهی در تک‌تک اجزاء num_g معرفی شوند. علاوه بر این، برخی از متغیرهایی که قبلاً دارای مقدار ثابتی بودند در این برنامه باید به‌عنوان متغیر ورودی به‌منظور تعریف و مشخص‌سازی هندسه قلمرو حل مورد نظر در فایل ورودی معرفی شوند و ضروری است نوع المان به‌کار گرفته‌شده در تحلیل نیز در فایل ورودی مشخص شود.

1- analytical
3- Tolerance
5- PDF
7- Unique

2- Global
4- Logical
6- Deterministic Finite Element
8- Text

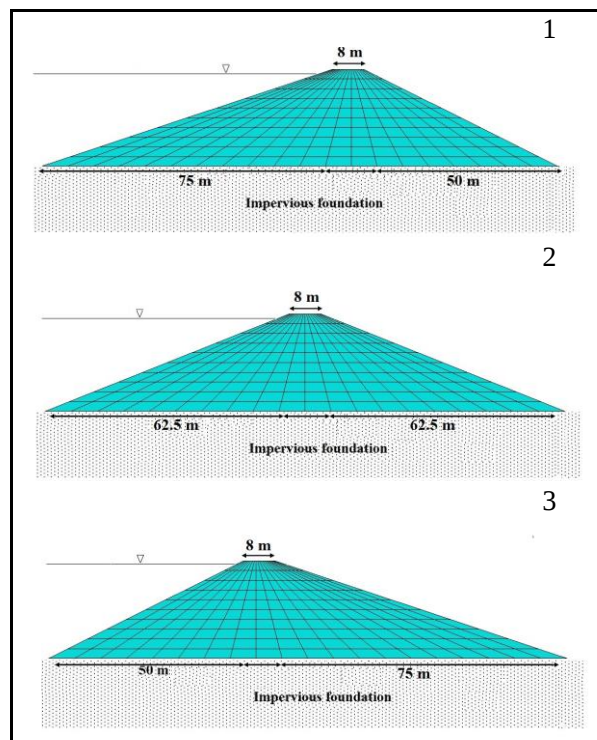
ارتفاع سطح مخزن استفاده و سطح آب پایین‌دست نیز متناسب با ارتفاع آب با گره‌هایی ثابت در نظر گرفته شد. خطوط سبز رنگ شکل ۵ نیز بیانگر سطوحی‌اند که با فشار هوای آزاد در ارتباط هستند. مرز بین پی و سد نیز به صورت جریان دبی صفر فرض شده است.



شکل ۵- نمای سد خاکی مورد بررسی در مدل‌سازی عددی و شرایط مرزی آن

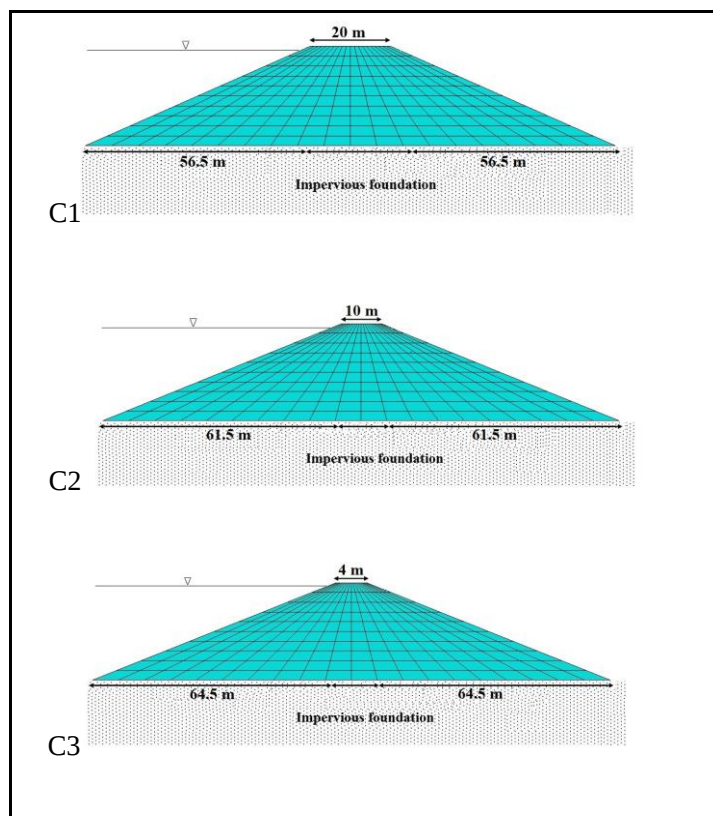
Fig 5- View of the earthen dam studied in numerical modeling and its boundary conditions

مدل‌های متفاوتی بر اساس هندسه سد خاکی شکل ۵ ایجاد شد که مشخصات هندسی مدل‌ها در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود. درواقع در این مدل‌ها تاج سد خاکی جابه‌جا و تأثیر این جابه‌جایی بر مقدار دبی نشت محاسبه می‌شود. برای هر ۶ مدل شکل ۶ و ۷ مش‌بندی مشتمل بر ۲۰۰ المان ۴ گرهی است.



شکل ۶- مدل‌های هندسی شماره ۱ تا ۳ سد خاکی برای بررسی تأثیر جابه‌جایی تاج بر مقدار نشت

Fig 6- Geometric models No. 1 to 3 of earth dam to investigate the effect of crest displacement on the Seepage flow



شکل ۷- مدل‌های هندسی سد خاکی برای بررسی تأثیر عرض تاج بر مقدار نشت

Fig 7- Geometric models No. 1 to 3 of earth dam to investigate the effect of Width displacement on the Seepage flow

بحث و نتایج

مدل‌سازی تعینی^۱

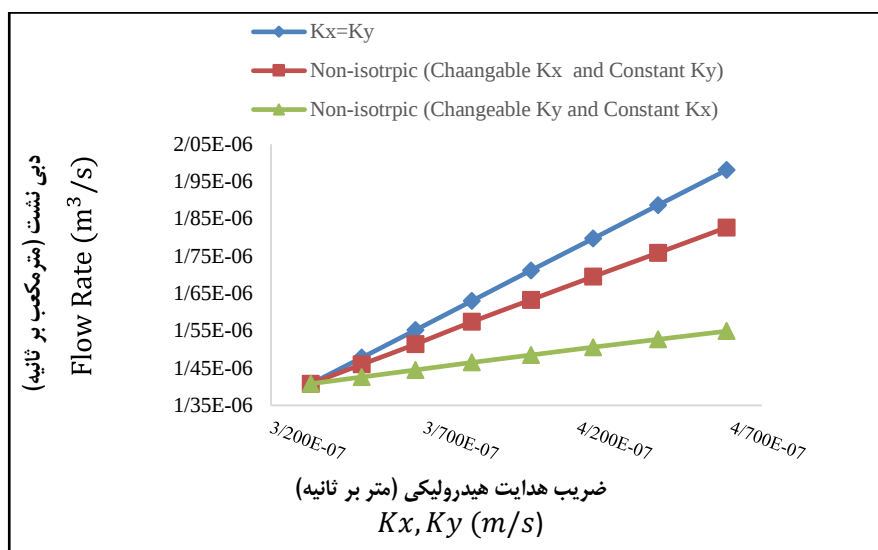
نمودار همچنین بیانگر این است که تأثیر مؤلفه افقی نفوذپذیری (K_x) از مؤلفه قائم آن (K_y) بر دبی نشت بیشتر است. در شکل ۸، دو حالت ناهم‌روندی ذکر شده است که در حالت اولی مقدار مؤلفه نفوذپذیری افقی (K_x) ثابت (برابر 0.000000333 متر بر ثانیه) و ضریب عمودی (K_y) متغیر است و همچنین در حالت دومی مقدار مؤلفه نفوذپذیری عمودی ثابت (برابر 0.000000333 متر بر ثانیه) و مؤلفه نفوذ افقی متغیر است.

ابتدا کد فترن با فرض ثابت بودن مقادیر نفوذپذیری مصالح اجرا و نتایج به‌صورت دو جریان نشت ورودی و خروجی بیان می‌شود که در این حالت این دو مقدار معادل هم هستند. نمودار شکل ۸ نشانگر این است که در حالت هم‌روندی^۲ که نفوذپذیری در راستای قائم و افقی برابر باشند، شیب‌خط از دو حالت ناهم‌روندی^۳ بیشتر است. این

³ Non-Isotropic

¹ Deterministic

² Isotropic



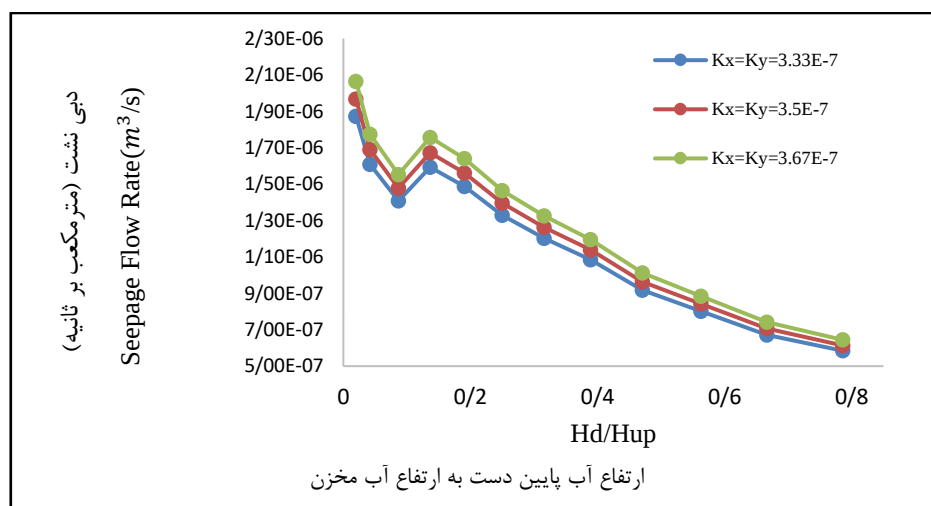
شکل ۸- رابطه تغییرات نفوذپذیری با مقادیر دبی در حالت هم‌روندی و ناهم‌روندی

Fig 8- Relationship between permeability changes and discharge values in isotropic and non-isotropic states

باشد، معمولاً پتانسیل عبور آب از محیط متخلخل سد خاکی کمتر می‌شود.

مدل‌های هندسی متفاوتی از طریق تغییرات دستی در هندسه شکل ۵ رسم شد و بعد از کدگذاری سدهای فرضی برنامه فرترن در حالت تعینی اجرا شد (جدول ۲).

با افزایش نسبت ارتفاع آب پایین‌دست به بالادست (H_d/H_{up}) میزان دبی تراوش کاهش پیدا کرده است. در واقع کاهش تراوش به صورت خطی تابع الگوی تغییرات (H_d/H_{up}) است که در شکل ۹ این رابطه برای سه ضریب هدایت هیدرولیکی (K) متفاوت در حالت هم‌روندی ($K_x=K_y$) تکرار شده است. هر چه ارتفاع آب در پایین‌دست سد بیشتر



شکل ۹- رابطه بین نسبت ارتفاع پایین‌دست به بالادست (H_d/H_{up}) و مقدار دبی تراوش

Fig 9- Relationship between downstream to upstream water level ratio (H_d/H_{up}) and amount of seepage flow

تحلیل احتمالاتی تراوش در سد خاکی با بهره‌گیری از روش مونت‌کارلو...

جدول ۲- دبی تراوش مدل‌های هندسی سد خاکی در حالت تعینی

Table 2- Seepage flow of geometric models of earthen dam in deterministic state

دبی نشت (مترمکعب بر ثانیه) Seepage flow rate (m ³ /s) $\times 10^{-6} \times \text{m}^3/\text{s}$	عرض تاج (متر) Crest width (m)	شیب پایین‌دست (تانژانت زاویه) Downstream slope (tan β)	شیب بالادست (تانژانت زاویه) Upstream slope (tan α)	نوع مدل Model type
1.41	8	0.5	0.33	1
1.28	8	0.4	0.4	2
1.18	8	0.33	0.5	3
1.24	20	0.44	0.44	C1
1.27	10	0.406	0.406	C2
1.30	4	0.387	0.387	C3

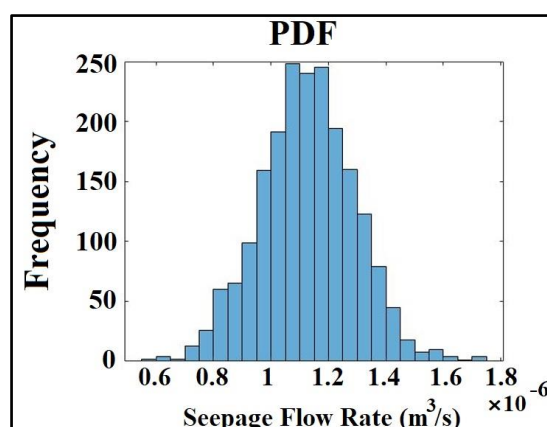
توسعه داده‌شده در حالت احتمالاتی اجرا شد.

میانگین نشت حاصل، با افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی و به‌صورت تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند.

برای ضریب هدایت هیدرولیکی با میانگین $10^{-7} \times 3/33$ و انحراف معیار 5×10^{-8} تابع توزیع تجمعی (CDF) و تابع توزیع فراوانی (PDF) به‌صورت شکل ۱۰ و ۱۱ است.

مدل‌سازی احتمالاتی^۱

همان‌طور که درباره مدل‌سازی تعینی گفته شد، نفوذپذیری مصالح سد در این حالت ثابت است و به‌وسیله سابروتین Seep_4 به‌صورت تحلیلی^۲ حل می‌شود اما در مدل احتمالاتی و روش مونت‌کارلو به‌جای ثبات هدایت هیدرولیکی، میانگین و انحراف معیار آن در محاسبات ورود پیدا می‌کند. ابتدا سد به‌صورت هم‌روند در نظر گرفته ($K_x=K_y$) و کد

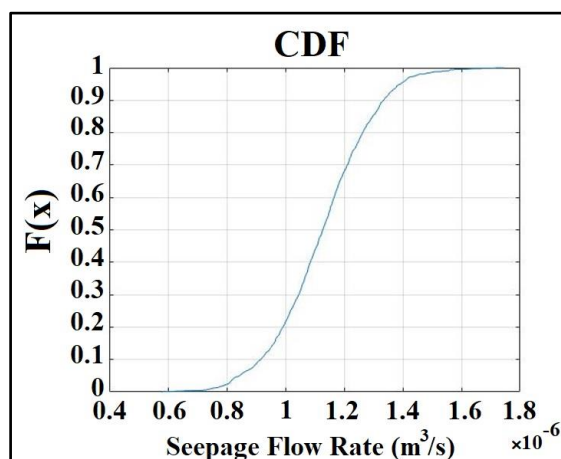


شکل ۱۰- تابع توزیع فراوانی متناظر با نشت از سد خاکی در حالت هم‌روند

Fig 10- Probability distribution function (PDF) corresponding to seepage of earth dam in isotropic state

² Analytically

¹ Probabilistic



شکل ۱۱- تابع توزیع تجمعی متناظر با نشت از سد خاکی در حالت همروند

Fig 11- Cumulative distribution function (CDF) corresponding to seepage from earthen dam in isotropic state

می‌شود و درواقع فراوانی در مقادیر پایین نشت، پرتعداد خواهد بود و از فراوانی مقادیر بالای نشت کاسته می‌شود (شکل ۱۲).

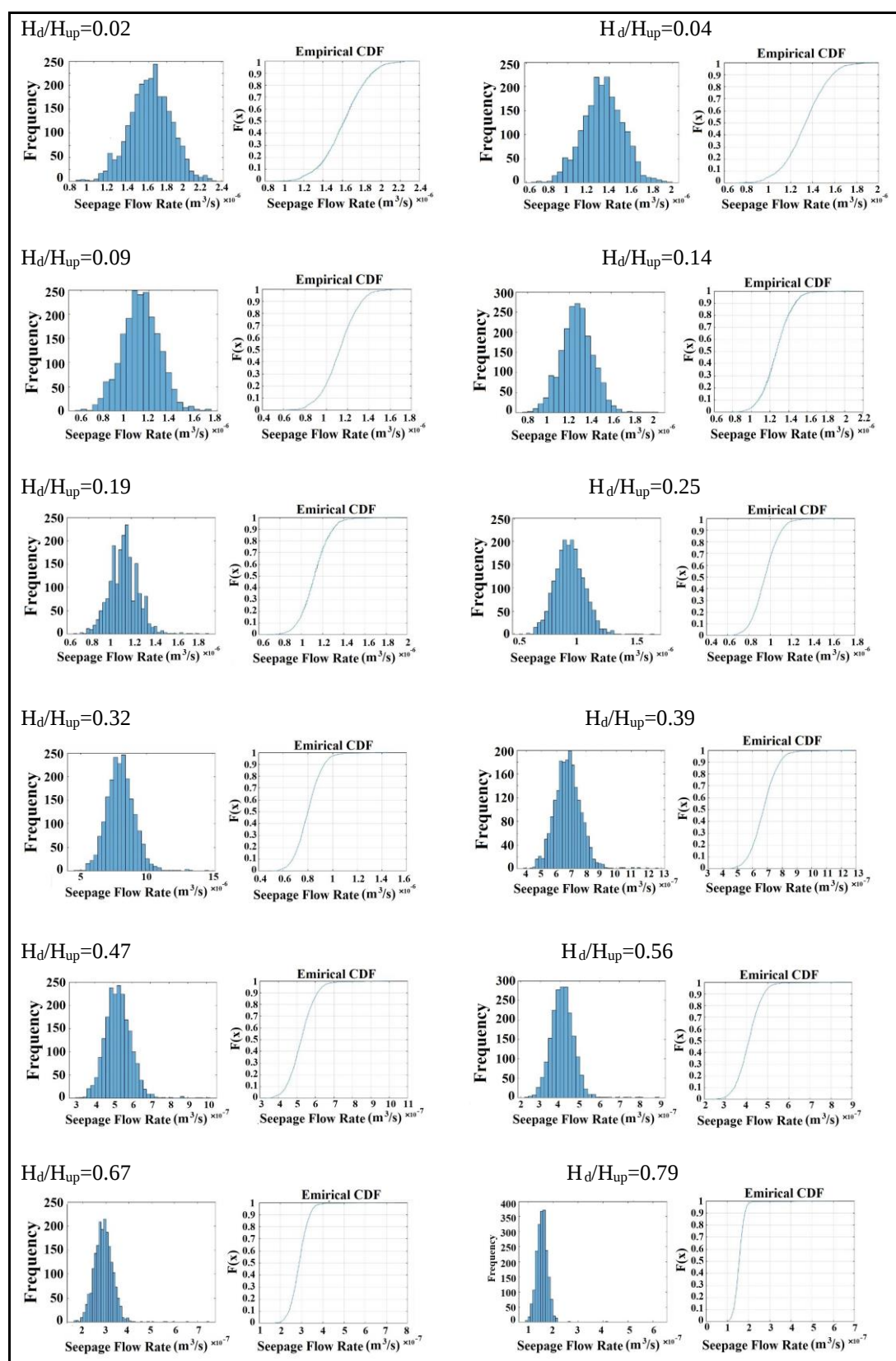
در تابع توزیع فراوانی (PDF) بازه دبی نشت نیز کوچک‌تر می‌شود و نشانگر این نیست که هر چه صورت کسر یعنی ارتفاع آب پایین‌دست بیشتر شود یا مخرج سطح آب کمتری داشته باشد، بازه قرارگیری دبی در نمودار توزیع فراوانی محدودتر می‌شود. تابع توزیع تجمعی (CDF) نیز با افزایش نسبت H_d/H_{up} به سمت چپ و مقادیر کمتر متمایل می‌گردد.

برای نسبت‌های مختلف از ضریب هدایت هیدرولیکی افقی به عمودی نیز تابع توزیع فراوانی و تجمعی در حالت احتمالاتی مقایسه شده است که در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

ارتفاع سطح مخزن و پایین‌دست سد

اگر ارتفاع آب بالادست و پایین‌دست سد متغیر باشد، می‌توان مقادیر نشت را به‌صورت احتمالاتی مطابق شکل ۱۲ محاسبه و نمودار تابع توزیع فراوانی و تابع توزیع تجمعی را به ازای نسبت‌های متغیر از H_d/H_{up} رسم کرد که نتایج عددی نیز در جدول ۳ مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت H_d/H_{up} مقدار میانگین دبی نشت خروجی کاهش پیدا می‌کند اما این تغییر به‌صورت اکیداً نزولی نیست، به‌طوری‌که در حداصل بین نسبت ۰/۰۹ و ۰/۱۴ از ارتفاع مشاهده می‌شود که با افزایش H_d/H_{up} میانگین نشت حالت افزایشی دارد که بیانگر این است که تقریب خطی معرف رفتار تابع دقیق نخواهد بود. به‌طورکلی، با افزایش نسبت ارتفاع پایین‌دست به مخزن، تابع توزیع تجمعی تراوش به چپ متمایل

تحلیل احتمالاتی تراوش در سد خاکی با بهره‌گیری از روش مونت کارلو...



شکل ۱۲- نمودار تابع توزیع فراوانی و تجمعی برای سد خاکی به ازای تغییرات سطح آب مخزن و پایین دست
Fig 12- Probability and Cumulative distribution function diagram for earthen dam in change for reservoir and downstream water level changes

به ازای نسبت نفوذپذیری‌های مختلف و در صورتی که از انحراف استاندارد به‌طور موقت چشم‌پوشی شود و فقط میانگین دبی به‌دست‌آمده از تحلیل عدم قطعیت مدنظر قرار گیرد، آنگاه مطابق جدول ۳ تغییرات H_d/H_{up} (نسبت ارتفاع پایین‌دست به ارتفاع مخزن) و میانگین دبی نشت کاملاً کاهشی (نزولی) نیست و در محدوده نسبت‌های کمتر از ۰/۱۵، حالت افزایشی (صعودی) نیز مشاهده می‌شود. آنچه مشهود است تغییر رفتار از کاهشی به افزایشی در حالتی است که نسبت ارتفاع پایین‌دست به مخزن برابر ۰/۱۴ می‌شود و در سه نفوذپذیری متفاوت ۰/۳۳۳، ۰/۳۴۹ و ۰/۳۶۷ (در 10^{-6}) رفتار تغییرات نشت مشابه است ولی در نسبت ۰/۱۴ رفتار ناهمگونی نشان می‌دهد که مشابه رفتار آن در حالت تعینی است.

جدول ۳- تأثیر تغییرات ارتفاع سطوح آب در پایین و بالادست آن در مدل‌های تحلیل احتمالاتی نشت

Table 3- Impact of changes in water elevation downstream and upstream in seepage probability analysis models

انحراف	میانگین نشت	بیشینه نشت	کمینه نشت	نسبت ارتفاع آب	ارتفاع سطح	ارتفاع سطح
ف	(مترمکعب بر ثانیه)	(مترمکعب بر ثانیه)	(مترمکعب بر ثانیه)	پایین‌دست به مخزن	آب پایین‌دست	آب مخزن
استاندارد	Average of seepage flow	Maximum of seepage flow	Maximum of seepage flow	Downstream water level divided in reservoir level	Downstream water level	Upstream water level
رد	$\times 10^{-7} \times m^3/s$	$\times 10^{-7} \times m^3/s$	$\times 10^{-7} \times m^3/s$	(H_{Down}/H_{Up})	(متر)	(متر)
stand						
ard						
deviat						
ion						
$\times 10^{-8}$						
22.97	16.15	23.47	8.319	0.02	0.5	25
19.38	13.36	19.72	6.817	0.04	1	24
16.51	11.27	17.46	5.784	0.09	2	23
15.52	12.69	20.45	7.614	0.14	3	22
13.57	11.29	19.19	6.766	0.19	4	21
12.32	9.56	16.5	5.578	0.25	5	20
10.45	8.03	14.52	4.686	0.32	6	19
8.96	6.76	12.67	3.953	0.39	7	18
7.05	5.26	10.19	3.035	0.47	8	17
5.90	4.12	8.912	2.39	0.56	9	16
4.36	2.90	7.41	1.656	0.67	10	15
2.97	1.58	6.217	0.9109	0.79	11	14

نفوذپذیری مصالح بدنه

در یک توده از خاک، ناهمگنی فضایی لایه‌های آن ناشی از تغییرپذیری ذاتی ساختار خاک و ناشی از فرآیندهایی مانند ته‌نشینی و هوازدگی طبیعی خاک است. در روش‌های تحلیل قطعی تراوش، مقدار ثابت محافظه‌کارانه‌ای برای خصوصیات یک‌لایه خاک در نظر گرفته و فرض می‌شود که لایه‌های خاک همگن هستند (Gui et al., 2000). در حالی که

فرض ثابت بودن مقدار نفوذپذیری در مدل‌های عددی موجب ایجاد خطای زیادی در محاسبات می‌شود، بافت و ساختار خاک در فضا خصوصیات متفاوتی نشان می‌دهند و درواقع ناهمگنی و تغییرپذیری فضایی از خواص ذاتی خاک طبیعی به شمار می‌رود (Lumb, 1966; Peck, 1967; Venmarcke, 1977; Degroot & Baecher, 1993).

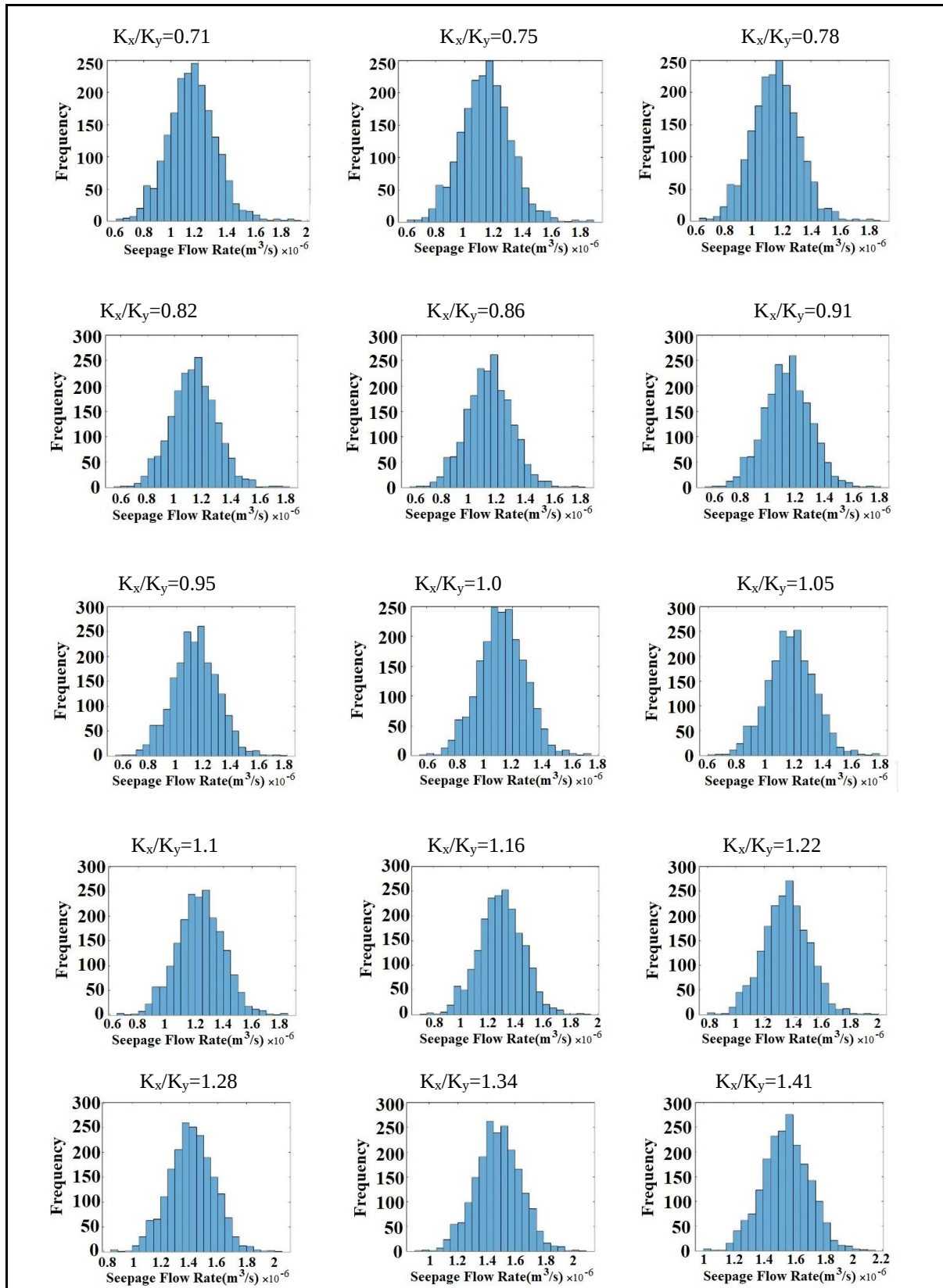
رویکردهای احتمالاتی به‌جای مقادیر ثابت و یکسان، در هر تکرار مقادیر متفاوتی به مشخصات مصالح اختصاص می‌دهد. صورتی که مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی بدنه سد (K_x) متغیر باشد، نتایج اجرای کد نشت در جدول ۴ و شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت نفوذپذیری افقی به قائم مقدار میانگین تراوش در بازه بین ۰/۷۱ و ۱ حالت نزولی و در بازه ۱ و ۱/۴۱ به‌صورت صعودی است و رفتار ثابتی ندارد. درواقع گزاره خطی بودن رابطه میانگین

جدول ۴- مشخصات نتایج تحلیل عدم قطعیت از مقادیر نشت به ازای تغییرات نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی (K_x/K_y)

Table 4- Details of Uncertainty Analysis Results from Leakage Values for Changes in Horizontal to Vertical

انحراف استاندارد standard deviation $\times 10^{-7}$	میانگین نشت (مترمکعب بر ثانیه) Average of seepage flow $\times 10^{-7} \times m^3/s$	بیشینه نشت (مترمکعب بر ثانیه) Maximum of seepage flow $\times 10^{-7} \times m^3/s$	کمینه نشت (مترمکعب بر ثانیه) Maximum of seepage flow $\times 10^{-7} \times m^3/s$	نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی Horizontal to vertical permeability ratio K_x/K_y
1.768	11.54	19.19	6.146	0.71
1.747	11.5	18.91	6.082	0.75
1.727	11.46	18.65	6.024	0.78
1.709	11.42	18.39	5.969	0.82
1.693	11.38	18.15	5.918	0.86
1.678	11.34	17.91	5.87	0.91
1.664	11.3	17.69	5.826	0.95
1.651	11.27	17.46	5.784	1.00
1.644	11.79	17.96	6.308	1.05
1.637	12.34	18.47	6.888	1.10
1.63	12.92	19.01	7.498	1.16
1.622	13.52	19.57	8.134	1.22
1.614	14.15	20.17	8.796	1.28
1.607	14.82	20.79	9.49	1.34
1.601	15.51	21.44	10.21	1.41

Permeability Ratio (K_x/K_y)



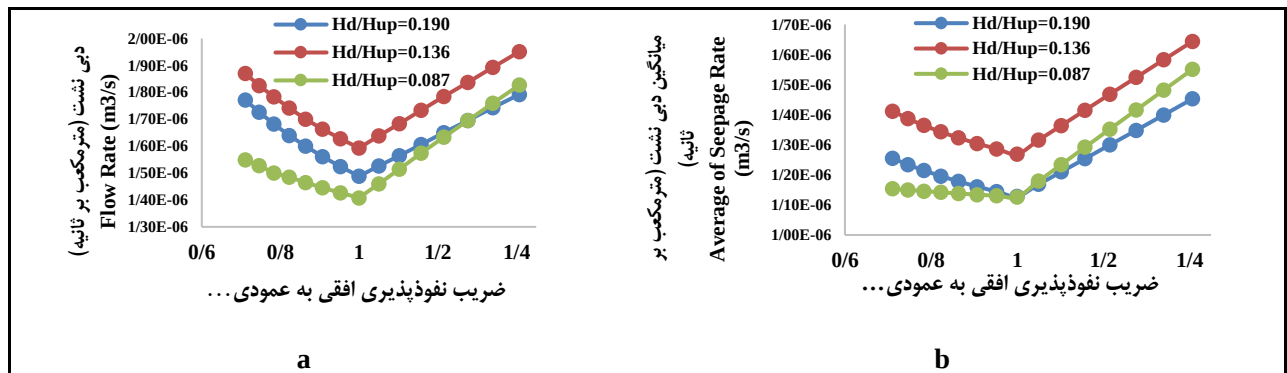
شکل ۱۳- تابع توزیع فراوانی (PDF) به ازای تغییرات نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی (K_x/K_y)

Fig 13- Probability distribution function (PDF) for changes in horizontal to vertical permeability ratio (K_x/K_y)

تحلیل‌شده، در بازه $0/71$ و $0/95$ مقدار نفوذپذیری افقی (K_x) ثابت فرض شده و فقط مقادیر نفوذپذیری قائم (K_y) دچار تغییر شده‌اند و شیب ملایم نمودار در این بازه بیانگر تأثیر اندک در مقدار میانگین تراوش است. همچنین، در بازه $1/41 < K_x/K_y < 1$ که شیب تندتر شده است و در این بازه نیز مقدار نفوذپذیری قائم، ثابت فرض شده است که مؤید تأثیر بیشتر مؤلفه افقی نفوذپذیری در تغییرات میانگین دبی نشت عبوری نسبت به نفوذپذیری قائم است و این تأثیر با تغییر نسبت ارتفاع سطح آب پایین‌دست به مخزن نیز تغییر می‌کند ولی به‌طور کلی در همه حالات تأثیر مؤلفه افقی هدایت هیدرولیکی نسبت به قائم بیشتر است. میزان کاهش و افزایش در هر سه حالت، متفاوت است و آهنگ یکسانی ندارند، در حقیقت روند تغییرات برای سه حالت رسم شده در شکل $a-14$ و $b-14$ مؤید این نکته است که به ازای نسبت‌های ارتفاع آب پایین‌دست به مخزن $0/087$ ، $0/136$ و $0/19$ شیب‌های نمودار یکسان نیستند.

مدل‌های هندسی قبلی ایجادشده برای سد خاکی با استفاده از روش مونت‌کارلو تحلیل شدند و نتایج در جدول ۵ قابل‌مشاهده است.

شکل ۱۴ بیانگر رابطه میانگین تراوش منتج از تحلیل مونت‌کارلو به ازای نسبت‌های پایین‌دست به مخزن $0/087$ ، $0/136$ و $0/19$ است و نشان می‌دهد نمودار در بازه $1 < K_x/K_y < 1/41$ شیب غیر یکسانی به نسبت بازه صعودی $1/41 < K_x/K_y < 1$ دارد. به بیان دقیق‌تر، شیب بخش نزولی در حالت تعیینی به ازای نسبت‌های پایین‌دست به مخزن $0/087$ ، $0/136$ و $0/19$ به ترتیب برابر با $0/96$ ، $0/96$ و $0/48$ در حالت نزولی و $0/73$ ، $0/88$ و $1/32$ در حالت صعودی است که تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود؛ اما در حالت احتمالاتی به ازای نسبت‌های پایین‌دست به مخزن $0/087$ ، $0/136$ و $0/19$ به ترتیب با $0/41$ ، $0/48$ و $0/69$ در حالت نزولی و $0/78$ ، $0/91$ و $1/32$ در حالت صعودی است که در هر سه حالت شیب بخش صعودی حداقل یک و نیم برابر بیشتر است. یادآوری می‌شود، در هر سه حالت و در هر دو بازه ضریب تبیین رابطه خطی بالای $0/98$ است که با نرم‌افزار SPSS و روش رگرسیون خطی محاسبه شد. رفتار غیرثابت میانگین دبی تراوش نیز نشانگر این نکته است که تأثیر تغییرات نفوذپذیری در محور افقی بر محور قائم تأثیر بیشتری دارد. شایان‌ذکر است که در موارد



شکل ۱۴- a: میانگین دبی عبوری از سد خاکی به ازای تغییرات نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی (K_x/K_y) در تحلیل تعینی. b- مقدار دبی عبوری از سد خاکی به ازای تغییرات نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی (K_x/K_y) در تحلیل احتمالاتی

Fig 14-a- Average seepage flow of earthen dam for changes in horizontal to vertical permeability ratio (K_x/K_y) in deterministic analysis. 14-b- The amount of flow through the earthen dam in change for changes in the ratio of horizontal to vertical permeability (K_x/K_y) in probabilistic analysis.

جدول ۵- مقادیر به دست آمده از تحلیل احتمالاتی با روش مونت کارلو برای مدل‌های هندسی

Table 5: Amounts obtained from probabilistic analysis by Monte Carlo method for geometric models				
انحراف	میانگین نشت	بیشینه نشت	کمینه نشت	نوع مدل
استاندارد	(مترمکعب بر ثانیه)	(مترمکعب بر ثانیه)	(مترمکعب بر ثانیه)	Model type
standard deviation	Average of seepage flow	Maximum of seepage flow	Maximum of seepage flow	
$\times 10^{-7}$	$\times 10^{-7} \times m^3/s$	$\times 10^{-7} \times m^3/s$	$\times 10^{-7} \times m^3/s$	
1.65	11.3	17.5	5.78	1
1.53	9.89	16.9	5.45	2
1.51	8.91	16.8	4.97	3
1.42	9.07	16	5.11	C1
1.52	9.73	16.7	5.39	C2
1.57	10.2	17.1	5.59	C3

مقایسه مدل‌های تعینی و احتمالاتی

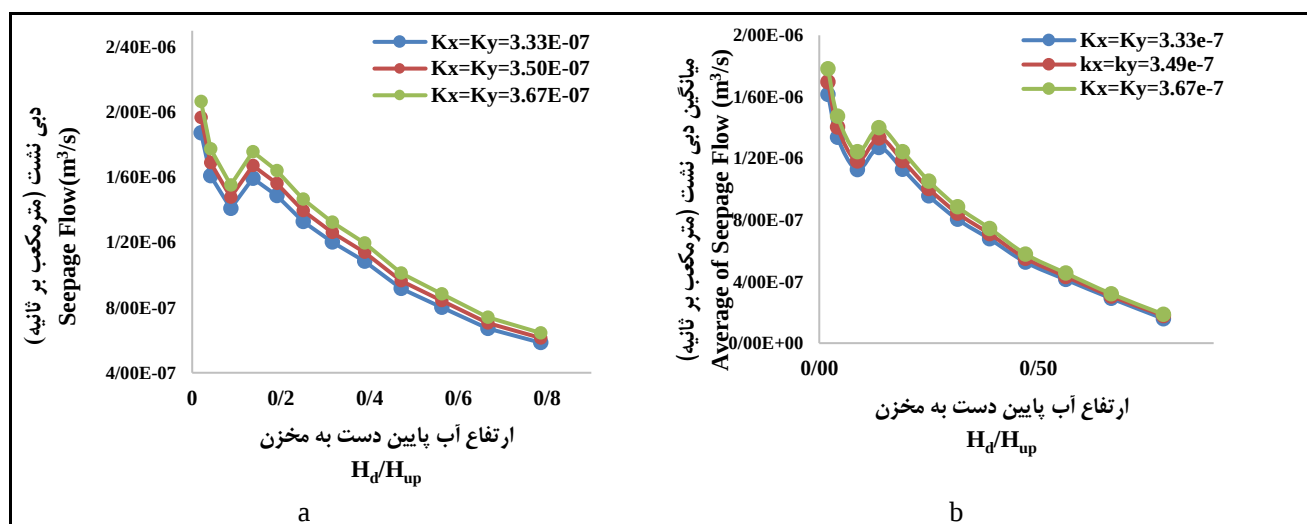
مقدار متنوع از ضریب هدایت هیدرولیکی برای به کارگیری در کد فرترن خواهد داشت. در حالت احتمالاتی و در فایل ورودی متنی میانگین و انحراف معیار استاندارد میانگین ضریب هدایت هیدرولیکی وارد می‌شود و به سبب این نوع ورودی، در خروجی مدل نیز تراوش در دو ستون میانگین دبی تراوش و انحراف استاندارد میانگین آن منتشر می‌شود. در شکل ۱۵ مقادیر خروجی دبی تراوش در حالت قطعی و غیرقطعی مقایسه شده است.

آنچه در این تحقیق در همه مدل‌های احتمالاتی مدنظر است تحلیل عدم قطعیت در ضریب

مشاهده نتایج حاصل از روش مونت کارلو همراه با نتایج حالت قطعی منجر به درک تأثیر اعمال عدم قطعیت در مدل سازی عددی می‌شود، درواقع در مدل غیرقطعی (احتمالاتی) نفوذپذیری مصالح تشکیل دهنده سد خاکی، به جای ثابت بودن، متغیر است درحالی که در مدل تعینی از ضریب K (دو مقدار در حالت ناهمروندی و یک مقدار در حالت همروندی) در طول مدت زمان اجرای کد ثابت هستند. به بیان دیگر، در صورتی که تعداد تکرار برنامه برابر ۱۰۰۰ باشد، برای حالت ناهمروندی ۲۰۰۰

تغییرات دبی نسبت به H_d/H_{up} در حالات تعینی و احتمالاتی مشابه است و در نسبت ۰/۱۴ از نمودار روند کاهشی تغییر یافته است؛ اما آنچه در نمودار مشخص است مقدار دبی با افزایش مقادیر نفوذپذیری افقی و عمودی از ۳/۳۳ تا ۳/۶۷ بیشتر می‌شود که این آهنگ افزایشی هم در دبی تراوش در حالت تعینی و هم در میانگین دبی در حالت احتمالاتی قابل مشاهده است.

نفوذپذیری خاک است که در سه فاز بررسی شده است، فاز اول تأثیر ارتفاع سطح آب، فاز دوم مشخصات مصالح و فاز سوم اثر هندسه سد خاکی را بر دبی نشت بررسی می‌کند. شکل ۱۵ بیانگر اثر تغییرات نسبت سطح آب پایین دست به مخزن (H_d/H_{up}) بر دبی نشت (a) و میانگین دبی احتمالاتی (b) است که مقایسه دو حالت مذکور نشانگر بیشتر بودن مقادیر دبی در حالت تعینی نسبت به حالت احتمالاتی است. در حالت کلی روند

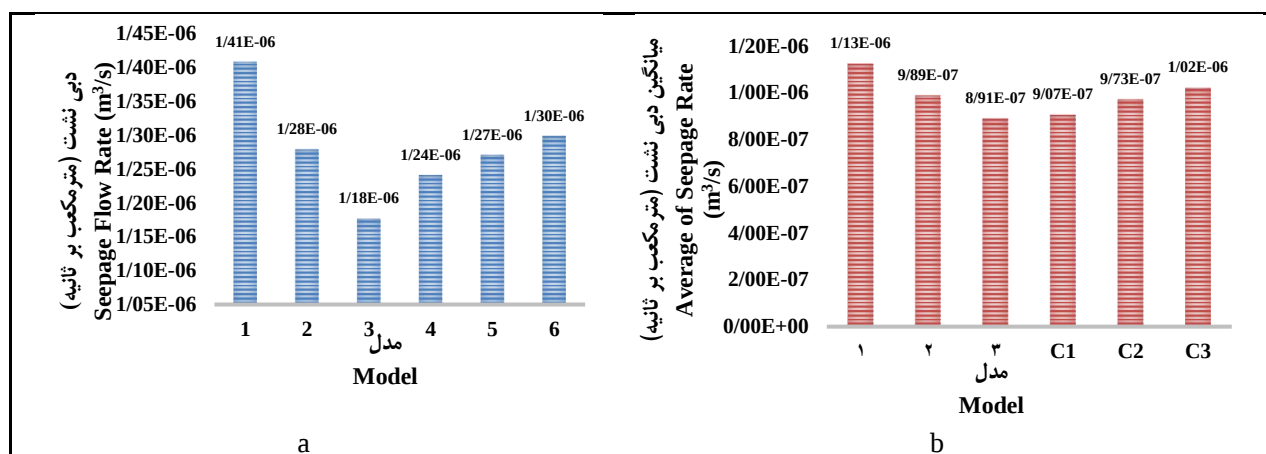


شکل ۱۵- a: تغییرات دبی نشت برحسب نسبت ارتفاع آب پایین دست به مخزن در حالت تعینی ۱۵- b: تغییرات دبی نشت برحسب نسبت ارتفاع آب پایین دست به مخزن در حالت احتمالاتی

Fig 15-a- Seepage flow changes in terms of downstream water divided in upstream level ratio in the definite state. 15-b- Seepage flow changes in downstream water divided in upstream level in probabilistic state.

تغییرات عرض تاج منجر به تغییرات قابل توجهی در دبی نشت عبوری از بدنه می‌شود. حداقل ۱۹/۷۴ و حداکثر ۲۶/۹۱ درصد تفاوت دبی میانگین احتمالاتی و دبی تعینی است و در همه مدل‌ها مقدار میانگین دبی محاسبه شده در روش احتمالاتی کمتر از حالت تعینی است. در مسائل طراحی سد خاکی توجه به این تفاوت‌ها موجب کاهش هزینه کل پروژه و عملیات مکانیزه می‌شود.

آنچه در شکل ۱۶-a و ۱۶-b دیده می‌شود تفاوت مقدار میانگین دبی تراوش در مدل‌های ۱ تا ۳ و C1 تا C3 است و درواقع جابه‌جایی تاج سد خاکی در جهت بالادست باعث افزایش میانگین دبی شده است و کاهش عرض تاج سد نیز تأثیر مشابهی بر میزان نشت دارد. عرض سد خاکی تابع عوامل دیگری شامل ابعاد ماشین‌آلات عبوری و پایداری سد است و طی زمان می‌تواند با نشست تحکیم یا ثانوی سد نیز دچار تغییر در اندازه شود. با توجه به شکل ۱۶



شکل ۱۶- a: میانگین دبی نشت در مدل‌های سد خاکی در حالت تعینی ۱۶- b: میانگین دبی نشت در مدل‌های سد خاکی در حالت احتمالاتی

Fig 16-a- Seepage flow rate in earthen dam models in the definite state 16-b- Average seepage flow in earthen dam models in the probabilistic state

نشت استفاده شده است که در حالت احتمالاتی مبتنی بر گام‌های تکراری است که نهایتاً با مدل تعینی مقایسه شده است. خلاصه نتایج مدل‌سازی عددی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- در تحلیل تعینی تأثیر نفوذپذیری افقی بر دبی نشت اختلاف معناداری نسبت به تأثیر نفوذپذیری قائم نشان نمی‌دهد اما در تحلیل احتمالاتی تأثیر نفوذپذیری افقی بر میانگین دبی نشت حداقل ۸۹ درصد بیشتر از نفوذپذیری قائم است.

- نتایج بررسی احتمالاتی تراوش نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ارتفاع پایین دست به بالادست، محدوده قرارگیری دبی در تابع توزیع فراوانی (PDF) و میانگین دبی تراوش کاهش می‌یابد.

- با کاهش عرض تاج سد خاکی میانگین دبی تراوش کاهش و با جابه‌جایی تاج سد به سمت بالادست این میزان افزایش می‌یابد.

- در تمامی حالات میانگین دبی تراوش محاسبه شده در حالات مختلف از مدل‌های روش

نتیجه‌گیری

فرآیندهای ژئومورفولوژیکی منجر به ایجاد خصوصیات تغییرپذیری فضایی در خاک می‌شود و با توجه به اینکه در مدل‌های تعینی (قطعی) از این خصوصیت خاک صرف نظر می‌شود، در نهایت این روش مدل‌سازی سنتی، خطای قابل توجهی ایجاد می‌کند. به همین سبب در این تحقیق، تراوش در محیط متخلخل بدنه سد خاکی با توجه به رویکردهای احتمالاتی بررسی شد که هدایت هیدرولیکی خاک به عنوان مشخصه‌ای توأم با عدم قطعیت فرض شده و میانگین و انحراف معیار آن در محاسبات وارد گردید. به طور کلی در این تحقیق تأثیر هندسه و مشخصات مصالح بر دبی نشت با روش اجزای محدود بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی تعینی در اغلب حالات مشابه تحلیل مونت کارلو است و رفتار تقریباً یکسانی را پیش‌بینی می‌کنند اما در حالت کلی، روش اجزای محدود تعینی دبی را بیشتر از میانگین روش احتمالاتی گزارش می‌کند. برنامه‌ای در زبان فرترن برای تحلیل

تحلیل احتمالاتی تراوش در سد خاکی با بهره‌گیری از روش مونت کارلو...

مونت کارلو ۱۶ تا ۲۷۰ درصد کمتر از دبی تراوش در
الگوریتم مونت کارلو را همراه با تخمین احتمال
حالت تعیینی است.
خرابی سازه و روش‌های قابلیت اطمینان مرتبه
• برای ادامه پژوهش حاضر می‌توان تراوش با
اول و دوم تحلیل کرد.

مراجع

- Ahmed, A. S., Revil, A., Bolève, A., Steck, B., Vergnault, C., Courivaud, J. R., Jougnot, D., & Abbas, M. (2020). Determination of the permeability of seepage flow paths in dams from self-potential measurements. *Engineering Geology Journal*, 268, 105514.
- Ashnab Advisor Company. (2014). Guide to seismic analysis and design of earthen and gravel dams. *Report*, Publications of the technical and executive system of the Iran (in Persian).
- Carpenter, L. C. (1980, July). Computer rendering of fractal curves and surfaces. In *Proceedings of the 7th annual Conference on Computer graphics and interactive techniques*, p. 109, July 14 – 18, Seattle, Washington, USA: Association for Computing Machinery.
- Casagrande, A. (1937). Seepage through Dams. *Journal of New England Water Works Association*, 52(2), 131-172.
- Chang, C. S. (1987). Boundary element method in drawdown seepage analysis for earth dams. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1(2), 83–98.
- Chen, Q., & Zhang, L. M. (2006). Three-dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturated unsaturated seepage theory. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(5), 449–461.
- Choopan, Y., Emami, S., & Kheiri Ghooje Bigloo, M. (2020). Evaluating Election, Imperialist Competitive Algorithms and Artificial Neural Network Method in Investigating the Groundwater Level of Reshtkhar Plain. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(6), 1333-1246. Doi: 10.22060/CEEJ.2019.15344.5888.
- Dagan, G. (1976). Comment on 'Stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media' by R. Allan Freeze. *Water Resources Research*, 12(3), 567-568.
- DeGroot, D. J., & Baecher, G. B. (1993). Estimating autocovariance of in-situ soil properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(1), 147–166.
- Desai, C. S. (1972). Seepage analysis of earth banks under drawdown. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(11), 1143–1162.
- Dvinoff, A. H., & Harr, M. E. (1971). Phreatic surface location after drawdown. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(1), 47–58.
- Emami, S., Choopan, Y., Kheiry Goje Biglo, M., & Hesam, M. (2020). Optimal and Economic Water Allocation in Irrigation and Drainage Network Using ICA Algorithm (Case Study: Sofi-Chay Network). *Irrigation and Water Engineering*, 10(3). Doi: 10.22125/iwe.2020.107104.
- Fenton, G. A., & Vanmarcke, E. H. (1990). Simulation of random fields via local average

- subdivision. *Journal of Engineering Mechanics*, 116(8), 1733–1749.
- Fournier, A., Fussell, D., & Carpenter, L. (1982). Computer rendering of stochastic models. *Communications of the ACM*, 25(6), 371–384.
- Freeze, R. A. (1971). Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resources Research*, 7(2), 347–366.
- Fukumoto, Y., Yang, H., Hosoyamada, T., & Ohtsuka, S. (2021). 2-D coupled fluid-particle numerical analysis of seepage failure of saturated granular soils around an embedded sheet pile with no macroscopic assumptions. *Computers and Geotechnics*, 136, 104234.
- Gelhar, L. W. (1977). Effects of hydraulic conductivity variations on groundwater flows, in *Hydraulic Problems Solved by Stochastic Methods*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colo, PP. 409-431.
- Ghias, M. (2014). An Introduction to the Monte Carlo Simulation Methods. *Basparesh*, 4(1), 67-77 doi: 10.22063/basparesh.2014.1062.
- Giglou, K. A., Biglou, M. K. G., Mehrparvar, B., & Naghadeh, A. S. (2019). Investigating Amount of Leakage, Sediment and Durability in Geosynthetic Cover of Pumping Channel 3 at Irrigation Network of Moghan. *Revista Geoaraguaia*, 9(2).
- Griffiths, D., & Fenton, G. A. (1993). Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil. *Geotechnique*, 43(4), 577–587.
- Gui, S., Zhang, R., Turner, J. P., & Xue, X. (2000). Probabilistic slope stability analysis with stochastic soil hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(1), 1–9.
- Helton, J. C. (1997). Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57(1–4), 3–76.
- Helton, J. C. (2011). Quantification of margins and uncertainties: Conceptual and computational basis. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(9), 976–1013.
- Helton, J. C., & Johnson, J. D. (2011). Quantification of margins and uncertainties: Alternative representations of epistemic uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(9), 1034–1052.
- Helton, J. C., Johnson, J. D., & Sallaberry, C. J. (2011). Quantification of margins and uncertainties: Example analyses from reactor safety and radioactive waste disposal involving the separation of aleatory and epistemic uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(9), 1014–1033.
- Jafarian, Y., Nasri, E. (2016). Evaluation of uncertainties in the existing empirical models and probabilistic prediction of liquefaction-induced lateral spreading. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(3), 275-290. Doi: 10.22060/ceej.2016.674 (in Persian)
- Jafarzadeh, F., & Asadnia, M. (2005). Considering Three-and Two-Dimensional Seepage Analysis for Inhomogeneous Earth Dam Constructed in Narrow Valleys, *73RD INTERNATIONAL COMMITTEE OF LARGE DAMS (ICOLD)*, Tehran, IRAN, Vol 126-S5.
- JamshidiChenari, R. and Behfar, B. (2017). Stochastic analysis of seepage through natural

- alluvial deposits considering mechanical anisotropy. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 50(2), 233–253.
- Johari, A., & Heydari, A. (2018). Reliability analysis of seepage using an applicable procedure based on stochastic scaled boundary finite element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 94, 44–59.
- Kalateh, F and Afshari, S. (2018). Three-dimensional analysis of Kalghan dam seepage and evaluation of the alluvial roof on the dam foundation sealing according to software Seep3D (Master Thesis), Faculty of Civil Engineering, Department of Water Engineering, University of Tabriz (in Persian)
- Kalateh, F, & Hoseinnejad, F. (2018). Using the Finite Element Method in the Coupled Analysis of Earth Dams and Estimating the Associated Pore Water Pressure. *Ferdowsi Civil Engineering*, 31(2), 23–40. <https://doi.org/10.22067/civil.v31i2.54955> (in Persian)
- Kalateh F, Hosseinejad F, Kheiry M. (2022). Uncertainty quantification in the analysis of liquefied soil response through Fuzzy Finite Element method. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 19, No. 3 (207), 177–199, 2022. DOI: 10.13168/AGG.2022.0007.
- Kheiry Ghoghjeh Biglou, M., Pilpayeh, A. (2020). Optimization of Height and Length of Ogee-Crested Spillway by Composing Genetic Algorithm and Regression Models (Case Study: Spillway of Balarood Dam). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 20(77), 39-56. Doi: 10.22092/idser.2019.124750.1368.
- Kheiry, M. & Pilpayeh, A. (2019). Effect of geometric specifications of ogee spillway on the volume variation of concrete consumption using genetic algorithm. *Revista INGENIERÍA UC*, 26(2), 145-153.
- Kouhpeyma, A., Kilanehei, F., Hassanlourad, M., & Ziaie-Moayed, R. (2021). Numerical and experimental modelling of seepage in homogeneous earth dam with combined drain. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1–11.
- Lam, L., Fredlund, D. G., & Barbour, S. L. (1987). Transient seepage model for saturated–unsaturated soil systems: A geotechnical engineering approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4), 565–580.
- Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. *Canadian geotechnical journal*, 3(2), 74–97.
- Liu, K., Vardon, P. J., & Hicks, M. A. (2018). Probabilistic analysis of seepage for internal stability of earth embankments. *Environmental Geotechnics*, 6(5), 294–306.
- Neuman, S. P. (1973). Saturated-unsaturated seepage by finite elements. *Journal of the hydraulics division*, 99(12), 2233–2250.
- Peck, R. B. (1967). Stability of natural slopes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(4), 403–417.
- Salami, A.B. (2003). An overview of the Monte Carlo simulation method. *Economic Research Journal*, 3(8), 117-138.
- Sharafati, A. and Mirfakhraee, S. (2019). Uncertainty Analysis of Seepage Flow in Soil Foundation of Small Concrete Dam. *Journal of Civil and Environmental Engineering*,

49.2(95), 95-105.

- Silva, A.V., Neto, S.A.D. and de Sousa Filho, F.D.A. (2016). A Simplified Method for Risk Assessment in Slope Stability Analysis of Earth Dams Using Fuzzy Numbers. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(10), 3607–3624.
- Smith, I. M., & Griffiths, D. V. (1998). Programming the finite element method, John Wiley & Sons. 2-nd edition.
- Smith, L., & Freeze, R. A. (1979a). Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain: 1. one-dimensional simulations. *Water Resources Research*, 15(3), 521–528.
- Smith, L., & Freeze, R. A. (1979b). Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain: 2. two-dimensional simulations. *Water Resources Research*, 15(6), 1543–1559.
- Vanmarcke, E. H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(11), 1227–1246.

Probabilistic Analysis of Seepage in Earth dam by using Monte Carlo Simulation and Considering Soil Permeability and Body Geometry

F. Kalateh*, M. Kheiry Ghojeh-Biglou²

* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: fkalateh@tabrizu.ac.ir

Received: 20 May 2022, Accepted: 1 August 2022

Extended Abstract

Introduction

Seepage through the soil is one of the most important issues of Fluid-Structure Interaction (FSI) that can lead to liquefaction, boiling of sand in downstream, settlement of hydraulic structures, instability and failure of embankments and earth dams. Accurate calculation of the amount of leakage passing through the earthen dam is an important factor in ensuring its safety and stability. On the other hand, the results of seepage analysis in calculating the dimensions of drainage and filters of the dam deformation is very important (Kalateh and Afshari, 2018; Jafarzadeh and Asadnia, 2005).

Methodology

To deterministic solving of the Laplace equation in soil medium is performed by Smith and Griffiths (2004), FORTRAN programming code is written that calculates the flow rate and piezometric head in the body of a homogeneous and non-homogeneous earth dam. The FORTRAN code for solving seepage equations is similar to the code for solid mechanics equations. In this code, inspired by solving the equations of static and dynamic equilibrium in solid mechanics and using the finite element method, the differential equation of seepage is solved with the difference that instead of displacement and force components in mechanical problems of seepage and piezometric head is used.

In the present paper, a program based on the finite element method in FORTRAN programming language has been developed by the author that solves the Laplace equations to determine the leakage discharge of an earth dam assuming the uncertainty of the components involved. In fact, in the previous code related to seepage, soil permeability has been considered definitively, which in this study is probabilistically investigated.

First, the FORTRAN code is assumed that the permeability values of the materials are constant, and the results are expressed as two leakage currents, input and output, in which case these two values are equivalent. The results show that in the isotropic state where the permeability is equal in the vertical and horizontal directions, the slope of the line is greater than the two non-isotropic states.

As mentioned for deterministic modeling, the permeability of dam materials is constant in this case and is solved analytically by the Seep_4 subroutine, but in the probabilistic model and the Monte Carlo method, instead of the stability of the conductivity coefficient, the mean and standard deviation are entered in the calculations.

Results and Discussion

Figure 1 shows the relationship between the average seepage resulting from Monte Carlo Simulation for downstream reservoir ratios of 0.087, 0.136 and 0.19, which shows a graph in the range of $0.71 < K_x/K_y < 1$ inequality slope. It has an ascending interval of $1 < K_x/K_y < 1.41$. To be more precise, the slope of the descending section in the definite position for downstream ratios to the reservoir is 0.087, 0.136 and 0.19, respectively, equal to 0.96, 0.96 and 0.48 in the

descending position and 0.73, 0, 0.88 and 1.032 are in the ascending state, with no significant difference. But in probabilistic mode for downstream ratios to reservoir 0.087, 0.136 and 0.19 with 0.41, 0.48 and 0.069 in descending mode and 0.78, 0.91 and 1.032 respectively is in the ascending state, in which the slope of the ascending part is at least one and a half times greater in all three states. It is worth mentioning that in all three cases and in both intervals, the coefficient of explanation of the linear relationship is above 0.98, which was calculated by SPSS software and linear regression method.

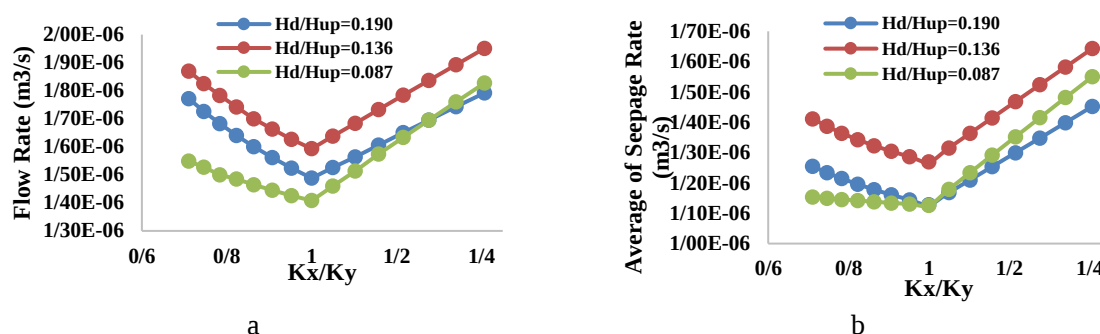


Fig 1-a- Average seepage flow of earthen dam for changes in horizontal to vertical permeability ratio (K_x/K_y) in deterministic analysis. 1-b- The amount of flow through the Earth dam in change for changes in the ratio of horizontal to vertical permeability (K_x/K_y) in probabilistic analysis.

Conclusions

- In the deterministic analysis, the effect of horizontal permeability on the seepage flow rate not show a significant difference compared to the effect of vertical permeability, but in probabilistic analysis, the effect of horizontal permeability on average of seepage flow rate is at least 89% higher than vertical permeability.
- The results of probabilistic leakage study show that with increasing the ratio of downstream to upstream, the range of discharge in the frequency distribution function (PDF) and the average leakage discharge decreases.
- With decreasing the width of the earthen dam crown, the average seepage flow decreases and with the upward movement of the dam crown, this amount increases.
- In all cases, the average seepage flow calculated in different cases of Monte Carlo Simulation (MCS) models is 16 to 270% less than the seepage flow in the definite case.

Keywords: Uncertainty Analysis, Saturated and Unsaturated Soils, FORTRAN Programming, Porous Media, Finite Element (FE).