

بررسی عدم قطعیت تراوش از سدهای خاکی همگن با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و اجزای محدود فازی

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: پذیرش مقاله:	در تحلیل محیط خاکی به صورت اشباع و نیمه اشباع، استفاده از روش اجزای محدود فازی به علت تصادفی بودن خصوصیات خاک موجب حصول تحلیل‌های واقع‌بینانه‌تری نسبت به روش‌های تعینی می‌شود. هدف این تحقیق بررسی تأثیر عدم قطعیت در پیش‌بینی دبی نشت از سد خاکی، با به‌کارگیری الگوریتم نوترکیب شبیه‌سازی مونت‌کارلو فازی (FMCS) است که به کمک روش اجزای محدود تصادفی اجرا شده است. در این تحقیق از یک برنامه رایانه‌ای برای تحلیل اجزای محدود استفاده شد که بعد از صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی ابتدا به صورت قطعی و تعینی بررسی گردید. سپس از حلقه‌های تکرار مونت‌کارلو برای حالت احتمالاتی استفاده شد. اجزای محدود فازی با فرض احتمال وقوع رخداد تراوش در خاک برای چهار متغیر نفوذپذیری خاک (K_x/K_y)، نسبت ارتفاع آب (H_d/H_u)، نسبت عرض افقی پایین‌دست به عرض قاعده (B_d/B) و نسبت عرض افقی پایین به بالادست (B_d/B_u) اجرا گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تابع عضویت فازی برای متغیرهای K_x/K_y به صورت خطی-مستقیم و برای دو متغیر هندسی B_d/B و B_d/B_u خطی-غیرمستقیم است و همچنین تابع عضویت H_d/H به صورت غیرخطی-غیرمستقیم برای تراوش می‌باشد.
واژگان کلیدی: محیط متخلخل، اجزای محدود گالرکین، مدل شبیه‌سازی، هدایت‌پذیری خاک، برنامه‌نویسی فرترن.	

۱-مقدمه

واقعی‌تری از داده‌های ورودی را فراهم می‌کند و تجزیه و تحلیل دقیق‌تری از سیستم ارائه می‌دهد. به‌طور کلی روش‌های تحلیل عدم قطعیت در مهندسی عبارت‌اند از: روش تحلیل حساسیت، روش تحلیل خطا، روش تحلیل احتمال‌اندیشانه، تحلیل فازی و اجزای محدود تصادفی. در روش تحلیل حساسیت برای شناسایی پارامترهای حساس در مدل‌های مهندسی استفاده می‌شود. با تغییر پارامترهای ورودی، تأثیر آن‌ها بر خروجی مدل بررسی می‌شود [۵-۶]. در روش تحلیل خطا، با مقایسه خروجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی یا داده‌های واقعی، خطاهای موجود در مدل شناسایی می‌شوند [۷].

هزینه ساخت سدهای خاکی و بتنی و بهره‌برداری از آن‌ها بسیار بالا است و شکست آن منجر به پیامدهای جبران‌ناپذیر اقتصادی و انسانی می‌شود [۱]. از طرف دیگر با توجه به شرایط حاکم آب و هوایی و کمبود آب قابل‌استفاده، توجه در بهره‌برداری از منابع ذخیره آب مانند سدها برای هر کشور ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است [۲-۴]. تجزیه و تحلیل اجزای محدود فازی شامل استفاده از مجموعه‌های فازی و منطق فازی برای مقابله با عدم قطعیت و ابهام در داده‌های ورودی است. این رویکرد مبتنی بر ایده نمایش داده‌های ورودی به صورت مجموعه‌های فازی و استفاده از منطق فازی است. استفاده از مجموعه‌های فازی و منطق فازی امکان نمایش

در روش تحلیل احتمال‌اندیشانه، با در نظر گرفتن توزیع احتمالی پارامترهای ورودی، تابع توزیع احتمالی به‌عنوان خروجی مدل بررسی می‌شود و در روش تحلیل فازی با در نظر گرفتن مقادیر فازی برای پارامترهای ورودی، تابع عضویت خروجی تعیین می‌گردد [۹-۸].

در روش تحلیل اجزای محدود تصادفی با در نظر گرفتن توزیع احتمالی پارامترهای ورودی، تحلیل اجزای محدود برای خروجی مدل انجام می‌شود که در این تحقیق مطابق شکل (۱) از ترکیبی از روش‌های احتمال‌اندیشانه و اجزای محدود فازی استفاده می‌شود [۱۰].

لیو و همکاران در سال ۲۰۱۹ از روش المان محدود تصادفی (RFEM^۱) جهت تحلیل نشست به‌صورت دوبعدی در حالت ماندگار یک خاک‌ریز استفاده کردند و با توجه به نشست پایداری آن را بررسی نمودند [۱۱]. النداوای از روش المان محدود برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم مربوط به نشست در سد هرمین^۲ استفاده کرد [۱۲].

در سال ۲۰۲۰ احمد و همکاران از «روش خود پتانسیل^۳» و زنجیره‌ی مونت‌کارلو مارکوف برای پیش‌بینی دبی تراوش در سد خاکی بهره بردند [۱۳].

کماسی و همکاران، تحلیل اجزای محدود سد خاکی را با نرم‌افزار ژئواستادیو و باهدف بهینه‌سازی ابعاد زهکش انجام دادند و حداقل ضریب اطمینان سد را با طرح سناریوهای مختلف برای زهکش محاسبه کردند [۱۴].

در سال ۲۰۲۰ کلاته و حسین نژاد از روش اجزای محدود فازی (FFEM) برای همبسته محیط متخلخل اشباع استفاده کردند، آن‌ها برای حل معادلات هیدرومکانیکال حاکم بر مسئله از معادله بایوت استفاده کردند [۱۵].

فوکوموتو و همکاران جریان تراوش از خاک ماسه‌ای اشباع را با روش پیشرفته شبکه‌بندی جفت شده^۴ بولتزمن و روش اجزای محدود (FEM) حل کردند [۱۶].

جوهری، حیدری و طالبی در سال ۲۰۲۱ پایگاه داده‌ای شامل هزار مورد را با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده (SBFEM) برای تحلیل تراوش در زیر یک سازه بتنی ایجاد کردند و از آن‌ها برای تحلیل احتمالاتی نشست استفاده نمودند. [۱۷]. در پژوهشی مروری به سال ۲۰۲۲ روش‌های عددی تحلیل جهت به دست آوردن نشست و محاسبه فشار منفذی برای سدهای خاکی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفتند و مدل‌های بهینه از بین مدل‌های حاضر برای پیش‌بینی تراوش از سد معرفی و مقایسه شد [۱۸].

خیری و کلاته در سال ۲۰۲۳ روش‌های اجزای محدود احتمالاتی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو را بررسی کرده و تحلیل تاریخیچه زمانی برای روش‌های تحلیل سدهای خاکی غیراشباع را ارائه دادند [۱۹].

در سال ۲۰۲۳ فنگ و همکاران از روش اجزای محدود تصادفی (RFEM) برای تحلیل یک سد سنگریزه‌ای با دیواره رسی استفاده کردند که در آن مشخصات خاک بدنه به‌عنوان متغیر تصادفی برای مدل سه‌بعدی فرض شده بود [۲۰].

شیراگو و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۳ تحلیل عدم قطعیت و قابلیت اعتماد سد خاکی را با روش مونت‌کارلو انجام دادند و پایداری احتمالاتی سد را با در نظر گرفتن عدم قطعیت خاک محاسبه نمودند.

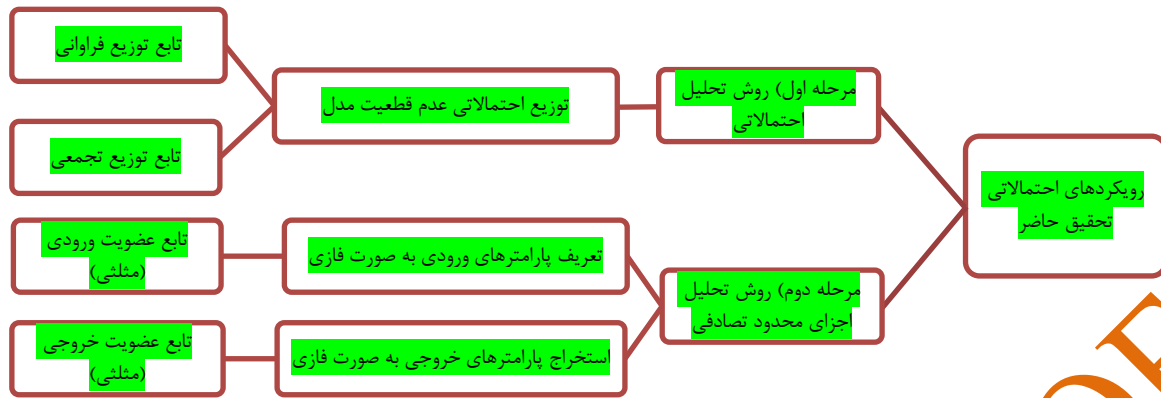
اهداف کلی تحقیق حاضر عبارت است از: الف) تحلیل عدم قطعیت با فرض احتمالاتی بودن مصالح سد و اثرات آن بر روی تراوش با کمک روش مونت‌کارلو در فاز اول تحقیق ب) محاسبه نشست با فرض فازی بودن داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

¹ Randon Finite Element Method

² Hemin

³ Streaming Potential field

⁴ Coupled



شکل ۱ - روش‌های احتمالاتی مورد استفاده در تحقیق حاضر جهت تحلیل تراوش.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش محاسباتی

جهت حل عددی معادله تراوش در محیط خاکی، اسمیت و گریفیث کدی را در زبان برنامه‌نویسی فرترن نگارش نموده‌اند [۲۲] که دبی و بار هیدرولیکی را در بدنه سد خاکی همگن یا ناهمگن محاسبه نماید که در تحقیق حاضر این کد توسعه داده شده است. این کد فرترن برای حل معادلات تراوش برگرفته از کد تحلیل اجزای محدود مکانیک جامدات است. این کد بر اساس معادلات بخش ۱-۲ نوشته شده است.

برای حل ریاضی تراوش معادله مرسوم رابطه لاپلاس است و بیانی از معادله لاپلاس، که برای تحلیل جریان نشأت آب از ناحیه تحتانی سازه‌های هیدرولیکی و بدنه خاک‌ریز و سد سنگریزه‌ای استفاده می‌شود به صورت زیر است:

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

در معادله (۱)، 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. \emptyset تابع پتانسیل جریان سیال و یا هد کل 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. معادله بالا برای جریان در شرایط دائمی و خاک همگن استفاده می‌شود.

با استفاده از روش اجزای محدود و گسسته سازی معادلات، معادله دیفرانسیل پاره‌ای فوق به دستگاه معادلات جبری زیر تبدیل می‌شود:

$$[k_c]\{\varphi\} = \{q\} \quad (2)$$

در معادله ۴، $[K_c]$ ماتریس ضرایب متقارن و $\{\varphi\}$ بردار مقادیر گرهی مجهول هد آب و $\{q\}$ بردار جریان‌های ورودی یا خروجی از گره‌های مرزی (در قلمرو حل) هستند [۲۲].

۲-۲- اجزای محدود فازی

در این تحقیق، چهار ویژگی سد خاکی به‌عنوان مجموعه‌های فازی مدل‌سازی می‌شوند که شامل مشخصات مصالح، هندسه سد و نفوذپذیری خاک است که با استفاده از قواعد منطق فازی، تحلیل و بررسی می‌شوند.

فرض کنید Ω دامنه موردنظر باشد و Ωh شبکه المان محدودی از Ω با گره‌های $\{x_i\}$ و المان‌های $\{T_j\}$ باشد. $h(x)$ سرعت هیدرولیکی در نقطه x در محیط متخلخل باشد و $\hat{h}(x)$ سرعت هیدرولیکی فازی در نقطه x باشد. سرعت هیدرولیکی فازی $\hat{h}(x)$ به‌عنوان یک مجموعه فازی بر روی Ω تعریف می‌شود، با تابع عضویت $\mu(x)$ که درجه عضویت x در \hat{h} را نشان می‌دهد.

معادله نفوذ در محیط متخلخل به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot (k \nabla h) = f \quad (7)$$

که در آن k هدایت هیدرولیکی و f تابع منبع / مصرف است. معادله نفوذ فازی در محیط متخلخل به شکل زیر است:

$$\vec{f} = \nabla \cdot (\vec{k} \nabla h) \quad (8)$$

و \vec{f} نیز همانند رابطه قبلی تابع منبع/مصرف اما به صورت فازی است. روش المان محدود فازی شامل گسسته سازی دامنه Ω به المان‌های محدود، و تقریب سرعت هیدرولیکی فازی $\vec{h}(x)$ با استفاده از توابع شکل فازی است. توابع شکل فازی برای هر المان محدود تعریف شده‌اند و برای تقریب سرعت هیدرولیکی فازی در گره‌های المان محدود استفاده می‌شوند. در ادامه فرمول‌بندی ریاضی اجزای محدود فازی در تجزیه تراوش را بیان می‌کنیم:

الف) فازی‌بندی پارامترهای نامعین:

پارامتر هدایت هیدرولیکی خاک را در نظر بگیریم که یک پارامتر نامعین است. می‌توانیم هدایت هیدرولیکی را با استفاده از مجموعه فازی $K(x)$ نمایش دهیم، جایی که x مختصات فضایی است. تابع عضویت مجموعه فازی $K(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_K(x, k) = \exp\left[-\frac{(\ln k - \ln K(x))^2}{2\sigma^2}\right] \quad (9)$$

که k مقدار دقیق هدایت هیدرولیکی است، $K(x)$ مقدار فازی هدایت هیدرولیکی در مختصات فضایی x است و σ انحراف معیار عدم قطعیت است.

ب) توسعه مدل المان محدود:

مدل المان محدود برای تجزیه تراوش می‌تواند با استفاده از معادلات حاکم تراوش مانند قانون داریسی و معادله پیوستگی توسعه یابد. مدل المان محدود فازی را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$S(x) = (K(x) \nabla h(x)) \cdot \nabla \quad (10)$$

که $h(x)$ سرعت هیدرولیکی در مختصات فضایی x است و $S(x)$ تابع منبع/مصرف. هدایت هیدرولیکی $K(x)$ توسط مجموعه فازی تعریف شده در مرحله الف نشان داده می‌شود.

ج) حل مدل المان محدود فازی:

مدل المان محدود فازی می‌تواند با استفاده از حساب فازی حل شود. حل می‌تواند به صورت مجموعه فازی $H(x)$

نمایش داده شود، جایی که تابع عضویت مجموعه فازی $H(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_H(x, h) = \exp\left[-\frac{(h - H(x))^2}{2\delta^2}\right] \quad (11)$$

که h مقدار دقیق سرعت هیدرولیکی است، $H(x)$ مقدار فازی سرعت هیدرولیکی در مختصات فضایی x است و δ انحراف معیار عدم قطعیت است. [۲۳-۲۴].

۲-۳- روش مونت کارلو

اگر متغیر احتمالاتی X را به عنوان متغیر اصلی در نظر بگیریم، تابع چگالی احتمالاتی به صورت $f_X(x)$ است که پاسخ‌های سیستم مورد انتظار به صورت تابع g از x تعریف می‌شود:

$$\mathbb{E}(g(X)) = \sum_{x \in X} g(x) f_X(x) \quad (12)$$

که اگر X گسسته فرض شود، داریم:

$$\mathbb{E}(g(X)) = \int_{x \in X} g(x) f_X(x) dx \quad (13)$$

و اگر X پیوسته مفروض شود و n نمونه از X شامل X_1 تا X_n در نظر گرفته گردد، $g(x)$ میانگین نمونه‌ها است. پس داریم:

$$\bar{g}_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i) \quad (14)$$

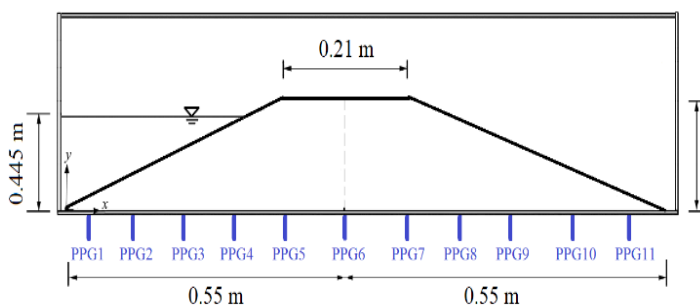
به طور جایگزین، برای متغیر تصادفی می‌توان گفت:

$$\bar{g}_n(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) \quad (15)$$

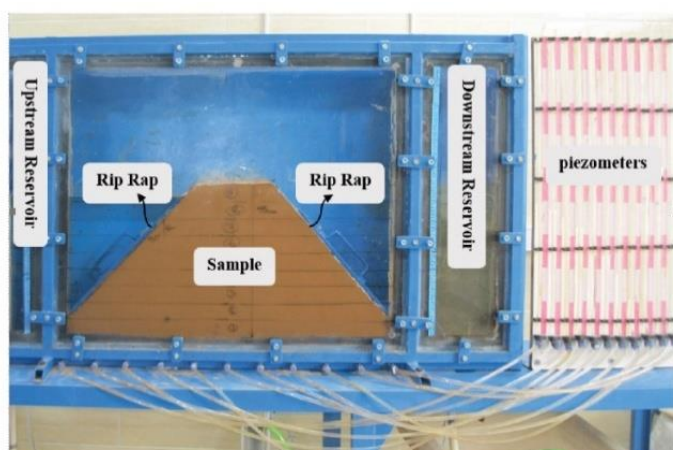
محاسبه گر مونت کارلو برای $\mathbb{E}(g(X))$ فراخوانده می‌شود و اگر $\mathbb{E}(g(X))$ وجود دارد، در نقطه مربوط فرم ضعیف مقادیر دست بالا^۱ بیان می‌کند که برای هر مقدار ناچیز ϵ داریم [۲۵]:

¹ Weak law of large numbers

کف و دو سرریز لوله‌ای در مخزن‌های پایین‌دست و بالادست برای تنظیم تراز آب است (شکل ۳ و ۲).



شکل ۲- نمای جانبی از مدل آزمایشگاهی کوه‌پیما و همکاران [۲۶].



شکل ۳- فلوم مورد بررسی در مدل آزمایشگاهی [۲۶].

میزان نشست 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 ۴). مطابق جدول ۱، اختلاف بین مقادیر عددی به‌دست‌آمده از برنامه فرترن و داده آزمایشگاهی برای مؤلفه نشست از سد بسیار جزئی و در حدود ۰/۳۱ درصد است.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\bar{g}_n(X) - \mathbb{E}(g(X))| \geq \epsilon) = 0 \quad (16)$$

قاعده LLN^۱ بیانی دیگر از رابطه بالا است. بیان می‌کند که اگر اندازه n بزرگ باشد و $\bar{g}_n(x)$ از روش مونت کارلو مشتق گردد و همچنین نزدیک به مقدار $\mathbb{E}(g(X))$ باشد.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\bar{g}_n(X)) &= \mathbb{E}\left\{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i)\right\} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{E}g(X_i) = \mathbb{E}g(X) \end{aligned} \quad (17)$$

در فاز اول از تحقیق، برای اجرای تحلیل احتمال‌اندیشانه، از حلقه‌های تکراری شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. به‌منظور اطمینان از همگرایی برنامه، یک زیر برنامه ایجاد شده است که به‌طور مداوم برای همه اجزا در یک حلقه اجرا می‌شود. این زیر برنامه اختلاف عددی هد هیدرولیکی به‌دست‌آمده در تکرار n را با مقدار منتج از تکرار n-1 مقایسه می‌نماید و اگر این اختلاف کمتر از خطای قابل قبول باشد، برنامه متوقف می‌گردد. در بخش بعدی الگوریتم، داده‌های به‌دست‌آمده از اجرای فاز اول با استفاده از روش اجزای محدود تصادفی برای تعیین اثرات متغیرهای فازی در دبی تراوش تحلیل می‌شوند.

۲-۴- 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 صحت سنجی از مدل آزمایشگاهی کوه‌پیما و همکاران مربوط به سال [۲۶] استفاده شد که در یک فلوم به ابعاد ۱/۱، ۱ و ۰/۱۵ متر به ترتیب برای طول، ارتفاع و عرض تانک اجرا شده بود. ابعاد مدل‌سازی فیزیکی به‌صورت کوچک‌مقیاس ولی دانه‌بندی بر مبنای مصالح واقعی انتخاب شد. برای مدل‌سازی تراوش از مخزن آبی استفاده گردید که مجهز به ۱۱ پیزومتر به فاصله‌های افقی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر در

¹ The Law of Large Numbers (LLN)

اجزای مکرر برنامه فرترن در قالب اجزای محدود تصادفی به روابط بین تنش مؤثر و مؤلفه‌های ورودی تبدیل می‌شوند.

۲-۶- اجرای روش فازی (فاز دوم)

بر اساس مفهوم کلی تحلیل اجزای محدود مبتنی بر مجموعه‌های فازی و منطق فازی، مراحل اصلی به شرح زیر است:

الف) تعریف متغیرهای فازی و غیرفازی: اولین گام، تعریف مسئله و تعیین داده‌های ورودی موردنیاز برای تجزیه و تحلیل است. در این تحقیق از چهار مؤلفه به‌عنوان متغیرهای فازی استفاده شده است که عبارت‌اند از:

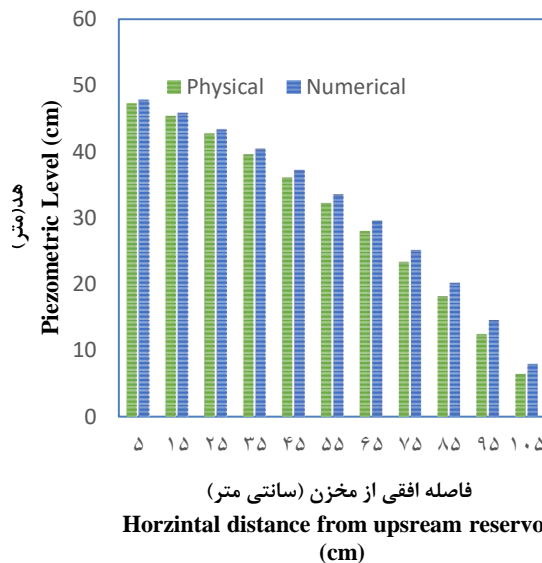
نسبت هدایت هیدرولیکی افقی به عمودی (K_x/K_y) ، نسبت سطح آب پایین‌دست به مخزن (H_d/H_u) ، نسبت فاصله تاج از پاشنه به عرض قاعده سد (B_d/B) ، نسبت فاصله تاج از پاشنه به فاصله تاج از نوک (B_d/B_u) .

این متغیرهای فازی که شامل مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده سد در جهت محورهای مختصاتی، سطوح آب پایین‌دست و بالادست و هندسه سد خاکی هستند به‌صورت مجموعه فازی مثلی شکل انتخاب شده‌اند. باقی متغیرها به‌عنوان متغیرهای تعینی فرض می‌شوند.

ب) تعریف توابع عضویت: مرحله بعدی تعریف مجموعه‌های فازی برای داده‌های ورودی است. این شامل تعریف توابع عضویت برای هر متغیر ورودی است که نشان‌دهنده درجه عضویت هر مقدار در مجموعه فازی است. در تحقیق حاضر توابع عضویت چهار متغیر فازی به شکل (۶) است.

ج) ایجاد مدل المان محدود: مرحله بعدی ایجاد مدل المان محدود سیستم با استفاده از کدنویسی در زبان فرترن و با فرض جریان داری نگارش شده است.

د) انجام تحلیل اجزای محدود فازی: مرحله بعدی انجام تحلیل اجزای محدود فازی با استفاده از مجموعه‌های فازی تعریف‌شده و منطق فازی است. این شامل حل معادلات اجزای محدود برای هر عنصر با استفاده از مجموعه‌های فازی و منطق فازی است.



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با مدل عددی تحقیق حاضر. جدول ۱- مقایسه دبی نشت به‌دست‌آمده از مدل آزمایشگاهی [۲۶] و مدل تحقیق حاضر.

دبی نشت (دبی)	دبی نشت (مدل آزمایشگاهی)	اختلاف دو مدل $\times 10^{-7} \times \text{m}^3/\text{s}$	درصد خطا %
۴/۸۳	۴/۸۵	۰/۰۲	۰/۳۱

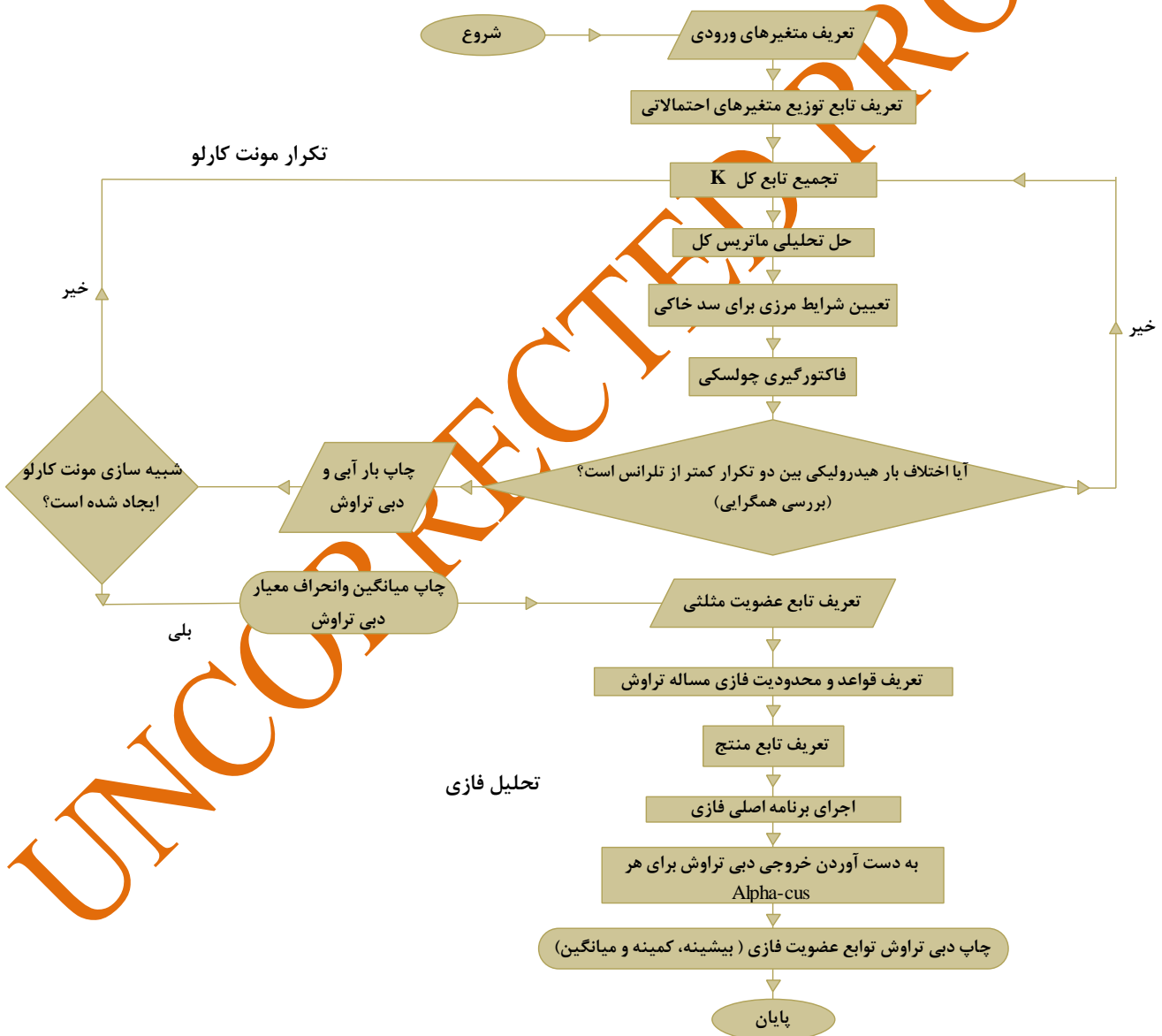
۲-۵- اجرای روش تحلیل احتمال‌اندیشانه مبتنی بر مونت کارلو (فاز اول)

در تحقیق حاضر برای کد محاسباتی در چند قسمت از حلقه‌های تکرار استفاده شده است که یکی از بخش‌های اساسی، حلقه تکرار اعمال شبیه‌سازی مونت کارلو است. همچنین مطابق شکل (۵) برای بررسی همگرایی زیر برنامه‌ای برای همه اجزا (المان‌ها) به‌صورت متصل حلقه‌ای ایجاد شده است که اختلاف بار هیدرولیکی به‌دست‌آمده 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. در واقع این روند بررسی همگرایی، برای هر اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو پردازش می‌شود که موجب افزایش زمان دستیابی به نتایج نسبت به حالت تعینی می‌گردد. در قسمت بعدی از الگوریتم تحقیق، داده‌های به‌دست‌آمده از

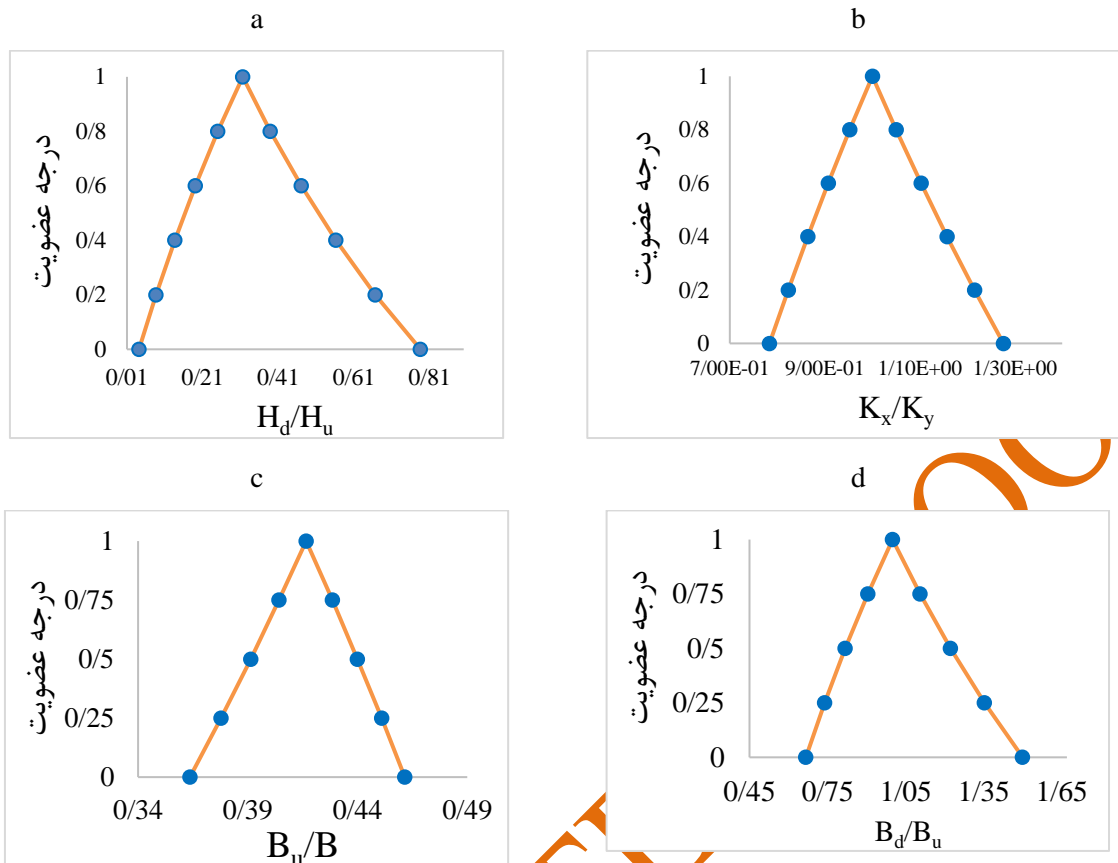
ذ) چاپ خروجی: مرحله نهایی تجزیه و تحلیل نتایج اجزای محدود فازی و نتیجه‌گیری در مورد رفتار سیستم سد و مخزن در شرایط مختلف است. در این مرحله یک تحلیل حساسیت بر روی خروجی‌ها انجام می‌گردد که از صحت نتایج دبی اطمینان حاصل گردد. سپس توابع عضویت به دست آمده برای دبی تراوش بر اساس چهار متغیر فازی مرحله (ب) رسم می‌گردد.

قابل ذکر است که برای انتخاب هندسه‌های مختلف سد خاکی علاوه بر استفاده از اطلاعات آماری سدهای در دست

بهره‌برداری از قیودات مربوط به ضریب اطمینان در مورد پایداری شیروانی‌ها [۲۷] استفاده گردید و برای چهار پارامتر فازی Kx/Ky , Hd/Hu , Bd/B و Bd/Bu محدوده معینی تعیین شد که ناپایداری احتمالی در سد و در شیب‌های بالا و پایین دست حادث نشود. در واقع با بهره‌گیری از دو منبع آمار متغیرهای هندسی در سدهای حاضر (۵۰ سد) و روابط مربوط به پایداری در برابر لغزش، بازه محدودی برای هر متغیر لحاظ گردید.



شکل ۵- الگوریتم ترکیبی اجزای محدود تصادفی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو در تحقیق حاضر.



شکل ۶- توابع عضویت متغیرهای ورودی در تحلیل فازی.

۶-۲- مدل تعیینی-فازی و مونت کارلو-فازی

در تحقیق حاضر از دو فاز برای اجرای پژوهش استفاده شده است، در فاز اول تحقیق از روش مونت کارلو استفاده گردیده است که یکی از انواع روش‌های پرکاربرد در تحلیل عدم قطعیت است و قبل از اجرای کد، باید میانگین و انحراف معیار متغیر تصادفی (متغیرهای ورودی) تعیین شود. در این مرحله متغیر تصادفی ورودی ضریب هدایت‌پذیری است و دیگر متغیرها تعیینی محسوب می‌شوند و متغیر خروجی تصادفی، دبی است. در این تحقیق، متغیر هدایت هیدرولیکی خاک به‌عنوان یک متغیر غیرقطعی با میانگین و انحراف معیار مدل شده است. روش مونت کارلو با ۲۰۰۰ تکرار اجرا گردیده و برخلاف تحلیل تعیینی که یک مقدار برای خروجی تولید می‌کند، مقادیر خروجی دبی تراوش به تعداد تکرارها به دست آمدند. برای نمایش نتایج استفاده از تابع توزیع فراوانی (PDF) استفاده شده است.

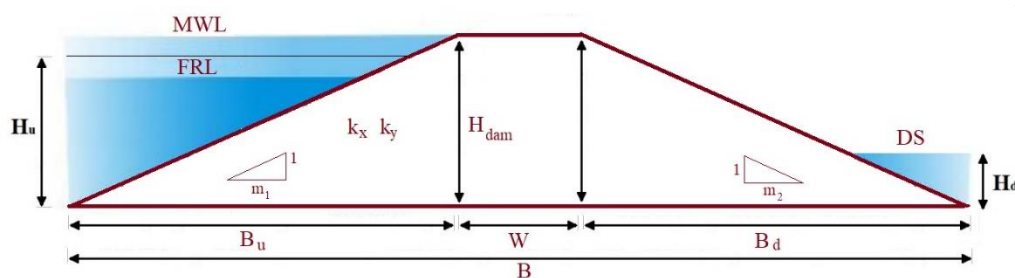
در مقاله حاضر برنامه‌ای بر اساس روش اجزای محدود در زبان برنامه‌نویسی فرترن توسط نگارنده توسعه داده شده است که معادلات لاپلاس را با فرض عدم قطعیت مؤلفه‌های ورودی و خروجی حل می‌کند. در واقع، در کد قبلی مربوط به تراوش، نفوذپذیری خاک به‌صورت تعیینی در نظر گرفته شده است که در این تحقیق به‌صورت احتمال‌اندیشانه بررسی می‌شود. در حالت تعیینی خروجی برنامه شامل سه ستون است که عبارت‌اند از: شماره گره، بار آبی و دبی تخلیه گره که در یک فایل^۱ متنی چاپ می‌شود؛ اما در حالت احتمال‌اندیشانه به دلیل کاهش حجم پرونده خروجی دبی تراوش ورودی و خروجی برای هر گام تکرار ایجاد و مقدار دبی به تعداد تکرارها منتشر می‌شود.

در روش‌های احتمال‌اندیشانه مبتنی بر روش محاسباتی مونت کارلو، تعداد تکرار شبیه‌سازی دارای اهمیت است که

^۱ File

است. در مش بندی اجزای محدود تحقیق، همه مدل‌ها دارای المان‌های چهارگره‌ای هستند که برای شرایط مرزی بالادست از نقاط پتانسیل گرهی ثابت به اندازه ارتفاع سطح مخزن استفاده و سطح آب پایین دست نیز متناسب با ارتفاع آب با گره‌هایی ثابت در نظر گرفته شد.

بر اساس میانگین (دینامیک) نتایج حاصل از تحلیل‌ها و برای سطح مشخصی از خطای مورد قبول انتخاب می‌شود. در همه تحلیل‌ها در این تحقیق تعداد تکرارها ۲۰۰۰ است که سطح خطای مورد نظر را ارضا می‌کند. مدل پایه برای شبیه‌سازی یک سد خاکی با ابعاد شکل (۷) است و جنس مصالح آن از نوع شنی رسی (SC)



شکل ۷- شرایط مرزی سد خاکی در مدل عددی اولیه.

برای مقایسه خروجی مدل‌های احتمالاتی از انحراف معیار و واریانس نتایج صرف نظر شده و میانگین دبی تراوش لحاظ می‌شود. در واقع و فقط میانگین دبی به دست آمده از تحلیل احتمالاتی مورد نظر است و بر همین مبنا سطوح آب مخزن و پایین دست تغییر یافته تا در حالت احتمال اندیشانه حساسیت کد فرترن به تغییرات شرایط مخزن و پایین دست بررسی شود. نتایج حاکی از این است که با افزایش نسبت H_d/H_{up} مقدار میانگین دبی نشت خروجی کاهش پیدا می‌کند اما این تغییر در همه شرایط نزولی نیست، در واقع در حدفاصل بین نسبت ۰/۰۹ و ۰/۱۴ از ارتفاع سد ملاحظه می‌شود که با افزایش H_d/H_{up} میانگین نشت حالت افزایشی دارد که بیانگر این است که رفتار تابع غیرخطی است. در سه سطح هدایت هیدرولیکی ۰/۳۳۳، ۰/۳۴۹ و ۰/۳۶۷ ($\times 10^{-6}$) تابع نشت رفتار تقریباً یکسانی دارد.

به طور کلی، با افزایش نسبت ارتفاع آب پایین دست به مخزن، تابع توزیع تجمعی تراوش به جهت چپ تمایل پیدا می‌کند و در واقع فراوانی در مقادیر پایین نشت، فراوانی بیشتری نشان می‌دهد. نتایج بررسی تابع توزیع فراوانی برای H_d/H_{up} نشانگر این است که هر چه ارتفاع آب پایین دست (H_d) بیشتر باشد و یا H_{up} کم باشد، بازه

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل خروجی مدل سازی تعیینی

ابتدا برنامه نوشته شده در زبان فرترن را با فرض ثابت بودن مقادیر نفوذپذیری مصالح اجرا و نتایج به صورت دو جریان نشت ورودی و خروجی بیان می‌شود (در حالت تعیینی این دو مقدار معادل هم هستند). بعد از انجام تحلیل تراوش فشار آب منفذی حاصل با استفاده از برنامه تک پلات ۳۶۰^۱ به کانتور تبدیل می‌شود. کانتور فشار منفذی سیال برای حالت تمام مدل سازی در حالت تعیینی برای سه حالت سطح آب بالادست ۲۱، ۲۲ و ۲۳ متر و پایین دست ۴، ۳ و ۲ متر در شکل (۸) ترسیم شده است. به طور کلی تأثیر مؤلفه افقی نفوذپذیری (K_x) از مؤلفه قائم آن (K_y) بر دبی نشت بیشتر است.

۳-۲- تحلیل خروجی مدل سازی احتمال اندیشانه

بالعکس حالت تعیینی که هدایت هیدرولیکی ثابت فرض می‌شد، در مدل احتمال اندیشانه و روش مونت کارلو به جای ثابت بودن ضریب هدایت هیدرولیکی، میانگین و انحراف معیار آن در محاسبات وارد می‌شود. به طوری که در شروع مدل سازی، سد به صورت همگن در نظر گرفته و کد توسعه داده شده در حالت احتمال اندیشانه اجرا گردید.

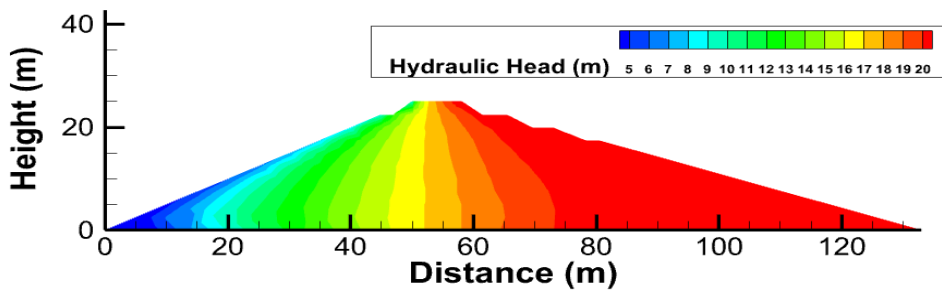
¹ Tecplot 360

قرارگیری دبی در نمودار توزیع فراوانی محدودتر می‌شود و قاعده تابع PDF عرض کمتری خواهد داشت.

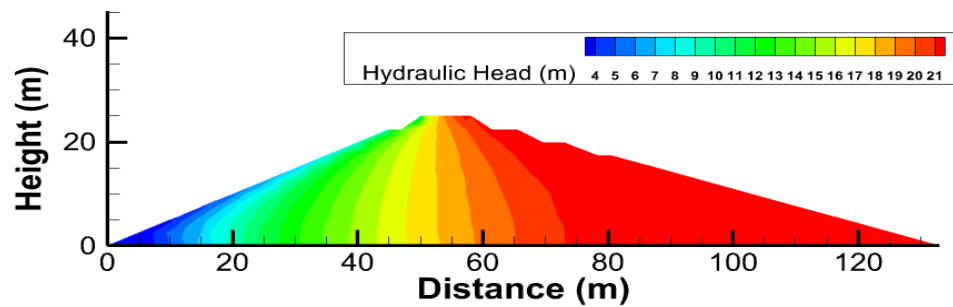
تابع توزیع فراوانی مستخرج برای شرایط تغییرپذیری (K) به صورت شکل (۹) است که خروجی مدل‌سازی احتمال‌اندیشانه مونت‌کارلو می‌باشد. در حقیقت برای هدایت هیدرولیکی به‌جای مقادیر ثابت و یکسان، در هر

تکرار مقادیر متغیری در نظر گرفته شده است. اگر فقط میانگین تراوش (قسمت میانی قاعده تابع PDF) مدنظر قرار داده شود، با افزایش نسبت ضریب هدایت هیدرولیکی افقی به قائم رفتار تابع میانگین نشت بین ۰/۷۱ و ۱ به صورت نزولی و در بازه ۱ و ۱/۴۱ به حالت صعودی است.

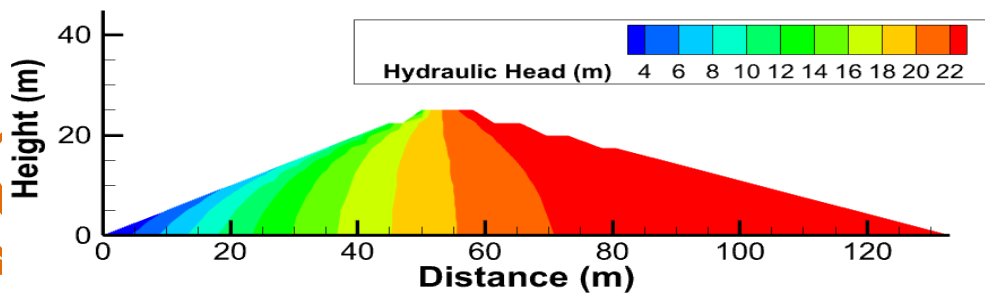
Hd= 4 m,
Hu=21 m



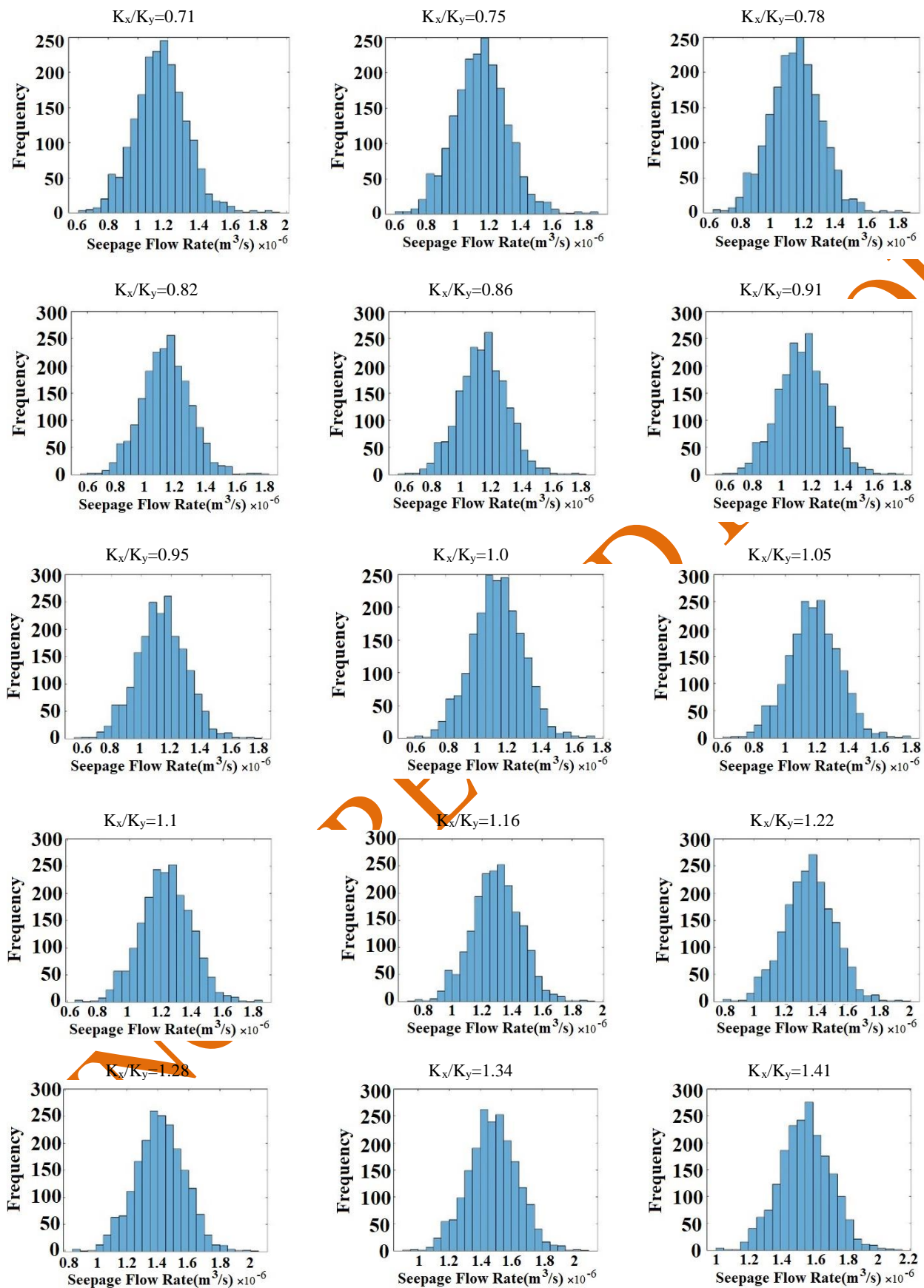
Hd= 3 m,
Hu=22 m



Hd= 2 m,
Hu=23 m



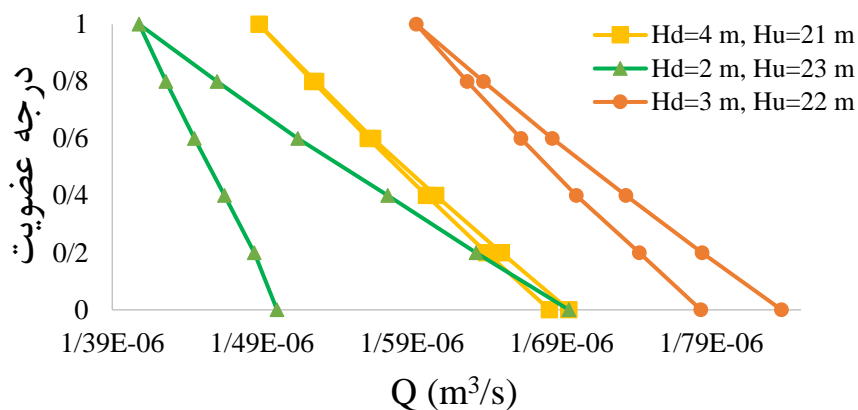
شکل ۸- کانتور فشار آب منفذی برای سد خاکی در تحلیل تعینی.



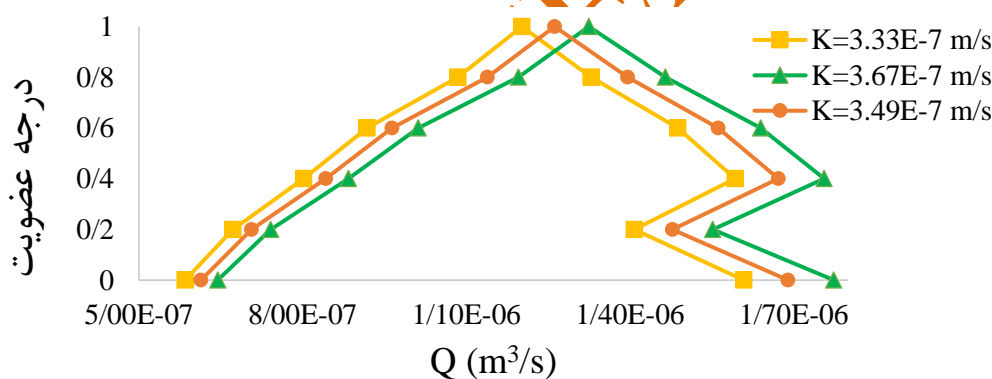
شکل ۹- تابع توزیع فراوانی (PDF) به ازای تغییرات نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی (K_x/K_y).

دبی نشت نیاز بود که علاوه بر مشخصات مصالح سد و به‌طور مشخص هدایت هیدرولیکی، تأثیر هندسه سد و سطح آب بالا و پایین‌دست نیز لحاظ شود. بر همین روی متغیرهای فازی چهارگانه جهت ارائه دید چندجانبه بر عدم قطعیت حاکم بر سد خاکی استفاده شدند.

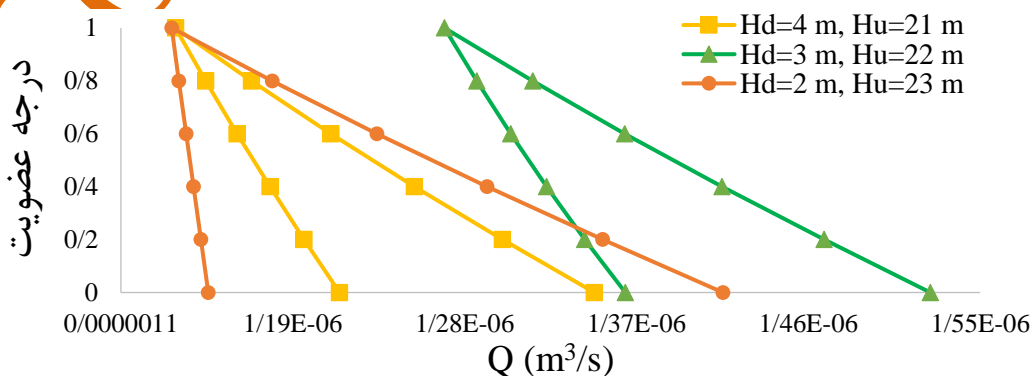
در این مرحله که روش شبیه‌سازی مونت کارلو منتج به استخراج توابع توزیع فراوانی برای دبی تراوش (شکل ۹) می‌شود، روش فازی بر روی داده‌های حاصل اجرا می‌گردد. در توابع توزیع فراوانی مقدار هدایت هیدرولیکی به‌عنوان متغیر احتمالاتی فرض شده بود ولی در تحلیل فازی به‌جای یک متغیر از چهار متغیر غیرقطعی استفاده می‌شود. برای به دست آوردن تأثیر عدم قطعیت بر روی



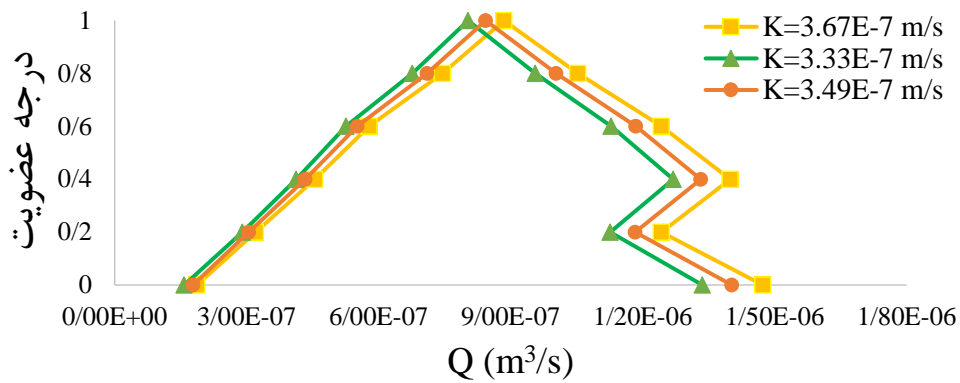
شکل ۱۰- توابع عضویت فازی دبی در حالت تعیینی-فازی برای نسبت هدایت هیدرولیکی متفاوت (K_x/K_y).



شکل ۱۱- توابع عضویت فازی دبی در حالت تعیینی-فازی برای نسبت سطح آب متفاوت (H_d/H_u).



شکل ۱۲- توابع عضویت فازی دبی در حالت احتمال اندیشه‌فازی برای نسبت هدایت هیدرولیکی متفاوت (K_x/K_y).

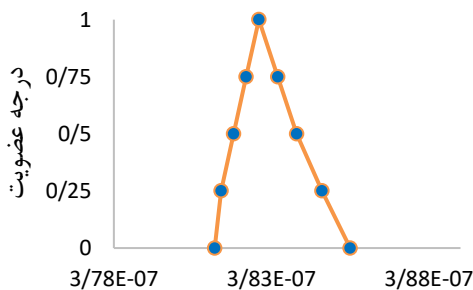


شکل ۱۳- توابع عضویت فازی دبی در حالت احتمال اندیشه-فازی برای نسبت سطح آب متفاوت (H_d/H_u).

نشان داده شده است تغییر فازی متغیر B_d/B موجب ایجاد توابع عضویت مثلثی بر روی دبی نشت فازی می شود و همچنین بررسی ها حاکی از این است که عدم قطعیت در متغیر B_d/B_u نسبت به B_d/B مقادیر بالاتری دارد و در واقع گزینه های محتمل (حالات ممکن) بیشتری برای متغیر B_d/B_u وجود دارد. خروجی فازی با تکیه بر داده های احتمالاتی (فاز اول) به صورت شکل ۱۴ خواهد بود و همانند حالت تعیینی قاعده مثلث تابع عضویت دبی در بررسی متغیر B_d/B_u نسبت به متغیر دیگر بیشتر هست و این نتیجه مشابه حالت تعیینی است. به طور کلی می توان گفت که توابع عضویت فازی مثلثی در بررسی دو متغیر هندسی B_d/B و B_d/B_u منجر به تولید خروجی مثلثی شکل برای توابع عضویت دبی نشت دو حالت تعیینی-فازی و احتمالاتی-فازی می شود.

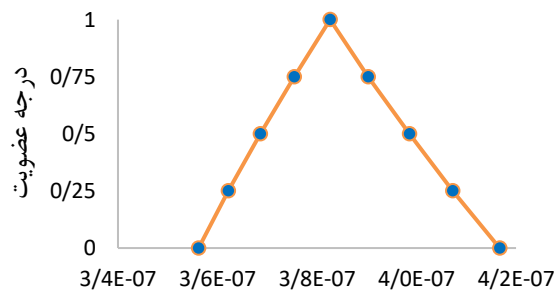
جهت تحلیل فازی هندسه سد لازم بود که از داده های ورودی هندسی به عنوان متغیرهای فازی استفاده شود که در مرحله اول تحقیق این متغیرها به صورت تعیینی در نظر گرفته شده بودند که بالعکس در فاز دوم، توابع عضویتی برای این متغیرها در نظر گرفته شد. در تحقیق حاضر به طور مشخص دو متغیر مؤثر بر روی دبی تراوش در نظر گرفته شدند که عبارتند از نسبت فاصله تاج از پاشنه عرض قاعده سد (B_d/B) و نسبت فاصله تاج از نوک به فاصله تاج از پاشنه (B_d/B_u). این دو متغیر به دلیل اینکه فاکتورهای تعیین کننده بر شیب بالادست و پایین دست سد خاکی هستند به همین جهت تحلیل تراوش بر آنها تأکید شده است.

برای مقایسه دو خروجی فازی مبتنی بر حالت تعیینی و احتمالاتی داده های حاصل از مرحله برای این دو حالت به صورت مجزا بررسی شدند. همان طور که در شکل ۱۳



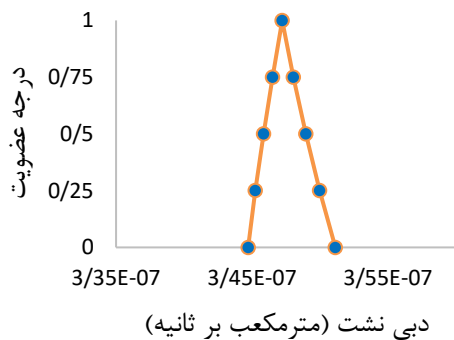
دبی نشت (مترمکعب بر ثانیه)

Bu/B - تعیینی - فازی

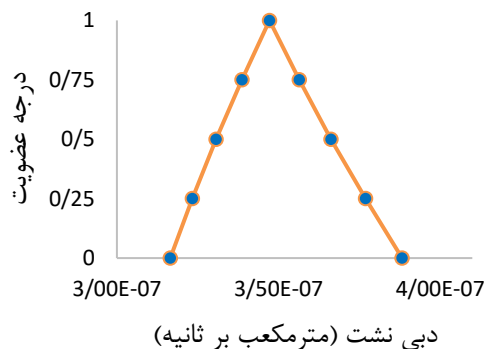


دبی نشت (مترمکعب بر ثانیه)

Bd/Bu - تعیینی - فازی



Bu/Bu احتمال اندیشانه-فازی



Bd/Bu احتمال اندیشانه-فازی

شکل ۱۴- نتایج تحلیل اجزای محدود فازی با در نظر گرفتن متغیرهای تعیینی مرحله اول و فازی مرحله دوم (فازی-تعیینی) و نتایج تحلیل اجزای محدود فازی با در نظر گرفتن متغیرهای احتمال اندیشانه فاز اول و فازی مرحله دوم (احتمالاتی-فازی).

۴- نتیجه گیری

روش اجزای محدود فازی یک روش بهینه در مهندسی ژئوتکنیک است که به مهندسان امکان می‌دهد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و عدم دقت در داده‌ها، به تحلیل دقیق تری از سازه‌ها و خاک‌ها بپردازند. با استفاده از این روش، می‌توان به طراحی بهینه‌تر سازه‌های خاکی، تحلیل پایداری خاک‌ها و مدل‌سازی رفتار خاک‌ها پرداخت. در این تحقیق اندرکنش خاک و سیال در سد خاکی با اجزای محدود تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. خاک به‌عنوان متخلخل و ناهمسان دارای عدم قطعیت‌های زیادی است و برای بررسی آن نیاز به استفاده از متغیرهای غیرقطعی در ورودی مدل است. هدف تحقیق برآورد رابطه‌ای برای محاسبه مقدار تراوش عبوری از بدنه سد خاکی با در نظر گرفتن مؤلفه‌های غیرتعیینی است که به این منظور برنامه‌ای در زبان فرترن بر مبنای قانون داری و با روش اجزای محدود احتمال‌اندیشانه توسعه داده شده است. در قسمت اول تحقیق با استفاده از برنامه توسعه داده شده، حرکت سیال در سازه برای دخیل کردن متغیرهای غیرقطعی با روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفت و سپس در مرحله بعدی با کمک اجزای محدود فازی نتایج مرحله اول استفاده گردید. پس از آنکه مقادیر تراوش منتج از ۲۰۰۰ تکرار در شبیه‌سازی مونت کارلو به دست آمدند، محاسبه تابع توزیع فراوانی (PDF) و تابع

تحلیل اجزای محدود فازی در تحقیق حاضر برای مشخصات مصالح و سطح آب و هندسه سد خاکی انجام شد و از داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو که در فاز اول تحقیق انجام شده بود برای به دست آوردن نتایج فازی استفاده شد. در فاز اول که تحقیق هدایت هیدرولیکی خاک به‌صورت احتمالاتی بررسی شده بود، در فاز دوم نیز به‌عنوان متغیر فازی لحاظ شد و در کنار این مؤلفه فازی از سه متغیر دیگر استفاده گردید و نتایج دبی تراوش برای تغییرات ۴ متغیر فازی رسم شد. نتایج حاکی از این است که در بررسی هدایت هیدرولیکی، نمودار نهایی فازی به‌صورت مثلثی خواهد بود و رأس هرم به‌عنوان پاسخ تعیینی در نظر گرفته می‌شود و همچنین بررسی سطح آب فازی نشان می‌دهد که نمودار نهایی تابع عضویت حالت مثلثی بوده و تغییرات آن متفاوت از تغییرات فازی هدایت هیدرولیکی است. در بررسی هندسه نیز که از دو متغیر استفاده شد که نتایج نهایی مشابه هدایت هیدرولیکی و سطح آب است و در واقع در این نمودارها امکان مقایسه حالت قطعی کامل و عدم قطعیت کامل قابل مشاهده است به‌طوری‌که اگر مقادیر قاعده هرم مثلث را به‌عنوان فازی کامل در نظر بگیریم این مقدار با مقادیر فازهای ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ (بیشینه و کمینه) قابل قیاس است.

تعیینی-فازی و مونت کارلو-فازی می‌شود و افزایش هر دو متغیر هندسی مذکور موجب افزایش دبی نشت (فازی) می‌گردد. برای تحقیقاتی آتی پیشنهاد می‌شود که از روش اجزای محدود فازی برای تحلیل نشت سدهای خاکی با در نظر گرفتن تأثیر تخلیه سریع مخزن بر روی پایداری شیب سد استفاده شود و همچنین اثر عدم قطعیت در چگالی و ضریب هدایت هیدرولیکی هسته رسی بر روی نشت نیز در نظر گرفته شود.

توزیع تجمعی (CDF) برای هر زیرمدل انجام گرفت و داده‌های حاصل با روش اجزای محدود فازی مورد تحلیل قرار گرفت. طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد تابع عضویت فازی برای تغییرات نسبت هدایت هیدرولیکی K_x/K_y دارای رفتار مثلثی غیرممتقارن متمایل به چپ است و همچنین توابع عضویت فازی مثلثی برای ورودی دو متغیر هندسی B_d/B_u و B_d/B منجر به تولید خروجی مثلثی شکل برای توابع عضویت دبی نشت در هر دو مدل

۳. مراجع

مکان‌یابی توسعه شهری در استان تهران). پژوهش‌های محیط زیست، ۱۳۹۵؛ ۷(۱۴): ۲۰۳-۲۱۴.

[۷]. دهقان، مهناز، دهقان منشادی، مجتبی، داوری، علیرضا. یک روش جدید در بررسی عدم قطعیت خطای عددی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر اساس پالایش شبکه. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۱۳۹۸؛ ۵۱(۶): ۱۳۸۱-۱۳۹۴. doi: 10.22060/mej.2018.13246.5581

[۸]. کوهساری، حمید، نجفی، امیر، علی‌الهی، حمید، آدم پیرا، محمد. بررسی عوامل مؤثر بر عملیات تراکم دینامیکی در خاک‌های دانه ای مبتنی بر روش فازی. مدل سازی در مهندسی، ۱۳۹۴؛ ۱۳(۴۳): ۱۴۳-۱۵۸. doi: 10.22075/jme.2017.1746

[۹]. طالبی علی، زاهدی احسان. تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی با استفاده از تئوری منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز درونگر درگز). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۳۹۴؛ ۹(۳۰): ۴۱-۵۰.

[10]. Mouyеaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P., & Bacconnet, C. Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. Computers and Geotechnics. 2018. 101: 34-47.

[11]. LIU, Kang; VARDON, Philip J.; HICKS, Michael A. Probabilistic analysis of seepage for internal stability of earth embankments. Environmental Geotechnics. 2018. 6.5: 294-306.

[12]. Al-Nedawi, N. M. Finite element analysis of seepage for Hemrin earth dam using Geo-Studio

[۱]. شریعتمدار، هاشم، شریعتمدار، هاشم، میرحاج، عادل. مدل سازی اندرکنش برج آبگیر- مخزن- پی تحت اثر زلزله. مدل سازی در مهندسی، ۱۳۸۸؛ ۳(۳).

[۲]. شیخ خوزانی، زهره، حسینی، خسرو، رحیمیان، مهدی. مدل‌سازی بهره برداری از مخازن چندمنظوره به روش پویایی سیستم. مدل سازی در مهندسی، ۱۳۸۹؛ ۸(۲۱): ۵۷-۶۵. doi: 10.22075/jme.2017.1560۶۵

[۳]. خوان، کرامت، عباسی، نادر، خیری قوجه بیگلو، میلاد، احمدپری، هدیه. بررسی راندمان انتقال و مشکلات بهره‌برداری کانال‌های پیش‌ساخته بتنی در شبکه آبیاری مغان. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۴۰۰؛ ۲۲(۸۳): ۲۱-۲۲. doi: 10.22092/idser.2021.354260.1470۴۲

[4]. Giglou, K. A., Biglou, M. K. G., Mehrparvar, B., & Naghadeh, A. S. INVESTIGATING AMOUNT OF LEAKAGE, SEDIMENT AND DURABILITY IN GEOSYNTHETIC COVER OF PUMPING CHANNEL 3 AT IRRIGATION NETWORK OF MOGHAN. Revista Geoaraguaia. 2019. 9.2.

[۵]. سلیمی راد، حلیمه، دهواری، عبدالحمید، گلوی، هادی، ابراهیمیان، محبوبه. شناسایی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای حساس مدل SWAT در برآورد رواناب حوضه کارده. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۹۹؛ ۱۶(۳): ۲۱۲-۲۲۱.

[۶]. سلمان ماهینی، عبدالرسول، رضا سلطانی، صبا، منوری، سید مسعود. کاربرد تحلیل حساسیت و تکثیر خطا در تصمیم‌گیری‌های فضایی چند معیاری (مطالعه موردی:

conditional random fields of soil parameters. *Computers and Geotechnics*, 2023, 159: 105437.

[21]. SHIRAGO, Kelifa; DIRATE, Democracy; KASAHUN, Demoze. Analysis of Overall Reliability of Embankment Dam for Steady-State Seepage. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2023, 41.3: 1703-1713.

[22]. Smith, L. & Griffiths, D. Programming the finite element method. John Wiley & Sons, 2004.

[23]. RAO, MV Rama; REDDY, R. Ramesh. Analysis of a cable-stayed bridge with uncertainties in Young's modulus and load-A fuzzy finite element approach. *Structural Engineering and Mechanics*, 2007, 27.3: 263-276.

[24]. KALATEH, Farhoud; HOSSEINEJAD, Farideh; KHEIRY, Milad. UNCERTAINTY QUANTIFICATION IN THE ANALYSIS OF LIQUEFIED SOIL RESPONSE THROUGH FUZZY FINITE ELEMENT METHOD. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2022, 19.3.

[25]. Fishman, G. S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. 1996. Springer Science & Business Media.

[26]. Kouhpeyma, A., Kilanehei, F., Hassanlourad, M., & Ziaie-Moayed, R. Numerical and experimental modelling of seepage in homogeneous earth dam with combined drain. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 1-11.

[27]. وفائیان، محمود. سد های خاکی و سنگریز. ۱۳۹۴. انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ایران.

software. *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2020, 66-76.

[13]. Ahmed, S.A., Revil, A., Bolève, A., Steck, B., Vergnault, C., Courivaud, J. R., Abbas, M. Determination of the permeability of seepage flow paths in dams from self-potential measurements. *Engineering Geology*, 2020, 268: 105514.

doi: doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105514.
[۱۴] حسین نژاد؛ فریده، کلاته؛ فرهود. بکارگیری المان محدود فازی در تحلیل دینامیکی همبسته محیط های متخلخل اشباع. مهندسی عمران مدرس، ۲۰۱۷، ۱۷.۵: ۱۹۳-۲۰۶.

[۱۵] حسین نژاد، فریده، کلاته، فرهود. فرم فازی تحلیل همبسته محیط های متخلخل خاکی در شرایط جریان غیرخطی سیال منفذی تحت بارهای دینامیکی به روش المان محدود. ۱۳۹۸. رساله دکتری، دانشگاه تبریز، ایران.

[16]. Fukumoto, Y., Yang, H., Hosoyamada, T., & Ohtsuka, S. 2-D coupled fluid-particle numerical analysis of seepage failure of saturated granular soils round an embedded set pile with no macroscopic assumptions. *Computers and Geotechnics*. 2021. 136: 104234.

[17]. JOHARI, A.; HEYDARI, A.; TALEBI, A. Prediction of discharge flow rate beneath sheet piles using scaled boundary finite element made database. *Scientia Iranica*. 2021. 28.2: 645-655.

[18]. BEIRANVAND, Behrang; RAJAEI, Taher. Application of artificial intelligence-based single and hybrid models in predicting seepage and pore water pressure of dams: A state-of-the-art review. *Advances in Engineering Software*, 2022, 173: 103268.

[19]. KALATEH, Farhoud; KHEIRY, Milad. A Review of Stochastic Analysis of the Seepage Through Earth Dams with a Focus on the Application of Monte Carlo Simulation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 1-26.

[20]. FENG, Wenquan; CHI, Shichun; JIA, Yufeng. Random finite element analysis of a clay-core-wall rockfill dam considering three-dimensional

Application of Monte Carlo simulation (MCS) and Fuzzy Finite Element (FFEM) for Investigating the Uncertainty of Seepage in Homogeneous Earth dams

ABSTRACT

In the analysis of saturated and semi-saturated soil media, the use of the finite element method results in more realistic analyses than deterministic methods due to the random nature of porous media properties. The purpose of this research is to investigate the impact of uncertainty in the prediction of seepage flow through earth dams using the Fuzzy Monte Carlo Simulation (FMCS) new hybrid algorithm, which is implemented with the help of the finite element method and monte carlo simulation. In this study, a computer program was used for Finite Element Analysis (FEA), which was definitively checked after validation with experimental results. Monte Carlo iteration loops were then used for probabilistic mode. The Fuzzy Finite Element Method (FFEM) was executed assuming the probability of the soil for four variables: soil permeability (K_x/K_y), water height ratio (H_d/H_u), horizontal width of downstream slope ratio to base width (B_d/B), and horizontal width of downstream slope ratio to horizontal upstream width (B_d/B_u). The results of this research show that the fuzzy membership function is linear-symmetric for K_x/K_y variables and linear-asymmetric for two geometric variables, B_d/B and B_d/B_u . Additionally, the membership function was extracted for H_d/H_u .

ARTICLE INFO

Keywords:

Porous Medium, Galerkin Finite Element Method (GFEM), Simulation Model, Soil Hydraulic Conductivity, FORTRAN.
