

# استخراج توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان پایداری با استفاده از روش‌های LHS و GLUE (مطالعه‌ی موردی: سد پارسیان)

احمد شرافتی\* (استادیار)

رویا کلاچیان (دانشجوی دکتری)

مریم نیری (دانشجوی دکتری)

مونا نعمتی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)  
دوره ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۳۵-۴۲

تحلیل پایداری، یکی از مباحث مهم در طراحی سد خاکی محسوب می‌شود و همواره با عدم قطعیت مواجه است. تئوری احتمال و تحلیل‌های اعتمادپذیری، چارچوبی منطقی برای کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت را فراهم می‌کنند. در پژوهش حاضر، با استفاده از روش‌های LHS و GLUE، ضریب اطمینان پایداری سد سنگریزه‌یی پارسیان با در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیرهای تصادفی مؤثر در آن برآورد شده است. تحلیل‌های پایداری شیروانی برای بدنه‌ی سد که از طریق مدل GEO-SLOPE انجام شده‌اند، بیان‌گر عدم تأثیر عدم قطعیت پارامترهای مکانیکی بخش زهکش، فیلتر و زهکش افقی در ضریب اطمینان پایداری است. طبق نتایج پژوهش حاضر، در محدوده‌ی ناحیه‌ی ناپایداری، ضرایب اطمینان کمتر از ۱/۸ است، به ازاء کلیه‌ی ضرایب اطمینان، مقدار احتمال وقوع ناپایداری در روش LHS بیشتر از روش GLUE است. به عبارت دیگر، روش LHS در ارائه‌ی ریسک شکست سد پارسیان محافظه‌کارانه‌تر است. همچنین شاخص اعتمادپذیری ضریب اطمینان با روش‌های LHS و GLUE به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۱/۳۶ برآورد شده است. از این رو اعتمادپذیری ضریب اطمینان پایداری به دست آمده از روش GLUE نسبت به روش LHS بیشتر است. همچنین متوسط ضریب اطمینان در روش‌های LHS و GLUE تقریباً برابر ۱/۱۲ است که بسیار نزدیک به حد مجاز ضریب اطمینان پایداری سد پارسیان (۱/۱۵) است.

asharafati@srbiau.ac.ir  
roya.kolachian@yahoo.com  
maryam.nayyeri.2014@gmail.com  
nematimona@gmail.com

واژگان کلیدی: ریسک، پایداری، عدم قطعیت، سد پارسیان.

## ۱. مقدمه

شواهد تاریخی نشان می‌دهند که سدهای خاکی از اولین روزهای تمدن جهت ذخیره‌ی آب استفاده شده‌اند.<sup>[۱]</sup> اهمیت طراحی سدهای خاکی به دلیل شکست سد و خطرات بالقوه‌ی آن برای جمعیت ساکن در پایین‌دست، حائز اهمیت است.<sup>[۲]</sup> لذا پایداری سدها و شیب‌های خاکی از موارد مهم برای مهندسان ژئوتکنیک در زمینه‌ی کنترل لغزش و شکست سدهای خاکی هستند. تحلیل پایداری شیب به عنوان یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک، همواره با عدم قطعیت مواجه بوده است. از عوامل وجود عدم قطعیت‌های مذکور می‌توان به این موارد اشاره کرد:

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۹/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۷/۱۶، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۱۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1330

الف) عدم قطعیت مرتبط با تصادفی بودن فرایندهای طبیعی، مانند تغییرپذیری طبیعی ویژگی‌های خاک؛

ب) عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی که می‌تواند ناشی از عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی، روش طراحی، و یا روابط تجربی معرف رفتار فیزیکی واقعی سیستم باشد (به عنوان مثال محاسبه‌ی ضریب اطمینان<sup>۱</sup> شیب با به کارگیری روش‌های تعادلی حدی<sup>۲</sup> قطعات)؛

ج) عدم قطعیت در پارامترهای مدل ناشی از عدم توانایی کمی‌سازی صحیح پارامترهای ورودی مدل؛

د) عدم قطعیت داده‌ها، شامل: خطاهای اندازه‌گیری، ناسازگاری و غیرهمگنی داده‌ها

و دسته‌بندی داده‌ها. با توجه به درجه‌ی این عدم قطعیت‌ها، احتمال گسیختگی شیب می‌تواند قابل توجه باشد.<sup>[۳۳]</sup>

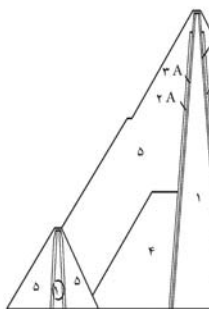
در تحلیل پایداری، ضریب اطمینان (SF) برابر نسبت نیروهای مقاوم به محرک بر روی سطح لغزش پتانسیل است و شیب خاکی فقط در صورتی ایمن است که ضریب اطمینان محاسبه شده بزرگ‌تر از ۱ باشد.<sup>[۳]</sup> تئوری احتمال و تحلیل‌های اعتمادپذیری چارچوبی منطقی برای مقابله با عدم قطعیت‌ها و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت فراهم می‌کنند.<sup>[۵]</sup> در روش‌های مذکور ضریب اطمینان بر حسب مقادیر میانگین و واریانس بیان می‌شود و تحلیل‌های عدم قطعیت در ارزیابی متغیرهای مهندسی، مانند ضریب اطمینان پایداری شیب به کار می‌رود.<sup>[۳]</sup>

در محاسبه‌ی عدم قطعیت‌های مرتبط با ضریب اطمینان، از روش‌هایی نظیر: روش گشتار دوم مرتبه‌ی اول (FOSM)، سری‌های تیلور، روش برآورد نقاط روزنبوت<sup>۲</sup> و شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود.<sup>[۵۳]</sup> به طور کلی در ارزیابی عدم قطعیت و اعتمادپذیری ضریب اطمینان پایداری شیب، ابتدا هندسه‌ی شیب و توزیع احتمال برای متغیرهای توده‌ی خاک استخراج می‌شود. سپس سطح لغزش بحرانی و ضرایب اطمینان مرتبط با آن با به‌کارگیری روش‌های تعادل حدی (نظیر روش Bishop ساده‌شده و روش Janbu ساده‌شده) مشخص می‌شود. در نهایت تحلیل‌های اعتمادپذیری انجام می‌شود.<sup>[۵]</sup>

در پژوهشی در سال ۱۹۸۲، روش مونت‌کارلو به‌عنوان ابزار تحلیل حساسیت برای پایداری شیب و نیز به‌عنوان روشی برای محاسبه‌ی احتمال گسیختگی شیب استفاده شده است.<sup>[۶]</sup> در پژوهشی در سال ۱۹۸۹ نیز آنالیز اعتمادپذیری گسیختگی صفحه‌ی شیب‌های سنگی تحت تأثیر آب بررسی و در روش‌شناسی آن (شبیه‌سازی مونت‌کارلو اصلاح‌شده)، وابستگی میان متغیرها لحاظ و برای متغیرهای موجود، توابع چگالی احتمال مختلف (علاوه بر توزیع نرمال) در نظر گرفته شد.<sup>[۴]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۰، در بررسی قابلیت اعتماد در پایداری شیب با دو روش احتمالاتی FOSM و مونت‌کارلو نتیجه گرفته شده است که روش مونت‌کارلو نیازمند زمان و حجم محاسبات کمتری در مقایسه با روش FOSM است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی در مسائل مهندسی ژئوتکنیک و تحلیل پایداری شیب به شمار رود.<sup>[۳]</sup> در سال ۲۰۰۴ نیز یک مدل عدم قطعیت در آنالیز پایداری جهت طراحی سدهای خاکی با فونداسیون‌های سخت ارائه و یک مدل احتمالاتی سه‌بعدی جهت آنالیز پایداری شیب‌ها توسعه داده شد که قابلیت محاسبه‌ی پایداری سدهای خاکی و پی آن‌ها را در مراحل ساخت و بعد از آن با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها داشت. در مدل مذکور عدم قطعیت متغیرهای مختلف و همبستگی میان پارامترهای مقاومتی و فشار آب حفره‌ی نیز لحاظ شده و نتایج نشان داده است که درجه‌ی همبستگی میان پارامترهای مقاومتی در احتمال گسیختگی شیب‌ها و عرض سطح شکست تأثیرگذار است.<sup>[۸]</sup>

همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۵ به آنالیز احتمالاتی پایداری شیب‌های سنگی و مشخصات تصادفی پارامترهای ناپیوسته پرداخته و یک روند آنالیز احتمالاتی و الگوریتم وابسته با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسعه داده شد. رویکرد پژوهش مذکور جهت آنالیز پایداری شیب‌های سنگی شامل دو بخش بود: ۱. آنالیز داده‌های ژئوتکنیکی موجود جهت به‌دست آوردن شاخص‌های احتمالاتی پارامترهای غیروابسته؛ ۲. آنالیز احتمالاتی شیب‌ها بر پایه پارامترهایی با مشخصات تصادفی. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که داشتن اطلاعات کافی و قضاوت مهندسی می‌تواند در تعیین مشخصات تصادفی پارامترهای ناپیوسته استفاده شود.<sup>[۹]</sup> در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۱ نیز در تحلیل پایداری شیب،

- ۱ هسته رسی
- ۲A فیلتر ریزدانه ماسه‌ی بالادست
- ۲B فیلتر ریزدانه ماسه‌ی پایین دست
- ۳A فیلتر ماسه‌ی درشت دانه بالادست
- ۳B فیلتر ماسه‌ی درشت دانه پایین دست
- ۳C فیلتر ماسه‌ی درشت دانه افقی
- ۴ مخلوط شن و ماسه رودخانه‌ی
- ۵ سنگریز
- ۶ سنگریز حاصل از حفاری‌های اجباری
- ۷ بتن پاشیده
- ۸ سنگریز درشت دانه



شکل ۱. مقطع طولی سد سنگریزه‌ی پاریسیان.<sup>[۱۱]</sup>

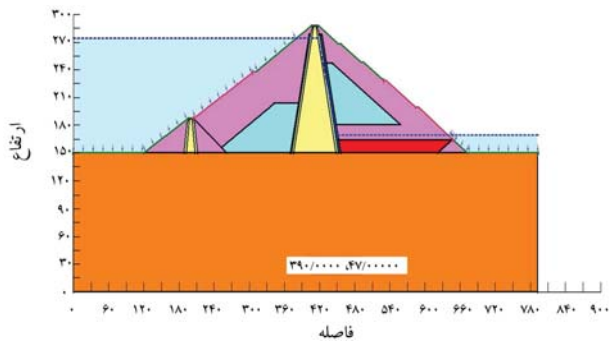
روش‌های سری‌های تیلور، روش برآورد نقاط روزنبوت، و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقایسه شدند و روش مونت‌کارلو به‌عنوان روشی سریع‌تر، قدرتمندتر، و مؤثرتر از ۲ روش دیگر معرفی شد.<sup>[۵]</sup> در پژوهش حاضر، جهت بررسی رفتار تصادفی سد خاکی پاریسیان و استخراج توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان از روش‌های LHS<sup>۴</sup> و GLUE<sup>۵</sup> استفاده شده است. روش‌های نمونه‌گیری مذکور جهت افزایش کارایی و دقت روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو بدون افزایش تعداد نمونه‌ها به کار می‌روند.

### ۱.۱. مطالعه‌ی موردی

طرح سد پاریسیان (گورک) به منظور تأمین و بهبود آبیاری و کشاورزی در منطقه‌ی نورآباد ممسنی، تأمین آب مصارف صنعتی در منطقه و تولید انرژی برقابی در محلی به فاصله‌ی ۱۳۵ کیلومتری شمال غربی شهر شیراز و در ۵۴٫۷ کیلومتری شرق شهرستان نورآباد ممسنی در حال اجراست.

سد مخزنی پاریسیان از نوع سد سنگریزه‌ی با هسته‌ی رسی است. بیشینه‌ی رقوم نرمال سطح آب ۱۴۷۰ متر از سطح دریاست که با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد ۱۴ متر رقوم تاج سد معادل ۱۴۸۴ متر از سطح دریا تعیین شده است. عرض تاج سد ۱۲ متر و طول تاج سد ۳۰۷ متر است. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۱۳۸ متر و از پایین‌ترین رقوم پی ۱۴۰ متر است.<sup>[۱۱]</sup> بدنه‌ی سد مخزنی پاریسیان، شامل این قسمت‌هاست (شکل ۱):

- هسته‌ی ناتراوای رسی،
- فیلتر ریزدانه‌ی پایین دست هسته،
- فیلتر ریزدانه‌ی بالادست،
- فیلتر فرازبند،
- زهکش مایل و لایه‌ی انتقالی بالادست،
- پوسته‌ی سنگ‌ریز،
- پوسته‌ی درهم یا سنگ‌ریز حاصل از حفاری اجباری،
- لایه‌ی سنگ‌ریز درشت،
- پوشش محافظ شیروانی بالادست.



شکل ۲. سطح لغزش شیب در مدل سد پارسیان در بارگذاری شبه‌استاتیکی مخزن پر.

پیشین روش GLUE، توزیع یکنواخت برای پارامترهای  $C'$  (ضریب چسبندگی خاک)،  $\phi'$  (زاویه اصطکاک داخلی خاک) و  $\gamma_{sat}$  (چگالی ذرات خاک در حالت اشباع) در نظر گرفته شد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، آماره‌های توزیع یکنواخت برای پارامترهای مذکور استخراج و در جدول ۱ ارائه شده است.<sup>[۱۱]</sup>

بررسی تغییرات ضریب اطمینان با به‌کارگیری تحلیل‌های متعدد بر روی مدل سد در محیط نرم‌افزار GEO-SLOPE، حاکی از عدم تأثیر پارامترهای بخش زهکش، فیلتر، و زهکش افقی در تغییرات ضریب اطمینان بوده است. لذا مقادیر پارامترهای ذکر شده در آنالیز پایداری ثابت فرض شده است. آنالیزهای پایداری شیروانی برای بدنه‌ی سد پارسیان براساس تئوری عمومی تعادل حدی و به روش قطعات انجام شده است. در فرمولاسیون مذکور، معادلات استاتیکی شامل جمع جبری نیروهای قائم جهت به‌دست آوردن نیروی نرمال در کف و نیروهای افقی در هر قطعه برای به‌دست آوردن نیروی بین قطعه‌ی استفاده شده است.

در آنالیزهای تعادل حدی برای محاسبه‌ی ضرایب اطمینان در برابر لغزش با استفاده از نرم‌افزار SOLPE/W، برنامه‌ی مذکور، کمی‌ی ضریب اطمینان پایداری برای سطوح لغزش دایره‌ی و گوه‌ی و همچنین سطوح لغزش نامنظم را به انتخاب کاربر و به روش‌های مختلفی ارائه می‌دهد، که در پژوهش حاضر از روش اسپنسر<sup>۹</sup> استفاده شده است.

مقاومت برشی خاک در کف قطعه با استفاده از فشار مؤثر خاک و معیار گسیختگی موهر - کلمب محاسبه و نیروی زلزله با معرفی ضرایب افقی و قائم و جهت اعمال آن در محاسبات منظور شده است. امکان تأثیر دادن نیروی زلزله در محاسبه‌ی مقاومت برشی خاک در کف قطعه با استفاده از فشار مؤثر خاک وجود دارد. فشار آب منفذی به شکل‌های مختلف در برنامه قابل تعریف است که در مدل موردنظر فشار آب متناظر با سطح پیرومتریک مدل شده است.

#### ۱.۲.۲. حالت بارگذاری و ضرایب اطمینان مجاز

با توجه به بررسی‌های انجام شده، بحرانی‌ترین حالت بارگذاری برای سد پارسیان که در پژوهش حاضر مدنظر قرار گرفته است، وقوع زلزله در حالتی بوده است که مخزن پر بوده است. ضریب اطمینان مجاز در بارگذاری شبه‌استاتیکی در زلزله با توجه به توصیه‌ی US Army Corps of Engineers برابر ۱٫۱۵ انتخاب شده است. در تحلیل‌های انجام شده، حالت تراوش پایدار در رقوم نرمال سد ۱۴۷۰ فرض شده و بخش پایین‌دست سد و با ضریب زلزله ۰٫۱۵، ملاک آنالیز قرار گرفته است. در شکل ۲، نمونه‌ی بارگذاری سد پارسیان و سطح لغزش شیب نشان داده شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. روش‌های احتمالاتی تحلیل عدم قطعیت

با توجه به غیرقطعی بودن بیشتر فرایندها در مهندسی عمران، تحلیل قطعی آن تقریباً غیرممکن است. عدم قطعیت‌ها می‌توانند ناشی از تصادفی بودن پارامترهای مؤثر در آن فرایندها باشند. عدم قطعیت به شرایط یا متغیرهایی نسبت داده می‌شود که به طور دقیق قابل کتی‌سازی نیستند. هر متغیر غیرقطعی به طور طبیعی ویژگی‌های تصادفی دارد و در معرض سطوح آشکاری از خطا قرار دارد.<sup>[۱۲]</sup> در پژوهش حاضر از روش‌های LHS و GLUE برای کتی‌سازی عدم قطعیت و استخراج توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان پایداری شیب استفاده شده است.

#### ۱.۱.۲. روش LHS

LHS (روش نمونه‌گیری مربع لاتین) روشی برای بهبود کارایی روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو است. در روش مذکور با افزایش کارایی در نمونه‌گیری، راندمان شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. در شرایطی که روش مونت‌کارلو با انتخاب نمونه به طور تصادفی از دامنه‌ی معتبر متغیرها، گروهی از اعداد بدون ضمانت را به کار می‌گیرد، روش نمونه‌گیری مربع لاتین رویکردی منظم را جهت اتخاذ نمونه‌ها به کار می‌برد.<sup>[۱۳]</sup> این روش با نمونه‌گیری در فواصل مساوی در فضای هر پارامتر باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت‌کارلو بدون افزایش در تعداد نمونه‌ها می‌شود.<sup>[۱۴]</sup> در روش LHS هنگام نمونه‌گیری از یک تابع  $M$  متغیر، تقسیم‌بندی محدوده‌ها با احتمال وقوع  $\frac{1}{M}$  صورت می‌گیرد که البته محدوده‌های ذکر شده با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند. برای یک توزیع احتمال مطلوب، LHS مقداری تصادفی از هر یک از محدوده‌ی متغیرها بدون تکرار استخراج می‌کند. سرعت هم‌گرایی LHS از مونت‌کارلو و همچنین دیگر نمونه‌گیری‌های طبقه‌بندی شده بیشتر است.<sup>[۱۵]</sup>

#### ۲.۱.۲. روش GLUE<sup>۶</sup>

روش GLUE در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است،<sup>[۱۷]</sup> و مبتنی بر روش مونت‌کارلو است.<sup>[۱۸]</sup> در روش GLUE، با استفاده از یک تابع چگالی احتمال پیشین<sup>۷</sup> و اطلاعات جدید (به‌عنوان مثال داده‌های مشاهداتی) تابع چگالی احتمال پسین<sup>۸</sup>، پارامترهای مدل به‌دست می‌آیند.<sup>[۱۹]</sup> از مزایای روش GLUE می‌توان به سهولت اجرا و انعطاف آن با منابع متفاوت اطلاعات و توانایی ترکیب آن با معیارهای مختلف جهت تعیین مقدار احتمال وقوع اشاره کرد.<sup>[۲۰]</sup> طبق مطالعاتی در سال ۲۰۰۱، امکان نمونه‌گیری از کلیه‌ی توابع توزیع احتمال وجود دارد، ولی بیشترین موارد نمونه‌گیری از توزیع یکنواخت ثبت شده است.<sup>[۲۱]</sup>

مراحل روش GLUE را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:<sup>[۲۲]</sup>

۱. استخراج توزیع احتمال یا محدوده‌ی محتمل برای هر متغیر تصادفی مورد بررسی،
۲. تولید مجموعه‌هایی از پارامترها با استفاده از توزیع احتمال تعریف شده و روش‌های نمونه‌گیری،
۳. مقایسه‌ی خروجی مدل با مقادیر مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده،
۴. اصلاح توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی.

### ۲.۲. آنالیز پایداری

در پژوهش حاضر، پایداری سد پارسیان در حالت مخزن پر بررسی و پارامترهای مقاومتی خاک در حالت زهکشی شده و تحکیم‌یافته (CD) در نظر گرفته شد. جهت کتی‌سازی رفتار تصادفی پارامترهای خاک در روش LHS و توزیع احتمالاتی

### ۳. نتایج

#### ۳.۱. تحلیل احتمالاتی پایداری شیب

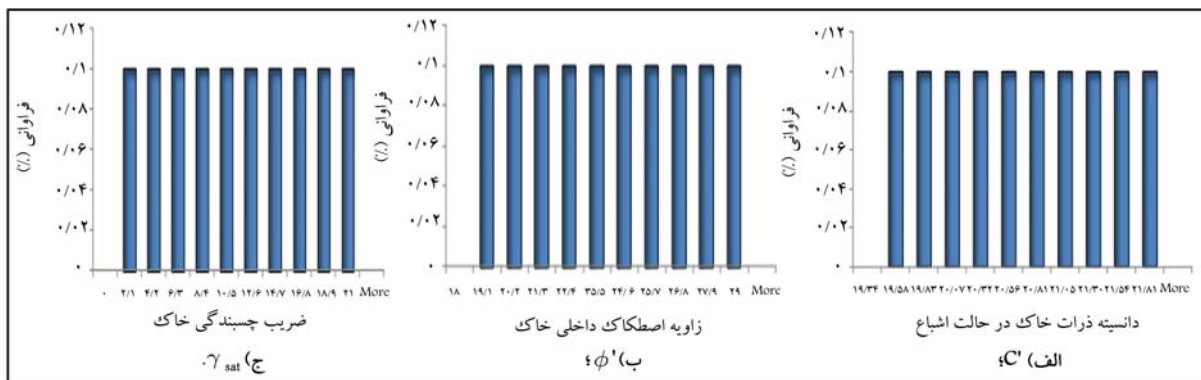
در پژوهش حاضر، جهت استخراج توزیع احتمالاتی تجربی ضریب اطمینان پایداری شیب از روش‌های LHS و GLUE استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، مجموعه‌ی شامل ۳۰۰ دسته داده با توزیع یکنواخت از پارامترهای  $C'$ ،  $\phi'$ ،  $\gamma_{sat}$  مربوط به هسته، پوسته و پی سد به روش نمونه‌گیری تصادفی LHS تولید و با به کارگیری پارامترهای تصادفی تولیدشده، مقادیر ضریب اطمینان متناظر با هر دسته با استفاده از مدل GEO SLOPE محاسبه و بررسی شد. پیشینه‌ی مطالعات در زمینه‌ی به‌کارگیری روش‌های نمونه‌گیری حاکی از تأثیر بالای اندازه‌ی نمونه در نتایج نهایی است. با وجود این، با توجه به اطلاعات اولیه‌ی موجود از نتایج آزمایشگاهی و محدوده‌ی مناسب کمینه و بیشینه‌ی هر یک از پارامترها، نمونه‌گیری به ۳۰۰ دسته محدود شده است. با روش مذکور می‌توان تأثیر قضاوت مهندسی و شناخت اولیه‌ی پارامترها را در کاهش حجم نمونه‌گیری ارزیابی کرد. توزیع احتمالاتی داده‌های تولیدشده به روش (LHS توزیع یکنواخت) با عنوان توزیع چگالی احتمال پیشین در روش GLUE معرفی و جهت محاسبه‌ی مقادیر ضریب اطمینان استفاده شده است. با قرار دادن معیار خطای MSE و حذف مقادیر با آستانه‌ی بدون بعد ۰/۱۴۳، حدود

نیمی از داده‌ها که اختلاف بیشتری با مقدار ضریب اطمینان مجاز ( $SF=1/15$ ) داشته‌اند، حذف و از مجموعه‌ی داده‌های باقی‌مانده (۱۵۸ دسته داده) جهت استخراج توابع احتمالاتی پسین در روش GLUE و تابع توزیع پسین جهت ارزیابی عدم قطعیت پارامترها استفاده شده‌اند. جهت تعیین توزیع فراوانی جدید هر پارامتر نیز از برنامه‌ی در محیط نرم‌افزار MATLAB، استفاده و با توجه به آن ۳۰۰ دسته‌ی ورودی جدید شامل مقادیر  $C'$ ،  $\phi'$  و  $\gamma_{sat}$  مربوط به هسته، پوسته و پی سد تولید شده است. سپس آنالیز پایداری شیب با استفاده از ۳۰۰ دسته پارامتر ورودی جدید و با به‌کارگیری نرم‌افزار GEO SLOPE انجام و مقادیر ضریب اطمینان جدید محاسبه شده است. در شکل‌های ۳ الی ۶، توزیع چگالی احتمال پیشین پارامترهای تولید شده به روش LHS ارائه شده است.

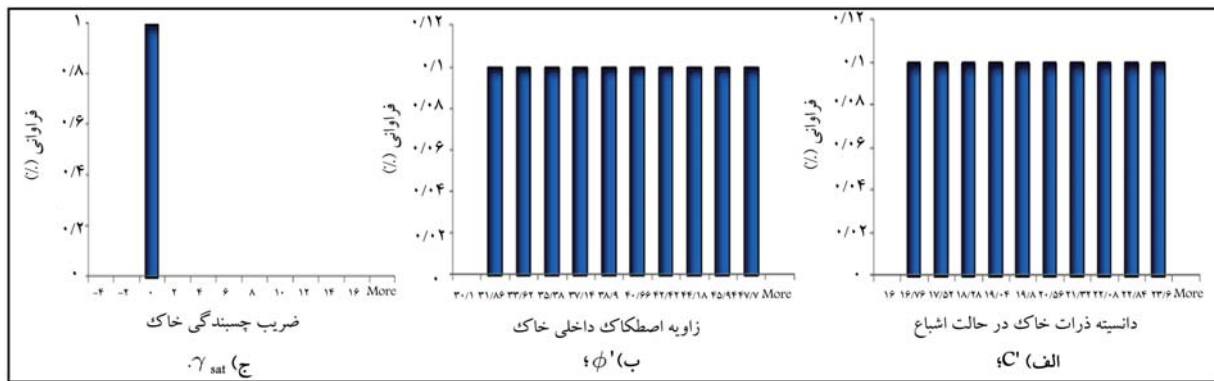
در شکل ۷، تابع توزیع احتمال مقادیر ضریب اطمینان حاصل از ۳۰۰ آنالیز پایداری انجام‌شده با به‌کارگیری پارامترهای مقاومتی تولید شده به روش LHS نشان داده شده است. جهت استخراج توابع احتمالاتی پسین در روش GLUE، از مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده به روش LHS استفاده شده است. در شکل‌های ۸ الی ۱۱، توزیع پسین پارامترهای استخراج شده به روش GLUE نشان داده شده است. مطابق شکل‌های مذکور، پس از حذف داده‌های با خطای بیشتر از آستانه، توزیع چگالی احتمال پارامترها از حالت یکنواخت

جدول ۱. آماره‌های توزیع یکنواخت پارامترهای مصالح مورد استفاده در بدنه‌ی سد پارسیان.

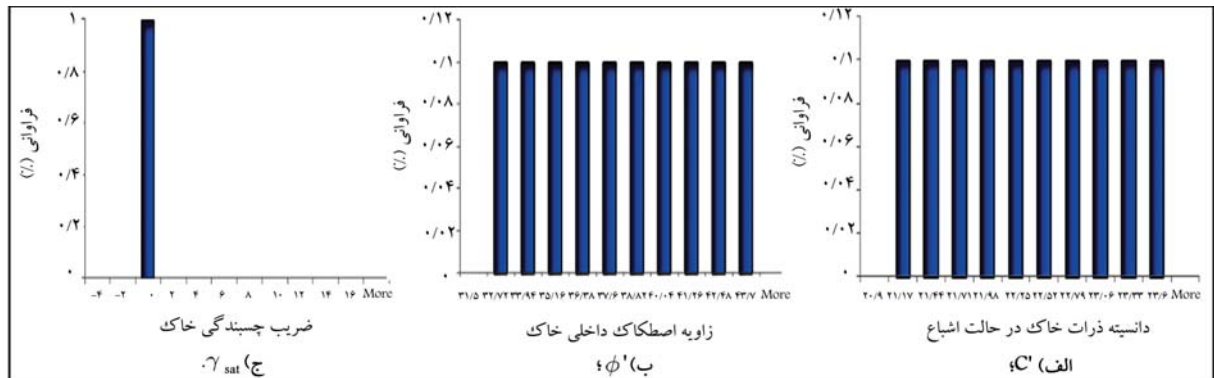
نوع مصالح	ضریب چسبندگی خاک		زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک		چگالی ذرات خاک در حالت اشباع	
	خاک	خاک	خاک	خاک	خاک	خاک
هسته	کمینه	۰	۱۸	۱۹/۳۳	کمینه	۱۹/۳۳
	بیشینه	۲۱	۲۹	۲۱/۷۹	بیشینه	۲۱/۷۹
سنگریز معدن	کمینه	۰	۳۰/۱	۱۶	کمینه	۱۶
	بیشینه	۰	۴۷/۷	۲۳/۶	بیشینه	۲۳/۶
سنگریز حفاری اجباری	کمینه	۰	۳۱/۵	۲۰/۹	کمینه	۲۰/۹
	بیشینه	۰	۴۳/۷	۲۳/۶	بیشینه	۲۳/۶
پی سنگی	کمینه	۱۴۲۵	۲۸	۲۳/۱	کمینه	۲۳/۱
	بیشینه	۱۵۷۵	۳۸	۲۶	بیشینه	۲۶



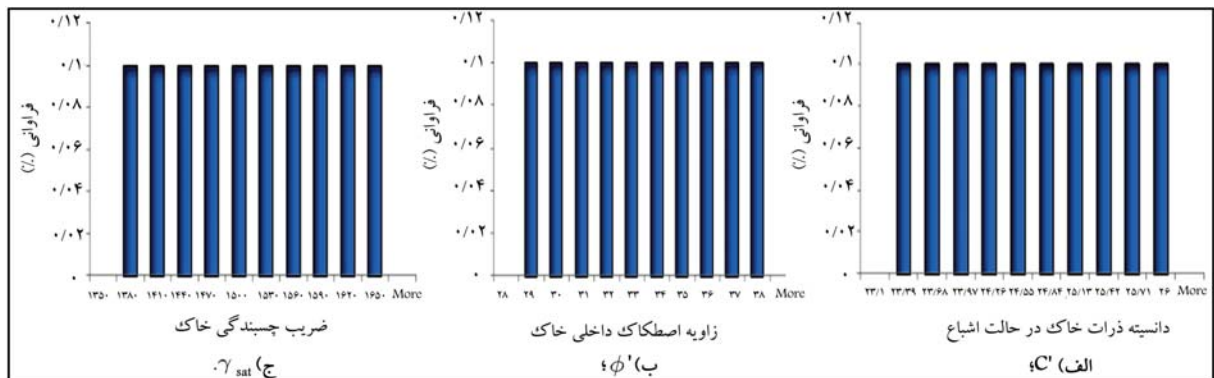
شکل ۳. توزیع چگالی احتمال پیشین پارامترهای مقاومتی هسته.



شکل ۴. توزیع چگالی احتمال بیشین پارامترهای مقاومتی سنگریز معدن.

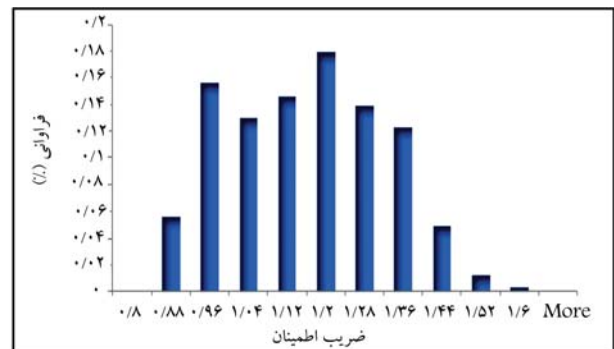


شکل ۵. توزیع چگالی احتمال بیشین پارامترهای مقاومتی سنگریز حفاری.

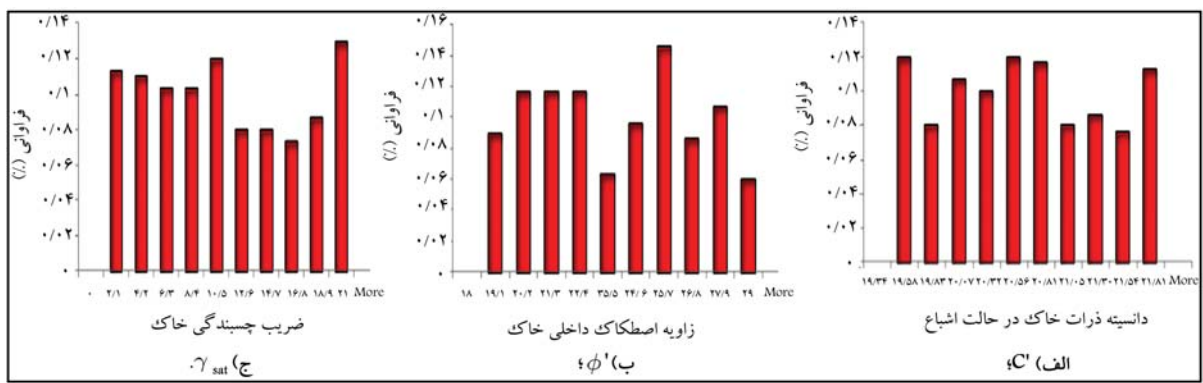


شکل ۶. توزیع چگالی احتمال بیشین پارامترهای مقاومتی پی سنگی.

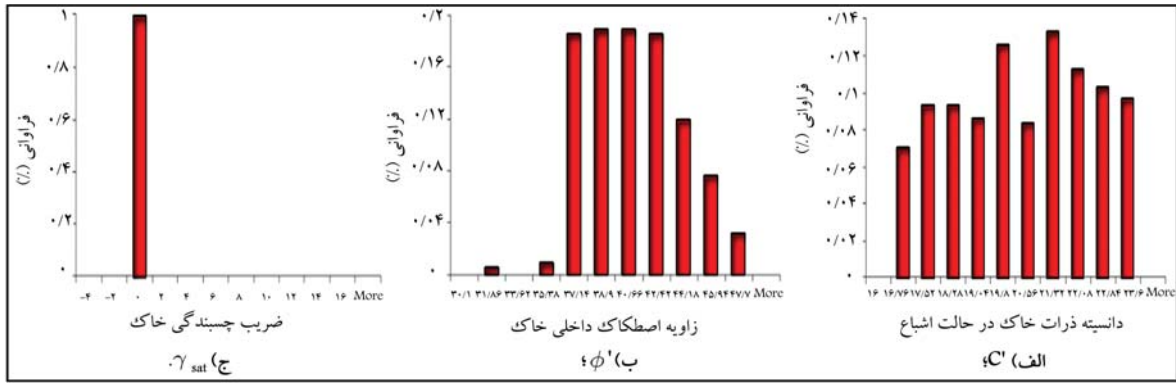
خارج شده و هر دسته از پارامترها، توزیع جدید و منحصر به فردی اختیار کرده است که در شبیه‌سازی به روش GLUE، با عنوان توزیع پسین پارامترها شناخته می‌شوند و جهت تولید ۳۰۰ داده‌ی تصادفی جدید برای هر پارامتر استفاده شده‌اند. در شکل ۱۲، تابع توزیع احتمال مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده با سری داده‌های تصادفی جدید نشان داده شده است. در جدول ۲، توزیع آماری ضرایب اطمینان پایداری سد، به دو روش LHS و GLUE نشان داده شده است که مطابق آن مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده به دو روش LHS و GLUE نزدیک به حد مجاز ضریب اطمینان پایداری سد پارسیان (۱/۱۵) هستند.



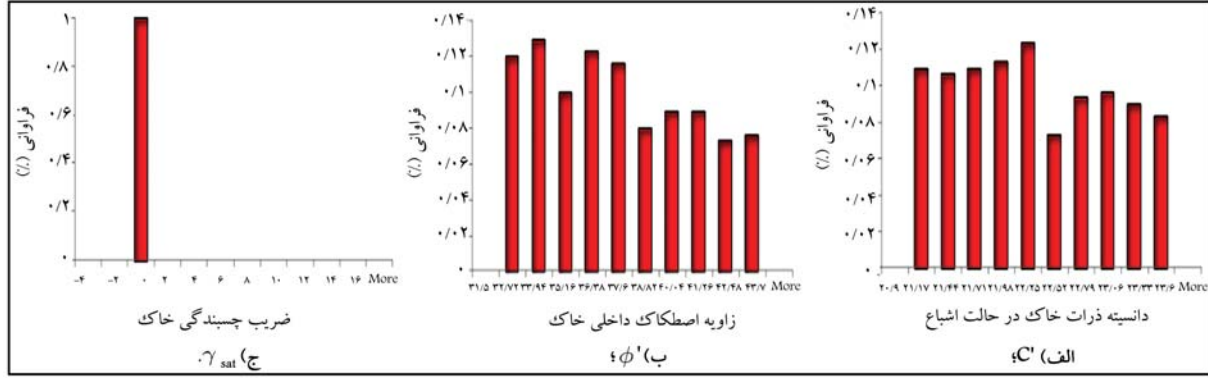
شکل ۷. تابع توزیع احتمال مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده به روش LHS.



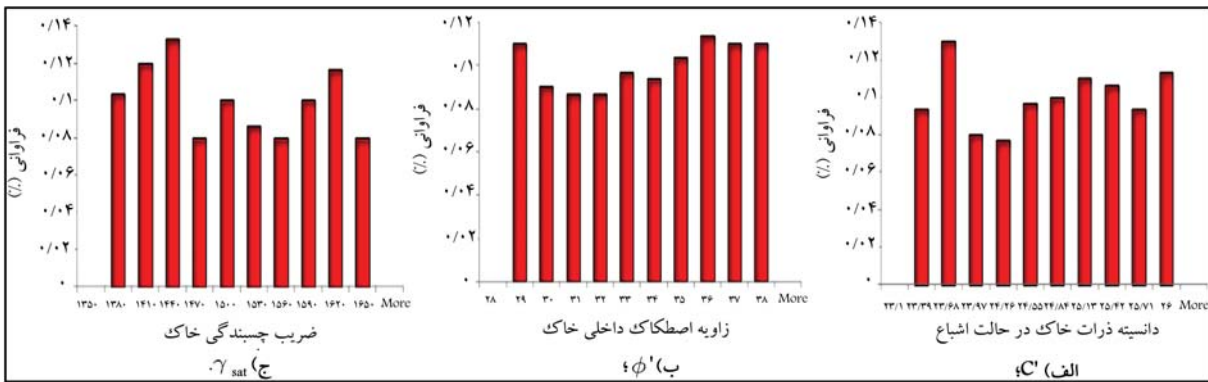
شکل ۸. توزیع چگالی احتمال پسین پارامترهای مقاومتی هسته.



شکل ۹. توزیع چگالی احتمال پسین پارامترهای مقاومتی سنگریز معدن.



شکل ۱۰. توزیع چگالی احتمال پسین پارامترهای مقاومتی سنگریز حفاری.



شکل ۱۱. توزیع چگالی احتمال پسین پارامترهای مقاومتی پی سنگی.

جدول ۲. شاخص‌های آماری روش‌های تحلیل عدم قطعیت مورد استفاده.

روش تحلیل	میانگین ضریب اطمینان	انحراف معیار	کمینه‌ی ضریب اطمینان	بیشینه‌ی ضریب اطمینان
LSH	۱٫۱۲۱۲	۰٫۱۵۹	۰٫۸۴۰	۱٫۵۲۴
GLUE	۱٫۱۲۰۴	۰٫۱۱۷	۰٫۸۴۴	۱٫۴۵۴

حدود ۶۰٪ است. برای انتخاب یکی از دو روش مذکور، جهت اعلام شاخص‌های آماری ضریب اطمینان از شاخص اعتمادپذیری ضریب اطمینان استفاده شده است.

شاخص اعتمادپذیری معمولاً جهت بیان درجه‌ی عدم قطعیت در ضریب اطمینان محاسبه شده به‌کار می‌رود و به صورت رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\beta = \frac{E(F) - 1}{\sigma(F)} \quad (1)$$

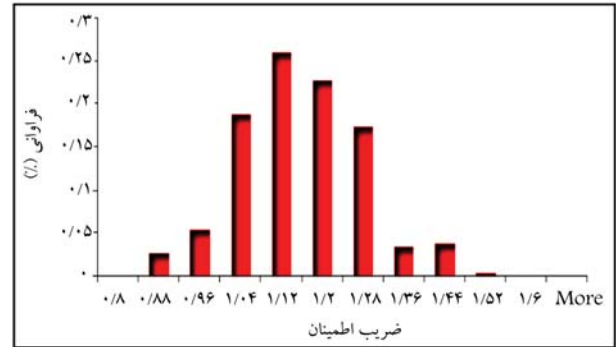
که در آن،  $\beta$  شاخص اعتمادپذیری،  $E(F)$  مقدار ضریب اطمینان مورد انتظار و  $\sigma(F)$  انحراف معیار است.<sup>[۴]</sup>

هر چه مقدار  $\beta$  بزرگ‌تر باشد، اعتمادپذیری نتایج بیشتر خواهد بود. براساس نتایج حاصل، شاخص اعتمادپذیری ضریب اطمینان در روش LHS و GLUE به ترتیب برابر ۰٫۹۳ و ۱٫۳۶ هستند. از این رو اعتمادپذیری ضریب اطمینان پایداری به‌دست‌آمده از روش GLUE نسبت به روش LHS بیشتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که متوسط ضریب اطمینان در روش‌های LHS و GLUE تقریباً برابر ۱٫۱۲ است، که بسیار نزدیک به حد مجاز ضریب اطمینان پایداری سد پارسیان (۱٫۱۵) است.

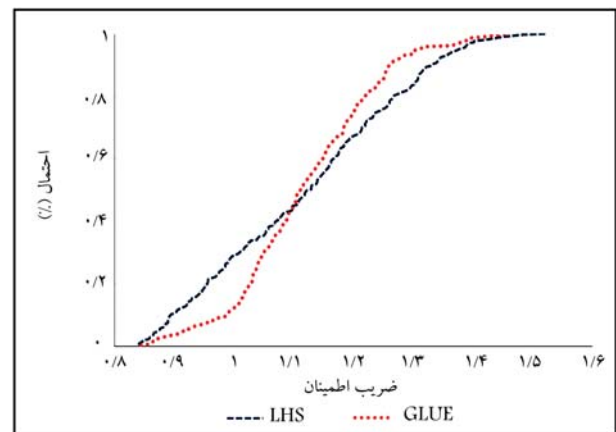
#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پایداری سد خاکی پارسیان به کمک نرم‌افزار GEO-SLOPE براساس تئوری عمومی تعادل حدی و به روش قطعات بررسی شده است. همچنین با استفاده از روش‌های LHS و GLUE، توزیع چگالی احتمال ضرایب اطمینان پایداری سد در حالت شبه‌استاتیکی مخزن پر بررسی شده است. آنالیزهای پایداری شیروانی برای بدنه‌ی سد، بیان‌گر عدم تأثیر پارامترهای بخش زهکش، فیلتر و زهکش افقی در تغییرات ضریب پایداری بوده است. همچنین، نتایج روش LHS محافظه‌کارانه‌تر برای طراحی و تصمیم‌گیرندگان است.

نتایج حاصل از مقایسه‌ی توابع چگالی احتمال پایداری سد پارسیان نشان می‌دهد که در محدوده‌ی ضرایب اطمینان کمتر از ۱٫۱ (ناحیه‌ی ناپایداری) به ازاء کلیه‌ی ضرایب اطمینان، مقدار احتمال وقوع ناپایداری در روش LHS بیشتر از روش GLUE است. به عبارت دیگر، روش LHS در ارائه‌ی ریسک شکست سد پارسیان محافظه‌کارانه‌تر است. جهت انتخاب یکی از دو روش مذکور، جهت اعلام شاخص‌های آماری ضریب اطمینان از شاخص اعتمادپذیری ضریب اطمینان استفاده شده است. با مقایسه‌ی نتایج دو روش LHS و GLUE براساس شاخص اعتمادپذیری مشخص شد که نتایج اقتباس‌شده از روش GLUE با واقعیات فیزیکی مسئله تطابق بیشتری دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که متوسط ضریب اطمینان در روش‌های LHS و GLUE تقریباً برابر ۱٫۱۲ است که بسیار نزدیک به حد مجاز ضریب اطمینان پایداری سد پارسیان (۱٫۱۵) است.



شکل ۱۲. تابع توزیع احتمال مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده به روش GLUE.



شکل ۱۳. توزیع احتمال تجمعی مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده به روش‌های LHS و GLUE.

با روش‌های LHS و GLUE مقایسه و ارائه شده است. در تفسیر شکل ۱۳ می‌توان به دو ناحیه اشاره کرد: ناحیه‌ی ۱، شامل ضرایب اطمینان کمتر از ۱٫۱ است (ناحیه‌ی گسیختگی). در ناحیه‌ی مذکور، به ازاء کلیه‌ی ضرایب اطمینان، مقدار احتمال وقوع در روش LHS بیشتر از روش GLUE است. برای مثال در ضریب اطمینان برابر ۱، احتمال وقوع در روش LHS برابر ۲۴٪ و در روش GLUE برابر ۱۲٪ است. به عبارت دیگر، روش LHS در ارائه‌ی ریسک شکست سد پارسیان محافظه‌کارانه‌تر است. در ناحیه‌ی ۲ که شامل ضرایب اطمینان بیشتر از ۱٫۱ است (ناحیه‌ی عدم گسیختگی)، به ازاء کلیه‌ی ضرایب اطمینان، مقدار احتمال وقوع در روش LHS کمتر از روش GLUE است. برای مثال در ضریب اطمینان برابر ۱٫۳، احتمال وقوع در روش LHS برابر ۸۲٪ و در روش GLUE برابر ۹۳٪ است. به عبارت دیگر، روش LHS در ارائه‌ی اعتمادپذیری سد پارسیان محافظه‌کارانه‌تر است. به طور کلی، نتایج روش LHS محافظه‌کارانه‌تر برای طراحی و تصمیم‌گیرندگان است. از طرفی ملاحظه می‌شود که در حد مجاز ضریب اطمینان (۱٫۱۵) برای بارگذاری مد نظر، احتمال وقوع دو روش بسیار به یکدیگر نزدیک و در

## پانوشتها

1. factor of safety
2. limiting equilibrium methods
3. rosenblueth point estimate method
4. latin hypercube sampling
5. general likelihood uncertainty estimation
6. generalized likelihood uncertainty estimation
7. prior probability distribution
8. posterior probability distribution
9. spencer method

## References

1. Hutchison, W.R. "Earth dam seepage analysis with a programmable calculator", Department of Hydrology and Water Recourses, The University of Arizona (1983).
2. Mansuri, B. and Salmasi, F. "Effect of horizontal drain length and cutoff wall on seepage and uplift pressure in heterogeneous earth dam with numerical simulation", *J. Civil Eng. Urban*, **3**(3), pp. 114-121 (2013).
3. Husein Malkawi, A.I., Hassan W. F. and Abdulla F.A., "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability", *Structural Safety*, **22**(2), pp. 161-187 (2000).
4. Moghadaripour, M., Askari, F. and Shafiee, A. "Application of reliability in stability analysis of an earth dam", *JSEE*, **15**(3-4), pp. 171-182 (2013).
5. Abbaszadeh, M., Shahriar, K., Sharifzadeh, M. and Heydari, M. "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability: A case study from sungun copper mine", *Geotech. Geol. Eng.*, **29**(4), pp. 581-596 (2011).
6. Tobutt, D.C. "Monte Carlo simulation methods for slope stability", *Computer & Geosciences*, **8**(2), pp. 199-208 (1982).
7. Tamimi, S., Amadei, B. and Frangopol, D. "Monte carlo simulation of rock slope realability", *Computers & Structures*, **33**(6), pp. 1495-1505 (1989).
8. Al-Homoud, A.S. and Tanash, N. "Modeling uncertainty in stability analysis for design of embankment dams on difficult foundations", *Engineering Geology*, **71**(3-4), pp. 323-342 (2004).
9. Park, H.J., West, T.R. and Woo, I.K. "Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters: Interstate highway western north Carolina", USA, *Engineering Geology*, **79**(3-4), pp. 230-250 (2005).
10. *The Second Phase of Parsian Dam*, Report of Prest Sources and Construction Materials, Iran Water & Power Resources Co. (iwpc), Ministry of Energy (2014).
11. *The Second Phase of Parsian Dam*, Report of the Dam Body Design and Instrumentation, Iran Water & Power Resources Co. (iwpc), Ministry of energy (2014).
12. Goodarzi, A., Shokri, N. and Ziayi, M. "Uncertainties and risk analysis of earth dam breach, (Case Study: Doroodzan dam in Fars province)", *IWRJ*, **7**(13), pp. 31-40 (2013).
13. Olsson, A.M.J. and Sandberg, G.E. "Latin hypercube sampling for stochastic finite element analysis", *Journal of Engineering Mechanics*, **128**(1), pp. 121-125 (2002).
14. Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., Davari, K. and Vazifedoust, M. "Calibration and uncertain analysis of SWAP model using GLUE method", *Journal of Water Research in Agriculture*, **28**(2), pp. 477-488 (1393).
15. Singh, V.P., Jain, S.K. and Tyagi, A., *Risk and Reliability Analysis: A Handbook for Civil and Environmental Engineers*, American Society of Civil Engineers, 796 p. (2007).
16. Kwon, H. and Moon, Y., *Improvement of Overtopping Risk Evaluations Using Probabilistic Concepts for Existing Dams*, Springer, 20, pp. 223-237 (2005).
17. Beven, K.J. and Binley, A.M. "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction", *Hydrological Processes*, **6**(3), pp. 279-298 (1992).
18. Spear, R.C. and Hornberger, G.M. "Eutrophication in peel inlet. II. identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis", *Water Res.*, **14**(1), pp. 43-49 (1980).
19. Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Lee, S.U. and Batchelder, R. "Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method", *Water Resour. Res.*, **44**(12), W00B06, pp. 1-17 (2008).
20. Blasone, R.S., Madsen, H. and Rosbjerg, D. "Uncertainty assessment of integrated distributed hydrological models using GLUE with Markov chain Monte Carlo sampling", *J. Hydrol.*, **353**(1-2), pp. 18-32 (2008).
21. Beven, K.J., *Rainfall-Runoff Modelling-The Primer*, 360 p., John Wiley, Hoboken, N.J. (2001).
22. Wang, X., Frankenberger, J.R. and Klavivko, E.J. "Uncertainties in DRAINMOD predictions of subsurface drain flow for an Indiana silt loam using the GLUE methodology", *Hydrol. Process*, **20**(14), pp. 3069-3084 (2006).