

## تحلیل قابلیت اعتماد پایداری سدهای باطله

مهدی نجفی\*<sup>۱</sup> علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۸۸/۱۲/۹

دریافت مقاله: ۸۷/۱۱/۲

### چکیده

در حال حاضر تحلیل پایداری سطوح شیب دار با استفاده از روش های تعادل حدی صورت می گیرد ولی از آنجایی که ممکن است خصوصیات خاک و سنگ در بخش هایی از دیواره مقادیر متفاوتی از خود نشان دهند، لازم است از روش های تحلیل احتمالاتی برای تحلیل پایداری سطوح شیب دار استفاده گردد. در این تحقیق ابتدا تحلیل پایداری دیواره سد باطله با استفاده از روش های تحلیل قطعی انجام شده است، سپس بر پایه اصول روش های احتمالاتی و با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو، اندیس قابلیت اعتماد و احتمال ریزش دیواره سد باطله ی کارخانه فرآوری معدن فسفات اسفوردی محاسبه و نتایج حاصل از دو روش (قطعی و احتمالاتی) با یکدیگر قیاس شده است و به منظور تأثیر پارامترهای ورودی بر روی ضریب اطمینان، تحلیل حساسیت با افزایش درصد هر کدام از پارامترها صورت پذیرفت. به طور کلی نتایج حاصل از تحلیل های قطعی و احتمالاتی نشان داده که پایداری سازه با ضریب اطمینان بیش از ۱/۳ به عنوان سازه ای با درجه سه مورد تایید و از پایداری مورد نظر برخوردار است.

**کلید واژه ها:** سد باطله، اندیس قابلیت اعتماد، احتمال ریزش، تحلیل پایداری

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود mehdi.najafi1362@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد Email: [ayarahmadi@yazduni.ac.ir](mailto:ayarahmadi@yazduni.ac.ir)

## مقدمه

یکی از اساسی‌ترین مشکلات معدنکاری، تولید زهاب اسیدی در نتیجه اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی است که باعث آلوده شدن آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. بهترین و اقتصادی‌ترین راه حل برای به حداقل رساندن تأثیرات زیست‌محیطی باطله‌ها، تخلیه آن در سدهای باطله است (وفائیان، ۱۳۷۷). سدهای باطله یکی از ارکان مهم معادن می‌باشند که هدف اصلی از طراحی این نوع سازه، دستیابی به مکان ایمن و پایدار پس از اتمام عملیات تغلیظ، برای دفع مواد باطله است (نجفی، ۱۳۸۶). سدهای باطله بخاطر عدم اعمال تحکیم در حین ساخت، عدم تزریق و یا عدم ایجاد هسته‌های نفوذ ناپذیر نسبت به سایر انواع سدهای خاکی کم‌ترین مقاومت را دارند و چنانچه به علتی در آن‌ها تخریب صورت پذیرد کاملاً ناگهانی و فاجعه آمیز خواهد بود. بنابراین سدهای باطله در مبحث ژئوتکنیک نیازمند توجه به مسائلی از قبیل: جانمایی سد با توجه به تأثیر عوامل ساختاری مثل ناپیوستگی‌ها بخصوص گسل‌های ناحیه، محاسبه خواص مکانیکی و دینامیکی خاک پی و دیواره‌های سد، بررسی وضعیت هیدروسیستم سد و تحلیل پایداری شیب دیواره‌ها می‌باشند.

عموماً روش‌های تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی، روش‌های مبتنی بر تعادل‌حدی (Limit equilibrium method) و روش‌های آنالیز حدی (Limit analysis method) می‌باشد. در روش‌های تعادل حدی فرض بر این است که در امتداد سطح لغزش (مسطح یا منحنی) معیار گسیختگی موهر-کولمب حاکم بوده و بخش لغزنده به صورت مجزا و صلب بر سطح لغزش جابه‌جا می‌شود و با در نظر گرفتن نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای مهاجم در سازه، ضریب اطمینان تعیین می‌گردد. روش‌هایی چون روش بیشاپ ساده شده (Bishop, 1955)، بیشاپ و مرگنستر (Bishop and Morgenstern, 1955)، اسپنسر (Spenser, 1967) و جانبو (Janbu, 1973) مبتنی بر تعادل حدی می‌باشند. در اکثر این روش‌ها توده لغزشی به بلوک‌های مجزا تقسیم‌بندی شده و نمودار آزاد نیروهای وارد بر هر بلوک، رسم می‌گردد سپس بر اساس تعادل نیرو و گشتاور نیروهای وارد بر هر بلوک، ضریب

اطمینان پایداری توده لغزشی محاسبه می‌شود (مجدی، ۱۳۸۵). روش‌های مبتنی بر آنالیز حدی نسبت به روش‌های مبتنی بر تعادل حدی جدیدترند و مزیت آن‌ها در این است که رابطه تنش- کرنش نیز در درون خاک در نظر گرفته می‌شود مزیت دیگر این روش‌ها سهولت کاربرد آن‌ها و در موارد بسیار، رسیدن آن‌ها به راه حلی با فرمول ساده می‌باشد (وفائیان، ۱۳۷۷). از آنجایی که سدهای باطله، از انواع سدهای خاکی هستند از این روش‌ها برای تحلیل قطعی پایداری دیواره‌ی آن‌ها استفاده شده است.

با توجه به تشریح روش‌های تحلیل قطعی پایداری، مشخص است که در این روش تحلیل پایداری شیب دیواره، پارامترهای ورودی ضریب اطمینان، همه از نوع قطعی در نظر گرفته می‌شوند و با توجه به این که خاک و سنگ از جمله محیط‌های غیرهمگن و ناهمسانگرد هستند که معمولاً توسط یکسری پارامترهای هندسی، مکانیکی و مقاومتی (وزن مخصوص، مدول یانگ، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و...) تعریف می‌شوند و ممکن است این پارامترها در دو نقطه مختلف مقادیر متفاوتی را نشان دهند (Chowdhury, 1987) لازم است از روش‌هایی استفاده گردد که در آن بتوان به بررسی ابهامات پارامترهای ورودی پرداخت. از این رو به عنوان جایگزین روش‌های تحلیل قطعی (روش‌های قدیمی تعیین ضریب اطمینان)، تحلیل‌های احتمالاتی جهت بررسی ابهامات پارامترهای ورودی در محاسبه ضریب اطمینان پیشنهاد شده‌اند و این امکان را فراهم می‌سازند تا احتمال ریزش سازه تعیین شود. با توجه به برتری روش‌های احتمالاتی، در این تحقیق از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تعیین قابلیت اعتماد و احتمال ریزش دیواره سد باطله معدن فسفات اسفوردی استفاده شده است.

## تحلیل احتمالاتی

از روش‌های تحلیل‌های احتمالاتی، برای تحلیل سیستم‌های دارای عدم قطعیت (Uncertainly) (ابهام) استفاده می‌گردد. اساس روش‌های طراحی احتمالاتی برای تعیین پایداری و عدم شکست این سیستم‌ها، شناخت و

$$g(X) = F - 1 = \frac{R}{S} - 1 \quad (1)$$

که در آن R: نیروهای مقاوم، S: نیروی‌های مهاجم و F برابر با ضریب اطمینان است.

### احتمال ریزش

یکی از مشکلات اساسی تئوری قابلیت اعتماد محاسبه انتگرال چندگانه احتمالاتی برای تخمین احتمال ریزش است که به صورت زیر محاسبه می‌شود (Zhao et al., 2001).

$$P_f = P(g(X) \leq 0) = \int_{g(x) \leq 0} f(X) dX \quad (2)$$

بطوری که  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$  معرف مجموعه متغیرهای تصادفی،  $f(X)$  تابع چگالی احتمال  $X$  و  $X(g)$  تابع پایه می‌باشد. محاسبه این انتگرال احتمالاتی به دلیل در دسترس نبودن تمام اطلاعات مورد نیاز برای تعیین تابع چگالی احتمال و از آنجایی که معرف یک کمیّت بسیار کوچک است مشکل است، لذا برای محاسبه این انتگرال باید از روش‌های تقریب (روش شبیه‌سازی Static Simulation) یا روش ممان‌های آماری (Static Moments) استفاده شود.

### اندیس قابلیت اعتماد ( $\beta$ )

بطور هندسی اندیس قابلیت اعتماد نزدیک‌ترین فاصله خطی بین مبدأ و سطح محدوده هدف در فضای متغیرهای استاندارد (هر فضای آماری دارای متوسط صفر و انحراف معیار ۱). به نقطه حاصل از برخورد این خط با تابع هدف، نقطه طرح یا نقطه متحمل‌ترین ریزش گفته می‌شود. شکل ۱ نقطه طرح ( $p^*$ ) روی محدوده‌ی هدف و اندیس قابلیت ( $\beta$ ) را نشان می‌دهد.

قابلیت اعتماد (Re) در مورد ضریب اطمینان (Safety Factor) (SF) بر حسب احتمال ریزش ( $SF < 1$ ) برابر است با:

$$Re = 1 - P_f \quad (3)$$

که در آن  $P_f$  برابر با احتمال ریزش است بنابراین در این حالت اندیس قابلیت اعتماد برابر است با:

تشخیص آن دسته از فاکتورهایی است که در پایداری سیستم نقش دارند (Chowdhury, 1987).

به طور کلی برای تعیین احتمال کلی ریزش سازه می‌توان از دو روش تحلیل قابلیت اعتماد و تحلیل حساسیت استفاده نمود. این دو روش احتمالاتی بر اساس وضعیت یا شرایط مسئله مورد تحلیل، استفاده کاملاً متفاوتی دارند. بر اساس ماهیت تحلیل پایداری شیب، ملزم به استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد هستیم زیرا تغییرات همزمان متغیرهای مختلف باعث تغییر در شرایط پایداری سازه خواهد شد و در برخی از موارد ممکن است با تغییر یک‌سری از متغیرها برخی دیگر از متغیرها نیز تغییر کنند (Malkawi et al., 2000).

### تحلیل قابلیت اعتماد

تحلیل قابلیت اعتماد شامل مجموعه روش‌هایی است که ابهامات را با استفاده از احتمال ریزش یا توزیع احتمالاتی تابع پایه، مدیریت می‌کنند. روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی را به مقدار خروجی تابع انتقال می‌دهند (Zhao et al., 1999). در مفهوم اساسی تحلیل قابلیت اعتماد فاکتورهای مقاوم و مهاجم ژئوتکنیکی، کمیّت‌های آماری هستند که دارای یک مقدار مرکزی (متوسط) و یک پراکندگی (واریانس)، اطراف این متوسط هستند. قبل از ورود به مرحله عملی تحلیل قابلیت اعتماد باید مفاهیم اساسی تابع پایه (Basic Function)، احتمال ریزش (Probability of Failure)، شاخص قابلیت اعتماد (Reliability Index) ( $\beta$ ) معرفی گردد.

### تابع پایه

تابع پایه یا محدوده هدف، با  $g(x)$  نشان داده می‌شود ( $X$  معرف مجموعه پارامترهای تصادفی ورودی است) و تابعی است که هنگام شکست کوچک‌تر از صفر است ( $g(x) < 0$ ) (Yarahmadi et al, 2003). در مورد سدهای باطله، تابع پایه محاسبه ضریب اطمینان است که از تقسیم نیروهای مقاوم بر نیروهای مهاجم محاسبه می‌شود. در این حالت  $g(x)$  از رابطه زیر قابل محاسبه است.

در این تحقیق برای تعیین اندیس قابلیت اعتماد و احتمال ریزش دیواره سد باطله معدن فسفات اسفوردی از روش شبیه سازی مونت کارلو (Monte Carlo Simulation) (MCS) استفاده شده است. برای استفاده از این روش باید تابع توزیع هر متغیر آماری شناخته شود. این روش شامل انتخاب تصادفی یک مقدار از هر متغیر و محاسبه تابع پایه است. اگر این مراحل تکرار شود، احتمال شکست براساس نسبت تعداد مورد نظر یا  $X(g < 0)$  به تعداد کل تیراژ محاسبات، تخمین زده می شود (Park et al., 2001). قبل از این که به تحلیل احتمالاتی دیواره سد باطله معدن فسفات اسفوردی پرداخته شود به معرفی انواع سدهای باطله پرداخته می شود.

### انواع سد باطله

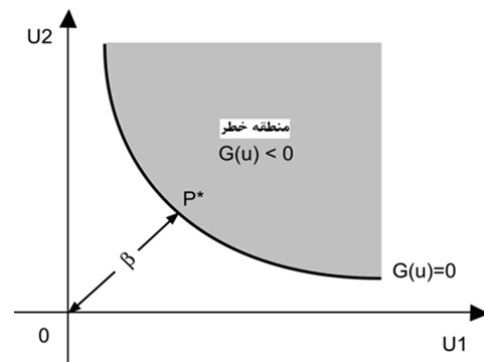
سدهای باطله بسته به حجم مواد ورودی و استفاده ای که دارا می باشند به سه طریق بالارو (Upstream method)، پایین رو (Downstream method) یا محوری (Centerline method) ساخته می شوند. از آن جایی که سد باطله معدن فسفات اسفوردی از نوع بالارو طراحی شده است تنها به توضیح این روش بسنده می شود.

### سد باطله بالارو

این نوع سد از ساده ترین و کم هزینه ترین نوع سد باطله است. برای ساخت این نوع سد ابتدا یک سد خاکی کم ارتفاع با روش معمولی سدهای خاکی به طوری که محکم و دارای ارتفاع آزاد کافی باشد ساخته می شود. اشکال این نوع سد در این است که دیواره های متوالی، بر روی نرمه هایی که در پشت دیواره انباشته شده و هنوز بر روی یکدیگر متراکم نشده اند ساخته می شوند. از این رو چنانچه ارتفاع این نوع سد از حدی تجاوز کند سد شکاف بر می دارد و مواد به خارج سد جریان می یابند به همین دلیل از این نوع سد تنها در معادن نسبتاً کوچک استفاده می شود. شکل ۲ نمونه ای از این نوع سد باطله را نشان می دهد (نعمت الهی، ۱۳۷۵).

$$RI = \frac{\mu - 1}{\sigma} \quad (4)$$

که در آن  $\mu$  برابر با متوسط تابع پایه (به عنوان مثال ضریب اطمینان رابطه ۱) و  $\sigma$  انحراف معیار تابع پایه (رابطه ۱) و RI برابر با اندیس قابلیت اعتماد است. اندیس قابلیت اعتماد برای پایداری شیب در صورتی قابل قبول است که  $RI \geq 3$  باشد. مقدار منفی RI نشان دهنده این است که ضریب اطمینان از یک کم تر است و در صورتی که RI برابر با صفر باشد نشان دهنده این است که متوسط ضریب اطمینان یک است (Slide manual, 2000).



شکل ۱: نقطه طرح ( $p^*$ ) روی محدوده هدف و اندیس قابلیت (Zhao et al., 1999) ( $\beta$ )

به طور کلی در حالتی که تابع پایه به صورت  $g(x) = F - F_0$  و حداقل ضریب اطمینان استاندارد باشد که کم تر از آن ایجاد ریزش می کند اندیس قابلیت اعتماد براساس روابط قبلی برای توزیع نرمال و لاگ نرمال به شکل زیر محاسبه می شود.

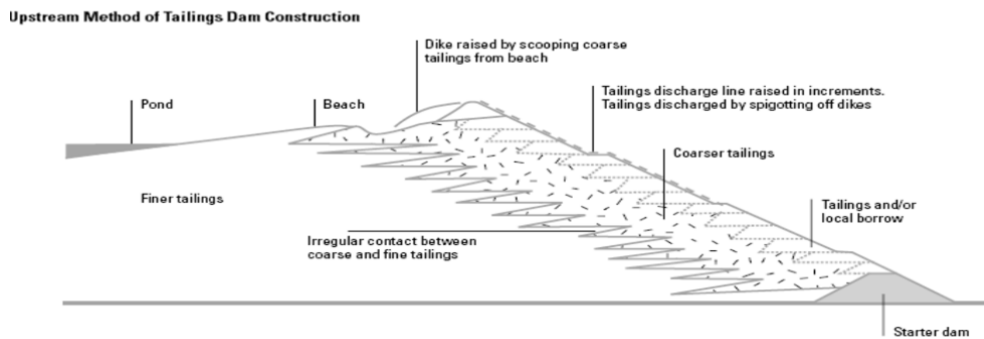
$$\beta = \frac{\mu_F - F_0}{\sigma_F} \quad (5)$$

$$\beta_{Ln} = \frac{\text{Ln}(\mu_F / F_s \sqrt{1 + \rho_F^2})}{\sqrt{\text{Ln}(1 + \rho_F^2)}} \quad (6)$$

بطوری که  $\rho_F$  ضریب تغییرات (ضریب تغییرات هر متغیر از تقسیم انحراف معیار بر میانگین آن به دست می آید) تابع پایه (ضریب اطمینان) است. در صورتی که احتمال ریزش وابسته به اندیس قابلیت اعتماد بیان شود به صورت زیر محاسبه می شود (Rackwitz and Fiessler, 1987).

$$p_f \approx \Phi(-\beta) \quad (7)$$

که در آن  $\Phi$  تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است.



شکل ۲: سد باطله بالارو (Martin et al, 2001)

### مطالعه موردی

معدن فسفات اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان بافق در استان یزد واقع شده است. ذخیره معدن فسفات اسفوردی برابر ۱۶/۵ میلیون تن برآورد شده است و بر طبق طراحی انجام شده عمر معدن حدود ۳۰ سال در نظر گرفته شده است که به طور متوسط سالیانه ۳۶۰ هزار تن خوراک (مواد) با وزن مخصوص به طور متوسط ۳/۲ تن بر مترمکعب به کارخانه فرآوری، ارسال می شود. از این میزان خوراک ۱۳۷ هزار تن باطله به سد باطله فرستاده می شود. سد باطله دارای پالپی از باطله با ۶۰ درصد جامد است بنابراین وزن مخصوص باطله انباشته شده در سد باطله برابر است با  $\gamma_t = 0.6 \times 3200 + 0.4 \times 1000 = 2320 \frac{N}{M^3}$  که با توجه به حجم بسیار زیاد باطله در داخل سد لازم است که دیواره سد در مقابل نیروی وارده از طرف مواد باطله پایدار باشد تا کمترین اثرات زیست محیطی ایجاد نماید.

### تحلیل پایداری سد باطله

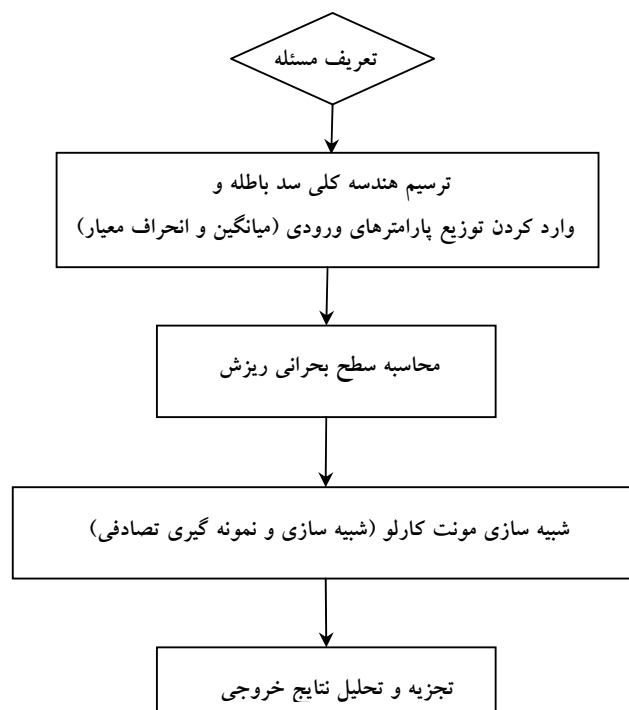
سد باطله کارخانه فرآوری معدن فسفات اسفوردی از نوع بالارو و بر روی سطح زمینی احداث شده است که شیب طبیعی آن حدود ۸ درجه است. پارامترهای هندسی مربوط به سد باطله عبارت است از: تاج سد: ۶ متر، شیب دیواره سد: ۴۵ درجه، ارتفاع سد: ۸ متر (در حالتی که دو خاکریز احداث شده باشد).

برای تحلیل پایداری دیواره سد باطله از نرم افزار Slide استفاده شده است. این نرم افزار یک برنامه دو بعدی جهت تحلیل پایداری شیبها است که ضریب اطمینان و احتمال

ریزش را جهت سطوح مستعد در حالت دایره ای و غیردایره ای بر اساس روش جستجوی شبکه‌ای (Gridsearch) برای شیب‌های سنگی و خاکی محاسبه می کند. این نرم افزار دارای قابلیت‌های زیادی بوده و در آن می توان مصالح سنگی یا خاکی تشکیل دهنده شیروانی، بارگذاری خارجی، سطح آب ایستایی و تدابیر تقویتی را مدل نمود. این نرم افزار قابلیت تحلیل به روش‌های بیشاب ساده شده، اسپنسر (Spenser)، مرگنسترن و جی ال ای مرگنسترن- پرایس (GLE/Morgenstern-price) و غیره را داراست. ضمناً تحلیل به صورت اتوماتیک بر روی سطوح لغزش احتمالی (Critical Probabilistic Surface) و هم‌چنین بر روی یک سطح لغزش مشخص امکان پذیر است (Slide Manual, 2000).

در شکل ۳ فلوجارت تحلیل احتمالاتی سد باطله نشان داده شده است. با توجه به این فلوجارت تحلیل احتمالاتی دیواره سد باطله شامل ۲ مرحله است. مرحله اول مربوط به تعیین خصوصیات آماری عدم قطعیت پارامترهای ورودی و مرحله دوم آنالیز احتمالاتی سطوح شیب‌دار و محاسبه پارامترهای مربوط به تحلیل قابلیت اعتماد می باشد.

در مرحله تعیین خصوصیات آماری، پارامترهای ورودی دارای عدم قطعیت شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و چگالی در نظر گرفته شده است. خصوصیات مواد ورودی شامل متوسط و انحراف معیار چسبندگی، زاویه اصطکاک بدست آورده شده است و نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است (نجفی، ۱۳۸۶).



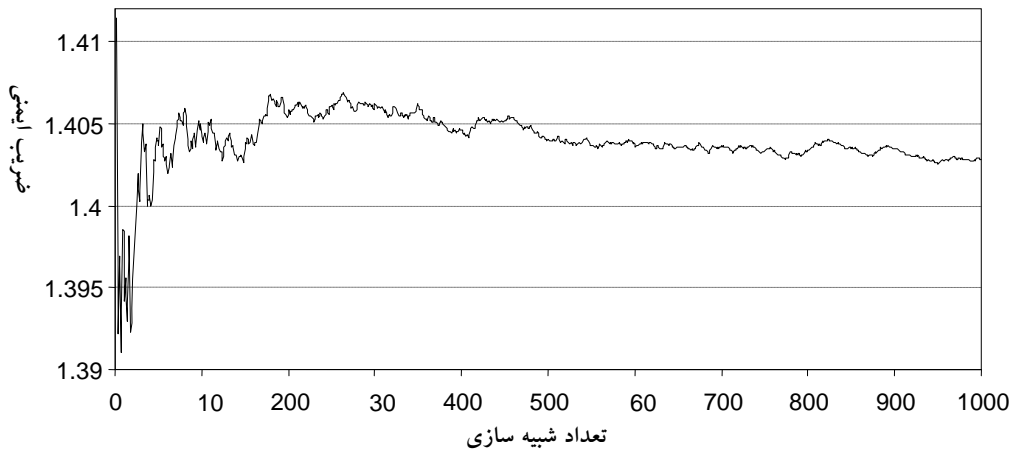
شکل ۳: مراحل مدل سازی احتمالاتی پایداری سد باطله

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده در تحلیل احتمالاتی (نجفی، ۱۳۸۶)

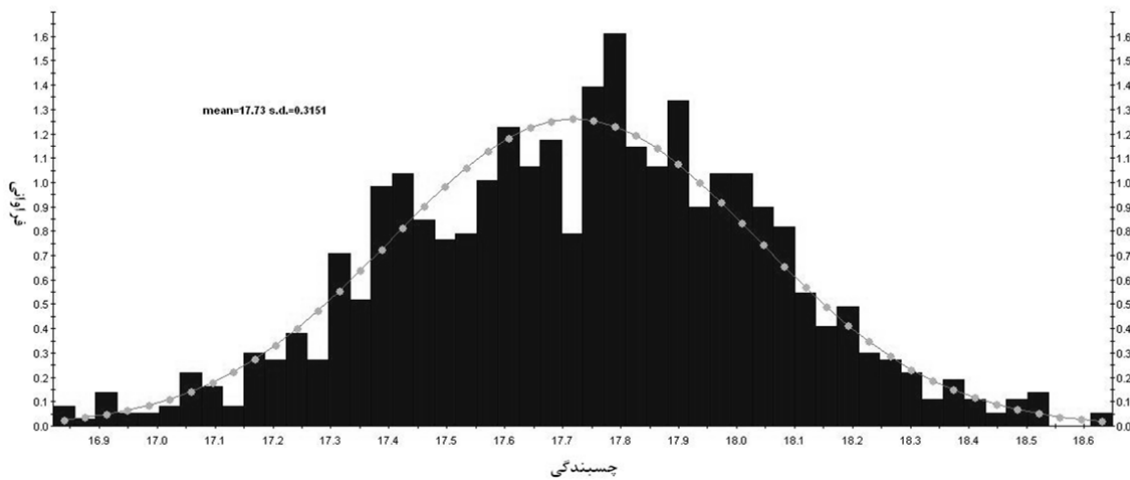
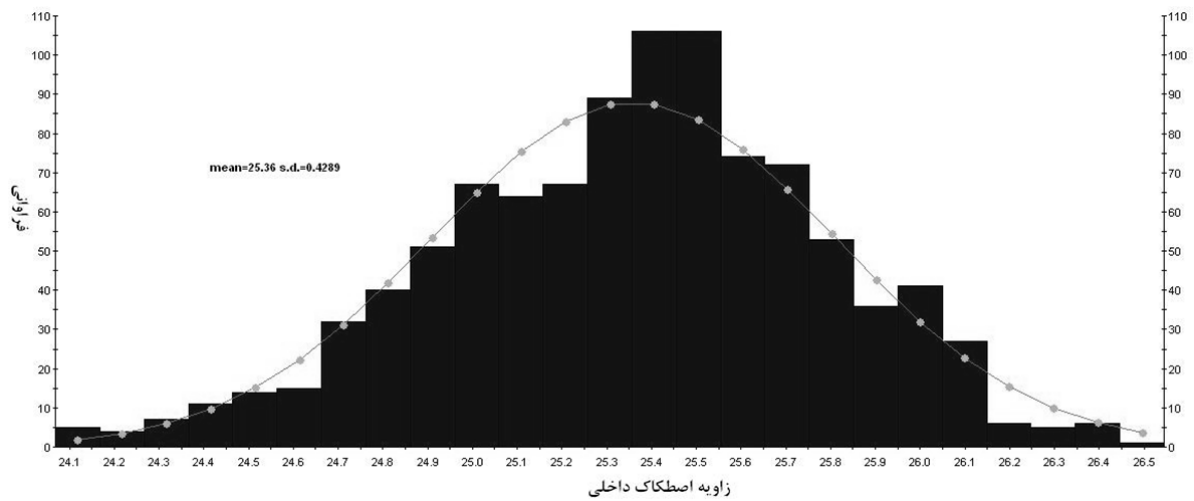
مواد	خصوصیات	تابع توزیع	متوسط	انحراف معیار
خاک دیواره	چگالی (تن بر متر مکعب)	نرمال	۲/۹	۱/۸۷
	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)		۲۵/۳۶	۰/۴۵
	چسبندگی (KPa)		۱۷/۷۲	۰/۳۱۶
باطله	چگالی (تن بر متر مکعب)	نرمال	۲/۳۲	۲/۷۳
	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)		۲۶/۳	۰/۶۷
	چسبندگی (KPa)		۶/۱۶۸	۰/۴۱۲

داخلی خاک دیواره سد در شکل ۵ نشان داده شده است (محور عمودی هیستوگرامها فراوانی نسبی است). در این تحقیق تحلیل پایداری دیواره سد باطله برای دو حالت، هنگامی که سطح لغزش حالت دایره‌ای و غیردایره‌ای داشته باشد صورت پذیرفته است. از این رو نتایج تحلیل پایداری سد باطله با استفاده از تحلیل قطعی در حالتی که سطح لغزش حالت دایره‌ای باشد در شکل ۶ نشان داده شده است. در این حالت ضریب اطمینان محاسبه شده با استفاده از روش بیشاپ ساده شده برابر با ۱/۴۰۱ است.

با توجه به اصول شبیه‌سازی مونت کارلو و برای این‌که نتایج آماری به دست آمده از شبیه‌سازی مونت کارلو قابل استفاده و با واقعیت تطابق داشته باشد تعداد تکرار شبیه‌سازی ۱۰۰۰ بار در نظر گرفته شده است. شکل ۴ محاسبه ضریب اطمینان بر حسب تعداد شبیه‌سازی نشان می‌دهد با توجه به این شکل ضریب اطمینان به مقدار ثابتی همگرا شده است و این نشان دهنده این موضوع است که تعداد شبیه‌سازی‌ها به اندازه کافی انتخاب شده است. به عنوان نمونه هیستوگرام نمونه‌گیری تصادفی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای چسبندگی و زاویه اصطکاک



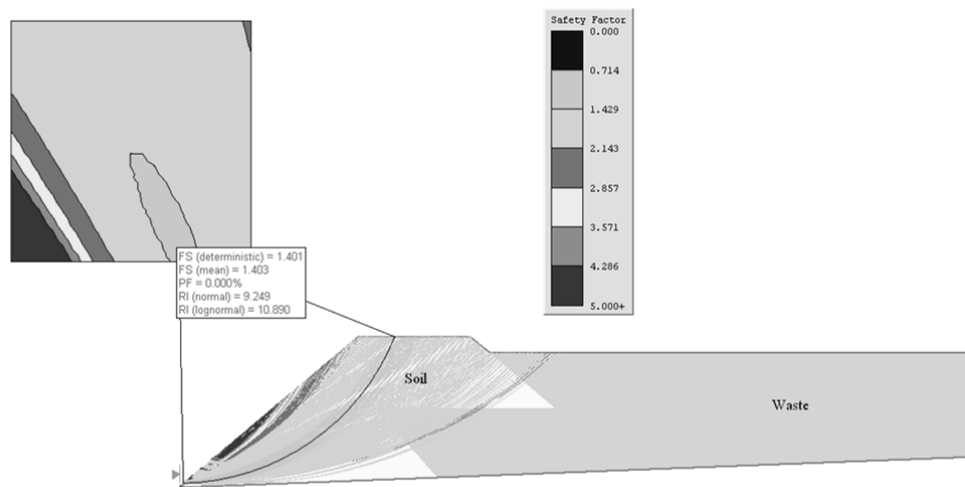
شکل ۴: نتایج حاصل از شبیه سازی مونت کارلو



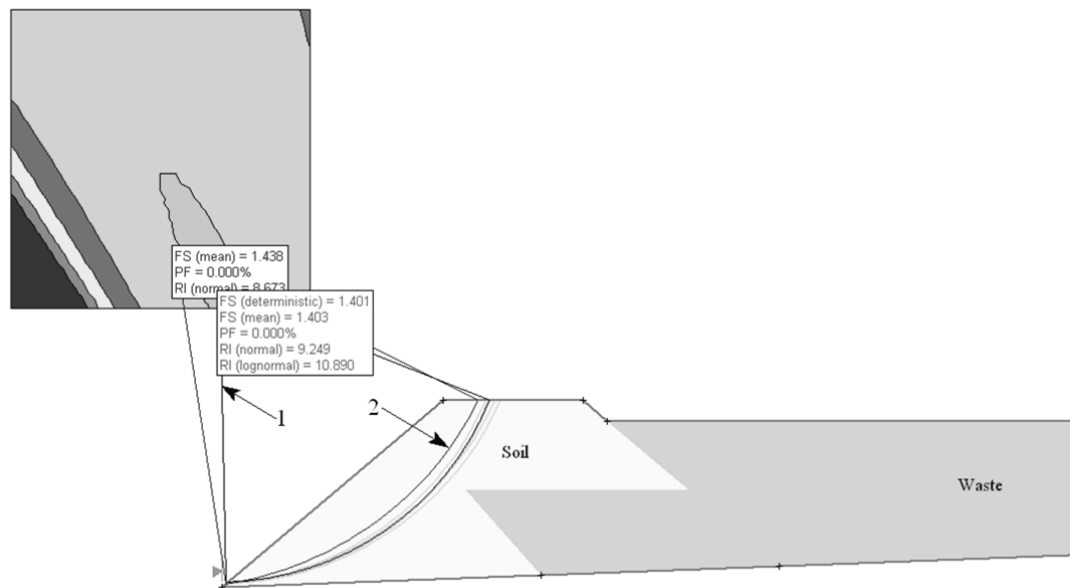
شکل ۵: هیستوگرام نمونه گیری تصادفی در روش شبیه سازی مونت کارلو

لغزش غیردایره‌ای باشد صورت پذیرفت. در این حالت، سطح با کمترین ضریب اطمینان در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که سطح لغزش احتمالی دارای ضریب اطمینان  $1/6$  است و احتمال این‌که پی سد دچار شکست گردد وجود ندارد و هیچ نوعی از گوه‌های ناپایدار در پی سد به وقوع نمی‌پیوندد. نتایج تحلیل قابلیت اعتماد سطح بحرانی احتمالاتی با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل در دو حالت سطح

در شکل ۷ سطح بحرانی شکست در دو روش تحلیل قطعی و احتمالاتی با هم مقایسه شده است (سطح ۲ مربوط به تحلیل احتمالاتی و سطح ۱ مربوط به تحلیل قطعی). با توجه به این شکل مشخص است که سطح بحرانی شکست دقیقاً همان سطحی که توسط روش‌های قطعی تحلیل پایداری محاسبه می‌شود نیست و این دو سطح بحرانی مجزا از یکدیگر هستند. از آنجا که همیشه در دیواره‌های خاکی لغزش به صورت دایره‌ای نیست تحلیل احتمالاتی برای حالتی که سطح

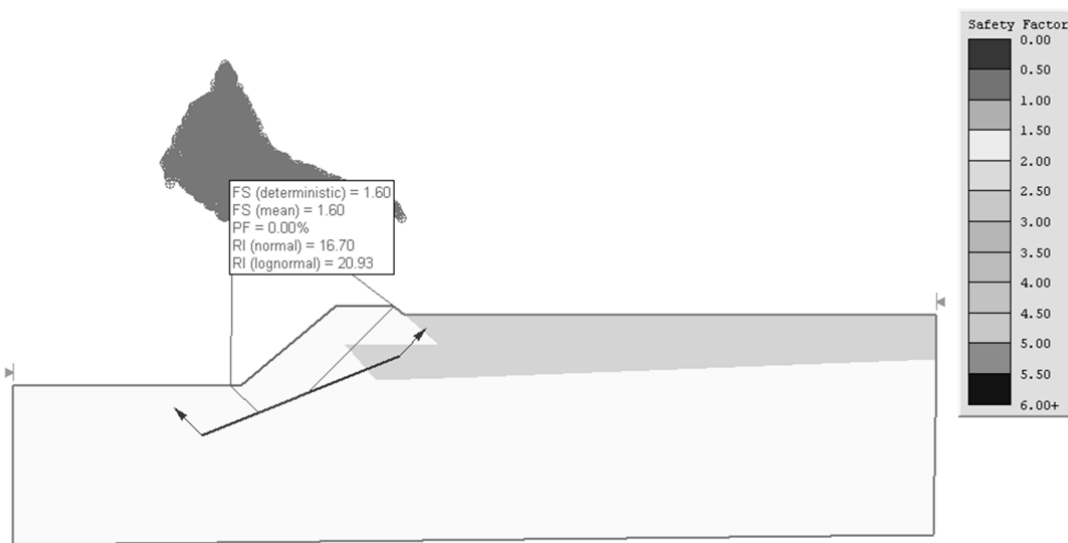


شکل ۶: سطح بحرانی شکست در حالت تحلیل قطعی



شکل ۷: مقایسه سطح بحرانی شکست در حالت تحلیل قطعی و احتمالاتی





شکل ۸: سطح بحرانی شکست در حالت ریزش غیردایره‌ای

تجمعی روش جانבו احتمال تجمعی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها محاسبه می‌کند. به عنوان مثال فرض کنید ضریب اطمینان قابل قبول برای پایداری سازه برابر با  $1/3$  باشد (یعنی ضریب اطمینان کم‌تر از  $1/3$  سازه دچار شکست شود) در این حالت احتمال تجمعی محاسبه شده توسط سایر روش‌ها برابر با صفر است. در حالی که احتمال تجمعی محاسبه شده توسط روش جانبو ۲۵ درصد است و نشان‌دهنده این موضوع است که روش جانبو خیلی محافظه‌کارانه ضریب اطمینان را محاسبه می‌نماید.

#### تحلیل حساسیت

به منظور تأثیر پارامترهای ورودی بر روی ضریب اطمینان، تحلیل حساسیت با افزایش درصد هر کدام از پارامترها صورت پذیرفت که نتایج تحلیل حساسیت در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰ با افزایش میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ضریب اطمینان افزایش می‌یابد به طوری که حساسیت ضریب اطمینان به افزایش زاویه اصطکاک داخلی مقداری بیش‌تر نسبت به افزایش چسبندگی است. نکته قابل

لغزش دایره‌ای و غیردایره‌ای در جدول (۲) بیان شده است.

با توجه به جدول (۲) نکات زیر قابل توجه است:

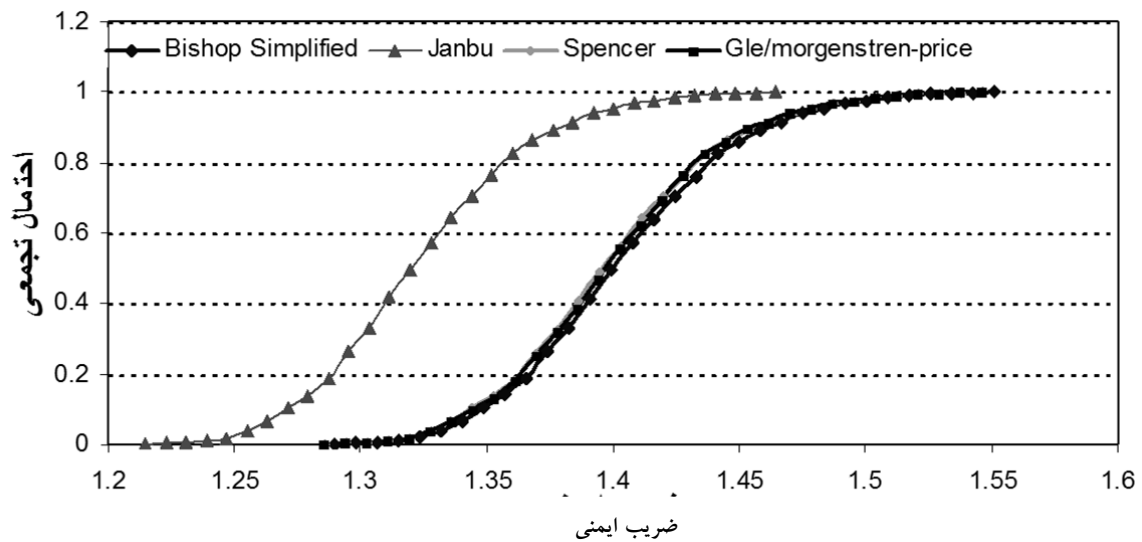
- ضریب اطمینان پایداری دیواره سد باطله با استفاده از هر کدام از روش‌های تحلیل و در هر دو حالت سطح لغزش دایره‌ای و غیردایره‌ای مقداری بیش‌تری از  $1/3$  است که بیانگر پایداری سازه است و با توجه به نتایج تحلیل احتمالاتی، احتمال شکست سازه برابر صفر است. یعنی سازه طراحی شده از پایداری کاملاً مناسبی برخوردار است.

- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی برای دو حالت سطح لغزش دایره‌ای و غیردایره‌ای بیانگر این است که احتمال به وقوع پیوستن سطح لغزش غیردایره‌ای در دیواره سد کم‌تر است زیرا سطح لغزش احتمالی دارای ضریب اطمینان و اندیس قابلیت اعتماد بیش‌تری است.

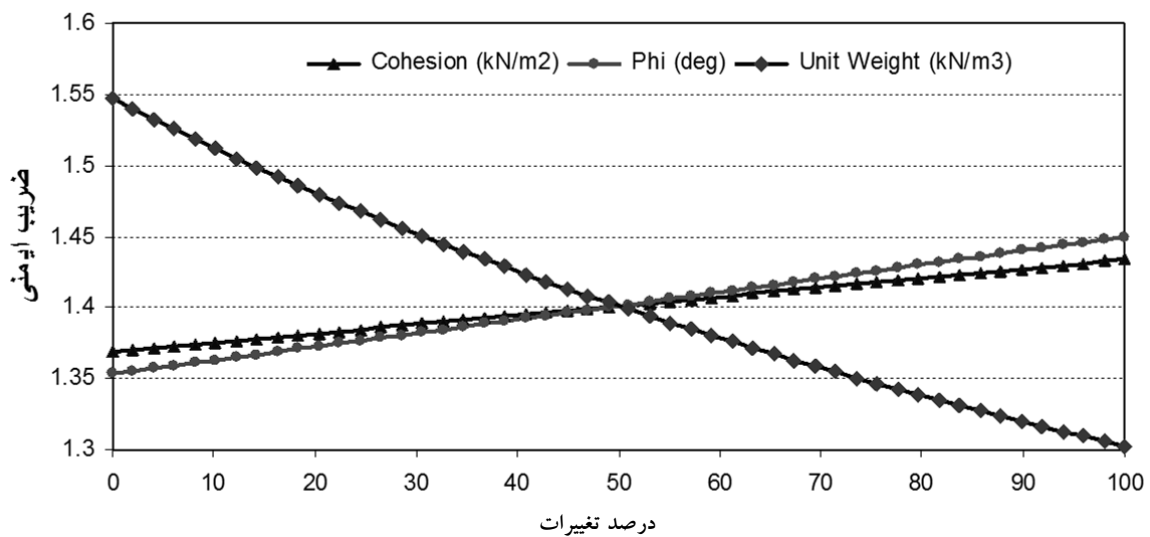
به منظور آگاهی یافتن از وضعیت احتمال تجمعی شکست برحسب ضریب اطمینان معیار (ضریب اطمینان مورد استفاده در طراحی که کم‌تر از آن سازه ناپایدار است) در شکل (۹) توزیع احتمال تجمعی بر حسب ضریب اطمینان در روش‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو بیان شده است نکته قابل توجه این است که نمودار احتمال

جدول ۲: نتایج تحلیل قابلیت اعتماد برای سطح اولیه لغزش

روش تحلیل	ضریب اطمینان (تابع پایه)									
	سطح لغزش غیر دایره‌ای					سطح لغزش دایره‌ای				
	حد اقل	متوسط	حداکثر	RI (Normal)	RI (Lognormal)	حد اقل	متوسط	حداکثر	RI (Normal)	RI (Lognormal)
بیشاپ	۱/۲۸	۱/۴۳	۱/۵۴	۹/۲۶	۱۰/۹۱	۱/۵	۱/۶	۱/۷	۱۶/۵	۲۰/۹۳
جانبو	۱/۲۱	۱/۳۲	۱/۴۵	۷/۷۸	۸/۹۱	۱/۴	۱/۵	۱/۶	۱۴/۷	۱۷/۸۷
اسپنسر	۱/۲۸	۱/۳۹	۱/۵۳	۹/۱۹	۱۰/۸۱	۲/۱۸	۲/۳۲	۲/۴۵	۳۱/۶۳	۴۶/۸
مرگسترن	۱/۲۸	۱/۳۹	۱/۵۳	۹/۳۰	۱۰/۹۳	۱/۸۸	۲	۲/۱۲	۲۵/۷۲	۳۵/۶۹



شکل ۹: توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو



شکل ۱۰: نتایج تحلیل حساسیت

از تابع توزیع ضریب اطمینان، اطلاعات قابل اعتماد زیادی به دست آید.

- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد برای دو حالتی که سطح لغزش حالت دایره‌ای و غیردایره‌ای باشد نشان داد که سطح لغزش غیردایره‌ای دارای ضریب اطمینان بیش‌تری است یعنی احتمال به وقوع پیوستن ریزش دایره‌ای در دیواره سد بیش‌تر از ریزش غیردایره‌ای است.

- در هیچ کدام از تحلیل‌های صورت گرفته احتمال لغزش پی سد وجود ندارد.

- با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت این نکته قابل توجه است که در ساخت سد باطله به اکثر پارامترهای خاک دیواره سد توجه گردد و از خاکی استفاده گردد که دارای چگالی و سایر پارامترهای مناسب باشد و نیز با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و تحلیل احتمالاتی این نکته روشن است که با استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت نمی‌توان احتمال شکست سازه را محاسبه نمود.

- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد (جدول ۲) ( $RI > 3$ ) و احتمال ریزش (برابر با صفر) برای پایداری شیب دیواره سد باطله نشان داد که دیواره سد باطله با در نظر گرفتن عدم قطعی پارامترهای ورودی هم‌چنان پایدار است و هیچ‌گونه احتمال ریزش دیوار سد وجود ندارد و با توجه به ضریب اطمینان به دست آمده از نتایج تحلیل به‌طور متوسط  $1/4$  پایداری سازه مورد نظر به‌عنوان سازه‌ای با درجه اهمیت ۳ مورد تایید قرار گرفت.

توجه دیگر در این نمودار این است که با افزایش چگالی مقدار ضریب اطمینان کاهش می‌یابد و دلیل آن این است که طبق رابطه موهرکولمب ( $\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$ ) با افزایش ارتفاع سد باطله، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی نسبت به چسبندگی بیش‌تر می‌شود و با افزایش چگالی تنش قائم حاصل از وزن دیواره افزایش می‌یابد و به دنبال آن ضریب اطمینان کاهش می‌یابد (یکی از عوامل اصلی ناپایداری شیروانی وزن آن است).

### نتیجه‌گیری

با توجه به ماهیت ساخت، سد باطله مقاومت کم‌تری نسبت به سد خاکی دارا است. با توجه به وقوع وقایع فاجعه‌آمیز در دنیا در اثر تخریب سدهای باطله، بررسی پایداری آن‌ها دارای اهمیت زیادی است. از این‌رو بررسی پایداری این سدها با توجه به عدم قطعیت پارامترهای تأثیرگذار در پایداری، توسط روش‌های تحلیل قطعی کافی نیست.

در این تحقیق، تحلیل پایداری سد باطله معدن فسفات اسفوردی توسط روش تحلیل قطعی و احتمالاتی صورت پذیرفت که نتایج حاصله به شرح ذیل است:

- تحلیل پایداری با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو باعث شده است که احتمال شکست سطحی از دیواره با کم‌ترین ضریب اطمینان مشخص گردد. هر چند که در این مثال احتمال شکست صفر است، ولی این به این معنا نیست که همیشه احتمال شکست صفر است بلکه بستگی به عدم قطعیت پارامترهای ورودی (میانگین و واریانس) دارد و نیز

### منابع

مجدی، عباس. چرمهینی، مهدی (۱۳۸۵) تحلیل پایداری سازه‌های فروشویی توده‌ای به روش جزء به جزء (روشی جدید)، نشریه فنی جلد ۴۰ شماره ۱.

نعمت الهی، حسین. کانه آرایی (جلد دوم)، زمستان ۱۳۷۵، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۸۱۶ تا ۸۲۰.

وفائیان، محمود. سدهای خاکی، (۱۳۷۷)، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ۲۰۳-۲۷۷ و ۷۱ تا ۷۶.

نجفی، مهدی. علیرضا یاراحمدی بافقی، (۱۳۸۶) تحلیل پایداری و مدیریت زیست محیطی سدهای باطله، پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.

- Bishop A.W. (1955). "The use of the circle in the stability analysis of earth slopes", *Geotechnique*, 5, pp 7-17
- Bishop A.W and Morgenstren N . (1960). "stability coefficient for earth slopes". *Geotechnique*, 10, pp 129-150.
- Spenser E . (1967). " a method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces" . *Geotechnique*, 17, pp 11-26.
- Janbu N. (1973). " soil stability computations". In *Embankment-dam engineering casagrande volume*, pp 47-86. New York. John Wiley & sons
- Martin A. J., McNee J. J and Pedersen, TF. (2001). "The reactivity of sediments impacted by metal-mining in Lago Junin", *Journal of Geochemical Exploration*.
- Yarahmadi-Bafghi A. R., Verdel T. (2003) "The Probabilistic Key-Group Method." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.
- Chowdhury R. N. (1987), "Practical aspects of probabilistic studies for slopes", *Soil slope instability and stabilization*, Walker B.F., Fell R.A.A.Balkema.
- Rocscience, Slide version 5.031., (2000). Users manual.
- Park H., West T. R. (2001), "Development of a probabilistic approach for rock wedge failure", *Engineering Geology*; 59: 233-251.
- Malkawi A. I. Husein , Hassan W. F., Abdulla F. A. (2000), "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability", *Structural Safety*; 22 : 161-187.
- Zhao Y. G., Ono T. (1999), "A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM)", *Structural Safety*; 21: 95-112.
- Zhao Y. G., Ono T. (2001), "Moment methods for structural reliability", *Structural Safety*; 23: 47-75.
- Rackwitz R., Fiessler B. (1978), "Structural reliability under combined random load sequences", *Computers and Structures*; 9:489-494.
- Park H., West T. R. (2001), "Development of a probabilistic approach for rock wedge failure", *Engineering Geology*; 59: 233-251