مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
زمستان ۱۳۹۹، جلد سیزدهم، شماره ۴، صفحه ۹۵ تا ۱۱۰

آنالیز قابلیت اعتماد سد خاکی با استفاده از یک روش ترکیبی جدید-مطالعه موردی

هادی فتاحی* [۱]، معین شیرمحمدی[۲]، حسین قائدی [۲]

دریافت مقاله: ۹۹/۰۱/۱۴ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۰۲

چکیده

تجزیه و تحلیل احتمالاتی پایداری شیروانی ابزاری برای در نظر گرفتن عدم‌قطعیت پارامترهای خاک در طراحی است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار Slide، از شبیه سازی مونت کارلو به عنوان روشی تحلیلی برای تهیه مدل‌های احتمالاتی پایداری شیروانی بر مبنای روش‌های تعادل حدی استفاده شده است. روش‌های تعادل حدی به عنوان روش‌های رایج در تحلیل پایداری شیروانی می‌باشند که با استفاده از نیروهای برشی در سطح لغزش تحلیل را انجام می‌دهند. در این تحقیق پارامترهایی که در مدلسازی دارای عدم‌قطعیت هستند عبارتند از زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و وزن مخصوص خاک که در مدلسازی به صورت تابع توزیع نرمال در نظر گرفته شده‌اند. در این تحقیق، برای نشان دادن قابلیت مدل‌های ارائه شده از داده‌های میدانی به دست آمده از سد رودبار لرستان (به عنوان مطالعه موردی) در ایران استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و روش‌های تعادل حدی برای ارزیابی پایداری شیروانی‌ها بطور موفقیت آمیزی قابل استفاده است.

کلید واژه‌ها: *قابلیت اعتماد، سد خاکی، پایداری شیروانی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، روش‌های تعادل حدی*

۱. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک h.fattahi@arakut.ac.ir
۲. دانشجوی دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
* مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

با توجه به بحران آب در کشور، نقش سدها با هدف ذخیره‌سازی آب، تأمین آب شرب مورد نیاز و همچنین جلوگیری از وقوع سیلاب‌ها غیرقابل انکار است. سدها را عمدتاً از نظر مصالح مصرفی در آن‌ها می‌توان به دو دسته سدهای بتنی و سدهای خاکی و سنگریزه‌ای طبقه‌بندی نمود. در این میان سدهای خاکی به علت سهولت در کار و مصالح طبیعی در دسترس، همواره مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. توجه به پایداری سدهای خاکی از دیرباز مورد توجه محققین و کارشناسان علوم مهندسی در پروژه‌های عمرانی و مکانیک سنگی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت سدسازی، ناپایداری و تخریب آن‌ها می‌تواند خسارت‌های مالی و جانی جبران ناپذیری را به بار آورد، بنابراین عموماً هزینه‌های سنگینی را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به یکسان نبودن پارامترها حتی در نقاط نزدیک به یکدیگر، هندسه غیر یکسان در تمام قسمت‌های شیب و خطاهای انسانی در تعیین پارامترهای خاک و یا مدل مورد استفاده، همه از جمله عواملی هستند که موجب غیر قابل اعتماد بودن ضریب اطمینان می‌باشد. از زمان ارائه‌ی اولین روش تحلیلی پایداری شیروانی‌ها توسط فلنیوس تاکنون، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. در حال حاضر روش‌های تحلیل شیروانی شامل: روش تعادل حدی، روش‌های المان مرزی، روش‌های اجزای محدود، روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و روش مونت‌کارلو هستند، که در این مقاله از ترکیب روش مونت‌کارلو و روش‌های تعادل حدی استفاده شده است. در طول سالیان اخیر مطالعات بسیاری بر روی پایداری سدهای خاکی و شیروانی‌ها صورت گرفته است، که به مهمترین آنها اشاره خواهد شد. در سال (۲۰۰۰) ملکآوی و همکاران به آنالیز قابلیت اعتماد پایداری شیب سد خاکی با دو روش لنگر دوم درجه اول و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو پرداختند. نتایج این روش‌ها با چهار روش پایداری شیب شامل روش‌های متداول قطعات، بیشاپ، جانبو و روش اسپنسر مقایسه شد (Malkawi et al. 2000). لی و همکاران در سال (۲۰۱۶) یک روش شبیه‌سازی احتمالاتی جدید با استفاده از روش ترکیبی تعادل حدی ساده و روش‌های المان محدود برای محاسبه احتمال خرابی شیب‌های خاکی ارائه دادند (Li et al. 2016). در سال (۲۰۰۷) لوو و همکاران در تحقیق خود به به ارائه‌ی یک روش علمی برای انجام روش تعادل حدی بهینه‌سازی سطح لغزش ارائه دادند. در این روش شاخص قابلیت اعتماد نیز به کمک بهینه‌سازی محاسبه می‌شود (Low et al. 2007) . در سال (۲۰۰۸) هونگ و روح در تحقیق خود به تحلیل قابلیت اعتماد شیب‌های خاکی با استفاده از روش درجه اول قابلیت اعتماد پرداختند. از آن‌جایی که گسیختگی هر سطح لغزش نشان دهنده‌ی گسیختگی شیب است، شیب به صورت یک مجموعه سیستم دارای سطوح لغزش در نظر گرفته شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که قابلیت اعتماد یک سیستم می‌تواند به تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی حساس باشد (Hong and Roh2008). در سال (۲۰۱۳) جوهری و همکاران با توسعه روش تحلیلی که از انتگرال‌گیری مستقیم توابع چگالی بدست می‌آید، احتمال شکست را برای حالت شکست صفحه‌ای مورد مطالعه قرار داده و به نتایج مشابه با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو دست یافته‌اند (Johari et al. 2013). در سال (۲۰۱۵) لی و همکاران در تحقیقی یک روش پاسخ سطح چندگانه برای تحلیل قابلیت اعتماد شیب با درنظر گرفتن تغییرپذیری خواص خاک پیشنهاد دادند. نتایج آنها نشان داد که روش پیشنهادی ابزاری عملی برای ارزیابی قابلیت اعتماد شیب در خاک‌های متغیر می‌باشد (Li et al. 2015). در سال (۲۰۱۲) لیانگ و زوسانگ در تحقیقی به پیدا کردن تفاوت بین سطح لغزش دارای حداقل ضریب اطمینان و سطح لغزش دارای حداقل قابلیت اعتماد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سطح لغزش بحرانی به طور قابل توجهی متفاوت از سطح لغزش با قابلیت اعتماد بحرانی برای شیب‌های چند لایه می‌باشد و شاخص قابلیت اعتماد سطح بحرانی لغزش بیشتر از این مقدار در سطح لغزش با قابلیت اعتماد بحرانی می‌باشد (Liang and Xue-song 2012). در سال (۲۰۰۸) رادهی و همکاران بر مبنای توزیع

www.SID.ir

Archive of SID

پارامترهای ناپیوستگی‌ها برای شکست‌های صفحه‌ای و گوه‌ای به بررسی آنالیز عدم قطعیت در شیب‌های سنگی پرداختند و با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو عدم قطعیت را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، از شش سطح شیب‌دار مختلف استفاده شد و نتایج تحقیق، حاکی از تفاوت ضرایب ایمنی بدست آمده از روش قطعی با روش احتمالاتی و همچنین اهمیت روش احتمالاتی در پایداری شیب‌های سنگی که دارای عدم قطعیت زیادی هستند، می‌باشد (Radhi et al. 2008). در سال (۲۰۰۹) هماه و همکاران به تحلیل احتمالاتی شیب با استفاده از دو روش تخمین نقطه‌ای و روش مونت‌کارلو پرداختند، نتایج این تحقیق نشان داد که در مسائل با درجه عدم قطعیت بالا، استفاده از روش احتمالاتی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در مواردی که حتی ضریب اطمینان حاصله از روش قطعی و احتمالاتی یکسان بوده ولی احتمال گسیختگی در آنها متفاوت است، استفاده از روش قطعی گاهی اوقات غیر ایمن می‌باشد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که روش مونت‌کارلو از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است (Hammah et al. 2009). در سال (۲۰۰۳) باتاچاریا و همکاران یک فرآیند عددی را برای تعیین سطح با کمترین مقدار اندیس قابلیت اطمینان در شیب‌های سنگی ارائه دادند (Bhattacharya et al. 2003). در سال (۲۰۱۱) خالد فرح و همکاران در تحقیقی به تحلیل قابلیت اعتماد پایداری شیب با در نظر گرفتن تغییرات خاک پرداختند. نتایج روش‌های اجزاء محدود تصادفی و روش تعادل حدی (بیشاپ ساده) برای کنترل کارآیی و دقت آن‌ها مورد ارزیابی قرار دادند (Farah et al. 2011). در سال (۲۰۱۴) کومار به بررسی تأثیر تغییرپذیری پارامترهای خاک روی قابلیت اعتماد شیروانی‌ها پرداخته است. این محقق برای این منظور از دو روش تقریب اول ممان دوم و روش المان محدود تصادفی استفاده کرده است (Jha 2015). در سال (۲۰۱۱) لی و همکاران با انجام تحلیل‌های احتمالاتی برای پایداری شیروانی به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب همبستگی بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، احتمال شکست به صورت خطی افزایش می‌یابد (Li et al. 2011). در سال (۲۰۱۷) ونگ و همکاران با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به تحلیل قابلیت اعتماد برای مسائل پایداری شیب پرداختند. این روش برای ارزیابی تأثیر تغییرات خواص خاک و سطح لغزش بحرانی استفاده شد و نتایج نشان داد که وقتی تغییرات خواص خاک در نظر گرفته نشود نتایج ممکن است به صورت بیش از حد (محافظه کارانه) و یا کمتر از حد (غیرمحافظه کارانه) ارائه شود (Cao et al. 2017). در سال (۲۰۱۳) ایون چاوو تحلیل قابلیت اعتماد را برای شیب با چندین مود گسیختگی مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که این روش به خوبی می‌تواند مودهای گسیختگی مختلف ایجاد شده توسط لایه‌بندی و تغییرات در خواص خاک را در ارزیابی احتمالاتی شیب در نظر بگیرد (Cho 2013). در سال (۲۰۱۳) یوسف ارزین و همکاران به دلیل یکسان نبودن محیط خاکی در پایداری شیروانی به پیش‌بینی ضریب اطمینان بحرانی شیب‌های محدوده همگن با استفاده از شبکه‌های عصبی و مدل رگرسیون چندگانه پرداختند (Erzin and Cetin 2013). در تحقیقی کاسویکز از تئوری فازی برای بیان ضریب اطمینان شیب و مواجهه با عدم اطمینان در پارامترهای خاک استفاده کرد، نتایج حاصل از این تحقیق بیان بهتری از پایداری شیب در مقایسه با روش‌های قطعی و کلاسیک را نشان داد (Kacewicz 1987). در تحقیقی دیگر آلونسو به دلیل وجود عدم اطمینان در پارامترهای خاک، عوامل محیطی و روش مورد استفاده (روش قطعات) در تحلیل پایداری شیب، از تحلیل قابلیت اعتماد برای بیان بهتری از گسیختگی استفاده کرد (Alonso 1976). در تحقیقی دیگر کریستین و همکاران روشی را برای ارزیابی توصیف احتمالاتی از داده‌های آزمایش‌های محلی و آزمایشگاهی پیشنهاد دادند و از نتایج آن برای رسیدن به شاخص قابلیت اعتماد برای پایداری شیب استفاده کردند (Christian et al. 1994). در سال (۲۰۰۶) سبویا و همکارانش با استفاده از منطق فازی به بررسی قابلیت گسیختگی شیب‌های خاکی پرداختند (Saboya Jr et al. 2006). دوداگودار و ونگاتاچالام با استفاده از روش ساده

www.SID.ir

Archive of SID

شده‌ی بیشاپ، عدم اطمینان در متغیرهای ورودی را به صورت فازی برای تحلیل قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی در نظر گرفتند(Dodagoudar and Venkatachalam 2000). در سال (۲۰۰۳) جیاسی و همکاران در مطالعه‌ای موردی نشان دادند که چگونه می‌توان به وسیله‌ی تئوری فازی عدم اطمینان در داده‌ها را در ارزیابی پایداری شیب و تحلیل قابلیت اعتماد مدل کرد(Giasi et al. 2003).

از طرفی پارامترهای ژئومکانیکی مانند مدول تغییرشکل پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی جزو مهم‌ترین پارامترها برای طراحی و مدل‌سازی عددی می‌باشند. لازم به ذکر است تعیین دقیق این پارامترها (با توجه به تغییرپذیری آن‌ها و عدم‌قطعیت ذاتی که این پارامترها در سنگ/خاک) طراحی را با مشکل روبرو کرده است. بنابراین در این مقاله جهت تحلیل احتمالاتی و ارزیابی قابلیت اعتماد از نرم‌افزار قدرتمند Slide (که یکی از جامع‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل پایداری شیروانی به همراه تحلیل آب زیرزمینی است) استفاده شده است. از طرفی کسانی که با روش‌های پیچیده قابلیت اعتماد آشنا هستند به خوبی می‌دانند که فرمول‌نویسی روابط روش‌های قابلیت اعتماد در اکسل یا حتی نرم‌افزار متلب (برای مدل‌های هندسی پیچیده مانند سد رودبار لرستان) کار بسیار دشواری است. اما این نرم‌افزار با توجه به قابلیت استفاده از توزیع‌های احتمالاتی مختلف قادر به مدلسازی احتمالاتی مسائل پیچیده پایداری شیروانی می‌باشد. در این مقاله به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد سد خاکی رودبار لرستان (با کمک نرم‌افزار Slide) از روش ترکیبی شبیه‌سازی مونت‌کارلو و روش‌های مختلف تعادل حدی استفاده شده است.

۲. معرفی روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

به دلیل وجود تغییرپذیری خواص فیزیکی و مقاومتی سنگ‌ها و خاک‌ها، و همچنین بروز خطا در اندازه‌گیری‌ها، موجب شده که کاربر تحلیل‌های احتمالاتی در مهندسی سنگ و ژئوتکنیک در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار بگیرد. به طور کلی روش‌های تحلیل احتمالاتی به پنج گروه روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی، روش‌های تقریبی، روش المان محدود تصادفی و روش‌های شبیه‌سازی تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از پرکاربردترین روش‌های شبیه‌سازی، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌باشد. در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، شاخص‌های قابل اطمینان از شبیه‌سازی فرایند واقعی و با توجه به رفتار اتفاقی سیستم برآورد می‌شود. بنابراین در روش‌های شبیه‌سازی با یک مسأله به صورت تعدادی آزمایش‌های شبیه تجربیات واقعی برخورد می‌شود و در برآورد احتمالات و سایر شاخص‌ها از روش شمارش تعداد وقوع رخدادها استفاده می‌شود. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، روشی بسیار قدرتمند برای مهندسین است و تنها به معلومات اولیه‌ای از آمار و احتمال برای برآورد ریسک و قابلیت اطمینان در مسائل پیچیده‌ی مهندسی نیازمند است. این روش، شامل قسمت‌های زیر است(Phoon 2008):

۱. تعریف مسأله در قالب متغیرهای تصادفی
۲. کمی کردن ویژگی‌های احتمالاتی در تمام متغیرهای تصادفی در قالب تابع چگالی احتمال
۳. تولید اعداد تصادفی
۴. حل مسأله به صورت قطعی برای هر یک از گروه‌های اعداد تصادفی تعیین شده در مرحله‌ی قبل که این مرحله آزمایش عددی نامیده می‌شود.
۵. استخراج پارامترهای احتمالاتی شامل قابلیت اعتمادپذیری و احتمال گسیختگی

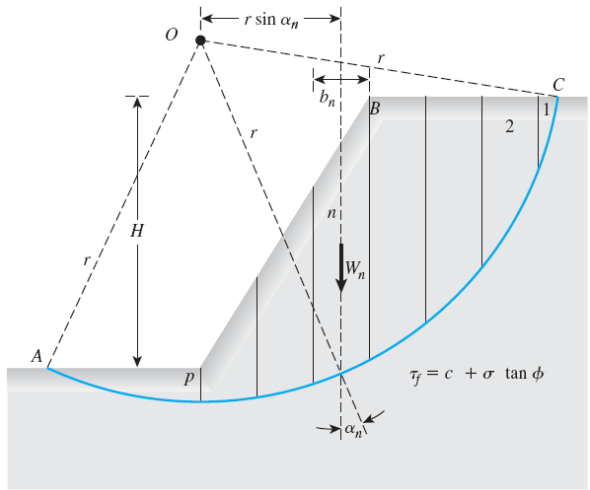
۳. معرفی روش تعادل حدی

روش تعادل حدی از پرکاربردترین روش‌های تحلیل پایداری شیب می‌باشد. در این روش توده‌ی لغزنده، به تعدادی قطعه‌ی قائم تقسیم می‌شود و تعادل هر قطعه به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱ توده لغزنده و قطعات قائم را نشان می‌دهد. عرض قطعات لازم نیست مساوی باشد و برای قطعات در امتداد عمود، ضخامت یک فرض می‌شود. در این روش می‌توان ناهمگنی خاک و فشار آب حفره‌ای را در

www.SID.ir

Archive of SID

محاسبات منظور کرد. برای هر قطعه سه معادله‌ی تعادل شامل تعادل لنگر، تعادل نیروها در جهت قائم و تعادل نیروها در جهت افقی نوشته می‌شود. برای حل این معادلات و برخورد با مجهولات مسئله، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که یا فرض‌های ساده‌کننده‌ای به کار می‌گیرند و یا از بعضی نیروهای داخلی صرف‌نظر می‌کنند. در این مقاله از روش‌های تعادل حدی ساده شده‌ی بیشاپ، فلنیوس، اسپنسر و جانبو تصحیح شده برای تحلیل پایداری شیب و به دست آوردن ضریب اطمینان و ترکیب آن با روش‌های احتمالاتی استفاده شده است.



شکل ۱. توده لغزنده و قطعات قائم

۴. معرفی نرم‌افزار اسلاید Slide

نرم‌افزار Slide، یکی از جامع‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل پایداری شیب به همراه تحلیل آب زیرزمینی به روش‌های: المان محدود، تحلیل نفوذپذیری، افت ناگهانی سطح آب، طراحی سیستم نگهداری، تحلیل احتمالاتی و تحلیل حساسیت است. تمامی انواع شیب‌های خاکی و سنگی، سدهای خاکی، خاکریزها و دیوارهای حائل می‌توانند در این نرم‌افزار مورد تحلیل قرار گیرد. این نرم‌افزار قابلیت گسترده‌ای در تحلیل احتمالاتی دارد و امکان انتخاب نوع تحلیل احتمالاتی نیز برای کاربران امکان‌پذیر است. در این نرم‌افزار، امکان اختصاص دادن نوع توزیع آماری برای هر کدام از پارامترهای ورودی شامل ویژگی‌های مواد، بارها و سطح آب زیرزمینی وجود دارد. احتمال ریزش و شاخص قابلیت اطمینان در تحلیل احتمالاتی از قبیل روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو محاسبه می‌شود که نوعی اندازه‌گیری کمی از ریزش را در طراحی شیب نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت در این نرم‌افزار به کاربر امکان تعیین اثر هر یک از متغیرها بر روی فاکتور ایمنی را می‌دهد (تعیین آنالیز حساسیت). در نرم‌افزار Slide، امکان استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری شیب از قبیل: روش بیشاپ، روش جانبو، روش اسپنسر و سایر روش‌ها به طور همزمان وجود دارد. یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین ویژگی‌های این نرم‌افزار، امکان اصلاح شیب به روشی آسان است که با صرف کم‌ترین زمان می‌توان اصلاح شیب را بر روی مدل اعمال کرد. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این نرم‌افزار عبارتند از:

- امکان جست‌وجوی سطح لغزش دایره‌ای و غیردایره‌ای.
- امکان تعریف انواع معیار شکست برای مواد استفاده شده در مدل‌سازی.
- امکان استفاده از تحلیل برگشتی به منظور یافتن نیروی مورد نیاز برای پایدارسازی شیب با توجه به فاکتور ایمنی مد نظر طراحی.
- امکان مشاهده انواع تفسیرهای حاصل از نتایج تحلیل و ترسیم نمودار برای پارامترهای مختلف.
- امکان تعریف بارهای خارجی با توزیع‌های یکنواخت و غیریکنواخت به همراه بارهای لرزه‌ای.
- امکان تعریف آماری ویژگی‌های مربوط به مواد، سیستم نگهداری، بارلرزه‌ای، سطح آب و ترک کششی.

۵. معرفی سد خاکی رودبار لرستان

محل پروژه سد رودبار در استان لرستان و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز قرار دارد. شکل ۲ محل قرارگیری پروژه سد روی نقشه ایران را نشان می‌دهد

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۲. محل قرارگیری پروژه سد رودبار روی نقشه ایران

سد رودبار لرستان بعنوان یک سد خاکی با هسته رسی، در مختصات جغرافیایی ″۷′۴۱°۴۹ طول شرقی و ″۲۳′۵۴°۳۲ عرض شمالی در محدوده رشته کوه زاگرس در غرب ایران واقع شده است. رودخانه رودبار پس از طی حدود ۳۳ کیلومتر در جهت جنوب شرقی به محل ساختگاه سد رسیده و سپس به صورت یک چرخش U شکل (که از این پس رودخانه الکن شروع می‌شود) بـه محـل پیشنهادی نیروگاه می‌رسد که تقریباً در فاصله ۳ کیلومتری پایین‌دست محور سـد واقع شـده اسـت. این چرخش، اختلاف ارتفاعی را درحدود ۳۰۰ متر بین سد و محل نیروگـاه کـه در مجـاورت روسـتای محمدآباد قرار گرفته ایجاد می‌نماید. هدف از احداث سد و نیروگاه استفاده از این پتانسیل طبیعی به همراه پتانسیل ایجاد شـده در اثر شکل‌گیری مخزن سد به منظور تولید انرژی برق‌آبی بـا ظرفیـت نـصب ۴۵۰ مگـاوات مـی‌باشـد. جدول ۱ مشخصات فنی سد رودبار لرستان را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات فنی سد رودبار لرستان

Properties	Value
Height of foundation	155 m
Width foundation	720 m
Crown length	185 m
Crown width	15 m
Crown level	1765 meters above sea level
Normal level	1756 meters above sea level
Total tank volume	228E6 m^3
Tank area	4.11 Km^2

۶. اطلاعات و پارامترهای مورد نیاز مدلسازی

در ابتدا برای مدلسازی، اطلاعات و مشخصات ژئوتکنیک نیاز است که در جدول ۲ مشخصات ژئوتکنیکی مورد نیاز برای مدلسازی مقطع عرضی سد رودبار لرستان نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

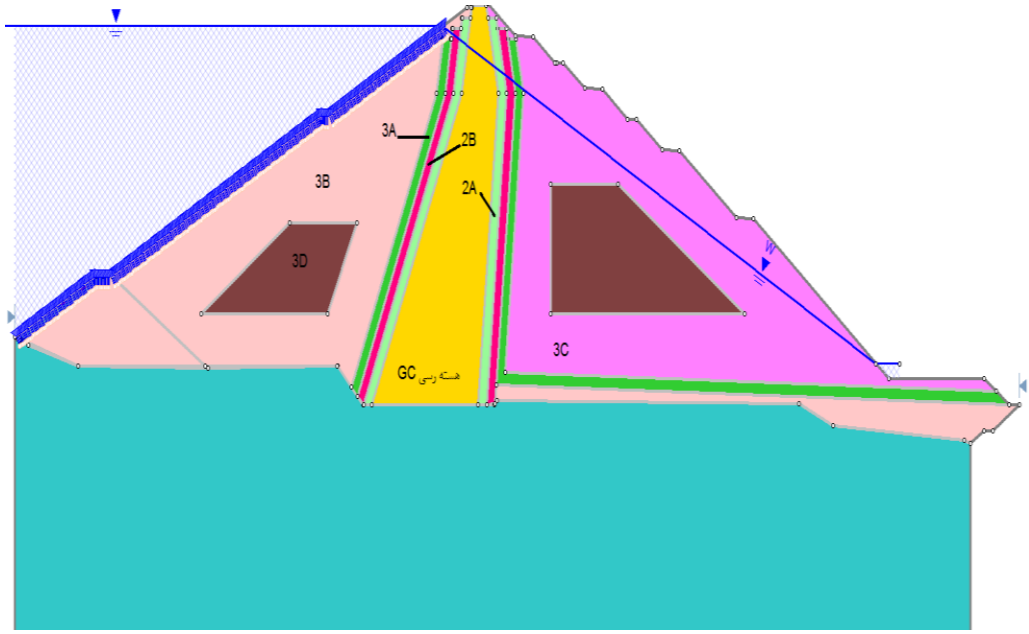
جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکی نمونه‌های مورد استفاده در سد رودبار لرستان

S.D friction angle	Friction angle (Degree)	S.D cohesion	Cohesion (Mpa)	S.D special weight	Special weight (KN/m^3)	Type of materials
6	25	10	50	1.7	21.5	Clay core GC
4	37	-	0	2	19	Filter 2A
3.4	39	-	0	1.9	19.5	Filter 2B
3	45	-	0	1.1	21	Filter 3A
3	45	-	0	1.7	21.5	Sample 3B
3.1	45	-	0	1.5	21	Sample 3B
3.1	45	-	0	1.4	20.5	Sample 3D
4.2	35	-	0	1.9	20	Dam foundation

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود میانگین وزن مخصوص مصالح انتخاب شده برای سد در بازه ۱۹ تا ۲۱/۵ (KN/m^3) می‌باشند و تمامی مصالح انتخابی بجز هسته رسی سد دارای چسبندگی صفر می‌باشند و زاویه اصطکاک مصالح مورد استفاده به استثنای پی بتنی سد، در بازه محدود بین ۳۷ تا ۴۵ درجه می‌باشند که منجر به یکپارچگی بیشتر بدنه سد و نفوذ متناسب‌تر آب و ایجاد جریان مورد پیش‌بینی و تعبیه هسته‌های مختلف برای مقابله هر چه بیشتر در مقابل افزایش نرخ نفوذ و سرعت پیشروی آب خواهد شد.

۷. مدلسازی مقطع عرضی سد

با توجه به داده‌های جدول ۲ و طبق معیار موهر کلمب به کمک نرم‌افزار Slide مدلسازی مقطع مورد نظر مطابق شکل ۳ می‌باشد. در این مدلسازی با تعریف هشت نمونه مصالح با خواص پارامترهای اندازه‌گیری شده از پی بتنی سد تا هسته رسی و فیلترها برای هر چه دقیق‌تر شدن نتایج حاصله استفاده شده است. قابل ذکر است همانطور که در مدلسازی مشاهده می‌کنید سیستم نگهداری به طول ۵ متر و فاصله ۱متر از همدیگر در بالادست سد نصب شده است و تراز آب پیش بینی شده برای ذخیره نهایی سد نیز در مدلسازی لحاظ شده است.



شکل ۳. مدلسازی براساس مشخصات ژئوتکنیکی سد رودبار لرستان

www.SID.ir

Archive of SID

۸. آماده‌سازی و محاسبه ضریب اطمینان بر مبنای روش قطعی

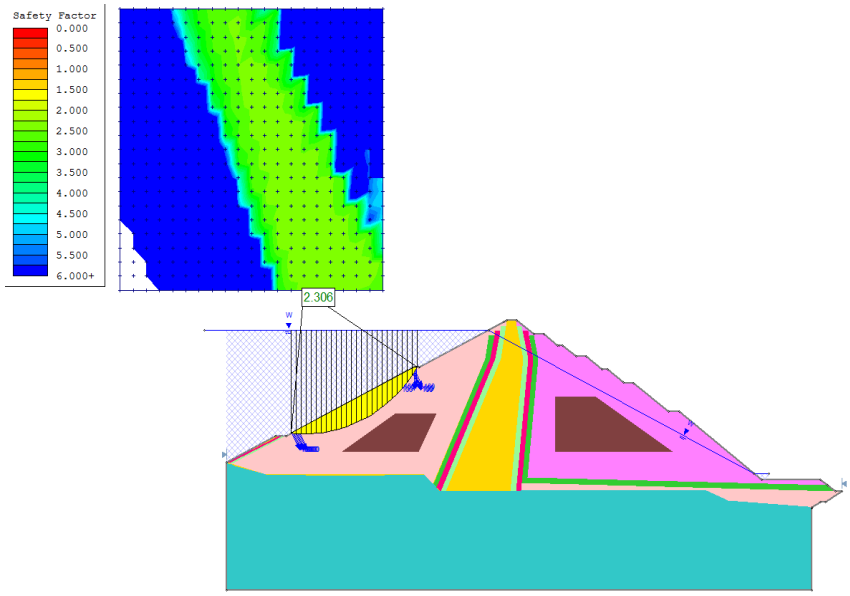
برای محاسبه ضریب اطمینان بصورت آنالیز قطعی کافیست تا نتایج حاصل از آزمایش‌ها (جدول ۲) را به عنوان مقادیر قطعی پارامترهای مورد نظر به نرم‌افزار Slide معرفی نموده و سپس ضریب اطمینان محاسبه شود. در نهایت قابل گسست‌ترین مماس بر شیب (سطح لغزش بحرانی) را که دارای کمترین ضریب اطمینان می‌باشد در شکل‌های مربوط به هر روش به همراه اطلاعات جزئی نشان داده می‌شود.

قابل ذکر است در تمامی نتایج حاصله از نرم‌افزار، تعداد قطعات عرضی برابر ۲۵ درنظر گرفته شد که دارای عرضی برابر یک بیست و پنجام طول سطح لغزش بحرانی می‌باشند. همچنین شبکه‌بندی صورت گرفته که هر تقاطع آن، مرکز کمان مورد بررسی شیب می‌باشد بصورت ۲۰ در ۲۰ می‌باشد.

در واقع در هر نوبت انجام آزمایش ۴۰۰ مرکز دایره (۴۰۰ سطح لغزش) مورد بررسی قرار خواهد گرفت که کمترین و بیشترین ضریب اطمینان ممکن را توسط رنگ‌های مختلف از قرمز تا آبی که بیانگر ضریب اطمینان صفرتا بیشتر از ۶ مقیاس‌بندی شده است. در ادامه، مدلسازی با انواع روش‌های تعادل حدی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۸-۱. مدلسازی قطعی با استفاده از روش تعادل حدی فلنیوس

همانطور که از شکل ۴ مشخص است کمترین مقدار ضریب اطمینان محاسبه شده با روش تعادل حدی فلنیوس در بالادست سد FS=۲/۳۰۶ می‌باشد که فاصله زیادی تا ناپایداری وجود دارد.

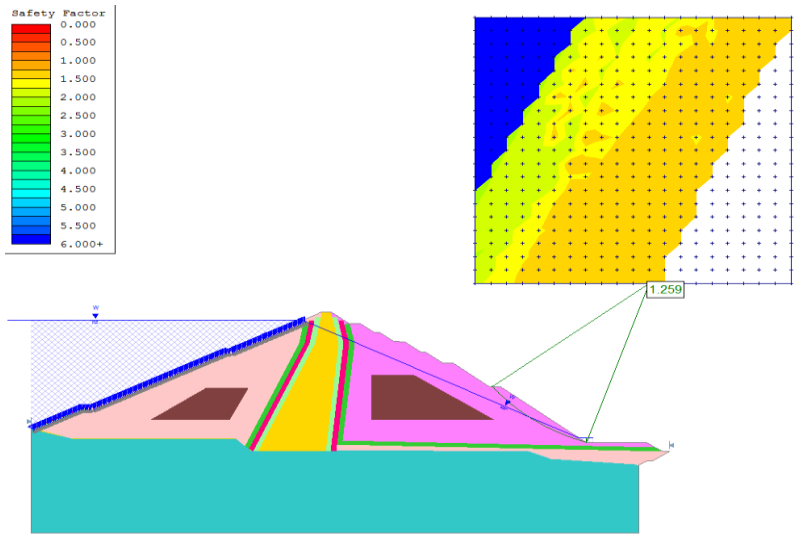


جدول ۴. نتیجه ارزیابی بالادست سد مدل شده با استفاده از روش فلنیوس

مقدار ضریب اطمینان در پایین دست سد در سطح بحرانی لغزش (مطابق شکل ۵) برابر FS=۱/۲۵۹ می‌باشد که نسبت به بالادست سد ضریب اطمینان متفاوت‌تر و کمتری دارد که در این حالت نیاز به توجه بیشتری در مورد پایداری را بیان می‌کند. همانطور که در شبکه سمت راست شکل ۵ که نمایش‌دهنده گستره‌ی تغییرات ضریب اطمینان می‌باشد، قسمت سفید رنگ در مقیاس مورد نظر (قرمز تا آبی) قرار نگرفته است زیرا کمان‌های مورد بررسی از آن نقاط سطح بسیار کوچکی را مورد تحلیل پایداری قرار می‌دهد و از این رو ضریب اطمینان در آن نقاط قابل محاسبه نمی‌باشند و در صورت محاسبه نیز اتفاق خاصی رخ نخواهد داد.

www.SID.ir

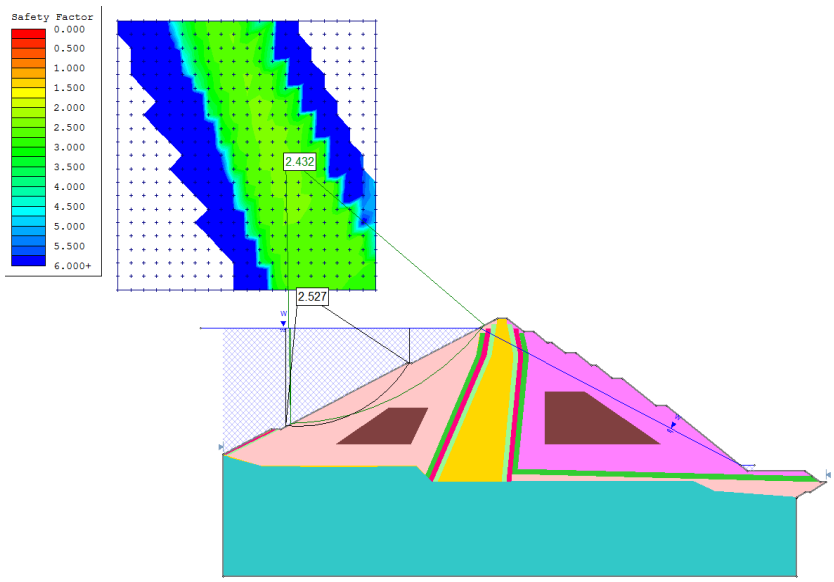
Archive of SID



شکل ۵. نتیجه ارزیابی پایین‌دست سد مدل شده با استفاده از روش فلنیوس

۸-۲. مدلسازی قطعی با استفاده از روش تعادل حدی بیشاب ساده شده

پس از مدلسازی قطعی با استفاده از روش تعادل حدی بیشاب ساده شده (شکل ۶)، کمترین مقدار ضریب اطمینان (سطح بحرانی لغزش) در بالادست سد FS=۲/۴۳۲ می‌باشد. این روش نسبت به روش فلنیوس دارای ضریب اطمینان کمی بیشتر و همچنین تا سطح گسست قطعه فاصله بیشتری را نشان می‌دهد که نشان از پایداری بیشتر آن می‌باشد. بخش‌های سفید موجود در شبکه سمت چپ عکس شبکه بدلیل مقدار بسیار کم نیروی مهاجم در سطوحی می‌باشد که کمان آنها را قطع می‌کند و موجب ضریب اطمینان بسیار بالایی می‌باشد که این ضرایب ایمنی بسیار بالا توسط نرم‌افزار حذف می‌شوند.

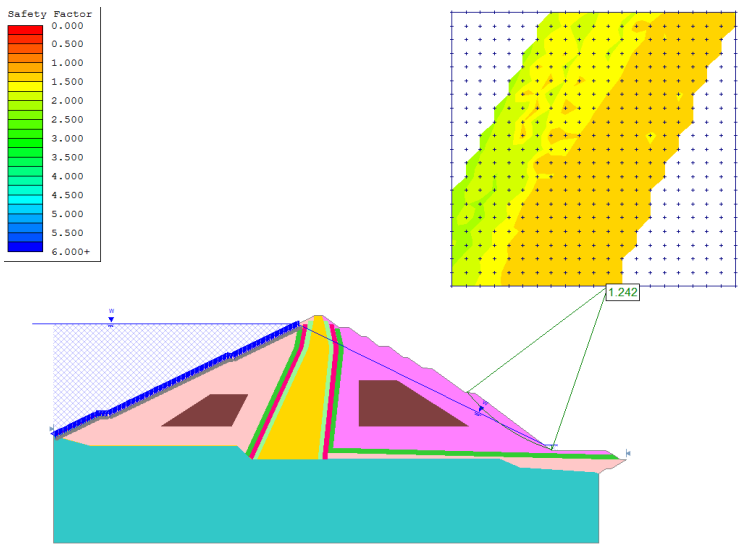


شکل ۶. نتیجه ارزیابی بالادست سد مدل شده با استفاده از روش بیشاپ ساده شده

www.SID.ir

Archive of SID

مقدار ضریب اطمینان در پایین دست سد برای بحرانی‌ترین سطح لغزش (شکل ۷) برابر FS=۱/۲۴۲ می‌باشد. همانطور که در شبکه سمت راست شکل مشخص است قسمت‌های سفید رنگ به دو دسته تقسیم می‌شوند، که قسمت سفید واقع در سمت راست شبکه به دلیل بیش از اندازه کوچک بودن سطح های قطع شده توسط کمان از آن مراکز قابل محاسبه نبوده‌اند و قسمت سفید واقع در سمت چپ شبکه بدلیل اینکه کمان سطوح واقع در پیشانی سد را قطع می‌نماید و بدلیل اینکه در سطوح مربوطه، نیروی مهاجم بسیار ناچیز می‌باشد و از طرفی ضریب اطمینان از تقسیم نیروی مقاوم به مهاجم بدست می‌آید پس هنگامی که نیروی مهاجم مقدار بسیار ناچیزی داشته باشد، مقدار عددی ضریب اطمینان عدد بسیار بالایی می‌شود، نکته‌ای که می‌توان نتیجه گرفت این است که در روش بیشاپ ساده شده، ضریب ایمنی‌های بسیار بزرگ گزارش داده نمی‌شوند و به همین دلیل نتایج حاصله قابل اطمینان‌تر خواهند بود.



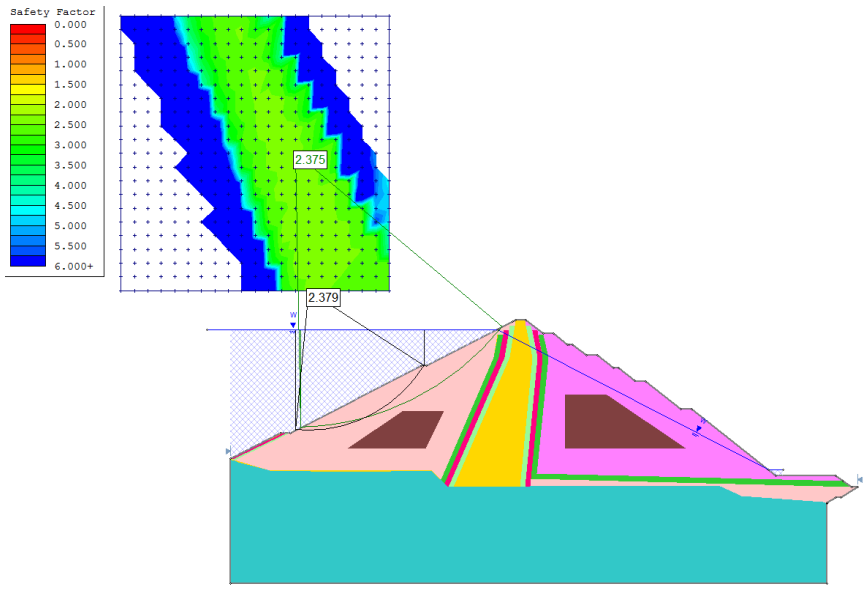
شکل ۷. نتیجه ارزیابی پایین‌دست مدل شده با استفاده از روش بیشاپ ساده شده

۸-۳. مدلسازی قطعی با استفاده از روش تعادل حدی جانبو تصحیح شده

پس از مدلسازی قطعی با استفاده از روش تعادل حدی جانبو تصحیح شده (شکل ۸)، بحرانی‌ترین سطح لغزش دارای ضریب اطمینان FS=۲/۳۷۶ می‌باشد که در نقاط همسان با روش‌های قبل (مرکز دایره مماس بر شیب) مقدار ضریب اطمینان را اندکی کمتر محاسبه می‌کند. نقاط سفید موجود در شبکه سمت چپ شکل نیز به همان دلیل بسیار ناچیز بودن نیروی مهاجم و مقادیر بسیار بالای ضریب اطمینان بدست آمده توسط نرم‌افزار حذف می‌شوند که نشان از برتری و محدودتر بودن بازه بررسی به مقادیر نزدیک به واقعیت ضریب اطمینان در روش جانبو تصحیح شده نسبت به روش فلنیوس می‌باشد.

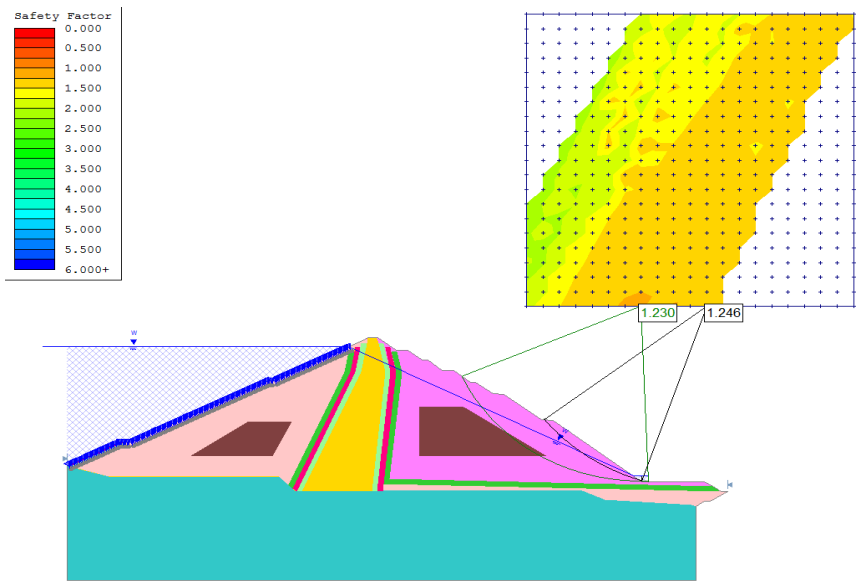
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸. نتیجه ارزیابی بالادست سد مدل شده با استفاده از روش جانبو تصحیح شده

همچنین همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است ضریب اطمینان سطح بحرانی لغزش در پایین‌دست سد برابر با FS=۱/۲۳۰ می‌باشد که تفاوت نتیجه‌ی این روش با روش‌های قبل در مقدار حداقلی ضریب اطمینان می‌باشد. در صورتی که در مرکز کمان لغزش مورد اندازه‌گیری را با مرکز حداقلی کمان لغزش شیروانی روش‌های قبل هم مختصات شود (شکل ۸) چنین نتیجه می‌شود که اختلاف ناچیزی بین دو روش وجود دارد.



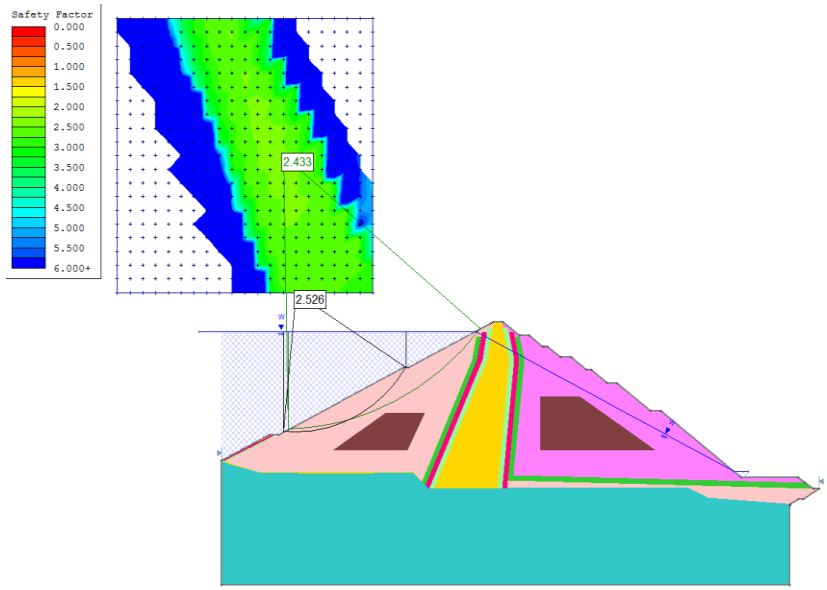
شکل ۹. نتیجه ارزیابی پایین‌دست سد مدل شده با استفاده از روش جانبو تصحیح شده

www.SID.ir

Archive of SID

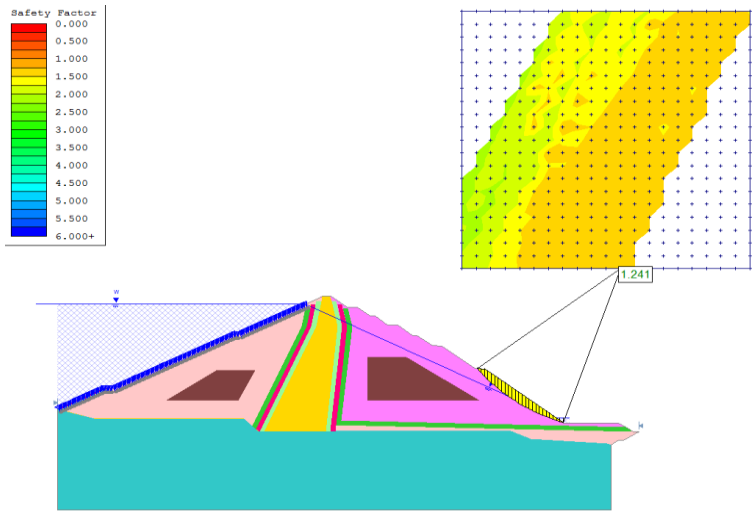
۸-۴. مدلسازی قطعی با استفاده از روش تعادل حدی اسپنسر

یکی از کامل‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های محاسبه ضریب اطمینان بصورت قطعی، روش اسپنسر می‌باشد زیرا که در این روش عوامل هندسی شیروانی، هیدرولوژی و خواص مقاومتی توده سنگ مورد استفاده قرار گرفته می‌شود. در صورتی که با روش‌های قطعی دیگر در این مورد مطالعاتی مورد مقایسه قرار داده شود، به شباهت بسیار زیاد در نتایج میان این روش و بیشاپ ساده شده پی برده می‌شود. مطابق شکل ۱۰ ضریب اطمینان برای سطح بحرانی لغزش در بالادست برابر FS=۲/۴۳۳ می‌باشد. همچنین نقاط سفید در شبکه سمت راست تصویر تماماً بدلیل جزئی بودن مقدار نیروی مهاجم و مقدار عددی بسیار بالای ضریب اطمینان توسط نرم‌افزار حذف شده‌اند.



شکل ۱۰. نتیجه ارزیابی بالادست سد مدل شده با استفاده از روش اسپنسر

همچنین همانطور که در شکل۱۱ نشان داده شده است ضریب اطمینان سطح بحرانی لغزش در پایین‌دست سد برابر با FS=۱/۲۴۱ می‌باشد.



شکل ۱۱. نتیجه ارزیابی پایین‌دست سد مدل شده با استفاده از روش اسپنسر

www.SID.ir

Archive of SID

۹. مدلسازی احتمالاتی بر مبنای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (غیرقطعی)

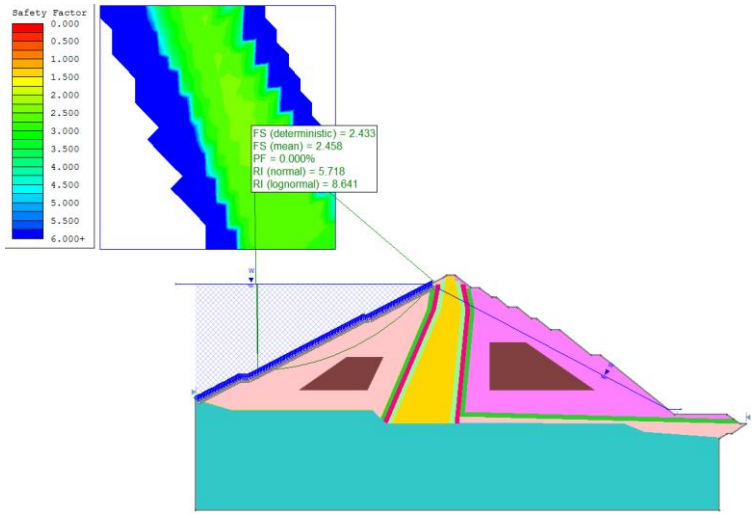
تغییرپذیری خواص فیزیکی و مقاومتی خاک (وزن مخصوص، نفوذپذیری، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی) و مقاومت برشی و همچنین بروز خطا در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی سبب می‌شود که نتوان منطقه مورد آزمایش را معرف کل منطقه دانست. لذا بدلیل اهمیت پایداری سدهای خاکی، استفاده از تحلیل ریسک و توزیع احتمالاتی در بررسی ضریب ایمنی شیب‌ها در مقابل لغزش برای سدهای خاکی امری ضروری است.

در روش قطعی (بدون توزیع احتمالاتی) برای بررسی پایداری شیروانی سدها، عدم قطعیت پارامترهای ورودی به صورت کمی اعمال نمی‌شود و برای لحاظ کردن عدم قطعیت مقادیر محافظه‌کارانه‌ای برای متغیرهای ورودی در نظر گرفته می‌شود که ممکن است بیش از میزان موردنیاز و یا کمتر از مقدار لازم باشد. در روش‌های مبتنی بر ریسک از توزیع احتمالاتی برای متغیرهای فیزیکی و مقاومتی خاک استفاده شده است که منجر به یافتن توزیع احتمالاتی برای ضریب ایمنی شیروانی می‌شود که به کمک آن می‌توان احتمال ناپایداری شیب را به صورت کمی مشخص نمود. در روش‌های قابلیت اعتماد علاوه بر ارائه دیدگاه واقع‌گرایانه نسبت به سطح ایمنی سد، امکان بهینه‌سازی فنی و اقتصادی را فراهم می‌آورد، بطوری که در اغلب موارد طرح‌هایی که منجر به فاکتور ایمنی بالاتری می‌شوند دارای هزینه بالاتر و طرح‌هایی که دارای سطح ایمنی پایین‌تری هستند هزینه کمتری دارند. یکی از پرکاربردترین روش‌های بررسی پایداری شیروانی‌ها مبتنی بر توزیع احتمالاتی، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌باشد. در این روش طی یک روند تکراری با بکارگیری مدل‌های قطعی بررسی پایداری شیروانی و با توجه به تابع توزیع احتمالاتی پارامترهای ورودی، تعداد زیادی جواب برای مسئله بدست می‌آید که در نهایت منجر به تعیین توزیع احتمالی پاسخ‌های مسئله می‌شود. در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ابتدا بر اساس تابع توزیع احتمال برای پارامترهای ورودی تعداد زیادی مقادیر تصادفی انتخاب می‌شود، سپس احتمال شکست محاسبه مشود. در ادامه مقدار میانگین، واریانس ضریب اطمینان و شکل تابع چگالی احتمال ضریب اطمینان نیز بدست آورده می‌شود.

در این مقاله، پس از مدل‌سازی سد رودبار با روش قطعی، برای اجرای آنالیز احتمالاتی بر مبنای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، می‌بایست نتایج حاصل از پارامترهای ژئوتکنیک با استفاده از تعداد زیادی نمونه به توزیع مناسبی نسبت داده شد. سپس با توجه با تغییرپذیری و عدم قطعیت برای پارامترهای چسبندگی، وزن مخصوص و زاویه اصطکاک در سد رودبار بهترین و مناسب‌ترین توزیع انتخاب شد. ماحصل این توزیع انحراف‌معیار و واریانس پارامتر موردنظر می‌باشد که در واقع همان بازه‌ای است که موردنیاز روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو است که در آن بازه اقدام به عددسازی و انجام محاسبات بر مبنای اعداد می‌باشد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، میزان چسبندگی بغیر از نمونه هسته رسی همگی دارای مقدار چسبندگی صفر می‌باشند. به همین دلیل بجز نمونه اول (هسته رسی)، در مابقی نمونه‌ها انحراف معیار در چسبندگی لحاظ نمی‌شود. بنابراین فقط در مورد نمونه اول هر سه پارامتر دارای پیش شرط لازم برای مدل‌سازی احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو را دارا می‌باشد و در مابقی نمونه‌های جدول فقط وزن مخصوص و زاویه اصطکاک خاک‌ها لحاظ می‌شود. شکل ۱۲ محاسبات برمبنای روش اسپنسر با استفاده از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو بدست آمده است.

www.SID.ir

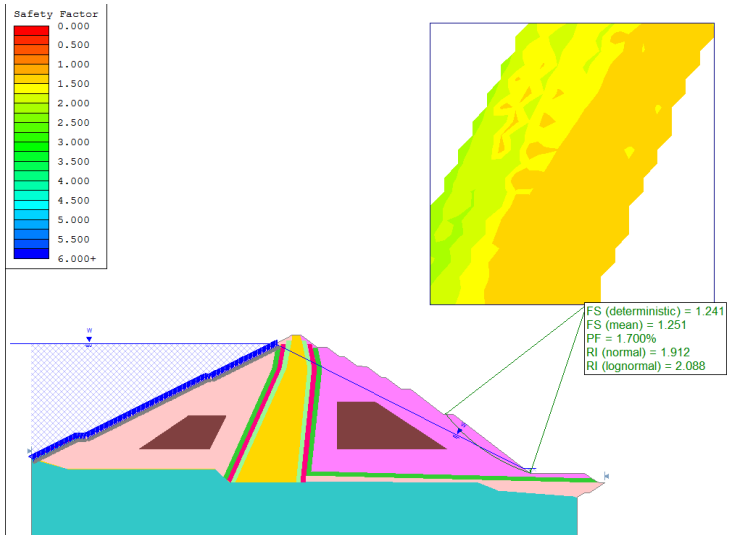
Archive of SID



شکل ۱۲. نتیجه ارزیابی بالادست سد مدل شده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر پایه اسپنسر

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نتیجه محاسبات شامل ضریب اطمینان قطعی، ضریب اطمینان میانگین، احتمال شکست، شاخص قابلیت اعتماد بر اساس رابطه توزیع نرمال و آخرین مورد شاخص قابلیت اعتماد براساس رابطه لاگ نرمال می‌باشد، که اگر ضریب اطمینان حاصله در این حالت را با روش‌های قطعی مورد مقایسه قرار دهیم، تقریباً از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد و همانطور که در روش‌های قطعی نیز مشهود بود، انتظار می‌رود احتمال شکست در بالادست سد صفر می‌باشد یعنی تحت شرایط کنونی و بدون تغییرات ناگهانی امکان لغزش وجود ندارد.

همچنین نتایج محاسبه برای پایین دست سد با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر مبنای روش اسپنسر شکل ۱۳ خواهد بود.



شکل ۱۳. نتیجه ارزیابی پایین‌دست مدل شده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر پایه اسپنسر

در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد تعداد نمونه‌گیری بر پایه ضریب اطمینان پایداری سد است به گونه‌ای که با افزایش تعداد نمونه‌گیری‌ها به منظور همگرایی ضریب اطمینان و احتمال شکست نتایج دقیق‌تری بدست خواهد آمد. جدول ۳ تعداد نمونه‌گیری بر

www.SID.ir

Archive of SID

پایه ضریب اطمینان پایداری سد را با شبیه‌سازی مونت‌کارلو به روش اسپنسر را نشان می‌دهد.

جدول ۳. تاثیر تعداد نمونه‌گیری بر پایه شبیه‌سازی مونت‌کارلو به روش اسپنسر

Confidence factor barrier upstream of the spencer method	Confidence factor barrier downstream of the spencer method	Number of samples
2.43345	1.24108	500
2.43347	1.24111	1000
2.43343	1.24116	10000
2.43342	1.24117	100000
2.43342	1.24117	1000000
2.43342	1.24117	1500000

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است پس از تعیین ۱۰۰۰۰۰ نمونه، با افزایش تعداد نمونه‌گیری در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو تغییری در مقدار ضریب اطمینان ایجاد نمی‌شود. بنابراین حداقل تعداد نمونه لازم در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تعیین سطح لغزش بصورت احتمالاتی برابر ۱۰۰۰۰۰ است. در نهایت نتایج به دست آمده از تحلیل احتمالاتی توسط نرم‌افزار در پایین‌دست و بالادست سد با استفاده از ترکیب روش‌های مختلف تعادل حدی و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول ۴. نتایج بدست آمده از تحلیل احتمالاتی توسط نرم‌افزار اسلاید توسط روش مونت‌کارلو

Barrier downstream				Barrier upstream				Calculated parameters
Spencer	Bishop	Janbo	Flenius	Spencer	Bishop	Janbo	Flenius	Methods
1.24	1.24	1.22	1.25	2.43	2.43	2.37	2.30	Definite safety factor
0.134	0.134	0.110	0.136	0.255	0.255	0.249	0.24	S.D safety factor
1.245	1.24	1.23	1.26	2.45	2.44	2.39	2.32	Mean safety factor
0.887	0.887	0.906	0.902	1.76	1.76	1.72	1.67	Minimum safety factor
1.74	1.74	1.67	1.76	3.41	3.41	3.32	3.22	Maximum safety factor
2.24	2.34	1.08	1.59	0	0	0	0	Probability of failure (percent)
1.84	1.85	2.10	1.95	5.67	5.66	5.57	5.45	Reliability index (normal distribution)
2.00	2.02	2.29	2.15	8.55	8.55	8.33	8.04	Reliability index (lagnormal distribution)

۱۰. نتیجه‌گیری

مسئله ی مهم و حائز اهمیت در شیوه های کنونی طراحی سد، وجود عدم قطعیت‌های موجود در ساخت سد است که روش های معمول طراحی سد آن‌ها را در نظر نمی گیرند. گاهی اوقات این عدم قطعیت‌ها به اندازه‌ای است که باعث کاهش اعتبار محاسبات می‌شود. از این نیاز به استفاده از روش‌های احتمالاتی برای در نظرگرفتن این عدم قطعیت‌ها امری محسوس می‌باشد. در تحقیق موجود به منظور استفاده از روش احتمالاتی در سدهای خاکی، سد خاکی رودبار لرستان به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب شده و پارامترهای چسبندگی، زاویه ی اصطکاک داخلی و وزن مخصوص به عنوان منابع عدم قطعیت در سد در نظر گرفته شد.

در ادامه با توجه به مدلسازی صورت گرفته و درنظر گرفتن تمامی اجزای سد برای هر چه دقیق‌تر شدن مدلسازی و به دنبال آن نتایج بدست آمده از دو طریق روش‌های قطعی و غیرقطعی (احتمالاتی) پایداری سد خاکی رودبار لرستان مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از مدلسازی و بررسی شرایط پایداری سد به روش‌های مختلف قطعی جانبو، بیشاپ، فلنیوس، اسپنسر و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو، در قسمت بالادست سد با توجه به صفر بودن احتمال شکست و بالا بودن شاخص قابلیت اعتماد نیازی به نگهداری دیواره‌های سد ندارد. ولی در رابطه با دیواره پایین‌دست سد با توجه به غیر صفر بودن احتمال شکست (تقریباً ۲ درصد) احساس نیاز به تقویت این دیواره را افزایش می‌دهد ولی تا مادامی که حداقل احتمال شکست زیر ۵ درصد باشد، احتمال شکست نیازمند تصمیم‌گیری جدی نمی‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

Alonso E.E., 1976, "Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays", Geotechnique, 26: 453-472.

Bhattacharya G., Jana D., Ojha S., Chakraborty S., 2003, "Direct search for minimum reliability index of earth slopes", Computers and Geotechnics, 30: 455-462.

Cao Z., Wang Y., Li D. (2017) "Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet". In: Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis. Springer, pp 147-167

Cho S.E., 2013, "First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes", Engineering Geology, 154: 98-105.

Christian J.T., Ladd C.C., Baecher G.B., 1994, "Reliability applied to slope stability analysis", Journal of Geotechnical Engineering, 120: 2180-2207.

Dodagoudar G., Venkatachalam G., 2000, "Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory", Computers and Geotechnics, 27: 101-115.

Erzin Y., Cetin T., 2013, "The prediction of the critical factor of safety of homogeneous finite slopes using neural networks and multiple regressions", Computers & Geosciences, 51: 305-313.

Farah K., Ltifi M., Hassis H., 2011, "Reliability analysis of slope stability using stochastic finite element method ,"Procedia Engineering, 10: 1402-1407.

Giasi C., Masi P., Cherubini C., 2003, Probabilistic and fuzzy reliability analysis of a sample slope near Aliano, Engineering Geology, 67: 391-402.

Hammah R., Yacoub T., Curran J. "Probabilistic slope analysis with the finite element method". In: 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium, 2009. American Rock Mechanics Association ,

Hong H., Roh G., 2008, "Reliability evaluation of earth slopes", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 134: 1700-1705.

Jha S.K., 2015, "Effect of spatial variability of soil properties on slope reliability using random finite element and first order second moment methods", Indian Geotechnical Journal, 45: 145-155.

Johari A., Fazeli A., Javadi A., 2013, "An investigation into application of jointly distributed random variables method in reliability assessment of rock slope stability", Computers and Geotechnics, 47: 42-47.

Kacewicz M., 1987, "Fuzzy slope stability method", Mathematical Geology, 19: 757-767.

Li D.-Q., Jiang S.-H., Cao Z.-J., Zhou W., Zhou C.-B., Zhang L.-M., 2015, "A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties", Engineering Geology, 187: 60-72.

Li D.-Q., Xiao T., Cao Z.-J., Phoon K.-K., Zhou C.-B., 2016, Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis, Applied Mathematical Modelling, 40: 5216-5229.

Li D., Chen Y., Lu W ,.Zhou C., 2011, "Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables", Computers and Geotechnics, 38: 58-68.

Liang L., Xue-song C., 2012, "The location of critical reliability slip surface in soil slope stability analysis", Procedia Earth and Planetary Science, 5: 146-149.

Low B., Lacasse S., Nadim F., 2007, "Slope reliability analysis accounting for spatial variation", Georisk, 1: 177-189.

Malkawi A.I.H., Hassan W.F., Abdulla F.A., 2000" ,Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability", Structural Safety, 22: 161-187.

Phoon K.-K. (2008) Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications. CRC Press ,

Radhi M.M., Pauzi N.M., Omar H. "Probabilistic approach of rock slope stability analysis using Monte Carlo simulation". In: International Conference in Construction and Building Technology, Malayzya, 2008 .

Saboya Jr F., da Glória Alves M., Pinto W.D., 2006, "Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic", Engineering Geology, 86: 211-224.

www.SID.ir