

بررسی پایداری شیروانی در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی در بدنه سد خاکی با استفاده از

نرم افزارهای Gio Studio و Plaxis (مطالعه‌ی موردی سد کبودال)

حسین حکیمی خانسر*^۱، سیدحسن گلماپی^۲ و مجید شیداییان^۳

(۱) کارشناس ارشد، گروه سازه های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

(۳) دانشجوی دکتری، گروه سازه های آبی، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران.

نویسنده مسئول: Hakimi1904@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۹/۲۳

چکیده

مسئله نشست و پایداری شیروانی‌ها از موضوعات مهم و ضروری در سدهای خاکی می‌باشند، لذا در این راستا نرم‌افزارهای متعددی برای پیش‌بینی و محاسبه دبی نشست تهیه شده که نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی به زمان و هزینه کمتری برای آنالیز نشست قبل از احداث سد خاکی نیاز دارند. در این پژوهش ضرایب اطمینان برای پایداری شیروانی سد خاکی کبودال در نرم‌افزار Plaxis دو بعدی در حین و پایان ساخت، پرشدن، افت سریع و آرام مخزن و مخزن نیمه پر بررسی شد. با استفاده از نرم‌افزار Plaxis پایداری شیروانی بالادست و پایین‌دست برای مراحل مختلف ساخت به‌دست آمد. نتایج بیان‌گر پایداری شیروانی سد در مراحل مختلف ساخت و مهم‌تر از همه در مرحله‌ی پایان ساخت است. به‌طور کلی نتایج آنالیزها، رفتار مناسب سازه سد را در برابر شرایط مختلف بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی تأیید می‌نماید. ضریب اطمینان با افزایش ارتفاع خاک‌ریزی کاهش می‌یابد که در آخرین مرحله ی خاک‌ریزی به عدد ۱/۴۹۸ می‌رسد. با مقایسه‌ی نتایج ضریب اطمینان پایداری شیروانی در مرحله‌ی پایان ساخت با معیار گروه مهندسی ارتش آمریکا تضمین می‌شود. بررسی پایداری شیروانی، ناپایداری شیروانی بالادست نزدیک مخزن را نشان می‌دهد، که ضرورت ایجاد بتن‌ریزی در این منطقه مشهود است. همچنین کارایی روش و نرم‌افزارهای به‌کار رفته جهت مدل نمودن رفتار سدهای خاکی در حین ساخت مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، سد کبودال، Plaxis و نشست.

مقدمه

پایداری شیروانی‌ها از مهم‌ترین مسائلی است که در مراحل مختلف ساخت و بهره‌برداری باید مورد بررسی قرار گیرد (حصیرچیان و همکاران، ۱۳۹۱). ارزیابی پایداری شیروانی‌های خاکی از قدیمی‌ترین مسائل مطرح در حیطه مهندسی خاک بوده و تا کنون برای آن روش‌های مختلفی مانند روش‌های مبتنی بر اصول تعادل حدی، روش اجزاء محدود، روش تفاضل محدود و ... توسعه یافته است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای GeoSlope (۲۰۰۷) و Plaxis و بر اساس روش‌های مذکور، برای شیروانی سد کبودال آنالیز پایداری انجام گرفت و با نتایج حاصله مقایسه و بررسی شده است. در این مطالعه ضرایب اطمینان در برابر لغزش و گسیختگی در شیب‌های سد خاکی کبودال با مشخصات و هندسه ثابت و به روش Grid & radius به دست آمد. جهت پی بردن به عملکرد اینگونه نرم‌افزارها در این بخش با مدنظر قراردادن اطلاعات سد خاکی کبودال، مدلی از سد فوق با مشخصات مصالح و ژئوتکنیک واقعی در نرم‌افزارهای Plaxis و seep/w که هر دو مبتنی بر المان محدود بوده که seep/w مختص آنالیز جریان و تراوش و Plaxis برای تحلیل دو بعدی تغییر شکل، پایداری و تحلیل های دینامیکی در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد، ترسیم شده و تحلیل و محاسبه دبی نشت با هر دو نرم-افزار صورت گرفت که این تحلیل در نرم‌افزار seep/w با دو نوع مش‌بندی مثلثی و مربعی انجام و در نرم‌افزار Plaxis با مش‌بندی مثلثی صورت گرفت.

امروزه سدهای بزرگ اعم از خاکی یا بتنی از مهم‌ترین سازه های آبی به شمار می روند که در تأمین آب مورد نیاز جوامع انسانی نقش اساسی را ایفا می‌کنند. بنابراین پایداری سدها ب هویژه در دهه های اخیر مورد توجه خاص مهندسان طراح سدهای خاکی و بتنی بوده است. طبیعت متفاوت سازندهای طبیعی در محل احداث سدهای خاکی از یک طرف و رفتار پیچیده مصالح خاکی سد از طرف دیگر ارزیابی کمی و کیفی پارامترهای رفتاری خاک را ضروری می نماید. تحقیقات نشان می دهند که ارزیابی غلط این گونه پارامترها اغلب علت به مخاطره افتادن پایداری سدهای خاکی بوده است. نصب ابزار دقیق و رفتارنگاری آنها در دوران ساخت و دوره بهره برداری اولیه کمک شایان به ارزیابی این پارامترها می‌کند (ASCE Task Committee, 2000). اهمیت ویژه ابزار دقیق در سدها به نقش آنها در کنترل پایداری کوتاه و دراز مدت سدها بر می‌گردد، به‌گونه‌ای که در رفتارنگاری سدها مورد توجه مهندسين واقع شده است (US Army Corps of Engineers, 1995).

روش اجزای محدود در حال حاضر یکی از قوی‌ترین روش‌های عددی در مسائل مهندسی خصوصاً محیط‌های پیوسته است که در شرایط کنونی مورد استفاده دانشمندان قرار می‌گیرد. یکی از گام‌های مهم در تحلیل سدهای خاکی تحلیل شبه استاتیکی می‌باشد. تحلیل شبه استاتیکی سدهای خاکی روشی ساده و معمول در مطالعه پایداری لرزه‌ای سدهای

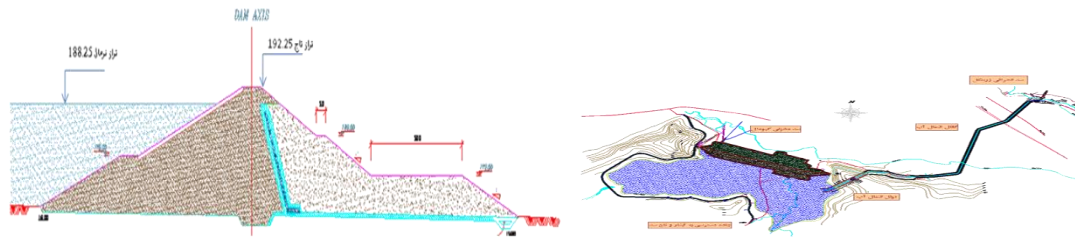
خاکی می‌باشد. بر اساس این روش بررسی پایداری سد در مقابل زلزله به روش شبه‌استاتیکی و با معادل‌سازی نیروی زلزله با یک نیروی ثابت افقی انجام می‌شود و بدین ترتیب ضریب اطمینان پایداری سد در مقابل زلزله محاسبه می‌شود. نیروی معادل استاتیکی مذکور از حاصل ضرب وزن گوه مورد بررسی در یک ضریب ثابت که به ضریب شتاب افقی تحلیل شبه-استاتیک موسوم است، به دست می‌آید. انتخاب صحیح و واقع بینانه ضریب شبه‌استاتیک مذکور، مهم‌ترین مرحله در مطالعه رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی به روش شبه‌استاتیکی می‌باشد.

محققین پیشین و همچنین آیین‌نامه‌های طراحی سدهای خاکی غالباً برای انتخاب ضریب مذکور، بدون توجه به وضعیت لرزه‌خیزی ساختگاه و مشخصات دینامیکی سازه، ارقام ثابتی ارائه کرده‌اند. (حکیمی خانسر و همکاران، ۱۳۹۲). حصیرچیان و همکاران (۱۳۸۸)، مقایسه عددی مدل‌های المان محدود و تفاضلات محدود در تحلیل ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که دقت بیش‌تر المان محدود در مقایسه با تفاضلات محدود است و جواب‌های محافظه کارانه‌تری را نتیجه می‌دهد (صادقی و اصلانی، ۱۳۸۸)، تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای سنگریزه‌ای با هسته بتن آسفالتی را انجام داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که به علت کم بودن ضخامت هسته بتن آسفالتی در قیاس با هسته رسی، تغییر مکان‌ها و نشست‌های این سدها بسیار کمتر از انواع دیگر است (محمدی‌ها و همکاران ۱۳۸۹)، بررسی عددی پایداری شیروانی سد خاکی بوستان در مرحله ساخت با استفاده از روش المان‌های محدود با نرم-افزار Plaxis را انجام داده و به این نتیجه رسیدند که سد در تمام مراحل ساخت و آبیگری پایدار بوده و نشست‌ها ندارد. جهانی و همکاران (۱۳۹۱)، پایداری سد آسفالت هسته‌ای مجیران را در دو حالت استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از آنالیز برگشتی سد با ابزار دقیق تطابق خوبی باهم دارند. و سد در برابر زلزله‌های اعمالی ایمن است.

مواد و روش‌ها

معرفی سد

سد کبود وال همگن و دارای فیلتر و زهکش مایل است. مخزن آن خارج از حوضه ی آبریز اصلی است، طول تاج ۱۳۷۲ متر و حداکثر ارتفاع از پی ۳۳/۲۵ متر است. ارتفاع از بستر ۳۰/۵ متر و هم چنین تراز بستر سد ۱۶۲ متر از سطح دریا و حداقل تراز آب در مخزن ۱۷۱ متر از سطح دریا و نیز حداکثر تراز نرمال آب ۱۸۸/۲۵ متر از سطح دریا است. تراز تاج سرریز ۱۸۹/۶ متر از سطح دریا و تراز تاج سد ۱۹۲/۲۵ متر از سطح دریا است. ضخامت در پی ۱۰ متر و آب قابل تنظیم سالیانه حدود ۵۵ میلیون متر مکعب است.



شکل ۱: جانمایی کلی پروژه و مقطع تیپ عرضی بدنه سد کیودوال

مدل موهر-کولومب (MC)

این مدل شامل پنج پارامتر ورودی است. پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون برای الاستیسیته خاک و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک برای پلاستیسیته خاک و زاویه اتساع است. مدل موهرکلمب یک تقریب مرتبه اول از رفتار سنگ یا خاک را نشان می‌دهد. پیشنهاد شده است که این مدل برای تحلیل اولیه از مساله استفاده شود. مدل موهر-کولومب از ساده ترین مدل‌های رفتاری خاک می باشد و از آنجایی که در این مدل اکثر پارامترهای اساسی خاک، اعم از خمیری و کشسان وجود دارد برای مدل کردن اکثر حالات رفتاری خاک مناسب می باشد (Plaxis User Manual, 2001) مفهوم پلاستیسیته اصولاً به کرنش های غیرقابل برگشت مربوط می شود. این مدل به دلیل سادگی و عدم نیاز به پارامترهای متعدد، در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده واقع می شود. مفهوم پلاستیسیته اصولاً به کرنش های غیرقابل برگشت مربوط می شود. به این منظور یک تابع تسلیم تنش-کرنش به عنوان یک سطح در فضای تنش های اصلی معرفی می شود تا نقاط پلاستیک را بتوان ارزیابی کرد. بدیهی است نقاطی داخل سطح تسلیم رفتار ارتجاعی کامل دارند. براساس این مدل، کرنش و نرخ کرنش از دو بخش الاستیک و پلاستیک تشکیل می‌شوند. به عبارتی

$$\underline{\sigma}' = \left(\frac{D^e}{\sigma} - \frac{\alpha D^e}{\alpha} \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^t}{\partial \sigma'} \frac{D^e}{\sigma} \right) \varepsilon^0 \quad \text{رابطه ۱:}$$

بر اساس تئوری پلاستیسیته هیل، کرنش‌های پلاستیک متناسب با مشتق تابع تسلیم نسبت به تنش‌ها می باشد. به عبارتی کرنش‌های پلاستیک را می‌توان به صورت بردارهایی عمود بر سطح تسلیم در نظر گرفت. بر این اساس می‌توان رابطه بین نرخ تنش مؤثر و کرنش مؤثر را به دست آورد. در این رابطه $\underline{d} = \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{D^e}{\sigma} \frac{\partial f^t}{\partial \sigma'}$ است. معیار تسلیم مور-کلمب از شش تابع تسلیم که بر حسب تنش های اصلی بوده و یک مخروط شش وجهی را در فضای تنش‌های اصلی تشکیل می دهند می‌توان به صورت رابطه کلی زیر نشان داد:

$$f(j, i, k) = \frac{1}{2} \left| \left[\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)} \right] \right| + \frac{1}{2} \left| \left[\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)} \right] \right| \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \quad \text{رابطه ۲:}$$

که i, j و k به ترتیب برابر ۱ و ۲ و ۳ هستند. دو پارامتر دیگر در این مدل c به معنی چسبندگی و f زاویه اصطکاک خاک هستند. هم چنین شش تابع پتانسیل پلاستیک را برای این مدل را به صورت رابطه کلی زیر می‌توان تعریف کرد:

$$g(j, i, k) = \frac{1}{2} \left| [\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)}] \right| + \frac{1}{2} \left| [\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)}] \right| \sin \phi \leq 0 \quad \text{رابطه ۳:}$$

بعد از مدل سازی عددی و کالیبره کردن سد با روش آنالیز برگشتی، (جدول ۲) شامل مشخصات مصالح در مدل رفتاری موهر کلمب نرم افزار Plaxis بدست آمد. (حکیمی خانسر و همکاران، ۱۳۹۲)

مدل سازی

نرم افزار Plaxis یک برنامه اجزای محدود است که از روش غیر صریح برای مدل سازی عددی استفاده می کند. برنامه های اجزای محدود نرم افزار اغلب ماتریس اجزا را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کل می سازند. به عبارتی حوزه ی تعریف تابع از تعداد متناهی المان با تعداد ثابتی گره تشکیل شده است. تغییر مکان های گره های هر المان با استفاده از تابع شکل که جابجایی های گرهی را به هم مرتبط می کند تخمین زده می شود. معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبی اولیه با مجموعه معادلات جبری جایگزین می شوند و به این ترتیب ماتریس سختی کل شکل می گیرد. با حل دستگاه معادلات جابه جایی نقاط تعیین می شود و به کمک آن ها می توان تنش ها و کرنش های هر المان آن را به دست آورد. برای تحلیل تنش-کرنش سدهای خاکی و خاکریزه های معمولاً از روش اجزای محدود به صورت دو بعدی در شرایط کرنش صفحه ای که موجب ساده شدن محاسبات گشته استفاده می شود. تحقیقات نشان داده که تحلیل دو بعدی سدهای خاکی که دارای نسبت طول تاج به ارتفاع بزرگی دارند، دارای تقریب خوبی از واقعیت است (حکیمی خانسر و همکاران، ۱۳۹۲). تنها در مورد سدهایی که در دره های تنگ ساخته می شوند و احتمال پدیده قوسی شدن وجود دارد، استفاده از تحلیل سه بعدی توصیه شده است. به منظور تحلیل تنش-کرنش سد کبودوال از نرم افزار Plaxis دو بعدی (نسخه ۲/۸) که بر اساس روش اجزای و در حالت دو بعدی، محدود قادر به تحلیل تنش-تغییر شکل و پایداری سازه های ژئوتکنیکی در حالت کرنش صفحه ای و نیز محاسبه جریان آب در این گونه سازه هاست، استفاده شده است. در محاسبات تراوش جریان و تحلیل های هیدرولیکی نرم افزار Plaxis علاوه بر محاسبه فشارهای سیال در حالت ساکن که از روی خط آزاد جریان صورت می گیرد، اضافه فشارهای حفره ای ناشی از اعمال بار را نیز در صورت زهکش نبودن خاک در نظر می گیرد و این دو فشار را با هم جمع می کند.

$$P_{active} = P_{steady} + P_{excess} \quad \text{رابطه ۴:}$$

برای انجام تحلیل های عددی تنش - کرنش به دلیل سازگاری نتایج نرم افزار Plaxis در محیط های خاکی از این نرم افزار استفاده شده است. در ابتدا با مدل کردن هندسه بستر و لحاظ کردن شرایط مرزی مدل که با شرایط مرزی لحاظ شده گیرداری کامل در پائین هندسه و شرایط تکیه گاه غلتکی در کناره های عمودی ایجاد می شود، به منظور شبیه سازی رفتار خاک، پارامترهای مقاومتی مصالح به هندسه مدل تخصیص داده می شود. پس از ساخت مدل، شبکه اجزای محدود

مش بندی مقطع ایجاد می شود. در ساخت مش از المان های ۱۵ گرهی برای مدل کردن توده خاک استفاده شده است. بر همین اساس، اندازه ریز برای مدل کردن اندازه شبکه المان ها در نظر گرفته شده است. هم چنین برای حذف شرایط مرزی از هر طرف بستر حداقل ۲ برابر عرض ماکزیمم بدنه از توده خاک مدل شده و با مرز مناسب جایگزین شده است. به وسیله این نرم افزار ساخت لایه لایه و مرحله ای سد مدل شده و پدیده تحکیم شبیه سازی شده و تحلیل های عددی در دو محیط تنش کل و تنش موثر انجام گرفته است. در شکل ۵ هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹ سد به منظور انجام تحلیل های عددی برگشتی ارائه شده است. در این تحلیل اطلاعات جمع آوری شده توسط ابزار دقیق در سه سال متوالی از سال ۸۷ تا سال ۹۰ که زمان مراحل پایانی سد می باشد، بانایج حاصل از مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه در یکی از مقاطع میانی سد کبود وال (مقطع ۱۹) که دارای ابزار دقیق می باشد، بین داده های ابزار دقیق و مدل نرم افزاری انجام شده است. برای تطابق داده ها نقطه ای واقع در محور سد کمی بالاتر از پی سد، در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از ابزار دقیق و نرم افزار باهم در یک تحلیل برگشتی تقریباً یکی شده است. مشخصات مصالح تشکیل دهنده بدنه سد کیودوال که شامل سه بخش اصلی فیلتر و پوسته و پی است، در جدول ۱ آورده شده است. هم چنین مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری مدل نرم شونده، مدل سخت شونده نیز در جدول ۲ بیان شده است.

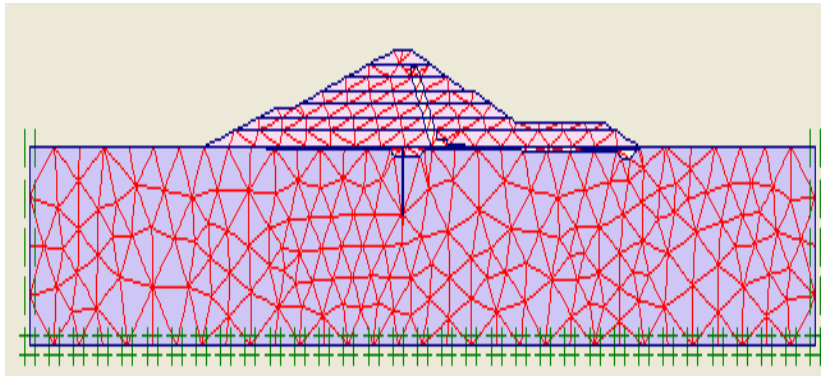
جدول ۱: مشخصات مصالح در مدل رفتاری سخت شونده و موهر کلمب و نرم شونده

خصوصیات مصالح	نوع مصالح	Y_{unsat} (KN/m ³)	Y_{sat} (KN/m ³)	E_{ref} (KN/m ²)	ν	C_{ref} (KN/m ²)	Φ ($^{\circ}$)	$K_{x,y}$ (m/day)
پی	Undrain	۱۷	۲۰	0/1e+۴	3/0	۱۸	۲ ۹	68/8e-۳
بدنه	Drained	۱۹	۲۳	0/1e+۴	4/0	۲۲	۲ ۵	68/8e-۳
فیلتر و زهکش	Drained	۲۰	۲۱	۲۵۰۰	25/ 0	۱۲	۳ ۶	64/8

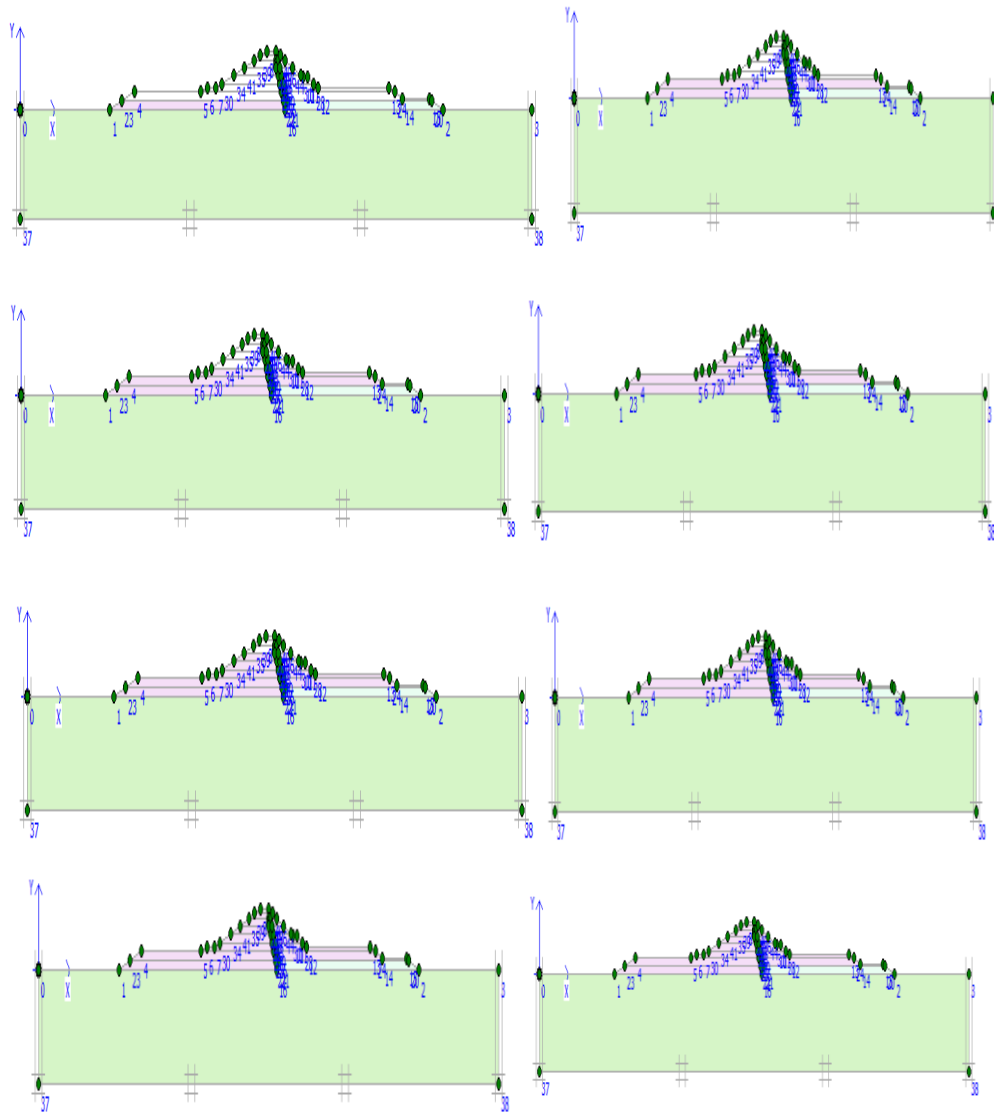
جدول ۲: مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری سخت شونده و نرم شونده

خصوصیات مصالح	λ^*	κ^*	E_{50} (KN/m ²)	E_{oed} (KN/m ²)	E_{ur} (KN/m ²)	K_o^{nc}
بدنه	۱e-۳	۱e-۳	۵/۲e+۴	۵/۲e+۴	۵e+۴	۰/۴۷۸

در ادامه در نرم افزار ۱۶ فاز محاسباتی برای خاک برداری و خاکریزی مقطع سد بروش ساخت مرحله ای تعریف شد.



شکل ۲: هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹



شکل ۳: روند خاکریزی مقطع ۱۹ در نرم افزار Plaxis

در نرم افزار Gio Studio نیز روند بالا اجرا شد و مشخصات مصالح زیر بعد از آنالیز برگشتی به دست آمد.

جدول ۴: مشخصات مصالح در نرم افزار Gio Studio

نوع مدل و مصالح	پی Elastic-plastic (unDrained)	بدنه Elastic-plastic (Drained)	فیلتر و زهکش Elastic-plastic (Drained)	لایه تزریق Linier elastic (Drained)
E-Muduls1	۲۲۰۰۰	۱۸۰۰	-	-
E-Muduls2(kPa)	-	-	-	-
E'(kPa)	-	-	۱۰۰	۱۰۰۰۰
G-Muduls2 (kPa)	-	-	-	-
Unit weight (kN/m3)	۱۶	۹	۱۴	۱۷
(1)v	۰/۳	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳
(2)v	-	۰/۲۲	-	-
ε(kPa)	-	-	۱۲	-
ε ₀	-	-	۳۶	-
C(kPa)	۱۸	۲۲	-	-
φ(°)	۲۹	۲۵	-	-

روش Grid & Radius

این روش، یک روش ترسیمی برای تعیین مقطع لغزشی است. به این صورت که در یک طرف شیب، مجموعه ای از نقاط را با ترسیم یک شبکه با ابعاد دلخواه (Grid) مشخص کرده و در طرف دیگر شیب، مجموعه ای از خطوط را (Radius) ترسیم می کنند. سپس نرم افزار از نقاط واقع بر شبکه، یک سری دایره به مرکز همین نقاط به خطوط Radius مماس می کند که شعاع این دایره برابر فاصله ی عمودی این نقاط Grid تا خطوط Radius است. این دایره ها روی شیب مورد نظر، مقطعی ایجاد می کنند که در نهایت ضریب اطمینان پایداری این مقطع تعیین می شود (حکیمی خانسر و همکاران، ۱۳۹۲).

پایداری شیروانی در حالت دو بعدی

در این پژوهش پایداری شیروانی سد کبودوال در دوران ساخت، پایان ساخت، مخزن نیمه پر و شرایط افت سریع با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Plaxis بررسی شده است. سد خاکی کبودوال با دو مدل موهر - کلمب، سخت شوندگی تحلیل عددی شد. در تحلیل، افت سریع و آرام و همچنین شرایط مخزن نیمه پر بررسی و سطوح گسیختگی و ضرایب اطمینان با هر دو قانون رفتاری ارزیابی شد. در نرم افزار Plaxis برای محاسبه ضریب اطمینان از فرمول های زیر استفاده می شود. که این دو فرمول اساس روش phi-c-reduction است که می تواند در Plaxis برای محاسبه ی یک ضریب اطمینان کلی به کار رود.

$$SF = \frac{S_{maximum\ available}}{S_{need\ for\ equilibrium}} \quad \text{رابطه ۵:}$$

$$SF = \frac{C + \sigma_n \tan \phi}{C_r + \sigma_n \tan \phi_r} \quad \text{رابطه ۶:}$$

در روش phi-c-reduction برای محاسبه ی SF از رابطه ۷ استفاده می شود:

$$\sum MSF = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \frac{c}{c_r} \quad \text{رابطه ۷:}$$

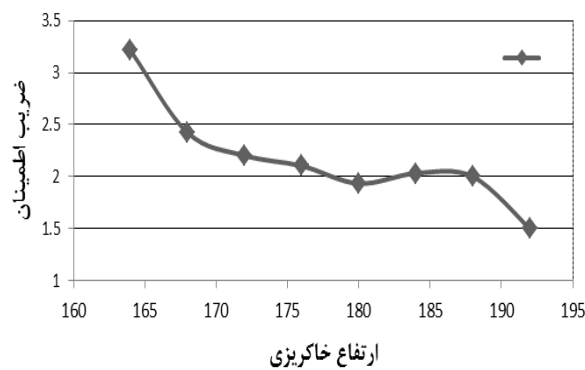
که C چسبندگی، $\tan \varphi$ زاویه اصطکاک مصالح، σ_{η} تنش نرمال، C_r و φ_r حداقل پارامترهای مقاومتی است. در این روش پارامترهای مقاومتی خاک ($c, \tan \theta$) به طور مرتب کم می‌شوند تا اینکه خاک گسیخته شود.

نتایج و بحث

نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی‌های بالادست و پائین‌دست سد در شرایط استاتیکی و در حین ساخت با

نرم‌افزار Plaxis دو بعدی

بعد از کالیبره کردن، نرم افزار Plaxis قادر است ضریب اطمینان در هر مرحله از خاکریزی را بدهد. ضریب اطمینان در هر مرحله‌ی خاکریزی در (جدول ۵) نشان داده شده است.

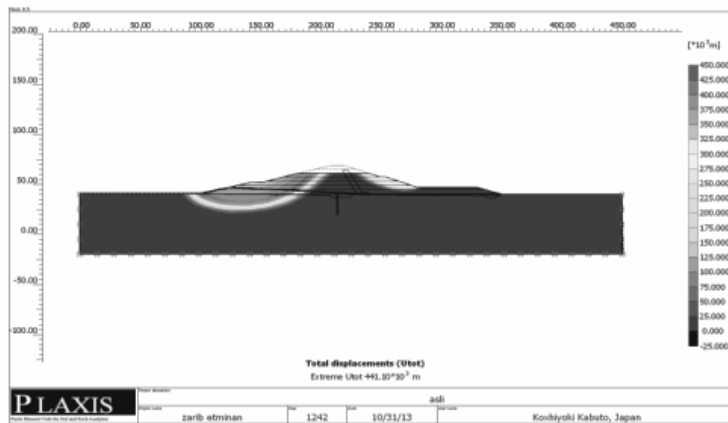


شکل ۴: تغییرات ضریب اطمینان با ارتفاع خاکریزی با نرم‌افزار Plaxis دو بعدی

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ضریب اطمینان با افزایش ارتفاع خاکریزی کاهش می‌یابد که در آخرین مرحله‌ی خاکریزی به عدد ۱/۴۹۸ می‌رسد. با مقایسه‌ی نتایج ضریب اطمینان پایداری شیروانی در مرحله‌ی پایان ساخت با معیار گروه مهندسی ارتش آمریکا پایداری سد در این مرحله تضمین می‌شود.

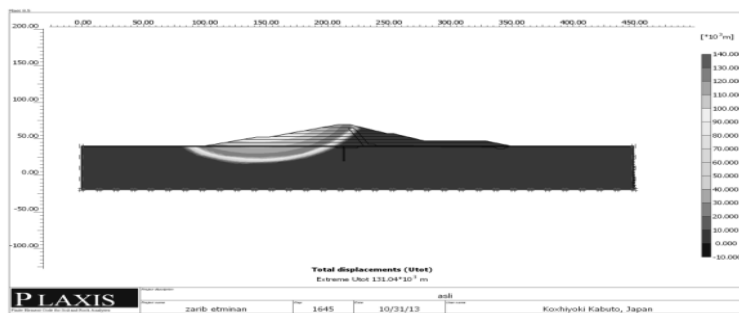
جدول ۵: ضریب اطمینان در هر مرحله از خاکریزی با نرم‌افزار Plaxis دو بعدی

خاکریزی لایه چهارم	تحکیم لایه سوم	خاکریزی لایه سوم	تحکیم لایه دوم	خاکریزی لایه دوم	تحکیم لایه اول	خاکریزی لایه اول	خاکبرداری لایه اول
FS=۲/۲۰۰	FS=۲/۲۰۳	FS=۲/۴۳۹	FS=۲/۴۲۳	FS=۲/۴۰۸	FS=۲/۲۱۲	-	-
خاکریزی لایه هشتم	تحکیم لایه هفتم	خاکریزی لایه هفتم	تحکیم لایه ششم	خاکریزی لایه ششم	تحکیم لایه پنجم	خاکریزی لایه پنجم	تحکیم لایه چهارم
FS=۲/۰۴۳	FS=۲	FS=۲/۲۵۹	FS=۲/۰۲۳	FS=۲/۲۳۳	FS=۱/۹۳۵	FS=۱/۹۸۰	FS=۲/۱۰۴
تحکیم لایه هشتم							
۱/۴۹۸							
FS=							

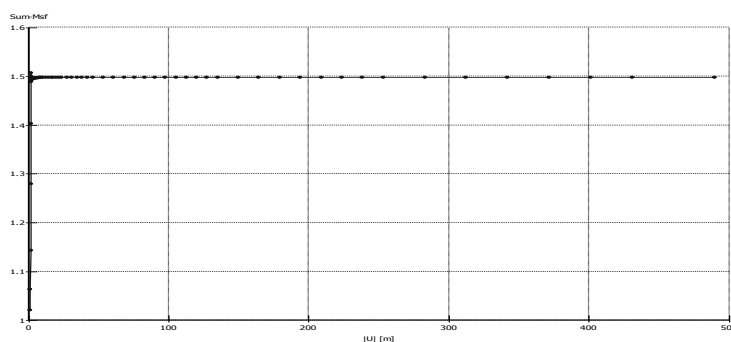


شکل ۵: آنالیز پایداری شیروانی‌های بالادست و پائین‌دست در حین ساخت پایان لایه ششم با مدل Plaxis دو بعدی
 نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی‌های بالادست و پائین‌دست سد در شرایط استاتیکی و در مرحله پایان
 ساخت با نرم‌افزار Plaxis دو بعدی

براساس تحلیل‌های پایداری در حالت بارگذاری پایان ساخت، ضرائب اطمینان شیروانی‌ها ۱/۴۹۸ محاسبه شده‌اند. در (شکل ۶) نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی‌های بالادست در حالت پایان ساخت به همراه موقعیت سطوح شکست بحرانی مربوطه ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در شرایط پایان ساخت، سطوح شکست بحرانی شیروانی‌های بالادست تا میانه سد ادامه دارد.



شکل ۶: آنالیز پایداری شیروانی‌های بالادست، حالت پایان ساخت با مدل Plaxis دو بعدی

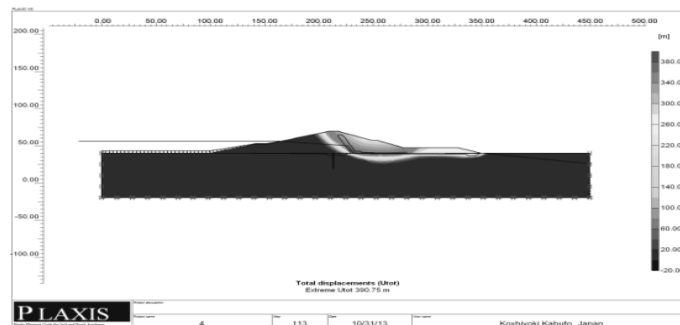


شکل ۷: ضریب اطمینان شیروانی پائین دست سد، حالت پایان ساخت با مدل Plaxis دو بعدی.

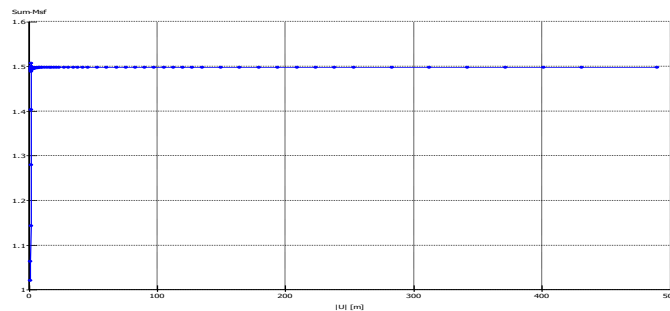
نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی پائین دست سد در شرایط استاتیکی و مرحله تراوش پایدار، با نرم افزار

Plaxis دو بعدی

در حالت تراوش پایدار، سطح آب مخزن در رقوم نرمال بوده و پس از افت در زهکش و فیلتر در حدود تراز زهکش قرار می‌گیرد. این حالت بارگذاری برای شیروانی بالادست کنترل کننده نمی‌باشد، اما شیروانی پائین دست را ممکن است در وضعیت بحرانی قرار دهد. نتایج آنالیز پایداری در حالت تراوش پایدار، حداقل ضریب اطمینان شیروانی پائین دست را در مقابل لغزش ۲/۰۳ نشان داده است (شکل ۸) آنالیز پایداری شیروانی پائین دست سد، تراوش پایدار با مدل Plaxis دو بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۸: آنالیز پایداری شیروانی پائین دست سد، تراوش پایدار با مدل Plaxis دو بعدی



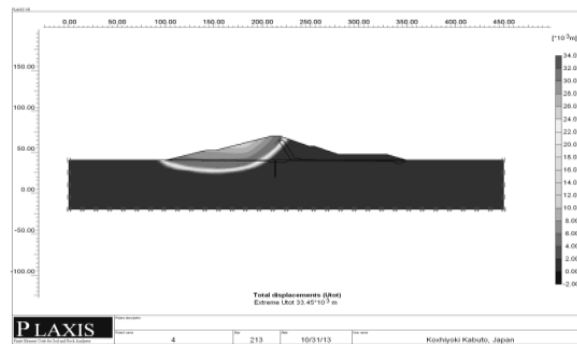
شکل ۹: ضریب اطمینان شیروانی پائین دست تراوش پایدار Plaxis دو بعدی

نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی بالادست در شرایط استاتیکی و مرحله تخلیه سریع مخزن با نرم افزار

Plaxis دو بعدی

در سدهای خاکی معمولاً بحرانی‌ترین حالت برای شیب بالادست موقعی است که سطح آب مخزن در پشت سد به طور ناگهانی پایین می‌رود، بدون اینکه آب داخل بدنه سد (در پوسته‌ی بالادست) فرصت کافی برای تخلیه داشته باشد و سطح آب در قسمت اشباع شده‌ی خاک بدنه برای مدتی در سطح اولیه باقی بماند. این حالت در اصطلاح افت ناگهانی سطح آب نامیده می‌شود. بر اثر تخلیه و افت کامل سطح آب، فشار هیدرواستاتیک موجود در سطح خارجی شیب بالادست (که در

زمان پر بودن مخزن وجود داشت) حذف می شود، در حالی که فشار هیدرواستاتیک متعادل کننده ی آن در قسمت داخل بدنه ی سد که بر سطح شیب دار بالادست اثر می کرد کماکان وجود دارد. در شرایطی که ضروری است سطح آب مخزن در مدت زمان نسبتاً کوتاهی به سرعت پائین آورده شود، با توجه به ابقاء فشار آب منفذی موجود در هسته و نیز حذف نیروی مقاوم ناشی از وزن آب مخزن بر روی شیب بالادست، ممکن است این شیروانی در حالت بحرانی قرار گیرد (حصیرچیان و همکاران، ۱۳۹۱). برای بررسی وضعیت پایداری شیروانی بالادست سد کیودوال در مرحله تخلیه سریع مخزن، فرض شده که سطح آب مخزن از رقوم نرمال تا تراز حداقل بهره برداری به سرعت افت می کند. براساس تحلیل های پایداری، حداقل ضریب اطمینان در مقطع بحرانی ۱/۳۲ به دست آمد. در شکل ۱۰ موقعیت سطح شکست بحرانی ارائه شده است.

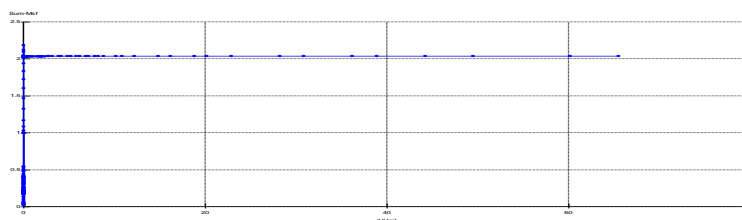


شکل ۱۰: آنالیز پایداری شیروانی بالادست مرحله تخلیه سریع مخزن با مدل Plaxis دو بعدی

نتایج آنالیزهای پایداری در شیروانی بالادست در شرایط استاتیکی و مرحله مخزن نیمه پر با نرم افزار

Plaxis دو بعدی

در هنگام بهره برداری از سد و در شرایطی که سطح آب مخزن در وضعیت نیمه پر بین رقوم نرمال بهره برداری است، شیب بالادست می تواند در معرض گسیختگی قرار گیرد. به منظور کنترل ایستایی شیروانی بالادست در این حالت از بارگذاری، محاسبات تحلیل پایداری برای رقوم مختلف سطح آب انجام گرفت و حداقل ضریب اطمینان برای تراز بحرانی آب ۱/۵۲ تعیین شد. در (شکل ۱۱) نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی بالادست در حالت مخزن نیمه پر ارائه شده است.

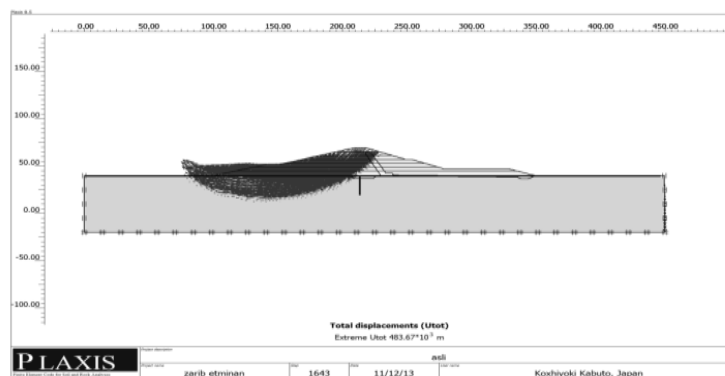


شکل ۱۱: شکل ضریب اطمینان شیروانی پائین دست سد ، تخلیه Plaxis دو بعدی

نتایج آنالیزهای پایداری در شیروانی بالادست در شرایط استاتیکی و مرحله مخزن نیمه پر با نرم افزار

Plaxis دو بعدی

در هنگام بهره‌برداری از سد و در شرایطی که سطح آب مخزن در وضعیت نیمه پر بین رقوم نرمال بهره‌برداری است، شیب بالادست می‌تواند در معرض گسیختگی قرارگیرد. به‌منظور کنترل ایستایی شیروانی بالادست در این حالت از بارگذاری، محاسبات تحلیل پایداری برای رقوم مختلف سطح آب انجام گرفت و حداقل ضریب اطمینان برای تراز بحرانی آب ۱/۵۲ تعیین شد. در شکل ۱۲ نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی بالادست در حالت مخزن نیمه پر ارائه شده است.

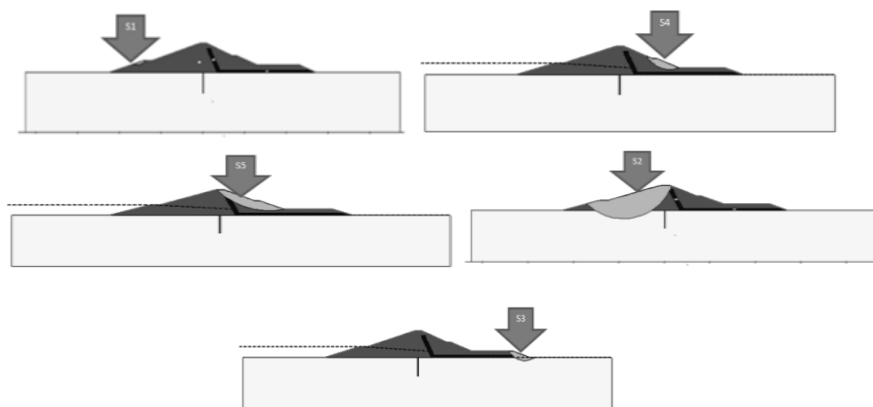


شکل ۱۲: آنالیز پایداری در شیروانی بالادست، مخزن نیمه پر با مدل Plaxis دو بعدی

برای مقایسه ضرائب اطمینان به‌دست آمده برای پایداری سد در حالات مختلف بارگذاری با حداقل مقادیر مجاز در شرایط استاتیکی، به مراجع بین‌المللی معتبر نظیر استانداردهای اداره عمران ایالات متحده آمریکا (U.S.B.R) استناد می‌شود. مرجع فوق‌الذکر حداقل ضریب اطمینان لازم را برای مرحله پایان ساخت ۱/۴ توصیه می‌کند. مقایسه این ضریب اطمینان و حداقل ضرائب اطمینان پایداری شیروانی‌های سد که در مرحله پایان ساخت ۱/۴۹۸ محاسبه شده‌اند، گویای پایداری مطمئن سد در این مرحله از بارگذاری است. در حالت تراوش پایدار حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز توسط مرجع فوق پیشنهاد شده است. از طرفی نتایج آنالیزهای انجام شده، حداقل ضریب اطمینان پایداری را برای شیروانی پائین دست در مرحله تراوش پایدار ۲/۰۳ نشان می‌دهد، لذا در این حالت نیز پایداری کافی فراهم می‌باشد. همچنین اداره عمران ایالات متحده آمریکا، ضریب اطمینان مجاز را برای پایداری شیروانی بالادست در حالت تخلیه سریع مخزن ۱/۳ اعلام نموده است. بنابراین با توجه به آنکه حداقل ضریب اطمینان پایداری شیروانی بالادست در حالت تخلیه سریع مخزن ۱/۳۰۲ تعیین شده است، ایمنی سد در این حالت برقرار می‌باشد. ضمناً در حالت مخزن نیمه پر، حداقل ضریب اطمینان مجاز ۱/۵ توصیه شده است. مقایسه این ضریب اطمینان با نتایج آنالیزهای پایداری شیروانی بالادست در ترازهای مختلف آب که حداقل ضریب اطمینان پایداری را ۱/۵۳ نشان می‌دهد، بیانگر پایداری ایستایی سد در حالت مذکور می‌باشد.

بررسی پایداری شیروانی در نرم افزار Gio Studio در حالات استاتیکی و شبه استاتیکی

در این بخش ضرایب اطمینان بالادست و پایین دست سد خاکی در حالت پایان ساخت و آبگیری همزمان، به روش Grid & Radius مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. در (شکل ۱۳) شیروانی‌های سد با علایم حروف لاتین نامگذاری شده است. ضریب اطمینان بعد از تحلیل در (جدول ۶) آورده شده است.



شکل ۱۳: نامگذاری سطوح شیبدار در نرم افزار Gio Studio

جدول ۶: ضریب اطمینان در حالت استاتیک و دینامیک، با استفاده از مدل Gio Studio دو بعدی

ضریب اطمینان	S1	S2	S3	S4	S5
در حالت استاتیک Gio Studio دو بعدی	۴/۷۴۹	۲/۲۶۰	۳/۳۱۱	۳/۶۰۰	۲/۶۶
در حالت دینامیکی، شتاب افقی ۰/۱۵g	۲/۸۶۹	۱/۴۴۷	۱/۴۴۹	۱/۷۲۴	۱/۷۶
در حالت دینامیکی، شتاب افقی ۰/۳g	۲/۰۲۸	۱/۴۷۰	۱/۴۳۳	۱/۴۸۴	۱/۴۸۷

همان‌طور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، سد در هر دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی پایدار می‌باشد. به‌طور کلی نتایج آنالیزها، رفتار مناسب سازه سد را در برابر شرایط مختلف بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی تأیید می‌نماید. ضریب اطمینان به‌دست آمده از مدل رفتاری براساس استاندارد گروه مهندسين ارتش آمریکا گواه پایداری سد می‌باشد. نتایج در نرم‌افزار Gio Studio نشان داد که ضریب اطمینان، حالت دینامیکی، شتاب افقی بالاتر از ۰/۳g پایداری را به خطر می‌اندازد.

نتیجه‌گیری

یکی از قابلیت‌های نرم افزار Plaxis پیش‌بینی رفتار سازه‌هایی است که هنوز به طور کامل ساخته نشده‌اند و یا ساخته شده و آبگیری کامل یا افت سریع انجام نپذیرفته است. برای سد کیودوال ضرایب اطمینان برای پایداری شیروانی سد با مدل Plaxis دو بعدی در حین و پایان ساخت، پرشدن، افت سریع و آرام مخزن و مخزن نیمه پر بررسی شد. با استفاده

از نرم افزار Plaxis پایداری شیروانی بالادست و پایین دست برای مراحل مختلف ساخت به دست آمد. نتایج بیانگر پایداری شیروانی سد در مراحل مختلف ساخت و مهم تر از همه در مرحله ی پایان ساخت است. به طور کلی نتایج آنالیزها، رفتار مناسب سازه سد را در برابر شرایط مختلف بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی تأیید می نماید. ضریب اطمینان با افزایش ارتفاع خاکریزی کاهش می یابد که در آخرین مرحله ی خاکریزی به عدد $1/498$ می رسد. با مقایسه ی نتایج ضریب اطمینان پایداری شیروانی در مرحله ی پایان ساخت با معیار گروه مهندسی ارتش آمریکا پایداری سد در این مرحله تضمین می شود. نتایج آنالیزها، رفتار مناسب سازه سد را در برابر شرایط مختلف بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی را تأیید می نماید. ضریب اطمینان بدست آمده از مدل رفتاری براساس استاندارد گروه مهندسی ارتش آمریکا گواه پایداری سد می باشد. همچنین بررسی پایداری شیروانی ها ناپایداری شیروانی بالادست، نزدیک مخزن را نشان می دهد، که ضرورت ایجاد بتن ریزی در این منطقه مشهود است. همچنین نتایج حاکی از کارایی مناسب روش و نرم افزارهای به کار رفته جهت مدل نمودن رفتار سدهای خاکی در حین ساخت است.

منابع

- جهانی، ص.، ح. گلمایی و م. ضیاءتبار احمدی. (۱۳۹۱). مطالعه و بررسی مدل سازی عددی اجزای محدود جهت بررسی پایداری شیروانی ها در حین ساخت و پرشدن و افت سریع مخزن (مطالعه ی موردی سد میجران با استفاده از نرم افزار Plaxis). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- حصیر چیان، م. ح. گلمایی و م. ضیاءتبار احمدی (۱۳۸۹). ارزیابی کارایی مدل های رفتاری در تحلیل سدهای خاکریزه ای به روش آنالیز برگشتی (کاربرد موردی سد البرز). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- حکیمی خانسر، ح.، ح. گلمایی و م. حصیر چیان. (۱۳۹۲). ارزیابی رفتار سد های خاکریزه ای با استفاده از نرم افزار PLAXIS و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق (مطالعه ی موردی سد کبودوال). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- شرکت سهامی آب منطقه ای گلستان (۱۳۹۱). داده های ابزار دقیق سد کبودوال.
- صادقی، م. و مسعود و اصلانی، م. (۱۳۸۸). تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای سنگریزه ای با هسته بتن آسفالتی، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.

محمدی‌ها، الف، مشکواتی تروجنی، ج، گلماهی، ح، و محبوبی، م.ح. (۱۳۸۹). بررسی عددی پایداری شیروانی

سدخاکی بوستان درمرحله ساخت با استفاده از روش المان های محدود با نرم افزار PLAXIS، نهمین کنفرانس

هیدرولیک ایران، تهران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

ASCE Task Committee. (2000). Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. ASCE.

Plaxis User Manual. (2001). Plaxis 2D general information- reference & scientific manual, Version 1. A. A. Balkema Brinkgreve R. B. J. and Vermeer P.A.

US Army Corps of Engineers. (1995). Instrumentation of embankment dams and levees engineering and design. Washington DC.