

آنالیز ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی نسبت به زمان

حدیث دقیق^۱، حسین حسن پور درویشی^۲ و سید حبیب موسوی جهرمی^{۳*}

(۱) دانشجوی دکتری؛ سازه‌های آبی؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ تهران، ایران

(۲) استادیار؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد شهر قدس؛ تهران؛ ایران

(۳) استاد؛ گروه عمران-آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد شهر قدس؛ تهران، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: h-mousavi@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

چکیده

طراحی نادرست سدهای خاکی و سنگریزه‌ای با ضرایب اطمینان نامناسب به هر دلیل ممکن، در مواقع سیلابی موجب می‌شود که در این گونه سدها آبشستگی درونی، مستغرق شدن شیروانی پایین دست و در مواقعی تخریب آن‌ها را به دنبال داشته باشد. تخریب سدهای خاکی و سنگریزه‌ای از یک سو و حجم زیاد جریان سیلاب از سوی دیگر می‌تواند بسترهای سیل گیر و در سطح گسترده‌تر سطح حوضه‌های آبریز مربوطه را تخریب نموده، موجب کنده شدن درختان و پوشش گیاهی می‌شوند و در زمان فروکش سیلاب موجب پوشیده شدن سطح حوضه‌ها از مواد رسوبی به ضخامت زیاد می‌شوند. لذا طراحی صحیح و حصول ضرایب اطمینان مناسب و مطمئن موجب جلوگیری از این گونه خسارت‌ها و خسارت‌های مشابه است. به منظور بررسی پایداری سدهای خاکی، مجموعه‌ای از مطالعات و آزمایش‌های ژئوتکنیکی شامل آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی بر روی خاک منطقه سد دریاچه چیتگر انجام گرفت. سپس با استفاده از نرم افزار المان محدود PLAXIS، چهار مدل عددی با در نظر گرفتن جنس لایه‌های مختلف فونداسیون و بدنه سد، برای سد خاکی همگن و غیرهمگن بر روی بستر درشت دانه و ریزدانه شبیه‌سازی و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. با تجزیه و تحلیل نتایج مدل مشخص گردید که در سدهای خاکی همگن و غیرهمگن برای جلوگیری از تخریب سد از زیر فونداسیون، سد باید به صورت مرحله‌ای و با در نظر گرفتن فواصل زمانی مناسب تحکیم یابد تا فشار آب حفره‌ای اضافی بستر تعدیل گردد و در غیر این صورت، فشار آب حفره‌ای زیادی باعث تخریب سد از زیر فونداسیون خواهد شد. سدهای خاکی غیرهمگن که هسته رسی دارند اگر به صورت همزمان با اجرای سد آگیری شوند، فشار آب حفره‌ای زیادی در هسته سد ایجاد می‌شود که این مورد باعث کاهش ضریب اطمینان خواهد شد. بنابراین توصیه می‌گردد که سدهای خاکی غیرهمگن در زمان ساخت به طور هم‌زمان آگیری نشوند که نتیجه آن افزایش ضریب اطمینان سد خواهد بود. در حالت فونداسیون ضعیف، ضریب اطمینان حاصله در روش ساخت مرحله‌ای در خصوص سد همگن معادل ۱/۴۵ و در خصوص سد غیرهمگن معادل ۱/۱۴ حاصل گردیده است، بنابراین در حالت فونداسیون ضعیف، عملکرد سدهای همگن بهتر از سدهای غیرهمگن می‌باشد.

کلید واژه‌ها: پایداری مرحله‌ای؛ تحکیم؛ سد خاکی؛ نرم افزار PLAXIS

مقدمه

تخریب آن‌ها را به دنبال داشته باشد. تخریب سدهای خاکی و سنگریزه‌ای از یک سو و حجم زیاد جریان سیلاب از سوی دیگر، جریان‌های با غلظت بالای مواد رسوبی به راه می‌اندازد. تلاطم جریان و دانسیته بالای آب موجب شسته شدن بستر، دیواره‌ها و تشدید غلظت مواد

طراحی نادرست سدهای خاکی و سنگریزه‌ای با ضرایب اطمینان نامناسب به هر دلیل ممکن، در مواقع سیلابی موجب می‌شود که در این گونه سدها آبشستگی درونی، مستغرق شدن شیروانی پایین دست و در مواقع

خاکریزی لایه‌ها خیلی زیاد باشد، به دلیل عدم امکان زهکشی، فشار آب منفذی تا مرز بحرانی افزایش یافته و وقوع پدیده شکست سد محتمل خواهد بود (مکرم، ۱۳۸۱؛ رحیمی، ۱۳۸۹).

با تحلیل و پیش‌بینی رفتار سدها در مراحل ساخت و بهره‌برداری، می‌توان با اتخاذ اقدامات لازم از وقوع مشکلات جدی در حین اجرا و بهره‌برداری از سد جلوگیری به عمل آورده و ظرفیت بهره‌برداری از آن را به حداکثر رساند (غروی و محمدی، ۱۳۸۸). با شبیه‌سازی عددی ساخت مرحله‌ای سد و بررسی افزایش فشار آب منفذی در فونداسیون، عمق لایه‌های خاکریزی و زمان لازم جهت تحکیم مرحله‌ای و افزایش پایداری سد پیشرفت‌های چشمگیری در این خصوص حاصل گردیده است.

فتح‌اللهی مرنی و صباغ یزدی (۱۳۸۱)، در یکی از مطالعات خود به بررسی آیین‌نامه پایداری شیب‌های سد-خاکی پرداختند. آن‌ها در ابتدا خرابی‌های سدهای خاکی را مورد بررسی قرار دادند و در ادامه انواع آزمایشات جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالات مختلف اجرا و بهره‌برداری سد را مورد بررسی قرار دادند.

فیضی ماسوله و گتمیری (۱۳۸۲)، در تحقیقی به تحلیل سدهای خاکی با هسته رسی با درصد رطوبت بالاتر از بهینه پرداختند. از آنجا که مرحله پایان ساخت به دلیل ایجاد فشارهای حفره‌ای بالا معمولاً بحرانی‌ترین برهه زمانی در طول عمر این گونه سدها است، تحلیل‌های انجام شده مربوط به این دوره می‌باشد.

موسوی (۱۳۸۲)، با جمع‌آوری داده‌های

مربوط به ۱۴۲ سد شکسته شده از مراجع معتبر، روابط مربوط به تخمین پارامترهای شکستگی (سدهای خاکی)، عرض شکست، شیب شکست، زمان شکست را بررسی و محدوده اطمینان این روابط را به صورت احتمالی بیان کردند. آن‌ها موضوع تراوش از بدنه، پی و تکیه‌گاه سدهای خاکی با شرایط مختلف را به صورت سه بعدی با استفاده از

معلق همراه جریان می‌شود. در ادامه بسترهای سیل‌گیر و در سطح گسترده‌تر سطح حوضه‌های آبریز مربوطه را تخریب نموده، موجب کنده شدن درختان و پوشش گیاهی می‌شوند و در زمان فروکش سیلاب موجب پوشیده شدن سطح حوضه‌ها از مواد رسوبی به ضخامت زیاد می‌شوند. لذا طراحی صحیح و حصول ضرایب اطمینان مناسب و مطمئن موجب جلوگیری از این‌گونه خسارت‌ها و خسارت‌های مشابه است. از طرفی با توجه به نیاز کشور به مهار و ذخیره آب‌های سطحی جهت تولید برق، مصارف کشاورزی، جلوگیری از خسارت سیل، احداث سازه‌های آبیگر به خصوص سدها بسیار مهم و حائز اهمیت است (امیدواری‌نیا و موسوی جهرمی، ۱۳۹۱). سدهای خاکی از جمله مهم‌ترین و عظیم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که ملاحظات فنی و اقتصادی آنها بسیار تأثیرگذار است. همچنین با توجه به فناوری‌های روز لازم است تا با مدل‌سازی سد توسط نرم افزارهای معتبر و بررسی نتایج حاصله، پارامترهای مشخصه مصالح بکار رفته در سد را اصلاح کرد و به شرایط مرزی مناسب جهت مدل‌سازی عددی دست یافت و به این ترتیب توانایی پیش‌بینی رفتار سد و بطور کلی دانش سدسازی را بهبود بخشید (باقرزاده خلخالی، ۱۳۸۷).

با توجه به اینکه قسمت عمده تغییرشکل‌ها و عوارض احتمالی سد در دوران ساخت و اولین آبیگری رخ می‌دهند، بررسی رفتار سدهای خاکی در طول مراحل ساخت و اولین آبیگری، دارای اهمیت بسیاری از نظر ارزیابی پایداری و ایمنی می‌باشد. بخش عمده فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته سد در زمان ساخت به وجود می‌آید که این مسأله، لزوم بررسی و مدل‌سازی عددی و رفتارسنجی حین ساخت را آشکار می‌کند (فتح‌اللهی مرنی، ۱۳۸۱). میزان فشار آب منفذی، کاملاً متأثر از سرعت ساخت می‌باشد و زمانی که سرعت اجرای لایه‌ها بالا می‌باشد، فشار آب منفذی ایجاد شده افزایش ناگهانی خواهد داشت. بدیهی است در صورتی که سرعت اجرای

دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر روی سد همگن و غیرهمگن به‌منظور بررسی تأثیر فشار آب حفره‌ای بر روند شکل‌گیری و آغاز پدیده شکست هیدرولیکی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان فشار آب حفره‌ای در ایجاد این پدیده تأثیر چشم‌گیری دارد.

هدف اصلی این تحقیق آنالیز ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی نسبت به زمان در شرایط بحرانی، بررسی افزایش فشار آب منفذی در فونداسیون سدهای خاکی، بررسی زمان لازم برای تحکیم لایه به لایه خاکریزی‌ها و اثرات آن بر فشار آب منفذی، و هم‌چنین مقایسه عملکرد سدهای خاکی همگن و غیرهمگن در شرایط ساخت مرحله‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد چیتگر یک سد تفرجگاهی تفریحی در منطقه غرب تهران می‌باشد که محور سد اصلی دارای امتداد شرقی‌غربی بوده و ارتفاع آن متغیر است به‌طوری‌که در بیشترین حالت این رقم بالغ بر ۲۰ متر می‌گردد. حجم مخزن سد ۱۰ میلیون متر مکعب بوده و طول تاج سد اصلی آن معادل با ۱۴۰۰ متر و تراز تاج حدود ۱۲۶۵ متر می‌باشد. تصویر سه‌بعدی از موقعیت سد خاکی چیتگر و دریاچه آن در شکل ۱ و موقعیت محل گمانه‌ها و نقاط نمونه‌برداری شده از محدوده سد در شکل ۲ نشان شده است.

با توجه به وجود مصالح مخلوط سنگریزه‌ای، سنگی، و خاکی در نزدیکی محل ساختگاه سد، جنس بدنه سد اصلی چیتگر پس از بررسی‌های لازم به صورت تلفیقی از بدنه خاکی به همراه قسمتی سنگریزه‌ای تعیین گردید. خاک موجود در محدوده احداث سد اصلی تامین‌کننده مصالح بدنه خاکی سد می‌باشد.

نرم افزار SPEED-3D مدل کردند و اثر تغییرات نفوذپذیری و عرض هسته را نیز بررسی کردند.

دارسنج (۱۳۸۸)، به بررسی رفتار سد علویان در طول مراحل ساخت و اولین آبیگری توسط تحلیل‌های عددی و تکنیک تحلیل برگشتی پرداختند. آن‌ها به‌منظور مدل‌سازی از نرم‌افزار FLAC 2D استفاده کرده و تغییر مکان‌های افقی و تنش‌های کل سد در پایان ساخت و مراحل آبیگری و نیز تغییرات نسبت قوس‌زدگی را مورد ارزیابی قرار دادند.

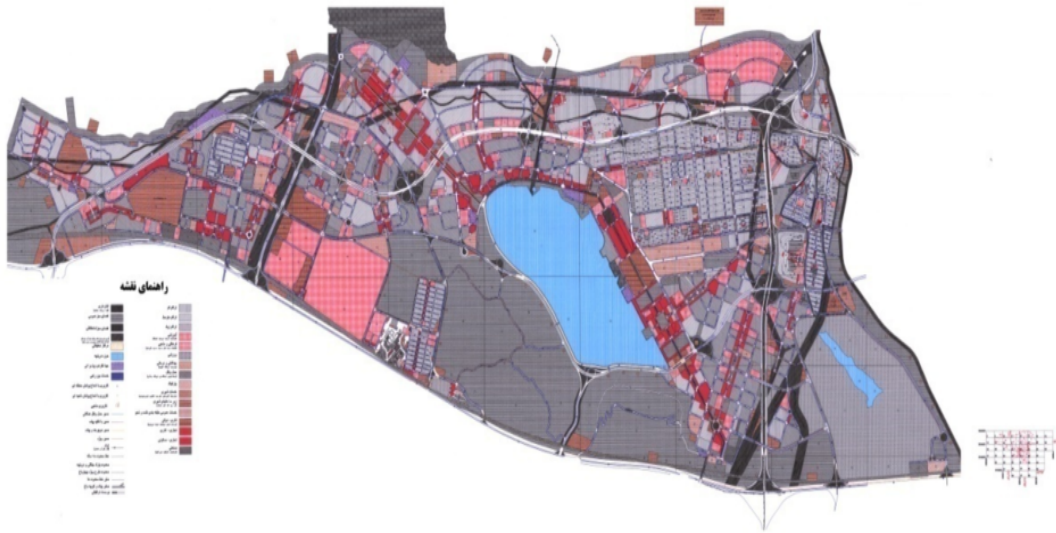
Hilf (1948)، روشی را برای تخمین مقدار فشار آب حفره‌ای برای خاک‌های نیمه اشباع از تئوری تحکیم یک بعدی ارائه کرد و آن را با مقادیر اندازه‌گیری شده در سایت مقایسه کرد. شرایط این روش زهکشی نشده، تراکم‌پذیری به صورت یک‌بعدی و کرنش جانبی برابر صفر بود. او به این نتیجه رسید که زایل شدن مقادیر هوای محبوس در خاک که با اشباع شدن خاک همراه است باعث افزایش فشار آب حفره‌ای می‌گردد.

NG و Pang (2000)، به بررسی تأثیر فشار آب حفره‌ای در رفتار تنش کرنش سدهای خاکی پرداختند و نتایجی را در خصوص رفتار تنش کرنش در زمان‌های مختلف ارائه کردند. آن‌ها با محاسباتی که توسط کدهای کامپیوتری انجام شد به بررسی توزیع فشار آب حفره‌ای و میزان نشست در هنگام ساخت سد و رفتار تنش کرنش نهایی سطح زیرین سد پرداختند.

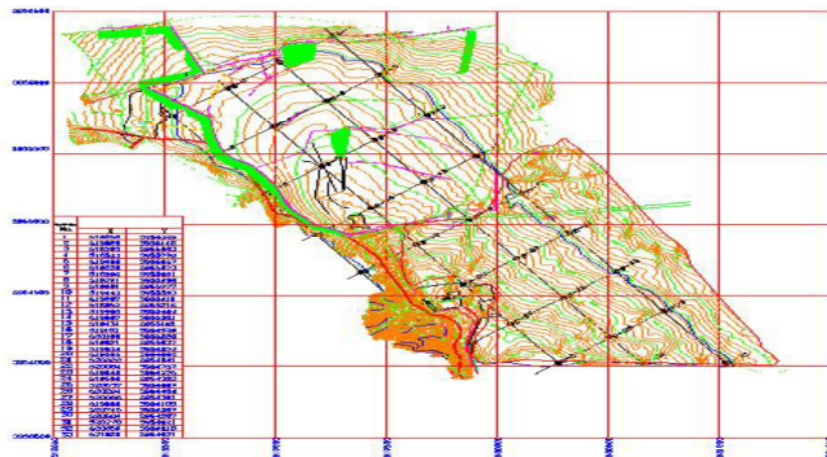
Gens و همکاران (2006)، با در نظر گرفتن فشار هوا و سطح حالت ویژه برای پوسته، رفتار فشار آب حفره‌ای هسته سد ال‌لیمونرو^۱ را در طول ساخت و آبیگری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با فرض رفتار زهکشی نشده در حین اولین آبیگری به این نتیجه رسیدند که با پر شدن سطح مخزن، تنش کل افزایش می‌یابد که بر قسمت بالا-دست هسته اثر می‌کند.

Wang و همکاران (2013)، پدیده شکست هیدرولیکی را با استفاده از یک مدل المان محدود مورد بررسی قرار

¹ . El Limonero



شکل ۱. موقعیت دریاچه چیتگر



شکل ۲. موقعیت محل گمانه ها و نقاط نمونه برداری شده از محدوده سد

جهت دستیابی به اهداف تحقیق امکان انجام آزمایش‌های متعددی بر روی خاک وجود دارد، اما با توجه به عواملی از جمله نوع تحقیق، امکانات موجود، کنترل هزینه‌ها و زمان، موارد زیر به‌عنوان آزمایش‌های اصلی در آزمایشگاه مکانیک خاک انجام شد:

- تعیین منحنی دانه‌بندی خاک (شامل دانه‌بندی مکانیکی و هیدرومتری)
- تعیین حدود آتربرگ
- تعیین مشخصات تراکمی خاک
- تعیین چگالی خاک
- آزمایش نفوذپذیری

در تحقیق حاضر ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی نسبت به زمان بررسی شد که یکی از مراحل انجام این کار، بررسی مصالح و پارامترهای مقاومتی تشکیل‌دهنده بدنه و فونداسیون سدخاکی می‌باشد. بنابراین مجموعه‌ای از آزمایش‌های کلاسیک مکانیک خاک و آزمایش‌های دیگر نظیر آزمایش برش مستقیم و تحکیم بر روی نمونه مصالح موجود انجام شده است که نتایج مربوط به آن در ادامه مقاله ارائه گردیده است. مطالعات بر روی خاک به‌منظور تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی و تعیین خواص مهندسی آن صورت گرفته است تا در اجرای عملیات ساخت و ساز بتواند مفید واقع شده و از آن استفاده گردد.

افقی) و شیب دامنه پایین دست ۱ به ۳ (قائم به افقی) است. شکل ۳ مقطع عرضی سد را نشان می‌دهد.

شبکه استفاده شده در نرم افزار جهت مدل‌سازی مراحل ساخت سد در شکل ۴ ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، شالوده سد چیتگر تا عمق ۳۰ متری و بالادست و پایین‌دست سد از هر طرف ۴۰ متر به صورت افقی در شبکه المان‌ها مدل گردیده است.

در نهایت چهار مدل مختلف برای سد خاکی چیتگر به صورت همگن و غیرهمگن بر روی بستر درشت‌دانه و ریزدانه شبیه‌سازی گردید. جدول ۱، ترکیب نوع فونداسیون و بدنه سد در چهار مدل مختلف را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که در حالت‌های مختلف مدل‌سازی، پارامترهای مقاومتی خاک، مراحل مختلف بارگذاری و افزایش و استهلاک فشار آب منفذی، شرایط زمانی تحکیم ارائه گردیده و در کلیه مدل‌ها رفتار خاک به صورت الاستیک‌پلاستیک بوده و از مدل موهرکلمب استفاده گردیده است.

برای به‌دست آوردن پارامترهای ورودی مورد نیاز برای مدل‌سازی در نرم‌افزار PLAXIS، یک سری کامل از آزمایش‌های ژئوتکنیکی (آزمایش دانه‌بندی مکانیکی و هیدرومتری، آزمایش تعیین حدوداتریب، آزمایش تراکم، آزمایش نفوذپذیری، آزمایش برش‌مستقیم و آزمایش تحکیم) بر روی نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. داده‌های انتخابی بدنه و فونداسیون سد خاکی در جدول ۲ و داده‌های انتخابی مصالح فیلتر در جدول ۳ آورده شده است.

▪ آزمایش برش مستقیم

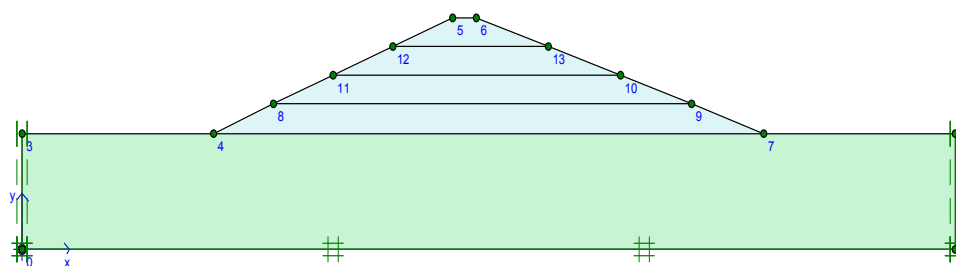
▪ آزمایش تحکیم

مدل‌سازی عددی

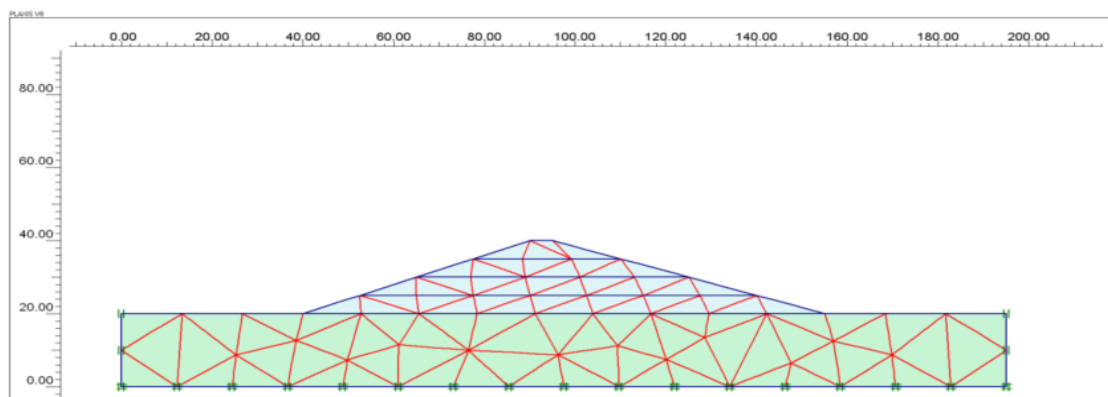
در این تحقیق فونداسیون و بدنه سد به صورت المان محدود با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS مورد بررسی قرار گرفته است. سد خاکی مطالعه موردی به صورت لایه به لایه در ضخامت‌های مشخص مدل‌سازی شده و پس از اندازه‌گیری فشار آب منفذی، مدت زمان مناسب برای تحکیم لایه مورد نظر و کاهش فشار آب منفذی به مدل - عددی داده شده است. با تکرار روند فوق در فواصل مختلف زمانی، تحکیم لایه‌ها و تغییرات مشخصه‌های خاک با گذشت زمان مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با افزایش لایه‌های جدید تا مرحله اتمام ساخت، مدل سد تحت وزن خود تحلیل گردیده است.

آنالیز ضریب اطمینان مرحله‌ای به صورت لایه به لایه در طول مراحل ساخت سد انجام گردیده و ضریب اطمینان نهایی سد در پایان مرحله تحکیم حاصل گردیده است. در نهایت نتایج حاصل از سد خاکی همگن و غیرهمگن بر روی فونداسیون ضعیف و قوی مورد بررسی قرار گرفته است.

سد خاکی چیتگر دارای ارتفاع معادل بیست متر از بستر دریاچه است. حداکثر عرض مقطع سد در قسمت تحتانی آن برابر ۱۱۵ متر و حداقل عرض مقطع در تاج سد معادل ۶ متر است. شیب دامنه بالادست ۱ به ۲/۵ (قائم به



شکل ۳. شکل مقطع عرضی سد با ارتفاع ۲۰ متر



شکل ۴. شکل المان بندی استفاده شده در نرم افزار PLAXIS

جدول ۱. ترکیب نوع فونداسیون و بدنه سد خاکی در چهار مدل انتخابی

ردیف	ارتفاع سد	فونداسیون	بدنه سد	هسته	نوع سد
۱	۲۰	شن رس دار ^۱	شن رس دار	همگن
۲	۲۰	شن رس دار	شن رس دار	رس با پلاستیسیته بالا	غیر همگن
۳	۲۰	رس با پلاستیسیته بالا ^۲	شن رس دار	همگن
۴	۲۰	رس با پلاستیسیته بالا	شن رس دار	رس با پلاستیسیته بالا	غیر همگن

جدول ۲. پارامترهای انتخابی مصالح بدنه و فونداسیون سد خاکی در مدل عددی

مشخصات خاک	شن رس دار	رس با پلاستیسیته بالا
وضعیت زهکشی	زهکشی شده	زهکشی نشده
وزن مخصوص (ton/m ³)	۲/۲۶ ~ ۲/۲۸	۲/۰۴ ~ ۲/۰۶
وزن مخصوص خشک (ton/m ³)	۲/۰۴ ~ ۲/۰۹	۱/۷۵ ~ ۱/۷۸
وزن مخصوص اشباع (ton/m ³)	۲/۲۳ ~ ۲/۳۲	۲/۱۰ ~ ۲/۱۴
درصد رطوبت	۹/۳ ~ ۱۱/۴۳	۱۵/۰۵ ~ ۱۶/۷
نفوذ پذیری K _x (cm/s)	۱۰ ^{-۴} ~ ۱۰ ^{-۶}	۱۰ ^{-۷} ~ ۱۰ ^{-۸}
نفوذ پذیری K _y (cm/s)	۱۰ ^{-۴} ~ ۱۰ ^{-۶}	۱۰ ^{-۷} ~ ۱۰ ^{-۸}
مدول الاستیسیته (kg/cm ²)	۵۰۰ ~ ۷۰۰	۱۰۰ ~ ۲۰۰
ضریب پواسون	۰/۳ ~ ۰/۳۵	۰/۴ ~ ۰/۴۵
چسبندگی (kg/cm ²)	۰/۲ ~ ۰/۲۵	۰/۴ ~ ۰/۴۵
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۸ ~ ۳۳	۵ ~ ۱۰

^۱. Gravel Clay (GC)

^۲. Clay High Plasticity (CH)

جدول ۳. پارامتر های انتخابی مصالح فیلتر سد خاکی در مدل عددی	
مشخصات فیلتر	ماسه بد دانه بندی شده به همراه شن
وضعیت زهکشی	زهکشی شده
وزن مخصوص (ton/m^3)	۲
وزن مخصوص اشباع	۲/۲
نفوذ پذیری K_x (cm/s)	10^{-1}
نفوذ پذیری K_y (cm/s)	10^{-1}
مدول الاستیسیته (kg/cm^2)	۳۰۰
ضریب پواسون	۰/۳
چسبندگی (kg/cm^2)	۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۰

نتایج و بحث

آنالیزهای سد به صورت ساخت یک جا^۱

در این مرحله چهار آنالیز مختلف بر روی سد خاکی همگن و غیرهمگن (هسته رسی) با جنس بدنه شن رس - دار بر روی فونداسیون شن رس دار و رس با پلاستیسیته - بالا انجام شده است. در این حالت نوع محاسبات به صورت ساخت یک جا می باشد. برای بررسی رفتار کلی سد، این سازه به صورت یک جا به همراه آب مخزن بالادست مدل شده و تغییر مکان ها و تنش های وارده نیز محاسبه گردیده است. جهت تجزیه و تحلیل نتایج نمونه ای از خروجی مدل در شکل های ۵ الی ۱۲ ارائه گردیده است. بررسی شکل های ۵ و ۷ نشان می دهند که در سدهایی که بر روی فونداسیون شن رس دار قرار گرفته اند، گسیختگی روی شیب پایین دست سد اتفاق می افتد ولی با توجه به شکل های ۶ و ۸ سدهایی که بر روی فونداسیون رس با پلاستیسیته بالا قرار گرفته اند، ناحیه گسیختگی بزرگتری دارند که در محدوده فونداسیون سد گسترش می یابد.

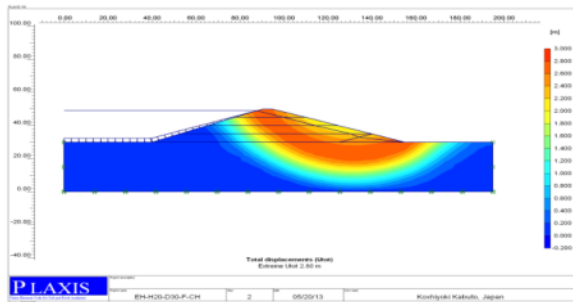
در بررسی نتایج آنالیز سد خاکی همگن و غیرهمگن بر

روی بستر شن رس دار در شکل های ۹ و ۱۰ مشاهده می گردد که به دلیل درشت دانه بودن لایه های خاک بستر، فشار آب منفذی اضافی در فونداسیون سد ایجاد نگردیده است لیکن فشار آب منفذی اضافی صرفاً در هسته رسی سد غیرهمگن اتفاق می افتد که این به دلیل کم بودن نفوذپذیری خاک های ریزدانه هسته می باشد.

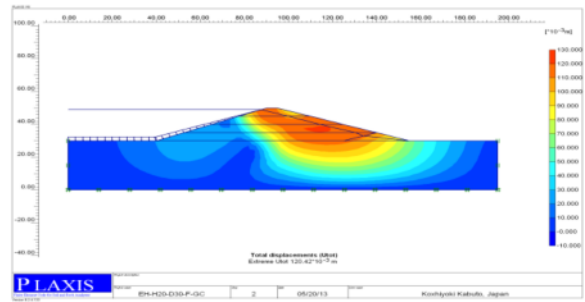
در بررسی نتایج آنالیز سد خاکی همگن و غیرهمگن بر روی بستر رس با پلاستیسیته بالا در شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می گردد که به دلیل محبوس شدن آب، فشار آب حفره ای اضافی قابل توجهی رخ داده است. این فشار آب حفره ای زیاد باعث تغییر مکان سد به سمت پایین دست شده و باعث کاهش محسوس ضریب اطمینان می گردد.

از مقایسه بین گراف های مربوط به سد خاکی همگن و غیرهمگن بر روی بستر شن رس دار ملاحظه گردید که تغییر مکان کلی آن ها تقریباً یکسان است. ضمناً گراف های مربوط به سد خاکی همگن و غیرهمگن بر روی بستر رس با پلاستیسیته بالا نشان می دهند که در این حالت تغییر مکان کلی سد در هر دو حالت همگن و غیرهمگن افزایش یافته و در نتیجه سد دچار گسیختگی گردیده است.

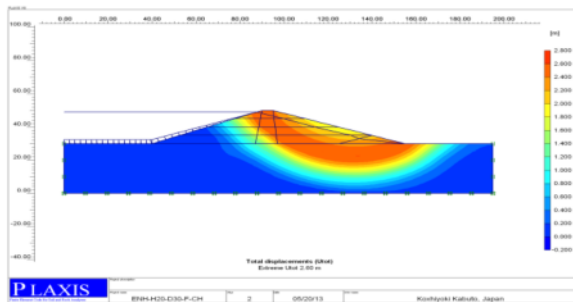
^۱ . Total multipliers



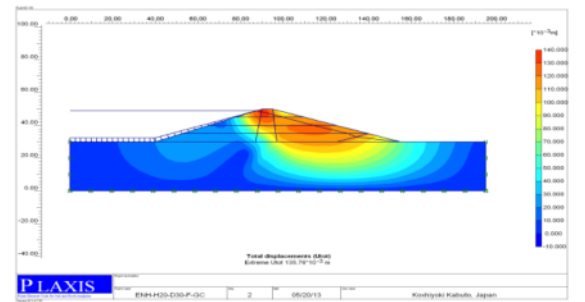
شکل ۶. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به سد خاکی همگن بر روی فونداسیون ضعیف (CH) (حداکثر ۲/۸ متر)



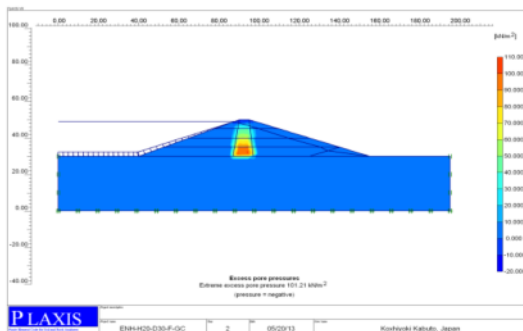
شکل ۵. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به سد خاکی همگن بر روی فونداسیون قوی (GC) (حداکثر ۱۲/۴۲ سانتی متر)



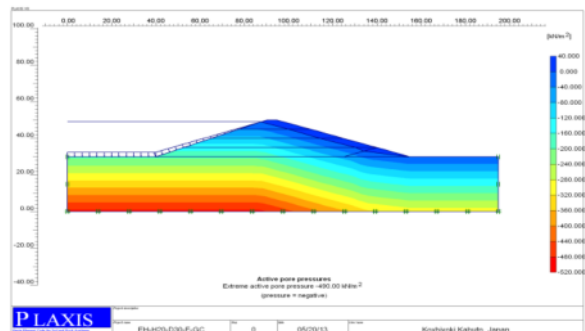
شکل ۸. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به سد خاکی غیرهمگن بر روی فونداسیون ضعیف (CH) (حداکثر ۲/۶ متر)



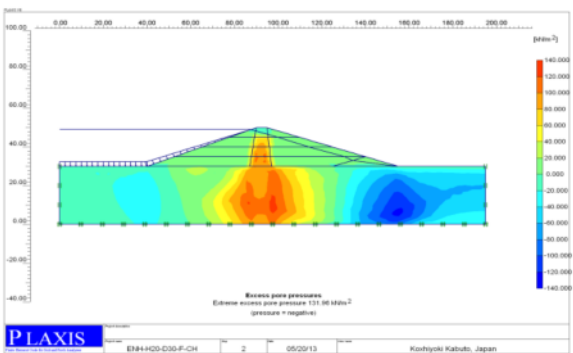
شکل ۷. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به سد خاکی غیرهمگن بر روی فونداسیون قوی (GC) (حداکثر ۱۳/۵ سانتی متر)



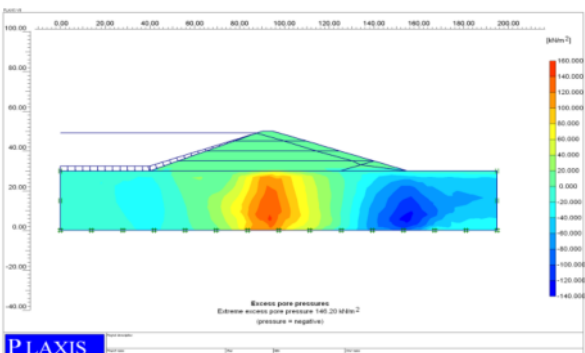
شکل ۱۰. فشار آب حفره ای اضافی در آنالیز مربوط به سد خاکی غیرهمگن بر روی فونداسیون قوی (GC) (حداکثر $101/21 \text{ KN/M}^2$)



شکل ۹. فشار آب حفره ای در آنالیز مربوط به سد خاکی همگن بر روی فونداسیون قوی (GC) (حداکثر -490 KN/M^2)



شکل ۱۲. فشار آب حفره ای اضافی در آنالیز مربوط به سد خاکی غیرهمگن بر روی فونداسیون ضعیف (CH) (حداکثر $131/96 \text{ KN/M}^2$)



شکل ۱۱. فشار آب حفره ای اضافی در آنالیز مربوط به سد خاکی همگن بر روی فونداسیون ضعیف (CH) (حداکثر $146/20 \text{ KN/M}^2$)

که در شکل‌های ۱۳ الی ۲۰ برخی از خروجی‌های مربوط به ساخت مرحله‌ای قبل و پس از تحکیم آورده شده است. نتایج آنالیزها نشان می‌دهد که سدخاکی همگن و غیرهمگن بر روی فونداسیون ریزدانه رسی، در اثر نیروهای وارده از بدنه سد و آب پشت آن و همچنین بالارفتن فشار آب حفره‌ای اضافی دچار ناپایداری و گسیختگی می‌گردد. بنابراین در تحلیل‌های بعدی سد به صورت لایه به لایه مدل شد و پس از هر لایه خاکریزی، به لایه‌های سد و فونداسیون آن فرصت تحکیم داده شد تا فشار آب حفره‌ای اضافی تعدیل گردد. البته این نکته نیز باید مورد توجه قرار گیرد که با توجه به محدودیت زمان در ساخت سازه‌های عمرانی و با در نظر گرفتن شرایط اجرایی پروژه، زمان تحکیم تا صفر شدن فشار آب حفره‌ای اضافی ادامه پیدا نکرده است بلکه تا زمانی ادامه یافته که مجموعه فونداسیون و بدنه سد به یک تعادل مشخص از نظر فشار آب حفره‌ای برسد.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نتایج آنالیز سد همگن نشان می‌دهند که پس از ۱۲ لایه خاکریزی و تحکیم، حداکثر تغییر مکان معادل $3 \times 10^{-3} \times 353/80$ متر به دست آمد. با توجه به شکل‌های ۱۹ و ۲۰، فشار آب منفذی اضافی نیز در مرحله آخر آبیگری سد خاکی همگن از ۱۵۱/۶۶ کیلو-نیوتن بر مترمربع (در شرایط قبل از تحکیم) به ۱۰۰/۲ کیلونیوتن بر مترمربع (در شرایط پس از تحکیم) رسیده است. بنابراین با اتخاذ این روش، امکان ساخت سد و افزایش پایداری سد همگن فراهم گردید. ضریب اطمینان نهایی سد همگن در شرایط تحکیم مرحله‌ای معادل ۱/۴۵ حاصل گردیده است که قابل قبول بوده و نشان از پایداری سد دارد.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۶ نتایج آنالیز سد غیرهمگن نشان می‌دهند که پس از ۱۲ لایه خاکریزی و تحکیم مرحله‌ای، حداکثر تغییر مکان معادل $3 \times 10^{-3} \times 346/80$ متر به دست آمد. با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸، فشار آب منفذی اضافی نیز در مرحله آخر آبیگری سد خاکی غیرهمگن از

آنالیزهای سد به صورت ساخت مرحله‌ای^۱

در این مرحله چهار آنالیز مختلف بر روی سد خاکی همگن و غیرهمگن با جنس بدنه شن رس‌دار بر روی فونداسیون شن رس‌دار و رس با پلاستیسیته بالا انجام شده است که نوع محاسبات به صورت ساخت مرحله‌ای بوده است. در این روش برای بررسی رفتار کلی سد، ساخت سازه به صورت مرحله به مرحله مدل شده و در همان مرحله ضریب اطمینان پایداری بررسی گردیده است. سپس فرصت تحکیم به سازه داده شده و مجدداً ضریب اطمینان پایداری سد در آن مرحله خاص محاسبه گردیده است که این مراحل در برنامه PLAXIS در ۴۶ گام مختلف تا آبیگری کامل سد انجام شده است.

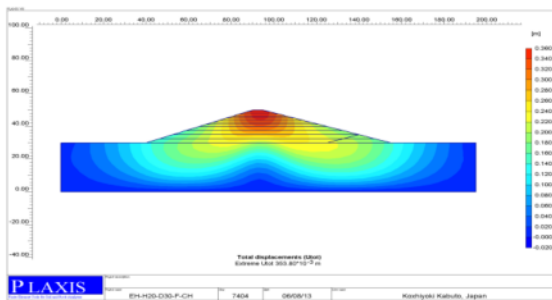
لایه‌های بدنه سد در ۱۲ لایه تعریف شده‌اند که ۴ لایه اول دارای ارتفاع ۲/۵ متر و ۸ لایه بعدی دارای ارتفاع ۱/۲۵ متر می‌باشند که به منظور حفظ پایداری سد، با افزایش ارتفاع و شیب سد از ضخامت لایه‌ها کاسته شده است. در نهایت تغییر مکان‌ها و تنش‌های وارده نیز محاسبه شده است. نظر به اینکه بستر طبیعی قبل از ساخت سد پیش تحکیم یافته است لذا هیچ گونه فشار آب منفذی اضافی در شرایط اولیه مدل وجود ندارد و به همین علت مدت زمان تحکیم اولیه آن ۶ سال در نظر گرفته شده است تا فشار آب حفره‌ای اضافی به صفر تقلیل نماید. لازم به توضیح است که در هر مرحله از ساخت لایه فوقانی سد، ضریب اطمینان پایداری آن محاسبه گردیده و پس از آن فرصت تحکیم جهت کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی داده شده است و بنابراین پس از تحکیم، ضریب اطمینان سد مجدداً افزایش یافته است.

پس از انجام آنالیزهای مجدد در حالت ساخت مرحله‌ای و بررسی خروجی‌های مربوط به نرم‌افزار مشخص شد که فشار آب منفذی تا حد زیادی تعدیل شده و فونداسیون و بدنه سد خاکی همگن و غیرهمگن نیز در ساخت مرحله‌ای دچار ناپایداری و گسیختگی نمی‌شود

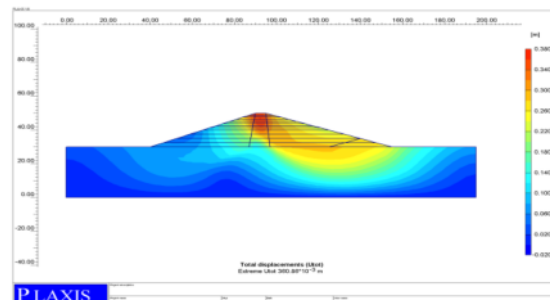
^۱ Stage construction

سد تأمین شده و دچار گسیختگی نشده است لیکن ضریب پایداری این نوع سد نسبت به سد همگن کمتر می باشد. دیاگرام نهایی مربوط به تغییرات ضریب اطمینان سد خاکی همگن و غیرهمگن نسبت به زمان در شکل های ۲۱ و ۲۲ ارائه گردیده است.

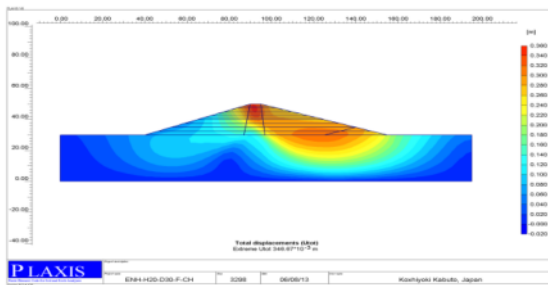
۱۴۸/۲۵ کیلونیوتن بر مترمربع (در شرایط قبل از تحکیم) به ۵۸/۲۶ کیلونیوتن بر مترمربع (در شرایط پس از تحکیم) رسیده است. بنابراین با اتخاذ این روش، امکان ساخت مرحله ای و افزایش پایداری سد فراهم گردید. ضریب اطمینان نهایی سد غیرهمگن در شرایط تحکیم مرحله ای معادل ۱/۲ حاصل گردیده است که در این حالت پایداری



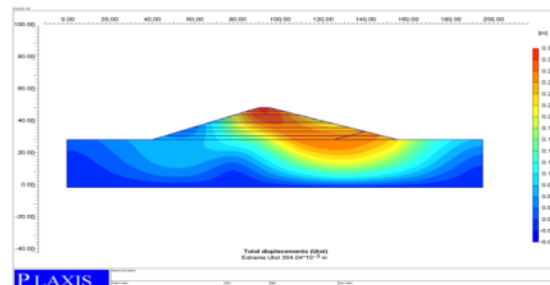
شکل ۱۳. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به آبگیری سد خاکی غیرهمگن به ارتفاع ۱۹ متر قبل از تحکیم (حداکثر ۳۶ سانتی متر)



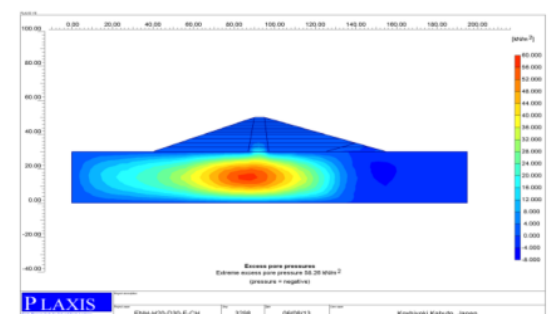
شکل ۱۴. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به آبگیری سد خاکی همگن به ارتفاع ۱۹ متر پس از تحکیم (حداکثر ۳۵ سانتی متر)



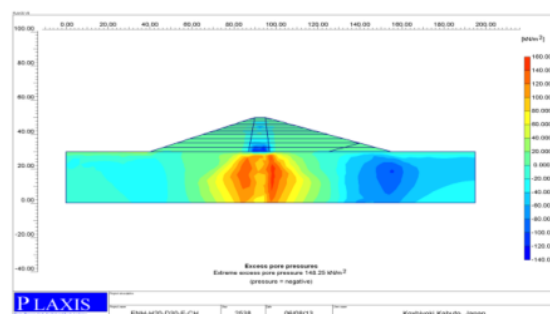
شکل ۱۵. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به آبگیری سد خاکی غیرهمگن به ارتفاع ۱۹ متر پس از تحکیم (حداکثر ۳۴/۶ سانتی متر)



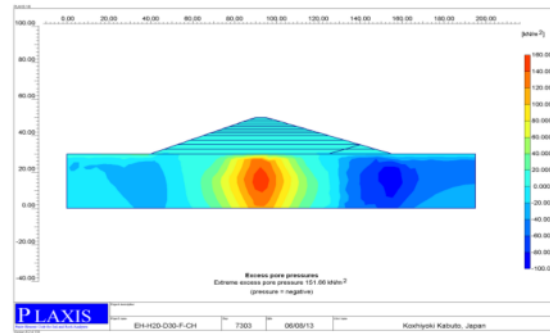
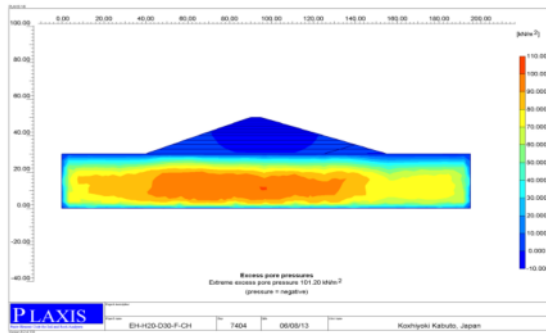
شکل ۱۶. تغییر شکل کلی در آنالیز مربوط به آبگیری سد خاکی همگن به ارتفاع ۱۹ متر قبل از تحکیم (حداکثر ۳۰ سانتی متر)



شکل ۱۷. فشار آب حفره ای اضافی در آنالیز مربوط به آبگیری سد خاکی غیرهمگن به ارتفاع ۱۹ متر پس از تحکیم (حداکثر ۵۸/۲۶ KN/M²)

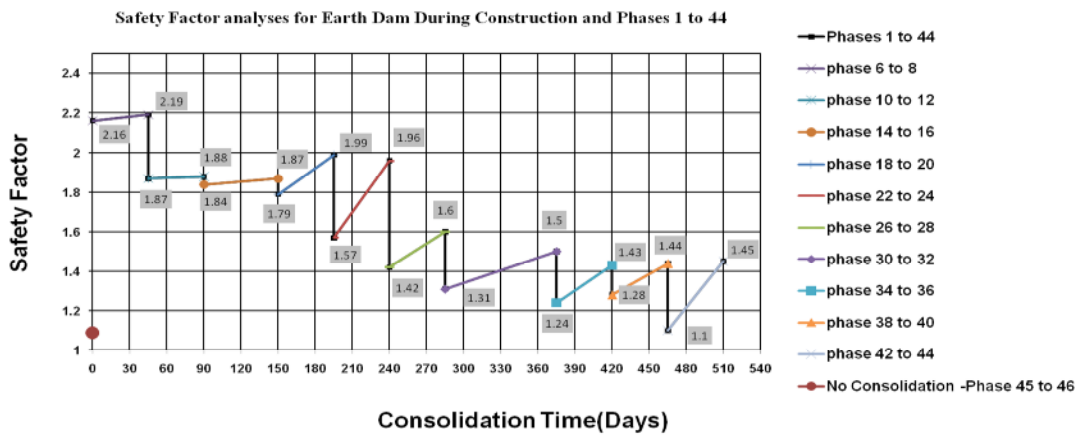


شکل ۱۸. فشار آب حفره ای اضافی در آنالیز مربوط به آبگیری سد خاکی غیرهمگن به ارتفاع ۱۹ متر قبل از تحکیم (حداکثر ۱۴۸/۲۵ KN/M²)

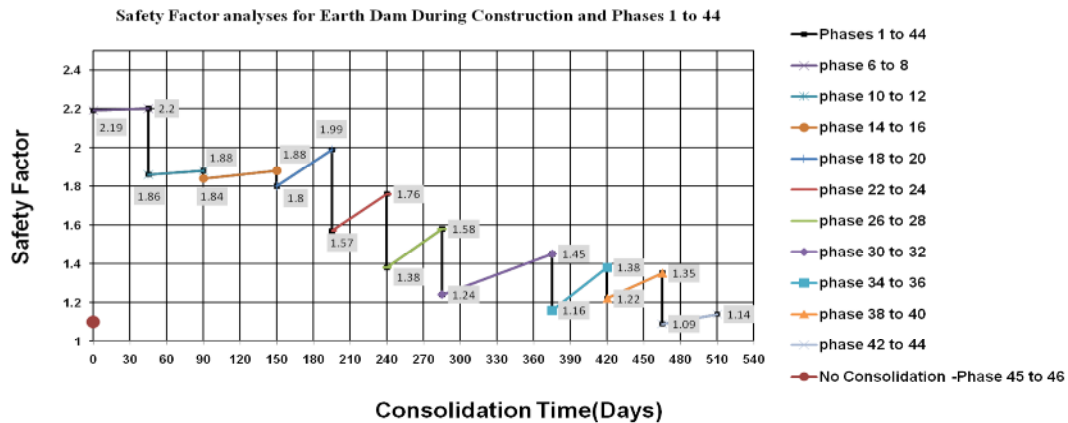


شکل ۲۰. فشار آب حفره ای اضافی در آنالیز مربوط به آبیگری سد خاکی همگن به ارتفاع ۱۹ متر پس از تحکیم (حداکثر 100 KN/M^2)

شکل ۱۹. فشار آب حفره ای اضافی در آنالیز مربوط به آبیگری سد خاکی همگن به ارتفاع ۱۹ متر قبل از تحکیم (حداکثر 151 KN/M^2)



شکل ۲۱. گراف ضریب اطمینان مرحله ای پایداری سد خاکی همگن نسبت به زمان



شکل ۲۲. گراف ضریب اطمینان مرحله ای پایداری سد خاکی غیرهمگن نسبت به زمان

نتیجه گیری

سد خاکی مورد مطالعه در حالتی که بر روی فونداسیون از جنس شن رس دار ساخته می شود پایدار بوده و ضریب اطمینان به دست آمده در هر دو حالت همگن و غیرهمگن شبیه به هم می باشند، درحالتی که بر

روی فونداسیون ریزدانه رسی ساخته می شود ناپایدار بوده و دچار گسیختگی می شوند. بنابراین لازم است که این نوع سدها به صورت مرحله ای و لایه به لایه ساخته شوند و پس از ساخت هر لایه، فرصت لازم جهت تحکیم و تعدیل فشار آب حفره ای اضافی به فونداسیون سد داده

غیرهمگن دارای هسته رسی بهتر است اجرا و آبیگری به طور هم‌زمان انجام نگیرد چون فشار آب حفره‌ای زیادی در هسته سد ایجاد می‌شود که باعث کاهش ضریب اطمینان سد خواهد شد. لذا طراحی صحیح سد و آبیگری مناسب آن و حصول ضرایب اطمینان مناسب و مطمئن به‌منظور جلوگیری از خسارت‌های ناشی از تخریب سد امری بسیار مهم می‌باشد.

شود. در سدهایی که خاک بستر فونداسیون سد، ریزدانه رسی باشد در هنگام اجرا در صورتی که سطح آب بالا باشد، فشار آب حفره‌ای زیادی ایجاد می‌شود و باعث تخریب سد از زیر فونداسیون می‌گردد. در خصوص سدهای با فونداسیون ریزدانه رسی بهتر است آبیگری سد پس از ساخت آن و به صورت مرحله‌ای انجام گردد تا فشار آب حفره‌ای زیادی در موقع آبیگری تعدیل شود و ضریب اطمینان نهایی سد افزایش یابد. در سدهای

فهرست منابع

- امیدواری‌نیا، م. و موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۹۱. تاثیر طول آستانه و زاویه در پرتاب کننده‌های مثلثی بر مسیر کلی پرتابه خروجی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱ (۴): ۱-۱۸.
- باقرزاده خلخالی، ا. ۱۳۸۸. ابزار دقیق متداول در سدهای خاکی- سنگریزه‌ای. کارگاه آموزشی شرکت سهامی خدمات مهندسی برق مشانیر، تهران، ۱ تا ۲ آبان.
- حیدری، ط. ۱۳۸۲. مقایسه رفتار دینامیکی سدهای خاکی در حالت دو بعدی و سه بعدی. دانشگاه علم و صنعت، برای دریافت کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب گروه عمران، ۱۵۰ صفحه.
- دارسنج، س. ۱۳۸۸. تحلیل و بررسی رفتار سدهای خاکی در حین اولین آبیگری- مطالعه موردی سد علویان، دانشگاه تبریز، برای دریافت کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب گروه عمران، ۲۱۵ صفحه.
- رحیمی، ح. ۱۳۸۹. سدهای خاکی. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۶۷۱ صفحه.
- شریفی، ا. ۱۳۸۲. تحلیل تراوش و زیر تراوش از سد خاکی با استفاده از روش عددی المان‌های مرزی، دانشگاه صنعتی شریف، برای دریافت کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب گروه عمران، ۱۷۵ صفحه.
- غروی، م.، محمدی، م. ۱۳۸۸. بررسی ضرورت مدل‌سازی لایه‌ای در تحلیل استاتیکی سد خاکی. دومین همایش ملی سد سازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، ۱۰ اسفند، زنجان.
- فتح‌اللهی مرنی، ط. ۱۳۸۱. تحلیل عددی تأثیر زهکشهای بالادست بر فشار آب حفره‌ای و پایداری شیب بالادست سد خاکی در شرایط تخلیه سریع مخزن، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، برای دریافت کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب گروه عمران، ۲۰۰ صفحه.
- فیضی ماسوله، ش. ۱۳۸۲. تحلیل سدهای خاکی با هسته با رطوبت بالا، دانشگاه تهران، برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب گروه عمران، ۱۷۳ صفحه.
- مکرم، ن. ۱۳۸۱. آنالیز دینامیکی سدهای خاکی با هسته بتن آسفالتی. دانشگاه تهران، برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- خاک و پی گروه عمران، ۲۱۰ صفحه.
- موسوی، ش. ۱۳۸۲. آنالیز غیر خطی تخمین پارامترهای شکست سدهای خاکی، دانشگاه صنعتی شریف، برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی گروه عمران، ۱۶۵ صفحه.
- Gens, A., Sánchez, M. and Sheng, D., 2006. On constitutive modelling of unsaturated soils. *Acta Geotechnica*, 3: 137-147.
- Hilf, J.W., 1948, June. Estimating construction pore pressures in rolled earth dams. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3: 234-240.
- Ng, C.W. and Pang, Y.W., 2000. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(2): 157-166.

Wang, S.Y., Sloan, S.W., Fityus, S.G., Griffiths, D.V. and Tang, C.A., 2013. Numerical modeling of pore pressure influence on fracture evolution in brittle heterogeneous rocks. *Rock mechanics and rock engineering*, 46(5): 1165-1182.