

بررسی نشست سدهای خاکی با استفاده از روش المان محدود (بررسی نشست سد مهاباد بعنوان مطالعه موردی)

کمال رحمانی

مربی گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی مهاباد

صابر پیرونی

مربی گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی مهاباد

ارسطو ارمغانی

استادیار مهندسی عمران - سازه دانشگاه تبریز

چکیده

آنچه در ساخت سدهای خاکی مدرن، حیاتی است کنترل و رفتارنگاری (**Monitoring**) صحیح این سازه‌های ژئوتکنیکی می‌باشد. بهبود روش‌های کنترل پایداری، استفاده از تنش موثر و اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در سدهای خاکی باعث ایمن شدن ساخت این قبیل سدها می‌گردد. در حال حاضر این نظریه مطرح است که به‌جای استفاده از ضریب اطمینان‌های موجود در مقابل لغزش، طراحی‌ها بر اساس تغییر شکل‌های قابل قبول انجام گیرد. یک روش تحلیلی استفاده از روش المان محدود است که قابلیت پیش‌بینی پارامترهای تغییر شکل را دارد، رفتار نگاری سدها با نصب ابزار دقیق در نقاط حساس و اندازه‌گیری پارامترهای مختلف نظیر فشارهای منفذی و تغییر شکل‌ها اعم از نشست و جابه‌جایی امکان‌پذیر می‌باشد، در این مقاله رفتارنگاری سد مخزنی مهاباد با استفاده از اطلاعات ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در انجام تحلیل عددی از بسته نرم افزاری **plaxis** که یک نرم افزار تحلیلی بر اساس المان محدود می‌باشد، استفاده شده است.

به کمک بررسی داده‌ها و انجام آنالیز معکوس وضعیت سد خاکی مهاباد از نظر تغییر شکل‌ها و تراوش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. از آنجایی که بیش از ۳۰ سال از عمر سد می‌گذرد، در همان ابتدای ساخت این سد نشست‌ها و جابه‌جایی‌های افقی غیر متعارفی در بدنه سد ملاحظه شده است. بطوریکه نشست پی تا زمان اتمام عملیات اجرایی (از سال ۱۳۴۴ تا ۱۳۴۸) ۱۳۰ سانتی‌متر و در دوره بهره‌برداری از سال ۱۳۴۹ تا سال ۱۳۷۶) ۶۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. از زمان ساخت تا سال ۱۳۷۶ حداکثر نشست و جابه‌جایی افقی به ترتیب برابر ۱۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردیده است. پس از اجرای دیوار آببند و تکمیل عملیات تزریق در پی سد، میزان تراوش از پی نیز کاهش یافته و طبق محاسبات عددی در حد ناچیز (۰.۰۷ سانتی‌متر مکعب در دقیقه) و میزان تراوش در بدنه سد نیز ۵/۸ سانتی‌متر مکعب در دقیقه می‌باشد.

کلید واژه‌ها:

سد مهاباد، المان محدود، تغییر شکل، تراوش، ترک

۱- مقدمه

جدول ۱ مشخصات هندسی مقطع نمونه سد

سنگریزه‌ای با هسته	نوع سد
۷۰۰ متر	طول تاج سد
۸ متر	عرض تاج سد
۴۷.۵	ارتفاع سد از بستر رودخانه
۱۳۵۸.۵ متر از سطح دریاهای آزاد	حداکثر تراز از سطح دریاچه
۴۰۰۰ متر مکعب	سطح دیافراگم پی سد
۴۰۰ متر مکعب در ثانیه	ظرفیت تخلیه تونل تحتانی
۲۰ متر مکعب در ثانیه	ظرفیت تخلیه توربین‌ها

از قابلیت‌های اساسی یک سد این است که می‌تواند حجم زیادی از آب را پشت خود ذخیره کند. آب در شرایط حاضر یک عنصر اساسی در پیشرفت و تحرک اقتصادی یک منطقه به حساب می‌آید. اکثریت سدهای اولیه، بتنی بودند تا اینکه از سال ۱۹۳۰ با پیشرفت علم ژئوتکنیک و آگاهی به رفتار خاک، سد خاکی به عنوان اولین گزینه در صنعت سد سازی جهان مطرح شد. بهبود روش‌های کنترل پایداری، استفاده از تنش موثر و اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای باعث ایمن شدن ساخت سدهای خاکی شد.

با وجود این پیشرفت‌ها لغزش‌هایی نیز روی داده است که می‌توان مثال‌های متعددی را برای آن ارائه کرد و این نشان می‌دهد که نیازمند تدوین روش‌های جدید در کنترل و اجرا هستیم. در حال حاضر این نظریه مطرح است که به‌جای استفاده از ضریب اطمینان‌های موجود در مقابل لغزش، طراحی‌ها بر اساس تغییر شکل‌های قابل قبول انجام گیرد. یک روش تحلیلی استفاده از تکنیک المان محدود است که قابلیت پیش‌بینی پارامترهای تغییر شکل را دارد. برای ارزیابی این روش داشتن تغییر شکل‌های دقیق مورد نیاز است. تجربه نشان داده است ابزارها باید توسط مهندسين مجرب طراحی و نصب شوند. طراحی و نصب نادرست ابزارها و تجهیزات می‌تواند منجر به نتایج غیر مفید یا گمراه کننده گردد. اندازه دقیق جابه‌جائی‌هایی قائم حتی بدون نصب اندازه‌گیری جابه‌جایی داخلی می‌تواند بیان کننده تغییرات غیر قابل قبول حرکات بدنه سد باشد. بنابراین کنترل حرکات سدها اهمیت ویژه‌ای دارد. این مسئله علاوه بر کنترل سد می‌تواند کمک شایانی به مهندسين ژئوتکنیک در بهبود تئوری تئوری‌ها و اصلاح روش بکنند. بدیهی است که موارد غیر عادی اهمیت بیشتری دارد تا مهندسين با چالش‌هایی که در اجرا پیش می‌آید آشنا شده و برای آن چاره‌اندیشی کنند.

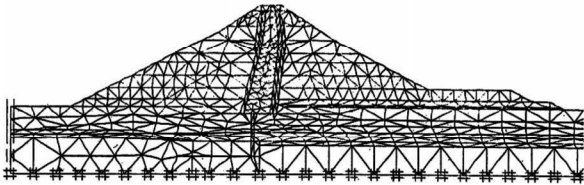
۲- سد مخزنی مه‌باد

سد مه‌باد بر روی رودخانه مه‌باد در استان آذربایجان غربی از نوع خاکی سنگریزه‌ای با هسته نفوذ ناپذیر باریک که کمی به سمت بالا دست تمایل داشته، می‌باشد. این هسته به وسیله دو لایه فیلتر در دو طرف بالادست و پایین دست حفاظت می‌گردد. قسمت خارجی پوسته بالا دست به‌صورت سنگریزه ساخته شده که بوسیله یک لایه سنگ‌چین حفاظت می‌شود. بخش داخلی پوسته بالا دست از مصالح شن ریز تشکیل یافته است. پوسته پایین دست طبق نقشه‌های طراحی از دو قسمت مصالح در هم متشکل بوده که در کنار فیلترهای پایین دست هسته قرار می‌گیرند.

۴- نرم‌افزارهای استفاده شده

در این مقاله از دو برنامه **plaxis** و **GMS** استفاده شده است. الف: **plaxis** یک برنامه المان محدود است که در خصوص آنالیز تغییر شکل پایداری پروژه‌های ژئوتکنیکی مسائل مربوط به خاک و سنگ تدوین شده است. برای شبیه سازی رفتار غیر خطی و وابسته به زمان مسائل ژئوتکنیکی نیاز به مدل‌های مخصوص است و علاوه بر

جابجایی‌هاست بدین شکل که جابجایی بستر سنگی در کف صفر است و از جابجایی افقی طرفین پی سد نیز جلوگیری شده است.



شکل ۱ نحوه شبکه‌بندی و قیدهای جانبی مدل

۷- ذانتخاب مدل رفتاری مصالح

انتخاب نوع مدل رفتاری متناسب با مصالح از بخش‌های بسیار مهم کار می‌باشد. برای بخش سنگی پی و دیافراگم از مدل الاستیک خطی استفاده شده، مصالحی از پی و بدنه که حاوی مصالح ریزدانه هستند و قابلیت نشست درازمدت را دارند به وسیله مدل **Soft soil creep** مدل شده‌اند. در بخش‌هایی که دارای خاصیت نشست دراز مدت نیستند مدل موهر کلمب استفاده شده است. (بخش- های فیلتر و خاکریز بالادست و پایین دست سد)

۸- شبیه‌سازی دوره بهره‌برداری سد و شرایط اولیه مدل

در دوره بهره‌برداری سد فقط تغییرات سطح آب دریاچه است که باعث تغییر تنش در سد و در نتیجه تغییر شکل آن می‌شود. برای شبیه‌سازی این بخش از مسئله چون در زمان آبیگری ما شاهد کاهش تنش موثر هستیم آنالیز پلاستیک زهکشی شده برای آن انتخاب شده است. اما در زمان پایین افتادن تراز آب دریاچه تنش موثر افزایش می‌یابد. بنابراین پدیده تحکیم روی خواهد داد و بایستی آنالیز تحکیم انجام شود. عملیات تسطیح و خاکبرداری پی سد بسیار محدود و در بیشتر موارد نیازی به خاکبرداری نبوده است به همین دلیل از شبیه‌سازی این بخش صرف‌نظر شده است و فرض شده که سطح پی در تراز ۱۳۱۷ قرار دارد. شرط اولیه دیگر مربوط به سطح آزاد آب می‌باشد. با توجه به تراز آب در گمانه‌ها سطح آزاد آب ۱۳۱۴.۵ فرض شده است. در شکل ۲، شکل ۳، شکل ۴ الف و شکل ۴ ب تغییرات نشست نقاط روی لبه پایین دست تاج سد و هسته رسی و پی سد توسط نرم افزار نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز نحوه توزیع تغییر شکل در بدنه سد مطابق نتایج تحلیل ارایه گردیده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، بخش قابل توجه حرکات بدنه سد در قسمت بالایی سد روی داده است و سهم بخش‌های پایینی و میانی سد از این حرکات بسیار کم است. شکل ۶ الف و شکل ۶ ب مربوط به وضعیت ایجاد نقاط بحرانی قبل از اولین آبیگری می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود نقاط محدودی در

این‌ها خاک یک مصالح چند فازی است و روش‌های خاصی برای بیان رفتار هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک فشار آب حفره‌ای در خاک مورد نظر است. گرافیک ساده ورودی برنامه کاربر را قادر به ساخت مدل‌های پیچیده المان محدود در زمان کوتاه می‌نماید.

ب: نرم افزار **GMS** یک برنامه گرافیکی شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی است. این برنامه دارای گرافیک قوی و قدرت بالا در مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی یک منطقه بر اساس گمانه‌های شناسایی زده شده می‌باشد. برنامه هر مسائل را با یک رنگ مشخص می‌کند و بر حسب موقعیت مختصاتی و عمق به شکل سه بعدی آنها را نمایش می‌دهد.

۵- مدل‌سازی مرحله ساخت سد

نرم افزار پلاکسیس این امکان را در اختیار کاربر می‌گذارد که ساخت سد را شبیه‌سازی کنیم. برای انجام شبیه‌سازی مطابق جدول ۱-۱ سد را به ده بخش تقسیم کرده‌ایم که در بخش ساخت سد آنالیز به صورت پلاستیک و بعد از تکمیل سد تا زمان اولین آبیگری از آنالیز تحکیم استفاده شده است.

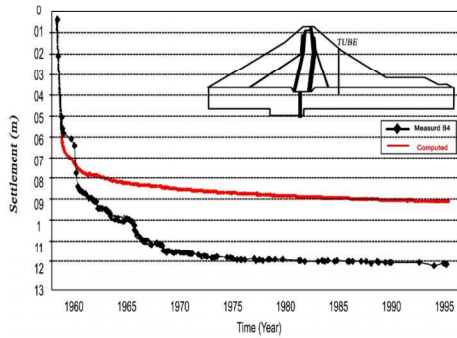
جدول ۱ مراحل محاسباتی ساخت سد

شماره مرحله	نوع محاسبه	شرایط	تراز ساخت سد	تراز آب	زمان انجام(روز)
۱	Plastic	Draind	۱۳۲۰	۱۳۱۴.۵	۲۹
۲	Plastic	Draind	۱۳۲۵	۱۳۱۴.۵	۲۸
۳	Plastic	Draind	۱۳۳۰.۵	۱۳۱۴.۵	۲۲
۴	Plastic	Draind	۱۳۳۶	۱۳۱۴.۵	۲۲
۵	Plastic	Draind	۱۳۴۰	۱۳۱۴.۵	۱۸
۶	Plastic	Draind	۱۳۴۶	۱۳۱۴.۵	۱۷
۷	Plastic	Draind	۱۳۴۶	۱۳۱۴.۵	۲۴۹
۸	Plastic	Draind	۱۳۵۲	۱۳۱۴.۵	۸۲
۹	Plastic	Draind	۱۳۶۱.۵	۱۳۱۴.۵	۹۴
۱۰	ConsoLidation	-	۱۳۶۱.۵	۱۳۱۴.۵	۲۵۶

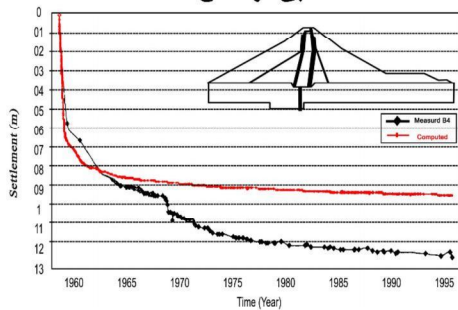
تمامی ترازها نسبت به سطح آبهای آزاد بر حسب متر می‌باشند.

۶- مدل‌سازی هندسه سد و شرایط مرزی و شبکه بندی

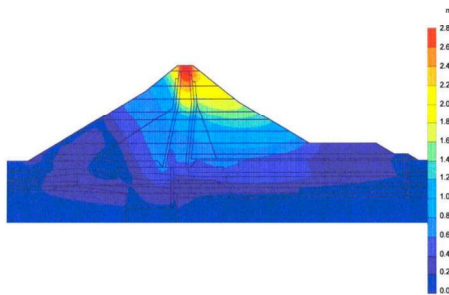
مقطع بدنه سد بر اساس طرح نهایی مطابق شکل ۱-۱ می‌باشد. همچنین شکل پی سد نیز بر اساس خروجی **GMS** و اصلاحات انجام گرفته روی آن در دست می‌باشد. شبکه‌بندی مدل نیز با قرار دادن یک سری گزینه انتخابی برای کاربر در مورد کیفیت شبکه‌بندی بصورت خودکار انجام می‌شود و در موارد مورد نیاز می‌توان المان‌های یک بخش از مدل را ریزتر نمود. مدل بوسیله المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی شبکه‌بندی شده است، همچنین بخش هسته به صورت ریزتری شبکه‌بندی شده است. شرایط مرزی که اعمال می‌کنیم محدود کردن



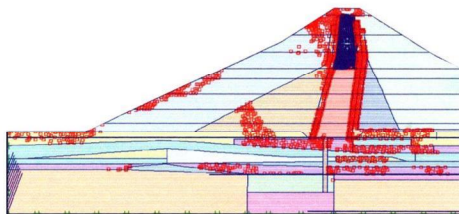
شکل ۴ الف - منحنی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نشست پی در مقطع ۲+۰۰



شکل ۴ ب - منحنی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نشست پی در مقطع ۳+۰۰



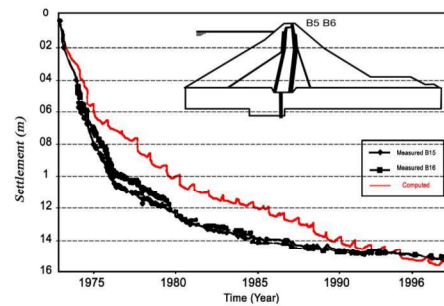
شکل ۵ - نحوه توزیع تغییر شکل در بدنه سد مطابق نتایج آنالیز



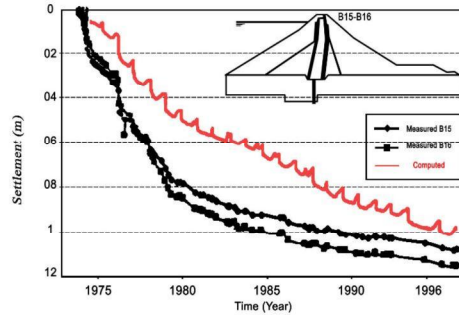
شکل ۶ الف - وضعیت نقاط بحرانی قبل از آبیگری

پوسته‌ها به حالت تنش کششی رسیده‌اند اما بخش اعظم هسته رسی در شرایط تنش پلاستیک قرار دارند. شکل ۷ مربوط به حالتی است که برای اولین بار سد تا تراز ۱۳۵۰.۷ آبیگری شده است. از روی شکل مشخص می‌شود که این مسئله باعث ایجاد نقاط کششی در پوسته بالا دست و پایین دست سد شده است. همچنین در بخش‌های بالایی هسته رسی نقاط کششی تقریباً گسترده‌ای ایجاد شده است.

شکل ۸ مربوط به وضعیت پیش تحکیمی در بدنه سد در ۲۱ سال بعد از ساخت سد، تمامی مصالح در این حالت پیش تحکیم شده هستند، بخش‌های بالایی هسته به علت واقع شدن در شرایط کششی بسیار پیش تحکیمی به حساب می‌آید. هسته در پنجه بالا دست بسیار پیش تحکیم شده است. پیش تحکیمی در مصالح پوسته نیز زیاد شده است.



شکل ۲ - منحنی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شد نشست تاج سد در کیلومتر ۲+۰۰



شکل ۳ - منحنی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شد نشست هسته رسی از اواخر سال ۱۹۷۳ در کیلومتر ۳+۰۰

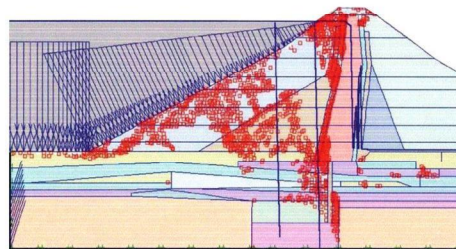
مراحل مختلف تحلیل پی سد نیز در جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود حدود (۷۲٪ تا ۵۸٪) نشست پی تا قبل از آبیگری انجام می شود. البته محاسبات با نرم افزار پلاکسیس عدد ۸۵٪ را نشان می دهد با توجه به این عدد مشخص می شود که بعد از آبیگری تقریباً فقط نشست تحکیمی ثانویه (Creep) روی داده است.

جدول ۳ - خلاصه نتایج تحلیل و اندازه گیری نشست پی

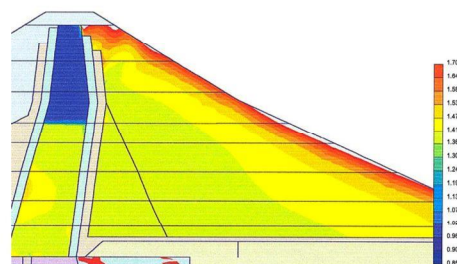
اختلاف مقادیر اندازه گیری شده (%)	درصد کل نشست محاسبه شده (%)	میزان نشست محاسبه شده (متر)	درصد کل نشست اندازه گیری شده (%)	میزان نشست اندازه گیری شده (متر)	زمان سپری شده از آغاز ساخت (روز)
۱۸	۷۱	۰.۶۵	۴۴	۰.۵۵	۲۱۹
۱۰	۷۴	۰.۶۱۵	۵۰	۰.۶۲	۳۸۵
۱۵	۸۰	۰.۷۴	۵۲	۰.۶۴۲	۵۶۱
۸	۸۵	۰.۷۸	۵۸	۰.۷۲	۸۱۷
۰	۸۷	۰.۸	۶۴	۰.۸	۱۱۳۷
۸	۹۲	۰.۸۵	۷۵	۰.۹۲۸	۲۷۸۴
۲۴	۹۹	۰.۹۱	۹۷	۱.۲	۷۶۴۱
۲۴	۱۰۰	۰.۹۲	۹۸	۱.۲۱۷	۱۰۴۹۹
کیلومتر ۲۰۰+					
۲۵	۲۸	۰.۴	۱۷	۰.۳۲	۴۹
۱۲	۷۱	۱.۰۱	۴۷	۰.۹	۱۸۱
۱۵	۷۷	۱.۰۹۴	۵۰	۰.۹۵۵	۳۸۵
۸	۸۲	۱.۱۷	۶۶	۱.۲۷	۵۶۱
۱۱	۸۵	۱.۲۲	۷۲	۱.۳۷	۸۱۷
۱۷	۹۰	۱.۲۸	۸۱	۱.۵۴	۱۸۸۹
۲۴	۹۲	۱.۳۱	۹۱	۱.۷۳	۲۷۱۰
۲۶	۹۸	۱.۴	۹۸	۱.۸۸	۷۵۶۷
۲۵	۱۰۰	۱.۳۳	۹۹	۱.۹	۱۰۴۲۵
کیلومتر ۲۰۰+					

۱۰- محاسبه میزان تراوش از بدنه و پی سد

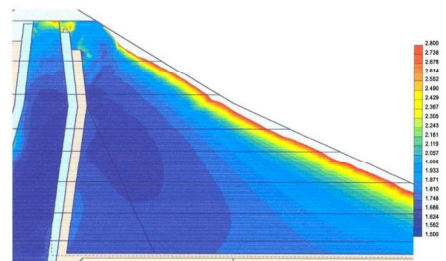
برای مدل سازی میزان تراوش عبوری از بدنه سد پیزومترهای موجود در سد را می توان به دو دسته تقسیم بندی نمود. پیزومترهای قدیمی تقریباً از زمان ساخت سد نصب و تماماً در پایین دست سد واقع شده و پیزومترهای جدید به تعداد حداقل چهار عدد در قسمت بالادست سد نصب شده اند. مطابق شکل ۹، شکل ۱۰، شکل ۱۱ نتایج این داده ها بیانگر وجود هیچ نوع مشکلی نیست، فقط نشان دهنده بالا بودن تراز آب زیرزمینی در محل تکیه گاه راست است که با توجه به ثبات وضعیت آن نسبت به تراز دریاچه مورد بحرانی برای آن نمی توان متصور شد. همانطوریکه در شکل ۱۲ ملاحظه می شود که میزان تراوش از بدنه و پی سد به ترتیب ۵.۸ و ۰.۰۷ سانتی متر مکعب در دقیقه می باشد. این مقدار تراوش اثر بسیار مثبت استفاده از دیوار آبنما را خاطر نشان می سازد.



شکل ۶ ب- وضعیت نقاط بحرانی بعد از اولین آبیگری



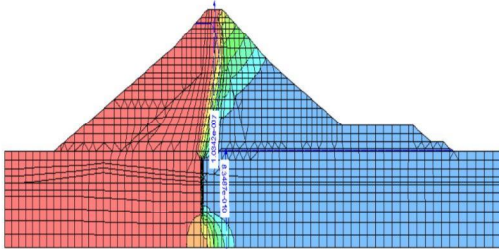
شکل ۷- وضعیت پیش تحکیمی (OCR) در بدنه سد قبل از اولین آبیگری



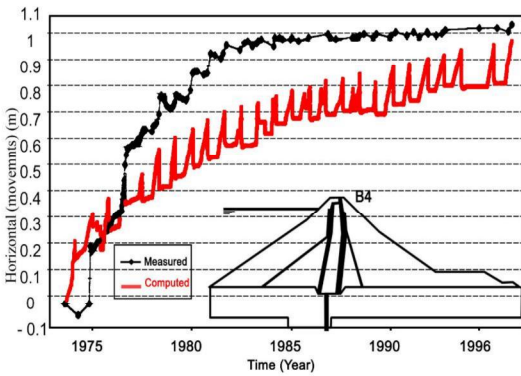
شکل ۸- وضعیت پیش تحکیمی (OCR) در بدنه سد ۲۱ سال بعد از ساخت سد

۹- مقادیر عددی پارامترهای مورد نیاز مدل

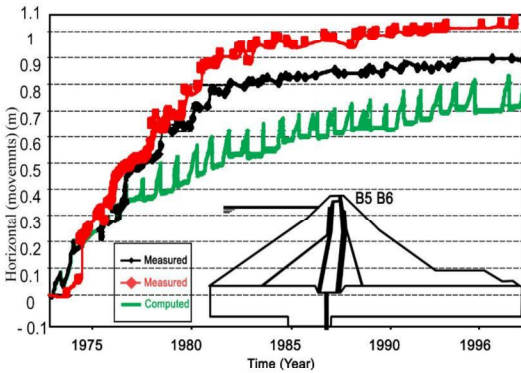
بصورت کلی در تحلیل هر مسئله توسط مدل های عددی مهمترین بخش معرفی پارامترهای مدل است و در این قسمت اکثر مقادیر پارامترهای مهندسی فرض شده توسط طراح، مقادیر پارامترهای مربوط به آزمایشات در محل و منابع قرضه و نیز نتایج آزمایشات سال ۱۳۶۷ و پیشنهادات مهتاب قدس ارایه گردید. برای آنالیزهای اولیه این مقادیر به صورت میانگین در نظر گرفته شد. آنگاه مطابق روال تمامی آنالیزهای معکوس به صورت سعی و خطا تا انطباق رفتار مدل با واقعیت این عددها تغییر داده شد و بدین شکل پارامترهای مصالح تعیین گردید. جدول (۲)



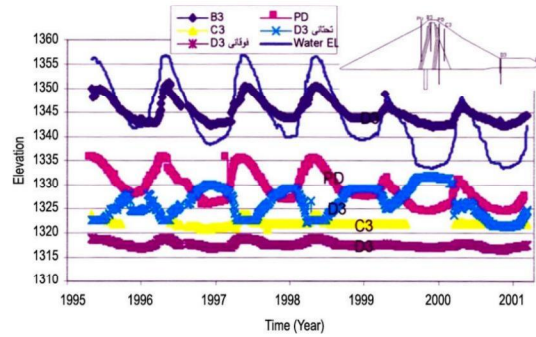
شکل ۱۲ - میزان تراوش محاسبه شده سد مهاباد



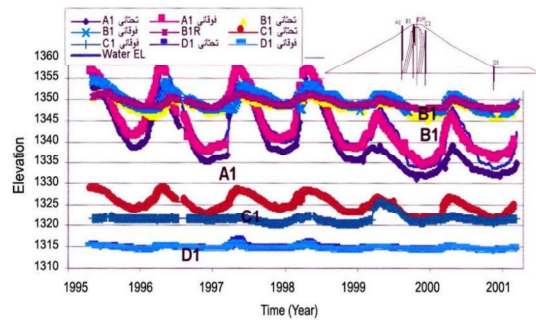
محاسبه شده جابجایی افقی تاج سد بعد از ساخت در کیلومتر +۲۰۰



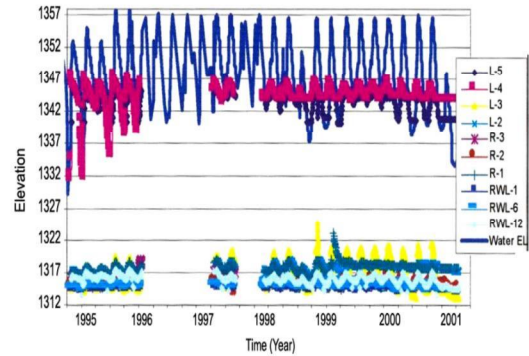
محاسبه شده افقی تاج سد بعد از ساخت در کیلومتر +۳۰۰



شکل ۹ - تغییرات تراز پیزومترها در مقطع ۴+۰۲ همراه تراز آب



شکل ۱۰ - تغییرات تراز پیزومترهای مقطع سد ۱۸۲+ همراه تراز آب



شکل ۱۱ - تغییرات تراز پیزومترهای قدیمی نسبت به تغییرات تراز آب

جدول ۲ پارامترهای انتخاب شده برای مصالح

نوع مصالح	پارامترهای عمومی				پارامترهای اختصاصی هر مدل								توضیحات
	نوع مدل	وزن مخصوص خشک (kn/m ^۳)	وزن مخصوص تر (kn/m ^۳)	K(m/day)	E(m/m ^۲)	ν	λ	K*	C(kn/m ^۲)	درجه ϕ	μ		
مصالح برای مصالح	بستر سنگی	LE	۲۳	۲۳	۸.۶۴E-۸	۵E۰۴	--	--	--	--	--	--	--
	CL	SSC	۲۲	۲۲	۸.۶۴E-۴	--	--	۰.۰۸	۸E-۳	۲۰	۲۲	۶.۷E-۳	H<۱۲
	CL	SSC	۲۲	۲۲	۸.۶۴E-۴	--	--	۰.۰۶۵	۶.۵E-۳	۲۵	۲۲	۵.۴E-۳	۳۰<H<۱۲
	CL	SSC	۲۲	۲۲	۸.۶۴E-۴	--	--	۰.۰۶	۶E-۳	۳۰	۲۲	۵E-۳	H>۳۰
	SM	MC	۲۲	۲۲	۸.۶۴E-۴	۳E۰۴	۰.۳۵	--	--	۱	۳۳	--	
	ML	MC	۲۲	۲۲	۸.۶۴E-۳	۳E۰۴	۰.۳۵	--	--	۱	۳۳	--	
	GM	MC	۲۲	۲۲	۰.۸۶۴	۳E۰۴	۰.۳۵	--	--	۱	۳۳	--	
	GC	SSC	۲۲	۲۲	۸.۶۴E-۳	--	--	۸E-۳	۶.۶E-۳	۲۰	۳۲	۶.۶E-۳	
	CH	SSC	۲۲	۲۲	۸.۶۴E-۴	--	--	۰.۲۵۵	۰.۰۷	۲۰	۲۲	۵.۸E-۳	
هسته	CL	SSC	۱۹	۲۰	۸.۶۴E-۵	--	--	۰.۰۶۵	۶.۵E-۳	۱۷	۲۵	۳.۳E-۳	
فیلتر	S	MC	۱۵	۱۷	۸.۶E-۳	۳E۰۴	۰.۳۲	--	--	۱	۲۰	--	
زهکش	S	MC	۱۸	۲۲	۰.۰۷۶	۳.۵E۰۴	۰.۳۲	--	--	۱	۳۷	--	
سنگریزه	G	MC	۲۰	۲۱	۰.۵	۳E۰۴	۰.۳۵	--	--	۱	۴۳	--	
پوسته پایین دست	GC	SSC	۱۸	۲۰	۸.۶E-۳	--	--	۰.۰۴۵	۴.۵E-۳	۱۸	۲۷	۲.۳E-۳	

۱۱- نتایج و پیشنهادات:

در این مقاله نتایج زیر حاصل شده است:

۱- باتوجه به نتایج تحلیل‌های انجام شده توسط برنامه‌های **plaxis** و **GMS** و همخوانی آن با نتایج ابزار دقیق می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این برنامه برای آنالیز و پیش‌بینی رفتار سدهای خاکی بسیار مفید خواهد بود.

۲- در شرایطی که پوسته پایین دست بصورت مصالح سنی با درصد کم ریزدانه (میانگین ۵ درصد) اجراء گردد نشست هسته به میزان ۲۵۰ سانتی‌متر خواهد شد ولی در شرایطی که پوسته پایین دست بصورت مصالح درهم با درصد بالای ریزدانه (میانگین ۴۵ درصد) باشد ارتفاع نشست در هسته حدود ۳۳۰ سانتی‌متر می‌گردد. این امر به علت افزایش سختی پوسته‌ها و عدم آزاد شدن تنش‌ها می‌باشد.

۳- نمودارهای تغییر شکل‌های زمان ساخت نشان می‌دهد چنانچه پوسته پایین دست بصورت مصالح درهم با درصد بالای ریزدانه اجرا گردد محل وقوع نشست حداکثر بالاتر از نصف ارتفاع ساخته شده (خط میانی) خواهد بود. فاصله گرفتن از خط میانی با زیاد شدن ارتفاع سد بیشتر می‌شود. علت این مسئله کافی نبودن محدودیت جانبی و در نتیجه آزاد شدن تنش و افزایش تنش افقی است که باعث انتقال نا صحیح بار از هسته به پوسته‌ها شده است.

۴- با توجه به نتایج **SPT** پی سد مهاباد دارای مصالح سست تا بسیار متراکم می‌باشد، بطور متوسط **SPT** مصالح پی ۳۵ است که حاکی از یک پی متراکم می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج آنالیز بخش اعظم پی سد مهاباد (۸۵ درصد کل نشست) قبل از آبیگری به وقوع پیوسته است. بیشتر نشست پی سد بعد از آبیگری ناشی از تحکیم ثانویه بوده است. با توجه به مقادیر زیاد نشست پی ۱۳۰ سانتی‌متر می‌توان گفت مصالح پی قبل از ساخت حالت عادی تحکیم یافته داشته‌اند.

۵- میزان نشست و جابجایی در بدنه سد مهاباد، به مراتب بیشتر از استانداردهای طراحی است و از موارد کم نظیر در سدسازی به حساب می‌آید. نشست حاصل از خروج **plaxis** مربوط به فاصله زمانی اتمام ساخت تا سال ۱۳۷۵ دومترو هفتاد سانتی‌متر جابجایی افقی (شکل ۱۳ و شکل ۱۴) ۱۰۰ سانتی‌متر برآورد شده است.

۶- هسته رسی سد مهاباد از نظر خواص، مصالحی با پلاستیسیته کم می‌باشد. حد روانی آن ۳۴٪ الی ۴۴٪ و شاخص خمیری آن ۱۲٪ الی ۲۰٪ که در رطوبتی بالاتر از رطوبت بهینه آزمایش پراکتور استاندارد متراکم شده است. میزان تراکم به دست آمده برای آن کمتر از حد معمول است. (دانسیته خشک حداکثر به دست آمده ۱.۶۷ تا ۱.۷۳ تن بر مترمکعب است).

۷- نمودارهای مربوط به وضعیت نقاط بحرانی در بدنه سد نشان می‌دهد که ایجاد ترک در پوسته پایین دست منحصر به ۱۰ متر بالای از تاج سد است و بیشتر در خلال ۹ سال اول ساخت ایجاد شده است. و همچنین ترک‌های هسته رسی منحصر به ۲ متر روبروی نسبت به بالای هسته می‌باشد (حدود تراز

۱۳۷۵) این ترک‌ها به شکل توده‌ای ایجاد می‌شوند و مطابق نتایج آنالیز هیچ نقطه‌ای با شرایط کششی در بخش‌های پایینی هسته ایجاد نشده است. ۸- مطابق نتایج آنالیز میزان تراوش از پی و بدنه سد به ترتیب برابر ۵/۸ و ۰.۷ سانتی‌متر مکعب در دقیقه می‌باشد. این مقدار تراوش اثر بسیار مثبت استفاده از دیوار آبیند را خاطر نشان می‌سازد.

۹- روند ایجاد نقاط کششی با زمان قابل توجه است. با سپری شدن زمان، نقاط کششی داخل هسته به حرکت به پایین دست از آن خارج شده و روی سطح فیلتر متمرکز می‌شود. نقاط کششی نیز بتدریج روی سطح تاج ایجاد می‌شود. اما مسئله در مورد پوسته بالا دست برعکس است گذر زمان باعث حرکت نقاط کششی به بخش‌های داخلی تر پوسته می‌شود.

۱۰- عوامل موثر در نشست‌های زیاد سد مهاباد در رابطه با جنس مصالح پوسته پایین دست و کم بودن سختی آن‌ها می‌باشد. هندسه سد نیز (در بخش‌های بالایی تاج سد به شکل غیر اصولی شیب‌ها تند شده‌اند) و تراکم پوسته بالادست کم و تراکم هسته ریزدانه نیز کم است و در نتیجه وقوع نشست‌های تحکیمی زیاد را در بردارد.

۱۱- برای کنترل بهتر تغییرات تنش کل، فشار آب حفره‌ای اضافی، تنش‌های موثر، حرکات داخلی بدنه، پیشنهاد می‌شود که سیستم رفتار نگاری سد به روز گردد.

۱۲- با توجه به کاهش ارتفاع آزاد سد پی‌شنهاد می‌شود ی‌کی از دو روش زیر برای مسئله مقابله با سیلاب صورت گیرد:

الف) با تحلیل هیدرولیکی و اعمال شرایط جدید سد اهم از رسوب گذاری مخزن و ارتفاع موجود هسته رسی، ارتفاع ایمن جدیدی برای آبیگری سد انتخاب شود.

ب) با انجام عملیات جدید ارتفاع سد افزایش داده شود.

۱۳- برای ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود که روی مسئله ضریب اطمینان‌های کنونی سد برای حالت استاتیک و نیز زلزله تحقیق انجام گیرد. همچنین با توجه به وجود مصالح شن و ماسه در پی سد در صورت تکمیل شدن اطلاعات در پایین دست سد، مسئله پتانسیل روانگرایی سد نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

۸- مراجع

- [۱] مه‌اب قدس
- [۲] بولز، ج. (Bowles, J.). (۱۳۷۹). تحلیل و طراحی پی. ترجمه اردشیر اطمینانی
- [۳] بررسی مدل‌های رفتاری نرم‌افزار پلاکسیس

[۴]. Anthinac p., Bonelli S., Carrere A. & Debordes O. (1998)- Modeling saturation settlements in rockfill dams - International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety, Barcelon, 17-19 th June, 1998

- [۵]. Bjerrum, L.(1967). Engineering geology of normally- considered marine clays as related to settlement of buildings. *Journal of Geotechnique*, London, England, vol(17), No(2), 82-118
- [۶]. Bregado,D.T,Teerawattanasuk, C., Youwai, S.,& Voottipruex .p., (2000)-Finite element modeling of hexagonal wire reinforced embankment on soft clay. *Canadian journal of geotech*, No(37), 1209- 1226
- [۷]. Charles, J.A. (1986). The significance of problem and remedial works at British earth dams. *Proc of BNCOLD-IWES Conference, Reservoirs 1986*, 123-141.
- [۸]. Dounias, G.t., potts, D.M., &Vaughan, P.R. (1996). Analysis of progressive failure and cracking in old British dams. *Jegeotechnique vol(46) , No(7)*, 621-640
- [۹]. Griffliiths, D.V.& Provost, J.N.(1988). Two- and three - dimensional dynamic finite element analyses of the Long valley dam. *Journal of Geotechnique*, vol(38), No(3), 367-388.
- [۱۰]. Joao Marcelino & E. Mmaranha das Neves (1997). Modeling collapse effects. *Application of computational mechanics in Geotechnical engineering* , Azevedo et al. (eds).
- [۱۱]. Kikusawa, M. (1990). Seismic stability analysis of rockfill dams. *Journal of Geotechnique . Vol(40), No (2)*, 201-210
- [۱۲]. L.Pagano, A.Desideri, & F. Vinale (1998). Interpreting settlement profiles of earth dams. *ASCE journal of geotechnic and geoenvironmental eng*, Vol(124), No(10), 923-932.
- [۱۳]. Lambe, T.W.(1973). Predications in soil engineering, 13 th rankine lecture. *Geotechnique , Vol(23), No(2)*, 149202.
- [۱۴]. Loganatham, N., Balasubramaniam, A.S., and Bergado, D.T .(1993) deformation analysis of embankments. *ASCE journal of geotechnic and geoenvironmental eng*, Vol(119), No(8), 1185-1206.
- [۱۵]. Marsal , R.J. (1958). Analisis de asentamientos en la presa presidente aleman. *Oaxaca,NO(5) Instituto de Ingernieria, UNAM Mexico city, Mexico (in Spanish)*.
- [۱۶]. W. Mayne, Member, ASCE(1995).undrained plastic modulus original cam clay.*ASCE journal of geotechnic and geoenvironmental Eng*, vol(121), No(5), 448-451.

Settlement Analysis Of Embankment With Finite Element Method

Kamal Rahmany

Islamic Azad University, Mahabad Branch.

Saber pirot

Islamic Azad University, Mahabad Branch.

Arasto Armaghani

Assistant Professor, Tabriz University.

Abstract:

It is the correct control and monitoring of modern embankment dams that are very vital in the geotechnical constructions. The improvement of the methods of stability control, using the effective stress and the measurement of ganglionic water pressure in embankment dams cause more the safety for this kind of dams. Nowadays there is such an idea that instead of using of being safety factor against coast, designments must be done according to acceptable displacement. Analytic approach is using the finite element that is capable of fortelling the displacement parameters. Monitoring of dams with setting up accurate tools in the sensitive points and measurement various parameters such as pore water pressure and displacement more or most common settlement and movement is possible. The displacement that occur all of a sudden at the end of this process can indicate be causes of enlargement of strain inside the dam body. This is the reason of undesirable decreasing of stresses or causes the start of an increasing impairment. By investigation of datas and using inverted analysis about the very unusual condition of mahabad dam, it has been tried to define the cause of this action in this thesis. From the start of construction an unnatural settlement and horizontal movement has occurred in it. During the construction 130 cm and during the exploitation 60 cm settlement has occurred in the foundation up to now. Also from the end of construction the maximum settlement and vertical movement are 150 cm and 100 cm respectively. In this paper monitoring of dams Mahabad with using accurate tools information and numerical analytic has considered. In performing numerical analytic from PLAXIS using finite element program. After construction cutoff walls and finishing operation injection in foundation of dam, rate of seepage from foundation is decreased and is according to numerical calculations in negligible extent and rate of seepage in body dam

Keywords:

Mahabad dam, Finite element, Transformation, Leakage, Crack