ارزیابی فشار منفذی در هسته ی سد کرخه هنگام ساختن و آبگیری همزمان

سید مجدالدین میرمحمدحسینی[۱]، محسن موسوی خونساری*[۲] و رضا احمدی فرد[۳]

تاریخ دریافت:۸۷/۹/۱۸ تاریخ پذیرش:۸۸/۳/۲۶

چکیده

مدیریت بهینه ی طرحهای بزرگ تامین آب به لحاظ اقتصادی ایجاب می کند تا همزمان با اجرا و آماده شدن بخشی از طرح، بهره برداری هم صورت گیرد. این فرایند در طرحهای بزرگ سدسازی امری متداول بوده و موجب می گردد که استفاده موثرتری از سرمایه گذاری های انجام شده به عمل آید. بهره برداری از مخازن چنین سد هایی همزمان با انجام وتکمیل عملیات ساختمانی شرایط خاصی را از نظر بارگذاری بر این طرح ها تحمیل می کند که باید تمهیداتی ویژه در مورد آنها اندیشیده شوند. هنگام ساختن و اجرای سد های خاکی مقدار قابل ملاحظه ای فشار های آب منفذی در هسته این سدها ایجاد می شود که عمدتاً ناشی از سربارهای مربوط به افزایش ضخامت خاکریزی بوده و بهره برداری همزمان با اجرا موجب می شود که علاوه بر فشارهای منفذی ایجاد شده بر اثر سربارهای خاکریزی، فشارهای منفذی جدیدی ناشی از تراوش و نفوذ آب به داخل سد نیز ایجاد گردد. ممکن است این امر موجب افزایش فشار های منفذی گردیده و چنانچه انجام آن با مطالعه صورت نگیرد منجر به بروز پدیده ی شکست هیدرولیکی سد شود . در مقاله حاضر سعی شده است که با استفاده از نرم افزار CA2 ، فشارهای منفذی ایجاد شده ی ناشی از دو عامل استمرار عملیات ساختمانی و آبگیری همزمان مطالعه و مورد ارزیابی قرار گیرد. در ادامه با استفاده از داده های جمع آوری شده با کاربرد ابزار دقیق نصب شده در سد کرخه که در شرایط ذکر شده مورد بهره برداری قرار گرفته اند، نتایج بدست آمده مقایسه و مورد قضاوت قرار گرفته اند.

واژه های کلیدی: سد کرخه، ابزار دقیق، فشارسنج ، فشار آب منفذی، شکست هیدرولیکی.

[1] - دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[2] - دانشجوی دکترای علوم آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات

[3] - کارشناس ارشدخاک وپی

*- نویسنده ی مسؤول مقاله m_moosavi_khonsari@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir

پیشگفتار

یکی از روش های رفع کمبود آب ، مهار کردن آب های سطحی است . احداث سد و ذخیره سازی آب بهترین راه جهت مهار کردن آب های سطحی بوده که با توجه به گستردگی عملیات اجرایی سد ها، زمان احداث این قبیل تاسیسات معمولا طولانی خواهد بود. اگر مشکلات ویژه ی طرح های بزرگ از قبیل منابع مالی و مدیریت های اجرایی را به این مورد اضافه کنیم، ممکن است مدت ها به طول انجامد تا یک طرح سد سازی بزرگ به گونه ی کامل مورد بهره برداری قرار گیرد .دو نکته در مدیریت این منابع دارای اهمیت است:۱- امکان بهره برداری از بخش هایی از طرح پیش از پایان کامل عملیات احداث امکان پذیر باشد و ۲- بهره برداری زودرس شرایط غیر قابل پذیرشی را از نظر بارگذاری بر طرح تحمیل نکند.

در رابطه با موضوع نخست، برنامه ریزی ها بیش تر به گونه ای انجام پذیر خواهد بود که پس از رسیدن رقوم سد به تراز مشخص امکان آبگیری مخزن با رعایت فاصله ای تا تراز اجرا شده وجود داشته باشد . لحاظ کردن این امر با توجه به مطالعات آبی بالادست، حجم مخزن و سرعت عملیات اجرایی سد طی یک ارزیابی انجام پذیر بوده، ولی آنچه در رابطه با موضوع دوم نیاز به تامل و مطالعه ای ویژه دارد، چگونگی اثر گذاری عملیات آبگیری بر رفتار سد در شرایطی که سربارهای مربوط به زمان ساخت نیز همواره رو به افزایش است، خواهد بود . در مورد سدهای خاکی پیشرفت عملیات اجرایی موجب انباشتگی شایان توجه فشارهای آب منفذی در هسته ی سد شده و چنانچه پیش از پایان کامل عملیات خاکی و استهلاک نسبی این فشارها اقدام به آبگیری شود، بالا رفتن تراز آب در مخزن می تواند خود موجب افزایش دو چندان فشارها در هسته سد گردد. در نتیجه ممکن است تامین شرط دوم بهره برداری سریع تر از چنین طرح هایی با مشکل رو به رو شود. در این رابطه مطالعه ای درباره ی چگونگی تاثیر این امر بر رفتار هسته ی سدهای خاکی صورت پذیرفته که خلاصه ی آن را در بخش های آتی آمده است. نظر به این که برنامه ریزی بهره برداری از سد کرخه به صورت بالا می باشد، لذا از ویژگی های سد مزبور جهت انجام این مطالعه استفاده شده و نتایج تحلیل ها با داده های بدست آمده از ابزار دقیق سد کرخه مقایسه شده اند.

ویژگی های سد کرخه و ویژگی های ابزار دقیق آن

سد مخزنی کرخه واقع در ۲۱ کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک و بر رود کرخه احداث شده است. رود کرخه پس از رودهای کارون و دز، سومین رود بزرگ ایران از نظر آبدهی بشمار می آید که از مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوههای زاگرس سرچشمه گرفته و پس از طی ۹۰۰ کیلومتر به مرداب هورالعظیم می ریزد. حوضه ی آبخیز این رود به وسعت ۴۳۰۰۰ کیلومتر مربع از سر شاخه های سیمره ، کشکان ، قره سو ، گاماسیاب و چرداول تشکیل شده است.

سد کرخه بزرگ ترین سد کشور از نوع خاکی با هسته ی رسی مختلط می باشدکه به ارتفاع ۱۲۷ متر از پی و طول تاج ۳۰۳۰ متر ، ششمین سد در دنیا بشمار می رود. رقوم تاج سد ۲۳۴ متر و رقوم کف پی در بحرانی ترین مقطع آن ۱۰۷ متر بالاتر از سطح دریاست . هدف اصلی از ساختن سد مخزنی کرخه ، مهار رواناب های سطحی به منظور های زیر می باشد:

۱) تامین و تنظیم آب جهت آبیاری بیش از ۳۲۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی شمال غرب استان خوزستان،

۲) تولید کارمایه ی برقابی به میزان ۹۳۴ گیگاوات ساعت در سال،

۳) مهار کردن سیلاب های ویرانگر و جلوگیری از زیان های وارده.

ساختگاه سد مخزنی کرخه روی سازند بختیاری واقع است .این سازند در محل سد از توده سنگ های جوش سنگی که در بر گیرنده ی عدسی های ماسه سنگی و گلسنگی می باشد، تشکیل شده است. این توده ی جوش سنگی از نفوذپذیری نسبتا بالایی برخوردار بوده و به وسیله ی میان لایه های گلسنگی با نفوذپذیری بسیار کم از یک دیگر جدا شده اند، به گونه ای که لایه های گلسنگ به عنوان پتوی نفوذ ناپذیر عمل می کنند . برای کاهش نفوذپذیری، جلوگیری از جوشش و شستگی مصالح پی و

Archive of SID

www.SID.ir

پایین آوردن شیب آبی از دیواره ی آب بند استفاده شده است.

ویژگی های ابزارگذاری پی و بدنه ی سد

به منظور اطمینان از پایداری سد و مقایسه ی چگونگی عملکرد سد کرخه در طول دوران ساختن و بهره برداری از یک سامانه ی رفتار سنجی با توجه به ویژگی های سد ، وضعیت زمین شناسی پی و موقعیت دیواره ی آب بند استفاده شده است. شمار مقاطع ابزار گذاری شده ۲۳ می باشد که در جدول ۱ هدف از تعبیه ی هر ابزار ، تعداد و نوع ابزار مورد استفاده تشریح شده است .

جدول ۱ : ویژگی های ابزارگذاری پی و بدنه ی سد

نام ابزار	نوع ابزار	تعداد ابزار	کاربرد
فشارسنج RP	تار مرتعشی	۸۷	فشار منفذی سنگ پی در جوش سنگ و گلسنگ ها
فشارسنج EP	تار مرتعشی	۱۹۱	ارزیابی فشار آب منفذی داخل هسته و صافی
فشارسنج SP	مکانیکی	۱۳۴	ارزیابی صحت فشار آب منفذی RP وSP پی- بدنه
فشارسنج PC	تار مرتعشی	۱۰۲ خوشه ۵ تایی	اندازه گیری فشار های داخلی خاکریز در۵ جهت
انحراف سنج	مکانیکی	۲۶	اندازه گیری تغییر مکان افقی و قائم پوسته ی هسته
نقاط نقشه برداری			نقاط مرجع برای تعیین تغییر مکان بدنه و راهرو
چاههای مشاهده ی			تراز آب بین گلسنگ ها در پایین دست و تکیه گاه
شتاب نگار		۵	ثبت آمارهای زلزله درتکیه گاهها وبدنه ی سد

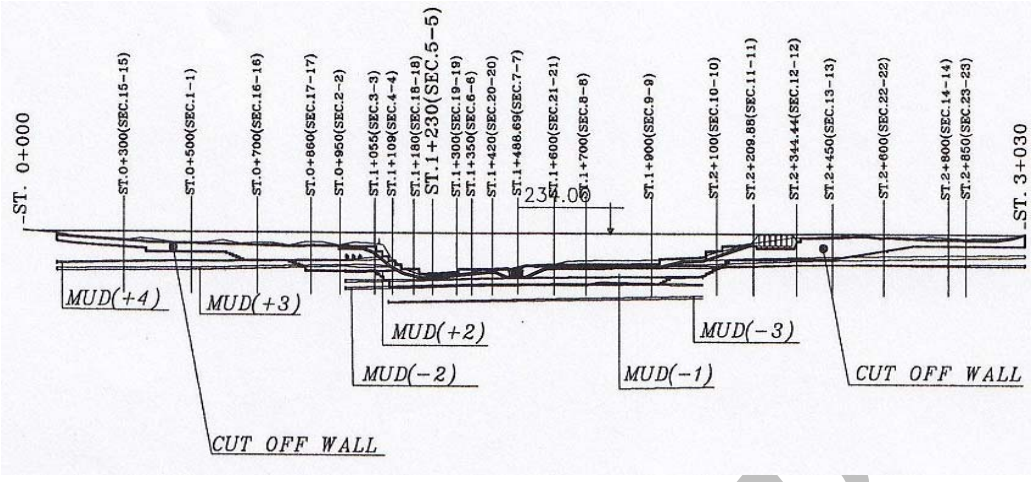
روش انجام پژوهش

معرفی و انتخاب مقطع بحرانی سد جهت انجام مطالعات

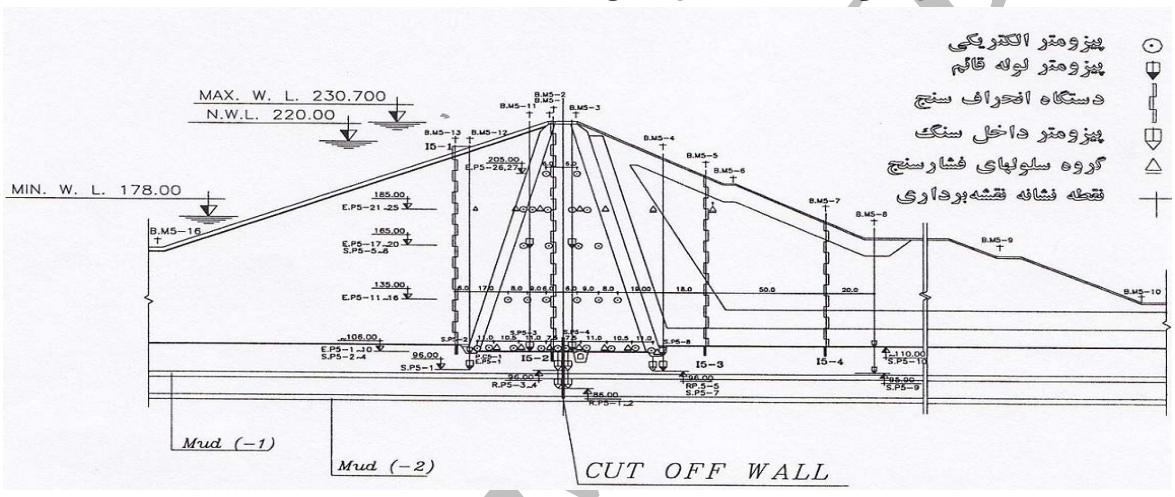
در کل۹۴۸ قطعه ابزار دقیق، در ۲۳ مقطع عرضی در بدنه و در پی سد کرخه نصب شده اند. وضعیت قرارگیری مقاطع ابزار دقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. با مقایسه ی مقاطع گوناگون ابزارگذاری و در نظر گرفتن رقوم پی، ارتفاع خاکریزی و عمق دره ، بحرانی ترین مقطع سد کرخه به لحاظ ایجاد و انباشته شدن فشارهای آب منفذی و بیشینه ی نشست، مقطع ۵-۵ واقع در ایستگاه (۲۳۰+۱) می باشدکه بیش ترین تعداد ابزار دقیق در آن بکار رفته است. شکل ۲ ابزار دقیق بکار رفته در مقطع ۵-۵ را نشان می دهد. چنانچه ملاحظه می شود، فشارسنج های سنگ برای رفتار سنجی عملکرد دیواره ی آب بند در دو سوی این دیوار بین گلسنگ های (۱-) و (۲-) و بالای گلسنگ (۱-) نصب شده اند. برای ارزیابی فشار منفذی داخل هسته در ترازهای ۱۰۷ ، ۱۳۵ ، ۱۶۵ ، ۱۸۵ و ۲۰۵ متر بالاتر از سطح دریا به ترتیب ۱۰ ، ۶ ، ۴ ، ۵ و ۲ فشارسنج تار مرتعش تعبیه گردیده است. در تراز ۱۰۷ و ۱۸۵ متر بالاتر از سطح دریا برای اندازه گیری فشار کل توده ی خاک در جهات گوناگون به ترتیب ۸ و۷ خوشه ی ۵ تایی از سلول های فشار قرار داده شده اند. جهت اندازه گیری تغییر شکل ها ۴ انحراف سنج (دو انحراف سنج در پوسته ی پایین دست و دو انحراف سنج در هسته و پوسته ی بالادست) نصب شده اند. همچنین، پنج فشارسنج ایستا در بخش های گوناگون پی و بدنه قرار داده شده اند.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱ – مقطع طولی سد به همراه مقاطع عرضی انتخاب شده جهت نصب ابزار دقیق.



شکل ۲ – ویژگی های ابزار دقیق بکار رفته در مقطع ۵-۵.

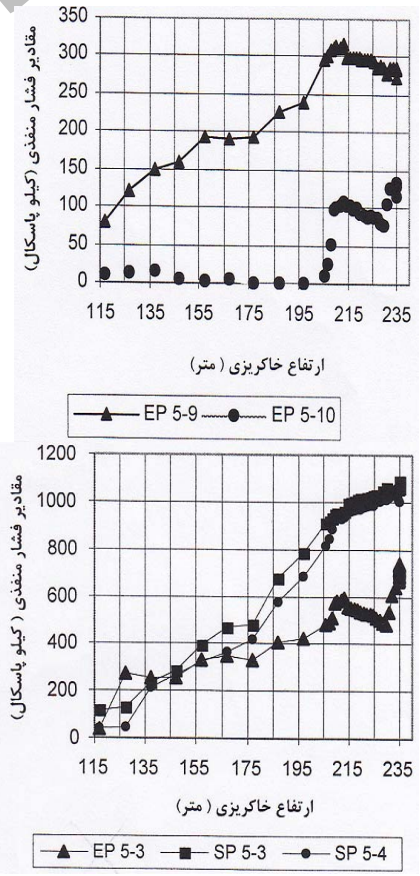
ارزیابی نتایج گرد آوری شده با کاربرد ابزار دقیق در مقطع مورد مطالعه

ارزیابی نتایج ابزار دقیق در مقطع ۵-۵ انجام گرفته است . در این مقطع و در ترازهای ۱۰۷، ۱۳۵، ۱۶۵، ۱۸۵ و ۲۰۵ متر بالاتر از سطح دریا فشارسنج های تار مرتعش جهت اندازه گیری فشار آب منفذی نصب شده که در این بین، تراز ۱۰۷ متر بالاتر از سطح دریا (محل اتصال هسته به پی) دارای بیش ترین فشار منفذی به علت بیش ترین سربار ناشی از خاکریزی می باشد. شکل های ۳ ، ۴ و ۵ تغییرات تراز خاکریزی و تراز آب در فشارسنج های پایین دست (EP5-9،EP5-10) ، بخش میانی (EP5-3، SP5-3 ،SP5-4) و بالادست (EP5-1، EP5-2،SP5-2) هسته ی سد را در رقوم ۱۰۷ متری و در مقطع ۵-۵ در زمان های گوناگون نشان می دهند .

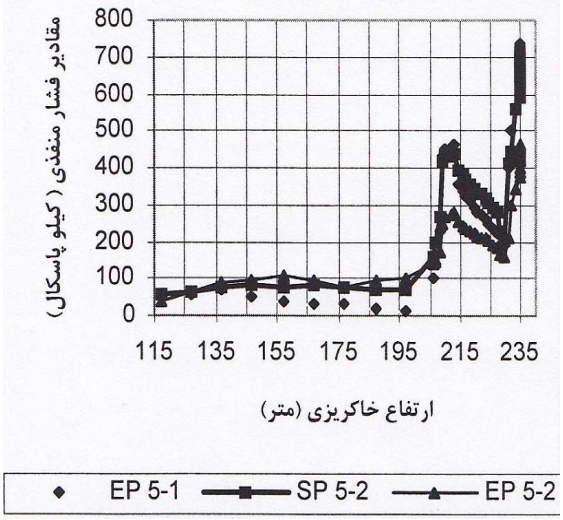
همان گونه که ملاحظه می شود، تغییرات فشار آب منفذی در طول دوران ساختن و پیش از آبگیری ، کاملا از تغییرات تراز خاکریزی پیروی کرده است، به گونه ای که پس از تراز خاکریزی ۲۰۲ متر بالاتر از سطح دریا که در آن آبگیری شروع شده، افزایش شایان توجهی در تراز ایستابی آب در فشارسنج های بالادست هسته سد مشاهده می شود در حالی که آبگیری تأثیر کمی بر فشارسنج های بخش میانی و پایین دست هسته ی سد داشته است. در فشارسنج های بالادست هسته پس از تراز ۲۱۵ متر از خاکریزی عامل قوس زدگی از تاثیر خاکریزی کاسته و عاملی دیگر که باعث کاهشی بیش تر در فشارسنج های بالادست شده، کاهش ارتفاع آب مخزن بوده است، ولی پس از رقوم خاکریزی تراز ۲۳۰ متر، افزایشی در تراز آب مخزن بوجود آمده که دوباره باعث

Archive
www.SID.ir

افـزایش مقـادیر فـشار آب منفـذی در فـشارسنج هـای بالادست هسته شده و تاییدی دیگر بر این امر اسـت کـه آبگیری اثری مهم در افـزایش مقـادیر فـشار آب منفـذی بالادست هسته داشـته اسـت. در فـشارسنج هـای پـایین دست هسته پس از تراز ۲۱۵ متر از خاکریزی عامل قوس زدگـی از تـأثیر خـاکریزی کاسـته و کـاهش فـشاری درفشارسنج های پایین دست هسته پدید آمده و آبگیـری تاثیری بر مقادیر فشار آب منفـذی پـایین دسـت هـسته نداشـته اسـت . در فـشارسنج هـای SP5-3،SP5-4 (فشارسنج های محور هسته ی سـد) بـا افـزایش ارتفـاع خاکریزی، به علت پدیده ی قـوس زدگـی، رونـد افـزایش فشار منفذی کـاهش یافتـه، ولـی شـاهد کـاهش مـشابه فشارسنج های پایین دست نیستیم. این نکتـه را بایـد در نظر داشت که آبگیری تاثیری مـشابه در فـشارسنج هـای بالادست و هسته ندارد.

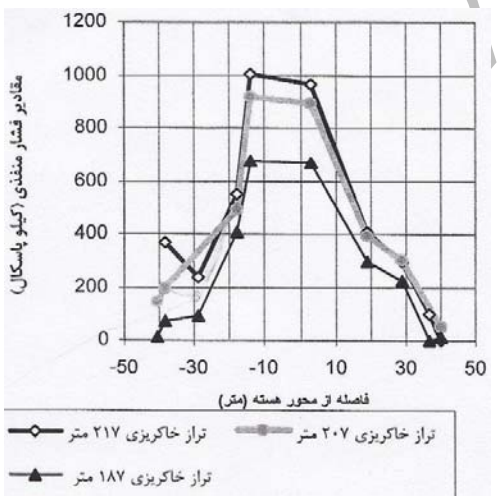


شکل ۳-فشار آب منفذی در تراز ۱۰۷ متر دربخش میانی هسته (بالا) و شکل ۴- فشار آب منفذی در تراز ۱۰۷ متر و پایین دست هسته (پایین).



شکل ۵- فشارآب منفذی در تراز ۱۰۷ متر و در بالا دست هسته.

در بالادست هسته ی سد، یک جهش ناگهانی پـس از آبگیری مشاهده می شود که نشان دهنده ی تاثیرپـذیری این منطقه ی مجاور هـسته از تـراز آب مخـزن در حـین آبگیری است، در صورتی کـه بـیش تـرین فـشارهای آب منفذی در منطقه ی میانی هسته، صرفا مربوط بـه سـربار زمـان سـاختن و فـشار خـاک بـوده و از آبگیـری متـأثر نگردیده اند.



شکل ۶- تغییرات فشار آب منفذی هسته در سه تراز ۱۸۷ ، ۲۰۷ و ۲۱۷ متر از سطح دریا در مقطع ۵-۵.

Archive of SID

www.SID.ir

تحلیل عددی سد کرخه در شرایط گوناگون

انتخاب و معرفی نرم افزار مورد استفاده و روش شبیه سازی سد

برای انجام تجزیه و تحلیل های ایستایی و بررسی فشارهای آب منفذی در هسته ی سد کرخه در زمان اجرا، از نرم افزار تفاضل محدود CA2 استفاده شده است. سازک بندی این سد یک شبکه ی ۱۰۱*۵۵ می باشد که تعداد لایه های در نظر گرفته شده برای آن از روی تراز پی ، ۱۳ عدد بوده و هر لایه شامل ۴ مجموعه شبکه ی شبکه بندی به ضخامت ۲/۵ متر است (ضخامت هر لایه ۱۰ متر) برای تجزیه و تحلیل ایستایی سد ، ابتدا کل سد شبیه سازی شده، سپس با دستور null کل سازک ها تا رقوم پی حذف، سپس برای ایجاد تنش های اولیه در پی با اعمال وزن مخصوص مصالح پی و شتاب ثقل و انجام گام های مکانیکی مقادیر تنش های ناشی از نیروی ثقل در پی بدست می آید . در مرحله بعد، پی و فرازبند به صورت سازک های از قبل موجود (preexisting) ، سپس بدنه ی اصلی سد به صورت لایه لایه در ضخامت های ۱۰ متری ساخته می شود. در پایان ساختن هر لایه ۱۰ متری تجزیه و تحلیل تحکیم صورت می گیرد ، در ضمن نفوذپذیری در جهت افقی ده برابر نفوذپذیری در جهت قائم در نظر گرفته شده است .

شکل ۷ پیشرفت اجرایی سد را نسبت به زمان نشان می دهد که تقریبا هر ۱۰ متر از ارتفاع سد در مدت ۱۰۰ روز بنا می شود، بنابراین می توان فرض کرد که این لایه های ۱۰ متری نیز در مدت ۱۰۰ روز ساخته می شوند. چنانچه در مدت ۱۰۰ روز نیز پیشرفت اجرایی سد یکنواخت باشد، در این صورت سرعت اجرایی سد را می توان ۱۰ سانتی متر در روز در نظر گرفت . برای محاسبه ی اثر تحکیم در تجزیه و تحلیل بالا، با فرض این که که لایه های ۱۰ متری به جای آن که در مدت ۱۰ روز به گونه ی تدریجی ساخته شوند، در مدت ۵۰ روز به گونه ی آنی بنا می گردند، بنابراین پس از ساختن هر لایه ابتدا کل مجموعه مورد تجزیه و تحلیل پویایی قرار می گیرد، سپس در زمان ۵۰ روز (۴۰۰۰۰۰۰ ثانیه) تجزیه و تحلیل مکانیکی و جریان با هم، در مورد آن انجام می گیرد و از این راه اثر تحکیم لایه های هسته ی سد نیز شبیه سازی می شود.

ویژگی های مهندسی مصالح سد برای انجام تحلیل های عددی در جدول ۲ نشان داده شده اند . شبیه رفتاری انتخاب شده ، شبیه کشسی - خمیری کامل (موهر – کلمب) است که فراسنج های مورد نیاز در این شبیه وزن مخصوص، سنجه ی تغییرشکل، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع می باشند. در صورت انجام تحلیل تحکیم فراسنج های مورد نیاز عبارتند از: ضریب نفوذپذیری، درجه ی اشباع مصالح و پوکی. یکی از فراسنج های موثر بر مقدار فشار آب منفذی، درجه ی اشباع می باشد.درجه ی اشباع مصالح هسته و پوسته بر پایه ی نتایج آزمایش های انجام گرفته در مرحله ی اجرا بدست آمده است. درجه ی اشباع مصالح هسته ی متراکم شده با رطوبت بهینه ی ۸۸ درصد است.

جهت بررسی فشارهای آب منفذی در هسته ی سد کرخه به هنگام آبگیری همراه با ساختن از نرم افزار تفاضل محدود CA2 جهت انجام تحلیل های عددی استفاده شده است. با توجه به این که آبگیری سد کرخه از بهمن ۱۳۸۷ آغاز گردیده است، لذا نتایج ابزار دقیق تا پایان ساختمان آن موجودند .

چون عملیات ساختن همراه با آبگیری است ، باید شبیه بکار رفته در تجزیه و تحلیل با اجرا منطبق باشد و از آنجا که در هر تراز خاکریزی، تراز آب مخزن سد هم در دسترس است، عملیات ساختن هر لایه ی ۱۰ متری (۴ لایه ی ۲/۵ متری) در شبیه بکار رفته ۵۰ روز است. پس از ساختن هر لایه ی ۲/۵ متری از خاکریز و قراردادن تراز آب مخزن در بالادست پوسته، تعدادی تناوب مکانیکی برای رسیدن مجموعه به حالت تعادل انجام می گیرد . سپس تحکیم برای لایه ی ساخته شده انجام شده (تحکیم ۱۰ روزه) و به همین ترتیب تا لایه ی ۲/۵ متری آخر از لایه ی ۱۰ متری عمل می شود. در ضمن با توجه به شکل ۷ که تغییرات خاکریزی در شروع مرحله ی آبگیری و تغییرات تراز آب مخزن سد را نشان می دهد ، تغییرات تراز آب مخزن به ۴ مرحله تقسیم گردیده در

Archive of SID

www.SID.ir

شبیه مربوطه استفاده شده است . به دلایل زیر تجزیه و تحلیل تراوش به گونه ی مستقل انجام نمی گیرد:

۱) در تجزیه و تحلیل تحکیم افزون بر حل معادله ی تحکیم ترزاقی ، حل معادله ی لاپلاس هم صورت می گیرد.

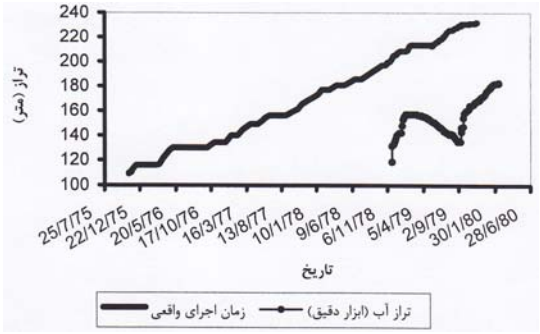
۲) در تحلیل تراوش به گونه ی معمول جریان پایدار برقرار است، ولی در این مطالعات جریان ناپایدار سیال برقرار است .

برای مقایسه ی تاثیر آبگیری بر مقادیر فشار آب منفذی مانند حالت ساختن ، لایه های ۱۰ متری شبیه سازی شده اند.

با توجه به مطالعات انجام شده در مورد نرم افزار CA2 ، محاسن آن جهت انجام مطالعه به شرح زیر است:

۱) در سدهای خاکی بزرگ و در شیب ها اختلاف تنش های اصلی زیاد می شود و احتمال وقوع تغییر شکل های خمیری وجود دارد. افزون براین، گسیختگی خاک های درشت دانه ی متراکم با افزایش حجم در هنگام برش همراه است. از آن جا که شبیه رفتاری کششی غیر خطی نمی تواند این رفتارها را شبیه سازی کند، بهتر است برای تحلیل از نرم افزاری استفاده شود که توانایی شبیه سازی رفتار کششی - خمیری را داشته باشد که نرم افزار CA2 این توانمندی را داراست .

.



شکل ۷ - پیشرفت اجرایی سد و تراز آب مخزن نسبت به زمان

۲) مقادیر فشار حفره ای بدست آمده از تحلیل سد خاکی حین ساختن با فرض سیال تراکم پذیر (قابل انجام با کاربرد نرم افزار CA2) تطبیق خوبی را با مقادیر اندازه گیری شده در محل نشان می دهند. در نظر نگرفتن تراکم پذیری سیال باعث می شود فشار آب حفره ای بیش از مقدار واقعی محاسبه شود؛ بنابراین تنش مؤثر کم تر از مقدار واقعی محاسبه شده و چنین تحلیلی ضریب اطمینان واقعی را نشان نمی دهد.

۳) در نظرنگرفتن تراکم پذیری بخش جامد خاک در تحلیل تحکیم باعث می گردد که مقادیر فشار آب حفره ای بیشتر محاسبه شود . این تحلیل ممکن است در جهت توجیه اقتصادی طرح نباشد، اما تأثیر در نظرنگرفتن تراکم پذیری سیال کم تر است .

۴) توانایی بررسی جریان ناپایدار سیال[1] در محیط متخلخل را دارد.

در ضمن نواقص و معایب نرم افزار CA2 جهت انجام مطالعه به شرح زیر است :

۱) در نظر نگرفتن تغییرات نفوذپذیری در حین تراکم،

۲) در نظر نگرفتن سنجه ی کششی بصورت ثابت ، که بایستی از سنجه ی کششی مماسی یعنی شبیه هذلولی دانکن[2] و چانگ[3] استفاده شود،

۳) سرعت طولانی اجرای برنامه، بویژه در مورد مسایل تحکیم،

۴) عدم توانایی نرم افزار در شبیه سازی سازک های واسط[4] بین سازک های پوسته و هسته.

بررسی فشارهای منفذی

چنانچه در شکل های ۸ و ۹ ملاحظه می شود، نتایج تحلیل های عددی در دوران ساختن نسبت به محور سد تقارن دارند. تقارن در تحلیل عددی منطقی است، چه، در تجزیه و تحلیل ، شرایط بالادست و پایین دست در دوران ساخت یکسان است. ملاحظه می شود که فشار آب منفذی در دوران ساختن در حال افزایش است دلیل آن در بخش مقایسه ی نتایج ابزار دقیق و تحلیل های عددی توضیح داده خواهد شد . شکل های ۱۰ و۱۱ تغییرات فشار آب منفذی را در مقطع ۵-۵ ، با استفاده از آمار بدست آمده از ابزار واقع در تراز ۱۰۷ متری را در رقوم خاکریزی ۲۰۷ و ۲۱۷ متر پس از آبگیری و در شبیه بدون نظر گرفتن آبگیری نشان می دهند.

---

[1]- unsteady state
[2]- dunkan
[3]- chang
[4]- interface element

Archive of SID

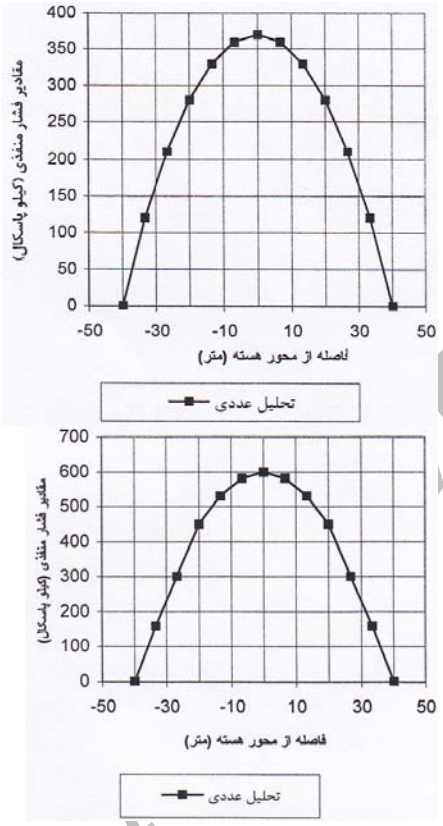
www.SID.ir

جدول ۲: مقادیر فراسنج های مصالح پی و بدنه ی سد کرخه برای تحلیل های عددی

ویژگی ها	وزن مخصوص خشک، (t/m^3)	وزن مخصوص اشباع، (t/m^3)	زاویه ی اصطکاک داخلی، (درجه)	چسبندگی، (kg/cm^2)	سنجه ی تغییر شکل، (kg/cm^2)	ضریب پواسون	زاویه، (درجه)	پوکی، (درصد)	ضریب نفوذ پذیری، (cm/s)
هسته(CD)	۱/۷۴	۲/۰۲	۲۰	۰/۳	۳۵۰	۰/۴	۲	۳۴/۲	$(۱۰)^{-۷}$
پوسته	۲	۲/۲	۳۹		۱۰۲۰	۰./۲۵	۱۰	۲۵	$(۱۰)^{-۴}$
صافی و زهکش	۱/۹	۲	۳۵		۷۰۰	۰./۲۷	۸	۵۰	$(۱۰)^{-۳}$
گلسنگ(۱-)و (۲-)	۲	۲/۱	۲۲	۰/۷	۱۲۰۰	۰./۳	۵	۳۵	$(۱۰)^{-۸}$
جوش سنگ	۲/۱	۲/۳	۳۹/۴	۰/۸۵	۱۰۰۰۰	.۰/۲۵	۱۲	.۴۵	

در بالا دست هسته ی سد پس از آبگیری جهشی ناگهانی مشاهده می شود. مقادیر فشار منفذی در بالا دست ، در مقایسه با پایین دست هسته ی سد، از آن تقارنی که در مرحله ی ساختن داشتند، خارج شده و از وجود عاملی در این نبود تقارن حکایت می کنند که نشانگر تبعیت فشار سنج های بالادست هسته از تراز آب مخزن می باشد، در صورتی که فشارسنج های بخش میانی هسته ی سد کاملاً متأثر از تغییرات تراز خاکریزی می باشد. چنین امری طبیعی است، چه، در نخستین مرحله ی آبگیری جریان نا پایدار سیال[1] برقرار بوده و زمانی طولانی لازم است تا تراوش دایمی[2] در هسته ی سد صورت گیرد.

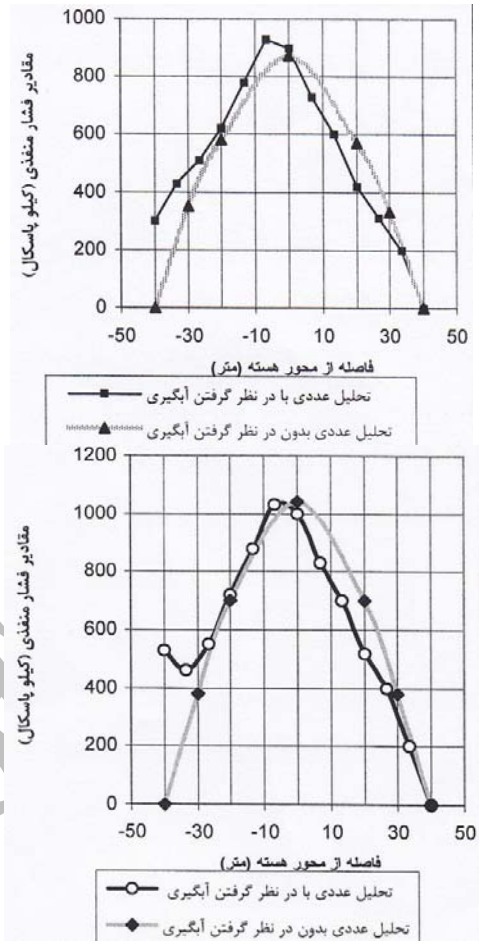
تراوش آب از بخش میانی هسته به طرف بالادست بر قرار است. دلیل این امر ، تفاوت مقادیر فشار آب منفذی است زیرا مقادیر فشار آب منفذی در بخش میانی هسته از مقادیر تراز آب مخزن بیش تر بوده، همچنین تراوشی از بخش میانی هسته ی سد به سمت پایین دست سد بر قرار است .



شکل ۸- تغییرات فشار آب منفذی در تراز ۱۰۷ متر در مقطع ۵-۵ و در رقوم خاکریزی ۱۵۷ (بالا) و شکل۹- درتراز ۱۸۷ متر (پایین).

[1]- unsteady state
[2]- steady state

www.SID.ir



شکل ۱۰ - تغییرات فشار آب منفذی در تراز ۱۰۷ متر در مقطع ۵-۵ و رقوم خاکریزی ۲۰۷ متر(بالا) و شکل ۱۱- درتراز ۲۱۷ متر (پایین).

اثر سرعت آبگیری مخزن بر فشارهای منفذی هسته

سرعت آبگیری را می توان از دو جهت بررسی کرد :

- پدیده ی گسیختگی هیدرولیکی در نخستین آبگیری عاملی مهم است که در سدهایی که همزمان با آبگیری عملیات ساختن هم انجام می گیرد، رخ می دهد. بی توجهی به حفظ فاصله ی ایمنی در اختلاف تراز آب مخزن و تراز خاکریزی می تواند خطرناک باشد .

- افزایش مقادیر فشار آب منفذی بیش تر در بالادست هسته بوده که باعث کاهش تنش مؤثر در آن جا شده و وقوع لغزش را محتمل خواهد نمود. چنانچه اختلاف ارتفاع تراز آب مخزن و خاکریزی زیاد باشد، تراوشی از بالادست هسته به سوی مخزن سد برقرار خواهد شد که در این بین وجود صافی بالادست ضروری است تا همانند صافی پایین دست ایفای نقش نماید .

مقایسه ی نتایج ابزار دقیق با تحلیل های عددی

با توجه به شکل ۱۲ مشخص می شود که با افزایش ارتفاع خاکریزی مقادیر فشار منفذی در حال افزایش بوده و نتایج بدست آمده از ابزار دقیق و تحلیل عددی نیز با هم سازگارند. علت افزایش فشار آب منفذی در داخل هسته افزایش مداوم سربارهای ناشی از افزایش ضخامت خاکریزی می باشد ، بدین صورت که در ابتدای عملیات اجرایی، رطوبت خاک معادل رطوبتی است که مصالح در آن کوبیده و به تراکم مورد نظر رسیده و طبعا این رطوبت با شرایط اشباع فاصله ی زیادی داشته و بخشی از فضاهای خالی بین ذرات همچنان بدون آب مانده اند .

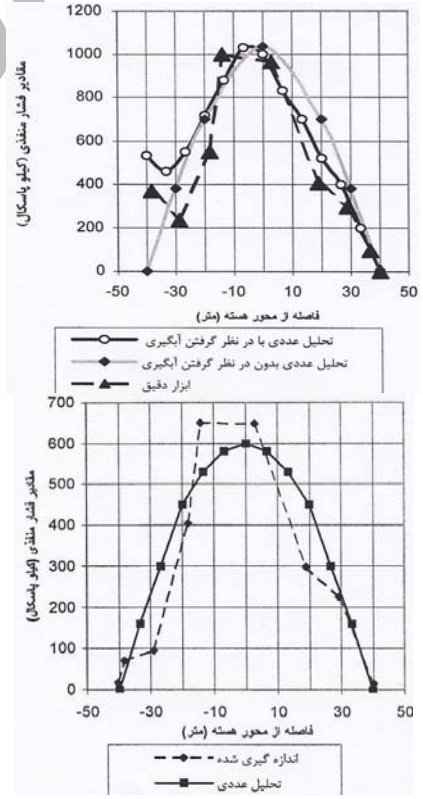
بر اثر استمرار عملیات خاکی و افزایش فشار سربار، تراکم خاک در لایه های زیرین افزایش یافته و حجم فضاهای خالی کاهش می یابد که تداوم این امر منجر به وضعیتی خواهد شد که در آن شرایط مقدار آب موجود در لایه های رسی تمام فضاهای خالی را پر کرده و لایه خاک اشباع می شود. از این مرحله به بعد، افزایش بیش تر سربار بر اثر استمرار عملیات خاکریزی و ازدیاد ضخامت هسته ، موجب بالا رفتن فشار آب منفذی شده و چون نفوذ پذیری هسته ی رسی بسیار پایین و خروج آب از آن مستلزم زمان زیادی است، لذا شرایط بعدی حاکم بر هسته از نظر وضعیت فشار ها ، تابع سرعت نسبی افزایش سربار و خروج آب بوده و چنانچه سرعت عملیات خاکریزی چندان زیاد نباشد ، ضمن بالا رفتن فشار آب منفذی در داخل هسته، بر اثر افزایش سربار بتدریج استهلاک فشارها صورت می گیرد به گونه ای که خطر افزایش ناگهانی فشار آب منفذی و بروز پدیده ی شکست هیدرولیکی بوجود نخواهد آمد. بر اساس شکل ۱۲ ، با حرکت از محور سد به سمت پایین دست و یا بالادست ، تغییرات مقادیر فشار آب منفذی بدست آمده از نتایج ابزار دقیق در مقایسه با نتایج تحلیل های عددی ، به دلایل زیر کمی بیش ترند:

- ساختن شبیهی که بتواند با نتایج عملی دقیقا منطبق باشد، در عمل نا ممکن است .

Archive of SID

www.SID.ir

- در تحلیل عددی، سنجه ی کششی ثابت است و با افزایش ارتفاع خاکریزی افزایش نمی یابد، بنابراین تراکم تاثیری بر نفوذپذیری قایم و افقی نداشته و در طول تجزیه و تحلیل تحکیم هم نرم افزار توانایی تغییر مقادیر نفوذ پذیری را ندارد، ولی در نتایج بدست آمده از ابزار دقیق مسلما سنجه ی کششی خاک با افزایش ارتفاع خاکریزی افزایش می یابد که نتایج آزمایشگاهی هم بیانگر این مسأله است. پس تراکم خاک باعث کم شدن نفوذپذیری در جهت قائم و افقی شده و لذا بایستی نتایج بدست آمده از ابزار دقیق در پایین دست و بالادست هسته بزرگ تر از مقادیر محاسبه شده با کاربرد تحلیل عددی آن باشد، ولی ملاحظه می شود که چنین نیست . این اختلاف می تواند از مسایل اجرایی ، درصد تراکم بکار رفته و زهکشی در بالادست و پایین دست هسته ناشی شود که ممکن است به کاستی های نرم افزار هم برگردد، لذا برای قضاوت صحیح باید از نرم افزاری با قابلیت تغییر سنجه ی کششی و نفوذپذیری متناسب با افزایش ارتفاع خاکریزی بهره گرفت .



شکل ۱۲ - تغییرات فشار آب منفذی در تراز ۱۰۷ متر در مقطع ۵-۵ در رقوم خاکریزی ۱۸۷ متر(بالا) و شکل ۱۳- درتراز ۲۱۷ متر (پایین).

در شکل ۱۳ مقایسه ی نتایج بدست آمده از ابزار دقیق و تحلیل عددی در مرحله ی آبگیری همراه با ساختن و در تراز خاکریزی ۲۱۷ متر نشان داده شده اند. مقادیر فشار آب منفذی در بالادست هسته ی سد حاصل از تحلیل های عددی از مقادیر اندازه گیری شده بیش تر است. این تفاوت ناشی از اعمال شرایط آبگیری در بالادست در پرونده ی رایانه ای است و شرایط حاکم بر بالادست از قابلیت صافی در کاهش فشار آب منفذی در حین تراکم می کاهد زیرا در نخستین مرحله ی آبگیری جریان ناپایدار سیال (steady state) در هسته ی سد صورت می گیرد . در صورت ایجاد تراوش دایمی، آبگیری بر مقادیر فشار منفذی در داخل هسته تأثیر می گذارد که این امر مستلزم سپری شدن زمان زیادی است.

ضریب فشار آب حفره ای (Ru)

از شاخص های مهم ارزیابی فشار آب منفذی ، تعیین ضریب فشار آب حفره ای یا Ru است که از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$Ru = [u / \sigma v]$$

Ru بیش ترین ضریب فشار آب حفره ای ، u فشار آب منفذی (kpa) و σ v فشارقائم (kpa) می باشد . u از نتایج اندازه گیری شده به وسیله ی ابزار دقیق استخراج و σ v بدست آمده از محاسبه ی ($v = \gamma h$) σ) و نتایج بدست آمده از ابزار دقیق تعیین گردیده و بار دیگر نیز از نتایج تحلیل های عددی مقادیر u و v σ محاسبه شده اند. با این روش ها ۳ گروه اعداد مشخص برای ضریب فشار آب منفذی بدست آمده اند. در شکل ۱۴ ملاحظه می شود که بیش ترین ضریب فشار آب منفذی از نتایج تحلیل عددی در پایان مرحله ی ساخت ۶/. و این ضریب از نتایج ابزار دقیق در پایان مرحله ساخت ۷/. بوده است ، بنابراین ضریب بدست آمده از نتایج ابزار دقیق همواره بیش تر از نتایج محاسباتی است که چنین امری طبیعی بوده و این بدان علت است که به خاطر پدیده ی قوس زدگی، مقادیر تنش قائم واقعی از مقدار γh کم تر است و قرار

Archive of SID

www.SID.ir

گرفتن مقادیر Ru در عمل بالاتر از مقادیر بدست آمده ابزار دقیق محاسباتی خواهد بود .

شکل ۱۴ – تغییرات بیشینه ی ضریب فشارهای منفذی در تراز ۱۰۷ متر در مقطع ۵-۵ در زمان های گوناگون.

خلاصه و نتیجه گیری

- اهمیت رفتارسنجی در شناختن مسایل رفتاری سدهای خاکی در این مقاله روشن گردید و ثابت شد که عاملی مؤثر که در دوران ساخت بر مقادیر فشار آب منفذی تأثیر می گذارد، افزایش ارتفاع خاکریزی است، در حالی که در دوران آبگیری توأم با ساختن، آبگیری تاثیری بر مقادیر بیش ترین فشار آب منفذی داخل هسته نداشته و صرفا باعث افزایش مقادیر فشار آب منفذی در بالادست هسته ی سد می گردد .

- با بررسی پایداری صفحه ی لغزشی که از بالا دست هسته به سمت بدنه می گذرد، نتیجه گیری می شود که وجود صافی در بالادست هسته ی سد ضروری است و می توان چنین حالتی را به کاهش سریع آب مخزن تشبیه کرد: در کاهش سریع آب مخزن ، جریان از بدنه به سوی مخزن برقرار است، ولی در این حالت جریان آب از هسته به سوی بدنه صورت می پذیرد.

- برای بررسی مقادیرفشار منفذی و پدیده ی قوس زدگی لازم است مقادیر بیشینه ی ضریب فشار منفذی (Ru) اداره شود تا پدیده ی شکست هیدرولیکی بروز نیابد . افزایش سرعت آبگیری ممکن است بر مقادیر فشار منفذی بالادست هسته تاثیر گذارد. این افزایش مادامی که احتمال بروز پدیده ی شکست هیدرولیکی در این منطقه از بدنه ی سد وجود نداشته باشد، قابل قبول خواهد بود، مشروط برآن که همواره یک فاصله ی ایمنی میان تراز مخزن و رقوم اجرا شده ی سد رعایت شود.

سپاسگزاری

دراین جا لازم است که از تمامی مسوؤلان ودست اندرکاران طرح عظیم کرخه دربخش های گوناگون، بویژه مهندسین مشاور مهاب قدس که با دراختیارقراردادن کلیه ی داده های طرح کرخه ونیز نتایج اندازه گیری های ابزاردقیق سد درمراحل گوناگون، انجام این پژوهش را ممکن ساخته اند، صمیمانه قدردانی وتشکر شود.

منابع

۱- گزارش های مراحل ۱ ، ۲ و ۳ طرح کرخه و گزارش خاکریز آزمایشی، شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس

۲- فخیمی، احمد علی ،۱۳۷۶ ، تئوری و راهنمای نرم افزار CA2 در تحلیل محیط های پیوسته (گونه ۲)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه ی ۲۶۲ ، تهران , صفحات ۲۳۵-۲۰۵ .

3-Alonso E.E., Battle F., 1988. Consolidation analysis of partially saturated Soils application to earth dam construction , Proc. 6th . Int. Conf. on Num. Methods in Geomech. 2, Innsbruck: 1303-1308.

4- Duncliff, J., Green, Gordon E., 1993. Geotechnical instrumentation for monitoring field.

5- G.C. & Desai C.S. 1983, Stress and Seepage Analysis of Dams. J. Geotech Eng. Div. ASCE 109(7): 946-960.

6- Ang K.L. J.C.Small 1995, Simulation of dam constructed with unsaturated fills during construction and water impounding , Unsaturated Soil , Alonso & Delage .

7- Naylor, D.J., Maranaha.J.A. 1997. A back-analysis of Beliche Dam , Geotechnique 47: 221-223.

8- Sandic, Tosic, M. 2000, Monitoring of Lazici Dam. ,Proc. 20th . Int. Con. Large Dam , Icold, Volume 3, pp. 133-134, Beijing

Archive of SID

www.SID.ir