

بررسی رفتار سد تبارک آباد در دوران ساخت با استفاده از تحلیل‌های برگشتی

علیرضا فریور^۱، علی اصغر میرقاسمی^{۲*} و رضا مهین روستا^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک خاک و مهندسی پی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۳ عضو هیئت علمی دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت ۸۷/۲/۲۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۱/۲۹، تاریخ تصویب ۸۹/۴/۲۳)

چکیده

سد تبارک آباد، یک سد خاکی با هسته رسی می باشد که دارای ۷۴ متر ارتفاع از روی پی سنگی است. این سد با تاجی به طول ۱۹۳٫۵ متر، روی رودخانه تبارک آباد در شمال شرقی ایران قرار گرفته است. عملیات ساخت سد از بهمن ماه سال ۱۳۸۱ آغاز شده و در مهر ماه سال ۱۳۸۳ به اتمام رسیده است. این سد ابزاربندی خوبی شده است تا اطلاعات مورد نیاز برای رفتارنگاری آن را در اختیار قرار دهد. در این مقاله سیستم ابزاربندی نصب شده در بدنه سد به همراه تحلیل‌های برگشتی انجام شده برای رفتارنگاری آن، شامل فشار آب حفره ای، فشار خاک و تغییر شکل‌ها ارائه شده است.

واژه های کلیدی: تبارک آباد، سد خاکی، هسته رسی، تحلیل برگشتی، رفتار نگاری

مقدمه

(تراز رقوم عادی بهره برداری) و طول و عرض تاج به ترتیب ۴۵ و ۱۵ متر می‌باشد. بخش عمده پی سد، سنگ شیل و بقیه آن سنگ آهک است.

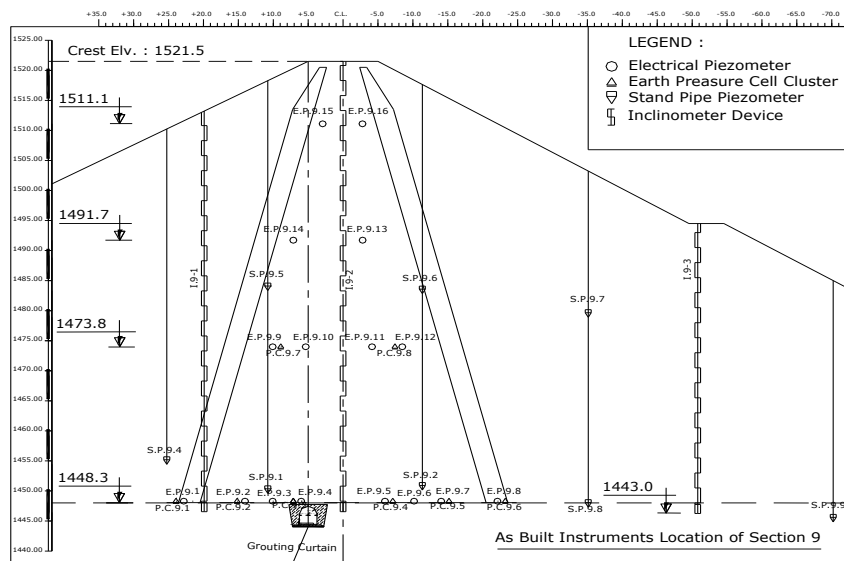
ابزاربندی

پایداری و ایمنی اجرای سدهای خاکی در طول ساخت، اولین آنگیری و عملکرد بلندمدت آنها باید تحت کنترل قرار گیرد [۳]. به بیان ICOLD [۴]: "به طور کلی این اصل پذیرفته شده است که ایمنی سدها فقط به طراحی و ساخت مناسب آنها بستگی ندارد، بلکه رفتارنگاری عملکرد واقعی سد در طول چند سال اول فعالیت و در کل دوران بهره برداری آن نیز بسیار تاثیرگذار است." بدین منظور سدها به ابزار اندازه گیری و کنترلی برای تعیین تغییر شکل‌ها، فشار آب حفره‌ای و تنش‌ها مجهز می‌شوند.

سیستم ابزاربندی سد تبارک آباد شامل موارد زیر می‌باشد:
- تعداد ۱۱۵ عدد سلول فشار کل (PC) برای رفتارنگاری فشار کل خاک در بدنه سد

- تعداد ۴۴ عدد پیژومتر الکتریکی تار مرتعش (EP) برای رفتارنگاری فشار آب حفره‌ای در بدنه سد

سد مخزنی تبارک آباد در شمال شرقی ایران، بر روی رودخانه تبارک آباد در نزدیکی شهر قوچان قرار گرفته است. این سد از نوع خاکی- سنگریزه‌ای با هسته مرکزی رسی می‌باشد. طول و عرض تاج سد به ترتیب ۱۹۳/۵ و ۱۰ متر می‌باشد. شیب‌های بدنه سد، در پوسته بالادست ۱ قائم به ۱/۸ افقی و در پوسته پایین دست ۱ قائم به ۱/۶۵ افقی ساخته شده است و شیب هسته رسی در هر دو طرف ۱ قائم به ۰/۲۵ می باشد [۱]. پوسته‌های سد از مصالح سنگریزه ساخته شده است. فیلترها برای حفاظت هسته از فرسایش ناشی از آب تراوش شده، از طریق زهکشی آن عمل می‌کنند و همچنین یک ناحیه انتقالی بین هسته و پوسته با دانه‌بندی بین آنها ایجاد می‌کند تا تغییر دانه‌بندی از هسته به پوسته به طور ملایم انجام گیرد. مقادیر مصالح مورد استفاده در بخش‌های مختلف بدنه سد به شرح ذیل می‌باشد: پوسته سنگریزه‌ای ۶۷۲ هزار مترمکعب، هسته رسی ۱۵۱ هزار مترمکعب، فیلترها و نواحی انتقالی ۱۳۲ هزار مترمکعب [۲]. ظرفیت مخزن در تراز نرمال و حداکثر به ترتیب ۴۷/۱ و ۶۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. سرریز این سد از نوع سرریز آزاد با تبدیل نوع بادبزی است و تراز تاج آن ۱۵۱۳/۵ متر از سطح دریا



شکل ۱: آرایش ابزار در مقطع ۹-۹.

نرم افزار FLAC2D انجام شده است. طول دوره ساخت در حدود ۶۲۰ روز می باشد که از مقدار پیش بینی شده اولیه که حدود ۷۳۰ روز بوده، به مراتب کمتر می باشد. اطلاعات موجود شامل سه دسته قرائت ابزار می باشد: فشار آب حفره ای هسته در مدت ساخت، نشست های بدنه سد و فشار کل خاک. در ادامه، موارد فوق بررسی شده و با نتایج تحلیل های برگشتی انجام شده در هر مورد مقایسه می گردد.

تحلیل های برگشتی

در مدل سازی سد تبارک آباد از یک شبکه 32×100 المانی با ابعاد کلی 114×590 متر استفاده شده است. عرض مدل شده در حدود $2/5$ برابر عرض بدنه سد می باشد تا با دور شدن از بدنه، به مرزهای قابل قبولی برای بستن مدل دست یابیم. در مرزهای کناری امکان جا به جایی افقی و در مرز پایین، هم جا به جایی افقی و هم قائم گرفته شده است. از 32 المان قائم، 8 المان به عمق 40 متر برای مدل سازی پی و 24 المان باقی مانده به ارتفاع 74 متر، برای مدل سازی ارتفاع بدنه به کار می روند. کل عمق پی در یک لایه و بدنه سد در 24 لایه به ارتفاع هر کدام حدود 3 متر مدل گردیده است.

پس از ساخت هندسه مدل، برای مصالح به کار رفته در سد، مدل رفتاری الاستو- پلاستیک کامل موهر-کولمب که شناخته شده ترین مدل در مصالح خاکی می باشد،

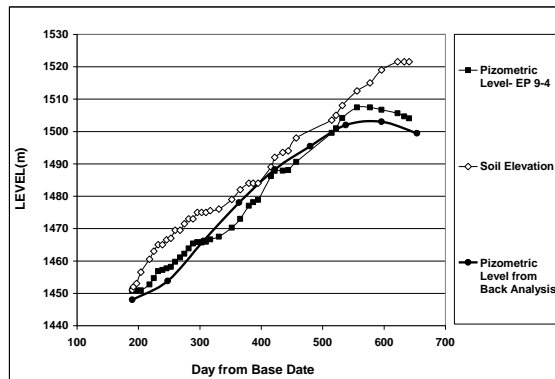
- تعداد ۹ عدد انحراف سنج برای رفتارنگاری تغییر شکلهای جانبی افقی و اندازه گیری نشست های قائم بدنه سد در ترازهای مختلف
- دو سری کشیدگی سنج برای اندازه گیری تغییر شکل های هسته در امتداد محور سد
- تعداد ۷ عدد چاه مشاهده ای
- تعداد ۳ عدد شتاب نگار
کلیه ابزار فوق در ۳ مقطع عرضی به نام های ۶-۶، ۹-۹ و ۱۲-۱۲ نصب شده اند. مقطع ۹-۹ که مقطع میانی و مرتفع ترین آنها می باشد، برای بررسی رفتار سد انتخاب شده است (شکل ۱).

رفتارنگاری

رفتارنگاری^۱ به معنای بررسی عملکرد یک سازه در دوران ساخت و مرحله بهره برداری و تطبیق آن با پیش بینی های زمان طراحی می باشد.

رفتارنگاری صحیح، مستلزم داشتن اطلاعات صحیح و سامان یافته می باشد که در نتیجه کارایی خوب ابزار به دست می آید. برای این منظور پس از جمع آوری کلیه اطلاعات و قرائت های موجود ابزار دقیق نصب شده در سد، اقدام به ساماندهی و غربال آنها می گردد. پس از اطمینان از داشتن اطلاعات دقیق ابزار، رفتار واقعی به دست آمده از آنها مشخص شده و در ادامه تحلیل های عددی مورد نظر برای دستیابی به پارامترهای واقعی مصالح با استفاده از

انتخاب شده است. پارامترهای مورد نیاز در این مدل عبارتند از: وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع و در تحلیل تحکیم ضریب نفوذپذیری، درجه اشباع و پوکی نیز به پارامترهای مورد نیاز قبلی اضافه می شوند. در ابتدای انجام تحلیل از پارامترهای اولیه ای که بر اساس آنها پیش بینی های طراحی انجام شده است، استفاده می گردد که در جدول (۱) آمده است.



شکل ۲: تغییرات تراز خاکریزی و تراز پیزومتریک اندازه گیری شده در پیزومتر میانی هسته و به دست آمده از تحلیل عددی در مقطع (۹-۹) و در تراز ۱۴۴۸ متر (محل اتصال هسته به پی) در طول مدت ساخت سد.

شکل (۲) تغییرات تراز خاکریزی و تراز پیزومتریک در قسمت میانی هسته را که از نتایج ابزار دقیق و تحلیل های برگشتی به دست آمده، نشان می دهد. کاهش فشار آب حفره ای ایجاد شده در انتهای خاکریزی، به علت پدیده قوس زدگی^۲ می باشد. بدین ترتیب که با وقوع پدیده قوس زدگی، هیچ تنش اضافی در اثر افزایش سربار به قسمت های پایینی هسته منتقل نمی گردد و در نتیجه فشار آب حفره ای نیز نه تنها افزایش نمی یابد، بلکه به علت پدیده تحکیم به مرور زمان فشار آب حفره ای زایل می شود و سیر نزولی نیز پیدا می کند. نکته قابل توجه دیگر که در شکل (۲) مشاهده می شود، اختلاف فشار آب حفره ای ایجاد شده در پیزومتر الکتریکی موجود در محدوده میانی هسته با نتایج حاصل از تحلیل های برگشتی بدست آمده در همان نقطه در زمان انتهای خاکریزی می باشد، به طوری که پیزومتر مقدار بیشتری را نشان می دهد. این موضوع به علت کاهش نفوذپذیری هسته در مراحل انتهایی خاکریزی است که بیشترین سربار را دارد. زیرا افزایش سربار باعث تراکم بیشتر هسته و در نتیجه کاهش نفوذپذیری آن می گردد. از آنجایی که میزان نفوذپذیری در مدل عددی ثابت داده شده است، در

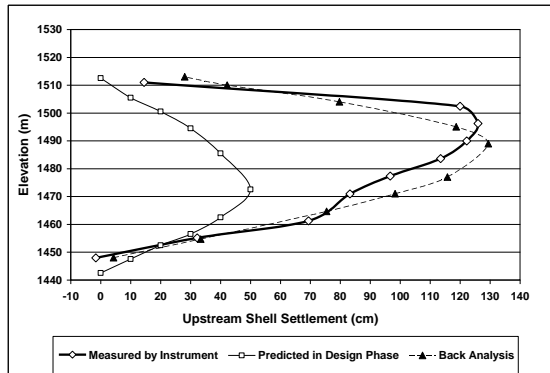
بدین ترتیب پس از ساخت هندسه مدل و وارد نمودن پارامترهای اولیه مصالح، تحلیل اولیه و پس از آن تحلیل های برگشتی انجام می شود. از آنجایی که هدف اصلی از انجام تحلیل های برگشتی، رسیدن به پارامترهای واقعی مصالح مصرفی در زمان ساخت سد می باشد، بدین منظور باید اصلی ترین پارامترهای اولیه ورودی به نرم افزار با توجه به رفتار واقعی سد که از اطلاعات ابزار دقیق به دست آمده است، تغییر داده شوند تا جایی که رفتار واقعی سد، در مدل هم ایجاد شود. بدین منظور در مراحل مختلف و با انجام تحلیل های متعدد، همه پارامترهای اصلی تاثیرگذار به طور مجزا با روند منطقی تغییر داده شده تا در نهایت همگی پارامترها تدقیق شوند. نهایتاً مشخصات مصالح به دست آمده از تحلیل های برگشتی به صورت جدول (۲) خلاصه می شود.

بررسی فشار آب حفره ای در بدنه سد

فشار آب حفره ای ایجاد شده در خاک ریزدانه مورد استفاده در ساخت یک سد خاکی، از لحاظ مکانیک خاک بسیار اهمیت دارد و افزایش آن می تواند پایداری سد را به مخاطره بیندازد. افزایش فشار آب حفره ای، کاهش تنش موثر را باعث می شود. از آنجاییکه مقاومت برشی خاک نیز که باعث پایداری سد در مقابل تغییر شکل های برشی می گردد، در رابطه مستقیم با تنش موثر می باشد، با کاهش مقاومت برشی، پایداری سد تهدید می گردد. در نتیجه افزایش فشار آب حفره ای می تواند عامل ناپایداری سد گردد.

در ادامه با شناخت اهمیت نقش فشار آب حفره ای ایجاد شده در سد، مقادیر آن از طریق اطلاعات ابزار دقیق و تحلیل های عددی مورد ارزیابی قرار می گیرد. همان طوری که در شکل (۱) مشاهده می شود، در مقطع (۹-۹) که مرتفع ترین مقطع سد می باشد، در چهار تراز ۱۴۴۸،

در مقطع (۹-۹) سه عدد نشست سنج به نام‌های SD 9-1 و SD 9-2 و SD 9-3 به ترتیب در حدود ۲۰ متری محور هسته در پوسته بالا دست، در روی محور و داخل هسته، در حدود ۵۰ متری محور سد در پوسته پایین دست قرار دارند. برای ارزیابی تغییر شکل‌های قائم مقطع (۹-۹)، مقادیر نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزار فوق در حین ساخت، تجزیه و تحلیل می‌گردد.



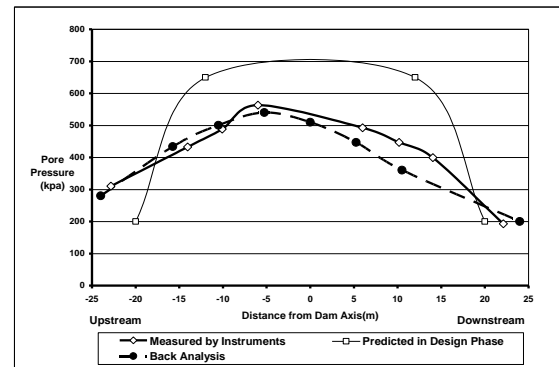
شکل ۴: تغییرات نشست در ترازهای مختلف پوسته بالادست مقطع (۹-۹) در پایان ساخت (تراز خاکریزی ۱۵۲۱).

شکل (۴) مقادیر نشست اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی شده اولیه و به دست آمده از تحلیل برگشتی در پوسته بالادست، در زمانی که خاکریزی سد به رقوم ۱۵۲۱ متر یعنی پایان ساخت رسیده است را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نشست‌های اندازه‌گیری شده حدود ۲/۵ برابر نشست‌های پیش‌بینی شده است، به طوری که حداکثر نشست پیش‌بینی شده ۵۰ و نشست اندازه‌گیری شده ۱۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. این مقدار نشست اندازه‌گیری شده در پوسته بالادست در حدود ۱/۶ درصد ارتفاع سد می‌باشد که در محدوده قابل قبول بین ۱ تا ۲ درصد ارتفاع قرار دارد. از طرفی مشاهده می‌گردد که پیش‌بینی‌های اولیه طراحی با مقادیر واقعی دارای تفاوت چشمگیری می‌باشد. با بررسی به عمل آمده مشخص گردید که علت افزایش نشست اندازه‌گیری شده پوسته بالادست ناشی از آبیگری مخزن می‌باشد. آبیگری مخزن باعث اشباع شدن مصالح پوسته بالادست شده که در نهایت منجر به نشست‌های بیشتر آن گردیده است [۷]. همچنین مشاهده می‌گردد حداکثر نشست تجمعی در زمان ساخت، در تراز بالاتری از پیش‌بینی زمان طراحی اتفاق افتاده است. این مورد ناشی از متراکمترشدن لایه‌های پایینی خاک در اجراء، بدلیل وزن لایه‌های بالاتر

انتهای خاکریزی که در عمل نفوذپذیری کاهش پیدا کرده و افزایش فشار آب حفره ای ادامه یافته است، در مدل عددی به علت وقوع پدیده زود هنگام قوس زدگی نسبت به پیژومتر، کاهش فشار آب حفره ای زودتر از واقعیت اتفاق افتاده است.

شکل (۳) مقادیر فشار آب حفره ای به دست آمده از ابزار، پیش‌بینی طراحی و تحلیل برگشتی را در مقطع (۹-۹) و تراز ۱۴۴۸ متر، در داخل هسته و در رقوم خاکریزی ۱۵۲۱ متر (انتهای خاکریزی) نشان می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً هم بیان شد، تطابق ایجاد شده بین روند واقعی افزایش فشار آب حفره‌ای در دوران ساخت سد به دست آمده از ابزار و تحلیل برگشتی، یکی از ملاک‌های انتخاب پارامترهای مصالح در تحلیل‌های برگشتی می‌باشد. عدم تقارن منحنی تحلیل برگشتی نیز ناشی از یکسان نبودن پارامترهای مصالح پوسته بالادست و پایین دست در انتهای ساخت می‌باشد، به طوری که ضعیف‌تر شدن پوسته در بالادست به علت آبیگری، باعث نشست بیشتر و در نتیجه فشار آب حفره ای بیشتر گردیده است.



شکل ۳: تغییرات فشار آب حفره ای در تراز ۱۴۴۸ متر داخل هسته و در عرض مقطع (۹-۹) انتهای خاکریزی بدست آمده از پیژومترهای الکتریکی، پیش‌بینی طراحی و تحلیل برگشتی.

بررسی تغییر شکل‌های بدنه سد

یکی از مهم‌ترین رفتارهای سد خاکی، تغییر شکل‌هایی است که هم در دوران ساخت و هم پس از آن در داخل و خارج بدنه سد اتفاق می‌افتد که در صورت عدم کنترل آن می‌تواند پایداری و یا کارایی سد را به مخاطره بیندازد.

برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های داخلی از ۹ عدد نشست سنج - انحراف سنج کار گذاشته شده در سه مقطع بدنه سد، استفاده می‌شود.

به ذکر است که مقدار حداکثر نشست اندازه‌گیری شده در هسته که در حدود ۱/۹ درصد ارتفاع سد می‌باشد در محدوده قابل قبول برای سدهای خاکی قرار دارد.

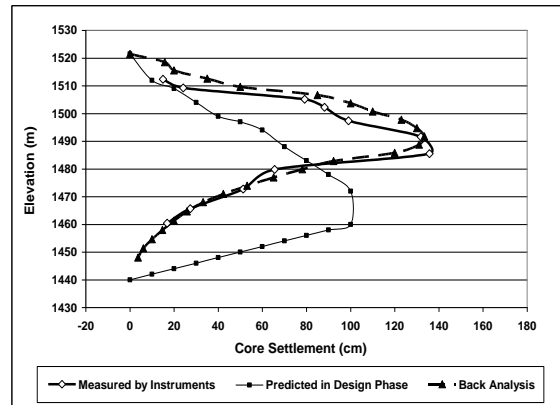
نتایج

(۱) تمامی پیزومترهای الکتریکی موجود در هسته برای فشار آب حفره ای ایجاد شده در طول زمان ساخت، تأثیری مستقیم و منطقی از روند خاکریزی نشان می‌دهند. بدین ترتیب که با افزایش تراز خاکریزی و تقریباً با همان سرعت افزایش، فشار آب حفره ای ایجاد شده و افزایش می‌یابد.

(۲) پیزومترهای نصب شده در فیلتر، روند متفاوتی از بقیه پیزومترها نشان می‌دهند که ناشی از محل نصب آنها می‌باشد. زیرا در فیلتر به علت بالابودن نفوذپذیری مصالح آن، فشار آب حفره ای ایجاد نمی‌گردد و فشار آب دیده شده توسط ابزار، ناشی از تراز آب زیرزمینی و تراز آب مخزن می‌باشد. بدین ترتیب چنین نتیجه‌گیری می‌گردد که تمامی پیزومترهای الکتریکی، کارکرد صحیح و قابل قبولی دارند و احتمال خرابی در هیچ‌کدام وجود ندارد.

(۳) نشست‌های ایجاد شده در پوسته بالادست به دلیل آبیگری مخزن در اواخر خاکریزی بدنه سد، مقادیر زیادی تا بیش از ۲/۵ برابر پیش بینی‌های طراحی نشان می‌دهد. تأثیر آب در لغزش مصالح روی یکدیگر، چنین نشست‌های زیادی را به وجود آورده است.

است که نشست‌پذیری آن را نیز کمتر می‌کند. از طرف دیگر نشست به دست آمده از تحلیل برگشتی در حدود ۱۲۰ سانتی‌متر، یعنی تقریباً برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار است و دارای روندی با تطابق نسبتاً قابل قبول نیز می‌باشد.



شکل ۵: تغییرات نشست در ترازهای مختلف هسته مقطع (۹-۹) در پایان ساخت (تراز خاکریزی ۱۵۲۱).

شکل (۵) تغییرات نشست پیش بینی شده اولیه، اندازه‌گیری شده توسط ابزار و بدست آمده از تحلیل برگشتی در هسته و در ترازهای مختلف سد، زمانیکه خاکریزی به انتها یعنی به رقم ۱۵۲۱ متر رسیده است را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که حداکثر نشست‌های اندازه‌گیری شده (۱۴۰ سانتی‌متر)، حدود ۱/۴ برابر حداکثر نشست‌های پیش بینی شده (۱۰۰ سانتی‌متر) است. تحلیل برگشتی، تطابق رفتاری خوبی را با روند واقعی نشست اندازه‌گیری شده هسته نشان می‌دهد. لازم

جدول ۱: مقادیر اولیه پارامترهای مصالح.

ضریب نفوذپذیری (cm/s)	پوکی (%)	زاویه اتساع (درجه)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (Mpa)	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص اشباع (KN/m ³)	وزن مخصوص خشک (KN/m ³)	پارامترهای مصالح
1×10^{-7}	۳۰	۰	۰/۳۵	۱۰	۱۰	۲۹	۲۰	۱۷	هسته
1×10^{-3}	۳۰	۸	۰/۳۰	۵۴	-	۴۴	۲۲	۲۱	پوسته
1×10^{-5}	۳۵	۴	۰/۲۵	۲۸	-	۳۵	۲۱	۱۷/۵	فیلتر و مناطق انتقالی
1×10^{-9}	۲۵	۱۰	۰/۲۵	۲۵۰	۱۰۰	۲۵	۲۲/۵	۲۱	پی (شیل)
1×10^{-10}	۲۰	۱۲	۰/۲۵	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۸	۲۴	۲۳	پی (آهک)

جدول ۲: مقادیر نهایی پارامترهای مصالح (به دست آمده از تحلیل‌های برگشتی).

ضریب نفوذپذیری (cm/s)	پوکی (%)	زاویه اتساع (درجه)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (Mpa)	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص اشباع (KN/m ^۳)	وزن مخصوص خشک (KN/m ^۳)	مصالح
1×10^{-8}	۳۵	۰	۰/۴۵	۱۸	۲۵	۲۹	۲۰	۱۷	هسته
1×10^{-6}	۳۰	۵	۰/۲	۱۵ ۲۲*	-	۳۹	۲۳	۲۱	پوسته بالادست
1×10^{-6}	۳۰	۸	۰/۲	۳۰ ۴۰*	-	۴۴	۲۲	۲۱	پوسته پایین دست
1×10^{-3}	۳۵	۴	۰/۲۵	۱۶	-	۲۸	۲۱	۱۷/۵	فیلتر و مناطق انتقالی
1×10^{-9}	۲۵	۱۰	۰/۲۵	۲۵۰	۱۰۰	۲۵	۲۲/۵	۲۱	پی (شیل)
1×10^{-10}	۲۰	۱۲	۰/۲۵	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۸	۲۴	۲۳	پی (آهک)

* مدول الاستیسیته در نیمه پایین پوسته

مراجع

- 1 - Design Report of Tabarak Abad Dam Body, Mahab Ghods Consultant Engineering Co. (1991), 220 pages.
- 2 - Material Report of Tabarak Abad Dam, Mahab Ghods Consultant Engineering Co. (1991), 120 pages.
- 3 - Dunnycliff, J. and Green, Gordon, E. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, Publication Willey & Sons.
- 4 - CIGB-ICOLD, (1989). *Dam Monitoring General Consideration*, BULLETIN 60.
- 5 - Niroomand, H. (1996). *Karkkeh Dam Monitoring by instrumentation during Construction*, Advisor: Dr. Mirghasemi, M.Sc. Thesis of Soil Mechanics and Foundation at Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 6 - Fast Lagrangian Analysis of Continua, Manual, Itasca Code, Version 4.
- 7 - Naylor, D. J. (1997). "Collapse settlement-some developments." *Application of Computation Mechanics in Geotechnical Engineering*, Azevedo et al. Balkema, Rotterdam. ISBN 9054108649, PP. 37-53.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Monitoring
- 2 - Arching