

\*

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک خاک و مهندسی پی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران  
<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران  
<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت ۸۷/۲/۲۹ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۱/۳۹ ، تاریخ تصویب ۸۹/۴/۲۳)

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 ۱۳۸۲ 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 تحلیل های برگشتی انجام شده برای رفتارنگاری آن، شامل فشار آب حفره ای، فشار خاک و تغییر شکل ها ارائه شده است.

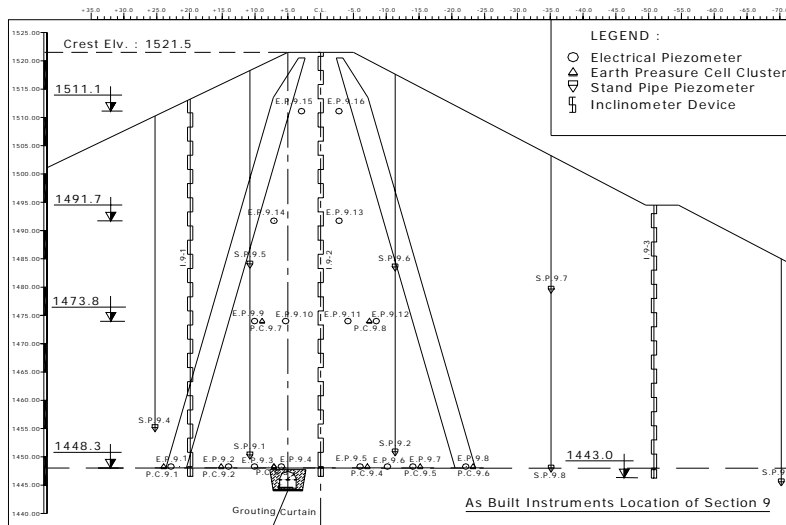
:

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

پایداری و ایمنی اجرای سدهای خاکی در طول ساخت، اولین آگیری 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 شکل ها، فشار آب حفره ای و تنش ها مجهز می شوند. سیستم ابزاربندی سد تبارک آباد شامل موارد زیر می باشد:

- تعداد ۱۱۵ عدد سلول فشار کل (PC) برای رفتارنگاری فشار کل خاک در بدنه سد
- تعداد ۴۴ عدد پیزومتر الکتریکی تار مرتعش (EP) برای رفتارنگاری فشار آب حفره ای 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- سنگریزه ای با هسته مرکزی رسی می باشد. طول و عرض تاج سد به ترتیب ۱۹۳/۵ و ۱۰ متر می باشد. شیب های 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]. پوسته های سد از مصالح سنگریزه ساخته شده است. فیلترها برای حفاظت هسته از فرسایش ناشی از آب تراوش شده، از طریق زهکشی آن عمل می کنند و همچنین یک ناحیه انتقالی بین هسته و پوسته با دانه بندی بین آنها ایجاد می کند تا تغییر دانه بندی از هسته به پوسته به طور ملایم انجام گیرد. مقادیر مصالح مورد استفاده در بخش های مختلف بدنه سد به شرح ذیل می باشد: پوسته سنگریزه ای 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 می باشد. 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.

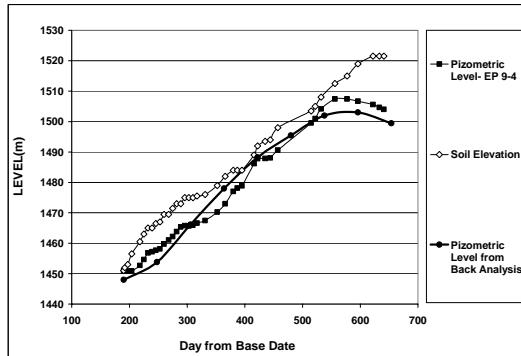
نرم افزار FLAC2D انجام شده است. طول دوره ساخت در حدود ۶۲۰ روز می‌باشد که از مقدار پیش‌بینی شده اولیه که حدود ۷۳۰ روز بوده، به مراتب کمتر می‌باشد. اطلاعات موجود شامل سه دسته قرائت ابزار می‌باشد: فشار آب حفره‌ای هسته در مدت ساخت، نشست‌های بدنه سد و فشار کل خاک. در ادامه، موارد فوق بررسی شده و با نتایج تحلیل‌های برگشتی انجام شده در هر مورد مقایسه می‌گردد.

در مدل‌سازی سد تبارک آباد از یک شبکه  $32 \times 100$  المانی با ابعاد کلی  $114 \times 590$  متر استفاده شده است. عرض مدل شده در حدود  $2/5$  برابر عرض بدنه سد می‌باشد 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 مدل‌سازی پی و  $24$  المان باقی مانده به ارتفاع  $74$  متر، برای مدل‌سازی ارتفاع بدنه به کار می‌روند. 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 می‌باشد،

- تعداد ۹ عدد انحراف‌سنج برای رفتارنگاری تغییر شکلهای جانبی افقی و اندازه‌گیری نشست‌های قائم بدنه سد در ترازهای مختلف  
- دو سری کشیدگی‌سنج برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های هسته در امتداد محور سد  
- تعداد ۷ عدد چاه مشاهده‌ای  
- تعداد ۳ عدد شتاب نگار  
- کلیه ابزار فوق در ۳ مقطع عرضی به نام‌های ۶-۶، ۹-۹ و ۱۲-۱۲ نصب شده‌اند. مقطع ۹-۹ که مقطع میانی و مرتفع‌ترین آنها می‌باشد، برای بررسی رفتار سد انتخاب شده است (شکل ۱).

رفتارنگاری<sup>۱</sup> به معنای بررسی عملکرد یک سازه در دوران ساخت و مرحله بهره‌برداری و تطبیق آن با پیش‌بینی‌های زمان طراحی می‌باشد. رفتارنگاری صحیح، مستلزم داشتن اطلاعات صحیح و سامان‌یافته می‌باشد که در نتیجه کارایی خوب ابزار به دست می‌آید. برای این منظور پس از جمع‌آوری کلیه اطلاعات و قرائت‌های موجود ابزار دقیق نصب شده در سد، اقدام به ساماندهی و غربال آنها می‌گردد. پس از اطمینان از داشتن اطلاعات دقیق ابزار، رفتار واقعی به دست‌آمده از آنها مشخص شده و در ادامه تحلیل‌های عددی موردنظر برای دستیابی به پارامترهای واقعی مصالح با استفاده از

۱۴۷۴، ۱۴۹۲ و ۱۵۱۱ متر ۱۶ پیزومتر الکتریکی نصب شده است. فشارهای آب حفره‌ای در این چهار تراز از ابتدا تا انتهای خاکریزی برداشت شده است. تراز ۱۴۴۸ متر، محل اتصال هسته به پی بوده و در نتیجه دارای بیشترین فشار آب حفره‌ای به علت بیشترین ارتفاع خاکریز سربار می باشد.



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 تحلیل‌های برگشتی به دست آمده، نشان می دهد. کاهش فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در انتهای خاکریزی، به علت پدیده قوس زدگی<sup>۱</sup> می باشد. بدین ترتیب که با وقوع پدیده قوس زدگی، هیچ تنش اضافی در اثر افزایش سربار به قسمت‌های پایینی هسته منتقل نمی گردد و در نتیجه فشار آب حفره‌ای نیز نه تنها افزایش نمی‌یابد، بلکه به علت پدیده تحکیم به مرور زمان فشار آب حفره‌ای زایل می‌شود و سیر نزولی نیز پیدا می کند. نکته قابل توجه دیگر که در شکل (۲) مشاهده می شود، اختلاف فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در پیزومتر الکتریکی موجود در محدوده میانی هسته با نتایج حاصل از تحلیل‌های برگشتی بدست آمده در همان نقطه در زمان انتهای خاکریزی می‌باشد، به طوری که پیزومتر مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. 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 می‌گردد. از آنجایی که میزان نفوذپذیری در مدل عددی ثابت داده شده است، در

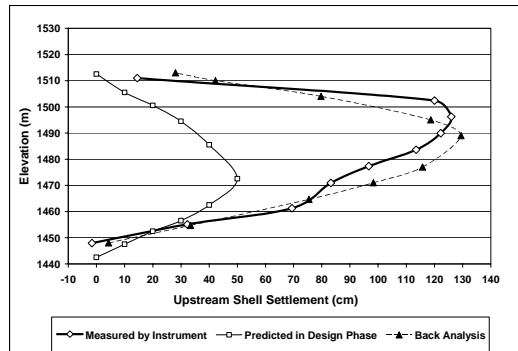
انتخاب شده است. پارامترهای مورد نیاز در این مدل عبارتند از: وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع و در تحلیل تحکیم ضریب نفوذپذیری، درجه اشباع و پوکی نیز به پارامترهای مورد نیاز قبلی اضافه می شوند. در ابتدای انجام تحلیل از پارامترهای اولیه ای که بر اساس آنها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

بدین ترتیب پس از ساخت هندسه مدل و وارد نمودن پارامترهای اولیه مصالح، تحلیل اولیه و پس از آن تحلیل‌های برگشتی انجام می‌شود. از آنجایی که هدف اصلی از انجام تحلیل‌های برگشتی، رسیدن به پارامترهای واقعی مصالح مصرفی در زمان ساخت سد می باشد، بدین منظور باید اصلی‌ترین 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 تحلیل‌های 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 تحلیل‌های برگشتی به صورت جدول (۲) خلاصه می شود.

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 بیناندازد. افزایش فشار آب حفره‌ای، کاهش تنش موثر را باعث می‌شود. از آنجاییکه مقاومت برشی خاک نیز که باعث پایداری سد در مقابل تغییر شکل‌های برشی می‌گردد، در رابطه مستقیم با تنش موثر می باشد، با کاهش مقاومت برشی، پایداری سد تهدید می‌گردد. در نتیجه افزایش فشار آب حفره ای می تواند عامل ناپایداری سد گردد.

در ادامه با شناخت اهمیت نقش فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در سد، مقادیر آن از طریق اطلاعات ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همان طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، 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 در مقطع (۹-۹) سه عدد نشست سنج به نام‌های SD 9-1 و SD 9-2 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.



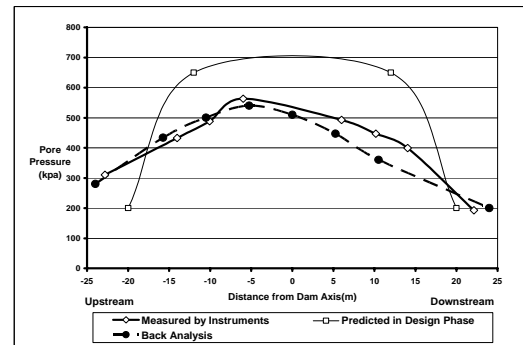
شکل ۴: تغییرات نشست در ترازهای مختلف پوسته بالادست مقطع (۹-۹) در پایان ساخت (تراز خاکریزی ۱۵۲۱).

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 آنگیری مخزن می‌باشد. آنگیری 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 متراکم‌تر شدن لایه‌های پایینی خاک در اجرا، 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 آنگیری، 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.

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 بیاندازد.

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

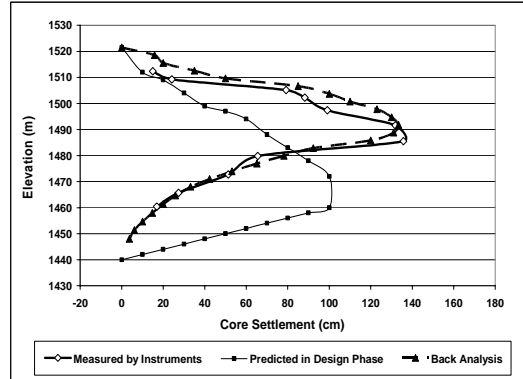
به ذکر است که مقدار حداکثر نشست اندازه‌گیری شده در هسته که در حدود ۱/۹ درصد ارتفاع سد می‌باشد در محدوده قابل قبول برای سدهای خاکی قرار دارد.

(۱) تمامی پیژومترهای 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) پیژومترهای نصب شده در فیلتر، روند متفاوتی از بقیه پیژومترها 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 پیژومترهای 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 رقوم 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

ضریب نفوذپذیری (cm/s)	پوکی (%)	زاویه اتساع (درجه)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (Mpa)	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص اشباع (KN/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص خشک (KN/m <sup>3</sup> )	پارامترهای مصالح
$1 \times 10^{-7}$	۳۰	۰	۰/۳۵	۱۰	۱۰	۲۹	۲۰	۱۷	هسته
$1 \times 10^{-6}$	۳۰	۸	۰/۳۰	۵۴	-	۴۴	۲۲	۲۱	پوسته
$1 \times 10^{-5}$	۳۵	۴	۰/۲۵	۲۸	-	۳۵	۲۱	۱۷/۵	فیلتر و مناطق انتقالی
$1 \times 10^{-9}$	۲۵	۱۰	۰/۲۵	۲۵۰	۱۰۰	۲۵	۲۲/۵	۲۱	پی (شیل)
$1 \times 10^{-10}$	۲۰	۱۲	۰/۳۵	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۸	۲۴	۲۳	پی (آهک)

. ( ) :

ضریب نفوذپذیری (cm/s)	پوکی (%)	زاویه اتساع (درجه)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (Mpa)	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص اشباع (KN/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص خشک (KN/m <sup>3</sup> )	مصالح
$1 \times 10^{-8}$	۳۵	۰	۰/۴۵	۱۸	۲۵	۲۹	۲۰	۱۷	هسته
$1 \times 10^{-7}$	۳۰	۵	۰/۲	۱۵ ۲۲*	-	۳۹	۲۳	۲۱	پوسته بالادست
$1 \times 10^{-7}$	۳۰	۸	۰/۲	۳۰ ۴۰*	-	۴۴	۲۲	۲۱	پوسته پایین دست
$1 \times 10^{-7}$	۳۵	۴	۰/۲۵	۱۶	-	۲۸	۲۱	۱۷/۵	فیلتر و مناطق انتقالی
$1 \times 10^{-6}$	۲۵	۱۰	۰/۲۵	۲۵۰	۱۰۰	۲۵	۲۲/۵	۲۱	پی (شیل)
$1 \times 10^{-7}$	۲۰	۱۲	۰/۲۵	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۸	۲۴	۲۳	پی (آهک)

\* مدول الاستیسیته در نیمه پایین پوسته

- 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 - Dunncliff, 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). *Karkheh 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.

1 - Monitoring

2 - Arching