

تحلیل برگشتی رفتار سد خاکی تبارک آباد ایران با استفاده از نتایج رفتارسنجی و مدل سازی عددی

سهیل قره*^۱ و رضا نوروززاده^۲

^۱ دانشیار بخش فنی و مهندسی دانشگاه پیام نور تهران

^۲ کارشناس ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه پیام نور تهران

(دریافت: ۹۶/۱۱/۷، پذیرش: ۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۹۷/۶/۳۱)

چکیده

یکی از مهم‌ترین مراحل بعد از مطالعات ژئوتکنیک، طراحی و احداث سد، بررسی رفتار سد در دوران بهره‌برداری می‌باشد که در این راستا رفتار سد در مراحل مختلف ساخت، آگیری و دوران بهره‌برداری توسط ابزارهای دقیق نصب شده، قابل ارزیابی می‌باشد. سد خاکی تبارک آباد با ارتفاع حداکثر ۵۰ متر از کف و ۷۴ متر از بستر سنگی دارای هسته‌ای رسی بوده و در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر قوچان از استان خراسان رضوی بر روی رودخانه تبارک آباد واقع شده است. از اهداف اصلی ساخت این سد تأمین و تنظیم آب مورد نیاز اراضی کشاورزی پایین دست و نیز قسمتی از نیاز آب شرب دراز مدت شهر قوچان است. در این تحقیق تحلیل برگشتی رفتار سد خاکی تبارک آباد با استفاده از نتایج رفتارسنجی و مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود GeoStudio انجام گرفته است که نتایج رفتارسنجی از اطلاعات ثبت شده توسط ابزارهای دقیق نشست‌سنج، انحراف‌سنج، نیروسنج و پیزومتر به دست آمده است. لازم به ذکر است مدل سازی عددی سد با در نظر گرفتن شرایط واقعی خاکریزی سد و به منظور تحلیل تغییرات نشست تحکیمی و اندازه‌گیری فشار آب منفذی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در راستای این تحقیق مدل رفتاری الاستو پلاستیک، مدلی مناسب به منظور ارزیابی رفتار سد تبارک آباد می‌باشد. همچنین نتایج مدل سازی‌های عددی تطبیق و هم‌خوانی مناسبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در همه ابزارهای اندازه‌گیری تنش و فشار آب منفذی نشان می‌دهد و اختلافات قابل قبول آن‌ها ناشی از اعمال فرضیات ساده شونده‌ای نظیر فرض کرنش صفحه‌ای و یا همسان‌گرد بودن پروفیل خاک می‌باشد. به علاوه مقادیر فشار آب منفذی در زمان انتهایی ساخت و اولین آگیری بیش از مقادیر مشاهده شده در سدهای دیگر می‌باشد که علت وقوع این پدیده سرعت نسبتاً زیاد اجرای خاکریز بدنه سد و نفوذپذیری اندک مصالح هسته می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سد تبارک آباد، مدل سازی عددی، ابزار دقیق، تحلیل برگشتی، GeoStudio.

۱- مقدمه

طراحی و ساخت آن‌ها، به رفتارسنجی عملکرد آن در دوران ساخت و بهره‌برداری نیز وابسته است. در دوران ساخت یک سد پارامترهای رفتاری خاک نظیر تنش کل، فشار منفذی و کرنش بر اثر عواملی نظیر حرکات پی، تحکیم مصالح هسته و تغییرات رطوبت مصالح در حال تغییر است به گونه‌ای که رفتارسنجی سد را ضروری می‌نماید. رفتارسنجی سدها اصولاً منجر به ارزیابی پارامترهای طراحی، کاهش ریسک خطرپذیری، کنترل کیفیت در حین ساخت و نیز بررسی دقیق پایداری در دوران بهره‌برداری کوتاه مدت و دراز مدت می‌شود (بیراوند و همکاران، ۱۳۹۲). با استفاده از نتایج رفتارسنجی و مطالعه روند تغییرات داده-های ابزار دقیق در بسیاری از موارد می‌توان پدیده‌هایی که منجر به فرسایش و یا تخریب سد می‌شوند را شناسایی نمود و یا این

سدها و مخازن ذخیره آب نقشی اساسی در توسعه مسائل اقتصادی و تأمین آب در کشور دارند. از طرفی با توجه به کاهش سالیانه سرانه آب و نیاز به تولید انرژی برقایی، مدیریت منابع آب از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. لازم به ذکر است احداث سد علاوه بر تأمین آب مورد نیاز کشاورزان، از وقوع سیلاب‌های ویران‌گر نیز جلوگیری می‌نماید و همچنین مانع بروز خشکسالی در فصول کم بارش می‌گردد. پس از وقوع تخریب سد تتون در سال ۱۹۷۶ که با کشته شدن چندین نفر و تحمیل صدها میلیون دلار خسارت همراه بود، پیشنهاد تجهیز سدها به ابزارهای دقیق مناسب مطرح گردید تا مواردی نظیر نشست آب و یا نشست سد، به موقع شناسایی و هشدار داده شود. ایمنی سدها علاوه بر

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۳۸۴۲۷۴۶

و مقادیر ناچیز نشت آب برای اعماق بیش از ۴۰ متر از زیر بدنه سد، عمق پرده آب‌بند سد ۴۰ متر پیشنهاد گردید.

محمدنژاد و علی‌زاده (۱۳۹۱)، به منظور مقایسه کارایی پتوی رسی، دیواره‌های سپری و پوشش‌های ژئوسنتتیک در کاهش اثرات نشت، با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio سد خاکی ناهمگن فرضی را مدل‌سازی نمودند که نتایج برای مقطع فرضی بیانگر اجرای دیواره سپری در موقعیت میانی پی همراه با پوشش کامل ژئوسنتتیک به عنوان بهترین روش کنترل نشت و گرادایان خروجی می‌باشد.

سد کرخه به کمک نرم‌افزار GeoStudio با فرض خاک نیمه اشباع توسط موهبت‌زاده و همکاران (۱۳۹۰)، مدل‌سازی عددی گردید که مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی در حدود دو برابر مقادیر واقعی ارزیابی گردید.

خزایی و همکاران (۱۳۹۲)، به مطالعه سه‌بعدی رفتار سد گیوی با استفاده از نرم‌افزار Seep 3D و با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه پرداختند که نتایج نشان می‌دهد به منظور دستیابی به مقادیر واقعی نشت، استفاده از مدل‌سازی‌های عددی سه‌بعدی اجتناب ناپذیر می‌باشد.

بقالی و مناف‌پور (۱۳۹۲)، به مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی در سد خاکی ستارخان پرداختند که از مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی با داده‌های به دست آمده از پیرومترهای نصب شده عملکرد قابل قبول این سد در مقابله با نشت آب در بازه زمانی مورد مطالعه، ملاحظه گردید. مطالعه نتایج مدل‌سازی عددی سد نهرین با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio به منظور بررسی میزان نشت نشان می‌دهد استفاده از تشک رسی، بیش‌ترین کارایی را در کاهش دبی نشت از پی و استفاده از سپر در مرکز، بیش‌ترین تأثیر را در کاهش نشت از بدنه سد، دارا می‌باشد (مقدس و رئیسی استبرق، ۱۳۹۱).

بلوری بزاز و مبینی‌زاده (۱۳۸۹)، نیز به بررسی رفتار سد نهرین به روش اجزاء محدود با مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و سخت‌شونده و مقایسه نتایج آن با مقادیر واقعی حاصل از ابزار دقیق پرداختند. نتایج بیانگر نشست ۲۰۰ میلی‌متری سد در تراز ارتفاع میانی سد بوده که با توجه به کمتر بودن رطوبت مصالح از حد اشباع، مقدار آن قابل قبول است. همچنین علاوه بر هم‌خوانی مناسب هر دو مدل رفتاری با داده‌های به دست آمده از ابزار دقیق، مدل سخت‌شونده دارای انطباق بیش‌تری می‌باشد.

۲- پروژه مورد مطالعه

سدها از نقطه نظر مصالح مورد استفاده در ساخت، به دو دسته سدهای بتنی و سدهای خاکی-سنگریزه‌ای طبقه‌بندی می‌گردند. در این میان سدهای خاکی-سنگریزه‌ای به جهت سهولت در اجرا، انطباق‌پذیری مناسب با شرایط توپوگرافی

که پیشاپیش از وقوع آن‌ها جلوگیری و یا نهایتاً در زمان کافی با انجام اقدامات لازم، خسارات احتمالی وارده را به حداقل ممکن رساند. در حال حاضر به کمک مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی، تحلیل و طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر تونل‌ها، سدهای خاکی، دیوارهای حائل و سازه‌های نگهبان و تطبیق نتایج آن با اطلاعات ثبت شده از ابزارهای دقیق، امکان‌پذیر می‌باشد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد تکنیک مذکور یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تخمین اولیه رفتار سدهای خاکی می‌باشد، به طوری که بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی، پیش‌بینی مناسبی از مقادیر جابجایی و تنش در سدهای خاکی را ارائه می‌نمایند.

شمس و حقایق (۱۳۹۴)، به منظور بررسی رفتار سد خاکی چیتگر از نقاط ثابت نشست سنج، پیرومترهای الکتریکی، سلول‌های تنش کل در کف سد و پیرومترهای لوله قائم در پنجه پائین سد استفاده نمودند و با کمک نرم‌افزار GeoStudio ابتدا رفتار سد را پیش‌بینی و سپس با استفاده از نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی، مدل رفتاری مناسبی از سد را ارائه نمودند.

در تحقیق دیگری اسدیان و همکاران (۱۳۹۴)، نتایج داده‌های ابزار دقیق در سد دوستی را با مدل رفتاری ارائه شده از نرم‌افزار GeoStudio مقایسه نمودند که نتایج بیانگر تطابق قابل قبول و منطقی می‌باشد.

جائمی و پرویشی (۱۳۹۳)، در تحقیقات خود به بررسی تراوش از پی و بدنه سد خاکی شهرچای با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و اطلاعات حاصل از ابزار دقیق پرداختند. اگر چه نتایج اولیه مدل‌سازی عددی با داده‌های ابزار دقیق به دلیل تغییر مشخصات مصالح در محل سد و آزمایشگاه ژئوتکنیک، اختلاف زیادی داشتند اما با استفاده از آنالیز برگشتی مدلی با حداکثر انطباق با نتایج ابزار دقیق ارائه گردید.

مطالعات یشربی و باقریه (۱۳۹۱)، بر روی تراوش و فشار آب حفره‌ای سد گلستان در حین ساخت و مراحل مختلف آبیگری با استفاده از نرم‌افزار CA2 و همچنین داده‌های ثبت شده توسط ابزارهای دقیق نصب شده در سد، بیانگر عدم وجود هر گونه پدیده پیش‌بینی نشده‌ای از نظر تراوش در این سد می‌باشد.

محمودی و همکاران (۱۳۹۲)، از مقایسه نتایج مدل‌سازی‌های عددی و رفتارسنجی، علت اصلی نشت در سد تنگاب فیروزآباد را ناشی از اجرای نامناسب پرده آب‌بند و عدم توجه به تراکم و دانه‌بندی پروفیل خاک، ساختار زمین‌شناسی و توزیع درزه‌ها، شکاف‌ها و کارستی‌ها دانستند.

در تحقیق دیگری بیرانوند و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی وضعیت نشت آب در ساختگاه سد سردشت با استفاده از نرم‌افزار UDEC پرداختند که با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق

اهداف اصلی اجرای سد تبارک‌آباد عبارتند از:

- تأمین و تنظیم آب مورد نیاز ۱۶۵۰ هکتار از اراضی پایاب.
- تأمین قسمتی از نیاز آب شرب دراز مدت شهر قوچان به میزان ۱۴ میلیون متر مکعب در سال در صورتی که تأمین آب شرب دراز مدت شهر قوچان از منابع آب‌های زیرزمینی و آهکی امکان‌پذیر نباشد.

- کنترل سیلاب‌های منطقه‌ای و جلوگیری از آسیب‌دیدگی زمین‌های کشاورزی پایین‌دست.

- تغذیه آبخوان‌های زیرزمینی منطقه

- گسترش فضاها و امکانات تفریحی و گردشگری

۲-۲- زمین‌شناسی ساختگاه سد

حوضه آبریز سد تبارک‌آباد بخشی از حوضه رسوبی کپه‌داغ محسوب می‌شود که روند چینه‌شناسی و تکتونیک آن از کپه‌داغ تبعیت می‌کند. سنگ‌شناسی منطقه عمدتاً ماسه‌سنگ و کنگلومرا با تداخل شیل، لایه‌های گچی، آهک، مارن و رسوبات آبرفتی می‌باشد. همچنین مورفولوژی منطقه شامل کوهستان و دشت آبرفتی با دره‌هایی با شیب تند می‌باشد که شیب دیواره در تکیه-گاه چپ ۶۵ تا ۷۰ درجه و در تکیه‌گاه راست ۴۵ تا ۵۵ درجه می‌باشد. مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی در محدوده سد، ناودیس و گسل تبارک‌آباد می‌باشد و محور ناودیس تبارک‌آباد با روند شمال غرب به جنوب شرق در شمال شرقی مخزن قرار دارد. لازم به ذکر است گسل تبارک‌آباد با طول ۲۵ کیلومتر از حدود ۱۸۰۰ متری شرق سد عبور نموده و محور ناودیس تبارک‌آباد را قطع می‌کند. این گسل فعال بوده و نشانه‌هایی از جابجایی در نهشته‌های کواترنری منطقه مشاهده می‌شود. وجود این گسل و سیستم درزه‌های مربوطه تأثیر نامطلوبی بر روی کیفیت توده سنگی و نفوذپذیری در پی سد و مخزن دارد. از سوی دیگر با توجه به شرایط توپوگرافی و سنگ‌شناسی، دامنه‌های شمال و شمال شرقی از پتانسیل ناپایداری بیشتری نسبت به دامنه‌های غربی برخوردار می‌باشد.

۲-۳- داده‌های ژئوتکنیکی پروژه

سد تبارک‌آباد با ارتفاع حداکثر ۵۰ متر از کف و ۷۴ متر از بستر سنگی به طول تاج ۱۹۸ متر و عرض ۱۰ متر می‌باشد که دارای مساحت حوضه آبریز ۵۶۰ کیلومتر مربع و حجم مخزن ۶۰ میلیون متر مکعب است. مقطع عرضی تیپیک سد در شکل (۲) نشان داده شده است.

منطقه، استفاده از مصالح طبیعی موجود و تطابق آن‌ها با مصالح بستر و همچنین هزینه ساخت کم‌تر، همواره مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته‌اند. در همین راستا عملیات ساخت سد خاکی تبارک‌آباد به منظور تأمین آب کشاورزی قسمتی از اراضی پایین دست سد و همچنین تأمین بخشی از آب شرب شهر قوچان از بهمن ماه سال ۱۳۸۱ آغاز و در مهر ماه سال ۱۳۸۳ به اتمام و بهره‌برداری رسید.

۱-۲- موقعیت پروژه

سد خاکی تبارک‌آباد سدی خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم می‌باشد که در شمال شرقی کشور ایران و در ۲۵ کیلومتری شهر قوچان بر روی رودخانه تبارک‌آباد، احداث گردیده است. رودخانه تبارک‌آباد متشکل از دو شاخه که در بالادست روستای تبارک‌آباد به یکدیگر می‌پیوندند، می‌باشد که در جهت شمال شرقی به جنوب غربی جریان یافته و در نهایت حوالی شهر قوچان در بالادست دشت قوچان- شیروان به رودخانه اترک می‌پیوندد. راه دسترسی به محل سد از روستاهای پری‌آباد، بادخو، زوخالو و یوسف‌خان می‌گذرد.

نمایی کلی از بدنه، سرریز، راه‌های دسترسی و محدوده دریاچه سد تبارک‌آباد در شکل (۱) نشان داده شده است.

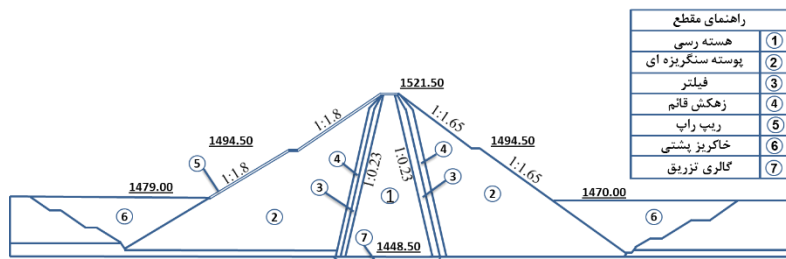


(الف)



(ب)

شکل ۱- نمایی کلی از سد تبارک‌آباد: الف) بدنه سد و سرریز، ب) محدوده مورد مطالعه به همراه دریاچه سد



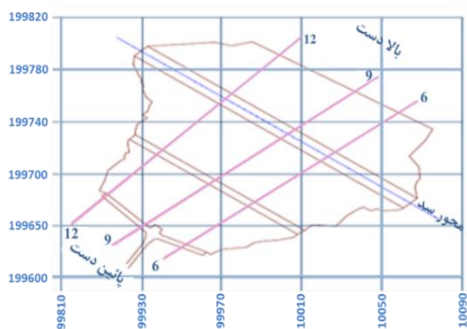
شکل ۲- مقطع عرضی تیبیک سد تبارک آباد

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده در ساخت سد با استفاده از مطالعات ژئوتکنیک

پارامتر بدنه سد	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)	وزن مخصوص اشباع (kN/m ³)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب نفوذپذیری (cm/s)
هسته	۱۷	۲۰	۱۰	۲۹	۰/۳۵	۱۰	۱×۱۰ ^{-۲}
پوسته	۲۱	۲۲	-	۴۴	۰/۳۰	۵۴	۱×۱۰ ^{-۲}
فیلتر	۱۷/۵	۲۱	-	۲۸	۰/۲۵	۲۸	۱×۱۰ ^{-۲}
زهکش	۱۷/۵	۲۱	-	۲۸	۰/۲۵	۲۸	۱×۱۰ ^{-۵}
پی	۲۱	۲۲/۵	۱۰۰	۲۵	۰/۲۵	۲۵۰	۱×۱۰ ^{-۹}

۳-۱- مقاطع ابزارگذاری و تجهیزیات نصب شده

از مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار در انجام تحلیل، مدل-سازی های عددی و ارزیابی رفتار سد، می توان به مقادیر تنش کل، تنش مؤثر، فشار آب حفره ای و میزان نشست سد اشاره نمود که اندازه گیری این کمیت ها بایستی از زمان ساخت تا دوران بهره برداری انجام پذیرد. بدین منظور طراحی جانمایی ابزارهای دقیق سد تبارک آباد توسط متخصصین ژئوتکنیک در دستور کار قرار گرفت. ابزارهای دقیق نصب شده در بدنه، پی و جناحین سد تبارک آباد به منظور پایش و رفتارسنجی آن در جدول (۲) و پلان موقعیت ابزارگذاری در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- پلان موقعیت مقاطع ابزارگذاری سد تبارک آباد

مطالعات ژئوتکنیک متشکل از آزمایش های آزمایشگاهی و برجا جهت تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده در ساخت سد نظیر ضریب نفوذپذیری، حدود اتربرگ، نسبت تخلخل، درجه اشباع، وزن مخصوص، رطوبت طبیعی، تراکم، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نسبت پواسون براساس استاندارد ASTM انجام گرفته است که خلاصه نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است (ASTM, 2000).

۳- پایش رفتار سد

به منظور کنترل ایمنی و پایداری سدها و همچنین جلوگیری از بروز خطرات احتمالی نظیر نشست، نشت آب، شکست سدها و ... دستورالعمل هایی از طرف نهادهایی نظیر USBR ارائه شده است که تیم بهره برداری سدها با توجه به نوع و جنس مصالح، پروفیل خاک بستر سد، قدمت، وضعیت زمین شناسی، شرایط جمعیتی، مناطق استراتژیکی پایین دست سد و ... بایستی پیش بینی ها و برنامه ریزی های لازم در دوران بهره برداری از سد را اعمال نمایند (USBR, 1983). از جمله این برنامه ها می توان به پایش رفتار سد از طریق قرائت منظم ابزارهای دقیق نصب شده و سپس رفتارسنجی سد بر اساس اطلاعات ثبت شده توسط این ابزارها اشاره نمود. با توجه به محدودیت های زمان ساخت، آگیری اولیه و گذشت زمان در دوران بهره برداری، شبیه سازی رفتار واقعی سد و تحلیل برگشتی و مقایسه آن با رفتار پیش بینی شده زمان طراحی، این امکان فراهم می شود تا در صورت بروز هرگونه اختلاف نامتعارف و غیر ایمن، راهکارهای مناسب در دوران بهره برداری اتخاذ گردد.

جدول ۲- ابزارهای دقیق نصب شده در بدنه، پی و جناحین

نام ابزار	تعداد نصب شده
تنش سنج الکتریکی	۱۱۵
پیزومتر الکتریکی بدنه	۴۳
پیزومتر الکتریکی سنگی	۸
پیزومتر کاساگرانده	۲۴
چاه مشاهده‌ای	۱۶
فشار سنج مکانیکی آب	۴۹
نشست سنج مغناطیسی	۹
انحراف سنج	۹
کشیدگی سنج	۲۵
دبی سنج مثلثی	۳
ایستگاه هواشناسی	۱
شتاب‌سنج سه مؤلفه‌ای	۳
سیستم قرائت مرکزی	۱
ترازسنج مکانیکی آب مخزن	۱
شبکه میکروژئودزی	۱

آن، امکان تعیین تنش‌های کل و تنش‌های مؤثر و فشار آب حفره‌ای را فراهم می‌نماید و از طریق آن می‌توان تغییر شکل‌های حاصل در خاک را ارزیابی نمود. در این نرم‌افزار پس از ساخت هندسه مدل، مطابق با شرایط واقعی ساخت سد، خاکریزی در چندین مرحله و لایه‌های مختلف خاک مدل‌سازی عددی می‌گردد. سپس خصوصیات و مشخصات لایه‌های خاک و نواحی مختلف مدل تعریف و به مدل اختصاص می‌یابد. علاوه بر امکان تعریف شرایط فشار آب منفذی و مدل رفتاری مناسب برای پروفیل خاک در مدل‌سازی عددی، می‌توان به تعیین مقادیر نشست در هر نقطه از مدل عددی با این ماژول نیز اشاره نمود. لازم به ذکر است با توجه به این ویژگی بر اساس مختصات ابزارهای دقیق در بدنه، پی و جناحین سد می‌توان مختصات مربوطه را در مدل عددی انتخاب تا نتایج مدل‌سازی‌های عددی پس از برداشت با نتایج به دست آمده از قرائت ابزارهای دقیق مقایسه گردد (Geostudio، ۲۰۰۷).

۴-۲- فرضیات مدل

با توجه به گذشت بیش از ده سال از زمان بهره‌برداری و آگیری سد، مقادیر فشار آب منفذی پیزومترهای نصب شده در داخل هسته و همچنین وجود آب که توسط دستگاه عمق‌سنج سطح آب بررسی می‌گردد، برای مصالح هسته شرایط اشباع و برای مصالح سایر بخش‌ها شرایط زهکشی شده در نظر گرفته شد. به منظور اعمال شرایط مرزی مناسب در مدل‌سازی‌های عددی، شکل هندسی مدل، مرزبندی و مش‌بندی بر اساس دستورالعمل کمیته ملی سدهای بزرگ برای تحلیل سدهای خاکی انتخاب گردیده است (شکل ۴).

پس از ساخت هندسه مدل عددی، با توجه به طبیعت غیر خطی مصالح پروفیل خاک، بایستی مدل رفتاری مناسبی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Chang و Duncan، ۱۹۷۰). در راستای این تحقیق برای مصالح به کار رفته در ساخت هسته سد تبارک آباد، از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب و برای مصالح سایر بخش‌ها از مدل الاستیک خطی استفاده گردید. لازم به ذکر است مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب یکی از شناخته شده‌ترین مدل‌های رفتاری برای مدل‌سازی مصالح پروفیل خاک می‌باشد.

با توجه به زمان ۶۲۰ روزه ساخت سد تبارک‌آباد در مدل‌سازی‌های عددی از ۱۸ لایه خاکریز با در نظر گرفتن زمان مذکور و پارامترهای اولیه طراحی برای مصالح بخش‌های مختلف استفاده شده است. هدف از در نظر گرفتن مراحل خاکریزی، نزدیک‌تر شدن شرایط تحلیل به شرایط واقعی ساخت، در نظر گرفتن پدیده تحکیم و تغییرات فشار آب منفذی می‌باشد. شایان توجه است در مدل‌سازی‌های عددی مطابق با وضعیت دوران

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در این سد سه مقطع ابزارگذاری شده ۶-۶، ۹-۹ و ۱۲-۱۲ وجود دارد که مقطع ۹-۹ بزرگ‌ترین مقطع سد و دارای بیش‌ترین عمق پی آبرفتی می‌باشد که در این تحقیق به عنوان بحرانی‌ترین مقطع انتخاب شده است. با توجه به داده‌های ثبت شده ابزارهای دقیق این مقطع که با قرائت و دوره‌های بسیار منظم صورت گرفته است، تحلیل عددی بازگشتی انجام گردیده است. لازم به ذکر است بر این اساس تغییر مکان‌های واقعی در دوران بهره‌برداری شبیه‌سازی و در نهایت نتایج با مقادیر پیش‌بینی شده دوران طراحی، تدقیق گردید.

۴-۳- مدل‌سازی عددی

۴-۱- نرم افزار مورد استفاده

به منظور ارزیابی رفتار سد در دوران بهره‌برداری، از روش تحلیل برگشتی با استفاده از نتایج رفتارسنجی و مدل‌سازی عددی استفاده گردید. رفتارسنجی با استفاده از داده‌های ثبت شده ابزارهای دقیق نصب شده در بدنه، پی و جناحین سد و مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود GeoStudio انجام گردید.

نرم‌افزار المان محدود GeoStudio قادر به شبیه‌سازی مسائل به صورت دوبعدی با تقارن محوری می‌باشد و از طریق آن می‌توان آنالیزهایی از قبیل تنش- کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیب، آنالیز دینامیکی و همچنین شرایط افت سریع را بررسی نمود. در این نرم‌افزار با مدل‌سازی لایه‌های خاک مصالح سد و بستر زیرین

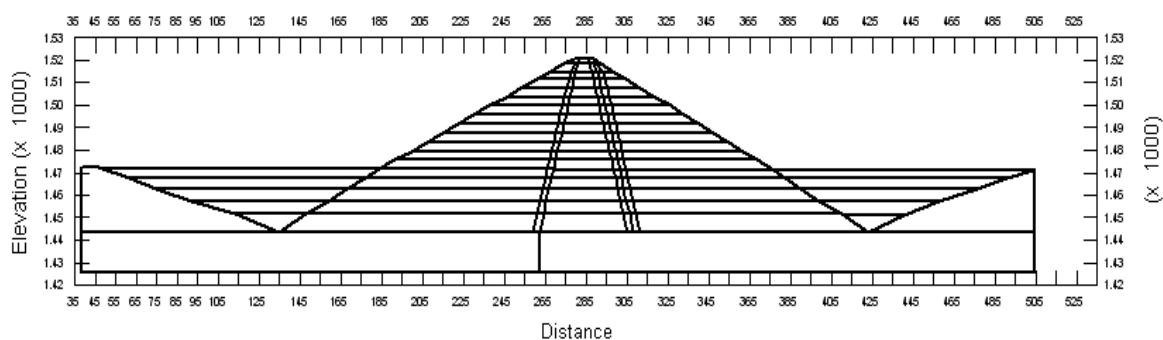
زمانی که رفتاری تقریباً مشابه رفتار واقعی سد (نتایج به دست آمده از ابزارهای دقیق) در مدل عددی ایجاد گردد، بایستی در پارامترهای اولیه ورودی به مدل عددی تغییراتی اعمال گردد. بدین منظور با استفاده از روش آنالیز حساسیت در مراحل مختلف و با انجام مدل‌سازی‌های عددی متعدد تمام پارامترهای اصلی تأثیرگذار به طور مجزا با روند منطقی تغییر داده شده تا در نهایت با مقادیر واقعی تدقیق شوند. لازم به ذکر است با توجه به پیچیده بودن این فرآیند و تأثیر تمامی پارامترها بر روی یکدیگر، با تغییر اندک در هر پارامتر، سایر پارامترها نیز تغییر می‌نمایند، به همین دلیل در هر مرتبه انجام تحلیل، تنها یک پارامتر به طور منطقی تغییر داده می‌شود تا تأثیر آن بر دیگر پارامترها مشاهده گردد و بر این اساس لزوم تغییر پارامتر بعدی و حدود آن مشخص گردد. در این تحقیق پارامترهای قابل تغییر به دو دسته پارامترهای مؤثر در فشار آب حفره‌ای و پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل بدنه سد تقسیم گردیده است (محمودی و همکاران، ۱۳۹۲).

پس از انجام تحلیل‌های مذکور و استفاده از روش آنالیز حساسیت و تحلیل برگشتی، مقادیر مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در تعیین تنش، تغییر شکل، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، نشست، ضریب نفوذپذیری تدقیق گردید، که نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است.

بهره‌برداری در زمان مدل‌سازی، تراز سطح آب مخزن ۱۴۹۴/۸ در نظر گرفته شد. به علاوه با توجه به این که با گذشت زمان و تأثیرات آب مخزن، پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومت مصالح تغییر می‌نمایند، به منظور تدقیق داده‌ها از تحلیل برگشتی استفاده گردیده است.

۳-۴- تحلیل برگشتی

از جمله کاربردهای ابزار دقیق در پروژه‌های ژئوتکنیکی، استفاده از نتایج آن در تحلیل برگشتی به منظور تدقیق پارامترهای ژئوتکنیک و مقاومت مصالح می‌باشد. با توجه به این که روش‌های مدل‌سازی عددی و نرم‌افزارهای توسعه یافته، امکان پیش‌بینی نسبتاً دقیق مقادیر تنش‌ها و تغییر شکل‌های یک سد خاکی در زمان کم را فراهم می‌آورند، معمولاً در روند انجام تحلیل برگشتی از یک نرم‌افزار عددی بهره گرفته می‌شود. مقایسه نتایج این گونه تحلیل‌ها با واقعیت که همان نتایج ابزار دقیق است، علاوه بر اعتبار بخشی مدل‌سازی‌های عددی، مبنای انجام تحلیل برگشتی برای تدقیق پارامترهای ژئوتکنیک و مقاومت مصالح می‌باشد (کریمی، ۱۳۸۵). پس از ساخت هندسه مدل عددی و اعمال پارامترهای اولیه مصالح، مدل‌سازی‌های عددی اولیه انجام و سپس تحلیل‌های برگشتی انجام می‌گردد. به دلیل این که هدف اصلی انجام تحلیل‌های برگشتی رسیدن به پارامترهای واقعی ژئوتکنیک و مقاومت مصالح در زمان ساخت سد می‌باشد، لذا تا



شکل ۴- هندسه مدل سد تبارک آباد در مدل‌سازی عددی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار المان محدود GeoStudio

جدول ۳- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده در ساخت سد پس از انجام آنالیز حساسیت و تحلیل برگشتی

پارامتر بدنه سد	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)	وزن مخصوص اشباع (kN/m ³)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب نفوذپذیری (cm/s)
هسته	۱۷	۱۷/۵	۲۲	۲۲	۰/۳	۱۰	۱/۱۵×۱۰ ^{-۹}
پوسته	۲۱	۲۱	-	۴۴	۰/۳۰	۳۰	۱×۱۰ ^{-۵}
فیلتر	۱۷/۵	۱۷/۵	-	۲۸	۰/۳۳۴	۱۶	۱×۱۰ ^{-۶}
زهکش	۱۷/۵	۱۷/۵	-	۲۸	۰/۳۵	۱۶	۱×۱۰ ^{-۵}
پی	۲۱	۲۱	۱۰۰	۲۵	۰/۳	۳۰۰	۱×۱۰ ^{-۸}

۵- تغییرات رفتاری در بدنه سد

می‌باشد که تا تاریخ این تحقیق آب به این تراز نرسیده و سد سرریز نکرده است.

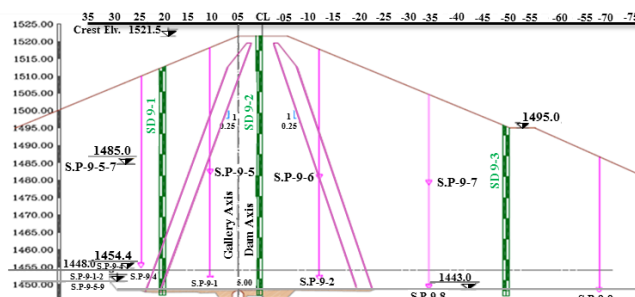
از مهم‌ترین ویژگی‌های مورد نیاز در بررسی‌ها و تحلیل‌ها، اندازه‌گیری مقادیر تغییر شکل و نحوه توزیع آن‌ها، تنش‌های کل، تنش‌های مؤثر و فشار آب منفذی می‌باشد که اندازه‌گیری این کمیت‌ها بایستی از زمان ساخت آغاز گردد. به علاوه بررسی پایداری و تغییر شکل سدهای خاکی هنگام اولین آبیگری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، زیرا نواحی پوسته در سدهای خاکی غالباً به صورت خشک کوبیده می‌شوند و در زمان اولین آبیگری، حضور آب موجب کاهش مقاومت بین سنگدانه‌ها و نهایتاً لغزش و جابجایی دانه‌ها در پوسته بالادست خواهد شد. در این تحقیق آبیگری سد تبارک‌آباد در ۵ مرحله مطابق زمان‌بندی آورده شده در جدول (۴)، در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در جدول نیز آورده شده است حداکثر تراز آب مخزن سد مربوط به پایان آبیگری مرحله دوم می‌باشد و نتایج داده‌ها در این تراز به عنوان بالاترین تراز آبیگری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است تراز نرمال آب مخزن سد ۱۵۱۳/۵

۵-۱- تغییرات نشست بدنه سد

یکی از پدیده‌های اصلی مورد انتظار در سدهای خاکی نشست می‌باشد. نشست پدیده‌ای مستمر بوده که هم‌زمان با ساخت سد در لایه‌های خاکریزی شده، آغاز می‌گردد، لذا سنجش و ارزیابی نشست بدنه سد هم‌زمان با مراحل اجرا ضروری است. میزان نشست علاوه بر تبعیت از پارامترهای مختلفی نظیر جنس مصالح و نحوه اجرا، تابع زمان نیز می‌باشد. با توجه به وقوع عمده مقادیر نشست در زمان اجرا و آبیگری، در دوران بهره‌برداری نیز مقادیر نشست با سرعت بسیار کمی ادامه دارد. میزان نشست در بدنه سد با استفاده از سه گمانه نشست‌سنج- انحراف‌سنج که به ترتیب در پوسته بالادست، هسته بر روی محور سد و پوسته پایین دست سد در بحرانی‌ترین مقطع (مقطع ۹-۹) واقع شده‌اند، بررسی گردید. لازم به ذکر است موقعیت ابزار نشست‌سنج- انحراف‌سنج بدنه سد در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۴- تراز آب در مراحل مختلف آبیگری

مرحله آبیگری	تاریخ شروع آبیگری	تاریخ پایان آبیگری	مدت زمان از ابتدای ساخت (سال)	تراز آب مخزن (متر)
اول	۸۳/۷/۱	۸۴/۴/۴	۲/۴۱	۱۴۹۸/۷۷
دوم	۸۴/۴/۵	۸۵/۲/۴	۳/۲۴۳	۱۵۰۲/۶
سوم	۸۵/۲/۵	۸۸/۳/۲۶	۷/۱۷	۱۴۹۴/۸۳
چهارم	۸۵/۳/۲۷	۹۱/۱۲/۱۲	۱۱/۱۲	۱۴۹۸/۶۳
پنجم	۹۱/۱۲/۱۳	۹۳/۵/۱۳	۱۲/۶۲	۱۴۹۴/۸

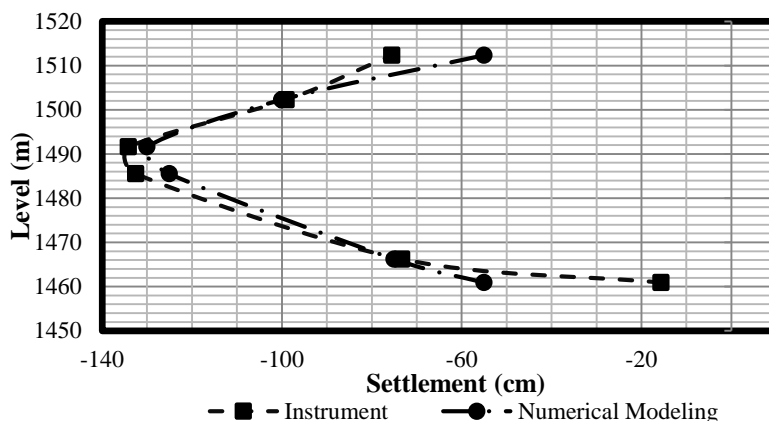


شکل ۵- موقعیت ابزار نشست‌سنج- انحراف‌سنج در بدنه سد

۵-۱-۱- نشست هسته در زمان ساخت

متناسب با آن نشست تحکیمی در هسته رخ می‌دهد. میزان نشست در هسته سد با استفاده از ابزار نشست‌سنج اندازه‌گیری و قرائت‌های حاصل از این نشست‌سنج پس از ثبت در ترازهای مختلف، با داده‌های حاصل از آنالیز برگشتی مقایسه گردیده است که نتایج حاصل در شکل (۶) آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد بیش‌ترین مقادیر نشست به دست آمده از ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی در تراز ۱۴۹۱/۶ به ترتیب ۱۳۴/۱ سانتی‌متر و ۱۳۰ سانتی‌متر می‌باشد که بیانگر تطابق مناسب بین نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی می‌باشد.

در زمان ساخت، نشست در هسته متأثر از عواملی نظیر وزن خاکریز، سرعت خاکریزی، بافت خاک، پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک، درصد رطوبت زمان اجرا، روش تراکم و هندسه هسته می‌باشد. در زمان ساخت بدنه سد به علت بارگذاری ناشی از وزن لایه‌های فوقانی، در داخل هسته افزایش فشار آب منفذی به وجود می‌آید و این اضافه فشار آب منفذی در زمان ساخت و پس از آن در دوران بهره‌برداری به تدریج مستهلک شده و

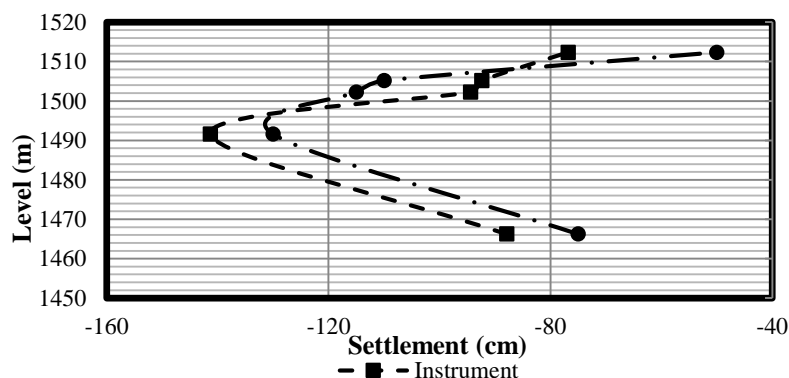


شکل ۶- مقادیر نشست به دست آمده از ابزار دقیق و مدل سازی عددی برای هسته در انتهای ساخت سد

تحلیل قرار گرفت. در شکل (۷) مقادیر به دست آمده برای تحلیل نشست در مراحل مختلف آبیگری با مقادیر حاصل از ابزار دقیق در هسته ارائه شده است. با توجه به داده های ابزار دقیق در مرکز هسته سد و مدل سازی های عددی، ملاحظه می گردد مقادیر بدست آمده از مدل سازی عددی و داده های ابزار دقیق از تطابق مناسبی برخوردار بوده و از یک روند تبعیت می نمایند.

۵-۱-۲- نشست هسته در مرحله آبیگری سد

بررسی پایداری و تغییر شکل سدهای خاکی در حین اولین آبیگری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. همان گونه که در جدول (۳) آورده شده است، آبیگری سد در ۵ مرحله با زمان های مشخص انجام گردیده است. برای هر مرحله در حداکثر تراز آبی که سد تبارک آباد تجربه کرده، میزان نشست مورد بررسی و

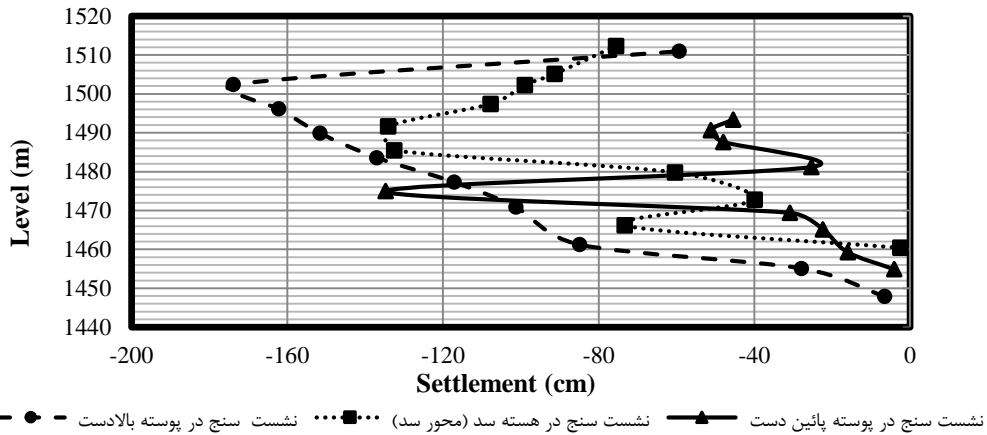


شکل ۷- مقایسه تغییرات نشست در ترازهای ارتفاعی مختلف در مرکز هسته سد و در پایان مرحله دوم آبیگری با استفاده از نتایج ابزار دقیق و مدل سازی عددی

است حداکثر نشست ثبت شده در انتهای ساخت برای پوسته بالادست در مقطع ۹-۹ بیش از ۲ درصد ارتفاع ۷۳/۲ متری این مقطع در مقایسه با مقدار حداکثر طراحی (۱/۷۵ درصد ارتفاع سد در یک سوم میانی هسته سد) ناشی از آبیگری سریع سد در حین و بعد از دوران ساخت و همچنین وقوع پدیده نشست فروریزی در اثر اشباع شدن مصالح پوسته سنگریزه ای بالادست در این دوران می باشد. به علاوه به علت تراکم بیش تر لایه های پایینی پوسته در مقایسه با لایه های بالاتر به دلیل وزن لایه های بالایی، در اولین آبیگری بیش ترین حرکات ناشی از رمبندگی در ترازهای بالاتر رخ می دهد.

۵-۱-۳- نشست پوسته سد

همان گونه که ذکر گردید در بحرانی ترین مقطع یعنی مقطع ۹-۹ سه گمانه نشست سنج - انحراف سنج در پوسته بالادست، در هسته و بر روی محور سد و در نهایت در پوسته پایین دست سد نصب شده است. در شکل (۸) پروفیل نشست قائم ثبت شده در هریک از گمانه ها در پایان آخرین مرحله آبیگری نشان داده شده است. حداکثر نشست رخ داده در این مقطع در پوسته بالادست ۱۷۴ سانتی متر، در هسته و روی محور سد ۱۳۴/۱ سانتی متر و در پوسته پایین دست ۱۳۴/۷ سانتی متر می باشد. لازم به ذکر



شکل ۸- تغییرات نشست قائم در راستای نشست سنج‌های مقطع ۹-۹ در پایان آخرین مرحله آبیگری

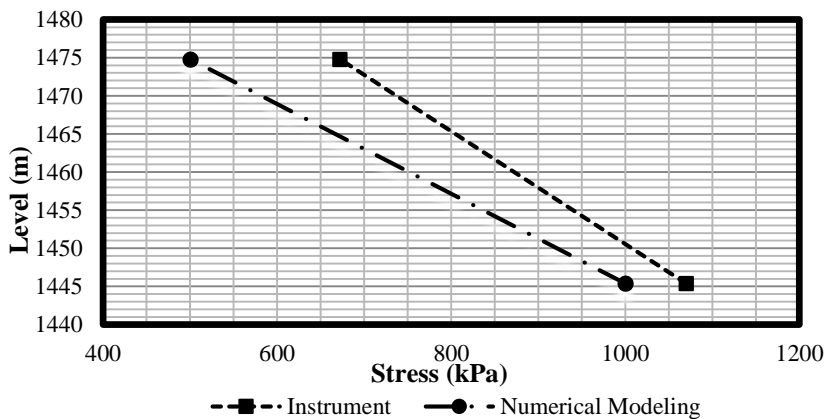
۵-۲- تغییرات تنش بدنه سد

وضعیت تنش در بدنه سدهای خاکی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی جهت ارزیابی ایمنی سد می‌باشد. این پارامتر در مرحله ساخت سد در جهت کنترل خاکریزی و انتخاب سرعت بهینه و در دوران بهره‌برداری جهت بررسی و انتقال تنش‌های حاصل از خاکریز به پی سد تأثیرگذار است. در سدهای غیر همگن تحلیل وضعیت تنش‌ها با توجه به تغییر شکل‌پذیری متفاوت هسته و پوسته از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این نوع سدها به دلیل نشست کم‌تر پوسته در مقایسه با هسته، بخش‌هایی از هسته به صورت معلق به پوسته آویزان شده و تنش حاصل از لایه‌های خاکریز به طور کامل به بخش پایین‌تر و پی منتقل نخواهد شد. نتیجه چنین فرآیندی بروز پدیده کمانش یا قوس‌زدگی می‌باشد که طی آن تنش‌ها در بخش‌های داخلی هسته کاهش یافته و شرایط برای تغییر شکل‌های شکننده فراهم می‌گردد. در صورتی که فشار آب حفره‌ای بر تنش‌های حاکم غلبه نماید احتمال وقوع ترک و گسیختگی هیدرولیکی و به تبع آن

آبستگی هسته وجود خواهد داشت. از این رو بررسی شرایط تنش در بدنه سدهای خاکی امری ضروری است.

۵-۲-۱- تنش در دوران ساخت

تنش سنج‌های الکتریکی سد تبارک‌آباد به صورت کلاسترهای ۵ تایی به همراه یک پیزومتر الکتریکی جهت اندازه‌گیری فشار آب منفذی در هسته و فیلتر نصب شده‌اند. در این سد ۱۱۵ عدد تنش‌سنج الکتریکی در ۲۳ کلاستر در سد نصب شده است که از این تعداد ۳۵ عدد در مقطع ۶-۶، ۴۰ عدد در بحرانی‌ترین مقطع یعنی مقطع ۹-۹ و ۴۰ عدد در مقطع ۱۲-۱۲ نصب شده‌اند. در شکل (۹)، داده‌های حاصل از ابزار دقیق و مدل‌سازی‌های عددی در بحرانی‌ترین مقطع (مقطع ۹-۹) در انتهای مرحله ساخت ارائه شده است. از مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی و ابزار دقیق ملاحظه می‌گردد در تمامی ترازهای ارتفاعی، مقادیر تنش به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی در جهت اطمینان می‌باشد.



شکل ۹- مقایسه تغییرات تنش ترازهای ارتفاعی مختلف در انتهای مرحله ساخت سد با استفاده از نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی

۵-۲-۲- تنش در دوران بهره‌برداری

در دوران بهره‌برداری سد نیز در دو تراز ۱۴۷۴ و ۱۴۴۵/۳۸ نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی با داده‌های ابزار دقیق مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در شکل (۱۰) تغییرات ثبت شده آورده شده است، که بیش‌ترین مقادیر تنش قائم در محدوده ترازهای پائینی می‌باشد. مقایسه نتایج مقادیر تنش حاصل از مدل‌سازی‌های عددی و داده‌های ابزار دقیق نشان می‌دهد در تمامی ترازها مدل‌سازی‌های عددی در مقایسه با نتایج ابزار دقیق، مقادیر محافظه‌کارانه‌تری می‌باشد.

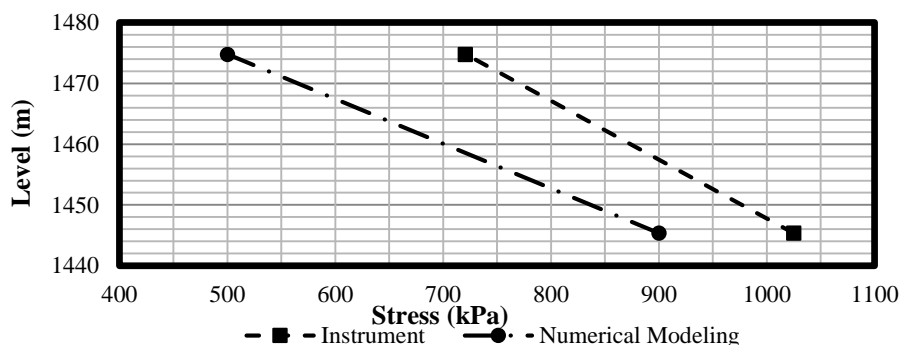
۵-۳- تغییرات فشار آب منفذی

با افزایش مقادیر فشار آب منفذی، تنش مؤثر میان ذرات خاک کاهش می‌یابد که این عامل موجب کاهش مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش احتمال بروز گسیختگی هیدرولیکی می‌گردد. بر این اساس کنترل این پارامتر، در تمام مراحل اجرایی و بهره‌برداری به منظور حفظ ایمنی سد از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق بررسی مقادیر فشار آب منفذی به دست آمده از ابزارهای دقیق نشان می‌دهد با پیشرفت عملیات خاکریزی طی دوران ساخت، فشار آب منفذی با افزایش همراه

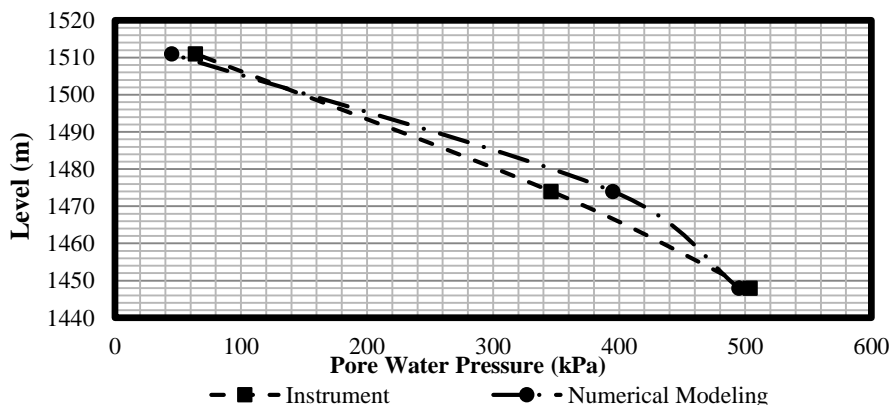
می‌باشد، زیرا روند تغییرات مورد انتظار فشار آب منفذی به نحوی است که در مراحل ابتدایی ساخت سد که فشار منفذی اضافی در هسته سد تخلیه نشده است، ضریب فشار آب منفذی بالا بوده و به تدریج با زایل شدن فشار آب منفذی اضافی و حاکم شدن رژیم پایدار از مقدار آن کاسته شود. با این حال به دلیل این که در ترازهای پائینی فشارهای سربار ناشی از افزایش ضخامت خاکریزی بالا و تراکم لایه‌های زیرین بیش‌تر است و همچنین نفوذپذیری مصالح در این بخش بسیار پائین می‌باشد، استهلاک فشار آب منفذی با سرعت کمتری همراه خواهد بود و به همین دلیل کاهش فشار آب منفذی در ابزارهای نصب شده در ترازهای بالاتر بیش‌تر از ترازهای پائین‌تر خواهد بود.

۵-۳-۱- فشار آب منفذی در دوران ساخت

در شکل (۱۱) مقادیر فشار آب منفذی ثبت شده توسط ابزار دقیق از پایان ساخت و همچنین بهره‌برداری سد تا تاریخ ۸۳/۷/۱۳، به همراه نتایج حاصل از تحلیل برگشتی سد ارائه شده است. قابل ذکر است این داده‌ها مربوط به ترازهای مختلف از مرکز هسته در مقطع بحرانی سد (مقطع ۹-۹) می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل برگشتی و ابزار دقیق بیانگر انطباق خوب این داده‌ها با یکدیگر می‌باشد.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات تنش ترازهای ارتفاعی مختلف در زمان حداکثر آبیگری سد با استفاده از نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر فشار آب منفذی در ترازهای ارتفاعی مختلف در انتهای ساخت سد با استفاده از نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی

عددی

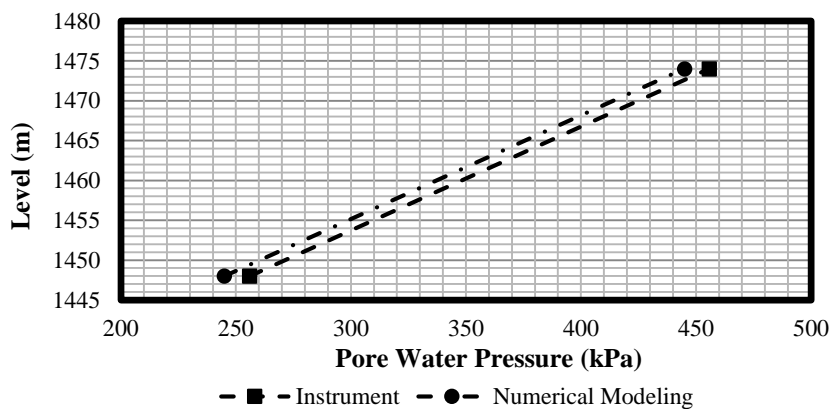
۵-۳-۲- فشار آب منفذی در دوران بهره‌برداری

با گذشت زمان و اتمام عملیات ساخت و در نهایت آغاز دوران بهره‌برداری و آبیگری مخزن، مقادیر فشار آب منفذی روند کاهشی می‌یابد و همچنین با افزایش تراز سطح آب مخزن و تثبیت سطح آب مخزن، فشار آب منفذی ثابت می‌شود. این موضوع در جدول (۵) قابل ملاحظه می‌باشد. در شکل (۱۲)

مقادیر فشار آب منفذی در مرحله دوم آبیگری (تراز حداکثر) به کمک ابزارهای دقیق در نظر گرفته شده و تحلیل برگشتی در هسته سد بررسی شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در این مرحله نتایج حاصل از آنالیز برگشتی به داده‌های ابزار دقیق بسیار نزدیک می‌باشد و دارای تطابق و هم‌خوانی مناسبی می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر فشار آب منفذی در هسته سد در ترازهای مختلف بهره‌برداری برحسب کیلو پاسکال

تراز بهره‌برداری		نتایج	تراز آبیگری	مرحله آبیگری
۱۴۷۴	۱۴۴۸			
۴۹۵	۲۴۵	مدل‌سازی عددی	۱۴۹۸/۸	اول
۴۵۷/۷	۲۲۲/۴۴	ابزار دقیق		
۴۴۵	۲۴۵	مدل‌سازی عددی	۱۵۰۲/۶	دوم
۴۵۵/۵۷	۲۵۶	ابزار دقیق		
۴۴۵	۲۴۵	مدل‌سازی عددی	۱۴۹۴/۸	سوم
۳۸۶/۹	۲۳۹/۶۷	ابزار دقیق		
۴۴۵	۲۴۵	مدل‌سازی عددی	۱۴۹۸/۶	چهارم
۴۰۱/۳۱	۲۲۸/۱	ابزار دقیق		
۴۴۵	۱۹۵	مدل‌سازی عددی	۱۴۹۴/۸	پنجم
۴۰۲	۲۲۶/۹۳	ابزار دقیق		



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات فشار آب منفذی در ترازهای ارتفاعی مختلف در هسته سد با استفاده از نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی

۶- نتایج

ذکر است حداکثر نشست اندازه‌گیری شده در هسته ۱/۸ درصد ارتفاع سد می‌باشد و این مقدار در محدوده نشست طبیعی و قابل قبول سد قرار دارد و تطابق رفتاری مناسبی بین مدل‌سازی‌های عددی و روند واقعی حاصل از ابزار دقیق وجود دارد.

۳- اختلاف حداکثر مقدار نشست طراحی سد تبارک‌آباد با مقادیر نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزارهای دقیق نصب شده برای پوسته بالادست ناشی از آبیگری سریع سد در حین و بعد از

۱- در راستای این تحقیق مدل رفتاری موهر- کولمب، مدل مناسبی برای تخمین رفتار مصالح هسته سد می‌باشد.

۲- نتایج به دست آمده از نشست‌سنج در ابزارهای نصب شده در بحرانی‌ترین مقطع یعنی مقطع ۹-۹ تطابق قابل قبول و منطقی با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد، به گونه‌ای که بیش‌ترین مقدار نشست در مدل‌سازی‌های عددی در هسته ۱۳۰ سانتی‌متر و در ابزار دقیق ۱۳۴/۱ سانتی‌متر می‌باشد. لازم به

ساختمانگاه- مطالعه موردی سد گیوی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، ۱۳۹۲.

جامعی، ا. پرویشی، ع.، "بررسی تراوش از پی و بدنه سد خاکی شهرچای با استفاده از روش اجزاء محدود و اطلاعات ابزار دقیق"، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، ارومیه، ۱۳۹۳.

شمس ش، حقایق ع، "تحلیل عددی تغییرات تنش و فشار آب حفره‌ای در سد خاکی با رویه نفوذناپذیر و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق سد خاکی چیتگر"، سومین کنفرانس بین-المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران، ۱۳۹۴.

کریمی ف، "مطالعه رفتار سدهای خاکی با استفاده از نتایج ابزار دقیق و تحلیل عددی برگشتی- مطالعه موردی سد تهم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۵.

محمدنژاد ب، علیزاده ز، "ارزیابی روش‌های کاهش اثرات نشست و زیرشویی در سدهای خاکی"، سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کرج، ایران، ۱۳۹۱. محمودی، ا. صدقی اصل م، پرویزی م، مهرکی ا، "بررسی نشست در سد خاکی- مطالعه موردی سد تنگاب فیروزآباد"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، اردبیل، ۱۳۹۲.

موهبت‌زاده آ، مشعل م، هدایت ن، "تحلیل نشست در سدهای خاکی با هسته رسی با استفاده از نرم‌افزار Seep/W - مطالعه موردی سد کرخه در خوزستان"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰.

مقدس م، رئیسی استبرق ع، "ارزیابی روش‌های مختلف کاهش نشست از پی و بدنه سدهای خاکی"، دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله و ژئوتکنیک، بابلسر، ۱۳۹۱.

یثربی ش، باقریه ع، "رفتارنگاری فشار آب حفره‌ای سد گلستان حین عملیات ساختمانی و اولین آبیگری"، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، ۱۳۸۱.

American Society for Testing & Materials. "ASTM Book of Standards, 4 (08 & 09), Construction Materials: Soils & Rocks", Philadelphia, PA, 2000.

Duncan J M, Chang, C M, "Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division", ASCE, 1970, 96 (SM5), 1629-1653.

GEO-SLOPE International Ltd., "Geostudio, Stress and Deformation Modeling with Sigma/W", Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5, 2007.

USBR, "Safety Evaluation of Existing Dams (SEED), A Manual for the Safety Evaluation of Embankment and Concrete Dams", U.S. Department of the Interior, Denver, Colorado, 1983.

دوران ساخت و همچنین وقوع پدیده نشست فروریزی در اثر اشباع شدن مصالح پوسته بالادست می‌باشد.

۴- بررسی مقادیر فشار آب منفذی به دست آمده از ابزارهای دقیق نشان می‌دهد با پیشرفت عملیات خاکریزی طی دوران ساخت و در نتیجه تراکم لایه‌های خاکریزی، خاک کاملاً اشباع شده و لذا تطابق مناسبی بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده وجود دارد، به گونه‌ای که پس از اتمام عملیات ساخت سد در ترازهای پایینی مقدار فشار آب منفذی به دست آمده از مدل-سازی‌های عددی و نتایج ابزار دقیق به ترتیب ۴۹۵ kPa و ۵۰۴ kPa می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر فشار آب منفذی در زمان انتهای ساخت و اولین آبیگری بیش از مقادیر مشاهده شده در سدهای دیگر می‌باشد که علت وقوع این پدیده سرعت نسبتاً زیاد اجرای خاکریز بدنه سد و نفوذپذیری اندک مصالح هسته می‌باشد.

۵- نتایج مدل‌سازی‌های عددی تطبیق و هم‌خوانی مناسبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در تمام ابزارهای اندازه‌گیری تنش و فشار آب منفذی نشان می‌دهد و اختلافات قابل قبول آن‌ها ناشی از اعمال فرضیات ساده شونده‌ای نظیر فرض کرنش صفحه‌ای و با همسان‌گرد بودن پروفیل خاک می‌باشد.

۶- در راستای این تحقیق، نرم‌افزار المان محدود GeoStudio به عنوان ابزاری مناسب برای طراحی اولیه و تخمین مناسبی از الگوی رفتار سد خاکی تبارک‌آباد می‌باشد.

۷- مراجع

اسدیان ح، رحیمی ا، غفوری م، بشیر گنبدی م، "رفتارنگاری سد دوستی تا انتهای ساخت به کمک داده‌های ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی"، مجله علوم زمین، ۱۳۹۴، ۲۵ (۹۸)، ۲۱۳-۲۲۲.

بقالی س، مناف‌پور م، "ارزیابی جریان تراوشی از پی و بدنه سد خاکی ستارخان با استفاده از نتایج تحلیل عددی و ابزار دقیق"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، ۱۳۹۲.

بلوری بزاز ج، مبینی‌زاد م، "ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق"، مجله پژوهش آب ایران، ۱۳۸۹، ۴ (۶)، ۱-۱۰.

بیرانوند پ، بخشنده امینه، ح، رحیمی دیزجی م، بهادری م، "تحلیل عددی نشست از پی سنگی سد سردشت به وسیله نرم‌افزار UDEC"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، اردبیل، ۱۳۹۲.

خزایی ج، شرفی ح، ستاری د، هدایتی ج، "آنالیز سه بعدی نشست از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی

EXTENDED ABSTRACT

Back Analysis of Tabarakabad Embankment Dam Using Monitoring and Numerical Model Results

Soheil Ghareh*, Reza Nowroozzadeh

Department of Civil Engineering, Payame Noor University, P.O. Box 19395-4697, Tehran, Iran.

Received: 27 January 2018; **Accepted:** 22 September 2018

Keywords:

Tabarakabad Dam, Numerical modeling, Instrumentation, Back Analysis, Behavior.

1. Introduction

Dams have an essential role in development of economic and water supply in Iran. In addition, due to annual decline in rainfall and hydropower production requirement, water resources management is one of the most important issues. It is worth noting the construction of dam, not only supply the required water of farmers, but also prevents the occurrence of floods devastating and incidence of drought in low rainfall season. After the destruction of the Teton Dam in 1976, which lead to deaths of several people and losses of several hundred million dollars, it was proposed to be placed instruments in body of dams to identify and warn behavior such as seepage or settlement. By studying the results of instrumentations and evaluate the changes of reading data during the time, it's possible to identify the phenomena that lead to erosion or destruction of dam and prevent from happening of these events or minimize the potential damages (Beiranvand et al., 2013). Currently, numerical modeling and geotechnical software are used to analyzed and designing geotechnical structures which their results can be compared with information are recorded by instrumentations. Recent studies indicate this technique is one of the most suitable methods to estimate soil dams behaviors, as lots of numerical models provide an acceptable estimation of displacement and stress values in embankment dams.

2. Study Area

Tabarakabad embankment dam which has been constructed on Tabarakabad river is located in Khorasan Razavi province, in 25km northeast of Quchan city. The main purposes of construction of Tabarakabad dam are to supply and adjustment of needed water for 1650 hectares of agricultural lands in downstream, providing part of the long-term drinking required water of Quchan city will be about 14 million cubic meters per year in the event that is not possible to provide long-term drinking water through groundwater and limestone resources. Other aims of construction Tabarakabad dam which can be mentioned are: Controlling regional flooding and prevention of damage to agricultural lands, feeding groundwater aquifers in this area, development of spaces and recreational facilities and tourism (Farivar et al., 2010).

3. Methodology

3.1. Monitoring of dam

In order to control the safety and stability of dams, and also prevent of possible hazards such as settlement, water leakage, dam failure, etc., dams are monitoring through regular readings of instruments which are placed in body dam and then study of dam behavior are done based on the data recorded by these tools. In Tabarakabad dam tools were placed in 3 sections and section 9-9 which is the largest section of the dam with the highest depth of alluvium, selected as the most critical section.

* Corresponding Author

E-mail addresses: ghareh_soheil@pnu.ac.ir (Soheil Ghareh), nowroozzade@yahoo.com (Reza Nowroozzadeh).

3.2. Numerical Modeling

To evaluate dam behavior during operation time, back analysis was done by using of obtain results from numerical model and monitoring recorded data. In order to simulate the real conditions of dam construction in GeoStudio, after designing the geometry of model, backfilling was modeled in several stages and different layers of soil. Then characteristics of soil layers were defined in different regions of dam and assigned to the model. Considering passing over 10 years from the operation and impoundment of dam, pore water pressure values from installed piezometers inside the core and water existence which is examined by the depth-measuring device, saturated conditions for core materials and drained condition for other regions of dam were selected.

In this numerical model, for core materials, Elasto- Plastic behavioral model and for materials of other regions of dam, Mohr-Coulomb Linear- Elastic behavioral model in drained conditions with 18 soil layers were considered. The purpose of considering the backfilling steps in numerical model is to simulate the actual conditions of construction, consolidation and changes in pore pressure water. It is be mentioned in numerical model, accordance to operation time state, water level was considered 1494.8 meters. In addition, geotechnical characteristics and strength of material are impressed by reservoir water during the time, so back analysis was used for data scrutiny.

3.3. Back Analysis

One of the applications of instrumentations is the use of its results to determine the geotechnical parameters and strength of materials by use of back analysis. Considering that it is possible to predict the values of stress and strain for dam in the short time using by numerical models, it is common to use of software for numerical model in back analysis. After analyzing and using the sensitivity analysis and back analysis, the values of the most effective parameters the stress, deformation were determine Cohesion, Internal friction angle, Specific gravity, Elasticity modulus, Poisson ratio, Permeability coefficient, which the results are presented at table 1.

Table 1. Physical and mechanical parameters of materials used in dam construction after back analysis

Parameters Body of dam	Dry Unit Weight (kN/m ³)	Saturated Unit Weigh (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Poison ratio	Elasticity module	Permeability coefficient (cm/s)
Core	17	17.5	22	22	0.3	10	$1.15 * 10^{-9}$
Crust	21	21	-	44	0.3	30	$1 * 10^{-5}$
Filter	17.5	17.5	-	28	0.334	16	$1 * 10^{-6}$
Drain	17.5	17.5	-	28	0.35	16	$1 * 10^{-5}$
Foundation	21	21	100	25	0.30	300	$1 * 10^{-8}$

4. Results and discussion

Most important and effective characteristics in analysis are strain values and its distribution, total stress, effective stress and pore pressure water values, which should to measure these values from the start time of dam construction. In Fig. 1. to Fig. 3. the results of effective parameters were obtained from instrumentations and numerical model are given.

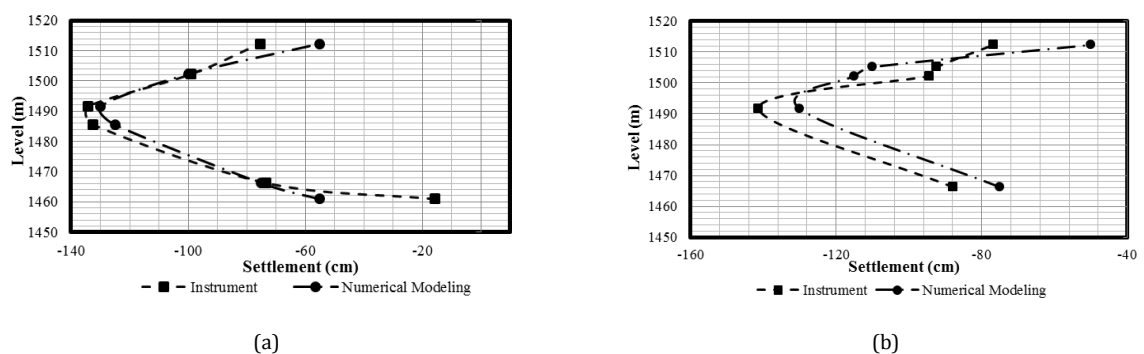


Fig. 1. a) Settlement of Core at the end of construction time, b) Settlement of Core during the operation time

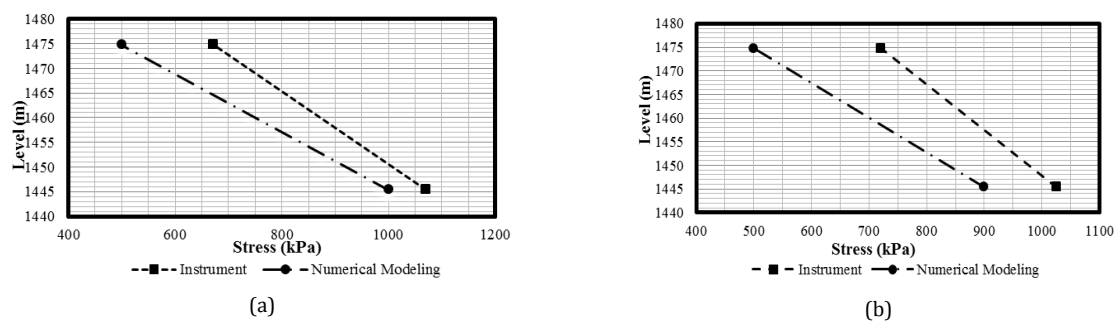


Fig. 2. a) Stress in Core at the end of construction time, b) Stress in Core during the operation time

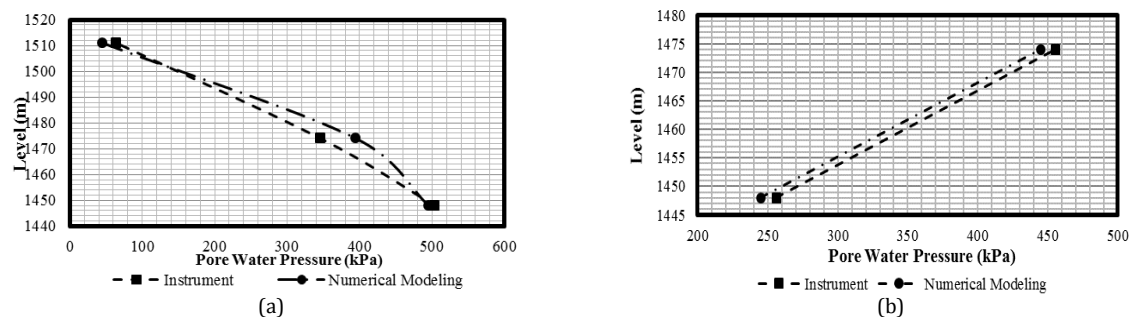


Fig. 3. a) Pore water pressure in core at the end of construction time, b) Pore water pressure in core during the operation time

5. Conclusions

1. In this study, mohr-coloumb behavior model was evaluated as a suitable model to estimate behavior of core materials of dam.

2. The results obtained from instrumentations which were installed in the most critical section, Section 9-9, show acceptable accordance with the results of numerical modeling, so the maximum settlement from numerical model and instrumentations are respectively 130 cm and 134.1 cm. It is worth noting the maximum settlement measurement in the core is 1.8% of dam height which is in the limits of natural and acceptable settlement of dam and there is suitable accordance between numerical model and real data were reading from instrumentations.

3. Difference between the maximum settlement value of numerical model and measured values of instrumentations installed in upstream crust is result of rapid impoundment of dam during and after the construction time and also collapse settlement phenomenon due to saturation of upstream crustal materials.

4. Investigation of pore water pressure values obtained from the instrumentations shows concurrent of the progress of embankment and as the result of soil compaction during the time, the soil was completely saturated and therefore there is appropriate accordance between measured data and calculated values. After completion of dam construction operations, the pore water pressure obtained from numerical modeling and instrumentations data at the lower level are respectively 495 kPa and 504 kPa. It should be noted that the pore water pressure values at the end of construction time and first impoundment in this dam are higher than the observed values in other dams. The reason of this phenomenon is the high relatively speed of dam body construction and low permeability of core material.

5. The results of numerical model show proper conformity with measured values from all measured instruments of stress and pore water pressure. There are some acceptable differences which due to application of simple assumptions such as plan strain assumption or isotropic of soil profile.

6. In this research, GeoStudio was evaluated as a suitable software for initial design and proper estimation of the Tabarakabad dam model.

6. References

- Beiranvand P, Bakhshandeh Amineh H, Rahimi Dizaji M, Bahadori M, "Numerical Analysis of Seepage from Bedrock of Sardasht dam Using by UDEC Software", 1st Iranian Conf. on Geotech. Engrg., Ardabil, Iran, 2013.
- Farivar A, Mirghasemi A.A, MahinRoosta R, "Evaluation of Tabarakabad During Construction using by Back Analysis", Journal of Civil and Surveying Engineering, 2010, 44 (3), N (3), 407-412.