Archive of SID

بررسی رفتار سد خاکی چهچهه با استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی

سهیل قره[۱،*]، فاطمه اخلاقی[۲] و رضا نوروززاده[۳]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۲۳

واژگان کلیدی:
سد چهچهه،
مدلسازی عددی،
رفتارسنجی،
ابزار دقیق،
تحلیل برگشتی.

چکیده

بررسی رفتار سدهای خاکی در حین دوران ساخت، پایان ساخت و همچنین اولین دوره آبگیری به عنوان یکی از بحرانی‌ترین زمان‌ها در طول عمر سد، به دلیل تنش‌های ایجاد شده و فشار آب منفذی در هسته با توجه به وضعیت تراز آب در این دوره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور در این تحقیق رفتار سد خاکی چهچهه با استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی به کمک نرم‌افزار المان محدود GeoStudio مورد مطالعه قرار گرفته است. این سد با ارتفاع حداکثر ۴۷ متر از بستر طبیعی رودخانه از نوع سدهای خاکی با هسته رسی می‌باشد که در حوزه آبریز شهرستان کلات و ۹۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مشهد بر روی رودخانه چهچهه احداث شده است. در راستای این تحقیق به منظور تدقیق پارامترهای در نظر گرفته شده در پروسه طراحی سد و ساخت مدل عددی منطبق بر شرایط واقعی احداث سد، با استفاده از نتایج رفتارسنجی مدل‌سازی‌های عددی و تحلیل برگشتی انجام و امکان پیش‌بینی رفتار سد مهیا گردید. از مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزارهای دقیق نصب شده، هم‌خوانی مناسبی ملاحظه می‌گردد به طوری که میزان نشست به دست آمده در هسته رسی با استفاده از نتایج رفتارسنجی ۶۵ سانتی‌متر و مدل عددی ۶۶ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. همچنین حداکثر تنش قرائت شده در تراز ۵۳۰ متری در هسته رسی برابر ۸۲۰ کیلو پاسکال است که بر اساس مدل عددی در همین تراز ۹۵۰ کیلو پاسکال به دست آمده است و در تمامی موارد مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی در جهت اطمینان می‌باشد.

۱-مقدمه

پایداری و ایمنی سدها علاوه بر نحوه طراحی و ساخت، ارتباط زیادی به رفتارسنجی عملکرد آن در دوران ساخت و بهره‌برداری دارد. تحقیقات نشان می‌دهد سدهای خاکی بیش از سدهای بتنی در معرض تخریب بوده و بیش از ۵۰ درصد خرابی‌ها یا آسیب دیدگی‌های آن‌ها در حین ساخت و یا اولین دوره آبگیری رخ داده است. در دوران ساخت یک سد پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح سد و بستر آن نظیر تنش کل، تنش مؤثر، فشار آب 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 اجتناب ناپذیر می‌نماید. رفتارسنجی سدها اصولاً منجر به ارزیابی پارامترهای طراحی، کاهش ریسک، کنترل کیفیت در حین ساخت و نیز بررسی دقیق

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghareh_soheil@pnu.ac.ir
۱. دانشیار بخش فنی و مهندسی دانشگاه پیام نور تهران
۲. کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، مدرس دانشگاه پیام نور مشهد
۳. مدیر بهره‌برداری و نگهداری از تاسیسات آبی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

www.SID.ir

Archive of SID

پایداری در دوران بهره‌برداری کوتاه مدت و دراز مدت می-شود [۱]. پس از وقوع تخریب سد تتون در سال ۱۹۷۶ که با خسارت‌های جانی و مالی فراوانی همراه بود، ایده تجهیز سدها به ابزارهای دقیق جهت شناسایی و هشدار مواردی نظیر نشت آب، نشست سد و غیره مطرح گردید و در حال حاضر، رفتارنگاری در سدهای خاکی به عنوان بخشی از برنامه جامع کنترل پایداری و تشخیص هرگونه مشکل احتمالی، مورد استفاده می‌باشد. کاربرد دیگر ابزار دقیق در پروژه‌های ژئوتکنیکی استفاده از نتایج آن در تحلیل برگشتی و تدقیق پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومت مصالح است و در این راستا تحلیل برگشتی با استفاده از مدل-سازی‌های عددی و نتایج رفتارسنجی که مبتنی بر رفتار واقعی سد می‌باشد، روش قابل اعتمادی در ارزیابی و پیش-بینی مقادیر تنش‌ها و تغییر شکل‌های سد است [۲]. پیشینه مطالعات تحلیلی انجام شده بر روی سدها به تحلیل‌های عددی پنمن و همکارانش در سال ۱۹۶۰ میلادی بر روی سد خاکی اسکاموند باز می‌گردد. اندکی بعد از احداث سد اسکاموند، پنمن و چارلز ، تحلیل عددی سد للین بریان را با استفاده از اجزاء محدود بررسی نمودند. کلاف و وودوارد نیز در سال ۱۹۶۷ میلادی در تحلیل یک سد از روش اجزاء محدود استفاده کردند. همچنین سد خاکی اروویل توسط نوبری و دانکن در سال ۱۹۷۲ میلادی و در زمان اولین آبگیری با مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت [۳].

در سال‌های اخیر نیز تحقیقات زیادی در رابطه با پیش‌بینی رفتار سدهای خاکی با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام شده است. سیتاساری و تیم تحقیقاتی‌اش سد خاکی سرمو در اندونزی را با استفاده از قرائت‌های ابزار دقیق و محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار Plaxis 2D مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد مقادیر ابزار دقیق و مدل عددی از روند یکسانی پیروی کرده اما محاسبات عددی نتایج محافظه کارانه‌تری را به دست می‌دهد [۴]. سد سیاه بیشه در استان مازندران توسط عابدینی و همکارانش به منظور تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی با استفاده از آنالیز برگشتی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری سد نشان داد نتایج اولیه مدل عددی بسیار بیشتر از مقادیر واقعی بود. همچنین بر اساس نتایج آنالیز برگشتی مشاهده شد تعداد لایه‌های مورد استفاده در مدل‌سازی سد تأثیر قابل توجهی بر حداکثر مقدار تغییر شکل حاصله دارد [۵].

جوانمردی و همکاران سد خاکی تهم با هسته رسی را با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج مدل عددی و ابزار دقیق حاکی از تشابه مقادیر ثبت شده برای فشار آب منفذی با استفاده از ابزار دقیق و نتایج محاسبه شده توسط مدل عددی است اما در مورد تنش، محاسبات عددی مقادیر بالاتری را در اکثر نقاط سد نشان می‌دهد [۶]. مرادی و حائری فشار آب منفذی را در بدنه سد خاکی دامغان در مراحل ساخت بررسی نمودند. با مدل‌سازی این سد خاکی با نرم‌افزار Plaxis و آنالیز لایه به لایه از مراحل ساخت سد و استفاده از مدل رفتار موهر-کولمب، آنها نتایج مثبتی در رابطه با توانایی نرم افزار برای شبیه سازی فشار آب منفذی به دست آوردند [۷]. رشیدی و همکاران، فشار آب منفذی و نشست سد خاکی گاوشان را با استفاده از داده‌های ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار (FLAC 2D) بررسی نمودند و نتیجه گرفتند عملکرد سد از نظر فشار آب منفذی و پایداری مناسب است [۸].

شمس و حقایق نیز بررسی رفتار سد خاکی چیتگر را بررسی نمودند. آنها در مطالعه خود از نقاط ثابت نشست سنج، پیزومترهای الکتریکی، سلول‌های تنش کل در کف سد و پیزومترهای لوله قائم در پنجه پائین سد استفاده نمودند و با کمک نرم‌افزار GeoStudio پس از پیش‌بینی رفتار سد با استفاده از نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی، مدل رفتاری مناسبی برای سد ارائه نمودند [۹]. در تحقیق دیگری اسدیان و همکاران، 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 بود [۱۰]. جاثمی و پرویشی 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، اگرچه نتایج اولیه مدل‌سازی عددی با داده‌های ابزار دقیق به دلیل تغییر مشخصات مصالح در محل سد و مطالعات ژئوتکنیک، اختلاف زیادی داشتند اما با استفاده از آنالیز برگشتی مدلی با حداکثر انطباق با نتایج ابزار دقیق ارائه گردید [۱۱]. سد کرخه به کمک نرم‌افزار GeoStudio با فرض خاک نیمه اشباع توسط موهبت‌زاده و همکاران مدل‌سازی عددی

www.SID.ir

Archive of SID

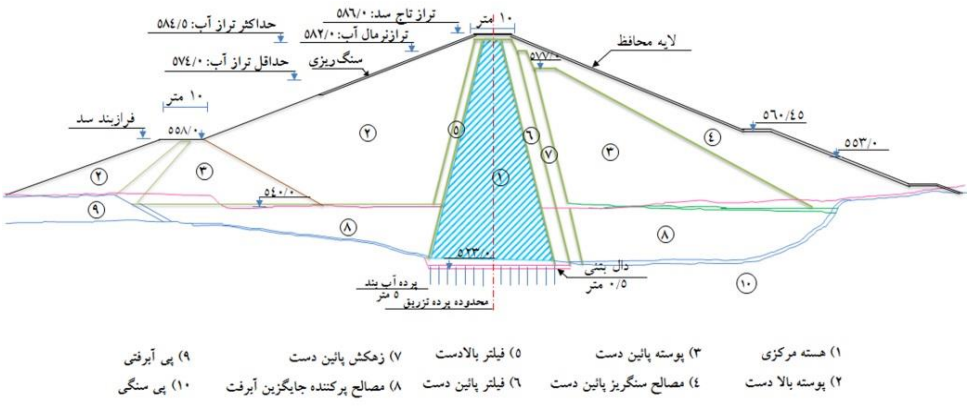
گردید که مقادیر مدل‌سازی‌های عددی در تمامی موارد بیش‌تر از مقادیر واقعی به دست آمده از رفتارسنجی، ارزیابی گردید [۱۲]. خزایی و همکاران، به مطالعه سه بعدی رفتار سد گیوی با استفاده از نرم‌افزار Seep 3D و با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه پرداختند که نتایج نشان می‌دهد به منظور دستیابی به مقادیر واقعی نشت، استفاده از مدل‌سازی‌های عددی سه بعدی اجتناب ناپذیر می‌باشد [۱۳]. مطالعه نتایج مدل‌سازی عددی سد نهرین توسط مقدس و رئیسی استبرق 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 [۱۴]. قره و نوروززاده در مطالعات خود بر روی سد خاکی تبارک آباد احتمال گسیختگی هیدرولیکی در این سد را بر اساس نتایج ابزار دقیق و همچنین پیش‌بینی رفتار سد را در طی دوران ساخت و بهره‌برداری با استفاده از مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق بررسی نمودند. در این راستا مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و پیش‌بینی رفتار سد با استفاده از مدل رفتاری الاستو پلاستیک انجام گردید. لازم به ذکر است در مطالعه مذکور نتایج حاصل از تحلیل برگشتی برای سه پارامتر نشست، تنش و فشار آب منفذی در طی دوران ساخت و بهره‌برداری از تطابق و هم‌خوانی مناسبی با نتایج به دست آمده از رفتارسنجی برخوردار بود [۱۵ و ۱۶].

۲- پروژه مورد مطالعه

۲-۱- مشخصات پروژه

مدیریت منابع آب در کشورهای کم آب از جمله ایران از موارد اجتناب ناپذیر است [۱۷]. سد خاکی چهچهه با هدف استحصال آب جهت توسعه کشاورزی منطقه و جلوگیری از هدر رفت آب این رودخانه از طریق مرز در منطقه مرزی ایران و ترکمنستان احداث گردیده است. ساخت این سد علاوه بر ایجاد اشتغال، با حفظ جمعیت حاشیه مرز، از مهاجرت روستائیان به شهرها جلوگیری نموده است. سد چهچهه از نوع سد خاکی با هسته ناتراوا بر روی رودخانه چهچهه با ارتفاع ۴۷ متر از بستر طبیعی رودخانه و ارتفاع ۶۱ متر از بستر سنگی در استان خراسان رضوی و شمال شرقی شهر مشهد احداث شده است. طول تاج سد در حدود ۲۵۰ متر و عرض تاج سد برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. عملیات ساخت این سد در خردادماه سال ۱۳۹۴ به اتمام رسید و اولین مرحله آبگیری از فروردین ماه ۱۳۹۴ آغاز گردید. ساختگاه سد در محدوده پلانچ تاقدیس چهچهه و بر روی رسوبات شیلی، شیل‌های آهکی به رنگ خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌های آهکی سازند سرچشمه واقع شده و از نظر آب‌بندی و پایداری شرایط مطلوبی را فراهم

می‌نماید. ضخامت مصالح آبرفتی رودخانه حداکثر ۱۵ متر و عمدتاً از شن سیلتی همراه با ماسه و ماسه سیلتی به همراه شن سیلت ماسه‌دار با دانه‌بندی ضعیف تشکیل شده است. انتخاب نوع سد متناسب با شرایط توپوگرافی، ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه، مصالح قابل دسترس و همچنین امکانات اجرایی صورت گرفته است. در شکل‌های (۱) و (۲) مقطع عرض سد چهچهه، نمایی کلی از سد و موقعیت دریاچه آن نشان داده شده است.



شکل ۱- مقطع عرضی سد چهچهه.

www.SID.ir

Archive of SID

(الف)

(ب)

شکل ۲- الف) نمایی کلی از سد چهچهه ب) موقعیت دریاچه سد.

۲-۲- پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مورد نیاز جهت انجام مطالعات تحلیلی، اختصاص پارامترهای مدل عددی است. در این راستا 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 و غیره مطالعات آزمایشگاهی و برجا براساس استاندارد ASTM [۱۸] انجام گردیده است و نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است با توجه به این که در تمامی مراحل ساخت و آبگیری سد از اصل تنش مؤثر (آنالیزهای تحکیم) استفاده شده، تمام پارامترها در حالت زهکشی شده محاسبه گردیده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده در ساخت سد.

پارامتر / بدنه سد	وزن مخصوص اشباع (kN/m^3)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (^{o})	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب نفوذپذیری (cm/s)
هسته	۲۰/۵	۳۰	۳۳	۰/۴۵	۷	۳×۱۰^{-۹}
پوسته بالادست	۲۲/۵	۰	۴۲	۰/۳۵	۳۵	۳×۱۰^{-۴}
پوسته پائین دست	۲۲/۵	۰	۴۲	۰/۳۵	۳۵	۳×۱۰^{-۴}
مصالح سنگریز پائین دست	۲۲/۵	۰	۴۰	۰/۲۸	۲۰	۱
فیلتر بالادست	۲۲/۵	۰	۴۲	۰/۳۵	۲۰	۱×۱۰^{-۲}
فیلتر پائین دست	۲۱/۵	۰	۴۰	۰/۳۳	۳۶	۱×۱۰^{-۱}
زهکش پائین دست	۲۲/۵	۰	۴۲	۰/۲۸	۲۰	۳×۱۰^{-۱}
مصالح پرکننده جایگزین آبرفت	۲۱/۵	۰	۳۸	۰/۲۸	۲۵	۱×۱۰^{-۳}
پی آبرفتی	۱۸/۵	۰	۳۰	۰/۲۵	۲۰	۵×۱۰^{-۴}
پی سنگی	۲۵/۵	۵۰	۲۸	۰/۳۱	۵۰۰۰	-

۲-۳- پایش رفتار سد

گسیختگی سدها، به استثناء خرابی‌های غیر قابل پیش-بینی، نظیر زلزله تقریباً با نشانه‌هایی مانند افزایش نرخ تغییرشکل‌ها، نشست‌ها، ناپیوستگی کرنش‌ها، ترک و تولید اضافه فشار آب حفره‌ای همراه می‌باشند. اگرچه این نشانه-های هشدار دهنده ممکن است در حالتی به استثناء وقوع گسیختگی نیز ظاهر شوند [۱۹]. به منظور کنترل ایمنی و پایداری سدها و همچنین جلوگیری از بروز خطرات احتمالی نظیر نشست، نشت آب، شکست سدها و غیره، دستورالعمل‌هایی از طرف نهادهایی نظیر USBR ارائه شده است که تیم بهره‌برداری سد با توجه به نوع و جنس مصالح، پروفیل خاک و سنگ بستر سد، قدمت، وضعیت زمین-شناسی، شرایط جمعیتی، مناطق استراتژیکی پایین‌دست سد و غیره بایستی پیش‌بینی‌ها و برنامه‌ریزی‌های لازم را در دوران بهره‌برداری از سد اعمال نماید. از جمله این برنامه‌ها می‌توان 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

www.SID.ir

Archive of SID

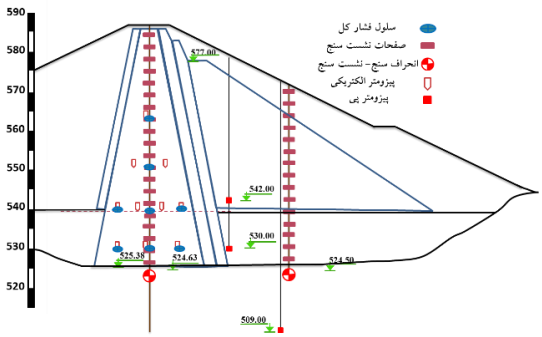
محدودیت‌های زمان ساخت، آبگیری اولیه و گذشت زمان در دوران بهره‌برداری، شبیه‌سازی رفتار واقعی سد، تحلیل برگشتی و مقایسه آن با رفتار پیش‌بینی شده در زمان طراحی، این امکان را فراهم می‌سازد تا در صورت بروز هرگونه اختلاف نامتعارف و غیرایمن، راهکارهای مناسب در دوران بهره‌برداری اتخاذ و اجرا گردد [۲۰].

۲-۴- ابزارگذاری و تجهیزات نصب شده

به منظور کنترل و بررسی رفتار سد در حین ساخت، آبگیری و دوران بهره‌برداری، ابزاربندی و تجهیزات رفتارنگاری گسترده‌ای در سه مقطع سد چهچهه مشتمل بر پیزومتر الکتریکی پی و خاکریز، پیزومتر لوله قائم، سلول فشار کل، ابزار تلفیقی انحراف سنج-نشست سنج، ایستگاه هواشناسی، سنجش آب مخزن، شتاب نگار و سرریز مثلثی انجام گردید. لازم به ذکر است قرائت ابزارها در زمان ساخت سد به طور منظم هر دو هفته و در زمان آبگیری به صورت روزانه انجام شده است. در جدول ۲ تعداد ابزار دقیق نصب شده در بدنه سد چهچهه و در شکل (۳) موقعیت ابزارگذاری در بحرانی-ترین مقطع سد که مرتفع‌ترین و عمیق‌ترین پی آبرفتی می‌باشد، ارائه شده است.

جدول ۲- ابزارهای دقیق نصب شده در بدنه، پی و جناحین سد چهچهه به منظور پایش آن.

نام ابزار	تعداد نصب شده	نام ابزار	تعداد نصب شده
پیزومتر الکتریکی بدنه	۱۷	نشست سنج - انحراف سنج	۶
پیزومتر الکتریکی پی	۱۲	سرریز مثلثی دبی	۱
پیزومتر کاساگرانده	۸	چاه مشاهده‌ای	۲۰
سلول فشار سنج	۱۴	ایستگاه هواشناسی	۱



شکل ۳- پلان موقعیت ابزارگذاری واقع در هسته سد چهچهه و در مرتفع‌ترین مقطع آن.

۳- مدل‌سازی عددی

سدهای خاکی به لحاظ هندسی، سازه‌های نسبتاً ساده‌ای هستند که مصالح تشکیل دهنده آن‌ها دارای تنوع زیادی می‌باشد. از طرفی رفتار غیرخطی این مصالح در بارگذاری و باربرداری و در شرایط زهکشی شده یا زهکشی نشده، ضرورت انجام مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب را به منظور پیش‌بینی و تدقیق رفتار سد نشان می‌دهد.

مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های رفتاری ساده اختلاف زیادی بین نتایج مدل‌سازی عددی و رفتار واقعی سد ارائه می‌دهد. از طرفی مدل‌های رفتاری پیشرفته نیازمند پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومت مصالح می‌باشند. روش المان محدود یکی از عمومی‌ترین روش‌ها در برخورد با مسائل تحلیلی پیچیده است [۲۱] و با توجه به رفتار پیچیده خاک‌ها، استفاده از این روش به منظور تحلیل رفتار خاک تحت تنش، مناسب می‌باشد.

۳-۱- نرم‌افزار مورد استفاده

نرم افزارهای بر پایه روش‌های عددی قادرند انواع مختلفی از مدل‌های رفتاری خاک و خصوصیات هندسی مسئله را تحت پوشش قرار دهند. با این حال استفاده از این نرم افزارها مستلزم آگاهی از نحوه عملکرد آنها است [۲۲]. در این مطالعه، به منظور ارزیابی رفتار سد در دوران ساخت و 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

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از برنامه SIGMA/W که زیرمجموعه نرم‌افزار المان محدود GeoStudio می‌باشد، انجام گردید. بسته نرم‌افزاری GeoStudio یک مجموعه نرم‌افزاری بر پایه روش المان محدود است که 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. این مجموعه نرم‌افزاری شامل نرم‌افزار SEEP/W برای بررسی شرایط تراوش و شبیه‌سازی جریان آب در خاک و تحلیل آن، نرم-افزار SLOPE/W جهت تحلیل پایداری شیب‌ها و ضریب اطمینان بحرانی آن‌ها و SIGMA/W به منظور تحلیل تنش‌ها و کرنش‌ها و جابجایی سازه ژئوتکنیکی می‌باشد. همچنین این برنامه شامل لیست گسترده‌ای از مدل‌های رفتاری خاکی می‌باشد که می‌تواند رفتار اغلب مصالح ژئوتکنیکی مانند خاک و سنگ را شبیه‌سازی کند.

در نرم‌افزار SEEP/W با مدل‌سازی لایه‌های خاک مصالح سد و بستر زیرین آن، امکان تعیین تنش‌های کل و تنش‌های موثر و فشار آب حفره‌ای فراهم می‌گردد و از طریق آن می‌توان تغییرشکل‌های حاصل در خاک را ارزیابی نمود. در این نرم‌افزار پس از ساخت هندسه مدل مطابق با شرایط واقعی ساخت سد، خاکریزی در چندین مرحله انجام و لایه‌های مختلف خاک مدل‌سازی 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 مدل-سازی‌های عددی پس از برداشت با نتایج به دست آمده از قرائت ابزارهای دقیق مقایسه گردد [۲۳].

۳-۲- فرضیات مدل

اعمال شرایط مرزی مناسب در مدل‌سازی‌های عددی، شکل هندسی مدل، مرزبندی و مش‌بندی بر اساس دستورالعمل کمیته ملی سدهای بزرگ برای تحلیل سدهای خاکی انجام گردیده است. 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 [۲۴]. در راستای این تحقیق برای مصالح به کار رفته در ساخت هسته سد، از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب و برای مصالح سایر بخش‌ها از مدل الاستیک خطی استفاده گردید. مدل موهر-کولمب از ساده‌ترین مدل‌های رفتاری خاک می‌باشد و به دلیل این که در این مدل اکثر پارامترهای اساسی خاک اعم از خمیری و کشسان وجود دارد، برای مدل کردن اکثر حالات رفتاری خاک مناسب می‌باشد. این مدل به دلیل سادگی و عدم نیاز به پارامترهای متعدد، در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده واقع می‌شود. در مدل‌سازی‌های عددی انجام شده از یک شبکه با ۳۴۸ گره و ۳۴۹ المان استفاده گردیده و ابعاد کل شبکه ۷۸ × ۲۳۵ مترمربع می‌باشد. با توجه به مدت زمان ساخت سد، تحلیل عددی سد چهچهه به صورت مرحله‌ای و با در نظر گرفتن ۱۶ مرحله خاکریزی و زمان ساخت ۴۳ روز برای هر لایه در نظر گرفته شد. هدف از در نظر گرفتن مراحل خاکریزی، نزدیک‌تر شدن شرایط مطالعات تحلیلی 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 بهره‌برداری در زمان مدل‌سازی، تراز سطح آب مخزن ۵۸۴/۵ متر در نظر گرفته شد (شکل ۴). به علاوه با توجه به تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومت مصالح در طول زمان و تأثیرات آب مخزن بر این پارامترها، به منظور تدقیق داده‌ها از تحلیل برگشتی استفاده شد.

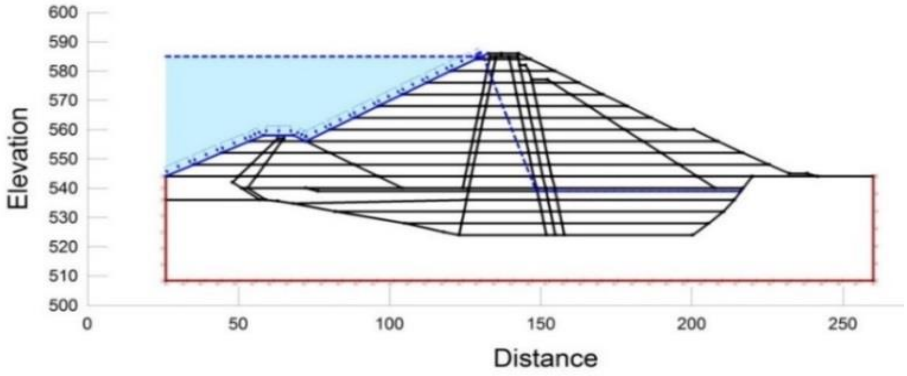
۳-۳- آنالیز برگشتی

پس از ساخت هندسه مدل عددی و اعمال پارامترهای اولیه مصالح، مدل‌سازی‌های عددی اولیه انجام و سپس تحلیل-های برگشتی اجرا گردید. با توجه به این که هدف اصلی انجام تحلیل‌های برگشتی تدقیق پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومت مصالح در زمان ساخت سد است، لذا تا زمانی‌که رفتاری تقریباً مشابه رفتار واقعی سد (نتایج به دست آمده از رفتارسنجی) در مدل عددی ایجاد شود، تأثیر تغییرات پارامترهای اولیه ورودی به مدل عددی بایستی ارزیابی 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

www.SID.ir

Archive of SID

تأثیر تمامی پارامترها بر روی یکدیگر، با تغییری 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 [۲۵]. پس از انجام تحلیل‌های مذکور و استفاده از روش آنالیز حساسیت و تحلیل برگشتی، مقادیر مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در تعیین تنش، تغییرشکل، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، نشت و ضریب نفوذپذیری تدقیق گردید که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۴- هندسه مدل سد چهچهه 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 اشباع (kN/m^3)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (^{o})	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب نفوذپذیری (cm/s)
هسته	۲۲	۵۰	۳۵	۰/۲۸	۲۰	۳×۱۰^{-۴}
پوسته بالادست	۲۰	۰	۴۲	۰/۲۵	۴۰	۳×۱۰^{-۳}
پوسته پائین دست	۲۰	۰	۴۲	۰/۳	۴۰	۳×۱۰^{-۳}
مصالح سنگریز پائین دست	۱۹	۰	۳۶	۰/۲۵	۵۰	۳×۱۰^{-۳}
فیلتر بالادست	۱۹	۰	۳۸	۰/۲۵	۳۰	۵×۱۰^{-۲}
فیلتر پائین دست	۲۰	۰	۴۱	۰/۲۵	۳۰	۲×۱۰^{-۲}
زهکش پائین دست	۲۰	۰	۲۸	۰/۲۵	۳۰	۲×۱۰^{-۲}
مصالح پرکننده جایگزین	۱۹	۰	۳۸	۰/۲۵	۳۰	۱×۱۰^{-۲}
پی آبرفتی	۱۷	۰	۳۰	۰/۲۵	۵۰	۲×۱۰^{-۳}
پی سنگی	۲۳	۱۰	۴۰	۰/۲۵	۱۴۰	۱×۱۰^{-۷}

۴-بحث و نتیجه‌گیری

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. با توجه به این که قسمت عمده تغییر شکل‌ها و عوارض احتمالی سد در دوران ساخت و اولین آبگیری رخ می‌دهند، بررسی رفتار سدهای خاکی در طول مراحل ساخت و اولین آبگیری، دارای اهمیت بسیاری از نظر ارزیابی پایداری و ایمنی می‌باشد.

۴-۱- تغییرات نشست

با توجه به مکانیسم جریان آب در خاک و ساختار مصالح سد، یکی از پدیده‌های اصلی مورد انتظار در سدهای خاکی که تابعی از زمان نیز می‌باشد، نشست است. 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 و به ویژه اولین دوره آبگیری ضروری است. با توجه به وقوع عمده مقادیر نشست در زمان اجرا و آبگیری، در دوران بهره‌برداری نیز نشست با سرعت بسیار کمی ادامه دارد. در سد چهچهه میزان نشست با استفاده از دو گمانه نشست‌سنج- انحراف‌سنج که به ترتیب در هسته بر روی محور سد و پوسته پایین دست سد در

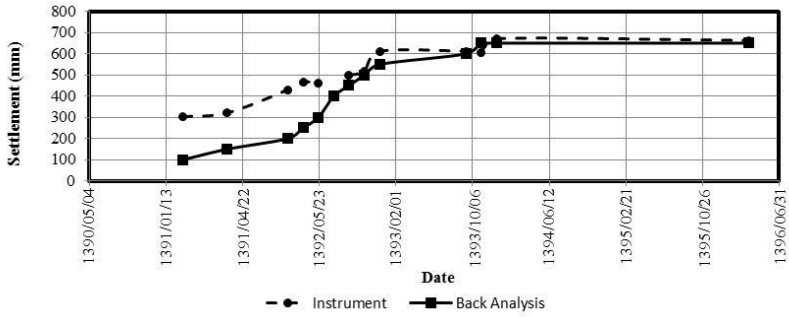
www.SID.ir

Archive of SID

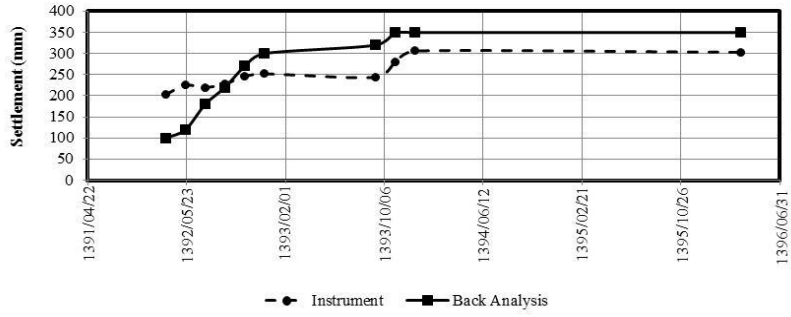
بحرانی‌ترین مقطع واقع شده‌اند، بررسی گردید. در شکل-های (۵) و (۶) میزان تغییرات نشست در طی مراحل ساخت تا پس از اولین آبگیری با استفاده از این دو گمانه نمایش و با نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اعداد حاصل از قرائت هر دو گمانه به ویژه در مراحل پایانی ساخت و پس از آبگیری تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از تحلیل برگشتی نشان می‌دهد.

۴-۱-۱- نشست هسته در مرحله آبگیری سد

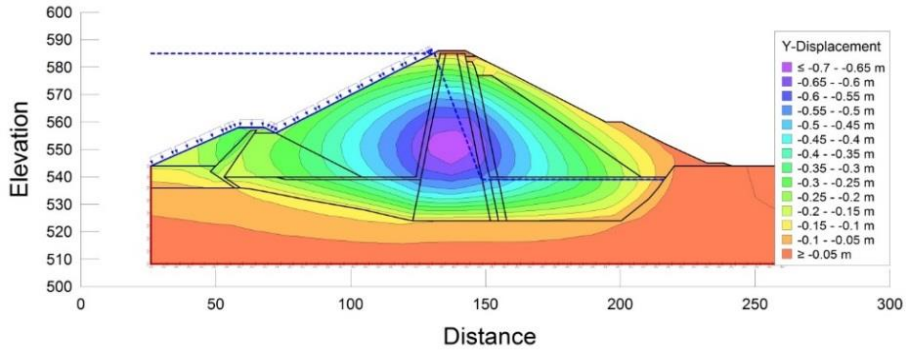
بررسی پایداری و تغییر شکل سدهای خاکی در حین اولین آبگیری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. مقادیر نشست پس از اولین مرحله آبگیری سد با استفاده مدل-سازی المان محدود توسط نرم‌افزار GeoStudio در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین با استفاده از ابزارهای نشست سنج که در بحرانی‌ترین مقطع سد جایگذاری شده، میزان نشست در ترازهای مختلف، قرائت، ثبت و با داده‌های حاصل از آنالیز برگشتی مقایسه شده است (شکل ۸). مقادیر نشست ثبت شده توسط ابزار نشست سنج در هسته و پائین دست در ترازهای ۵۴۸ متر و ۵۶۰ متر، به ترتیب ۶۶ سانتی‌متر و ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی که به ترتیب ۶۵ سانتی‌متر و ۳۵ سانتی‌متر است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی عددی و داده‌های ابزار دقیق از تطابق مناسبی برخوردار بوده و از یک روند تبعیت می-نمایند.



شکل ۵- میزان تغییرات نشست در هسته سد چهچهه در طی مراحل ساخت و آبگیری.



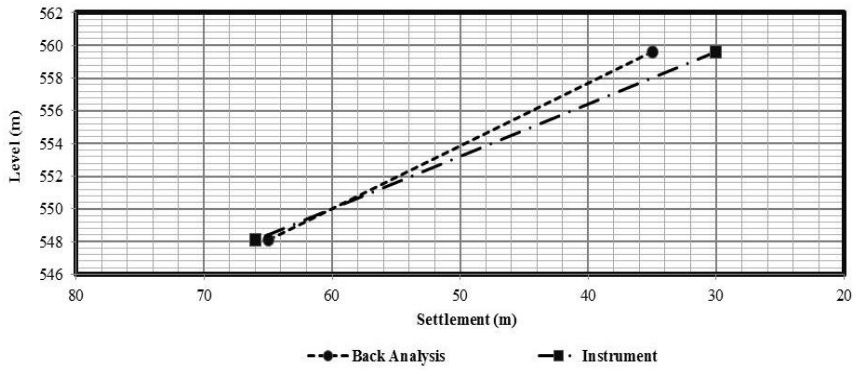
شکل ۶- میزان تغییرات نشست در پائین دست سد چهچهه در طی مراحل ساخت و آبگیری.



شکل ۷- منحنی‌های هم نشست با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار GeoStudio پس از اولین دوره آبگیری.

www.SID.ir

Archive of SID

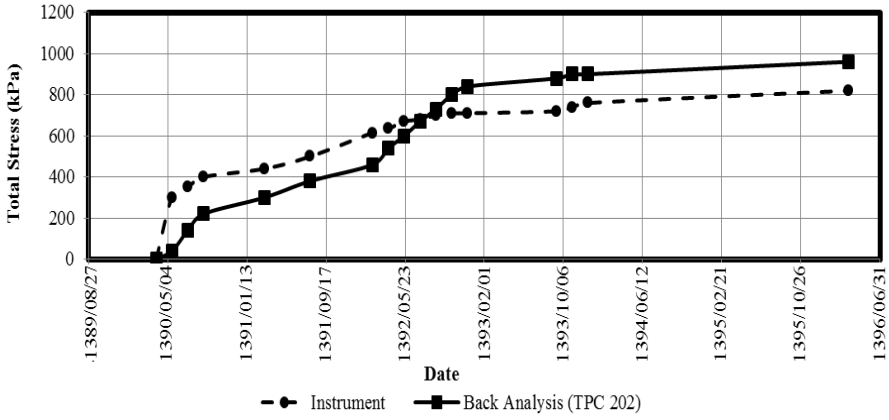


شکل ۸- مقایسه مقادیر نشست به دست آمده با استفاده از ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی در بحرانی‌ترین مقطع سد پس از اولین دوره آبگیری.

۴-۲- تغییرات تنش

با توجه به در نظر گرفتن اصل تنش مؤثر در طراحی سدهای خاکی، وضعیت تنش یکی از تأثیرگذارترین پارامترها جهت ارزیابی پایداری و 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.توزیع تنش در بدنه سد تابع هندسه و خواص هسته و مناطق مجاور آن است. بحث در مورد توزیع تنش‌های داخلی به ویژه در هسته به این دلیل اهمیت دارد که وضعیت نشست‌ها، آسیب‌پذیری و پایداری آن تابعی از توزیع همین تنش‌ها می‌باشد. به عنوان مثال در صورتی که تنش‌های موجود در نقطه‌ای از هسته از فشار آب موجود در آن نقطه کوچک‌تر باشد، امکان رخداد شکست هیدرولیکی میسر می‌گردد. بنابراین کاهش تنش‌های قائم در هر ترازی رخداد این پدیده را محتمل‌تر می‌سازد [۲۶].

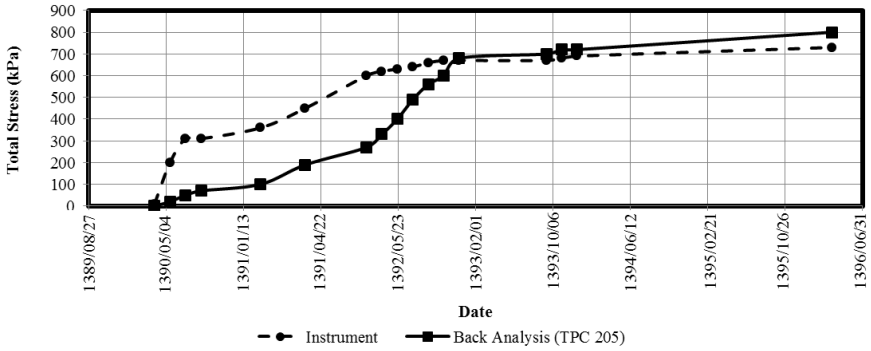
در سد چهچهه ۱۴ عدد سلول فشارسنج کل برای تعیین توزیع، اندازه و جهت تنش‌های کل در جهات مختلف در هسته رسی نصب شده‌اند که از این تعداد، ۸ عدد آن در بحرانی‌ترین مقطع جایگذاری شده است. آرایش فشارسنج‌ها در مقاطع مختلف به صورتی است که فشار در نقاط مختلف هسته سد قابل اندازه‌گیری است. قرائت سلول‌های تنش سنج در دوران ساخت به صورت ماهانه و در اولین دوره آبگیری به صورت هفته‌ای انجام شده است. در شکل‌های (۹) تا (۱۱) میزان تغییرات تنش کل در هسته سد از ابتدای ساخت تا اولین مرحله آبگیری که از سلول‌های فشار نصب شده در سه تراز ۵۳۰، ۵۴۰ و ۵۵۰ متری قرائت شده و همچنین نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی در همین ترازها آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به ویژه در مراحل پایانی ساخت و پس از آبگیری با داده‌های حاصل از ابزار دقیق همخوانی خوبی نشان می‌دهد.



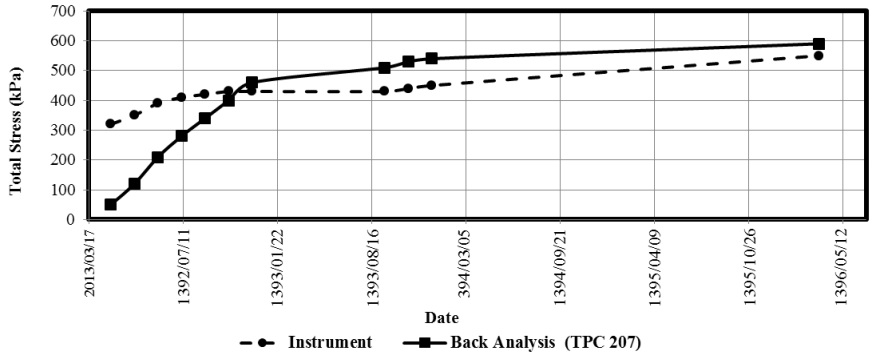
شکل ۹- تغییرات تنش کل از ابتدای ساخت تا اولین مرحله آبگیری در هسته سد با استفاده از نتایج قرائت شده سلول فشار نصب شده در تراز ۵۳۰ متری و مدل‌سازی عددی

www.SID.ir

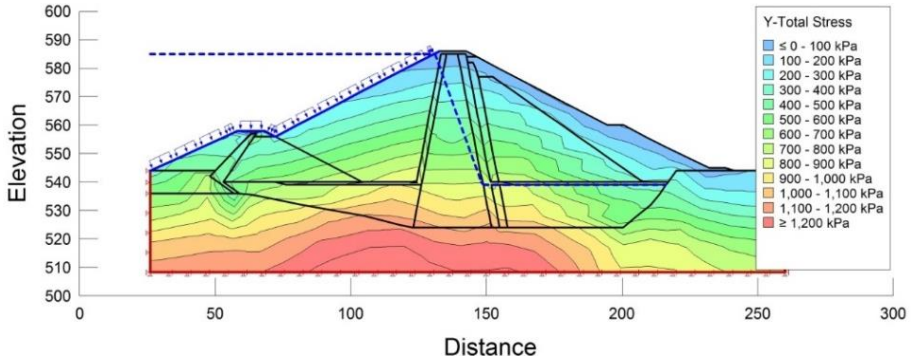
Archive of SID



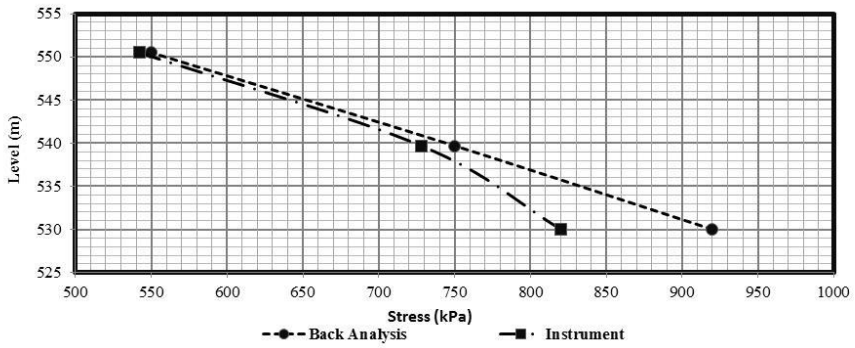
شکل ۱۰- تغییرات تنش کل از ابتدای ساخت تا اولین مرحله آبگیری در هسته سد با استفاده از نتایج قرائت شده سلول فشار نصب شده در تراز ۵۴۰ متری و مدل‌سازی عددی



شکل ۱۱- تغییرات تنش کل از ابتدای ساخت تا اولین مرحله آبگیری در هسته سد با استفاده از نتایج قرائت شده سلول فشار نصب شده در تراز ۵۵۰ متری و مدل‌سازی عددی



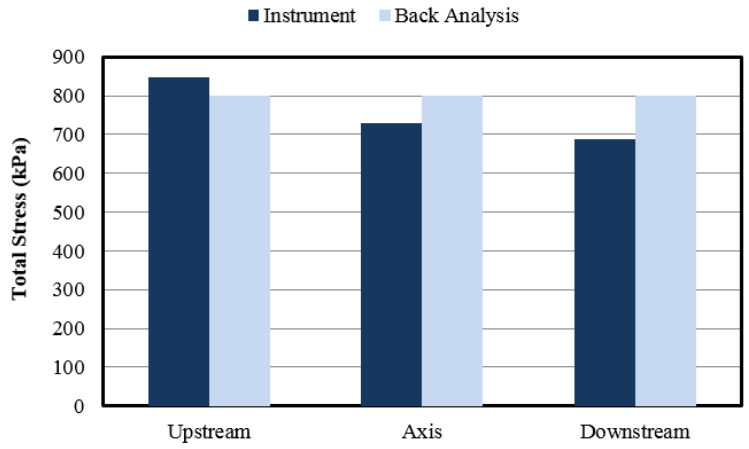
شکل ۱۲- مقادیر تنش قائم محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio پس از اولین دوره آبگیری.



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر تنش حاصله از ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی در بحرانی‌ترین مقطع سد پس از اولین دوره آبگیری.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۴- مقایسه نتایج آنالیز برگشتی و ابزار دقیق در تراز ۵۴۰ متری سد.

۴-۲-۱- تنش در دوران بهره‌برداری

با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار GeoStudio میزان تنش در ترازهای مختلف در بدنه سد چهچهه محاسبه گردید (شکل ۱۲). همچنین میزان تنش قرائت شده توسط ابزار دقیق در ترازهای ۵۳۰، ۵۴۰ و ۵۵۰ با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود 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 با نتایج ابزار دقیق مطابقت داشته و به‌ویژه در ترازهای بالاتر این نتایج بسیار نزدیک می‌باشند. مقادیر تنش در تراز ۵۴۰ متری با استفاده از قرائت‌های ابزار دقیق که در سه نقطه پائین دست، محور و بالا دست سد نصب شده‌اند و همچنین نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio پس از اولین مرحله آبگیری در شکل (۱۴) آورده شده است.

۴-۳- تغییرات فشار آب منفذی

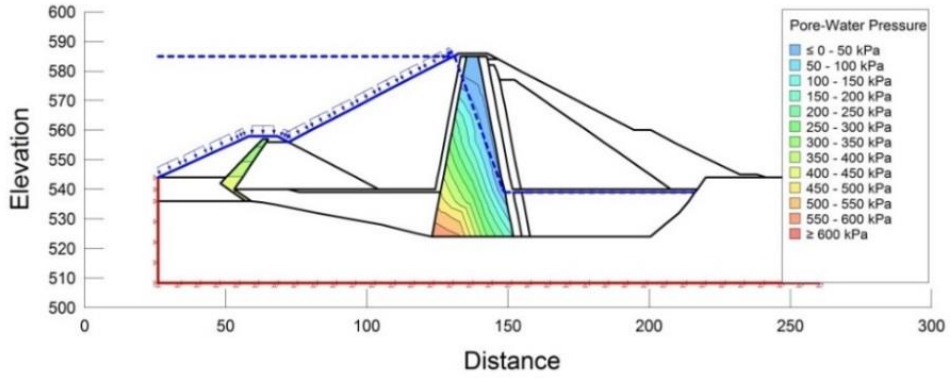
به منظور پایش فشار آب منفذی در پی سنگی و ارزیابی راندمان پرده آب‌بند پس از اولین دوره آبگیری سد چهچهه، ۱۰ عدد پیزومتر الکتریکی در مقاطع مختلف پی سنگی در بالادست و پایین دست پرده (EPF) پی آب بند سد چهچهه تعبیه شد که با استفاده از آن‌ها میزان فشار آب منفذی به صورت منظم قرائت و ثبت گردید. اطلاعات ثبت شده توسط پیزومترهای الکتریکی ۲۵ ماه بعد از اولین آبگیری سد نشان می‌دهد در هسته با افزایش تراز ارتفاعی از ۵۳۰ به ۵۶۲/۵ مقادیر فشار آب حفره‌ای از ۴۴۹ کیلوپاسکال به ۱۰۱/۷ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد و مؤید این می‌باشد که در حین عملیات اجرایی سدهای خاکی هم‌زمان با افزایش ارتفاع سد، در اثر ازدیاد وزن لایه‌های فوقانی خاکریز، کاهش حجم خلل و فرج خاک و فشرده شدن هوای داخل آن، فشار منفذی در هسته افزایش می‌یابد، در حالی که در مصالح درشت دانه پوسته بالادست و پایین‌دست به دلیل زهکشی سریع آب، فشار منفذی قابل توجهی به وجود نمی‌آید. از طرف دیگر افزایش فشار آب منفذی موجب کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود و در یک مرحله بحرانی ممکن است گسیختگی و تخریب سد را به دنبال داشته باشد. در سد چهچهه ۲۵ ماه بعد از اولین آبگیری سد با افزایش تراز ارتفاعی از ۵۳۰ به ۵۶۲/۵ مقادیر ضریب فشار آب حفره‌ای از ۰/۶۵ به ۰/۱۲ کاهش می‌یابد و این دامنه تغییرات در سدهای بزرگی مانند سد تهم با ارتفاع ۱۲۳ متر از ۰/۲ تا ۰/۸۸ و در سد کرخه با ارتفاع ۱۳۰ متر از ۰/۴۵ تا ۱ گزارش شده است، لذا سد چهچهه در پایان ساخت در شرایط خوبی قرار گرفته است.

در شکل (۱۵) مقادیر فشار آب منفذی در هسته سد که با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio محاسبه شده، نمایش داده شده است. شکل (۱۶) مقادیر فشار آب منفذی ثبت شده توسط ابزار دقیق به همراه نتایج حاصل از تحلیل برگشتی سد را نمایش می‌دهد. قابل ذکر است این داده‌ها مربوط به ترازهای مختلف از مرکز هسته در مقطع بحرانی سد می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل برگشتی و ابزار دقیق بیانگر انطباق خوب این داده‌ها با یکدیگر می باشد. به علاوه نتایج ثبت شده توسط پیزومترها نشان میدهد تغییرات

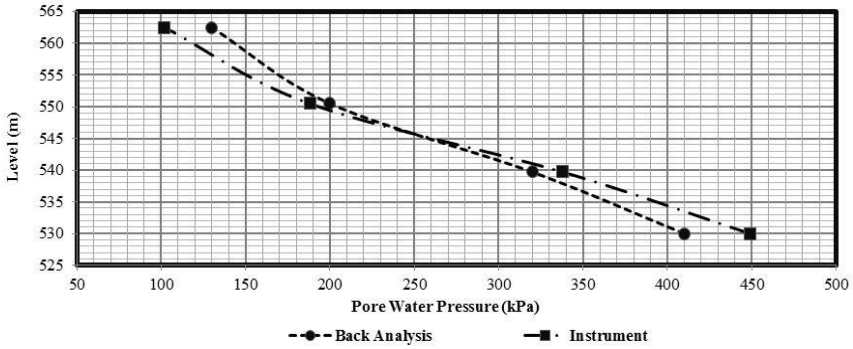
www.SID.ir

Archive of SID

فشار آب منفذی با افزایش تراز ارتفاعی سد، با روند کاهشی همراه می‌باشد. در این تحقیق روند تغییرات مورد انتظار فشار آب حفره‌ای 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 می‌شود. 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 حفره‌ای در ابزارهای نصب شده در ترازهای بالاتر بیش‌تر از ترازهای پائین‌تر خواهد بود.



شکل ۱۵- مقادیر فشار منفذی در هسته سد در اولین مرحله آبگیری.



شکل ۱۶- تغییرات فشار آب منفذی در ترازهای ارتفاعی مختلف پس از اولین آبگیری با استفاده از نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی.

۵- نتایج

۱- در راستای این تحقیق مدل رفتاری موهر- کولمب به عنوان مدلی مناسب برای تخمین رفتار مصالح هسته سد و نرم‌افزار المان محدود GeoStudio به عنوان ابزاری مناسب برای ارزیابی رفتار سد چهچهه می‌باشد.

۲- نتایج به دست آمده از رفتارسنجی سد نشان می‌دهد مقادیر فشار آب منفذی در پی و بدنه سد، فشار کل در سلول‌های فشارسنج و همچنین مقادیر تغییر مکان بدنه و پی سد در تمامی مقاطع در حد مجاز می‌باشد و علت اصلی اختلاف میان نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی‌های عددی مربوط به فرض همسانگرد بودن مقادیر پارامترهای مقاومتی مصالح هسته است زیرا که در عمل ناهمسانگرد بوده و برخی مشخصات مکانیکی مصالح در راستای قائم و افقی متفاوت است.

۳- از مقایسه مطالعات رفتارسنجی به دست آمده از مقادیر ثبت شده در نشست‌سنج‌های واقع در هسته رسی و پوسته پایین‌دست که به ترتیب ۶۵ سانتی‌متر و ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد با مقادیر به دست آمده از مطالعات تحلیلی برای هسته رسی و پوسته پایین‌دست که به ترتیب ۶۶ سانتی‌متر و ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد، تطابق و هم‌خوانی مناسبی ملاحظه می‌گردد و مطالعات تحلیلی تخمین مناسبی برای ارزیابی مقادیر نشست در هسته و پوسته می‌باشد.

۴- بیش‌ترین مقدار تنش ثبت شده توسط سلول‌های فشار کل مربوط به تراز ۵۳۰ متری هسته و برابر ۸۲۰

www.SID.ir

Archive of SID

کیلوپاسکال می‌باشد، که مقادیر تنش به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی در همین تراز ۹۱۵ کیلوپاسکال می‌باشد و بیانگر نتایج محافظه‌کارانه مقادیر تنش مدل‌سازی‌های عددی در مقایسه با رفتار واقعی سد می‌باشد.

۵- اطلاعات ثبت شده پیزومترهای الکتریکی ۲۵ ماه بعد از اولین آبگیری نشان می‌دهد در هسته با افزایش تراز ارتفاعی از ۵۳۰ به ۵۶۲/۵، فشار آب حفره‌ای از ۴۴۹ کیلوپاسکال به ۱۰۱/۷ کیلوپاسکال و ضریب فشار آب حفره‌ای از ۰/۶۵ به ۰/۱۲ کاهش می‌یابد، زیرا که در اثر ازدیاد وزن لایه‌های فوقانی خاکریز، کاهش حجم خلل و فرج خاک و فشرده شدن هوای داخل آن، فشار منفذی در هسته افزایش می‌یابد.

۶- با توجه به صحت‌سنجی انجام شده بر روی مدل‌سازی‌های عددی، انجام تحلیل برگشتی و تدقیق پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومت مصالح سد چهچهه، پیش‌بینی رفتار سد در مراحل بحرانی نظیر آبگیری و تخلیه سریع مخزن امکان‌پذیر گردید.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله برخود لازم می‌دانند از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی به دلیل در اختیار گذاشتن اطلاعات ابزار دقیق سد چهچهه و به ویژه آقای دکتر ملوندی و مهندس باوفا مدیر طرح پروژه بابت همکاری صمیمانه ایشان و همچنین از آقای مهندس یزدانمهر به دلیل راهنمایی‌های ارزنده ایشان در بخش مطالعات تحلیلی این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

[۱] پریسا بیرانوند، امینه بخشنده، حسن رحیمی، مرتضی دیزجی و معین بهادری، "تحلیل عددی نشت از پی سنگی سد سردشت به وسیله نرم‌افزار UDEC"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، اردبیل، ۱۳۹۲.

[۲] فرزین کریمی، "مطالعه رفتار سدهای خاکی با استفاده از نتایج ابزار دقیق و تحلیل عددی برگشتی (مطالعه موردی: سد تهم)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۵.

[۳] کیوان کولانی مطلق، "بررسی رفتار سدهای خاکی با استفاده از نتایج ابزار دقیق سد و تحلیل برگشتی (مطالعه موردی: سد خاکی شهر چای)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۱.

[4] C.S. Undayani, W. Partono and S.P.R. Wardani, "Displacement analysis of dam based on material parameters using numerical simulation and monitoring instrumentation", In MATEC Web of Conferences, Vol 258, 2019, pp. 1-6.

[5] M.A. Abedian, F. Farrokhi and R. Rasouli, "Settlement Evaluation of a Concrete Face Rock-Fill Dam (CFRD) Using a Back-Analysis Method Based on Measurement Results (A Case Study of Siah-Bisheh Dam)", Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 50, No. 4, 2018, pp. 516–533.

[6] M. Javanmardi, F. Amiri and M. Safavi, "Instrumentation Readings versus Numerical Analysis of Taham Dam", International Journal of Engineering, Vol 32. No. 1, 2019, pp.28–35.

[۷] سبحان مرادی، کاظم اسماعیلی و زهرا جبلی، "بررسی فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی در مراحل ساخت به وسیله نرم افزار Plaxis: مطالعه موردی سد دامغان"، دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای پژوهشی در عمران معماری و مدیریت شهری، تهران، ۱۳۹۵.

[8] M. Rashidi and M. Haeri. "Evaluation of behaviors of earth and rock fill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Vol. 9, No. 4, 2017, pp. 709–725.

[۹] شاهین شمس و علی حقایق، "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 بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ۱۳۹۵.

[۱۰] حامد اسدیان، ابراهیم رحیمی، محمد غفوری و محمد بشیر گنبدی، "رفتارنگاری سد دوستی تا انتهای ساخت به کمک داده‌های ابزاردقیق و تحلیل‌های عددی"، نشریه علوم زمین، شماره ۹۸، ۱۳۹۴، صفحه ۲۱۳-۲۲۲.

www.SID.ir

Archive of SID

[۱۱] امیر جاثمی و علیرضا پرویشی، "بررسی تراوش از پی و بدنه سد خاکی شهرچای با استفاده از روش اجزاء محدود و اطلاعات ابزار دقیق،" ارومیه، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، ۱۳۹۳.

[۱۲] آرش موهبت‌زاده، محمود مشعل و نجف هدایت، "تحلیل نشت در سدهای خاکی با هسته رسی با استفاده از نرم‌افزار Seep/W - مطالعه موردی سد کرخه در خوزستان،" ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ایران، ۱۳۹۰.

[۱۳] جهانگیر خزایی، حسن شرفی، دانش ستاری و جواد هدایتی، "آنالیز سه بعدی نشت از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه - مطالعه موردی سد گیوی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، ایران. ۱۳۹۲.

[۱۴] مهرداد مقدس و علی رئیسی استبرق، "ارزیابی روش‌های مختلف کاهش نشت از پی و بدنه سدهای خاکی"، دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله و ژئوتکنیک، بابلسر، ایران، ۱۳۹۱.

[۱۹] سهیل قره، و رضا نوروززاده، "بررسی احتمال گسیختگی هیدرولیکی در سد خاکی تبارک آباد بر اساس نتایج ابزار دقیق"، نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، ایران، ۱۳۹۵.

[۲۰] سهیل قره و رضا نوروززاده، "تحلیل برگشتی رفتار سد خاکی تبارک آباد ایران با استفاده از نتایج رفتارسنجی و مدل‌سازی عددی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۸، شماره ۹۳، ۱۳۹۷، صفحه ۵۱-۶۴.

[۲۱] محمد حاجی عزیزی، محمود رحمانی و نجف بیگلری، "تحلیل اجزاء محدود سدهای زیرزمینی و نکات مهم در طراحی و اجرای آنها- مطالعه موردی سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، ۱۳۹۳، صفحه ۱۵۳-۱۶۵.

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

[۲۳] سولماز دارسنج، "تحلیل و بررسی رفتار سدهای خاکی در حین اولین آبگیری (مطالعه موردی سد علویان)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۸.

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

[۲۵] غلامعلی شفا بخش و احمد مهرابی، "تحلیل عددی روسازه انعطاف پذیر راه به روش میکروسازه‌ای"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۰، ۱۳۹۴، صفحه ۵۹-۶۷.

[۲۶] مرضیه حسن آبادی، عبدالحسین حداد و حسین نادرپور، "استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین ظرفیت باربری شالوده های سطحی واقع بر بسترهای چند لایه چسبنده"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۴، ۱۳۹۰، صفحه ۶۵-۸۲.

[27] Geo-Slope International Ltd, GeoStudio, Stress and Deformation Modeling with Sigma/W, Cal gray, Alberta, Canada, 2007.

[28] J. M. Duncan and C. M. Chang, "Nonlinear analysis of stress and strain in soils, "Journal of Soil Mechanics and Foundations Division", ASCE, Vol. 96, No. SM5, 1970, pp. 1629–1653.

[۲۹] امین محمودی، محمد صدقی اصل، منصور پرویزی و ارسلان مهرکی، "بررسی نشت در سد خاکی- مطالعه موردی سد تنگاب فیروزآباد"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، اردبیل، ایران، ۱۳۹۲.

[۳۰] مرتضی سالاری، رضا نوروززاده و علی اخترپور، "تحلیل عددی بازگشتی رفتار یک سد خاکی بلند در دوران ساخت"، هشتمین کنگره ملّی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، ایران، ۱۳۹۳.

www.SID.ir