Archive

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

بررسی رفتار تغییرشکلی و گسیختگی در بدنه سد خاکی در طی مرحله آبگیری برای سد خاکی هسته رسی کبودوال

محمد نظریان[۱]، سید مصطفی مرتضوی[۲]
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب وسازه های هیدرولیکی دانشگاه ولیعصر رفسنجان
استادیار دانشگاه ولیعصر رفسنجان

چکیده

نیاز به توسعه منابع آبی و همچنین افزایش سریع جمعیت سبب گردیده تا منابع بصورت محدودتری در اختیار باشد. این مسئله در زمینه منابع آبی بسیار قابل توجه‌تر بوده و اهمیت بیش از پیش مهار آب‌های سطحی را نمایان‌تر کرده است. اجرای سدهای خاکی را می‌توان به عنوان مهمترین نمود در مهار چنین آب‌های دانست. در پیاده‌سازی و اجرای سدهای خاکی طراحی پایدار سد در برابر نشست‌های حاصل از آبگیری بسیار مهم بوده و نقش حیاتی در بقای آن دارد. در این مطالعه این مسئله مورد توجه بوده و سعی شده با استفاده از رویکرد عددی المان محدود (FEM) و نرم‌افزار Plaxis شرایط پایداری و نشست‌پذیری برای سد خاکی هسته رسی کبودوال مورد بررسی قرار گیرد. برپایه نتایج مدل‌سازی عددی حداکثر جابجایی و نشست برآورد شده در مدل برابر ۱/۸ متر بوده است که برابر رویکردهای طراحی پیش‌بینی شده در محدوده تعیین شده است.

کلید واژگان : تحلیل نشست‌پذیری، سد خاکی هسته رسی، آبگیری سد، سد کبودوال.

۱- مقدمه

از دیدگاه ژئوتکنیک و روش ساخت، سدهای خاکی به دو گروه هستند که تقریباً تمامی آنها در گروه غلتکی (کوبیدنی) قرار دارند و تعدادی در گروه هیدرولیکی و نیمه هیدرولیکی طبقه‌بندی می‌شوند. منظور از سدهای غلتکی این است که ساخت سد با روش کوبیدن خاک که بوسیله غلتک است صورت می‌گیرد، که معمولاً در لایه-های ۱۵ تا ۲۲ سانتیمتری در هر نوبت تراکم کوبیده می-شوند. منظور از روش هیدرولیکی اینست که بنا شدن سد با کمک آب انجام می‌گیرد و در ضمن جدا شدن آب از خاک، نوعی طبقه‌بندی طبیعی در دانه‌بندی خاک صورت می‌گیرد که برای سد مناسب می‌باشد، یعنی دانه‌های درشت‌تر در کناره‌ها و دانه‌های ریزتر در وسط سد قرار می‌گیرند (زمردیان و چوچی، ۱۳۹۱). از دیدگاه همگنی بدنه سد، نیز می‌توان تیپ‌های مختلفی را شامل گردد که می‌تواند بصورت تیپ همگن، تیپ ناهمگن یا هسته رسی، و تیپ دیافراگمی طبقه‌بندی گردد (نجف‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). انتخاب نوع سد، یعنی اینکه خاکی، سنگریز، بتن ثقلی، قوسی، پایه‌ای و .... باشد. اما هنگامی که زمینی همراه با شرایط دیگر برای بنای سد خاکی مناسب تشخیص داده شد انتخاب یکی از انواع سد خاکی مطرح می‌شود. نوع سد خاکی در بدو امر تابع مصالحی است که در آن ناحیه یا در نزدیکی‌های آن موجود است. نوع

www.SID.ir

Archive

روش هیدرولیکی مصالح کوبیده نمی‌شوند تا مقاوم گردند. دامنه‌های که پوشش‌های محکم بتنی و آسفالتی و سنگی برآن‌ها قرار می‌گیرند می‌توانند بطور نسبی پرشیب‌تر ساخته شوند (Novak et al., 2017).

تراکم خاک در سدهای خاکی به روش‌های معمول تراکم صورت می‌گیرد. لایه‌های به ضخامت ۱۵ تا ۲۵ سانتیمتری در هر مرحله کوبیده می‌شوند. مشخصات مربوط به تراکم خاک‌ها، تأثیر انرژی داده شده (نوع غلتک، ضخامت لایه، تعداد رفت و برگشت)، تأثیر سرعت حرکت غلتک، تأثیر نوع خاک، و تأثیر درصد آب در تراکم و غیره از مسائلی است که نیاز به بررسی دقیق و مفصل دارند. برای یک نوع خاک مشخص، هر چه انرژی تراکم بیشتر باشد تراکم بیشتری صورت می‌گیرد، یعنی دانسیته خشک ماکزیمم حاصل بزرگ‌تر و درصد رطوبت بهینه کمتر است. با یک روش تراکم هر چه خاک مورد تراکم با دانه‌بندی گسترده‌تر و با پلاستیسیته کمتر باشد، تراکم‌پذیری آن بهتر است، بطوری‌که با درصد رطوبت کمتری، دانسیته خشک ماکزیمم بیشتری می‌دهد، و در حقیقت شن و ماسه مخلوط با مقداری سیلت ورس بهترین تراکم، و سیلت‌ها و رس‌های پلاستیک و نیز مثلاً ماسه با دانه‌بندی یکنواخت کمترین تراکم را نشان می‌دهد. تراکم خاک با رطوبت بیشتر از رطوبت بهینه را در سمت تر، و با رطوبت کمتر از رطوبت بهینه را تراکم در سمت خشک می‌نامند (زمردیان و چوچی، ۱۳۹۱). سمت تر و سمت خشک غیر از تفاوتی که در مصرف آب دارند و همین ممکن است پارامتری قابل توجه به لحاظ مصرف آب باشد، تفاوت دیگری نیز دارند که عبارت است از اینکه در سمت خشک تاثیر انرژی داده شده نسبت به سمت تر بسیار زیاد است، بطوری‌که با مصرف یک مقدار معین انرژی در سمت خشک می‌توان دانسیته را به مقدار معینی افزایش داد، در صورتی‌که با صرف همین مقدار انرژی در سمت تر، افزایش دانسیته بسیار کمتر است (نجف‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین باید توجه داشت که تراکم خاک در سمت تر موجب می‌شود که بافت خاک ریزدانه بطور نسبی بصورت موازی قرار گیرد، در حالی‌که در سمت خشک بطور نسبی بافت خاک پس از تراکم حالت در هم پیدا می‌کند و شالوده سدخاکی، هرچند باشد عمدتاً غیرقابل تغییر است، مگر لایه‌های سطحی آن که ممکن است برداشته شده و به‌جای آن در صورت لزوم خاک مناسب کوبیده شود. بنابراین وضعیت زمین محل یا شالوده تا حد زیادی در طرح سد خاکی موثر است. به عنوان یک عامل فراگیر بر تمام جنبه‌ها، مسأله اقتصادی بودن طرح نیز سرانجام مطرح می‌گردد (حاجیان، ۱۳۹۵). بطورکلی، چنانچه مواد نفوذ پذیر و نفوذناپذیر به فراوانی در دسترس باشند، ترجیحاً از سدهای هسته رسی (غیرهمگن) استفاده می‌گردد هرچند نسبت حجمی مواد نفوذناپذیر به نفوذپذیر نیز تابع هزینه‌های حمل و نقل آنها و نیز هزینه تهیه دانه‌بندی مورد نظر است. اگر سدی به صورت همگن ساخته شود ضرورتاً مواد تشکیل دهنده آن نفوذناپذیر و یا کم نفوذپذیر می‌باشد و با وجود این ضرورتاً باید به نوعی زهکش مجهز باشد تا دامنه پایین دست همواره از اشباع شدن در اثر زه مصون بماند. از طریقی اگر سد عمدتاً از مواد دانه درشت باشد ضرورتاً باید مغزه‌ای نفوذناپذیر در بخش میانی یا در محلی از دامنه بالا دست وجود داشته باشد تا آن‌را کاملاً آب‌بندی کند (بیرامی، ۱۳۹۷). چنانچه سد روی رسوبات نفوذپذیر ساخته شود، میزان حد بالائی اتلاف آب از آن باید در بدو امر تخمین زده شود. مقدار تخمینی این حد را باید با استفاده از رسم شبکه جریان و یا بر اساس نتایج تلمبه کردن آب در محل و نیز از آزمایشات آزمایشگاهی بدست آورد و چنانچه مقدار اتلاف آب به صورت زه بیش از مقداری باشد که برای پروژه سدسازی مورد نظر زیان بار باشد، لازم است از بعضی از انواع آب‌بندها استفاده شود. انتخاب هر کدام از بخش‌های سد چه از نظر نوع و چه از نظر اندازه، بطور مستقل صورت نمی‌گیرد بلکه تابعی از مجموعه شرایط موجود است. مثلاً انتخاب شیب دامنه‌ها، تابع نوع شالوده، مصالح، روش ساخت، و نوع سد است، بطوری‌که هرچند شالوده سست‌تر باشد در شرایط یکسان دیگر، شیب دامنه‌ها باید کمتر باشد و دامنه‌ها گسترده‌تر شده باشند. برای یک شالوده معین، دامنه‌های سد همگن کم شیب‌تر از دامنه‌های یک سد غیرهمگن است، و یا دامنه‌های یک سد هیدرولیکی باز هم کم شیب‌تر از دامنه‌های سد غلتکی است، زیرا در

www.SID.ir

Archive

حد تراکم مطلوب رسانید، در صورتی‌که برای خاک‌های چسبنده انرژی زیادتر و یا کوبه‌های سنگین لازم است و باید لایه‌ها را بطور معمول نازک انتخاب نمود (منافپور و قهرمان‌نژاد، ۱۳۹۰).

۲- شکست و گسیختگی سدهای خاکی

بعضی از این سدها حتی قبل از شروع بکار و بهره‌وری شکسته شده، و برخی پس از پرشدن مخزن یا در زمان-های بعد از آن تخریب شده‌اند. البته از تاریخ آن گزارش به بعد نیز موارد متعددی از خرابی‌ها وجود داشته است، ولی بهرحال تعداد سدهای خراب شده و بزرگی آن‌ها در اینجا مورد توجه نیست بلکه دسته‌بندی علت تخریب‌ها و نتیجه‌گیری کلی از آنها به منظور کاهش دادن خطرات شکسته شدن سد در طراحی‌های آینده از اهمیت خاصی برخوردار است (حاجیان، ۱۳۹۵). پژوهشگرانی که در این زمینه مطالعه کرده‌اند، آمار خرابی‌ها را به شکل‌های مختلفی طبقه‌بندی نموده‌اند تا اهمیت دقیق در پاره‌ای از مسائل سد را به خوبی نشان دهند. با این حال مواردی همچون انهدام حاصل از سرریز آب روی سد، در اثر زه غیر مجاز و شسته شدن خاک، گسیخته شدن دامنه‌ای در یال پایین‌دست، شسته شدن کناره تونل‌ها و گالری‌های سد، در اثر شسته شدن پوشش نفوذناپذیر بالا دست، تاثیر فاکتورهای زمین‌شناسی مانند زلزله و ... (نجف‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). بر اساس تجربه های گذشته و آمار موجود، اغلب خرابی و شکست سدها به علت عدم دقت کافی در اجرا و ساخت و یا عدم توجه در نگهداری‌های بعد از بهره‌برداری، صورت گرفته است علل تخریب سدهای خاکی را به طور کلی می توان در سه گروه عمده به شرح زیر طبقه بندی کرد (بیرامی، ۱۳۹۷):

تخریب هیدرولیکی: تخریب هیدرولیکی، به آن دسته از عوامل تخریب اطلاق می شود که بر اثر حرکت یا جریان مستقیم آب آزاد حاصل می‌شوند. عوامل تخریب هیدرولیکی عبارت از سرریز آب از روی بدنه‌ی سد فرسایش شیب بالادست در اثر موج، فرسایش ناشی از حرکت آب در پنجه‌ی سد، فرسایش ناشی از جریان سطحی روی شیب پایین دست است.

مقاومت نسبی بافت در هم بیشتر و نفوذپذیری آن نیز بیشتر است، بطوری‌که نفوذپذیری بافت موازی بطور نسبی صد تا هزار مرتبه کمتر از بافت غیرموازی است. به این علت توصیه می‌شود که مغزه سد که از جنس رسی است با رطوبت بهینه کوبیده شود، هر چند در شرایط یکسان مقاومت برشی آن کمتر از هنگامی است که در رطوبت کمتر از بهینه کوبیده شود، با وجود این در مورد مغزه، مساله نفوذناپذیری نقش اصلی را دارد. معمولاً غلتک‌های صاف تقریباً بافت درهم ایجاد می‌کنند و غلتک ویبره موجب بافت موازی می‌شوند (Berhane et al., 2013).

تأثیر تعداد رفت و برگشت غلتک در افزایش مقدار تراکم خاک، بر حسب نوع خاک و درصد رطوبت آن و نوع غلتک متفاوت است و همین علت نمودار راندمان تراکمی غلتک در برابر تعداد رفت و برگشت آن در همه شرایط یکسان نیست، ولی بهر حال این نمودار به یک حدی می-رسد که از آن حد به بعد ادامه دادن به رفت و برگشت غلتک، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش دانیسته خاک ندارد و یا به هیچ وجه تأثیری ندارد. معمولاً بین ۶ تا ۱۲ مرتبه رفت و برگشت غلتک، راندمان آن به حدی می‌رسد که می‌توان از تأثیر دفعات بعدی آن صرف‌نظر نمود. ممکن است بر حسب تشخیص طراح، میزان تراکم خاک سد در نقاط مختلف، یا در ترازهای مختلف یک سد متفاوت انتخاب شود و این به منظور تنظیم بخشی از نشست‌های نامساوی سد است، اما انتخاب تراکم متفاوت در یک تراز معین با احتیاط کامل باید صورت گیرد. آنچه باید مورد توجه کافی قرار گیرد اینست که لایه‌های پی در پی تراکم در یکدیگر قفل شده و حدفاصل آنها به صورت صفحه‌ای برای تمرکز زه و ایجاد افق‌های ضعیف تبدیل نگردد و نیز محیط‌های بلافاصله در حاشیه مجاری، کانال‌ها و تونل‌های خروج آب و موارد مشابه که بوسیله غلتک‌های سنگین کاملاً کوبیده نمی‌شوند، با هر روش ممکن به حد تراکم سایر نقاط آن افق برسد. معمولاً رعایت این نکته یعنی کوبیدن حاشیه‌های محدود که با غلتک‌های بزرگ مقدور نیست در مورد خاک‌های اصطکاکی ساده‌تر صورت می-گیرد، چه می‌توان با غلتک‌های کوچک و در لایه‌های ضخیم‌تر و یا با غلتک‌های دستی و نیز ارتعاشی آنها را به

www.SID.ir

Archive

می‌افتد و در مقابل در زمین‌های رسی-سیلتی نشست کامل در طول سال‌ها پس از تکمیل سد ادامه می‌یابد هرچند ممکن است قسمت عمده آن در ضمن ساخت سد صورت گیرد (Berhane et al., 2013). علاوه بر نشست زمین به علت وزن سد، به علت وزن آب روی دامنه بالادست و روی بستر مخزن نیز مقداری نشست پیش‌بینی می‌شود. البته اندازه‌گیری نشست بستر مخزن پس از پر شدن بسیار دشوار است، با وجود این در نقاطی این اندازه-گیری انجام گردیده و مقدار نشست را نشان می‌دهد. معمولاً در سدی که به خوبی متراکم شده باشد نشست تاج سد به علت نشست بدنه سد به ندرت ممکن است؛ ۰/۲ درصد ارتفاع سد تجاوز کند. در شرایط معمولی نشست تاج سد را به علت نشست بدنه سد ۲ درصد ارتفاع سد در نظر می‌گیرند و در نقاط زلزله خیز ۱ درصد ارتفاع نیز به علت زلزله اضافه می‌کنند. اما برای کل نشست تاج سد نمی‌توان رقمی را ذکر نمود؛ زیرا چنانچه اشاره شد بستگی به شرایط تعیین کننده دیگری دارد. محاسبه و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که تغییرات نشست در ارتفاع سد دارای حداکثری در محل‌های میانی بدنه سد یا بالاتر از میان ارتفاع سد است. بنابراین می‌توان بیان داشت که تغییرشکل ایجاد شده در سد خاکی می‌تواند بصورت تغییرشکل‌های ایجاد شده طی زمان ساخت، تغییرشکل-های ناشی از آبگیری مخزن و تغییرشکل‌های بلند مدت ناشی از تحکیم و خزش طبقه‌بندی نمود (منافپور و قهرمان‌نژاد، ۱۳۹۰). بطورکلی در حین مرحله آبگیری ممکن است دو نوع تغییر شکل در سد خاکی رخ دهد (Novak et al., 2017):

- تغییرشکل‌های ناشی از افزایش بار آب روی بدنه،
- تغییرشکل ناشی از تخریب ساختمان خاک در پوسته بالادست (رمبندگی) بر اثر غرقاب شدن.

۴- روش‌شناسی تحقیق و مبانی مدل‌سازی عددی

پلکسیس نرم‌افزاری المان محدود و پیشرفته برای تحلیل تغییرشکل‌ها و پایداری می‌باشد و در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. معمولاً در مسائل مهم

تخریب ساختمانی: تخریب ساختمانی سدهای خاکی که به علت کمی نیروهای مقاوم در مقابل نیروهای مخرب ایجاد می‌شود، تقریباً ۲۰ درصد کل خرابی‌ها را تشکیل می‌دهد، خرابی‌های ساختمانی ممکن است قبل از بهره-برداری از سد و ضمن ساخت آن حادث شود و یا سال‌ها پس از بهره‌برداری، در اثر عوامل تحریک‌کننده مانند زلزله یا در اثر تخلیه‌ی سریع مخزن، اتفاق بیفتد. در مواردی نیز پس از اولین آبگیری کامل مخزن، دامنه‌ی پایین دست وضعیت بحرانی پیدا می‌کند، که احتمال تخریب وجود دارد.

تخریب حاصل از نشت آب: حرکت آب در سد، یکی از مشکلات فرا روی مهندسی ژئوتکنیک مربوط به سد خاکی است. بطورکلی در مسائل مربوط به نشت، توده خاک یک محیط پیوسته محسوب می‌شود، که دارای تعداد بی-شماری منافذ به هم پیوسته است. بنابراین شکست اجتناب‌ناپذیر است و برای بهینه‌سازی دبی عبوری باید به محاسبه‌ی دقیق نشت پرداخت. در تمامی سدها، صرف‌نظر از نوع مصالح بکار رفته در بدنه و یا نحوه طراحی، احتمال وقوع نشت وجود داشته و این آب می‌تواند از مقادیر بسیار ناچیز تا حجم‌های قابل توجه، تغییر یابد. نشت آب در پایین‌دست سدها می‌تواند به صورت افزایش رطوبت، ایجاد نرمی در خاک همراه با توسعه پوشش گیاهی، جریان‌های متمرکز و کانالی شکل از آب و یا به شکل افزایش آبدهی چشمه‌ها و بالا آمدن سطح پیزومتری آب‌زیرزمینی در پایین دست مشاهده شود و تا غیراقتصادی شدن طرح پیش رود. به دست آوردن مقدار نشت، به طراح این امکان را می‌دهد که مشکلات نشت را پیش‌بینی و خصوصیات جریان موردنظر را به دست آورد و با صرف کمترین زمان، طراحی بهینه را انجام داده و سریعاً تصمیم‌گیری نماید.

۳- نشست‌پذیری سدهای خاکی حین آبگیری

به علت وزن سازه سد که بار قائم و توزیع شده بر یک محوطه وسیع است، زمین زیر آن الزاماً نشست خواهد داشت. مقدار و نوع این نشست بستگی به نوع زمین و مقدار بار دارد. در زمین‌های سنگی و آبرفتی شن و ماسه-ای نشست تقریباً بطور کامل در ضمن ساختن سد اتفاق

www.SID.ir

Archive

انجام می‌شود. در تحلیل تحکیم در نرم‌افزار PLAXIS، می‌توان مدت زمان تحکیم را در نظر گرفت.

بطورکلی روند شبیه‌سازی در این پژوهش می‌تواند بصورت طراحی مدل هندسی، تشکیل مش‌های المان محدود و تعیین الگوهای رفتاری، شرایط مرزی و ویژگی-های مصالح ژئوتکنیکی سد معرفی گردد که سبب آماده-سازی مدل عددی می‌گردد. مدل آماده‌سازی شده بعد از اجرای مدل برای ارزیابی‌های نشست‌پذیری مورد استفاده قرار گرفته است. مراحل ذکر شده بصورت مختصر در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به اینکه مطالعه حاضر یک مطالعه موردی است که برای سد کبودوال پیاده‌سازی شده است. بنابراین مدل هندسی تهیه شده برای ارزیابی باید برابر مقطع طراحی شده برای سد مذکور باشد. شکل (۱) نمایی از مقطع ارائه شده از سد را نشان داده که به عنوان مدل هندسی در این تحقیق وارد شده است. لازم به بیان است تمامی ابعاد مدل ارائه شده بصورت کامل و بدون تغییر در مدل عددی لحاظ گردیده است. پس از آن که بر اساس توضیحات بخش‌های قبل، مدل هندسی ترسیم گردید، نوبت به تخصیص شرایط مرزی و اولیه در نرم‌افزار می‌رسد. در حالت استاتیکی شرایط مرزی با استفاده از تکیه‌گاه‌هایی مدل می‌شود که این تکیه‌گاه‌ها باید با شرایط مرزها در مسئله هم‌خوانی داشته باشد. انواع شرایط مرزی متعارف در نرم‌افزار PLAXIS، که پس از ساخت شکل هندسی مدل اعمال می‌شوند، عبارت‌اند از: گیرداری انتقالی یک گره در راستای x، گیرداری انتقالی یک گره در راستای y، گیرداری انتقالی گره در هر دو راستای x و y. گزینه Standard Fixities در پلکسیس برای اختصاص شرایط مرزی در مسائل متعارف ژئوتکنیکی (نظیر گودبرداری‌ها)، تعبیه‌شده است که به شرح زیر است:

- مرزهای قائم (طرفین مدل) که عمود بر محور X بوده و در جهت X مقید می‌شوند.
- مرز افقی (صفحه تحتانی) که عمود بر محور X بوده و در هر دو جهت X و Y مقید می‌شوند.
- سطح زمین که در هر دو راستای X و Y آزاد است.

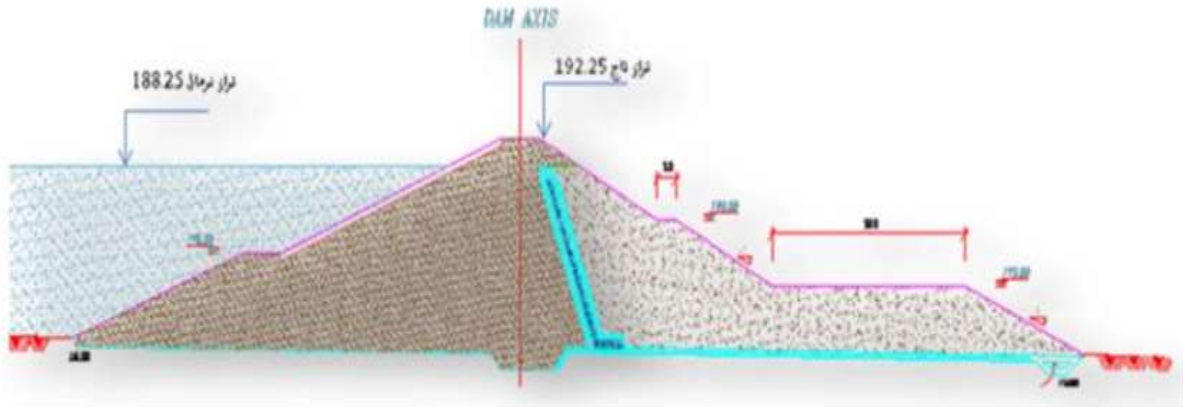
ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک‌ها بسته به هدف مورد نظر،لازم است. با این نرم‌افزار می‌توان خاک‌برداری و خاکریزی مرحله‌ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان‌های مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدل‌سازی نمود. اولین ویرایش این نرم‌افزار به منظور آنالیز سدهای خاکی احداث شده بر روی خاک‌های نرم درقسمت‌های کم‌ارتفاع و پست کشور هلند و به سفارش مدیریت منابع آب آن کشور در دانشگاه صنعتی Delft در سال ۱۹۸۷ تهیه و سپس در سال ۱۹۹۳ قابلیت‌های آن گسترش داده شده که توسط موسسه Center for Civil Engineering Research and Codes نیز مورد تأئید و پشتیبانی قرار گرفته است. در این نرم افزار مدل‌های رفتاری موهر- کلمب، مدل سخت شوندگی هذلولی، مدل نرم شوندگی (مدلCam-Clay) و مدل نرم شوندگی خزشی قابل بکارگیری است، همچنین با این نرم‌افزار می‌توان فرایند ساخت و حفاری را توسط فعال کردن و غیر فعال کردن المان‌ها در مرحله محاسبات مدل کرد. نمونه‌ای از کاربرد این قابلیت، انجام آنالیز لایه به لایه در پایداری شیب‌ها، سدها و تونل‌ها می‌باشد. محاسبات پلاستیک در پلکسیس، برای در نظر گرفتن تغییر شکل‌های الاستوپلاستیک که تغییرات فشار آب حفره‌ای در آن لحاظ نمی‌شود بکار می‌رود. ماتریس سختی در این محاسبات در نرم‌افزار PLAXIS، در صورت استفاده نکردن از به روز رسانی مش‌بندی براساس مدل تغییر نیافته اولیه ساخته می‌شود. این حالت از نرمافزار PLAXIS در اغلب تحلیل‌های ژئوتکنیکی کاربرد دارد. نکته دیگر در این نوع از محاسبه در نرم‌افزار PLAXIS، عدم در نظر گرفتن اثر زمان می‌باشد که در نتیجه آن در مدل‌سازی مسائلی که زمان در آن نقش مهمی ایفا می‌کند کاربرد ندارد و می‌بایست از نوع دیگری از محاسبه در نرم‌افزار PLAXIS استفاده نمود. در بررسی مدل‌های شامل خاک ریزدانه به همراه تراز آب زیرزمینی در نرم‌افزار PLAXIS، نیاز به در نظر گرفتن پدیده‌ی تحکیم و زائل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای می‌باشد. این روند در نرم‌افزار PLAXIS، پس از تحلیل پلاستیک زهکشی نشده‌و بدون بارگذاری اضافی

www.SID.ir

Archive

ایجاد گردد، حالت تنش اولیه و وضعیت اولیه باید مشخص شرایط آب) و دیگری مدی برای مشخص کردن نمای کلی هندسه اولیه و تولید میدان تنش مؤثر اولیه می‌باشد.

هرگاه هندسه مدل رسم و مش‌بندی اجزاء محدود شود. این عمل به‌وسیله قسمت شرایط اولیه ۴ در نرم‌افزار پلکسیس قابل انجام است. شرایط اولیه شامل دو مد مختلف است: یک مد برای ایجاد فشار آب اولیه (مد



شکل شماره (۱) : مدل هندسی سد کبودوال

دهنده بدنه و بستر سدکبودوال که شامل سه بخش اصلی فیلترو پوسته و پی است. این بخش‌ها بصورت جداگانه و با انجام نمونه‌برداری‌های گسترده ژئوتکنیکی اقدام به برآورد خصوصیات ژئوتکنیکی سد گردیده که در جدول (۱) آورده شده است. برای برآورد این خصوصیات از آزمایشات برجا و آزمایشگاهی ژئوتکنیکی مانند بارگذاری صفحه‌ای، آزمون تک محوری و سه محوری، برش مستقیم برجا و آزمایشگاهی، آزمون حدود اتربرگی، دانه‌بندی و هیدرومتری و سایر آزمایشات مطرح شده در گزارش و شرح کار مهندسین مشاور سد صورت گرفته است. از روی نتایج این آزمایشات، خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح برای سد تخصیص داده می‌شود. همچنین شکل (۲) مدل هندسی نهایی سد بهمراه شرایط مرزی و تخصیص خواص مصالح طراحی شده در این مطالعه را نشان داده است.

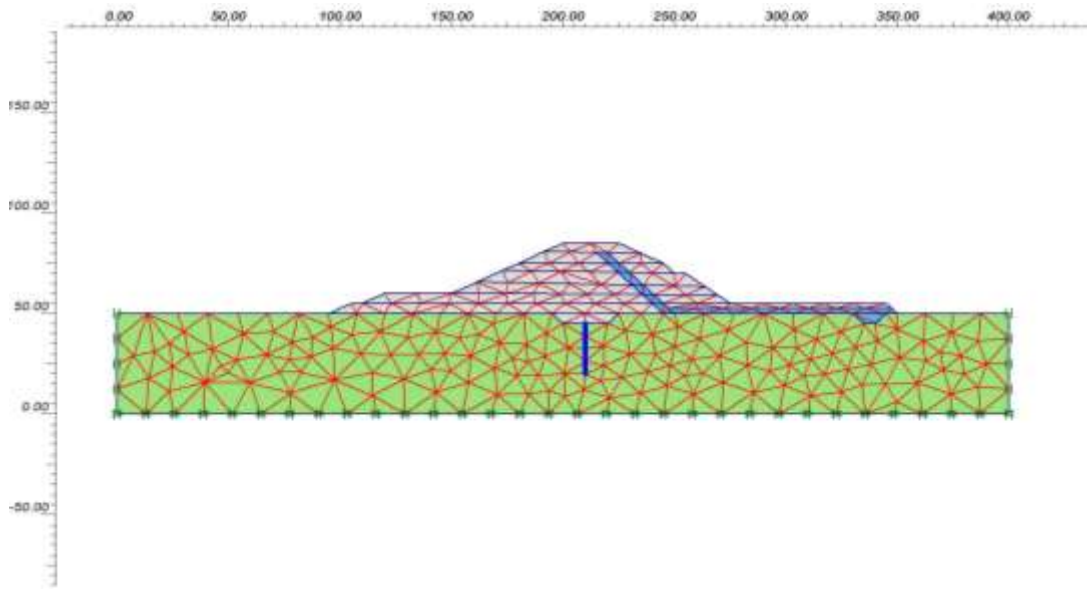
سد کبودوال همگن و دارای فیلتر و زهکش مایل است. مخزن آن خارج از حوضه‌ی آبریز اصلی است. طول تاج ۱۳۷۲ متر و حداکثر ارتفاع از پی ۳۳/۲۵ متر است. ارتفاع از بستر ۳۰/۵ متر و هم چنین تراز بستر سد ۱۶۲ متر از سطح دریا و حداقل تراز آب در مخزن ۱۷۱ متر از سطح دریا و نیز حداکثر تراز نرمال آب ۱۸۸/۲۵ متر از سطح دریا است. تراز تاج سر ریز ۱۸۹/۶ متر از سطح دریا و تراز تاج سد ۱۹۲/۲۵ متر از سطح دریا است. ضخامت در پی ۱۰ متر و آب قابل تنظیم سالیانه حدود ۵۵ میلیون متر مکعب است. شیب شیروانی بالادست از پی تا تراز ۱/۱۷۵ قائم به ۳/۵ افقی است و از تراز ۱۷۵ تا تاج سد، ۱ قائم و ۳/۳ افقی است. اما شیب شیروانی پایین دست از پی تا تراز ۱۷۰، ۱قائم به ۳ افقی است و از تراز ۱۷۰ تا تراز ۱/۱۸۰ قائم و ۲۰۵ افقی است و از تراز ۱۸۰ تا تاج سد، ۱ قائم و ۲/۵ افقی است. مشخصات مصالح تشکیل

جدول نمونه شماره (۱): خصوصیات ژئوتکنیک مصالح سد کبودوال

خصوصیات	نوع	γ_{unsat} (KN/m³)	γ_{sat} (KN/m³)	E_{ref} (KN/m²)	ν	C_{ref} (KN/m²)	ϕ (°)	$K_{x,y}$ (m/day)
پی	Undrain	۱۷	۲۰	۱۰۰۰۰	۰/۳	۱۸	۲۹	۸/۶۸×۱۰$^{-۳}$
بدنه	Drained	۱۹	۲۳	۱۰۰۰۰	۰/٤	۲۲	۲۵	۸/۶۸×۱۰$^{-۳}$
فیلتر	Drained	۲۰	۲۱	۲۵۰۰	۰/۲۵	۱۲	۳۶	۸/۶۸×۱۰$^{-۳}$

www.SID.ir

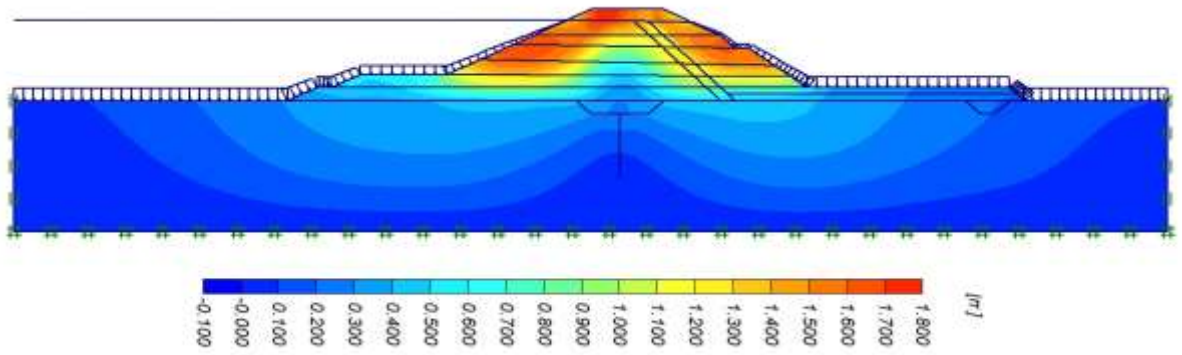
Archive



شکل شماره (۲) : مدل هندسی تهیه شده از سد کبودوال

۵- نتایج شبیه‌سازی عددی و تحلیل نشست‌پذیری در حین آبگیری سد

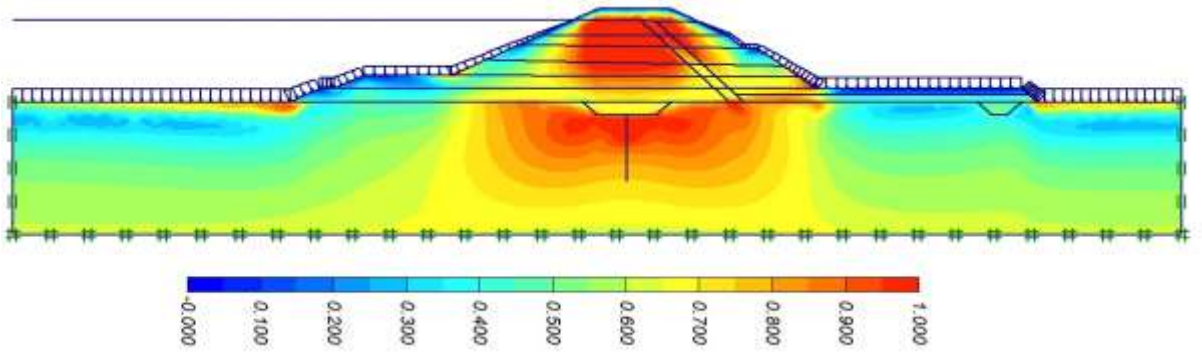
همانطور که در بخش روش‌شناسی به روند مدل‌سازی عددی اشاره گردیده؛ می‌توان بیان داشت که در مرحله اول بررسی رفتار گسیختگی و تغییرشکلی بدنه و بستر سد کبودوال از رویکرد عددی المان محدود و نرم‌افزار PLAXIS بهره گرفته شده است. در این بخش به ارائه نتایج مدل بعد از آبگیری سد پرداخته شده که به منظور بررسی تغییرشکل‌ها و شرایط گسیختگی حین آبگیری در سد توجه داشته است. اشکال (۳) تا (۵) نتایج مربوط به این ارزیابی را نشان داده است.



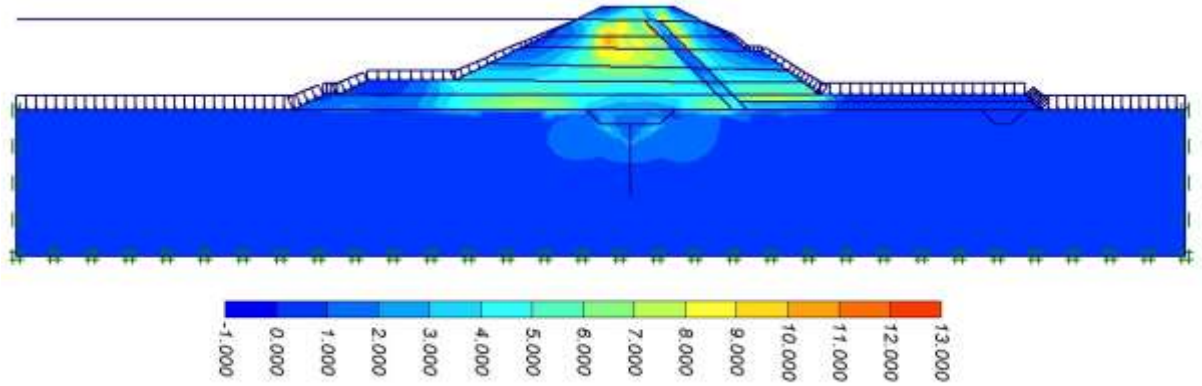
شکل شماره (۳) : مدل جابجایی تهیه شده از سد کبودوال در حین آبگیری

www.SID.ir

Archive



شکل شماره (۴) : مدل توزیع تنش برجا در محدوده سد و مخزن سد در حین آبگیری



شکل شماره (۵) : مدل شرایط تغییرشکلی در محدوده سد در حین آبگیری

یک سد بدون هسته می‌باشد که فیلتر نقش زهکشی کامل از بدنه و پی سد را بر عهده دارد.

- برپایه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مشاهده گردیده که حداکثر جابجایی و تغییرشکل ثبت شده برای محدوده سد برابر ۱/۸ متر در مرحله آبگیری بوده است.
- به دلیل شرایط تنش برجا در محدوده سد، در مرحله آبگیری، تمرکز تنش در محدوده فیلتر و پرده آب‌بند بوده است.

باتوجه به این نتایج این مطالعه مشاهده می‌گردد، تغییرشکل‌های برآورد گردیده هر دو بخش سد شامل بدنه و بستر را تحت تاثیر قرار داده است. نرخ جابجایی کل رخداده در بدنه سد تمرکز داشته و بیشترین جابجایی ثبت شده در محدوده تاج و یال‌های سد درحد قرار دادر که برابر ۱/۸ متر برآورد شده است. از سوی دیگر شرایط تنش در بدنه و بستر سد کبودوال برآورد گردیده که تنش کل نسبت به عمق افزایش نشان می‌دهد اما تنش برجا محاسبه شده به دلیل وجود آب و آبگیری سد در بدنه سد بخصوص محدوده فیلتر و پرده آب‌بند تمرکز دارد.

۹- نتیجه‌گیری

باتوجه به دستاوردهای برآورد گردیده در این پژوهش؛ می‌توان نتایج را بصورت زیر پارامتربندی کرد:

- سد کبودوال سد خاکی با فیلتر میانی بصورت همگن ساخته شده و بهره‌برداری بصورت مرحله‌ای و پیوسته صورت گرفته است. این سد

مراجع

۱. بیرامی، م. (۱۳۹۷). سازه‌های انتقال آب. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۴۶۴ ص.

۲. حاجیان، ن. (۱۳۹۵). اصول مهندسی سد و سازه‌های آبی (جلد ۱). انتشارات گویا، ۲۹۲ ص.

۳. زمردیان، م.ع.؛ چوچی، ح. (۱۳۹۱). تحلیل عددی رفتار سدهای خاکی- سنگریزه‌ای حین ساخت و اولین آبگیری (مطالعه موردی: سد مسجد سلیمان). مجله علوم و فنون

www.SID.ir

Archive

کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۶(۶۲): ۲۲۹-۲۴۷.

۴. منافپور، م.، قهرمان‌نژاد، م. (۱۳۹۰). بررسی عددی جریان از هسته رسی و پی سنگی سد خاکی قلعه‌چای. کنفرانس ملی هیدرولیک، دانشگاه امام خمینی قزوین، قزوین، ایران.

۵. نجف‌پور، ن.، شایان‌نژاد، م.، صمدی، ح. (۱۳۹۳). بررسی الگوی عبور خطوط نشت و طراحی زهکش پنجه در سدهای خاکی همگن روی پی نفوذناپذیر با استفاده از مدل فیزیکی و نرم‌افزار PLAXIS. نشریه آب و خاک، ۲۸(۳): ۴۵۱-۴۶۱.

6. Berhane, G., Martens, K., Al Farrah, N., & Walraevens, K. (2013). Water leakage investigation of micro-dam reservoirs in Mesozoic sedimentary sequences in Northern Ethiopia. Journal of African Earth Sciences, 79, 98-110
7. Novak P., Moffat A.I.B., Nalluri C., Narayanan R. (2017). Hydraulic Structures. CRC Press, 730 p.

www.SID.ir