Archive

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

مدل‌سازی عددی و تحلیل پایداری بدنه سد خاکی کرخه در مرحله آبگیری توسط رویکرد المان محدود و نرم‌افزار Seep/W

فرشاد کیانی ده کیانی[۱] ، سید مصطفی مرتضوی[۲]
۱-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
۲-استادیار دانشگاه ولی عصر (عج) دانشگاه رفسنجان
Email: farshadkiani015@gmail.com

چکیده

سدهای خاکی را می‌توان به عنوان یکی از مهمترین سازه‌های ژئوتکنیکی جهان بر شمرد که به لحاظ پایداری باید مورد توجه قرار گیرند. نتیجه ناپایداری (بخصوص در مرحله آبگیری) پایین دست سد معمولاً منجر به فجایع بزرگ مقیاس مانند شکست سد، تخریب شهرها و تاسیسات پایین‌دستی و... می‌شود. بنابراین در مرحله طراحی، پایداری سدهای خاکی توسط رویکردهای عددی ارزیابی شده و شرایط آبگیری سد و نقش آن در ایجاد تغییر شکل‌های بدنه سد خاکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر نیز به بررسی شرایط نشت و پایداری سد خاکی کرخه طی مرحله آبگیری سد توسط روش عددی FEM و نرم‌افزار Seep/W پرداخته شده است. برپایه نتایج حاصل از تحلیل آبگیری بحرانی مشخص شده که همزمان با افزایش آب پشت سد در مدل مقدار فشار آب و هد نیز بیشتر می‌شود. با افزایش هد کانتورهای نشان‌دهنده هد در بدنه سد نیز تغییر می‌کند. اما بطورکلی در راستای محوری سد، از بالا دست به سمت پایین دست میزان هد کل افت نشان می‌دهد. این شرایط برای تحلیل بصورت تراوش پایدار در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: مهندسی ژئوتکنیک، سدهای خاکی، آبگیری سد، نشت، پایداری.

۱- مقدمه

سیستم‌های زهکشی در بدنه و پی سدهای خاکی، تمهیداتی هستند که برای جمع‌آوری و هدایت آب‌های نشت یافته به نواحی پایین‌دست سد طراحی و به اجرا در می‌آیند. این سیستم‌ها اصولاً شامل قرار دادن یک لایه مصالح درشت دانه با نفوذپذیری خیلی زیاد و ابعاد معین در قسمت خاصی از بدنه و پی سد است (وفائیان، ۱۳۹۵). ابعاد و نفوذپذیری مصالح سیستم‌های زهکش باید به گونه‌ای انتخاب شوند که سیستم قادر به تخلیه‌ی مطمئن کلیه‌ی آب‌های ورودی بر اثر پدیده‌ی نشت از بدنه و پی باشد. ارتفاع پنجه سنگی را می‌توان تا ارتفاع سد در نظر گرفت. خط الرأس پنجه سنگی باید به قدر کافی بالاتر از سطح آب جمع شده در پائین دست باشد تا از هرگونه اثرات موج روی جبهه پایین دست جلوگیری نماید. جبهه ورودی آب در پنجه سنگی با شیب یک به یک و جبهه خروجی آن ادامه شیب پائین دست ساخته می‌شود. این مسئله سبب می‌گردد تا حین عملیات آبگیری سدهای خاکی مشکلات ژئوتکنیکی، ناپایداری‌ها و گسیختگی‌ها از پیش طرح‌ریزی و کنترل

www.SID.ir

Archive

کردد. عامل اصلی در ارزیابی‌های ژئوتکنیکی و تحلیل رفتاری سدهای خاکی بررسی میزان تغییرشکل‌های رخ داده در بدنه سد بصورت پیوسته در طی مراحل طراحی، ساخت و پس از آن می‌باشد تا بتوان برپایه آن‌ها تمهیدات لازم را بری کنترل، مهار و بهسازی شرایط ارائه گردد (Das, 2008). بطورکلی انواع تغییر شکل‌هایی که ممکن است در یک توده خاکی رخ دهد را می‌توان به سه دسته تغییرشکل‌های الاستیک یا ارتجاعی، پلاستیک یا خمیری و تغییر شکل‌های ناشی از فشردگی تقسیم کرد. در حالت الاستیک با برداشتن نیروهای مؤثر جسم به حالت اول بر می‌گردد درحالی‌که در حالت تغییرشکل خمیری با حذف نیروها حالت اولیه جسم بازیابی نمی‌شود. تغییر شکل‌های فشردگی نیز مخصوص محیط‌های دانه‌ای است و در اثر لغزش و یا حرکت دانه‌ها بر روی هم و کاسته شدن حجم حفرات بین ذرات صورت می‌گیرد (قنبری، ۱۳۹۳). بنابراین تعاریف، تغییرشکل-های ایجاد شده در یک سد خاکی را می‌توان به سه گروه شامل تغییر شکل‌های ایجاد شده طی زمان ساخت، تغییر شکل‌های ناشی از آبگیری مخزن، تغییر شکل‌های بلند مدت ناشی از تحکیم و خزش تقسیم‌بندی نمود (Das, 2013). در این مطالعه تغییر شکل‌های ناشی از آبگیری مخزن مورد توجه بوده که به عنوان یک عامل مهم در ایجاد ناپایداری و گسیختگی در بدنه سد خاکی مورد توجه می‌باشد. این ناپایداری در صورت عدم کنترل سبب شکست گسترده در بدنه سد و تخریب کامل پایین-دست و سازه‌های پیرامونی می‌شود. در حین مرحله آبگیری ممکن است دو نوع تغییرشکل: (۱) تغییرشکل ایجادشده ناشی از افزایش بار آب بر روی بدنه و (۲) تغییرشکل ناشی از تخریب ساختمان خاک در پوسته بالادست بر اثر غرقاب شدن (رمبندگی) در سد خاکی رخ دهد. آبگیری اولیه دو تأثیر مهم بر سد دارد. اول فشار آب وارد بر بدنه و دوم تأثیر خیس‌شدن (wetting). در طول روند خیس‌شدن مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی و همچنین مقدار مدول یانگ تغییر می‌کند. مدول یانگ موادی که در ناحیه غوطه‌وری قرار گرفته‌اند بدلیل توسعه نیروی شناوری کاهش می‌یابد (وفائیان، ۱۳۹۵). بنابراین میزان نرخ تغییرشکلی بصورت مضاعف افزوده شده و عملاً تغییرشکل را وابسته به زمان می‌نماید. این مسئله نیز بر روی میدان تنش تاثیر داشته و سرعت گسیختگی را افزایش می‌دهد. در نهایت با اعمال بار نشت و جریان پیوسته از بالادست تخریب سد محتمل خواهد بود. بنابراین طراحی شرایط جریان و تحلیل پایداری سد در مرحله آبگیری یک اولویت برای ساخت سدهای خاکی به شمار می‌آید.

۲- مدل رفتاری مکانیک خاکی و معیار گسیختگی در سدهای خاکی

در تحلیل‌های مکانیک خاکی مربوط به تحلیل سدهای خاکی، معیار مور-کولمب بکار برده می‌شود. معیار مور-کولمب برای حالات رفتار الاستوپلاستیک خاک با اعتبار کافی مورد پیاده‌سازی است. خاصیت پلاستسیسته یا خمیری متناسب با توسعه کرنش‌های برگشت ناپذیر است. برای سنجش اتفاق افتادن حالت خمیری در یک خاک از تابع تسلیم که تابعی از تنش‌ها و کرنش‌ها است استفاده می‌شود. تسلیم پلاستیک را متناسب با حالت صفر این تابع تعریف می‌کنند که این شرایط در سطحی که تنش اصلی وارد می‌شود، اتفاق می‌افتد. یک مدل پلاستیک کامل مدلی با یک صفحه تسلیم ثابت است، صفحه تسلیمی که با پارامترهای مدل بصورت کامل تعریف شده و تحت تأثیر کرنش‌های پلاستیک نباشد. تمامی نقاطی که در روی صفحه تسلیم واقع شده‌اند رفتاری الاستیک داشته و کرنش‌های برگشت پذیر دارند. مدل رفتاری موهر-کولمب نیاز به پنج پارامتر اصلی دارد که این پنج پارامتر را می‌توان با استفاده از آزمون‌های معمول بر روی نمونه‌های خاک بدست آورد. این پارامترها عبارتند از:

- مدول یانگ (E) برحسب kN/m^2،
- نسبت پواسون (υ)،
- زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) برحسب درجه،
- چسبندگی (c) برحسب kN/m^2،
- زاویه اتساع (ψ) برحسب درجه.

همانگونه که ذکر شد برای سطوح تنش در صفحه تسلیم، رفتار نقاط الاستیک بوده و از قانون هوک برای رفتار الاستیسیته خطی پیروی می‌کند. به همین خاطر نیاز به پارامترهای مدول یانگ و نسبت پواسون است. مدول یانگ بعنوان مدول سختی

www.SID.ir

Archive

اساسی برای مدل الاستیک و مدل موهر- کولمب استفاده می‌شود. همچنین جهت محاسبه نشست‌ها و نحوه توزیع تنش‌ها در توده خاک نیاز به محاسبه این پارامترها می‌باشد. این دو پارامتر را می‌توان از نتایج آزمون سه محوری استخراج نمود (Das, 2008). البته باید توجه کرد لایه‌های زیرین نسبت به لایه‌های بالایی مدول یانگ بیشتری دارند. همچنین طی عملیات بارگذاری و باربرداری سختی خاک نسبت به سختی اولیه افزایش می‌یابد. علاوه بر آن سختی بستگی به مسیرهای تنش موجود در خاک نیز دارد.

۳- مطالعه موردی سد کرخه

رودخانه کرخه از مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس در نواحی غرب و شمال غرب کشور سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی حدود ۹۰۰ کیلومتر در امتداد شمال به جنوب در نهایت به مرداب هورالعظیم می‌ریزد. حوزه آبریز این رودخانه در حدود ۴۲ هزار کیلومتر مربع بین ۴۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی بوده پس از رودخانه‌های کارون و دز، سومین رود پرآب کشور می‌باشد. سرشاخه-های اصلی رودخانه کرخه، رودخانه‌های سیمره، کشکان، قره سو، گامسیاب، و چرداول هستند. مطالعات اولیه در این حوزه آبریز از سال ۱۳۳۵ توسط مشاوران خارجی شروع شده و در نهایت در سال ۱۳۵۸ پیشنهاد احداث سد مخزنی در محلی به نام کرخه صفر ارائه گردید. پس از پیروزی انقلاب اسلامی این مطالعات مورد بازنگری قرار گرفته و محور کنونی سد که در ۲۱ کیلومتری شمال غربی اندیمشک قرار دارد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر می باشد برای احداث سد انتخاب شد. عملیات اجرایی طرح از اسفند ماه سال ۱۳۷۰ با شروع احداث سیستم انحراف آغاز گردیده و با پایان آن در میانه سال ۱۳۷۴ و انحراف آب رودخانه، مرحله احداث بدنه شروع شد. عملیات خاکریزی بدنه سد تا سال ۱۳۸۰ به طول انجامید، اما آبگیری سد در اواخر سال ۱۳۷۸ و زمانی که کار احداث بدنه هنوز به اتمام نرسیده بود انجام گرفت. اهداف اجرای طرح سد مخزنی کرخه بصورت زیر تعریف شده است (وزارت نیرو، ۱۳۸۱):

- تأمین و تنظیم آب جهت آبیاری بیش از ۳۴۰ هزار هکتار اراضی پایین دست، دشت‌های پای پل و همچنین دشت-های حمیدیه، قدس، دشت آزادگان، دشت عباس، فکه و عینخوش واقع در شمال غربی و غرب خوزستان،
- کنترل سیلاب‌های مخرب رودخانه و جلوگیری از خسارات ناشی از آن،
- تولید انرژی برق آبی به میزان ۹۳۴ گیگاوات ساعت در سال،
- به علت شیب نسبتا کم رودخانه، دریاچه سد از حجم قابل ملاحظه ای برخوردار است. سیستم انحراف آب.

سد کرخه شامل یک کالورت بتنی چهار دهانه، سازه‌های آبگیر ورودی، حوضچه آرامش انتهایی، پیش فرازبند، فرازبند و نشیب‌بند می‌باشد. بر اساس طرح بدنه، چون فرازبند سد جزئی از بدنه اصلی در نظر گرفته شده بود از یک پیش فرازبند برای خشک نگه داشته شدن آن استفاده شد. فرازبند سد به طول ۹۵۰ متر و ارتفاع ۵۲ متر و عرض تاج ۲۰ متر احداث شد. دهانه-های کالورت انحراف نیز به شکل هشت ضلعی با ابعاد ۱۰/۵ جنس بتن مسلح می‌باشد. جهت استهلاک انرژی آب خروجی از کالورت در انتهای آن از حوضچه آرامشی با عرض ۳۵ متر و طول ۱۲۸/۵ متر استفاده شده است. از مجاری کالورت انحراف در زمان بهره‌برداری از سد بعنوان تخلیه کننده‌های عمقی نیز استفاده می‌شود. به همین دلیل در سه مجرا از مجاری آن تجهیزاتی جهت تنظیم دبی نصب شده و از مجرای چهارم نیز بعنوان راه دسترسی به این تأسیسات استفاده می‌گردد. سد کرخه بزرگترین سد خاکی کنونی ایران از نظر حجم بدنه و هم چنین ظرفیت مخزن است. شکل (۱) موقعیت مکانی سد کرخه را نشان داده است.

www.SID.ir

Archive

شکل شماره (۱) : موقعیت مکانی سد کرخه توسط گوگل ارث

۴- روش تحقیق

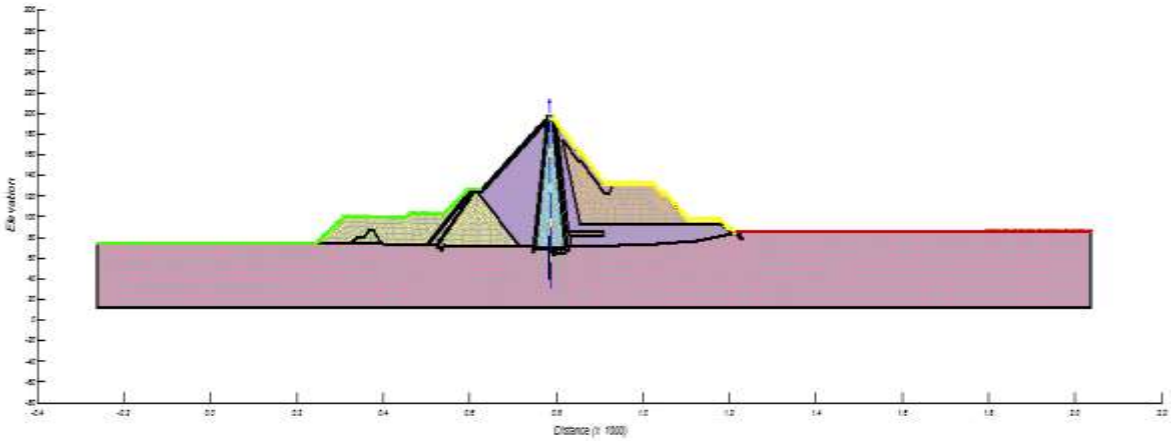
به منظور انجام مطالعات رفتار تغییرشکلی سد کرخه از نرم‌افزار عددی Seep/W به عنوان یک واحد تحلیلی از مجموعه نرم‌افزاری Geo-studio بهره گرفته شده است. کاربرد اصلی Seep/W به منظور ارزیابی شرایط بحرانی آب در بدنه سدهای خاکی، خاکریزها و زمین به منظور ارزیابی رفتاری و تغییر شکل‌های ایجاد شده در آن‌ها به واسطه جریان سیال می‌باشد که توسط رویکردهای عددی المان محدود (FEM) به منظور تحلیل شرایط جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل و خاک پیاده سازی شده است. بطورکلی روند تحلیل در این نرم افزار برای ارزیابی رفتاری سد کرخه در سه مرحله اصلی شامل موارد زیر اجرا گردیده است و نتایج حاصل از تحلیل بصورت جامع برای بررسی تغییرشکل‌های حاصل در سد و بستر آن مورد استفاده است:

- شبیه سازی هندسی و شرایط: به منظور تهیه مدل هندسی سد است.
- تخصیص خواص مکانیکی و شرایط رفتاری: به منظور ارائه و اختصاص خصوصیات مکانیک خاکی و معیار گسیختگی تحلیلی به مدل هندسی سد است.
- شبیه سازی مکانیکی: به منظور انجام تحلیل و استخراجی داده ها و نتایج.

برای شبیه‌سازی هندسی در نرم‌افزار Seep/W، ابتدا هندسه مسئله رسم می‌شود و سپس ویژگی‌های مصالح به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. هندسه مسئله با توجه به نقشه‌های اجرایی سد ترسیم شده که در شکل (۲) نشان داده شده است. در هندسه مسئله از ترسیم جزئیات خودداری شده و بخش های اصلی سد یعنی هسته و دیوار آب‌بند و فیلتر و زهکش‌های افقی و عمودی ترسیم شده است. لازم به بیان است که در این شکل، شرایط مرزی نیز لحاظ شده است. این شرایط در نرم‌افزار Seep/W برای انجام بهتر تحلیل سد، مش‌های تعریف شده برای تحلیل، کوچک در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی مصالح بصورت همگن و همسان تعریف شده است به عبارت دیگر نفوذ پذیری مصالح در جهت افقی و عمودی یکسان و برابر می‌باشد. در این تحلیل از ویژگی های مقاومتی مصالح صرف نظر شده و تنها تحلیل تراوش صورت می‌گیرد. در ابتدای تحلیل نوع تحلیل در نرم افزار می بایست مشخص گردد. این تحلیل در بصورت آنالیز تراوش پایدار انجام می‌شود. بنابراین در تحلیل فرض می-شود شرایط مسئله در طول زمان ثابت باشد. جدول (۱) خصوصیات رفتاری مدل را نشان داده است.

www.SID.ir

Archive



شکل شماره (۲) : مدل هندسی بهمراه شرایط مرزی و خصوصیات رفتاری برای سد کرخه

جدول شماره (۱) : خصوصیات ژئوتکنیک مصالح اختصاص داده شده در شبیه سازی

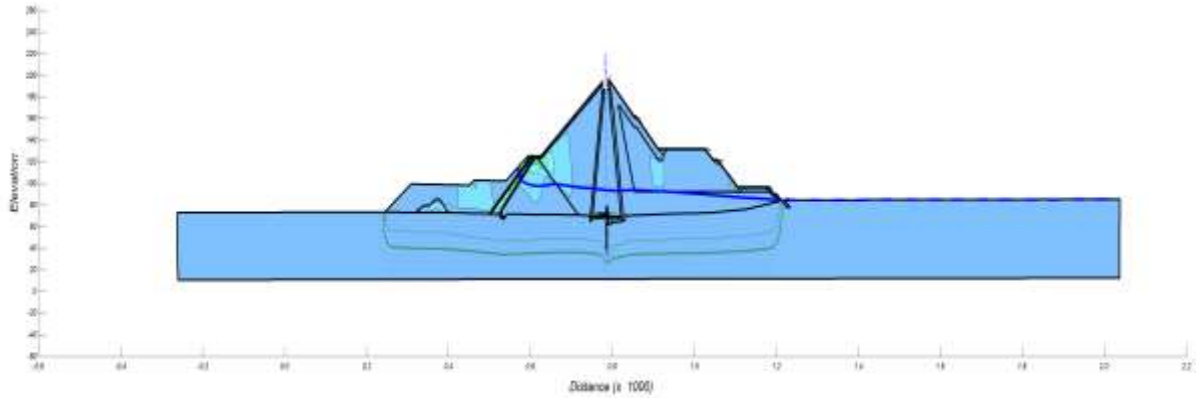
	Conglomerate1	Conglomerate2	mudstone	shell	core	filter	Cut-off
$\gamma_{dry}(kN/m^3)$	21	21	19.5	20	17.4	19	21
$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	23	23	21	22	20.2	20	22
K_x (m/day)	38.9	0.95	0.000045	0.085	0.00045	0.85	0.000086
K_y (m/day)	38.9	0.95	0.000045	0.085	0.00045	0.85	0.000086
$E_{ref}*10^4$ (kN/m^2)	80	100	12	11	3.5	7	400
ν	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.27	0.25
c_{ref} (kN/m^2)	85	85	70	2	30	2	700
$\varphi(phi)$	40	40	22	39	20	35	33
$\psi(psi)$	10	10	5	10	2	8	10

۵- یافته‌های تحقیق

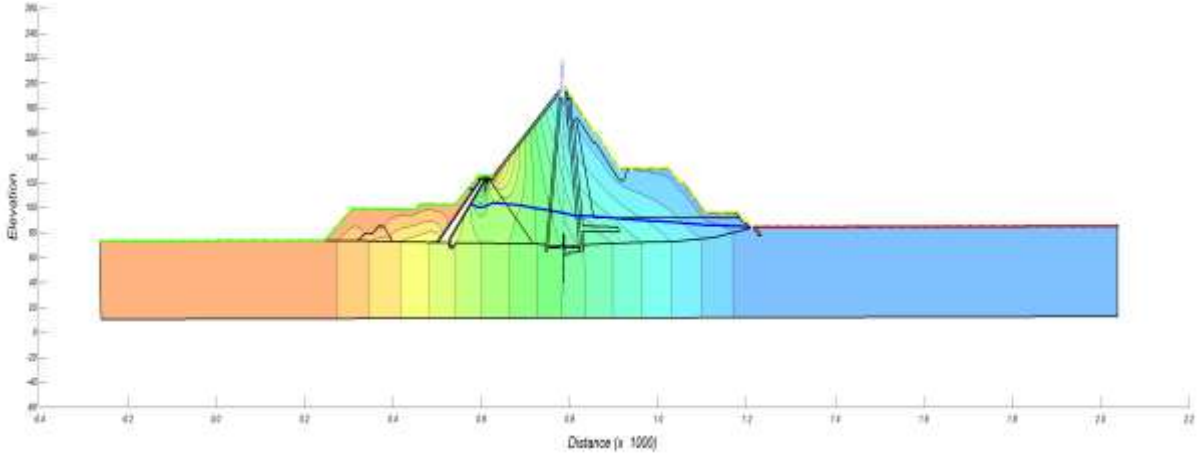
در تحلیل مکانیکی نتایج مدل سازی عددی ارائه می شود. با توجه به اینکه در تمام سد حالت اشباع برای مصالح انتخاب شده است لذا در حرکت آب در همه قسمت های آن وجود دارد. همان طور که اشاره شد در نظر گرفتن حالت غیراشباع برای مصالح علاوه بر حالت اشباع به دقت مدلسازی می‌افزاید. برای تعریف حالت غیراشباع در مدل‌سازی می‌بایست تغییرات پارامترهایی مانند ضریب نفوذ پذیری به تغییرات مکش در محیط مسئله مشخص باشد. به هر حال، حالت اشباع مدل دارای شرایط خاصی همانند افزایش میزان محافظه کارانه بودن تحلیل می‌باشد که در راستای طراحی دست پایین (با احتیاط بالا) مناسب است. بنابراین این حالت برای تحلیل سد انتخاب شده است. به منظور اجرای تحلیل، مدل هندسی به‌همراه خصوصیات مصالح و معیار رفتاری اجرا (run) می‌گردد. برپایه نتایج حاصل از تحلیل هیدرومکانیکی انجام گرفته، مشخص گردیده است که میزان هد کل برای سد بصورت شکل (۳) می‌باشد که بیشترین تمرکز آن بر روی بخش بالا دست و بستر سد می‌باشد.

www.SID.ir

Archive



شکل شماره (۳) : وضعیت هد کل در بدنه سد و بستر آن



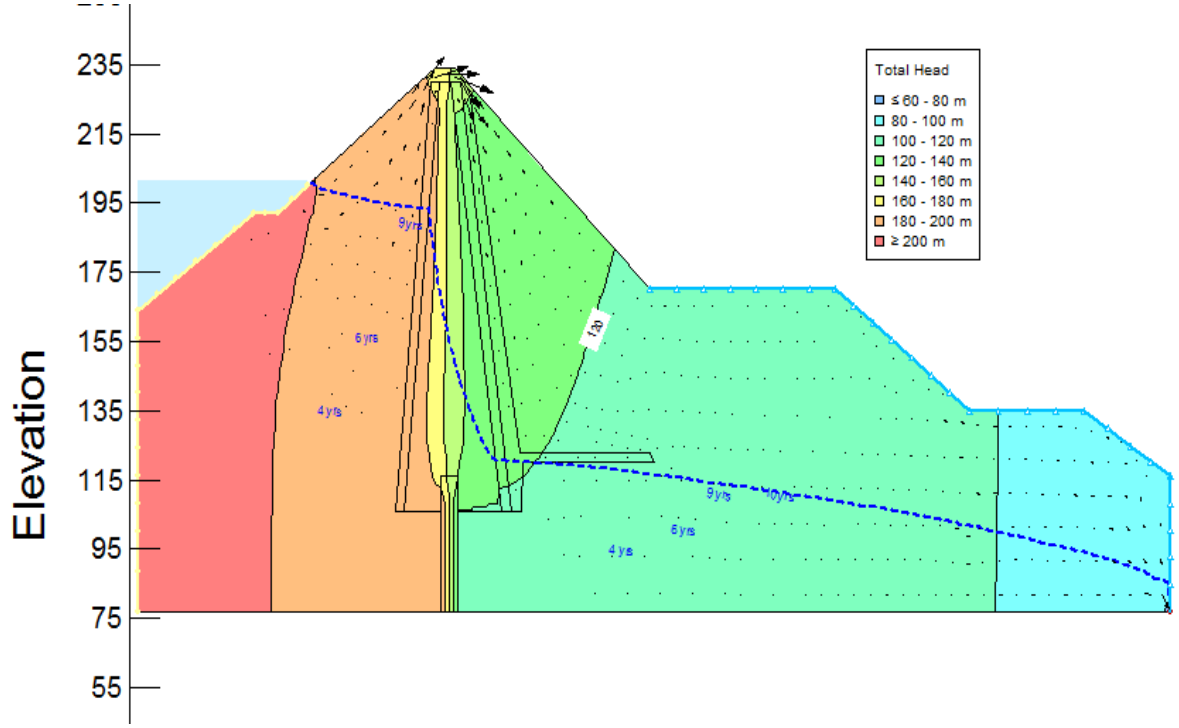
شکل شماره (۴) : وضعیت فشار آب منفذی و هد کل در بدنه و بستر سد کرخه

با مد نظر قرار دادن وضعیت فشار آب و هد کل در بدنه سد (شکل ۴)، می‌توان وضعیت مربوط به تغییرات هد کل و فشار آب منفذی را در بدنه سد کرخه برآورد نمود. با توجه به این شکل مشخص می‌گردد که بیشترین تمرکز مربوط به فشار آب منفذی در بالادست سد بوده که به سمت پایین دست کاهش پیدا می‌کند. این کاهش شرایط عادی را نشان داده و همچنین خطر ناپایداری پایین دست سد را که عامل اصلی آن آب منفذی است بسیار پایین برآورد نموده است. با انجام عملیات آبگیری در سد برای تحلیل رفتاری بلند مدت سد، خصوصیات هیدرولیکی در پایین دست سد تغییر پیدا می‌کند. این تغییر رفتار به دلیل اشباع شدگی بالادست سد و تحلیل نهایی سد بکار گرفته شده است. در بالادست هد کل برابر با مقدار ارتفاع آب جمع شده در پشت سد می‌باشد. خطچین نشان دهنده سطح آب که در سد بوجود آمده در نقطه‌ای بالاتر نسبت به حالت قبل قرار می‌گیرد. بیشترین میزان افت هد با توجه به پایین بودن مقدار ضریب نفوذپذیری در هسته سد اتفاق می‌افتد. شکل (۵) نشان دهنده این مسئله است.

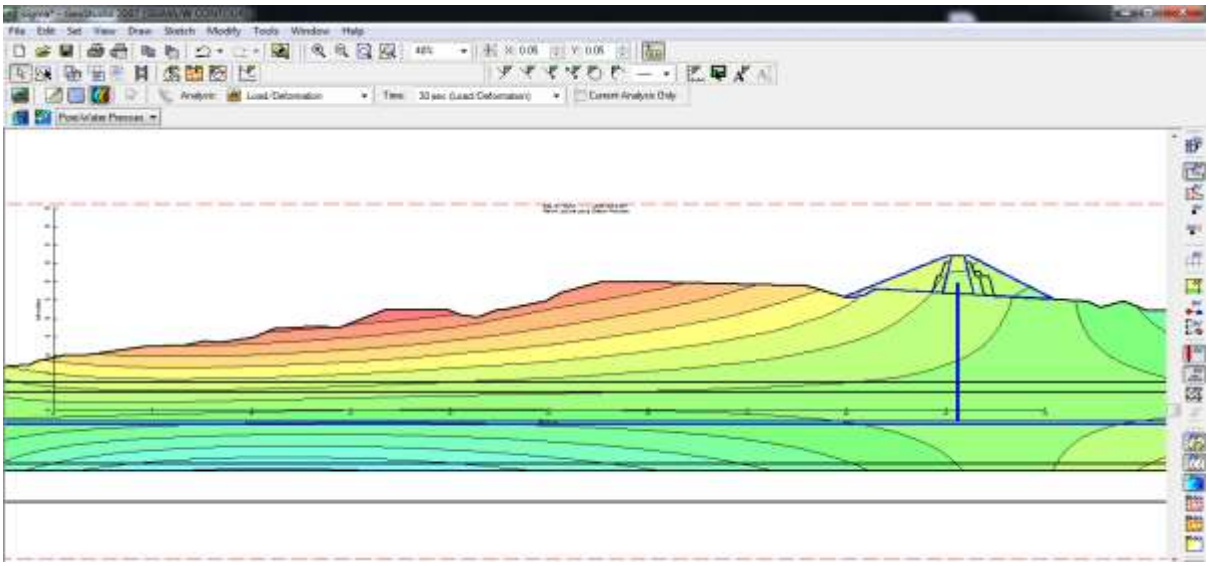
باتوجه به نتایج حاصل از وضعیت جابجایی‌های رخ داده در راستای محور افقی سد بصورت شکل (۶) می‌باشد که نشان-دهنده عمده تمرکز در بخش مخزنی سد است. این وضعیت بطرف خود سد و پایین دست آن کاهش نشان می‌دهد که وضعیت افت فشار آب منفذی در این راستا قابل توجیه می‌باشد. این شکل وضعیت جابجایی‌های رخ داده در راستای محور قائم سد را نشان می‌دهد که بیانگر یک وضعیت دور شونده از محور سد می‌باشد که در راستای افزایش پایداری بدنه سد عمل خواهد کرد. اما تغییرات تنش برشی در محدوده سد همگرا بوده و تمرکز تنش‌های عامل جابجایی برشی را در محدوده بدنه سد نزدیک شونده برآورد نموده است. بنابراین میزان جابجایی در بدنه سد کمتر از مخزن و بیشتر از پایین دست آن می‌باشد.

www.SID.ir

Archive



شکل شماره (۵) : تحلیل تراوش و پایداری برای آبگیری سد کرخه



شکل شماره (۶) : وضعیت جابجایی رخ داده در محدوده بدنه و مخزن سد کرخه و شرایط پایداری سد

۹- نتیجه‌گیری

برپایه نتایج حاصل از انجام این مطالعه می‌توان موارد زیر را بصورت پارامتریک بیان نمود:

- با توجه به اینکه در تمام سد حالت اشباع برای مصالح انتخاب شده است لذا در حرکت آب در همه قسمت‌های آن وجود دارد. این مسئله سبب گردیده تا پارامترهای طراحی ژئوتکنیکی بصورت کاملا محافظه کارانه و دست پایین محاسبه گردند که یک امتیاز در آنالیز حساسیت بشمار می‌آید.

www.SID.ir

Archive

- به منظور ارزیابی و تحلیل شرایط رفتار هیدرولیکی سد کرخه از نرم افزار المان محدود Seep/W بهره گرفته‌شده است. کاربرد اصلی این نرم‌افزار به منظور ارزیابی شرایط بحرانی آب در بدنه سدهای خاکی، خاکریزها و زمین به منظور ارزیابی رفتاری و تغییرشکل‌های ایجاد شده در آن‌ها به واسطه جریان سیال می‌باشد.
- نتایج مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Seep/W نشان داده است که همزمان با افزایش آب پشت سد در مدل مقدار فشار آب و هد نیز بیشتر می‌شود. با افزایش هد کانتورهای نشان دهنده هد در بدنه سد نیز تغییر می‌کند. اما بطور کلی در راستای محوری سد، از بالا دست به سمت پایین دست میزان هد کل افت نشان می‌دهد. این شرایط برای تحلیل بصورت تراوش پایدار در نظر گرفته شده است.
- با انجام تحلیل موازی توسط نرم‌افزار Seep/W وضعیت نشست پذیری سد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است که برپایه نتایج حاصل مشخص گردیده است که عمده تمرکز کرنش پلاستیک در بدنه سد در بخش هسته و تاج بوده و در بالادست سد در بخش مخزنی آن نیز کرنش محوری مشاهده شده است.

مراجع

۱. قنبری، ع. (۱۳۹۳). اصول مهندسی سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۲. وفائیان، م. (۱۳۹۵). سدهای خاکی. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۳. وزارت نیرو. (۱۳۸۱). مشخصات سد مخزنی و نیروگاه آبی کرخه. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. تهران.
4. Das B.M. (2008). Advanced soil mechanics. Taylor & Francis, New York, USA.
5. Das B.M. (2013). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning, USA.

www.SID.ir