Archive of SID

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی ،معماری،عمران ومحیط زیست

بررسی رفتار بدنه سد کرخه در حین آبگیری و تحلیل نشست سد با استفاده از رویکرد عددی المان محدود توسط Seep/W و Plaxis2D

مهرزاد ایرانپور مبارکه[۱]، سیاوش صادقی[۲]

۱-کارشناس عمران

۲-کارشناسی ارشد مدیریت تکنولوژی

۱-۱-چکیده

سدها به عنوان یکی از مهمترین سازه‌های ژئوتکنیکی نقش قابل توجهی در مدیریت و تامین منابع آب دارا می‌باشند که جهت ذخیره، کنترل سیلاب و تولید انرژی برق احداث، ایجاد محیط مناسب کشاورزی، بهبود صنایع وابسته به زمین (منابع طبیعی و آب) بکار برده می‌شوند. مطالعه حاضر سعی گردیده است تا با استفاده از روش عددی المان محدود (FEM) و نرم‌افزارهای $Plaxis^{2D}$ و Seep/W برای ارزیابی و سنجش رفتار بدنه سد کرخه در حین آبگیری و تحلیل نشست سد استفاده شده است. برپایه نتایج بدست آمده مشخص گردیده است که سد کرخه حین آبگیری برای حالت اشباع؛ 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. در تحلیل بلند مدت برای مدت ۱۰ ساله، بیشترین میزان افت هد با توجه به پایین بودن مقدار ضریب نفوذپذیری در هسته سد اتفاق اقتاده است. با توجه به اینکه در مدت زمان ۱۰ سال سطح آب در شرایط مرزی بالادست افزایش می یابد در بدنه سد نیز در هر مرحله مقدار سطح آب باید افزایش بیابد. این مسئله سبب گردیده تا تمرکز تنش ها و تغییرشکل‌ها در بخش تاج بیشتر شود. باتکیه بر نتایج مدل‌سازی وضعیت نشست‌پذیری سد مشخص نموده 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.

واژه‌های کلیدی: مهندسی ژئوتکنیک، سدهای خاکی، رفتار آبگیری، رویکرد عددی، تحلیل نشست سد، $Plaxis^{2D}$، Seep/W.

۱-۲-مقدمه

از زمان‌های بسیار پیش احداث سدهای خاکی به منظور تنظیم و ذخیره‌ی آب معمول بوده است، اما به علت امکانات محدود و عدم شناخت قوانین مکانیک خاک و هیدرولیک ارتفاع سدها و بندهای خاکی از مقدار محدودی بیشتر نشده است، هرچند از نظر وسعت و طول سد این محدودیت وجود نداشته است [فلر و همکاران، ۲۰۱۴]. بطورکلی می‌توان بیان داشت که سد خاکی، ساختمان با تاسیساتی است که بر روی رودخانه یا مسیل با استفاده از مصالح بدون ملات به منظور ذخیره‌سازی و بالابردن سطح آب در پشت آن ساخته می‌شود. بعبارت دیگر یک سد خاکی نیز مانند سد بتنی هم باید بتواند سطح آب را در پشت خود بالا بیاورد و در مقابل فشار آب مقاومت کند و هم قادر به ذخیره‌ی آب باشد، یعنی در مقابل آب غیرقابل نفوذ باشد. در این شرایط

www.SID.ir

Archive of SID

سدهای خاکی در مقایسه با سدهای بتنی در رابطه با پی و مصالح ساختمانی از قابلیت انعطاف بیشتری برخوردار می‌باشند، این سدها بار خود را در پایه‌های پهن‌تر و وسیع‌تر توزیع می‌کنند و می‌توانند در مقایسه با سدهای بتنی تغییرات بیشتری را تحمل نمایند. سدهای خاکی با پوسته‌های سنگریزه‌ای نیز برای پایداری در مقابله با زلزله‌های شدید طراحی می‌شوند. غالباً بیشتر مصالح قرضه‌ی مورد نیاز سدهای خاکی باید به صورت طبیعی در محل موجود باشند و مقدار کمی از آنها ممکن است نیاز به اصلاح داشته باشند. کرنش ایجاد شده در این نوع سدها کمتر است و این امر نیز یکی از دیگر مزایای سدهای خاکی بشمار می‌آید [میورسی و همکاران،۲۰۱۷]. در مطالعه حاضر سدهای خاکی به عنوان محوریت اصلی در این تحقیق مطرح بوده و به عنوان یک مطالعه موردی بر روی سد کرخه تمرکز خواهد گردید.

۱-۳ اهمیت و ضرورت مطالعات

دانش در زمینه رفتارنگاری سدهای خاکی و تحلیل رفتار سدها در مراحل آبگیری می‌تواند در ارزیابی میزان تغییرشکل‌پذیری آن‌ها بسیار کارآمد باشد. بطوریکه با شناخت وضعیت رفتاری و تغییرشکل‌های حاصل از میدان تنش ایجاد شده توسط نیروهای فشار آب در پشت سد بر روی بدنه و پی آن؛ امکان بررسی و تحلیل پایداری سد در نقاط مختلف آن فراهم می‌آید. از سوی دیگر رفتارنگاری میدانی با کمک ابزاردقیق به دلیل وقت‌گیر بودن و هزینه بالا آن همواره بصورت پروژه‌های همراستا با ساخت مطرح می‌باشند که امکان بکارگیری آن‌ها در مراحل طراحی عموماً با عدم‌قطعیت‌های بالایی همراه است. در این مطالعه با مدنظر قرار دادن این مسئله سعی شده است از رویکرد عددی به ارزیابی خصوصیات رفتاری سد کرخه پرداخته شود. بکارگیری روش‌های عددی باتوجه به امکان ارزیابی‌های پیوسته و تعیین میزان گسترش نواحی پلاستیک و تغییرشکل‌ها طی مراحل مختلف آبگیری و بهره‌برداری سبب گردیده تا توجه ویژه‌ای را به خود جلب نمایند. از سوی دیگر کاهش زمان تحلیل مزیت دیگری است که امکان تحلیل‌های پایداری و تمرکز تغییرشکل را در مراحل مختلف آبگیری فراهم می‌آورد.

۱-۴-سوالات پژوهش

- رفتار تغییرشکلی سد کرخه حین آبگیری در برابر شکست، نشست‌پذیری و گسیختگی سد به چه صورت خواهد بود؟
- نقش رویکردهای عددی المان محدود در ارزیابی رفتاری سد کرخه چگونه است؟
- آیا مدل‌سازی‌های صورت گرفته توانسته به حد مطلوبی در برآورد رفتارنگاری سد نماید؟
- نرم‌افزارهای Seep/W و $Plaxis^{2D}$ چه عملکردی در تحلیل رفتاری و برآورد شبکه جریان و تغییرشکلی سد کرخه دارند؟

۱-۵-فرضیه های پژوهش

- رفتار تغییرشکلی در بدنه سد حین عملیات آبگیری می‌تواند عاملی بر رخداد گسیختگی و نشست‌پذیری گسترده در سد باشد.
- رویکرد عددی المان محدود و نرم‌افزارهای تحلیل توانایی مناسبی در ایجاد شرایط تحلیل آبگیری سد دارند.
- امکان استفاده از رویکردهای عددی المان محدود برای پاسخ‌گویی به تغییرشکل‌ها و رفتار سدهای خاکی هسته رسی وجود دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

- نرم‌افزارهای Seep/W و $Plaxis^{2D}$ می‌توانند در ارزیابی مهندسی و ژئوتکنیکی سد کرخه موثر باشند.

۱-۶-مفاهیم

بنابر مقتضیات این پژوهش، نیازمند داشتن پیش زمینه‌هایی به منظور درک بهتر مفاهیم این مطالعه می‌باشیم. در ادامه به تعریف برخی مفاهیم کلی پرداخته می‌شود:

ژئوتکنیک[1]: ژئوتکنیک به علم مهندسی کاربردی زمین اطلاق می‌گردد. متخصصین ژئوتکنیک به افرادی گفته می‌شود که در زمینه‌های مهندسی خاک (مکانیک خاک)، سنگ (مکانیک سنگ)، زمین‌شناسی (زمین‌شناسی مهندسی) توانایی بالایی داشته باشند [۲].

آنالیز عددی[2]: به تنظیم، مطالعه، و اعمال شیوه‌های تقریبی محاسباتی برای حلّ آن دسته از مسائل ریاضیات پیوسته (در مقابل ریاضیات گسسته) می‌پردازد که باروش‌های تحلیلی قابل حل نیستند [میورسی و همکاران،۲۰۱۷].

سدهای خاکی[3]: نوعی سد است که برای ساخت آن مصالح را از همان منطقه احداث یا نواحی نزدیک تأمین می‌کنند، و اصولاً دارای هسته رسی است. رس در تماس با آب مانع نفوذ و انتقال آب و رطوبت می‌شود و مانند نوعی عایق رطوبتی عمل می‌کند [میورسی و همکاران،۲۰۱۷].

مکانیک خاک[4]: شاخه‌ای از مهندسی عمران است که به توضیح رفتار خاک می‌پردازد. مکانیک خاک برای تحلیل تغییر شکل‌ها، یا حرکت سیالات در سازه‌های طبیعی یا ساختگی (دست‌ساز بشر) که از خاک ساخته شده‌اند یا زیربنای خاکی دارند یا سازه‌هایی که در زیرخاک مدفون شده‌اند مانند پی ساختمان‌ها و پل‌ها، دیوارهای حائل، سدها و سامانه خطوط لوله مدفون در زمین؛ بکار می‌رود. اصول مکانیک خاک در دیگر رشته‌های مهندسی مانند مهندسی زمین‌شناسی، خاک، سازه‌های دریایی، کشاورزی، هیدرولوژی و رشته فیزیک خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد [میورسی و همکاران،۲۰۱۷].

۱-۷-پیشینه پژوهش

کماسی و بیرانوند (۱۳۹۸) طی مقاله‌ای با استفاده از رویکرد عددی المان محدود و نرم‌افزارهای Seep/W و $Plaxis^{2D}$ اقدام به ارزیابی کرنش پیوسته و رفتار سد خاکی سیوند بعد از اولین دوره ابگیری نمودند. ایشان نتایج شبیه‌سازی خود را با داده‌های ابزار دقیق سد مورد سنجش قرار دادند [کماسی و بیرانوند،۱۳۹۸].

[1] Geotechnique
[2] Numerical analysis
[3] Embankment dam
[4] Soil mechanics

www.SID.ir

Archive of SID

کماسی و بیرانوند (۱۳۹۹) طی مقاله‌ای از رویکردهای عددی و نرم‌افزارهای Seep/W و Plaxis^{2D} برای بررسی جابجایی‌های قائم و افقی سد خاکی ایوشان استفاده نموده‌اند. ایشان برپایه نتایج حاصل مشخص نمودند که ایمنی سد تنها به طراحی و ساخت آن مربوط نمی‌شود، بلکه به رفتارنگاری کاملی از عملکرد آن در اولین دوره آبگیری و بهره‌برداری و همچنین سرویس‌دهی منظم در طول عمر سد وابسته است [کماسی و بیرانوند،۱۳۹۹].

سیسوانتو و همکاران[5] (۲۰۱۹) طی مقاله‌ای از روش‌های عددی المان محدود و نرم‌افزارهای Seep/W و Plaxis^{2D} برای ارزیابی و رفتارنگاری سطح تغییرات پلاستیک در سدخاکی با مراحل ساخت، ابگیری و بهره‌برداری بصورت پیوسته استفاده نموده است. نتایج حاصل از مطالعات ایشان مشخص نموده که تغییرات ابگیری مستقیماً بر روی جریان سیال، تغییرشکل هسته، بدنه و بستر سد، کرنش‌ها در محدوده پایین دست سد موثر بوده است که از حد مجاز معمولاً بالاتر بوده که سبب ایجاد ابشستگی می-شود. این مسئله عملاً سبب افزایش نگرانی نسبت به رخداد گسیختگی در بدنه سد خواهد بود. فلذا مدل‌های مطراحی باید بصورت پیوسته با رفتارنگاری میدانی و عددی کالیبره و تصحیح گردند [سیسوندو و همکاران،۲۰۱۹].

شکوری و محمدی (۲۰۲۰) برای ارزیابی رفتاری سدهای خاکی هسته رسی و میزان تاثیر آن بر عملیات آبگیری سد در هسته رسی نسبت به رخداد گسیختگی و کرنش پلاستیک و جابجایی‌های (تغییرشکل‌ها) از رویکرد عددی و نرم‌افزار Plaxis^{2D} استفاده نمودند. ایشان بیان داشتند که این تغییرشکل‌ها توسط رویکرد عددی بخوبی شناسایی شده است [شکوری و همکاران،۲۰۲۰].

خیری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از نرم‌افزار Slope/W اقدام به سنجش وضعیت تراوش و تحلیل تغییرشکلی سد خاکی هسته رسی نموده و نتایج تحلیل خود را با داده‌های میدانی ابزار دقیق سنجش نمودند. این محققین بیان داشتند که بکارگیری شبیه‌سازی‌های عددی در تحلیل رفتاری سدهای خاکی و تحلیل جریان بسیار مناسب است [خیری و همکاران،۲۰۲۰].

۱-۸-روش شناسی پژوهش

در این مطالعه از رویکردهای عددی المان محدود و نرم‌افزارهای Seep/W و Plaxis^{2D} برای ارزیابی رفتارنگاری سد کرخه بهره گرفته شده است. رویکرد FEM، روشی بسیار توانمند در تحلیل جریان درون سازه‌های خاکی و شبیه‌سازی نحوه جابجایی و توزیع فشار آب منفذی در داخل مواد متخلخل مثل خاک و سنگ می‌باشد. نرم‌افزارهای Seep/W و Plaxis^{2D} دو مورد از رایج-ترین نرم‌افزارهای موجود مبتنی بر روش FEM می‌باشند که به‌صورت گسترده در مهندسی عمران و ژئوتکنیک کاربرد دارند. در این مطالعه محوریت اصلی انجام مدل‌سازی عددی و تعیین شرایط رفتاری سد کرخه که یک سد هسته رسی ناهمگن است، در مرحله آبگیری می‌باشد.

۱-۹-یافته های پژوهش

سیستم‌های زهکشی در بدنه و پی سدهای خاکی، تمهیداتی هستند که برای جمع آوری و هدایت آب‌های نشت یافته به نواحی پایین دست سد طراحی و به اجرا در می آیند. این سیستم ها 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. ابعاد و نفوذپذیری مصالح سیستم‌های زهکش باید به گونه‌ای

[5] Souliyavong et al.,

www.SID.ir

Archive of SID

انتخاب شوند که سیستم قادر به تخلیه‌ی مطمئن کلیه‌ی آب‌های ورودی بر اثر پدیده‌ی نشت از بدنه و پی باشد. این مسئله سبب می‌گردد تا حین عملیات آبگیری سدهای خاکی مشکلات ژئوتکنیکی، ناپایداری‌ها و گسیختگی‌ها از پیش طرح‌ریزی و کنترل 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. این مسئله بر روی رفتارنگاری سد بصورت قابل توجهی تاثیر دارد. بنابراین در این مطالعه به بررسی تغییرشکل‌های حاصل در بدنه و بستر سد کرخه پرداخته می‌شود.

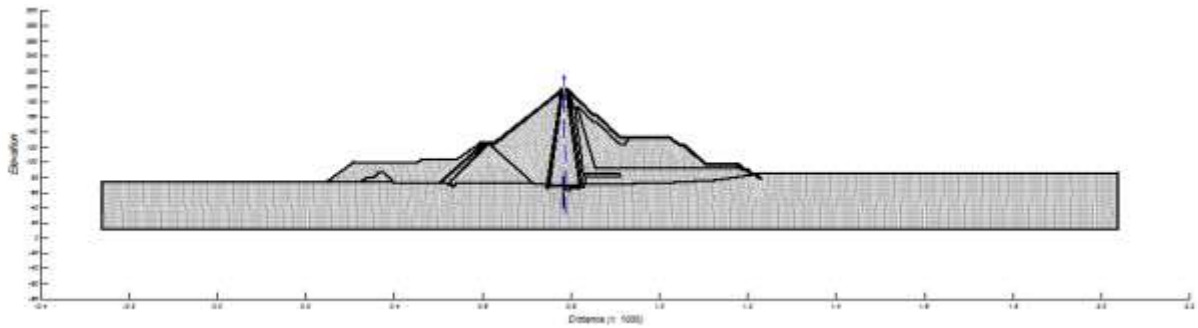
به منظور انجام مطالعات رفتار تغییرشکلی سد کرخه از ماژول عددی SEEP/W به عنوان یک واحد تحلیلی نرم‌افزار GEO-SLOPE/Geo-studio بهره گرفته شده است. کاربرد اصلی SEEP/W برای ارزیابی شرایط بحرانی آب در بدنه سدهای خاکی، خاکریزها و زمبن به منظور ارزیابی رفتاری و تغییرشکل‌های ایجاد شده در آن‌ها به واسطه جریان سیال می‌باشد که توسط رویکردهای عددی المان محدود در تحلیل شرایط جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل و خاک پیاده‌سازی شده است. بطورکلی روند تحلیل در این نرم‌افزار 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:

- شبیه‌سازی 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.
- شبیه‌سازی مکانیکی: به منظور انجام تحلیل و استخراجی داده‌ها و نتایج است.

برای شبیه‌سازی در نرم افزار، ابتدا هندسه مسئله رسم شده و سپس ویژگی‌های مصالح به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. هندسه مسئله با توجه به نقشه‌های اجرایی سد ترسیم شده که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. در هندسه مسئله از ترسیم جزئیات خودداری گردیده و بخش های اصلی سد یعنی هسته و دیوار آب‌بند و فیلتر و زهکش‌های افقی و عمودی ترسیم شده است. هندسه مدل تهیه شده برای تحلیل توسط SEEP/W از روی مقطع اصلی سد (شکل ۴-۱) تهیه گردیده است. باتوجه به اینکه تحلیل به روش المان محدود نیازمند تعریف مش‌های تحلیل می‌باشد و به عنوان یکی از مراحل مدل‌سازی هندسی مطرح اشد. نرم‌افزار SEEP/W برای انجام بهتر تحلیل سد، مش‌های تعریف شده برای تحلیل، کوچک در نظر گرفته شده است. همانطور که دانسته می‌شود، هرچه میزان مش‌بندی ریزتر باشد دقت تحلیل افزایش پیدا می‌کند.

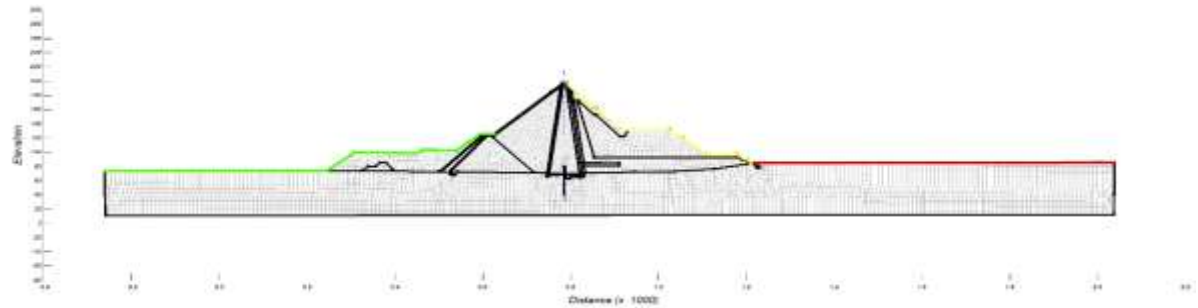
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴-۱: مدل هندسی و شرایط شبکه‌بندی تهیه شده از سد کرخه

بعد از تهیه مدل هندسی، مراحل انتخاب شرایط اولیه و شرایط مرزی است. در این بخش مسئله مهم انتخاب سطح آب اولیه قبل از آبگیری سد می‌باشد. سطحی از سد که در تماس با آب است؛ به عنوان یک سطح مرزی با هد ثابت انتخاب می‌شود. در سمت دیگر سد که پتانسیل عبور آب از مرزها وجود دارد به عنوان مرز با مقدار هد ثابت صفر انتخاب می‌شود. در پایین‌دست سد باید نقطه‌ای با عنوان هد ثابت تعریف شود که سطح آب از نقطه پایین تر قرار نمی‌گیرد. این مسئله به عنوان تعریف شرایط مرزی در مدل سازی مطرح می‌باشد. شرایط مرزی مربوط به سد و مخزن آن در شکل (۴-۲) آورده شده است.



شکل ۴-۲: تعریف شرایط مرزی برای مدل هندسی سد کرخه

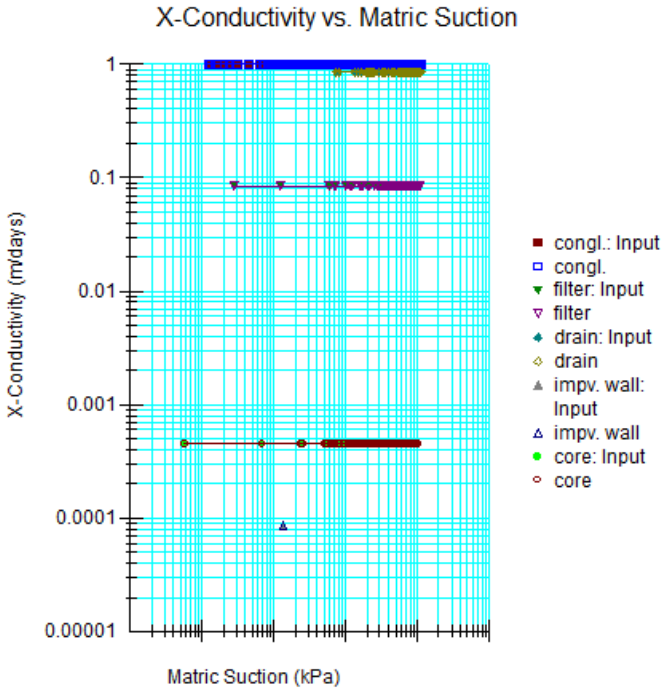
در این تحلیل از ویژگی‌های مقاومتی مصالح صرف‌نظر شده و تنها تحلیل تراوش صورت می‌گیرد. در ابتدای تحلیل نوع تحلیل در نرم‌افزار می‌بایست مشخص گردد. این تحلیل در دو بخش بصورت آنالیز تراوش پایدار و آنالیز تراوش گذرا انجام می‌شود. در بخش اول تحلیل فرض می‌شود شرایط مسئله در طول زمان ثابت باشد. در بخش دوم شرایط مسئله در طول زمان تغییر می‌کند. بخش اول تحلیل مربوط به زمانی است که ساخت سد به اتمام رسیده و آبگیری انجام نشده است. در این قسمت سطح آب در سد پایین بوده و شرایط پایدار بر مسئله حاکم است. در حالی‌که در قسمت دوم تحلیل شرایط مسئله در مدت زمان تغییر می‌کند. در این قسمت آبگیری در سد انجام می‌شود. در این تحلیل مصالح بصورت اشباع درنظر گرفته شده‌اند. نمودار سطح آب در طول زمان در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. همچنین داده های ورودی در شبیه سازی در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول ۴-۱: خصوصیات نشت مصالح اختصاص داده شده در شبیه سازی

www.SID.ir

Archive of SID

	کنگلومرای۱	کنگلومرای۲	گلسنگ	هسته	پوسته	فیلتر	دیوار آب‌بند
نفوذپذیری افقی (متر بر روز)	۳۸/۹	۰/۹۵	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۸۵	۰/۸۵	۰/۰۰۰۰۸۵
نفوذپذیری عمودی (متر بر روز)	۳۸/۹	۰/۹۵	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۸۵	۰/۸۵	۰/۰۰۰۰۸۵

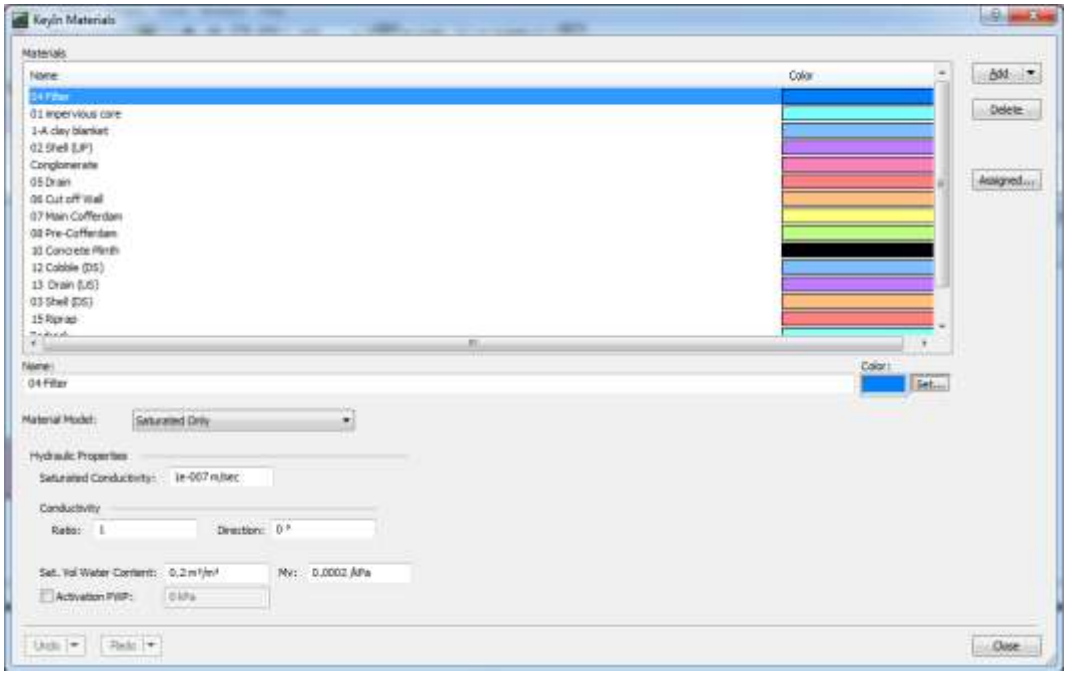


شکل ۴-۳: مقدار ضریب نفوذپذیری در در مکش های مختلف

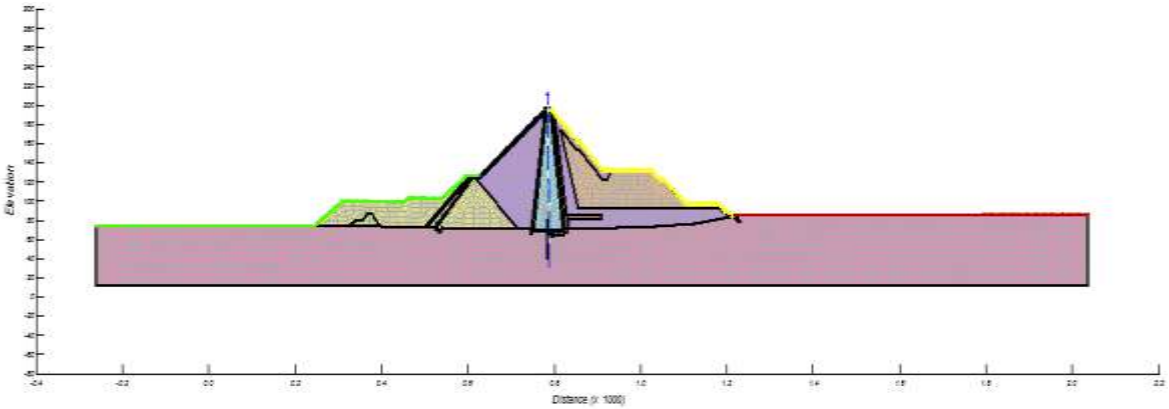
با توجه به ویژگی‌های مصالح ارائه شده در جدول (۴-۱)، خصوصیات مصالح برای هر کدام از بخش‌ها بصورت جداگانه تخصیص داده شده است. اختصاص خواص برای مصالح سد کرخه در شکل (۴-۴) آورده شده است. همچنین مدل نهایی مربوط به اختصاص خواص مصالح برای سد در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴-۴: تعریف خواص ژئوتکنیکی و هیدرولیکی برای سد کرخه



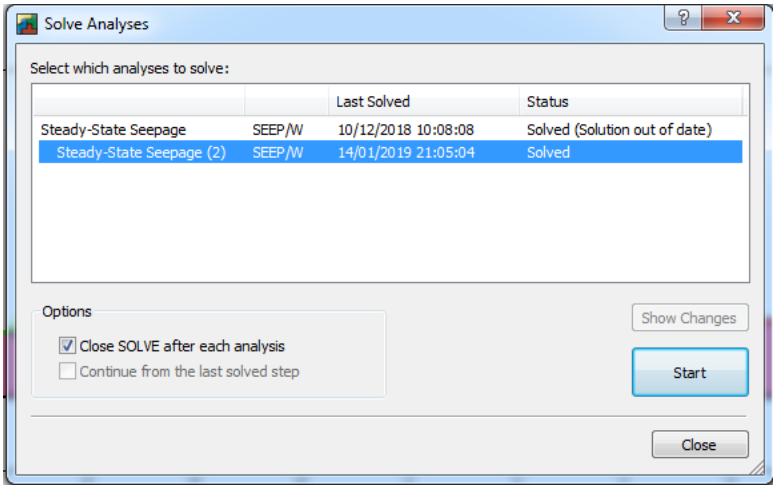
شکل ۴-۵: مدل تخصیص خواص ژئوتکنیکی و هیدرولیکی برای سد کرخه

بعد از انجام عملیات تخصیص خصوصیات ژئوتکنیکی به مصالح، مدل رفتاری مصالح تعریف می‌گردد. مدل رفتاری بکار برده شده در این مطالعه، معیار گسیختگی مور-کولمب می‌باشد. این معیار در محیط خاکی با دقت بسیار بالا و اعتبار قابل قبولی بکار بسته می‌شود. این معیار در فصل قبلی بصورت اختصار بیان شده است. بعد از اعمال خصوصیات ژئوتکنیکی و تعریف مدل رفتاری مدل ساختاری آماده تحلیل مکانیکی (آنالیز نهایی) می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

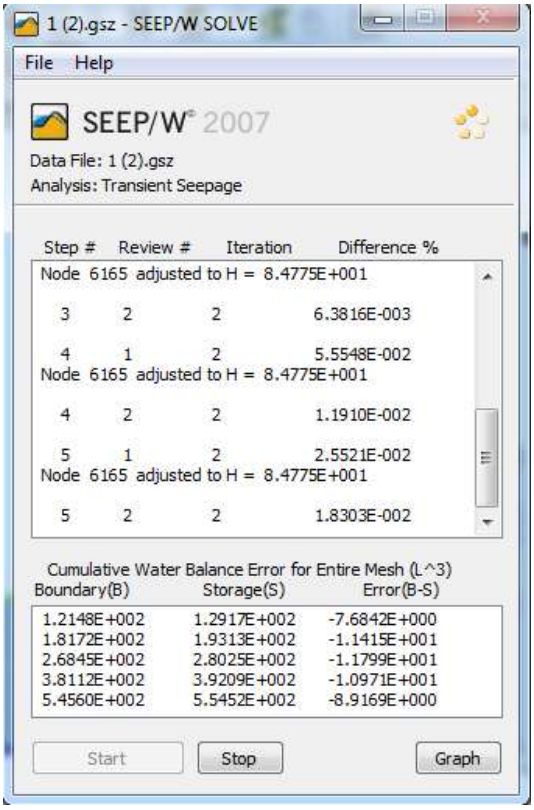
با توجه به اینکه در تمام سد حالت اشباع برای مصالح انتخاب شده است؛ لذا در حرکت آب در همه قسمت‌های آن وجود دارد. حالت اشباع مدل دارای شرایط خاصی همانند افزایش میزان محافظه‌کارانه بودن تحلیل می‌باشد که در راستای طراحی دست‌پایین (با احتیاط بالا) مناسب است. فلذا این حالت برای تحلیل سد انتخاب شده است. به منظور اجرای تحلیل، مدل هندسی بهمراه خصوصیات مصالح و معیار رفتاری اجرا می‌گردد. این اجرا بصورت اشکال (۴-۶) و (۴-۷) می‌باشد.



شکل ۴-۶: اجرای مدل اولیه در تحلیل رفتار آبگیری

www.SID.ir

Archive of SID

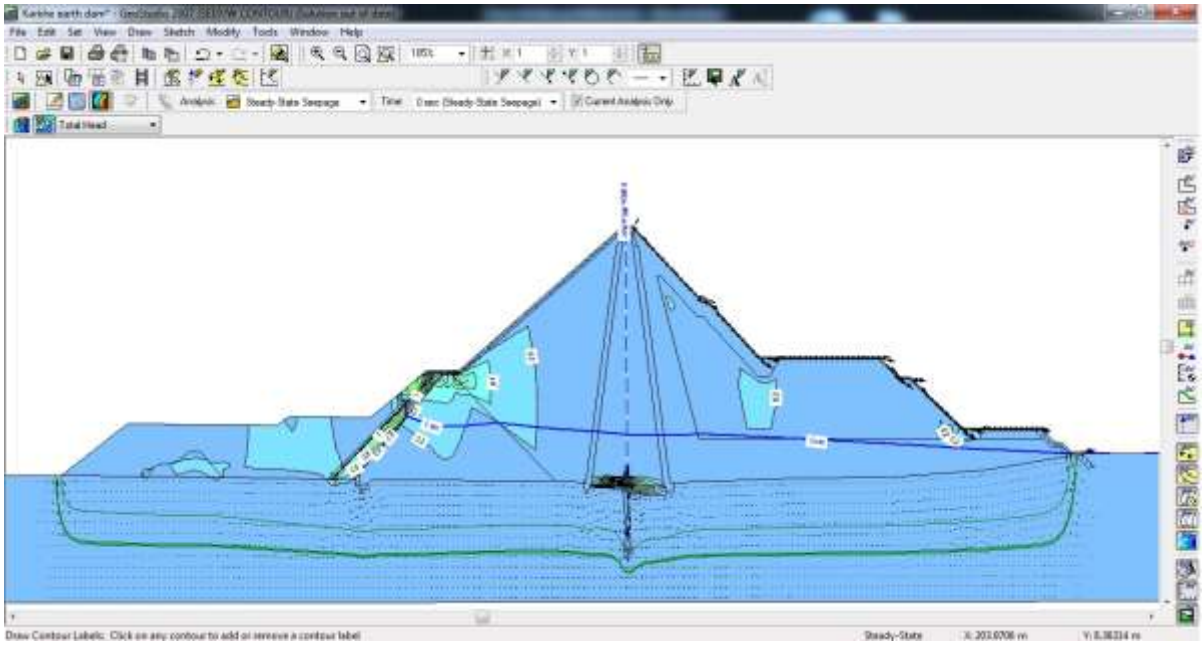


شکل ۴-۷: مراحل ارزیابی مدل اولیه در تحلیل رفتار آبگیری

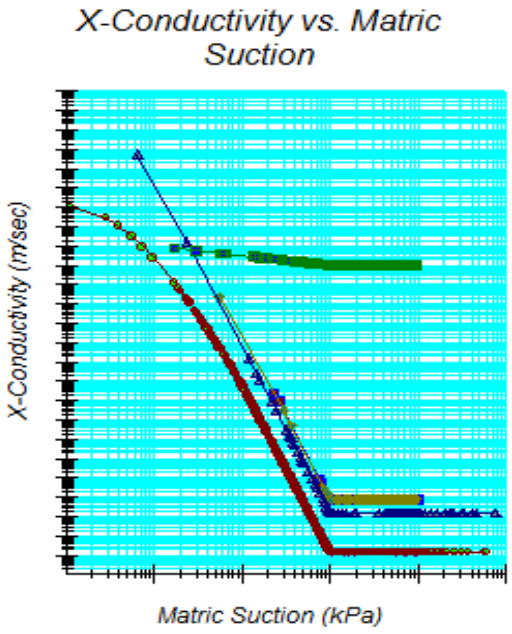
برپایه نتایج حاصل از تحلیل هیدرومکانیکی انجام گرفته، مشخص گردیده است که میزان هد کل برای سد بصورت شکل (۴-۸) می‌باشد که بیشترین تمرکز آن بر روی بخش بالا دست و بستر سد می‌باشد.

www.SID.ir

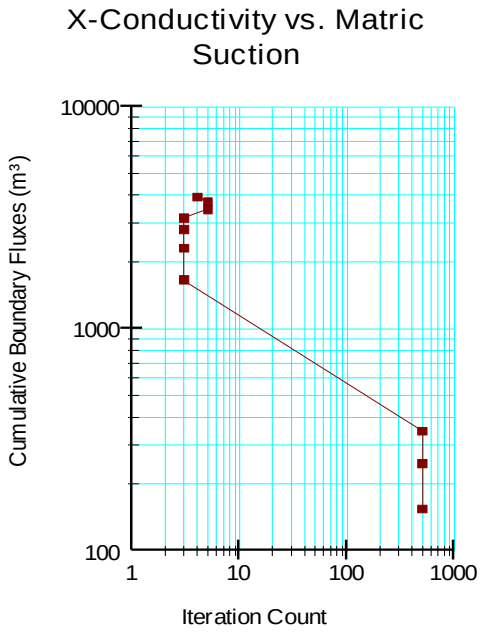
Archive of SID



شکل ۴-۸: وضعیت هد کل برای کل سد و بستر آن



شکل ۴-۹: تغییرات هدایت هیدرولیکی در سد

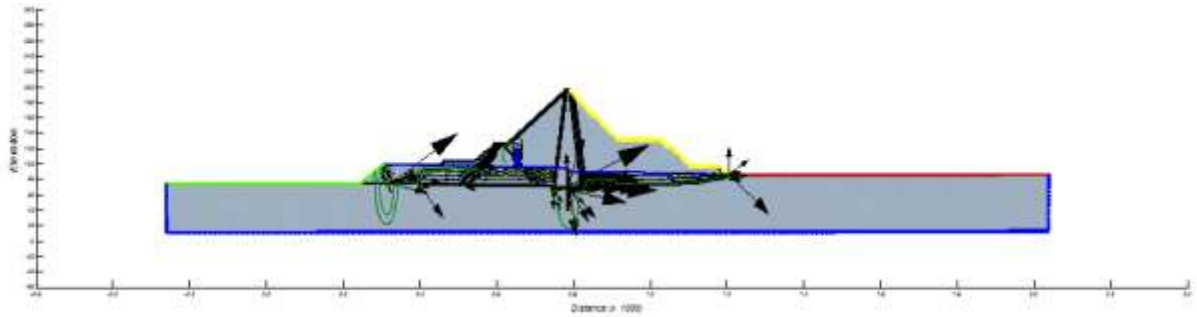


شکل ۴-۱۰: تغییرات هدایت هیدرولیکی در فیلتر

www.SID.ir

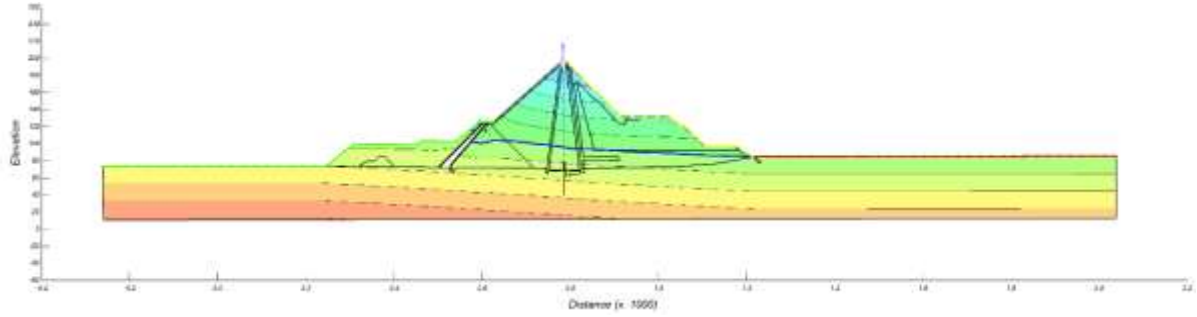
Archive of SID

با در نظر گرفتن تغییرات پیوسته به آبگیری سریع در لحظه اول سد، کنتورهای حرکت جریان آب در بستر و بدنه سد بصورت شکل (۴-۱۱) خواهد بود.



شکل ۴-۱۱: وضعیت کنتورها و بردارهای هد کل در بدنه سد

در شکل (۴-۱۲) وضعیت فشار آب در لحظه آبگیری سد نشان داده شده است. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که تغییرات سطح آب در بالادست سد به درستی ایجاد شده است. 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 می کند. علاوه بر آن خطچین بوجود آمده در مدل نشان دهنده سطح آب در بدنه سد می‌باشد. در این شکل نتیجه تحلیل اول یعنی آنالیز تراوش پایدار در سد با در نظر گرفتن سطح آب ثابت بدست آمده است.



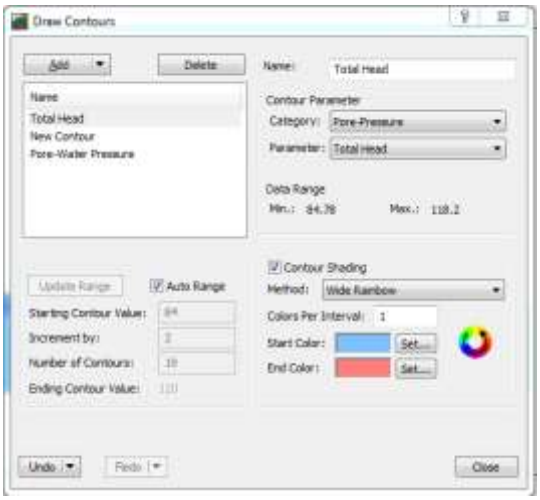
شکل ۴-۱۲: وضعیت فشار آب منفذی در بدنه و بستر سد

با مد نظر قرار دادن وضعیت فشار آب و هد کل در بدنه سد (شکل ۴-۱۳)، می‌توان وضعیت مربوط به تغییرات هد کل و فشار آب منفذی را در بدنه سد کرخه برآورد نمود. نتیجه این ارزیابی در شکل (۴-۱۴) آورده شده است. 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 تمرکز بر روی پایین دست می توان تغییرات جریان و فشار آب را در محدوده پایین دست برآورد نمود.

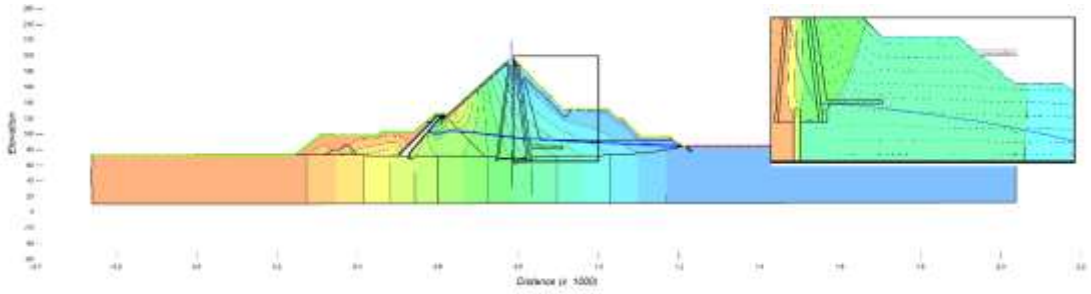
www.SID.ir

Archive of SID

باتوجه به این شکل نیز مشاهده می گردد که کنتورهای تغییرشکلی در بخش پایین دست نسبت به بالادست سد (بخش مخزنی) پایین بوده و سد در حالت پایدارتری قرار دارد.



شکل ۴-۱۳: تعیین کنتورهای رفتاری برای فشار آب منفذی و هد کل

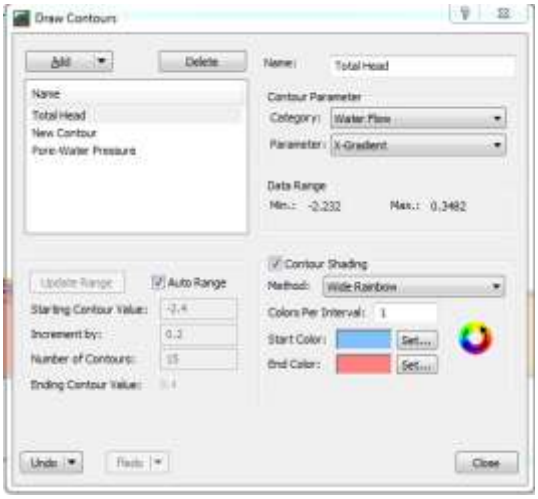


شکل ۴-۱۴: وضعیت فشار آب منفذی و هد کل در بدنه و بستر سد کرخه

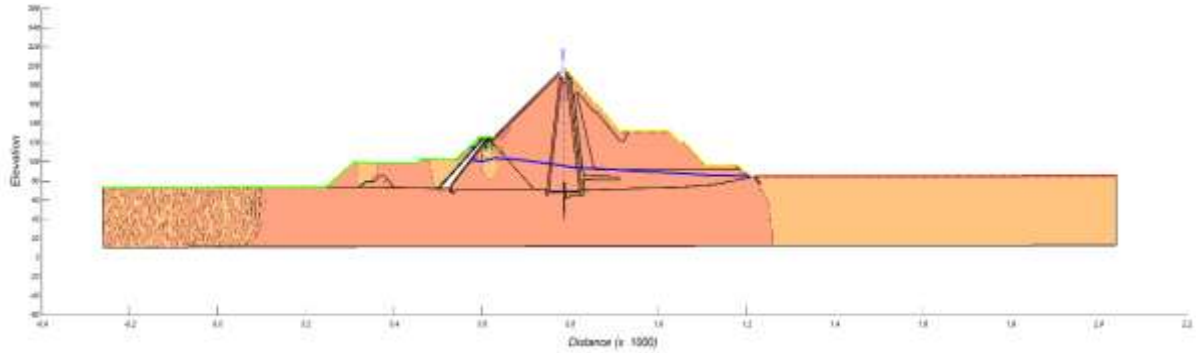
باتوجه به نتایج ارائه شده در فوق می توان بیان داشت که میزان جهت جریان در یک راستا همتراز با گرادیان هیدرولیکی در سد و بستر آن صورت می پذیرد. بارسم تغییرات گرادیان هیدرولیکی جریان در راستای محوری سد (شکل ۴-۱۵)، دیدی مناسب از شرایط تغییرات شیب هیدرولیکی در بدنه سد و بستر آن بدست می‌آید که می‌تواند در تحلیل‌های مربوط به گسیختگی‌های سد بکار برده شود. شکل (۴-۱۶) وضعیت گرادیان هیدرولیکی محوری را در بدنه سد و بستر ارائه داده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴-۱۴: تعیین کنتورهای رفتاری برای جریان آب و گرادیان محوری

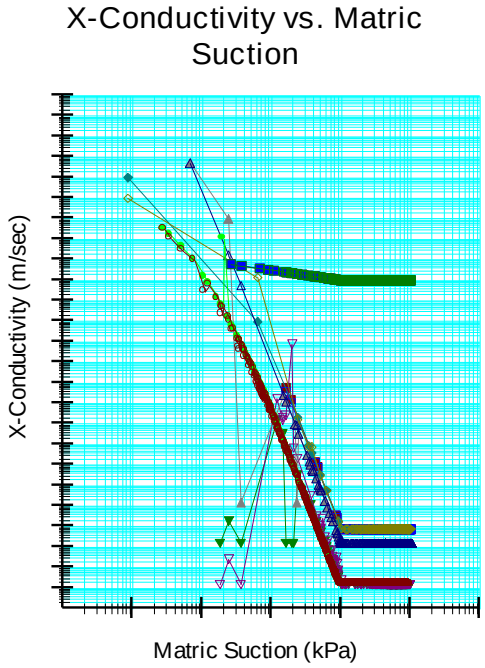


شکل ۴-۱۵: وضعیت جریان آب منفذی و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و بستر سد

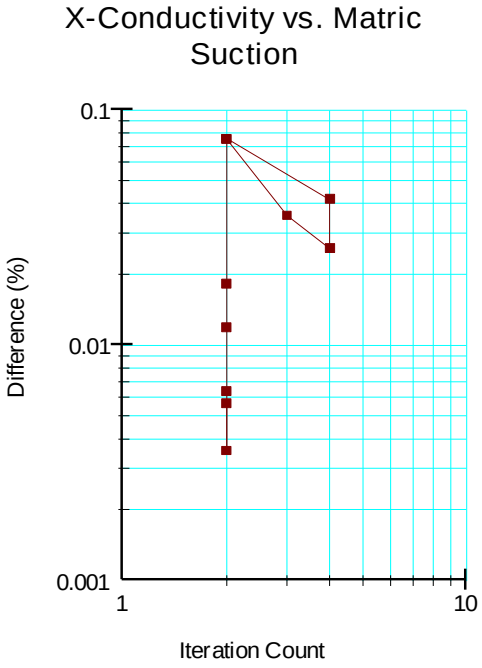
با در نظر گرفتن جریان منفذی و گرادیان هیدولیکی می‌توان تغییرات هدایت هیدرولیکی محوری در سیکل های مختلف مکش برآورد نمود. نتایج حاصل از ارزیابی‌های محوری در شکل (۴-۱۶) آورده شده است. باتوجه به این شکل مشخص می‌گردد که با افزایش میزان سیکل‌های مکش، هدایت هیدولیکی محوری در راستای سد کرخه کاهش پیدا می کند. همچنین میزان تغییرشکل آن در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. با انجام عملیات آبگیری در سد برای تحلیل رفتاری بلند مدت سد، خصوصیات هیدرولیکی در پایین دست سد تغییر پیدا می کند. 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.

www.SID.ir

Archive of SID



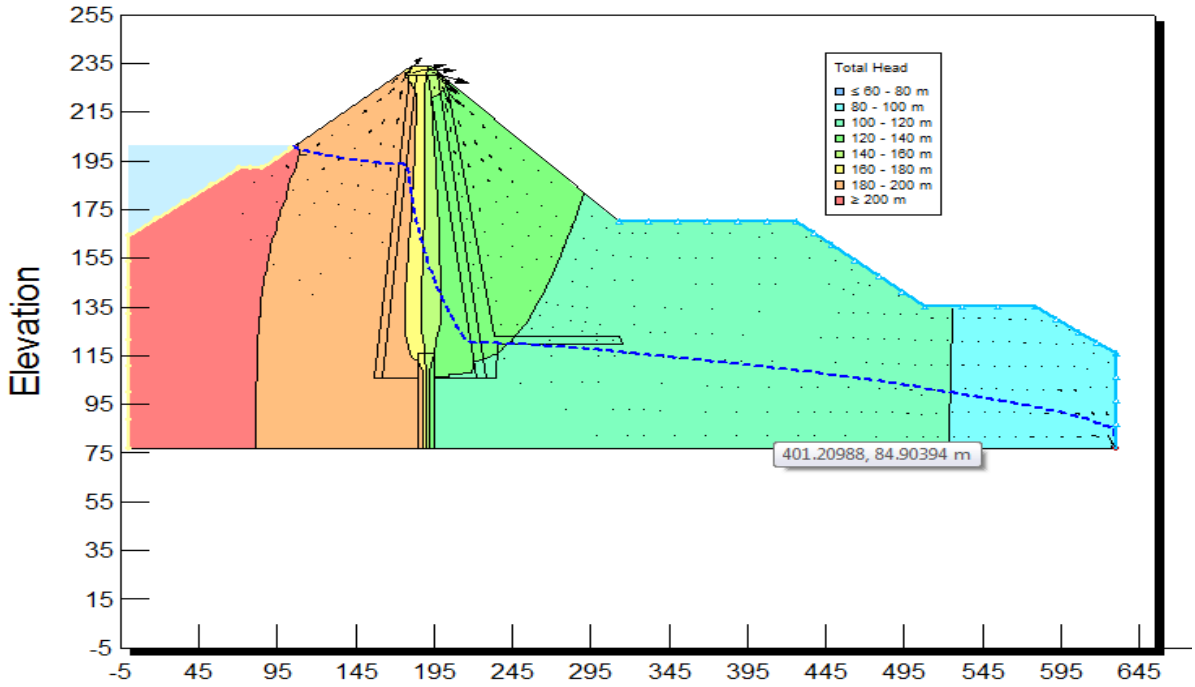
شکل ۴-۱۶: نمودار تغییر هدایت هیدولیکی در سیکل‌های مختلف مکش



شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرشکل در سیکل‌های مختلف مکش

www.SID.ir

Archive of SID

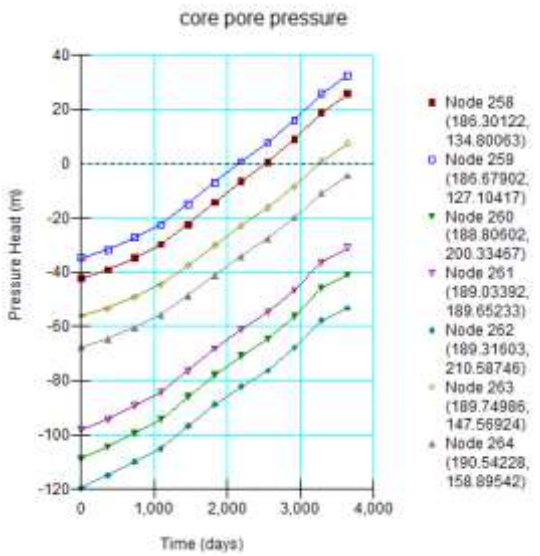


شکل ۴-۱۸: محل قرارگیری سطح آب در حین آبگیری

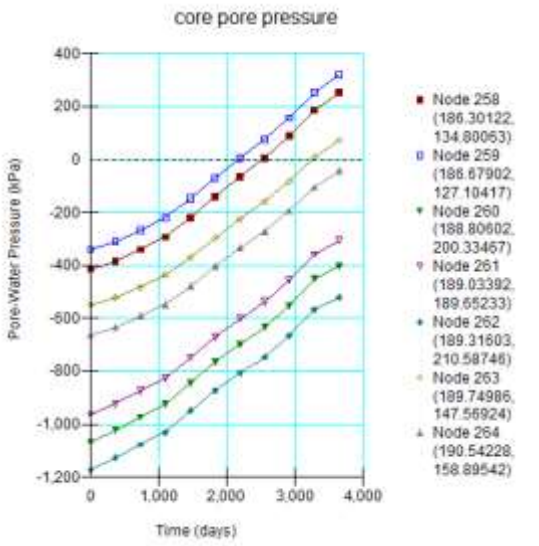
در شکل های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) مقدار هد فشار و فشار آب حفره‌ای برای هسته سد نشان داده شده است. در این نمودارها مربوط نقاط مختلف در هسته سد می‌باشند که مختصات هر کدام از آن‌ها بر روی سد قابل تشخیص است. نقاطی که در آن‌ها مقدار هد منفی می‌باشد؛ نشان دهنده این است که نقاط بالاتر از سطح آب قرار دارند و بنابراین مقدار هد فشار کمتر از صفر خواهد بود. اما با در نظر گرفتن ارتفاع هر نقطه مقدار هد کل بصورت کانتور نشان داده شده در قسمت قبل خواهد بود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴-۱۹: هد فشار در مدت زمان آبگیری سد در هسته سد



شکل ۴-۲۰: فشار آب حفره ای در مدت زمان آبگیری سد در هسته سد

۱-۱۰- 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 کاملاً محافظه‌کارانه و دست‌پایین محاسبه گردند که یک امتیاز در آنالیز حساسیت بشمار می‌آید.
- به منظور ارزیابی و تحلیل شرایط رفتار هیدرولیکی سد کرخه از نرم‌افزار المان محدود و ماژول عددی SEEP/W به عنوان یک واحد تحلیلی نرم‌افزار GEO-SLOPE/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 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.
- در تحلیل بلند مدت برای مدت ۱۰ ساله، بیشترین میزان افت هد با توجه به پایین بودن مقدار ضریب نفوذپذیری در هسته سد اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه در مدت زمان ۱۰ سال سطح آب در شرایط مرزی بالادست افزایش می

www.SID.ir

Archive of SID

یابد در بدنه سد نیز در هر مرحله مقدار سطح آب باید افزایش بیابد. این مسئله سبب گردیده تا تمرکز تنش ها و تغییرشکل‌ها در بخش تاج بیشتر شود.

- با انجام تحلیل موازی توسط نرم‌افزار SEEP/W و Plaxis وضعیت نشست‌پذیری سد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته 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.
- به منظور ارزیابی و صحت سنجی نرم‌افزار و عملکرد تحلیل توسط SEEP/W، مدل توسط نرم‌افزار عددی المان محدود PLAXIS مجدداً مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این ارزیابی شرایط هندسی، خصوصیات، مدل رفتاری و مدل مکانیکی یکسان در نظر گرفته شده است.
- باتوجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار PLAXIS تغییرات فشار آب منقذی و جریان اب در بالا دست سد بیشتر بوده و بطرف پایین‌دست کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده افت درهد کل است. این مسئله توسط نتایج SEEP/W تطابق دارد. همچنین در ارزیابی ۱۰ ساله تغییرشکل‌های رخ داده توسط PLAXIS تغییرات در بخش تاج سد تمرکز نشان می دهند که با نتایج SEEP/W تطابق دارد.
- با مقایسه شهودی بین نتایج حاصل از نرم‌افزارهای SEEP/W و PLAXIS مشاهده می‌گردد که نتایج دارای تطابق بسیار خوبی می باشند. این مسئله گواهی بر صحت انجام کار و تایید عملکردی تحلیل حاضر می باشد.

۱-۱۱-پیشنهادات

در پایان بر اساس نتایج بدست آمده و موارد دارای ابهام و یا مواردی که بدلیل کمبود زمان و داده‌های موجود امکان طرح آن میسر نشد، پیشنهادات زیر برای انجام طرح‌های پژوهشی آینده در این حوزه ارائه می‌گردد:

- بررسی داده های حاصل از ابزاردقیق سد کرخه به صورت هر ۵ سال یکبار و تعیین ابزارهای خراب و یا مشکل‌دار و کالیبراسیون مجدد آنها (در صورت نیاز).
- مطالعه حرکات داخلی سد با استفاده از روش ژئوتکنیکی و نقشه‌برداری از سد و مقایسه آن با داده‌های حاصل از نشست-سنج‌ها و شیب‌سنج‌ها.
- با توجه به این که در ترازهای بالای مخزن در مقدار نشت آب از بدنه و پی سد یک جهش بزرگ اتفاق افتاده است لذا انجام کارهای پژوهشی دقیق‌تر برای بررسی بیشتر موضوع و علت‌یابی آن توصیه می‌شود.

۱-۱۲-منابع

-روشنگر، ک.، روحپرور، ب.، صداقتی، ط. (۱۳۹۵). ارزیابی تاثیر گزینه‌های مختلف طراحی در تحلیل تراوش و پایداری سد گلفرج. فصلنامه دانش آب و خاک، ۲۶(۲): ۱۵-۳۰.

www.SID.ir

Archive of SID

-فتاحیان، م.، یوسف‌زاده، م.، کوهزادیان، ی. (۱۳۹۵). تحلیل پی و بدنه سدهای خاکی در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی با استفاده از مدل های عددی. نشریه مهندسی و مدیریت ساخت، ۱(۲): ۱۱-۱۵.

-کماسی، م.، بیرانوند، ب. (۱۳۹۸). ارزیابی فشار آب حفره‌ای پی و هسته سد سیوند پس از اولین دوره آبگیری در قیاس با نتایج ابزاردقیق. نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران، ۶(۲۱): ۶۳-۷۷.

-کماسی، بیرانوند، ب. (۱۳۹۹). ررسی جابجایی‌های قائم و افقی سد خاکی ایوشان با استفاده از ابزاردقیق و تحلیل عددی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱): ۲۴۵-۲۵۶.

-وزارت نیرو (۱۳۹۸). ارزیابی نتایج ابزاردقیق در بدنه و پی سد کرخه (گزارش مشاور طرح، شرکت مهندسی مشاورمهاب قدس). شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، تهران.

-Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bell G., Foster M. (2014). Geotechnical Engineering of Dams. CRC Press, 1348 p.

Kheiri G., Javdanian H., Shams G. (2020). A numerical modeling study on the seepage under embankment dams. Modeling Earth Systems and Environment, 6: 1075-1087.

-Murthy. V. N. S. (2007). Advanced Foundation Engineering. Bangalore: New Delhi.

-Siswanto M., Suprapto S., Sachro S. (2019). The correlation between reservoir water level elevation and seepage path length to seepage discharge of vertical zoned core rockfill dam (case study: Jatibarang dam). Jurnal Teknik Hidraulik, 10(2): 128-137.

-Shakouri B., Mohammadi M. (2020). Evaluation of Penetration Depth for Cutoff Walls in the Core of Earth Dams. Geotechnical and Geological Engineering, 38: 151-167.

www.SID.ir