

مقایسه عملکرد نرم افزارهای اجزا محدود Geostudio و plaxis2D در رفتار نگاری سدهای خاکی و مقایسه با نتایج ابزار دقیق (مطالعه موردی سد کبودوال استان گلستان)

حسین حکیمی خانسر^۱، سیدحسن گلماهی^۲، مجید شیداایان^۳

^۱ کارشناس ارشدسازه های آبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۳ دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه گرگان

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

حسین حکیمی

hakimi1904@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق سد کبودوال در دوران ساخت در مدل SIGMA/W و پلاکسیس تحلیل برگشتی شده و فشار آب حفره ای، تنش ها در بدنه و نشست با داده های ابزار دقیق مقایسه شده است. با توجه به تطابق بالای نتایج مدل سازی و رفتارنگاری می توان گفت انتخاب مصالح اصلی مدل های رفتاری الاستیک پلاستیک برای بدنه و پی و فیلتر و مدل رفتاری الاستیک خطی برای لایه تزریق، در SIGMA/W و خاک سخت شونده در بدنه و موهر-کلمب در پی در پلاکسیس، به طور مناسبی توانسته رفتار سد را پیش بینی نماید. مدل خاک سخت شونده در نرم افزار پلاکسیس همخوانی بهتری را نسبت به مدل الاستیک-پلاستیک ارائه کرده است. مقطع شماره ۱۹ در کیلومتر ۶۶۰+ واقع گردیده، می تواند بعنوان اولین مقطع بخش میانی بدنه سد مورد بررسی قرار گیرد. بیشترین نشست تجمعی بدنه و پی این مقطع در دوران ساخت سد ۱۸۵۰ میلیمتر بوده است. به عبارتی نشست اختلافی معادل ۵۸۳ میلیمتر در بین این مقطع و مقطع شماره ۱۴ برای پی سد قابل استناد است. ارزیابی این نتایج در کنار هم موید این مهم است که تغییر شکل های قائم بدنه سد از سمت جناحین به سمت مقاطع میانی افزایش یافته است که هر دو نرم افزار بکار رفته در این مقاله آن را تایید می کنند.

واژگان کلیدی: سد خاکی، سد کبود وال، پلاکسیس، نشست.

مقدمه

در اوایل قرن بیستم اندازه‌گیری‌های کنترلی بعد از ساخت روی سدهای خاکی بطور محدود صورت می‌گرفت که بعضی از آنها بصورت بررسی‌های توپوگرافی بوده است. با بیشتر شدن ارتفاع سدها و دقیق‌تر شدن فرآیند طراحی، تکنیک‌های اندازه‌گیری بهبود یافته و تبدیل به یک بخش اساسی در مهندسی پروژه و همچنین در ارزیابی ایمنی سدها گردید. پیشرفت‌های صورت گرفته در طول سی سال گذشته در زمینه ابزار دقیق، رفتارنگاری مستمر ساختار سدها را ممکن ساخته است. رفتارنگاری ساختار سد دو مزیت عمده را دارد: اولاً در سال‌های اولیه ساخت سد، رفتار سد نشان‌دهنده چگونگی رفتار آن در آینده می‌باشد. به این ترتیب فهم جنبه‌های بنیادی طراحی سد را راحت‌تر می‌کند. ثانیاً در طول دوره بهره‌برداری از سد، با رفتارنگاری اطلاعات مورد نیاز جهت ایمنی سد و بهره‌برداری موثر در اختیار اداره‌کنندگان قرار می‌گیرد. تجهیزات و ابزارهای که نصب شده‌اند، تغییر شکل، حالات و موقعیت داخلی مصالح بدنه و سد را در اثر بارهای اعمال شده نشان می‌دهند. با کنار هم قرار دادن داده‌ها در طول زمان می‌توان رفتار گذشته سد را نشان داد که روش‌های گوناگونی در زمینه تحلیل و تفسیر و استفاده از نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفته است. حکیمی خانسر و همکاران (۱۳۹۲).

ایمنی و عملکرد یک سد باید در حین ساخت، اولین آنگیری و در دوران بهره‌برداری کنترل شود. اولین دوره آنگیری احتمالاً بحرانی‌ترین زمان در طول عمر سد است. با افزایش سطح مخزن میزان آنگیزی از پی و بدنه سد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تنش‌های ایجاد شده و نیز فشار آب منفذی در بدنه با توجه به تراز آب و اندازه‌گیری آنها با ابزار دقیق در این دوره از اهمیت ویژه برخوردار است. رفتار غیرخطی و غیر ارتجاعی مصالح سدهای خاکی در بارگذاری و باربرداری و در حالت زهکشی شده یا زهکشی نشده استفاده از مدل‌های رفتاری که قادر به مدل‌سازی رفتار هرچه دقیق‌تر خاک را باشند، ضروری می‌سازد. بلوری و مبینی زاد (۲۰۱۰).

در زمینه رفتارسنجی سدهای خاکی و مدل‌های رفتاری در ایران در چند سال اخیر بررسی و تحقیقاتی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

حصیرچیان، گلمایی و ضیاء تبار احمدی (2009, Hasirchian et al)، مقایسه عددی مدل‌های المان محدود و تفاضلات محدود در تحلیل ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها را بررسی کردند. به این نتیجه رسیدند که دقت بیشتر المان محدود در مقایسه با تفاضلات محدود است و جواب‌های محافظه کارانه‌تری را نتیجه می‌دهد.

همتی و برخوردار (2006, Hemati & Barkhordari) با نرم افزار پلاکسیس به رفتارسنجی سد شیرین دره در انتهای ساخت پرداختند. خروجی نرم افزار با داده‌های مهندسی ابزار دقیق مقایسه و وضعیت عملکرد سد را مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی‌ها نشان دادند نرم افزار رفتار سد را به خوبی مدل نموده‌اند و نشست‌ها و ضرایب فشار حفره‌ای و قوس زدگی در انتهای ساخت در محدوده مجاز قرار می‌گیرد که ایمنی سد را در زمان مزبور تضمین می‌کند.

جهانی، گلمایی و ضیاء تبار احمدی (2010, Jahani et al)، پایداری سدآسفالت هسته‌ای مجیران را در دو حالت استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از آنالیز برگشتی سد با ابزار دقیق تطابق خوبی باهم دارند. و سد در برابر زلزله‌های اعمالی ایمن است.

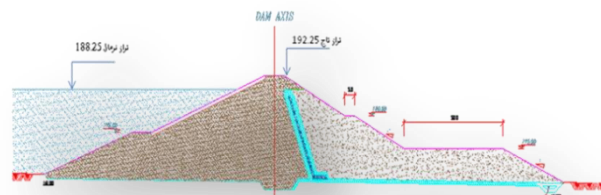
در انجام این تحقیق از نرم‌افزار geo studio استفاده شده است. همچنین هدف انجام آنالیز تغییر شکل و تراوش سد است. لذا همچنین از برنامه SIGMA/W که از زیرمجموعه‌های نرم افزار GEO-SLOPE هستند، استفاده شده است. برنامه SIGMA/W یک برنامه اجزای محدود است که می‌توان از آن برای تحلیل تغییر شکل و تنش در سازه‌های خاکی استفاده کرد. در این برنامه می‌توان یک تحلیل تغییر شکل الاستیک خطی ساده با یک تحلیل تنش موثر الاستوپلاستیک غیرخطی پیشرفته را مورد بررسی قرار داد. هنگامی که SIGMA/W به برنامه متصل می‌شود، می‌توان تولید و اتلاف فشار آب حفره‌ای را در یک سازه خاکی و در اثر بارهای وارده مدل نمود. به طور کلی، در تحلیل و طراحی سدهای خاکی، فرض مدل‌سازی کل سازه در یک مرحله غیر واقعی می‌باشد، به همین منظور باید از قابلیت ساخت مرحله‌ای بهره جست.

به منظور ساخت مرحله‌ای سدکبودال، ابتدا وضعیت قبل از شروع ساخت به عنوان شرایط اولیه معرفی شده و به تدریج کل سازه ایجاد گردید. با توجه به زمان واقعی اجرای خاکریزی بدنه‌ی سد در هشت لایه مدل گردیده، تا به ارتفاع معین تاج رسیده است. بدلیل اهمیت پیش‌بینی رفتار خاک از نظر میزان تغییر شکل در سازه خاکی و تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای بررسی مدل‌های رفتاری ضروری می‌باشد. چرا که مدل‌های رفتاری ارتباط بین تنش و کرنش را برقرار می‌کنند، تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌تواند به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر رفتار سازه‌های خاکی بیانجامد. در این تحقیق سعی بر آن بوده است که سد با مدل‌های رفتاری الاستیک-پلاستیک و الاستیک غیر همگن، الاستیک غیر خطی، الاستیک خطی تحلیل عددی گردد تا یک مدل رفتاری با پارامترهای واقع بینانه برای سد خاکی ایده آل انتخاب گردد.

مواد و روش ها

معرفی سد

سد کبود وال همگن و دارای فیلتر و زهکش مایل است. مخزن آن خارج از حوضه ی 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 سرریز 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. در شکل ۱ مقطع تیپ عرضی بدنه سد کبودال نشان داده شده است.

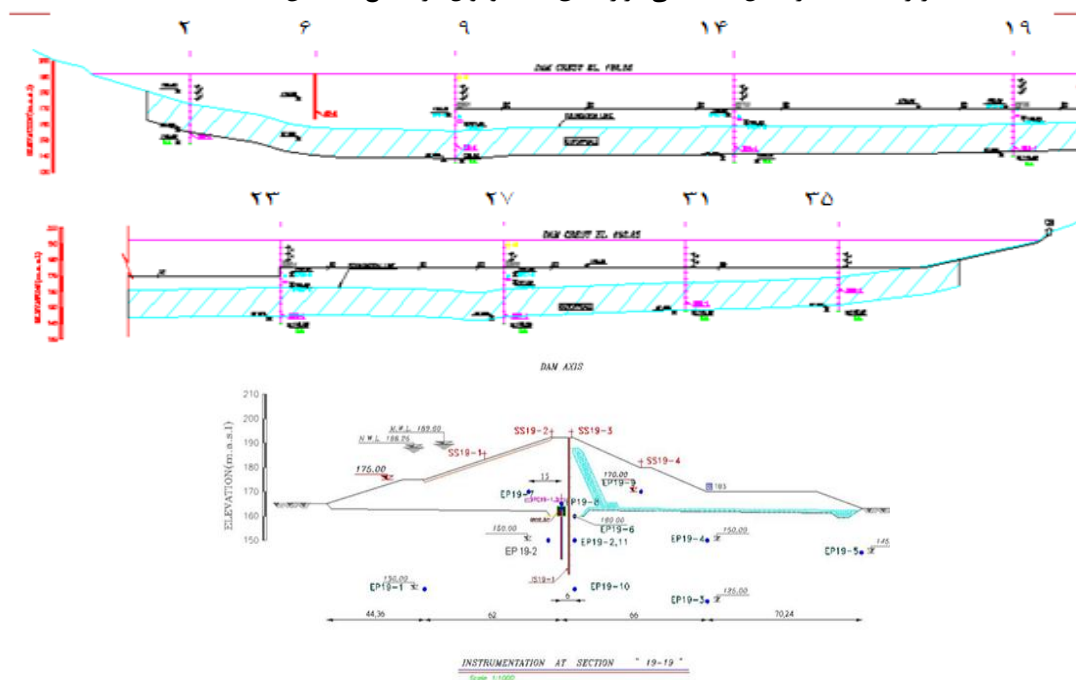


شکل ۱ - مقطع تیپ عرضی بدنه سد کبودال

سیستم ابزار دقیق و مقاطع مختلف سد کبودال

شکل شماره ۲ جانمایی سیستم پیزومتریک (پیزومترهای الکتریکی) و فشارسنجی خاک را در مقطع ۱۹ نشان می دهد در این مقطع (مقطع ۱۹) از بدنه سد در کل ۱۱ پیزومتر الکتریکی به ترتیب ۳ پیزومتر در داخل بدنه سد، یک پیزومتر در حدفاصل پی و بدنه سد و ۷ پیزومتر در داخل پی سد مدنظر قرار گرفته است.

در مورد تغییرشکلهای افقی و قائم (نشست) بدنه و پی، از داده های نشست سنجی و انحراف سنجی پروژه مورد استفاده شده است. برای دستیابی به تغییرشکلهای افقی و قائم (نشست) بدنه و پی، انحراف سنج های قائم به همراه صفحات مغناطیسی نشست سنجی در مقاطع مختلف بدنه سد بکار رفته است. در شکل ۲ جانمایی ابزار دقیق سد کبودال در مقطع ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۲- مقاطع مختلف سد کبود وال و جانمایی ابزار دقیق سد کبودال در مقطع ۱۹

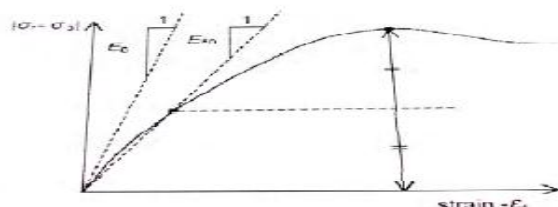
مدل سازی عددی

مدل موهر-کولومب (MC)

این مدل شامل پنج پارامتر ورودی است. پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون برای الاستیسیته خاک و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک برای پلاستیسیته خاک و زاویه اتساع است. مدل موهرکلمب یک تقریب مرتبه اول از رفتار سنگ یا خاک را نشان می دهد. پیشنهاد شده است که این مدل برای تحلیل اولیه از مساله استفاده شود. مدل موهر-کولمب از ساده ترین مدل های رفتاری خاک می باشد و از آنجایی که در این مدل اکثر پارامترهای اساسی خاک، اعم از خمیری و کشسان وجود دارد برای مدل کردن اکثر حالات رفتاری خاک مناسب می باشد. مفهوم پلاستیسیته اصولاً به کرنش های غیرقابل برگشت مربوط می شود. این مدل به دلیل سادگی و عدم نیاز به پارامترهای متعدد، در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده واقع می شود. مفهوم پلاستیسیته اصولاً به کرنش های غیرقابل برگشت مربوط می شود. به این منظور یک تابع تسلیم تنش-کرنش به عنوان یک سطح در فضای تنش های اصلی معرفی می شود تا نقاط پلاستیک را بتوان ارزیابی کرد. بدیهی است نقاطی داخل سطح تسلیم رفتار ارتجاعی کامل دارند.

مدل سخت شونده (HS)

در این مدل اثر خزش یا نشست ثانویه که معمولاً در درازمدت اتفاق می افتد در نظر گرفته نمی شود. بدیهی است با توجه به اینکه در طول ساخت معمولاً نشست های اولیه اتفاق می افتد مدل سخت شونده کارآیی بهتری می تواند داشته باشد. این مدل رفتار خاک را در محدوده الاستیک با استفاده از مدل هایپر بولیک، شبیه سازی می کند. این مدل شامل سخت شونده فشاری می باشد که برای شبیه سازی تراکم برگشت ناپذیر خاک تحت فشار اولیه به کار می رود و هم چنین برای شبیه سازی رفتار ماسه و شن و هم برای انواع نرم تر خاک همانند سیلت ها و رس ها به کار می رود. پارامترهای مشترک این مدل با مدل موهر کولمب غیر سخت شونده عبارتند از: چسبندگی، زاویه ی اصطکاک داخلی، زاویه ی اتساع. پارامترهای پایه سختی خاک عبارتند از: سختی سکانتی در آزمایش سه محوری استاندارد زهکشی شده، سختی مماسی برای مرحله اولیه بارگذاری تحکیمی (ادئومتری)، توان وابستگی سختی به سطح تنش. پارامترهای پیشرفته: سختی باربرداری بارگذاری مجدد، ضریب پواسن برای بار حالت باربرداری بارگذاری مجدد، تنش مبنا برای سختی ها، مقدار K برای خاک تحکیم عادی یافته، نسبت گسیختگی، مقاومت کششی، ضریب تغییر چسبندگی مانند مدل موهر کولمب.



شکل ۳- تعریف برای نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده

برای خاک ها، هر دو مدول باربرداری E_{ur} و مدول بارگذاری اولیه E_{50} با فشار محدود شده افزایش می یابند، بنابراین لایه های عمیق خاک به داشتن سختی بزرگتر از لایه های کم عمق تر منجر می شوند. علاوه بر این، سختی مشاهده شده به مسیر تنشی که آن را هدایت می کند بستگی دارد. سختی باربرداری و بارگذاری مجدد بسیار بزرگتر از بارگذاری اولیه است.

مشخصات مصالح سد کبودال

مشخصات مصالح تشکیل دهنده سد کبودال که شامل چهار بخش اصلی فیلتر و پوسته و پی و لایه تزریق است، در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. در واقع سد به وسیله سه مدل آنالیز شده است. مقادیر وزن مخصوص مرطوب و وزن مخصوص از آزمایش تراکم به دست آمده است. پارامترهای رفتاری خاک در این جدول از آزمایشات سه محوری روی نمونه هایی که با همان وزن مخصوص مرطوب تهیه شده بودند به دست آمده است. آزمایشات روی مصالح بخش های گوناگون سد هم در فاز مطالعاتی و هم در زمان ساخت انجام شده است. در طول ساخت در صورت مشاهده هرگونه تغییر احتمالی در نوع خاک منابع قرضه، آزمایشات طبق نظر مشاور انجام و پارامترهای اندازه گیری شده مجدداً کنترل شدند.

در این تحقیق اطلاعات جمع آوری شده توسط ابزار دقیق در چهار سال متوالی از سال ۸۷ تا سال ۹۱ که زمان مراحل پایانی سد می باشد با نتایج حاصل از مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه در یکی از مقاطع میانی سد کبودال (مقطع ۱۹)

که دارای ابزار دقیق می باشد، بین داده های ابزار دقیق و مدل نرم افزاری انجام شده است. برای تطابق داده ها نقطه ای واقع در محور سد کمی بالاتر از پی سد، در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از ابزار دقیق و نرم افزار باهم در یک تحلیل برگشتی تقریباً یکی شده است. این تحلیل همراه با سعی و خطا بوده که به مهارت کاربر برای حصول نتیجه در زمان کمتر، بستگی دارد. پس از سعی و خطا با آنالیز برگشتی مقادیر زیر از مشخصات مصالح در مدل های رفتاری مربوطه بدست آمده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح در مدل رفتاری سخت شونده و موهر کلمب

خصوصیات مصالح	نوع مصالح	γ_{unsat} کیلونیوتن بر متر مکعب	γ_{sat} کیلونیوتن بر متر مکعب	E_{ref} کیلونیوتن بر متر مربع	ν	C_{ref} کیلونیوتن بر متر مربع	Φ (درجه)	K_{xy} (متر بر روز)
پی	عدم زهکشی	۱۷	۲۰	۱۰۰۰۰	۰/۳	۱۸	۲۹	۰/۰۰۰۰۸۷
بدنه فیلتر و زهکش	زهکشی	۱۹	۲۳	۱۰۰۰۰	۰/۴	۲۲	۲۵	۰/۰۰۸۶۸
	زهکشی	۲۰	۲۱	۲۵۰۰	۰/۲۵	۱۲	۳۶	۸/۶۴

جدول ۲- مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری سخت شونده

خصوصیات مصالح	λ^* -	κ^* -	E_{50} کیلونیوتن بر متر مربع	E_{oed} کیلونیوتن بر متر مربع	E_{ur} کیلونیوتن بر متر مربع	k_0^{nc}
بدنه	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۰/۴۷۸

جدول ۳- مشخصات مصالح در نرم افزار زیو استدیو

مدل سازی عددی در نرم افزار Geostudio

نرم افزار Geostudio از جمله برنامه های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان های محدود بوده و از طریق آن می توان آنالیزهایی از قبیل تنش- کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیب ها، آنالیز دینامیکی و همچنین شرایط افت سریع را بررسی کرد. این نرم افزار شامل قسمت های SIGMA/W برای آنالیز تنش-کرنش SEEP/W، برای آنالیز جریان و تراوش SLOPE/W برای آنالیز پایداری شیب، QUAKE/W برای آنالیز دینامیکی، بر خاک است. لازم به ذکر است که کلیه قسمت های این نرم افزار به غیر از SLOPE/W از روش المان محدود استفاده می کنند و تنها در این بخش از نرم افزار، روش های ترسیمی بکار گرفته شده است. برنامه SIGMA/W یک برنامه اجزای محدود است که می توان از آن برای تحلیل تغییر شکل و تنش در سازه های خاکی استفاده کرد. در این برنامه می توان یک تحلیل تغییر شکل الاستیک خطی ساده تا یک تحلیل تنش موثر الاستوپلاستیک غیرخطی پیشرفته را مورد بررسی قرار داد. هنگامی که برنامه SIGMA/W به برنامه متصل می شود، می توان تولید و اتلاف فشار آب حفره ای را در یک سازه خاکی و در اثر بارهای وارده مدل نمود.

آنالیز تنش- تغییر شکل سد خاکی همگن با استفاده از برنامه SIGMA/W

این بخش از نرم افزار مربوط به آنالیزهای تنش- کرنش، تنش درجا، و تحکیم است که می توان از این طریق تنش های کل و بین ذره ای و فشار آب حفره ای را بدست آورد و از طریق آن تغییر شکل های حاصل در خاک را مشاهده کرد. در این بخش از نرم افزار تحلیل یک سد خاکی همگن مطابق الگوی زیر است.

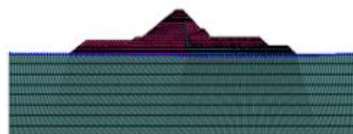
۱- آنالیز تنش - تغییر شکل پی پیش از اجرای خاکریز و بررسی تغییرات پارامترهایی نظیر تنش های قائم و افقی کل، بین ذره ای و فشار آب و نشست با عمق.

۲- بررسی تغییرات پارامترهای مذکور به روش دستی و ارزیابی صحت نتایج.

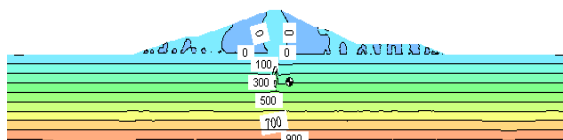
۳- بررسی تغییرات پارامترهای فوق پس از اجرای هشت لایه خاکریزی و مقایسه‌ی نتایج فوق با ابزار دقیق سد و تحلیل نتایج آن. برای تحلیل تنش-کرنش سدهای خاکی و خاکریزه ای معمولاً از روش اجزای محدود به صورت دو بعدی در شرایط کرنش صفحه‌ای که موجب ساده شدن محاسبات گشته استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داده که تحلیل دو بعدی سدهای خاکی که دارای نسبت طول تاج به ارتفاع بزرگی دارند، دارای تقریب خوبی از واقعیت است. تنها در مورد سدهایی که در دره های تنگ ساخته می شوند و احتمال پدیده قوسی شدن وجود دارد، استفاده از تحلیل سه بعدی توصیه شده است. به منظور تحلیل تنش-کرنش سد کبودال از نرم افزار SIGMA/W که بر اساس روش اجزای محدود قادر به تحلیل تنش-تغییر شکل و پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی در حالت کرنش صفحه ای و نیز محاسبه جریان آب در این گونه سازه هاست، استفاده شده است.

نحوه مدل سازی عددی در نرم افزار Geostudio

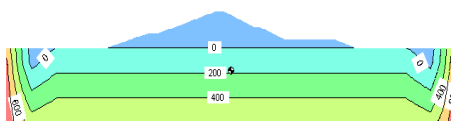
برای تمام خاک‌های معرفی شده مدل رفتاری مناسب در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل به این صورت است که برای تکیه گاه‌های جانبی حرکت در جهت افقی، و برای کف پی حرکت در دو جهت افقی و قائم محدود گردیده است و بقیه نقاط نیز آزاد می‌باشند. در شکل‌های ۵ و ۶ طیف تغییرات تنش کل و فشار آب حفره‌ای در مقطع ۱۹ حاصل از تحلیل Insituie توسط نرم افزار نمایش داده شده است. تحلیل Insituie یک تحلیل اولیه از شرایط پی قبل از خاکریزی را نشان می‌دهد. شکل ۴ مش بندی و شکل ۵ طیف تغییرات تنش کل اولیه محاسبه شده از تحلیل Insituie را نشان می‌دهد.



شکل ۴- هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹ در نرم افزار Seep/w



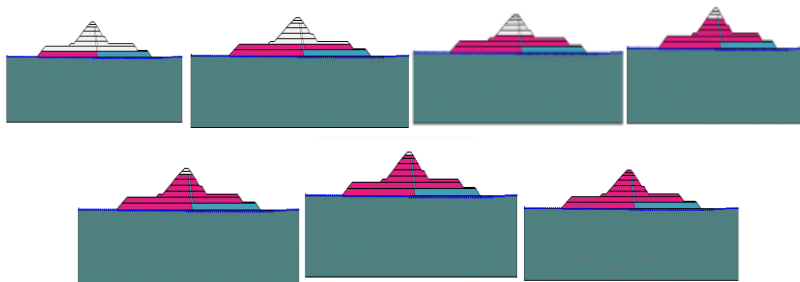
شکل ۵- طیف تغییرات تنش کل اولیه محاسبه شده از تحلیل Insituie



شکل ۶- طیف تغییرات فشار آب حفره‌ای اولیه محاسبه شده از تحلیل Insituie

روند خاکریزی در نرم افزار Geostudio

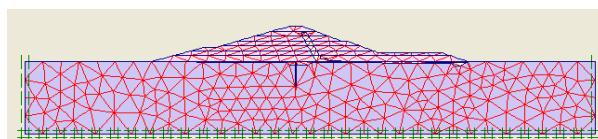
شکل ۷ روند خاکریزی در نرم افزار را نشان می‌دهد.



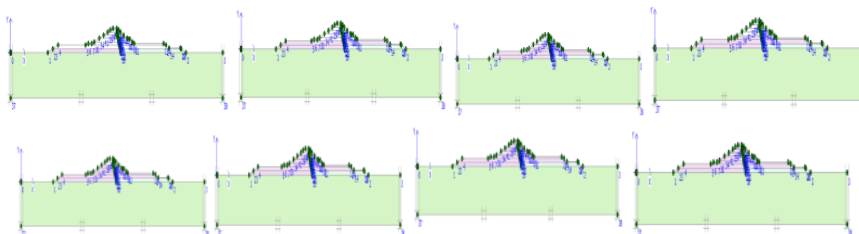
شکل ۷- روند خاکریزی مقطع ۱۹ در نرم افزار Seep/w

نحوه مدل سازی عددی در نرم افزار plaxis دو بعدی

با این نرم افزار می توان خاکبرداری و خاکریزی مرحله ای، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان های مثلثی ۶ گره ای و ۱۵ گره ای مدل سازی نمود. نرم افزار مزبور قادر به شبیه سازی رفتار غیر خطی و وابسته به زمان خاک و نیز تحلیل سد در دوران ساخت و نیز در دوران بهره برداری با در نظر گرفتن فشار آب منفذی است. همچنین تحلیل پلاستیک، ساخت مرحله ای و تحلیل دینامیکی با این نرم افزار ممکن است. برای تحلیل سد کبودال از دو مدل موهر-کلمب و سخت شونده گی استفاده شده است. برای انجام تحلیل های عددی تنش-کرنش به دلیل سازگاری نتایج نرم افزار افزار پلاکسیس در محیط های خاکی از این نرم افزار استفاده شده است. در ساخت مش از المان های ۱۵ گره ای برای مدل کردن توده خاک استفاده شده است. بر همین اساس، اندازه ریز برای مدل کردن اندازه شبکه المان ها در نظر گرفته شده است. همچنین برای حذف شرایط مرزی از هر طرف بسترحداقل ۲ برابر عرض ماکزیمم بدنه از توده خاک مدل شده و با مرز مناسب جایگزین شده است. به وسیله این نرم افزار ساخت لایه لایه و مرحله ای سد مدل شده و پدیده تحکیم شبیه سازی شده و تحلیل های عددی در دو محیط تنش کل و تنش موثر انجام گرفته است. در شکل ۸ هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹ سد به منظور انجام تحلیل های عددی بر گشتی ارائه شده است. در این تحلیل اطلاعات جمع آوری شده توسط ابزار دقیق در سه سال متوالی از سال ۸۷ تا سال ۹۰ که زمان مراحل پایانی سد می باشد با نتایج حاصل از مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه در یکی از مقاطع میانی سد کبودال (مقطع ۱۹) که دارای ابزار دقیق می باشد، بین داده های ابزار دقیق و مدل نرم افزاری انجام شده است. برای تطابق داده ها نقطه ای واقع در محور سد کمی بالاتر از پی سد، در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از ابزار دقیق و نرم افزار با هم در یک تحلیل برگشتی تقریباً یکی شده است. در ادامه در نرم افزار ۱۶ فاز محاسباتی برای خاکبرداری و خاکریزی مقطع سد به روش ساخت مرحله ای تعریف شد.



شکل ۸- هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹

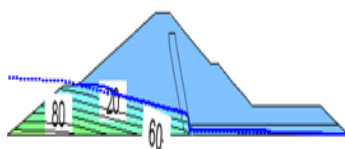


شکل ۹- روند خاکریزی مقطع ۱۹ در نرم افزار پلاکسیس

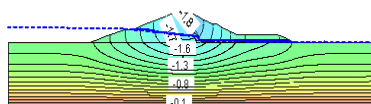
نتایج و بحث

نتایج حاصل از نرم افزار Geostudio و پلاکسیس

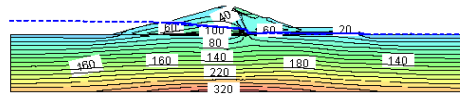
در شکل های زیر خروجی حاصل از دو نرم افزار ارایه شده است. این نرم افزار با گرافیک قوی که دارند قادر به محاسبه پارمترهای متفاوت خاک در مقاطع مختلف سد هستند.



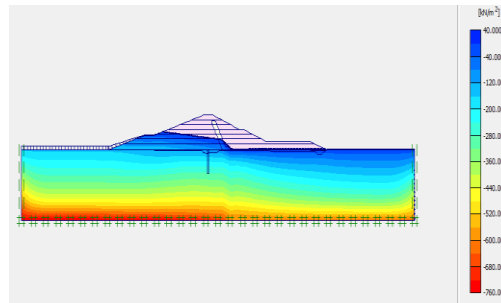
شکل ۱۰- توزیع فشار آب حفره ای بدنه در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۱۹



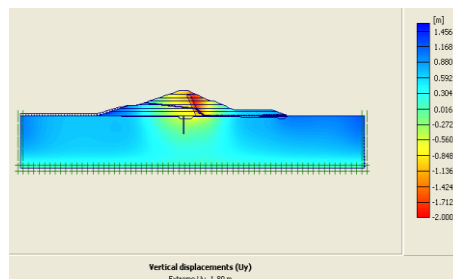
شکل ۱۱- توزیع نشست در خاکریز و پی سد در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۱۹



شکل ۱۲- توزیع تنش کل افقی در خاکریز و بی سد در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۱۹



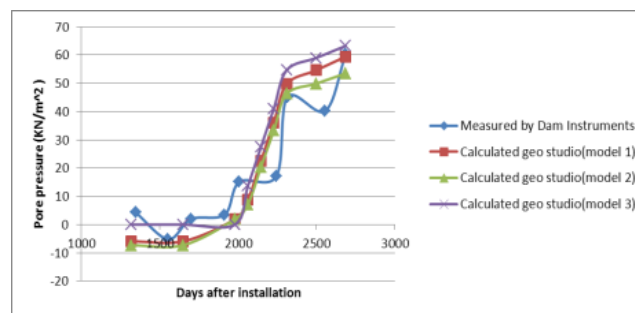
شکل ۱۳- توزیع فشار آب حفره‌ای در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۱۹ (مدل خاک سخت‌شونده)



شکل ۱۴- توزیع نشست در مقطع ۱۹ سد در آخرین مرحله خاکریزی (مدل خاک سخت‌شونده)

بررسی فشار آب حفره‌ای

مهمترین عواملی را که بایستی دائم در دوران ساخت بررسی کرد فشار آب منفذی، تنش‌های ایجاد شده و نشست است. نظر به اینکه برای اجرای بدنه سد رطوبت خاک حوالی رطوبت بهینه و درصد تراکم حدود ۹۸ درصد است، هنگام متراکم کردن، خاک حالت پیش تحکیم یافته پیدا می‌کند و ممکن است فشار منفذی منفی در بدنه به وجود آید. شکل ۱۵ وضعیت تغییرات فشار آب حفره‌ای مقطع ۱۹-۱۹ سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهد.



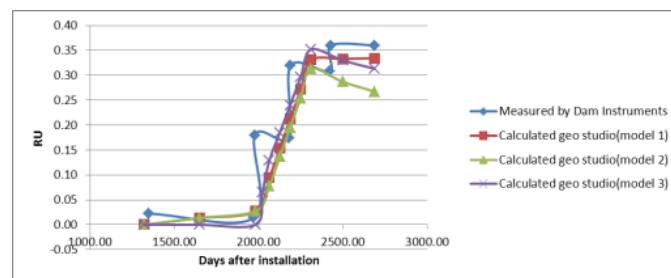
شکل ۱۵- وضعیت تغییرات فشار آب حفره‌ای مقطع ۱۹-۱۹ سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

همانطور که در شکل‌های بالا دیده می‌شود، با ساخت مرحله‌ای به علت افزایش حجم سربار مقدار فشار آب حفره‌ای در حال افزایش است. پیژومترهای واقع در محور سد عدد بیشتری را نسبت به پیژومترهای بالادست و پایین‌دست سد نشان می‌دهد. که علت آن این است که سد در حین انجام خاکریزی آبیگری نیز شده است و به علت دور بودن پیژومترهای واقع در پایین دست محور سد از آب نفوذی در سد عددی کمتری را نسبت به سایر پیژومترها نشان می‌دهد، اما تفاوت آن قابل ملاحظه نیست. ماکزیمم افزایش فشار آب حفره‌ای در بخش مرکزی اتفاق می‌افتد که در آن فشار سربار بیشتر و تأثیرات ناشی از زه‌کشی مصالح فیلتر حداقل است. ضریب فشار آب حفره‌ای شاخص مهم در ارزیابی فشار آب حفره‌ای است، از محاسبه نسبت فشار آب حفره‌ای ثبت شده به فشار خاک اندازه‌گیری شده، می‌توان ضریب R_u را

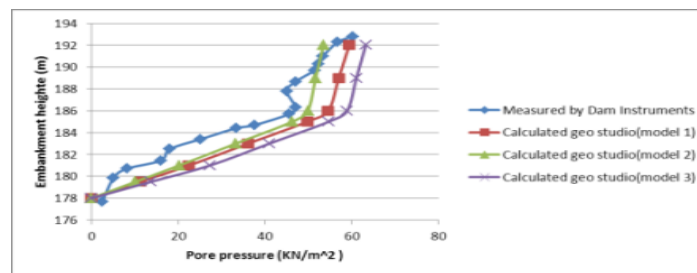
برای دوران ساخت در دو موقعیت بالادست و محور سد این مقطع تعیین نمود. ضریب فشار آب حفره ای = نسبت فشار آب حفره ای ثبت شده تقسیم بر فشار خاک اندازه گیری شده:

$$R_U = \frac{U}{\sigma_v} \quad (7)$$

فشار قائم خاک از حاصل ضرب وزن مخصوص خاک ضرب در ارتفاع خاکریزی بدست می‌آید. ثبات نسبی ضریب فشار آب حفره‌ای در طول عملیات خاکریزی و نیز قبل و بعد از آن آگیری سد نشان‌دهنده مناسب بودن سرعت عملیات خاکریزی و غیر محتمل بودن بروز پدیده شکست هیدرولیکی است. شکل ۱۶ وضعیت تغییرات پارامتر R_U مقطع ۱۹-۱۹ در نقطه نشان داده شده در بدنه سد را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود مقدار آن کمتر از ۰/۴۰ است. در مجموع، این محدوده تغییرات در رنج مجاز قرار دارد.



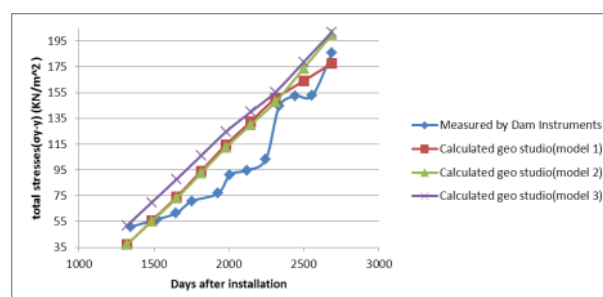
شکل ۱۶- وضعیت تغییرات پارامتر R_U مقطع ۱۹-۱۹ در محور سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی



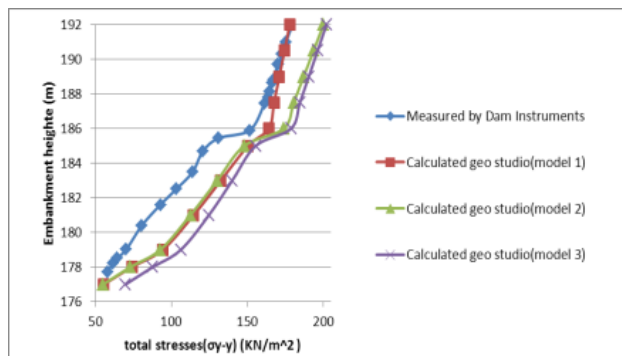
شکل ۱۷- تغییرات فشار آب حفره‌ای پیژومتر و مدل رفتاری (آنالیز برگشتی) در رقوم مختلف خاکریزی مقطع ۱۹

بررسی تنش کل خاک

اصولاً تنش سنج‌هایی که در سدهای خاکی نصب می‌شوند فقط تنش‌های عمودی را اندازه‌گیری کرده و قادر به اندازه‌گیری تنش‌های برشی نیستند. در حالت کلی بر اساس روابط مکانیک جامدات هنگامی که مقادیر تنش‌های عمودی در یک نقطه و در سه جهت دلخواه مشخص باشند تنش‌های اصلی را در آن نقطه می‌توان محاسبه کرد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ وضعیت تغییرات تنش کل با زمان ساخت و تراز خاکریزی در مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهند. شکل ۱۸ وضعیت تغییرات تنش کل با زمان ساخت مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- وضعیت تغییرات تنش کل با زمان ساخت مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی



شکل ۱۹- وضعیت تغییرات تنش کل با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

در پایان مقایسه نتایج آنالیز باننایج ابزار دقیق سد کبودوال بلافاصله پس از ساخت سد با نرم افزار Geostudio و پلاکسیس در جدول ۵۶ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقایسه نتایج آنالیز باننایج ابزار دقیق سد کبودوال بلافاصله پس از ساخت سد با نرم افزار Geostudio

موقعیت				نتایج ابزار دقیق			نتایج آنالیز عددی Geostudio		
ابزار	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به محور سد	فشار آب منفذی kPa	تنش کل kN/m2	ضریب فشار آب منفذی Ru(pp/gH)	فشار آب منفذی kPa	تنش کل kN/m2	ضریب فشار آب منفذی Ru(pp/gH)
Ep19-7 Tpc19-1	۱۹	۱۷۰	-۱۵	۵۱	۱۴۵	۰/۳۵	۴۷	۱۵۰	۰/۳۱
Ep19-8 Tpc19-1	۱۹	۱۶۳	۰	۵۳/۷۴	۱۸۹	۰/۲۸	۶۰	۲۰۰	۰/۳
Ep19-6	۱۹	۱۶۰	+۶	۳۸/۴۳	-	-	۴۲	-	-
Ep19-11	۱۹	۱۵۰	+۶	۱۸۴	-	-	۱۷۸	-	-

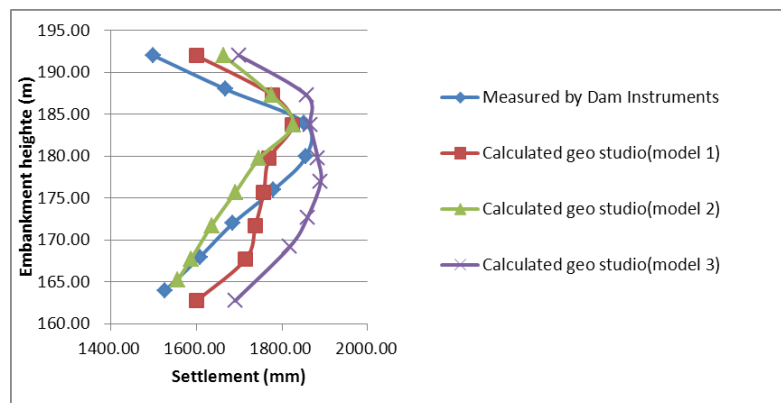
جدول ۶- مقایسه نتایج آنالیز باننایج ابزار دقیق سد کبودوال بلافاصله پس از ساخت سد با نرم افزار پلاکسیس

موقعیت				نتایج ابزار دقیق			نتایج آنالیز عددی پلاکسیس		
ابزار	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به محور سد	فشار آب منفذی kPa	تنش کل kN/m2	ضریب فشار آب منفذی Ru(pp/gH)	فشار آب منفذی kPa	تنش کل kN/m2	ضریب فشار آب منفذی Ru(pp/gH)
Ep19-7 Tpc19-1	۱۹	۱۷۰	-۱۵	۵۱	۱۴۵	۰/۳۵	۴۹	۱۵۰	۰/۳۲
Ep19-8 Tpc19-1	۱۹	۱۶۳	۰	۵۳/۷۴	۱۸۹	۰/۲۸	۶۱	۲۰۰	۰/۳
Ep19-6	۱۹	۱۶۰	+۶	۳۸/۴۳	-	-	۴۰	-	-
Ep19-11	۱۹	۱۵۰	+۶	۱۸۴	-	-	۲۰۰	-	-

بررسی نشست

نشست سد را به دو بخش نشست در طول ساخت و پس از ساخت (دوران بهره‌برداری) می‌توان تقسیم کرد. مقطع شماره ۱۹ در ۶۶۰+ واقع گردیده، می‌تواند به عنوان اولین مقطع بخش میانی بدنه سد مورد بررسی قرار گیرد. بیشترین نشست تجمعی بدنه و پی این مقطع در دوران ساخت سد ۱۸۵۰ میلیمتر بوده است. همان طور که در شکل زیر ملاحظه می‌شود، دو نرم افزار بخوبی توانسته

اند عمل مدل سازی را انجام دهند. شکل ۲۰ وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می دهد.



شکل ۲۰- وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

نتیجه گیری

با توجه به این که پارامترهای مقاومتی خاک که در مدلسازی استفاده می‌شود، حاصل از نتایج آزمایشگاهی است و از طرفی فرضیات ساده شونده‌ای مانند فرض کرنش صفحه‌ای و یا همسان‌گرد بودن خاک به طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده‌های ابزار دقیق و نتایج دور از انتظار نیست. با توجه به روند صحیح افزایش فشار آب منفذی در رقوم نزدیک پی که با افزایش رقوم خاکریزی رخ داده است، می‌توان این چنین نتیجه گرفت که مدل‌های بکار رفته توانسته است رفتار فشار آب منفذی را به طور دقیق و مناسبی برآورد نماید. بررسی داده‌های فشارسنجی فشار آب حفره‌ای و تنش کل خاک نشان داد که در هنگام ساخت بدنه سد با کنترل صحیح عملیات‌های اجرایی (بر پایه روش مشاهده حین اجرا) ضریب Ru در بدنه سد کمتر از ۰/۴ بوده و مقدار آن در پی ناچیز بوده است. توجه به تطابق بالای نتایج مدل‌سازی و رفتارنگاری، می‌توان نتیجه گرفت که، انتخاب مصالح به عنوان مصالح اصلی مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک برای مصالح بدنه و پی و مدل رفتاری الاستیک خطی برای لایه تزریق، به طور مناسبی توانسته است رفتار سد را پیش‌بینی کند. کارایی روش و نرم افزار به کار رفته جهت مدل نمودن رفتار سدهای خاکی در حین، انتهای ساخت مناسب است. نتایج آنالیز رفتار سد حاکی از مدل‌سازی صحیح آزمایش‌های سه محوری و انتخاب صحیح پارامترهای آنالیز به صورت تنش مؤثر، می‌باشد. هر سه مدل هم‌خوانی خوبی را با داده‌های ابزار دقیق نشان می‌دهند اما مدل خاک سخت‌شونده در نرم‌افزار پلاکسیس هم‌خوانی بهتری را نسبت به مدل الاستیک - پلاستیک ارائه کرده است. اصولاً مدل الاستیک - پلاستیک به دلیل آنکه خاک رفتار پلاستیک تنها یا الاستیک تنها را ندارد بلکه رفتاری بین آن دو یعنی الاستیک - پلاستیک را دارا می‌باشد، بهتر می‌تواند مدل‌سازی نماید. از طرفی در مدل سخت‌شونده اتساع خاک در هنگام برش دیده شده است. مدل سخت‌شونده به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای بیشتری از خاک رفتار این نوع مصالح را بهتر مدل می‌نماید. بر اساس اندازه گیری‌های به عمل آمده توسط پیزو متر های نصب شده در داخل پی و طرفین پرده آب بند افت قابل ملاحظه‌ای در تراز پیزو متر یک آب در طرفین پرده آب بند مشاهده می‌شود که عملکرد مناسب این پرده را نشان می‌دهد. این افت در داخل بدنه سد که به عنوان یک قسمت نفوذ ناپذیر در این نوع از سد ها عمل می‌کند نیز به وضوح دیده می‌شود که عملکرد مثبت بدنه را یادآور می‌شود. مقطع شماره ۱۹ در کیلومتر ۶۶۰+ واقع گردیده، می‌تواند بعنوان اولین مقطع بخش میانی بدنه سد مورد بررسی قرار گیرد. بیشترین نشست تجمعی بدنه و پی این مقطع در دوران ساخت سد ۱۸۵۰ میلی‌متر بوده است. به عبارتی نشست اختلافی معادل ۵۸۳ میلی‌متر در بین این مقطع و مقطع شماره ۱۴ برای پی سد قابل استناد است.

منابع و مراجع

- [۱] بلوری بزارج، مبینی زاد، محسن. ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی. مجله پژوهش آب ایران. سال چهارم/ شماره ششم/ بهار و تابستان ۱۳۸۹ (۱۰-۱)
- [۲] داده های ابزار دقیق سد کبودوال سال ۹۱، شرکت سهامی آب منطقه ای گلستان
- [۳] حکیمی خانسرخ، و همکاران. ۱۳۹۲. ارزیابی رفتار سد های خاکریزه ای با استفاده از نرم افزار PLAXIS و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق (مطالعه ی موردی سد کبودوال). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، بهمن ۱۳۹۲.
- [۴] جواهری، ا.، ا. پاک نیت. ۱۳۹۰. تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از Gio studio. انتشارات علم عمران، چاپ دوم. کد B035. ص ۷۰-۹۵.
- [۵] جهانی، ص.، ح. گلمایی و م. ضیاءتبار احمدی. ۱۳۸۹. مطالعه و بررسی مدل سازی عددی اجزای محدود جهت بررسی پایداری شیروانی ها در حین ساخت و پرشدن و افت سریع مخزن (مطالعه ی موردی سد میجران با استفاده از نرم افزار Plaxis). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، .
- [۶] حصیر چیان، م. ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی مدل های رفتاری در تحلیل سدهای خاکریزه ای به روش آنالیز برگشتی (کاربرد موردی سد البرز). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد. ص ۴۵-۵۹.
- [۷] حصیر چیان، م. ۱۳۸۸. مطالعه و بررسی مدل سازی عددی اجزای محدود جهت بررسی پایداری شیروانی ها در حین ساخت و پرشدن و افت سریع مخزن. نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
- [۸] گزارش رفتار سنجی سد کبودوال سال ۹۲، شرکت سهامی آب منطقه ای گلستان
- [۹] گزارشات مصالح قرضه آزمایشگاهی تحلیل های بدنه فنی و ابزار دقیق سد کبودوال، شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان گلستان
- [۱۰] وفائیان، م.، " سدهای خاکی "، چاپ سوم، انتشارات جهاددانشگاهی واحد صنعتی اصفهان-مرکز انتشارات
- [11] 11-R.B.J. Brinkgreve, Plaxis Manual, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Delf University of Technology & b.v, The Neatherlands, 2002
- [12] 6- ICOLD, "World Register of dams", 1988, Paris.
- [13] 12- Kuo, j. t. and Yen, B. C., "Risk Analysis in Dam Safety Assessment", 1999, Water
- [14] Resources Publications, 179p.
- [15] 113- Maloney, T., "What if you to keep your dam?", 1999, Haustonnic Current, summer, SR8.
- [16] 14 Clough, G. W. and R. J. Woodward. 1967. Analysis of Embankment Stress and Deformation. Proceedings Paper,
- [17] 15-J.Soil Mech. and Found. Div., ASCE 93(4):529-549.9-, Instituto de Ingernieria, UNAM, Mexico City, Mexico