ارزیابی رفتار سد خاکی کبودوال (قره سو – زرینگل) در طول ساخت به روش اجزای محدود با نرم افزار PLAXIS و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده های ابزار دقیق

حسین حکیمی خانسر*[۱]، سیدحسن گلمایی[۲] و مجید شیداییان [۳]

۱) کارشناس ارشد، گروه سازه های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی ومنابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۳) دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران.

نویسنده مسئول: Hakimi1904@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۰۴ **تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۰**

چکیده

در تحقیق حاضر براساس داده های ابزار دقیق سد خاکی کبودوال، فشار آب حفره ای، تنش های ایجاد شده و نیز نشست سد در دوران ساخت با مقادیر حاصل ازتحلیل عددی مقایسه شده است. به این منظور دوران ساخت سد با استفاده از مدل‌های رفتاری موهر-کلمب، مدل نرم شونده، مدل سخت شونده تحلیل گشته و فشار آب حفره‌ای، تنش های ایجاد شده در بدنه و نشست آن با داده های ابزار دقیق مقایسه شده است. با توجه به هم خوانی داده های ابزاردقیق و نتایج حاصل از تحلیل، می توان گفت مدل رفتاری انتخاب شده قادر به پیشبینی مناسب رفتار سد در این مرحله هستند. هر سه مدل هم خوانی خوبی را با داده های ابزار دقیق نشان می دهند، اما مدل سخت شونده هم خوانی بهتری را ارائه کرده است. اصولاً مدل سخت شونده به دلیل آنکه پارامترهای بیش‌تری از خاک را در نظر می گیرد، رفتار این نوع مصالح را بهتر مدل می نماید. مقدار Ru کمتر از ۰/۴۰ است. عملا بیش‌ترین مقدار این ضریب طی سال ۹۰-۹۱ اتفاق افتاده است که دلایل آن آبگیری مخزن و به ویژه به‌علت بارگذاری بدنه سد (تکمیل خاکریزی بدنه سد) بوده است. در مجموع، این محدوده تغییرات در محدوده مجاز قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، سدکبودوال، رفتار نگاری، Plaxis و مدل رفتاری خاک.

مقدمه

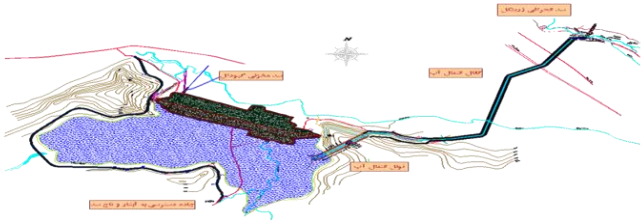
ایمنی و عملکرد یک سد باید در حین ساخت، اولین آبگیری و در دوران بهره برداری کنترل شود. اولین دوره آبگیری احتمالاً بحرانی ترین زمان در طول عمر سد است. با افزایش سطح مخزن میزان آبگذری از پی و بدنه سد مورد ارزیابی قرار می گیرد. تنش های ایجاد شده و نیز فشار آب منفذی در بدنه با توجه به تراز آب و اندازه گیری آنها با ابزار دقیق دراین 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 مدل های رفتاری که قادر به مدل سازی رفتار هرچه دقیق تر خاک را باشند، ضروری می سازد. (بلوری‌زاد و مبینی زاد، ۱۳۸۹). در زمینه رفتارسنجی سدهای خاکی و مدل‌های رفتاری در ایران در چند سال اخیر بررسی و تحقیقاتی صورت گرفته است که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد. اهمیت ویژه ابزار دقیق در سدها به نقش آن‌ها در کنترل پایداری کوتاه و دراز مدت سدها بر می‌گردد، به گونهای که در رفتارنگاری سدها مورد توجه مهندسان واقع شده است (US Army Corps of Engineers, 1995). در حال حاضر، رفتارنگاری در سدهای خاکی با رفتار بسیار پیچیده بخشی از برنامه جامع کنترل پایداری است. به عبارتی هدف اصلی که تشخیص هرگونه مشکل احتمالی که پایداری سد را تهدید کند است به خوبی با رفتارنگاری توسط ابزار دقیق برآورده میشود (Myers and Statelier, 2008). حصیرچیان (۱۳۸۹)، مقایسه عددی مدل های المان محدود و تفاضلات محدود در تحلیل ضریب اطمینان پایداری شیروانی ها را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که دقت بیشتر المان محدود در مقایسه با تفاضلات محدود است و جواب های محافظه کارانه‌تری را نتیجه می‌دهد. همتی و برخورداری (۱۳۸۵) با نرم افزار PLAXIS به رفتارسنجی سد شیرین دره در انتهای ساخت پرداختند. خروجی نرم افزار با داده های 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 نشست ها و ضرایب فشار حفره‌ای وقوس زدگی در انتهای ساخت در محدوده مجاز قرار می گیرد که ایمنی سد را در زمان مزبور تضمین می‌کند. جهانی و همکاران (۱۳۹۰) پایداری سدآسفالت هسته ای 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 زلزله های اعمالی ایمن است. به‌منظور ساخت مرحله ای سدکبودوال، ابتدا وضعیت قبل از شروع ساخت به عنوان شرایط اولیه معرفی شده و به تدریج کل سازه ایجاد شد. 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 دراین زمینه می‌تواند به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر رفتار سازه‌های خاکی بیانجامد.

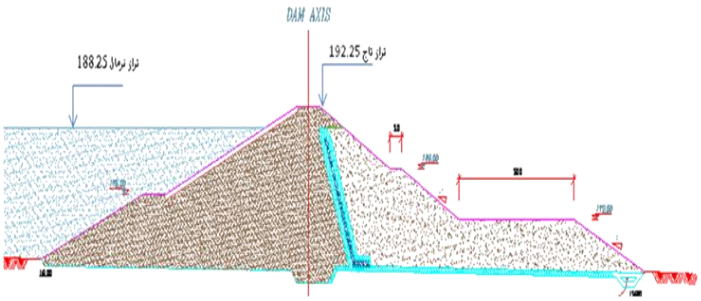
مواد و روش‌ها

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 متراست. 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.



شکل ۱: جانمائی کلی پروژه



شکل ۲: مقطع تیپ عرضی بدنه سد کبودوال

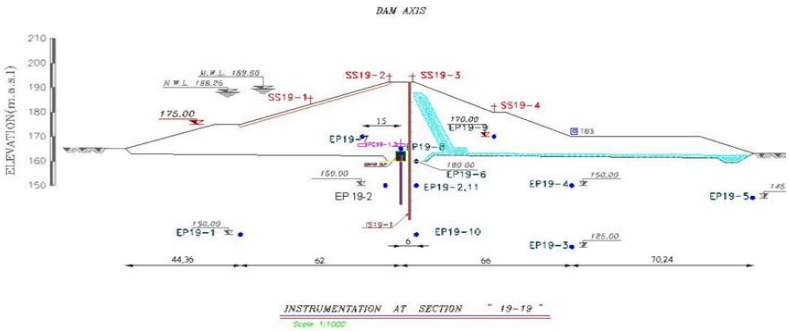
پارامترهای رفتاری و سیستم و مقاطع ابزار دقیق سدکبودوال

در مورد تغییرشکل‌های بدنه و پی، از داده‌های نشست‌سنجی و انحراف‌سنجی پروژه مورد استفاده شده است. برای دستیابی به تغییرشکل‌های بدنه و پی، انحراف سنج‌های قائم به همراه صفحات مغناطیسی نشست‌سنجی در مقاطع مختلف بدنه سد به‌کار رفته است.

مدل‌سازی

مدل موهر-کولومب (MC)

این مدل شامل پنج پارامترورودی است. پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون برای الاستیسیته خاک و چسبندگی و زاویه اصکاک داخلی خاک برای پلاستیسیته خاک و زاویه اتساع است.



شکل ۳: جانمایی ابزار دقیق سدکبودوال در مقطع ۱۹

مدل موهرکلمب یک تقریب مرتبه اول از رفتار سنگ یا خاک را نشان می‌دهد. پیشنهاد شده است که این مدل برای تحلیل اولیه از مساله استفاده شود. مدل موهر- کولمب از ساده‌ترین مدل‌های رفتاری خاک می‌باشد 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 می‌باشد. مفهوم پلاستیسیته اصولاً به کرنش‌های 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. براساس این مدل،کرنش و نرخ کرنش از دو بخش الاستیک و پلاستیک تشکیل میشوند. به عبارتی

$$\underline{\sigma}' = (\underline{\underline{D}}_0^e - \frac{\underline{a}}{d}\underline{\underline{D}}_0^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'}\frac{\partial f^t}{\partial \sigma'}\underline{\underline{D}}_0^e)\varepsilon^{0\prime}$$

رابطه ۱:

بر اساس تئوری پلاستیسیته کرنش های پلاستیک متناسب با مشتق تابع تسلیم نسبت به تنش ها می باشد. به عبارتی کرنش های پلاستیک را می توان به صورت بردارهایی عمود بر سطح تسلیم در نظر گرفت. بر این اساس می توان رابطه بین نرخ تنش مؤثر و کرنش مؤثر را به دست آورد. در این رابطه $d = \frac{\partial g}{\partial \sigma'}\underline{\underline{D}}_0^e\frac{\partial f^t}{\partial \sigma'}$ است. معیار تسلیم مور-کلمب از شش تابع تسلیم که بر حسب تنش‌های اصلی بوده و یک مخروط شش وجهی را در فضای تنش‌های اصلی تشکیل می‌دهند می‌توان به‌صورت رابطه کلی زیر نشان داد:

رابطه ۲: $$f(j,i,k) = \frac{1}{2}\left|\left[\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)}\right]\right| + \frac{1}{2}\left|\left[\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)}\right]\right|\sin\emptyset - c\cos\emptyset \le 0$$

که i، j و k به ترتیب برابر ۱و۲و۳ هستند. دو پارامتر دیگر در این مدل c به معنی چسبندگی و f زاویه اصطکاک خاک هستند. هم چنین شش تابع پتانسیل پلاستیک را برای این مدل را به‌صورت رابطه کلی زیر می‌توان تعریف کرد:

رابطه ۳: $$g(j,i,k) = \frac{1}{2}\left|\left[\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)}\right]\right| + \frac{1}{2}\left|\left[\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)}\right]\right|\sin\emptyset \le 0$$

مدل سخت شونده(HS)

در این مدل اثر خزش یا نشست ثانویه که معمولاً دردرازمدت اتفاق می افتد درنظر 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 رفتارخاک را درمحدوده الاستیک بااستفاده از مدل هایپربولیک، شبیه‌سازی می‌کند. این مدل شامل سخت شونده فشاری می‌باشد که برای شبیه سازی تراکم برگشت ناپذیر خاک تحت فشار اولیه به کار می‌رود و هم چنین برای شبیه‌سازی رفتار ماسه و شن و هم برای انواع نرم تر خاک همانند سیلت‌ها و رس‌ها به کار می‌رود. پارامترهای مورد نیاز برای این مدل رفتاری به قرار زیر است. پارامترهای مشترک این مدل با مدل موهرکولمب غیرسخت شونده عبارتند از: چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه ی اتساع. پارامترهای پایه سختی خاک عبارتند از: سختی سکانتی درآزمایش 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 بارحالت باربرداری بارگذاری مجدد، تنش مبنا برای سختی ها، مقدار K برای خاک تحکیم عادی یافته، نسبت گسیختگی، مقاومت کششی، ضریب تغییرچسبندگی مانند مدل موهرکولمب (بلوری بزار و همکاران، ۱۳۸۹). در مدل رفتاری سخت شونده سطح تسلیم در فضای تنش های اصلی محدود نبوده و به علت وجود کرنش هایپلاستیک سطح مزبور توسعه می یابد. در این مدل دو رفتار برشی و فشاری سخت شونده که به‌ترتیب برای مدل کردن کرنش های پلاستیک غیرقابل برگشت در اثر تنش انحرافی و تنش فشاری همه جانبه به کار می روند، وجود دارد. هم چنین این مدل برای شبیه سازی رفتار انواع خاک های نرم و سخت کاربرد دارد. هنگامی که خاک تحت تنش انحرافی قرار می گیرد، سختی خاک کاهش یافته و کرنش های پلاستیک غیرقابل برگشت توسعه می یابد. این گونه رفتار توسط مدل هیپربولیک قابل مدل کردن است. مدل سخت شونده به دلیل بهره‌گیری از تئوری پلاستیسیته و وارد کردن پارامتر اتساع و نیز وابستگی سختی خاک به تنش و کرنش، جایگزین مناسب‌تری است. یکی از ویژگی‌های این مدل وابستگی سختی خاک به تنش است که در شرایط تحکیمی به صورت زیر قابل بیان است:

رابطه ۴: $$E_{oed} = E_{oed}^{ref}(\sigma/p^{ref})^m$$

برای خاک‌های نرم فرض m=1 به واقعیت نزدیک است. در این حالت:

رابطه ۵: $E_{oed} = p^{ref}/\lambda^*$

رابطه ۶: $\lambda^* = \lambda/(1+e_0)$

در این روابط تنش مرجع و اندیس فشردگی اصلاح شده است. به گونه‌ای مشابه، ضریب ارتجاعی باربرداری- بارگذاری مجدد را می‌توان به ضریب تورم اصلاح شده k^* مرتبط کرد، به عبارتی:

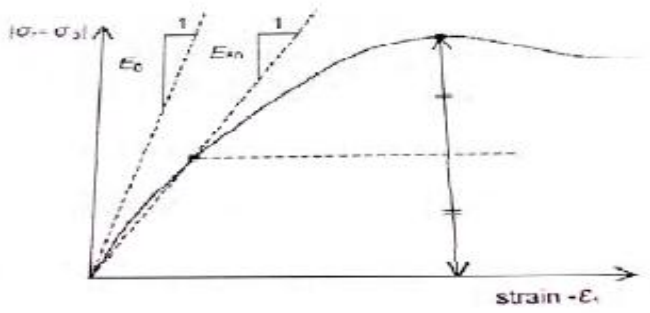
رابطه ۷: $E_{ur}^{ref} = 3p^{ref}(1-2v_{ur})/k^*$

رابطه ۸: $k^* = k/(1+e_0)$

که v_{ur} در این مدل اثر خزش یا نشست ثانویه که معمولاً دردرازمدت اتفاق می‌افتد درنظر گرفته نمی‌شود. پارامتر λ ضریب پلاستیک می‌باشد . برای رفتار کاملا الاستیک صفر در نظر گرفته می شود. بدیهی است با توجه به این که در طول ساخت معمولاً نشست های اولیه اتفاق می افتد مدل سخت شونده کارآیی بهتری می تواند داشته باشد.این مدل یک مدل پیشرفته برای شبیه سازی رفتار خاک است آنچنان کنه برای مدل موهر کلمب حالات محدود تنش بوسیله زاویه اصطکاک و چسبندگی c و زاویه اتساع ψ توصیف می شود. اگرچه سختی خاک با استفاده از سه ورودی متفاوت سختی بسیار دقیق تر توصیف می شود. سختی بارگذاری محوریE_{50}، سختی باربرداری E_{ur}، سه محوری و سختی بارگذاری ادئومترE_{oed}که مقدار میانگین برای انواع مختلف خاک داریم:

رابطه ۹: $E_{oed} = E_{50}, E_{ur} = 3E_{50}$

فرق اساسی مدل موهرکلمب و خاک سخت شونده این است که مدل خاک سخت شونده تابع تنش بودن مدول سختی را لحاظ کرده است. یعنی تمام سختی‌ها با فشار افزایش می یابند.بنابراین هر سه سختی ورودی وابسته به تنش مرجع ۱۰۰Kpa در نظر گرفته می‌شود. نرم افزار PLAXIS مدول یانگ را مانند مدل سختی پایه در مدل الاستیک و مدل موهرکلمب استفاده می کند مقادیر پارامتر سختی سازگار با محاسبات نیازمند توجه خاصی هستند چنان که بیش‌تر مواد زمینی از ابتدای بارگذاری یک رفتار غیر خطی نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است. در مکانیک خاک شیب اولیه معمولا به عنوان E_{50}و مدول سکانت در مقاومت ۵۰ درصد به عنوان E_{50} نوشته می شود. برای مواد با یک محدوده الاستیک خطی بزرگ استفاده از E_{50} واقع بینانه است، ما برای بارگذاری خاک‌ها عموماً از E_{50} استفاده می‌کنند.



شکل ۴: نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده

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

مدل نرم شوند (SS)

این مدل یک نوع مدل کم کلی می باشد که برای شبیه سازی رفتار خاک نرم همانند رس عادی تحکیم یافته -و خاک نباتی به کار می رود. این مدل موقعیت فشار اولیه را به بهترین وجه نشان می‌دهد. پارامترهای مورد نیازبرای مدل رفتاری شامل زاویه اصطکاک، چسبندگی، زاویه اتساع، شاخص تراکم اصلاح شده، شاخص تورم اصلاح شده می باشد. پارامترهای پیشرفته عبارتند از: نسبت پوآسون برای باربرداری بارگذاری مجدد، ضریب تنش جانبی در تحکیم عادی، پارامتر ضریب تنش جانبی در تحکیم عادی.

مدل‌سازی

نرم‌افزار PLAXIS یک برنامه اجزای محدود است که ازروش غیرصریح برای مدل‌سازی عددی استفاده می‌کند. برنامه‌های اجزای محدود نرم افزار اغلب ماتریس اجزا را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کل می‌سازند. به عبارتی حوزه‌ی تعریف تابع ازتعداد متناهی المان با تعداد ثابتی گره تشکیل شده است . تغییر مکان‌های گره‌ای هر المان با استفاده از تابع شکل که جابجایی های گرهی رابه هم مرتبط می کند تخمین زده می‌شود. معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبی اولیه با مجموعه معادلات جبری جایگزین می شوند و به این ترتیب ماتریس سختی کل شکل می گیرد. باحل دستگاه معادلات جابه جایی نقاط تعیین می‌شود و به کمک آن‌ها می‌توان تنش ها و کرنش‌های هر المان آن را به دست آورد. 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 ازتحلیل سه بعدی توصیه شده است. به منظور تحلیل تنش-کرنش سد کبودوال از نرم افزا PLAXIS دو بعدی (نسخه ۲،۸) که بر اساس روش اجزای و در حالت دو بعدی، محدود قادر به تحلیل تنش-تغییر شکل و پایداری سازه های ژئوتکنیکی درحالت کرنش صفحه‌ای و نیز محاسبه جریان آب در این گونه سازه‌هاست، استفاده شده است. در محاسبات تراوش جریان و تحلیل‌های هیدرولیکی نرم افزار PLAXIS علاوه بر محاسبه فشارهای سیال در حالت ساکن که از روی خط آزاد جریان صورت می‌گیرد، اضافه فشارهای حفره‌ای ناشی از اعمال بار را نیز در صورت زهکش نبودن خاک در نظر می‌گیرد و این دو فشار را با هم جمع می‌کند.

رابطه ۱۰: $P_{active} = P_{steady} + P_{excess}$

برای انجام تحلیل های عددی تنش - کرنش به دلیل سازگاری نتایج نرم افزار افزار PLAXIS در محیط های خاکی از این نرم افزار استفاده شده است. در ابتدا با مدل کردن هندسه بستر ولحاظ کردن شرایط مرزی مدل که با شرایط مرزی لحاظ شده گیرداری کامل در پائین هندسه و شرایط تکیه گاه غلتکی در کناره های عمودی ایجاد می شود، به منظور شبیه سازی رفتار خاک، پارامترهای مقاومتی مصالح به هندسه مدل تخصیص داده می شود. پس از ساخت مدل، شبکه اجزای محدود مش بندی مقطع ایجاد می شود. در ساخت مش از المان های ۱۵ گرهی 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. هم چنین 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. به‌وسیله 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 شکل۵ هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹ سد به منظور انجام تحلیل های عددی برگشتی 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 بانتایج حاصل از مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه در یکی از مقاطع میانی سد کبودوال (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 تقریبا یکی شده است. مشخصات مصالح تشکیل دهنده بدنه سدکبودوال که شامل سه بخش اصلی فیلترو پوسته و پی است، در جدول ۱ آورده شده است. هم چنین مشخصات تکمیلی مصالح درمدل رفتاری مدل نرم شونده، مدل سخت شونده نیز در جدول ۲ بیان 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 مرطوبت 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 گیریشده مجدداً کنترل می شدند (گزارش فنی، ۱۳۹۲).

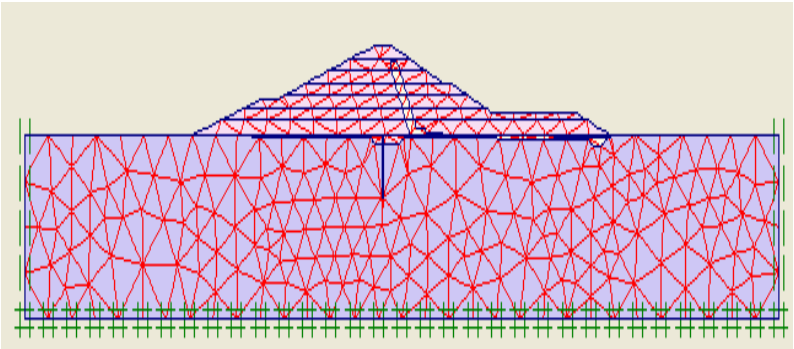
جدول ۱: مشخصات مصالح در مدل رفتاری سخت شونده و موهرکلمب و نرم شونده

خصوصیات مصالح	نوع مصالح	Y_{unsat} (KN/m3)	Y_{sat} (KN/m3)	E_{ref} (KN/m2)	ν	C_{ref} (KN/m2)	Φ (°)	$K_{x,y}$ (m/day)
پی	Undrain	۱۷	۲۰	۱,۰e+۴	۰,۳	۱۸	۲۹	۸,۶۸e-۳
بدنه	Drained	۱۹	۲۳	۱,۰e+۴	۰,۴	۲۲	۲۵	۸,۶۸e-۳
فیلتر و زهکش	Drained	۲۰	۲۱	۲۵۰۰	۰,۲۵	۱۲	۳۶	۸,۶۴

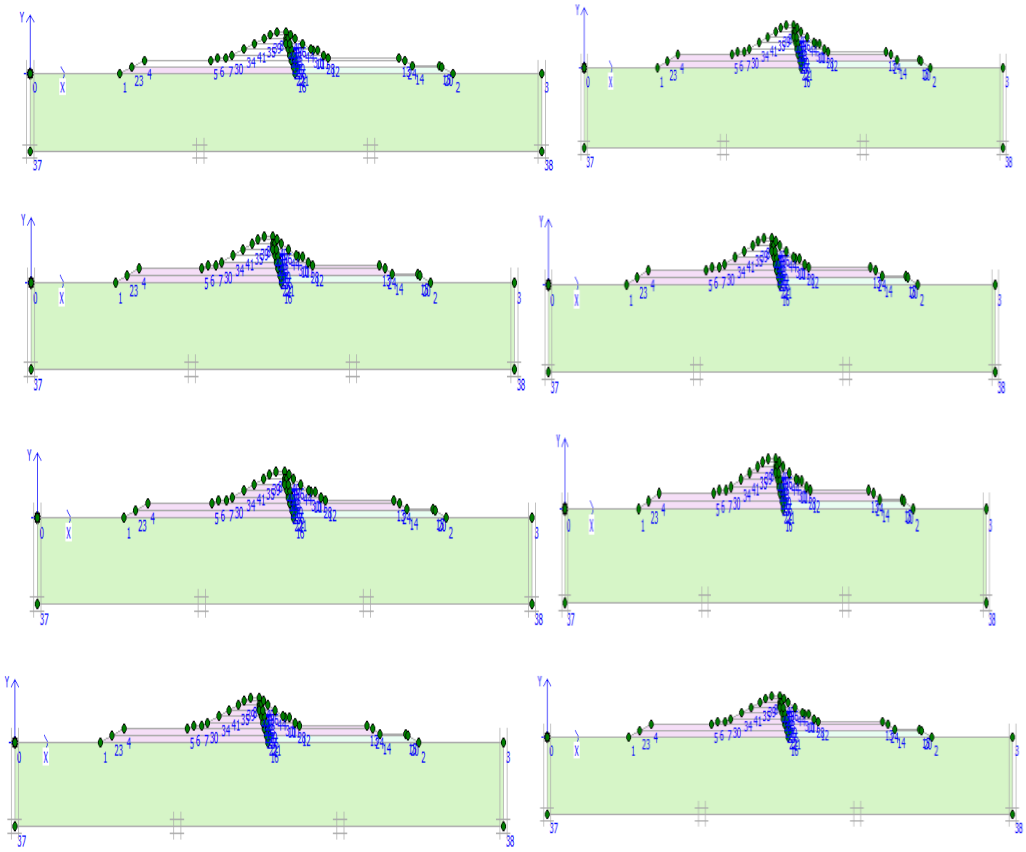
جدول ۲: مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری سخت شونده و نرم شونده

خصوصیات مصالح	λ*	κ*	E_{50} (KN/m2)	E_{oed} (KN/m2)	E_{ur} (KN/m2)	K_o^{nc}
بدنه	۱e-۳	۱e-۳	۲,۵e+۴	۲,۵e+۴	۵e+۴	۰,۴۷۸

در ادامه در نرم افزار ۱۶ فاز محاسباتی برای خاکبرداری و خاکریزی مقطع سد بروش ساخت مرحله ای تعریف شد.



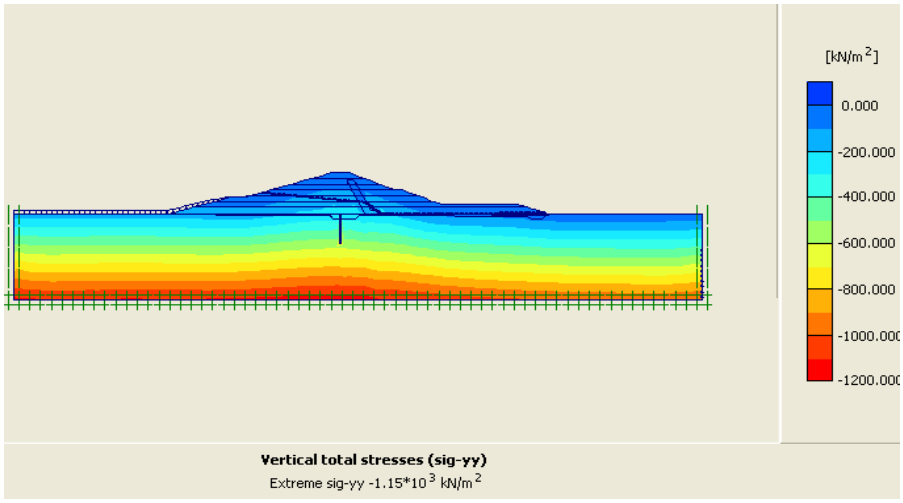
شکل۵: هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹



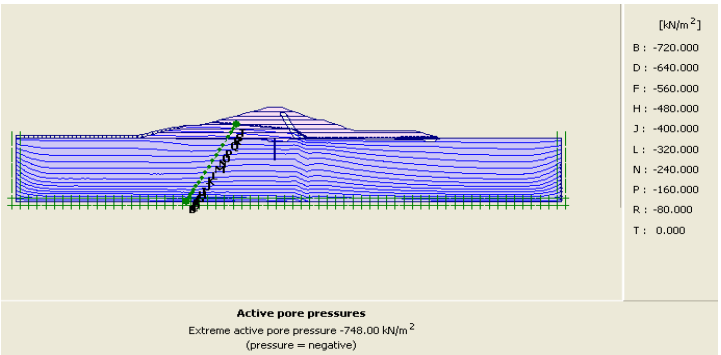
شکل ۶: روند خاکریزی مقطع ۱۹در نرم افزار PLAXIS

نتایج و بحث

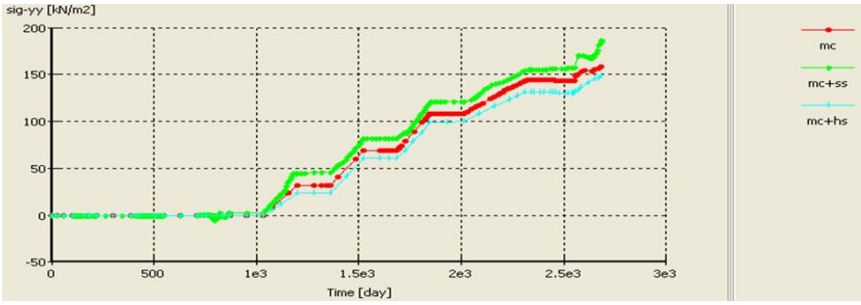
نتایج حاصل از نرم افزار بعد از آنکه مدل‌سازی با نرم افزار انجام شد، و به روش تحلیل برگشتی داده‌ها کالیبره شدند، در شکل‌های زیر نتایج حاصل از نرم افزار PLAXIS دو بعدی ارائه شده است.



شکل۷: توزیع تنش کل قائم در مقطع سد درآخرین مرحله خاکریزی مقطع۱۹ (مدل رفتاری موهر – کولومب)



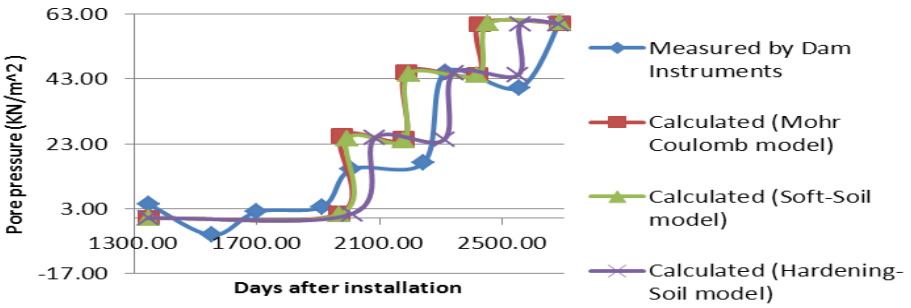
شکل ۸: نتایج حاصل فشار آب حفره ای در مقطع۱۹



شکل ۹: نتایج خروجی فشار آب حفره ای در نرم افزار PLAXIS دو بعدی در مقطع۱۹

بررسی فشار آب حفره‌ای

مهم‌ترین عواملی را که در دوران ساخت باید دایم بررسی کرد فشار آب منفذی، تنش های 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 بیش تحکیم یافته پیدا می‌کند و ممکن است فشار منفذی منفی در بدنه به وجود آید. در شکل زیر نتایج ۳ مدل در نرم‌افزار PLAXIS با نتایج واقعی برازش شده است.



شکل ۱۰: وضعیت تغییرات فشار آب حفره ای مقطع ۱۹-۱۹ سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

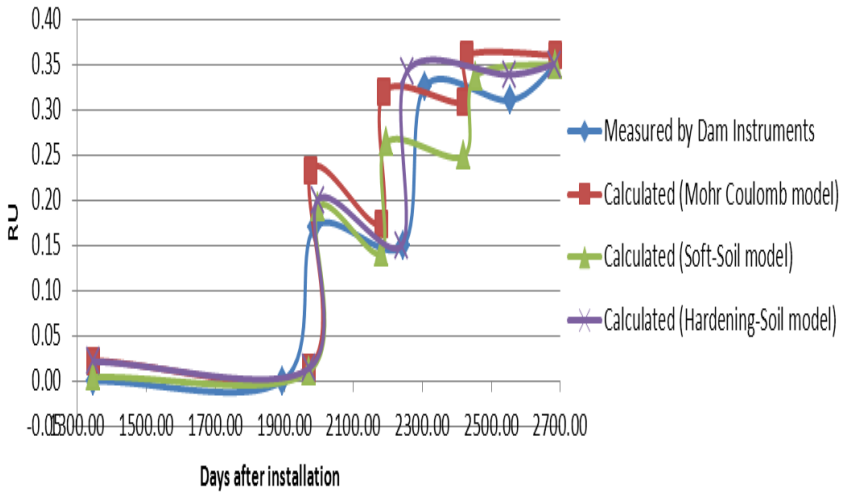
همان طورکه در شکل های بالا دیده می‌شود، با ساخت مرحله ای به علت افزایش حجم سربار مقدار فشار آب حفره ای در حال افزایش است. پیزومتر های واقع در محور سد عددی بیش‌تری را نسبت به پیزومتر های بالادست و پایین‌دست سد

نشان می‌دهد.که علت آن این است که سد در حین انجام خاکریزی آبگیری نیز شده است و به علت دور بودن پیزومتر های واقع در پایین دست محور سد از آب نفوذی در سد عددی کمتری را نسبت به سایر پیزومتر ها نشان می‌دهد، اما تفاوت آن قابل ملاحظه نیست. ماکزیمم افزایش فشار آب حفره‌ای در بخش مرکزی اتفاق می‌افتد که در آن فشار سربار بیش تر و تاثیرات ناشی از زه کشی مصالح فیلتر حداقل است. در شرایط خاصی ممکن است افزایش فشار آب حفره‌ای موجب کاهش شدید مقاومت برشی خاک شود و در یک مرحله بحرانی گسیختگی و تخریب سد را بدنبال داشته باشد. عوامل اصلی کنترل کننده Ru یا ضریب فشار آب حفره ای شاخص مهم در ارزیابی فشار آب حفره ای است، از محاسبه نسبت فشار آب حفره ای ثبت شده به فشار خاک اندازه‌گیری شده، می‌توان ضریب Ru 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 فشار قائم خاک از حاصل ضرب وزن مخصوص خاک ضرب در ارتفاع خاکریزی بدست می آید. ثبات نسبی ضریب فشار آب حفره ای در طول عملیات خاکریزی و نیز قبل و بعد از آن آبگیری سد نشان دهنده مناسب بودن سرعت عملیات خاکریزی و غیز محتمل بودن بروز پدیده شکست هیدرولیکی است.

رابطه ۱۱:

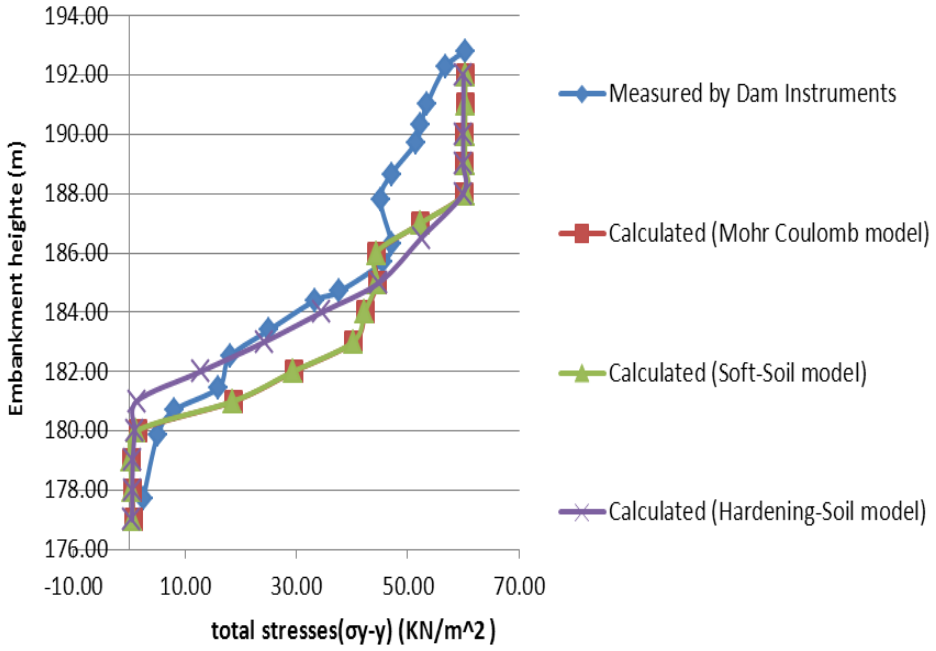
$$R_U = \frac{U}{\sigma_v}$$

شکل ۱۱ وضعیت تغییرات پارامتر Ru مقطع ۱۹-۱۹در نقطه نشان داده شده در بدنه سد را نشان می‌دهد، همان‌طور که دیده می شود مقدار آن کمتر از ۰/۴۰ است. عملا بیش‌ترین مقدار این ضریب طی سال ۹۰-۹۱ اتفاق افتاده است که دلایل آن آبگیری مخزن و به ویژه به علت بارگذاری بدنه سد (تکمیل خاکریزی بدنه سد) بوده است. در مجموع، این محدوده تغییرات در رنج مجاز قرار دارد.



شکل ۱۱: وضعیت تغییرات پارامتر Ru مقطع۱۹-۱۹ در محور سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

در مجموع ۸ پیزومتر الکتریکی در پی مقطع ۱۹ نصب شده است. نتایج ثبت شده از این پیزومترها نشان می دهند که در سال ۱۳۹۰ افزایش چشم‌گیری در فشار آب حفره ای پی اتفاق افتاده است. البته بخش قابل توجه این فشار تا پایان سال ۹۰ زهکشی شده است. دلیل این افزایش می‌تواند بارندگی های سال ۹۰ و هم چنین خاکریزی با احجام زیاد در طی این سال باشد. شکل ۱۲ تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومتر و مدل رفتاری (آنالیز برگشتی) در رقوم مختلف خاکریزی مقطع ۱۹ را نشان می‌دهد. که مدل سخت شونده چون داده‌های بیش‌تری از خاک را در نظر می‌گیرد، برازش بهتری دارد.

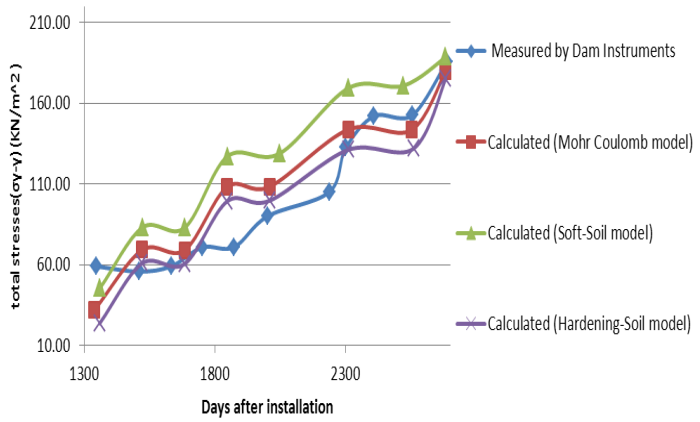


شکل ۱۲: تغییرات فشار آب حفره ای پیزومتر و مدل رفتاری (آنالیز برگشتی) در رقوم مختلف خاکریزی مقطع ۱۹

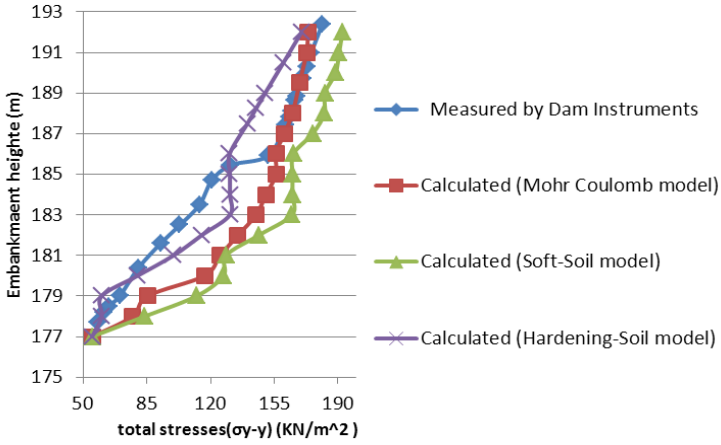
به هر حال عمده فشار یاد شده با توقف عملیات خاکریزی طی پائیز و زمستان سال ۹۰ - بر اساس روش مشاهده‌ای - از پی خارج شده است؛ لذا مشکل چندانی در پی از دیدگاه فشارهای حفره ای وجود ندارد. در دوران آبگیری اخیر نیز افزایش های محدودی در پیزومترهای پی و بدنه سد بسیج شده است که برای این مرحله از بررسی‌ها قابل قبول می‌باشد. لیکن افزایش فشار آب در پایاب زهکش دودکشی بدنه می‌بایست در مراحل آتی رفتارنگاری مدنظر قرار گیرد.

تعیین تنش‌های اصلی

اصولاً تنش سنج هایی که در سدهای خاکی نصب می شوند فقط تنش‌های عمودی را اندازه گیری کرده و قادر به اندازه گیری 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 می توان محاسبه کرد (حکیمی خانسر و همکاران ،۱۳۹۲) در شکل‌های زیر نیز همانند شکل‌های بالا مدل سخت شونده برازش بهتری دارد.



شکل ۱۳: وضعیت تغییرات تنش کل بازمان ساخت مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی



شکل ۱۴: وضعیت تغییرات تنش کل با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

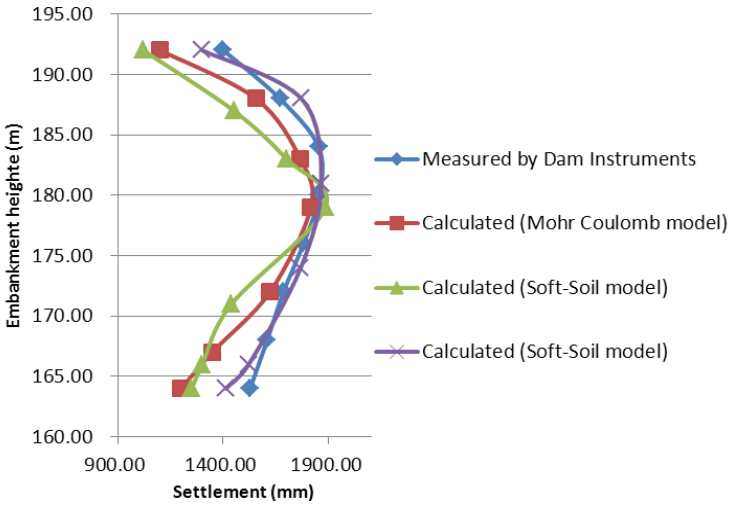
جدول زیر هم مثل نمودارها و با توجه به مقایسه ۳ مدل رفتاری خاک، برازش مدل سخت شونده مناسبتر بوده است

جدول۳ مقایسهٔ نتایج آنالیز با ابزار دقیق سد کبودوال بلافاصله پس از ساخت

	موقعیت				نتایج ابزاردقیق		نتایج آنالیز عددی		
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 به دو بخش نشست درطول ساخت و پس از ساخت (دوران بهره برداری) می‌توان تقسیم کرد. مقطع شماره ۱۹ در کیلومتراژ ۰+۶۶۰ واقع گردیده، می تواند به‌عنوان اولین مقطع بخش میانی بدنه سد مورد بررسی قرار گیرد. بیش-ترین 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. این نشست اختلافی که در طول ۲۰۰ متر رخ داده با معیارهای طراحی پوشش داده شده است. نکته قابل توجه اینکه به نظر می رسد با توزیع مناسب تغییرشکل ها در بدنه سد در پیرامون مقطع شماره ۹، عوارض ناشی از افت ناگهانی تراز سنگ بستر کنترل شده است و با دور شدن از مقطع شماره ۹ نشست‌های اختلافی تا مقطع ۱۹ به ارقام کمتر از ۲۰۰ سانتیمتر رسیده است. نشست بدنه سد در این مقطع تناظر مناسبی با مقاطع بدنه سد دارد.



شکل ۱۵: وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

ارزیابی ضریب اطمینان

در مهندسی سازه‌ای، ضریب اطمینان معمولا به عنوان نسبتی از بار فرو رفتگی به بار خدمت تعریف می‌شود. با معرفی شرط کلمب استاندارد به صورت زیر بدست می آید. در این مقاله برای محاسبه ضریب اطمینان از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود:

رابطه ۱۲:
$$SF = \frac{S_{maximum\ available}}{S_{need\ for\ equalibrium}}$$

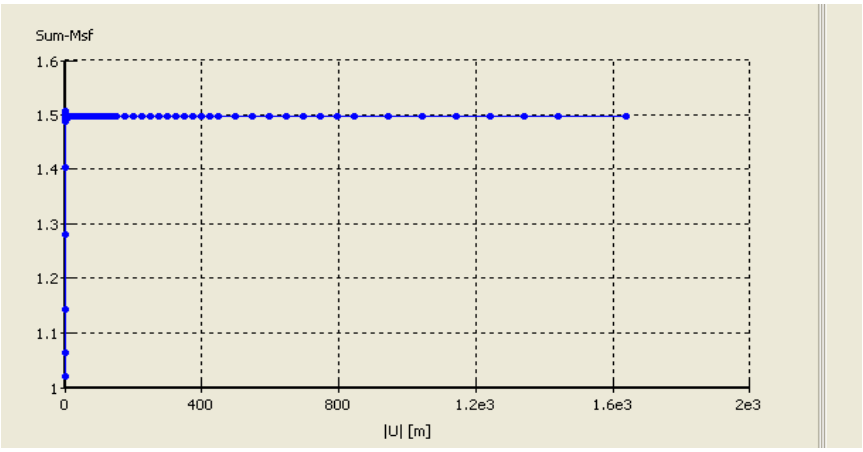
رابطه ۱۳:
$$SF = \frac{C+\sigma_n tan\phi}{C_r+\sigma_n tan\phi_r}$$

در روش phi-c-reduction برای محاسبه‌ی SF از رابطه ۱۴ استفاده می‌شود:

رابطه ۱۴:

$$\sum MSF = \frac{tan\,\varphi}{tan\,\varphi_r} = \frac{c}{c_r}$$

که C چسبندگی، $\tan\varphi$ زاویه‌ی اصطکاک مصالح، σ_n تنش نرمال، c_r و φ_r حداقل پارامترهای مقاومتی است. دراین روش پارامترهای مقاومتی خاک (tanθ ,c) به طور مرتب کم می‌شوند تا اینکه خاک گسیخته شود. بعد از کالیبره کردن سد با روش بالا پایداری بدست آمد، که در شکل زیر نشان داده شده است. شکل ۱۶ نشان دهنده مقادیر ضریب اطمینان بعد از ساخت است. مقدار ضریب اطمینان برابر۱,۵ می باشد.با توجه به اینکه برای طراحی شیب مقدار لازم معمولا بالاتر از ۱/۵ است، بنابراین سد پایدار خواهد بود.



شکل ۱۶: ضریب اطمینان پایداری مقطع۱۹ خروجی نرم افزار PLAXIS دو بعدی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شده است که نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق با نتایج تحلیلی بر اساس مدل رفتاری موهر-کلمب ، سخت شونده و نرم شوندگی مقایسه شود. با توجه به این که پارامترهای مقاومتی خاک که در مدلسازی استفاده می شود، حاصل ازنتایج آزمایشگاهی است و از طرفی فرضیات ساده شونده‌ای مانند فرض کرنش صفحه‌ای و یا همسان گرد بودن خاک به‌طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده های ابزار و نتایج دور از انتظار نیست. نشست سد که در تراز حدود ارتفاع میانی آن (تراز متوسط۱۸۲)، اندازه‌گیری شده است حدود ۱۸۵۶ میلی‌متر است که مقدار آن باتوجه به نوع مصالح منطقی به نظر می رسد. در این تحقیق سعی شده است که نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق با نتایج تحلیلی بر اساس مدل رفتاری موهر-کلمب ، سخت شونده و نرم شوندگی مقایسه شود. با توجه به این که پارامترهای مقاومتی خاک که در مدل‌سازی استفاده می شود، حاصل ازنتایج آزمایشگاهی است و از طرفی فرضیات ساده شونده ای مانند فرض کرنش صفحه ای و یا همسان گرد بودن خاک به طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده های ابزار و نتایج دور از انتظار نیست. هر سه مدل هم خوانی خوبی را با داده های ابزار دقیق نشان می

دهند اما مدل سخت شونده هم‌خوانی بهتری را ارائه کرده است. هم چنین عدم انطباق کامل نمودارها مربوط به پارامترهای مقاومتی خاک است که اصولاً با گذشت زمان و افزایش سربار مقدار آن‌ها تغییر می یابد که در مدل دیده نمی شود. تحلیل تنش بیانگر هم‌خوانی خوب بین داده‌ها و مدلسازی است. مقدار Ru کمتر از ۰/۴۰ است. عملا بیش‌ترین مقدار این ضریب طی سال ۹۰-۹۱ اتفاق افتاده است که دلایل آن آبگیری مخزن و به ویژه به علت بارگذاری بدنه سد (تکمیل خاکریزی بدنه سد) بوده است. در مجموع، این محدوده تغییرات در رنج مجاز قرار دارد. مقادیر ضریب اطمینان بعد از ساخت برابر۱/۵ می باشد.با توجه به اینکه برای طراحی شیب مقدار لازم با توجه به معیار ارتش امریکا، معمولا بالاتر از ۱/۵ است، بنابراین سد پایدار خواهد بود.

منابع

بلوری بزار،ج. مبینی زاد،محسن. (۱۳۸۹). 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 (۱۰-۱).

حکیمی خانسر، ح.، گلمایی، ح. و حصیرچیان، م. (۱۳۹۲). ارزیابی رفتار سد های خاکریزه‌ای با استفاده از نرم افزارپلکسیس و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق (مطالعه ی موردی سد کبودوال). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، بهمن ۱۳۹۲.

جهانی، ص.، ح. گلمایی و م. ضیاءتبار احمدی. (۱۳۹۰). مطالعه و بررسی مدل‌سازی 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 پلکسیس). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد.

حصیرچیان، م. (۱۳۸۹). مطالعه و بررسی مدل‌سازی عددی اجزای محدود جهت بررسی پایداری شیروانی ها درحین ساخت و پرشدن و افت سریع مخزن. نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

شرکت سهامی آب منطقه ای گلستان. (۱۳۹۲). گزارش فنی رفتار سنجی سد کبودوال سال ۹۲.

همتی، الف. و برخورداری، ک. (۱۳۸۵). رفتار سنجی سد شیرین دره در انتهای ساخت به کمک قرائتهای ابزار دقیق، سیزدهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

US Army Corps of Engineers. (1995).Instrumentation of embankment dams and levees engineering and design. Washington DC.

Myers B. and Statelier J. (2008). Why include instrumentation in dam onitoring programs?, United States Society on Dams. Committee on Monitoring of Dams and their Foundations.