

بررسی نشست بدنه سد خاکی در دوران ساخت و مقایسه آن با نتایج تحلیلی با استفاده از نرم افزار PLAXIS (مطالعه موردی سد کبودوال)

فرزین سلماسی، حسین حکیمی خانسر* و بهرام نورانی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵)

چکیده

در مدل سازی سد کبودوال با استفاده از نرم افزار پلاکسیس، از مدل رفتاری موهر-کلمب استفاده شده است و تأثیر دو عامل استمرار عملیات خاکریزی و آبگیری هم زمان روی نشست، مورد بررسی شده است. نشست بدنه سد از سمت جناحین به سمت مقاطع میانی افزایش یافته و بیشترین نشست در مقطع ۲۵-۲۵ و حدود ۲۲۰۰ میلی متر ثبت شده است. با بررسی در مقاطع مختلف، بیشترین نشست در حد فاصل تراز ۱۸۰ تا ۱۸۵ روی داده است، یعنی تراز خاکریزی در این اعداد بحرانی بوده است. بیشتر نگرانی ها در بخش میانی سد است که وضعیت ضعیف تری نیز دارد. با توجه به آنالیز نشست در بخش های مختلف سد کبودوال، مصالح تشکیل دهنده پی در جناح راست سد از جناح میانی و چپ سد وضعیت بهتری دارد. در مورد مقطع ۱۹ علاوه بر مدل موهر کلمب، سد با مدل های نرم شونده و سخت شونده مدل شده است. در اینجا مدل سخت شونده برازش بهتری را ایجاد می کند. مدل سخت شونده چون داده های بیشتری از خاک را دارا است، رفتار سدهای خاکی را بهتر می تواند مدل سازی کند. با توجه به اینکه در طول ساخت معمولاً نشست های اولیه اتفاق می افتد، مدل سخت شونده کارایی بهتری می تواند داشته باشد.

واژه های کلیدی: سد خاکی، سد کبودوال، پلاکسیس، نشست

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hakimi1904@yahoo.com

مقدمه

که در نتیجه افزایش تدریجی ارتفاع سد ممکن است رخ دهد نیز همیشه مورد توجه مهندسين باید باشد. ابزاربندی سد و رفتارنگاری آن در دوران ساخت به این موضوع کمک زیادی می‌کند به گونه‌ای که ممکن است آبیگری موقت سد در بعضی مراحل ساخت پیشنهاد شود (۱۶).

در تحقیق حاضر سعی شده است داده‌های ابزار دقیق در دوران ساخت که شامل مقادیر واقعی نشست سد هستند با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار پلاکسیس با مدل‌های رفتاری موهر-کلمب و سخت‌شونده و نرم‌شونده با هم مقایسه و بررسی شوند، یک تحلیل کلی از رفتار سد در مورد نشست ارائه شد. در انتها بهترین مدل رفتاری برای شبیه‌سازی سدهای خاکی پیشنهاد شد.

مواد و روش‌ها

معرفی سد

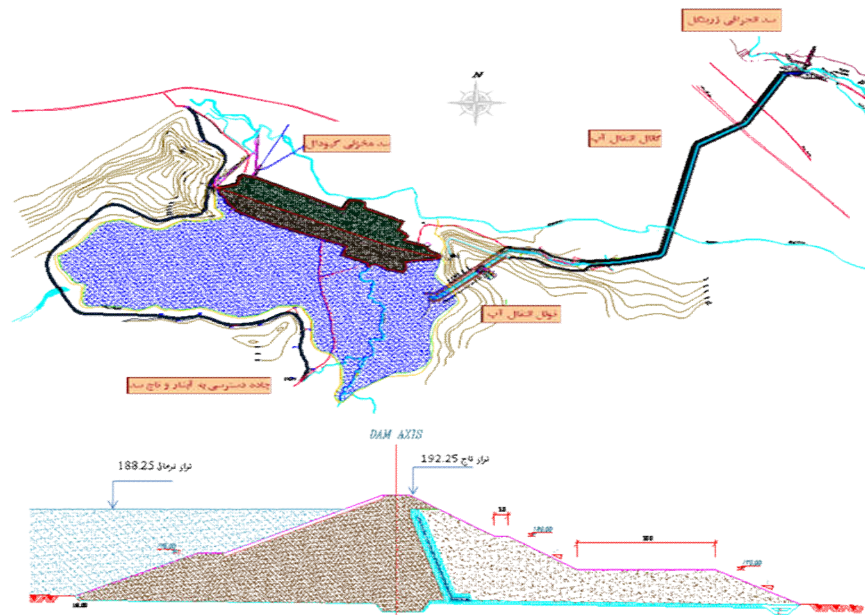
سد کبودوال واقع در شهر علی‌آباد در استان گلستان است. این سد همگن و دارای فیلتر و زهکش مایل است. مخزن آن خارج از حوضه آبریز اصلی است، طول تاج ۱۳۷۲ متر و حداکثر ارتفاع از پی ۳۳/۲۵ متر است. ارتفاع از بستر ۳۰/۵ متر و همچنین تراز بستر سد ۱۶۲ متر از سطح دریا و حداقل تراز آب در مخزن ۱۷۱ متر از سطح دریا و نیز 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 (۴).

با توجه به حساسیت پی و بدنه سد کبودوال در خصوص نحوه و سرعت بارگذاری در حین ساخت سد، ارزیابی رفتار پی و بدنه سد به‌ویژه در بخش میانی بدنه برای تغییر شکل‌پذیری پی این بخش، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی، ساخت دو بخش کناری بدنه سد پیش از بخش میانی حساسیت یاد شده را در خصوص انتقال تنش‌ها، تغییر شکل‌ها و اضافه فشار آب حفره‌ای بسیج شده در بدنه و پی را تشدید کرده است. در همین راستا و بر اساس دستیابی به تحلیلی درست، سه

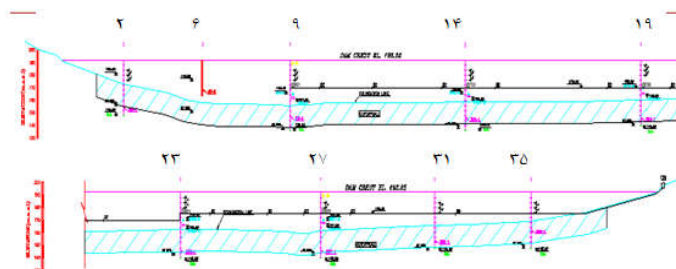
وقتی سد خاکی یا خاکریزه‌ای ساخته شود، تنش خاک موجب تغییر شکل پی می‌شود (۱۶ و ۲۲). بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که در سدهای خاکی یا دیگر سازه‌های خاکی، زمانی که ساخته می‌شوند، محاسبات نشست در زمان ساخت سد برای پیش‌بینی هزینه پروژه مهم است (۲۲ و ۲۳).

سدهای بزرگ اعم از خاکی یا بتنی از مهم‌ترین سازه‌های آبی به‌شمار می‌روند که در تأمین آب مورد نیاز جوامع انسانی نقش اساسی را ایفا می‌کنند. بنابراین پایداری سدها به‌ویژه در دهه‌های اخیر مورد توجه خاص مهندسين طراح سدهای خاکی و بتنی بوده است (۱۱). اهمیت ویژه ابزار دقیق در سدها به نقش آنها در کنترل پایداری کوتاه و درازمدت سدها برمی‌گردد، به گونه‌ای که در رفتارنگاری سدها، مورد توجه مهندسين واقع شده است (۱۷). ایمنی و عملکرد یک سد باید در حین ساخت، اولین آبیگری و در دوران بهره‌برداری کنترل شود. اولین دوره آبیگری احتمالاً بحرانی‌ترین زمان در طول عمر سد است (۲). به طور کلی پذیرفته شده که ایمنی سد نه تنها به طراحی و ساخت آن برمی‌گردد، بلکه به رفتارنگاری کامل از عملکرد آن در دوران ساخت و بهره‌برداری وابسته است (۱۷).

بعد از خرابی سد تون در سال ۱۹۷۶، که منجر به خسارات فراوان شد، رفتارنگاری سدهای خاکی به صورت وسیع‌گسترش پیدا کرد. رفتار غیرخطی و غیرارتجاعی 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. مدل‌های رفتاری ساده اگرچه نیاز به پارامترهای رفتاری را ندارند اما نتایج حاصل از تحلیل با این گونه مدل‌ها با نتایج واقعی ممکن است اختلاف زیادی داشته باشند. از طرف دیگر مدل‌های رفتاری پیچیده نیاز به پارامترهای ژئوتکنیکی دقیق‌تری دارند که تعیین آنها از نظر اقتصادی و آزمایشگاهی چندان ساده نیست. بنابراین انتخاب یک مدل رفتاری مناسب یکی از وظایف مهم مهندسين طراح سد است (۲). گسترش فشار آب منفذی در داخل هسته و در دوران ساخت



شکل ۱. جانمایی کلی پروژه و مقطع تیپ عرضی بدنه سد کبودال



شکل ۲. مقاطع مختلف سد کبودال

ابزار دقیق که شرح داده شد، تطبیق داده و نرم‌افزار برای مدل کردن سد کالیبره شد. شکل ۱ جانمایی کلی پروژه و مقطع تیپ عرضی بدنه سد کبودال و شکل ۲ مقاطع مختلف سد کبودال را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی عددی

انواع مدل‌های رفتاری خاک در پلاکسیس

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.

مقطع عرضی ۱۹، ۲۵ و ۲۷ (مقاطع عرضی بخش میانی بدنه و پی سد) و همچنین مقاطع ۲ مربوط به جناح چپ و ۳۵ مربوط به جناح راست برای بررسی نشست مدل‌سازی عددی شده است تا میزان نشست در این مقاطع بررسی شود. برای بررسی تغییرات نشست در ارتفاع بدنه و عمق پی سد، داده‌های نشست‌سنجی برحسب تراز صفحات نشست‌سنجی به ازای آخرین اطلاعات جمع‌ی منتهی به دوران قریب به پایان ساخت در شکل‌هایی به تفکیک انحراف‌سنج‌های نصب شده در هر مقطع ارائه شده است. بر پایه این شکل‌ها، ضمن بررسی مقدار نشست ایجاد شده در هر مقطع، امکان ارزیابی نحوه توزیع آن در عمق فراهم شده است. درنهایت با یک تحلیلی برگشتی، نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج

به صورت رابطه کلی زیر می توان تعریف کرد:

$$g(j, i, k) = \frac{1}{\psi} \left| \left[\sigma'_{(j, k, i)} - \sigma'_{(k, i, j)} \right] \right| + \frac{1}{\psi} \left| \left[\sigma'_{(j, k, i)} + \sigma'_{(k, i, j)} \right] \right| \sin \emptyset \leq \sigma \quad (4)$$

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 کارایی بهتری می تواند داشته باشد. این مدل رفتار خاک را در محدوده الاستیک با استفاده از مدل های پربولیک، شبیه سازی می کند. این مدل شامل سخت شونده فشاری است که برای شبیه سازی تراکم برگشت ناپذیر خاک تحت فشار اولیه به کار می رود و همچنین 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 مورد نیاز برای این مدل رفتاری به قرار زیر است. پارامترهای مشترک این مدل با مدل موهركولمب غیرسخت شونده عبارتند از: چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه 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 بارحالت باربرداری بارگذاری مجدد، تنش مبنا برای سختی ها، مقدار K برای خاک تحکیم عادی یافته، نسبت گسیختگی، مقاومت کششی، ضریب تغییر چسبندگی مانند مدل موهركولمب (۲). در مدل رفتاری سخت شونده سطح تسلیم در فضای تنش های اصلی محدود نبوده و به علت وجود کرنش های پلاستیک سطح مزبور توسعه می یابد. در این مدل دو رفتار برشی و فشاری سخت شونده که به ترتیب برای مدل کردن کرنش های پلاستیک غیرقابل برگشت در اثر تنش انحرافی و تنش فشاری همه جانبه به کار می روند، وجود دارد. همچنین این مدل برای شبیه سازی رفتار انواع خاک های نرم و

مدل موهركولمب یک تقریب مرتبه اول از رفتار سنگ یا خاک را نشان می دهد (۱۹). پیشنهاد شده است که این مدل برای تحلیل اولیه از مسئله استفاده شود. مدل موهر- کولمب از ساده ترین مدل های رفتاری خاک است و از آنجایی که در این مدل بیشتر پارامترهای اساسی خاک، اعم از خمیری و کشسان وجود دارد برای مدل کردن بیشتر حالات رفتاری خاک مناسب است. 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. بر اساس این مدل، کرنش و نرخ کرنش از دو بخش الاستیک و پلاستیک تشکیل می شوند. به عبارتی

$$\underline{\sigma}' = \left(\frac{D^e}{\sigma} - a \frac{D^e}{d} \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^t}{\partial \sigma'} \frac{D^e}{\sigma} \right) \varepsilon' \quad (1)$$

بر اساس تئوری پلاستیسیته هیل (Hil, ۱۹۵۰)، کرنش های پلاستیک متناسب با مشتق تابع تسلیم نسبت به تنش ها است. 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.

$$d = \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{D^e}{\sigma} \frac{\partial f^t}{\partial \sigma'} \quad (2)$$

در این رابطه است. معیار تسلیم مور- کولمب از شش تابع تسلیم که برحسب تنش های اصلی بوده و یک مخروط شش وجهی را در فضای تنش های اصلی تشکیل می دهند می توان به صورت رابطه کلی زیر نشان داد:

$$f(j, i, k) = \frac{1}{\psi} \left| \left[\sigma'_{(j, k, i)} - \sigma'_{(k, i, j)} \right] \right| + \frac{1}{\psi} \left| \left[\sigma'_{(j, k, i)} + \sigma'_{(k, i, j)} \right] \right| \sin \emptyset - c \cos \emptyset \leq \sigma \quad (3)$$

که a ، j و k به ترتیب برابر ۱ و ۲ و ۳ هستند. دو پارامتر دیگر در این مدل c به معنی چسبندگی و f زاویه اصطکاک خاک هستند. همچنین شش تابع پتانسیل پلاستیک را برای این مدل را

مدل خاک سخت‌شونده تابع تنش بودن مدول سختی را لحاظ کرده است. یعنی تمام سختی‌ها با فشار افزایش می‌یابند. بنابراین هر سه سختی ورودی وابسته به تنش مرجع 10^0Kpa در نظر گرفته می‌شود. نرم‌افزار پلاکسیس مدول یانگ را مانند مدل سختی پایه در مدل الاستیک و مدول موهرکلمب استفاده می‌کند. مقادیر پارامتر سختی سازگار با محاسبات نیازمند توجه خاصی هستند، چنانکه بیشتر مواد زمینی از ابتدای بارگذاری یک رفتار غیرخطی نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است. در مکانیک خاک شیب اولیه معمولاً به عنوان E_{σ_0} و مدول سکانت در مقاومت 50% درصد به عنوان E_{σ_0} نوشته می‌شود. برای مواد با یک محدوده الاستیک خطی بزرگ استفاده از E_{σ_0} واقع‌بینانه است، ما برای بارگذاری خاک‌ها عموماً از E_{σ_0} استفاده می‌کنند.

برای خاک‌ها، هر دو مدول باربرداری E_{ur} و مدول بارگذاری اولیه E_{σ_0} با فشار محدود شده افزایش می‌یابند، بنابراین لایه‌های عمیق خاک به داشتن سختی بزرگ‌تر از لایه‌های کم‌عمق‌تر 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. شکل (۳) تعریف E_{σ_0} و E_{ur} برای نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده را نشان می‌دهد.

معرفی نرم‌افزار

نرم‌افزار پلاکسیس برای تحلیل تغییرشکل و پایداری در پروژه‌های مهندسی که با رفتار خاک ارتباطی تنگاتنگ دارند از قبیل مهندسی ژئوتکنیک، کاربرد دارد. با این نرم‌افزار می‌توان خاکبرداری و خاکریزی مرحله‌ای، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان‌های مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدل‌سازی کرد. نرم‌افزار افزار پلاکسیس یک برنامه اجزای محدود است که از روش عددی غیرصریح برای مدل‌سازی عددی استفاده می‌کند (۳). در این تحقیق برای مدل‌سازی از نرم‌افزار پلاکسیس نسخه ۵/۸ و از مدل موهرکلمب استفاده شده است. در ابتدا با مدل

سخت کاربرد دارد. هنگامی که خاک تحت تنش انحرافی قرار می‌گیرد، سختی خاک کاهش یافته و کرنش‌های پلاستیک غیرقابل برگشت توسعه می‌یابد. این گونه رفتار توسط مدل هیپربولیک، قابل مدل کردن است (۱۳).

مدل سخت‌شونده 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:

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

$$E_{oed} = p^{ref} / \lambda^* \quad (5)$$

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:

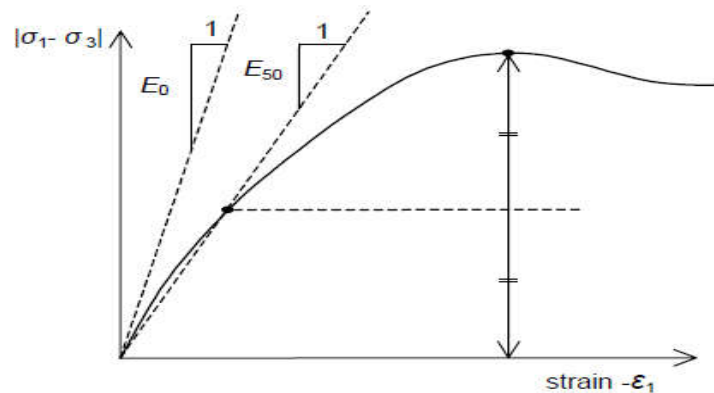
$$E_{ur}^{ref} = \nu p^{ref} (1 - \nu_{ur}) / k^* \quad (6)$$

$$k^* = k / (1 + e_0) \quad (7)$$

که ν_{ur} در این مدل اثر خزش یا نشست ثانویه که معمولاً در درازمدت اتفاق می‌افتد، در نظر گرفته نمی‌شود. پارامتر λ ضریب پلاستیک است. برای رفتار کاملاً الاستیک صفر در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است با توجه به این که در طول ساخت معمولاً نشست‌های اولیه اتفاق می‌افتد مدول سخت‌شونده کارایی بهتری می‌تواند داشته باشد. این مدل یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار خاک است و برای مدل موهر کلمب حالات محدود تنش به وسیله زاویه اصطکاک و چسبندگی c و زاویه اتساع ψ توصیف می‌شود. اگرچه سختی خاک با استفاده از سه ورودی متفاوت سختی بسیار دقیق‌تر توصیف می‌شود. سختی بارگذاری محوری E_{σ_0} ، سختی بار برداری E_{ur} ، سه محوری و سختی بارگذاری اذئومتر E_{oed} که مقدار میانگین برای انواع مختلف خاک داریم:

$$E_{oed} = E_{\sigma_0} + E_{ur} = 3E_{\sigma_0} \quad (8)$$

فرق اساسی مدل موهرکلمب و خاک سخت‌شونده این است که



شکل ۳. تعریف E_0 و E_{50} برای نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده

جدول ۱. مشخصات مصالح در مدل رفتاری سخت شونده، موهر کلمب و نرم شونده

$K_{x,y}$ (m/day)	Φ (°)	C_{ref} (kN/m ²)	ν	E_{ref} (kN/m ²)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	نوع مصالح	خصوصیات مصالح
۲e-۸/۶۸	۲۹	۱۸	۰/۳	۴e+۱/۰	۲۰	۱۷	Undrain	پی
۳e-۸/۶۸	۲۵	۲۲	۰/۴	۴e+۱/۰	۲۳	۱۹	Drained	بدنه
۸/۶۴	۳۶	۱۲	۰/۲۵	۲۵۰۰	۲۱	۲۰	Drained	فیلتر و زهکش

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

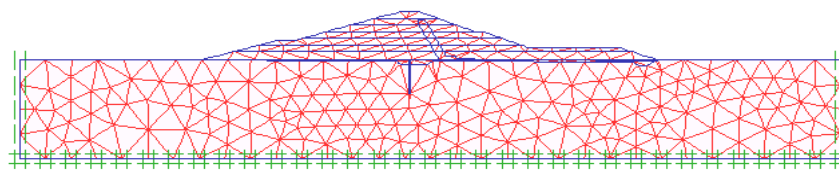
K_0^{nc}	E_{ur} (KN/m ^۲)	E_{oed} (KN/m ^۲)	E_{50} (KN/m ^۲)	خصوصیات مصالح
۰/۴۷۸	۴e+۵	۴e+۲/۵	۴e+۲/۵	بدنه

پلاکسیس که به روش آنالیز برگشتی به دست آمده، را نشان می دهد.

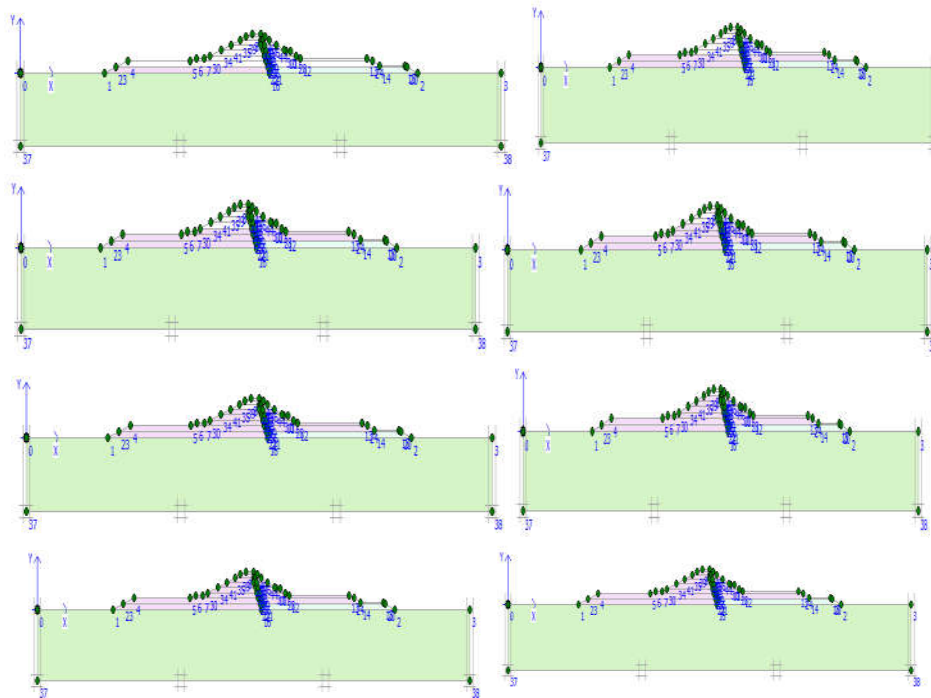
در جداول فوق c چسبندگی (مؤثر)، Φ زاویه اصطکاک داخلی (مؤثر)، ν نسبت پواسون، γ_{sat} وزن مخصوص اشباع و γ_{unsat} وزن مخصوص غیر اشباع آب، E_{ref} ضریب پواسون، k هدایت هیدرولیکی خاک، K_0^{nc} ضریب فشار افقی زمین، E_{50} سختی سکانت در آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد، E_{oed} سختی مماسی برای بارگذاری ادئومتر اولیه، E_{ur} سختی باربرداری و بارگذاری مجدد هستند.

فشار آب حفره ای اولیه و تنش اولیه به روش k_0 در نرم افزار ایجاد شد. تنش های اولیه در خاک متأثر از وزن مصالح و

کردن هندسه بستر و لحاظ کردن شرایط مرزی مدل، به منظور شبیه سازی رفتار خاک، پارامترهای مقاومتی مصالح به هندسه مدل تخصیص داده می شود. پس از ساخت مدل، شبکه بندی مقطع ایجاد می شود. در ساخت شبکه ها از المان های ۱۵ گرهی برای مدل کردن توده خاک استفاده شده است. به وسیله این نرم افزار ساخت لایه لایه ای و مرحله ای سد مدل شده و پدیده تحکیم شبیه سازی شده و تحلیل های عددی در دو محیط تنش کل و تنش مؤثر انجام گرفته است. تعداد لایه ها، مدت زمان خاکریزی و مقدار زمان تحکیم بر اساس برنامه زمان بندی اجرای سد بود که در هشت لایه مدل شده است. جداول ۱ و ۲ پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح، مدل موهر کلمب استفاده شده در نرم افزار



شکل ۴. هندسه مدل و شبکه‌بندی مقطع ۱۹

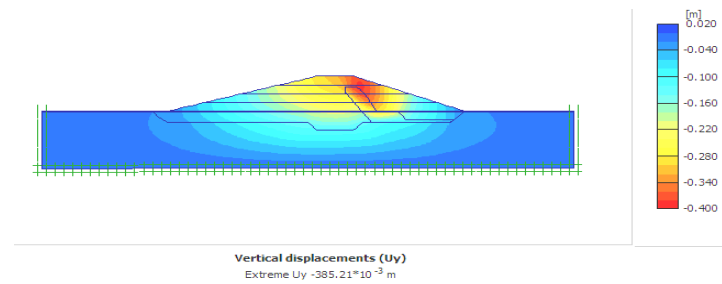


شکل ۵. روند خاکریزی مقطع ۱۹ در نرم‌افزار پلاکسیس

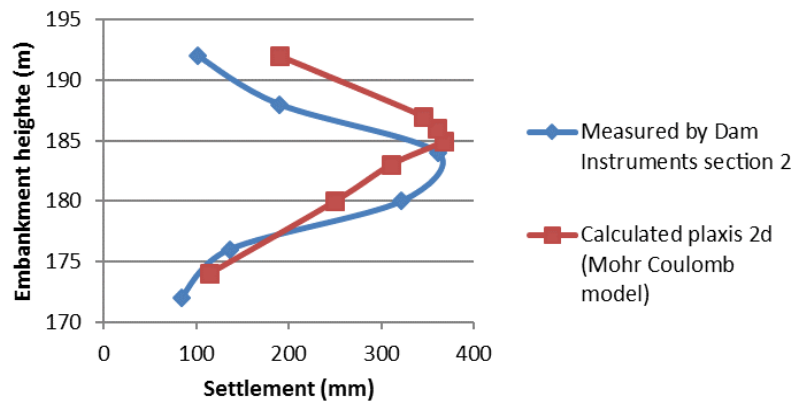
در مورد شبکه‌بندی نرم‌افزار این نکته قابل ذکر است که سه نوع شبکه ریز، متوسط و درشت قابل استفاده است که عمل شبکه‌بندی با توجه به دقت و یکی از روش‌های فوق خودکار انجام می‌شود. در شکل (۴) عمق دیواره آب‌بند مطابق نقشه‌های اجرایی سد برابر ۱۶ متر در نظر گرفته شد. هدایت هیدرولیکی بخش‌های مختلف سد مانند بدنه، پی و فیلتر در جدول ۱ ارائه شده است.

تعیین تعداد لایه‌های لازم برای مدل‌سازی ساخت مرحله‌ای
واقعیت این است که در مدل‌سازی سدهای خاکی یک حداقل تعداد لایه برای رسیدن به جواب‌های قابل قبول در مورد تغییر شکل‌ها وجود دارد، بنابراین مشخص کردن تعداد لایه‌ها مورد

تاریخچه تشکیل آنها است که معمولاً به صورت تنش مؤثر اولیه عمودی مشخص می‌شود. تنش مؤثر اولیه عمودی ضرب در k_0 ، مساوی تنش مؤثر اولیه افقی است. تنش اولیه به وسیله مشخصه k_0 یا با استفاده از بارگذاری ثقلی ایجاد می‌شود. در ادامه در نرم‌افزار ۱۶ یا ۱۰ فاز محاسباتی (بسته به نوع مقطع و با توجه به برنامه زمان‌بندی اجرا) برای خاک‌برداری و خاکریزی مقاطع سد به روش ساخت مرحله‌ای تعریف شد و در نهایت با یک آنالیز برگشتی نتایج با داده‌های ابزار دقیق تقریباً یکی شد و به تحلیل آنها پرداخته شده است. شکل (۴)، هندسه مدل و شبکه‌بندی مقطع ۱۹ و شکل ۵، روند خاکریزی مقطع ۱۹ در نرم‌افزار پلاکسیس را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۲



شکل ۷. وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۲ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

خاکریزی مقطع ۲ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷، ماکزیمم نشست بدنه مقطع ۲ در تراز ۱۸۴ متر (حدود چهار متر بالاتر از سطح پی) رخ داده و مقدار آن معادل ۳۶۰ میلی‌متر تا پیش از تکمیل خاکریزی کمربند فوقانی سد بوده است. در ترازهای بالاتر بدنه سد مقدار نشست کاهش یافته است. نشست تجمعی پی در این مقطع برای دوران ساخت و پس از آگیری اولیه به ترتیب ۳۴۵ و ۴۴۸ میلی‌متر بوده و ۶/۵ متر عمق سطحی پی نشست بیشتری را تجربه کرده است.

بررسی نشست مقطع ۱۹ مقطع میانی سد و مقایسه مدل عددی با نتایج ابزار دقیق

مقطع شماره ۱۹ در کیلومتر ۶۶۰+ واقع شده، می‌تواند به‌عنوان اولین مقطع بخش میانی بدنه سد بررسی شود. بیشترین نشست تجمعی بدنه و پی این مقطع در دوران ساخت سد ۱۸۵۰ میلی‌متر بوده است. نشست بدنه سد در این مقطع تناظر مناسبی با مقاطع

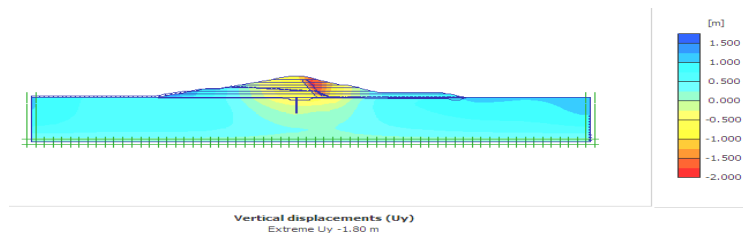
نیاز در تحلیل اهمیت دارد. زمریدیان و چوچی اثر تعداد لایه‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های کامپیوتری روی پارامترهایی تحلیلی کنترل کننده در سدهای خاکی با هسته رسی قائم مسجد سلیمان را بررسی کرده‌اند. پیشنهاد حداقل تعداد لایه‌های لازم برای رسیدن به نتایج معقول در مدل‌های کامپیوتری $H/10$ ارایه کرده‌اند و که H ارتفاع سد از پی است (۷). در این مقاله این قانون رعایت شده است. روند خاکریزی طبق برنامه زمان‌بندی اجرا سد شبیه‌سازی شد. و در خود نرم‌افزار هنگام خاکریزی آگیری با فعال کردن تراز سطح آب در ارتفاع خواسته شده ایجاد شد.

نتایج و بحث

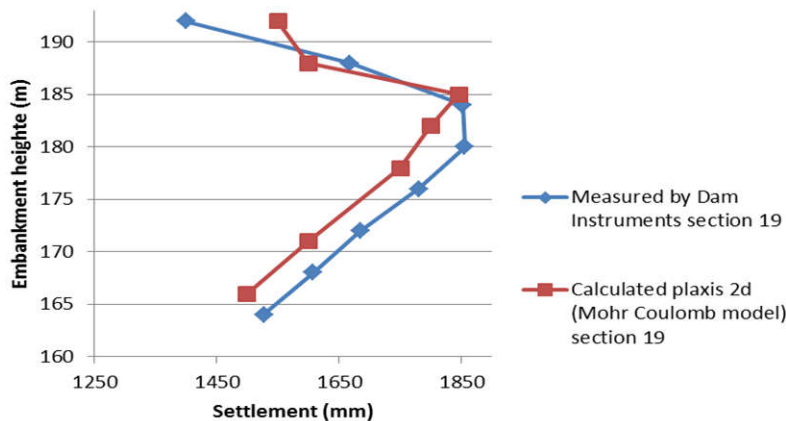
بررسی نشست مقطع ۲ جناح چپ سد و مقایسه مدل عددی

با نتایج ابزار دقیق

شکل ۶ نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۲ را در نرم‌افزار پلاکسیس و شکل ۷ وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع



شکل ۸. نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۱۹



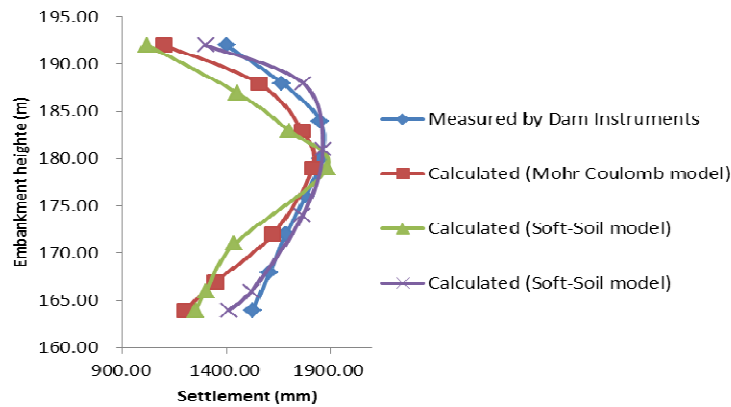
شکل ۹. وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ با مدل موهر کلمب

سخت‌شونده چون داده‌های بیشتری از خاک را دارا است، رفتار سد سدهای خاکی را بهتر می‌تواند مدل‌سازی کند. در این مدل اثر خزش یا نشست ثانویه که معمولاً در درازمدت اتفاق می‌افتد در نظر گرفته نمی‌شود. بدیهی است با توجه به اینکه در طول ساخت معمولاً نشست‌های اولیه اتفاق می‌افتد، مدل سخت‌شونده کارایی بهتری می‌تواند داشته باشد. در این مدل نیز مقاومت برشی خاک بر اساس معیار موهر کولمب مشخص می‌شود؛ اما ویژگی اصلی این مدل در نظر گرفتن سختی وابسته به مسیر و تنش وارده به توده خاک است. این مدل دارای سخت‌شوندگی همسان بوده و می‌تواند تغییر در اندازه سطح تسلیم را در نظر گیرد. با توجه به تغییرات سختی بسته به مسیر بارگذاری و تنش، استفاده از این مدل در پروژه‌هایی که باربرداری یا بارگذاری به میزان زیاد انجام می‌شود، مانند ساخت خاکریزها مثل همین سد خاکی که مدل شد توصیه می‌شود. تفاوت مدل سخت‌شونده با مدل موهر کلمب در پیش‌بینی نتایج آزمایش سه محوری است. شکل ۱۰ وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار

بدنه سد دارد. شکل ۸ نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۱۹ در نرم‌افزار پلاکسیس و شکل ۹ وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری نشست معمولاً در سدهای خاکی در بخش مرکزی هسته رسی، با قرار دادن صفحات مغناطیسی در ترازهای گوناگون معمولاً به فاصله ۲ تا ۳ متر از یکدیگر و قرار دادن صفحه مغناطیسی مبنا در پایین‌ترین تراز ممکن هسته رسی به عنوان نقطه مبنا و ثابت و سنجش نشست سایر نقاط نسبت به آن اندازه‌گیری می‌شود. نشست سد را به دو بخش نشست در طول ساخت و پس از ساخت و در دوران بهره‌برداری می‌توان تقسیم کرد (۱۸).

در مورد مقطع ۱۹ علاوه بر مدل موهر کلمب، سد با مدل‌های نرم‌شونده و سخت‌شونده مدل شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ و جدول ۳ که مقایسه درصد خطا بین مدل‌های رفتاری خاک و ابزار دقیق سد را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود مدل سخت‌شونده برآزش بهتری را ایجاد می‌کند. مدل



شکل ۱۰. وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

جدول ۳. مقایسه درصد خطا بین مدل‌های رفتاری خاک و ابزار دقیق سد

تراز خاکریزی	نشست حاصل از ابزار دقیق سد (mm)	نشست حاصل از مدل موهر کلمب (mm)	نشست حاصل از مدل نرم‌شونده (mm)	نشست حاصل از مدل سخت‌شونده (mm)	درصد خطا مدل موهر کلمب	درصد خطا مدل نرم‌شونده	درصد خطا مدل سخت‌شونده
۱۶۴	۱۵۲۷	۱۲۰۰	۱۲۵۰	۱۴۱۲/۱۶۹	۲۱	۱۸	۷/۵
۱۸۵	۱۶۶۸	۱۵۵۵	۱۴۵۰	۱۷۶۹/۵۵۱	۶/۷	۱۳	۶
۱۹۲	۱۴۰۰	۱۰۹۹/۲۴۹	۱۰۲۰	۱۳۰۰	۲۱	۲۷	۷

ساختگاه این مهم قابل درک است. مقدار نشست تجمعی در پی این ساختگاه معادل ۲۲۰۰ میلی‌متر است. بر اساس داده‌ها، بیشترین نشست اختلافی در راستای عرضی بدنه سد در این مقطع از بخش میانی رخ داده است. به طوری که با لحاظ نشست پی در پایاب این مقطع ۱۶۸۱ میلی‌متر است، نشست اختلافی در راستای عرضی مقطع به مقدار ۹۴۹ میلی‌متر محدود شده است [۹].

شکل ۱۱ نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۲۵ و شکل ۱۲ وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۲۵ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را در نرم‌افزار پلاکسیس، نشان می‌دهد.

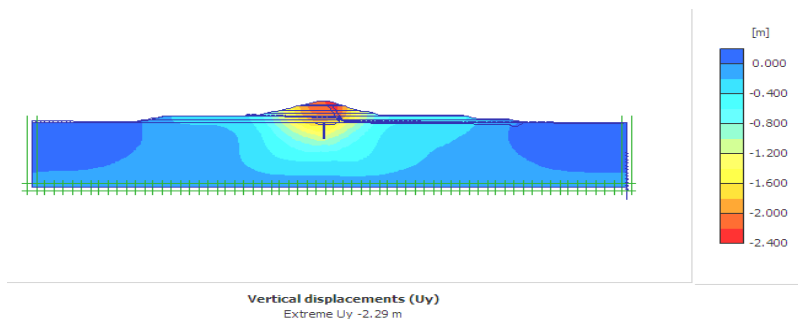
بررسی نشست مقطع ۲۷ مقطع میانی و مقایسه مدل عددی با نتایج ابزار دقیق

شکل ۱۳ نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۲۷ در

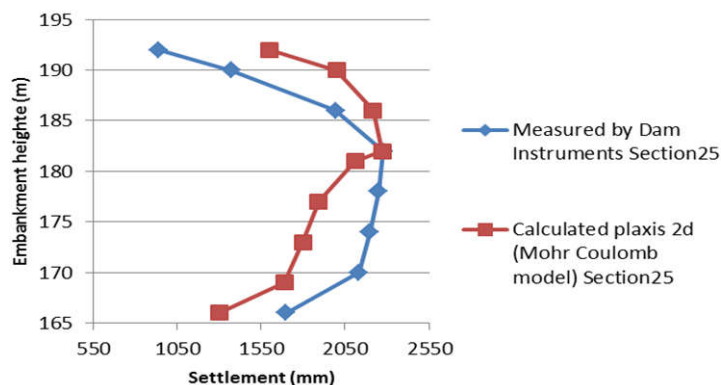
دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهد. جدول ۳ مقایسه درصد خطا بین مدل‌های رفتاری خاک و ابزار دقیق سد را نشان می‌دهد. در این جدول، سه نقطه به‌عنوان نمونه در بالای مقطع و در تراز ۱۹۲ و میانه سد در تراز ۱۸۵ و پایین سد در تراز ۱۶۴ انتخاب شده است. درصد خطا در هر تراز، به‌دست آمد. همان‌طور که می‌بینید مدل سخت‌شونده در هر ۳ تراز درصد خطایی کمتری دارد. بنابراین برای مدل‌سازی سدهای خاک مدل سخت‌شونده توصیه می‌شود.

بررسی نشست مقطع ۲۵ مقطع میانی و مقایسه مدل عددی با نتایج ابزار دقیق

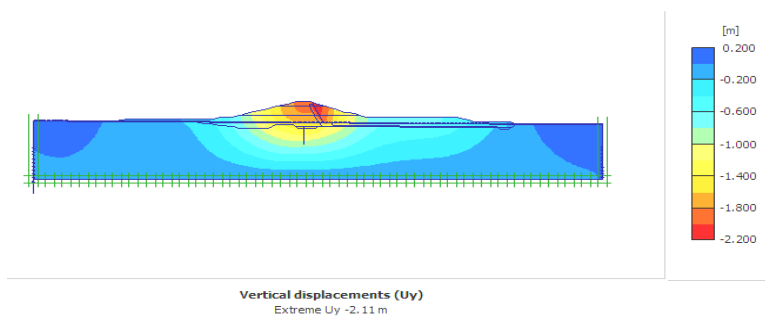
در مقطع ۲۵ (کیلومتر ۹۰۰+۰) نیز مشابه مقطع ۲۳ دو انحراف‌سنج به همراه صفحات نشست-سنجی نصب شده‌اند. با توجه به شکل ۷، نشست بیشینه پی سد در این مقطع رخ داده است که با توجه به ضعیف بودن پی این بخش از بدنه سد، سرعت اجرای خاکریزی و قرارگیری مقطع در خط القعر



شکل ۱۱. نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۲۵



شکل ۱۲. وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۲۵ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی



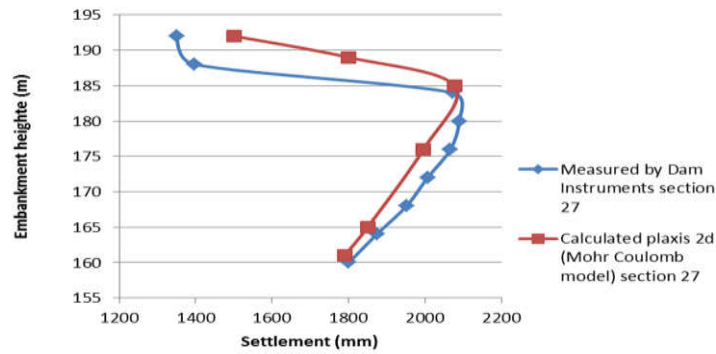
شکل ۱۳. نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۲۷

تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۲۷ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهد.

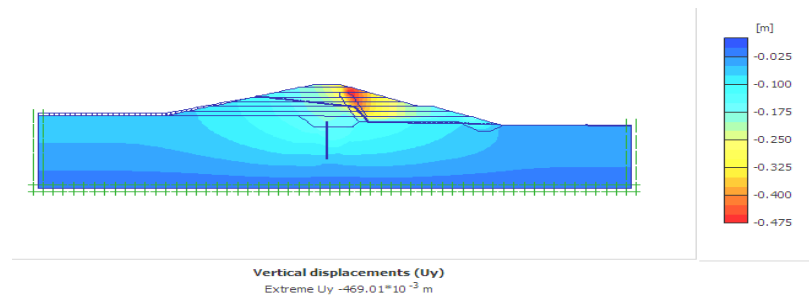
بررسی نشست مقطع ۳۵ جناح راست سد و مقایسه مدل عددی با نتایج ابزار دقیق

شکل ۱۵ نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۳۵ را در نرم‌افزار پلاکسیس را نشان می‌دهد. نتایج نشست‌سنجی آخرین

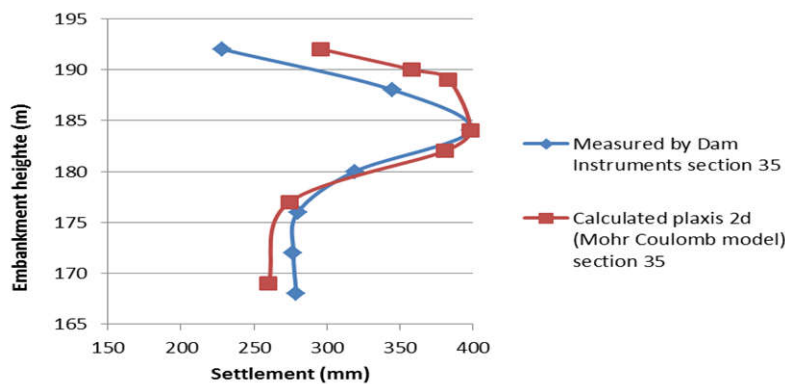
نرم‌افزار پلاکسیس را نشان می‌دهد. وضعیت تغییرشکل‌های قائم بدنه و پی سد در مقطع شماره ۲۷ با توجه به شکل (۱۴) شبیه سایر مقاطع بخش میانی بدنه سد است. به طوری که بیشینه نشست در راستای محور سد در این مقطع عرضی ۲۱۰۰ میلی‌متر است. نشست‌های اختلافی در راستاهای طولی و عرضی به مقادیر بحث شده قبلی محدود شده‌اند و تغییر شکل قائم حداکثر در بدنه سد نزدیک به سطح پی رخ داده است. شکل ۱۴ وضعیت



شکل ۱۴. وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۲۷ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی



شکل ۱۵. نشست در آخرین مرحله خاکریزی مقطع ۳۵



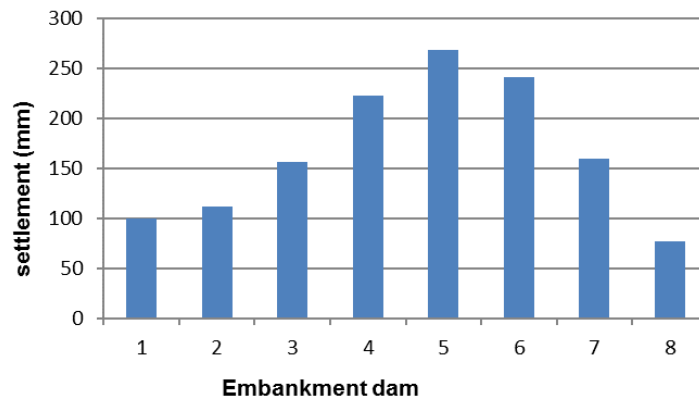
شکل ۱۶. وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۳۵ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

آنالیز برگشتی و را نشان می دهد.

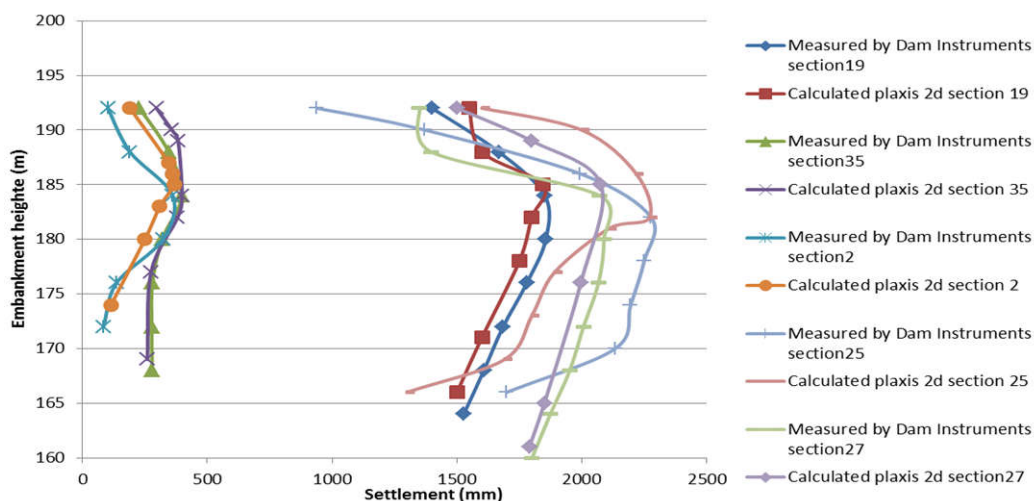
بررسی نشست مقاطع مختلف سد و مقایسه مدل عددی با نتایج ابزار دقیق

در شکل ۱۷ نشست در هر مرحله خاکریزی را نشان می دهد. بیشترین نشست در مرحله پنجم و کمترین نشست در مرحله

مقطع ابزارگذاری شده بدنه سد (مقطع ۳۵) در شکل ۱۶ ارائه شده است. نشست سطح پی ۴۰۰ میلی متر و نشست حداکثر بدنه ۱۳ سانتی متر برای دوران قریب به انتهای ساخت و به ترتیب ۴۳۹ میلی متر و ۱۷/۵ سانتی متر پس از آبدگیری اولیه و اتمام خاکریزی کامل بدنه سد است. شکل ۱۶ وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۳۵ حاصل از ابزار دقیق و



شکل ۱۷. نشست هر مرحله خاکریزی، پلاکسیس دو بعدی مقطع



شکل ۱۸. نشست مقاطع مختلف سد و مقایسه مدل عددی با نتایج ابزار دقیق

سد اتفاق می‌افتد (۱۷). نرم‌افزار پلاکسیس در این مدل هم بیشترین مقدار نشست را تقریباً در قسمت میانه سد نشان می‌دهد که این مقایسه به‌خاطر صحت‌سنجی نرم‌افزار پلاکسیس انجام گرفته است. شکل ۱۸ نشست هر مرحله خاکریزی، پلاکسیس دو بعدی مقطع ۱۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید بیشترین مقدار نشست تقریباً در قسمت میانه سد (یعنی ارتفاع ۱۸۰ تا ۱۸۵ متری) رخ داده است.

با توجه تحلیل‌های انجام شده با نرم‌افزار و داده‌های سد نشست سد در موارد زیر تحلیل شده است.

حد فاصل مقاطع شماره ۷ تا ۱۱ بدنه سد جناح چپ را تشکیل می‌دهد. این جناح محدوده حاد از نظر تغییر عمق سنگ بستر هست.

آخر رخ داده است. همان‌طور که می‌بینید نشست تا مراحل میانی روند افزایش را داشته و سپس روند آن کاهش یافته است. شکل ۱۸ مجموعه نتایج تفسیر شده در فوق برای مقاطع عرضی را در یک تصویر نشان می‌دهد. ارزیابی این نتایج در کنار هم مؤید این مهم است که تغییر شکل‌های قائم بدنه سد از سمت جناحین به سمت مقاطع میانی افزایش یافته و بیشترین نشست در مقطع ۲۵-۲۵ ثبت شده است. بنابراین می‌توان از رفتار یکپارچه بدنه سد با لحاظ روند تغییرات نشست‌ها را در شکل ۱۸ یاد کرد.

نشست‌های اندازه‌گیری شده در ۲۲ سد خاکریزه‌ای بزرگ جهان نشان می‌دهد که بیشترین مقدار نشست در قسمت میانه

وضعیت پی و مصالح تشکیل دهنده آن در جناح راست سد، مناسب‌تر از جناح میانی و چپ سد است، بدین ترتیب انتظار تغییر شکل‌هایی در جناح راست و با سرعت بیشتری به دلیل درشت دانه‌تر شدن پی قابل انتظار است.

نتیجه‌گیری

در بحث‌های فوق، تغییرات نشست در عمق بدنه و پی سد به‌همراه نحوه توزیع نشست‌ها در راستای محور سد و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق مورد بررسی قرار گرفت. چون دانش ژئوتکنیک بر پایه فرضیات بنا نهاده شده است بنابراین مدل‌سازی کامل، غیرممکن است، به همین دلیل وجود اختلاف بین مدل و اصل امری طبیعی است (۶). همواره مقایسه روش‌های ریاضی یا عددی در خصوص مسائل ژئوتکنیکی با داده‌های اندازه‌گیری شده دقت این روش‌ها در یک پروژه خاص، تعیین می‌کند. در این تحقیق نیز این مقایسه نشان داد که آنالیز برگشتی صورت گرفته در مقاطع مختلف سد کبودال تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته و لذا با اطمینان خوبی می‌توان از آن برای پیش‌بینی عملکرد سد از لحاظ نشست در آینده استفاده کرد. نتایج حاصل از نشست ابزار دقیق و نرم‌افزار (آنالیز برگشتی) نشان می‌دهد که این دو تطابق خوبی با هم دارند. کلیه ابزارهای نصب شده به‌خوبی عمل کرده و نتایج حاصل قابل تفسیر و منطقی است که نشان دهنده دقت نصب و قرائت است. ارزیابی این نتایج در کنار هم مؤید این مهم است که تغییر شکل‌های قائم بدنه سد از سمت جناحین به سمت مقاطع میانی افزایش یافته و بیشترین نشست در مقطع ۲۵-۲۵ ثبت شده است. با بررسی در مقاطع مختلف، بیشترین نشست در حد فاصل تراز ۱۸۰ تا ۱۸۵ روی داده است. یعنی تراز خاکریزی در این اعداد بحرانی بوده است. عمده نگرانی‌ها در بخش میانی سد محدود می‌شود که وضعیت ضعیف‌تری نیز دارد. توجه شود که بیشترین تغییر شکل‌های جانبی بدنه سد در بخش میانی بسیج شده است که همخوانی

مناسبی با شرایط ژئوتکنیکی پی، نحوه بارگذاری بدنه، زمان پایدارسازی توزیع تنش‌ها و عملکرد یکپارچه بدنه سد دارد. در مورد مقطع ۱۹ علاوه بر مدل موه‌ر کلمب، سد با مدل‌های نرم‌شونده و سخت‌شونده مدل شده است. در اینجا مدل سخت‌شونده برآزش بهتری را ایجاد می‌کند. در این مورد بلوری و مبینی‌زاد (۲)، به ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق پرداختند که نتایج نشان داد که مدل رفتاری سخت‌شونده برآزش بهتری در مورد سد نهرین داشت و که این تحقیق صحت انجام کار آنها را تأیید می‌کند. مدل سخت‌شونده چون پارامترهای بیشتری از خاک را دارد، رفتار سدهای خاکی را بهتر می‌تواند مدل‌سازی کند. با توجه به اینکه در طول ساخت معمولاً نشست‌های اولیه اتفاق می‌افتد مدل سخت‌شونده کارایی بهتری می‌تواند داشته باشد. با توجه به تغییرات سختی بسته به مسیر بارگذاری و تنش، استفاده از این مدل در پروژه‌هایی که باربرداری یا بارگذاری به‌میزان زیاد انجام می‌شود، مانند ساخت خاکریزها مثل همین سد خاکی که مدل شد، توصیه می‌شود. در این تحقیق روش ارائه شده توسط زمردیان و همکاران (۷) مورد تأیید قرار گرفت و نتایج صحت انجام کار آنها را تأیید کرد. در پایان می‌توان گفت که برای دستیابی به بهترین مدل عددی برای سدهای خاکی بهتر است موارد زیر مورد توجه قرار گیرند:

- ۱- در نظر گرفتن ناهمگنی مصالح فیلتر و پوسته در پیکره سد در هنگام ایجاد مدل عددی ۲- مدل کردن لایه‌بندی‌های مصالح از نظر خواص و ویژگی‌های مکانیکی در ترازهای مختلف ۳- توجه به شیب لایه‌های در نظر گرفته شده، بسته به شرایط هر پروژه ۴- مدل کردن بارگذاری لایه ناشی از احداث سد در هنگام ساخت مدل عددی ۵- استفاده از پلکان زمانی ۶- استفاده از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به جای مدل‌های رفتاری خطی یا نرم‌شونده و یا ترکیب آنها با مدل رفتاری کم‌کلی.

منابع مورد استفاده

۱. بدو، ک. و م. امین افخمی فرد. ۱۳۸۷. تحلیل نشست سد شهرچای ارومیه در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.
۲. بلوری بزار، ج. و م. مبینی‌زاد. ۱۳۷۹. ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی. *مجله پژوهش آب ایران* ۴(۶): ۱۰-۱.
۳. جهانی، ص.، ح. گلمایی و م. ضیاءتبار احمدی. ۱۳۸۹. مطالعه و بررسی مدل سازی عددی اجزای محدود جهت بررسی پایداری شیروانی‌ها در حین ساخت و پرشدن و افت سریع مخزن (مطالعه موردی سد میجران با استفاده از نرم‌افزار Plaxis). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۴. حصیرچیان، م.، ح. گلمایی و م. ضیاءتبار احمدی. ۱۳۸۸. مطالعه و بررسی مدل‌سازی عددی اجزای محدود جهت بررسی پایداری شیروانی‌ها در حین ساخت و پرشدن و افت سریع مخزن. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
۵. حکیمی خانسر، ح.، ح. گلمایی و م. حصیرچیان. ۱۳۹۲. ارزیابی رفتار سدهای خاکریزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق (مطالعه موردی سد کبودال). پایان‌نامه کارشناسی ارشد ۱۳۹۲، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۶. حکیمی خانسر، ح.، ح. گلمایی و م. شیداییان. ۱۳۹۲. ارزیابی رفتار سد خاکی کبودال (قره سو - زرینگل) در طول ساخت به روش اجزای محدود با نرم‌افزار PLAXIS و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق. *مجله علوم و مهندسی آب* ۴(۹): ۳۳-۵۰.
۷. زمردیان، س. م. ع. و ح. چوچی. ۱۳۹۱. تحلیل عددی رفتار سدهای خاکی - سنگریزه‌ای حین ساخت و اولین آبیگری (مطالعه موردی: سد مسجد سلیمان. *مجله علوم آب و خاک* ۱۶(۶۲): ۲۴۲-۲۲۹.
۸. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان. ۱۳۹۱. داده‌های ابزار دقیق سد کبودال سال. گلستان.
۹. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان. ۱۳۹۲. گزارش رفتارسنجی سد کبودال سال. گلستان.
۱۰. شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان گلستان. ۱۳۹۲. گزارشات مصالح قرضه آزمایشگاهی تحلیل‌های بدنه فنی و ابزار دقیق سد کبودال. گلستان.
11. ASCE Task Committee. 2000. Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance. ASCE. USA
12. Chen X, Shiwei B. 2003. Research on creep-consolidation characteristics and calculating model of soft soil. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 22(5): 728-734. (In Chinese).
13. Duncan, J. M. and C. Y. Chang. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain. *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division* 96:1629-1653
14. Dunnycliff, J. 1993. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley and Sons Inc. USA.
15. Indraratna, B., A. S. Balasubramaniam and P. Ratnayake. Performance of embankment stabilized with vertical drains on soft clay. *Journal of Geotechnical Engineering* 120(2): 257.
16. Mir-Mohammad-Hosseiny S. M. and R. Ahmadi-Fard. 2003. Pore pressure development in the core of earth dams during simultaneous construction and impounding. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 8: Bundle A.
17. Myers, B. and J. Statelie. 2008. Why Include Instrumentation in Dam Monitoring Programs? United States Society on Dams. Committee on Monitoring of Dams and their Foundations. United States.
18. Pagano L., A. Desidri and F. Vinale. 1998. Interpreting settlement profiles of earth dams. *Journal of Geotechnical and Geo environmental Division. ASCE* 124(10): 923-932
19. Plaxis 2D, General Information- Reference and Scientific Manual. 2001. Version 1. A. A. Balkema Brinkgreve R.B.J. and Vermeer P.A.
20. US Army Corps of Engineers. 1995. Instrumentation of Embankment Dams and Levees Engineering and Design.

- Washington DC. TMax A. M. Herzog Practical Dam Analysis. Consulting Engineer.
21. Weibing, Z., C. Yonghu and G. Youpin. 1998, A methodology for modeling sand-drain ground in plain strain analysis. *Journal of Hydraulic Engineering* 43(6): 53-57. (In Chinese).
 22. Zhiwan Y., Z. Weibing and G. Ji. 2003. 3-D FEM Analysis of Soft Viscoelastic/Viscoplastic Foundation with Drainage Preloading. *Journal of Hohai University* 23(5): 1-7. (In Chinese).
 23. Zongze, Y. 1988. One double yield surface constitutive model of soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 10(1): 64-71. (In Chinese).

Investigation of the Structure of the Dam Body during Construction and its Comparison with the Analytical Results Using PLAXIS Software (the Case Study of Kaboodvall Dam)

F. Salmasi, H. Hakimi Khansar* and B. Norani¹

(Received: July 11-2017 ; Accepted: January 15-2018)

Abstract

Modeling of Kaboodval Dam using Plaxis software has been used for the Mohr-Coulomb behavior model. The effect of two continuities of embankment and watering operations on the meeting was considered. The body structure of the dam was increased from the side of the faces to the middle sections, and the maximum seating was recorded at 25-25 and at about 2200 mm. By examining at different intervals, the largest meeting was in the range of 180 to 185. That is, the level of the embankment was found to be critical in these numbers. Most concerns were regarding the middle of the dam, which had a weaker position. According to the analysis of different parts of Kaboodvall Dam, the materials forming the right wing of the dam in the middle and left wings of the dam were better. In the case of the 19th Module, besides the Mohr-Coulomb model, the dam could be modeled with hardening and hardening models. Here, the hardening model created a better fit. The hardening model, as it could get more data from the soil, is likely to better model the behavior of the soil dams. Due to the fact that, during the construction, the first sessions usually occur, the hardening model can have a better performance.

Keywords: Dam, Dam Kaboodval, Plaxis, Soil subsidence

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: hakimi1904@yahoo.com