

ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق

جعفر بلوری بزاز^{۱*} و محسن مبینی زاد^۲

چکیده

کنترل مستمر ایمنی و پایداری سدهای خاکی در حین ساخت، اولین آنگیری و نیز در زمان بهره‌برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نقش اصلی هسته در این‌گونه سدها به دلیل پایین بودن نفوذپذیری رس، جلوگیری از نشت آب است. در دوران ساخت، افزایش سرعت خاکریزی به افزایش فشار حفره‌ای و کاهش تنش مؤثر در هسته منجر می‌شود که ممکن است در اولین دوره آنگیری پایداری سد را تهدید کند. با کمک ابزار دقیق نصب شده در این‌گونه سدها، پایداری آن را می‌توان کنترل کرد. با توجه به رفتار غیرخطی سد خاکی برای تحلیل آن باید از روش عناصر محدود و مدل‌های رفتاری مناسب بهره جست. در تحقیق حاضر بر اساس داده‌های ابزار دقیق سد خاکی نهرین طیس، تنش‌های ایجاد شده و نیز نشست سد در دوران ساخت با مقادیر حاصل از تحلیل عددی مقایسه شده است. به این منظور دوران ساخت سد با استفاده از دو مدل رفتاری مور-کلمب و سخت‌شونده، تحلیل گشته و تنش‌های ایجاد شده در هسته و نشست آن با داده‌های ابزار دقیق مقایسه شده است. با توجه به همخوانی داده‌های ابزار دقیق و نتایج حاصل از تحلیل، می‌توان گفت پارامترهای مقاومتی خاک که از آزمایشات به دست آمده، به واقعیت نزدیک بوده و نیز مدل‌های رفتاری انتخاب شده قادر به پیش‌بینی مناسب رفتار سد در این مرحله هستند.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، رفتارنگاری، دوران ساخت، مدل رفتاری.

ارجاع: بلوری ب. و مبینی زاد م. ۱۳۸۹. ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۶): ۱-۱۰.

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- کارشناس ارشد خاک و پی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

*نویسنده مسئول: bolouri@ferdowsi.um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۷/۸

مقدمه

امروزه سدهای بزرگ اعم از خاکی یا بتنی از مهمترین سازه‌های آبی به‌شمار می‌روند که در تأمین آب موردنیاز 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. طبیعت متفاوت سازندهای طبیعی در محل احداث سدهای خاکی از یک طرف و رفتار پیچیده مصالح خاکی سد از طرف دیگر ارزیابی کمی و کیفی پارامترهای رفتاری خاک را ضروری می‌نماید. تحقیقات نشان می‌دهند که ارزیابی غلط این‌گونه پارامترها اغلب علت به مخاطره افتادن پایداری سدهای خاکی بوده است. نصب ابزار دقیق و رفتارنگاری آنها در دوران ساخت و دوره بهره‌برداری اولیه کمک شایان به ارزیابی این پارامترها می‌کند (کمیته راهبردی انجمن مهندسين راه و ساختمان آمریکا، ۲۰۰۰). اهمیت ویژه ابزار دقیق در سدها به نقش آنها در کنترل پایداری کوتاه و دراز مدت سدها برمی‌گردد، به‌گونه‌ای که در رفتارنگاری سدها مورد توجه مهندسين واقع شده است (سازمان مهندسين ارتش ایالات متحده، ۱۹۹۵). در حال حاضر، رفتارنگاری در سدهای خاکی با رفتار بسیار پیچیده بخشی از برنامه جامع کنترل پایداری است. به‌عبارتی هدف اصلی که تشخیص هرگونه مشکل احتمالی که پایداری سد را تهدید کند است به خوبی با رفتارنگاری توسط ابزار دقیق برآورده می‌شود (میرس و استتلیر، ۲۰۰۸).

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 هسته با توجه به تراز آب و اندازه‌گیری آنها با ابزار دقیق در این دوره از اهمیت ویژه برخوردار است (مدیریت انرژی و منابع آب نروژ، ۲۰۰۴). به‌طورکلی 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. در دوران ساخت یک سد پارامترهای رفتاری خاک نظیر تنش کل، فشارمنفذی و کرنش بر اثر عواملی نظیر حرکات پی، تحکیم هسته و

تغییرات رطوبت مصالح، دایم در حال تغییر است به‌گونه‌ای که رفتارسنجی سد را ضروری می‌نماید. رفتارسنجی سدها اصولاً منجر به ارزیابی پارامترهای طراحی، کاهش ریسک خطرپذیری، کنترل کیفیت در حین ساخت و نیز بررسی دقیق پایداری در دوران اولیه بهره‌برداری و بهره‌برداری دراز مدت می‌شود. با توجه به عدم حضور بارهای خارجی در دوران ساخت، سنجش تغییرات تنش، فشار منفذی و نشست مهمترین عواملی هستند که می‌توانند مورد ارزیابی قرار گیرند (دانکلایف، ۱۹۹۳). به‌طورخلاصه برای به حداقل رساندن خطراتی که منجر به ناپایداری سد می‌شود در نظر گرفتن نکات مهم شامل نصب ابزار دقیق در بدنه و پی سد، ثبت داده‌های ابزار نصب شده در کلیه مراحل اجرایی، ثبت هرگونه حادثه غیر معمول، مدل کردن روند پیشرفت پروژه، تحلیل سریع داده‌های ابزار دقیق و مقایسه آنها با پارامترهای طراحی و در صورت تحلیل برگشتی ضروری است.

گسترش فشار آب منفذی در داخل هسته و در دوران ساخت 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 به‌گونه‌ای که ممکن است آنگیری موقت سد در بعضی مراحل ساخت پیشنهاد شود (حسینی و احمدی، ۲۰۰۵). 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. مدل‌های رفتاری ساده اگرچه نیاز به پارامترهای رفتاری را ندارند اما نتایج حاصل از تحلیل با این‌گونه 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.

در تحقیق حاضر سعی شده است داده‌های ابزار دقیق در دوران ساخت که شامل مقادیر واقعی تنش و نشست سد هستند (مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق نصب

حوضه آبریز طیس که به حوضه مهربانی یا نهرین نیز مشهور است در شرق شهرستان طیس قرار دارد. مساحت حوضه آبریز ۱۸۸ کیلومتر مربع و محیط آن ۷۷ کیلومتر است. محل سد نهرین در ارتفاعات شتری قرار دارد. بخشی از ارتفاعات محدوده سد در ارتباط با رسوبات تراسی حاشیه رودخانه بوده که با شیب بسیار تند، تکیه‌گاه جناح راست سد را تشکیل می‌دهد. تکیه‌گاه چپ با شیب ملایم‌تر عمدتاً از رسوبات شیل و ماسه سنگ تشکیل شده است و از ساختارهای زمین‌شناسی محدوده تبعیت می‌کند. لایه‌های شیل و ماسه سنگ با روند شمال شرق-جنوب غرب امتداد دارد و رودخانه نهرین سری مذکور را با روند جنوب شرق-شمال غرب قطع می‌کند (گزارش فنی سد ذخیره‌ای نهرین طیس، ۱۳۸۱).

پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح سد

مصالح موردنیاز سد از دو منبع قرضه در محدوده ۳۰ و ۱۲ کیلومتری از محل سد تأمین شد. پارامترهای رفتاری و مشخصات مصالح تشکیل دهنده بدنه سد نهرین که شامل سه بخش اصلی هسته رسی، فیلتر و پوسته است، در جدول ۱ آورده شده است. همچنین مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری سخت شونده نیز در جدول ۲ بیان شده است. مقادیر وزن مخصوص مرطوب، γ_{wet} و وزن مخصوص خشک، γ_d از آزمایش تراکم (۹۸٪ تراکم) به‌دست آمده است. پارامترهای رفتاری خاک در این جدول از آزمایشات سه محوری CD روی نمونه‌هایی که با همان وزن مخصوص مرطوب، γ_{wet} تهیه شده بودند به‌دست آمده است. آزمایشات روی مصالح بخش‌های گوناگون سد هم در فاز مطالعاتی و هم در زمان ساخت انجام شده است (گزارش فنی سد ذخیره‌ای نهرین طیس، ۱۳۸۱). در طول ساخت در صورت مشاهده هرگونه تغییر احتمالی در نوع خاک منابع قرضه، آزمایشات طبق نظر مشاور انجام و پارامترهای اندازه‌گیری شده مجدداً کنترل می‌شدند.

جدول ۱- مشخصات مصالح در مدل رفتاری سخت‌شونده و مورکلمب

ky (m/day)	kx (m/day)	v	ϕ (درجه)	c (kN/m ²)	E (kN/m ²)	γ_{wet} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	
۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۹	۰/۳۵	۲۹	۲۰	۶۰۰۰۰	۲۰	۱۹	هسته رسی
۳۲	۳۹	۰/۲۵	۳۵	۰/۲	۱۰۰۰۰۰	۲۱	۲۰	فیلتر
۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۲۵	۳۸	۰/۲	۸۰۰۰۰	۲۲/۵	۲۱/۵	پوسته

شده در سد) با مقادیر به‌دست آمده از تحلیل سد (مقادیر محاسبه شده) براساس مدل‌های رفتاری مور-کلمب و سخت‌شونده مقایسه و بررسی شوند.

مواد و روش‌ها

مشخصات عمومی سد نهرین

سد ذخیره‌ای نهرین در ناحیه شمال استان یزد در ۲۱ کیلومتری شرق شهرستان طیس و در موقعیت جغرافیایی ۳۱° ۵۷' طول شرقی و ۳۳° ۳۹' عرض شمالی واقع شده است. این سد از نوع خاکی با هسته مرکزی رسی است که با ارتفاع ۴۸ متر از بستر رودخانه و ۶۰ متر از پی‌سنگی، قادر به ذخیره سازی حدود ۴/۸۶ میلیون مترمکعب آب است. با تکمیل سد، حدود ۸/۲ میلیون مترمکعب آب رودخانه تنظیم خواهد شد که علاوه بر تأمین ۵ میلیون مترمکعب آب شرب شهرستان طیس، حدود ۳۲۵ هکتار از اراضی پایاب نیز آبیاری خواهد شد. طول تاج سد نهرین با خاکریز جناح راست ۳۰۷ متر و عرض تاج آن ۱۰ متر است. (گزارش فنی سد ذخیره‌ای نهرین طیس، ۱۳۸۱). شکل ۱ توپوگرافی محدوده سد نهرین طیس را نشان می‌دهد.



شکل ۱- توپوگرافی محدوده سد نهرین

شکل، ابعاد و ابزارگذاری مشابه مقطع B-B است که به دلیل طولانی شدن و نیز مشابهت نتایج با مقطع B-B از آوردن نمودارهای داده‌های ابزار آنها خودداری شده است.

جدول ۳- شرح ابزار نصب شده در سد نهرین

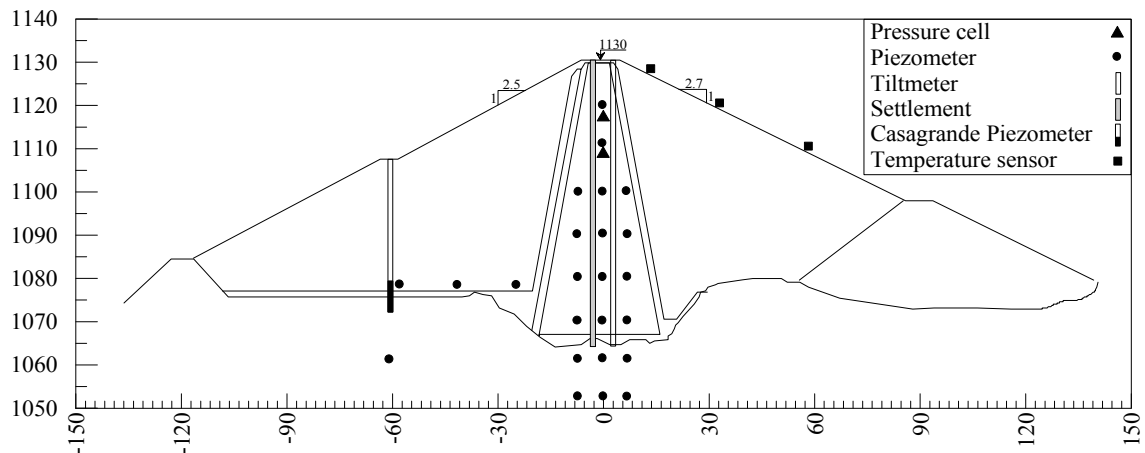
نوع ابزار	محل نصب	تعداد
سلول فشارسنج	هسته	۲۳
پیزومتر تار مرتعش	هسته، پوسته و فیلتر	۶۳
پیزومتر کاساگرانده	پی	۳
صفحه مغناطیسی	هسته و پوسته	۲۵
نشست‌سنج	هسته	۲۴
کشیدگی سنج تک نقطه‌ای	تکیه‌گاه	۲
کشیدگی سنج چهار نقطه‌ای	سرریز	۱
انحراف‌سنج	هسته	۲۰
حرارت‌سنج آب و هوا	بدنه	۱

جدول ۲- مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری سخت

شونده		
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)
۶۰۰۰۰	۷۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰
۱۰۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰
۸۰۰۰۰	۹۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰

سیستم و مقاطع ابزار دقیق سد نهرین

به‌منظور ثبت هرگونه تغییر شکل سد در دوران ساخت و بهره‌برداری مجموعه کاملی از ابزار دقیق طراحی شده است. با توجه به طول سد ابزار دقیق آن در چهار مقطع نصب شد. ابزار دقیق سد نهرین براساس نقشه‌های ابلاغ شده توسط دستگاه نظارت شرکت مشاور در ترازهای مربوطه نصب شده‌اند. فهرستی از این ابزار و تعداد آنها در جدول ۳ آمده است. شکل ۲ جانمایی ابزار دقیق سد نهرین را در مقطع B-B که کامل‌ترین مقطع ابزارگذاری بوده و بر روی بستری از سنگ بنا شده است نشان می‌دهد. مقطع C-C نیز از لحاظ



شکل ۲- جانمایی ابزار دقیق سد نهرین در مقطع B-B

می‌شوند و احتمال پدیده قوسی شدن وجود دارد، استفاده از تحلیل سه بعدی توصیه شده است.

به‌منظور تحلیل تنش-کرنش سد نهرین از نرم‌افزار PLAXIS (نسخه ۷/۲) که بر اساس روش اجزای محدود قادر به تحلیل تنش-تغییر شکل و پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی در حالت کرنش صفحه‌ای و نیز محاسبه جریان آب در این‌گونه سازه‌هاست، استفاده شده است (برینکگریو و ورمیر، ۲۰۰۱). 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 بهره‌برداری با در نظر گرفتن فشار آب منفذی است.

تحلیل تنش-کرنش سد

برای تحلیل تنش-کرنش سدهای خاکی و خاکریزها معمولاً از روش اجزای محدود به‌صورت دو بعدی در شرایط کرنش صفحه‌ای ۱ 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 (پاتس و زراکویک، ۲۰۰۱). تنها در مورد سدهایی که در دره‌های تنگ ساخته

که i, j و k به ترتیب برابر ۱، ۲ و ۳ هستند. دو پارامتر c و همچنین شش تابع پتانسیل پلاستیک را برای این مدل را به صورت رابطه کلی زیر می توان تعریف کرد:

$$g_{(i,j,k)} = \frac{1}{2} \left| [\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)}] \right| + \frac{1}{2} \left| [\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)}] \right| \sin \psi \leq 0 \quad (4)$$

پارامتر ψ زاویه اتساع بوده که به کمک آن می توان کرنش حجمی خاک های متراکم را مدل کرد.

ب- مدل سخت شونده

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 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 (دانکن و چانگ، ۱۹۷۰) قابل مدل کردن است. مدل سخت شونده به دلیل بهره گیری از تئوری پلاستیسیته و وارد کردن پارامتر اتساع و نیز وابستگی سختی خاک به تنش و کرنش، جایگزین مناسب تری است. یکی از ویژگی های این مدل وابستگی سختی خاک به تنش است که در شرایط تحکیمی به صورت زیر قابل بیان است:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} (\sigma / p^{ref})^m \quad (5)$$

برای خاک های نرم فرض $m=1$ به واقعیت نزدیک است. در این حالت

$$E_{oed}^{ref} = p^{ref} / \lambda^* \quad (6)$$

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

در این روابط p^{ref} تنش مرجع و λ^* اندیس فشردگی اصلاح شده است. به گونه ای مشابه، ضریب ارتجاعی باربرداری-بارگذاری مجدد را می توان به ضریب تورم اصلاح شده K^* مرتبط کرد، به عبارتی

همچنین تحلیل پلاستیک، ساخت مرحله ای و تحلیل دینامیکی با این نرم افزار ممکن است. با استفاده از این نرم افزار مدل های رفتاری گوناگون خاک، نظیر الاستیک خطی، مور-کلمب، خزشی نرم شونده، نرم شونده و سخت شونده را می توان برای رفتارهای گوناگون خاک در دوران ساخت و یا بهره برداری در نظر گرفت. برای تحلیل سد نهرین از دو مدل زیر استفاده شده است.

الف- مدل مور-کولومب

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 می شوند. به عبارتی

$$\underline{\dot{\sigma}}^e = \underline{\underline{D}}^e \dot{\underline{\sigma}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\dot{\underline{\varepsilon}} - \dot{\underline{\varepsilon}}^p) \quad (1)$$

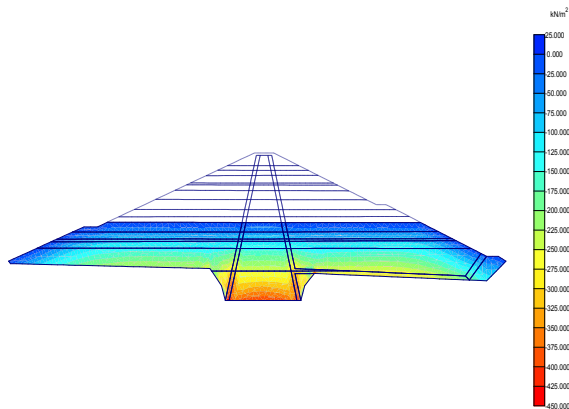
براساس تئوری پلاستیسیته (هیل، ۱۹۵۰) کرنش های پلاستیک متناسب با مشتق تابع تسلیم نسبت به تنش ها می باشد. به عبارتی کرنش های پلاستیک را می توان به صورت بردارهایی عمود بر سطح تسلیم در نظر گرفت. بر این اساس می توان رابطه بین نرخ تنش مؤثر و کرنش مؤثر را به دست آورد.

$$\underline{\sigma}' = \left(\underline{\underline{D}}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \right) \dot{\underline{\varepsilon}} \quad (2)$$

در این رابطه $d = \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'}$ است. معیار تسلیم مور-کلمب 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:

$$f_{(i,j,k)} = \frac{1}{2} \left| [\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)}] \right| + \frac{1}{2} \left| [\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)}] \right| \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \quad (3)$$

شکل سد مقدار آن منطقی به نظر می‌رسد. در بخش‌های بعدی این موضوع مورد تجزیه و تحلیل واقع شده است.



شکل ۳- توزیع تنش کل قائم در مقطع سد در ششمین مرحله تحلیل (مدل رفتاری مور- کولومب)

نتایج و بحث

مهمترین عواملی را که در دوران ساخت باید دایم بررسی کرد فشار آب منفذی، تنش‌های ایجاد شده و نشست هسته رسی است. نظر به اینکه برای اجرای هسته رسی سد رطوبت خاک حوالی رطوبت بهینه و درصد تراکم بیش از ۹۸ درصد است، هنگام متراکم کردن هسته، خاک حالت بیش تحکیم یافته پیدا می‌کند و ممکن است فشار منفذی منفی در هسته به وجود آید (فل و همکاران، ۱۹۹۲). با پیشرفت خاکریزی هسته و افزایش سربار فشار منفذی منفی به تدریج خنثی شده و فشار منفذی مثبت ایجاد شده و به مرور افزایش می‌یابد. با توجه به شرایط آب و هوایی طبرس و گرم و خشک بودن آن منطقه به نظر می‌رسد رطوبت هسته رسی خیلی کمتر از شرایط اشباع باشد و بنابراین شرایط زهکشی شده را در دوران ساخت هنگام تحلیل سد می‌توان در نظر گرفت.

اگرچه پیرومترهای الکتریکی نصب شده در سد از ابتدای شروع ساخت فشار منفذی بسیار اندک را در هسته نشان می‌دادند اما برای حصول اطمینان گمانه‌های در هسته رسی حفر شد. مصالح خارج شده از گمانه دارای رطوبت اندکی بود که این نظر را تأیید می‌کرد و بنابراین بررسی فشار منفذی در دوران ساخت مورد نداشت. دلیل فشار منفذی اندک در طول ساخت، هوای گرم منطقه و طولانی شدن دوران ساخت و زایل شدن تدریجی فشار آب منفذی بود.

$$E_{ur}^{ref} = 3p^{ref}(1 - 2v_{ur}) / \kappa^* \quad (8)$$

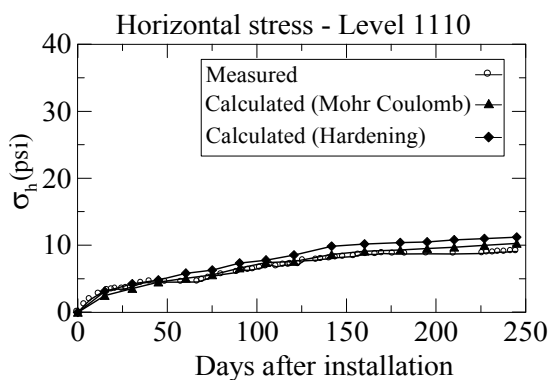
$$\kappa^* = \kappa / (1 + e_0) \quad (9)$$

که v_{ur} ضریب پواسون باربرداری و بارگذاری مجدد است. 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 کارآیی بهتری می‌تواند داشته باشد.

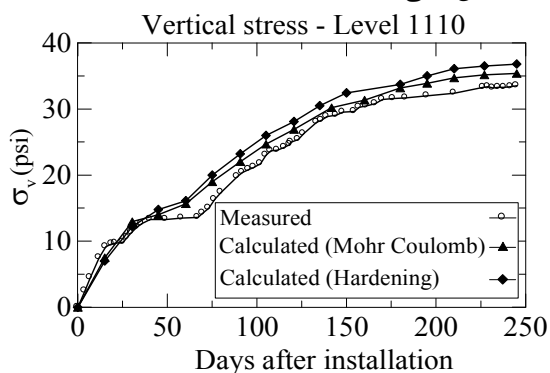
روش مدل‌سازی

نرم‌افزار plaxis قابلیت مدل‌سازی ساخت مرحله‌ای^۱ را داراست. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان رفتار سد را طی دوران ساخت تحلیل کرد. به این منظور براساس ابعاد واقعی اجرا شده و نیز با توجه به سرعت و ارتفاع خاکریزی بدنه سد، مدل پیشرفت ساخت سد (در طول دوران ساخت) تهیه و اطلاعات وارد نرم‌افزار شد. برای تهیه مدل نرم‌افزاری، ساخت این سد به ۱۶ مرحله تقسیم شد و مدل آن به همراه مشخصات رفتاری مصالح (براساس اطلاعات به دست آمده از کارگاه) تهیه شده و تحلیل تنش-کرنش انجام گرفت. همان‌گونه که بیان شد تحلیل براساس مدل رفتاری مور-کلمب و سخت‌شونده و با توجه به رطوبت پایین مصالح هسته، شرایط زهکشی شده برای آن در نظر گرفته شد.

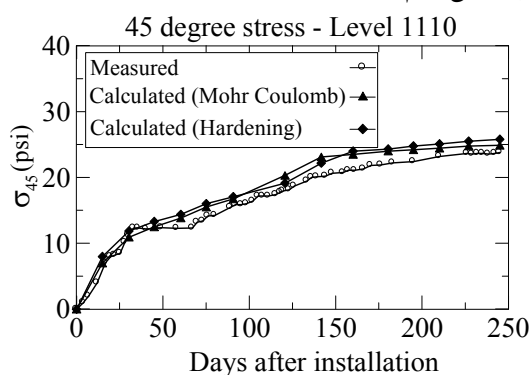
به منظور مقایسه نتایج تحلیل با داده‌های ابزار دقیق در ۱۶ مرحله تحلیل انجام پذیرفت. در مرحله اول، به عنوان مثال، ارتفاع خاکریز از پایین‌ترین نقطه پی تا بستر رودخانه (تراز ۱۰۷۶) و یا در مرحله دوم ارتفاع خاکریز مجدداً از پایین‌ترین نقطه پی تا یک لایه بالای بستر رودخانه (تراز ۱۰۸۴) در نظر گرفته شد و پس از مدل‌سازی نتایج تحلیل با داده‌های ابزار دقیق (دقیقاً در همان مرحله ساخت) مقایسه شد. تحلیل تنش تا انتهای شانزدهمین مرحله ساخت (که انتهای ساخت سد است) انجام شد. شکل ۳ ششمین مرحله تحلیل تنش سد را در دوران ساخت (هنگامی که ارتفاع خاکریز در تراز ۱۰۹۸ قرار داشته) با استفاده از مدل مور-کلمب نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بیشینه تنش قائم در تراز کف پی حدود 450 kN/m^2 است که با توجه به وزن مخصوص مصالح و



الف: تنش افقی



ب: تنش قائم



ج: تنش مایل

شکل ۴- نتایج تحلیل تنش در تراز ۱۱۱۰ متر

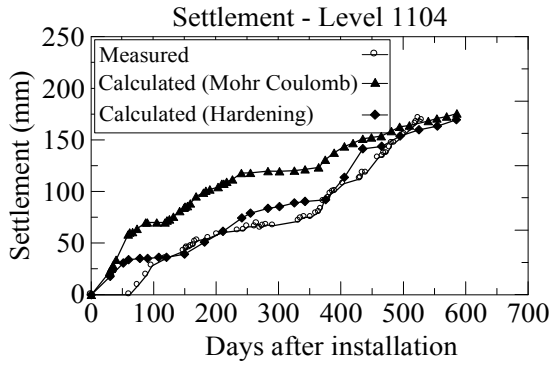
تحلیل تنش

تنش‌سنج‌های نصب شده در مقطع B-B در دو تراز ۱۱۱۰ و ۱۱۲۰ بودند. در این دو تراز سه عدد تنش‌سنج به ترتیب در جهت افقی، قائم (عمود بر محور سد) و با زاویه ۴۵ درجه (نسبت به تنش‌سنج قائم) در بخش مرکزی هسته رسی نصب شده‌اند. بنابراین تنش‌های اندازه‌گیری شده شامل موارد زیر است: تنش کل قائم، تنش کل افقی و تنش کل در راستای ۴۵ درجه نسبت به افق در راستای محور سد. داده‌های هر یک از ابزار دقیق که از ابتدای نصب برداشت شده است پس از فرآوری و انجام تبدیل‌های لازم با نتایج حاصل از تحلیل سد که براساس دو مدل رفتاری موهر-کولومب و سخت‌شونده در دوران ساخت انجام شده مقایسه شدند. همان‌گونه که ذکر شد تحلیل سد در دوران ساخت سد در ۱۶ مرحله انجام شد.

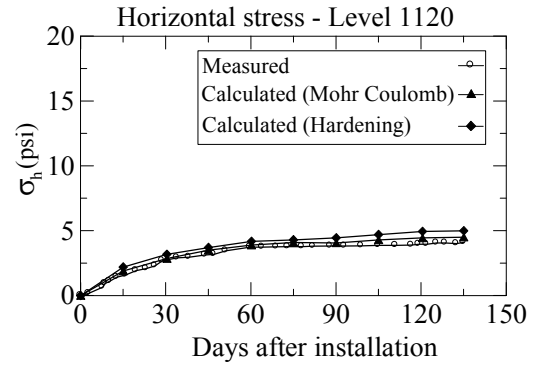
نتایج تحلیل تنش در ترازهای ۱۱۱۰ و ۱۱۲۰ برای تنش‌های افقی، قائم و مایل در مقطع B-B به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در هر یک از شکل‌ها مقادیر تنش اندازه‌گیری شده توسط فشارسنج‌های نصب شده در هسته رسی سد به همراه مقادیر تنش محاسبه شده براساس مدل مورکلمب و مدل سخت‌شونده نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود روند افزایش تنش در مدل‌های تحلیلی و داده‌های ابزار دقیق مطابقت خوبی دارند.

تحلیل نشست

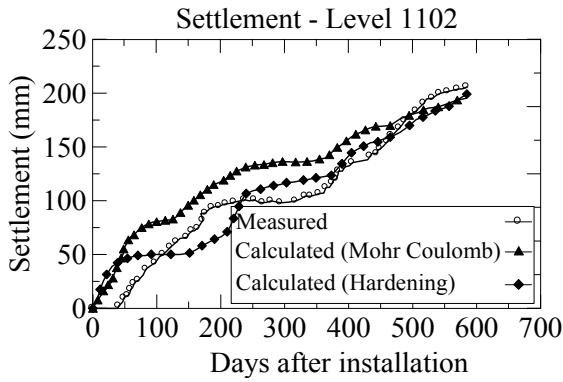
اندازه‌گیری نشست معمولاً در سدهای خاکی در بخش مرکزی هسته رسی، با قرار دادن صفحات مغناطیسی در ترازهای گوناگون (معمولاً به فاصله ۲ تا ۳ متر از یکدیگر) و قرار دادن صفحه مغناطیسی مبنا در پایین‌ترین تراز ممکن هسته رسی (به‌عنوان نقطه مبنا و ثابت و سنجش نشست سایر نقاط نسبت به آن) اندازه‌گیری می‌شود. نشست سد را به دو بخش نشست در طول ساخت و پس از ساخت (در دوران بهره‌برداری) می‌توان تقسیم کرد. (پاگانو و همکاران، ۱۹۹۸).



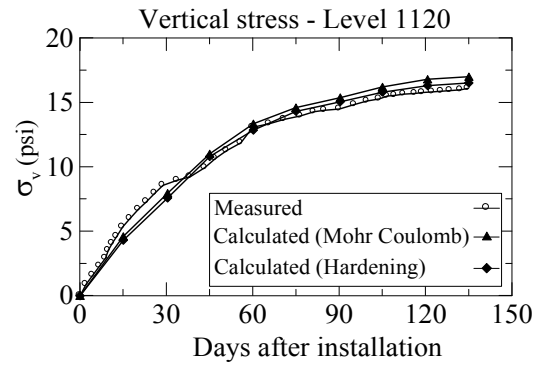
الف: تراز ۱۱۰۴ متر



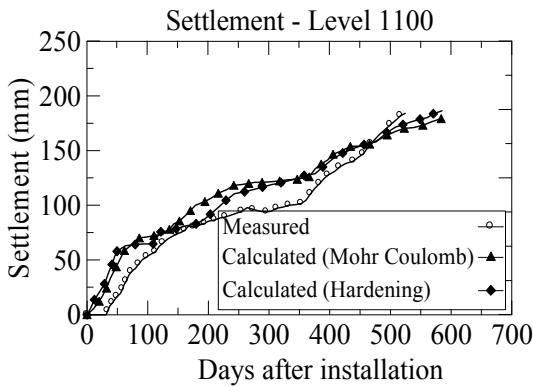
الف: تنش افقی



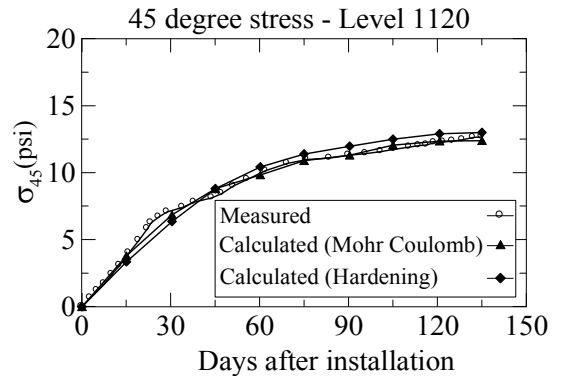
ب: تراز ۱۱۰۲ متر



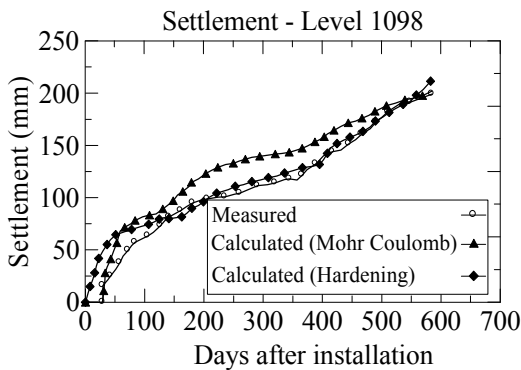
ب: تنش قائم



ج: تراز ۱۱۰۰ متر



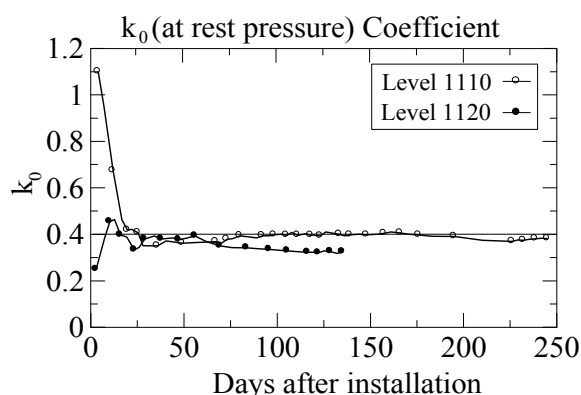
ج: تنش مایل



د: تراز ۱۰۹۸ متر

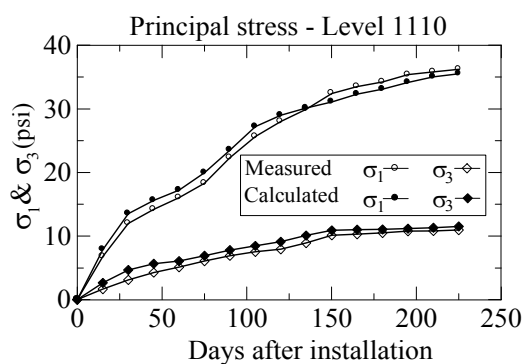
شکل ۵- نتایج تحلیل تنش در تراز ۱۱۲۰ متر

شکل ۶- نتایج نشست در ترازهای گوناگون

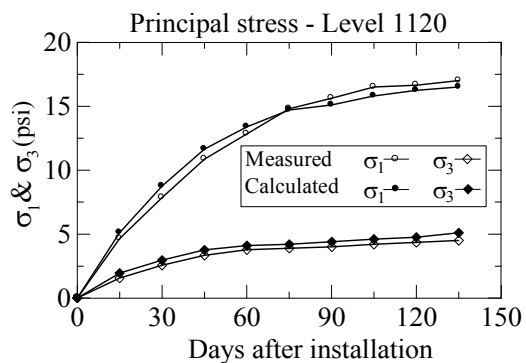


شکل ۷- ضریب فشار جانبی در تراز ۱۱۲۰ و ۱۱۱۰ متر

تنش‌سنج‌هایی که در سد نهرین نصب شده‌اند به صورت سه-گانه در یک نقطه (دو عدد عمود بر یکدیگر و سومی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به دو عدد دیگر) هستند. برای مقایسه نتایج تحلیل با مقادیر اندازه‌گیری شده تنش‌های اصلی محاسبه و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. به علت مشابه بودن نتایج براساس دو مدل مورد بحث، فقط نتایج تحلیل بر اساس مدل مور-کلمب ارائه شده است.



الف: تراز ۱۱۱۰ متر



ب: تراز ۱۱۲۰ متر

شکل ۸- تنش‌های اصلی در تراز ۱۱۱۰ و ۱۱۲۰

حداکثر نشست در طول ساخت معمولاً حدود میانی ارتفاع سد اتفاق می‌افتد. به این لحاظ نشست‌های تراز حدود میانی یعنی مقدار نشست در ترازهای ۱۰۹۸، ۱۱۰۰، ۱۱۰۲ و ۱۱۰۴ محاسبه شده که جزئیات آن در شکل ۶ نشان داده شده است. به گونه مشابه با تحلیل تنش، نمودارها مقادیر نشست اندازه‌گیری شده را در هسته رسی سد به همراه مقادیر نشست محاسبه شده براساس مدل مورکلمب و مدل سخت‌شونده نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه که از شکل می‌شود میزان نشست با گذشت زمان داشته که علت آن افزایش ارتفاع خاکریزی است اما نرخ افزایش آن یکسان نیست که علت آن متوقف شدن عملیات خاکریزی (بنا به دلایل اجرایی) و ثابت ماندن میزان سربار است.

ارزیابی ضریب فشار جانبی خاک

نسبت تنش افقی به تنش قائم که به نام ضریب فشار جانبی خاک در حال سکون شناخته شناخته شده و از معادله ۱۰ قابل تعیین است، همیشه مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک بوده است.

$$k_0 = \sigma_h / \sigma_v \quad (10)$$

یکی از روش‌های ارزیابی روابط ارائه شده توسط محققین برای تعیین آن، استفاده از داده‌های ابزار دقیق است که مقدار واقعی این ضریب را برای خاکریزهایی که به تدریج ایجاد و متراکم می‌شوند به دست می‌دهد. این ضریب با داشتن مقادیر تنش‌های قائم و افقی در ترازهایی که تنش‌سنج افقی و قائم نصب شده است قابل محاسبه است. شکل ۷ مقدار k_0 را برای دو تراز ۱۱۲۰ و ۱۱۱۰ نشان می‌دهد. شکل فوق نشان می‌دهد که در ابتدای خاکریزی که تنش‌های محصورکننده بسیار اندک است مقدار این ضریب متغیر است اما با افزایش تنش قائم مقدار k_0 به سمت مقداری ثابت در حدود $k_0=0.4$ میل می‌کند.

تعیین تنش‌های اصلی

اصولاً تنش‌سنج‌هایی که در سدهای خاکی نصب می‌شوند فقط تنش‌های عمودی را اندازه‌گیری کرده و قادر به اندازه‌گیری تنش‌های برشی نیستند. در حالت کلی براساس 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 (اگورال و فنستر، ۱۹۸۴).

نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شده است که نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق با نتایج تحلیلی براساس مدل رفتاری مور-کلمب و سخت‌شونده مقایسه شود. 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 به‌طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده‌های ابزار و نتایج دور از انتظار نیست.

نشست سد که در تراز حدود ارتفاع میانی آن (تراز متوسط ۱۱۰۰، شکل ۶)، اندازه‌گیری شده است حدود ۲۰۰ میلی‌متر است که با توجه به رطوبت پایین‌تر مصالح از حد اشباع مقدار آن منطقی به‌نظر می‌رسد. هر دو مدل همخوانی خوبی را با داده‌های ابزار دقیق نشان می‌دهند اما مدل سخت‌شونده همخوانی بهتری را ارائه کرده است.

اصولاً مدل سخت‌شونده به‌دلیل در نظر گرفتن پارامترهای بیشتری از خاک رفتار این نوع مصالح را بهتر مدل می‌نماید. سطح تسلیم در این مدل به‌دلیل حضور کرنشهای پلاستیک (برخلاف مدل رفتاری مور-کلمب با سطح تسلیم ثابت) بزرگتر است. از طرفی در مدل سخت‌شونده اتساع خاک در هنگام برش دیده شده است. این موضوع بیشتر برای لایه‌های تحتانی که به مرور با پیشرفت روند خاکریزی تحکیم پیدا می‌کنند اهمیت پیدا می‌کند. به‌عبارتی مدل الاستو-پلاستیک رفتار خاک را در حوزه تنش‌های عادی ارتجاعی مدل می‌کند، حال آنکه در مدل سخت‌شونده رفتار خاک از ابتدا الاستو-پلاستیک در نظر گرفته می‌شود. همچنین عدم انطباق کامل نمودارها مربوط به پارامترهای مقاومتی خاک است که اصولاً با گذشت زمان و افزایش سربار مقدار آنها تغییر می‌یابد که در مدل دیده نمی‌شود.

تحلیل تنش (شکل ۴ و ۵) در دو تراز متفاوت بیانگر همخوانی خوب بین داده‌ها و مدل‌سازی است. علت اصلی اختلاف میان نتایج ابزار دقیق و مدل تحلیلی مربوط به مقادیر پارامترهای مقاومتی مصالح هسته است که برای تحلیل به‌صورت همسانگرد مدل شده است ولی در عمل ناهمسانگرد بوده و برخی مشخصات مکانیکی مصالح در راستای قائم و افقی متفاوت است.

منابع

- ۱- بی‌نام. ۱۳۸۱. گزارش فنی سد ذخیره‌ای نهرین طبرستان. مهندسین مشاور آب پوی.
- 2- ASCE Task Committee. 2000. Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. ASCE.
- 3- US Army Corps of Engineers. 1995. Instrumentation of embankment dams and levees engineering and design. Washington DC.
- 4- Myers B. and Stalier J. 2008. Why include instrumentation in dam monitoring programs? United States Society on Dams. Committee on Monitoring of Dams and their Foundations.
- 5- Norwegian Water Resources and Energy Directorate. 2004. Guidelines for monitoring and instrumentation of dams, Issued in accordance with the regulations governing the safety and supervision of watercourse structure.
- 6- Dunicliff J. 1993. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons Inc. USA.
- 7- Mir-Mohammad-Hosseiny S. M. and Ahmadi-Fard R. 2003. Pore pressure development in the core of earth dams during simultaneous construction and impounding. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 8: Bundle A.
- 8- Brinkgreve R.B.J. and Vermeer P.A. 2001. Plaxis 2D, general information- reference & scientific manual, Version 1. A. A. Balkema Publisher. Netherlands.
- 9- Hill R. 1950. The mathematical theory of plasticity. Oxford University Press. London, UK.
- 10- Duncan J.M. and Chang C.Y. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain. ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Div. 96:1629-1653.
- 11- Ugural A.C. and Fenster S.K. 1984. Advanced strength and applied elasticity. Edvard Arnold Ltd. London.
- 12- Fell R. MacGregor P. and Stapledon D. 1992. Geotechnical engineering of embankment dams. Balkema A. A. Publisher. Netherlands.
- 13- Pagano L. Desidri A. and Vinale F. 1998. Interpreting settlement profiles of earth dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Division. ASCE 124(10): 923-932.