

تحلیل‌های عددی رفتارنگاری سدهای خاکی در طول ساخت به روش اجزای محدود با نرم‌افزار

SIGMA/W (مطالعه موردی سد کبودوال استان گلستان)

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

(۱) کارشناس ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

(۳) دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران.

نویسنده مسئول: Hakimi1904@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۸/۰۶

چکیده

در این پژوهش در انجام تحلیل عددی از بسته نرم‌افزاری SIGMA/W که بر اساس روش المان محدود می‌باشد، استفاده شده است. به این منظور دوران ساخت سد کبودوال استان گلستان با استفاده از مدل‌های رفتاری الاستیک - پلاستیک و الاستیک غیر همگن، الاستیک غیر خطی، الاستیک خطی تحلیل گشته و فشار آب حفره‌ای، تنش‌های ایجاد شده در بدنه و نشست آن با داده‌های ابزار دقیق مقایسه شده است. انتخاب مصالح به‌عنوان مصالح اصلی مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک برای مصالح بدنه و پی و فیلتر و مدل رفتاری الاستیک خطی برای لایه تزریق، به‌طور مناسبی توانسته است رفتار سد را پیش‌بینی نماید. همچنین کارایی روش و نرم‌افزار به کار رفته جهت مدل نمودن رفتار سدهای خاکی در حین ساخت مناسب می‌باشد. تغییرشکل‌های قائم بدنه سد از سمت جناحین به سمت مقاطع میانی افزایش یافته و بیش‌ترین نشست در مقطع ۲۵-۲۵ و حدود ۲۲۰۰ میلی‌متر ثبت شده است. با بررسی در مقاطع مختلف، بیش‌ترین نشست در حد فاصل تراز ۱۸۰ تا ۱۸۵ متری روی داده است. یعنی تراز خاکریزی در این اعداد بحرانی بوده است. عمده نگرانی‌ها در بخش میانی سد محدود می‌گردد. در مجموع تغییرشکل‌های جناح راست بدنه سد در مقایسه با جناح چپ در راستای عرضی کم‌تر و در راستای طولی بیش‌تر بوده است.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی کبودوال، رفتارنگاری، SIGMA/W و مدل رفتاری خاک.

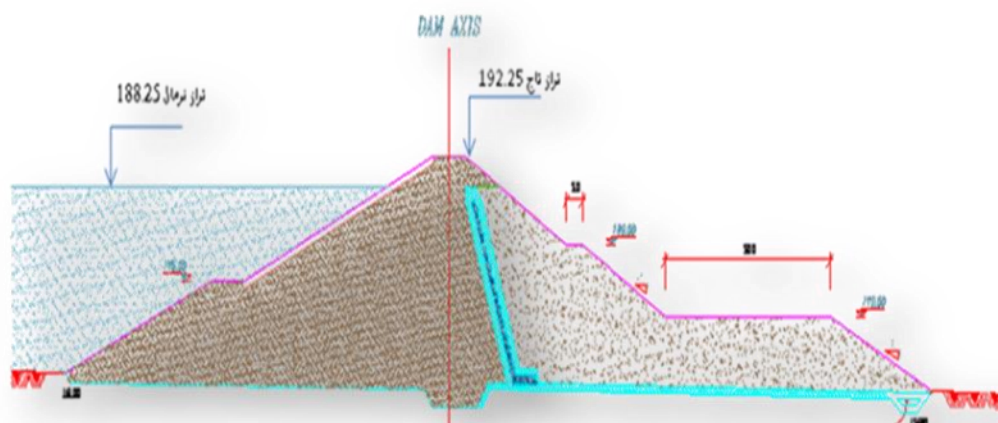
مقدمه

به‌طور کلی پذیرفته شده که ایمنی سد نه تنها به طراحی و ساخت آن بر می‌گردد، بلکه به رفتار نگاری کامل از عملکرد آن در دوران ساخت و بهره‌برداری وابسته است. در دوران ساخت یک سد پارامترهای رفتاری خاک نظیر تنش کل، فشار منفذی و کرنش بر اثر عواملی نظیر حرکات پی، تحکیم هسته و تغییرات رطوبت مصالح، دایم در حال تغییر است به گونه‌ای 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 (Dunnicliff, 1993). نصب ابزار دقیق و رفتارنگاری سدها در دوران ساخت و دوره بهره‌برداری اولیه کمک شایان به ارزیابی کمی و کیفی پارامترهای رفتاری خاک می‌کند (ASCE, 2000). اهمیت ویژه ابزار دقیق در سدها به نقش آن‌ها در کنترل پایداری کوتاه و دراز مدت سدها برمی‌گردد، به گونه‌ای که در رفتارنگاری سدها مورد توجه مهندسان واقع شده است (US Army Corps of Engineers, 1995). در تحقیق حاضر سعی شده است داده‌های ابزار دقیق در دوران ساخت که شامل مقادیر واقعی فشار آب حفره‌ای، تنش و نشست سد هستند (مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق نصب شده در سد) با مقادیر به‌دست آمده از تحلیل سد (مقادیر محاسبه شده) بر اساس مدل‌های رفتاری الاستیک-پلاستیک و الاستیک غیرهمگن، الاستیک غیر خطی، الاستیک خطی مقایسه و بررسی شوند. روش اجزای محدود در حال حاضر یکی از قوی‌ترین روش‌های عددی در مسائل مهندسی خصوصاً محیط‌های پیوسته است که در شرایط کنونی مورد استفاده دانشمندان قرار می‌گیرد. از نظر هندسی اصولاً سدهای خاکی سازه‌هایی نسبتاً ساده‌ای می‌باشند، اما مصالح تشکیل دهنده‌ی آن‌ها دارای تنوع زیادی می‌باشد. رفتار خاک‌ها دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد که این امر باعث می‌شود. روش اجزای محدود به کار رفته، پیچیده‌تر از روش‌های به‌کار برده شده برای مصالح خطی باشد (بلوری‌بزار و مبینی‌زاد، ۱۳۸۹). در انجام این تحقیق از نرم‌افزار Geo Studio استفاده شده است. در این مقاله هدف انجام آنالیز تغییر شکل و تراوش است. لذا از دو برنامه SIGMA/W زیرمجموعه‌های نرم‌افزار GEO SLOPE هستند، استفاده شده است. برنامه SIGMA/W یک برنامه اجزای محدود است که می‌توان از آن برای تحلیل تغییر شکل و تنش در سازه‌های خاکی استفاده کرد. در این برنامه می‌توان یک تحلیل تغییر شکل الاستیک خطی ساده تا یک تحلیل تنش موثر الاستوپلاستیک غیرخطی پیشرفته را مورد بررسی قرار داد. هنگامی که برنامه SIGMA/W به برنامه متصل می‌شود، می‌توان تولید و اتلاف فشار آب حفره‌ای را در یک سازه خاکی و در اثر بارهای وارده مدل نمود (رحمانی، ۱۳۹۱).

مواد و روش‌ها

معرفی سد

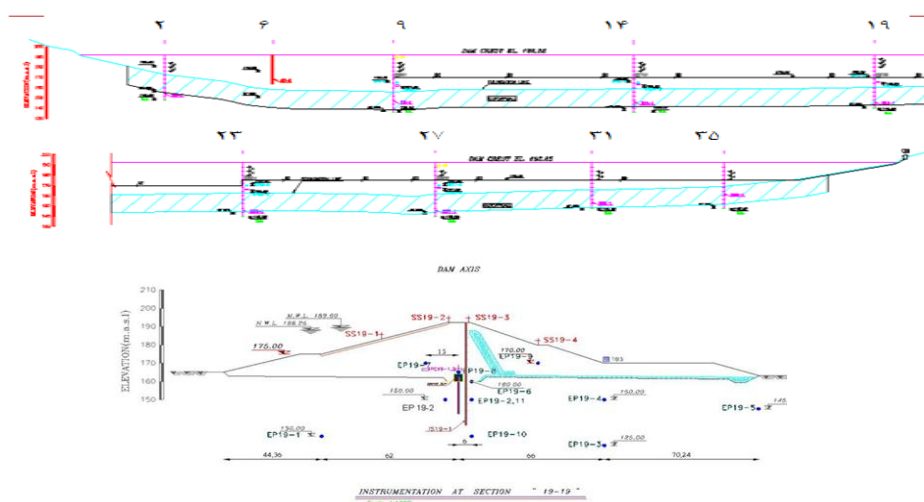
سد کبودال همگن و دارای فیلتر و زهکش مایل است. مخزن آن خارج از حوضه‌ی آبریز اصلی است، طول تاج ۱۳۷۲ متر و حداکثر ارتفاع از پی ۳۳/۲۵ متر است. ارتفاع از بستر ۳۰/۵ متر و همچنین تراز بستر سد ۱۶۲ متر از سطح دریا و حداقل تراز آب در مخزن ۱۷۱ متر از سطح دریا و نیز حداکثر تراز نرمال آب ۱۸۸/۲۵ متر از سطح دریا است. 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. در شکل ۱ زیر مقطع تیپ عرضی سد کبودال نشان داده شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۹۱).



شکل ۱: مقطع تیپ عرضی بدنه سد کبودال

سیستم و مقاطع ابزار دقیق سد کبودال

شکل ۲ جانمایی سیستم پیزومتریک (پیزومترهای الکتریکی) و فشارسنجی خاک را در مقطع ۱۹ نشان می‌دهد. در این مقطع (مقطع ۱۹) از بدنه سد در کل ۱۱ پیزومتر الکتریکی به ترتیب سه پیزومتر در داخل بدنه سد، یک پیزومتر در حد فاصل پی و بدنه سد و هفت پیزومتر در داخل پی سد مدنظر قرار گرفته است. در مورد تغییر شکل‌های افقی و قائم (نشست) بدنه و پی، از داده‌های نشست‌سنجی و انحراف‌سنجی پروژه مورد استفاده شده است. برای دستیابی به تغییر شکل‌های افقی و قائم (نشست) بدنه و پی، انحراف‌سنج‌های قائم به همراه صفحات مغناطیسی نشست‌سنجی در مقاطع مختلف بدنه سد به کار رفته است. در (شکل ۲) جانمایی ابزار دقیق سد کبودال در مقطع ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۲: مقاطع مختلف سد کبود وال و جانمایی ابزار دقیق سد کبودوال در مقطع ۱۹

مدل‌سازی

به‌منظور تحلیل تنش- کرنش سد کبودوال از نرم افزار SIGMA/W که بر اساس روش اجزای محدود قادر به تحلیل تنش و تغییر شکل و پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی در حالت کرنش صفحه‌ای و نیز محاسبه تراوش جریان آب در این گونه سازه‌هاست، استفاده شده است.

نحوه مدل‌سازی

در ابتدا با مدل کردن هندسه بستر و لحاظ کردن شرایط مرزی مدل و شرایط تکیه‌گاه غلتکی در کناره‌های عمودی در نرم‌افزار ایجاد می‌شود، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار خاک، پارامترهای مقاومتی مصالح به هندسه مدل تخصیص داده می‌شود. پس از ساخت مدل، شبکه اجزای محدود مش‌بندی مقطع ایجاد می‌شود. در ساخت مش از مش‌بندی مثلثی و هم‌مسططیلی برای مدل کردن توده خاک استفاده شده است. معمولاً جاهایی که از نظر ابعادی کوچکترند از مش‌بندی مثلثی استفاده می‌شود ولی در کل در نتایج نوع مش‌بندی تفاوتی چشم‌گیری را نشان نمی‌دهد. همچنین برای تعیین اثر اندازه و تعداد المان‌ها بر نتایج تحلیل، آنالیزهای حساسیت برای تعیین اثر تعداد و اندازه مش بر نتایج انجام شده است. همچنین برای حذف شرایط مرزی از هر طرف بستر حداقل دو برابر عرض ماکزیمم بدنه از توده خاک مدل شده و با مرز مناسب جایگزین شده است. به وسیله این نرم‌افزار ساخت لایه‌لایه و مرحله‌ای سد مدل شده و پدیده تحکیم شبیه‌سازی شده است. در این تحلیل اطلاعات جمع آوری شده توسط ابزار دقیق در چهار سال متوالی از سال ۸۷ تا سال ۹۱ که زمان مراحل پایانی سد می‌باشد با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه در یکی از مقاطع میانی سد کبودوال (مقطع ۱۹) که دارای ابزار دقیق می‌باشد، بین داده‌های ابزار دقیق و مدل نرم‌افزاری انجام شده است. برای

تطابق داده‌ها نقطه‌ای واقع در محور سد کمی بالاتر از پی سد، در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از ابزار دقیق و نرم‌افزار باهم در یک تحلیل برگشتی تقریباً یکی شده است. این تحلیل همراه با سعی و خطا بوده که به مهارت کاربر برای حصول نتیجه در زمان کم‌تر، بستگی دارد.

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 نمودن تعداد لایه‌ها مورد نیاز در تحلیل اهمیت دارد. اثر تعداد لایه‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های کامپیوتری بر روی پارامترهایی تحلیلی کنترل‌کننده در سدهای خاکی با هسته رسی قائم را به کمک نرم‌افزار Gio Stadio بررسی نموده‌اند. آن‌ها براساس آنالیز، GEO SLOPE نرم‌افزار صورت گرفته روی سد سنگ سیاه پیشنهاد حداقل تعداد لایه‌های لازم برای رسیدن به نتایج معقول در مدل‌های کامپیوتری H/10 ارائه نموده‌اند، که ارتفاع سد از H پی است (زمردیان و چوچی، ۱۳۹۱) در این مقاله این قانون رعایت شده است.

انتخاب مدل رفتاری خاک

اگرچه برنامه SIGMA/W در کل دارای شش مدل رفتاری مختلف می‌باشد، لیکن در مقاله حاضر فقط از چهار مدل رفتاری (الاستیک-پلاستیک والاستیک غیر همگن، الاستیک غیر خطی، الاستیک خطی) آن استفاده شده است.

مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک

اصل اساسی الاستوپلاستیسیته آن است که کرنش‌ها و نرخ کرنش‌ها به یک بخش الاستیک و یک بخش پلاستیک تجزیه می‌شود.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

رابطه ۱:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

قانون هوک برای مرتبط کردن نرخ‌های تنش به نرخ‌های کرنش، به کار می‌رود. جاگذاری معادله (۱-۲) در قانون هوک به رابطه زیر منجر می‌شود:

$$\sigma = D^e + D^e (\varepsilon^e - \varepsilon^p)$$

رابطه ۲:

مطابق تئوری کلاسیک پلاستیسیته نرخ‌های کرنش پلاستیک با مشتق تابع سیلان نسبت به تنش‌ها متناسب هستند یعنی نرخ‌های کرنش پلاستیک می‌توانند به صورت بردارهای عمود بر سطح سیلان نشان داده شوند. اگرچه برای توابع سیلان نوع موهر-کولمب تئوری پلاستیسیته مرتبط به پیش‌بینی زیاد اتساع منجر می‌شود. بنابراین، علاوه بر تابع سیلان،

یک تابع پلاستیک g معرفی می‌شود. مورد $g \neq f$ به عنوان پلاستیسیته غیر وابسته نوشته می‌شود. عموماً نرخ‌های کرنش پلاستیک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\underline{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \quad \text{رابطه ۳:}$$

که λ ضریب پلاستیک است. برای رفتار کاملاً الاستیک $\lambda = 0$ است، در حالی که برای رفتار پلاستیک λ عددی مثبت است. این رابطه‌ها ممکن است برای به دست آوردن روابط بین نرخ‌های تنش موثر و نرخ‌های کرنش برای الاستوپلاستیسیته به کار روند.

$$\underline{\dot{\sigma}} = \left(\underline{D}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}} \underline{D}^e \right) \underline{\dot{\varepsilon}} \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \quad \text{رابطه ۵:}$$

پارامترهای α به عنوان یک کلید استفاده می‌شود. اگر رفتار مواد الاستیک باشد، مانند آنچه به وسیله رابطه ۴ تعریف شده است، مقدار α برابر صفر است در حالی که برای پلاستیسیته مانند آنچه به وسیله رابطه ۴ تعریف شده است، مقدار α برابر واحد است. تئوری فوق درباره پلاستیسیته به سطوح سیلان نرم محدود شده است و طرح سیلان سطح مانند آنچه در مدل موهر کولمب وجود دارد را تحت پوشش قرار نمی‌دهد. برای چنین سطح سیلانی تئوری پلاستیسیته جهت به دست آوردن دو یا چند تابع پتانسیل پلاستیک گسترش داده شده است.

$$\underline{\varepsilon}^p = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}} + \dots \quad \text{رابطه ۶:}$$

به طور مشابه، چندین تابع سیلان نیمه مستقل (f_1, f_2, \dots) برای تعریف کردن بزرگی ضرائب (λ, \dots) استفاده می‌شوند (بلوری‌بزار و مبینی‌زاده، ۱۳۸۹). مشخصات مصالح تشکیل دهنده سد کبودوال که شامل چهار بخش اصلی فیلتر و پوسته و پی و لایه تزریق است، در جدول ۲ تا جدول ۴ آورده شده است. در واقع سد به وسیله سه مدل آنالیز شده است. مقادیر وزن مخصوص مرطوب و وزن مخصوص از آزمایش تراکم به دست آمده است. پارامترهای رفتاری خاک در این جدول از آزمایشات سه محوری روی نمونه‌هایی که با همان وزن مخصوص مرطوب تهیه شده بودند به دست آمده است. آزمایش‌ها روی مصالح بخش‌های گوناگون سد هم در فاز مطالعه‌ای 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 اندازه‌گیری شده مجدداً کنترل می‌شدند (شرکت سهامی آب منطقه ای گلستان، ۱۳۹۱). در جدول‌های زیر بعد از آنالیز برگشتی و

کالیبره شدن سد، داده‌ها و مشخصات مصالح ارایه شده است. کالیبره شدن با روش آنالیز برگشتی صورت گرفته و داده‌های زیر بدست آمده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح در مدل یک

	پی	بدنه	فیلتر و زهکش	لایه تزریق
نوع مدل و مصالح	Anisotropic elastic (unDrained)	Elastic-plastic (Drained)	Anisotropic elastic (Drained)	Linier elastic (Drained)
E-Muduls1 (kPa)	۱۸۰۰	-	۱۰۰۰	-
E-Muduls2 (kPa)	۲۲۰۰	-	۳۰۰۰	-
E' (kPa)	-	۲۳۰۰۰	-	۱۰۰۰۰
G-Muduls2 (kPa)	۱۹۱۶,۳۹	-	۱۰۷۱,۴۲	-
Unit weight (kN/m3)	۱۶	۹	۱۴	۱۷
$\nu(1)$	۰,۳۸	۰,۴	۰,۳۵	۰,۳
$\nu(2)$	۰,۳۹	-	۰,۴	-
ϵ (kPa)	-	-	-	-
ϕ' ($^{\circ}$)	-	۲۹	-	-
C (kPa)	-	-	-	-
ϕ ($^{\circ}$)	-	-	-	-

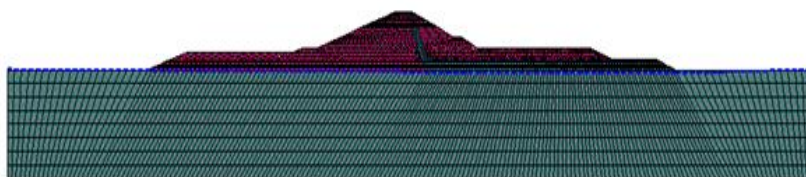
جدول ۲: مشخصات مصالح در مدل دو

	پی	بدنه	فیلتر و زهکش	لایه تزریق
نوع مدل	Elastic-plastic	Elastic-plastic	Elastic-plastic	Linier elastic
و مصالح	(unDrained)	(Drained)	(Drained)	(Drained)
E-Muduls1 (kPa)	۲۲۰۰۰	۱۸۰۰	-	-
E-Muduls2 (kPa)	-	-	-	-
E' (kPa)	-	-	۱۰۰	۱۰۰۰۰
G-Muduls2 (kPa)	-	-	-	-
Unit weight (kN/m ³)	۱۶	۹	۱۴	۱۷
v(1)	۰,۳	۰,۳۸	۰,۳۸	۰,۳
v(2)	-	۰,۲۲	-	-
ε (kPa)	-	-	۱۲	-
ϕ' (°)	-	-	۳۶	-
C (kPa)	۱۸	۲۲	-	-
ϕ (°)	۲۹	۲۵	-	-

جدول ۳: مشخصات مصالح در مدل سه

	بی	بدنه	فیلتر و زهکش	لایه تزریق
نوع مدل و مصالح	Elastic-plastic (unDrained)	Anisotropic Elastic (Drained)	Hyperbolic NonLinier elastic (Drained)	Linier elastic (Drained)
E-Muduls1 (kPa)	۲۲۰۰۰	۱۸۰۰	-	-
E-Muduls2 (kPa)	-	۲۲۰۰	-	-
E' (kPa)	-	-	۱۰۰	۱۰۰۰۰
G-Muduls2 (kPa)		۱۹۱۶,۳۹	-	-
Unit weight (kN/m3)	۱۶	۹	۱۴	۱۴
v(1)	۰,۳	۰,۳۸	۰,۳۸	۰,۳۸
v(2)	-	۰,۲۲	-	-
c (kPa)	-	-	۱۲	۱۲
ϕ' (°)	-	-	۳۶	۳۶
C (kPa)	۱۸	-	-	-
ϕ (°)	۲۹	-	-	-
Rf	-	-	-	۰,۴

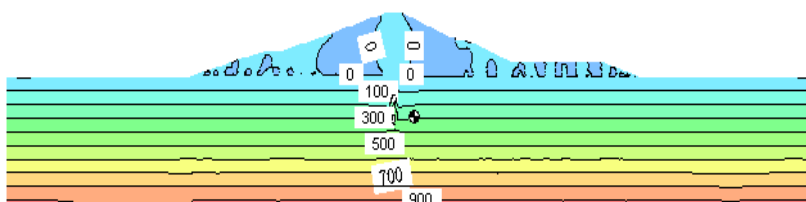
شکل ۳ هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹ در نرم افزار Seep/w را نشان می‌دهد.



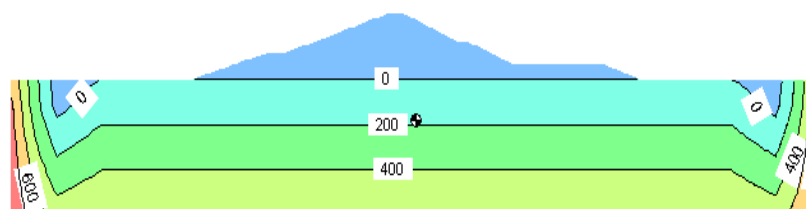
شکل ۳: هندسه مدل و مش بندی مقطع ۱۹ در نرم افزار Seep/w

شرایط اولیه در مدل

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



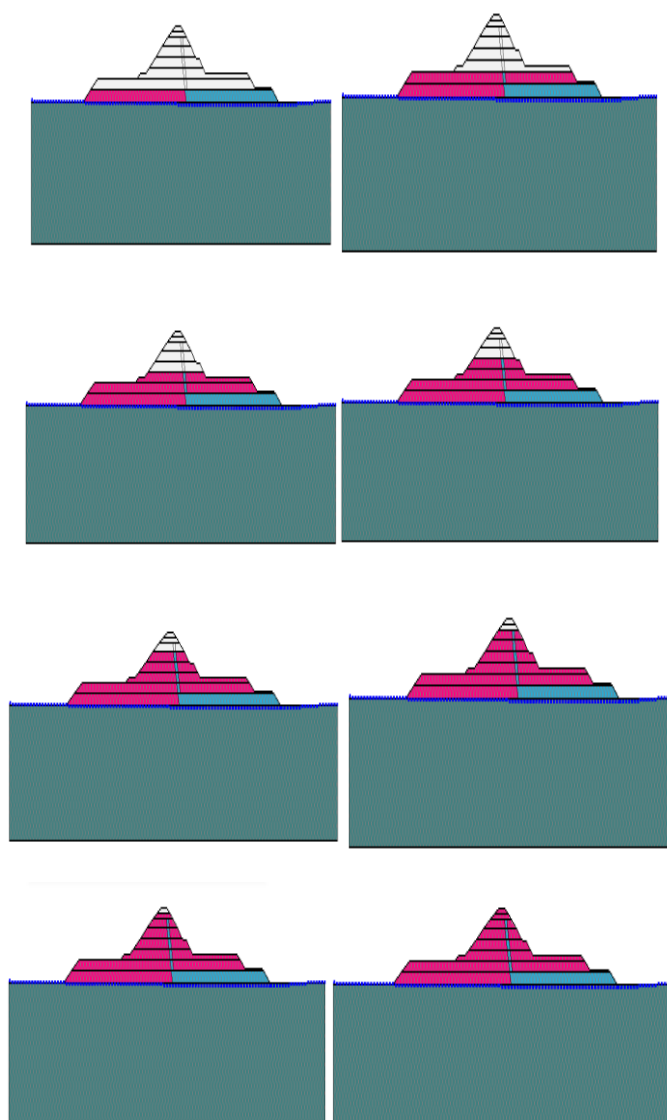
شکل ۴: طیف تغییرات تنش کل اولیه محاسبه شده از تحلیل Insituie



شکل ۵: طیف تغییرات فشار آب حفره‌ای اولیه محاسبه شده از تحلیل Insituie

خاکریزی

شکل ۶ روند خاکریزی در نرم افزار را نشان می‌دهد.

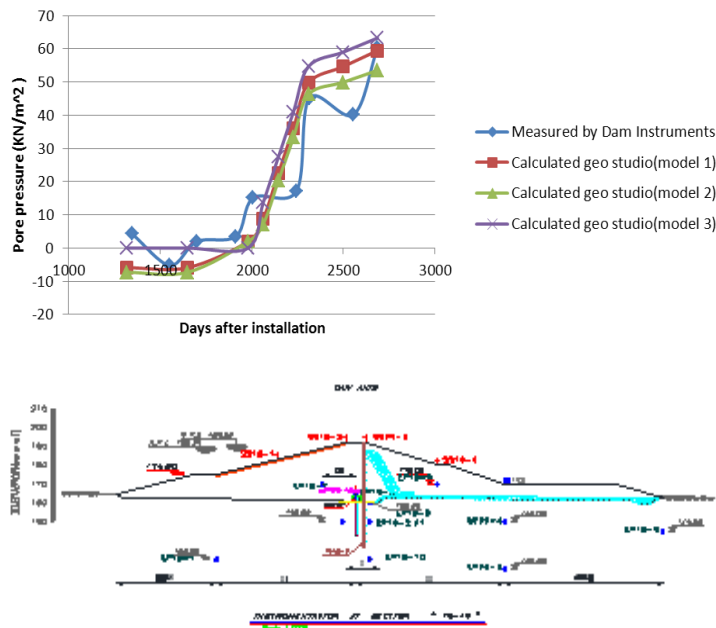


شکل ۶: روند خاکریزی مقطع ۱۹ در نرم افزار Seep/w

نتایج و بحث

بررسی فشار آب حفره‌ای

مهم‌ترین عواملی را که در دوران ساخت باید دایم بررسی کرد فشار آب منفذی، تنش‌های ایجاد شده و نشست است. نظر به اینکه برای اجرای بدنه سد رطوبت خاک حوالی رطوبت بهینه و درصد تراکم حدود ۹۸ درصد است، هنگام متراکم کردن، خاک حالت بیش تحکیم یافته پیدا می‌کند و ممکن است فشار منفذی منفی در بدنه به وجود آید (حصیرچیان و همکاران ۱۳۸۹). در شکل ۷ وضعیت تغییرات فشار آب حفره‌ای مقطع ۱۹-۱۹ سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی نشان داده شده است.

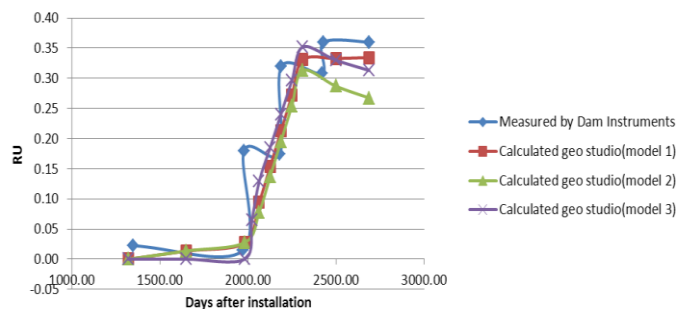


شکل ۷: وضعیت‌های تغییر فشار آب حفره‌ای مقطع ۱۹-۱۹ سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

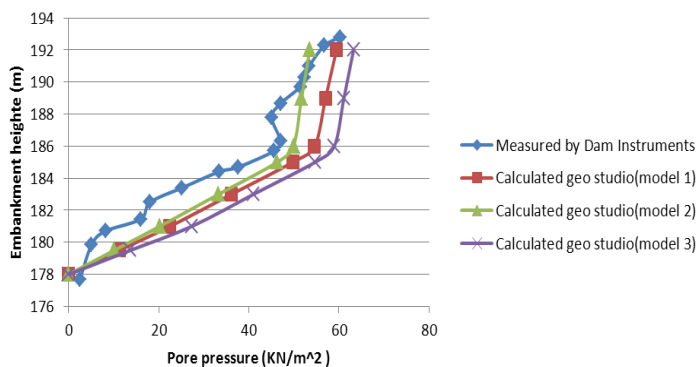
همان‌طور که در شکل‌های بالا دیده می‌شود، با ساخت مرحله‌ای به علت افزایش حجم سربار مقدار فشار آب حفره‌ای در حال افزایش است. پیزومترهای واقع در محور سد عددی بیشتری را نسبت به پیزومترهای بالادست و پایین‌دست سد نشان می‌دهد، که علت آن این است که سد در حین انجام خاکریزی آبدگیری نیز شده است و به علت دور بودن پیزومترهای واقع در پایین دست محور سد از آب نفوذی در سد عددی کم‌تری را نسبت به سایر پیزومترها 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 زهکشی مصالح فیلتر حداقل است. R_u یا ضریب فشار آب حفره‌ای شاخص مهم در ارزیابی فشار آب حفره‌ای است، از محاسبه نسبت فشار آب حفره‌ای ثبت شده به فشار خاک اندازه‌گیری شده، می‌توان ضریب R_u را برای دوران ساخت در دو موقعیت بالادست و محور سد این مقطع تعیین نمود.

$$R_u = \frac{U}{\sigma_v} \quad \text{رابطه ۷:}$$

فشار قائم خاک از حاصل ضرب وزن مخصوص خاک ضرب در ارتفاع خاکریزی به‌دست می‌آید. ثبات نسبی ضریب فشار آب حفره‌ای در طول عملیات خاکریزی و نیز قبل و بعد از آن آبدگیری سد نشان‌دهنده مناسب بودن سرعت عملیات خاکریزی و غیز محتمل بودن بروز پدیده شکست هیدرولیکی است. شکل ۸ وضعیت تغییرات پارامتر R_u مقطع ۱۹-۱۹ در نقطه نشان داده شده در بدنه سد را نشان می‌دهد، همان‌طور که دیده می‌شود مقدار آن کم‌تر از ۰/۴۰ است. در مجموع، این محدوده تغییرات در محدوده مجاز قرار دارد.



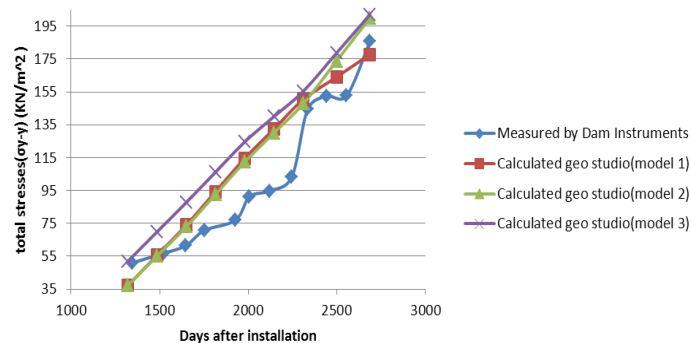
شکل ۸: وضعیت تغییرات پارامتر Ru مقطع ۱۹-۱۹ در محور سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی



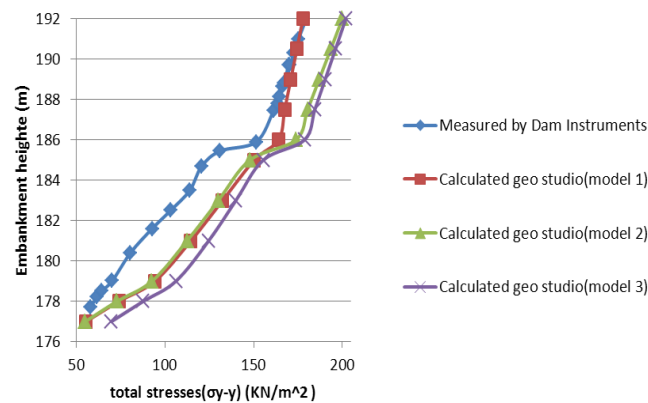
شکل ۹: تغییرات فشار آب حفره‌ای پیژومتر و مدل رفتاری (آنالیز برگشتی) در رقوم مختلف خاکریزی مقطع ۱۹

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 بر اساس روابط مکانیک جامدات هنگامی که مقادیر تنش‌های عمودی در یک نقطه و در سه جهت دلخواه مشخص باشند تنش‌های اصلی را در آن نقطه می‌توان محاسبه کرد (جهانی و همکاران، ۱۳۸۹). شکل ۱۰ و شکل ۱۱ وضعیت تغییرات تنش کل با زمان ساخت و تراز خاکریزی در مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰: وضعیت تغییرات تنش کل با زمان ساخت مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی



شکل ۱۱: وضعیت تغییرات تنش کل با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

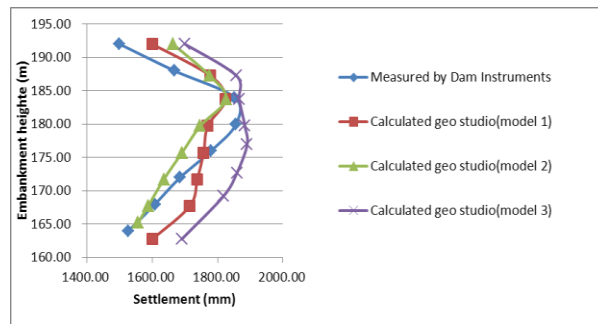
در جدول ۴ مقایسه نتایج آنالیز با ابزار دقیق سد کبودال بلافاصله پس از ساخت نشان داده شده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج آنالیز با ابزار دقیق سد کبودال بلافاصله پس از ساخت

موقعیت	نتایج ابزار دقیق			نتایج آنالیز عددی					
	موقعیت	فشار آب	تنش کل	ضریب فشار	فشار آب	تنش کل	ضریب فشار		
مقطع	تراز	نسبت به	منفذی	آب منفذی	منفذی	آب منفذی	منفذی		
ابزار	نصب	محور سد	kPa	kN/m2	Ru(pp/gH)	kPa	Ru(pp/gH)		
Ep19-7,	۱۹	۱۷۰	-۱۵	۵۱	۱۴۵	۰,۳۵	۴۸	۱۵۰	۰,۳۲
Tpc19-1									
Ep19-8,	۱۹	۱۶۳	۰	۵۳,۷۴	۱۸۹	۰,۲۸	۶۰	۲۰۰	۰,۳
Tpc19-1									
Ep19-6	۱۹	۱۶۰	+۶	۳۸,۴۳	-	-	۴۰	-	-
Ep19-11	۱۹	۱۵۰	+۶	۱۸۴	-	-	۱۷۸	-	-

بررسی نشست

نشست سد به دو بخش نشست درطول ساخت و پس از ساخت (دوران بهره‌برداری) می‌توان تقسیم کرد. مقطع شماره ۱۹ در کیلومتر ۶۰+۰ واقع شده، می‌تواند به‌عنوان اولین مقطع بخش میانی بدنه سد مورد بررسی قرار گیرد. بیش‌ترین نشست تجمعی بدنه و پی این مقطع در دوران ساخت سد ۱۸۵۰ میلی‌متر بوده است. (شکل ۱۲) وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: وضعیت تغییرات نشست با ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹ حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شده است که نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق با نتایج تحلیلی بر اساس مدل‌های رفتاری الاستیک- پلاستیک و الاستیک غیر همگن، الاستیک غیرخطی، الاستیک خطی 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 به طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده‌های ابزار و نتایج دور از انتظار نیست. با توجه به روند صحیح افزایش فشار آب منفذی در رقوم نزدیک پی که با افزایش رقوم خاکریزی رخ داده است، می‌توان این چنین نتیجه را گرفت که مدل‌های بکار رفته توانسته است رفتار فشار آب منفذی را به طور دقیق و مناسبی برآورد نماید. بررسی داده‌های فشارسنجی آب حفراهی و تنش کل خاک نشان داد که در هنگام ساخت بدنه سد با کنترل صحیح عملیات‌های اجرایی (بر پایه روش مشاهده حین اجرا) ضریب R_u در بدنه سد کم‌تر از $0/4$ بوده و مقدار آن در پی ناچیز بوده است. کلیه تنش‌های حاصل در بدنه و پی سد در محدوده مجاز طراحی بوده و احتمال بروز پدیده ترک کششی در بدنه سد منتفی می‌باشد. تغییر شکل‌های قائم بدنه سد از سمت جناحین به سمت مقاطع میانی افزایش یافته و بیش‌ترین نشست در مقطع ۲۵-۲۵ و حدود ۲۲۰۰ میلی‌متر ثبت شده است. با بررسی در مقاطع مختلف، بیش‌ترین نشست درحد فاصل تراز ۱۸۰ تا ۱۸۵ متر 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. در مجموع تغییرشکل‌های جناح راست بدنه سد در مقایسه با جناح چپ در راستای عرضی کمتر و در راستای طولی بیش‌تر بوده است. این مهم شاید به دلیل گذشت زمان کم از اجرای بدنه سد در جناح راست در مقایسه با جناح چپ باشد. با توجه به تطابق بالای نتایج مدل‌سازی و رفتارنگاری، می‌توان نتیجه گرفت که، انتخاب مصالح به عنوان مصالح اصلی مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک برای مصالح بدنه و پی و مدل رفتاری الاستیک خطی برای لایه تزریق، به طور مناسبی توانسته است

رفتار سد را پیش‌بینی کند. با توجه به نتایج آنالیز، می‌توان نتیجه گرفت که آنالیز ساخت مرحله ای سد، در این تحقیق به طور مناسبی توانسته است رفتار سد را در دوران ساخت و ساخت مرحله ای بیان کند. کارایی روش و نرم‌افزار به کار رفته جهت مدل نمودن رفتار سدهای خاکی در حین، انتهای ساخت مناسب است. نتایج آنالیز رفتار سد خاکی از مدل‌سازی صحیح آزمایش‌های سه محوری و انتخاب صحیح پارامترهای آنالیز به صورت تنش مؤثر، می‌باشد. هر سه مدل هم‌خوانی خوبی را با داده‌های ابزار دقیق نشان می‌دهند، اما مدل دوم هم‌خوانی بهتری را ارائه کرده است. اصولاً مدل الاستیک - پلاستیک به دلیل آنکه خاک رفتار پلاستیک تنها یا الاستیک تنها را ندارد، بلکه رفتاری بین آن دو یعنی الاستیک- پلاستیک را دارا می‌باشد، بهتر می‌تواند مدل‌سازی نماید. بنابراین این مدل این نوع مصالح را بهتر مدل می‌نماید. به عبارتی مدل الاستیک- پلاستیک رفتار خاک را در حوزه تنش‌های عادی ارتجاعی مدل می‌کند. 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 بیانگر هم‌خوانی خوب بین داده‌ها و مدل‌سازی است. علت اصلی اختلاف میان نتایج ابزار دقیق و مدل تحلیلی مربوط به مقادیر پارامترهای مقاومتی مصالح است که برای تحلیل به صورت همسانگرد مدل شده است ولی در عمل ناهمسانگرد بوده و برخی مشخصات مکانیکی مصالح در راستای قائم و افقی متفاوت است. در پایان می‌توان گفت که جهت دستیابی به بهترین مدل عددی برای سدهای خاکی بهتر است موارد ذیل مورد توجه قرار گیرند: در نظر گرفتن ناهمگنی مصالح فیلتر و پوسته در پیکره سد در هنگام ایجاد مدل عددی و مدل کردن لایه بندی‌های مصالح از نظر خواص و ویژگی‌های مکانیکی در ترازهای مختلف و توجه به شیب لایه‌های در نظر گرفته شده، بسته به شرایط هر پروژه، مدل نمودن بارگذاری لایه‌لایه ناشی از احداث سد در هنگام ساخت مدل عددی استفاده از پلکان زمانی و استفاده از مدل رفتاری الاستیک- پلاستیک به جای مدل‌های رفتاری خطی و یا ترکیب آن‌ها با مدل رفتاری کم‌کلی.

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 حاصل از داده‌های ابزار دقیق. مجله پژوهش آب ایران، سال چهارم، شماره ۶.
- رحمانی، س. (۱۳۹۱). بررسی انواع مش بندی در نرم افزار Seep/w و تاثیر آن بر محاسبه نشت.
- زمردیان، م. و چوچی، ح. (۱۳۹۱). تحلیل عددی رفتار سدهای خاکی سنگریزه‌ای حین ساخت و اولین آنگیری (مطالعه موردی، سد مسجد سلیمان). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال شانزدهم، شماره

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 پر شدن و افت سریع مخزن (مطالعه ی موردی سد میجران با استفاده از نرم افزار Plaxis). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

حصیرچیان، م. ح. گلمایی و م. ضیاءتبار احمدی. (۱۳۸۹). ارزیابی کارایی مدل‌های رفتاری در تحلیل سدهای خاکریزه‌ای به روش آنالیز برگشتی (کاربرد موردی سد البرز). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

شرکت سهامی آب منطقه ای گلستان (۱۳۹۱). داده های ابزار دقیق سد کبودال.

ASCE Task Committee. (2000). Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. ASCE.

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

Dunncliff J. (1993). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons Inc. USA.