

مطالعه و تحلیل عددی فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته‌ی سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان*

«یادداشت پژوهشی»

علی اخترپور^(۱)

عباس سروش^(۲)

چکیده نقش اصلی هسته در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای کاهش و کنترل نشت آب از بدنه‌ی سد می‌باشد. برای دستیابی به این هدف عموماً از خاک‌های رسی برای هسته استفاده می‌شود که به‌خاطر نفوذپذیری اندک، این نوع خاک می‌تواند این وظیفه را به‌خوبی انجام دهد. ولی نفوذپذیری اندک این نوع خاک همزمان با بالا رفتن درجه‌ی اشباع خاک ناشی از افزایش سربار می‌تواند باعث ایجاد فشار آب حفره‌ای در هسته‌ی سد در زمان ساخت گردد و این فشارهای آب منفذی نمی‌تواند به‌سادگی استهلاک یابد. لذا افزایش سرعت خاکریزی می‌تواند باعث افزایش فشارهای آب منفذی در هسته به میزان قابل توجهی گردد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS7.2 و مدل رفتاری پلاستیک سخت‌شونده مقادیر فشار آب حفره‌ای و تنش‌های کل در هسته‌ی سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان در زمان ساخت و اولین آگیری محاسبه می‌شود و با مقادیر حاصل از ابزار دقیق مقایسه می‌گردد. به‌طور کلی نتایج تحلیل تطبیق خوبی را با مقادیر حاصل از ابزار دقیق نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی سد سنگریزه‌ای، فشار آب حفره‌ای، مدل رفتاری الاستوپلاستیک، ضریب فشار آب حفره‌ای، تنش کل.

Numerical Study of Pore Pressure Development and Dissipation in Core of Masjed-Soleyman Rockfill Dam

A. Akhtarpour

A. Soroush

Abstract The main role of core in earth dams is to reduce and control the seepage flow through the dam. In order to achieve this purpose, the core material is usually selected from pure or mixed clays. Due to very small coefficient of permeability, the clay cores can prevent water leakage easily. However, pore water pressures developed inside the core during construction, can not be dissipated quickly. As a result, increasing the rate of embankment filling during the construction stage, may lead to large development of the pore pressure inside the core. In this study, based on a hardening elasto-plastic constitutive model, the total stresses and pore pressures inside the core of MASJED-E-SOLEYMAN rockfill dam, are calculated using the PLAXIS software during the construction and first reservoir filling stages. The analysis is in term of effective stress coupled with consolidation analysis. In order to verify the result of the numerical analysis, the measurement data from installed instruments in the rockfill dam have been compared with the numerical results. This comparison shows that the numerical analysis results are in a good agreement with the instrument results. Excess amount of pore pressures in the core of this dam is due to very small coefficient of permeability and high rate of embankment filling.

Keywords Rockfill Dam, Pore Water Pressure, Elasto-Plastic Constitutive Model, Pore Pressure ratio, Total Stress, Effective Stress

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۵/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، دکترای عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

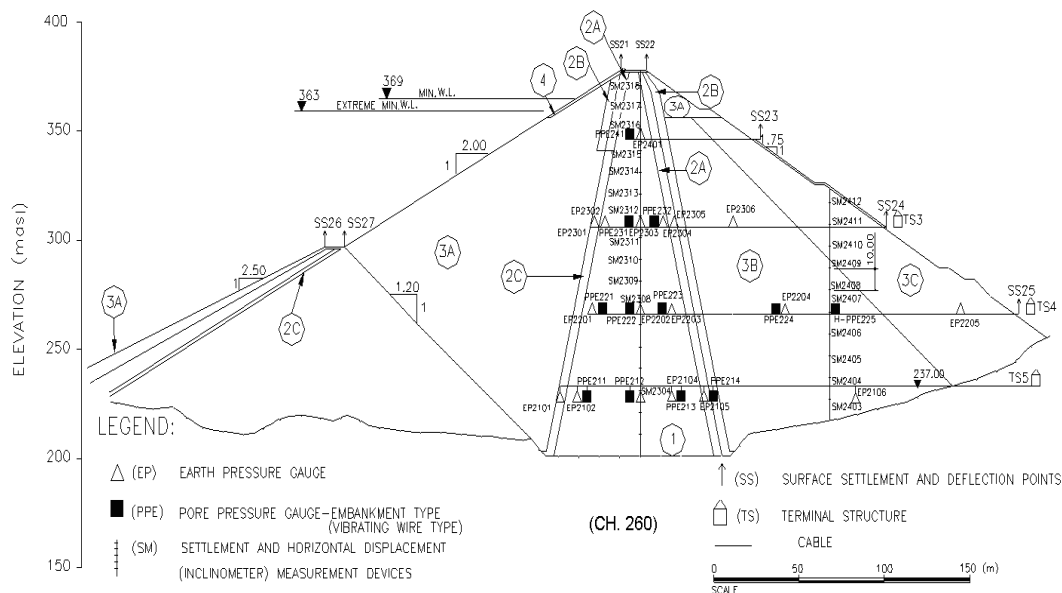
قائم می‌باشد. این سد، که هدف عمده از ساخت آن تولید انرژی است، در بین سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۹ بر روی رودخانه کارون بنا شده است. مرتفع‌ترین مقطع عرضی و مقطع طولی محور سد در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. همچنین بر روی مقطع طولی سد، مقاطع ابزارگذاری شده ۱۶۰، ۲۶۰، ۳۶۰ و ۴۳۵ نشان داده شده است. مشخصات کلی و مشخصات مصالح سد در جدول (۱) به صورت خلاصه ارائه گردیده است. آبگیری سد در اواخر آذر ۱۳۷۹ (۱۹ دسامبر ۲۰۰۰) یک ماه پس از پایان ساخت، آغاز گردید. برای این که فرصت کافی برای کنترل ایمنی سد از طریق پایش و قراءت ابزار دقیق وجود داشته باشد، آبگیری در پنج مرحله صورت گرفت و کل مراحل آبگیری ۷ ماه به طول انجامید. از جمله نکاتی که در زمان ساخت و آبگیری سد مورد توجه واقع شد مقدار قابل توجه فشار آب حفره‌ای در هسته و نرخ نسبتاً کم استهلاک آن با گذشت زمان بود.

مقدمه

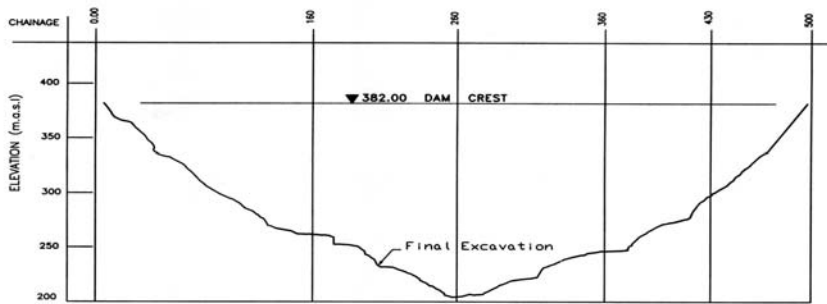
از موارد مهم در رفتارنگاری و کنترل پایداری سدهای خاکی و سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی، توجه به نحوه‌ی توسعه و میرایی فشار آب منفذی در هسته‌ی سد می‌باشد. افزایش بیش از حد فشار آب منفذی در هسته سبب کاهش تنش مؤثر می‌گردد و این پدیده پایداری سد را کاهش خواهد داد و نیز سبب افزایش نشست‌های درازمدت در هسته‌ی سد می‌گردد. با توجه به اهمیت فرضیات تحلیل در نتایج حاصل، خصوصاً پارامترهای مصالح، در ابتدا به تشریح فرضیات تحلیل و روش تعیین پارامترها می‌پردازیم. در ادامه، تحلیل صورت پذیرفته و نتایج به دست آمده از آن با نتایج ابزار دقیق مقایسه می‌شود و رفتار سد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

سد مسجد سلیمان

سد مسجد سلیمان از نوع سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی



شکل ۱ مرتفع‌ترین مقطع عرضی سد مسجد سلیمان و موقعیت ابزار دقیق (مقطع ۲۶۰)



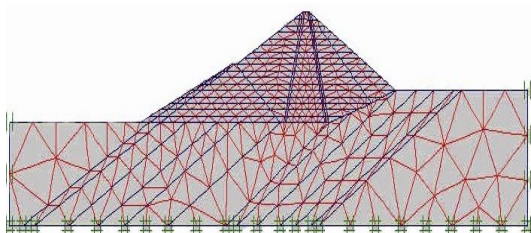
شکل ۲ مقطع طولی محور سد مسجد سلیمان و موقعیت مقاطع عرضی

جدول ۱ مشخصات هندسه و مصالح سد مسجد سلیمان

مصالح پی	مصالح سد	هندسه سد
نوع مصالح لایه‌های متناوب کنگلومرا، رس سنگ، ماسه سنگ و لای سنگ	مصالح هسته خاک رسی متشکل از ۸۰٪ CL و ۲۰٪ GC رطوبت متوسط تراکم هسته $W_{opt} + ۲\%$ پوسته (3A,3C,3B,3D) مصالح سنگریزه‌ای از منابع کنگلومرا، ماسه سنگ و رس سنگ از پی و تونل‌های انحراف- تراکم در حالت خشک	حداکثر ارتفاع از پی ۱۷۸ متر طول تاج ۴۸۰ متر نسبت طول تاج به حداکثر ارتفاع ۲/۷ حجم بدنه $m^3 ۲۲۸ \times ۱۰۶$

آبگیری

- ۱- تغییر خواص مصالح پوسته‌ی بالادست از خشک به اشباع (اعمال کاهش در E_{50}^{ref} و E_{oed}^{ref} و ϕ).
 - ۲- استفاده از وزن مخصوص غوطه‌ور (γ') برای مصالح پوسته‌ی بالادست.
 - ۳- اعمال بار هیدرواستاتیک به صورت فشار مرزی روی شیب بالادست هسته و روی پی بالادست.
 - ۴- تحلیل تحکیم برای مدت ۶۰ روز صورت گرفت (نصف زمان آبگیری).
- شکل (۳) نحوه‌ی شبکه‌بندی بلندترین مقطع سد (مقطع ۲۶۰) را نشان می‌دهد.



شکل ۳ شبکه‌بندی مقطع ۲۶۰ سد مسجد سلیمان (مقطع حداکثر)

مراحل مدل‌سازی و تحلیل

تحلیل عددی بدنه‌ی سد مسجد سلیمان همراه با پی آن به صورت تحلیل تنش مؤثر همراه با تحکیم و محاسبه‌ی فشارهای آب منفذی درون هسته صورت گرفت. در این تحلیل، برای هر یک از مقاطع ابزارگذاری شده‌ی سد (شکل (۲)) مراحل زیر تکرار گردید.

زمان ساخت

- ۱- محاسبه‌ی تنش‌های برجا در پی، قبل از ساخت سد.
 - ۲- مدل‌سازی فرازبند ادغامی.
 - ۳- مدل‌سازی ساخت سد اصلی به صورت لایه‌ای با ضخامت هر لایه معادل ۱۰ متر.
- پس از ساخت هر لایه، تحلیل تحکیم برای لایه‌های زیرین انجام گردید. بدین صورت که تحلیل تنش کرنش و تحکیم به صورت هم‌زمان صورت گرفت.
- در تحلیل تحکیم از تئوری Biot استفاده شد که در آن تنش کل در جریان تحکیم الزاماً ثابت نمی‌باشد.

m : عدد توان برای منظور کردن اثر سطح تنش بر روی سختی.
 v_{ur} : ضریب پواسون برای حالت بار برداری-بارگذاری مجدد (پیش فرض $v_{ur} = 0.2$).
 P^{ref} : تنش مبنا برای سختی (پیش فرض 100 kN/m^2)
 (P^{ref}) :
 R_f : نسبت گسیختگی (پیش فرض $R_f=0.9$).

ارزیابی مدل و تدقیق پارامترها

برای ارزیابی دقیق روش عددی و نیز برای تدقیق پارامترهای ورودی مدل سخت‌شوندگی (به‌ویژه E_{50}^{ref} و m ، که اثر قابل ملاحظه‌ای بر تغییرشکل‌های خاک دارند)، آزمایش‌های سه محوری انجام شده بر روی مصالح تشکیل دهنده‌ی بدنه‌ی سد، به‌وسیله‌ی تحلیل عددی مدل‌سازی گردید. با استفاده از تحلیل برگشتی، پارامترهای تغییر شکلی مصالح به‌گونه‌ای انتخاب شد که نتایج تنش-کرنش حاصل از تحلیل عددی بهترین تطابق را با نتایج متناظر حاصل از آزمایش‌های سه محوری داشته باشد. در این روش نمونه‌ی مورد آزمایش در شرایط تقارن محوری (Axisimetry) مدل عددی می‌شود و ابتدا فشار همه جانبه و سپس فشار محوری به مدل عددی اعمال می‌گردد. در روند اعمال بار محوری مقادیر کرنش قراءت شده و منحنی تنش انحرافی-کرنش محوری ترسیم و با مقادیر حاصل از آزمایش‌ها مقایسه می‌گردد. شکل (۴) نمونه‌ای از این نتایج را برای مصالح پوسته (3A) در آزمایش‌های سه محوری با سه فشار محصورکنندگی ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. با توجه به این‌که تحلیل تنش مؤثر در شرایط زهکشی نشده و با در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای انجام شده است، از پارامترهای مؤثر هسته (C', E', ϕ') در تحلیل استفاده می‌گردد. لذا برای نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته‌ی زهکشی شده CD مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۵) نتایج آزمایش‌های مصالح هسته و تطبیق حاصل از تحلیل عددی برای فشارهای محصورکنندگی ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال قابل مشاهده است.

مدل رفتاری مصالح

با توجه به نتایج آزمایش‌های متعدد انجام شده بر روی مصالح پی و مصالح قسمت‌های مختلف بدنه‌ی سد، برای مدل‌سازی پی از مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب و برای مصالح بدنه‌ی سد از مدل سخت‌شوندگی (Schanz et (Hardening Soil Model) (Schanz et al., 1998) که در نرم‌افزار PLAXIS (Brinkgreve and Vermeer, 1998) وجود دارد، استفاده گردید.

مدل خاک سخت شونده

مدل فوق یک مدل الاستو-پلاستیک با ویژگی‌های زیر می‌باشد:

۱- سطح تسلیم بر اثر کرنش‌های پلاستیک می‌تواند بزرگتر شود (برعکس مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل که سطح تسلیم آن در فضای تنش‌ها ثابت است).
 ۲- دو نوع سخت‌شوندگی متمایز از یکدیگر در مدل تعریف شده است. سخت‌شوندگی برشی و سخت‌شوندگی فشاری.

۳- در حالت ویژه بارگذاری آزمایش سه محوری در شرایط زهکشی شده، رابطه‌ی بین تنش انحرافی و کرنش محوری به صورت هذلولی فرض می‌شود (Duncan and Chang, 1970).

۴- مزایای مدل سخت‌شوندگی Hardening Soil Model نسبت به مدل هذلولی عبارتند از: تئوری پلاستیسیته در آن استفاده شده است؛ اتساع خاک در هنگام برش در آن در نظر گرفته شده است؛ یک کلاهک تسلیم (Yield Cap) در آن معرفی گردیده است.

مشخصه‌های اصلی مدل به قرار زیر است:

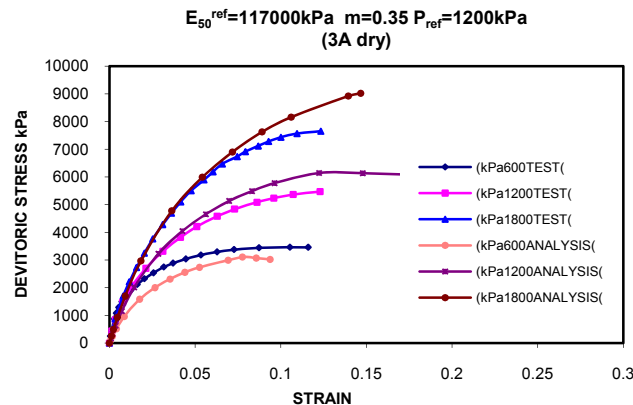
C' : چسبندگی مؤثر.

ψ : زاویه‌ی اتساع.

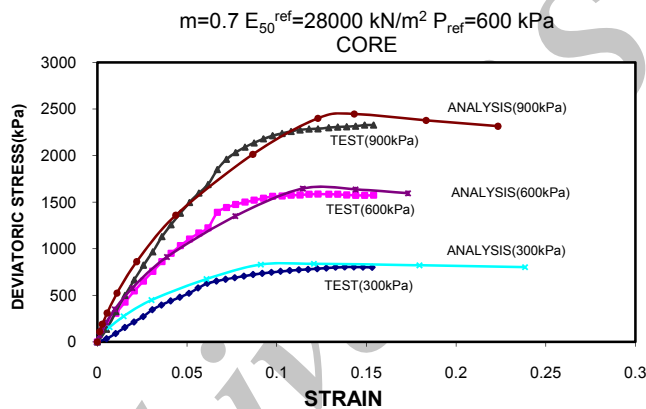
ϕ' : زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر.

E_{50}^{ref} : مدول سکانت در آزمایش سه محوری استاندارد در شرایط زهکشی شده.

E_{oed}^{ref} : مدول مماسی برای بارگذاری اولیه در دستگاه ادومتر.



شکل ۴ تطبیق منحنی‌های حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های سه محوری (مصالح پوسته 3A در حالت خشک)



شکل ۵ تطبیق منحنی‌های حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های سه محوری (مصالح هسته در حالت CD)

نتایج تحلیل

با توجه به این‌که هدف اصلی از انجام این پژوهش مطالعه‌ی توسعه و میرایی فشار آب منفذی در هسته بود، در اینجا صرفاً نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل قائم و نسبت فشار آب حفره‌ای R_{II} ارائه می‌گردد. شکل‌های (۶) و (۷) به‌عنوان نمونه، به‌ترتیب کانتورهای فشار آب حفره‌ای در هسته‌ی سد پس از پایان ساخت و پس از آبگیری برای مقطع ۲۶۰ نشان می‌دهد. هم‌چنین جدول‌های (۴) و (۵) به‌ترتیب فشارهای آب حفره‌ای و تنش‌های کل محاسبه شده را با مقادیر متناظر آن‌ها برای ابزارهای نصب شده در مقاطع مختلف مقایسه می‌کند.

مشاهده می‌شود که مدل سخت شونده‌گی به‌خوبی قادر به مدل‌سازی رفتار نمونه‌های مصالح در آزمایش‌های سه محوری بوده است. روند مدل‌سازی فوق برای سایر مصالح بدنه‌ی سد، تکرار گردید و نتایج مشابه به‌دست آمد. جدول (۲) خواص مصالح و پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح مختلف بدنه‌ی سد را نشان می‌دهد. خواص مصالح و پارامترهای پی در جدول (۳) خلاصه شده است.

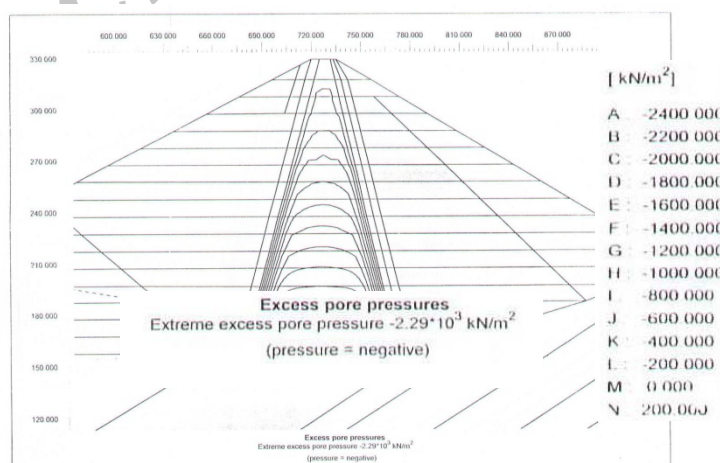
با بررسی و مطالعه‌ی دقیق آزمایش‌های نفوذپذیری صورت گرفته بر روی مصالح هسته، ضریب نفوذپذیری افقی و قائم این مصالح به‌ترتیب $K_{H1}=2/5 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ و $K_{V1}=1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ تخمین زده شد.

جدول ۲ پارامترهای مصالح بدنه‌ی سد مسجد سلیمان

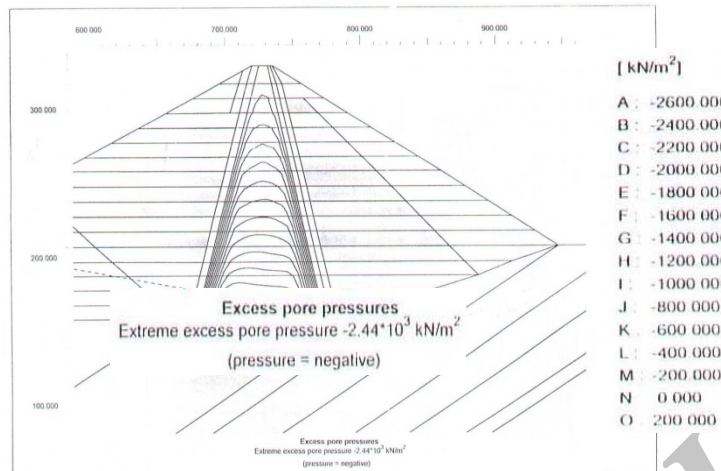
Material	Drainage Condition	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	E50ref (kPa)	EOedref (kPa)	Eurref (kPa)	C' (kPa)	ϕ'	ψ	ν	Pref (kPa)	m	Rf
2A فیلتر پایین دست	Drained	20.5	23.2	----	----	72000	102780	216000	0.0	35	5	0.2	1200	0.5	0.8
2B ناحیه انتقالی در پایین دست	Drained	18.3	19.7	----	----	72000	102780	216000	0.0	41	11	0.2	1200	0.5	0.8
2C ناحیه انتقالی در بالادست	Drained	22.9	23.2	----	----	126000	167000	378000	0.0	41	11	0.2	1200	0.5	0.7
core	Undrained	21.5	22.5	2.5*10-8	1*10-8	28000	33000	84000	25	30.9	0	0.2	600	0.7	0.7
shell(3A,3C)(dry)	Drained	22.6	23.5	----	----	117000	116771	351000	0.0	45	15	0.2	1200	0.35	0.8
shell(3A,3C)(saturated)	Drained	13.5	13.5	----	----	94000	90563	282000	0.0	45	15	0.2	1200	0.35	0.7
shell(3B)	Drained	22.9	23.9	----	----	95000	142234	285000	0.0	41.7	2	0.2	300	0.35	0.9
saturated2A	Drained	----	23.2	----	----	72000	102780	216000	0.0	35	5	0.2	1200	0.5	0.8
saturated2B	Drained	----	19.7	----	----	37000	65237.7	111000	0.0	41	11	0.2	600	0.5	0.7
saturated2C	Drained	----	23.2	----	----	126000	167000	378000	0.0	41	11	0.2	1200	0.5	0.7

جدول ۳ پارامترهای فرض شده برای مصالح پی سد

Material	Type	γ_{dry} (kN/m ²)	γ_{sat} (kN/m ²)	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	ν	E (kPa)	C (kPa)	ϕ	ψ
found1 (Conglomerate)	Drained	23	24	1*10-5	1*10-5	0.3	3872200	700	30	0
found2 (Siltstone)	Drained	24	25	1*10-3	1*10-3	0.3	6776400	2000	45	12



شکل ۶ کانتورهای فشار آب منفذی در انتهای ساخت در مقطع ۲۶۰



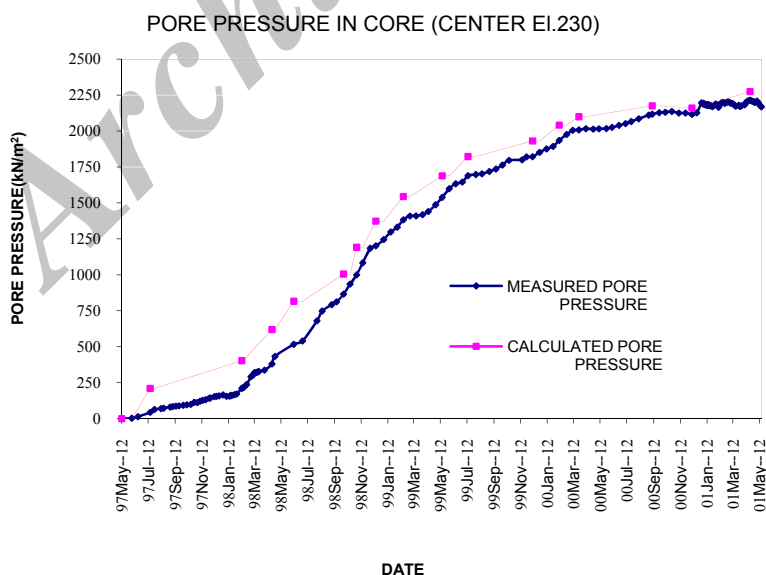
شکل ۷ کانتورهای فشار آب منفذی پس از اولین آبیگری در مقطع ۲۶۰

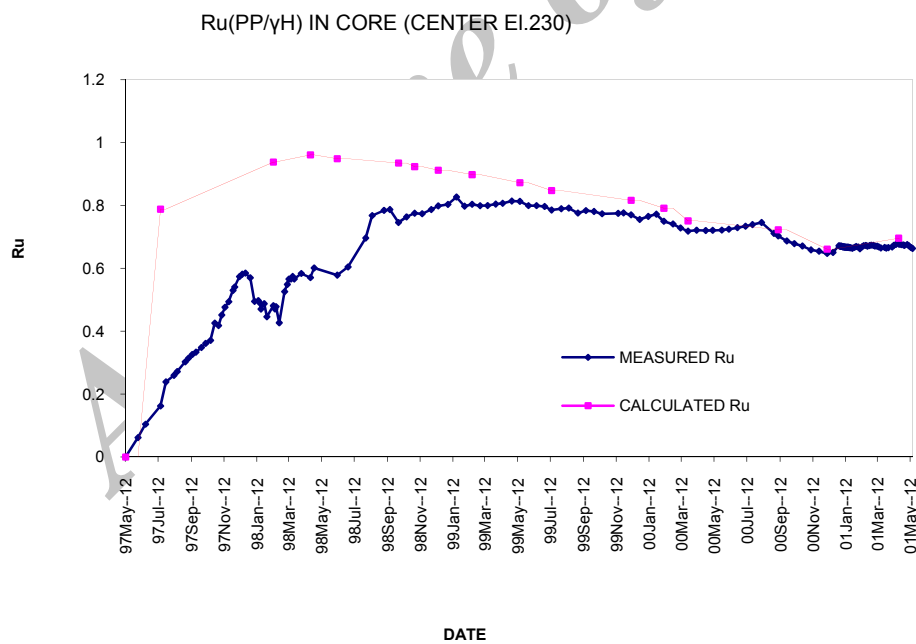
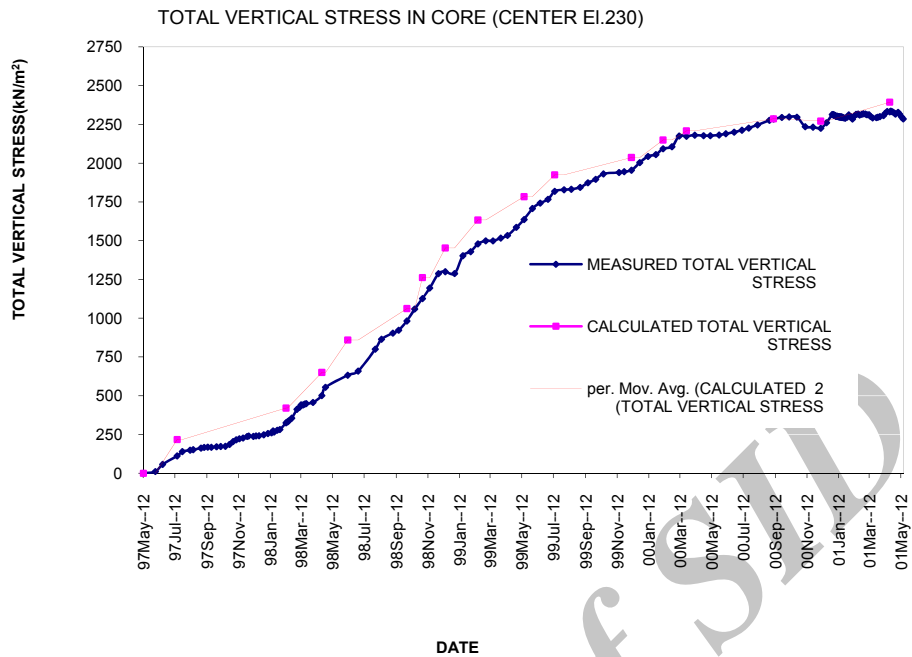
جدول ۴ مقایسه‌ی نتایج تحلیل با ابزار دقیق در زمان بلافاصله پس از ساخت

ابزار	موقعیت			نتایج ابزار دقیق			نتایج تحلیل عددی		
	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به مرکز هسته	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای Ru(PP/gH)	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای Ru(PP/gH)
PPE212 و EP2103	260	230	Centre	2115	2225	0.65	2160	2271	0.66
PPE213 و EP2104	260	230	30m / DS	2096	2334	0.69	1902	1942	0.63
PPE222 و EP2202	260	270	Centre	1407	1455	0.58	1438	1546	0.59
PPE223 و EP2203	260	270	19.5m / DS	1412	1433	0.62	1361	1421	0.60
PPE232 و EP2304	260	310	12.8m / DS	494	696	0.32	676	731	0.44
PPE112 و EP1102	160	278.9	Centre	1329	1442	0.6	1445	1552	0.65
PPE113 و EP1103	160	279	20m / DS	1258	1369	0.61	1382	1435	0.66
PPE122 و EP1204	160	310	11.9m / DS	552	917	0.36	898	971	0.58
PPE312 و EP3102	360	280.1	Centre	1237	1343	0.56	1409	1515	0.64
PPE313 و EP3103	360	280.2	19.5m / DS	1212	1361	0.59	1337	1376	0.64
PPE322 و EP3204	360	310.2	12.2m / DS	612	897	0.41	872	946	0.58
PPE412 و EP4104	420	309.6	12.3m / DS	509	935	0.34	956	1007	0.63

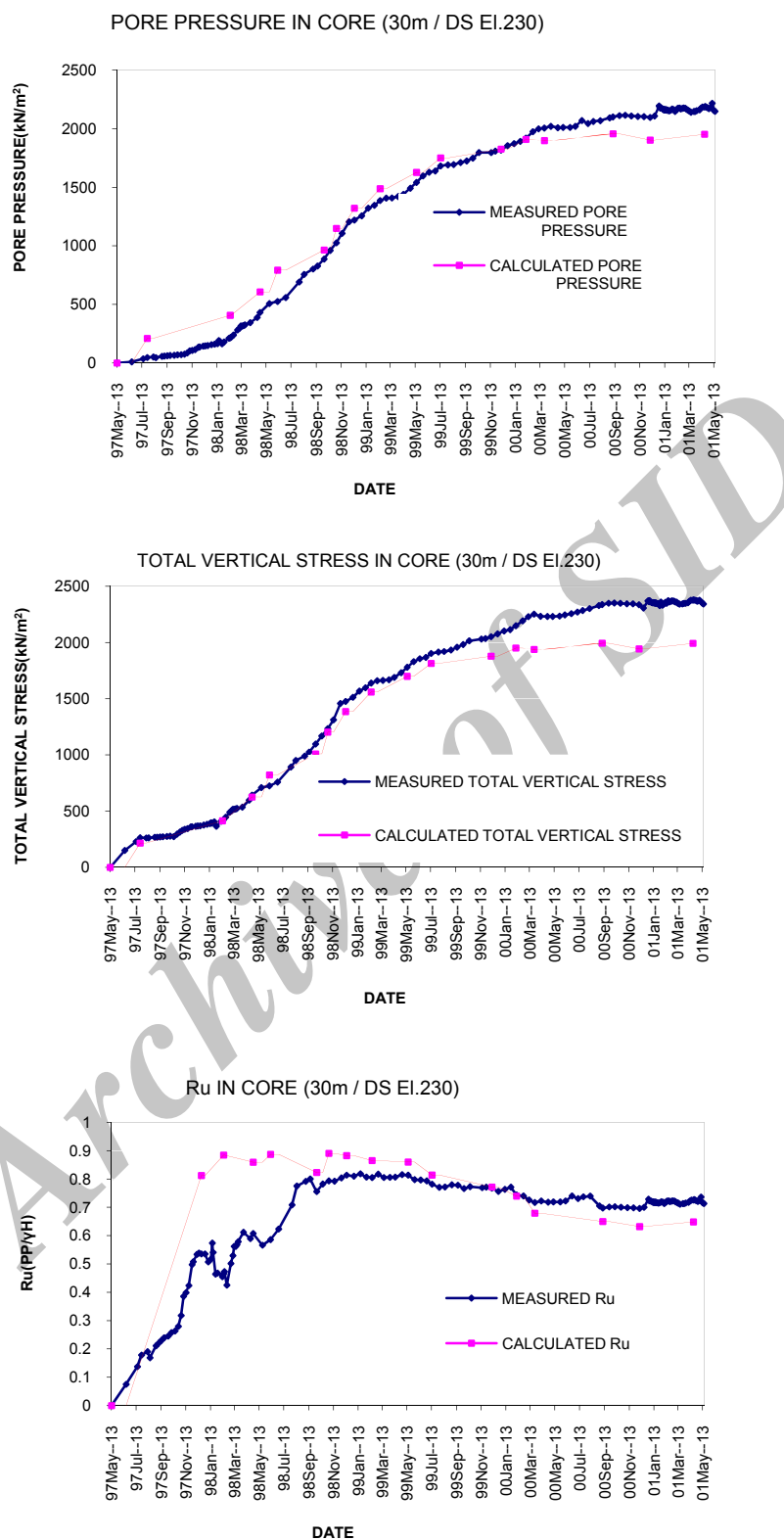
جدول ۵ مقایسه‌ی نتایج تحلیل با ابزار دقیق بلافاصله پس از اولین آبیگری

ابزار	موقعیت			نتایج ابزار دقیق			نتایج تحلیل عددی		
	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به مرکز هسته	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای Ru(PP/gH)	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای
PPE212 و EP2103	260	230	Centre	2214	2330	0.68	2275	2394	0.69
PPE213 و EP2104	260	230	30m / DS	2185	2375	0.72	1952	1992	0.64
PPE222 و EP2202	260	270	Centre	1523	1598	0.63	1562	1647	0.64
PPE223 و EP2203	260	270	19.5m / DS	1533	1581	0.67	1470	1529	0.64
PPE232 و EP2304	260	310	12.8m / DS	612	801	0.40	756	808	0.50
PPE112 و EP1102	160	278.9	Centre	1430	1573	0.64	1482	1585	0.66
PPE113 و EP1103	160	279	20m / DS	1380	1495	0.67	1395	1448	0.67
PPE122 و EP1204	160	310	11.9m / DS	655	938	0.43	939	996	0.61
PPE312 و EP3102	360	280.1	Centre	1339	1430	0.61	1467	1568	0.66
PPE313 و EP3103	360	280.2	19.5m / DS	1292	1436	0.63	1394	1432	0.67
PPE322 و EP3204	360	310.2	12.2m / DS	709	983	0.47	913	972	0.61
PPE412 و EP4104	420	309.6	12.3m / DS	550	968	0.36	981	1027	0.65

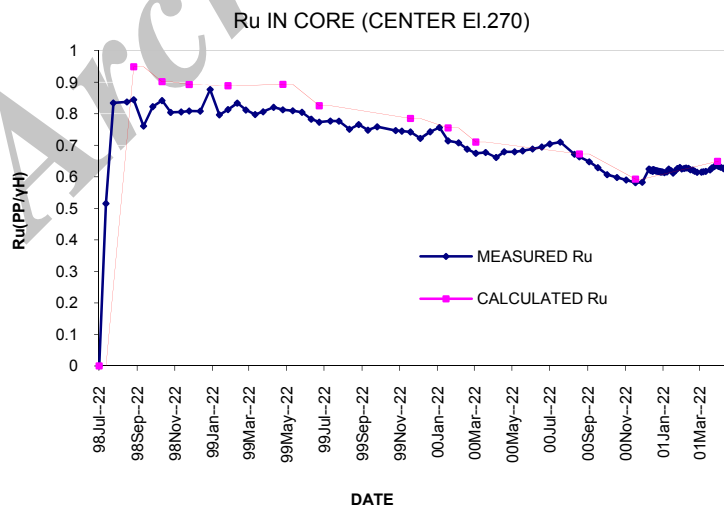
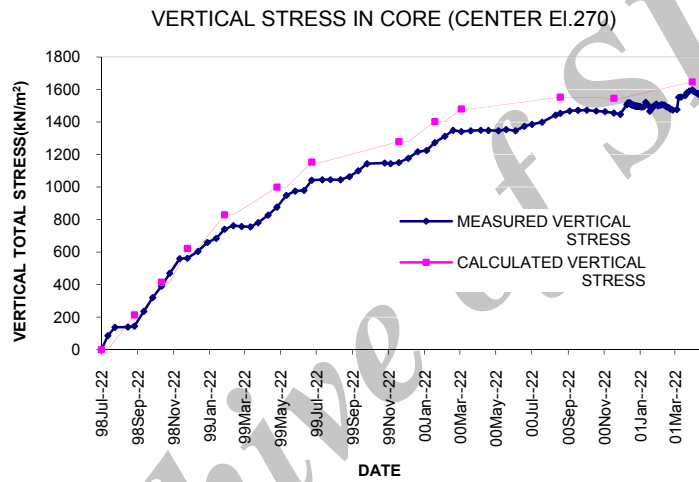
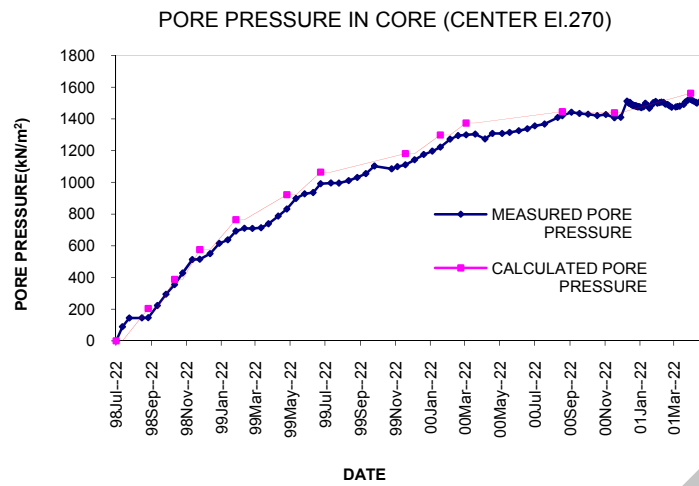




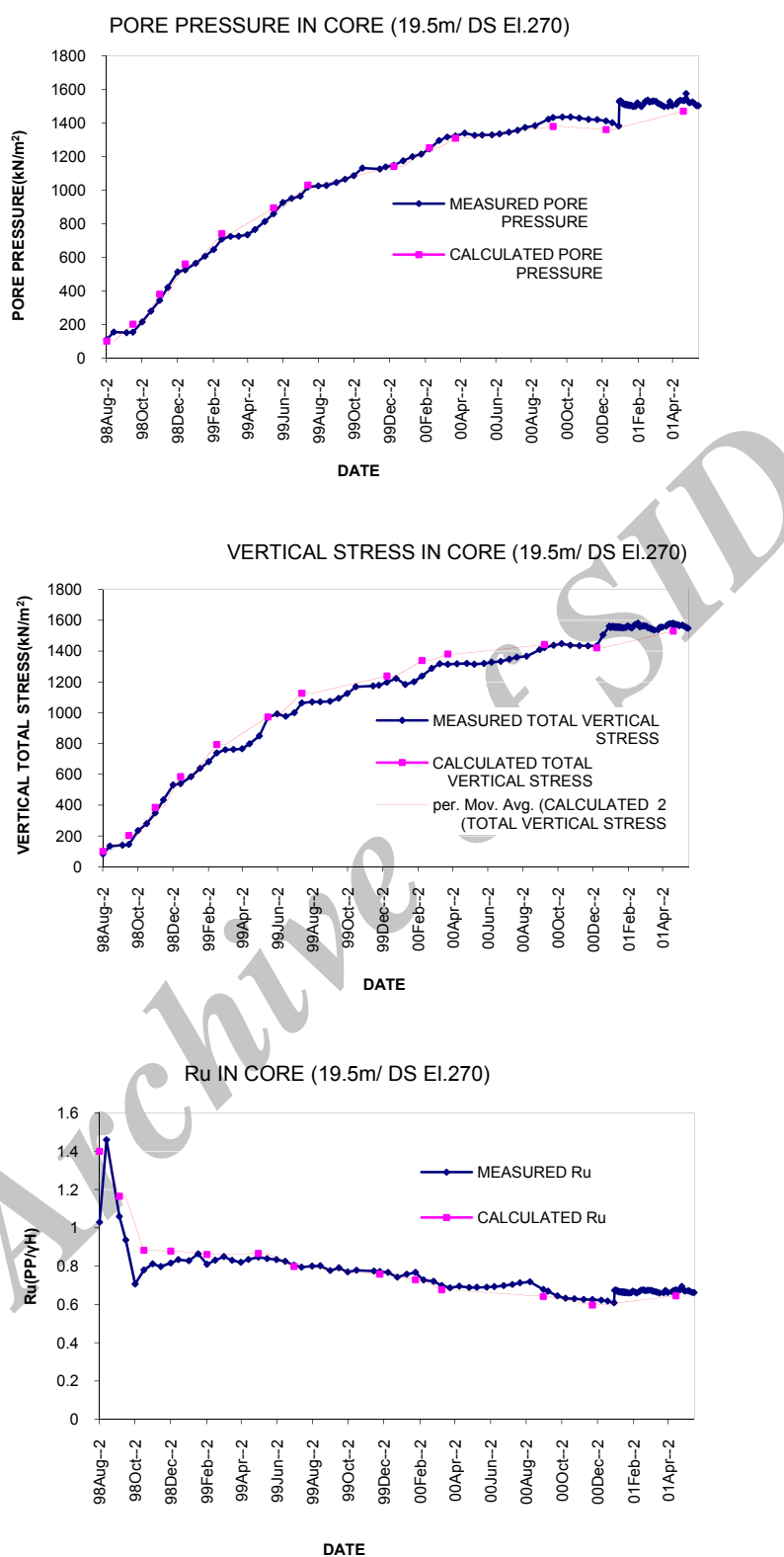
شکل ۸ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار EP212 و PPE2103 (مقطع ۲۶۰)



شکل ۹ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار
 EP2104 و PPE213 (مقطع ۲۶۰)



شکل ۱۰ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار EP2202 و PPE222 (مقطع ۲۶۰)



شکل ۱۱ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار
 EP2203 و PPE223 (مقطع ۲۶۰)

افزایش تنش کل در هسته می‌گردد. افزایش فشار آب منفذی ناشی از آبیگری نسبتاً کم بوده است. به هر حال مقادیر فشار آب منفذی در زمان انتهایی ساخت و اولین آبیگری بیش از مقادیر مشاهده شده در سدهای دیگر بوده است. علت وقوع این پدیده را می‌توان سرعت نسبتاً زیاد اجرای خاکریز بدنه‌ی سد و نفوذپذیری اندک مصالح هسته دانست.

از موارد دیگری که در این سد مشاهده شده است این است که مقادیر فشار آب حفره‌ای در مرکز هسته و در پایین دست هسته بسیار به یکدیگر نزدیک است. در حالی که انتظار می‌رود با توجه به مجاورت با فیلتر، در پایین دست هسته مقادیر کمتری برای فشار آب حفره‌ای داشته باشیم. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که نفوذپذیری افقی مصالح هسته کمتر از مقادیر مفروض اولیه می‌باشد. تحلیل‌های متعدد با نسبت‌های مختلف نفوذپذیری افقی به قائم (K_H/K_V) نشان می‌دهد که بهترین تطبیق با فرض نفوذپذیری افقی $2/5$ برابر نفوذپذیری قائم حاصل می‌شود. هم‌چنین با پیشرفت روند تحکیم در مجاورت فیلتر تنش مؤثر افزایش یافته و نفوذپذیری در این منطقه کاهش بیشتری خواهد داشت. این کاهش نفوذپذیری از استهلاک فشار آب منفذی در نواحی مجاور جلوگیری می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل عددی تطبیق خوبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در همی ابزارهای اندازه‌گیری تنش و فشار آب حفره‌ای نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت که مقدار ضریب فشار آب حفره‌ای در زمان ساخت سد در محدوده‌ی قابل قبول به‌نظر می‌رسد، اما مقدار فشار آب منفذی در پایان ساخت بیش از مقادیر معمول مشاهده شده در سایر سدها می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی آن است که روند تحکیم مصالح به‌کندی صورت پذیرفته است. دلایل ماندگاری آب منفذی در

در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نتایج تنش کل، فشار آب منفذی و نسبت فشار آب منفذی (R_u) نسبت فشار آب به وزن سربار (γh) حاصل از تحلیل عددی و مقایسه‌ی آن با نتایج ابزار دقیق برای مقطع ۲۶۰ آورده شده است.

γh محاسبه شده $R_u = u$ محاسبه شده

γh اندازه‌گیری شده $R_u = u$ اندازه‌گیری شده

تحلیل نتایج مدل‌سازی عددی

همان‌گونه که در شکل‌های (۸) تا (۱۱) ملاحظه می‌گردد، در زمان‌های اولیه‌ی خاکریزی به‌دلیل کم بودن سربار هنوز خاک کاملاً اشباع نمی‌باشد و لذا مقادیر اندازه‌گیری شده فشار آب حفره‌ای کمتر از مقادیر محاسبه شده می‌باشد. دلیل دیگر این اختلاف این است که احتمالاً در لحظات اولیه‌ی خاکریزی فشار آب منفذی ایجاد شده به‌علت نفوذپذیری پایین مصالح کاملاً به ابزار منتقل نشده و برای این‌که ابزار اندازه‌گیری کاملاً اشباع شود و تحت فشار کامل آب قرار گیرد، نیاز به گذشت زمان بوده است. پس از افزایش تراز خاکریزی، خاک کاملاً اشباع شده و لذا تطبیق بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده بسیار خوب می‌باشد. به‌طوری که در زمان بلافاصله پس از اتمام ساخت اختلاف بین نتایج تحلیل عددی و ابزار دقیق ناچیز است. در تراز ۲۷۰ که ابزارهای PPE223 و PPE222 نصب شده است، حتی در لحظات اولیه تطبیق خوبی بین نتایج تحلیل عددی و مشاهدات ابزار دقیق وجود دارد که به‌علت رطوبت بالای هسته در این تراز می‌باشد (احتمالاً به‌دلیل بارندگی).

آبیگری اولیه سبب افزایش تنش‌های کل و به‌دنبال آن فشارهای آب منفذی در هسته گردیده است؛ زیرا اولاً نیروی هیدرواستاتیکی آب بر وجه بالادست هسته اعمال می‌گردد و ثانیاً رُمیش اشباعی در پوسته‌ی بالادست سبب کاهش قوس‌زدگی و در نتیجه

۴- از غلطک پاچه‌بزی به منظور تراکم هسته استفاده شده است. می‌دانیم که خاک‌های رسی متراکم شده با غلطک پاچه‌بزی در یک درصد تراکم مشخص، نسبت به رس‌های متراکم شده با غلطک چرخ لاستیکی دارای نفوذپذیری کمتری است.

۵- مطابق تئوری ساختار کلوخه‌ای خاک‌های رسی متراکم شده (Olsen 1962) عمده جریان در رس‌های متراکم شده از فضاها بین کلوخه‌های خاک عبور می‌کند و خاکی که دارای کلوخه‌های با ابعاد کوچکتری باشد، نفوذپذیری کمتری خواهد داشت.

هسته‌ی سد مسجد سلیمان و در نتیجه بالابودن فشار آب منفذی به شرح زیر است:

۱- هسته نسبتاً عریض است.

۲- درصد رطوبت در سمت تر درصد رطوبت بهینه است و بر اساس گزارش‌های کنترل کیفیت به‌طور متوسط حدود ۱/۵٪ بیش از رطوبت بهینه می‌باشد. معمولاً حداقل نفوذپذیری در رطوبت ۲-۴٪ بیش از بهینه حاصل می‌گردد.

۳- مصالح هسته ریزدانه است و در گروه CL قرار می‌گیرد. هم‌چنین دامنه‌ی خمیری متوسط مصالح هسته در حدود ۱۹٪ می‌باشد، بنابراین دارای نفوذپذیری نسبتاً کمی بوده است.

مراجع

۱. اخترپور، علی، "تأثیر درصد رطوبت زمان تراکم بر نفوذپذیری رس‌های متراکم شده"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مهرماه، (۱۳۸۱).
۲. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، "گزارش رفتار سد مسجد سلیمان در حین ساختمان و اولین آگیری تا اردیبهشت ۱۳۸۰"، خرداد، (۱۳۸۰).
3. Charles, J.A. , "The Use of One-Dimensional Compression Tests and Elastic Theory in Predicting Deformations of Rockfill Embankments", *Canadian Geotechnical Journal*, 13, pp.189-200, (1976).
4. Eisenstein, Z. and SIMMONS, J.V., "Three-Dimensional Analysis of Mica Dam, Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams", Proc. Of Int. Symp. At Univ. of Wales, Swansea, pp.431-545, Sept.,(1975).
5. Eisenstein, Z. and Law, S.T.C., "Analysis of Consolidation Behavior of Mica Dam", *J.Soil Mech. Fdn. Eng. Div.* , ASCE, 103, NoGT8, pp.879-895, (1977).
6. Iran Water & Power Resources Development Co. Godar-E-Landar Hepp, Review on Additional Laboratory Test, May, (1996).
7. James, M., Duncan and Chin-Yung Chang, members ASCE, "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils", *J. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.96, No.SM5, ,P. 1622-1651 September, (1970).
8. Schanz, T. , Vermeer, P.A. , Bonnier, P.G., "Formulation and Verification of the Hardening-Soil Model", *Submitted for Publication to Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech* , (1999).
9. Icold , "Static Analysis of Embankment Dams" , Bulletin, No.53, (1986).
10. Naylor. D. J., "Stress-Strain Laws for Soil", Chapter 2 of *Developments in Soil Mechanics*, Ed.C.R. Scott, Applied Science, England, (1978).