

مطالعه و تحلیل عددی فشار آب حفره ای ایجاد شده در هسته سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان

علی اخترپور، استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد*
عباس سروش، دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، تهران**
* تلفن: 0511-6220912-09153143978، پست الکترونیکی: a_akhtarpur@yahoo.com
** تلفن: 64543009، پست الکترونیکی: soroush@aut.ac.ir

چکیده:

نقش اصلی هسته در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای کاهش و کنترل نشست آب از بدنه سد می‌باشد. برای دستیابی به این هدف عموماً از خاکهای رسی برای هسته استفاده می‌شود که بخاطر نفوذپذیری اندک، این نوع خاک می‌تواند این وظیفه را بخوبی انجام دهد. ولی نفوذپذیری اندک این نوع خاک همزمان با بالا رفتن درجه اشباع خاک ناشی از افزایش سربار می‌تواند باعث ایجاد فشار آب حفره‌ای در هسته سد در زمان ساخت گردد و این فشارهای آب منفذی نمی‌تواند بسادگی 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 نرم افزار اجزا محدود PLAXIS7.2 و مدل رفتاری پلاستیک سخت شونده مقادیر فشار آب حفره‌ای و تنش‌های کل در هسته سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان در زمان ساخت و اولین آبدگیری محاسبه شده و با مقادیر حاصل از ابزار دقیق مقایسه می‌گردد. بطور کلی نتایج آنالیز تطبیق خوبی را با مقادیر حاصله از ابزار دقیق نشان می‌دهد.

کلید واژه: سد سنگریزه‌ای، فشار آب حفره‌ای، مدل رفتاری الاستوپلاستیک، ضریب فشار آب حفره‌ای، تنش کل

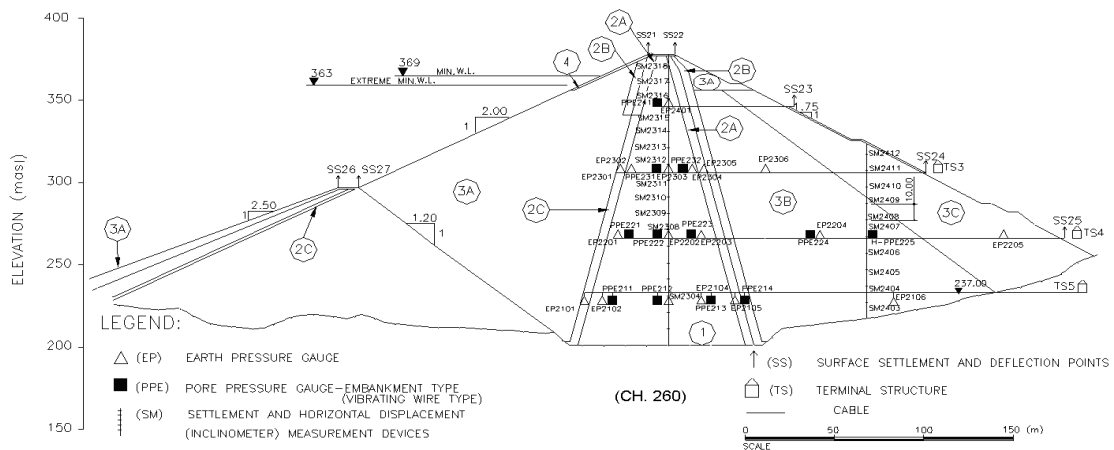
1- مقدمه

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

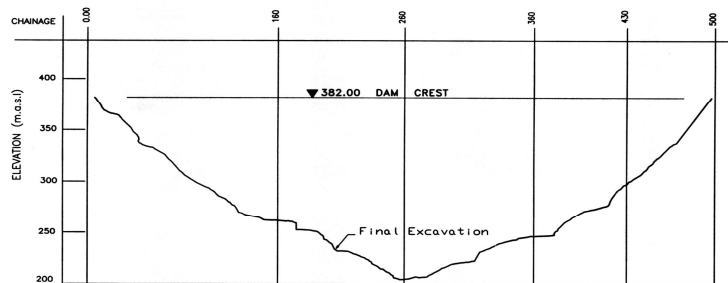
2- سد مسجد سلیمان

سد مسجد سلیمان از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم می‌باشد. این سد، که هدف عمده از ساخت آن تولید انرژی بوده، در بین سالهای 1374 تا 1379 بر روی رودخانه کارون بنا شده است. مرتفع‌ترین مقطع

عرضی و مقطع طولی محور سد در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. همچنین بر روی مقطع طولی سد، مقاطع ابزارگذاری شده 160، 260، 360 و 435 نشان داده شده است. مشخصات کلی و مشخصات مصالح سد در جدول 1 به صورت خلاصه ارائه گردیده است. آبیگری سد در اواخر آذر 1379 (19 دسامبر 2000) یک ماه پس از پایان ساخت، آغاز گردید. برای اینکه فرصت کافی برای کنترل ایمنی سد از طریق پایش و قرائت ابزار دقیق وجود داشته باشد، آبیگری در پنج مرحله صورت گرفته و کل مراحل آبیگری 7 ماه به طول انجامید. از جمله نکاتی که در زمان ساخت و آبیگری سد مورد توجه واقع شد مقدار قابل توجه فشار آب حفره‌ای در هسته و نرخ نسبتاً کم استهلاک آن با گذشت زمان بود.



شکل (1): مرتفعترین مقطع عرضی سد مسجد سلیمان و موقعیت ابزار دقیق (مقطع 260)



شکل (2): مقطع طولی محور سد مسجد سلیمان و موقعیت مقاطع عرضی

3- مراحل مدلسازی و تحلیل

تحلیل عددی بدنه سد مسجد سلیمان همراه با پی آن به صورت تحلیل تنش موثر همراه با آنالیز تحکیم و محاسبه فشارهای آب منفذی درون هسته صورت گرفت. در این تحلیل، برای هر یک از مقاطع ابزارگذاری شده سد (شکل 2) مراحل زیر تکرار گردید.

زمان ساخت

- محاسبه تنش‌های برجا در پی، قبل از ساخت سد
- مدلسازی فرازبند ادغامی
- مدلسازی ساخت سد اصلی به صورت لایه‌ای با ضخامت هر لایه معادل 10 متر

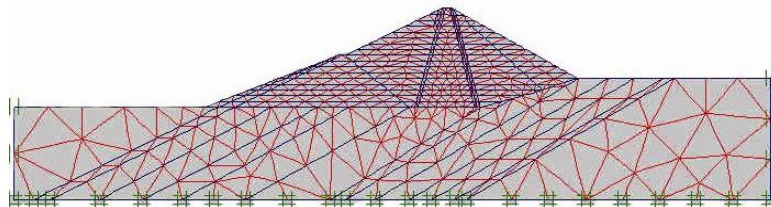
- پس از ساخت هر لایه، آنالیز تحکیم برای لایه های زیرین انجام گردید. بدین صورت که آنالیز تنش - کرنش و آنالیز تحکیم به صورت همزمان صورت گرفت.
- در آنالیز تحکیم از تئوری Biot استفاده شد که در آن تنش کل در پروسه تحکیم الزاماً ثابت نمی باشد.

جدول (1): مشخصات هندسه و مصالح سد مسجد سلیمان

مصالح پی	مصالح سد	هندسه سد
نوع مصالح لایه های متناوب کنگلومرا، رس سنگ، ماسه سنگ و لای سنگ	مصالح هسته خاک رسی متشکل از 80% CL و 20% GC رطوبت متوسط تراکم هسته $W_{opt} + 2\%$ پوسته (3A,3C,3B,3D) مصالح سنگریزه ای از منابع کنگلومرا، ماسه سنگ و رس سنگ از پی و تونلهای انحراف - تراکم در حالت خشک	حداکثر ارتفاع از پی 178 متر طول تاج 480 متر نسبت طول تاج به حداکثر ارتفاع $2/70$ حجم بدنه $m^3 228 \times 10^6$

آبگیری

- تغییر خواص مصالح پوسته بالادست از خشک به اشباع (اعمال کاهش در E_{50}^{ref} و E_{oed}^{ref} و ϕ)
- استفاده از وزن مخصوص غوطه ور (γ') برای مصالح پوسته بالادست
- اعمال بار هیدرواستاتیک به صورت فشارمرزی روی شیب بالادست هسته و روی پی بالادست
- آنالیز تحکیم برای مدت 60 روز صورت گرفت (نصف زمان آبگیری)
- شکل (3) نحوه المان بندی بلندترین مقطع سد (مقطع 260) را نشان می دهد.



شکل (3): المان بندی مقطع 260 سد مسجد سلیمان (مقطع حداکثر)

4- مدل رفتاری مصالح

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

4-1- مدل خاک سخت شونده

مدل فوق یک مدل الاستو - پلاستیک با ویژگیهای زیر می باشد :

- سطح تسلیم بر اثر کرنشهای پلاستیک می تواند بزرگتر شود (بر عکس مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل که سطح تسلیم آن در فضای تنشها ثابت است).

- دو نوع سخت شونده گی متمایز از یکدیگر در مدل تعریف شده است. سخت شونده گی برشی و سخت شونده گی فشاری.

- در حالت ویژه بارگذاری آزمایش سه محوری در شرایط زه کشی شده، رابطه بین تنش انحرافی و کرنش محوری به صورت هذلولی فرض می شود (Duncan and Chang, 1970).
- مزایای مدل سخت شونده گی Hardening Soil Model نسبت به مدل هذلولی عبارتند از: از تئوری پلاستیسیته در آن استفاده شده است؛ اتساع خاک در هنگام برش در آن فرموله شده است؛ یک کلاهیک تسلیم (Yield Cap) در آن معرفی گردیده است.

مشخصه های اصلی مدل به قرار زیر است :

C' : چسبندگی موثر ψ : زاویه اتساع ϕ' : زاویه اصطکاک داخلی موثر

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

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

m : عدد توان برای منظور کردن اثر سطح تنش بر روی سختی

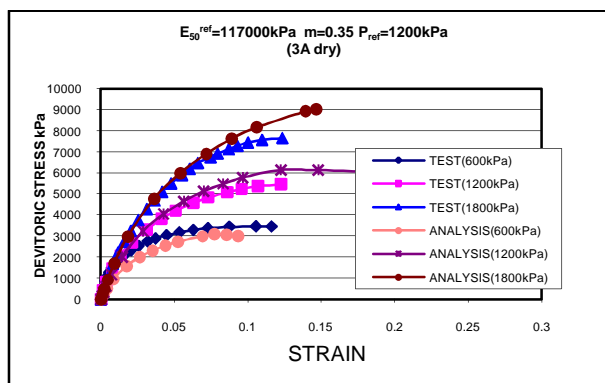
ν_{ur} : ضریب پواسون برای حالت بار برداری-بارگذاری مجدد (پیش فرض $\nu_{ur} = 0.2$)

P^{ref} : تنش مبنا برای سختی (پیش فرض $P^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$)

R_f : نسبت گسیختگی (پیش فرض $R_f = 0.9$)

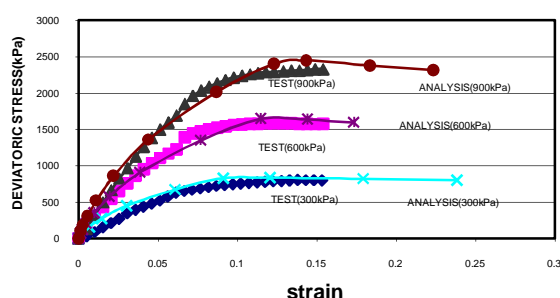
2-4- ارزیابی مدل و تدقیق پارامترها

برای ارزیابی دقیق روش عددی و نیز برای تدقیق پارامترهای ورودی مدل سخت شونده گی (به ویژه m و E_{50}^{ref})، که اثر قابل ملاحظه ای بر تغییرشکلهای خاک دارند)، آزمایشهای سه محوری انجام شده بر روی مصالح تشکیل دهنده بدنه سد، بوسیله تحلیل عددی مدلسازی گردید. با استفاده از آنالیز برگشتی، پارامترهای تغییر شکلی مصالح به گونه ای 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 نمونه مورد آزمایش در شرایط تقارن محوری (Axisimetry) مدل عددی گردیده و ابتدا فشار همه جانبه و سپس فشار محوری به مدل عددی اعمال می گردد. در روند اعمال بار محوری مقادیر کرنش قرائت شده و منحنی تنش انحرافی - کرنش محوری ترسیم و با مقادیر حاصل از آزمایشات مقایسه می گردد. شکل 4 نمونه ای از این نتایج را برای مصالح پوسته (3A) در آزمایشهای سه محوری با سه فشار محصور کننده گی 600، 1200 و 1800 کیلو پاسکال نشان میدهد. با توجه به اینکه آنالیز تنش موثر در شرایط زه کشی نشده و با در نظر گرفتن فشار آب حفره ای انجام شده است، از پارامترهای موثر هسته (C', E', ϕ') در آنالیز استفاده می گردد. لذا نتایج آزمایشات تحکیم یافته زه کشی شده CD مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل 5 نتایج آزمایشهای مصالح هسته و تطبیق حاصل از تحلیل عددی برای فشارهای محصور کننده گی 300، 600 و 900 کیلو پاسکال قابل مشاهده است.



شکل (4): تطبیق منحنی‌های حاصل از نرم افزار با نتایج آزمایشهای سه محوری (مصالح پوسته 3A در حالت خشک)

$m=0.7$ $E_{50}^{ref}=28000$ kN/m² $P_{ref}=600$ kPa
CORE



شکل (5): تطبیق منحنی‌های حاصل از نرم افزار با نتایج آزمایشهای سه محوری (مصالح هسته در حالت CD)

مشاهده می شود که مدل سخت شوندگی بخوبی قادر به مدلسازی رفتار نمونه‌های مصالح در آزمایشهای سه محوری بوده است. روند مدلسازی فوق برای سایر مصالح بدنه سد، تکرار گردید و نتایج مشابه بدست آمد. جدول 2 خواص مصالح و پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح مختلف بدنه سد را نشان می دهد. خواص مصالح و پارامترهای پی در جدول 3 خلاصه شده است. با بررسی و مطالعه دقیق آزمایشهای نفوذپذیری صورت گرفته بر روی مصالح هسته، ضریب نفوذپذیری افقی و قائم این مصالح به ترتیب $K_h=2/5 \times 10^{-8}$ cm/s و $K_v=1 \times 10^{-8}$ cm/s تخمین زده شد.

5- نتایج آنالیز

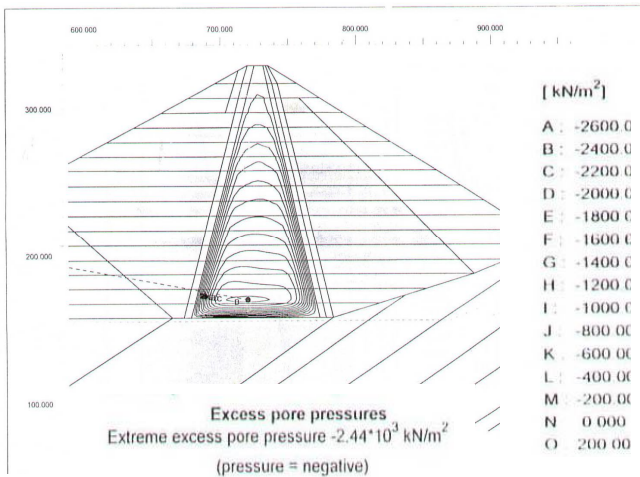
با توجه به اینکه هدف اصلی از انجام این پژوهش مطالعه توسعه و میرایی فشار آب منفذی در هسته بود، در اینجا صرفاً نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل قائم و نسبت فشار آب حفره ای R_{II} ارائه می گردد. شکل های 6 و 7 به عنوان نمونه، به ترتیب کانتورهای فشار آب حفره‌ای در هسته سد پس از پایان ساخت و پس از آبیگری برای مقطع 260 را نشان می دهد. همچنین جدولهای 4 و 5 به ترتیب فشارهای آب حفره‌ای و تنش های کل محاسبه شده را با مقادیر متناظر آنها برای ابزارهای نصب شده در مقاطع مختلف مقایسه می کند.

جدول (2): پارامترهای مصالح بدنه سد مسجد سلیمان

Material	Drainage Condition	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	Kx (cm/s)	Ky (cm/s)	E_{s0}^{ref} (kPa)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	C' (kPa)	ϕ'	ψ	ν_{ur}	P_{ref} (kPa)	m	R_f
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	$2.5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	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
staturated2B	Drained	----	19.7	----	----	37000	65237.7	111000	0.0	41	11	0.2	600	0.5	0.7
staturated2C	Drained	----	23.2	----	----	126000	167000	378000	0.0	41	11	0.2	1200	0.5	0.7

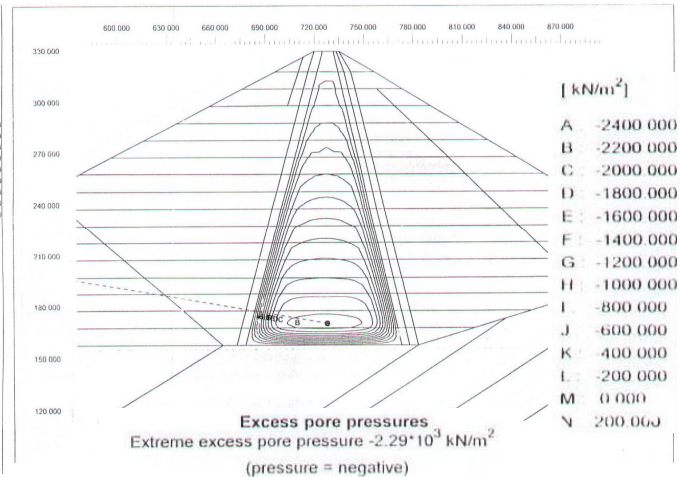
جدول (3): پارامترهای فرض شده برای مصالح پی سد

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



شکل (7): کانتورهای فشار آب منفذی

پس از اولین آبگیری در مقطع 260



شکل (6): کانتورهای فشار آب منفذی در انتهای ساخت

در مقطع 260

جدول (4): مقایسه نتایج آنالیز با ابزار دقیق در زمان بلافاصله پس از ساخت

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

جدول (5): مقایسه نتایج آنالیز با ابزار دقیق بلافاصله پس از اولین آبیاری

ابزار	موقعیت			نتایج ابزار دقیق			نتایج آنالیز عددی		
	مقطع نصب	ارتفاع نصب	موقعیت نسبت به مرکز هسته	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای $R_u(PP/gH)$	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای $R_u(PP/gH)$
EP2103 و PPE212	260	230	Centre	2214	2330	0.68	2275	2394	0.69
EP2104 و PPE213	260	230	30m / DS	2185	2375	0.72	1952	1992	0.64
EP2202 و PPE222	260	270	Centre	1523	1598	0.63	1562	1647	0.64
EP2203 و PPE223	260	270	19.5m / DS	1533	1581	0.67	1470	1529	0.64
EP2304 و PPE232	260	310	12.8m / DS	612	801	0.40	756	808	0.50

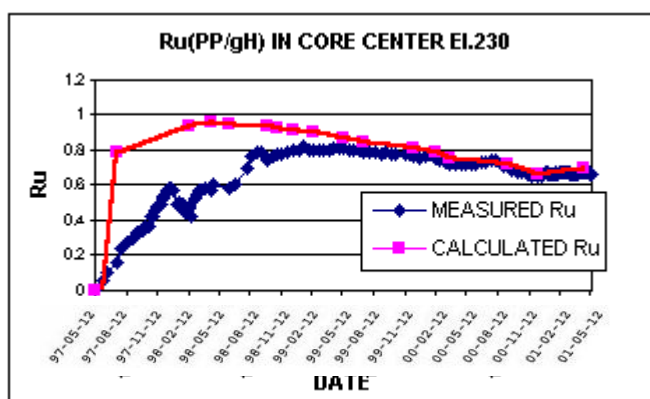
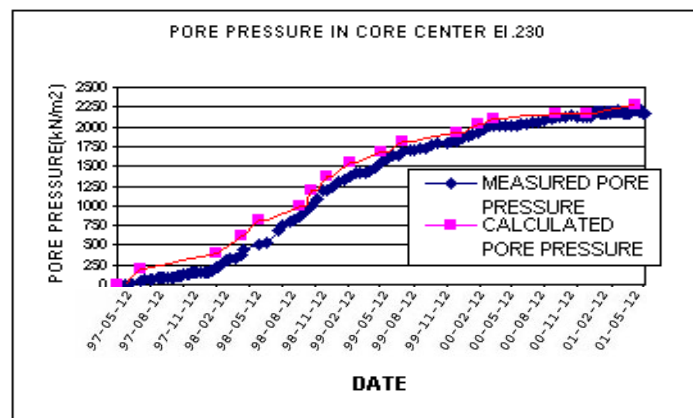
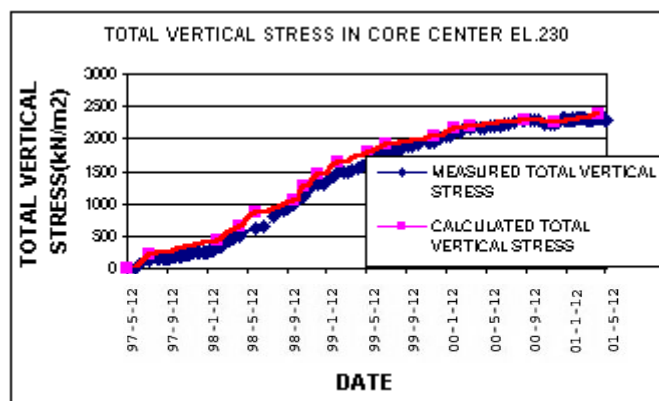
جدول (5): ادامه

ابزار	موقعیت			نتایج ابزار دقیق			نتایج آنالیز عددی		
	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به مرکز هسته	فشار آب حفره ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره ای $R_u(PP/gH)$	فشار آب حفره ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره ای $R_u(PP/gH)$
EP1102 و PPE112	160	278.9	Centre	1430	1573	0.64	1482	1585	0.66
EP1103 و PPE113	160	279	20m / DS	1380	1495	0.67	1395	1448	0.67
EP1204 و PPE122	160	310	11.9m / DS	655	938	0.43	939	996	0.61
EP3102 و PPE312	360	280.1	Centre	1339	1430	0.61	1467	1568	0.66
EP3103 و PPE313	360	280.2	19.5m / DS	1292	1436	0.63	1394	1432	0.67
EP3204 و PPE322	360	310.2	12.2m / DS	709	983	0.47	913	972	0.61
EP4104 و PPE412	420	309.6	12.3m / DS	550	968	0.36	981	1027	0.65

در شکل‌های 8 تا 11 نتایج تنش کل، فشار آب منفذی و نسبت فشار آب منفذی R_u حاصل از آنالیز عددی و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق برای مقطع 260 آورده شده است.

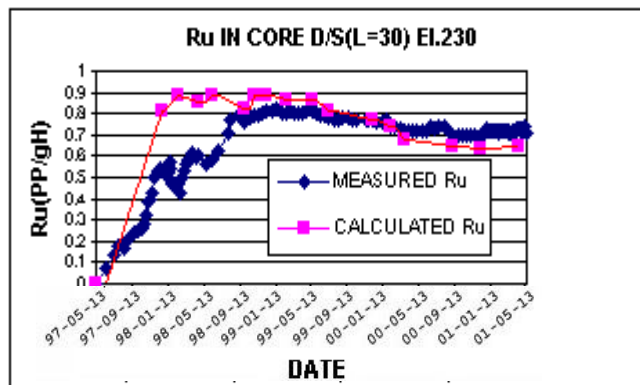
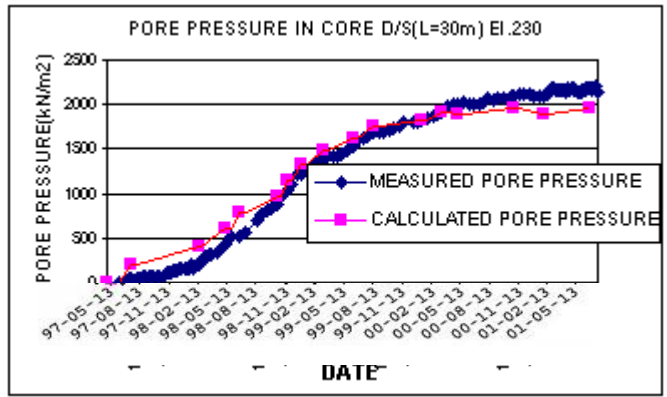
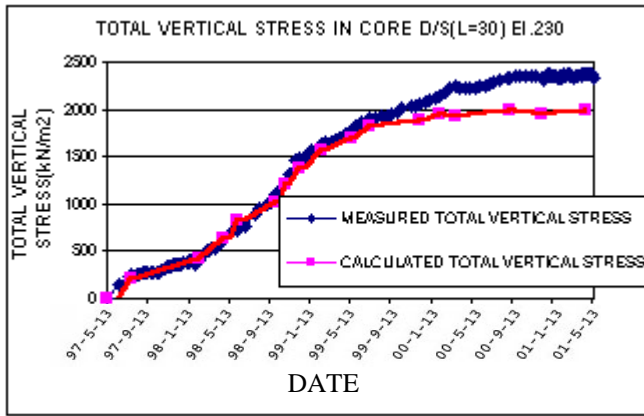
$R_u = u / \gamma h$ محاسبه شده

$R_u = u$ اندازه گیری شده

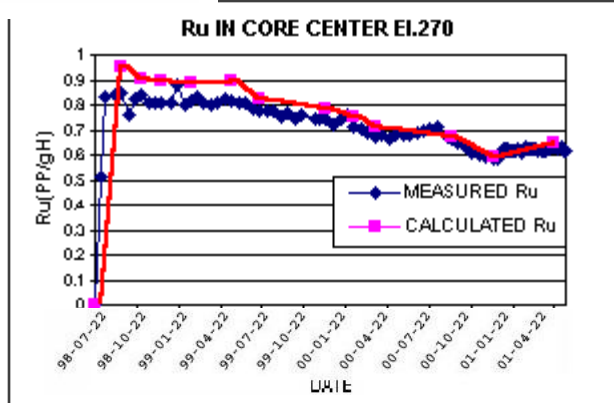
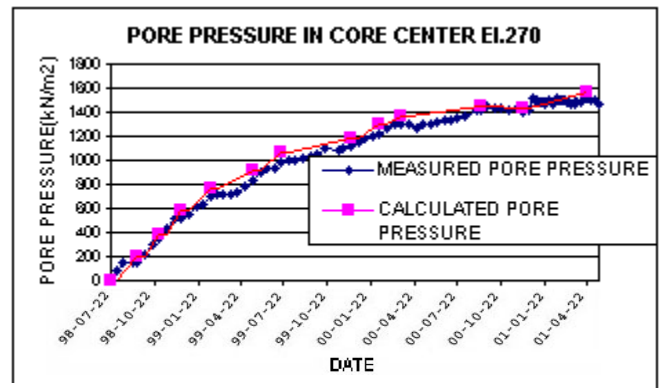
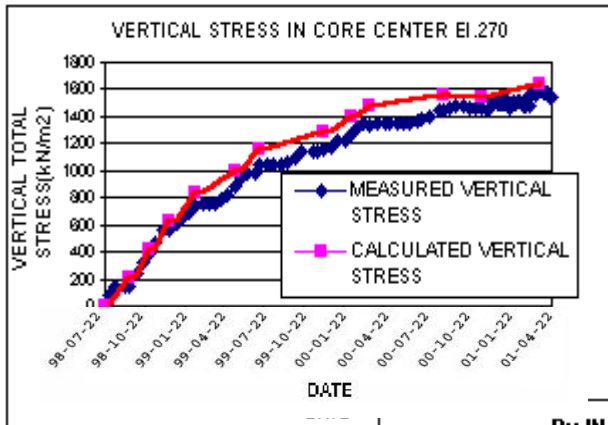


شکل (8): نتایج فشار آب حفره ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره ای R_u حاصل از آنالیز و ابزار دقیق در ابزار EP212 و

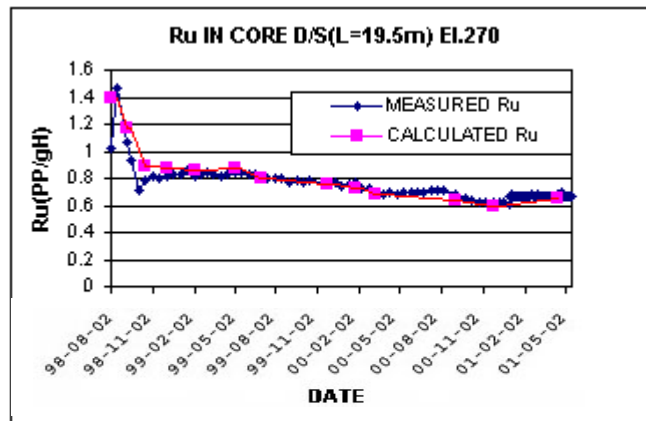
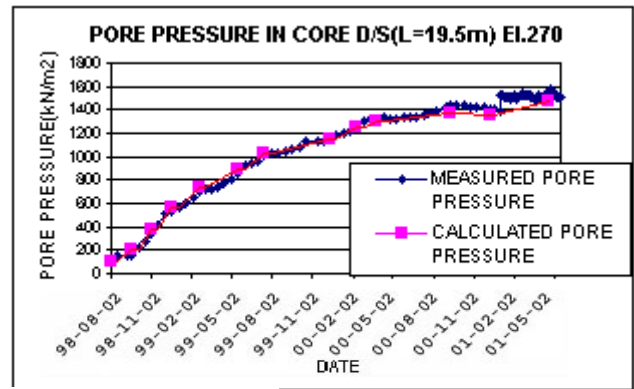
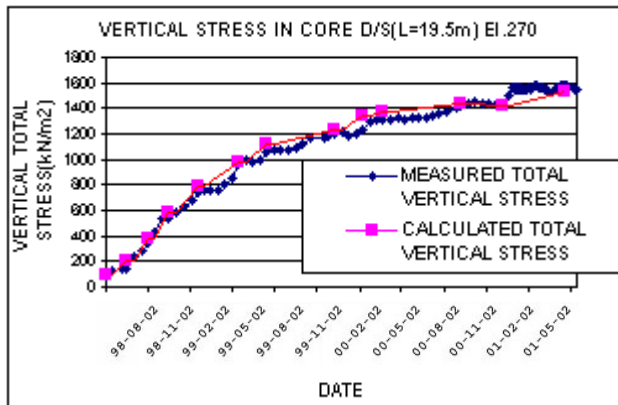
PPE2103 (مقطع 260)



شکل (9): نتایج فشار آب حفره ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره ای R_{uII} حاصل از آنالیز و ابزار دقیق در ابزار EP2104 و PPE213 (مقطع 260)



شکل (10): نتایج فشار آب حفره ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره ای R_{uII} حاصل از آنالیز و ابزار دقیق در ابزار EP2202 و PPE222 (مقطع 260)



شکل (11): نتایج فشار آب حفره ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره ای R_{II} حاصل از آنالیز و ابزار دقیق در ابزار EP2203 و PPE223 (مقطع 260)

6- تحلیل نتایج آنالیز عددی

همانگونه که در شکل‌های 8 تا 11 ملاحظه می‌گردد، در زمانهای اولیه خاکریزی بدلیل 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 اولیه خاکریزی فشار آب منفذی ایجاد شده بعلت نفوذپذیری پایین مصالح کاملاً به ابزار منتقل نشده و برای اینکه ابزار اندازه‌گیری کاملاً اشباع شده 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. بطوریکه در زمان بلافاصله پس از اتمام ساخت اختلاف بین نتایج تحلیل عددی و ابزار دقیق ناچیز است. در تراز 270 که ابزارهای PPE222 و PPE223 نصب شده است، حتی در لحظات اولیه تطبیق خوبی بین نتایج تحلیل عددی و مشاهدات ابزار دقیق وجود دارد که بعلت رطوبت بالای هسته در این تراز می‌باشد (احتمالاً بدلیل بارندگی).

آبگیری اولیه سبب افزایش تنش‌های کل و به دنبال آن فشارهای آب منفذی در هسته گردیده است. زیرا اولاً نیروی هیدرواستاتیکی آب بر وجه بالادست هسته اعمال می‌گردد و ثانیاً رُمبش اشباعی در پوسته بالادست

سبب کاهش قوس زدگی و در نتیجه افزایش تنش کل در هسته می گردد. افزایش فشار آب منفذی ناشی از آبیگری نسبتاً کم بوده است.

به هر حال مقادیر فشار آب منفذی در زمان انتهای ساخت و اولین آبیگری بیش از مقادیر مشاهده شده در سدهای دیگر بوده است. علت وقوع این پدیده را می توان سرعت نسبتاً زیاد اجرای خاکریز بدنه سد و نفوذپذیری اندک مصالح هسته دانست.

از موارد دیگری که در این سد مشاهده شده است، این است که مقادیر فشار آب حفره ای در مرکز هسته و در پایین دست هسته بسیار به یکدیگر نزدیک است. در حالیکه انتظار می رود با توجه به مجاورت با فیلتر، در پایین دست هسته مقادیر کمتری برای فشار آب حفره ای داشته باشیم. در توجیه این پدیده می توان گفت که نفوذپذیری افقی مصالح هسته کمتر از مقادیر مفروض اولیه می باشد. آنالیزهای متعدد با نسبت های مختلف نفوذپذیری افقی به قائم (K_x/K_y) نشان می دهد که بهترین تطبیق با فرض نفوذپذیری افقی $2/5$ برابر نفوذپذیری قائم حاصل می شود. همچنین با پیشرفت روند تحکیم در مجاورت فیلتر تنش موثر افزایش یافته و نفوذپذیری در این منطقه کاهش بیشتری خواهد داشت. این کاهش نفوذپذیری از استهلاک فشار آب منفذی در نواحی مجاور جلوگیری می کند.

7- نتیجه گیری

نتایج آنالیز عددی تطبیق خوبی را با مقادیر اندازه گیری شده در همه ابزارهای اندازه گیری تنش و فشار آب حفره ای نشان می دهد. بطور کلی می توان گفت که مقدار ضریب فشار آب حفره ای در زمان ساخت سد در محدوده قابل قبول بنظر می رسد. اما مقدار فشار آب منفذی در پایان ساخت بیش از مقادیر معمول مشاهده شده در سایر سدها می باشد و نشان دهنده آن است که روند تحکیم مصالح به کندی صورت پذیرفته است. دلایل ماندگاری آب منفذی در هسته سد مسجد سلیمان و در نتیجه بالابودن فشار آب منفذی به شرح زیر است:

- هسته نسبتاً عریض است.

- درصد رطوبت در سمت تر درصد رطوبت بهینه است و بر اساس گزارشات کنترل کیفیت بطور متوسط حدود $1/5\%$ بیش از رطوبت بهینه می باشد. معمولاً حداقل نفوذپذیری در رطوبت $2-4\%$ بیش از بهینه حاصل می گردد [1].

- مصالح هسته ریزدانه بوده و در گروه CL قرار می گیرد. همچنین دامنه خمیری متوسط مصالح هسته در حدود 19% می باشد؛ بنابراین دارای نفوذپذیری نسبتاً کمی بوده است.

- از غلطک پاچه بزی بمنظور تراکم هسته استفاده شده است؛ می دانیم که خاکهای رسی متراکم شده با غلطک پاچه بزی در یک درصد تراکم مشخص، نسبت به رسهای متراکم شده با غلطک چرخ لاستیکی دارای نفوذپذیری کمتری است [1].

- 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 [1].

6- فهرست مراجع

1. اخترپور، علی، مهرماه 1381، "تاثیر درصد رطوبت زمان تراکم بر نفوذپذیری رسهای متراکم شده"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
2. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، خرداد 1380، "گزارش رفتار سد مسجد سلیمان در حین ساختمان و اولین آبیگری تاردیبهشت 1380"
3. CHARLES, J.A. , 1976. The Use of One-Dimensional Compression Tests and Elastic Theory in Predicting Deformations of Rockfill Embankments, Canadian Geotechnical Journal, 13, pp.189-200.
4. EISENSTEIN, Z. and SIMMONS, J.V.,1975. Three-Dimensional Analysis of Mica Dam, Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams, Proc. Of Int. Symp. At Univ. of Wales, Swansea, Sept.1975, pp.431-545.
5. EISENSTAIN, Z. and LAW, S.T.C., 1977. Analysis of Consolidation Behavior of Mica Dam, J.Soil Mech. Fdn. Eng. Div. , ASCE, 103, NoGT8, pp.879-895.
6. Iran Water & Power Resources Development Co. May 1996. GODAR-E-LANDAR HEPP, Review on Additional Laboratory Test
7. James M. Duncan & Chin-Yung Chang, members ASCE, 1970, "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils", J. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.96, No.SM5, September 1970, P. 1622-1651
8. SCHANZ, T. , VERMEER, P.A. , BONNIER, P.G., 1999. Formulation and Verification of the Hardening-Soil Model. Submitted for Publication to Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.
9. ICOLD 1986 , " Static Analysis of Embankment Dams" , Bulletin No.53
10. Naylor. D. J., 1978. Stress-Strain Laws for Soil, Chapter 2 of Developments in Soil Mechanics, Ed.C.R. Scott, Applied Science, England.