

مقایسه‌ی رفتار سد خاکی با مصالح رس خالص و رس مخلوط در بارگذاری‌های مختلف

سینا ساسانیان (کارشناس ارشد)

عباس سروش (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حسین سلطانی جیقه (استادیار)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تربیت معلم آذربایجان

به دلیل برخی مشکلات فنی و اجرایی، امروزه در هسته‌ی سدهای خاکی از خاک رسی مخلوط به جای خاک رسی خالص استفاده می‌شود. در این نوشتار سدهای خاکی با هسته‌ی رسی و سدهای خاکی با هسته‌ی مخلوط مورد تحلیل عددی قرار گرفته و با هم مقایسه شدند. نتایج حاصله حاکی از آن است که در حین ساخت سد با هسته‌ی مخلوط - در مقایسه با ساخت سد با هسته‌ی رسی - فشار آب حفره‌ی مازاد کم‌تری ایجاد می‌شود؛ اما در بارگذاری تناوبی فرضی بر روی تاج سد فشار آب حفره‌ی بیشتری در هسته‌ی مخلوط ایجاد می‌شود. بررسی نتایج همچنین نشان می‌دهد که مجموع فشار آب حفره‌ی تولیدشده در حین ساخت، آبگیری و بارگذاری تناوبی فرضی در هسته‌ی رسی بیشتر از هسته‌ی مخلوط است. بنابراین در سد خاکی با هسته‌ی مخلوط - در مقایسه با هسته‌ی رسی - علاوه بر بهبود خواص مقاومتی، فشار آب حفره‌ی مازاد کم‌تری تولید می‌شود.

واژگان کلیدی: هسته سد خاکی، خاک رس مخلوط، بارگذاری یکنواخت، بارگذاری تناوبی، تحلیل عددی.

۱. مقدمه

سدهای خاکی ناحیه‌بندی شده از قسمت‌های مختلفی نظیر پوسته، هسته، زهکش‌ها و فیلترها تشکیل می‌شوند، که هر یک عهده‌دار وظیفه‌ی خاصی هستند. از آنجا که فشار آب حفره‌ی در هسته از عوامل ناپایداری و مخاطره‌انگیز در سدها است، لازم است در انتخاب مصالح هسته و اجرای آن تدابیری اتخاذ شود تا در شرایط بارگذاری‌های مختلف بهترین عملکرد را داشته باشد و میزان فشار آب حفره‌ی مازاد در حین ساخت سد، آبگیری و بارگذاری‌های زلزله کمیته شود.

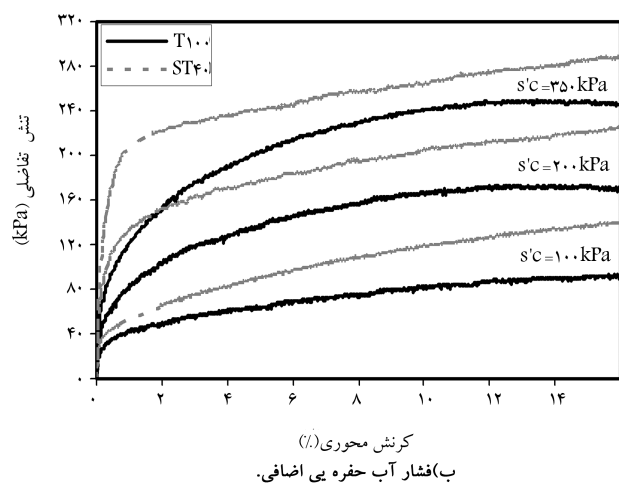
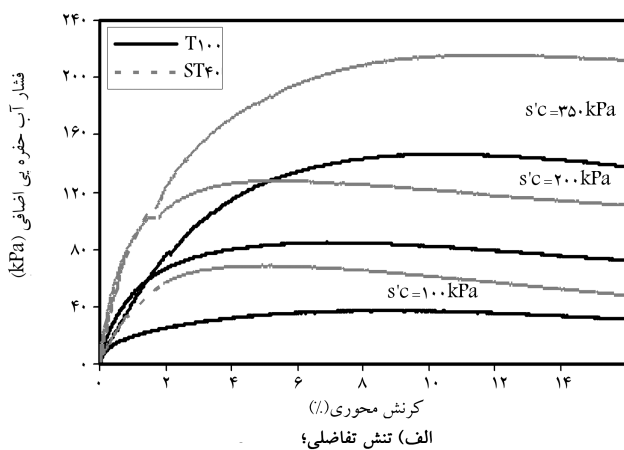
اکثر سدهای خاکی اجراشده در گذشته دارای هسته‌ی رسی بود چرا که میزان نفوذپذیری این مصالح کم بوده است. محدودیت منابع قرضه‌ی خاک رس، مهندسیین ژئوتکنیک را به فکر جایگزینی این مصالح با مصالحی با مقاومت بالا و نفوذپذیری نسبتاً کم در هسته‌ی سدها انداخت. بهترین جایگزین برای این مصالح، خاک‌های مخلوط یا میانی بودند که ترکیبی از مصالح دانه‌ی (مانند ماسه و شن) با مصالح چسبنده (مانند رس) هستند. رفتار مکانیکی این نوع خاک‌ها حد میانی رفتار خاک‌های رسی و دانه‌ی است و به سختی نسبی این دو بخش، نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها نسبت به هم، و اندرکنش بین آن‌ها وابسته است.

سد کرخه، بزرگ‌ترین سد مخزنی ایران با ارتفاع ۱۲۷ متر و طول تاج ۳۰۰ متر، از هسته‌ی رسی مخلوط (متشکل از ۶۰ درصد رس و ۴۰ درصد مصالح دانه‌ی بی)

ساخته شده است. اهمیت و افزایش کاربرد این نوع خاک‌ها محققین را واداشته تا تحقیقات آزمایشگاهی و عددی خود را بر این خاک‌ها متمرکز کنند. [۱-۷]

در سال ۱۳۸۵ با انجام آزمایش‌های سه‌محوری یکنواخت، تناوبی و پس‌تناوبی یکنواخت بر روی مصالح مخلوط در شرایط بارگذاری مختلف، رفتار این خاک‌ها به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفت [۱] اما رفتار سازه‌های متشکل از این نوع مصالح به‌طور دقیق ارزیابی نشده است. برای این منظور در این نوشتار رفتار یک سد خاکی فرضی در دو حالت مطالعه می‌شود: ۱. مصالح هسته از رس خالص باشد؛ ۲. مصالح هسته از رس مخلوط باشد. تحلیل رفتار سد در حین ساخت، آبگیری (تحلیل تراوش) و بارگذاری تناوبی انجام شده و نتایج به دست آمده برای هر دو نوع هسته‌ی رسی خالص و رسی مخلوط با هم مقایسه می‌شوند. برای انجام این تحلیل‌ها لازم است نوع مدل رفتاری مورد استفاده و پارامترهای مورد نیاز آن، در تحلیل‌ها به‌طور دقیق تعیین شوند. بنابراین ابتدا این پارامترها با توجه به نتایج آزمایشگاهی برآورد می‌شود و سپس با تحلیل عددی نمونه‌های آزمایش شده، مقادیر دقیق پارامترهای مدل رفتاری تعیین خواهد شد. درنهایت با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی سد و مقایسه‌ی آنها، به‌منظور انتخاب مصالح هسته‌ی سدهای خاکی پیشنهادی ارائه می‌شود.

در این زمینه تحقیقات بسیاری انجام شده است. [۲-۵] بیشتر این تحقیقات در مورد سد خاکی کرخه با مصالح هسته‌ی رسی و رسی مخلوط، و با استفاده از نرم‌افزارهایی



شکل ۱. نتایج حاصل از آزمایش یکنواخت نمونه‌های T_{100} و ST_{40} در تنش‌های محصورکنندگی مختلف.^[۱]

باشد، سختی آن بیشتر می‌شود؛ و چون شرایط بارگذاری در حالت سطوح تنش یکسان است نمونه‌یی که سختی بیشتری دارد، تمایل به تغییر حجم کم‌تری دارد. از آنجا که فشار آب حفره‌یی با تمایل به تغییر حجم متناسب است، نمونه‌یی که پتانسیل تغییر حجم یا به عبارتی کرنش کم‌تری داشته باشد، فشار آب حفره‌یی کم‌تری در آن ایجاد می‌شود.

۲.۲. آزمایش‌های تناوبی تحکیم‌یافته‌ی زه‌کشی‌نشده

در آزمایش‌های تناوبی کنترل کرنش پس از تحکیم نمونه‌ها، بارگذاری تناوبی با کرنش‌های محوری ۰٫۵ و ۱ درصد از بالا به نمونه‌ها اعمال شده است.^[۱] فرکانس بارگذاری ۰٫۱ Hz و تعداد دوره‌های بارگذاری ۵۰ بوده است. به دلیل تعدد آزمایش‌ها، تنها نتایج آزمایش تناوبی با کرنش محوری ۱ درصد در تنش محصورکنندگی مؤثر ۲۰۰ kPa ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۲ تغییرات فشار آب حفره‌یی حاصل از آزمایش تناوبی با کرنش محوری ۱٪ در تنش محصورکنندگی مؤثر ۲۰۰ kPa، برای نمونه‌های رس خالص و رس مخلوط نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در این نوع بارگذاری در هر دو حالت کنترل کرنش و سطوح تنش مساوی، با افزایش مصالح دانه‌یی در خاک رس و افزایش تعداد دوره‌های بارگذاری، فشار آب حفره‌یی بیشتر می‌شود و نرخ افزایش آن در ۱۰ دوره‌ی اول بیشتر است.

نظیر FEADAM و FLAC انجام شده است. در یکی از این تحقیقات سد خاکی کرخه با استفاده از نرم‌افزار FLAC و با دو هسته‌ی رسی و مخلوط در شرایط مراحل ساخت و دینامیکی تحلیل شد.^[۸] نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نشان دادند که افزایش مصالح دانه‌یی در هسته‌ی سد در شرایط ایستا باعث کاهش فشارهای منفذی، و در شرایط پویا باعث افزایش فشارهای منفذی می‌شود.

هدف از ارائه‌ی این نوشتار، مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی با تحلیل عددی آن است تا بتوان به‌وسیله‌ی آن به پارامترهای واقعی خاک رسید و سپس با استفاده از این پارامترها در مدل‌سازی هسته‌ی سد خاکی فرضی به مقایسه‌ی آن در شرایط ساخت لایه‌لایه و بارگذاری تناوبی روی تاج سد پرداخت.

۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

در سال ۱۳۸۵ آزمایش‌های تحکیم‌یافته‌ی زه‌کشی‌نشده‌ی یکنواخت، تناوبی و پس‌تناوبی یکنواخت در شرایط کنترل کرنش روی نمونه‌های رس خالص، مخلوط رس - ماسه و مخلوط رس - شن با درصد‌های ماسه و شن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ تحت تنش‌های محصورکنندگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۵۰ کیلوپاسکال انجام شد.^[۱] رس خالص مورد استفاده از نوع رس بال-کلی ترکیه با توده‌ی ویژه ۲٫۷۲ و شاخص خمیری ۱۹ بود. مصالح دانه‌یی مورد آزمایش نیز از منطقه‌ی خلیج (مسیل کن اطراف تهران) انتخاب شده بود که توده‌ی ویژه ذرات ماسه و شن براساس یافته‌های آزمایش به ترتیب برابر ۲٫۶۴ و ۲٫۵۶ بود. همچنین ارتفاع و قطر نمونه‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۷٫۱ و ۷٫۸ سانتی‌متر بود. در این نوشتار به دلیل تعدد آزمایش‌ها، فقط به نتایج آزمایش نمونه‌های رس خالص با نام اختصاری T_{100} و مخلوط رس - ماسه مرکب از ۴۰٪ رس و ۶۰٪ ماسه با نام اختصاری ST_{40} اشاره شده و تحلیل‌های عددی نیز بر روی سد خاکی متشکل از این نوع مصالح انجام می‌شود. این دو نمونه نماینده‌ی حد پایین و بالای فشار آب حفره‌یی در نمونه‌های آزمایش شده‌اند.

۲.۱. آزمایش‌های یکنواخت تحکیم‌یافته‌ی زه‌کشی‌نشده

در آزمایش‌های یکنواخت، نمونه‌های تحکیم‌یافته تحت بارگذاری یکنواخت کنترل کرنش قرار گرفته و کرنش نهایی اعمال شده به نمونه‌ها برابر ۱٫۱۶٪ بود. شکل ۱ تغییرات تنش تفاضلی و فشار آب حفره‌یی را در برابر کرنش محوری برای نمونه‌های T_{100} و ST_{40} نشان می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در تنش‌های محصورکنندگی یکسان، افزودن مصالح دانه‌یی به خاک رس باعث افزایش تنش تفاضلی و فشار آب حفره‌یی می‌شود. ولی بررسی تغییرات فشار آب حفره‌یی در سطوح تنش یکسان نشان داد که مقدار آن با افزودن مصالح دانه‌یی کاهش می‌یابد. پژوهش‌گران علت افزایش فشار آب حفره‌یی با افزایش درصد مصالح دانه‌یی را در شرایط کنترل کرنش چنین بیان می‌کنند:^[۳-۱] با توجه به سازوکار انتقال تنش در بخش‌های مختلف خاک مخلوط، در انتهای مرحله‌ی تحکیم، بخش رسی دور از دانه‌ها در نمونه‌های مخلوط ساختار سست‌تری نسبت به بخش رسی نمونه‌های رس خالص دارد. هر قدر درصد مصالح دانه‌یی بیشتر می‌شود، رس محبوس در فضای دور از دانه‌ها ساختار سست‌تری خواهد داشت. ساختار سست‌تر در حین بارگذاری برشی تمایل بیشتری به انقباض دارد و در نتیجه فشار آب حفره‌یی بیشتری در آنها ایجاد می‌شود. همچنین در نمونه‌های با درصد مصالح دانه‌یی یکسان، با کوچک‌تر شدن اندازه دانه‌ها و کاهش مقاومت برشی، فشار آب حفره‌یی بیشتری تولید می‌شود. علت افزایش فشار آب حفره‌یی پس از افزایش مصالح دانه‌یی در شرایط سطوح تنش یکسان را می‌توان چنین بیان کرد: هر قدر درصد مصالح دانه‌یی در نمونه بیشتر

جدول ۱. پارامترهای مدل کم-کلی نمونه‌های $T100^\circ$ و $ST40^\circ$ در تنش‌های محصورکنندگی مختلف.

نمونه	تنش محصورکنندگی (kPa)	λ	κ	M	k (cm/sec)	e_0
$T100^\circ$	۱۰۰	۰٫۰۹	۰٫۰۷۵	۰٫۹	$6,107E-10$	۰٫۷۰۸
	۲۰۰	۰٫۰۶۵	۰٫۰۶۵	۰٫۸۵۷۶		
	۳۵۰	۰٫۰۶۱	۰٫۰۶۱	۰٫۸۵۲۳		
$ST40^\circ$	۱۰۰	۰٫۰۷۵	۰٫۰۴۵	۱٫۴۴۸	$6,176E-0,9$	۰٫۴۱۲
	۲۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۱٫۳۴۷		
	۳۵۰	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۵	۱٫۲۵۲		

درجه اشباع $S_r = 1$ و $K_w = 2E + 6$ (kPa) مدل بالک آب حفره‌یی

$$\lambda = (G_s \cdot PI) / 461 \quad (1)$$

$$\kappa = P/E \quad (2)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (3)$$

$$\tau = c' + \sigma_{n'} \cdot \tan \phi' \quad (4)$$

$$\sin \phi' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c' \cot \phi' - 2\Delta u} \quad (5)$$

۴. تحلیل‌های عددی

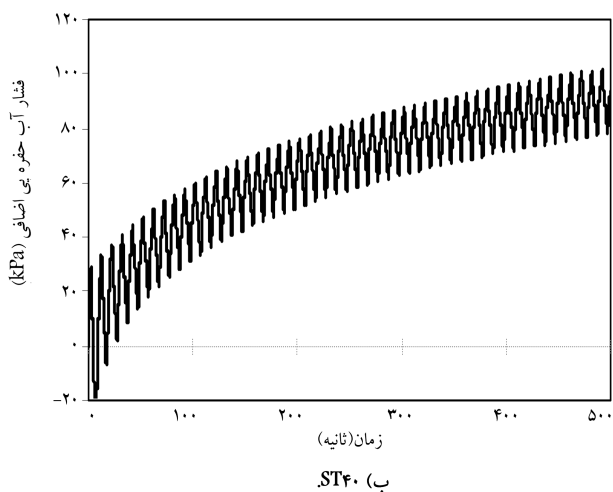
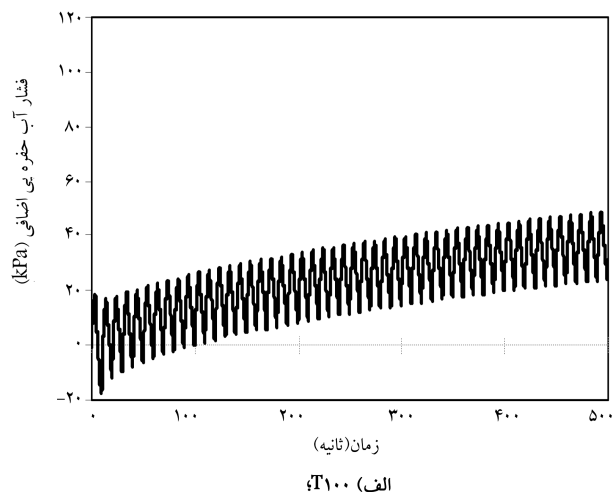
۴.۱. تحلیل عددی نمونه‌ی تحکیم‌یافته‌ی زه‌کشی نشده تحت

بارگذاری یکنواخت

تحلیل عددی دو نمونه رس خالص ($T100^\circ$) و رس مخلوط ($ST40^\circ$) تحت بارگذاری یکنواخت به‌منظور تدقیق پارامترهای مدل و مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش انجام شده است. در این حالت نمونه‌ها مشابه با شرایط اعمال شده در آزمایشگاه، در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس به‌صورت سه‌بعدی و با استفاده از ۲۰۸ المان هشت‌گره‌ی و ۲۹۷ گره مدل‌سازی و تحلیل شدند. ابعاد نمونه، نحوه‌ی المان‌بندی و هندسه‌ی تغییرشکل‌یافته‌ی نمونه در اثر بارگذاری یکنواخت در شکل ۳ ارائه شده است. در شکل ۴ تغییرات فشار آب حفره‌یی و تنش تفاضلی در برابر کرنش محوری برای تحلیل عددی نمونه $T100^\circ$ در تنش‌های محصورکنندگی مختلف با نتایج آزمایش‌ها مقایسه شده است. نمودارهای مشابه برای نمونه $ST40^\circ$ در شکل ۵ ارائه شده است.

مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که در تحلیل عددی نیز مانند نتایج آزمایش‌ها، با افزودن مصالح دانه‌یی به رس خالص، فشار آب حفره‌یی، به‌ویژه در تنش‌های محصورکنندگی بالا، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن است که تغییرات تنش تفاضلی و فشار آب حفره‌یی با کرنش محوری برای نمونه‌ی $ST40^\circ$ در تنش محصورکنندگی مؤثر 350 kPa نسبت به تنش‌های محصورکنندگی مؤثر 100 kPa و 200 kPa اختلاف بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

علت موضوع اخیر را می‌توان چنین بیان کرد: تداخل اولیه‌ی نمونه‌ها پس از ساخت با تداخل نمونه بعد از اعمال تنش محصورکنندگی مؤثر همه‌جانبه (بعد از برش) متفاوت است و با افزایش تنش محصورکنندگی، تداخل نمونه کاهش می‌یابد. در حالی که در تحلیل‌های انجام‌شده در کلیه‌ی تنش‌های محصورکنندگی، مقدار

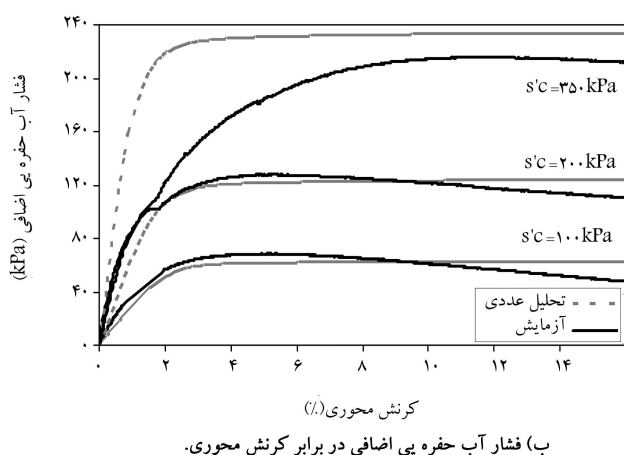
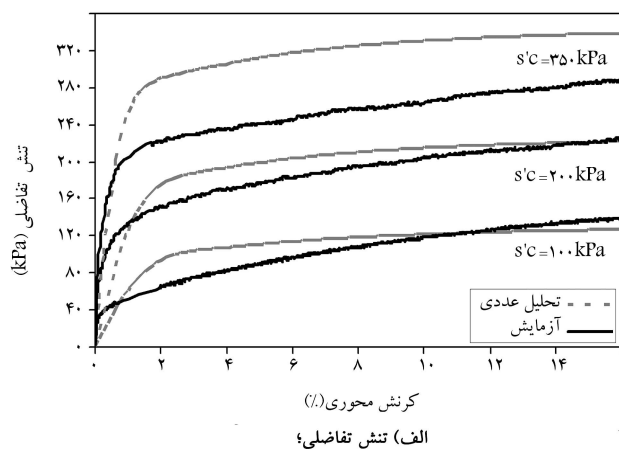


شکل ۲. تغییرات فشار آب حفره‌یی مازاد در آزمایش سه‌محوری تناوبی با کرنش محوری ۱٪ و تنش محصورکنندگی 200 kPa [۱]

۳. نرم‌افزار، مدل استفاده‌شده و پارامترهای خاک

برای مدل‌سازی عددی نمونه‌ها در شرایط بارگذاری یکنواخت از نسخه‌ی ۶/۷ نرم‌افزار آباکوس، [۹] و در شرایط بارگذاری تناوبی و تحلیل تراوش از مجموعه نرم‌افزارهای ژئوسلوپ [۱۰] استفاده شد. هر دو نرم‌افزار برای تحلیل از روش اجزاء محدود بهره‌می‌گیرند و قادر به مدل‌سازی محیط‌های خاکی هستند. مدل رفتاری مصالح برای تحلیل عددی نمونه‌ها مدل‌های موه‌رکولمب، دراگر-پراگر و کم-کلی بود و در نهایت به‌دلیل نزدیکی جواب‌های مدل کم-کلی به نتایج آزمایش‌ها، این مدل به‌عنوان مدل رفتاری برای تحلیل عددی سد خاکی فرضی انتخاب شد.

در مدل کم-کلی پارامترهای استفاده‌شده برای نمونه‌های $T100^\circ$ و $ST40^\circ$ در تنش‌های محصورکنندگی مؤثر مختلف با استفاده از روابط ۱ تا ۵ و نتایج آزمایش سه‌محوری [۱] و نیز مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش‌ها تعیین شد. این پارامترها برای تحلیل‌های یکنواخت و تناوبی یکسان در نظر گرفته شده و در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول مقادیر نشانه‌ی خلاء اولیه و ضریب نفوذپذیری از نتایج آزمایش استخراج شد. [۱]

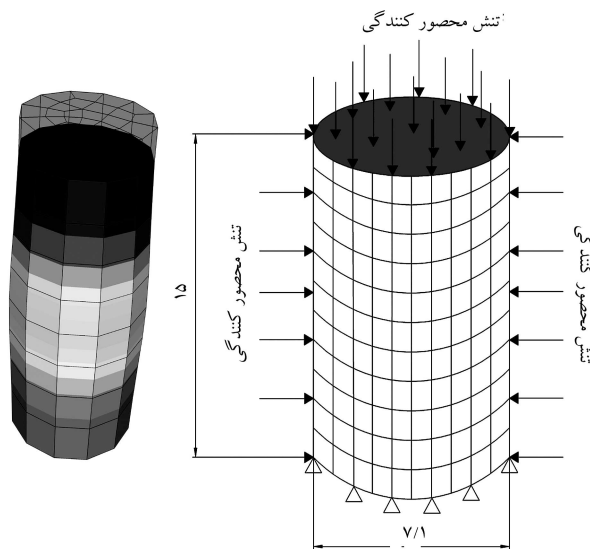


شکل ۵. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی نمونه ST40 در تنش های محصورکنندگی مختلف.

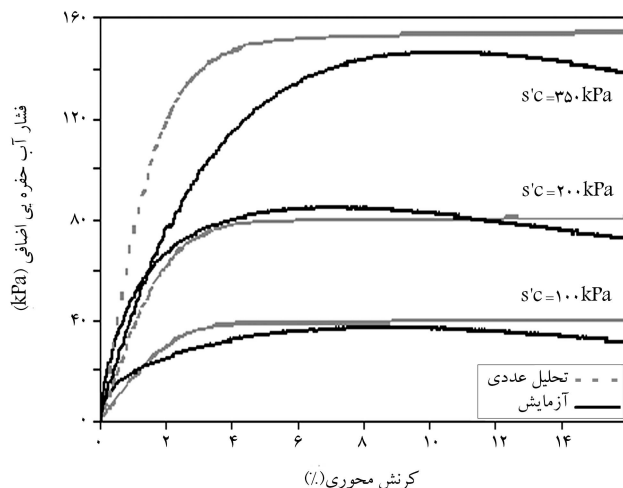
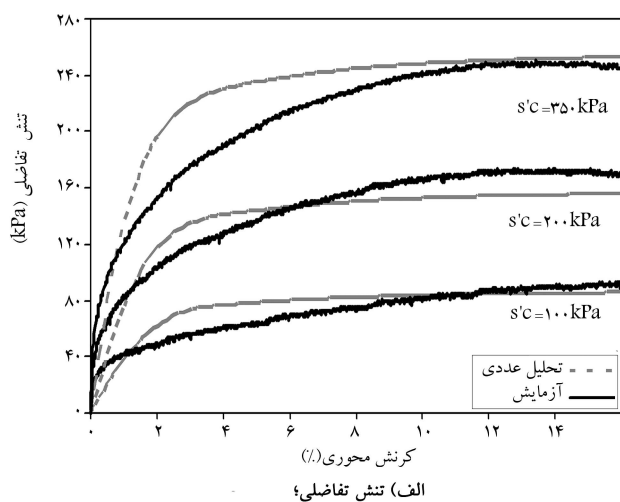
تخلخل نمونه ها همان تخلخل اولیه در نظر گرفته شده است. در واقع تخلخل هنگام شروع برش زهکشی نشده برابر تخلخل اولیه نمونه فرض شده است. چنان که می دانیم هر قدر تخلخل نمونه کم تر باشد، فشار آب حفره بی کم تری نیز در نمونه ایجاد می شود. بنابراین با توجه به نحوه مدل سازی، بدیهی است که با افزایش تنش محصورکنندگی اختلاف بین شرایط تحلیل عددی و آزمایشگاهی بیشتر می شود.

۲.۴. تحلیل عددی نمونه ی تحکیم یافته ی زهکشی نشده تحت بارگذاری تناوبی

نمونه های تحکیم یافته T100 و ST40 در تنش محصورکنندگی مؤثر 200 kPa با اعمال بارگذاری تناوبی کنترل کرنش در شرایط زهکشی نشده، با کرنش محوری 1٪ در مدت زمان 500 ثانیه با استفاده از مدل کم-کلی تحلیل عددی شدند. پارامترهای مدل کم-کلی قبلاً در جدول 1 ارائه شده است. نمونه ها به صورت تقارن محوری و با استفاده از 20 المان چهارگره ای و 33 گره مدل سازی و تحلیل شد. شکل 6 ابعاد و نحوه المان بندی و شمای بارگذاری تناوبی اعمال شده به نمونه ها را نشان می دهد. لازم به ذکر است که شرایط مرزی در اطراف نمونه طوری تعریف شدند که در حین بارگذاری امکان زهکشی از اطراف نمونه وجود نداشته باشد. نتایج حاصل از این تحلیل ها به صورت تغییرات فشار آب حفره بی مازاد برحسب زمان با نتایج آزمایشگاهی در شکل 7 برای هر دو نمونه مقایسه شده است.



شکل ۳. ابعاد نمونه (cm)، نحوه المان بندی و هندسه ی تغییر شکل یافته ی نمونه بر اثر بارگذاری یکنواخت.



شکل ۴. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی نمونه T100 در تنش های محصورکنندگی مختلف.

ST۴۰ بیشتر از نتایج آزمایش و برای نمونهی T۱۰۰ کم تر از نتایج آزمایش است. با این حال مقدار فشار آب حفره‌یی در دوره‌ی پایانی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.

۵. تحلیل عددی سد خاکی فرضی

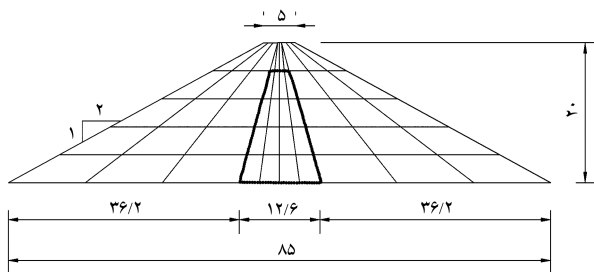
برای ارزیابی رفتار مصالح رس خالص و رس مخلوط در سازه‌های خاکی، یک سد خاکی فرضی با هسته‌ی مرکزی قائم در دو حالت: ۱. هسته‌ی متشکل از مصالح رس خالص (T۱۰۰)؛ ۲. هسته‌ی متشکل از مصالح رس مخلوط (ST۴۰) تحلیل شدند. ارتفاع کل سد و هسته‌ی آن به ترتیب ۲۰ و ۱۶ متر انتخاب شد. شیب پوسته ۲ به ۱ و شیب هسته ۳ به ۰٫۳ (افقی به قائم) انتخاب شده و فرض شد اجرای سد به صورت ساخت لایه‌لایه (۵ لایه‌ی ۴ متری) باشد. چنان که پیش‌تر اشاره شد مدل رفتاری مورد استفاده در تحلیل عددی مدل کم‌کلی بود و پارامترهای آن از میانگین پارامترهای مدل کم‌کلی در تنش‌های محصورکنندگی مؤثر مختلف به دست آمده بودند. پارامترهای مدل کم‌کلی برای مصالح هسته‌ی T۱۰۰، ST۴۰، و مصالح پوسته‌ی سد در جدول ۲ ارائه شده است.

۱.۵. مرحله‌ی ساخت لایه‌لایه سد

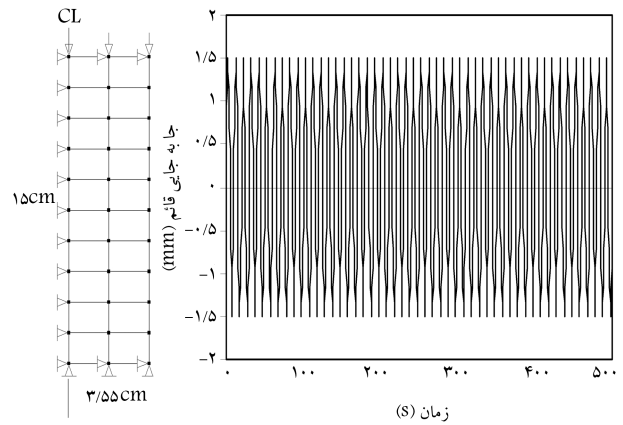
سد خاکی فرضی، با ابعاد و المان‌بندی ارائه‌شده در شکل ۸، یک بار با هسته‌ی رسی خالص و بار دیگر با هسته‌ی مخلوط تحلیل عددی شد. در این تحلیل‌ها دو نوع شرط مرزی برای هسته‌ی سد در نظر گرفته شد، به طوری که در حالت اول زهکشی فشار آب حفره‌یی از هسته امکان‌پذیر نبود (تحلیل کاملاً زهکشی‌نشده) و در حالت دوم امکان خروج آب و تحکیم لایه‌ها در حین تحلیل عددی وجود داشت (تحلیل همراه با تحکیم لایه‌ها). برای این که در حین مدل‌سازی مرحله‌ی اجرای لایه‌لایه‌ی سد در روش کاملاً زهکشی‌نشده، زمان کافی برای بازتوزیع فشار آب حفره‌یی در هسته‌ی سد خاکی وجود داشته باشد، زمان ساخت به‌اندازه‌ی کافی در نظر گرفته شد. در تحلیل عددی با فرض تحکیم لایه‌ها نیز برای ساخت هر لایه ۳۰ روز، یعنی زمانی

جدول ۲. پارامترهای مدل کم‌کلی هسته و مدل کشسانی پوسته‌ی سد خاکی فرضی.

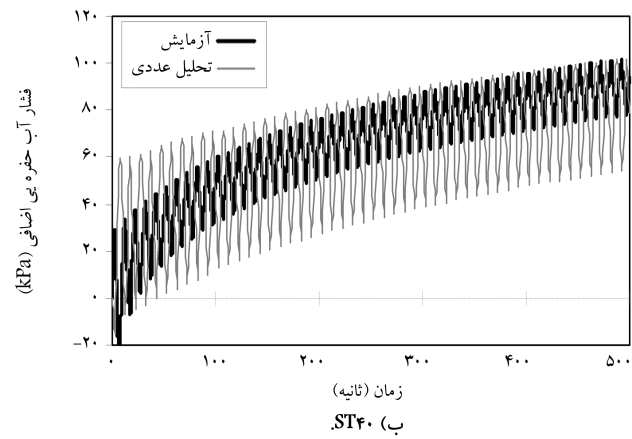
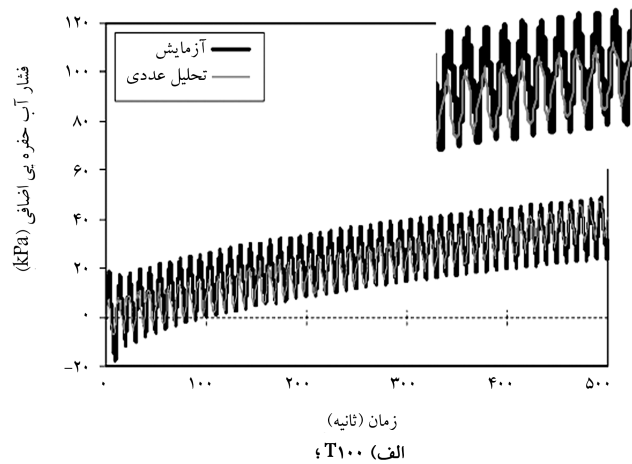
مصالح	M	λ	κ	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	K (cm/s)
T۱۰۰	۰٫۸۷	۰٫۰۹	۰٫۰۶۷	۱۰۰۰۰	۰٫۳	۱۸	۶٫۰۷E-۱۰
ST۴۰	۱٫۳۴۹	۰٫۰۷۵	۰٫۰۳۷	۳۰۰۰۰	۰٫۳	۱۸	۶٫۷۶E-۰۹
پوسته	-	-	-	۵۰۰۰۰	۰٫۲۵	۲۰	-



شکل ۸. هندسه و نحوه‌ی المان‌بندی سد خاکی فرضی در تحلیل عددی ساخت لایه‌لایه (ابعاد برحسب متر).



شکل ۶. نحوه‌ی المان‌بندی و ابعاد نمونه در بارگذاری تناوبی با کرنش محوری ۱٪ و تابع بارگذاری.



شکل ۷. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایش کنترل کرنش بر اثر اعمال کرنش محوری تناوبی ۱٪ و تنش محصورکنندگی ۲۰۰ kPa.

نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که مقدار فشار آب حفره‌یی مازاد حاصل از تحلیل‌های عددی نیز مشابه نتایج آزمایشگاهی، با افزایش تعداد دوره‌های بارگذاری بیشتر می‌شود و افزودن دانه‌ها به رس خالص نیز باعث زیاد شدن فشار آب حفره‌یی می‌شود. دامنه‌ی تغییرات فشار آب حفره‌یی با نتایج آزمایش یکسان نیست و دامنه‌ی تغییرات برای نمونه‌ی

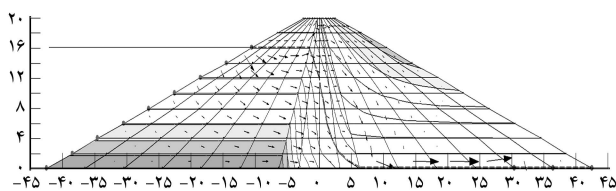
در حین ساخت سد نزدیک به شرایط سطوح تنش مساوی در آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده‌ی نمونه‌هاست.

درمورد علت کاهش نشست می‌توان گفت: در هنگام تحکیم خاک، تنش محصورکنندگی افزایش می‌یابد و چون در مدل کم‌کلی سختی مصالح تابعی از تنش محصورکنندگی است، با افزایش تنش محصورکنندگی سختی خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه با افزایش سختی مصالح نشست کاهش می‌یابد.

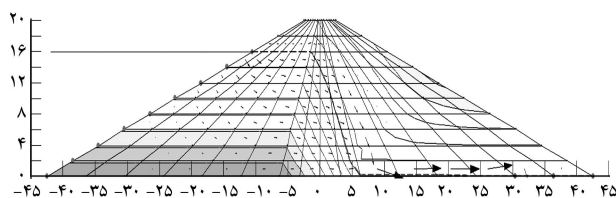
۲.۵. تحلیل تراوش سد

برای انجام تحلیل عددی با بارگذاری تناوبی بر روی سد خاکی در شرایط بعد از آبگیری، فرض شد که بارگذاری تناوبی پس از برقراری تراوش دائم در سد اعمال شده باشد.

در تحلیل تراوش، ارتفاع آب در بالادست سد معادل ۱۶ متر و در پایین‌دست سد برابر صفر فرض شد. برای هر دو سد با هسته‌های $T100$ و $ST40$ سطح آزاد آب به دست آمد. در شکل ۱۰ سطح آزاد آب بعد از تحلیل تراوش برای هر دو سد نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در سد خاکی با مصالح هسته‌ی رس خالص، به دلیل نفوذپذیری کم نسبت به هسته‌ی با مصالح رس مخلوط، سطح آزاد آب بالاتر بوده و فشار آب حفره‌ی ناشی از بار آب در سد خاکی در مصالح هسته $T100$ نیز بیشتر از مصالح هسته $ST40$ است. به عبارتی با افزایش مصالح دانه‌ی در هسته‌ی سد خاکی، نرخ تراوش از هسته‌ی سد افزایش می‌یابد.



الف) $T100$



ب) $ST40$

شکل ۱۰. سطح آزاد آب بعد از تحلیل تراوش برای سد خاکی فرضی با مصالح هسته.

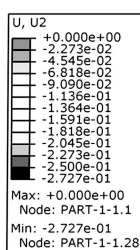
جدول ۳. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه و کمینه‌ی پارامترهای مورد بررسی در هسته‌ی سد خاکی با مصالح $T100$ و $ST40$ در دو روش کاملاً زهکشی‌نشده و تحکیم‌یافته‌ی ساخت لایه‌لایه.

نشست δ_y (cm)		فشار آب حفره‌ی مازاد Δu (kPa)			مدل	روش ساخت سد
$ST40$	$T100$	$ST40$	$T100$	مصالح هسته		
۱۶٫۴۶	۲۷٫۲۷	۲۰٫۵٫۳	۲۲٫۲٫۵۶	حداکثر	کم‌کلی	کاملاً زهکشی‌نشده
		۲۹٫۳۶	۲۳٫۱۰۵	حداقل		
۱۷٫۴۱	۱۵٫۲۰	۵۷٫۰۱	۱۹٫۵٫۰۱	حداکثر	کم‌کلی	تحکیم یافته
		-	-	حداقل		

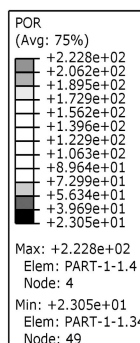
معادل ۱۵ روز، برای ساخت کل سد در نظر گرفته شد. در این تحلیل‌ها، نشست قائم و فشار آب حفره‌ی در هسته به‌عنوان پارامترهای مهم در پایداری سد مورد بررسی قرار گرفتند.

شکل ۹ خطوط هم‌تراز فشار آب حفره‌ی و نشست قائم را برای سد خاکی با هسته $T100$ نشان می‌دهد. در جدول ۳ مقایسه‌ی مقدار فشار آب حفره‌ی، نشست قائم و نسبت فشار آب حفره‌ی بیشینه برای مصالح $T100$ در حالت کاملاً زهکشی‌نشده، و $ST40$ برای حالت همراه با تحکیم لایه‌ها ارائه شده است.

مقایسه‌ی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که صرف‌نظر از روش تحلیل، مقادیر فشار آب حفره‌ی و نشست قائم با افزودن مصالح دانه‌ی رس خالص کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در آزمایش سه‌محوری نمونه‌ها در آزمایشگاه و در شرایط سطوح تنش مساوی، افزایش دانه‌ها در رس خالص باعث کاهش فشار آب حفره‌ی می‌شود. به عبارت دیگر، نحوه‌ی تولید فشار آب حفره‌ی



الف) نشست قائم

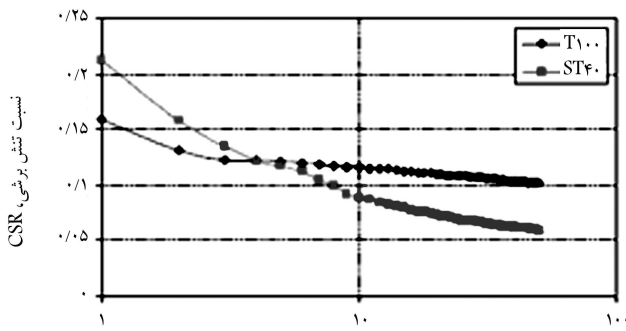
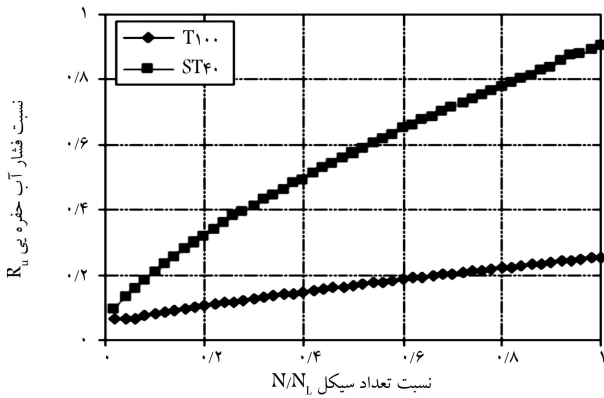


ب) فشار آب حفره‌ی برای سد خاکی با مصالح هسته $T100$ در روش تحلیل ساخت لایه‌لایه کاملاً زهکشی‌نشده سد خاکی.

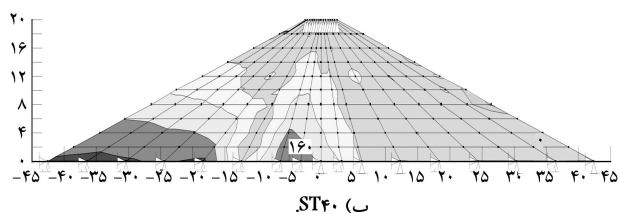
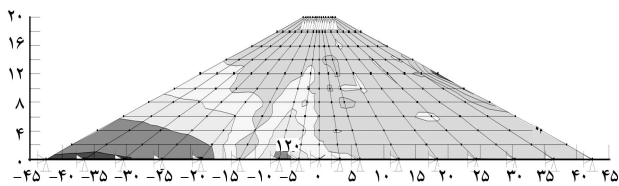
شکل ۹. خطوط هم‌تراز.

تناوبی و تغییرات نسبت تنش برشی در برابر تعداد دوره‌های بارگذاری تناوبی است (شکل ۱۲).

نتایج تحلیل به صورت خطوط تراز فشار آب حفره‌یی برای هر دو سد با مصالح هسته $T100$ و $ST40$ در شکل ۱۳ ارائه شده است. مقادیر فشار آب حفره‌یی برای هر دو سد خاککی در نقاط هدف ذکر شده در شکل ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین مقادیر نشست قائم در امتداد محور مرکزی سد و جابه‌جایی افقی سد در تراز +۸ متر برای هر دو سد در شکل ۱۵ ارائه شده است.



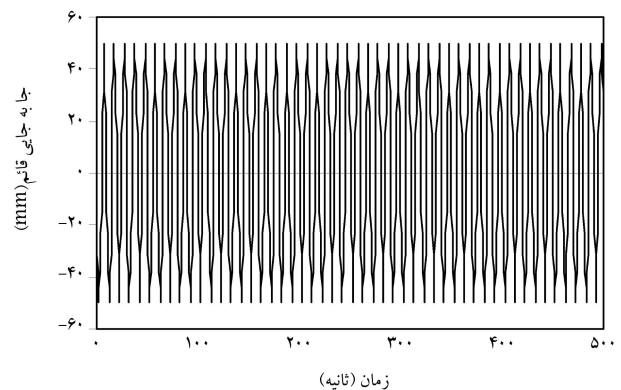
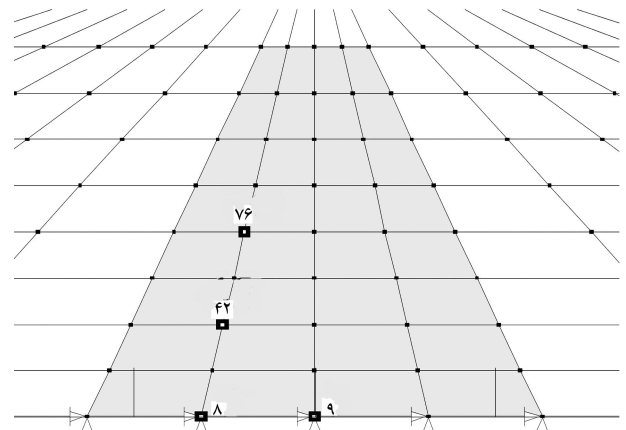
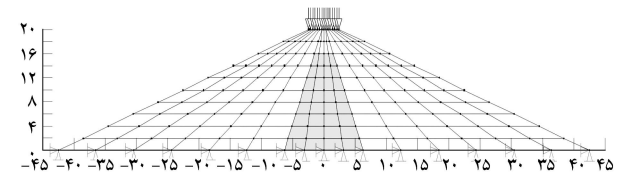
شکل ۱۲. توابع مورد نیاز جهت مدل‌سازی در شرایط بارگذاری تناوبی.



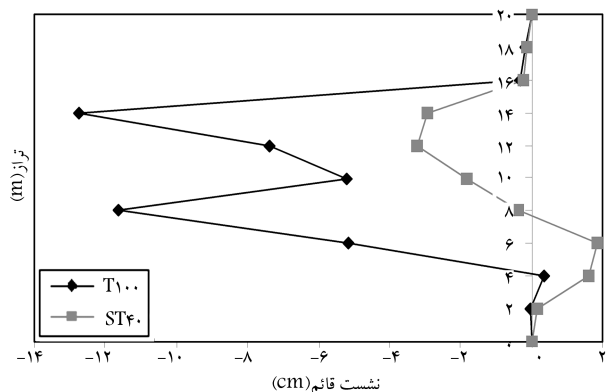
شکل ۱۳. خطوط هم‌تراز فشار آب حفره‌یی حاصل از تحلیل عددی حاصل از اعمال بار تناوبی فرضی بر روی تاج سد خاککی فرضی با مصالح هسته.

۳.۵. تحلیل عددی با بارگذاری تناوبی فرضی روی تاج سد

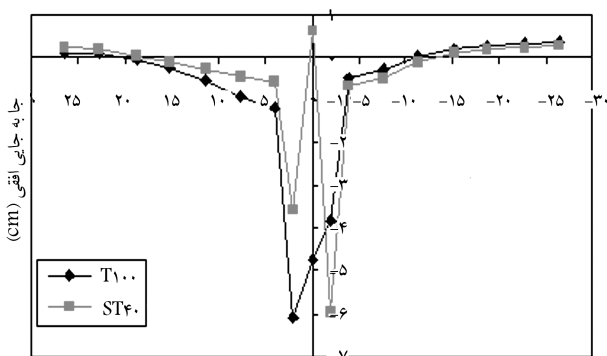
بر روی هر دو سد خاککی با هسته‌های متفاوت با اعمال بارگذاری تناوبی فرضی با کرنش 0.25% ارتفاع سد (معادل ۵ cm جابه‌جایی قائم در تاج سد) تحلیل عددی انجام گرفت. در این تحلیل بار وارده به صورت تغییر شکل از بالای تاج سد در 5° دوره، و با فرکانس 0.1 Hz به سد خاککی اعمال شد. این تحلیل بعد از ساخت لایه‌لایه‌یی سد و تراوش سد به صورت دوبعدی و با استفاده از مدل کم‌کلی انجام شد. تنش‌های حاصل از ساخت لایه‌لایه‌یی سد با مدل کشسانی و سطح آب آزاد به دست آمده از تحلیل تراوش به عنوان شرایط اولیه در تحلیل اعمال شدند. هندسه، نحوه‌ی المان‌بندی، تابع کرنش محوری تناوبی و نیز نقاط هدف برای بررسی فشار آب حفره‌یی در شکل ۱۱ ارائه شده است. پارامترهای مدل کم‌کلی مورد استفاده در تحلیل عددی سد خاککی با بارگذاری تناوبی، همان پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عددی با بارگذاری یکنواخت است. لذا برای اعمال شرایط بارگذاری تناوبی دو تابع برای هسته‌های $T100$ و $ST40$ در نظر گرفته شد. این توابع به ترتیب تابع تغییرات نسبت فشار آب حفره‌یی در برابر نسبت تعداد دوره‌ی بارگذاری



شکل ۱۱. شکل، ابعاد، نحوه‌ی المان‌بندی و تابع بارگذاری سد خاککی فرضی و نقاط هدف برای خواندن فشار آب حفره‌یی.



الف) نشست قائم در امتداد قائم و مرکز سد؛



فاصله از محور قائم (m)

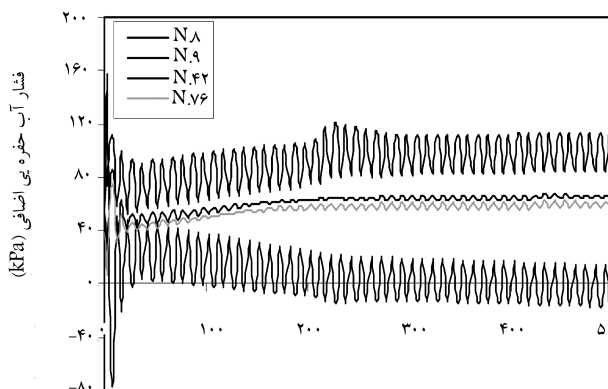
ب) جا به جایی افقی در تراز +8 متر حاصل از تحلیل عددی حاصل از اعمال بار تناوبی فرضی بر روی تاج سد خاکی فرضی.

شکل ۱۵. نمودار مقایسه جابه‌جایی قائم و افقی سد خاکی فرضی با دوهسته مختلف حاصل از اعمال بارگذاری تناوبی فرضی.

جدول ۴. مقادیر بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی و نشست قائم سد خاکی با مصالح هسته‌ی T_{100} و ST_{40} در تحلیل عددی حاصل از اعمال بار تناوبی فرضی روی تاج سد خاکی فرضی.

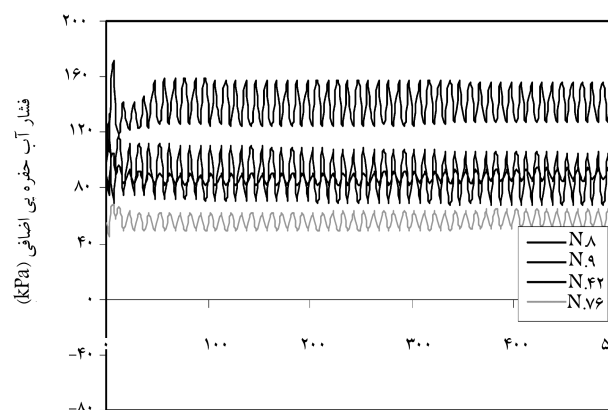
ST_{40}	T_{100}	نقاط هدف	
۱۵۶٫۴۴	۱۱۳٫۵۶	۸	فشار آب حفره‌یی (kPa)
۱۰۵٫۱۰	۱۴٫۲۴۹	۹	
۹۱٫۳۰۶	۶۴٫۰۸۲	۴۲	
۶۵٫۴۳۶	۵۶٫۴۷۶	۷۶	
۳٫۲۲۲	۱۲٫۷۴۳	نشست قائم، δ_y (cm)	

در حدود ۷ برابر مقدار متناظر در هسته‌ی T_{100} است. در این گره (مطابق شکل ۱۴ الف) با افزایش تعداد دوره‌ها، فشار آب حفره‌یی در هسته‌ی T_{100} کاهش می‌یابد. نشست قائم بیشینه در هر دو سد در قسمت میانی سد اتفاق می‌افتد و مقدار آن در سد خاکی با مصالح هسته‌ی T_{100} در حدود ۴ برابر بیشتر از سد خاکی با مصالح هسته‌ی ST_{40} است. به عبارت دیگر، افزودن ۶۰ درصد ماسه به رس خالص، باعث کاهش ۷۵ درصدی نشست قائم در بارگذاری قائم تناوبی، و افزایش ۳۵ درصدی فشار آب حفره‌یی در بحرانی‌ترین گره هسته‌ی سد خاکی می‌شود.



زمان (ثانیه)

الف) T_{100} ؛



زمان (ثانیه)

ب) ST_{40} .

شکل ۱۴. مقایسه فشار آب حفره‌یی در نقاط هدف حاصل از تحلیل عددی حاصل از اعمال بار تناوبی فرضی روی تاج سد خاکی فرضی با مصالح هسته.

مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که بر اثر بارگذاری تناوبی فرضی، در سد خاکی با هسته‌ی ST_{40} فشار آب حفره‌یی بیشتری نسبت به سد خاکی با هسته‌ی T_{100} ایجاد می‌شود. به طوری که به استثنای گره ۹ برای مصالح T_{100} ، با افزایش تعداد دوره‌های بارگذاری، فشار آب حفره‌یی نیز زیاد می‌شود و نرخ افزایش در دوره‌های اولیه بیشتر و در دوره‌های بالا کند یا ثابت می‌شود. همچنین نشست قائم سد خاکی با مصالح هسته‌ی T_{100} بیشتر از سد خاکی با مصالح هسته‌ی ST_{40} است.

جابه‌جایی افقی سد، به دلیل ماهیت بارگذاری که از نوع کرنش محوری قائم بود، در هر دو سد خاکی برابر و در حدود ۶ cm است. با مقایسه‌ی خطوط هم‌تراز فشار آب حفره‌یی برای هر دو سد در شکل ۱۳ مشخص می‌شود که گستردگی فشار آب حفره‌یی در سد با هسته‌ی ST_{40} بیشتر است. در جدول ۴ مقادیر بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی و نشست قائم در نقاط هدف مورد بررسی، برای دو سد با هسته‌های T_{100} و ST_{40} ، ارائه شده است.

از مقایسه‌ی مقادیر فشار آب حفره‌یی در جدول ۴ درمی‌یابیم که مقدار بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی در گره ۸ ایجاد می‌شود و این مقدار برای سد با مصالح هسته‌ی ST_{40} حدود ۳۵٪ بیشتر از سد با مصالح هسته‌ی T_{100} است. البته بیشترین اختلاف فشار آب حفره‌یی در گره ۹ است که فشار آب حفره‌یی در هسته‌ی ST_{40}

جدول ۵. کل نتایج حاصل از تحلیل های عددی.

فشار آب حفره‌یی در هسته‌ی سد (kPa)		تحلیل عددی
ST۴۰	T۱۰۰	
۵۷	۱۹۵	ساخت لایه لایه (همراه با تحکیم)
۱۶۰	۱۲۰	آبگیری و بارگذاری تناوبی
۲۱۷	۳۱۵	جمع

پایان هر سه تحلیل ساخت لایه‌لایه، آبگیری و تحلیل بر اثر اعمال بار تناوبی فرضی روی تاج سد برای دو هسته‌ی T۱۰۰ و ST۴۰ با یکدیگر مقایسه شود.

برای روشن شدن مطلب، نتایج فشار آب حفره‌یی بیشینه حاصل از تحلیل های ساخت لایه‌لایه در شرایط همراه با تحکیم و بارگذاری تناوبی پس از آبگیری برای سد خاکی فرضی با مصالح هسته‌ی T۱۰۰ و ST۴۰ در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۵ می‌توان گفت که افزودن ۶۰ درصدی مصالح دانه‌یی به رس خالص در هسته‌ی سدهای خاکی باعث کاهش فشار آب حفره‌یی در پایان بارگذاری تناوبی می‌شود. بنابراین در هسته‌ی سدهای خاکی، رس مخلوط می‌تواند جایگزینی مناسب برای رس خالص باشد تا علاوه بر بهبود خواص مقاومتی سد خاکی، کاهش نشست‌ها، جلوگیری از ترک‌خوردگی ناشی از خشک‌شدگی، از بین بردن اختلاف سختی هسته و پوسته‌ی سد خاکی و کاهش پتانسیل وقوع قوس‌زدگی^۱ باعث کاهش فشار آب حفره‌یی اضافی به‌عنوان یکی از عوامل مهم در تخریب و ناپایداری سدهای خاکی شود.

۷. فهرست علائم

- G_s : توده‌ی ویژه‌ی خاک
- PI : نشانه‌ی خمیری
- P : تنش میانگین
- E : مدول کشسانی
- φ' : زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر
- c' : چسبندگی مؤثر
- σ'_n : تنش نرمال مؤثر
- σ_1 و σ_3 : تنش‌های اصلی قائم و افقی
- Δu : فشار آب حفره‌یی مازاد
- k : ضریب نفوذپذیری
- λ : ثابت سخت‌شوندگی لگاریتمی
- k : مدول بالک لگاریتمی
- M : نسبت تنش در حالت بحرانی
- e : نسبت تخلخل اولیه
- γ : وزن مخصوص

۶. نتیجه‌گیری

در این بخش نتایج تحلیل‌های عددی انجام‌شده بر روی مصالح رس خالص و رس مخلوط به‌صورت خلاصه ارائه شده و در پایان پیشنهاد لازم در خصوص انتخاب مصالح هسته‌ی سد خاکی ارائه می‌شود. اهم نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی عبارت است از:

۱. تحلیل عددی نمونه‌های T۱۰۰ و ST۴۰ نشان داد که براساس نتایج آزمایشگاهی^[۱] در شرایط کنترل کرنش با افزودن مصالح دانه‌یی به رس خالص، فشار آب حفره‌یی افزایش می‌یابد در حالی که در شرایط سطوح تنش مساوی کاهش می‌یابد.

۲. ساخت لایه‌لایه‌ی سد خاکی که از نوع بارگذاری یکنواخت است، در شرایط کاملاً زه‌کشی‌نشده یا شرایط همراه با تحکیم، باعث می‌شود مقدار فشار آب حفره‌یی در سد با هسته‌ی T۱۰۰ بیشتر از هسته‌ی ST۴۰ باشد. اختلاف فشار آب حفره‌یی بیشینه در مصالح رس خالص و رس مخلوط در تحلیل لایه‌لایه‌ی سد خاکی همراه با تحکیم لایه‌ها بیشتر از تحلیل عددی کاملاً زه‌کشی‌نشده است. این نتیجه نشان می‌دهد که شرایط موجود در هنگام ساخت لایه‌لایه‌ی سد نزدیک به شرایط کنترل تنش در نمونه است. افزودن ۶۰ درصد ماسه به رس خالص در هسته‌ی سد خاکی باعث می‌شود تا در شرایط ساخت سد همراه با تحکیم لایه‌های سد، مقدار فشار آب حفره‌یی بیشینه در حدود ۲۴ درصد کاهش یابد.

۳. در تمام شرایط تحلیل عددی سد خاکی، افزودن مصالح دانه‌یی به رس خالص در هسته‌ی سد باعث بهبود خواص مقاومتی و کاهش نشست قائم و جابه‌جایی افقی سد می‌شود. دلیل این موضوع سخت‌تر شدن مصالح بر اثر افزایش مصالح دانه‌یی است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۶۰٪ مصالح دانه‌یی به خاک رس خالص سبب کاهش ۵۰ درصدی نشست قائم سد در حین ساخت لایه‌لایه و باعث کاهش ۷۵ درصدی آن در بارگذاری تناوبی کرنش کنترل می‌شود.

۴. تحلیل عددی سد خاکی فرضی نشان داد که بارگذاری قائم تناوبی فرضی روی تاج سد، فشار آب حفره‌یی بیشتری را در سد با مصالح هسته‌ی مخلوط (ST۴۰) ایجاد می‌کند. نتایج حاصله خاکی از آن است که با افزایش تعداد دوره‌های بارگذاری، فشار آب حفره‌یی افزایش می‌یابد. نرخ افزایش فشار آب حفره‌یی در دوره‌های اولیه بیش از دوره‌های بعدی است. مقایسه‌ی مقدار فشار آب حفره‌یی در گره هدف ۸ برای دو هسته‌ی T۱۰۰ و ST۴۰ نشان می‌دهد که وجود ۶۰ درصدی مصالح دانه‌یی در رس خالص باعث افزایش ۳۵ درصدی فشار آب حفره‌یی می‌شود.

۵. از بحث‌ها و تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان نتیجه گرفت اگرچه استفاده از رس مخلوط در هسته‌ی سد خاکی در مقایسه با رس خالص باعث کاهش نشست سد می‌شود ولی در بارگذاری تناوبی، که ماهیتی شبیه به بارگذاری زلزله دارد، فشار آب حفره‌یی بیشتری در آن ایجاد می‌شود. از طرف دیگر، در حین ساخت سد - در هر دو شرایط زه‌کشی‌نشده و همراه با تحکیم - فشار آب حفره‌یی ایجادشده در هسته‌ی رسی خالص به‌مراتب بیشتر از هسته‌ی رسی مخلوط است. در هنگام ساخت که امکان زه‌کشی آب و تحکیم لایه‌ها وجود دارد، تفاوت فشار آب حفره‌یی هسته‌ی رسی خالص و هسته‌ی رسی مخلوط بیشتر از شرایط زه‌کشی‌نشده است. بنابراین باید فشار آب حفره‌یی در

پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، صص ۲۱-۳۰ (۱۳۸۶).

پانویس

1. arching

منابع

۱. سلطانی جیقه، ح. «رفتار مکانیکی خاک های رسی مخلوط تحت بارگذاری های سیکلی و پس سیکلی» پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (۱۳۸۵).
۲. سلطانی جیقه، ح. و سروش، ع. «رفتار خاک های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت»، نشریه علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، دوره ۱۸ (۱۳۸۶).
3. Soroush, A. and Soltani-Jigheh, H. "Pre- and post-cyclic behavior of mixed clayey soils", *Accepted for publication in the Canadian Geotechnical Journal* (1388).
۴. بهرامی، ر. «ارزیابی و مقایسه تغییر شکل های سدهای خاکی با هسته رسی مختلط و هسته رسی خالص به هنگام زلزله (مطالعه موردی سد کرخه)»،

5. Mir Mohammad Hosseini, S.M. "Performance of mixed-clay as core material for earth dams", www:EJGE.com; **7**, Bundle A (2002).
6. Jafari, M.K. and Shafiee, A. "Mechanical behavior of compacted composite clays", *Canadian Geotechnical Journal*, **41**, pp. 1152-1167 (2004).
7. Vallejo, L.E. and Mawby, R. "Void ratio influence on the shear strength of granular material-clay mixtures", *Engineering Geology*, **58**, pp. 125-136 (2000).
8. Jalili, N. "Dynamic assessment of embankment with mixed clay core material by specific theory to pore water pressure changes", M.S. Thesis, iiees (1383).
9. ABAQUS 6.7, Simulia systems corp (2007).
10. Geo-Slope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada (2003).