

تحلیل عددی رفتار سدهای خاکی - سنگریزه‌ای حین ساخت و اولین آبیگری (مطالعه موردی: سد مسجد سلیمان)

سید محمدعلی زمردیان* و حسین چوچی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۶)

چکیده

افزایش فشار آب منفذی در سدهای با هسته رسی حین ساخت و اولین آبیگری می‌تواند باعث آغاز و یا پیشرفت شکست هیدرولیکی گردد. در این تحقیق ضمن مدل‌سازی سد مسجد سلیمان، تغییر شکل داخلی، فشار آب منفذی، ضریب فشار آب منفذی و تنش کل محاسبه شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردیده است. برای انجام آنالیز از نرم‌افزار *GEOSTUDIO* نسخه ۶.۰۲ که قابلیت ساخت لایه به لایه سد و انجام تحکیم دوبعدی همبسته رادارداستفاده شده است. مدل‌های رفتاری استفاده شده در تحلیل، مدل الاستیک خطی و الاستیک غیرخطی است. برای ارزیابی دقیق و به‌دست آوردن پارامترهای صحیح مدل رفتاری، آزمایش‌های سه محوری که روی مصالح هسته صورت گرفته است، مدل گردید. از مقایسه نتایج مدل‌سازی و ابزار دقیق می‌توان به رفتار مناسب سد و در نتیجه روند صحیح مدل‌سازی پی برد. هم‌چنین تأثیر آبیگری بر تغییر شکل، فشار آب منفذی، ضریب فشار آب منفذی و تنش کل ارزیابی گردیده است.

واژه‌های کلیدی: فشار آب منفذی، ابزار دقیق، سد مسجد سلیمان، مدل الاستیک غیرخطی، مدل الاستیک خطی، تحکیم همبسته

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mzomorod@shirazu.ac.ir

مقدمه

اطلاعات آماری اشاره بر این دارد که سدهای خاکی بیش از سدهای بتنی در معرض تخریب بوده، هم‌چنین بیش از ۵۰٪ خرابی‌ها یا آسیب‌دیدگی‌های سدهای خاکی در حین ساخت و یا در اولین آبیگری بوده است (۸)، شکست سد کانکی در سال ۱۸۹۵ در هندوستان، شکست سد سینکرکریک در آیداهو در سال ۱۹۴۳، تخریب سد مالپاست در فرانسه در سال ۱۹۶۱ و خرابی سد اوروس در برزیل در مارس ۱۹۶۰ مثال‌هایی در این زمینه هستند. به‌عنوان نمونه در ایران، سد خاکی مهاباد را می‌توان نام برد که در طی سال‌های ۴۹-۱۳۴۶ ساخته شد و طی اولین آبیگری ترک‌های عمیقی روی تاج و قسمت‌های مرکزی آن مشاهده گردید. افزایش فشار آب منفذی در سدهای سنگریزه‌ای با هسته رسی، در خلال ساخت و اولین آبیگری، می‌تواند باعث آغاز یا پیشرفت شکست هیدرولیکی گردد. توانایی پیش‌بینی گسترش و توزیع (زائل شدن) فشار آب منفذی در بررسی رفتار چنین سازه‌هایی از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۵).

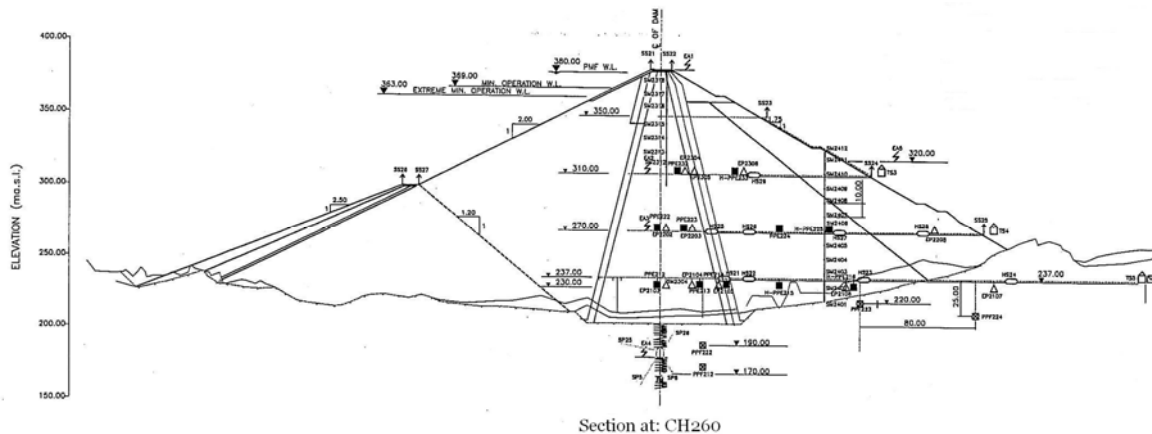
پاکزاد و میرمحمد حسینی (۱)، با استفاده از نتایج پیژومترهای به‌کار رفته در پی و بدنه سد کرخه، وضعیت سد پس از آبیگری را مورد بررسی قرار داده‌اند. چرخانوسکی و همکاران (۱۸)، پارامترهای مصالح سدهای خاکی، در دره و دریاچه *Diamond* را براساس اندازه‌گیری‌های ژئودزی مورد ارزیابی قرار داده و روشی با استفاده از آنالیز المان محدود، برای مدل‌سازی تأثیر اشباع بودن مصالح سد به منظور تعیین تغییر مکان‌ها در خلال آبیگری مخزن ارائه داده‌اند. نیرومند و همکاران (۶)، عملکرد سد کرخه که یکی از سدهای خاکی بزرگ ایران به شمار می‌رود را با استفاده از نتایج ابزار دقیق و آنالیز برگشتی که توسط نرم‌افزار *CA2* انجام گرفته است را مورد بررسی قرار داده و بیان نمودند که مقدار فشارهای منفذی ایجاد شده در داخل هسته در زمان ساخت سد با توجه به طولانی شدن مدت زمان اجرا و تغییر مصالح هسته از رس خالص به رس مخلوط حدود نصف مقادیر پیش‌بینی شده در

زمان طراحی بوده و پایین بودن فشارهای منفذی باعث بالارفتن ضریب اطمینان سد از لحاظ پایداری و گسیختگی هیدرولیکی شده است. در ضمن پدیده قوس‌شدگی (*Arching*) اتفاق افتاده در سد با مقادیر پیش‌بینی شده در زمان طراحی مطابقت خوبی دارد و مقدار آن در مقایسه با ضریب قوس‌زدگی سدهای دیگر دنیا در حد معقول و قابل قبولی ارزیابی شده است. ملکی و علوی‌فر (۱۵) رفتارنگاری سد مسجد سلیمان را به همراه آنالیز عددی توسط کد نرم‌افزاری *FLAC 4.0* مورد بررسی قرار داده‌اند. پارامترهای ضریب فشار آب منفذی و نسبت قوس‌شدگی را تعیین و بیان نمودند که تغییر شکل‌ها به‌علت اولین مرحله آبیگری مخزن سد، می‌توانند پایداری سد را به خطر بیندازند. در این تحقیق هدف اصلی تعیین و پیش‌بینی پارامترهای مدل رفتاری مناسب و سازگار، برای مصالح بدنه، پوسته و هسته سد مسجد سلیمان با استفاده از مدل‌سازی آزمایش‌های سه محوری و استفاده از روش آنالیز تحکیم همبسته (*Coupled Consolidation Analysis*) در محاسبه فشار آب منفذی ایجاد شده پس از تحکیم و مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج ابزار دقیق نصب شده در سد مسجد سلیمان است.

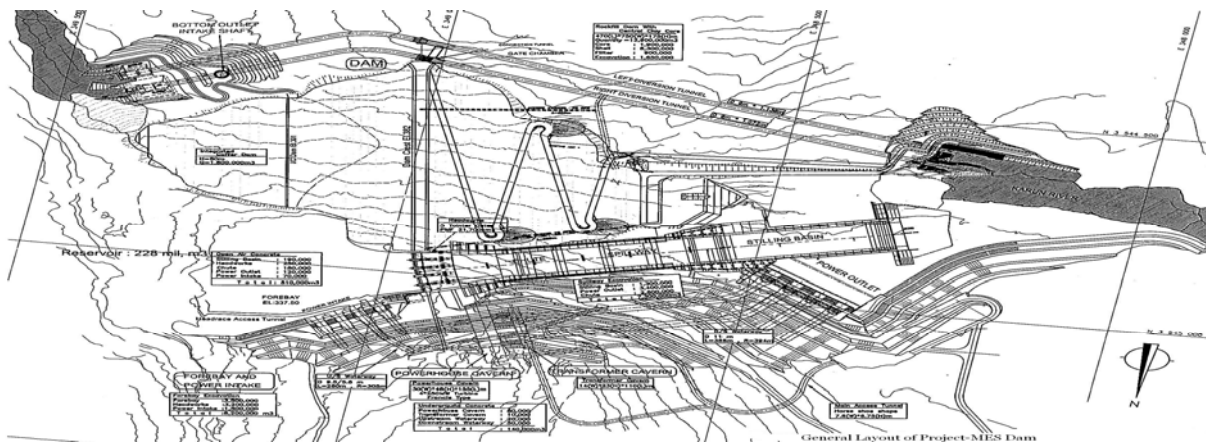
مواد و روش‌ها

۱. معرفی سد مسجد سلیمان

سد مسجد سلیمان از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم است، با ارتفاع حداکثر ۱۷۸ متر از پی سد، یکی از بلندترین سدهای خاکی ایران و دومین سد خاکی بلند خاورمیانه محسوب می‌شود. این سد در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مسجد سلیمان و در استان خوزستان به روی رودخانه کارون احداث شده است (۱۳). ارتفاع سد مورد مطالعه در مقطع حداکثر (*CH260*) برابر ۱۷۷ متر می‌باشد (شکل ۱). طول تاج سد ۴۹۰ متر و عرض پاشنه آن ۱۵ متر است. هم‌چنین شیب هسته ۰/۲۵:۱ و عرض بیشینه آن ۹۰ متر و ضخامت کلیه فیلترها و زهکش‌ها در بالادست و پایین‌دست هسته، ۵ متر است. هم‌چنین مصالح پی سد از جنس کنگلومرا و ماسه سنگ با لایه‌بندی



شکل ۱. مرتفع‌ترین مقطع عرضی سد مسجد سلیمان و نحوه ابزاربندی آن (CH260)



شکل ۲. طرح کلی سد مسجد سلیمان

۳. نشست سنج هیدرولیکی، ۴. فشارسنج خاک، ۵. فشارسنج آب منفذی در هسته (مدفون در خاکریز، سیم مرتعش)، ۶. فشارسنج آب منفذی در فیلتر و پوسته پایین دست (نوع مدفون در خاکریز، بیشاپ) ۷. فشارسنج آب منفذی در پی (نوع سیم مرتعش)، ۸. پیزومتر لوله‌ای یا کاساگرانده و ۹. چاه‌های مشاهده آب زیرزمینی

۳. مراحل مدل‌سازی سد

برای آنالیزهای مدل‌سازی از نرم‌افزار *GEOSTUDIO* استفاده شده است. این نرم‌افزار براساس روابط اجزاء محدود نوشته شده است. به وسیله این برنامه می‌توان ساخت لایه به لایه و مرحله‌ای سد و پدیده تحکیم را مدل‌سازی نمود (۱۳). مقطع

متناوب و با مقاومت زیاد است. در شکل ۲ طرح کلی سد مسجد سلیمان نشان داده شده است (۱۳).

۲. ابزارگذاری سد مسجد سلیمان

برای کنترل و بررسی رفتار سد در حین ساخت و آبیگری، ابزاربندی گسترده‌ای در مقاطع مختلف طولی و عرضی سد و همچنین در پی و تکیه‌گاه‌های آن انجام گرفته است. این ابزارها به منظور کنترل و اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر تنش کل، فشار آب منفذی، نشست‌ها و تغییرشکل‌های افقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزار زیر در بدنه و پی سد مسجد سلیمان نصب شده‌اند (۴):

۱. اندازه‌گیری نشست و تغییر شکل سطحی، ۲. انحراف سنج،

جدول ۱. خصوصیات تقریبی مصالح به کار رفته در هسته سد، در آزمایش‌های سه محوری

وزن مخصوص خشک تخمینی (kN/m^3) با استفاده از معادله <i>Walker Haltz</i>	درصد مصالح بالای قطر $4/76mm$	درصد <i>GC</i> و <i>CL</i>	نوع مصالح
۱۷/۹۶۴	۲۰	<i>GC:40%-CL60%</i>	<i>M1</i>
۱۸/۲۶۸	۲۸	<i>GC:60%-CL40%</i>	<i>M2</i>
۱۸/۵۸۲	۳۷	<i>GC:80%-CL20%</i>	<i>M3</i>

مدل‌سازی سد مسجد سلیمان و نیز برای سنجش دقت پارامترهای ورودی مدل الاستیک غیرخطی، آزمایش‌های سه‌محوری صورت گرفته روی مصالح بدنه سد در آزمایشگاه مکانیک خاک، مدل‌سازی شده است. سپس پارامترهای مدل رفتاری طوری انتخاب می‌شوند، تا نتایج آنالیز تنش-کرنش حاصل از تحلیل عددی بیشترین همخوانی و مطابقت را با نتایج آزمایش‌های سه محوری داشته باشد (۳). لذا در ابتدا پارامترهای ژئوتکنیکی نمونه در نرم‌افزار *SIGMA/W* و پارامترهای هیدرولیکی آن در نرم‌افزار *SEEP/W* وارد شده است و بسته به نوع آزمایش سه‌محوری از این دو نرم‌افزار به صورت همبسته استفاده می‌شود. نمونه مورد آزمایش در شرایط تقارن محوری مدل شده و ابتدا فشار همه‌جانبه و سپس فشار محوری به مدل اعمال می‌گردد. در ادامه، در خلال اعمال فشار محوری مقادیر کرنش قرائت شده و منحنی تنش انحرافی-کرنش محوری ترسیم می‌شود. سپس این منحنی‌ها با مقادیر حاصل از آزمایشگاه مقایسه می‌گردند. شایان ذکر است که نرم‌افزارهای *SEEP/W* و *SIGMA/W* دو نرم‌افزار از بسته نرم‌افزاری *GEOSTUDIO* هستند (۱۱ و ۱۲). سه نوع مصالح M_1 ، M_2 و M_3 برای استفاده در هسته سد مسجد سلیمان در نظر گرفته شده است، که در آنالیزهای استاتیکی مختلف نتایج نسبتاً مشابهی را ارائه نموده‌اند، خصوصیات این مصالح در جدول ۱ آورده شده است (۱۳).

در تحلیل هر مسأله توسط مدل‌های عددی، مهم‌ترین بخش، معرفی پارامترهای مدل است. در واقع غیر از نحوه المان‌بندی، تعریف شرایط مرزی مسأله و شرایط تکیه‌گاهی آنها که هر کدام

به عنوان مقطع حداکثر و بحرانی‌ترین مقطع، آنالیز گردیده است (شکل ۱).

۳.۱. انتخاب مدل رفتاری مصالح

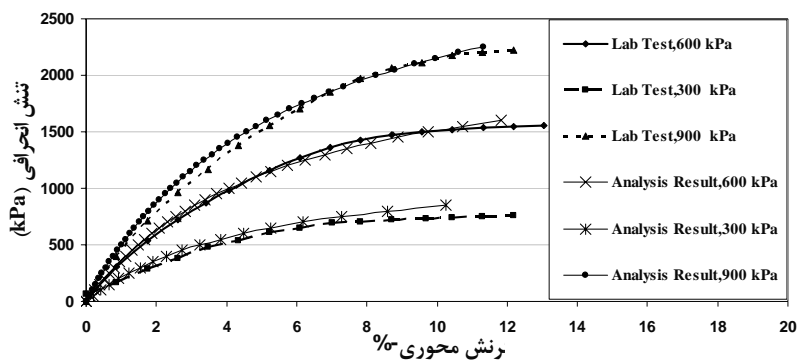
در مدل‌سازی به روش اجزای محدود، لزوماً در موارد زیر ایده‌آل‌سازی ضروری است:

۱. هندسه مدل ۲. روند ساخت و بارگذاری ۳. رفتار مصالح.
مدل رفتاری الاستیک غیرخطی که در بسته نرم‌افزار *Geostudio* موجود می‌باشد در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. که در واقع متشکل از آنالیزهای خطی است که به صورت متوالی انجام می‌شود و در هر مرحله بسته به تنش، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون تغییر می‌کنند.

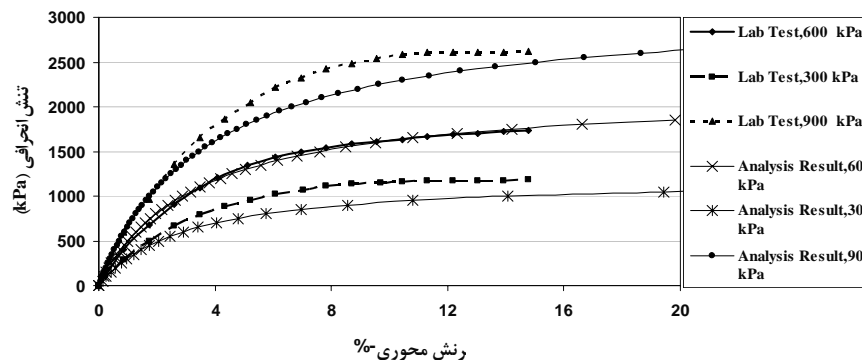
نرم‌افزار *SIGMA/W*، از فرمول‌های ارائه شده توسط *Duncan & Chang (1970)* برای مدول‌های مورد نیاز استفاده می‌کند. در این مدل رفتاری، فرمول‌بندی منحنی تنش-کرنش به صورت هذلولی است و مدول‌های خاک تابعی از تنش‌های همه‌جانبه و تنش برشی است که خاک تجربه می‌کند. این مدل غیرخطی مصالح را می‌توان از آزمایش‌های سه محوری به دست آورد. در تحلیل سد مسجد سلیمان از مدل رفتاری الاستیک غیرخطی (هایپربولیک) برای مصالح هسته سد و از مدل رفتاری الاستیک خطی برای دیگر مصالح سد استفاده شده است.

۳.۲. سنجش دقت پارامترهای مدل ساختاری الاستیک غیرخطی (هایپربولیک)

برای ارزیابی دقیق روش عددی و حصول نتایج قابل قبول از



شکل ۳. نتایج کالیبراسیون مصالح هسته سد، M_1 ، با مدل الاستیک غیرخطی و مقایسه نتایج تنش انحرافی - کرنش محوری بین مدل و نتایج آزمایشگاه در مصالح هسته در شرایط CD

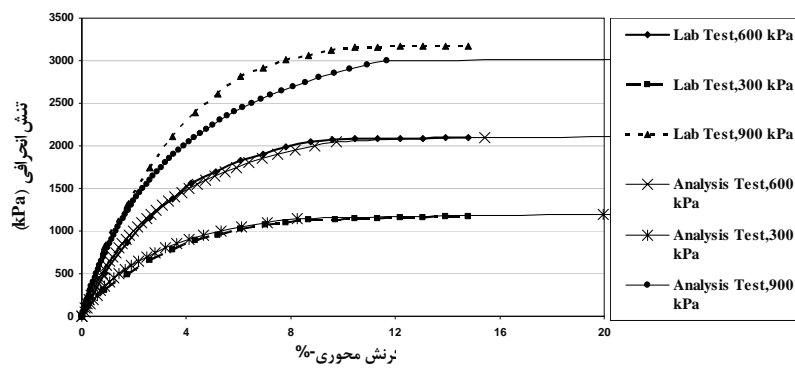


شکل ۴. نتایج کالیبراسیون مصالح هسته سد، M_2 ، با مدل الاستیک غیرخطی و مقایسه نتایج تنش انحرافی - کرنش محوری بین مدل و آزمایشگاه در مصالح هسته در شرایط CD

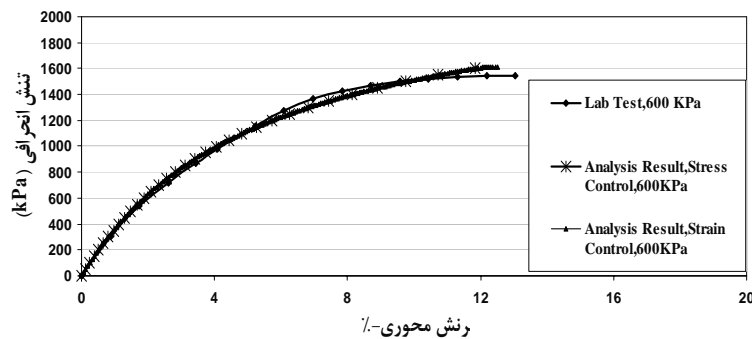
آزمایش سه محوری به صورت کنترل کرنش در حالت CU و CD نیز صورت گرفته است؛ که در شکل ۶ این منحنی‌ها برای مصالح M_1 آورده شده است.

با توجه به نمودارهای مذکور تطابق بسیار مناسبی بین مدل و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود و چون در مصالح نمونه‌ای M_1 این تطابق بین نتایج مدل و آزمایشگاه در هر دو نوع آزمایش کنترل کرنش و کنترل تنش مشاهده شده است، لذا پارامترهای مدل رفتاری الاستیک غیرخطی (هایپربولیک) این مصالح به عنوان مصالح مدل اصلی سد مسجد سلیمان انتخاب شده است. با توجه به این‌که آنالیز تنش مؤثر در شرایط زه‌کشی نشده و با در نظر گرفتن فشار آب منفذی انجام گرفته است، از پارامترهای تنش مؤثر هسته در آنالیز استفاده می‌گردد؛ لذا نتایج

نقش خاص و مؤثری را در نتایج تحلیل دارا هستند. لذا پیدا کردن پارامترهای صحیح و واقعی مدل و معرفی آن به برنامه، اصلی‌ترین بخش مدل‌سازی عددی است. مدل‌سازی تست‌های سه محوری CU و CD برای هر سه نوع نمونه مصالح هسته سد مسجد سلیمان و تحت فشارهای همه‌جانبه ۳۰۰ kPa، ۶۰۰ kPa و ۹۰۰ kPa صورت گرفته است. شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نتایج کالیبراسیون مصالح هسته سد را با مدل الاستیک غیرخطی و مقایسه نتایج تنش انحرافی - کرنش محوری بین مدل و آزمایشگاه در مصالح هسته را فقط در شرایط تحکیم‌یافته زه‌کشی شده نشان می‌دهد. شایان ذکر است که آزمایش‌های سه محوری مدل شده براساس کنترل تنش بوده و برای مصالح M_3, M_2, M_1 ، فقط، در تنش محصورکننده ۶۰۰ kPa مدل



شکل ۵. نتایج کالیبراسیون مصالح هسته سد، M_3 ، با مدل الاستیک غیرخطی و مقایسه نتایج تنش انحرافی - کرنش محوری بین مدل و آزمایشگاه در مصالح هسته در شرایط CD



شکل ۶. نتایج کالیبراسیون مصالح هسته سد، M_1 ، با مدل الاستیک غیرخطی و مقایسه نتایج تنش انحرافی - کرنش محوری در تست‌های کنترل کرنش و کنترل تنش، بین مدل و آزمایشگاه در شرایط CD

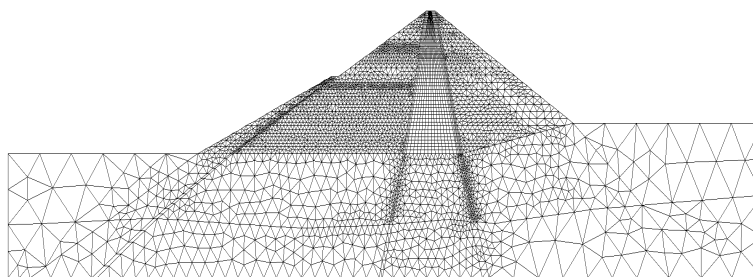
صورت گرفته روی سد سنگ سیاه پیشنهاد حداقل تعداد لایه‌های لازم برای رسیدن به نتایج معقول در مدل‌های کامپیوتری را $H/9 \approx H/1$ ارایه نموده‌اند، که H ارتفاع سد از پی است. در تحلیل سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان که دارای هسته رسی قائم است. از روش پیشنهادی زمردیان و صاحب‌زاده (۲) استفاده شده است. لذا تعداد لایه‌های لازم برای مدل‌سازی این سد که دارای ارتفاع ۱۷۸ متر می‌باشد، حدود ۲۰ لایه است، $(20 \approx 178/9 \approx 19/77)$ ، که در مدل‌سازی مد نظر قرار گرفته شده است.

۳.۴. المان‌بندی مقطع حداکثر (CH260)

تعداد کل المان‌های در نظر گرفته شده برای سد در مقطع حداکثر و پی فرضی که دارای دو لایه است، جمعاً ۷۲۲۳ المان

آزمایش‌های تحکیم یافته زه‌کشی شده، CD، استفاده شده است.

۳.۳. تعیین تعداد لایه‌های لازم برای مدل‌سازی ساخت مرحله‌ای لزوم در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ای اولین بار به وسیله گودمن و کلاف و وودوارد (۸) وارد تحلیل المان‌های محدود سدهای خاکی گردید. 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 (۵). زمردیان و صاحب‌زاده (۲) نیز اثر تعداد لایه‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های کامپیوتری بر روی پارامترهایی تحلیلی کنترل‌کننده در سدهای خاکی با هسته رسی قائم، را به کمک نرم‌افزار *Geoslope*، بررسی نموده‌اند. آنها براساس آنالیز



شکل ۷. مقطع المان‌بندی شده سد مسجد سلیمان

جدول ۲. پارامترهای مصالح بدنه سد مسجد سلیمان

مصالح	ناحیه	وضعیت زه‌کشی	γ_{sat} kN/m^3	γ_{wet} kN/m^3	K_y m/sec	$W.C$ %	m_v -
1	هسته	زه‌کشی نشده	۲۰/۳	۱۹/۹	1×10^{-10}	۱۹	۰/۰۰۰۰۰۲
3A	پوسته بالادست	زه‌کشی شده	۲۳	۲۱/۶	-	-	۰/۰۰۰۰۱
3B	پوسته پایین دست	زه‌کشی شده	۲۳	۲۱/۶	-	-	۰/۰۰۰۰۱
3C	پوسته پایین دست	زه‌کشی شده	۲۳	۲۱/۶	-	-	۰/۰۰۰۰۱
2A	فیلتر پایین دست	زه‌کشی شده	۲۲/۲	۱۹/۶	-	-	۰/۰۰۰۰۱
2B	ناحیه انتقالی پایین دست	زه‌کشی شده	۲۲/۲	۱۹/۶	-	-	۰/۰۰۰۰۱
2C	ناحیه انتقالی بالادست	زه‌کشی شده	۲۲/۷۵	۲۰/۶	-	-	۰/۰۰۰۰۱

نتایج و بحث

۱. نتایج آنالیز سد مسجد سلیمان در حین ساخت و اولین

آبگیری

جدول‌های ۴ و ۵ به ترتیب فشار آب منفذی و تنش‌های کل محاسبه شده را با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در انتهای ساخت و اولین آبگیری، را نشان می‌دهند. در جدول ۶ نتایج مقایسه نشست در هسته سد مسجد سلیمان در دو رقوم مختلف در انتهای ساخت آورده شده است. شکل ۸ خطوط هم‌تراز فشار آب منفذی را در هسته سد در انتهای ساخت را در مقطع ۲۶۰ نشان می‌دهد. در شکل‌های ۹ الی ۱۱ نتایج مقایسه فشار آب منفذی، نسبت فشار آب منفذی، تنش کل مدل‌شده و اندازه‌گیری شده در حین ساخت و اولین آبگیری به ترتیب در فشارسنج‌های EP 2202، EP2104، EP2103، PPE222، PPE213، PPE212 نشان داده شده است.

و تعداد گره‌های آنالیز ۵۵۳۶ گره است. المان‌بندی سد، برای پوشش دادن کلیه زوایا و قسمت‌ها به صورت غیرمنظم انجام شده است. در این مدل‌سازی ضخامت هر لایه خاکریزی معادل ۹ متر است. شکل ۷ المان‌بندی مقطع حداکثر سد و پی دو لایه آن را نشان می‌دهد.

۳.۵. تعریف خصوصیات مصالح

با توجه به استفاده از آنالیز تنش مؤثر برای تحلیل و مدل‌سازی سد می‌بایست از دو نرم‌افزار SEEP/W و SIGMA/W به‌طور کوپل شده (همبسته) برای مدل‌سازی شرایط تحکیم استفاده نمود. لذا می‌بایست خصوصیات هیدرولیکی مصالح در نرم‌افزار SEEP/W و خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح در نرم‌افزار SIGMA/W وارد شوند. در جدول ۲ خواص مصالح سد مسجد سلیمان و در جدول ۳ پارامترهای مقاومتی و تغییر شکلی مصالح مختلف بدنه سد آورده شده است.

جدول ۳. پارامترهای مدل رفتاری مصالح بدنه و پی سد مسجد سلیمان

مصالح	ناحیه	مدل رفتاری	E	K	ν	n	C	ϕ	R_f	E_{min}
		مصالح	MPa	-	-	-	kPa	Deg.	-	KPa
1	هسته	الاستیک غیرخطی	-	۱۱۰	۰/۳۴	۰/۷۶	۲۰۰	۳۳/۵	۰/۹۵	۱۰۱/۳۳
3A	پوسته بالادست	الاستیک خطی	۹۴	-	۰/۳	-	۰	۴۵	-	-
3B	پوسته پایین دست	الاستیک خطی	۹۵	-	۰/۳	-	۰	۳۷	-	-
3C	پوسته پایین دست	الاستیک خطی	۹۴	-	۰/۳	-	۰	۴۵	-	-
2A	فیلتر پایین دست	الاستیک خطی	۷۲	-	۰/۳	-	۰	۳۵	-	-
2B	ناحیه انتقالی پایین دست	الاستیک خطی	۷۲	-	۰/۳	-	۰	۴۰	-	-
2C	ناحیه انتقالی بالادست	الاستیک خطی	۱۲۶	-	۰/۳	-	۰	۴۰	-	-
Found.1	پی (کنگلو مرا)	الاستیک خطی	۳۸۷۰	-	۰/۳	-	۷۰۰	۳۰	-	-
Found.2	پی (ماسه سنگ)	الاستیک خطی	۶۶۷۰	-	۰/۳	-	۲۰۰۰	۴۵	-	-

جدول ۴. مقایسه نتایج آنالیز با ابزار دقیق سد مسجد سلیمان، بلافاصله پس از ساخت

ابزار	موقعیت		نتایج ابزار دقیق			نتایج آنالیز عددی			
	مقطع	تراز	موقعیت	فشار آب	تنش کل	ضریب فشار	فشار آب	تنش کل	ضریب فشار
	نصب	نصب	نسبت به مرکز هسته	منفذی kPa	kN/m ²	آب منفذی R _u (pp/gH)	منفذی kPa	kN/m ²	آب منفذی R _u (pp/gH)
PPE212 و EP2103	۲۶۰	۲۳۰	مرکز	۲۱۱۵/۶۲	۲۳۰۴/۷۹	۰/۷۰	۲۰۸۳/۷۰	۲۳۱۹/۷۰	۰/۶۹
PPE213 و EP2104	۲۶۰	۲۳۰	۳۰ متر - پایین دست	۲۰۹۶/۷۰	۲۰۹۶/۷۰	۰/۷۵	۲۰۹۵/۶۰	۲۱۶۰/۷۰	۰/۷۵
PPE222 و EP2202	۲۶۰	۲۷۰	مرکز	۱۴۰۷/۱۴	۱۴۶۳/۹۰	۰/۶۳	۱۲۱۶/۷۰	۱۴۹۲/۸۰	۰/۵۴
PPE223 و EP2203	۲۶۰	۲۷۰	۱۹/۵ متر - پایین دست	۱۴۱۲/۰۱	۱۴۳۳/۲۱	۰/۶۷	۱۱۹۱/۶۰	۱۴۷۷/۹۰	۰/۵۷
PPE232 و EP2304	۲۶۰	۳۱۰	۱۱/۵ متر - پایین دست	۴۹۲/۰۸	۷۵۰/۳۲	۰/۲۲	۴۵۹/۲۸	۷۸۰/۰۷	۰/۲۱

بیشتر از مقادیر فشار آب منفذی مدل شده است. علت این تفاوت را می توان، این حقیقت دانست که، مصالح هسته در ترازهای نزدیک پی، بیشتر به شرایط اشباع نزدیک بوده، در نتیجه منحنی های مقایسه از تطابق بهتری برخوردارند ولی در ترازهای بالاتر به علت درجه اشباع کمتر مصالح هسته، منحنی های مقایسه تطابق کمتری را نشان می دهند. با توجه به

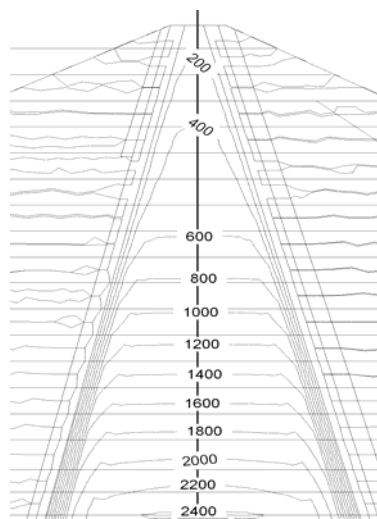
در شکل ۱۲ نتایج مقایسه مقدار نشست محاسبه شده و اندازه گیری شده در رقوم مختلف در انحراف سنج SM23 که در مقطع CH260 نصب گردیده، در آنالیز آبیگری آورده شده است (در دو حالت مخزن پر و نیمه پر تا تاریخ ۱۳-مه-۲۰۰۱). با توجه به نمودارهای ارایه شده به وضوح دیده که با افزایش تراز خاکریزی، مقادیر فشار آب منفذی اندازه گیری شده

جدول ۵. مقایسه نتایج آنالیز با ابزار دقیق سد مسجد سلیمان، در اولین آبیگری

ابزار	موقعیت			نتایج ابزار دقیق			نتایج آنالیز عددی		
	مقطع	تراز	موقعیت	فشار آب	تنش کل	ضریب فشار	فشار آب	تنش کل	ضریب فشار
	نصب	نصب	نسبت به مرکز هسته	منفذی	kN/m ²	آب منفذی R _u (pp/gH)	منفذی	kN/m ²	آب منفذی R _u (pp/gH)
PPE212 و EP2103	۲۶۰	۲۳۰	مرکز	۲۱۷۷/۵۴	۲۳۵۱/۷۸	۰/۷۲	۲۱۵۱/۵۴	۲۴۲۲/۶۷	۰/۷۱
PPE213 و EP2104	۲۶۰	۲۳۰	۳۰ متر - پایین دست	۲۲۱۷/۹۱	۲۲۴۶/۴۲	۰/۷۳	۲۱۲۷/۰۶	۲۳۰۶/۱۸	۰/۷۰
PPE222 و EP2202	۲۶۰	۲۷۰	مرکز	۱۴۹۸/۷۷	۱۵۶۹/۲۷	۰/۶۷	۱۲۴۶/۲۳	۱۶۰۹/۱۲	۰/۵۶

جدول ۶. مقایسه نتایج نشست آنالیزی و ابزار دقیق در انتهای ساخت

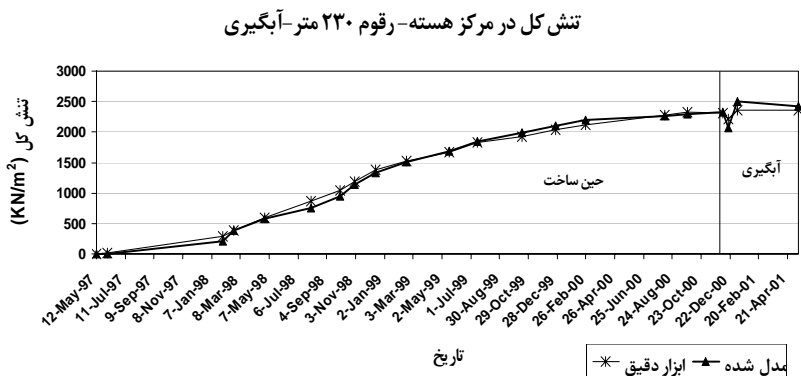
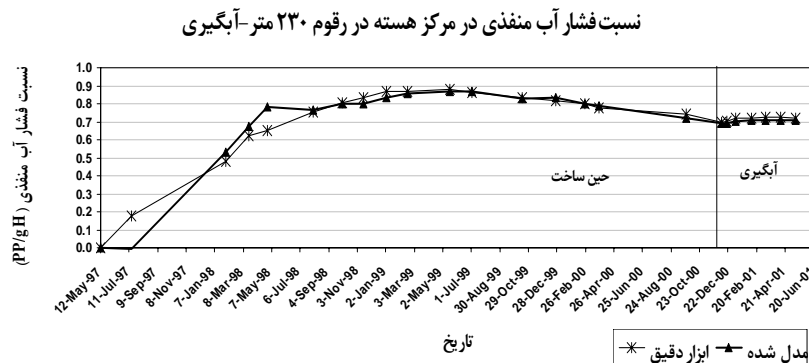
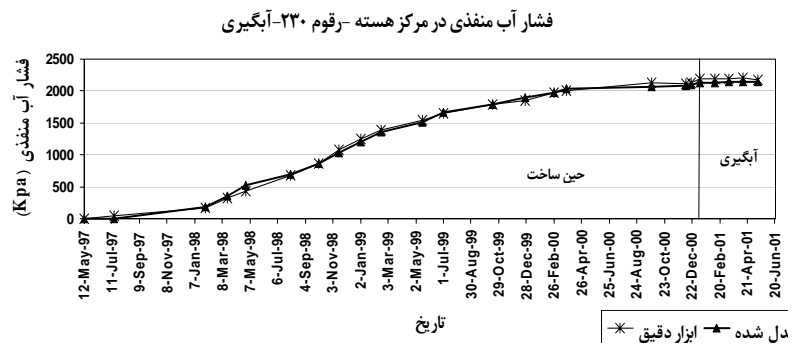
تاریخ	رقوم نصب m	نام انحراف سنج	نشست مدل شده (m)	نشست اندازه گیری شده (m)
۲۰ نوامبر ۲۰۰۰	۳۷۳	SM-2318	-۰/۳۴۰۴۷	-۰/۴۸۲۵
۲۰ نوامبر ۲۰۰۰	۳۸۱	SM-2319	-۰/۱۲۵۱۳	-۰/۰۷۵۵



شکل ۸. خطوط هم تراز فشار آب منفذی بر حسب kPa در انتهای ساخت

به دلایل زیر می توان ماندگاری آب منفذی در هسته سد مسجد سلیمان و در نتیجه بالا ماندن فشار منفذی در آن را توجیه نمود:
 ۱. عرض هسته نسبتاً زیاد است (حداکثر ۹۳ متر). ۲. درصد رطوبت در سمت تر درصد رطوبت بهینه است. یعنی با توجه به این که درصد رطوبت بهینه، W_{opt} ، حدود ۱۵/۵٪ است،

ارتفاع زیاد سد و نفوذپذیری نسبتاً کم مصالح هسته سد، مقادیر ضریب فشار آب منفذی در زمان ساخت در محدوده قابل قبول است. اما مقدار فشار آب منفذی در پایان ساخت بیش از مقادیر مشاهده شده در سدهای مشابه است. علت زیاد بودن فشار آب منفذی در انتهای ساخت را می توان روند کند تحکیم دانست.

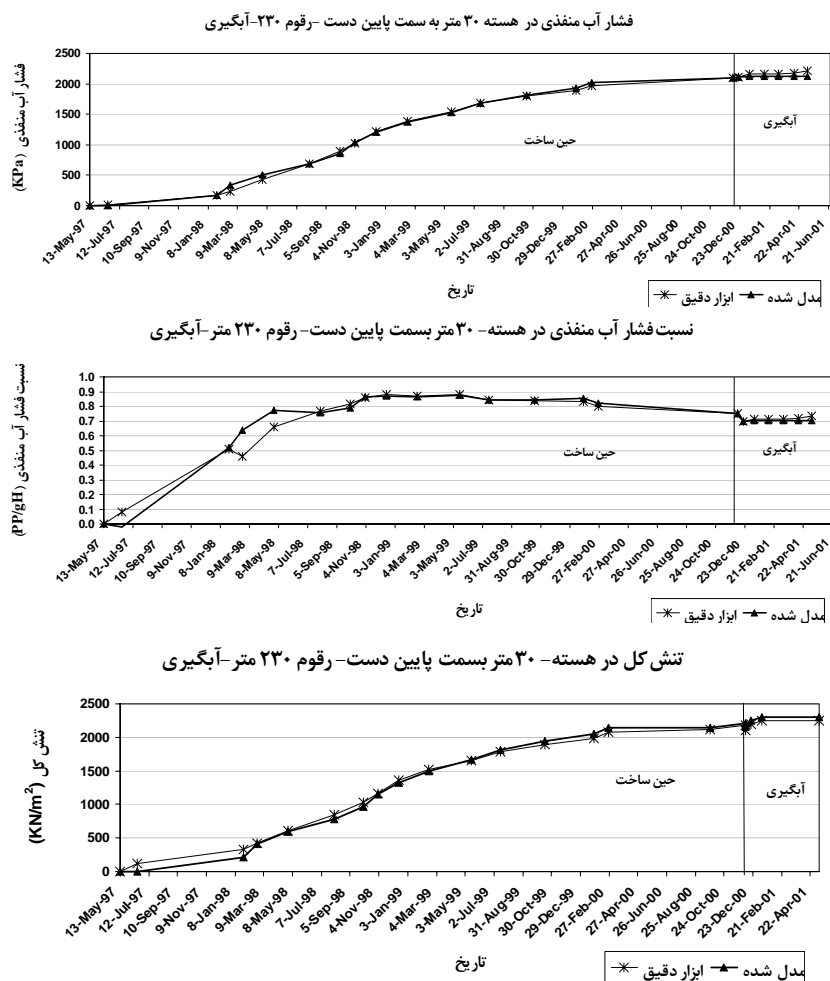


شکل ۹. نتایج فشار آب منفذی، نسبت فشار آب منفذی و تنش کل مدل شده و حاصل از ابزار دقیق در ابزار PPE212 و EP2103

نتیجه گیری

سروش و اختراپور (۳)، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود *Plaxis 7.2* و مدل رفتاری پلاستیک سخت شونده، مقادیر فشار آب منفذی و تنش کل در هسته سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان در زمان ساخت و اولین آبگیری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. و مقادیر محاسبه شده توسط مدل را با مقادیر حاصل از ابزار دقیق مقایسه و بیان نمودند که نتایج آنالیز تطبیق خوبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. لیو و همکاران (۱۴) در سال ۲۰۱۲ به بررسی و مدل‌سازی سه بعدی آبگیری متوالی سد پاشیه (Pushihe) در چین که از نوع سد CFR است با نرم‌افزار

عملیات تراکم در درصد رطوبت ۱۶/۵٪ صورت گرفته است. ۳. مصالح هسته ریزدانه بوده و در گروه رس با خاصیت پلاستیسیته کم (*CL*)، قرار می‌گیرد، که دارای نفوذپذیری پایینی هستند (زیر الک #۲۰۰ حدود ۶۰-۷۰٪). ۴. از غلطک پاچه‌بزی به منظور تراکم هسته استفاده شده است (۴). با توجه به شکل‌های ۹ الی ۱۱، نکته قابل توجه، تطابق نتایج اندازه‌گیری شده و محاسبه شده تنش کل به‌خصوص در پایان عملیات ساخت است. این پدیده نشانه این است که نسبت مدول الاستیسیته مصالح با واقعیت تطابق دارد.



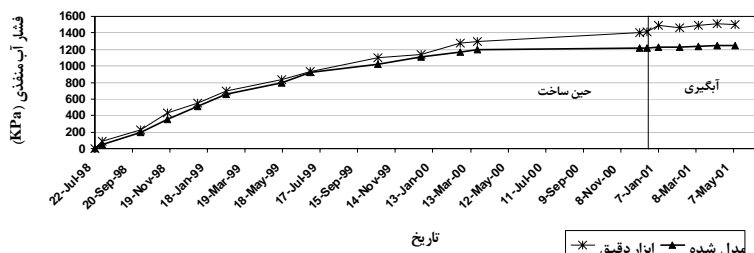
شکل ۱۰. نتایج فشار آب منفذی، نسبت فشار آب منفذی و تنش کل مدل شده و حاصل از ابزار دقیق در ابزار EP2104 و PPE213

یونان (Yunnan) با استفاده از مدل الاستیک غیرخطی هایپرولیک دانکن پرداخته و پس از بررسی تنش‌ها، کرنش‌ها و نشست‌های سد به این نتیجه رسیده‌اند که اختلاف زیاد بین مدول‌های نشست تأثیر بسزایی روی تغییر شکل‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های بین ناحیه انتقالی و سنگریز بدنه سد ندارد. با توجه به پژوهش‌های مشابه در سال‌های اخیر روی سدهای دیگر و هم‌چنین نتایج ابزار دقیق نصب شده روی بدنه و هسته سد مسجد سلیمان نتایج این تحقیق به قرار زیر است:

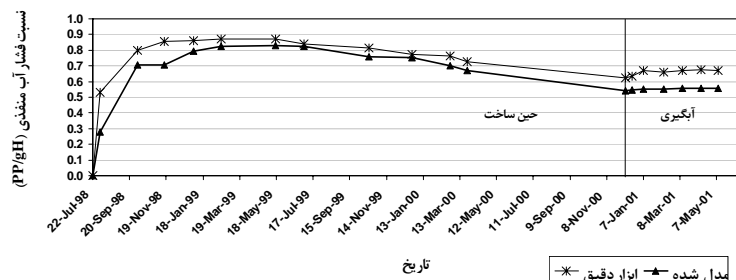
با توجه به روند صحیح افزایش فشار آب منفذی در رقوم نزدیک پی که با افزایش رقوم خاکریزی رخ داده است، می‌توان این چنین نتیجه گرفت که مدل توانسته است رفتار فشار آب منفذی را به‌طور دقیق و مناسبی برآورد نماید. مقادیر محاسبه

Plaxis پرداخته‌اند، ایشان جهت مدل‌سازی از مدل هایپرولیک دانکن و چانگ استفاده نموده و به نتایج قابل قبولی دست یافته‌اند. که در انتها با رسم منحنی‌های توزیع تغییر مکان افقی و عمودی، تنش‌های کل و برشی پیشنهاد استفاده از این نوع سدها را به جای سدهای بتنی داده‌اند. مرنندی و همکاران (۱۶) در سال ۲۰۱۲ به پیش‌بینی نشست‌های سدهای CFR روی ۳۰ سد بزرگ در ۷ کشور دنیا پرداخته و نتایج نشان داده است که مدل GP توانایی تخمین صحیح نشست این سدها را با ۴ خصوصیت نسبت تخلخل بدنه، ارتفاع، مدول تغییر مکان عمودی و فاکتور شکل سد به‌خوبی داراست. که در نهایت نتایج با مدل‌های دیگر از جمله مدل المان محدود مقایسه شده است. لیو و همکاران (۱۴) در سال ۲۰۱۲ به مدل‌سازی سد

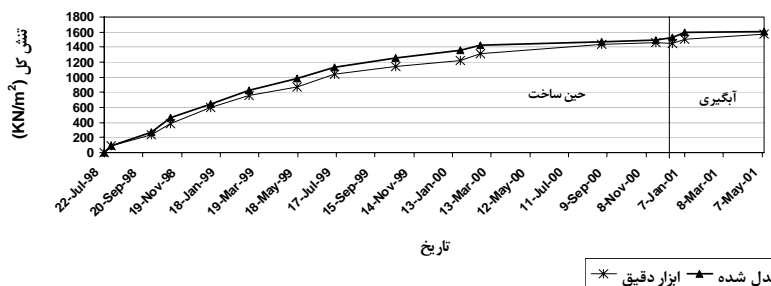
فشار آب منفذی در مرکز هسته -رقوم ۲۷۰-آبگیری



نسبت فشار آب منفذی در مرکز هسته -رقوم ۲۷۰ متر-آبگیری

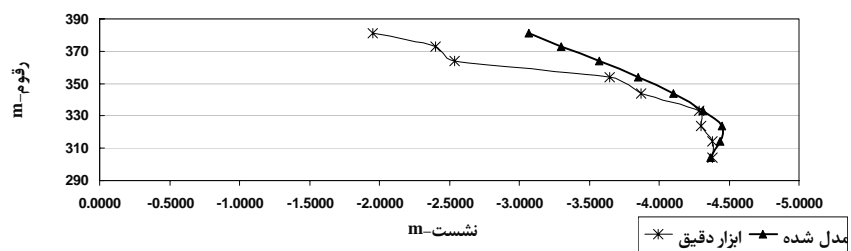


تنش کل در هسته- ۳۰ متر بسمت پایین دست -رقوم ۲۳۰ متر-آبگیری

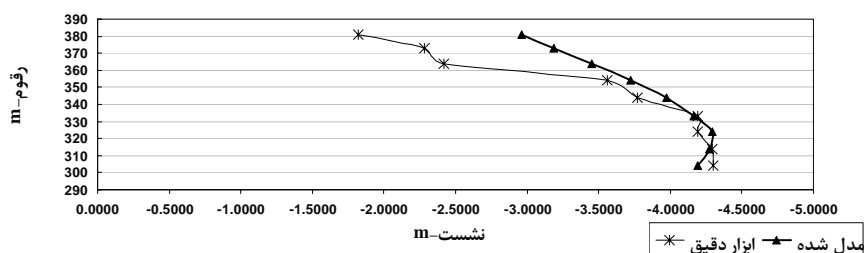


شکل ۱۱. نتایج فشار آب منفذی، نسبت فشار آب منفذی و تنش کل مدل شده و حاصل از ابزار دقیق در ابزار PPE222 و EP2202

نشست در حالت مخزن پر تا ۱۳-مه-۲۰۰۱



نشست در حالت مخزن نیمه پر تا ۱۳-مه-۲۰۰۱



شکل ۱۲. مقایسه نشست آنالیزی و اندازه گیری شده در رقوم مختلف به ترتیب در مخزن پر و نیمه پر

رفتاری الاستیک غیرخطی برای مصالح هسته و مدل رفتاری الاستیک خطی برای مناطق دیگر سد، به‌طور مناسبی توانسته است رفتار سد را پیش‌بینی نماید. با توجه به ارتفاع زیاد سد و نفوذپذیری نسبتاً کم مصالح هسته سد، مقادیر ضریب فشار آب منفذی در زمان ساخت در محدوده قابل قبول است. اما مقدار فشار آب منفذی در پایان ساخت بیش از مقادیر مشاهده‌شده در سدهای مشابه است. با توجه به نتایج آنالیز، می‌توان نتیجه گرفت که، رابطه‌ی ارائه شده توسط زمردیان و صاحب‌زاده (۲) در آنالیز ساخت مرحله‌ای سد، در این تحقیق به‌طور مناسبی توانسته است رفتار سد را در دوران ساخت و ساخت مرحله‌ای بیان کند. کارایی روش و نرم‌افزار به‌کار رفته جهت مدل نمودن رفتار سدهای سنگریزه‌ای در حین، انتهای ساخت و اولین آنگیری مناسب است. نتایج آنالیز رفتار سد حاکی از مدل‌سازی صحیح آزمایش‌های سه‌محوری و انتخاب صحیح پارامترهای آنالیز به‌صورت تنش مؤثر، می‌باشد.

شده و ابزار دقیق، تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند که این تطابق در ارتفاع‌های پایین‌تر بیشتر است، ولی در ارتفاع‌های بالاتر مقادیر اندازه‌گیری شده، بیشتر از مقادیر محاسبه‌شده هستند. علت اختلاف جزئی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج به‌دست آمده از ابزار دقیق را می‌توان ناشی از تفاوت فرضیات محاسبات دستی ضریب فشار آب منفذی در نقطه مورد نظر (نقطه‌ای که مقدار ضریب فشار آب منفذی محاسبه شده است) و نقطه ابزارگذاری شده دانست. هم‌چنین این اختلاف را می‌توان ناشی از تفاوت مقدار H ، (ارتفاع ستون خاکریز بالای رقوم مورد نظر) در فرمول ضریب فشار آب منفذی و مدل به‌دلیل شرایط متفاوت المان‌بندی، دانست.

ضریب فشار آب منفذی با افزایش زمان افزایش یافته و با افزایش بیشتر ارتفاع خاکریزی، از نرخ تغییرات آن کاسته شده و نهایتاً به مقدار تقریباً ثابتی میل نموده است. با توجه به تطابق بالای نتایج مدل‌سازی و رفتارنگاری، می‌توان نتیجه گرفت که، انتخاب مصالح M_1 به‌عنوان مصالح اصلی هسته سد و مدل

منابع مورد استفاده

۱. پاکزاد، م. و م. حسینی. ۱۳۷۹. ارزیابی فشارهای آب منفذی در پی و بدنه سد کرخه پس از آنگیری. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سدسازی.
۲. زمردیان، س. م. ع. و ک. صاحب‌زاده. ۱۳۸۳. بررسی تعریف تعداد مراحل ساخت سدهای خاکی و سنگریزه‌ای با انجام آنالیز تحکیمی در مدل‌های کامپیوتری. مجموعه مقالات اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
۳. سروش، ع. و ع. اخترپور. ۱۳۸۵. مطالعه و تحلیل عددی فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان. مجموعه مقالات هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۴. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. ۱۳۸۰. گزارش رفتار سد مسجد سلیمان در حین ساختمان و اولین آنگیری تا اردیبهشت ۱۳۸۰. وزارت نیرو.
۵. صدرنژاد، الف. ۱۳۸۴. سدهای خاکی و تحلیل عددی آن. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت دبیری شهید رجایی تهران.
۶. نیرومند، ح. و ع. میرقاسمی و م. پاکزاد. ۱۳۷۹. رفتارنگاری سد کرخه در دوران ساخت با استفاده از نتایج ابزار دقیق. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سدسازی، تهران.
7. Clough, G. W. and J. M. Duncan. 1971. Finite element analyses of retaining wall behavior. J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE 97(12): 1657-1674.
8. Clough, G. W. and R. J. Woodward. 1967. Analysis of Embankment Stress and Deformation. Proceedings Paper, J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE 93(4):529-549.

9. Duncan, J. M., P. Byrne, K. S. Wong and P. Mabry. 1980. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movements in soil masses. UCB/GT/80-01, College of California, Berkeley, California.
10. Duncan, J. M. and C. Y. Chang. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. *J. Soil Mech. and Found. Div.* 96(5):1629-1653.
11. GEOSTUDIO. 2004. Seepage Modeling with SEEP/W. Geostudio Manuals, Version, 6.02.
12. GEOSTUDIO. 2004. Stress and Deformation Modeling with SIGMA/W. Geo. Manuals, Ver, 6.02.
13. Iran Water and Power Resources Development Co. 1996. GODAR-E-LANDER HEPP, Review on Additional Laboratory Test (Static Test Result). Ministry of Energy.
14. Liu, C., L. Zhang and B. Bai. 2012. Nonlinear analysis of stress and strain for a clay core rockfill dam with FEM. *Procedia Eng.* 31: 497-501
15. Maleki, M. and A. Alavifer. 2005. Safety Evaluation of MASJED-E-SOLEYMAN, During Construction and First Stage Impounding." 73rd Annual Meeting of ICOLD, Tehran, Iran, No.101-S5.
16. Marandi, S.M., S. M. Vaezinejad and E. Khavari. 2012. Prediction of Concrete faced rockfill dam settlements using genetic programming algorithm. *Intl. J. Geosci.* 3:601-609.
17. Shouju, L., S. Zinchang and J. Wang. 2012. Computer simulation of sequential impoundment process of Concrete faced rockfill dam. *J. Comp.* 7(8): 1801-1808.
18. Szostak-Chrzanowski, A., M. Massiera, A. Chrzanowski, F. Le-Hoan and C. Whitaker. 2002. Verification of Material Parameter of Earthen Dams at Diamond Valley Lake Using Geodetic Measurements. FIG XXII International Congress Washington, DC. USA.