تحلیل عددی رفتار سدهای خاکی- سنگریزه‌ای حین ساخت و اولین آبگیری (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 آبگیری می‌تواند باعث آغاز و یا پیشرفت شکست هیدرولیکی گردد. در این تحقیق ضمن مدل‌سازی سد مسجد سلیمان، تغییرشکل 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* نسخهٔ *6.02* 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 مقایسهٔ نتایج مدل‌سازی و ابزار دقیق می‌توان به رفتار مناسب سد و در نتیجه روند صحیح مدل‌سازی پی برد. هم‌چنین تأثیرآبگیری بر تغییرشکل، فشار آب منفذی، ضریب فشار آب منفذی و تنش کل ارزیابی گردیده است.

واژه‌های کلیدی: فشار آب منفذی، ابزاردقیق، سد مسجدسلیمان، مدل الاستیک غیرخطی، مدل الاستیک خطی، تحکیم همبسته

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]

مقدمه

اطلاعات آماری اشاره بر این دارد کـه سـدهای خـاکی بـیش از سدهای بتنی در معرض تخریب بوده، هـم‌چنـین بـیش از ۵۰٪ خرابی‌ها یا آسیب‌دیدگی‌های سدهای خاکی در حین سـاخت و یا در اولین آبگیری بوده است (۸)، شکست سد کانکی در سـال ۱۸۹۵ در هندوستان، شکست سـد سـینکرکریک در آیـداهو در سال ۱۹۴۳، تخریب سد مالپاسـت در فرانسه در سـال ۱۹۶۱ و خرابی سد اوروس در برزیل در مارس ۱۹۶۰ مثال‌هایی در ایـن زمینه هستند. بـه‌عنـوان نمونـه در ایـران، سـد خـاکی مهابـاد را می‌توان نام برد که در طی سال‌های ۴۹-۱۳۴۶ ساخته شد و طی اولین آبگیری ترک‌های عمیقی روی تاج و قسمت‌های مرکـزی آن مـشاهده گردیـد. افـزایش فـشارآب منفـذی در سـدهای سنگریزه‌ای با هستهٔ رسی، در خلال سـاخت و اولـین آبگیـری، می‌تواند باعث آغاز یـا پیـشرفت شکـست هیـدرولیکی گـردد. توانایی پیش‌بینـی گـسترش و توزیـع (زائـل شـدن) فـشار آب منفذی در بررسـی رفتـار چنـین سـازه‌هـایی از اهمیـت بـالایی برخوردار است (۱۵).

پـاکزاد و میرمحمـد حـسینی (۱)، بـا اسـتفاده از نتـایج پیزومترهای به‌کار رفته در پی و بدنه سد کرخـه، وضـعیت سـد پس از آبگیری را مـورد بررسـی قـرار داده‌انـد. چرزانوسـکی و همکاران (۱۸)، پارامترهـای مـصالح سـدهای خـاکی، در دره و دریاچهٔ *Diamond* را براساس اندازه‌گیری‌هـای ژئـودزی مـورد ارزیابی قرار داده و روشی با استفاده از آنالیز المان محدود، برای مدل‌سازی تأثیر اشباع بودن مصالح سد به منظـور تعیـین تغییـر مکـان‌هـا در خـلال آبگیـری مخـزن ارایـه داده‌انـد. نیرومنـد و همکاران (۶)، عملکرد سد کرخه کـه یکـی از سـدهای خـاکی بزرگ ایران به شمار می‌رود را با استفاده از نتـایج ابـزاردقیـق و آنالیز برگشتی که توسط نـرم‌افـزار *CA2* انجـام گرفتـه اسـت را مورد بررسی قرارداده و بیان نمودند که مقدار فشارهای منفـذی ایجاد شده در داخل هسته در زمـان سـاخت سـد بـا توجـه بـه طولانی شدن مدت زمـان اجـرا و تغییـر مـصالح هـسته از رس خالص به رس مخلوط حدود نصف مقادیر پیش‌بینـی شـده در زمان طراحی بوده و پایین بودن فشارهای منفذی باعث بالارفتن ضریب اطمینان سد از لحاظ پایداری و گـسیختگی هیـدرولیکی شده است. درضمن پدیده قوس‌شدگی (Arching) اتفاق افتـاده در سد با مقادیر پیش‌بینی شده در زمان طراحی مطابقـت خـوبی دارد و مقدار آن در مقایسه با ضریب قوس‌زدگی سـدهای دیگـر دنیا در حد معقول و قابل قبـولی ارزیـابی شـده اسـت. ملکـی و علوی‌فر (۱۵) رفتارنگاری سد مسجدسلیمان را به همـراه آنـالیز عددی توسط کد نـرم‌افـزاری *FLAC 4.0*، مـورد بررسـی قـرار داده‌انـد. پارامترهـای ضـریب فـشار آب منفـذی و نـسبت قوس‌شدگی را تعیین و بیان نمودند که تغییرشـکل‌هـا بـه‌علـت اولین مرحله آبگیری مخزن سد، می‌تواننـد پایـداری سـد را بـه خطر بیندازند. در این تحقیق هدف اصـلی تعیـین و پـیش‌بینـی پارامترهای مدل رفتاری مناسب و سازگار، بـرای مـصالح بدنـه، پوسته و هسته سد مـسجد سـلیمان بـا اسـتفاده از مـدل‌سـازی آزمـایش‌هـای سـه محـوری و اسـتفاده از روش آنـالیز تحکـیم همبسته (Coupled Consolidation Analysis) در محاسبه فشار آب منفذی ایجاد شده پس از تحکیم و مقایسه نتـایج بـه‌دسـت آمده با نتایج ابزار دقیق نصب شده در سد مسجد سلیمان است.

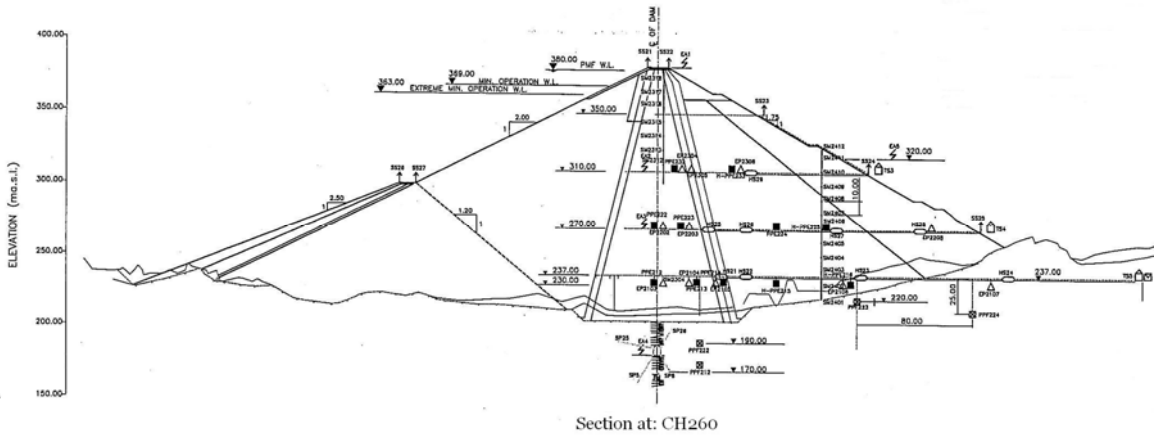
مواد و روش‌ها

۱. معرفی سد مسجد سلیمان

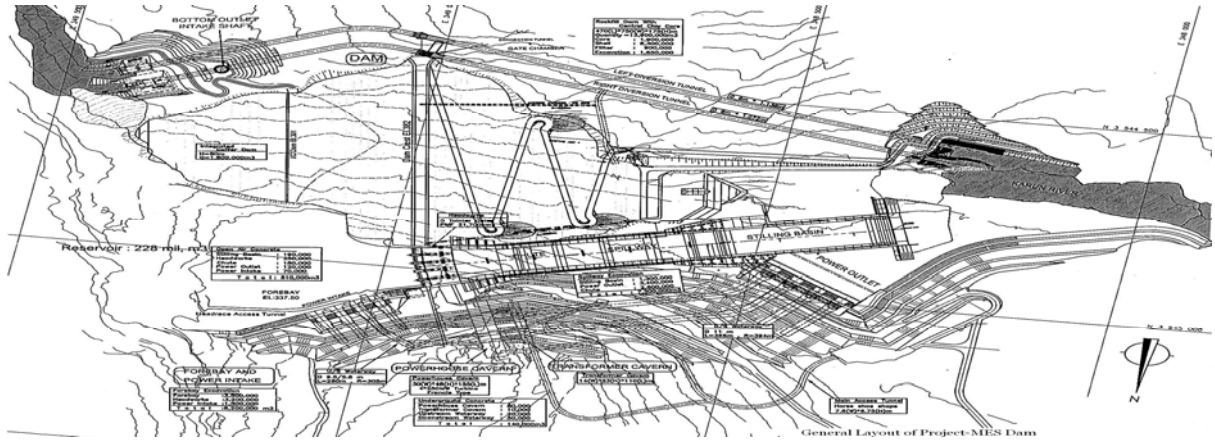
سد مسجد سلیمان از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم اسـت، با ارتفاع حداکثر ۱۷۸ متر از پی سد، یکی از بلنـدترین سـدهای خاکی ایـران و دومـین سـد خـاکی بلنـد خاورمیانـه محـسوب می‌شود. این سد در ۲۵ کیلومتری شـمال شـرقی شـهر مـسجد سلیمان و در استان خوزستان به روی رودخانه کـارون احـداث شده است(۱۳). ارتفـاع سـد مـورد مطالعـه در مقطـع حـداکثر *(CH260)* برابر ۱۷۷ متر می‌باشد (شکل ۱). طول تاج سـد ۴۹۰ متر و عرض پاشنه آن ۱۵ متر است. هم‌چنین شیب هـسته ۰/۲۵ :۱ و عـرض بیـشینه آن ۹۰ متـر و ضـخامت کلیـه فیلترهـا و زه‌کش‌ها در بالادست و پایین‌دست هسته، ۵ متر است. هم‌چنین مصالح پی سد از جنس کنگلومرا و ماسـه سـنگ بـا لایـه‌بنـدی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]



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



شکل۲. طرح کلی سد مسجد سلیمان

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 آبگیری، 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، 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 پایین‌دست (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. به‌وسیلهٔ این برنامه می‌توان ساخت لایه به لایه و مرحله‌ای سد و پدیدهٔ تحکیم را مدل‌سازی نمود(۱۳). مقطع

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]

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

نوع مصالح	درصد CL و GC	درصد مصالح بالای قطر $۴/۷۶mm$	وزن مخصوص خشک تخمینی (kN/m^3) بااستفاده از معادلهٔ *Walker Haltz*
M1	*GC:40%-CL60%*	۲۰	۱۷/۹۶۴
M2	*GC:60%-CL40%*	۲۸	۱۸/۲۶۸
M3	*GC:80%-CL20%*	۳۷	۱۸/۵۸۲

CH260، به‌عنوان 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 ایده‌آل سازی ضروری است:

۱. هندسه مدل ۲. روند ساخت و بارگذاری۳. 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 به‌صورت متوالی انجام می‌شود و در هر مرحله بسته به تنش، مدول الاستیسیته و ضریب پوآسون 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 به‌صورت 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 به‌دست 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.

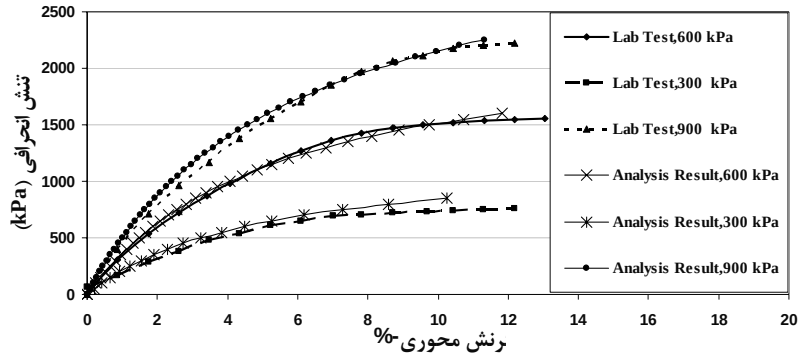
۳. ۲. سنجش دقت پارامترهای مدل ساختاری الاستیک غیرخطی (هایپربولیک)

برای ارزیابی دقیق روش عددی و حصول نتایج قابل قبول از مدل‌سازی سد مسجد سلیمان و نیز برای سنجش دقت پارامترهای ورودی مدل الاستیک غیرخطی، آزمایش‌های سه‌محوری صورت گرفته روی مصالح بدنهٔ 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 به‌صورت همبسته استفاده می‌شود. نمونهٔ 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 بستهٔ نرم‌افزاری *GEOSTUDIO* هستند(۱۱ و ۱۲). سه نوع مصالح M_1، M_2 و M_3 برای استفاده در هستهٔ سد مسجد سلیمان در نظر گرفته شده است، که در آنالیزهای استاتیکی مختلف نتایج نسبتاً مشابهی را ارایه نموده‌اند، خصوصیات این مصالح در جدول ۱ آورده شده است(۱۳).

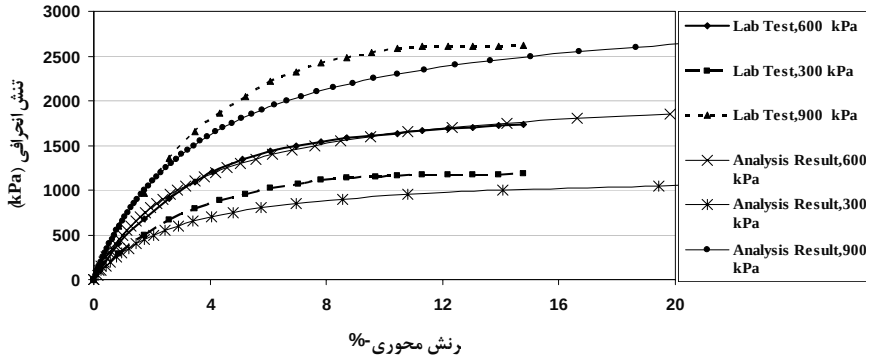
در تحلیل هر مسأله توسط مدل‌های عددی، مهم‌ترین بخش، معرفی پارامترهای مدل است. در واقع غیر از نحوهٔ المان‌بندی، تعریف شرایط مرزی مسأله و شرایط تکیه‌گاهی آنها که هر کدام

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]



شکل۳. نتایج کالیبراسیون مصالح هسته سد، M_1، با مدل الاستیک غیرخطی و مقایسهٔ نتایج تنش انحرافی- کرنش محوری بین مدل و نتایج آزمایشگاه در مصالح هسته در شرایط CD



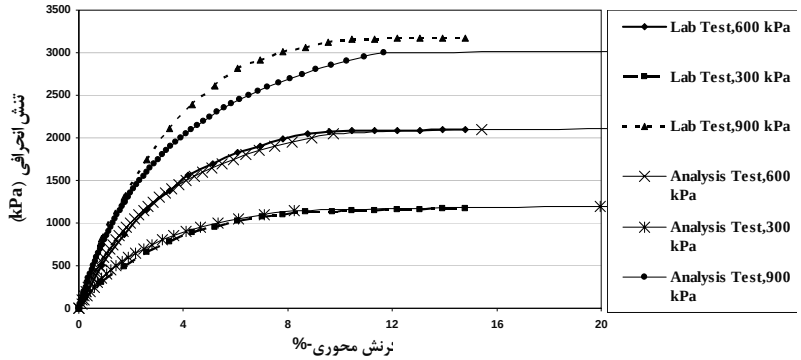
شکل ۴. نتایج کالیبراسیون مصالح هسته سد، M_2، با مدل الاستیک غیرخطی و مقایسهٔ نتایج تنش انحرافی- کرنش محوری بین مدل و آزمایشگاه در مصالح هسته در شرایط CD

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 هستهٔ سد مسجد سلیمان و تحت فشارهای همه‌جانبهٔ 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 مقایسهٔ نتایج تنش انحرافی- کرنش محوری بین مدل و آزمایشگاه در مصالح هسته را فقط در شرایط تحکیم‌یافتهٔ زه‌کشی شده نشان می‌دهد. شایان ذکر است که آزمایش‌های سه محوری مدل شده براساس کنترل تنش بوده و برای مصالح M_1,M_2,M_3، فقط، در تنش محصورکنندهٔ ۶۰۰ kPa مدل آزمایش سه محوری به‌صورت کنترل کرنش در حالت CU و CD نیز صورت گرفته است؛ که در شکل ۶ این منحنی‌ها برای مصالح M_1 آورده شده است.

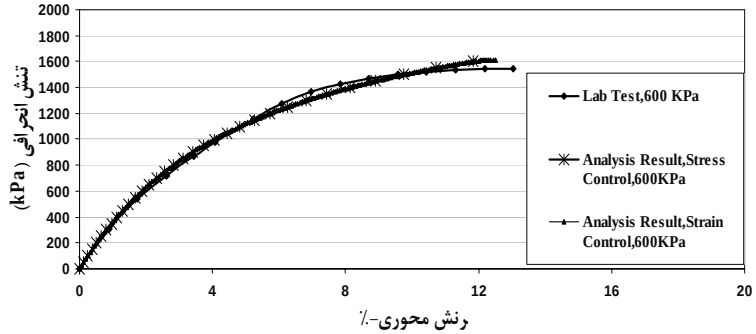
با توجه به نمودارهای مذکور تطابق بسیار مناسبی بین مدل و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود و چون در مصالح نمونه‌ای M_1 این تطابق بین نتایج مدل و آزمایشگاه در هر دو نوع آزمایش کنترل کرنش و کنترل تنش مشاهده شده است، لذا پارامترهای مدل رفتاری الاستیک غیرخطی (هایپربولیک) این مصالح به‌عنوان مصالح مدل اصلی سد 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]



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

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

۳. ۳. تعیین تعداد لایه‌های لازم برای مدل‌سازی ساخت مرحله‌ای

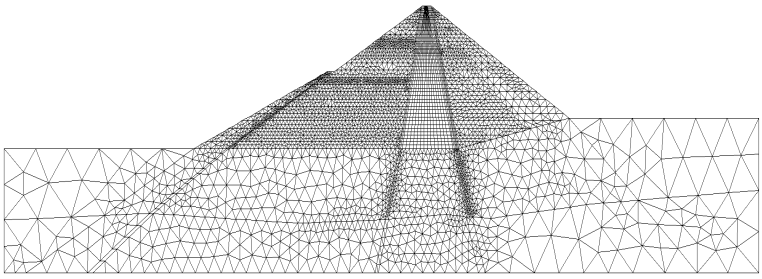
لزوم در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ای اولین‌بار به وسیلهٔ گودمن و کلاف و وودوارد (۸) وارد تحلیل المان‌های محدود سدهای خاکی گردید. واقعیت این است که در مدل‌سازی سدهای خاکی یک حداقل تعداد لایه برای رسیدن به جواب‌های قابل قبول در مورد تغییر شکل‌ها وجود دارد، بنابراین مشخص نمودن تعداد لایه‌ها مورد نیاز در تحلیل اهمیت دارد(۵). زمردیان و صاحب‌زاده (۲) نیز اثر تعداد لایه‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های کامپیوتری بر روی پارامترهایی تحلیلی کنترل‌کننده در سدهای خاکی با هستهٔ رسی قائم، را به کمک نرم‌افزار *Geoslope*، بررسی نموده‌اند. آنها براساس آنالیز صورت گرفته روی سد سنگ سیاه پیشنهاد حداقل تعداد لایه‌های لازم برای رسیدن به نتایج معقول در مدل‌های کامپیوتری را $H/9 \approx H/10$ 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، $(۱۷۸/9 \approx ۱۹/77 \cong ۲۰)$، 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]



شکل ۷. مقطع المان‌بندی شدهٔ سد مسجد سلیمان

جدول ۲. پارامترهای مصالح بدنه سد مسجد سلیمان

مصالح	ناحیه	وضعیت زه‌کشی	γ_{sat}	γ_{wet}	K_y	$W.C$	m_v
			kN/m^3	kN/m^3	m/sec	%	-
1	هسته	زه‌کشی نشده	۲۰/۳	۱۹/۹	1×10^{-10}	۱۹	۰/۰۰۰۰۰۲
3A	پوسته بالادست	زه‌کشی شده	۲۳	۲۱/۶	–	–	۰/۰۰۰۱
3B	پوسته پایین‌دست	زه‌کشی شده	۲۳	۲۱/۶	–	–	۰/۰۰۰۱
3C	پوسته پایین‌دست	زه‌کشی شده	۲۳	۲۱/۶	–	–	۰/۰۰۰۱
2A	فیلتر پایین‌دست	زه‌کشی شده	۲۲/۲	۱۹/۶	–	–	۰/۰۰۰۱
2B	ناحیه انتقالی پایین‌دست	زه‌کشی شده	۲۲/۲	۱۹/۶	–	–	۰/۰۰۰۱
2C	ناحیه انتقالی بالادست	زه‌کشی شده	۲۲/۷۵	۲۰/۶	–	–	۰/۰۰۰۱

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

نتایج و بحث

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

جدول‌های ۴ و ۵ به‌ترتیب 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 مقایسهٔ 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 مقایسهٔ فشار آب منفذی، نسبت فشار آب منفذی، تنش کل مدل‌شده و اندازه‌گیری شده در حین ساخت و اولین آبگیری به ترتیب در فشارسنج‌های PPE212، PPE213، PPE222، EP2103، EP2104 و EP 2202 نشان داده شده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]

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

مصالح	ناحیه	مدل رفتاری	E	K	v	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 پایین‌دست	الاستیک خطی	۹۵	-	۰/۳	-	۰	۳۷	-	-
3C	پوسته پایین‌دست	الاستیک خطی	۹۴	-	۰/۳	-	۰	۴۵	-	-
2A	فیلتر پایین‌دست	الاستیک خطی	۷۲	-	۰/۳	-	۰	۳۵	-	-
2B	ناحیه انتقالی پایین‌دست	الاستیک خطی	۷۲	-	۰/۳	-	۰	۴۰	-	-
2C	ناحیه انتقالی بالادست	الاستیک خطی	۱۲۶	-	۰/۳	-	۰	۴۰	-	-
Found.1	پی(کنگلومرا)	الاستیک خطی	۳۸۷۰	-	۰/۳	-	۷۰۰	۳۰	-	-
Found.2	پی (ماسه سنگ)	الاستیک خطی	۶۶۷۰	-	۰/۳	-	۲۰۰۰	۴۵	-	-

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

ابزار	موقعیت			نتایج ابزاردقیق			نتایج آنالیز عددی		
	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به مرکز هسته	فشار آب منفذی kPa	تنش کل kN/m^2	ضریب فشار آب منفذی R_u(pp/gH)	فشار آب منفذی kPa	تنش کل kN/m^2	ضریب فشار 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– پایین‌دست	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– پایین‌دست	۱۴۱۲/۰۱	۱۴۳۳/۲۱	۰/۶۷	۱۱۹۱/۶۰	۱۴۷۷/۹۰	۰/۵۷
PPE232 و EP2304	۲۶۰	۳۱۰	۱۱/۵ متر– پایین‌دست	۴۹۲/۰۸	۷۵۰/۳۲	۰/۲۲	۴۵۹/۲۸	۷۸۰/۰۷	۰/۲۱

در شکل ۱۲ نتایج مقایسهٔ مقدار نشست محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در رقوم مختلف در انحراف‌سنج SM23 که در مقطع CH260 نصب گردیده، در آنالیز آبگیری آورده شده است (در دو حالت مخزن پر و نیمه پر تا تاریخ ۱۳– مه–۲۰۰۱).

با توجه به نمودارهای ارایه شده به‌وضوح دیده که با افزایش تراز خاکریزی، مقادیر فشار آب منفذی اندازه‌گیری شده بیشتر از مقادیر فشار آب منفذی مدل‌شده است. علت این تفاوت را می‌توان، این حقیقت دانست که، مصالح هسته در ترازهای نزدیک پی، بیشتر به شرایط اشباع نزدیک بوده، در نتیجه منحنی‌های مقایسه از تطابق بهتری برخوردارند ولی در ترازهای بالاتر به‌علت درجه اشباع کمتر مصالح هسته، منحنی‌های مقایسه تطابق کمتری را نشان می‌دهند. با توجه به

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

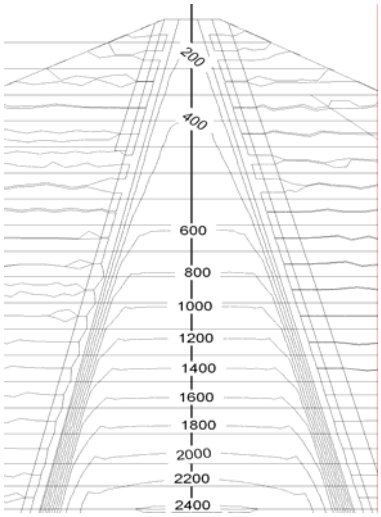
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]

جدول۵. مقایسهٔ نتایج آنالیز با ابزار دقیق سد مسجد سلیمان، در اولین آبگیری

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

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

نشست اندازه‌گیری‌شده(m)	نشست مدل‌شده(m)	نام انحراف‌سنج	رقوم نصبm	تاریخ
-۰/۴۸۲۵	-۰/۳۴۰۴۷	SM-2318	۳۷۳	۲۰ نوامبر ۲۰۰۰
-۰/۰۷۵۵	-۰/۱۲۵۱۳	SM-2319	۳۸۱	۲۰ نوامبر ۲۰۰۰

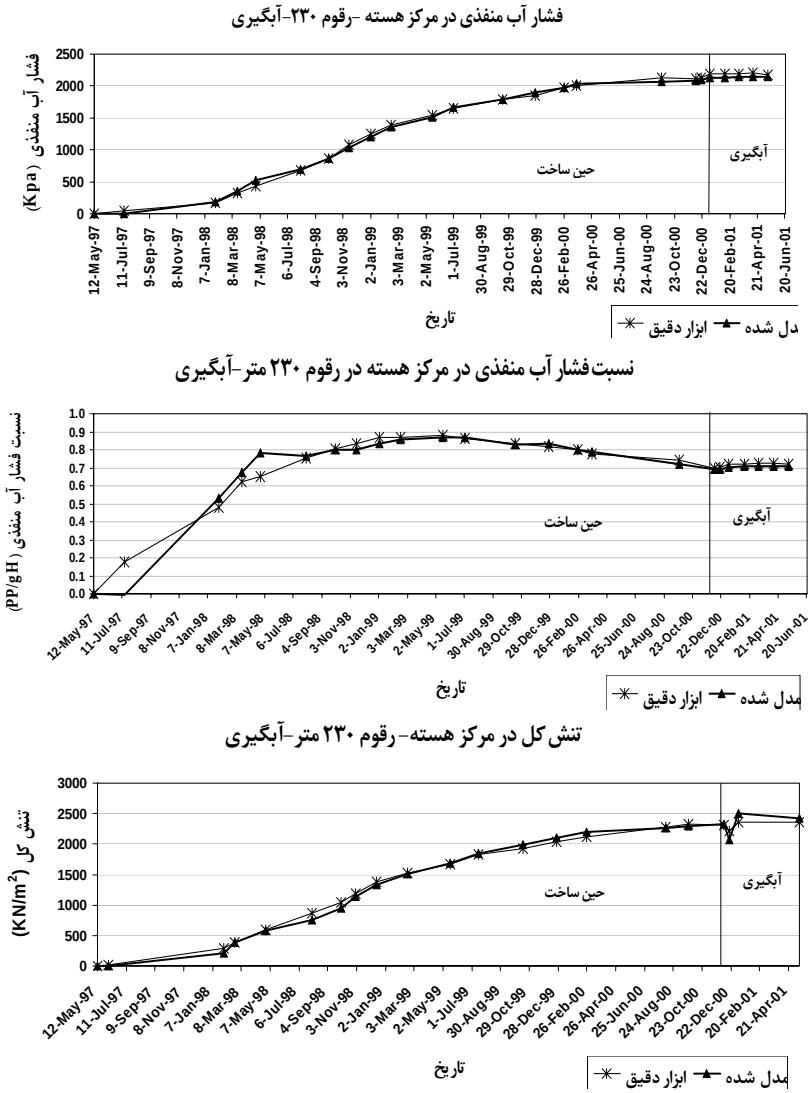


شکل ۸. خطوط هم‌تراز فشار آب منفذی برحسب kPa در انتهای ساخت

ارتفاع زیاد سد و نفوذپذیری نسبتاً کم مصالح هسته سد، مقادیر ضریب فشار آب منفذی در زمان ساخت در محدودهٔ 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 می‌توان روند کند تحکیم دانست. به‌دلایل زیر می‌توان 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 این‌که درصد رطوبت بهینه، W_{opt}، حدود ۱۵/۵٪ است،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]



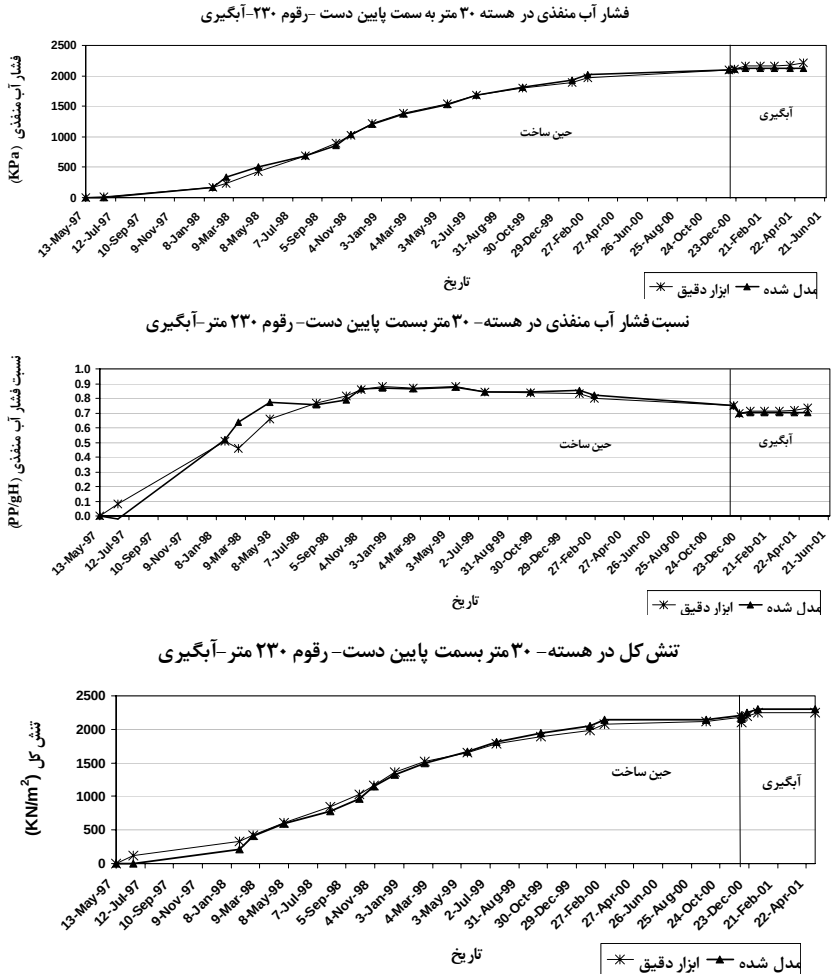
شکل ۹. نتایج فشار آب منفذی، نسبت فشار آب منفذی و تنش کل مدل شده و حاصل از ابزار دقیق در ابزار PPE212 و EP2103

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، نکتهٔ قابل توجه، تطابق نتایج اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده تنش کل به‌خصوص در پایان عملیات ساخت است. این پدیده نشانهٔ این است که نسبت مدول الاستیسیته مصالح با واقعیت تطابق دارد.

نتیجه‌گیری

سروش و اخترپور (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 نمودندکه 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]



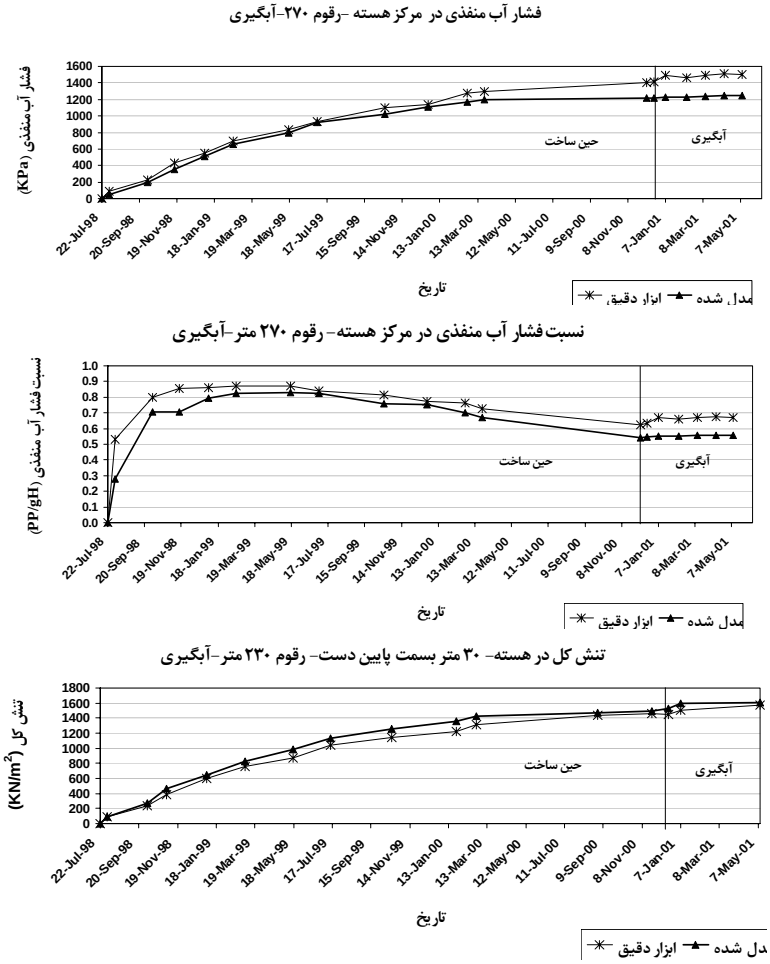
شکل ۱۰. نتایج فشار آب منفذی، نسبت فشار آب منفذی و تنش کل مدل شده و حاصل از ابزار دقیق در ابزار PPE213 و EP2104

Plaxis پرداخته‌اند، ایشان جهت مدل‌سازی از مدل هایپربولیک دانکن و چانگ استفاده نموده و به نتایج قابل قبولی دست یافته‌اند. که در انتها با رسم منحنی‌های توزیع تغییرمکان افقی و عمودی، تنش‌های کل و برشی پیشنهاد استفاده از این نوع سدها را به جای سدهای بتنی داده‌اند. مرندی 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 یونان (Yunnan) با استفاده از مدل الاستیک غیرخطی هایپربولیک 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:

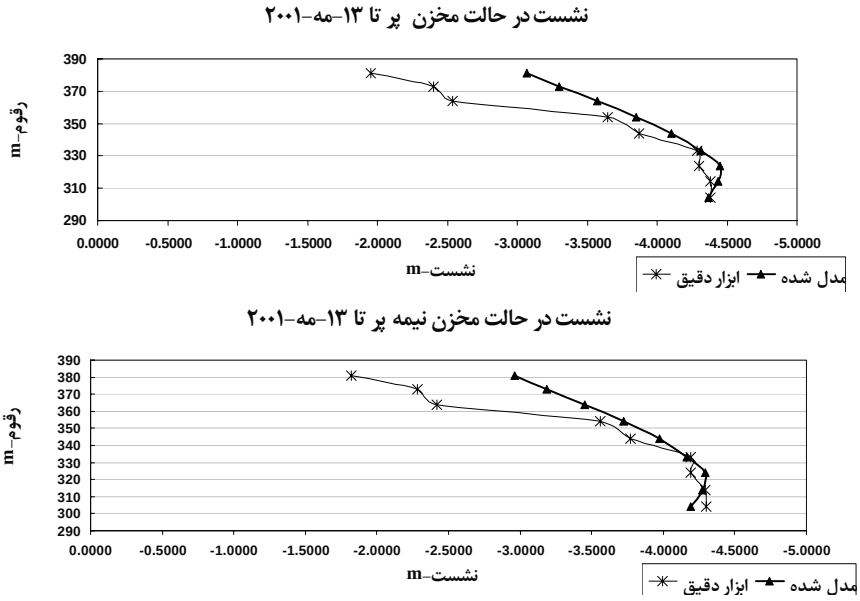
با توجه به روند صحیح افزایش فشار آب منفذی در رقوم نزدیک پی که با افزایش رقوم خاکریزی رخ داده است، می‌توان این چنین نتیجه گرفت که مدل توانسته است رفتار فشار آب منفذی را به‌طور دقیق و مناسبی برآورد نماید. مقادیر محاسبه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]



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



شکل ۱۲. مقایسهٔ نشست آنالیزی و اندازه‌گیری شده در رقوم مختلف به‌ترتیب در مخزن پر و نیمه پر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]

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 نقطهٔ مورد نظر (نقطه‌ای که مقدار ضریب فشار آب منفذی محاسبه شده است) و نقطهٔ 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 هستهٔ سد و مدل 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 محدودهٔ 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، رابطهٔ ارایه 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 آبگیری مناسب است. نتایج آنالیز رفتار سد حاکی از مدل‌سازی صحیح آزمایش‌های سه‌محوری و انتخاب صحیح پارامترهای آنالیز به‌صورت تنش مؤثر، می‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. پاکزاد، م. و م. حسینی. ۱۳۷۹. ارزیابی فشارهای آب منفذی در پی و بدنه سد کرخه پس از آبگیری. 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 آبگیری تا اردیبهشت ۱۳۸۰. وزارت نیرو.

۵. .صدرنژاد، الف. ۱۳۸۴. سدهای خاکی و تحلیل عددی آن. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت دبیری شهید رجائی 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]

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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.19.8]