

علمی - تخصصی

امکان‌سنجی استفاده از مصالح شن-رس، بتن آسفالتی و شن و ماسه سیمانته شده جایگزین رس در هسته سد خاکی، مطالعه موردی: سد تنگ سرخ بشار

سجاد پوربیرگ^{۱*}، وحید جمالی

^۱ کارشناسی ارشد، عمران، دانشگاه صنعتی شیراز

^۲ دکتری تخصصی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، موسسه فجر

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۳)

چکیده

انتخاب مصالح مناسب برای هسته سدهای خاکی، نقشی کلیدی در عملکرد و پایداری آن‌ها دارد. خاک رس به دلیل نفوذپذیری پایین و قابلیت کنترل تراوش، به‌عنوان مصالح اصلی در هسته سدها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، زمانی که خاک رس کافی یا مناسب در دسترس نباشد، بررسی مصالح جایگزین ضروری است. این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از ترکیبات شن-رس (GC)، بتن آسفالتی (AC)، و شن و ماسه سیمانته‌شده (CSG) را به‌عنوان جایگزین خاک رس در سد تنگ سرخ بشار بررسی کرده است. مطالعه شامل ارزیابی‌های ژئوتکنیکی، خواص مکانیکی، نفوذپذیری، و پایداری طولانی مدت مصالح جایگزین تحت شرایط هیدرولیکی متغیر است. همچنین مدل‌سازی‌های عددی برای بررسی پایداری، نشست، تراوش، و رفتار لرزه‌ای هسته با نرم‌افزار PLAXIS 3D انجام شده است. نتایج نشان داد که بتن آسفالتی از نظر زلزله، تراوش و فرسایش عملکرد بهتری دارد، اما هزینه و نیاز به فناوری پیچیده ساخت آن را محدود می‌کند. شن و ماسه سیمانته‌شده دارای مقاومت بالاست اما مشکلاتی در انعطاف‌پذیری دارد. ترکیب شن و رس گزینه‌ای مقرون به صرفه با نفوذپذیری مطلوب است، ولی مدیریت نشست و تراوش نیازمند دقت است. از نظر اقتصادی، ترکیب شن-رس گزینه‌ای ساده و ارزان است که برای سدهای خاکی عادی مناسب است، درحالی که بتن آسفالتی و شن و ماسه سیمانته‌شده در پروژه‌های با نیازهای دوام و مقاومت بالا مقرون به صرفه هستند.

کلیدواژه‌ها: هسته سد خاکی، مصالح جایگزین هسته، مدل‌سازی عددی، تحلیل هزینه-فایده مصالح، مطالعه موردی

۱. مقدمه

سدها به‌عنوان سازه‌های حیاتی در مهندسی عمران، نقش مهمی در کنترل و ذخیره‌سازی آب ایفا می‌کنند و معمولاً در دره‌ها یا بین کوه‌ها برای جلوگیری از جریان بی‌رویه آب و ذخیره آن ساخته می‌شوند. این سازه‌ها اهداف متنوعی را شامل مدیریت آب، تأمین آب شرب، آبیاری کشاورزی، تولید برق و کنترل سیلاب پوشش می‌دهند. انواع مختلفی از سدها مانند سدهای انحرافی و ذخیره‌ای وجود دارند که بسته به نیازها و شرایط محیطی طراحی می‌شوند [۱].

سدهای خاکی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین انواع سدها، به دلیل ویژگی‌هایی همچون انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت اجرا بر روی پی‌های مختلف، و اقتصادی بودن، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در مهندسی سدهای

خاکی صورت گرفته که اهمیت شناخت دقیق رفتار خاک‌ها در شرایط استاتیکی و دینامیکی را برای بهبود طراحی و اجرای این سازه‌ها افزایش داده است [۲]. هسته سدهای خاکی که وظیفه اصلی آب‌بندی را بر عهده دارد، معمولاً از مصالحی همچون رس، مخلوط شن و رس، بتن آسفالتی و شن و ماسه سیمانته شده ساخته می‌شود. انتخاب مناسب مصالح هسته برای جلوگیری از نشست آب و همچنین تأمین مقاومت و انعطاف‌پذیری لازم در برابر نیروهای مختلف، از جمله چالش‌های کلیدی در طراحی سدهای خاکی است.

ارزیابی ویژگی‌های ژئوتکنیکی و زیرسطحی محل ساخت سد، مرحله‌ای حیاتی در انتخاب طرح بهینه از نظر فنی و اقتصادی است. در سال‌های اخیر، استفاده از مخلوط‌های ریزدانه و درشت‌دانه به‌عنوان مصالح هسته، به‌منظور افزایش آب‌بندی و کاهش نشست در سدهای خاکی، رایج شده است. هسته سد باید علاوه بر جلوگیری

ترمودینامیکی این مصالح را نشان داده است. همچنین، در تحقیقات دیگری [۹] با انجام آزمایش‌های فشاری و بار رفت و برگشتی تک‌محوری مشخص شده که این مصالح رفتار الاستوپلاستیک دارند، که بیانگر مقاومت و انعطاف‌پذیری بالای آن‌ها در شرایط مختلف است.

در زمینه استفاده از بتن آسفالتی در هسته سدها، اولین سد با هسته آسفالتی در سال ۱۹۶۱ در آلمان ساخته شد و تا کنون بیش از ۱۳۰ سد با این نوع هسته احداث شده است. مطالعات انجام‌شده بر روی سدهای مختلف مانند سد Yele و سد Quxue در چین نشان داده‌اند که این نوع هسته‌ها، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و ویژگی‌های خودترمیمی، عملکرد بسیار خوبی در برابر زلزله و شرایط محیطی سخت داشته‌اند. علاوه بر این، سدهای با هسته آسفالتی تراوش کمتری ایجاد می‌کنند و پایداری بیشتری نسبت به هسته‌های رسی دارند [۱۰].

در این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از مصالح جایگزین شامل مخلوط شن و رس، بتن آسفالتی و شن و ماسه سیمانته شده به‌عنوان مصالح هسته سدهای خاکی موردبررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت و نفوذپذیری این مصالح و تحلیل عملکرد سد با استفاده از نرم‌افزار امان محدود PLAXIS 3D است. روش تحقیق شامل مرور ادبیات مرتبط با رفتار سدهای خاکی و سپس انجام تحلیل‌های مکانیکی و مدل‌سازی سه‌بعدی با در نظر گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی و هندسی سد است. همچنین، تحلیل‌های مربوط به افت سریع، تراوش پایدار، پایان ساخت و زلزله در مراحل مختلف ساخت بهره‌برداری سد مورد ارزیابی قرار گرفت.

این مطالعه باهدف بررسی و امکان‌سنجی استفاده از مصالح جایگزین برای هسته رسی در سد خاکی تنگ سرخ انجام شد.

سد شامل هسته، فیلتر، زهکش، پوسته‌ها، فونداسیون و سایر بخش‌های سازه‌ای به‌صورت سه‌بعدی و با ابعاد واقعی مدل‌سازی شد. سپس، مصالح جایگزین موردبررسی شامل شن-رس، بتن آسفالتی و شن و ماسه سیمانته شده، به‌طور جداگانه به‌عنوان مصالح هسته در مدل تعریف شدند.

۲-۲. تعریف مدل‌های رفتاری

برای تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، مدل‌های رفتاری مختلفی برای مصالح در نرم‌افزار PLAXIS 3D تعریف شدند. در این تحقیق از مدل رفتاری Mohr-Coulomb برای تحلیل‌های استاتیکی و از مدل رفتاری UBC3D-PLM برای تحلیل‌های دینامیکی و زلزله استفاده شد. مدل رفتاری Mohr-Coulomb یکی از ساده‌ترین و شناخته‌شده‌ترین مدل‌های رفتاری است که برای مصالح خاکی استفاده می‌شود و بر اساس پارامترهایی مانند مدول

از نشت، توانایی حفظ عملکرد خود در مواجهه با بارهای مختلف، از جمله بارهای ناشی از سیل، زلزله، و تغییرات هیدرولیکی را داشته باشد [۳].

با توجه به اهمیت روزافزون کنترل و مدیریت آب‌های سطحی و کاهش مخاطرات ناشی از سیلاب‌ها، ساخت سدهای بلند برای ذخیره آب و مهار سیلاب‌ها در کشور ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مسائل مهم در این راستا، بررسی و ارزیابی پارامترهای رفتاری خاک و مصالح مورد استفاده در سد است. مطالعات نشان داده‌اند که عدم دقت در ارزیابی این پارامترها می‌تواند منجر به مشکلات پایداری و عملکرد ضعیف سدها شود [۴].

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مواد جایگزین به‌جای خاک رس خالص در هسته سدهای خاکی می‌تواند به بهبود پایداری و کاهش نشت آب کمک کند. برای مثال، در برخی از مطالعات [۵] مشخص شده است که با افزایش محتوای سنگدانه‌ها در مخلوط‌های رس و شن، مقاومت برشی بیشتر شده و فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج تحقیقاتی دیگر [۶] که روی سد کرخه انجام شده، نشان می‌دهد که خاک‌های مخلوط نسبت به رس خالص، فشار آب حفره‌ای بیشتری تولید می‌کنند، اما در عین حال نشست و جابجایی‌های کمتری دارند و این امر باعث بهبود پایداری سد در شرایط لرزه‌ای می‌شود.

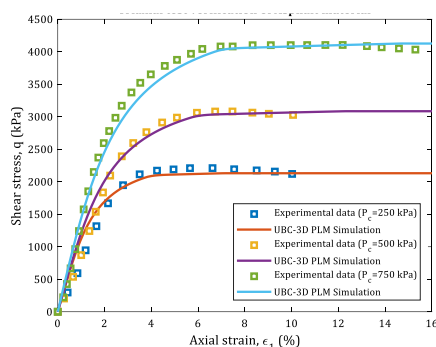
در زمینه استفاده از مخلوط شن و ماسه سیمانته شده نیز، برخی آزمایش‌ها [۷] نشان می‌دهند که مصالح CSG دارای منحنی تنش-کرنش با نرم‌شوندگی آشکار هستند. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوری روی مصالح CSG مورد استفاده در سدهای ژاپن [۸] ویژگی‌های مقاومتی، نفوذپذیری و

۲. روش تحقیق

به‌منظور انجام این ارزیابی، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D بهره‌گیری شد. نرم‌افزار PLAXIS 3D یکی از ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی سه‌بعدی است که به‌طور خاص برای تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی طراحی شده و قابلیت تحلیل‌های دقیق در شرایط مختلف استاتیکی، دینامیکی و شرایط ویژه مانند آبگیری و تراوش را دارد. روند کار به‌صورت سامانمند به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شد که تمامی مراحل مدل‌سازی و تحلیل‌های موردنیاز به شکل علمی و دقیق انجام شوند.

۲-۱. مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار PLAXIS 3D

برای مدل‌سازی عددی سد تنگ سرخ، ابتدا مختصات دقیق محلی و اطلاعات ژئوتکنیکی منطقه جمع‌آوری و در مدل وارد شدند. این اطلاعات شامل مشخصات هندسی سد، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح بدنه سد و فونداسیون آن بود. هندسه



شکل (۳). مقایسه نتایج کرنش محوری- تنش برشی، مصالح AC
[۱۳]

۳-۲. مراحل تحلیل‌های انجام‌شده

در طول این پژوهش، چندین نوع تحلیل باهدف ارزیابی پایداری و عملکرد سد تحت شرایط مختلف انجام شد. این تحلیل‌ها شامل بررسی استاتیکی، دینامیکی، شرایط آبیگری، تراوش و شرایط خاص مانند افت سریع آب در مخزن بود.

۱-۳-۲. تحلیل‌های استاتیکی و پایان ساخت

در این مرحله، پایداری سد تحت شرایط استاتیکی و در انتهای ساخت سد بررسی شد. تحلیل‌های پلاستیک با استفاده از مدل رفتاری Mohr-Coulomb برای ارزیابی تغییر شکل‌ها و تنش‌های برشی در بدنه سد انجام شد. مقادیر تنش و کرنش در نقاط مختلف سد محاسبه شده و تأثیر استفاده از مصالح جایگزین بر رفتار کلی سد تحلیل شد.

۲-۳-۲. تحلیل آبیگری و تحکیم

یکی از مراحل کلیدی در بررسی رفتار سد، تحلیل وضعیت سد در حین آبیگری و پس‌از آن بود. این تحلیل‌ها باهدف بررسی تغییرات فشار آب منفذی و نشست‌های احتمالی در بدنه سد انجام گرفت. تحلیل‌های تحکیم نیز باهدف ارزیابی نرخ و مقدار نشست‌ها پس از پایان مرحله آبیگری انجام شد. تغییرات فشار آب منفذی و میزان تحکیم در هر سه نوع مصالح جایگزین بررسی و مقایسه شدند.

۳-۳-۲. تحلیل تراوش

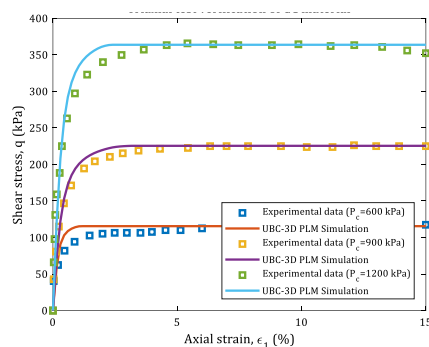
تراوش یکی از چالش‌های اصلی در سدهای خاکی است. به همین منظور، تحلیل تراوش در دو حالت پایدار و ناپایدار بر روی سد انجام شد. در این تحلیل‌ها، جریان آب از هسته و پوسته‌های سد بررسی شده و فشار آب منفذی و شیب‌های هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل‌ها به تعیین میزان تراوش و پتانسیل ایجاد نشست کمک کرد. در این بخش،

الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی تعریف می‌شود. این مدل به‌خصوص برای بررسی رفتار استاتیکی مصالح سد و تحلیل‌های بارگذاری نهایی سد مفید است.

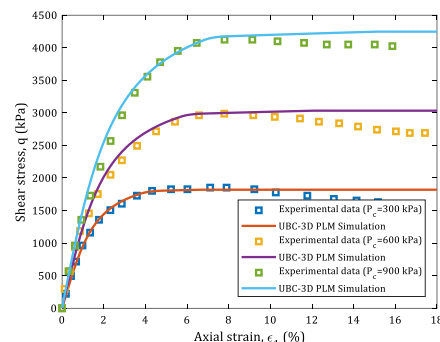
در طرف مقابل، مدل رفتاری UBC3D-PLM به‌عنوان یک مدل رفتاری پیچیده‌تر برای تحلیل‌های لرزه‌ای به‌کار رفت. این مدل رفتاری باقابلیت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح تحت بارهای دینامیکی، مناسب‌ترین انتخاب برای تحلیل پایداری سد تحت زلزله بود. علاوه بر این، پارامترهای مربوط به مقاومت، سختی و تغییر شکل‌های مصالح جایگزین نیز در مدل‌های رفتاری لحاظ شدند.

۱-۲-۲. کالیبراسیون پارامترهای مدل رفتاری

پارامترهای ورودی مدل‌های رفتاری با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین کالیبره شدند. این کالیبراسیون به‌منظور بهبود دقت نتایج و اطمینان از تطابق مدل‌های عددی با واقعیت انجام شد. در ادامه، نتیجه کالیبراسیون مصالح جایگزین خاک رس در هسته سد خاکی تنگ سرخ برای آزمایش سه محوری در حالت زهکشی شده در اشکال (۱) الی (۳) ارائه شده است.



شکل (۱). مقایسه نتایج کرنش محوری- تنش برشی، مصالح GC [۱۱]



شکل (۲). مقایسه نتایج کرنش محوری- تنش برشی، مصالح CSG

[۱۲]

و بویراحمد و ۳۶٪ (معادل ۵۶ میلیون مترمکعب) به استان فارس تعلق دارد.

۳-۳. مشخصات کلی سد تنگ سرخ

سد تنگ سرخ با ویژگی‌های فنی قابل توجه و طراحی‌های مدرن برای بهره‌برداری پایدار از منابع آبی منطقه طراحی شده است. مشخصات کلی سد در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول (۱). مشخصات کلی سد مخزنی تنگ سرخ			
مشخصات	مقادیر	مشخصات	مقادیر
رقوم کف رودخانه	۲۰۰۴/۵ متر از سطح دریا	طول تاج سد	۹۱۷ متر
رقوم تاج سد	۲۰۵۶ متر	حجم مخزن در	۱۲۵ میلیون مترمکعب
از سطح دریا		رقوم نرمال	
رقوم نرمال	۲۰۵۰ متر	حجم رسوبات	۹ میلیون مترمکعب
بهره‌برداری	از سطح دریا	۵۰ ساله	
ارتفاع سد از بستر رودخانه	۵۱/۵ متر	سطح دریاچه	۶۸۵ هکتار
ارتفاع سد از پی	۶۶/۵ متر	در رقوم نرمال	
عرض تاج سد	۱۰ متر	حجم تنظیم	۲۰۰ میلیون مترمکعب
		سالانه	
		سطح حوزه آبریز	۳۹۸/۵ کیلومتر مربع

۴-۳. پلان و مقاطع عرضی سد

برای مدل‌سازی دقیق سد در نرم‌افزار PLAXIS 3D، لازم است که مقاطع عرضی و پلان‌های توپوگرافی سد به صورت دقیق تهیه شوند. این اطلاعات برای تحلیل و طراحی دقیق تر سد و ارزیابی عملکرد آن تحت شرایط مختلف ضروری است. در شکل (۴)، نمای توپوگرافی کامل سد تنگ سرخ بشار نشان داده شده که پایه‌ای برای تحلیل‌های این مطالعه بود.



شکل (۴). توپوگرافی سد تنگ سرخ بشار

۵-۳. اهمیت پروژه سد تنگ سرخ

سد تنگ سرخ یک پروژه مهم در حوزه مدیریت منابع آب منطقه جنوب غرب ایران محسوب می‌شود. این سد باهدف تأمین

مقایسه‌ای میان تراوش در هسته‌های مختلف از جمله بتن آسفالتی و شن-رس انجام شد.

۴-۳-۲. تحلیل افت سریع و افت آهسته

برای بررسی پایداری سد در شرایط اضطراری و افت سریع سطح آب در مخزن، تحلیل افت سریع انجام شد. این تحلیل‌ها باهدف بررسی تغییرات تنش و تغییر شکل در بدنه سد پس از افت سطح آب در مخزن و سنجش پایداری هسته تحت این شرایط بحرانی بود. همچنین، تحلیل‌های تخلیه آهسته برای ارزیابی رفتار مصالح در هنگام کاهش تدریجی سطح آب نیز انجام گردید.

۵-۳-۲. تحلیل زلزله

یکی از مهم‌ترین بخش از تحلیل‌های انجام‌شده این پژوهش، تحلیل رفتار سد تحت بارهای لرزه‌ای بود. با استفاده از مدل رفتاری UBC3D-PLM، بارهای لرزه‌ای اعمال شده و پایداری و مقاومت مصالح جایگزین در برابر زلزله ارزیابی شد. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های دینامیکی نشان داد که هسته‌های جایگزین مانند بتن آسفالتی و شن و ماسه سیمانته شده عملکرد خوبی در برابر بارهای لرزه‌ای از خود نشان دادند.

۳. مطالعه موردی: سد مخزنی تنگ سرخ

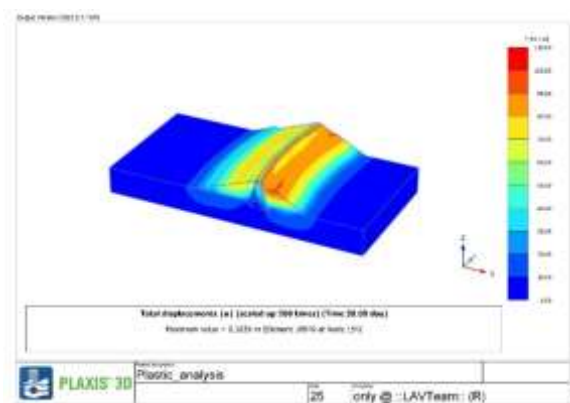
سد مخزنی تنگ سرخ بر روی رودخانه بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد و در مختصات جغرافیایی ۵۱°۴۴'۵۳" طول شرقی و ۱۲°۱۲'۳۰" عرض شمالی واقع شده است. این سد یکی از پروژه‌های مهم تأمین آب شرب در منطقه محسوب می‌شود و با هدف تأمین پایدار آب شهر یاسوج و دیگر مناطق اطراف طراحی و اجرا شده است.

۱-۳. موقعیت و دسترسی

دسترسی به محل ساختگاه سد از طریق جاده شیراز-یاسوج و سپس یک جاده آسفالت فرعی به طول ۳۵ کیلومتر از یاسوج فراهم می‌شود. کلنگ‌زنی ساخت سد در سال ۱۳۹۰ انجام شد، اما عملیات اجرایی به‌طور جدی از سال ۱۳۹۶ آغاز گردید. این پروژه با تمرکز بر تأمین آب شرب پایدار برای یاسوج شکل گرفته و از اهمیت استراتژیک در مدیریت منابع آبی منطقه برخوردار است.

۲-۳. منابع آبی و تقسیم‌بندی سهم استان‌ها

حدود ۳۶٪ از منابع آبی تغذیه‌کننده این سد از استان کهگیلویه و بویراحمد و ۶۴٪ مابقی از استان فارس سرچشمه می‌گیرد. بر اساس تقسیم‌بندی کمیته فنی آب کشور، ۶۴٪ از تنظیم آب سد (معادل ۱۰۱ میلیون مترمکعب) به استان کهگیلویه



شکل (۵). جابجایی کل در تحلیل پلاستیک قبل از آبیگری

جدول (۲). درصد تغییرات جابجایی، تنش و ضریب اطمینان مصالح مختلف بر اساس تحلیل پلاستیک قبل از آبیگری

مصالح	$ u $	درصد تغییر	Sig_{zz}	درصد تغییر	FS	درصد تغییر
	$ u $		Sig_{zz}		FS	
CSG1	۰/۱۰۳۵	-	۵۱/۸۶	-	۱/۷۷۸	-
CSG2	۰/۱۰۳۲	-۰/۲۹	۵۳/۵۴	% ۳/۶	۱/۷۹۶	% ۱/۰۱
CSG3	۰/۱۰۳۷	% ۰/۱۹	۵۲/۳۷	افزایش	۱/۷۸۸	افزایش
GC	۰/۱۸۳۷	% ۷۷/۴	۲۷/۳۹	% -۴۷	۱/۸۰۶	% ۱/۵۶
ASPHALT1	۰/۱۱۰۷	% ۷/۳	۵۱/۶۷	% -۰/۱۹	۱/۸۰۶	% ۱/۵۶
ASPHALT2	۰/۱۰۹۷	% ۵/۹	۱۷/۰۸	% -۶۷	۱/۸۰۵	% ۱/۵۱
ASPHALT3	۰/۱۱۱۷	% ۷/۹۲	۳۹/۷۹	% -۲۳	۱/۷۸	% ۰/۱۱

جابجایی کل: کمترین جابجایی برای مصالح CSG سپس بتن آسفالتی می‌باشد و بیشترین جابجایی برای مصالح شن-رس است. **تنش عمودی:** کمترین تنش برای مصالح بتن آسفالتی سپس شن-رس و در نهایت بیشترین تنش برای مصالح CSG می‌باشد. **ضریب اطمینان:** ضریب اطمینان در مصالح بتن آسفالتی و GC در مقایسه با CSG بالاتر است.

پایدار آب شرب شهرهای اطراف به‌ویژه یاسوج طراحی شده و همچنین نقشی کلیدی در تنظیم جریان‌های آبی و جلوگیری از سیلاب‌های مخرب ایفا می‌کند. علاوه بر این، بهره‌گیری از سیستم‌های پیشرفته انحراف و طغیان گیر در این سد نشان‌دهنده توجه به استانداردهای مدرن طراحی سازه‌های هیدرولیکی است.

۴. نتایج و بحث

در این تحقیق، باهدف ارزیابی امکان استفاده از مصالح جایگزین به‌جای هسته رس در سد خاکی، انواع مختلف تحلیل‌های مهندسی و ژئوتکنیکی روی سد خاکی موردبررسی انجام شده است. در این راستا، از مصالحی چون شن-رس، بتن آسفالتی و شن و ماسه سیمانته شده استفاده شده است تا جایگزین‌های بالقوه برای هسته رس بررسی شوند. هرکدام از این مصالح بر اساس معیارهای مختلف مقاومتی، تراوش و پایداری ارزیابی شده‌اند تا کارایی و عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف سنجیده شود.

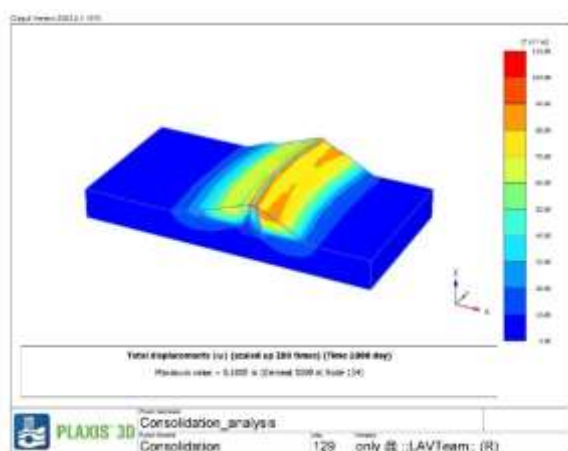
برای انجام این ارزیابی‌ها، تحلیل‌های مختلفی شامل تحلیل پلاستیک برای بررسی پایداری سازه در شرایط پایان ساخت، تحلیل‌های آبیگری و تحکیم جهت بررسی اثرات تغییرات فشار آب منفذی و نشست بدنه سد، تحلیل تراوش در دو حالت پایدار و گذرا به‌منظور بررسی الگوی جریان آب و فشار آب منفذی در هسته و پوسته سد، تحلیل افت سریع و تخلیه آهسته برای سنجش رفتار سد در شرایط اضطراری، و تحلیل زلزله به‌منظور ارزیابی پایداری سد تحت بارهای لرزه‌ای صورت گرفته است.

این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D انجام شد تا بتوان مدل‌سازی عددی دقیق و قابل‌اعتمادی از سد در حالات مختلف عملکردی ارائه داد. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از هر یک از این تحلیل‌ها به‌تفصیل موردبحث قرار می‌گیرد تا نشان داده شود چگونه مصالح جایگزین از نظر مکانیکی، هیدرولیکی و پایداری در شرایط مختلف عملکردی عمل کرده‌اند و آیا می‌توانند جایگزینی مناسب برای هسته رس در سد خاکی باشند یا خیر.

۴-۱. تحلیل پلاستیک

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به تحلیل پلاستیک سد خاکی تنگ سرخ پرداخته شده است و در ادامه مقایسه بین استفاده از مصالح مختلف در این سد موردبررسی و تحلیل قرار گرفته است. به‌عنوان مثال نمونه‌ای از جابجایی کل در سد تنگ سرخ در تحلیل پلاستیک قبل و بعد از آبیگری برای مصالح CSG-1 در شکل (۵) و (۶) ارائه شده است و در ادامه در جداول (۲) و (۳) تغییرات مربوط به تنش، جابجایی و ضریب اطمینان مصالح مختلف ارائه شده است.

(۸) ارائه شده است و در ادامه در جداول (۴) و (۵) تغییرات مربوط به تنش، جابجایی و ضریب اطمینان مصالح مختلف ارائه شده است.

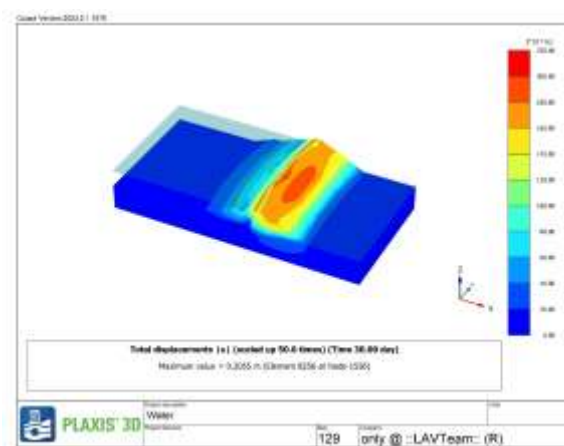


شکل (۷). جابجایی کل در تحلیل تحکیم قبل از آگیری

جدول (۴). درصد تغییرات جابجایی، تنش و ضریب اطمینان مصالح مختلف بر اساس تحلیل تحکیم قبل از آگیری

مصالح	$ u $	درصد تغییر	Sig_{zz}	درصد تغییر	FS	درصد تغییر
	$ u $		Sig_{zz}		FS	
CSG1	۰/۱۰۰۵	-	۸۰/۷۵	-	۱/۷۸۳	-
CSG2	۰/۰۹۹۳	-۱/۲۰	۸۰/۷۵	-	۱/۸۰۷	٪ ۱/۳۵
		٪ کاهش				افزایش
CSG3	۰/۰۹۹۴	-۱/۱۰	۸۰/۸۴	-	۱/۸۱۳	٪ ۱/۶۸
		٪ کاهش				افزایش
GC	۰/۱۷۷۶	٪ ۷۶/۷	۸۴/۵۷	٪ ۴/۷۳	۱/۸۰۵	٪ ۱/۲۳
		افزایش				افزایش
ASPHALT1	۰/۱۰۰۸	٪ ۷/۴	۸۲/۵۲	٪ ۲/۲	۱/۷۸۶	٪ ۰/۱۷
		افزایش				افزایش
ASPHALT2	۰/۱۰۶۲	٪ ۵/۶۷	۸۳/۲۵	٪ ۳/۱	۱/۷۹۲	٪ ۰/۵
		افزایش				افزایش
ASPHALT3	۰/۱۰۸۶	٪ ۸	۸۲/۸۱	٪ ۲/۵۵	۱/۷۹۷	٪ ۰/۷۸
		افزایش				افزایش

جابجایی کل: کمترین جابجایی برای مصالح CSG سپس بتن آسفالتی می باشد و بیشترین جابجایی برای مصالح شن-رس است. **تنش عمودی:** تغییرات در تنش عمودی به نسبت کم است. کمترین تنش برای مصالح شن-رس سپس بتن آسفالتی و در نهایت بیشترین تنش برای مصالح CSG سپس بتن آسفالتی در نهایت ضریب اطمینان: ضریب اطمینان در مصالح GC و CSG در مقایسه با بتن آسفالتی بالاتر است.



شکل (۶). جابجایی کل در تحلیل پلاستیک بعد از آگیری

جدول (۳). درصد تغییرات جابجایی، تنش و ضریب اطمینان مصالح مختلف بر اساس تحلیل پلاستیک بعد از آگیری

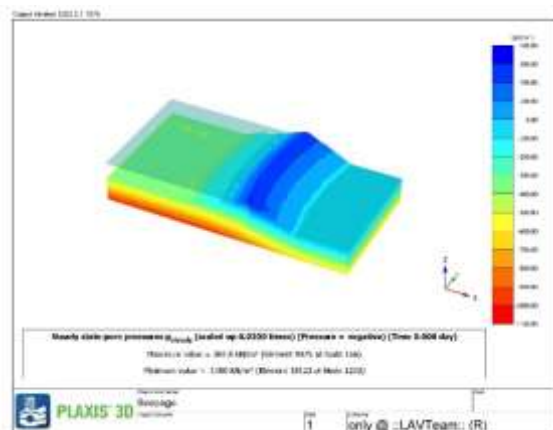
مصالح	$ u $	درصد تغییر	Sig_{zz}	درصد تغییر	FS	درصد تغییر
	$ u $		Sig_{zz}		FS	
CSG1	۰/۲۰۵۵	-	۵۹/۴۱	-	۱/۲۶	-
CSG2	۰/۲۰۰۸	٪ ۱/۲۱	۵۵/۶۹	٪ -۶/۲۶	۱/۲۵۶	-۰/۳۲
		افزایش		٪ کاهش		٪ کاهش
CSG3	۰/۲۰۸۳	٪ ۱/۳۵	۵۱/۸۸	-۱۲/۶۷	۱/۲۴۵	-۱/۲۰
		افزایش		٪ کاهش		٪ کاهش
GC	۰/۲۲۷۶	٪ ۱۰/۷	۴۵/۳۶	-۲۳/۶۵	۱/۲۶۳	٪ -۰/۲۴
		افزایش		٪ کاهش		افزایش
ASPHALT1	۰/۲۰۶۹	٪ ۰/۶۸	۵۲/۶۹	-۱۱/۳۱	۱/۲۳۷	-۱/۸۴
		افزایش		٪ کاهش		٪ کاهش
ASPHALT2	۰/۲۰۶۹	٪ ۰/۶۸	۵۹/۱۴	-۰/۴۶	۱/۲۵۸	-۰/۱۶
		افزایش		٪ کاهش		٪ کاهش
ASPHALT3	۰/۲۰۲۹	٪ ۱/۲۷	۵۴/۸۴	٪ -۷/۶۹	۱/۲۴۸	-۰/۹۶
		افزایش		٪ کاهش		٪ کاهش

جابجایی کل: کمترین جابجایی برای مصالح CSG سپس بتن آسفالتی می باشد و بیشترین جابجایی برای مصالح شن-رس است. **تنش عمودی:** تغییرات در تنش عمودی به نسبت کم است. کمترین تنش برای مصالح شن-رس سپس بتن آسفالتی و در نهایت بیشترین تنش برای مصالح CSG می باشد. **ضریب اطمینان:** ضریب اطمینان در مصالح GC و CSG در مقایسه با بتن آسفالتی بالاتر است.

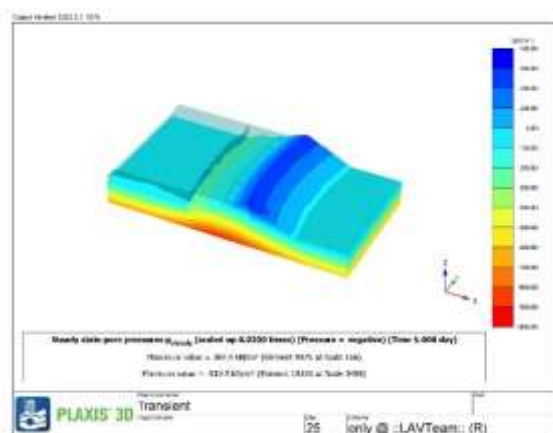
۲-۴. تحلیل تحکیم

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به تحلیل تحکیم سد خاکی تنگ سرخ پرداخته شده است و در ادامه مقایسه بین استفاده از مصالح مختلف در این سد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به عنوان مثال نمونه ای از جابجایی کل در سد تنگ سرخ در تحلیل تحکیم قبل و بعد از آگیری برای مصالح CSG-1 در شکل (۷) و

به‌عنوان مثال فشار آب حفره‌ای در حالت پایدار و گذرا در سد تنگ سرخ در تحلیل تراوش برای مصالح CSG-1 در شکل (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

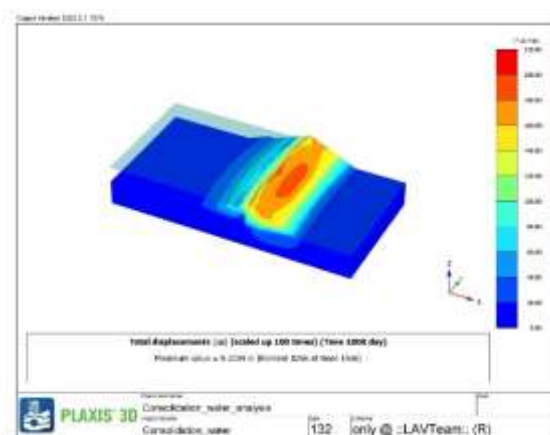


شکل (۹). تحلیل تراوش در حالت پایدار در پایان ساخت پس از آبگیری



شکل (۱۰). تحلیل تراوش در حالت گذرا در پایان ساخت پس از آبگیری

هسته شن-رس عملکرد مناسبی در هر دو حالت تراوش پایدار و گذرا دارد، اما به دلیل نفوذپذیری بیشتر نسبت به گزینه‌های دیگر، مقدار تراوش قابل‌توجه‌تری نسبت به شن و ماسه سیمانته شده و بتن آسفالتی نشان می‌دهد. باین‌حال، تغییرات فشار آب منفذی در تراوش گذرا می‌تواند بر عملکرد هسته تأثیرگذار باشد. هسته شن و ماسه سیمانته شده به دلیل نفوذپذیری کمتر و فشردگی بیشتر، تراوش بسیار کمی در هر دو حالت پایدار و گذرا دارد و می‌تواند گزینه مناسبی برای کاهش تراوش و افزایش پایداری سد باشد. هسته بتن آسفالتی به دلیل نفوذناپذیری بالا، بهترین عملکرد را از نظر جلوگیری از تراوش در هر دو حالت پایدار و گذرا ارائه می‌دهد و برای کنترل تراوش، مناسب‌ترین گزینه به شمار می‌آید. به‌طور کلی، بتن آسفالتی به دلیل جلوگیری کامل از تراوش، بهترین گزینه برای هسته سد است، درحالی‌که شن و ماسه



شکل (۸). جابجایی کل در تحلیل تحکیم بعد از آبگیری

جدول (۵). درصد تغییرات جابجایی، تنش و ضریب اطمینان مصالح مختلف بر اساس تحلیل تحکیم بعد از آبگیری

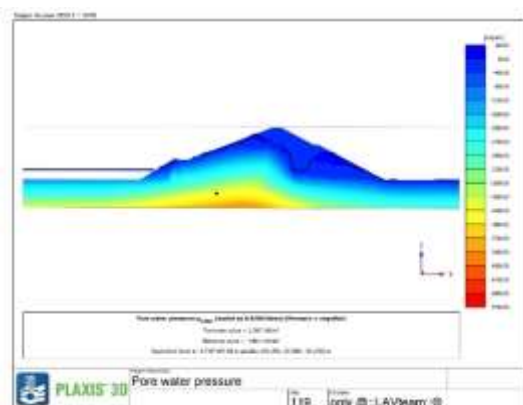
مصالح	$ u $	درصد تغییر	Sig_{zz}	درصد تغییر	FS	درصد تغییر
CSG1	۰/۲۰۰۴	-	۵۲/۵۴	-	۱/۲۵۸	۱/۳۹
CSG2	۰/۲۰۳۸	٪ ۱/۷	۵۱/۱۹	٪ -۲/۵۷	۱/۲۵۳	-۰/۳۹
		افزایش		کاهش		٪
CSG3	۰/۲۰۵	٪ ۲/۲۹	۵۱/۲۳	٪ -۲/۴۹	۱/۲۵۶	-۰/۱۶
		افزایش		کاهش		٪
GC	۰/۲۲۵۹	٪ ۱۲/۷	۴۵/۳۲	-۱۳/۲۴	۱/۲۶	٪ ۰/۱۶
		افزایش		کاهش		افزایش
ASPHALT1	۰/۲۰۳۸	٪ ۱/۱۹	۵۱/۸۸	٪ -۱/۲۵	۱/۲۵۳	-۰/۳۹
		افزایش		کاهش		٪
ASPHALT2	۰/۲۰۵۶	٪ ۲/۶	۵۹/۴۲	٪ ۱۳	۱/۲۶۲	٪ ۰/۳۱
		افزایش		افزایش		افزایش
ASPHALT3	۰/۱۹۸۲	٪ -۱	۵۴/۷۳	٪ ۴/۱۷	۱/۲۵۲	-۰/۴۷
		کاهش		افزایش		٪
						کاهش

جابجایی کل: کمترین جابجایی برای مصالح CSG سپس بتن آسفالتی می‌باشد و بیشترین جابجایی برای مصالح شن-رس است. **تنش عمودی:** تغییرات در تنش عمودی به نسبت کم است. کمترین تنش برای مصالح شن-رس سپس CSG در نهایت بیشترین تنش برای مصالح بتن آسفالتی می‌باشد. **ضریب اطمینان:** ضریب اطمینان در تحلیل‌های انجام‌شده در یک محدوده است.

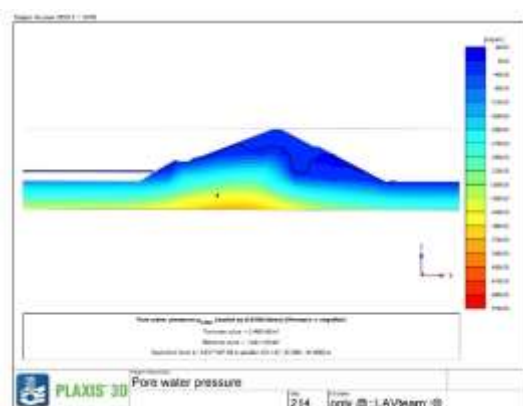
۳-۴. تحلیل تراوش

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به تحلیل تراوش سد خاکی تنگ سرخ پرداخته شده است و در ادامه مقایسه بین استفاده از مصالح مختلف در این سد موردبررسی و تحلیل قرارگرفته است.

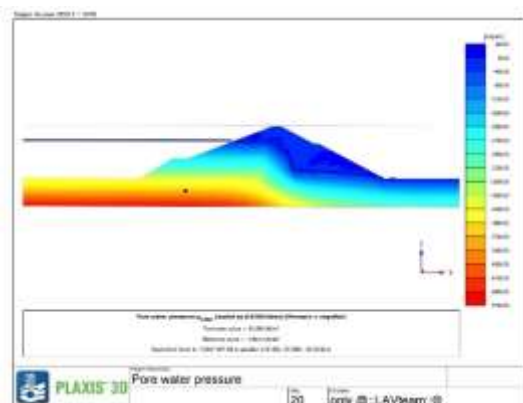
سطح مخزن بالا و پایین سد خاکی تنگ سرخ پرداخته شده است و در ادامه مقایسه بین استفاده از مصالح مختلف در این سد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به عنوان مثال نمایی از توزیع فشار آب حفره‌ای در چهار حالت (افت سریع، افت آرام، مخزن بالا، سطح مخزن پایین) برای مصالح CSG-1 در اشکال (۱۲) الی (۱۵) ارائه شده است و در ادامه در جدول (۷) تغییرات مربوط به ضریب اطمینان مصالح مختلف ارائه شده است.



شکل (۱۲). توزیع فشار آب حفره‌ای در حالت افت سریع



شکل (۱۳). توزیع فشار آب حفره‌ای در حالت افت آرام

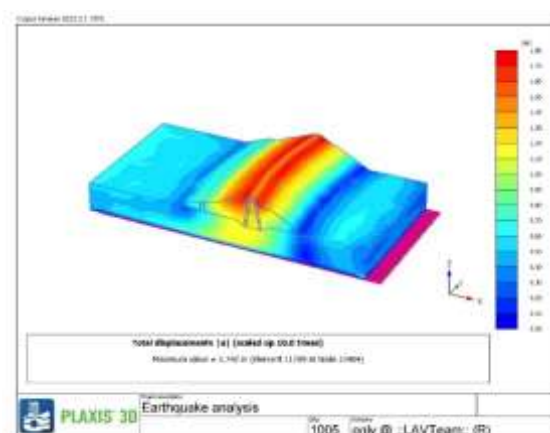


شکل (۱۴). توزیع فشار آب حفره‌ای در حالت سطح مخزن بالا

سیمانته شده نیز عملکرد بسیار خوبی در کاهش تراوش و پایداری دارد.

۴-۴. تحلیل لرزه‌ای

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به تحلیل لرزه‌ای سد خاکی تنگ سرخ پرداخته شده است و در ادامه مقایسه بین استفاده از مصالح مختلف در این سد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به عنوان مثال نمونه‌ای از جابجایی کل در سد تنگ سرخ در تحلیل لرزه‌ای بعد از آگیری برای مصالح CSG-1 در شکل (۱۱) ارائه شده است و در ادامه در جدول (۶) تغییرات مربوط به تنش، جابجایی و ضریب اطمینان مصالح مختلف ارائه شده است.



شکل (۱۱). جابجایی کل در تحلیل زلزله بعد از آگیری

جدول (۶). درصد تغییرات جابجایی و تنش مصالح مختلف بر اساس تحلیل زلزله

مصالح	$ u $	درصد تغییر $ u $	Sig_{zz}	درصد تغییر Sig_{zz}
CSG1	۱/۷۴۲	-	۹۰۴/۸	-
CSG2	۱/۷۵۹	۰/۹۸٪ افزایش	۸۹۲/۳	۱/۳۸٪ کاهش
CSG3	۱/۷۸۱	۲/۲۴٪ افزایش	۸۷۳/۸	۳/۴۳٪ کاهش
GC	۱/۵۵۳	۱۰/۸۵٪	۷۹۲/۸	۱۲/۳۸٪ کاهش
کاهش				
ASPHALT1	۱/۷۵۵	۰/۷۵٪ افزایش	۹۲۲/۱	۱/۹۱٪ کاهش
ASPHALT2	۱/۷۱۱	۱/۷۸٪ کاهش	۹۱۲/۹	۰/۸۹٪ افزایش
ASPHALT3	۱/۷۴۴	۰/۱۲٪ افزایش	۸۹۸/۸	۰/۶۶٪ کاهش

جابجایی کل: کمترین جابجایی برای مصالح شن-رس سپس بتن آسفالتی می‌باشد و بیشترین جابجایی برای مصالح CSG است. **تنش عمودی:** تغییرات در تنش عمودی به نسبت کم است. کمترین تنش برای مصالح شن-رس سپس CSG در نهایت بیشترین تنش برای مصالح بتن آسفالتی می‌باشد.

۴-۵. تحلیل تخلیه سریع و آرام

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به تحلیل افت سریع و آرام،

مصالح، هزینه واحد هر نوع مصالح، هزینه حمل‌ونقل و هزینه‌های اجرایی پروژه هستند. روند کلی محاسبه هزینه‌ها به این ترتیب است: **تعیین حجم مصالح موردنیاز:** با استفاده از نقشه‌ها و مشخصات طراحی سد، حجم هر نوع مصالح محاسبه می‌شود. برای این منظور می‌توان از نرم‌افزارهای مدلسازی مانند AutoCAD یا سایر نرم‌افزارهای تخصصی مهندسی عمران استفاده کرد.

هزینه واحد مصالح: هزینه هر مترمکعب از مصالح مختلف (مانند خاک رس، ماسه، بتن آسفالتی) باید مشخص شود. این هزینه‌ها معمولاً از تأمین‌کنندگان مصالح یا منابع معتبر به دست می‌آید.

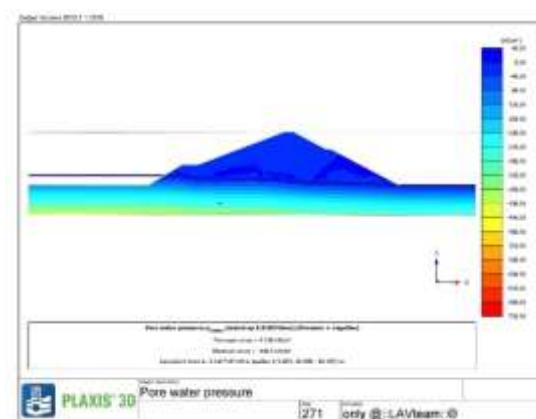
هزینه حمل‌ونقل: هزینه حمل‌ونقل مصالح از محل استخراج یا تولید تا محل پروژه با توجه به فاصله، نوع وسایل نقلیه و شرایط حمل‌ونقل محاسبه می‌شود.

هزینه‌های اجرا و نصب: هزینه‌های مرتبط با اجرای پروژه، از جمله کارگری، تجهیزات و ماشین‌آلات، نیز باید در نظر گرفته شود. در ادامه در جدول (۸) مقایسه هزینه‌های مختلف مصالح هسته سد خاکی و محاسبات تغییرات درصدی هزینه کل ارائه شده است.

جدول (۸). مقایسه هزینه‌های مختلف مصالح هسته سد خاکی و محاسبات تغییرات درصدی هزینه کل

نوع مصالح هسته	هزینه هر مترمکعب (ریال)	هزینه کل (ریال)	تغییر هزینه کل (%)
شن-رس	۲/۴۰۰/۰۰۰	۶۱۱/۶۹۷/۶۰۰/۰۰۰	-
شن و ماسه سیمانته شده	۱۸/۵۰۰/۰۰۰	۴/۷۱۵/۱۶۹/۰۰۰/۰۰۰	۶۷۰/۸
بتن آسفالتی	۴۹/۰۴۰/۰۰۰	۲/۳۸۳/۳۴۴/۰۰۰/۰۰۰	۲۸۹/۶

هسته شن و ماسه سیمانته شده نسبت به هسته شن-رس هزینه بالاتری دارد (حدود ۶۷۰/۸ درصد بیشتر) و همچنین ۹۷/۸ درصد گران‌تر از هسته با مصالح بتن آسفالتی می‌باشد، اما در پروژه‌هایی که نیاز به مقاومت و دوام بیشتری دارند، ممکن است توجیه اقتصادی داشته باشد. هسته بتن آسفالتی پرهزینه‌تر از هسته شن-رس است ولیکن ارزان‌تر از هسته با مصالح شن ماسه سیمانته شده می‌باشد. این نوع هسته در صورتی مناسب است که خواص فوق‌العاده‌ای مثل دوام بالا و مقاومت در برابر آب باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که هسته شن-رس کم‌هزینه‌ترین گزینه است، در حالی که مصالح شن و ماسه سیمانته شده گران‌ترین گزینه است و تنها در شرایط خاص می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد.



شکل (۱۵). توزیع فشار آب حفره‌ای در حالت سطح مخزن بالا

جدول (۷). درصد بهبود یا تغییرات ضریب اطمینان مصالح مختلف بر اساس تحلیل‌های تخلیه سریع و آرام

مصالح	تخلیه سریع	تخلیه آرام	سطح مخزن بالا	سطح مخزن پایین
CSG1 به CSG2	٪ ۰/۸۳	٪ ۱/۲۲	٪ ۰/۵	٪ ۱/۱
CSG2 به CSG3	٪ ۰/۱۹	٪ ۰/۱۷	٪ ۰/۱۱	٪ ۰/۱۶
GC به CSG3	٪ ۸/۲۶	٪ ۱۰/۷	٪ ۵/۸۲	٪ ۵/۵۲
GC به ASPHALT1	٪ ۱۵/۶۳	٪ ۱۵/۸۷	٪ ۸/۷۵	٪ ۶/۴۵
ASPHALT1 به ASPHALT2	٪ ۲/۲۱	٪ ۱/۳۵	٪ ۴/۰۷	٪ ۸/۲۹
ASPHALT2 به ASPHALT3	٪ ۲/۳۵	٪ ۲/۹۵	٪ ۰/۹۳	٪ ۱/۰۵

در افت سریع، مصالح بتن آسفالتی به‌طورکلی بهبود قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به سایر مصالح CSG و GC نشان می‌دهد. در افت آرام، رفتار مشابهی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که بتن آسفالتی در مقایسه با CSG و GC بهبودهای بیشتری دارد. در سطح مخزن پایین، بازهم بتن آسفالتی عملکرد بهتری نسبت به سایر مصالح دارد. در سطح مخزن بالا، عملکرد بتن آسفالتی در همه حالت‌ها بالاتر از CSG و GC است.

۴-۶. تحلیل اقتصادی

برای محاسبه هزینه مصالح به‌کاررفته در ساخت سد، چندین فاکتور کلیدی باید در نظر گرفته شود. این فاکتورها شامل حجم

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد سه نوع مصالح جایگزین شامل شن-رس، شن و ماسه سیمانته شده، و بتن آسفالتی به عنوان هسته سد خاکی تنگ سرخ بشار بررسی شد. نتایج تحلیل‌های مختلف، از جمله تحلیل‌های پلاستیک، آگیری، تحکیم، تراوش، و تحلیل لرزه‌ای، نشان داد که هر یک از مصالح جایگزین، تأثیر متفاوتی بر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی سد دارند. بتن آسفالتی به دلیل نفوذناپذیری بالا، کارایی بیشتری در جلوگیری از تراوش و بهبود پایداری هسته سد داشت. هسته شن و ماسه سیمانته شده نیز به دلیل مقاومت و کاهش نفوذپذیری گزینه‌ای مناسب برای پایداری بلندمدت سد بود، در حالی که هسته شن-رس با وجود کاهش تراوش، نفوذپذیری بالاتری نسبت به دو گزینه دیگر داشت. بر

اساس نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مصالح هسته باید با توجه به شرایط محیطی، هزینه‌ها، و نیازهای پروژه انجام شود. بتن آسفالتی به دلیل عملکرد برتر در برابر تراوش و لرزه‌پذیری، گزینه‌ای ایده‌آل برای پروژه‌های با محدودیت کمتر در هزینه و تکنیک‌های ساخت است. از سوی دیگر، شن و ماسه سیمانته شده به دلیل مقاومت بالا، انتخاب مناسبی در شرایطی است که به انعطاف‌پذیری کمتری نیاز است. در صورتی که هزینه و سادگی ساخت اولویت داشته باشد، شن-رس با مدیریت مناسب گزینه مناسبی خواهد بود.

در ادامه در جدول (۹) نمای کلی از تحلیل‌های انجام‌شده و مقایسه کیفی نتایج تحلیل برای مصالح مختلف ارائه شده است.

جدول (۹). مقایسه کیفی نتایج تحلیل‌های صورت گرفته برای مصالح مختلف

شن و ماسه سیمانته شده	مخلوط شن و خاک رس	بتن آسفالتی
استحکام بالا، اما صلبیت زیاد باعث ترک خوردگی احتمالی می شود	انعطاف پذیری خوب، اتلاف انرژی مناسب، اما احتمال تراوش و افزایش فشار آب منفذی در زلزله وجود دارد	انعطاف پذیری و نفوذناپذیری عالی، مقاوم در برابر لرزه ها و شوک های شدید، با توانایی بالای اتلاف انرژی
کنترل تراوش	نفوذناپذیری عالی	نفوذناپذیری برتر، جلوگیری از نشت
مقاومت در برابر فرسایش	نیاز به محافظت اضافی	مقاومت بسیار عالی
تحکیم	تحکیم کندتر، با نشست متوسط	نشست ناچیز، تحکیم سریع، پایداری طولانی مدت
پلاستیک	تغییر شکل متوسط، رفتار انعطاف پذیر	توزیع تنش عالی، تغییر شکل کم، مقاوم در برابر ترک و شکست
افت سریع و آرام	تغییر شکل زیاد، کنترل تراوش خوب اما زمان تحکیم طولانی	توانایی بالا در تحمل تغییرات فشار آب بدون ترک خوردگی

۶. مراجع

- [1] Telgote, A. M., Narayanan, V., & Dave, N. A. N., "Design and implementation of water environment monitoring system using GSM technology". In International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD), IEEE, 2015.
- [2] Wahlstrom, E., "Dams, dam foundations, and reservoir sites" (Vol. 6), 2012.
- [3] Soroush, A., Sasanian, S., & Soltani Jigheh, H., "Mixed versus clayey soils for the core of earth dams". In Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4), IOS Press, 2009.
- [4] ASCE Task Committee, "Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance", 2000.
- [5] Jafari, M. K., & Shafiee, A., "Mechanical behavior of compacted composite clays". Canadian Geotechnical Journal, 41(6), 1152-1167, 2004.
- [6] Shafiee, A., "Effect of core composition on seismic stability of earth dams". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 161(6), 283-290, 2008.
- [7] Sun, M. Q., Peng, C. S., Li, Y. L., & Xing, Z. X., "Triaxial test of over lean cemented material". Shuilu Shuidian Keji Jinzhan (Advances in Science and Technology of Water Resources), 27(4), 46-49, 2007.
- [8] He, Y. L., Peng, Y. F., & Xiong, K., "Analysis on material property of Hardfill dam". Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 5(4), 1-6, 2007.
- [9] Hirose, T., Fujisawa, T., Yoshida, H., Kawasaki, H., Hirayama, D., & Sasaki, T., "Concept of CSG and its material properties. In Roller Compacted Concrete Dams", 465-473, 2018.
- [10] Wang, W., Höeg, K., & Zhang, Y., "Design and performance

- constitutive model of cemented sand and gravel". *Materials*, 16(2), 542, 2023.
- [13] Akhtarpour, A., & Khodaii, A., "Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams". *Construction and building materials*, 41, 319-334, 2013.
- of the Yele asphalt-core rockfill dam". *Canadian Geotechnical Journal*, 47(12), 1365-1381, 2010.
- [11] Jafari, M. K., & Shafiee, A., "Mechanical behavior of compacted composite clays". *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1152-1167, 2004.
- [12] Ren, H., Cai, X., Wu, Y., Jing, P., & Guo, W., "A study of strength parameter evolution and a statistical damage