

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ

عنوان:

تحلیل رفتار سد خاکی نرماب با استفاده از روش عددی

نگارنده:

الهام محمد قلی پور

اساتید راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر مهدی نوروزی

تیر ماه ۱۳۹۹

تقدیم اثر

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم

به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان زحمکش

پدرم

به آرامش‌بخش‌ترین نگاه زندگیم، چشمان پر مهر

مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم

و هرچه بگو شدم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیتان را پاس توانم بگویم.

امروز، هستی‌ام به امید شماست

ره آوردی کران سنگ تر از این ارزان نداشتیم تا به خاک پستان نثار کنم،

باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه غبار محسنتان را بروداید

بوسه بردستان پر مهرتان...

شکر و قدردانی

خدایا نکویم دستم بگیر، عمریست گرفته‌ای مبادارها کنی

پیش از هر چیز از خداوند یکتایی سپاسگزارم که مریاری نمود تا بتوانم گامی دیگر را در مسیر زندگی ام با موفقیت پشت بگذارم.

برای مردی که خودنشت تا بتوانم بایستم

پدرم

وزنی که چشانش حکایت خاکستراست و غروب

مادرم

کسانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند

آموزگار انم: جناب آقای دکتر جلالی و جناب آقای دکتر نوروزی

و همچنین از جناب آقای مهندس عبدالحکیم جاوید و جناب آقای مهندس رضا قبادی شکر ویژه دارم

امید که شمع وجودشان همیشه روشن بماند...

تعمدنامه

اینجانب **الهام محمد قلی پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **معدن - مهندسی مکانیک سنگ** دانشکده **معدن، نفت و ژئوفیزیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل رفتار سد نرماب با استفاده از روش عددی تحت راهنمایی **دکتر سید محمد اسماعیل جلالی** و **دکتر مهدی نوروزی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

پدیده‌ی نشست یکی از عواملی است که می‌تواند شرایط سدها را دگرگون کند و منجر به آسیب جدی به آن‌ها شود. برآورد میزان این نشست‌ها در کنترل پایداری و تغییرشکل سدهای خاکی در طول ساخت و طراحی بدنه و سازه‌های وابسته‌ی آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

هدف در تحقیق حاضر، بررسی نشست سد نرماب با استفاده از مدل‌سازی عددی در دوران ساخت و اولین آبیگیری است. سد نرماب یک سد خاکی همگن با ارتفاع ۶۰ متر، عرض تاج ۱۰ متر و طول تاج سد ۸۰۷ متر و حجم مخزن ۱۱۵ میلیون مترمکعب است که در شهرستان مینودشت در حال ساخت است. برای کنترل میزان نشست پی و بدنه‌ی سد نرماب از پنج ایستگاه نشست‌سنج به منظور ثبت نشست پی و بدنه‌ی سد نرماب استفاده شده که در این تحقیق از نشست‌سنج‌های واقع در دو مقطع مختلف استفاده شده است. با استفاده از آنالیز عددی و با در نظر گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی بستر و بدنه‌ی سد، پروفیل زمین‌شناسی، فشار ناشی از روباره و سطح ایستابی آب زیرزمینی، نشست‌ها و تغییرشکل‌های کلی بدنه و پی سد مدل‌سازی و تحلیل شده است. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS، با در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ای و مطابق با روند اجرایی سد انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های ابزار دقیق هم‌خوانی خوبی داشته است. علاوه بر این مشاهده می‌شود عملکرد سد در رابطه با فشار منافذ ایجاد شده، نشست و تنش‌های ایجاد شده، مناسب است. حداکثر نشست سد در پایان ساخت در یک سوم میانی ارتفاع سد رخ می‌دهد و مقدار آن ۱/۶ متر است. این مقدار تقریباً ۳ درصد ارتفاع سد است که نشان می‌دهد رفتار سد قابل پذیرش است. فشار آب منفذی ایجاد شده در اثر ساخت لایه‌ای سد، در هر مرحله به علت تحکیم صورت گرفته، از بین می‌رود به طوری که در پایان مرحله ساخت، قابل صرف نظر کردن است. در تحلیل بلند مدت نیز بیشینه جابجایی سد پس از پنج سال به ۲ متر می‌رسد و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند که حاکی از ایمن بودن سد در دراز مدت است.

کلمات کلیدی: سد خاکی همگن، نشست، تحلیل عددی، PLAXIS 2D، ابزار دقیق

فهرست مطالب

فصل اول : کلیات

- ۱ - ۱ - مقدمه ۲
- ۱ - ۲ - ضرورت و اهمیت تحقیق ۳
- ۱ - ۳ - اهداف تحقیق ۴
- ۱ - ۴ - روش و مراحل انجام تحقیق ۴
- ۱ - ۵ - ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم : پیشینه‌ی تحقیق

- ۲ - ۱ - مقدمه ۸
- ۲ - ۲ - پیشینه مطالعات تجربی و تحلیلی نشست ۸
- ۲ - ۳ - پیشینه مطالعات عددی نشست ۹

فصل سوم : مبانی و تئوری نشست سدهای خاکی

- ۳ - ۱ - مقدمه ۳۲
- ۳ - ۲ - عوامل موثر در بروز نشست در خاک ۳۳
- ۳ - ۳ - انواع نشست ها ۳۴
- ۳ - ۳ - ۱ - نشست آبی ۳۵
- ۳ - ۳ - ۲ - نشست تحکیم ۳۷
- ۳ - ۴ - رفتارنگاری و ابزاربندی نشست ۴۶
- ۳ - ۶ - اهداف ابزاربندی و رفتارنگاری در سدهای خاکی ۴۷
- ۳ - ۷ - جمع بندی ۴۸

فصل چهارم : معرفی سد نرماب و ساختگاه آن

- ۴ - ۱ - مقدمه ۵۰
- ۴ - ۲ - معرفی سد نرماب ۵۰
- ۴ - ۳ - موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به سد ۵۳
- ۴ - ۴ - زمین شناسی عمومی ساختگاه سد ۵۵
- ۴ - ۵ - زمین شناسی مهندسی ۵۷
- ۴ - ۵ - ۱ - زمین ریخت شناسی ساختگاه سد ۵۷
- ۴ - ۵ - ۲ - چینه شناسی ۵۷
- ۴ - ۵ - ۳ - زمین ساخت ساختگاه سد ۵۹

۶۱	۴-۶ - خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ پی
۶۱	۴-۶-۱ - نفوذپذیری در بستر رودخانه و تکیه گاه ها
۶۴	۴-۶-۲ - نفوذپذیری سنگ بستر
۶۴	۴-۶-۳ - کیفیت سنگ بستر
۶۵	۴-۶-۴ - هیدرولوژی ساختگاه سد
۶۶	۴-۶-۵ - مشخصه های ژئوتکنیکی پی سد
۶۷	۴-۶-۶ - معرفی مشخصات سد خاکی مورد مطالعه

فصل پنجم : تحلیل عددی نشست بدنه سد نرماب

۷۲	۵-۱ - مقدمه
۷۲	۵-۲ - روش های عددی
۷۳	۵-۲-۱ - روش اجزای محدود
۷۴	۵-۳ - معرفی نرم افزار PLAXIS 2D
۷۵	۵-۴ - شبیه سازی عددی سد نرماب
۷۶	۵-۴-۱ - ساخت هندسه مدل
۷۷	۵-۴-۲ - اعمال شرایط مرزی
۷۹	۵-۴-۳ - مش بندی
۷۹	۵-۴-۴ - اعمال شرایط اولیه
۸۲	۵-۴-۵ - تحلیل مدل
۸۳	۵-۴-۶ - نتایج شبیه سازی مرحله احداث سد
۹۱	۵-۵ - ابزار دقیق سد نرماب
۹۶	۵-۶ - صحت سنجی نتایج حاصل از مدل سازی و ابزار دقیق
۱۰۲	۵-۷-۱ - مدل سازی سد تا پایان ساخت
۱۰۵	۵-۷-۱ - تحلیل فشار آب منفذی
۱۰۶	۵-۸ - مدل سازی مرحله آبگیری
۱۰۸	۵-۹ - تحلیل رفتار بلندمدت سد
۱۱۱	۵-۱۰ - جمع بندی

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۱۴	۶-۱ - مقدمه
۱۱۴	۶-۲ - نتیجه گیری
۱۱۵	۶-۳ - پیشنهادها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ - روند کلی انجام کار ۵
- شکل ۳-۱ - منحنی نشست آبی و نمودار فشار در رس الف) شالوده انعطاف‌پذیر ب) شالوده سخت ۳۶
- شکل ۳-۲ - شبیه‌سازی ساز و کار ایجاد تحکیم توسط فنر ۳۸
- شکل ۳-۳ - فرآیند ایجاد تحکیم اولیه ۳۹
- شکل ۳-۴ - نشست ناشی از تحکیم یک بعدی ۴۱
- شکل ۳-۵ - ویژگی تحکیم رس عادی تحکیم یافته با حساسیت کم تا متوسط ۴۱
- شکل ۳-۶ - ویژگی تحکیم رس پیش تحکیم با حساسیت کم تا متوسط ۴۳
- شکل ۳-۷ - نمودار تغییر شکل - زمان در حین تحکیم برای یک افزایش بار معلوم ۴۴
- شکل ۳-۸ - تغییرات نسبت تخلخل در مقابل لگاریتم زمان تحت افزایش بار و تعریف عامل تحکیم ثانویه ۴۵
- شکل ۳-۹ - α' برای نهشته‌های طبیعی خاک ۴۶
- شکل ۴-۱ - نمای کلی سد نرماب ۵۲
- شکل ۴-۲ - موقعیت سد نرماب ۵۳
- شکل ۴-۳ - نقشه سد نرماب ۵۴
- شکل ۴-۴ - تصویر ماهواره‌ای محدوده طرح سد نرماب ۵۴
- شکل ۴-۵ - نمایی از بخش اجرا شده‌ی سد نرماب ۵۵
- شکل ۴-۶ - مقاطع زمین‌شناسی ساختگاه سد نرماب ۵۶
- شکل ۴-۷ - نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی ۶۶
- شکل ۴-۸ - نیمرخ عرضی سد خاکی نرماب همراه با جزییات خاکریز و بستر ۶۹
- شکل ۵-۱ - نقشه کلی سد نرماب ۷۵
- شکل ۵-۲ - مدل هندسی بدنه و پی سد در مقطع ۱۳-۱۳ ۷۶
- شکل ۵-۳ - مدل هندسی بدنه و پی سد در مقطع ۱۹-۱۹ ۷۷
- شکل ۵-۴ - مدل هندسی بدنه و پی سد ۷۸
- شکل ۵-۵ - مش‌بندی مدل هندسی بدنه و پی سد ۷۹

- شکل ۵-۶ - فشارهای اولیه آب در شروع ساخت ۸۰
- شکل ۵-۷ - ایجاد تنش‌های برجا ۸۱
- شکل ۵-۸ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳ پس از تحکیم لایه اول ۸۳
- شکل ۵-۹ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳ پس از تحکیم لایه دوم ۸۴
- شکل ۵-۱۰ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳ پس از تحکیم لایه سوم ۸۴
- شکل ۵-۱۱ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳ پس از تحکیم لایه چهارم ۸۵
- شکل ۵-۱۲ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹ پس از تحکیم لایه اول ۸۵
- شکل ۵-۱۳ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹ پس از تحکیم لایه دوم ۸۶
- شکل ۵-۱۴ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹ پس از تحکیم لایه سوم ۸۶
- شکل ۵-۱۵ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹ پس از تحکیم لایه چهارم ۸۷
- شکل ۵-۱۶ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹ پس از تحکیم لایه پنجم ۸۷
- شکل ۵-۱۷ - توزیع جابه‌جایی‌های قایم نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹ پس از تحکیم لایه ششم ۸۸
- شکل ۵-۱۸ - نقاط مبنا برای محاسبه نشست در مقطع ۱۳-۱۳ ۸۹
- شکل ۵-۱۹ - نقاط مبنا برای محاسبه نشست در مقطع ۱۹-۱۹ ۸۹
- شکل ۵-۲۰ - نمودار نشست - زمان مقطع ۱۳-۱۳ در نرم‌افزار ۹۰
- شکل ۵-۲۱ - نمودار نشست - زمان مقطع ۱۹-۱۹ در نرم‌افزار ۹۰
- شکل ۵-۲۲ - نقشه ابزاربندی مقطع ۱۳-۱۳ سد نرماب ۹۴
- شکل ۵-۲۳ - نقشه ابزاربندی مقطع ۱۹-۱۹ ۹۵
- شکل ۵-۲۴ - پروفیل‌های نشست سد نرماب در دوره ساخت برای مقطع ۱۳-۱۳ ۱۰۰
- شکل ۵-۲۵ - پروفیل‌های نشست سد نرماب در دوره ساخت برای مقطع ۱۹-۱۹ ۱۰۱
- شکل ۵-۲۶ - مقایسه نشست محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مقطع ۱۳-۱۳ ۱۰۱
- شکل ۵-۲۷ - مقایسه نشست محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مقطع ۱۹-۱۹ ۱۰۲
- شکل ۵-۲۸ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم پس از ساخت سد ۱۰۳
- شکل ۵-۲۹ - نمودار نشست-ارتفاع پس از ساخت سد ۱۰۵
- شکل ۵-۳۰ - تغییرات فشار آب منفذی ضمن ساخت تا پایان ساخت ۱۰۶

- شکل ۵ - ۳۱ - تغییر شکل قایم سد در مرحله اول آبیگری ۱۰۷
- شکل ۵ - ۳۲ - تغییر شکل قایم سد در مرحله دوم آبیگری ۱۰۷
- شکل ۵ - ۳۳ - تغییر شکل قایم سد در مرحله سوم آبیگری ۱۰۸
- شکل ۵ - ۳۴ - محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل یک سال پس از ساخت سد ۱۰۹
- شکل ۵ - ۳۵ - محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل پنج سال پس از ساخت سد ۱۰۹
- شکل ۵ - ۳۶ - محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل ده سال پس از ساخت سد ۱۱۰
- شکل ۵ - ۳۷ - محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل بیست سال پس از ساخت سد ۱۱۰
- شکل ۵ - ۳۹ - نمودار تغییر شکل در برابر زمان ۱۱۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲ - خلاصه‌ای از تحقیقات پیشین	۲۷
جدول ۱-۴ - شناسنامه طرح	۵۲
جدول ۲-۴ - مشخصات دسته‌درزه‌ها در تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد نرماب	۶۰
جدول ۳-۴ - مشخصات دسته‌درزه‌ها در تکیه‌گاه راست ساختگاه سد نرماب	۶۰
جدول ۴-۴ - تغییرات و میانگین نفوذپذیری به روش لوفران در آب‌رفت‌های محدوده ساختگاه سد	۶۱
جدول ۴-۵ - مشخصات ژئوتکنیکی مصالح بستر سد نرماب	۶۷
جدول ۴-۶ - مشخصات ژئوتکنیکی مصالح خاکریز سد	۶۸
جدول ۵-۱ - مشخصات مصالح خاکریز و پی سد	۷۷
جدول ۵-۲ - تعداد و انواع ابزار نصب شده در ترازهای مختلف در سد تا پایان آذر ۱۳۹۶	۹۲
جدول ۵-۳ - مرحله اول محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳	۹۷
جدول ۵-۴ - مرحله اول محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹	۹۷
جدول ۵-۵ - مرحله دوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳	۹۷
جدول ۵-۶ - مرحله دوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹	۹۸
جدول ۵-۷ - مرحله سوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳	۹۹
جدول ۵-۸ - مرحله سوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹	۹۹
جدول ۵-۹ - مرحله اول محاسبه میزان نشست خاکریز در پایان ساخت	۱۰۳
جدول ۵-۱۰ - مرحله دوم محاسبه میزان نشست خاکریز در پایان ساخت	۱۰۴
جدول ۵-۱۱ - مرحله سوم محاسبه میزان نشست خاکریز در پایان ساخت	۱۰۴

فصل اول

کلیات

۱ - ۱ - مقدمه

تامین آب مورد نیاز شرب، بهداشتی، صنعتی و کشاورزی، از مهم‌ترین نیازهای جوامع بشری به‌شمار می‌رود. محدود بودن منابع آب شیرین در جهان انسان را بر آن داشته تا از روش‌های مختلف برای تامین نیاز خود استفاده نماید. مهار آب‌های سطحی، استفاده از سفره‌های آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی زمین برای ذخیره آب، استفاده از آب‌های غیر متعارف و ارائه راه‌های بهینه‌سازی مصرف، از جمله این اقدامات است. در این میان سدها از نظر اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. هم‌چنین سدها در توسعه کشاورزی، عمران مناطق روستایی و شهری، تامین آب آشامیدنی، تولید انرژی برق‌آبی، کنترل و تنظیم شدت جریان آب در رودخانه‌ها نقش اساسی را ایفا می‌کنند. بنابراین پایداری سدها به‌ویژه در دهه‌های اخیر مورد توجه مهندسين طراح سدهای خاکی و بتنی بوده است. سدها از نظر نوع کاربرد به سدهای مخزنی، تنظیمی و انحرافی تقسیم می‌شوند. سدها از نظر مصالح مصرفی به دو نوع بتنی و خاکی تقسیم می‌شوند. سدهای قوسی و وزنی دو نوع اصلی سدهای بتنی به‌شمار می‌روند. سدهای خاکی نیز به دو نوع اصلی خاکی و سنگریزه‌ای تقسیم می‌شوند. سدهای خاکی از سه قسمت اصلی شامل هسته، پوسته، فیلتر و زهکش تشکیل می‌شوند. مزیت زیاد سدهای خاکی باعث شده تا بتواند بیش از ۵۳ درصد سدهای موجود در دنیا را به خود اختصاص دهد. فراوانی و در دسترس بودن مصالح مصرفی یکی از مزایای اصلی در ساخت این سدها به‌شمار می‌رود. سدها به علت هزینه زیاد ساخت و خسارات جبران ناپذیر ناشی از خرابی، رفتارشان همواره باید کنترل و ارزیابی شود. رفتارنگاری سد در سه دوره اصلی زمان ساخت، اولین آگیری و زمان بهره‌برداری انجام می‌شود. رفتارسنجی سدهای خاکی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است، به‌طوری که هر ساله برای امکان رفتارنگاری دقیق‌تر بر تنوع و دقت ابزارهای اندازه‌گیری افزوده می‌شود. رفتارنگاری در مورد معضلات احتمالی به‌وجود آمده در سدها هشدار می‌دهد تا برای رفع این مشکلات اقدام شود. بنابراین علل رفتار نگاری سدها را می‌توان در بررسی مسایل ایمنی سدها، مقایسه عملکرد واقعی با پیش‌بینی‌های طراحی و کسب تجربه برای طراحی سدها در آینده خلاصه نمود.

۱ - ۲ - ضرورت و اهمیت تحقیق

سدهای خاکی به عنوان سازه‌های مهم ژئوتکنیکی با مهار جریان آب‌های سطحی به منظور اهداف مختلف از جمله تامین آب شرب، کشاورزی، صنعتی، تولید انرژی برق آبی، پروژه آبیان، کنترل جریان سیلاب و دیگر اهداف، طراحی و بر روی رودخانه‌ها ساخته می‌شوند. از طرفی سدهای خاکی به دلیل پیچیدگی طبیعی حاصل از رفتار خاک، به خصوص در مواقعی که تحت تاثیر پارامتر دیگری نظیر آب نیز قرار می‌گیرند، دست‌خوش رفتارهای پیچیده‌ای می‌شوند. با توجه به بالا بودن هزینه‌های ساختمانی و نگهداری سدها و همچنین خسارات جبران‌ناپذیر ناشی از شکست و یا تخریب آن‌ها، مساله حفاظت و نگهداری سدها و ارزیابی مستمر پایداری آن‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [۱].

هم‌چنین نیاز روزافزون به سدها و لزوم احداث آنها در مکان‌های مختلف با شرایط ژئومکانیکی و هیدرولوژی متفاوت و احتمالاً نامساعد، باعث شده که هر یک از این سدها دارای تجربه جدیدی باشد. از طرف دیگر بسیاری از سدها در بالادست آبادی‌ها و یا شهرهای پرجمعیت بنا شده‌اند که عدم ایمنی آن‌ها منجر به خطرات و تلفات جبران‌ناپذیری خواهد شد. علاوه بر این، با توجه به وابستگی شدید جامعه و صنعت به آب، تنظیم امکان بهره‌برداری منظم و بلندمدت از سدها حایز اهمیت بوده و هر گونه اقدامی به منظور حفظ پایداری و کارایی آن‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است، زیرا شکست یک سد نه تنها سرمایه صرف شده برای ساخت آن را نابود می‌کند، بلکه حجم زیادی از آب نیز تلف می‌شود که خسارت‌های مالی و تلفات جانی آن نیز قابل توجه است. بنابراین اگر پیش‌بینی رفتار سد بتواند بخشی از وقایع محتمل را قبل از وقوع آن‌ها آشکار کند، می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از شکست سد و تبعات آن ایفا کند. با توجه به اهمیت موضوع، لزوم مطالعه جامع برای بررسی و پیش‌بینی رفتار سدهای خاکی، به ویژه رفتار بلند مدت سدها، احساس می‌شود. برای این منظور، کنترل مستمر سدها به لحاظ ایمنی، پایداری و بررسی رفتار سد در دوران ساخت و بهره‌برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر بهره‌گیری از نتایج رفتارنگاری سدها در مراحل ساخت و بهره‌برداری مورد توجه خاص طراحان قرار گرفته است. به دلیل شرایط خاص طراحی و پیچیدگی رفتاری سدهای خاکی، تعبیه ابزار دقیق در محل‌های مناسب پی و بدنه سد خاکی، قرائت دوره‌ای و تفسیر داده‌های رفتارسنجی توأم با تحلیل‌های عددی پایداری سد، از اهمیت دوچندانی برخوردار است. زمانی که بدنه سد یا پی آن رفتار غیرعادی و یا بحرانی دارد،

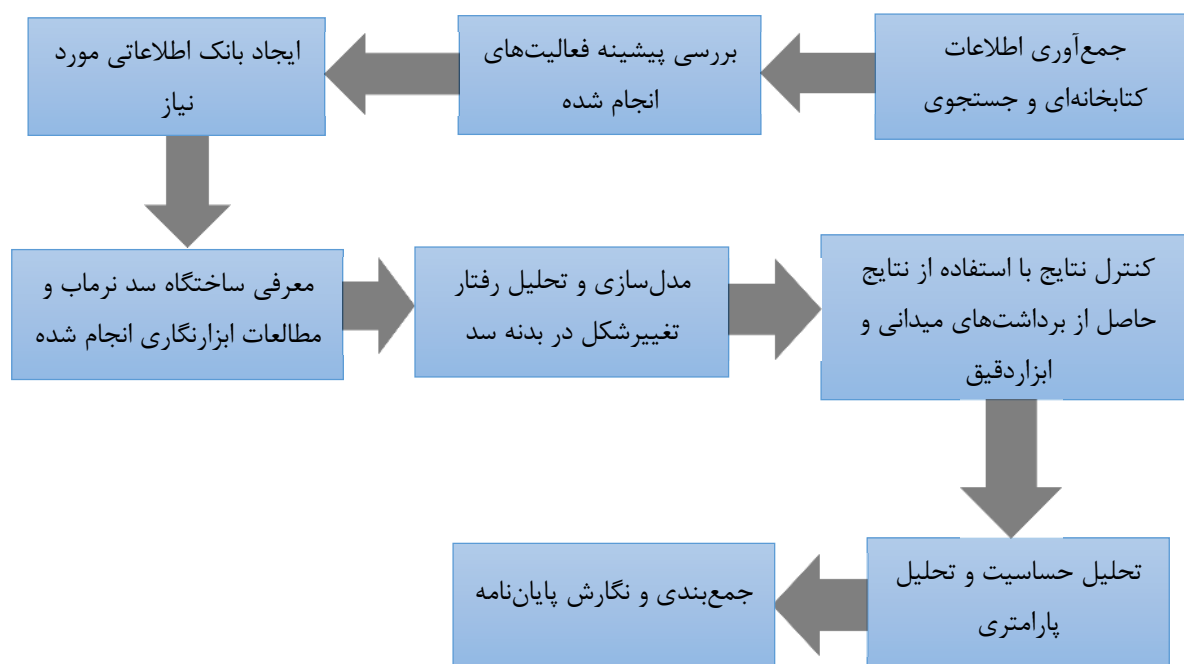
ابزار دقیق می‌تواند به درک فرضیات طراحی در طول ساخت یا دوران بهره‌برداری کمک نماید و از طرف دیگر پیش‌بینی‌های رفتاری برای سدهای خاکی و خاکریزها با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی و مقایسه با اطلاعات به‌دست آمده از ابزار دقیق در طول زمان بهره‌برداری می‌تواند برای طراحی و ساخت ایمن و اقتصادی‌تر در آینده، مورد استفاده قرار گیرد.

۱ - ۳ - اهداف تحقیق

- بررسی نشست پی سد به منظور جلوگیری از شکست بدنه سد و فرار آب و پیشگیری از خطرات و هزینه‌های احتمالی بسیار تاثیر گذار است. بنابراین اهداف اصلی انجام این پروژه عبارت‌اند از:
- رفتارسنجی تغییر شکل بدنه سد نرماب در دوران ساخت با کاربرد مدل‌های عددی و کنترل نتایج با استفاده از داده‌های ابزار دقیق.
- ارزیابی و تحلیل رفتار سد در مرحله آگیری، بهره‌برداری و بلند مدت با کمک مدل‌های عددی.

۱ - ۴ - روش و مراحل انجام تحقیق

برای انجام این تحقیق، ابتدا به جمع‌آوری اطلاعات از طریق منابع کتابخانه‌ای و جستجوی اینترنتی پرداخته می‌شود. سپس ساختگاه سد نرماب و مطالعات ابزارنگاری انجام شده در آن معرفی خواهد شد. در مرحله بعد، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS که بیشترین کاربرد را در مهندسی ژئوتکنیک دارد، مدل‌سازی و تحلیل رفتار تغییر شکل بدنه سد انجام خواهد شد. سپس نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از برداشت‌های میدانی و ابزار دقیق کنترل خواهد شد. در مرحله بعد، عملکرد سد با استفاده از نمودارهای تنش-کرنش و جابجایی، تعیین و در ادامه تحلیل پارامتری انجام می‌شود. در نهایت به جمع‌بندی و نگارش گزارش پرداخته می‌شود. در شکل ۱-۱ روند کلی کار نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ - روند کلی انجام کار

۱-۵ - ساختار پایان‌نامه

در این تحقیق سد نرماب واقع در استان گلستان، که بر روی رودخانه نرماب در حال احداث است، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ارائه گزارش و بسط به این تحقیق، از ساختار شش فصلی استفاده شده است. در فصل اول به کلیات، اهمیت و ضرورت، روش و مراحل انجام و اهداف تحقیق پرداخته شده است. در فصل دوم برخی از روش‌های پیش‌بینی نشست پی که در سالیان گذشته استفاده شده و همچنین سوابق تحقیق در زمینه مورد نظر، بیان شده است. در فصل سوم مشخصات ژئوتکنیکی سد نرماب مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم تحلیل عددی نشست پی سد نرماب با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در فصل پنجم نیز نتایج و پیشنهادها ارائه شده‌اند.

فصل دوم

پیشینه‌ی تحقیق

۲ - ۱ - مقدمه

برای طراحی یک سد خاکی باید آزمایش‌های متعددی برای شناخت رفتار فیزیکی و مکانیکی مصالح انجام شود و پس از آن با انتخاب یک الگوی رفتاری مناسب و روشی موثر اقدام به تحلیل رفتار سد در دوره‌های زمانی مختلف کرد. تحلیل پایداری سدهای خاکی مبتنی بر خصوصیات چگون پارامترهای مقاومت برشی مصالح بدنه و پی سد، سطح آب مخزن، ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه، خصوصیات هندسی بدنه، توپوگرافی محل احداث سد و پارامترهای اقتصادی طرح است. با به کارگیری مناسب پارامترهای طرح و انتخاب روشی مناسب در تحلیل می‌توان از منابع ایجاد کننده خطا در محاسبه تنش‌ها و تغییرشکل‌ها کاسته و با اطمینان بیشتری طرحی بهینه برای سد خاکی ارائه کرد.

عموما محاسبات پایداری بر اساس نامساعدترین و بحرانی‌ترین حالت ممکن یا به عبارتی حد پایین پارامترهای مقاومت برشی خاک انجام می‌شود. هم‌اکنون با توجه به توسعه تکنولوژی ساخت و نحوه بهره‌برداری از ابزار دقیق، می‌توان با دقتی بیش از گذشته به پارامترهای انتخابی در طراحی سدهای خاکی اطمینان کرد. این پارامترها به همراه روش‌های جدید نظری در مهم‌ترین بخش طراحی، یعنی تحلیل پایداری، با بهره‌گیری از کامپیوتر و نرم افزارهای مرتبط، ابزاری مناسب را در اختیار طراحان قرار می‌دهند. بررسی‌های تحلیل پایداری را می‌توان بر اساس روش‌های تحلیل حدی معمول و یا بر اساس روش‌های عددی انجام داد. در هر صورت کاربرد توام هر دو روش منجر به اطمینان بیشتر می‌شود.

در این فصل با توجه به هدف انجام این تحقیق، به قسمتی از تحقیقات انجام شده در مورد تحلیل رفتار سدهای خاکی با استفاده از روش‌های عددی اشاره خواهد شد.

۲ - ۲ - پیشینه مطالعات تجربی و تحلیلی نشست

با توجه به متعدد بودن نوع مطالعات در زمینه‌ی نشست خاک تاریخچه مطالعات نشست را می‌توان در دو حالت زیر تقسیم‌بندی کرد [۲] و [۳]:

۱ - مطالعات تجربی و تحلیلی و آزمایشگاهی

۲ - مطالعات عددی

در زمینه‌ی مطالعات تجربی و تحلیلی و آزمایشگاهی همان‌طور که بیان شد ترزاقی از اولین کسانی بود که در زمینه‌ی نشست مطالعاتی را انجام داده است. بعدها دانشمندانی مانند جانبو^۱، بیروم^۲ و ژرنسلی^۳ در سال ۱۹۵۶ رابطه محاسبه نشست متوسط شالوده‌های انعطاف‌پذیر روی خاک‌های رس اشباع را پیشنهاد کردند، پک^۴ و همکاران در سال ۱۹۶۹ بررسی‌هایی در زمینه‌ی نشست خاک بر اثر حفر تونل انجام دادند، اشمرتن^۵ و هارتمن^۶ در سال ۱۹۷۸ نشست آنی خاک‌های دانه‌ای را با استفاده از ضرایب تاثیر نیمه تجربی کرنش پیشنهاد کردند. همچنین روابط نشست توسط دانشمندان دیگری از قبیل جرجیادیس^۷ (۱۹۸۸)، باترفیلد^۸ (۱۹۸۸)، لی^۹ (۱۹۶۳)، ویتمن و ریچارت^{۱۰} (۱۹۷۶) ارائه شد. در سال‌های اخیر هم دانشمندانی از قبیل وسیک^{۱۱}، ولازف^{۱۲}، بیوت^{۱۳}، بولز^{۱۴}... مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند [۴] و [۵].

۲ - ۳ - پیشینه مطالعات عددی نشست

تحلیل عددی سدها با روش اجزاء محدود تقریباً در دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد. سد خاکی اسکاموند^{۱۵} از اولین سدهای خاکی نسبتاً بزرگ در انگلستان بود که در اواخر ۱۹۶۰ توسط پنمن^{۱۶} و همکارانش مورد تحلیل عددی براساس اجزاء محدود قرار گرفت. اندکی بعد از احداث سد اسکاموند، سد خاکی لیلین بریان^{۱۷} نیز توسط

۱ - Janbo

۲ - Bjerrum

۳ - Kjaernsli

۴ - Peck

۵ - Schmertaman

۶ - Hartman

۷ - Georgiadis

۸ - Butterfield

۹ - Lee

۱۰ - Whitman and Richard

۱۱ - Wesick

۱۲ - Wolosoff

۱۳ - Boycott

۱۴ - Bowles

۱۵ - Squamond

۱۶ - Penman

۱۷ - Lelin Bryan

پنمن و چارلز^۱ به روش تحلیل عددی و با استفاده از اجزاء محدود مورد مطالعه قرار گرفت. سد خاکی اروویل^۲ در سال ۱۹۷۲ در زمان اولین آبگیری توسط نوبری و دانکن^۳ به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت. سد ایل این فیری نیلو^۴ در مکزیک یکی از اولین سازه‌های خاکی سنگریزه‌ای است که نتایج حاصل از اندازه‌گیری ابزار دقیق با مقادیر نتایج حاصل از تحلیل عددی به روش اجزاء محدود مقایسه شده است. کلاف و وودوارد^۵ نیز در سال ۱۹۶۷ میلادی برای تحلیل یک سد مرتفع از روش اجزای محدود استفاده کرده‌اند.

نیلور^۶ و همکاران در سال ۱۹۹۷ نشست سد بلیچ^۷ واقع در پرتغال را در حین ساخت برآورده کردند. سد بلیچ، یک سد ناحیه‌بندی شده سنگریزه‌ای با هسته مرکزی رسی، به دلیل آبگیری مخزن و عمل مستقیم بارش باران، نشست‌های ریزشی بزرگی را تجربه کرده است [۶].

سزوستاک^۸ و همکارانش در سال ۲۰۰۲، با استفاده از مدل عددی به پیش‌بینی رفتار سد عظیم دیاموند^۹ واقع در جنوب شرقی لس آنجلس در شرایط بارگذاری مختلف پرداخته‌اند. تطابق بین مقادیر جابجایی‌های حاصل از تحلیل عددی با مقادیر حاصل از مشاهدات ژئودتیک در نقاط نشانه واقع بر روی تاج سد، موید صحت فرضیات ایشان در انتخاب پارامترهای ژئوتکنیکی و ضرایب یانگ به کار رفته در تحلیل عددی و همچنین اعتبار مدل ایشان بوده است [۷].

شمسایی و همکاران در سال ۱۳۸۱ (۲۰۰۲) به بررسی تغییرات تنش و جابجایی‌ها در سدهای خاکی در اثر اولین آبگیری مخزن سد خاکی سنبل رود با استفاده از نرم افزار FEADAM پرداختند. نتایج تحلیل نشان داد که پوسته بالادست و هسته سد با آغاز آبگیری به سمت بالادست یعنی دریاچه سد حرکت نموده در حالی که پوسته پایین‌دست به سمت پایین‌دست سد تغییر مکان می‌دهد. مقادیر تنش در هسته سد بیش از پوسته‌های

۱ - Charles

۲ - Oroville Dam

۳ - Noberi and Duncan

۴ - Il In Firi Niloo Dam

۵ - Clough and Woodward

۶ - Naylor

۷ - Beliche

۸ - Szostak

۹ - Diamond Dam

بالادست و پایین دست است. علت آن را می‌توان غوطه‌ور شدن پوسته بالادست با آغاز آبرگیری مخزن دانست. تغییر مکان‌های سد پس از آبرگیری در حد قابل قبول بوده و سد پایداری خود را حفظ می‌نماید [۸]. ولادیمیروف^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۳ برای رفتارنگاری سد سنگریزه‌ای هوا^۲ بین‌در ویتنام از یک مدل سه بعدی و مشاهدات میدانی استفاده کردند [۹].

نیرومند و همکاران در سال ۱۳۸۲ (۲۰۰۳) به رفتارنگاری سد کرخه در سه مرحله ساخت، آبرگیری و بهره‌برداری با استفاده از نتایج ابزار دقیق و آنالیز برگشتی پرداختند. نتایج به دست آمده را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود: بررسی فشارهای منفذی در داخل هسته نشان داد که فشارهای آب منفذی واقعی و تحلیل‌های برگشتی مطابقت خوبی با هم دارند اما از مقادیر پیش‌بینی شده در طراحی به مراتب کمتر است. نشست‌های اندازه‌گیری شده در پوسته بالادست و پایین دست برای پایان ساخت به ترتیب ۴۰ و ۳۸ سانتی‌متر بوده که به مراتب از مقادیر پیش‌بینی شده در طراحی ۱۱۴ و ۷۴ سانتی‌متر کمتر است. علت اختلاف مدول تغییر شکل محافظه‌کارانه و دست پایین در طراحی‌های عددی برای مصالح پوسته است. نشست هسته در طراحی با تحلیل‌های تنش موثر و کل برای پایان ساخت به ترتیب ۳۲۰ و ۳۴۰ پیش‌بینی شده بود که با مقادیر واقعی که در حدود ۱۱۰ سانتی‌متر بود، تفاوت داشت. علت این امر اختلاط در تغییر مصالح هسته از رس خالص با تراکم‌پذیری زیاد به رس مختلط با تراکم‌پذیری کم می‌باشد. مقدار نشست در داخل هسته در حدود یک درصد ارتفاع هسته است. با توجه به نتایج به دست آمده عملکرد سد کرخه در دوران ساخت در حد مطلوبی بوده است [۱۰].

لوگار^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۴ به آنالیز عددی اجرای سد خاکی در تیجسیکا^۴ پرداختند. در حین احداث سد، نشست‌های زیرزمینی در هشت محل اندازه‌گیری شد و پس از ساخت و ساز یک سیستم رفتارنگاری بزرگ‌تر تأسیس شد. در این تحقیق به تجزیه و تحلیل نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول و بعد از ساخت سد خاکی در تیجسیکا پرداخته شد. تجزیه و تحلیل برگشتی عملکرد سد در طول ساخت و ساز با استفاده از محاسبات FEM انجام شد. آنالیزهای عددی در شرایط کرنش صفحه‌ای با استفاده از مدل موهر-کولمب و

۱ - Vladimirov

۲ - Hoa Bbinh

۳ - Logar

۴ - DRTIJSČICA Dam

هم‌چنین دو مدل خاک که وابستگی به تنش - سختی خاک را در نظر می‌گرفتند، انجام گرفت. آن‌ها نتایج نشست‌های محاسبه شده برای بارگذاری زهکشی شده و زهکشی نشده و نشست‌های اندازه‌گیری شده را ارائه دادند. تجزیه و تحلیل برگشتی سد خاکی در تیجسیکا نشان داد که نشست‌های محاسبه شده زیر خاک با بزرگی و توسعه نشست‌های اندازه‌گیری شده به خوبی مطابقت دارد. تحکیم اندازه‌گیری شده هسته سد با نتایج محاسبات برای بارگیری زهکشی نشده کاملاً مطابقت دارد. همین‌طور پیش‌بینی تغییر شکل‌های مورد انتظار تاج سد در طول زمان بهره‌برداری محتمل است [۱۱].

سزوتاک و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از رفتارنگاری تغییر شکل به حل مسائل ژئومکانیکی پرداختند. مطالعه موردی ارائه شده، سودمندی نظارت‌های رفتارنگاری در حل مسائل ژئومکانیکی را نشان می‌دهد. بنابراین نظارت‌های پایش^۱ نه تنها به هدف ارائه اطلاعات در مورد تغییرات هندسی در سطح جسم مورد بررسی، انجام می‌شود بلکه به ابزاری برای تفسیر فیزیکی تغییر شکل نیز تبدیل می‌شود. هم‌چنین نقش نظارت پایش در توضیح موارد غیرمنتظره تغییر شکل و به تبع آن تاثیر ایمنی و اقتصاد و هم‌چنین اثرات زیست محیطی گسترش می‌یابد [۱۲].

بایراک^۲ در سال ۲۰۰۷ به مدل‌سازی رابطه بین سطح آب و جابجایی‌های عمودی روی سد یامالا^۳ در ترکیه پرداخت. الگوی پایش تغییر شکل سدها اغلب یکی از موثرترین راه‌ها برای فهمیدن وضعیت ایمنی آن‌ها است. هدف اصلی مطالعه، یافتن حدی از سطح آب مخزن است که بر ساز و کار تغییر شکل سد یامالا در طول نخستین دوره آبیگری، تأثیر می‌گذارد. سه روش مختلف تجزیه و تحلیل تغییر شکل، یعنی استاتیک، سینماتیک و دینامیک، برای تجزیه و تحلیل چهار رکورد نظارت ژئودزیکی متشکل از جابجایی‌های عمودی در نه نقطه هدف ایجاد شده روی سد و شش نقطه مرجع اطراف آن استفاده شدند. بدین ترتیب نقش افزایش سطح مخزن نقشی در تغییر شکل‌های عمودی در طول اولین دوره آبیگری مشخص شد. بزرگ‌ترین جابجایی‌های عمودی در وسط سد بود. یک رابطه خطی ظاهری بین فرونشست سد و سد مخزن وجود دارد. یک مدل تغییر شکل دینامیک گسترش یافت تا این وضعیت را مدل کند. این مدل یک رابطه بین سطح مخزن و تغییر شکل‌های سد ایجاد

۱ - Monitoring

۲ - Bayrak

۳ - Yamula

می‌کند. تجزیه و تحلیل نتایج میزان همبستگی بین تغییر سطح مخزن و تغییر شکل ساختاری مشاهده شده سد را تعیین می‌کند [۱۳].

اوزکوبان^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی ساخت مرحله‌ای و نشست سد ساخته شده بر روی رس نرم پرداختند. سد الیبی^۲ در نزدیکی استانبول در ترکیه، در ۴/۵ کیلومتری شمال نقطه تلاقی خود با رودخانه گلدن هورن، واقع شده است. این سد به عنوان یک سد خاکی با بیش از ۳۰ متر ضخامت رسوبات دره نرم ساخته شده است. قبل از ساخت سد، آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های بستر انجام شد. نتایج زیر از این تحقیق حاصل شد:

۱- ابزار دقیق میدانی و رفتارنگاری جابجایی‌ها و فشار منفذی ایجاد شده در لایه‌های پی در بررسی اعتبارسنجی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در تحلیل بسیار مفید است. ابزار دقیق استفاده شده بهترین نوع موجود در آن زمان بود، اما باید به فناوری نسبتاً کم با توجه به استانداردهای مدرن نیز توجه کرد.

۲- در تجزیه و تحلیل عددی انجام شده برای پیش‌بینی رفتار خاک، تخمین‌های کاملاً واقع‌گرایانه از جابجایی‌ها و فشار اضافی منافذ تحت بارگذاری مرحله‌ای به‌دست آمد.

۳- مدل خاک نرم‌شونده (یک مدل سازنده بر اساس مدل کم - کلی اصلاح شده) پیش‌بینی‌های نشست مشابه با رفتار میدانی مشاهده شده را ارائه داد. این مدل در پیش‌بینی جابجایی‌های افقی به دلیل عدم توانایی در مدل کردن انحرافات، موفقیت‌آمیز نبود [۱۴].

رحمانی و همکاران در سال ۲۰۰۷ رفتارنگاری سد خاکی مهاباد را با استفاده از اطلاعات ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی و انجام آنالیز معکوس مورد بررسی قرار داده‌اند. در انجام تحلیل از نرم‌افزار PLAXIS استفاده شده است. میزان نشست و جابجایی در بدنه سد مهاباد به مراتب بیشتر از استاندارد های طراحی است و از موارد کم نظیر در سد سازی است. نشست حاصل از خروجی نرم‌افزار PLAXIS از سال ۱۳۴۹ تا سال ۱۳۷۵، ۲/۷۰ سانتی‌متر

۱ - Ozcoban

۲ - Alibey

و میزان جابجایی افقی ۱۰۰ سانتی‌متر برآورد شده است. در دوران بهره‌برداری فقط تغییرات تراز آب دریاچه سد باعث تغییر تنش‌ها و در نتیجه تغییر شکل سد می‌شود [۱۵].

سزوتاک و همکاران در سال ۲۰۰۸ به مطالعه رفتار بلند مدت سد خاکی بزرگ همراه با نظارت و تحلیل برگشتی اجزای محدود، پرداختند. این مقاله به تجزیه و تحلیل تغییر شکل بلند مدت سد وست^۱ در دریاچه دره دیاموند (DVL) در کالیفرنیا ایالت متحده آمریکا پرداخته است. تغییر شکل سد وست به مدت هفت سال پس از پایان ساخت و ساز ادامه یافت. نشست پس از ساخت به ۲۰۰ میلی متر رسید که به معنی ۰/۲۴ درصد ارتفاع سد است، همان‌طور که برای این نوع سدها پیش‌بینی می‌شود. به طور کلی تغییر شکل سدهای خاکی و سنگریزه‌ای وقتی که نشست کم‌تر از ۰/۰۲ درصد ارتفاع سد در سال می‌شود، به عنوان تغییر شکل تثبیت شده در نظر گرفته می‌شود. در مورد سد وست، متوسط نشست در طی پنج سال گذشته فقط ۰/۰۱۴ درصد به دست آمده است یعنی می‌توان سد را پایدار دانست. تغییر ۲۰ درصد سطح آب تأثیری در میزان تحکیم سد نداشته است. با این حال جابجایی‌های افقی که از مکانیسم متفاوت تغییر شکل نسبت به مکانیسم تحکیم پیروی می‌کنند، نیاز به مطالعه بیشتر دارد. باید توجه داشت که حداکثر جابجایی‌های افقی در تاج صورت نمی‌گیرد بلکه بسیار پایین‌تر (در حدود ۲/۳ متر از ارتفاع) روی رویه‌ی پایین دست است. این باید هنگام طراحی طرح پایش مورد توجه قرار گیرد. توافق بسیار خوبی بین جابجایی‌های محاسبه شده (مدل شده) و داده‌های پایش ژئودزیکی روی تاج سدها در فرآیند آبگیری مخزن به دست آمده است. این سازگاری تایید می‌کند که پارامترهای ژئوتکنیکی و مقادیر مدول یانگ استفاده شده در آنالیز FEM و همچنین روش استفاده شده در مدل‌سازی رفتار سد، درست هستند [۱۶].

در سال ۲۰۰۸، گیکاس^۲ و همکاران به تجزیه و تحلیل نشست سد خاکی مورنوس^۳ یونان با استفاده از مدل‌سازی عددی و نظارت ژئودزیکی پرداختند. در این مقاله به بررسی رفتار بلند مدت (بالای ۳۰ سال) سد مورنوس یونان بر اساس آنالیز عناصر محدود و داده‌های جابجایی عمودی پرداختند. این مقاله نتایج

۱ - west

۲ - Gikas

۳ - Mornos

تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده از ثبت نظارت مداوم ژئودتیکی از رفتار سد را با آنالیز برگشتی مقایسه می‌کرد. هدف ارائه تاریخچه تغییر شکل واقعی بر اساس رفتار مکانیکی سد بود. رکوردهای نظارت بر تغییر شکل شامل داده‌های ترازبندی شده دقیق از تعداد زیادی از ایستگاه‌های کنترل در امتداد تاج و گالری بازرسی سد و همچنین داده‌های نشست‌های اخذ شده توسط اکستنسومترهای مغناطیسی قرار داده شده در بدنه سد بودند. به طور کلی، داده‌های موجود مراحل ساخت، نخستین آبیگری مخزن و بیشتر مدت بهره‌برداری سد را پوشش می‌دادند. در مدل‌سازی عددی شرایط کرنش صفحه‌ای دو بعدی فرض شد و مدت جابجایی و مشخصات تنش-کرنش پایه جناحی و سد، در یازده مقطع مساوی به دست آمد. ارزیابی مقایسه‌ای نتایج حاصل از تحلیل پایش ژئودزیکی در برابر یافته‌های حاصل از آنالیز برگشتی عناصر محدود در طول عمر سازه، توافق بسیار خوبی را (به طور متوسط $0.3/0$ متر) بین جابجایی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، نشان می‌داد که گواه بر صحت پارامترهای ژئوتکنیکی و بارهای مورد استفاده در مدل‌سازی بود. تجزیه و تحلیل رکوردهای پایش تغییر شکل سد مورنوس، جابجایی‌های عمودی در تاج و گالری تزریق را با حداکثر حرکات رخ داده در سطح مقطع مرکزی سد نشان می‌داد. جابجایی‌های عمودی سد به طورنمایی با زمان در حال کاهش به مقادیر نهایی‌شان بودند. مقایسه متقابل نتایج ابزار دقیق با نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل عددی، اثبات کرد که توافق خوبی بین اندازه‌گیری‌های میدانی و مقادیر محاسبه شده، وجود دارد [۱۷].

بدو و افخمی فرد در سال ۲۰۰۸ تحلیل نشست سد شهرچای ارومیه را در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری انجام دادند. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS با در نظر گرفتن ساخت مرحله ای و با المان‌های ۱۵ گرهی انجام شد. در تحلیل‌ها از مدل‌های رفتاری سازگار با جنس مصالح سد استفاده شده و مراحل مختلف ساخت و آبیگری مطابق با روند اجرایی سد در نظر گرفته شد. مراحل ساخت به صورت مرحله‌ای و با گام‌های زمانی مختلف و شرایط بهره‌برداری با اعمال تغییرات در تراز آب مخزن سد انجام گردید. تحلیل‌ها به صورت دو بعدی و کرنش صفحه‌ای بوده و برای ارزیابی صحت نتایج، داده‌های بدست آمده از تحلیل عددی با نتایج ابزار دقیق مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که تطابق خوبی بین داده‌های تحلیل عددی با داده‌های مشاهده‌ای وجود دارد. بر اساس نتایج رفتارسنجی و تحلیل‌های عددی صورت گرفته، اکثر نشست‌ها در دوره ساخت سد رخ داده است و تمرکز آن‌ها در مرکز هسته است. شکل و فرم تغییر شکل‌های زمان ساخت دلالت

بر درست بودن هندسه سد دارد. با تحلیل برگشتی، پارامترهای واقع بینانه‌تری برای رفتار مصالح سد و همچنین تعیین رفتار قسمت‌هایی که هیچ اطلاعی از رفتار آنها در دست نیست به دست آمده است و با انطباق خوب ابزار دقیق و مدل عددی در دوره ساخت و بهره‌برداری می‌توان رفتار حقیقی سد را در آینده با دقت مناسبی پیش بینی کرد. سد در وضعیت ایمن قرار دارد و رفتار تنش- کرنش مصالح، قابل قبول و طبیعی است [۱۸].

نیکخواه و همکاران در سال ۲۰۰۹ رفتارسنجی سد ملاصدرا را بر اساس نتایج به دست آمده از داده‌های ابزار دقیق در طول زمان ساخت، اولین آبگیری و دوران بهره‌برداری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند برای کنترل ایمنی سدها و ساختارهای وابسته آن‌ها در طول ساخت و ساز، مراحل آبگیری و بهره‌برداری ضروری است که طراحی دقیق، تأمین کافی، نصب صحیح، جمع‌آوری دقیق و درونگیری دقیق داده‌ها انجام شود و سرانجام یک تحلیل رفتاری واقعی از سد ارائه شود. در این مقاله به طور خلاصه به مشخصات و برنامه‌های ابزار دقیق سد ملاصدرا (یک سد خاکی که در استان فارس ایران ساخته شده است) و به بررسی رفتار سد مبتنی بر رکوردهای به دست آمده از ابزار دقیق در طی اولین دوره آبگیری و بهره‌برداری از سد پرداخته شد و برخی از تفسیرها نیز مورد بحث قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که رفتار سد در مراحل مذکور رضایت‌بخش بوده و مطابق با رفتار مورد انتظار است [۱۹].

محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۰ با مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق و نرم‌افزارهای تخصصی به رفتارنگاری سد ماکو پرداختند. سد ماکو بر روی رودخانه زنگمار در ۱۲ کیلومتری شهر ماکو در غرب ایران واقع شده است که در سال ۱۹۹۴ ساخته شده است. در این مقاله سعی شده است تا یک تحلیل دقیق رفتارنگاری سد ماکو ارائه شود. ابتدا سیستم ابزار دقیق که در سال ۲۰۰۴ در فونداسیون و بدنه سد نصب شده است (۱۰ سال پس از آبگیری)، مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W، سد ماکو آنالیز شد. سرانجام، برای اعتباربخشی به تجزیه و تحلیل، نتیجه نرم‌افزار و داده‌های ابزار دقیق مقایسه شدند. محاسبات نشان داد که بهره‌وری دیافراگم ضد آب ۷۷/۵ درصد است، اما در سنگ بستر شکافی وجود دارد و تزریق نیز ضروری است. فشار در هسته رسی تحت تأثیر فشار بستر است. به طور کلی شرایط هسته رسی و بستر قابل قبول تشخیص داده شده است [۲۰].

نیکوولووسکی^۴ در سال ۲۰۱۱ به مقایسه قوانین سازنده مواد خاکی در سدهای خاکی پرداخت. سد کوزجاک^۵ یکی از بلندترین سدهای خاکی در جمهوری مقدونیه و منطقه است و به تبع آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این تحقیق، انجام آنالیز تنش و کرنش برای سد خاکی - سنگریزه‌ای کوزجاک و اعمال قوانین سازنده مختلف برای مواد موجود در بدنه سد است. این مشکل با استفاده از روش اجزای محدود برای شرایط بلافاصله پس از ساخت و شرایط آبرگیری کامل مخزن به صورت عددی تحلیل خواهد شد. هدف از این تحقیق، توجه کردن به تفاوت در نتایج به دست آمده از طریق اعمال روش‌های مختلف - قانون ساختاری خطی و غیرخطی و همچنین حساسیت مدل نسبت به تنوع پارامترهای ژئوتکنیکی ورودی است. در این تحقیق نتایج به دست آمده از طریق تجزیه و تحلیل با نتایج حاصل از نظارت بر سد کوزجاک نیز مقایسه خواهد شد. این سد با دو مدل رفتاری الاستیک خطی و هذلولی غیرخطی تحلیل شد. نتایج هر دو تحلیل نشان داد که محل ماکزیمم نشست در بخش میانی سد و در ۶۰ درصد ارتفاعش در هسته است [۲۱].

کیوانی پور و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی رفتار نگاری دو سد سیرجان و بار با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق پرداختند. در این تحقیق از مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و خاک سخت شونده جهت رفتار مصالح دو سد استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که: با افزایش ارتفاع سد ضریب قوس‌زدگی افزایش می‌یابد. ضریب فشارمنفذی در سد تابع عوامل مختلفی است که مهم‌ترین آن‌ها ارتفاع سد و مدت زمان ساخت آن است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از نرم‌افزار PLAXIS و مدل‌های به کار رفته برای مدل نمودن رفتار سدهای خاکی مناسب است [۲۲].

در سال ۲۰۱۱ احمد رضا طبیب نژاد و رضا میهن روستا رفتار بدنه سد مارون را در دوران ساخت و آبرگیری با استفاده از نتایج ابزار دقیق بررسی کردند. مهم‌ترین بارهای وارد بر بدنه سدهای خاکی در شرایط عادی ساخت و آبرگیری، بارگذاری ناشی از خاکریزی خود بدنه است، به طوری که بخش اعظم تغییرات ایجاد شده در مقادیر تنش‌ها، فشار آب‌های حفره‌ای و همچنین جابجائی‌ها و تغییر شکل‌های بدنه، در حین ساخت سد رخ می‌دهند و بارگذاری‌های پس از ساخت، نقش کمتری در ایجاد تغییرات یاد شده دارند. براساس اندازه‌گیری‌های انجام

۴ - D. Nikolovski

۵ -Kozjak dam

شده، پیشینه نشست هسته رسی در بزرگ‌ترین مقطع سد رخ داده و در حدود $2/3$ متر در نیمه ارتفاع سد است. از این مقدار $1/9$ متر در طول دوران ساخت و $0/4$ باقی‌مانده ترکیب نشست تحکیمی هسته و نشست به دلیل فرآیند آگیری است. پس از $4/5$ سال از ساخت سد تنها 30 درصد تحکیم انجام شده است، بنابراین انتظار می‌رود با ادامه روند خروج فشار آب حفره‌ای اضافی، نشست تحکیمی هسته تا $1/15$ متر افزایش یابد [۲۳].

داوری و همکاران در سال 2013 به تحلیل نشست سد خاکی سبلان در زمان ساخت و بهره‌برداری به روش اجزاء محدود و مقایسه با داده‌های ابزار دقیق اقدام نمودند. مدل‌سازی سد خاکی با نرم افزار PLCAXIS 2D و در 12 لایه مطابق با زمان ساخت سد صورت گرفت. بر اساس تحلیل‌های عددی انجام شده و با استناد به داده‌های ابزار دقیق، بیشترین نشست مربوط به سد سبلان در دوران ساخت اتفاق افتاده و تمرکز آن در قسمت میانی هسته است. با افزایش تراز خاکریزی به علت افزایش سختی هسته اختلاف بین نشست‌های تحلیلی و داده‌های ابزاربندی کم می‌شود، به طوری که در انتهای ساخت سد سبلان نتایج تحلیلی و داده‌های ابزار دقیق هم‌خوانی خوبی را نشان می‌دهند. ماکزیم نشست حاصل از تحلیل $1/2$ درصد ارتفاع سد است. در دوران آگیری به علت اعمال بار آبی در بالادست، نشست‌های هسته با نرخ کمی افزایش داشته اند تا جایی که با رسیدن سطح آب مخزن به بالاترین تراز اثرات تورم هسته رسی ناشی از اشباع شدن آن خود را نشان داده‌اند. روند نشست‌های تحلیلی در دوران بهره‌برداری به ازای تغییرات تراز آب مخزن نشان‌دهنده این است که با گذشت زمان سد سبلان تمایل به ثبات داشته و به سمت پایداری پیش رفته است. هم‌خوانی نتایج تحلیلی با داده‌های ابزار دقیق نشان‌دهنده صحت آنالیز برگشتی و تحلیل‌های انجام شده است [۲۴].

در سال 2013 حسن‌زاده و همکاران به بررسی تغییرشکل‌ها و جابجایی‌های به‌وجود آمده در بدنه سد خاکی زنوز شهر تبریز در حین ساخت و مرحله آگیری با کمک مدل‌سازی عددی به روش المان محدود با استفاده از بسته نرم‌افزاری GeoStudio پرداختند. در این تحقیق سعی شد تا مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست آمده از ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی انجام شود و مقایسه نتایج به‌دست آمده از هر دو روش خاکی از رفتار عادی سد و انطباق قابل قبول بین پیش‌بینی‌های مهندسی و رفتار واقعی سد است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تغییرات نشست قائم هسته در مدل، همانند ابزار دقیق به‌دست آمد و روند افزایشی از قاعده تا تاج سد را نشان می‌دهد. همچنین اختلاف میان قرائت‌های ابزار دقیق و نتایج برآمده از نرم‌افزار خاکی از وجود داشتن اختلاف حداکثر 26 درصدی

است که دلیل این امر می‌تواند ناشی از محدودیت‌های مدل‌های اجزا محدود و همچنین عدم تطابق پارامترهای ورودی با مشخصات واقعی بدنه سد خاکی باشد [۲۵].

لطیفی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی نتایج رفتارنگاری سد خاکی البرز در طول مرحله ساخت پرداختند. در این مقاله، فشار آب منافذ، فشار کل و نشست در سد خاکی البرز را با مقایسه بین داده‌های گرفته شده از ابزار دقیق و تجزیه و تحلیل برگشتی روی مدل مطالعه کردند. سد البرز در شمال ایران در حدود چهل و پنج کیلومتری جنوب شرقی بابل واقع است. طول و عرض تاج ۸۳۸ و ۱۲ (متر)، ارتفاع سد ۷۸ (متر) است. همه تحلیل‌های برگشتی با استفاده از نرم‌افزار FLAC از ابتدا تا انتهای مرحله ساخت و ساز یعنی هنگامی که ارتفاع سد ۵۰ متر است، به دست آمده‌اند. داده‌های ابزار نصب شده روی سد خاکی نشان داد که فشار آب منافذ در هسته در طی ساخت و ساز دارای یک رویکرد طبیعی است. علاوه بر این، همان‌طور که پیش‌بینی شده بود، در پایان ساخت سد، نشست هسته به ۱۳۵ سانتی‌متر رسید. به طور کلی، تمام ابزارهای نصب شده به درستی کار می‌کردند [۲۶].

درخشاندی و همکاران در سال ۲۰۱۴، تجزیه و تحلیل عددی و پایش سد سنگریزه‌ای وانپار در پایان ساخت و ساز را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، رفتار مکانیکی سد وانپار در پایان ساخت و ساز ارزیابی شد. برای این منظور، یک تجزیه و تحلیل عددی دو بعدی با استفاده از روش المان محدود در بزرگ‌ترین مقطع سد انجام شد. اطلاعات ثبت شده توسط ابزار دقیق‌های مستقر در بزرگ‌ترین سطح مقطع با نتایج آنالیز عددی در محل ابزارها مقایسه شدند. پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی رفتار سد در پایان ساخت و ساز شامل نشست، فشار آب منفذی و تنش عمودی کل بودند. نتایج نشان داد که نشست‌های به دست آمده از تحلیل عددی با داده‌های ثبت شده توسط ابزارها در توافق منطقی است که ثابت می‌کند تجزیه و تحلیل عددی بر اساس خصوصیات مواد انجام شده است. به طور کلی، نتایج نشان داد که سد از نظر پارامترهای بحرانی شامل نشست و شکست هیدرولیکی در یک حالت امن قرار دارد [۲۷].

عارف‌پور در سال ۲۰۱۵ به رفتارنگاری سد خاکی البرز در طول عملیات، با استفاده از کالیبراسیون و مدل‌سازی عددی پرداخت. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از داده‌های کالیبراسیون، روش عددی تفاضل محدود، آنالیز برگشتی داده‌های اولیه در طول دوره ساخت، به داده‌های منطقی برسند. سپس دوره بهره‌برداری که از

سال ۱۳۸۹ آغاز شد، در نظر گرفته شد. میزان فشار آب منافذ طی ۲۰ سال بهره‌برداری به آرامی در حال صعود بود. جابجایی عمودی در سد البرز کمی صعودی بود که در پوسته بالاست به دلیل وجود آب، بسیار آهسته بود. جابجایی افقی نیز صعودی بود اما به دلیل آب دریاچه سرعت آن در پایین‌دست بیشتر از بالادست بود. با توجه به این تحلیل‌ها، بیش از ۹۰ درصد جابجایی‌ها در زمان ساخت بوده است [۲۸].

پانتازیس^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک مطالعه جامع در مورد پایش رفتار بلندمدت سدهای خاکی انجام دادند. در یک مورد مطالعاتی مناسب، سد کوریس^۲ که بزرگ‌ترین سد قبرس است، با جزئیات مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق آن‌ها از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول انواع مختلف ابزار دقیق نصب شده و نحوه پردازش داده‌های حاصل از رفتارنگاری را ارائه می‌دهد. بخش دوم تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌های رفتارنگاری را هم در حوزه زمان و هم فرکانس ارائه می‌دهد. بخش سوم تجزیه و تحلیل اجزای محدود مکمل مرتبط مربوط به سد و پاسخ بلند مدت محاسبه شده آن به ساخت و ساز خاکریزی، آبیگری مخزن، بهره‌برداری و نوسانات سطح مخزن را ارائه می‌دهد. داده‌های رفتارنگاری جمع‌آوری شده، یک الگوی سازگار از نشست‌های بلندمدت تاج و تغییرشکل‌های پایین‌دست را نشان می‌دهد. همچنین تجزیه و تحلیل فرکانسی یک هم‌بستگی قوی بین نشست‌های تاج و نوسانات سطح مخزن و تغییرشکل سدها ناشی از تنوع فصول را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل عناصر محدود نشان می‌دهد که تحکیم خاک مکانیسم اصلی نشست‌های سد در کوتاه مدت است، در حالی که نوسانات سطح مخزن در طولانی مدت عامل مهم‌تری هستند. همچنین آن‌ها بیان کردند که اندازه‌گیری‌های قوی و قابل اعتماد ضروری است و داده‌های پایش با کیفیت بالا و دقیق برای ارزیابی نظارت بر سلامت ساختاری طولانی مدت در سدهای خاکی بزرگ، مهم هستند [۲۹].

کاروی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی رفتار سد سیدی ال باراک^۴ در تونس پرداختند. سیدی ال باراک یک سد خاکی با ارتفاع ۲۸ متر در تونس است؛ این سد در سال ۱۹۹۹ بر روی یک بستر ناهمگن ساخته شد

۱ - Pantazis

۲ - Kouris

۳- Karoui

۴- Sidi El Barrak Dam

که یک لایه ضخیم از سازندهای شنی دارد. مساحت این سد ۸۹۶ کیلومتر مربع است و حدود ۲۶۰ میلیون مترمکعب در سال آب دریافت می‌کند. بستر سد سیدی ال باراک به وسیله لرزش - تراکم روی ۱۰ متر نخست تحکیم شد، تا تراکم نسبی لایه‌ی شنی فوقانی در برابر خطر روان شدن بهبود یابد. با نظارت بر رفتار سد در برابر رفتار هیدرولیکی و پایش توپوگرافی دیده شد که نشست پیک ثبت شده در سطح قله از جولای سال ۲۰۰۳ تا آگوست ۲۰۱۵ حدود ۱۸/۷ سانتی‌متر بود. به منظور شبیه‌سازی رفتار سد، یک مدل عددی کرنش مسطح از سد و بستر خاکی سد پیشنهاد شد. شبیه‌سازی رفتار سد با استفاده از مدل موهر-کولمب برای مواد خاکریز و لایه شنی و با اتخاذ مدل خاک نرم‌شونده برای لایه رسی به مطابقت نشست پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده منجر شد. رفتار مشاهده شده سد در طی ۱۵ سال توسط بررسی‌های عددی انجام شده، با موفقیت پیش‌بینی شد [۳۰].

در سال ۲۰۱۶ ما^۱ و همکاران به بررسی فن‌آوری‌های مهم برای ساخت و ساز ایمن سدهای خاکی - سنگریزه‌ای بزرگ پرداختند. در غرب چین برای ساخت سدهای مرتفع، سد سنگریزه‌ای - خاکی یکی از انواع اصلی سد است که انتخاب می‌شود. این انتخاب به دلیل سازگاری مطلوب بستر سد، استفاده کامل از خاک محلی، سنگ و مواد ساختمانی حفاری شده، هزینه ساخت کم؛ و مصرف سیمان کم است. این تحقیق به تشریح دستاوردهای تحقیقاتی و نتیجه‌گیری اساسی گذشته می‌پردازد. به طور سیستماتیک تجارب انباشته شده از ساخت سد نووژادو و سایر سدهای سنگریزه‌ای - خاکی را خلاصه می‌کند و در مورد مسائل مهم فنی از جمله کنترل تغییر شکل، کنترل نشت، پایداری شیب سد، ایمنی و کنترل تخلیه سیل، کنترل کیفیت ساخت سد، ارزیابی ایمنی، هشدار اولیه و سایر مشکلات فنی مهم، بحث می‌کند. این مطالعه همچنین یک پشتیبانی مرجع و تکنولوژیکی برای ساخت آینده سدهای خاکی - سنگریزه‌ای با ارتفاع ۳۰۰ متر را فراهم می‌کند. در طی مراحل ساخت سدهای سنگریزه‌ای با هسته خاکی مانند پروژه سد نوژادو با ارتفاع ۲۶۱/۵ متر، سه موضوع پایداری اساسی (پایداری تغییر شکل، پایداری نشت آب و پایداری شیب سد در برابر لغزش) و مشکلات فنی مهم در رابطه با ایمنی ساخت و ساز سد سنگریزه‌ای خاکی بزرگ به طور سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفت [۳۱].

در سال ۲۰۱۶ مناف پور و همکاران به بررسی نشست‌های سد خاکی قلعه‌چای عجب شیر تحت بارگذاری‌های هیدرولیکی مختلف مخزن سد به عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار در شکست سدها، با استفاده از مدل عددی پرداختند. همچنین با توجه به اینکه در حین اجرا تصمیم به افزایش ارتفاع سد گرفته شد که منجر به ایجاد شکل متفاوت هسته رسی شد، اهمیت تحقیق را دو چندان کرد. جهت انجام تحلیل‌ها سد موردنظر با استفاده از نرم افزار PLAXIS با به‌کارگیری مدل‌های رفتاری موهر-کولومب و الاستیک خطی مدل‌سازی شد و با نتایج ابزاردقیق صحت سنجی مدل عددی صورت گرفت. در این تحقیق مقایسه نتایج مدل عددی و ابزاردقیق نشان داد که تطابق خوبی دارند و با اطمینان به صحت نتایج مدل عددی، از آن‌ها برای پیش‌بینی عملکرد سد تحت شرایط مختلف و همچنین در راستای مطالعه مقطع بهینه برای سد مورد نظر استفاده شد. با توجه به نتایج مدل عددی بیشترین نشست سد در پایان دوران ساخت سد به میزان ۶۳۷ میلی متر معادل ۰/۸۶ درصد ارتفاع سد و در تراز ۱۷۳۳ رخ داده است. تغییرات تراز آب مخزن بیشترین تاثیر را بر پوسته بالادست داشته که به دلیل نیروی شناوری و کاهش تنش موثر نشست‌های پوسته بالادست سد به اندازه ۵۸ میلی متر کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل نبود آب در پوسته پایین‌دست تغییرات تراز آب مخزن تاثیری بر پوسته پایین‌دست ندارد [۳۲].

حائری در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی رفتار سدهای خاکی و سنگریزه‌ای در طول ساخت و نخستین آبیگری با استفاده از داده‌های ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی پرداخت. در این مطالعه، رفتار سد گاوشان در طول ساخت و در زمان نخستین آبیگری ارزیابی شد. یک آنالیز عددی دو بعدی بر اساس روش تفاضل محدود بر روی بزرگ‌ترین سطح مقطع سد با استفاده از نتایج اندازه‌گیری ابزاردقیق و آنالیز برگشتی، انجام شد. این ارزیابی‌ها در صورتی کامل می‌شد که تحلیل برگشتی به منظور کنترل درجه دقت و سطح اطمینان رفتار اندازه‌گیری شده انجام می‌گرفت. پس از آن، مقایسه نتایج تجزیه و تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان داد که بین این دو مقدار یکپارچگی مناسبی وجود دارد. علاوه بر این مشاهده شد که عملکرد سد در رابطه با فشار آب منافذ ایجاد شده، نسبت فشار منفذی آب r_u ، نشست، تنش‌های ایجاد شده و درجه قوس‌زدگی، مناسب است و احتمال شکست هیدرولیکی در دوره ساخت به قدرت نخستین مرحله آبیگری بستگی دارد. نتایج نشان داد که حداکثر نشست هسته در پایان ساخت ۲۳۸ سانتی متر است. در ۶ سال بعد از ساخت (اولین دوره آبیگری

و بهره‌برداری) نشست تجمعی ۲۷۰ سانتی متر بود. واضح است که ۸۸ درصد از نشست کلی سد در زمان ساخت سد صورت گرفته است و علت آن وجود هسته رسی خرد شده در قسمت مرطوب، محتوای رطوبت بهینه است. علاوه بر این، در حالی که میانگین نسبت انحنا در حین ساخت سد ۰/۶۴ بود، در پایان آبیگری اولیه، حداکثر مقدار نسبت انحنا در بالادست ۰/۸۱ و کمترین و مقدار بحرانی آن در پایین‌دست ۰/۵۲ بود. همچنین به این نتیجه رسیدند که این سد در مقایسه با رفتار سایر سدهای مشابه جهان ایمن است [۳۳].

در سال ۲۰۱۷ صادق جعفری دهکردی و همکاران، به بررسی نشست سد خاکی چغاخور با استفاده از روش موهر-کلمب و الاستیک خطی توسط نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis پرداختند. با انجام مدل‌سازی نشست سد چغاخور این نتیجه به دست آمد که در مدت ۱ سال، ابتدا نشست تغییرات بیشتری از خود نشان می‌دهد ولی با گذشت ۷ و ۲۵ سال نشست مقدار کمتری داشته است تا جایی که به سمت ثابت شدن پیش می‌رود. بیشترین نشست محاسبه شده مربوط به نقطه‌ای واقع در پوسته بالادست سد بوده است. به‌طور کلی نتایج آنالیزها رفتار مناسب سازه سد را در برابر شرایط مختلف بارگذاری استاتیکی تایید می‌نماید. تغییر مکان‌ها در حد قابل قبول بوده و می‌توان دریافت که سد در دوره‌های مختلف زمانی پایدار بوده است [۳۴].

در سال ۲۰۱۸ اندرسون^۱ و همکاران، پیش‌بینی عددی و محاسبات برگشتی رفتار وابسته به زمان سد آزمایشی بالینا^۲ را انجام دادند. در این مقاله به پیش‌بینی کلاس A و محاسبات برگشتی کلاس C سد آزمایشی بالینا با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS و مدل خزشی خاک نرم‌شونده (SSCM) پرداخته شد. پیش‌بینی‌ها سه سال بعد از ساخت سد، نشست اندازه‌گیری شده را حدود ۲۰ درصد تخمین زدند. این عمدتاً به دلیل سفتی خیلی زیاد در ناحیه انتقال زیر خاک رس بود که مدل SSCM تغییر شکل برشی رس را دست کم گرفته بود. علاوه بر این، نفوذپذیری افقی خاک رس هم بیش از حد ارزیابی شد. در محاسبات برگشتی امکان‌پذیر است که یک سازگاری بسیار عالی با نشست‌های اندازه‌گیری شده توسط اصلاحات منطقی پارامترهای ورودی، به دست آورد [۳۵].

۱ - Andresen

۲ - Ballina

وو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به تجزیه و تحلیل نشت و تحکیم سد نوژادا بلندترین سد سنگریزه‌ای-خاکی در چین پرداختند. یک سیستم نظارت کامل در سد نصب شد و یک بخش بزرگی از داده‌های مشاهده‌ای میدانی به دست آمد. در این مقاله، داده‌های مشاهده‌ای میدانی فشار آب منافذ در دیواره هسته سد سنگریزه‌ای - خاکی نوژادا در درجه اول تجزیه و تحلیل شده است. سپس برنامه اجزای محدود توسعه یافته در این مقاله برای آنالیز تحکیم غیر اشباع سد استفاده شده است. با مقایسه نتایج عددی با داده‌های مشاهده‌ای، معقول بودن نتایج اثبات شده است [۳۶].

پلکانوس^۲ در سال ۲۰۱۸ به آنالیز اجزای محدود رفتار بلندمدت پایش شده سد خاکی کوریس در قبرس پرداخت. این مقاله تحلیل محدود بلندمدت (بالای ۲۵ سال) تغییر شکل یک سد خاکی را ارائه می‌دهد. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر تحکیم، تغییرات سطح مخزن و فعالیت لرزه‌ای بر تغییر شکل سدهای خاکی است. تجزیه و تحلیل داده‌ها، جابجایی نشست با زمان را نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی ساخت و سازهای مرحله‌ای، آبیگری مخزن، تحکیم و تغییرات فصلی سطح مخزن، نشان داده است که: الف) تغییرات فصلی سطح مخزن منجر به نوسانات کوچک در نشست‌های سد شده است (مثلاً جابجایی‌های عمودی) ب) جابجایی‌های افقی تاج سد نسبت به تغییرات سطح مخزن حساس نیست و ج) اکثریت نشست‌های کلی به دلیل تحکیم خاک است [۳۷].

رشیدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به تجزیه و تحلیل عددی و نظارت بر سد خاکی سیاه سنگ در طول ساخت و نخستین دوره آبیگری پرداختند. در سدهای خاکی، فشارهای منافذ، فشارهای زمین و جابجایی‌هایی که در حین ساخت و ساز اتفاق می‌افتد و عملکردها در زمان نخستین آبیگری و بهره‌برداری، توسط ابزار دقیق اندازه‌گیری می‌شود و بنابراین عملکرد سد ارزیابی و تجزیه و تحلیل می‌شود. دامنه این پژوهش، ارزیابی عملکرد سد سیاه سنگ از طریق نتایج ابزار دقیق و آنالیز برگشتی است، که توسط نرم افزار FLAC انجام شده است. مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب به عنوان مدل رفتاری سد در نظر گرفته شده است و تاثیر تغییر شکل مواد پوسته بالادست در زمان مدل‌سازی اولیه مدل شده است. در ادامه مقایسه نتایج آنالیز عددی با مقادیر

۱ - Wu

۲ - Pelecanos

اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که بین این دو مقدار سازگاری مناسب وجود دارد. علاوه بر این، مشاهده شد که عملکرد سد با توجه به فشار آب منافذ ایجاد شده، جابجایی‌ها و تنش‌ها در دوره ساخت و ساز و همچنین در طول دوره نخستین آبیگری، مناسب است. علاوه بر این، حساسیت به شکست هیدرولیکی با محاسبه نسبت قوس‌زدگی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌گیری شد که این سد در مقایسه با رفتار سدهای مشابه در ایران و جهان از امنیت بیشتری برخوردار است [۳۸].

در سال ۲۰۱۸ جعفر محمدی و همکاران به ارزیابی نشست سد و نیار در طول ساخت به روش اجزا محدود و مقایسه آن با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق پرداختند. به این منظور دوران ساخت سد با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب در نرم‌افزار PLAXIS تحلیل و نشست هسته رسی با داده‌های ابزار دقیق مقایسه شده است. بررسی و ارزیابی قرائت‌های ابزار دقیق نشان می‌دهد که حداکثر میزان نشست سد در دوران ساخت در تراز حدود یک سوم ارتفاع میانی سد رخ می‌دهد و این موضوع توسط تئوری الاستیسیته نیز مورد تأیید است. مقادیر نشست واقعی نشان می‌دهد که مقدار نشست هسته در دوران ساخت حدود ۱ درصد ارتفاع است که این مقادیر با توجه به مقادیر نشست سدهای دیگر مقدار معقولی است [۳۹].

بیرانوند و همکاران در سال ۲۰۱۹ به پایش و تحلیل عددی تغییرات فشار آب منافذ سد ایواشان در اولین دوره آبیگری پرداختند. در این مطالعه، فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی ایواشان مورد بررسی قرار گرفت. سطح آب درون هسته رسی به دلیل تغییر سطح آب مخزن در اولین آبیگری و با استفاده از مشخصات واقعی مواد توسط نرم افزار Geostudio و PLAXIS، مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حاصل از ابزار دقیق در بدنه سد مقایسه شد. به منظور تطبیق داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده، از رگرسیون چند متغیری و ضریب تعیین استفاده شد که توافق بسیار خوبی را بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده نشان داد. مقادیر فشار آب مخزن نشان می‌داد که با شرایط طراحی اولیه تطابق خوبی دارند و رفتار سد از نظر فشار آب منفذی پایدار است. به دلیل وضعیت اشباع زیاد خط فراتیک، پیرومترهای نصب شده در بالادست هسته، فشار بیشتری را نسبت به پایین‌دست نشان می‌دادند. همچنین ارتفاع فشار در پایین‌دست دیوار آب‌بند، در هر دوی نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج مشاهده شده، به طور ناگهانی کاهش یافته بود که نشان دهنده عملکرد صحیح تزریق دیوار آب‌بند بود [۴۰].

پارتانو^۱ در سال ۲۰۱۹ به تجزیه و تحلیل جابجایی سد بر اساس پارامترهای مواد با استفاده از شبیه‌سازی عددی و ابزار دقیق پرداخت. تجزیه و تحلیل جابجایی سد بسیار مهم است زیرا می‌تواند پایداری و یا آسیب احتمالی سد را نشان دهد. پارامترهای ژئوتکنیکی مواد سد نقش مهمی در شناسایی و پیش‌بینی جابجایی در شرایط عملیاتی دارند. با مقایسه نتایج جابجایی بین مدل عددی شبیه‌سازی و روش ابزار دقیق می‌توان پارامترهای طراحی سد را مورد بررسی قرار داد. نتایج شبیه‌سازی عددی در این مطالعه یک روند توافق خوبی با نتایج پایش ابزار دقیق دارند [۴۱].

در سال ۲۰۱۹ جوانمرد و همکاران قرائت‌های ابزار دقیق در مقابل تحلیل عددی سد تهم را مورد بررسی قرار دادند. سد تهم سدی با هسته رسی است که در استان زنجان در ایران ساخته شده است. پس از آبیگری، تنش‌ها و توزیع فشار منفذی آب در سد با استفاده از ابزار دقیق نصب شده در بدنه سد، مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفت. سپس مقادیر اندازه‌گیری شده با نتایج به‌دست آمده از تجزیه و تحلیل عددی سد مقایسه شدند. برای تجزیه و تحلیل عددی از نرم‌افزار PLAXIS استفاده شده است. مقایسه‌ها نشان داد که فشار آب منافذ در سد با نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل عددی مشابه است، اما تنش‌ها در سد کم‌تر از نتایج آنالیز عددی در بیشتر مناطق سد است [۴۲].

بر اساس داده‌های به‌دست آمده از قرائت میدانی یا تجزیه و تحلیل عددی، نتایج زیر به دست آمده است: مقایسه فشار آب منافذ در قرائت‌سنج‌های نصب شده در سطوح مختلف در هسته سد و نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل عددی نشان می‌دهد که مقدار فشار آب منافذ برای هر دو روش، در نزدیکی مخزن بهتر از مناطق دور از مخزن است. دلیل این امر نقطه ضعف PLAXIS در محاسبه فشار آب در خاک‌های نیمه اشباع است. این برنامه درصد اشباع مواد را ۱۰۰ درصد می‌داند، که منجر به فشار بیشتر آب می‌شود. با توجه به فشار عمودی، نتایج قرائت ابزار دقیق کم‌تر از تحلیل عددی و اختلاف بین این دو در حدود ۲۸ درصد بود. نتایج به‌دست آمده از PLAXIS با نتایج پیژومترهای الکتریکی سازگار بود و تفاوت بین این دو کمتر از ۱ درصد بود.

در جدول ۱-۲ خلاصه‌ای از تحقیقات پیشین ارائه شده است.

^۱ - partano

جدول ۲-۱ - خلاصه‌ای از تحقیقات پیشین

ردیف	محقق	سال	موضوع تحقیق
۱	نیلور و همکاران	۱۹۹۷	بررسی نشست سد سنگریزه‌ای بلیچ واقع در پرتغال در حین ساخت
۲	سزوستاک و همکارانش	۲۰۰۱	پیش‌بینی رفتار سد خاکی عظیم دیاموند در شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از مدل عددی
۳	شمسایی و همکاران	۱۳۸۱	بررسی تغییرات تنش و جابجایی‌ها در سدهای خاکی در اثر اولین آبیگری مخزن سد با استفاده از نرم افزار FEADAM
۴	ولادیمیرووف و همکاران	۲۰۰۳	رفتارنگاری سد سنگریزه‌ای هوا بین در ویتنام با استفاده از مدل سه بعدی و مشاهدات میدانی
۵	نیرومند و همکاران	۱۳۸۲	رفتارنگاری سد خاکی کرخه در سه مرحله ساخت، آبیگری و بهره‌برداری با استفاده از نتایج ابزار دقیق و آنالیز برگشتی
۶	لوگار و همکاران	۲۰۰۴	آنالیز عددی سد خاکی درتجسیکا
۷	سزوتاک و همکاران	۲۰۰۶	حل مسائل ژئومکانیکی با استفاده از رفتارنگاری تغییر شکل
۸	بایراک	۲۰۰۷	مدل‌سازی رابطه بین سطح آب و جابجایی‌های عمودی روی سد یامالا در ترکیه
۹	اوزکوبان و همکاران	۲۰۰۷	بررسی ساخت مرحله‌ای و نشست سد خاکی الیبی ساخته شده روی رس نرم
۱۰	رحمانی و همکاران	۱۳۸۶	رفتارنگاری سد خاکی مهاباد با استفاده از اطلاعات ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی و انجام آنالیز معکوس
۱۱	سزوتاک و همکاران	۲۰۰۸	مطالعه رفتار بلند مدت سد خاکی بزرگ همراه با نظارت و تحلیل برگشتی اجزای محدود
۱۲	گیکاس و همکاران	۲۰۰۸	تجزیه و تحلیل نشست سد خاکی مورنوس یونان با استفاده از مدل‌سازی عددی و نظارت ژئودزیکی
۱۳	بدو و همکاران	۱۳۸۷	تحلیل نشست سد خاکی شهرچای ارومیه در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری
۱۴	نیکخواه و همکاران	۲۰۰۹	رفتارسنجی سد خاکی ملاصدرا بر اساس نتایج به‌دست آمده از داده‌های ابزار دقیق در طول زمان ساخت، اولین آبیگری و دوران بهره‌برداری

۱۵	محمدی و همکاران	۲۰۱۰	رفتارنگاری سد ماکو با مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق و نرم افزارهای رایانه‌ای
۱۶	نیکوولووسکی	۲۰۱۱	مقایسه قوانین سازنده مواد خاکی در سدهای خاکی
۱۷	کیوانی پور و همکاران	۱۳۹۰	بررسی رفتار نگاری دو سد سیرجان و بار با استفاده از نرم افزار پلکسیز و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق
۱۸	طیب نژاد و همکاران	۱۳۹۰	رفتار نگاری بدنه سد مارون را در دوران ساخت و آبیگری با استفاده از نتایج ابزار دقیق
۱۹	داوری و همکاران	۱۳۹۲	تحلیل نشست سد خاکی سبلان در زمان ساخت و بهره‌برداری به روش اجزاء محدود و مقایسه با داده‌های ابزار دقیق
۲۰	حسن زاده و همکاران	۱۳۹۲	بررسی تغییر شکل‌ها و جابجایی‌ها در بدنه سد خاکی زنوز در حین ساخت و مرحله آبیگری با کمک مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار GeoStudio
۲۱	لطیفی و همکاران	۲۰۱۴	بررسی نتایج رفتارنگاری سد خاکی البرز در طول مرحله ساخت
۲۲	درخشاندی و همکاران	۲۰۱۴	بررسی تجزیه و تحلیل عددی و پایش سد سنگریزه‌ای وانیار در پایان ساخت و ساز
۲۳	عارف پور	۲۰۱۵	رفتارنگاری سد خاکی البرز در طول بهره‌برداری با استفاده از کالیبراسیون و نتایج عددی
۲۴	پانتازیس و همکاران	۲۰۱۶	مطالعه جامع در مورد نظارت بلندمدت سدهای خاکی
۲۵	حائری	۲۰۱۶	ارزیابی رفتار سدهای خاکی و سنگریزه‌ای در طول ساخت و نخستین آبیگری با استفاده از داده‌های ابزار دقیق و مدل سازی عددی
۲۶	کاروی و همکاران	۲۰۱۶	ارزیابی رفتار مشاهده شده سد خاکی سیدی ال باراک در تونس
۲۷	ما و همکاران	۲۰۱۶	بررسی فن‌آوری‌های مهم برای ساخت و ساز ایمن سدهای خاکی- سنگریزه‌ای بزرگ
۲۸	مناف پور و همکاران	۱۳۹۵	بررسی نشست‌های سد خاکی قلعه‌چای عجب شیر
۲۹	جعفری و همکاران	۱۳۹۶	بررسی نشست سد خاکی چغاخور با استفاده از روش موهر-کلمب و الاستیک خطی توسط نرم افزارهای Geostudio و Plaxis
۳۰	اندرسون و همکاران	۲۰۱۸	پیش‌بینی عددی و محاسبات برگشتی رفتار وابسته به زمان سد آزمایشی بالینا

تجزیه و تحلیل نشت و تحکیم سد سنگریزه‌ای-خاکی نوژادا	۲۰۱۸	وو و همکاران	۳۱
آنالیز اجزای محدود رفتار بلندمدت مانیتور شده سد خاکی کوریس در قبرس	۲۰۱۸	پلکانوس	۳۲
تجزیه و تحلیل عددی و نظارت بر سد خاکی سیاه سنگ در طول ساخت و نخستین دوره آبگیری	۲۰۱۸	رشیدی و همکاران	۳۳
ارزیابی نشست سد و نیار در طول ساخت به روش اجزا محدود و مقایسه آن با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق	۱۳۹۷	محمدی و همکاران	۳۴
پایش و تحلیل عددی تغییرات فشار آب منافذ سد ایوووشان در اولین دوره آبگیری	۲۰۱۹	بیرانوند و همکاران	۳۵
تجزیه و تحلیل جابجایی سد بر اساس پارامترهای مواد با استفاده از شبیه‌سازی عددی و ابزار دقیق	۲۰۱۹	پارتانو	۳۶
بررسی قرائت‌های ابزار دقیق در مقابل تحلیل عددی در سد تهام	۲۰۱۹	جوانمرد و همکاران	۳۷

فصل سوم

مبانی و تئوری نشست سدهای خاکی

۳- ۱- مقدمه

در سدهای خاکی با توجه به وزن روباره، تنش‌های فشاری در لایه‌های زیرین خاک به وجود آمده و باعث فشرده شدن آن می‌شود. فشرده‌گی خاک ناشی از تغییر شکل فشاری و جابه‌جایی ذرات خاک، رانده شدن هوا و آب از حفرات و عوامل دیگر است. در یک خاک به‌خصوص، یک و یا تعدادی از عوامل فوق ممکن است مشارکت داشته باشند. از آنجا که فشرده شدن خاک باعث نشست سازه واقع بر روی آن می‌شود، از نقطه نظر مهندسی به این پدیده، نشست خاک می‌گویند.

نشست سازه‌ها بر اثر تغییر شکل و جابجایی زمین، تغییر حجم بستر و زیرسازه تحت تنش‌های خاک‌ها در محدوده‌ی کوچکی از تغییر شکل‌ها به صورت الاستیک عمل می‌کنند. در مجموع خاک مصالحی همگن و ایزوتروپ نبوده و عواملی چون تاریخچه‌ی تنش، وجود آب و هوا در خاک، تاثیرگذاری بارهای دینامیکی در رفتار دانه‌های تشکیل دهنده‌ی خاک و پیچیدگی در تعریف مناسب و دقیق شرایط مرزی باعث می‌شود که نتوان همانند دیگر مصالح سازه‌ای، تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های خاک را به سهولت و با روابط ساده، تعیین و محاسبه نمود. تعیین خصوصیات الاستیکی خاک، یعنی مدول الاستیسیته و ضریب پواسون (ν , E) نیز با مشکلات و ابهاماتی همراه است.

نشست پی در خاک‌های ریزدانه با دقت کمتری نسبت به توان باربری آنها به دست می‌آید، زیرا تخمین نشست در آنها به عوامل متعددی وابسته است و توجیه رفتار آنها نیازمند قضاوت مناسب مهندسی است. از مهم‌ترین عوامل، شرایط مرزی، درجه اشباع و تخمین میزان فشار پیش تحکیمی بوده که مربوط به حداکثر فشاری است که تا به حال به خاک وارد شده است. در مجموع بنا به دلایل عنوان شده، مقدار نشست محاسبه شده در محاسبات ممکن است کاملاً همراه با خطا باشد. نشست سازه بر خاک‌های درشت‌دانه عموماً با فرمول‌های تجربی به دست می‌آید. نشست‌ها در این خاک‌ها به سرعت و در حین ساخت پس از اعمال حداکثر بار اتفاق می‌افتد. نشست‌های درازمدت در مورد این بارها قابل صرف نظر کردن است. البته نشست درازمدت ممکن است پس از ساخت، در نتیجه عوامل دیگری از قبیل تحمیل بارهای دینامیکی (شمع کوبی، ارتعاشات حاصل از ماشین‌آلات و غیره)، تغییر شرایط سطح آب زیرزمینی، وقوع زلزله، انفجار، وجود یا تشکیل حفره‌ها و فضاهای خالی و سیل

رخ دهد که در این گونه موارد، روابط و فرمول‌های تجربی کفایت ننموده و باید معیارهای دیگری در طراحی مدنظر قرار گیرند.

برای خاک‌های ریزدانه اعم از لای و رس نزدیک به اشباع و یا اشباع، ضریب نفوذپذیری کم است. وقوع نشست در این خاک‌ها به علت کندی حذف اضافه فشار آب منفذی مربوط به بارگذاری و متعاقب آن کاهش تخلخل، نیازمند زمان نسبتاً طولانی بوده و در نتیجه پیش‌بینی و زمان لازم در محاسبات از اهمیت زیادی برخوردار است.

در این فصل ابتدا درباره مبانی و تئوری نشست در سدهای خاکی و سپس درباره رفتارنگاری و ابزاربندی و اهداف به‌کارگیری آن‌ها در سدها صحبت خواهد شد.

۳ - ۲ - عوامل موثر در بروز نشست در خاک

به طور کلی می‌توان عوامل بروز نشست در خاک را در قالب موارد زیر عنوان نمود [۴۳]:

۱- بارگذاری و فشردگی خاک بر اثر تنش‌های فشاری که نسبتاً سریع و به‌صورت مجموع تغییرشکل‌های الاستیکی (ارتجاعی) و پلاستیکی (خمیری) است.

۲- بارگذاری و جابجایی ذرات خاک بر اثر اعمال نیروهای برشی، به‌طور مثال در ماسه‌های شل موجب کاهش حجم و در ماسه‌های متراکم موجب افزایش حجم (اتساع) می‌شود.

۳- تحکیم خاک یا تحکیم اولیه بر اثر اعمال بار و متعاقب آن افزایش فشار آب منفذی. در ساختمان خاک اشباع به مرور بخشی از آب منافذ خاک در نتیجه اختلاف فشار، زهکشی و خارج شده، در نتیجه ذرات خاک جابجا شده تا بخشی از تخلخل به جا مانده از خروج آب را پر نماید. برای خاک‌های ریزدانه با نفوذپذیری پایین مثل رس‌ها، پدیده تحکیم کند و ممکن است سال‌ها و حتی تا پایان عمر مفید سازه به طول انجامد. هم‌چنین رس‌ها با درصد رطوبت بالاتر، بیشتر نسبت به رس‌های با درصد رطوبت کمتر تحکیم می‌شوند. به‌علاوه، رس‌های دارای پتانسیل تغییرات حجمی بر اثر تغییر درصد رطوبت، پس از خشک شدن منقبض و با افزایش رطوبت انبساط یا تورم حاصل می‌کنند. ماسه‌ها دارای نفوذپذیری بیشتر و درصد رطوبت کمتری نسبت به رس‌ها هستند. بنابراین تحکیم ماسه‌ها نسبت به رس‌ها خیلی سریعتر و به مراتب کم‌تر از مقادیر مربوط به رس‌هاست.

۴- خزش یا تحکیم ثانویه نیز موجب بروز نشست در خاک می‌شود. پس از اتمام پدیده‌ی تحکیم اولیه ممکن است تغییرات حجمی در خاک تحت اثر تنش موثر ثابت ادامه یافته که اصطلاحاً تحکیم ثانویه و یا خزش نامیده می‌شود. توجیه چنین پدیده‌ای کاملاً روشن نبوده ولی می‌توان وقوع آن را به خروج آب از منافذ میکروسکوپی و یا تغییر شکل لزجی نسبت داد. میزان خزش در خاک‌های پیش‌تحکیم یافته عموماً ناچیز بوده، در حالی که برای خاک‌های عادی تحکیم یافته می‌تواند جدی باشد. به علاوه مقدار این تغییر شکل برای خاک‌های آلی و یا خاک‌ها با قابلیت فشرده‌گی زیاد در مقایسه با نشست تحکیمی اولیه، قابل توجه است.

۵- عدم رعایت ملاحظات فنی در ساخت و اجرای روسازه و زیرسازه که در کوتاه‌مدت و بلندمدت با تغییر شکل‌های مصالح مصرفی در سد توأم خواهد بود، در صورت ساخت پی روی خاکریزها و به خصوص از نوع ریزدانه و غیر متراکم، احتمال وقوع نشست‌های زیاد مطرح است.

۶- اتفاقات در حین حفاری که شامل تورم خاک پس از گودبرداری، نرم‌شدگی بعضی از خاک‌ها و سنگ‌ها بر اثر عوامل محیطی، وقوع پدیده‌ی حرکت آب با سرعت زیاد در ماسه و لای، دست‌خوردگی و حساسیت در رس‌ها و لای‌ها است.

۷- فعالیت‌های ساخت و ساز در همسایگی که شامل پایین بردن سطح آب زیرزمینی، گودبرداری، شمع‌کوبی، انفجار و برقراری سیستم ترافیکی و استقرار کارخانه‌ها و ماشین‌آلات در مجاورت سازه است.

۸- عوامل دیگر از قبیل وقوع آب‌شستگی موضعی و عمومی، تورم و انقباض بر اثر تغییرات رطوبت در خاک و آثار یخ‌زدگی است.

۳ - ۳ - انواع نشست‌ها

نشست‌های خاک از نقطه نظر زمانی به دو گروه زیر تقسیم می‌شوند:

الف - نشست آنی: ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک خشک و یا خاک‌های مرطوب و اشباع بدون هرگونه تغییری در میزان آب است. محاسبات نشست آنی معمولاً بر پایه روابط به دست آمده از تئوری الاستیسیته قرار دارد.

ب - نشست تحکیم: ناشی از تغییر حجم خاک اشباع به علت رانده شدن آب‌های موجود در حفرات است.

نشست خاک از دیدگاه ساختاری را می‌توان به دو بخش نشست الاستیک و نشست غیر الاستیک تقسیم کرد. در نشست الاستیک به هنگام باربرداری، نشست خاک قابل برگشت است و با توجه به کوچک بودن این نشست، بازگشت به اصطلاح ارتجاعی آن نیز کوچک خواهد بود. حال آن‌که در نشست غیر الاستیک، میزان نشست قابل ملاحظه بوده و برگشت ناپذیر است. لغزش و سرخوردن ذرات جامد خاک به هنگام نشست غیر الاستیک، منجر به ورودشان به فضاهای خالی خاک می‌گردد. در نتیجه در نشست غیر الاستیک مقداری هوا و آب از خاک خارج شده و خاک تغییر حجم خواهد داشت. این در حالی است که در نشست الاستیک تغییر حجمی رخ نمی‌دهد.

در یک طبقه‌بندی دیگر ترکیبی از دو دیدگاه می‌توان بیان نمود که نشست آنی شامل سه گروه زیر است:

الف) نشست الاستیک

ب) نشست غیر الاستیک خاک که با خروج هوا همراه است (تراکم).

پ) نشست غیر الاستیک خاک که با خروج سریع آب از آن همراه می‌شود.

و نشست تحکیم مشتمل بر دو گروه زیر است:

الف) تحکیم اولیه که طی آن، آب در یک فرآیند زمان‌بر از خاک خارج شده و باعث کاهش حجم و نشست آن در بلند مدت می‌شود.

ب) تحکیم ثانویه که ناشی از تغییر شکل پلاستیک خاک است و به علت تغییر ساختار خاک در بلندمدت، رخ می‌دهد.

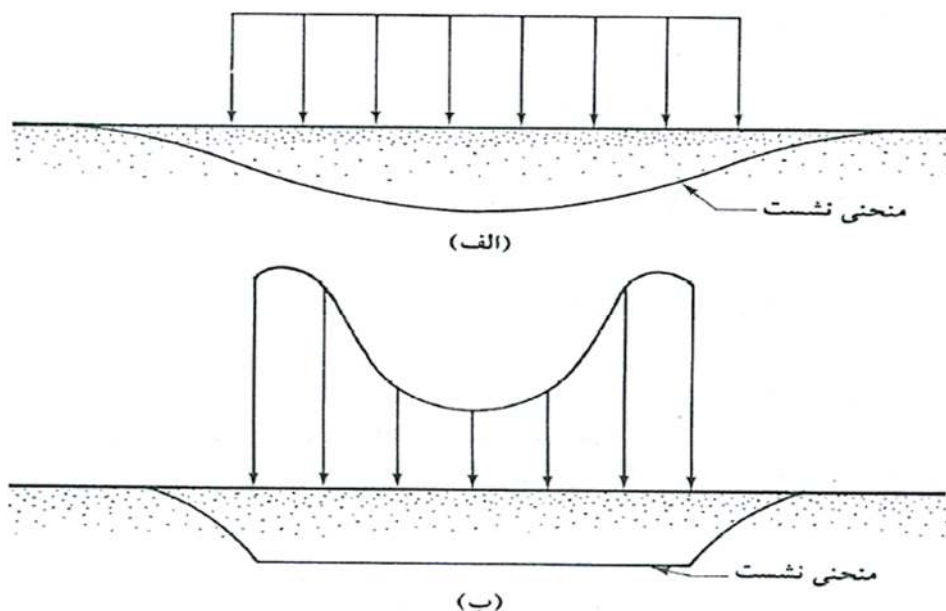
با این حال، در محاسبه نشست خاک معمولاً سه نوع نشست مدنظر است: نشست آنی (الاستیک)، نشست تحکیم اولیه و نشست تحکیم ثانویه (فشرده‌گی یا تراکم ثانویه) [۴۴].

۳ - ۱ - نشست آنی

نشست آنی و یا الاستیک یک شالوده، بلافاصله بعد از اعمال بار و بدون تغییر در میزان رطوبت به دست می‌آید. مقدار نشست بستگی به انعطاف‌پذیری شالوده و نوع مصالح پی دارد.

۳- ۱- ۱- شالوده انعطاف پذیر و سخت

وقتی که یک شالوده کاملاً انعطاف پذیر با بار گسترده بر روی مصالح الاستیک نظیر رس اشباع قرار گیرد، به علت نشست الاستیک، مطابق شکل ۱-۳-الف، شکل مقعر به خود می گیرد. لکن وقتی که شالوده سخت باشد و در روی مصالح الاستیک نظیر رس قرار گیرد، نشست حاصل یکنواخت خواهد بود. ولی مطابق شکل ۱-۳-ب توزیع مجددی در تنش تماسی حاصل شده و از حالت یکنواخت خارج می شود.



شکل ۱-۳- منحنی نشست آنی و نمودار فشار در رس (الف) شالوده انعطاف پذیر (ب) شالوده سخت [۵].

۳- ۱- ۲- محاسبه نشست آنی بر پایه تئوری الاستیسیته

نشست آنی شالوده متکی بر مصالح الاستیک (با ضخامت بی نهایت) را می توان با روابط به دست آمده بر پایه اصول تئوری الاستیسیته محاسبه نمود. شکل کلی این روابط به صورت زیر است [۴۷]:

$$P_i = P \cdot B \frac{1-\mu^2}{E} I_p \quad (1-3)$$

که در آن:

P_i : نشست الاستیک

P : فشار خالص موثر

B : عرض شالوده (یا قطر شالوده دایره)

μ : نسبت پواسون

E : ضریب ارتجاعی (الاستیسیتته) خاک

I_p : ضریب تاثیر بدون بعد.

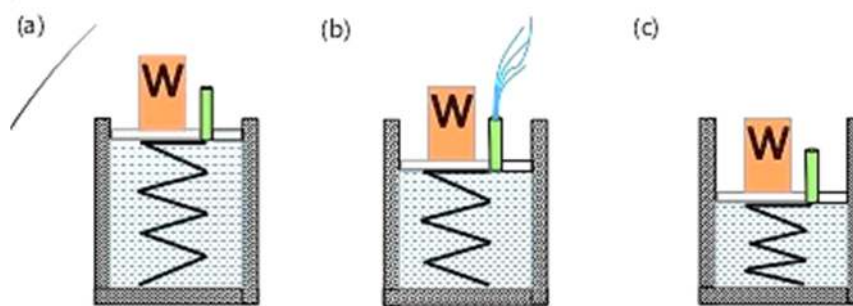
۳ - ۳ - ۲ - نشست تحکیم

وقتی که یک لایه خاک اشباع تحت تاثیر افزایش تنش قرار گیرد، فشار آب حفره‌ای به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در خاک‌های ماسه‌ای که نفوذپذیری آن‌ها بالاست، زهکشی ناشی از افزایش فشار آب حفره‌ای سریعاً انجام می‌شود. زهکشی آب حفره‌ای همراه با کاهش حجم توده خاک است که نتیجه آن ایجاد نشست است. به علت زهکشی سریع آب حفره‌ای در خاک‌های ماسه‌ای نشست تحکیم و آنی در آن‌ها به طور هم‌زمان رخ می‌دهد. اما وقتی که یک لایه خاک رس اشباع، تحت تاثیر افزایش تنش قرار گیرد، ابتدا نشست آنی رخ می‌دهد، از آنجایی که ضریب نفوذپذیری رس به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر از ضریب نفوذپذیری ماسه است، زهکشی آب حفره‌ای سریعاً انجام نشده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از بارگذاری، به طور تدریجی و در یک مدت زمان طولانی رخ می‌دهد. بنابراین کاهش حجم خاک، که از این به بعد آن را تحکیم می‌نامیم، به مدت طولانی بعد از بارگذاری و نشست آنی، ادامه خواهد داشت. در خاک‌های رسی نرم، نشست تحکیم چندین برابر نشست آنی است [۵].

۳ - ۳ - ۲ - ساز و کار تحکیم اولیه

برای درک بهتر مفهوم تحکیم اولیه در حالت یک بعدی، می‌توان از تشابه ساده‌ای استفاده کرد. در شکل ۳-۳ یک صفحه مسطح نشان داده شده است که بر روی یک فنر قرار گرفته و فنر نیز توسط آب درون استوانه احاطه شده است. در صفحه مذکور یک روزنه خروج آب نیز تعبیه شده است که امکان خروج آب از استوانه، تنها از طریق آن وجود دارد. ابتدا بدون این که روزنه خروج باز شود، صفحه بارگذاری می‌شود. در این حالت با توجه به این که آب غیر قابل تراکم است، صفحه پایین نیامده و فنر فشرده نمی‌شود، پس تمام بار وارده به آب منتقل می‌شود و در آن اضافه فشار ایجاد می‌شود. مطابق شکل، در مرحله بعد روزنه باز می‌شود و اجازه داده

می‌شود که آب تحت فشار، به تدریج از استوانه خارج شود. با خروج آب صفحه پایین آمده و فنر فشرده می‌شود و این به معنی تحمل نیرو توسط فنر است. خروج آب از استوانه زمانی متوقف می‌شود که تمام بار به فنر منتقل شده و اضافه فشار آب صفر گردد.



شکل ۳-۲ - شبیه‌سازی ساز و کار ایجاد تحکیم توسط فنر [۴۷].

حال یک لایه خاک ریزدانه اشباع با مرزهای نفوذپذیر در نظر گرفته شود که به علت بارگذاری، تحت تاثیر افزایش تنش قرار گرفته است. در ابتدا آب به عنوان یک مایع غیر قابل تراکم، تمام این اضافه تنش را دریافت می‌کند و فشار آب حفره‌ای به طور ناگهانی افزایشی به اندازه تنش وارده پیدا خواهد کرد. با گذشت زمان، آب به تدریج (چون خاک ریزدانه نفوذپذیری پایینی دارد) تحت این اضافه تنش، از خاک خارج می‌شود و معادل آب خارج شده، خاک نشست می‌کند. با خروج آب از خاک، دانه‌های جامد خاک نیز در تحمل اضافه تنش وارده سهیم می‌شوند و همان مقدار که از اضافه فشار آب حفره‌ای کاسته می‌شود، به تنش موثر افزوده می‌گردد. روند خروج آب و تبدیل اضافه فشار آب حفره‌ای به اضافه تنش موثر، تا صفر شدن کامل اضافه فشار آب حفره‌ای ادامه دارد و زمانی که اضافه فشار آب حفره‌ای صفر شود، تحمل اضافه تنش تماماً به عهده دانه‌های جامد خاک خواهد بود. این فرآیند یعنی مراحل تبدیل اضافه فشار آب حفره‌ای به اضافه تنش موثر خاک را تحکیم اولیه می‌گویند. تشابه موجود بین تحکیم اولیه و مدل استوانه و فنر را می‌توان با توجه به شکل ۳-۲ و هم‌چنین شکل ۳-۳ به صورت زیر بیان کرد:

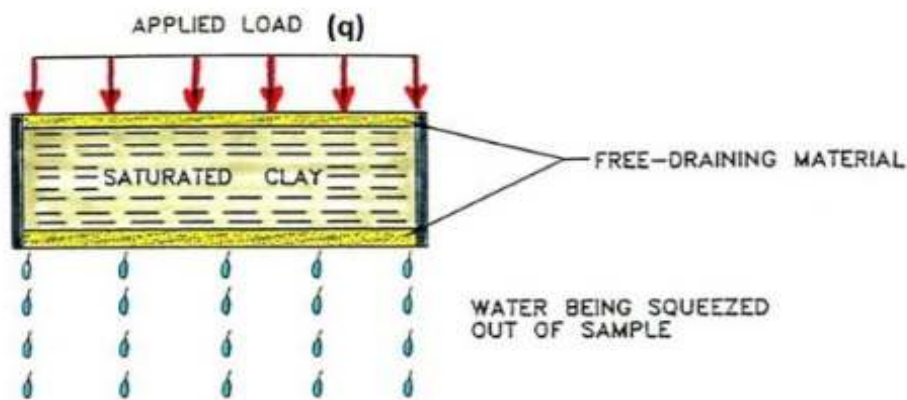
۱- خاک رس اشباع = مجموعه فنر، صفحه مسطح، آب و استوانه

۲- مرزهای نفوذپذیر خاک رس = روزنه خروج آب

۳- بارگذاری q روی سطح خاک = بار W که بر روی صفحه مسطح وارد شده است.

۴ - ساختار دانه های جامد خاک و اضافه تنش موثر = فنر و نیرویی که به تدریج به فنر منتقل می شود.

۵ - آب حفره ای و اضافه فشار آب حفره ای = آب اطراف فنر در داخل استوانه و اضافه فشار آب



شکل ۳-۳ - فرآیند ایجاد تحکیم اولیه [۴۷].

نحوه تبدیل اضافه فشار آب حفره ای به اضافه تنش موثر، در عمق خاک یکسان نیست. اگر خاک از دو طرف امکان زهکشی داشته باشد، بالا و پایین لایه به دلیل مجاورت با مرزهای نفوذپذیر به سرعت اضافه فشار آب حفره ای خود را از دست می دهند و تنش اضافی سریعاً از فشار آب حفره ای به اضافه تنش موثر تبدیل می گردد. این درحالی است که وسط لایه به علت فاصله زیاد از مرزهای نفوذپذیر، دیرتر این تبدیل را انجام می دهد (قطره آب در این نقطه، نسبت به سایر نقاط، به مسیر طولانی تری نیاز دارد تا با رسیدن به مرزهای نفوذپذیر، اضافه فشار آب حفره ای خود را از دست دهد)، بنابراین مدت زمانی طولانی لازم است تا اضافه فشار آب حفره ای در وسط لایه صفر شود [۴۳].

۳-۳-۲ - محاسبه نشست به علت تحکیم اولیه یک بعدی

با اطلاعات به دست آمده از نتایج آزمایش تحکیم، می توان محاسبات نشست احتمالی به علت تحکیم اولیه را با فرض تحکیم یک بعدی انجام داد.

لایه ای از رس اشباع به ضخامت H و سطح مقطع A تحت فشار روباره موجود P_0 در نظر گرفته می شود (شکل ۳-۴) فرض می شود که به علت افزایش فشار Δp ، نشست به علت تحکیم اولیه مساوی S باشد. بنابراین تغییر در حجم برابر است با:

$$\Delta V = V_0 - V_1 = H \cdot A - (H - S) \cdot A = S \cdot A \quad (2-3)$$

که در آن V_0 و V_1 به ترتیب حجم‌های اولیه و نهایی هستند.

ولی تغییر در حجم کل مساوی تغییر در حجم حفرات ΔV_v است. بنابراین:

$$\Delta V = S \cdot A = V_{v_0} - V_{v_1} = \Delta V_v \quad (3-3)$$

که در آن V_{v_0} و V_{v_1} حجم‌های حفرات اولیه و نهایی هستند.

با استفاده از تعریف نسبت تخلخل می‌توان نوشت:

$$\Delta V_v = \Delta e \cdot V_s \quad (4-3)$$

که در آن Δe تغییرات نسبت تخلخل است. از طرفی:

$$V_s = \frac{V_0}{1 + e_0} = \frac{AH}{1 + e_0} \quad (5-3)$$

در رابطه فوق e_0 نسبت تخلخل اولیه در حجم V_0 است.

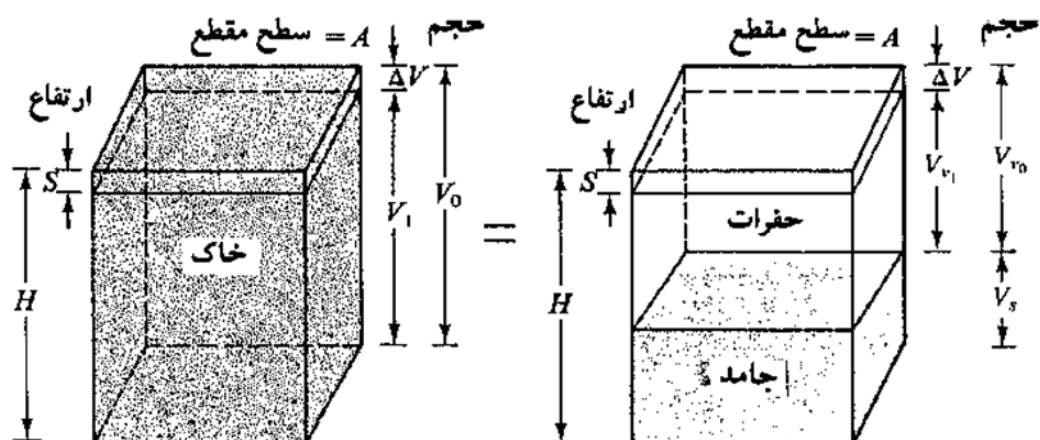
بنابراین با استفاده از روابط بالا می‌توان نوشت:

$$\Delta V = S \cdot A = \Delta e \cdot V_s = \frac{AH}{1 + e_0} \Delta e \quad (6-3)$$

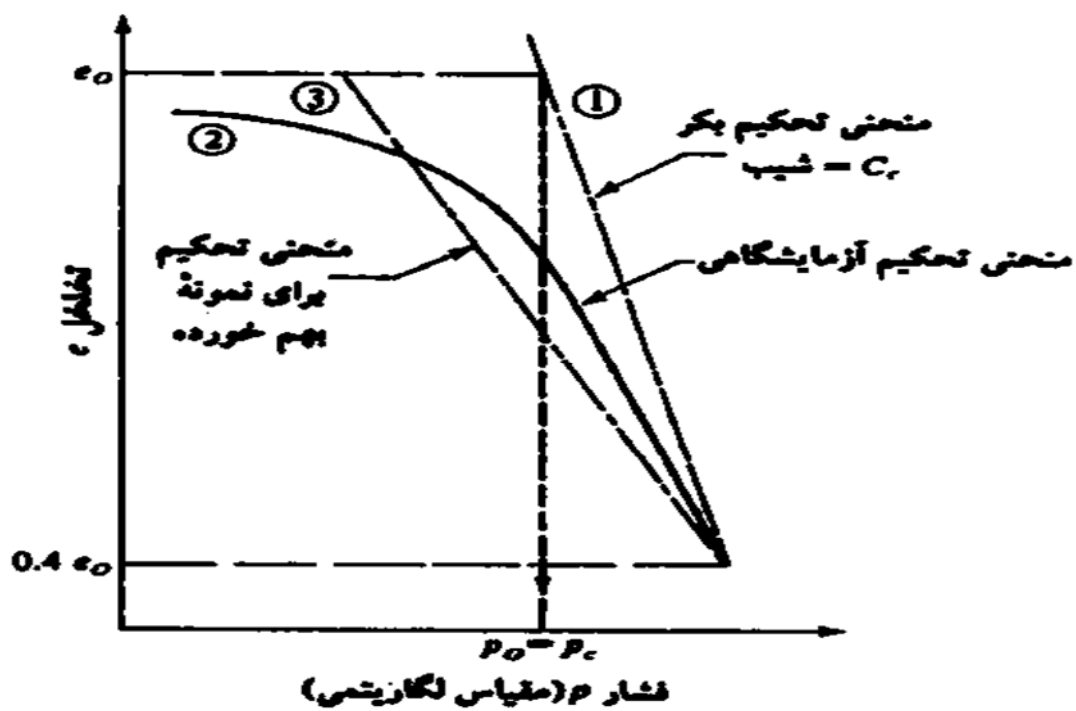
$$S = H \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad \text{یا}$$

برای رس‌های عادی تحکیم یافته که نمودار e در برابر $\log p$ آن‌ها خطی است (شکل ۳-۵)، می‌توان نوشت:

$$\Delta e = C_c [\log (p_0 + \Delta p) - \log p_0] \quad (7-3)$$



شکل ۳-۴ - نشست ناشی از تحکیم یک بعدی [۵].



شکل ۳-۵ - ویژگی تحکیم رس عادی تحکیم یافته با حساسیت کم تا متوسط [۵].

که در آن C_c شیب نمودار e در مقابل $\log p$ است که عامل فشردگی نامیده می‌شود. با قرار دادن رابطه ۳-۷ در رابطه ۳-۶ به دست می‌آید:

$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \quad (۳-۸)$$

برای یک لایه رس ضخیم، دقیق‌تر است که لایه به لایه‌هایی با ضخامت کم‌تر تقسیم شده و برای هر لایه، محاسبات نشست به طور جداگانه انجام شود. مجموع این نشست‌های جزئی، نشست کل برای تمام لایه‌ها را به دست می‌دهد:

$$S = \sum \left[\frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \left(\frac{p_{0(i)} + \Delta p_{(i)}}{p_{0(i)}} \right) \right] \quad (۳-۹)$$

که در آن:

H_i : ضخامت لایه i

$\Delta p_{0(i)}$: فشار روباره موثر متوسط اولیه برای لایه i

$\Delta p_{(i)}$: افزایش فشار قائم برای لایه i

در رس پیش تحکیم یافته (شکل ۳-۶)، برای $p_0 + \Delta p \leq p_c$ تغییرات صحرایی e در مقابل $\log p$ در امتداد خط cb خواهد بود که شیب آن تقریباً مساوی شیب منحنی برگشت در آزمایشگاه است. شیب منحنی برگشت C_s ، تورم نامیده می‌شود. بنابراین:

$$\Delta e = C_s [\log (p_0 + \Delta p) - \log p_0] \quad (۳-۱۰)$$

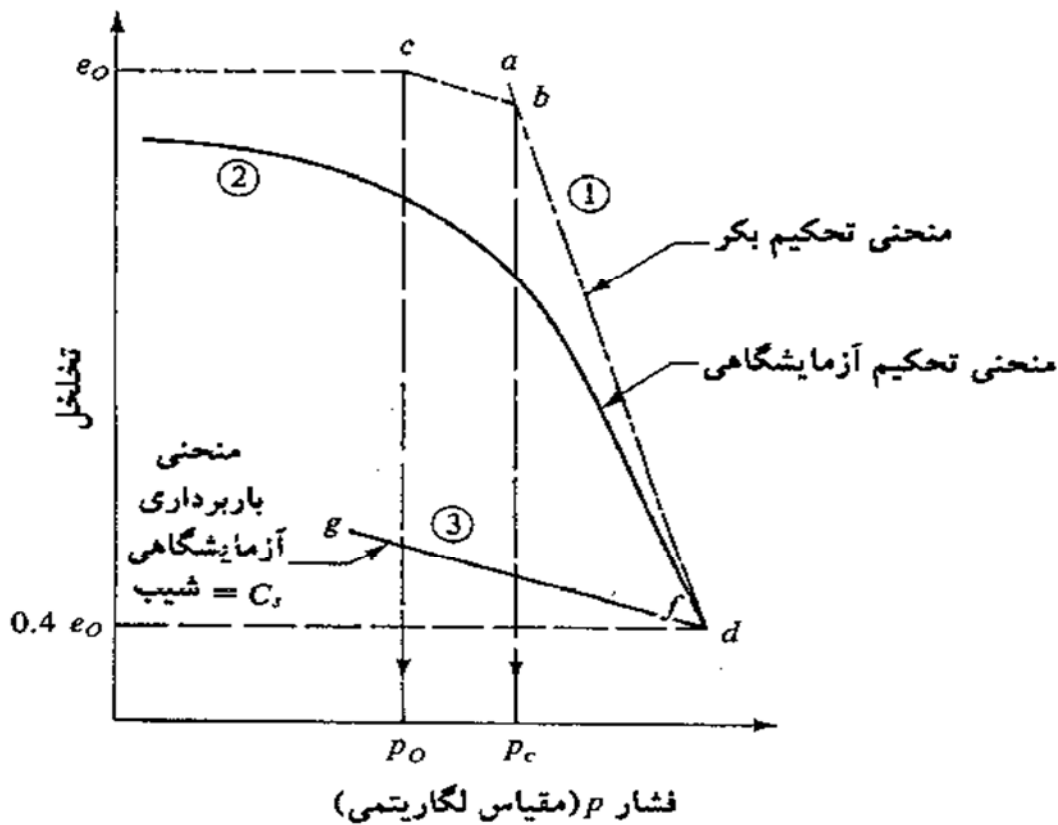
با استفاده از روابط (۳-۶) و (۳-۱۰) می‌توان نوشت:

$$S = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \quad (۱۱-۳)$$

اگر $p_0 + \Delta p \geq p_c$ باشد:

$$S = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_c} \right) \quad (۱۲-۳)$$

اگر نمودار e در مقابل $\log p$ در دست باشد، به سادگی می توان برای دامنه تغییرات فشار موردنظر، Δe را از روی نمودار خواند و با قرار دادن در رابطه (۲-۶)، نشست S را به دست آورد [۵].



شکل ۳-۶- ویژگی تحکیم رس پیش تحکیم با حساسیت کم تا متوسط [۵].

۳-۲-۳ محاسبه نشست به علت تحکیم ثانویه

در پایان تحکیم اولیه (یعنی با از بین رفتن کامل فشار آب اضافی)، به علت تغییر شکل پلاستیک اسکلت خاک، مقداری نشست رخ می دهد. این مرحله از تحکیم، به تحکیم ثانویه معروف است. در حین تحکیم ثانویه، نمودار تغییر شکل در مقابل لگاریتم زمان عملاً خطی است (شکل ۳-۷). تغییرات نسبت تخلخل e در مقابل t برای یک افزایش بار، مشابه شکل (۳-۷) است. این موضوع در شکل (۳-۸) نیز قابل مشاهده است. با استفاده

از شکل (۳-۸)، عامل تحکیم ثانویه به صورت زیر تعریف می‌شود:

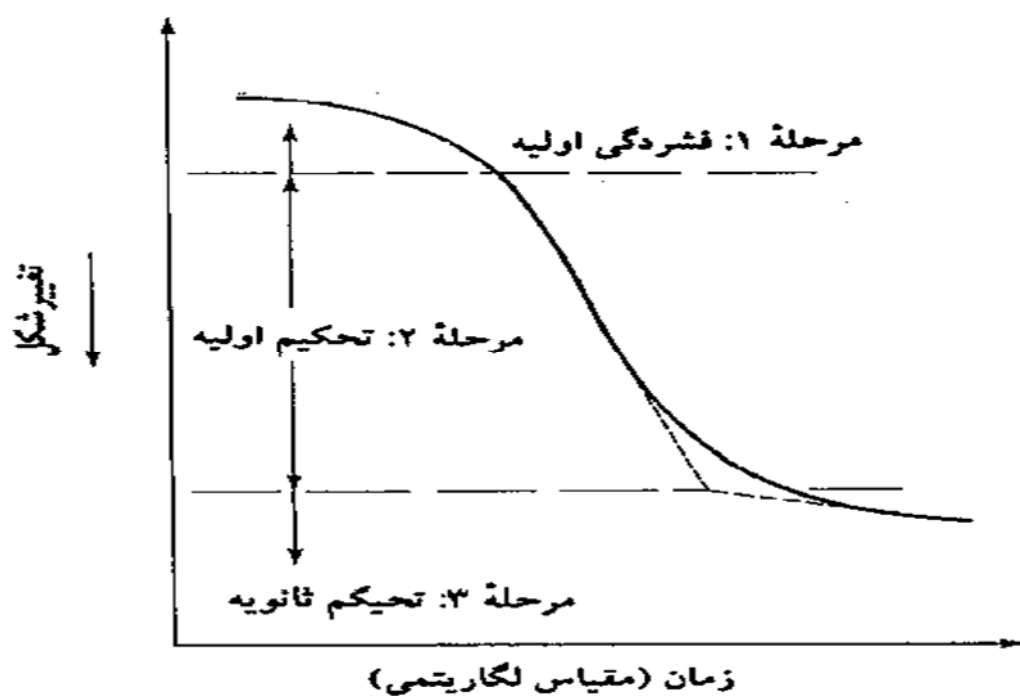
$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad (3-13)$$

که در آن:

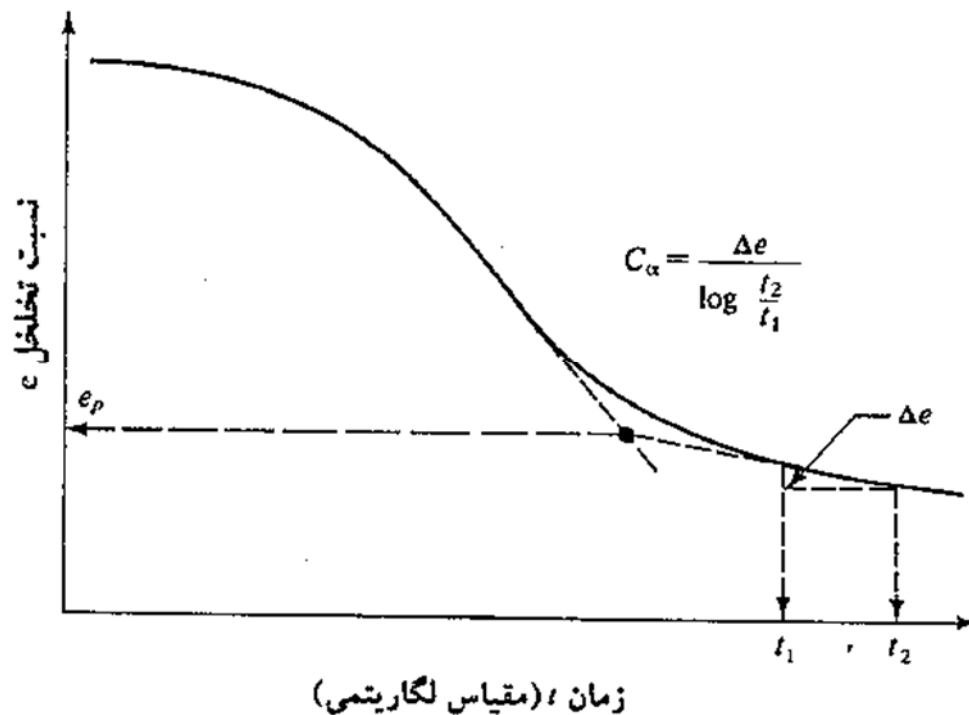
C_{α} : تحکیم ثانویه

Δe : تغییرات نسبت تخلخل

t_1 و t_2 : زمان



شکل ۳-۷- نمودار تغییر شکل - زمان در حین تحکیم برای یک افزایش بار معلوم [۵].



شکل ۳-۸ - تغییرات نسبت تخلخل در مقابل لگاریتم زمان تحت افزایش بار و تعریف عامل تحکیم ثانویه [۵].

مقدار تحکیم ثانویه می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

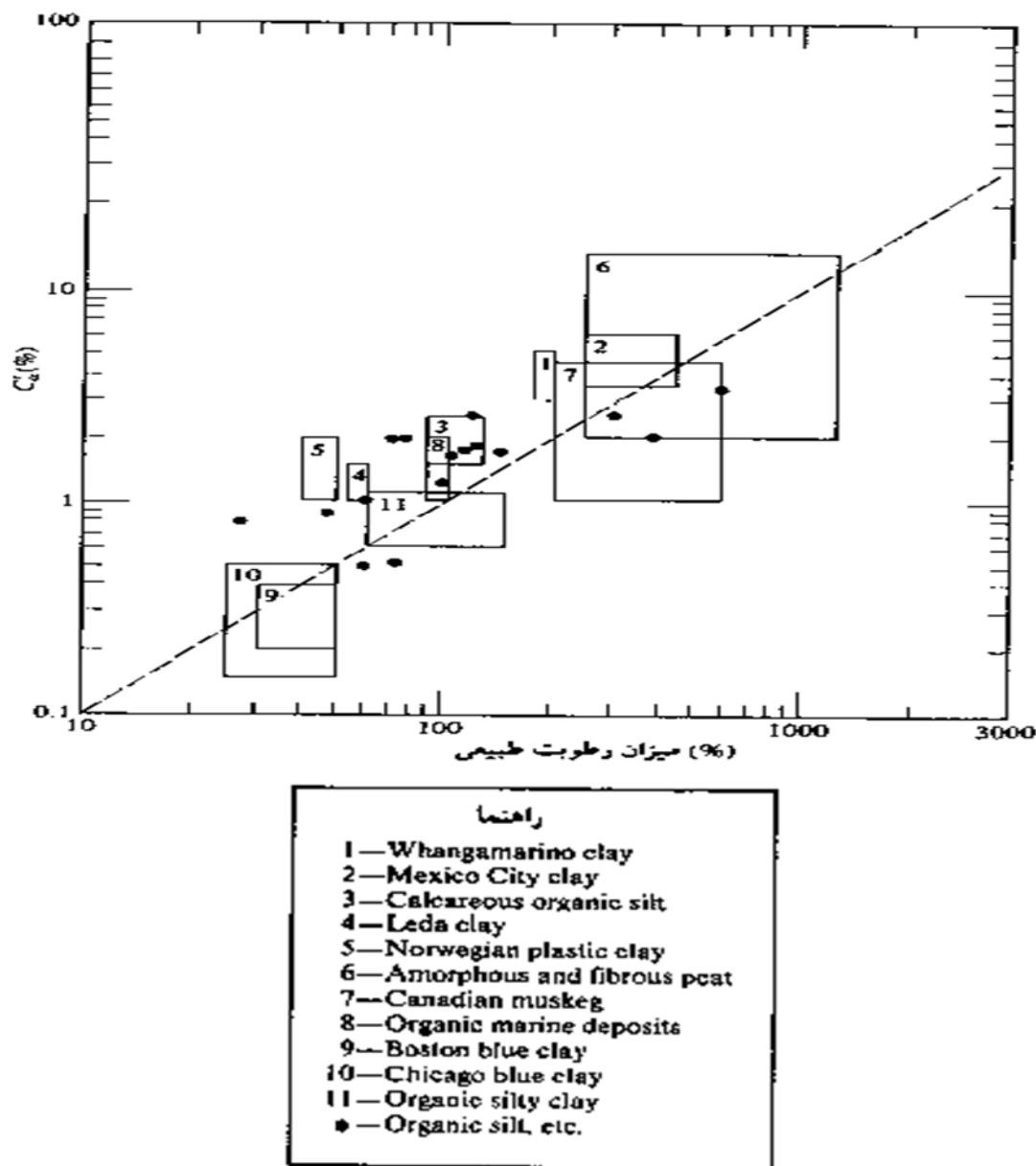
$$S_s = C'_\alpha H \log(t_2/t_1) \quad (۳-۱۴)$$

$$C'_\alpha = C_\alpha / (1 + e_p) \quad (۳-۱۵)$$

e_p : نسبت تخلخل در انتهای تحکیم اولیه (شکل ۳-۷)

H : ضخامت لایه رسی

در شکل ۳-۹، مقادیر C'_α برای بعضی از انواع خاک‌های رسی ارائه شده است. نشست ناشی از تحکیم ثانویه، در خاک‌های آلی و یا خاک‌های غیرآلی با قابلیت فشردگی زیاد، مهم‌تر است. در رس‌های غیرآلی پیش تحکیم یافته، مقدار تحکیم ثانویه خیلی کوچک است و اهمیت زیادی ندارد. عوامل زیادی وجود دارد که ممکن است در روی مقدار تحکیم ثانویه موثر باشند و بعضی از آن‌ها تاکنون به طور روشن فهمیده نشده‌اند. نسبت تحکیم ثانویه به تحکیم اولیه برای یک لایه خاک بستگی به نسبت افزایش تنش Δp به تنش موثر اولیه p دارد. برای نسبت‌های کوچک $\Delta p/p$ نسبت تحکیم ثانویه به اولیه بزرگ‌تر است.



شکل ۳-۹ - C_u برای نهشته‌های طبیعی خاک [۵].

۳-۴ - رفتارنگاری و ابزاربندی نشست

رفتارنگاری و ابزاربندی به معنای بررسی عملکرد یک سازه در دوران ساخت و مرحله بهره‌برداری و مقایسه آن با پیش‌بینی‌های زمان طراحی است. سازه‌های خاکی به دلیل آن‌که بدنه آن‌ها از خاک و سنگ تشکیل شده است دارای رفتارهای متفاوتی هستند. وجود پدیده‌هایی مثل لغزش شیروانی، رگاب یا جوشش مصالح ریزدانه

از جمله مواردی است که بر پیچیدگی رفتار خاک می‌افزاید. بررسی و کنترل نیروها و تغییرشکل‌های ایجاد شده در سازه خاکی مستلزم نصب یک‌سری ابزارهای اندازه‌گیری در محل‌های مناسب و حساس هستند که به این ابزارها، ابزاردقیق گفته می‌شود.

رفتارسنجی در سدهای خاکی به منظور اندازه‌گیری تغییرشکل و فشار منفذی آب، از زمان‌های قدیم وجود داشته است. از آنجا که سدهای خاکی قدیمی با ارتفاع کم ساخته می‌شدند مشکلات و پیچیدگی‌های توام با سدهای مرتفع را دربرنداشته‌اند. لیکن هر قدر ارتفاع این سدها افزایش می‌یافت و از ضخامت آن‌ها کاسته می‌شد، الزامات تکنیک‌های رفتارسنجی نیز توسعه می‌یافت و به‌تدریج به عنوان یکی از ارکان اصلی طراحی پروژه و عامل اصلی ارزیابی پایداری به حساب آمد.

به طور کلی رفتارنگاری عبارت است از انتخاب ابزاردقیق مناسب برای اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر، نصب ابزاردقیق، قرائت ابزاردقیق، پردازش داده‌های ابزاردقیق و رسم منحنی هدایت رفتارسنجی، تفسیر منحنی‌های رفتارسنجی، ارزیابی وضعیت پایداری، انجام اقدامات پیشگیرانه در صورت تشخیص ناپایداری و آنالیز برگشتی داده‌های رفتارسنجی به منظور ارزیابی پارامترهای واقعی اجرایی [۴۵].

۳ - ۶ - اهداف ابزاربندی و رفتارنگاری در سدهای خاکی

به‌منظور پیش‌گیری از گسیختگی سد در اثر عوامل مختلف، رفتارسنجی مستمر سد ضروری است. به این منظور با استفاده از ابزاردقیق در محل‌های مناسب، قرائت دوره‌ای و تفسیر داده‌های رفتارسنجی به همراه تحلیل برگشتی داده‌ها، در صورت لزوم، می‌توان محتمل‌ترین عامل ناپایداری را پیش‌بینی کرد و اقدامات لازم در جهت مقابله با آن را انجام داد. به کمک نتایج رفتارسنجی و مطالعه روند تغییرات داده‌های ابزار دقیق در بسیاری از موارد، می‌توان پدیده‌هایی را که احتمالاً در حال فرسایش، تضعیف و تخریب سد هستند، کشف و پیش از وقوع از آن‌ها اجتناب کرد، یا تاثیر آن‌ها را تقلیل داد و یا در نهایت در وقت کافی، با انجام اقدامات لازم، خسارات احتمالی وارده به اهالی و تأسیسات پایین‌دست سد را به حداقل ممکن رساند. به طور کلی به عنوان یک اصل پذیرفته شده است که ایمنی سد فقط به طراحی و اجرای خوب و مناسب بستگی ندارد، بلکه به رفتارنگاری واقعی در طول چند سال اول عملکرد و کل عمر مفید سازه سد نیز وابسته است. بدیهی است ابزاربندی یک

سد خاکی نمی‌تواند مشکلات موجود را از بین ببرد، ولی می‌تواند در مقابل مشکلات بالقوه و خطر آفرین هشدار دهد. یک سیستم ابزاربندی در رفتارسنجی مؤثر می‌تواند تغییرات ناگهانی غیرعادی و یا روند غیرعادی درازمدت را کشف کند.

در دوران ساختمان و بهره‌برداری سد تحت شرایط مختلف مانند آبدگیری اولیه، تراوش پایدار و غیره در شرایط استاتیکی و دینامیکی (وقوع زلزله)، لازم است که پایداری از طریق اندازه‌گیری و کنترل مقادیر یک‌سری از پارامترها مورد بازبینی و بررسی قرار گیرد. این پارامترها اغلب شامل فشارهای آب حفره‌ای، تراوش، تغییر شکل‌های سطحی، تغییر مکان‌ها و حرکات افقی و قائم داخلی و فشارهای کل خاکریز است که اندازه‌گیری هر یک از آن‌ها در مراحل مختلف عملکرد سد در نقاط خاصی از یک سد خاکی از ضرورت زیادی برخوردار است. به طور کلی رفتارنگاری سدهای خاکی به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود که عبارتند از دوران ساخت، اولین آبدگیری و دوران بهره‌برداری. از جمله موارد رفتارنگاری در دوران ساخت بررسی فشار آب حفره ای در داخل هسته ناشی از روباره و تغییر شکل‌های قائم و افقی و پدیده قوس‌زدگی است. همچنین سنجش میزان نشست آب از پی و تکیه‌گاه‌ها، بررسی عملکرد دیوار آب‌بند و بررسی پدیده رگاب و جوشش در پی از موارد مهم رفتارنگاری در اولین آبدگیری هستند. از موارد رفتارنگاری در زمان بهره‌برداری می‌توان به بررسی میزان نشست از پی و هسته، رفتارسنجی پایداری شیب‌ها و تکیه‌گاه‌ها و ارزیابی پدیده رگاب اشاره کرد. بنابراین سدها به دلیل اهمیت بالا همواره باید تحت نظارت و کنترل باشند [۴۵].

۳-۷- جمع‌بندی

در این فصل در مورد عوامل مؤثر بر بروز نشست خاک و انواع نشست‌های آبی و تحکیمی، ابزار دقیق و اهداف نصب آن در سدهای خاکی صحبت شد که در تحلیل رفتار سدهای خاکی بسیار مهم هستند. در فصل آتی به معرفی سد نرماب و ساختگاه آن پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

معرفی سد نرماب و ساختگاه آن

۴ - ۱ - مقدمه

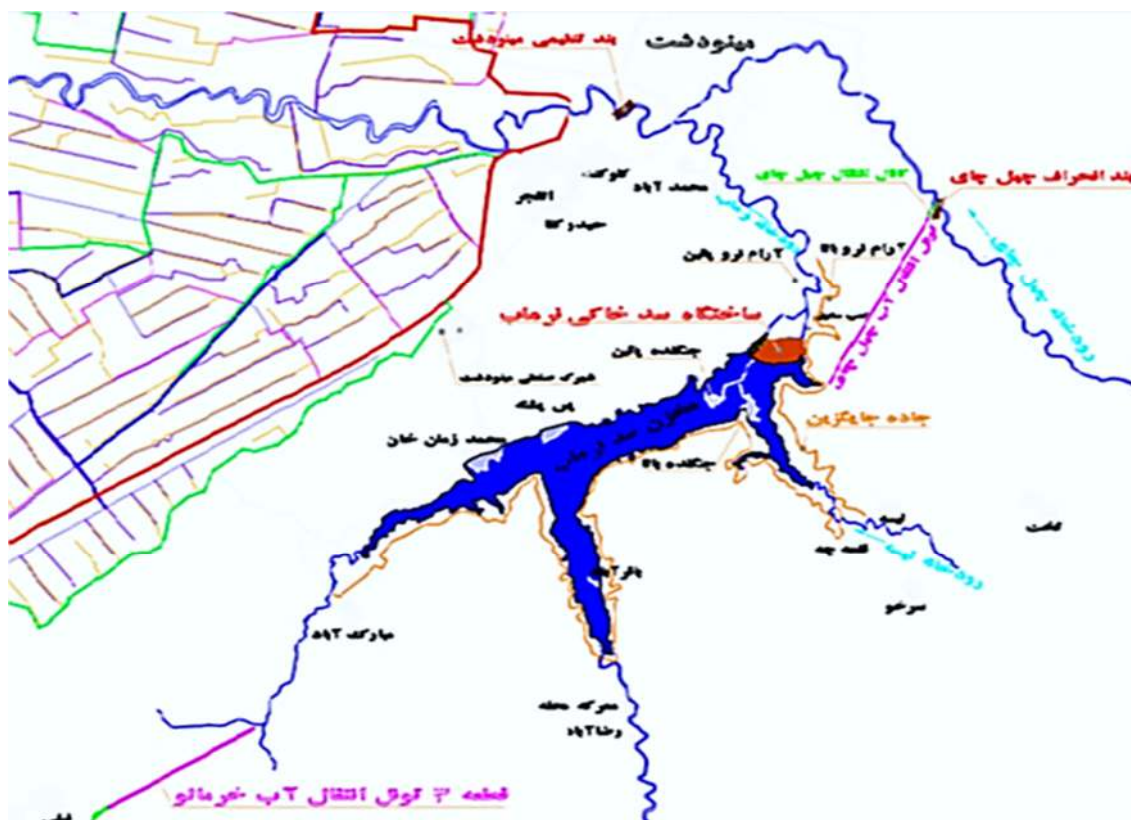
همواره سد سازی به عنوان یکی از مهم ترین فعالیت های مهندسی مطرح بوده است، به طوری که ساکنین مناطق مختلف جهان بنا به شرایط جغرافیایی و ضرورت های ایجاد شده، به احداث سدها یا آب بندهای مختلف با مصالح و مشخصات گوناگون، اقدام کرده اند. در این راستا، عمدتاً نیازهایی از جمله آبیاری و آبرسانی مطرح بوده یا در مناطقی نیز به خاطر پایین بودن سطح آب رودخانه ها یا نیاز به تغییر جهت مسیر رود، سد سازی انجام می گرفت. در سرزمین های باستانی و کهن که از قدیم در معرض سیلاب و طغیان رودخانه ها قرار داشته اند، ساخت بندهای مختلف در طول مسیر رودخانه ها یا مناطق سیل خیز به جلوگیری از خسارات کمک فراوانی کرده است. در ایران به جهت وجود مشکلات ناشی از کمبود آب و شرایط اقلیمی خاص، همواره آب به عنوان ماده ای بسیار ارزشمند و استراتژیک مد نظر بوده است به طوری که این موضوع باعث شده تا بندسازی، سد سازی و احداث دیگر تأسیسات ذخیره سازی و انتقال آب در آثار به جا مانده در فرهنگ و تمدن ایرانی، نمود خاصی داشته باشد. بسیاری از سیستم های آبرسانی و آبیاری که تا سال های متمادی نیز در ایران از آنها استفاده شد مرهون تلاش مهندسان و صنعتگران ایرانی است که در زمان های بسیار دور تلاش نمودند تا نیازها و کمبودها را در زمینه های عمرانی و آبادی بر طرف نمایند. آثار و شواهد این سیستم ها را می توان در نقاط مختلف ایران مشاهده کرد.

۴ - ۲ - معرفی سد نرماب

طرح سد و شبکه آبیاری و زهکشی نرماب - چهل چای به منظور بهره برداری بهینه و توسعه منابع آب رودخانه های نرماب، چهل چای و خرمالو در شرق استان گلستان احداث شده است. محدوده فوق در بخش میانی حوضه آبریز رودخانه گرگان قرار دارد که از شرق به رودخانه ی قلی تپه، از غرب به رودخانه قره سو و از شمال به رودخانه گرگان محدود می شود. با توجه به مطالعات هواشناسی، متوسط بارندگی سالانه در محدوده طرح بین ۴۵۰ الی ۸۵۰ میلی متر متغیر است. متوسط حداقل دمای ماهانه مشاهده شده ۵/۰- و متوسط حداکثر دمای ماهانه مشاهده شده ۳۵/۹ درجه سانتی گراد است. تعداد روزهای یخبندان حداکثر ۳۰ روز است که عموماً بسیار کمتر از آن است. متوسط تبخیر در محل سد نرماب ۱۶۰۰ میلی متر در سال است.

در طرح سد نرماب سازه‌های زیر لحاظ شده است [۴۶]:

- بدنه سد از نوع خاکی همگن
 - سازه انحراف شامل دو رشته تونل، کانال ورودی و حوضچه آرامش
 - سازه تخلیه طغیان (سرریز) بتنی و حوضچه آرامش
 - بند انحرافی چهل‌چای به همراه کانال و تونل انتقال آب حوزه رودخانه چهل‌چای
 - بند انحرافی خرمالو به همراه کانال و تونل انتقال آب حوزه رودخانه خرمالو
- حوضه آبریز رودخانه‌های نرماب، چهل‌چای و خرمالو با مساحتی حدود ۱۲۳۷ کیلومتر مربع از تنوع زمین ریخت‌شناسی و زمین‌شناختی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. هدف از این مطالعات امکان تامین آب برای آبیاری دشت گنبد - مینودشت به وسیله‌ی احداث سد مخزنی در ناحیه جنوب شهرستان مینودشت است. پس از بررسی‌های مقدماتی، از بین رودخانه‌هایی که از جنوب به مرکز دشت گنبد - مینودشت جاری هستند، رودخانه‌ی نرماب به لحاظ دارا بودن پتانسیل آبی بیشتر، شرایط مورفولوژی و زمین‌شناسی مناسب‌تر از سایر رودخانه‌های مورد مطالعه (چهل‌چای و خرمالو) به‌عنوان یک ساختگاه مدنظر قرار گرفت و سد مخزنی بر روی رودخانه مذکور در نظر گرفته شد. سیمای کلی پروژه سد مخزنی نرماب در شکل (۱) - ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱ - نمای کلی سد نرماب [۴۶].

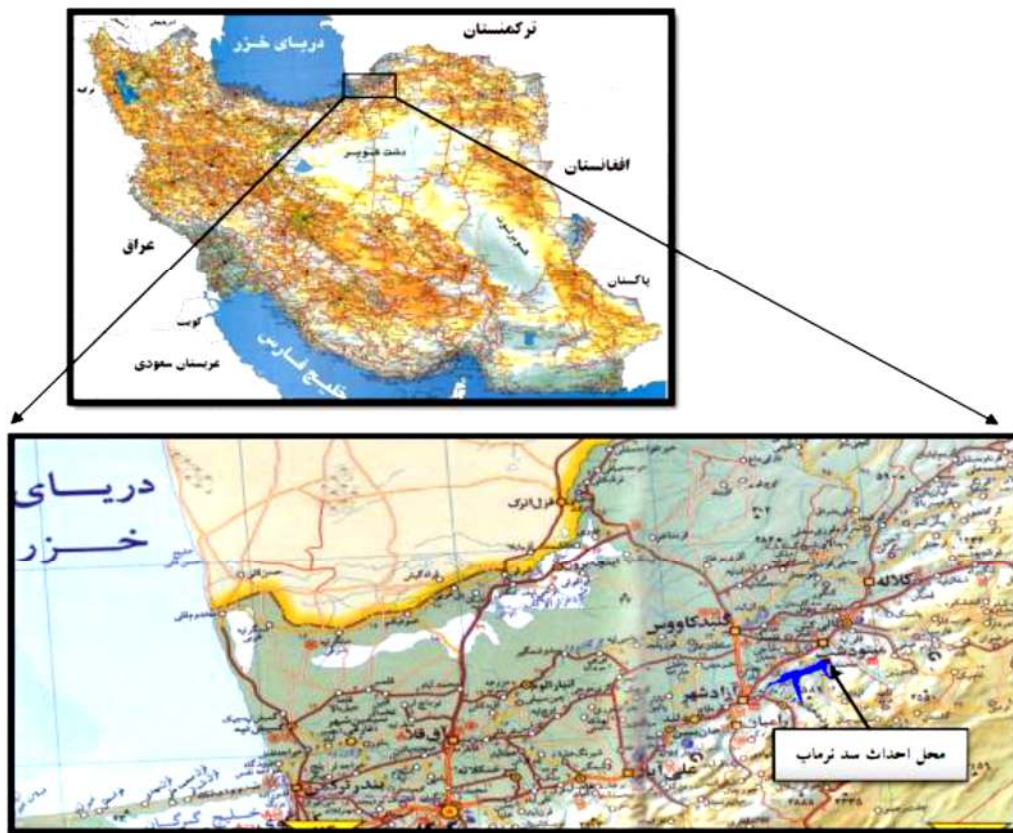
شناسنامه طرح سد نرماب به صورت جدول ۴-۱ ارائه شده است:

جدول ۴-۱ - شناسنامه طرح سد نرماب [۴۶].

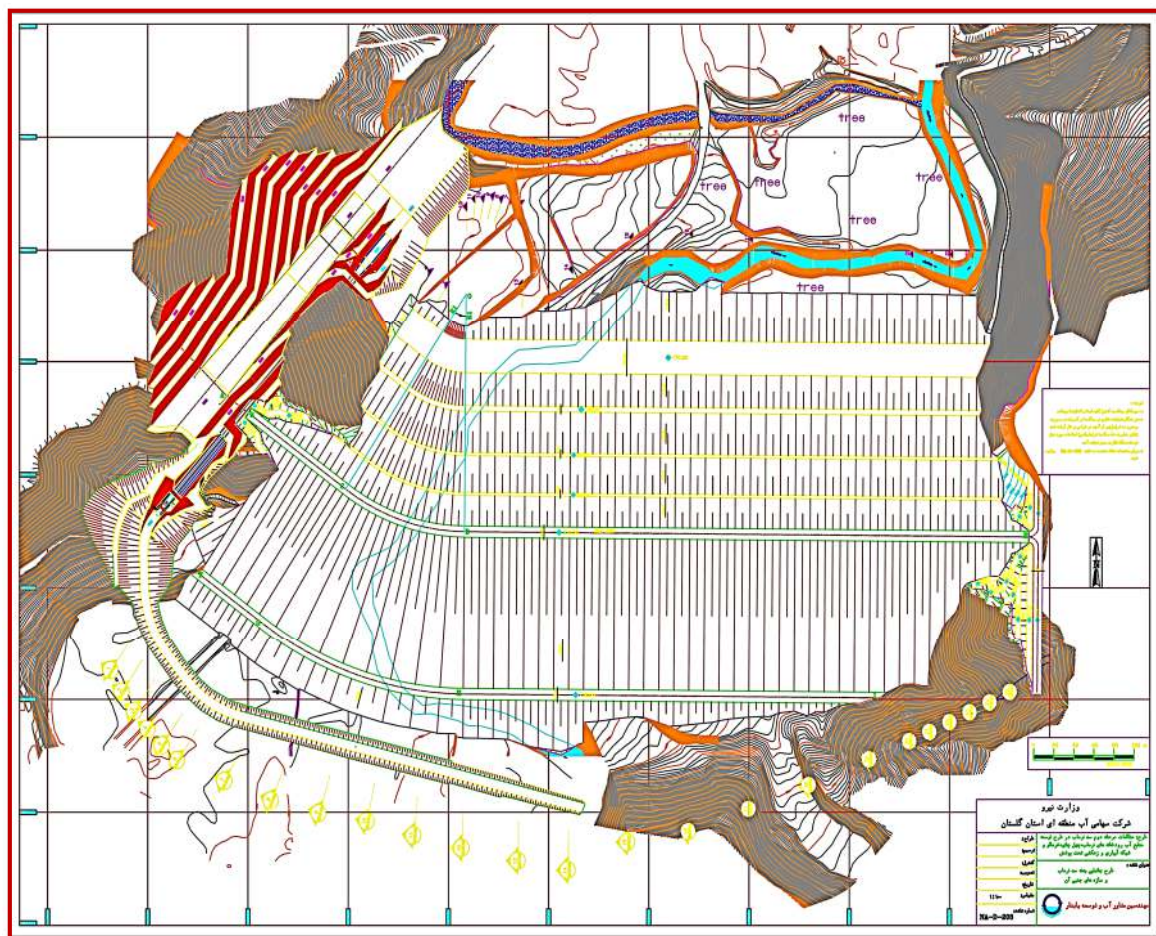
نوع	خاکی همگن
حجم کل مخزن در تراز نرمال	۱۱۵ میلیون مترمکعب
حجم کل خاکریزی بدنه	۶ میلیون مترمکعب
حداکثر ارتفاع سازه‌ای سد	۶۰ متر
تراز تاج سد	۲۱۵ متر بالاتر از سطح دریا
تراز کف سد	۱۵۵ متر بالاتر از سطح دریا
طول تاج	۸۰۷ متر
سیستم انحراف	دو رشته تونل به طول ۵۵۰ متر و قطر ۴/۵ متر
نوع سرریز	آزاد
تراز لبه سرریز	۲۰۴ متر بالاتر از سطح دریا
عرض سرریز	۴۰ متر

۴ - ۳ - موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد

ساختگاه سد نرماب در شمال شرقی ایران، استان گلستان و در فاصله‌ی حدود ۴ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مینودشت واقع شده است. راه دسترسی به محل سد نرماب از طریق جاده آسفalte مینودشت - جنگل ده امکان پذیر است. جاده مذکور از جناح چپ محور سد عبور می نماید. ساختگاه سد انحرافی چهل چای نیز در جنوب شرقی شهرستان مینودشت است و حدود ۵/۵ کیلومتر با مینودشت فاصله دارد. راه دسترسی به محل سد انحرافی چهل چای از طریق جاده آسفalte شهرستان مینودشت - روستای نالاج امکان پذیر است. جاده مزبور از جناح چپ محور سد انحرافی عبور می کند. ساختگاه سد انحرافی خرمالو در جنوب غربی شهرستان مینودشت و جنوب شرقی شهرستان آزادشهر در نظر گرفته شده است. این ساختگاه حدود ۶ کیلومتر با شهرستان آزادشهر فاصله داشته و پس از عبور از روستای خان دوز ساختگاه مذکور قابل دسترسی است. در شکل‌های ۴-۲ تا ۴-۴ موقعیت، پلان، تصویر ماهواره‌ای و نمایی از سد نرماب نشان داده شده است.



شکل ۴ - ۲ - موقعیت سد نرماب [۴۶].



شکل ۴-۳ - نقشه سد نرماب [۴۶].



شکل ۴-۴ - تصویر ماهواره‌ای محدوده طرح سد نرماب [۴۶].



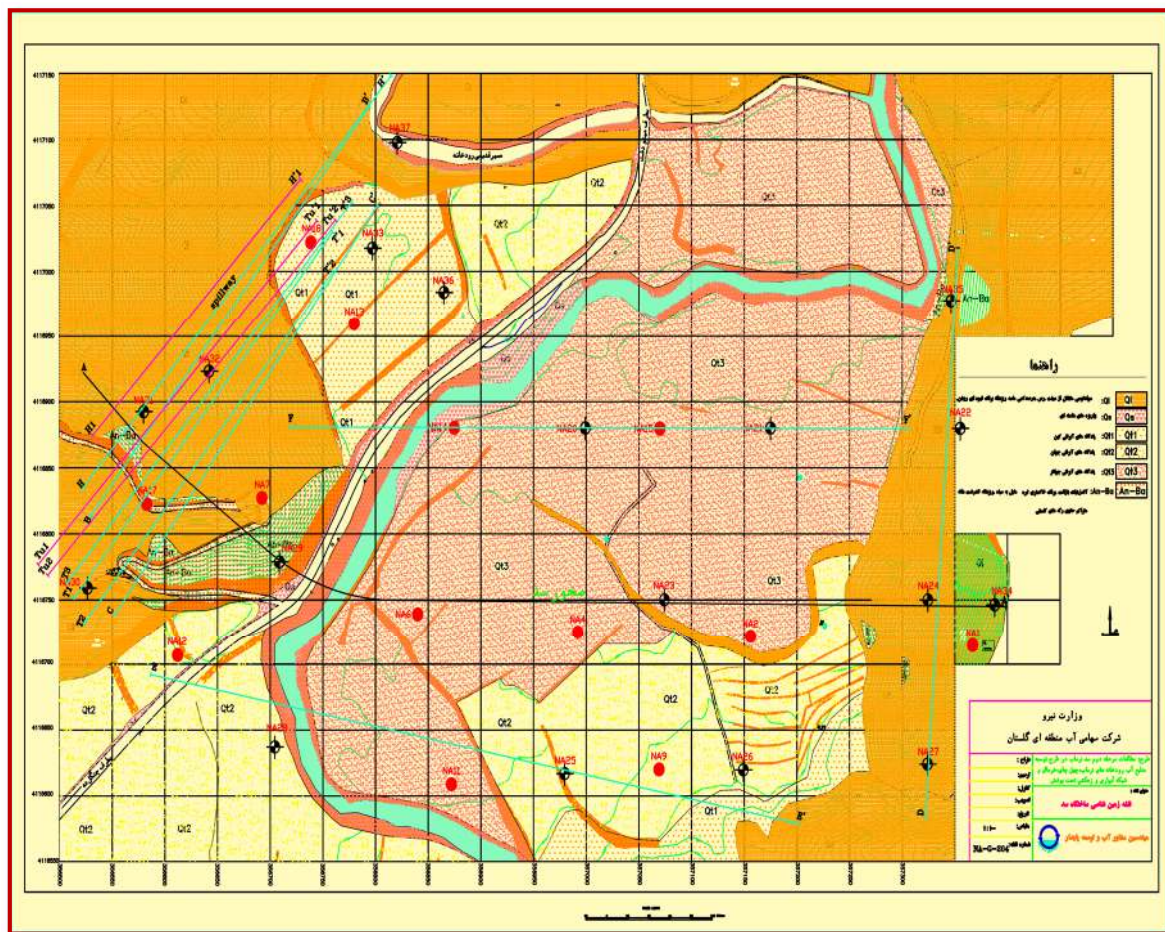
شکل ۴-۵ - نمایی از بخش اجرا شده‌ی سد نرماب [۴۶].

۴-۴ - زمین‌شناسی عمومی ساختگاه سد

از دیدگاه زمین‌شناسی منطقه‌ای، گستره طرح در مرز دو زون گرگان - مینودشت و زون کپه داغ - هزارمسجد واقع شده است. منطقه مورد مطالعه بخشی از حاشیه شمالی رشته کوه‌های چین خورده و رانده شده البرز است و رشته کوه‌های کپه داغ - هزارمسجد، در شمال استان خراسان که تا مرز ترکمنستان گسترش دارد، در جهت غربی خود به رشته کوه‌های البرز می‌پیوندد. هرچند که این رشته کوه‌ها در دوره کرتاسه و دوره‌های قبل از آن اغلب به صورت حوضه دریایی مستقل از حوضه البرز و جدا از آن بوده ولی گاهی نیز با آن حوضه در ارتباط و یا احیاناً با آن یکی بوده است [۴۶]. ساختار سد نرماب در محور سد بر روی سنگ‌های آندزیت، بازالت و سیلورین قرار گرفته است (شکل ۴-۶). بازگشایی پرتال‌های خروجی و ورودی سیستم انحراف آب و بررسی‌های به‌عمل آمده از گالری اکتشافی حفاری شده در محور سد و نیز مشاهده رخنمون لایه‌های زمین‌شناسی در سطح و محدوده مطالعه شده نشان می‌دهد که مقطع محورسد نامتقارن و دارای شیب‌های دامنه‌ای نسبتاً تندی است که در کف دره ضمن دارا بودن شیب بسیار ملایم به طرف رودخانه، با رسوبات ضخیم آبرفت‌های رودخانه‌ای پوشیده شده است. رسوبات آبرفتی بستر رودخانه دارای ضخامتی حدود ۶۰ متر متشکل از لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه بوده که در طی حفاری گمانه‌ها در

این قسمت مواردی دال بر وجود آرتزین دیده شده است. با توجه به وجود این لایه عظیم آبرفتی در تشکیلات پی سد، دیوار آببند با عمق ۶۸ متر به همراه پرده تزریق به عمق ۷ متر در زیر آن جهت آببندی پی سد طراحی شده است.

یکسری بررسی‌های ژئوتکنیکی شامل حفاری‌های اکتشافی، آزمایش‌های صحرایی درون چاهی و همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی انجام شده است. عملیات حفاری‌های اکتشافی توسط دستگاه‌های حفاری دورانی و با استفاده از مغزه‌گیر دو جداره به طول حداکثر ۳ متر در هر نوبت و با قطرهای ۱۰۱، ۸۶ و ۷۶ میلی‌متر و با توجه به خصوصیات آبرفت و سنگ انجام گرفته است، هدف از مطالعات ژئوتکنیکی، شناخت زمین‌شناسی زیرسطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی برای طراحی سد و سازه‌های وابسته است، به‌طوری‌که بتوان ارزیابی صحیحی از مشخصه‌های ژئوتکنیکی سنگ بستر در ساختگاه سد به دست آورد [۴۶].



شکل ۴-۶ - مقاطع زمین‌شناسی ساختگاه سد نرماب [۴۶].

۴ - ۵ - زمین‌شناسی مهندسی

رودخانه‌ی نرماب از جنوب شهرستان مینودشت و با روند جنوب غربی - شمال شرقی عبور می‌نماید. با توجه به شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه، ساختگاهی در فاصله‌ی حدود چهار کیلومتری جنوب غربی شهرستان مینودشت و در کوهپایه‌های رشته کوه البرز برای مطالعه و احداث سد انتخاب شده است. جاده‌ی آسفalte مینودشت - جنگل‌ده از جناح چپ این تنگه عبور می‌کند. مقطع محور انتخابی تقریباً نامتقارن و دارای شیب‌های دامنه‌ای نسبتاً تندی است، به‌طوری که شیب دامنه‌ای تکیه‌گاه راست از پادگانه‌ی آبرفتی ساحل راست رودخانه تا تراز ۲۱۰ متر بالاتر از سطح دریا در حدود ۳۰ درجه است [۴۷].

۴ - ۵ - ۱ - زمین‌ریخت‌شناسی ساختگاه سد

رودخانه‌ی نرماب در بستری U شکل حرکت می‌کند که دیواره‌های آن دارای شیب تند و نزدیک قائم است. عرض پادگانه‌ی آبرفتی ساحل راست رودخانه حدود ۴۵۰ متر و عرض بستر جاری رودخانه حدود ۱۵ تا ۲۰ متر بوده و ارتفاع دیواره‌های فعلی اطراف بستر جاری رودخانه به حدود ۱۰ متر می‌رسد. شیب دامنه‌ای تکیه‌گاه چپ از بستر فعلی حدود ۱۶۵ متر بالاتر از سطح دریا، حدود ۳۸ درجه و از تراز ۱۶۵ الی ۱۸۰ متر از سطح دریا، حدود ۴۴ درجه و از تراز ۱۸۰ متر به بالا شیب دامنه کاهش یافته و به ۲۲ درجه می‌رسد. شیب کلی رودخانه‌ی نرماب در تنگه‌ی سد حدوداً به ۱/۲ درصد می‌رسد [۴۷].

۴ - ۵ - ۲ - چینه‌شناسی

حوضه آبریز رودخانه گرگان‌رود (رودخانه‌های چهل‌چای، نرماب و خرمالو) بر بخشی از حوضه رسوبی هزارمسجد کپه داغ منطبق بوده و لیتولوژی واحدهای سنگی و چینه‌شناسی آن از مشخصات این حوضه تبعیت می‌نماید. این زون به صورت باریکه طویلی در شمال خراسان و ادامه بخش شمالی آن در ترکمنستان قرار دارد. حد جنوبی کپه داغ به بینالود محدود می‌شود و حد شمالی آن با فلات توران با گسیختگی (گسل) همراه است.

سازندهای ساختگاه سد نرماب به دو گروه متمایز قابل تفکیک‌اند. گروه اول - سازندهای ناپیوسته که تماماً مربوط به رسوبات دوران چهارم بوده‌اند و آبرفت‌های عهد حاضر شامل آبرفت‌های رودخانه‌ای، پادگانه‌های آبرفتی، خاک‌های برجای حاصل از فرسایش و واریزه‌های دامنه‌ای را تشکیل می‌دهند که توده‌سنگ ساختگاه سد را پوشش داده‌اند. گروه دوم - سنگ بستر ساختگاه است که تکیه‌گاه‌های ساختگاه سد را

تشکیل داده‌اند. در ادامه لیتولوژی و خواص ژئوتکنیکی هر یک از دو گروه به طور جداگانه شرح داده شده است [۴۸]. گسترش عمده رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای در کف کانال بستر جاری رودخانه است و حداکثر ضخامت آن در محل سد به ۶۴/۵ متر می‌رسد. ذرات متشکله این رسوبات تماماً درشت‌دانه بوده و شامل شن، ماسه، قلوه‌سنگ همراه با درصد کمی از مواد ریزدانه است. دانه‌ها دارای گردشگری خوبی هستند. با توجه به بافت این مصالح در محدوده‌ی ساختگاه سد رسوباتی با نفوذپذیری زیاد به حساب می‌آیند. در بین رسوبات به چند لایه ریزدانه (سیلت، رس و ماسه ریزدانه) برخورد شده است که ضخامت لایه‌های مذکور از ۲ تا ۱۰ متر می‌باشد. نفوذپذیری در این لایه‌ها بسیار کم و در حد نفوذناپذیر است. به دلیل ضخامت زیاد رسوبات آبرفتی رودخانه (حداکثر ۴۶ متر)، برداشت کل رسوبات آبرفتی در ساختگاه سد امکان‌پذیر نیست. پادگانه‌های آبرفتی شامل رسوبات آبرفتی است که کف دره و قسمت مرکزی ساختگاه سد را در وسعت زیادی پوشانده‌اند. عرض این پادگانه‌ها در محور سد حدود ۴۴۰ تا ۴۵۰ متر است. رودخانه‌ی نرماب کانال اصلی خود را که آب رودخانه در آن جریان دارد، درون این رسوبات حفر نموده است. جنس این رسوبات شامل لایه‌های رس سیلت‌دار، سیلت رس‌دار همراه با لایه‌های نسبتاً ضخیم از جنس شن، ماسه، ماسه‌ی ریزدانه و سیلت‌دار در عمق است. این رسوبات در حاشیه‌ی تکیه‌گاه‌ها با رسوبات واریزه‌های دامنه‌ای به صورت بین انگشتی قرار گرفته‌اند. ضخامت این رسوبات در گمانه‌های اکتشافی حداکثر ۶۴/۵ متر به دست آمده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، این رسوبات در حد تراکم متوسط تا خیلی متراکم هستند. واریزه‌های دامنه‌ای عمدتاً در دامنه و پای دامنه‌ها با گسترش بسیار کم مشاهده می‌شوند. قطعات تشکیل‌دهنده‌ی آنها در ابعاد سیلت، ماسه، شن و ندرتاً قلوه‌سنگ است. هر دو دامنه به صورت موضعی و با ضخامت بسیار کم (حداکثر ۶/۵ متر) به وسیله‌ی واریزه‌های دامنه‌ای پوشیده شده‌اند. خاک‌های برجای حاصل از فرسایش سنگ پی ساختگاه، سطح رخنمون‌های سنگی منطقه را پوشانده‌اند، البته در روی این رسوبات نیز مواد رسی نهشته شده‌اند که به همین دلیل ضخامت این رسوبات در برخی نقاط حداکثر به حدود ۲۳ متر نیز می‌رسد، ضخامت این رسوبات در تکیه‌گاه‌ها بین ۱۰ تا ۲۳ متر متغیر است. با توجه به هوازدگی و فرسوده بودن این مواد، خواص فیزیکی و مکانیکی آنها در حد ضعیف تخمین زده می‌شود.

سنگ بستر ساختگاه از دو دیدگاه بررسی شده است که شامل بررسی صحرایی و نتایج حاصل از تشریح میکروسکوپی می‌باشد. به طور کلی نمونه‌های مورد مطالعه و مغزه‌های حاصل از حفاری‌های اکتشافی در محدوده‌ی ساختگاه، سنگ‌های ولکانیکی بوده که شامل بلورهای فلدسپات پلاژیوکلاز اکثراً با ترکیب متوسط

تا اسیدی بوده که هم به صورت فنوکریست و هم به صورت میکرولیت‌های پلاژیوکلاز قابل رویت هستند. در اکثر نمونه‌ها فلدسپات‌های آلکالی (سدیک) نیز موجود بوده که گاه بلورهای پلاژیوکلاز در بخش‌هایی جانشین آن‌ها شده‌اند. در اکثر نمونه‌ها کلریت موجود بوده که هم در زمینه سنگ پراکنده بوده و هم به همراه سیلیس مشاهده شده و هم به صورت حفره‌های درشت در ابعاد ۰/۵ تا بزرگ‌تر از ۳ میلی‌متر است. هم‌چنین اکسیدهای کدر آهن در زمینه‌ی نمونه‌ها نسبتاً فراوان بوده و در برخی از نمونه‌ها تمامی متن سنگ را پوشش داده است. با توجه به شواهد موجود، سنگ‌های ولکانیکی مذکور مربوط به رخساره‌های زیر دریایی در محدوده‌های اسپلیتی (آلکالن) هستند. سنگ بستر در ساختگاه سد نرماب عمدتاً به رنگ خاکستری تیره متمایل به سیاه و به‌طور پراکنده متمایل به سبز، ریزدانه و متراکم و حاوی رگه و رگچه‌های سفید رنگ کلسیتی است. این سنگ‌ها دارای سطحی سخت و خشن هستند. در محدوده‌ی هوازده زمینه اکسیده یا حاوی اکسید آهن، زمینه یا متن سنگ به رنگ قهوه‌ای روشن می‌باشد. در قسمت‌هایی که سنگ بستر متمایل به سبز است، به دلیل وجود کلریت است. بافت سنگ بستر ساختگاه، پورفیریتیک، میکرولیتی و اینترسال است [۴۸].

۴ - ۵ - ۳ - زمین‌ساخت ساختگاه سد

توده سنگ آندزیتیک بازالت که ساختگاه اصلی محل سد را تشکیل می‌دهد، به وسیله‌ی شبکه‌ای از درزه، شکاف‌ها و گسله‌های فرعی و کوچک قطع شده است. برای تجزیه و تحلیل آماری و به‌منظور بررسی آن‌ها برای ارزیابی پایداری اقدام به اندازه‌گیری و برداشت سطحی در راستاهای مختلف و بررسی آن‌ها در هر تکیه‌گاه شده است. دسته درزه‌های غالب در هر جناح مشخص، کنتور دیاگرام و تصویر ایزومتریک گسستگی‌ها در هر جناح تهیه شده است.

۴ - ۵ - ۳ - ۱ - تکیه‌گاه چپ

با توجه به پوشش گیاهی و واریزه‌های دامنه‌ای و رخنمون بسیار کم سنگ بستر، مشاهده‌ی زون‌های برشی و گسل در این تکیه‌گاه امکان‌پذیر نیست. بر اساس درزه‌نگاری انجام شده در تکیه‌گاه چپ و گالری حفر شده در این تکیه‌گاه، چهار دسته درزه اصلی شناسایی شده که ویژگی‌های هر کدام از آنها در جدول (۲-۴) نشان داده شده است.

جدول ۴ - ۲ - مشخصات دسته‌درزها در تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد نرماب [۴۸].

ردیف	نوع ناپیوستگی	شیب / جهت شیب (درجه)	فاصله‌داری دسته‌درزها (متر)	توصیف	سایر مشخصات
۱	دسته‌درزه J_1	۵۷/۸۷	۰/۵ تا ۱/۵	فاصله‌داری درزها کم	بازشدگی درزها عمدتاً بسیار کم تا کم، زبر، صاف، صفحه‌ای برخی دارای پرشدگی، رس، کلسیت، اکسید آهن، به‌ندرت کوارتز و زئولیت، آثار خش‌لغزه نیز مشاهده شده است.
۲	دسته‌درزه J_2	۱۸۴/۳۱	۲/۵ تا ۱	فاصله‌داری درزها متوسط	عمدتاً بازشدگی بسیار کم (۰/۲۵ - ۰/۱ میلی‌متر)، زبر، صفحه‌ای، برخی دارای پرشدگی کلسیت، رس و اکسید آهن.
۳	دسته‌درزه J_3	۱۸/۸۳	۴ تا ۲	فاصله‌داری درزها زیاد	بازشدگی بسیار کم، صفحه‌ای، صاف، زبر، رس، کلسیت، آثار اکسید آهن و منگنز در سطح درزها، آثار خش‌لغزه نیز مشاهده شده است.
۴	دسته‌درزه J_4	۸۷/۸۳	۵ تا ۲/۵	فاصله‌داری درزها بسیار زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، پرشدگی رس، کلسیت، اکسید آهن و منگنز بسیار کم.

۴ - ۵ - ۳ - ۲ - تکیه‌گاه راست

بر اساس درزننگاری انجام شده در تکیه‌گاه راست، پنج دسته‌درزه شناسایی شده که ویژگی‌های هر کدام در جدول (۴-۳) به شرح زیر آمده است.

جدول ۴ - ۳ - مشخصات دسته‌درزها در تکیه‌گاه راست ساختگاه سد نرماب [۴۸].

ردیف	نوع درزه	شیب/جهت شیب (درجه)	فاصله‌داری دسته‌درزها (متر)	توصیف	سایر مشخصات
۱	دسته‌درزه J_1	۱۸۴/۲۵	۰/۵ تا ۲	فاصله‌داری درزها متوسط	عمدتاً بازشدگی بسیار کم تا کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، برخی دارای پرشدگی رس، ندرتا کلسیت و کوارتز و زئولیت.
۲	دسته‌درزه J_2	۶۷/۸۶	۱/۵ تا ۳	فاصله‌داری درزها متوسط تا زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، پرشدگی به‌وسیله رس، اکسید آهن، کلسیت، آثار خش‌لغزه.
۳	دسته‌درزه J_3	۲۳/۶۴	۴ تا ۳	فاصله‌داری درزها زیاد	عمدتاً بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، رس، کلسیت، ندرتا کوارتز.
۴	دسته‌درزه J_4	۱۲۲/۶۸	۵ تا ۳/۵	فاصله‌داری درزها بسیار زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، پرشدگی رس، کلسیت، ندرتا کوارتز و زئولیت
۵	دسته‌درزه J_5	۲۲۵/۶۸	۶ تا ۴	فاصله‌داری درزها زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، رس و کلسیت.

۴ - ۶ - خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ پی

هدف از مطالعات ژئوتکنیکی، شناخت زمین‌شناسی زیر سطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی برای طراحی سد و سازه‌های وابسته است، به‌طوری‌که بتوان ارزیابی صحیحی از مشخصه‌های ژئوتکنیکی سنگ بستر در ساختگاه سد به‌دست آورد. بدین منظور یک سری بررسی‌های ژئوتکنیکی شامل حفاری‌های اکتشافی، آزمایش‌های صحرایی درون‌چاهی هم‌چنین آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی انجام شده است. علاوه بر انجام عملیات زیرسطحی به‌منظور کسب اطلاعات زمین‌شناسی، نقشه‌ی زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰ از ساختگاه سد تهیه شده و برداشت گسستگی‌ها نیز در چندین محل هم‌چنین در گالری‌های اکتشافی حفر شده در ساختگاه سد انجام شده است.

۴ - ۶ - ۱ - نفوذپذیری در بستر رودخانه و تکیه‌گاه‌ها

در مواد پوششی ساختگاه سد، ۱۰۵ آزمایش نفوذپذیری به روش لوفران با بار ثابت و افتان در مطالعات مرحله‌ی اول و تعداد ۲۶۲ آزمایش لوفران در مطالعات مرحله‌ی دوم جهت تعیین نفوذپذیری رسوبات آبرفتی انجام گردیده است. بر اساس این نتایج میانگین نفوذپذیری نهشته‌های آبرفتی $10^{-2} \times 11/1$ سانتی‌متر بر ثانیه است که بیانگر نفوذپذیری زیاد این رسوبات می‌باشد. شایان ذکر است که آبرفت‌های بستر رودخانه را عمدتاً دو لایه‌ی متناوب ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل داده‌اند. نفوذپذیری در لایه‌های ریزدانه عمدتاً بین 10^{-5} تا 10^{-8} سانتی‌متر بر ثانیه متغیر است (بیانگر نفوذپذیری بسیار کم) و در لایه‌های درشت‌دانه بین 10^{-1} تا 10^{-4} متغیر است که بیانگر نفوذپذیری زیاد آبرفت‌های مذکور است. در کلیه‌ی گمانه‌های بستر رودخانه، در برخورد با لایه‌های درشت‌دانه‌ی تحتانی، گمانه‌ها آرتزین شده‌اند که انجام آزمایش نفوذپذیری در قطعات آرتزین مقدور نبوده ولی با توجه به آرتزین شدن گمانه، این امر نشان دهنده‌ی ارتباط بالا دست با پایین دست بوده که می‌تواند پس از آگیری مخزن لایه‌های آرتزین آب مخزن را به پایین دست هدایت نماید. در جدول ۴-۴ تغییرات و میانگین نفوذپذیری در آبرفت‌های ساختگاه سد آورده شده است [۴۸].

جدول ۴-۴ - تغییرات و میانگین نفوذپذیری به روش لوفران در آبرفت‌های محدوده ساختگاه سد [۴۸].

ردیف	تعداد	نفوذپذیری لوفران (cm/sec)	موقعیت
------	-------	------------------------------	--------

آزمایش	حداقل	حداکثر	میانگین	گمانه	ملاحظات
NA ₁	۵	$۴/۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۸/۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۱ \times ۱۰^{-۳}$	تکیه گاه راست
NA _۲	۱۱	۱×۱۰^{-۷}	$۱/۷ \times ۱۰^{-۳}$	۲×۱۰^{-۴}	بستر رودخانه
NA _۳	۱۰	۱×۱۰^{-۷}	۳×۱۰^{-۳}	$۶/۴ \times ۱۰^{-۴}$	بستر رودخانه
NA _۴	۱۱	۱×۱۰^{-۷}	۱×۱۰^{-۱}	$۲/۷ \times ۱۰^{-۲}$	بستر رودخانه
NA _۵	۳	$۲/۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۶/۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۱ \times ۱۰^{-۴}$	تکیه گاه چپ
NA _۶	۱۲	۱×۱۰^{-۷}	$۲/۴ \times ۱۰^{-۳}$	۲×۱۰^{-۴}	بستر رودخانه
NA _۷	۱۱	۱×۱۰^{-۷}	۱×۱۰^{-۱}	$۹/۹ \times ۱۰^{-۳}$	بستر رودخانه
NA _۸	۵	۱×۱۰^{-۸}	۱×۱۰^{-۲}	۲×۱۰^{-۳}	پادگانه آبرفتی ساحل چپ بالا دست محور
NA _۹	۷	۱×۱۰^{-۸}	$۱/۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۵ \times ۱۰^{-۴}$	پادگانه آبرفتی ساحل چپ پائین دست محور
NA _{۱۰}	۸	۱×۱۰^{-۷}	$۷/۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۲ \times ۱۰^{-۳}$	بستر رودخانه
NA _{۱۱}	۱۰	۱×۱۰^{-۷}	۱×۱۰^{-۱}	$۲/۱ \times ۱۰^{-۲}$	بستر رودخانه
NA _{۱۲}	۴	۱×۱۰^{-۸}	۲×۱۰^{-۵}	۵×۱۰^{-۶}	تکیه گاه راست بالا دست محور ساحل راست
NA _{۱۳}	۲	Impervious	Impervious	Impervious	پادگانه آبرفتی ساحل چپ پایین دست محور
NA _{۱۴}	۳	Impervious	۱×۱۰^{-۱}	$۶/۵ \times ۱۰^{-۴}$	تکیه گاه چپ بالا دست محور
NA _{۱۵}	۲۶	Impervious	$۲/۴ \times ۱۰^{-۲}$	$۲/۶ \times ۱۰^{-۱}$	بستر رودخانه

NA _{۱۱}	۲۳	Impervious	۲/۹×۱۰ ^{-۴}	۳/۱×۱۰ ^{-۳}	بستر رودخانه	
NA _{۱۲}	۳	۳/۸×۱۰ ^{-۵}	۲/۹×۱۰ ^{-۲}	۱/۱۶×۱۰ ^{-۴}	تکیه گاه راست	
NA _{۱۳}	۱۸	Impervious	۸×۱۰ ^{-۲}	۸/۴×۱۰ ^{-۳}	بستر رودخانه	حاشیه تکیه گاه راست
NA _{۱۴}	۱۱	Impervious	۱/۲×۱۰ ^{-۴}	۳×۱۰ ^{-۵}	بستر رودخانه	قسمت مرکزی
NA _{۱۵}	۲۱	Impervious	۱/۳×۱۰ ^{-۳}	۵/۹۵×۱۰ ^{-۴}	بستر رودخانه	قسمت مرکزی
NA _{۱۶}	۱۴	۹/۹×۱۰ ^{-۷}	۱/۶×۱۰ ^{-۳}	۲/۹×۱۰ ^{-۴}	بستر رودخانه	حاشیه تکیه گاه راست
NA _{۱۷}	۱۲	Impervious	۱×۱۰ ^{-۵}	۳/۳×۱۰ ^{-۶}	بستر رودخانه	قسمت مرکزی
NA _{۱۸}	۲۱	Impervious	۱×۱۰ ^{-۱}	۶/۴۶×۱۰ ^{-۳}	بستر رودخانه	قسمت مرکزی
NA _{۱۹}	۵	Impervious	۳/۱×۱۰ ^{-۴}	۶/۸×۱۰ ^{-۵}	بستر رودخانه	
NA _{۲۰}	۸	Impervious	۱/۷×۱۰ ^{-۳}	۲/۱۴×۱۰ ^{-۴}	تکیه گاه چپ	
NA _{۲۱}	۱۲	Impervious	۱/۴×۱۰ ^{-۴}	۶/۷×۱۰ ^{-۵}	تکیه گاه چپ	
NA _{۲۲}	۱۲	۹/۵×۱۰ ^{-۷}	۱/۲×۱۰ ^{-۴}	۲/۷۹×۱۰ ^{-۵}	تکیه گاه چپ	
NA _{۲۳}	۱۶	Impervious	۲×۱۰ ^{-۴}	۱/۳۵×۱۰ ^{-۴}	بستر رودخانه	
NA _{۲۴}	۷	۲/۷×۱۰ ^{-۷}	۱/۲×۱۰ ^{-۵}	۵/۶۸×۱۰ ^{-۶}	تکیه گاه راست	
NA _{۲۵}	۱۵	Impervious	۱×۱۰ ^{-۷}	۶/۸×۱۰ ^{-۳}	تکیه گاه راست	
NA _{۲۶}	۲۳	۷/۲×۱۰ ^{-۷}	۱/۵×۱۰ ^{-۳}	۳/۶×۱۰ ^{-۴}	بستر رودخانه	قسمت مرکزی
NA _{۲۷}	۱۳	Impervious	۱/۱×۱۰ ^{-۲}	۲/۵۷×۱۰ ^{-۳}	بستر رودخانه	حاشیه تکیه گاه چپ

۴ - ۶ - ۲ - نفوذپذیری سنگ بستر

با توجه به شرایط لیتولوژیکی و نفوذپذیری سنگ بستر و با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری انجام یافته به روش لوژان که در گمانه‌های اکتشافی صورت پذیرفته، عامل اصلی نفوذپذیری در تکیه‌گاه‌ها و پی محل سد عمدتاً وجود درزه‌ها، زون‌های خرد شده و موضعی توده‌سنگ است. شبکه‌ی دسته‌درزه‌ها، سیستم زهکشی آب‌های نفوذی در داخل توده‌سنگ را به عهده داشته و با بررسی‌های انجام شده و مطالعه‌ی آماری درزه‌ها، میزان بازشدگی درزه‌ها با استفاده از نتایج آزمایش لوژان در سنگ بستر بررسی شده که این میزان به‌طور متوسط در حدود $0/01$ میلی‌متر برای لوژان‌های بین ۱ تا ۵ و برای بیش از ۵ لوژان کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر برآورد شده است که خود این امر در کاهش نفوذپذیری با افزایش عمق در سنگ بستر پی نقش عمده‌ای داشته است.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که میزان نفوذپذیری در عین تبعیت از تراکم شکستگی‌ها و پدیده‌ی فرسایش عمدتاً تحت تاثیر لیتولوژی و خصوصیات توده سنگ است. باز شدن درزه‌ها و شسته شدن مواد ثانویه هوازده (سنگ‌های هوازده) تحت اعمال فشار آب در آزمایش لوژان، شرایط لازم را برای افزایش میزان نفوذپذیری در دسته‌درزه‌های توده‌سنگ ایجاد می‌کند. در قسمت‌هایی از توده‌سنگ که درجه‌ی خردشدگی، شکسته شدن و یا بازشدگی درزه‌های بزرگ که بازشدگی ۱ میلی‌متر در عمق و در سطح بازشدگی قابل توجه دارند، باعث به وجود آمدن جریان‌های آشفته، باز و بسته شدن درزه‌ها و شستشوی مواد پرکننده‌ی درزه‌ها می‌شوند. مجموعه شرایط فوق علاوه بر افزایش میزان نفوذپذیری در توده‌سنگ در ناپایداری‌های تکیه‌گاه‌ها و پی نیز موثر خواهد بود. اطلاعات به‌دست آمده از گمانه‌های اکتشافی حفر شده در ساختگاه، نشان می‌دهد که نفوذپذیری در تکیه‌گاه راست در عمق پایین‌تر از ۳۵ متری کاهش یافته و میزان آن تا حد غیر قابل نفوذ نیز می‌رسد. در بستر رودخانه حداکثر تا عمق $64/5$ متر آبرفت‌های بستر رودخانه وجود دارند، در برخورد به سنگ بستر، با افزایش عمق و کیفیت ویژه‌ی توده‌سنگ از عمق ۵۰ تا ۶۵ متر نفوذپذیری کاهش یافته و میزان آن نیز تا حد غیر قابل نفوذ می‌رسد. نفوذپذیری در تکیه‌گاه چپ در اعماق بیش از ۳۵ تا ۴۰ متر کاهش یافته و در این تکیه‌گاه نیز میزان نفوذپذیری به حد غیر قابل نفوذ می‌رسد.

۴ - ۶ - ۳ - کیفیت سنگ بستر

توصیف کیفی سنگ بستر بر اساس نتایج حفاری‌های اکتشافی در ارتباط با سیستم درز و شکاف‌ها با

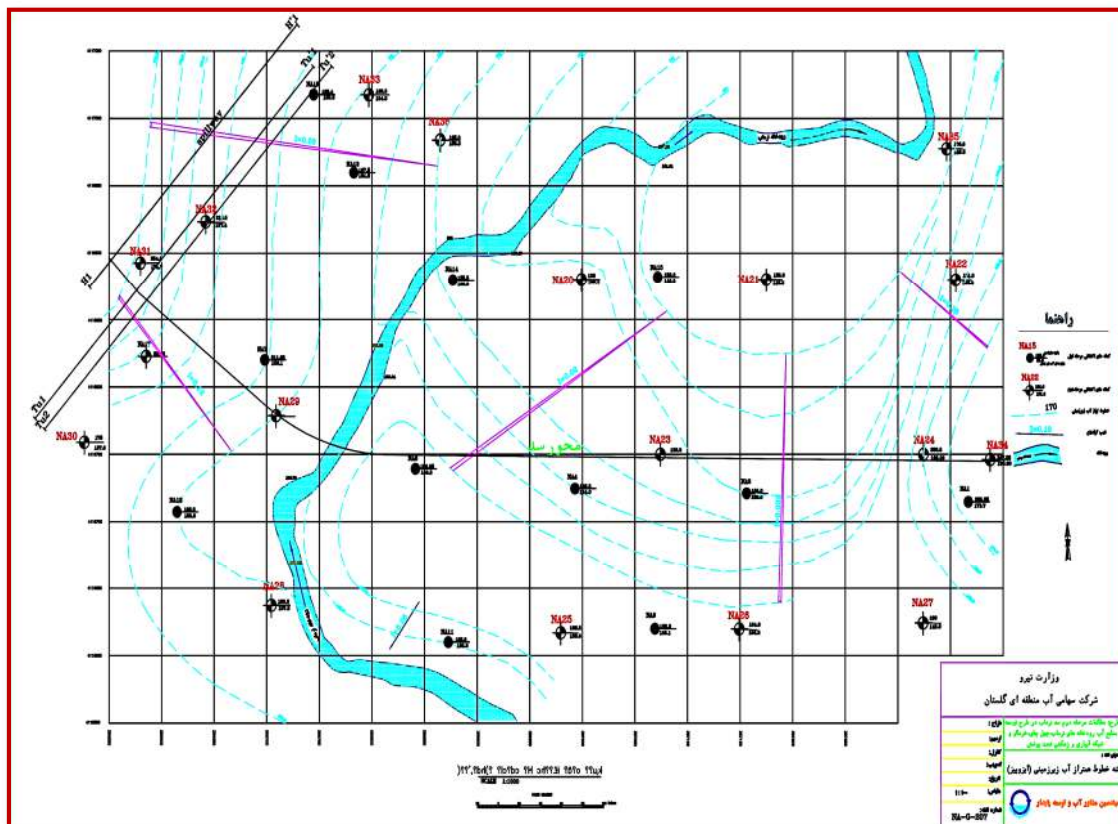
کاربرد شاخص کیفی سنگ (RQD) صورت گرفته است. در این بررسی‌ها درز و شکاف طبیعی توده‌سنگ مورد توجه بوده و شکستگی‌هایی که در حین حفاری ایجاد شده است، در نظر گرفته نشده است. شرایط کیفی توده‌ی سنگ از دیدگاه درجه سلامت، هوازدهی و کیفیت ویژه‌ی آن با توجه به گمانه‌های حفر شده و موقعیت آن‌ها متفاوت بوده ولی به طور کلی توده‌سنگ ساختگاه به جز قسمت‌هایی که تحت تاثیر شرایط تکتونیکی منطقه و یا عوامل فرسایشی شدیداً خرد و هوازده هستند، در سایر بخش‌ها از شرایط بسیار خوبی برخوردار بوده و مجموعه‌ی توده‌سنگ یکپارچه و یکدست دارای مقاومت خوبی است. با توجه به آرامش نسبی تکتونیکی منطقه‌ی مورد مطالعه، گسترش سیستم درز و ترک محدود به چهار دسته‌درزه‌ی اصلی بوده و لذا خردشدگی و شکستگی توده‌سنگ پی عمدتاً از چهار دسته‌درزه مذکور تبعیت می‌نماید. علی‌رغم حضور چهار دسته درزه و گسترش قابل توجه آن‌ها در محدوده‌ی ساختگاه، سنگ بکر از ضرایب مقاومتی بسیار خوبی برخوردار است [۴۸].

۴ - ۶ - ۴ - هیدرولوژی ساختگاه سد

در محدوده‌ی ساختگاه سد، محدوده‌ی اصلی برای تجمع آب‌های زیرزمینی عمدتاً رسوبات آبرفتی رودخانه است. رسوبات آبرفتی خاک عمدتاً به رده‌ی GC, GM, GP, GW, SP تعلق دارند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، نفوذپذیری متوسط توده‌ی آبرفتی $10^{-2} \times 1/1$ سانتیمتر بر ثانیه برآورد شده است. در عمق حدوداً ۳۰ متری و پایین‌تر از آن گمانه‌ها به لایه‌های درشت‌دانه برخورد کرده‌اند. در این لایه آب زیرزمینی تحت فشار وجود داشته که به هنگام برخورد گمانه به لایه مزبور، آب زیرزمینی آرتزین شده و امکان انجام آزمایش‌های نفوذپذیری لوفران در آبرفت‌های پایین‌تر از عمق ۳۴ متری وجود نداشته است. در آبرفت‌های بستر رودخانه نیز لایه‌های ریزدانه و با نفوذپذیری کم وجود دارند. لایه‌های مذکور می‌توانند در آب‌بندی آبرفت‌های بستر رودخانه کمک شایانی کنند. در توده‌سنگ بستر سد، نفوذپذیری اولیه کم است. نفوذپذیری سنگ‌ها غالباً در ارتباط با فرآیندهای ثانویه و به طور مشخص توسعه درز و ترک‌ها افزایش می‌یابد. نفوذپذیری در سنگ‌های آندزیت - بازالت هوازده، نسبتاً زیاد ولی در سنگ‌های سالم، بسیار کم است. رفتارنگاری سطوح آب زیرزمینی که بر اساس اندازه‌گیری سطح ایستایی در گمانه‌های اکتشافی صورت گرفته (شکل ۴-۷) موید این نکته است که سطح ایستایی در تکیه‌گاه راست بالاتر از رقوم سطح رودخانه بوده و نشان دهنده‌ی شیب هیدرولیکی سفره آب زیرزمینی به سمت رودخانه است. گرادیان هیدرولیکی در تکیه‌گاه راست به طور متوسط $0/19$ تا $0/22$ درصد و در تکیه‌گاه چپ به طور متوسط $0/12$

درصد و در بستر رودخانه حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ درصد است [۴۶].



شکل ۴-۷ - نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی [۴۶].

۴-۶-۵- مشخصه‌های ژئوتکنیکی پی سد

برنامه‌های شناسایی ژئوتکنیکی پی سد مخزنی نرماب در دو مرحله‌ی مطالعاتی با هدف روشن ساختن وضعیت ژئوتکنیکی پی در محور منتخب و به‌دست آوردن مشخصه‌های اساسی ژئومکانیکی مصالح متشکله‌ی آن به منظور طراحی بدنه‌ی سد تنظیم شده است. در جناح راست سد، رسوبات بادآورده و خواص آن‌ها از طریق حفاری چاهک‌های دستی و تهیه‌ی نمونه‌های بلوکی دست‌نخورده مورد بررسی قرار گرفته است. با پیشرفت عملیات حفاری و هماهنگی با آن، ابتدا بر روی نمونه‌های به‌دست آمده آزمایش‌های نشانه برای تعیین وضعیت عمومی پی انجام شد. سپس براساس اطلاعات حاصل از این آزمایش‌ها، مشخصه‌های ژئومکانیکی مصالح از طریق انجام آزمایش‌های مهندسی تعیین شد. در جدول (۴-۵) مشخصات ژئوتکنیکی حاصل از این آزمایش‌ها آمده است.

جدول ۴ - ۵ - مشخصات ژئوتکنیکی مصالح بستر سد نرماب [۴۶].

پارامترها	γ_x	γ_y	K_x	K_y	E	v	C	ϕ
واحد	(KN/m^3)	(KN/m^3)	(cm/s)	(cm/s)	(Kpa)	-	(Kpa)	(°)
پی خاکی	۲۰/۸	۲۰/۸	$۱۰^{-۳}$	$۱۰^{-۳}$	۲۳×۱۰^۳	۰/۳	۲۰	۲۷
پی سنگی هوا زده	۲۶/۷	۲۶/۷	$۱۰^{-۳}$	$۱۰^{-۳}$	۸۹۵×۱۰^۳	۰/۳۵	۲۵۰	۴۲
پی سنگی سالم	۲۶/۷	۲۶/۷	۳×۱۰^{-۵}	۳×۱۰^{-۵}	۵۰۳×۱۰^۴	۰/۳	۶۰۰	۴۰
دیوار آب بند	۲۳/۷۵	۲۳/۷۵	$۱۰^{-۶}$	$۱۰^{-۶}$	۶۵۲۲۶۳	۰/۴۵	۱۳	۳۰

۴ - ۶ - ۶ - معرفی مشخصات سد خاکی مورد مطالعه

سد نرماب، از جمله سدهای خاکی همگن بوده که بر روی بستر آبرفتی عمیق (با عمق متوسط در حدود ۶۰ متر) در حال احداث است. بدنه و پوسته‌ی سد مذکور، با مصالح خاکی به ترتیب ریزدانه و درشت‌دانه، تا ارتفاع حدود ۶۰ متر و بر روی بستری متشکل از لایه‌های خاکی (درشت‌دانه و ریزدانه) و سنگی (هوازده و سالم)، در حال احداث است. همچنین، در هر دوی دامنه‌های بالادست و پایین‌دست این سد، از لایه‌های محافظ (ریپ‌رپ) استفاده شده که این لایه‌ها تا تاج سد ادامه خواهند داشت. از لایه‌های زهکش نیز به طور افقی در دو طرف بدنه این سد استفاده شده که از این لایه به طور مایل و به همراه لایه‌های فیلتر در مجاورت هسته رسی و در سمت پایین‌دست بدنه نیز به کار گرفته شده است.

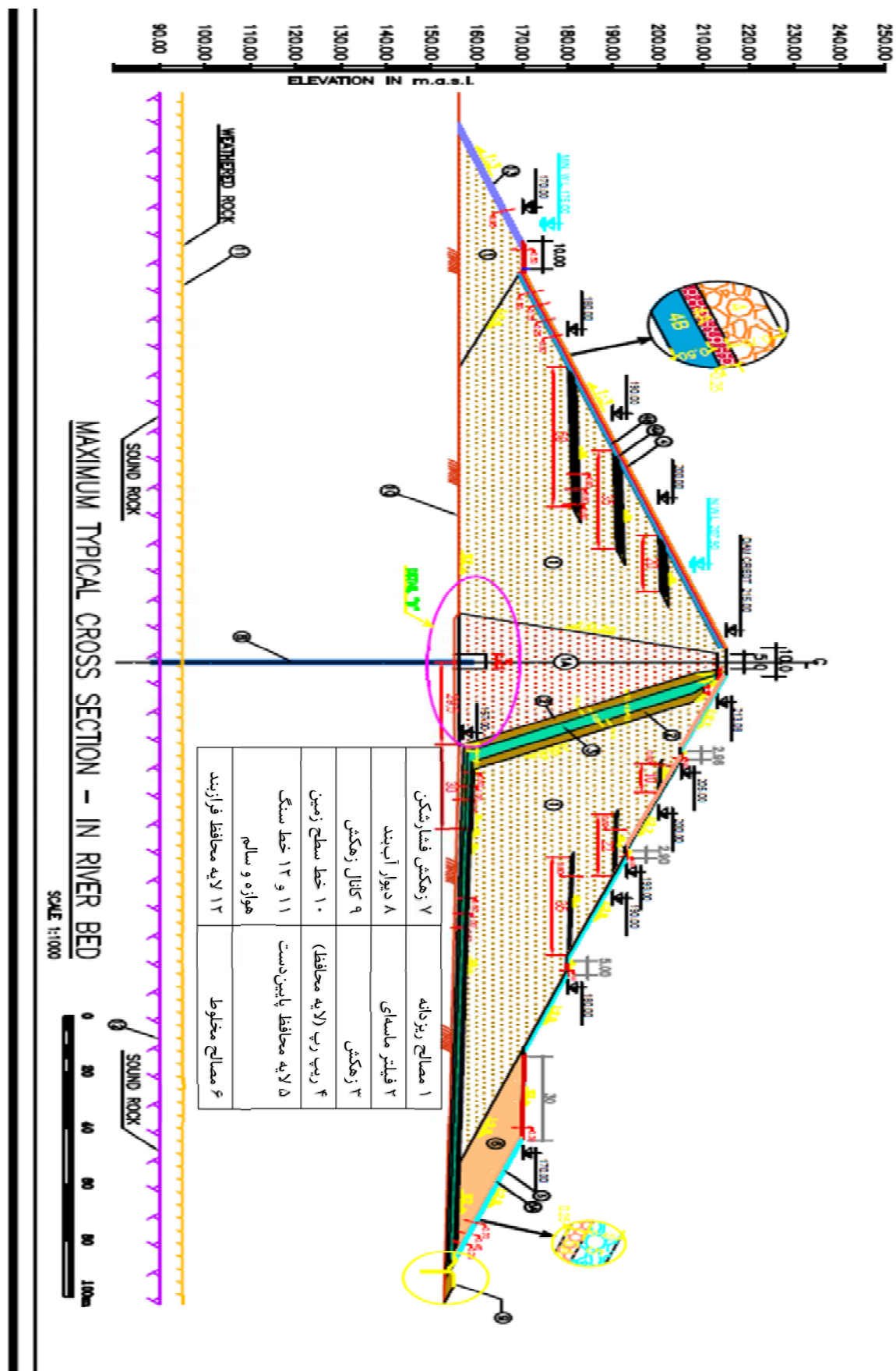
با توجه به توضیحات مذکور می‌توان اجزای خاگریز را به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- بدنه‌ی رسی
- لایه‌های زهکش
- لایه‌های فیلتر
- لایه‌های محافظ

که مجموعه‌ی این اجزا همان‌طور که در شکل ۴-۸ نشان داده شده، بر روی بستری متشکل از لایه‌های خاکی، لایه‌های سنگی هوازده، لایه‌های سنگی سالم در حال احداث است. همچنین، مشخصات مصالح خاکریز سد مذکور مطابق با جدول ۴-۶ ارائه شده است [۴۶].

جدول ۴-۶ - مشخصات ژئوتکنیکی مصالح خاکریز سد [۴۶].

پارامترها	γ_x	γ_y	K_x	K_y	E	ν	C	ϕ
واحد	(KN/m^3)	(KN/m^3)	(cm/s)	(cm/s)	(Kpa)	-	(Kpa)	(°)
بدنه	۲۰/۶	۲۰/۶	10^{-7}	10^{-7}	۱۸۵۰۰	۰/۳	۷۰	۲/۷
زهکش و فیلتر	۲۰	۲۰	10^{-1}	10^{-1}	۳۰۰۰۰	۰/۲۵	۰	۳۸



شکل ۴-۸ - نیمرخ عرضی سد خاکی نرماب همراه با جزییات خاکریز و بستر [۴۶].

فصل پنجم

تحلیل عددی نشست بدنه سد نرمام

۵ - ۱ - مقدمه

یکی از روش‌های مدل‌سازی سازه‌های خاکی و سنگی و تحلیل تغییرشکل و پایداری آن‌ها، روش عددی است. نرم‌افزار PLAXIS 2D، یک نرم‌افزار عددی اجزای محدود بوده که توانایی مدل‌سازی و تحلیل دو بعدی سدهای خاکی (هم در شرایط احداث و هم در شرایط آب‌گیری) را دارا است. در این فصل، ابتدا روش‌های عددی به‌خصوص روش عددی اجزای محدود و نرم‌افزار PLAXIS 2D، معرفی می‌شود. در ادامه، نحوه شبیه‌سازی‌های عددی سد خاکی نرماب در طی احداث و نیز مقایسه نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده از محل (برای اعتبارسنجی مدل‌سازی‌ها)، تشریح می‌شود.

۵ - ۲ - روش‌های عددی

از آنجا که سازه‌های خاکی و سنگی شکل منظم و ساده‌ای نداشته و نیز توده‌ی خاک و سنگ همسان، همگن و الاستیک نبوده، روش‌های ریاضی برای تعیین تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها، قابل کاربرد نیستند. بنابراین، در چند دهه‌ی اخیر، روش‌های عددی برای حل این مشکل، جانشین روش‌های ریاضی شده‌اند که در سال‌های اخیر به‌خصوص به واسطه‌ی پیشرفت تکنولوژی و علوم وابسته از قبیل کامپیوتر توسعه‌ی زیادی یافته‌اند.

روش‌های عددی، به‌طورگسترده‌ای در مدل‌سازی هندسی و رفتاری توده‌ی خاک و سنگ و نیز سازه‌های خاکی و سنگی به‌کار گرفته شده‌اند. در این روش، با در نظر گرفتن مدل رفتاری و شرایط پایداری برای محیط، به اعمال نیرو و تعیین جابه‌جایی در نقاط خاصی پرداخته می‌شود. موقعیت، تعداد و ارتباط این نقاط، توسط تقسیم‌بندی محیط به اجزای کوچکتر، مشخص می‌شود. هر جز، بیانگر ناحیه‌ای کوچک از محیط است. ارتباط اجزاء با یکدیگر، توسط گره‌های آن‌ها صورت می‌گیرد. یک تقسیم‌بندی اساسی برای روش‌های عددی بر مبنای نوع محیط بوده که این محیط‌ها به محیط‌های پیوسته و ناپیوسته تقسیم می‌شوند.

مهم‌ترین روش‌های عددی بر مبنای نوع محیط مورد کاربرد عبارتند از:

- اجزای محدود^۱ (FEM)

- المان مرزی^۱ (BEM)
- تفاضل محدود^۲ (FDM)
- المان مجزا^۳ (DEM)
- ترکیبی

۵ - ۲ - ۱- روش اجزای محدود

این روش، از سال ۱۹۵۶ ارایه شده و در اغلب کارهای مهندسی از جمله مدل سازی و تحلیل سازه های خاکی و سنگی به کار گرفته شده است. هر مساله مکانیکی که با یک معادله ی دیفرانسیل تعریف می شود را می توان با استفاده از این روش حل کرد. از دهه ۷۰ میلادی، روش اجزای محدود برای مدل سازی و تحلیل سازه های غیر خطی، مورد استفاده قرار گرفت. مدل سازی و تحلیل به روش اجزای محدود شامل شش مرحله بوده که به ترتیب عبارتند از:

مرحله ی اول: گسسته سازی و تقسیم عضو سازه ای یا توده مورد نظر به اجزای کوچک تر به نام المان
مرحله ی دوم: انتخاب توابع درونیابی جهت به دست آوردن جواب تقریبی مجهولات در المان ها
مرحله ی سوم: تشکیل ماتریس سختی و بردار نیروهای گره ای هر المان
مرحله ی چهارم: تشکیل ماتریس سختی و بردار نیروهای گره ای کل جهت تشکیل معادلات تعادل
مرحله ی پنجم: اعمال شرایط مرزی در مدل و حل معادلات تعادل جهت به دست آوردن بردار جابه جایی های گره ای کل
مرحله ی ششم: محاسبه کرنش و تنش در هر المان با استفاده از بردار جابه جایی های گره ای به دست آمده و مدل رفتاری در نظر گرفته شده.

۱ - Boundary Element Method

۲ - Finite Difference Method

۳ - Discreted Element Method

در مدل سازی های هندسی دو بعدی از قبیل کرنش صفحه ای، تنش صفحه ای و تقارن محوری، توده توسط المان های سطحی مثلثی، مستطیلی، چهارضلعی با اضلاع منحنی یا صاف، تقسیم بندی می شود. البته سازه را می توان توسط هر دوی المان های سطحی و خطی المان بندی کرد.

۵ - ۳ - معرفی نرم افزار PLAXIS 2D

PLAXIS 2D یک نرم افزار عددی اجزای محدود بوده که با مدل سازی هندسی دو بعدی کرنش صفحه ای یا تقارن محوری و با در نظر گرفتن پارامترهای مکانیکی و مدل های رفتاری مختلف برای مصالح، توانایی تحلیل استاتیکی و دینامیکی پایداری و تغییر شکل در مسائل مختلف ژئوتکنیکی را دارا است. در این نرم افزار، محیط پیوسته توسط المان های ۶ و ۱۵ گره ای، مش بندی می شود که جهت افزایش دقت محاسبات از المان های ۱۵ گره ای استفاده می شود. در این نرم افزار، می توان توده ی خاک و سنگ را ناهمگن و ناهمسان در نظر گرفت و اندرکنش بین خاک و سنگ با سازه را مدل کرد.

مراحل کار در این نرم افزار عبارتند از:

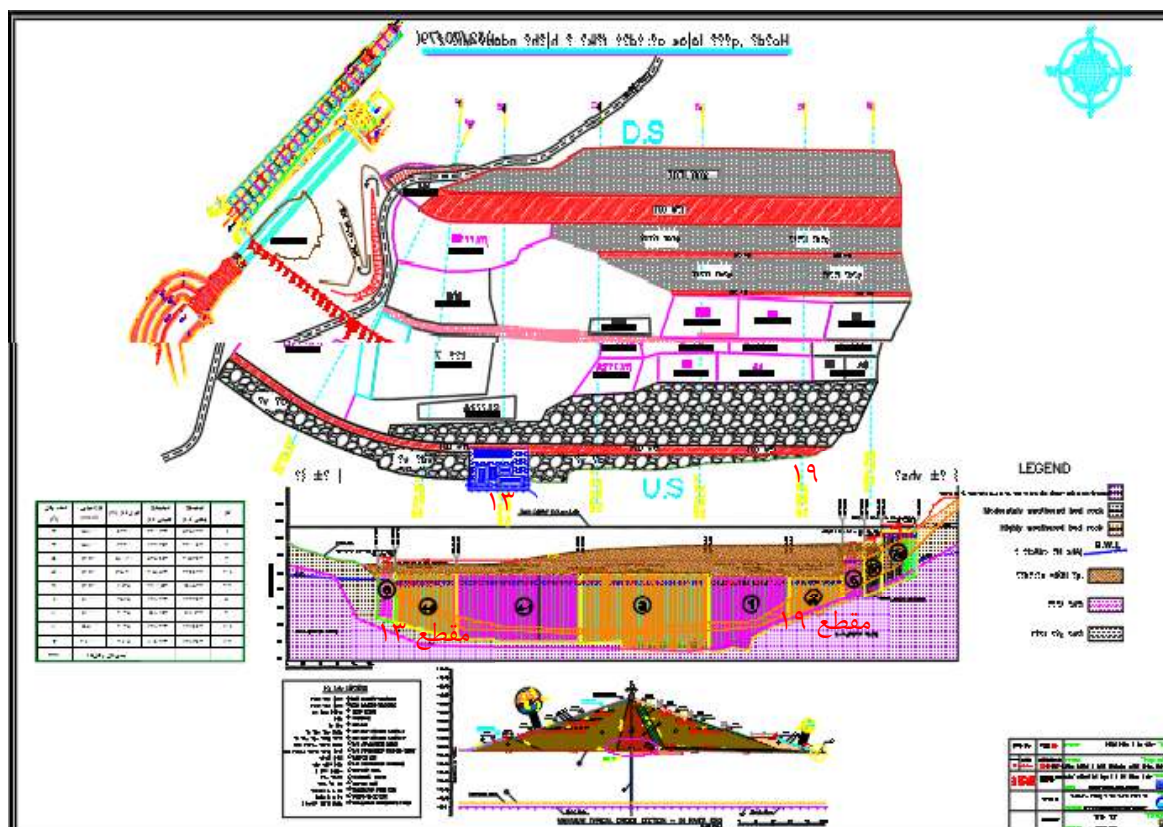
- مدل سازی که به ترتیب شامل مدل سازی هندسی، تعریف و اختصاص مدل رفتاری و مشخصات مصالح، مش بندی و اعمال شرایط اولیه به مسأله می باشد.
- محاسبات که شامل اعمال بارگذاری و مراحل اجرای عملیات است.
- بررسی خروجی ها از قبیل خروجی های اصلی در مدل سازی و تحلیل به روش اجزای محدود که تغییر مکان و تنش در نقاط گره ها است.

همان طور که یک پروژه ژئوتکنیکی به چند فاز تقسیم می شود، مرحله ی محاسبات در نرم افزار PLAXIS 2D، نیز به چند فاز تقسیم شده که در هر فاز باید نوع محاسبه تعیین شود. لازم به ذکر است که نیروهای سازه ای نیز در صورت وجود المان سازه ای در مساله، توسط این نرم افزار قابل محاسبه خواهد بود. مدل های رفتاری جهت تعریف رفتار مکانیکی المان ها در واکنش به نیروهای وارده و شرایط مرزی، به کار می روند. مدل های رفتاری از پیش تعریف شده متنوعی در نرم افزار PLAXIS 2D موجود است که از میان آن ها مدل های رفتاری موهر-کولمب، خاک سخت شونده و نرم شونده کاربرد وسیعی در شبیه سازی مسائل ژئوتکنیکی دارند. لازم به ذکر است

که مدل‌های رفتاری و مشخصات مصالح (مشخصات در ارتباط با مدل رفتاری انتخابی) به المان‌های مدل تخصیص می‌یابند.

۵ - ۴ - شبیه‌سازی عددی سد نرماب

در این فصل با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 2D و با مدل‌سازی و تحلیل دو بعدی نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳ و نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹ از سد خاکی در حال احداث نرماب، به ارزیابی میزان نشست خاکریز (نشست آبی و تحکیمی) در طی دوره احداث پرداخته شده و در نهایت این مقادیر با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق، تطابق داده شده‌اند. نیمرخ‌های عرضی مورد مطالعه در شکل ۵ - ۱، نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌ها برای سه مرحله احداث، آبیگری و بهره‌برداری انجام شده است. لازم به ذکر است، برای مدل‌سازی‌های عددی از مدل هندسی دو بعدی کرنش مسطح و از المان‌های ۱۵ گره‌ای برای مش‌بندی توده‌های سنگی و خاکی استفاده شده است.

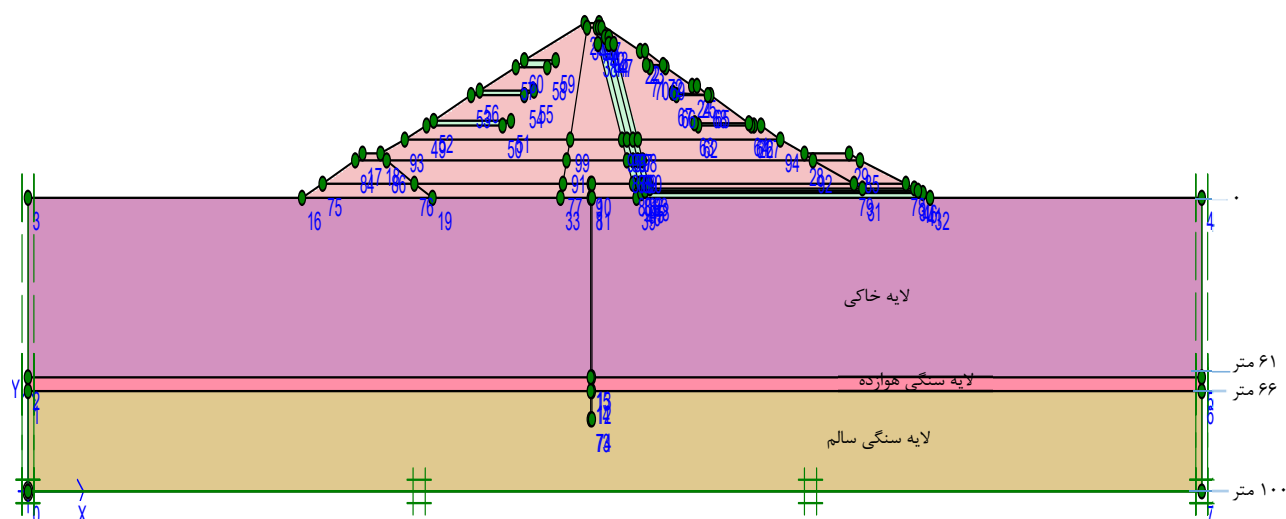


شکل ۵ - ۱ - نقشه کلی سد نرماب [۴۶].

۵ - ۴ - ۱- ساخت هندسه مدل

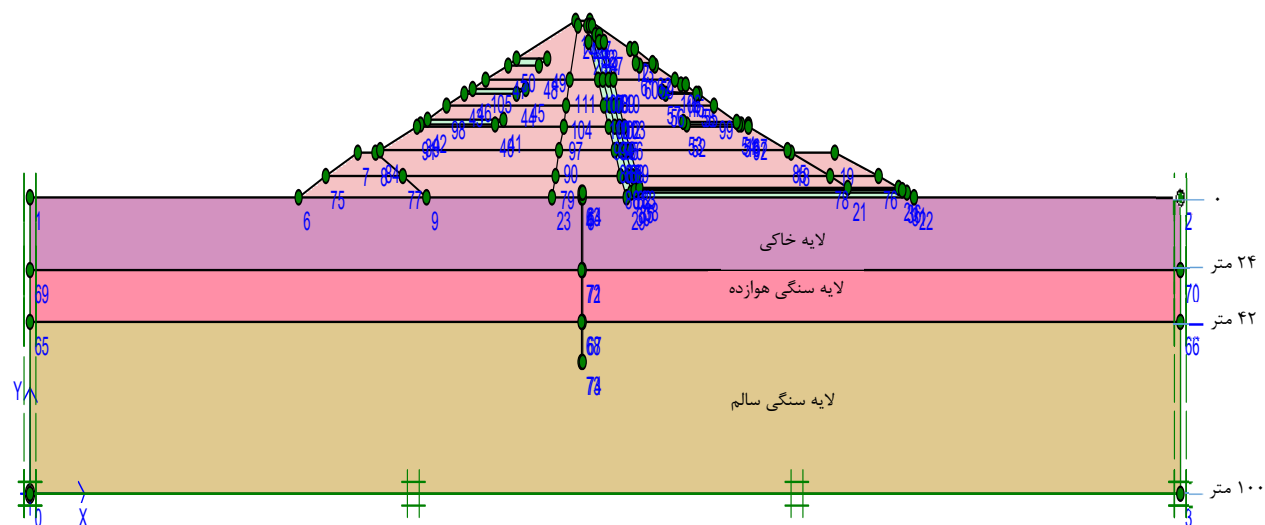
به منظور شبیه‌سازی هندسه مدل، به ترتیب ابعاد ۷۷۲ متر و ۱۶۰ متر در راستای محورهای x و y در نظر گرفته شده است. محور x ها در امتداد بدنه سد و محور y ها عمود بر امتداد سد است. در مقطع ۱۳-۱۳ در پی سد به ترتیب لایه‌ی خاکی از سطح بستر تا تراز ۶۱ متر و لایه‌ی سنگی هوازده از تراز ۶۱ تا ۶۶ متر و لایه سنگی سالم از تراز ۶۶ متر به پایین قرار گرفته است. در شکل ۵-۲، مدل هندسی بدنه و پی سد در مقطع ۱۳-۱۳، نشان داده شده است. در مقطع ۱۹-۱۹ در پی سد به ترتیب لایه خاکی از سطح بستر تا تراز ۲۴ متر و لایه سنگی هوازده از تراز ۲۴ تا ۴۲ متر و لایه سنگی سالم از تراز ۴۲ متر به پایین قرار گرفته‌اند که برای آن‌ها مدل رفتاری موهر-کولمب با مشخصاتی مطابق با جدول ۵-۱، استفاده شده است. در شکل ۵-۳ مدل هندسی بدنه و پی سد در مقطع ۱۹-۱۹، نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی مصالح خاکریز سد نیز از یک توده‌ی خاکی ریزدانه به عنوان بدنه‌ی رسی و تعدادی توده به عنوان لایه‌های زهکش، فیلتر و محافظ^۱ با مدل رفتاری موهر-کولمب و مشخصاتی که در جدول ۵-۱ درج شده، استفاده شده است. لازم به ذکر است که به منظور مدل‌سازی مصالح دیوار آب‌بند نیز، از یک توده‌ی خاکی ریزدانه با مدل رفتاری موهر-کولمب و مشخصاتی که در جدول ۵-۱ درج شده، استفاده شده است.



شکل ۵ - ۲ - مدل هندسی بدنه و پی سد در مقطع ۱۳ - ۱۳

۱- Rip Rap



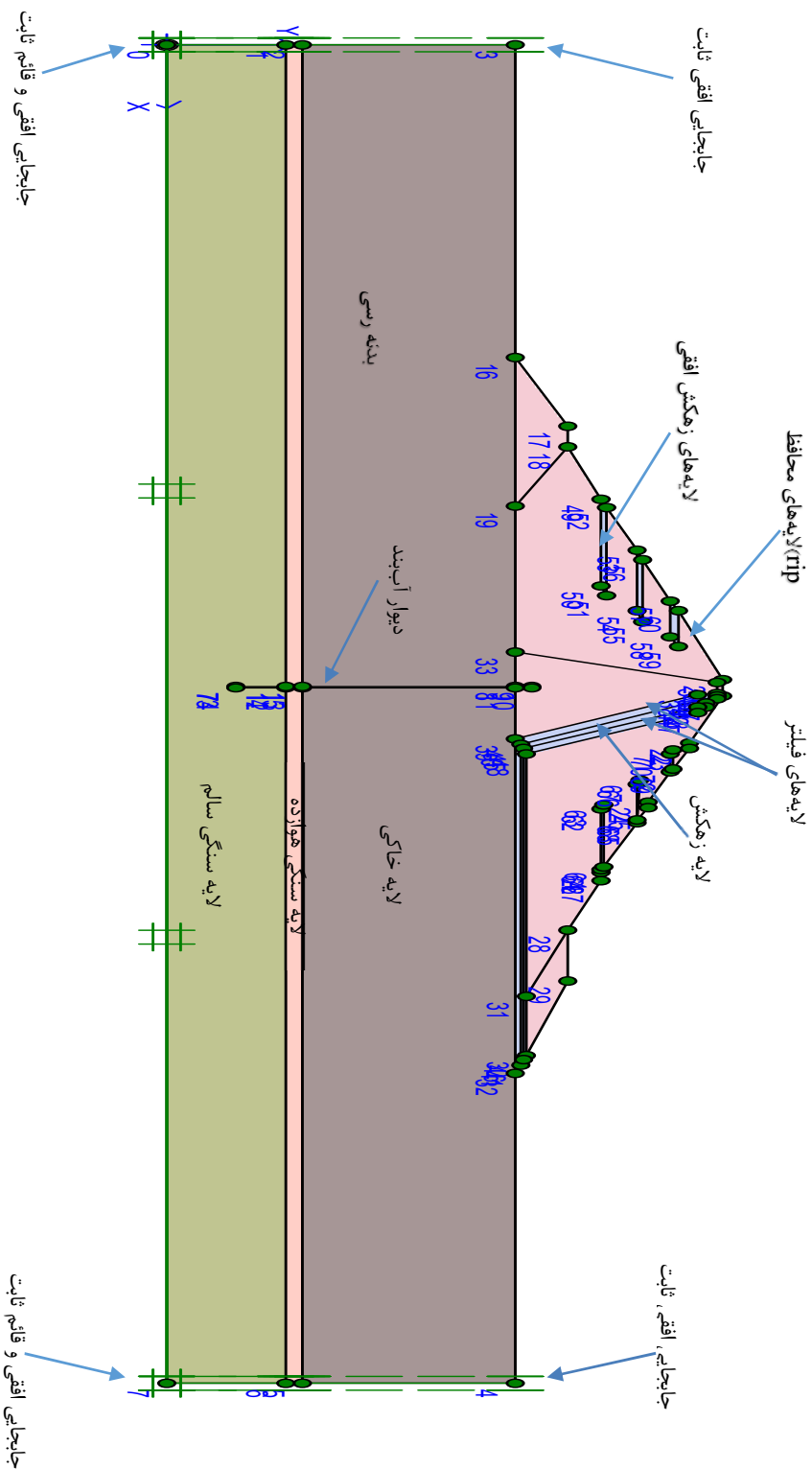
شکل ۵ - ۳ - مدل هندسی بدنه و پی سد در مقطع ۱۹ - ۱۹

جدول ۵ - ۱ - مشخصات مصالح خاگریز و پی سد [۴۶].

ϕ	C	v	E	K_y	K_x	γ_y	γ_x	پارامترها
(°)	(Kpa)	-	(Kpa)	(cm/s)	(cm/s)	(KN/m ³)	(KN/m ³)	واحد
۲/۷	۷۰	۰/۳	۱۸۵۰۰	۱۰ ^{-۷}	۱۰ ^{-۷}	۲۰/۶	۲۰/۶	بدنه
۳۸	۰	۰/۲۵	۳۰۰۰۰	۱۰ ^{-۱}	۱۰ ^{-۱}	۲۰	۲۰	زهکش و فیلتر
۲۷	۲۰	۰/۳	۲۳۰۰۰	۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۳}	۲۰/۸	۲۰/۸	پی خاکی
۴۲	۲۵۰	۰/۳۵	۸۹۵۰۰۰	۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۳}	۲۶/۷	۲۶/۷	پی سنگی هوا زده
۴۰	۶۰۰	۰/۳	۵۰۳۰۰۰۰	۳ × ۱۰ ^{-۵}	۳ × ۱۰ ^{-۵}	۲۶/۷	۲۶/۷	پی سنگی سالم
۳۰	۱۳	۰/۴۵	۶۵۲۲۶۳	۱۰ ^{-۶}	۱۰ ^{-۶}	۲۳/۷۵	۲۳/۷۵	دیوار آببند

۵ - ۴ - ۲ - اعمال شرایط مرزی

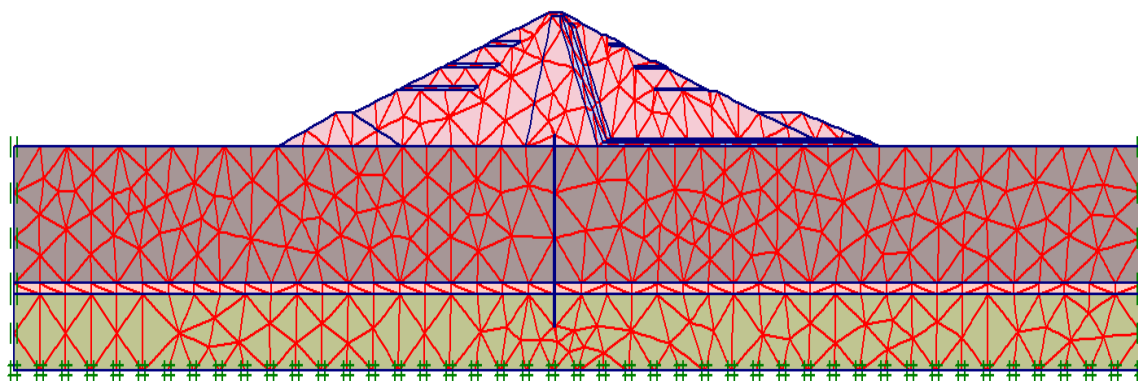
مطابق شکل ۵-۴، برای پایدار کردن مدل عددی، جابه‌جایی‌های افقی در مرزهای جانبی بستر سد و جابه‌جایی‌های افقی و قائم در مرز پایین بستر سد، ثابت شده‌اند. همچنین به منظور هدایت زه‌آب در بستر سد (طی تحکیم) از مرزهای تحکیمی بسته در مرزهای جانبی و مرز پایین بستر استفاده شده است.



شکل ۵-۴ - مدل هندسی بدنه و پی سد

۵ - ۴ - ۳ - مش بندی

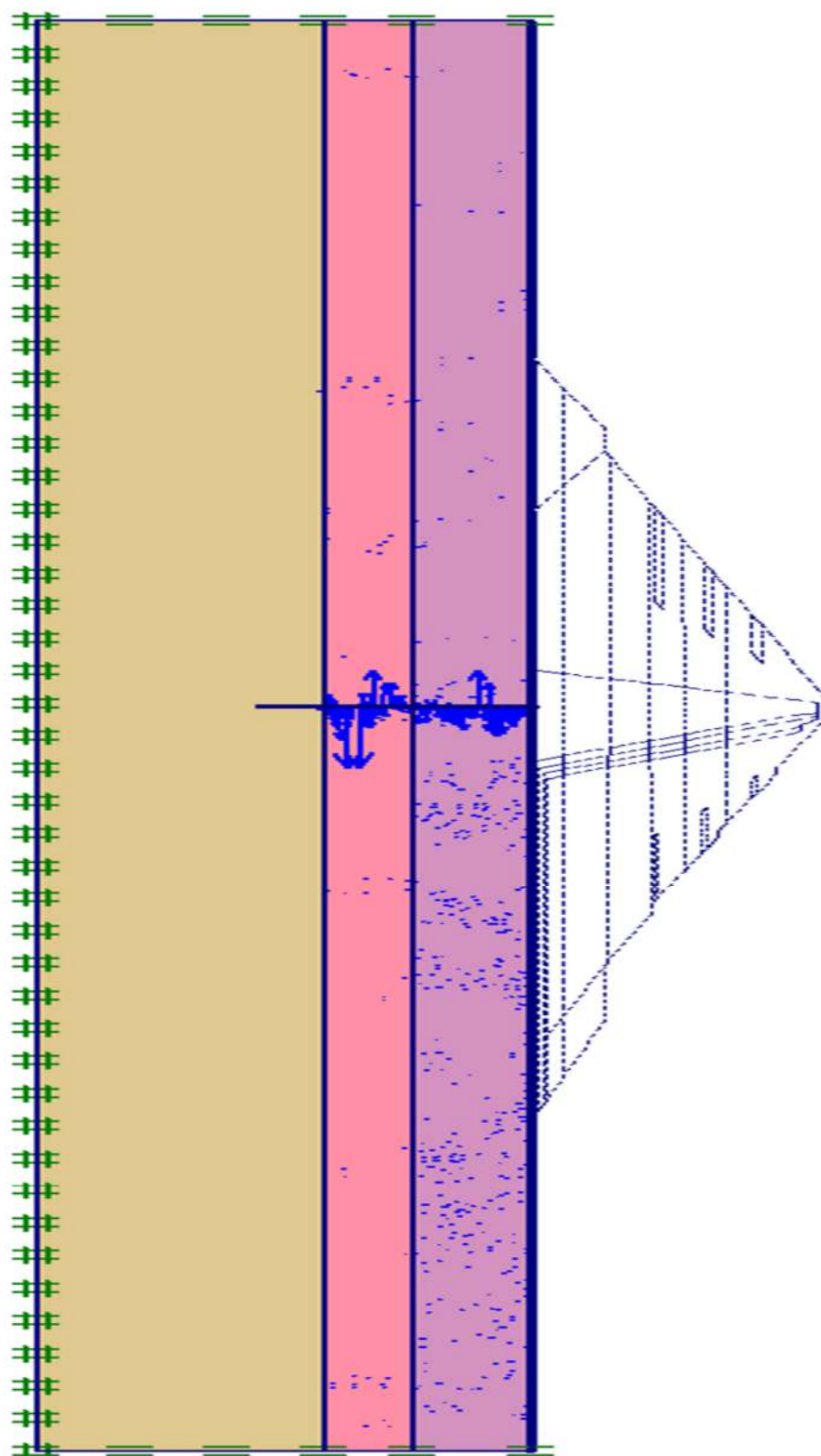
برای مش بندی مدل، از المان های ۱۵ گره ای بسیار ریز مطابق با شکل ۴-۵، استفاده شده است.



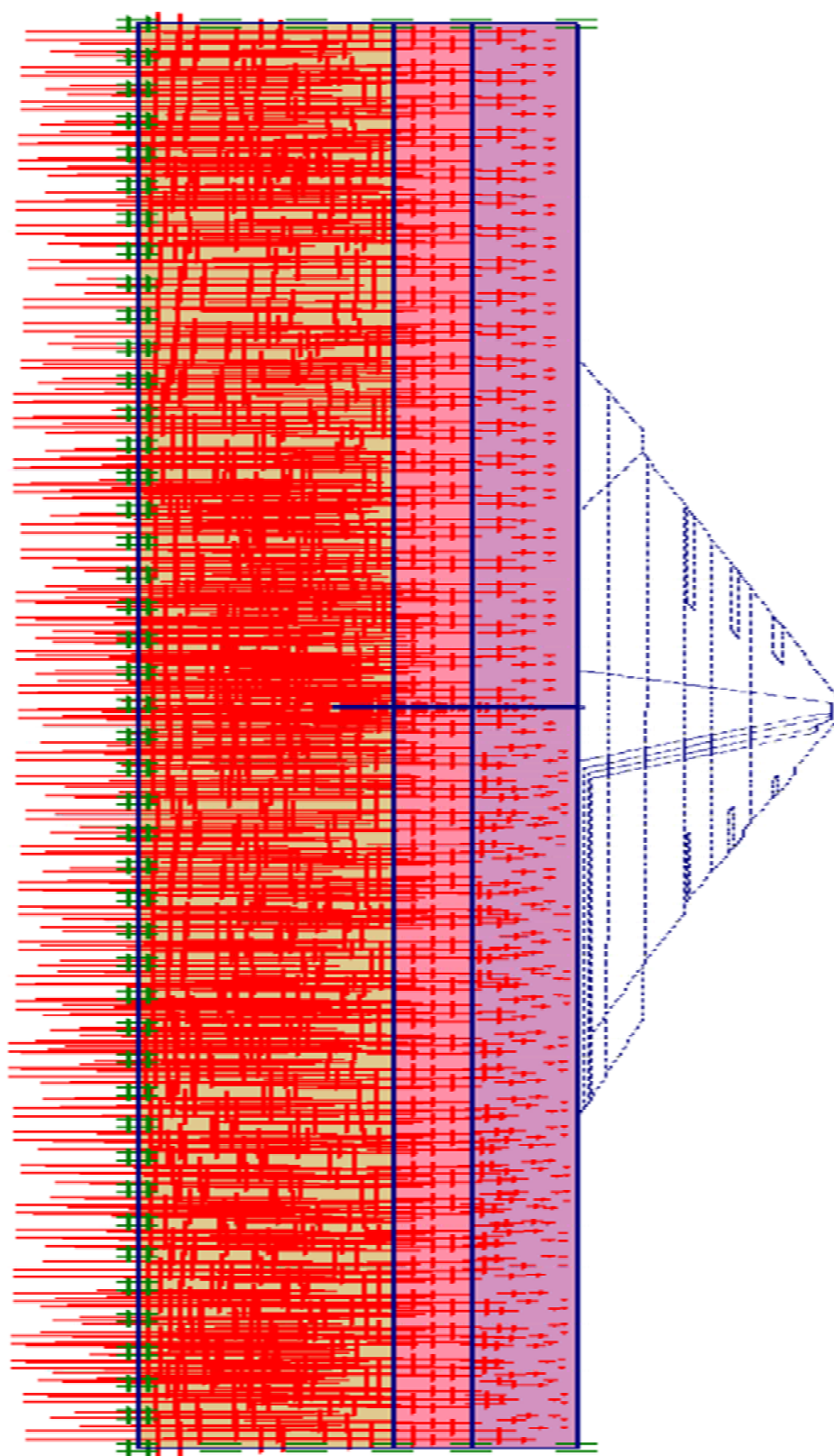
شکل ۵ - ۵ - مش بندی مدل هندسی بدنه و پی سد

۵ - ۴ - ۴ - اعمال شرایط اولیه

بعد از مش بندی، مدل سازی برای تحلیل به روش عددی اجزای محدود کامل شده است. قبل از تحلیل مدل شرایط اولیه به مدل اعمال شود. این کار برای حل مدل برای رسیدن به تعادل اولیه و همچنین دستیابی به وضعیت اولیه قبل از محاسبات، صورت گرفته است. به منظور اعمال شرایط اولیه به مدل، همان طور که در شکل ۴-۵، نشان داده شده است، ابتدا فشارهای هیدرواستاتیک آب با ترازى هم سطح با تراز روی بستر سد و نیز تعریف وزن مخصوص (γ_w) برابر با ۱۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب، ایجاد شده است که مقدار آن برابر $10^{-15} \times 65/25$ متر بر روز است. سپس، با اعمال کل وزن مصالح بستر به مدل و ضریب فشار جانبی زمین در حال سکون (K_0)، مطابق آنچه در شکل ۴-۵، نشان داده شده است، تنش های برجا ایجاد شده است که مقدار آن برابر $10^3 \times 1/56$ کیلو نیوتن بر مترمربع است. این تنش ها، شامل تنش قائم و افقی اولیه خاک هستند. تنش افقی اولیه با تنش قائم اولیه به وسیله ضریب فشار جانبی زمین در حال سکون در ارتباط است که در این تحقیق از مقدار پیش فرض این ضریب که بر اساس فرمول جکی ($1 - \sin \phi$) است، استفاده شده است.



شکل ۵-۶- فشارهای اولیه آب در شروع ساخت



شکل ۵-۷- ایجاد تنش‌های برجا

۵ - ۴ - ۵ - تحلیل مدل

برای بررسی رفتار آنی و تحکیمی بستر و خاکریز در طی احداث خاکریز و نیز ارزیابی میزان نشست خاکریز در طی احداث نیمرخ عرضی ۱۹ - ۱۹، ۷ مرحله محاسباتی زیر در نظر گرفته شده است:

مرحله ۱ : احداث دیوار آببند در پی

مرحله ۲ : خاکریزی تا ارتفاع ۷ متر از سطح بستر و تحکیم آن به مدت ۲۴۱ روز

مرحله ۳ : خاکریزی تا ارتفاع ۱۱/۴ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۲۲۹ روز

مرحله ۴ : خاکریزی تا ارتفاع ۱۶ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۲۹ روز

مرحله ۵ : خاکریزی تا ارتفاع ۲۴/۳ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۳۸۵ روز

مرحله ۶ : خاکریزی تا ارتفاع ۳۱ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۳۰۹ روز

مرحله ۷ : خاکریزی تا ارتفاع ۳۹/۷ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۶۱۱ روز

ارتفاع هر مرحله از خاکریزی و تعداد روزهای تحکیم آن طبق برنامه واقعی احداث سد در نظر گرفته شده است.

برای بررسی رفتار آنی و تحکیمی بستر و خاکریز در طی احداث خاکریز و نیز ارزیابی میزان نشست خاکریز در طی احداث نیمرخ عرضی ۱۳ - ۱۳، ۵ مرحله محاسباتی زیر در نظر گرفته شده است:

مرحله ۱ : احداث دیوار آببند در پی

مرحله ۲ : خاکریزی تا ارتفاع ۵ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۵۰۰ روز

مرحله ۳ : خاکریزی تا ارتفاع ۱۰/۱۵ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۷۶۷ روز

مرحله ۴ : خاکریزی تا ارتفاع ۱۵ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۵۲۱ روز

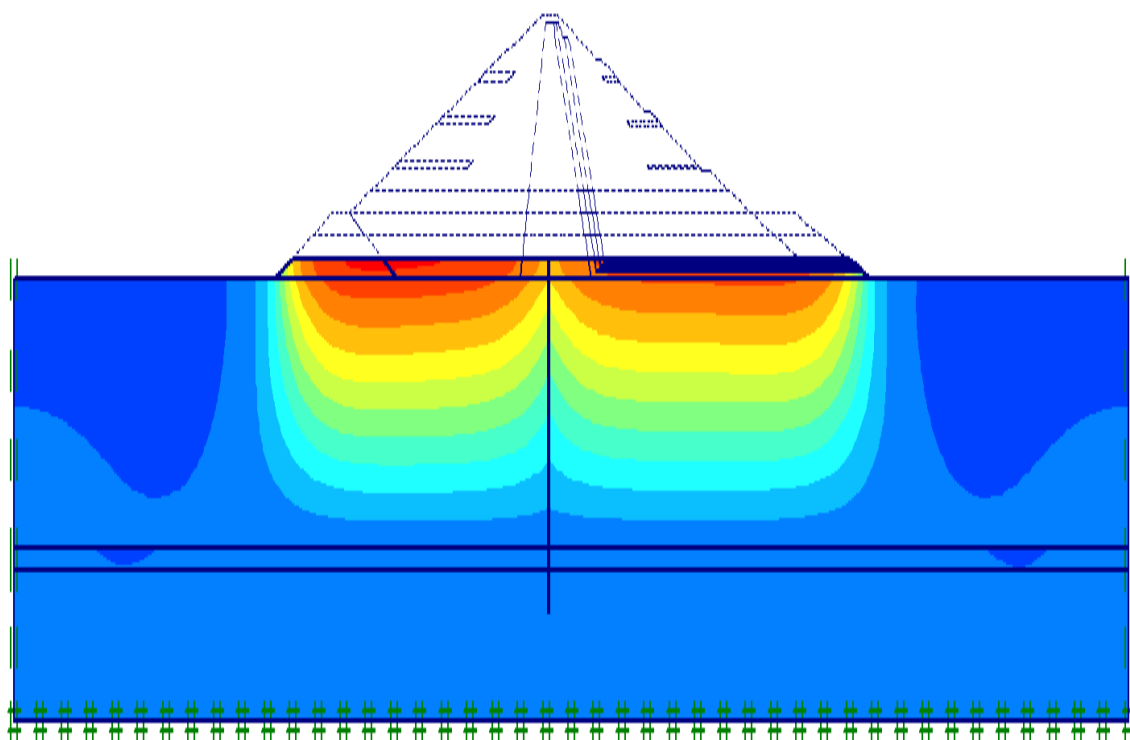
مرحله ۵ : خاکریزی تا ارتفاع ۲۰/۲ متر از سطح بستر و تحکیم لایه به مدت ۵۲۲ روز

لازم به ذکر است که در تمام مراحل خاکریزی، محاسبات از نوع پلاستیک و کوتاه مدت (آنی) و در تمام مراحل

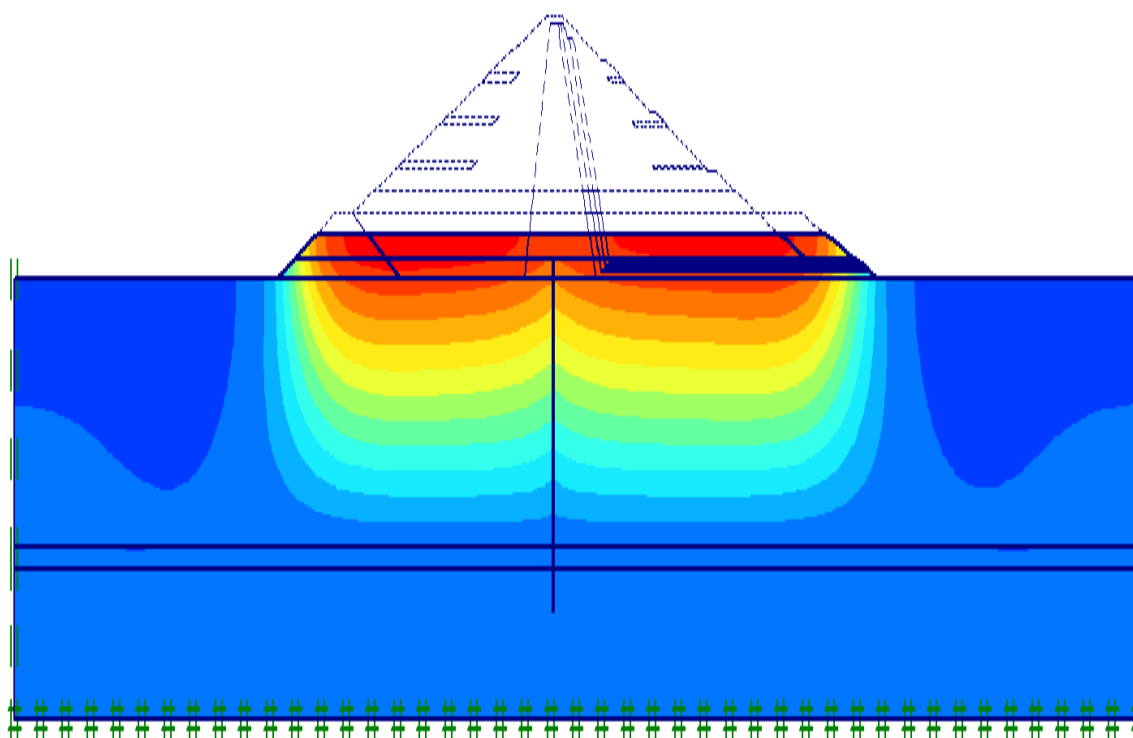
تحکیم، محاسبات از نوع تحکیمی با مدت زمان مورد نظر هستند. همچنین، در تمامی مراحل فوق، رفتار مصالح بدنه سد به صورت زهکشی نشده در نظر گرفته شده است.

۵ - ۴ - ۶ - نتایج شبیه‌سازی مرحله احداث سد

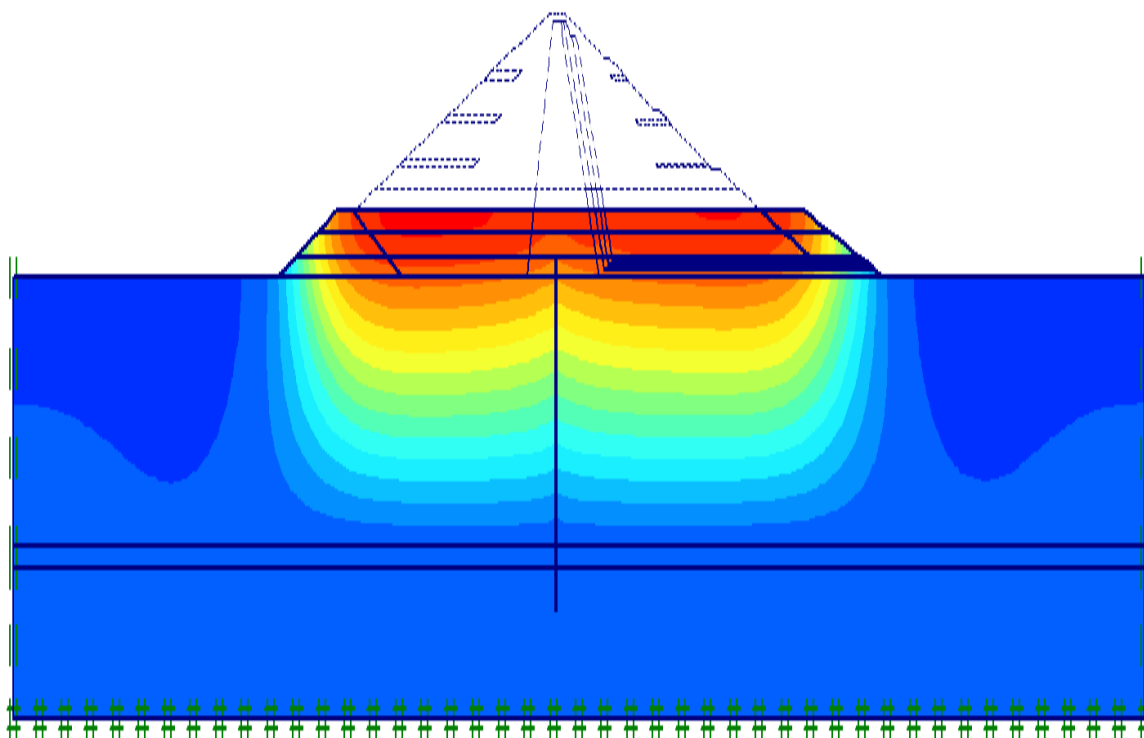
در شکل‌های ۵-۸ تا ۵-۱۱، توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳ سد، در مدت زمان احداث خاکریز (بارگذاری آبی) و تحکیم بستر (پس از هر مرحله خاکریزی)، نشان داده شده است. یکی از نتایج مهم و اصلی که بعد از انجام محاسبات عددی به دست می‌آید، نمایش محدوده‌ی توزیع جابه‌جایی‌های دو نیمرخ است که به صورت لایه‌ای احداث شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با پیشرفت روند خاکریزی و افزایش ارتفاع خاکریز سد، میزان جابجایی‌ها به صورت تجمعی افزایش یافته است. علت افزایش میزان جابجایی‌ها، افزایش وزن مواد روباره ناشی از لایه‌های احداث شده و همچنین زمانی است که با پیشرفت روند خاکریزی به تحکیم بیشتر لایه‌های خاکی کمک می‌کند.



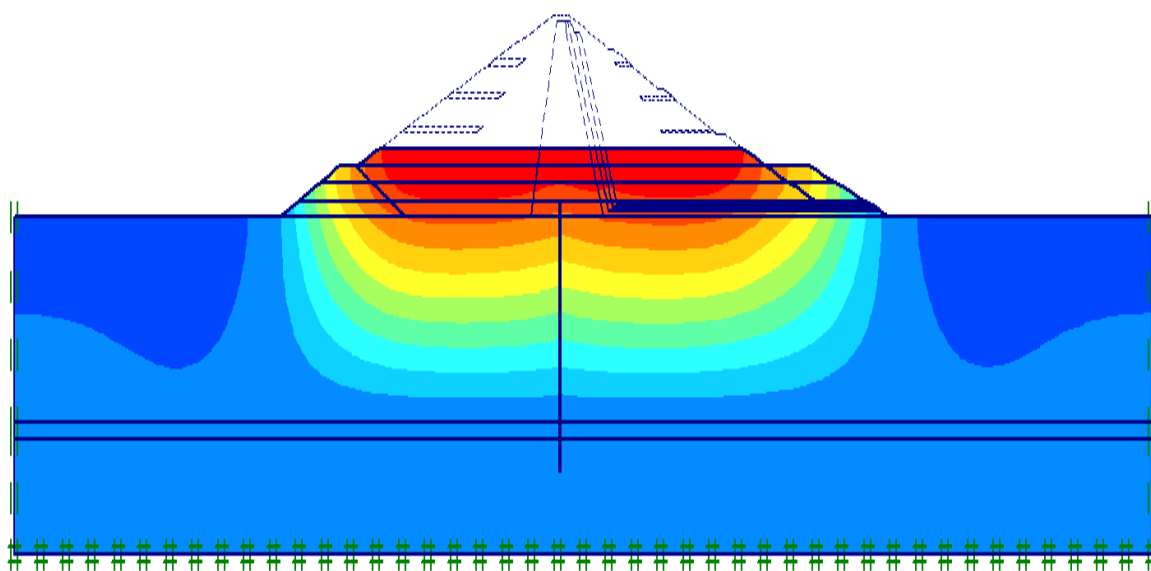
شکل ۵ - ۸ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیمرخ عرضی ۱۳ - ۱۳ پس از تحکیم لایه اول



شکل ۵ - ۹ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیم‌رخ عرضی ۱۳ - ۱۳ پس از تحکیم لایه دوم

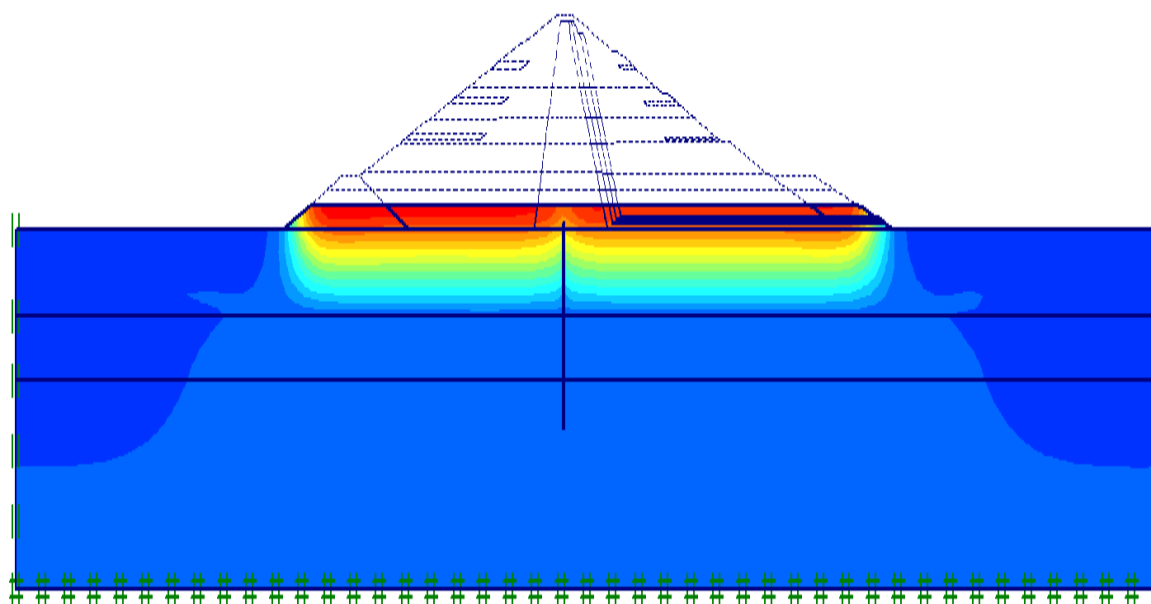


شکل ۵ - ۱۰ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیم‌رخ عرضی ۱۳ - ۱۳ پس از تحکیم لایه سوم

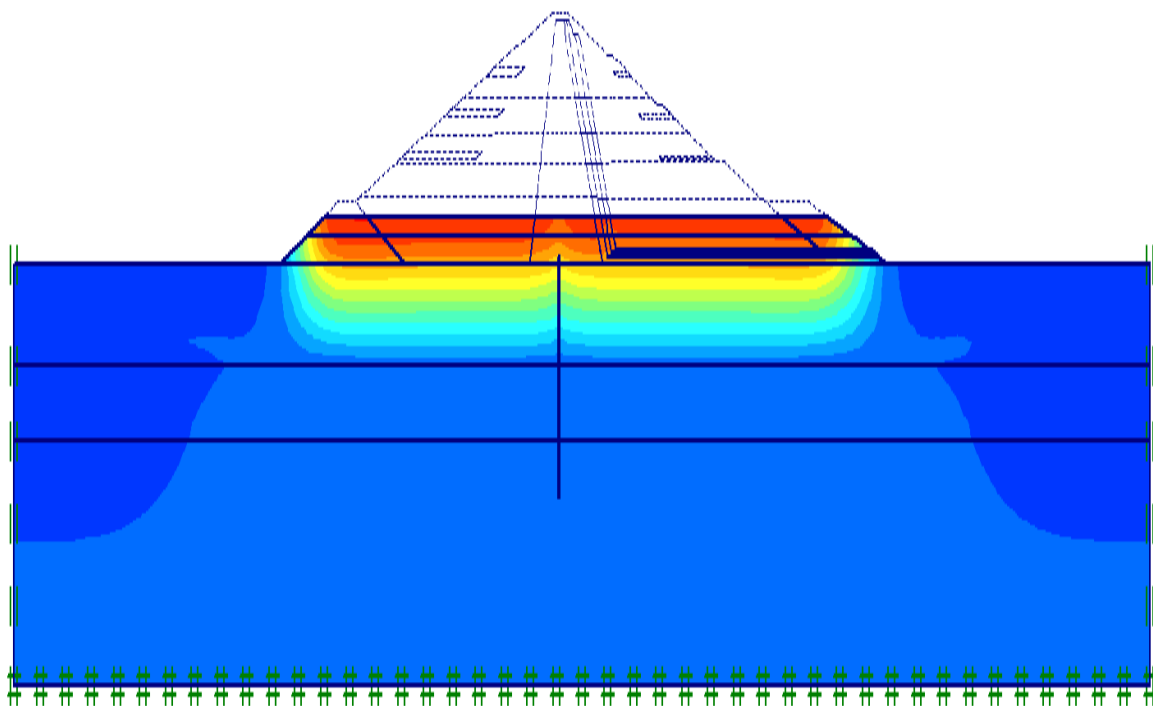


شکل ۵ - ۱۱ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیمرخ عرضی ۱۳ - ۱۳ پس از تحکیم لایه چهارم

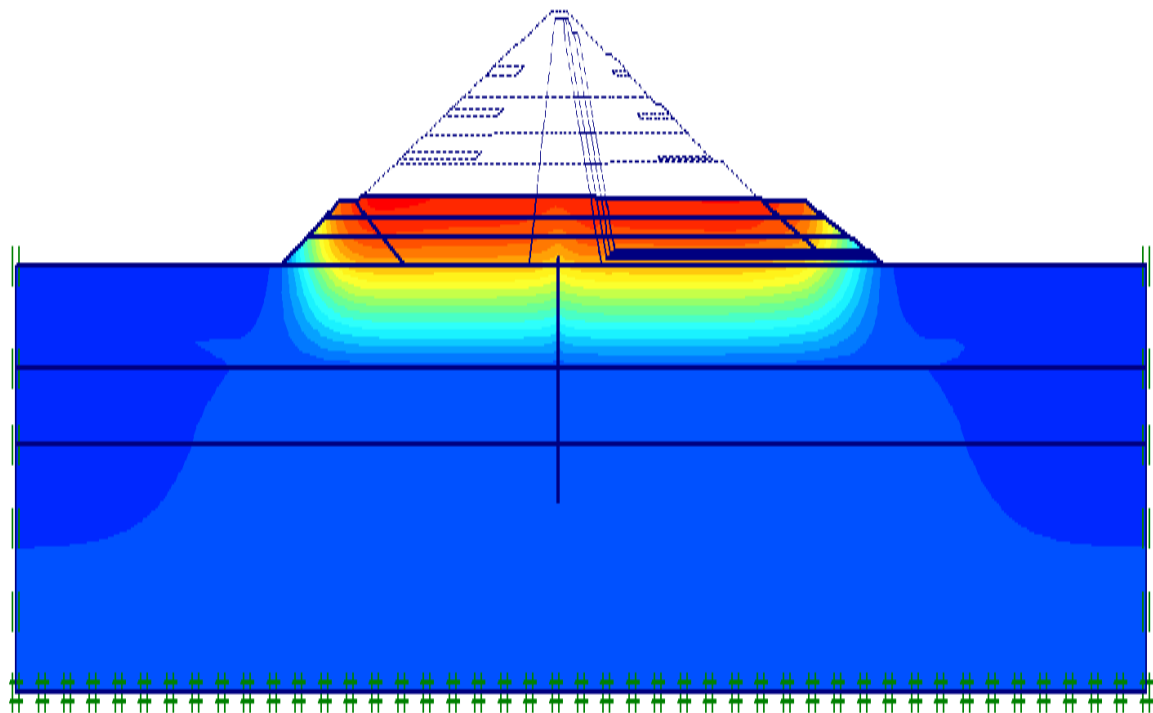
در شکل‌های ۵-۱۲ تا ۵-۱۷، توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹، در مدت زمان احداث خاکریز و تحکیم بستر، نشان داده شده است. در این مقطع نیز با پیشرفت روند خاکریزی و افزایش ارتفاع خاکریز، میزان جابه‌جایی‌های تجمعی افزایش یافته است.



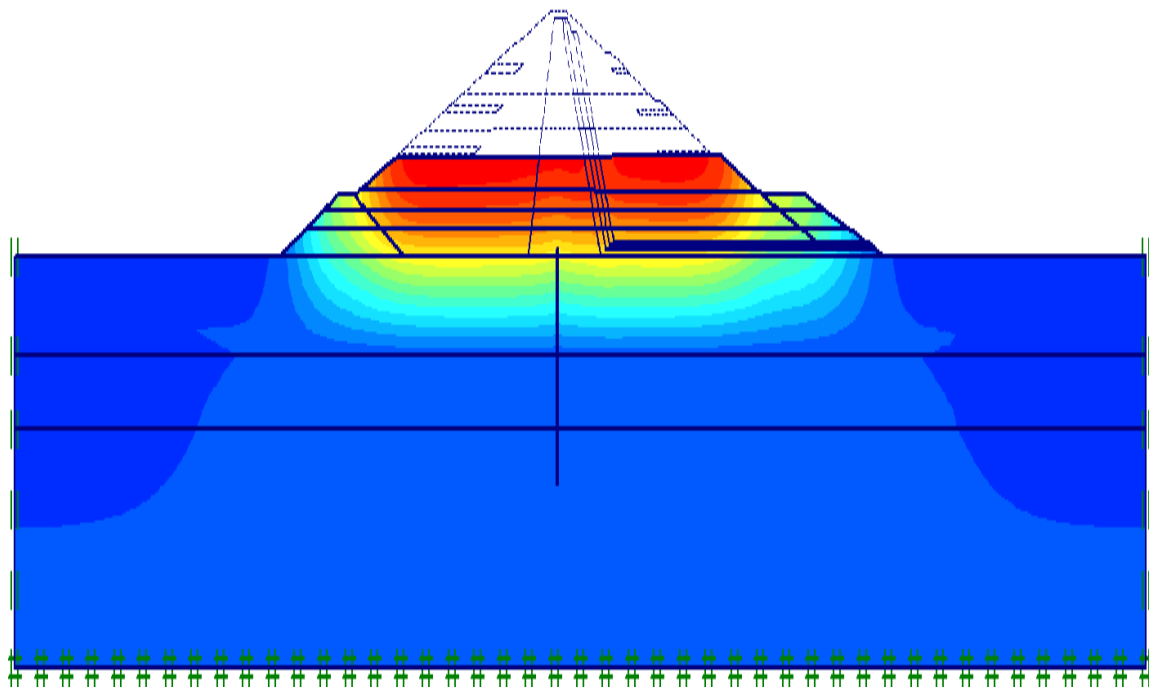
شکل ۵ - ۱۲ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیمرخ عرضی ۱۹ - ۱۹ پس از تحکیم لایه اول



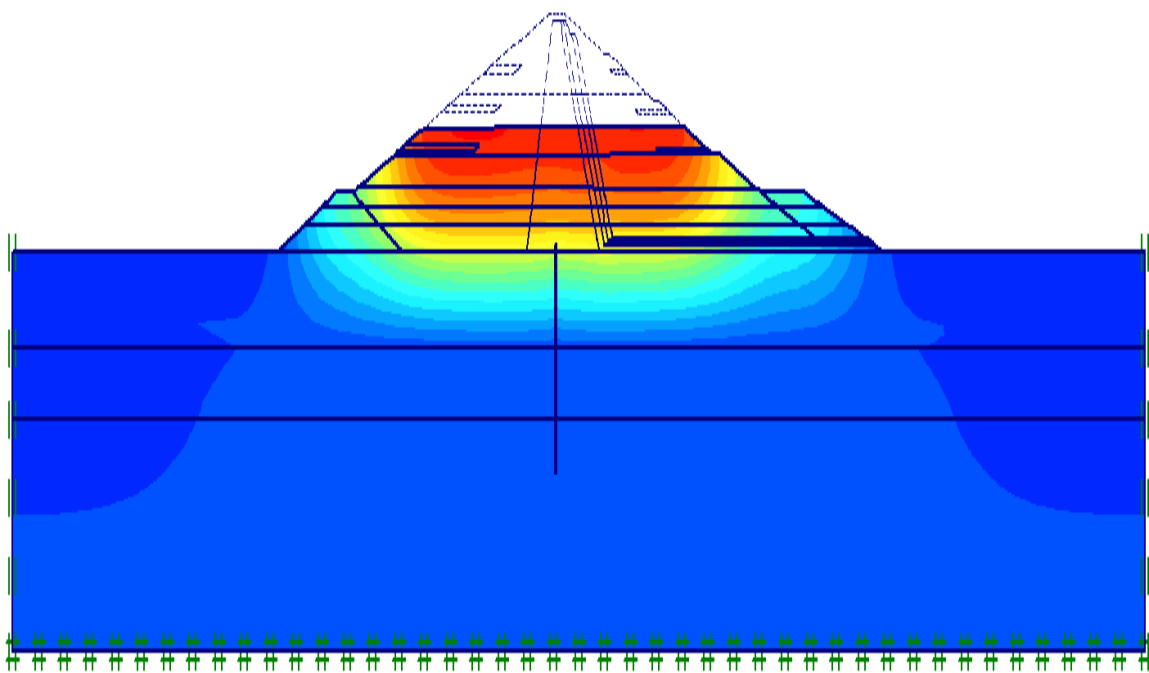
شکل ۵ - ۱۳ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیم‌رخ عرضی ۱۹ - ۱۹ پس از تحکیم لایه دوم



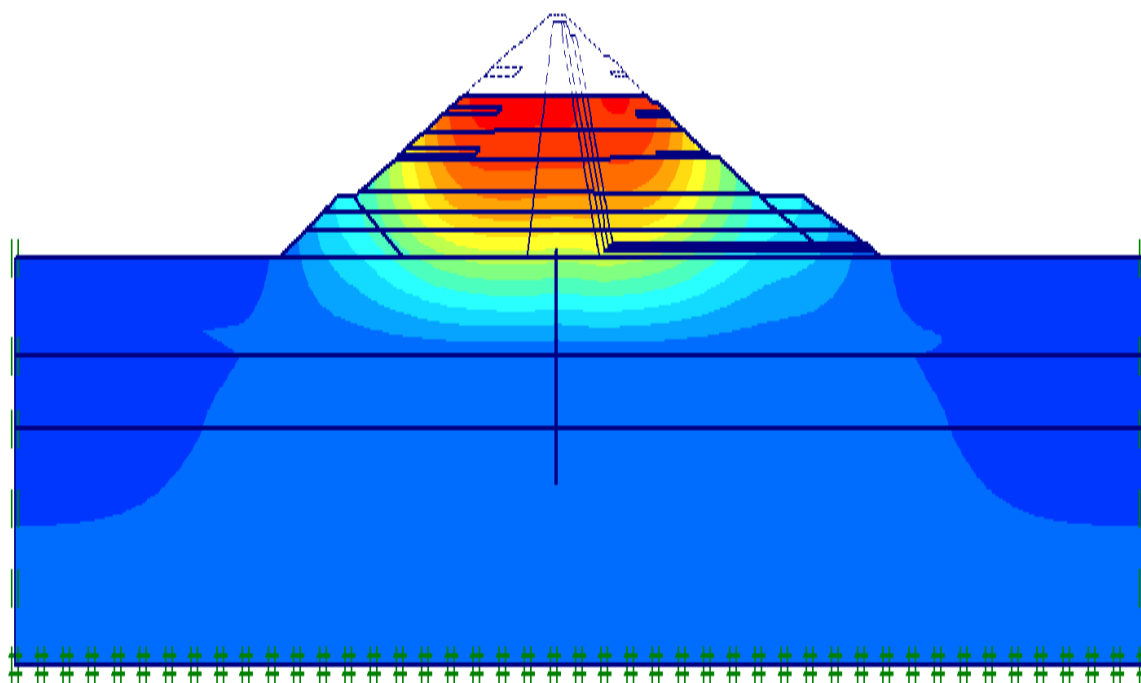
شکل ۵ - ۱۴ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیم‌رخ عرضی ۱۹ - ۱۹ پس از تحکیم لایه سوم



شکل ۵ - ۱۵ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیمرخ عرضی ۱۹ - ۱۹ پس از تحکیم لایه چهارم



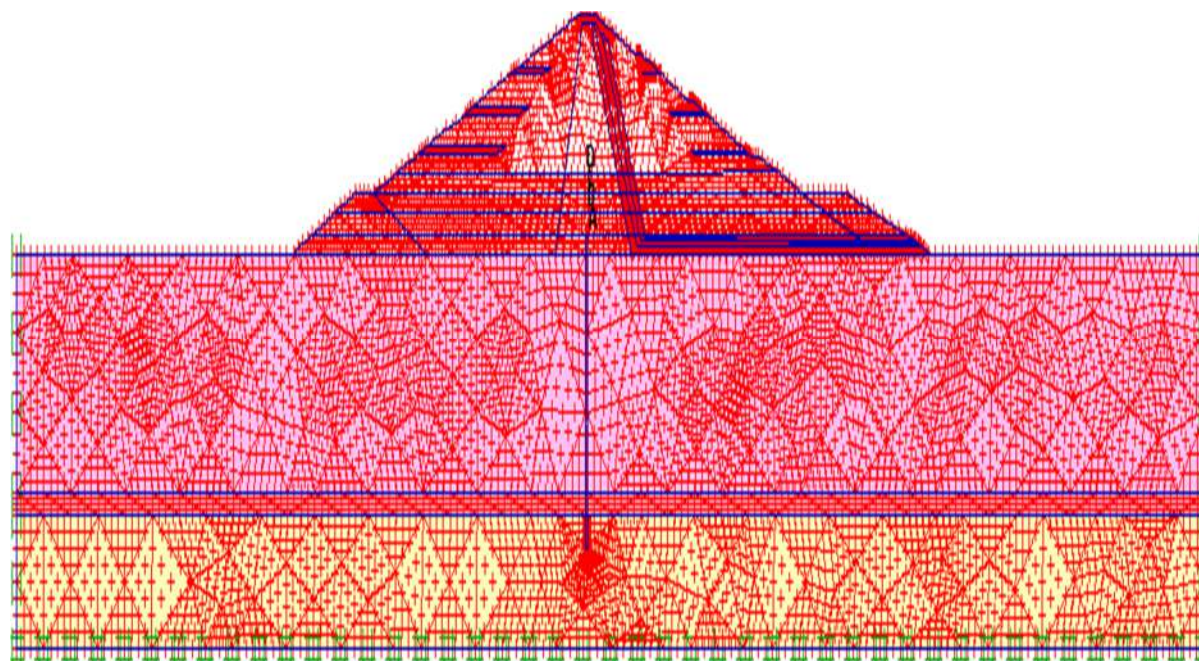
شکل ۵ - ۱۶ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیمرخ عرضی ۱۹ - ۱۹ پس از تحکیم لایه پنجم



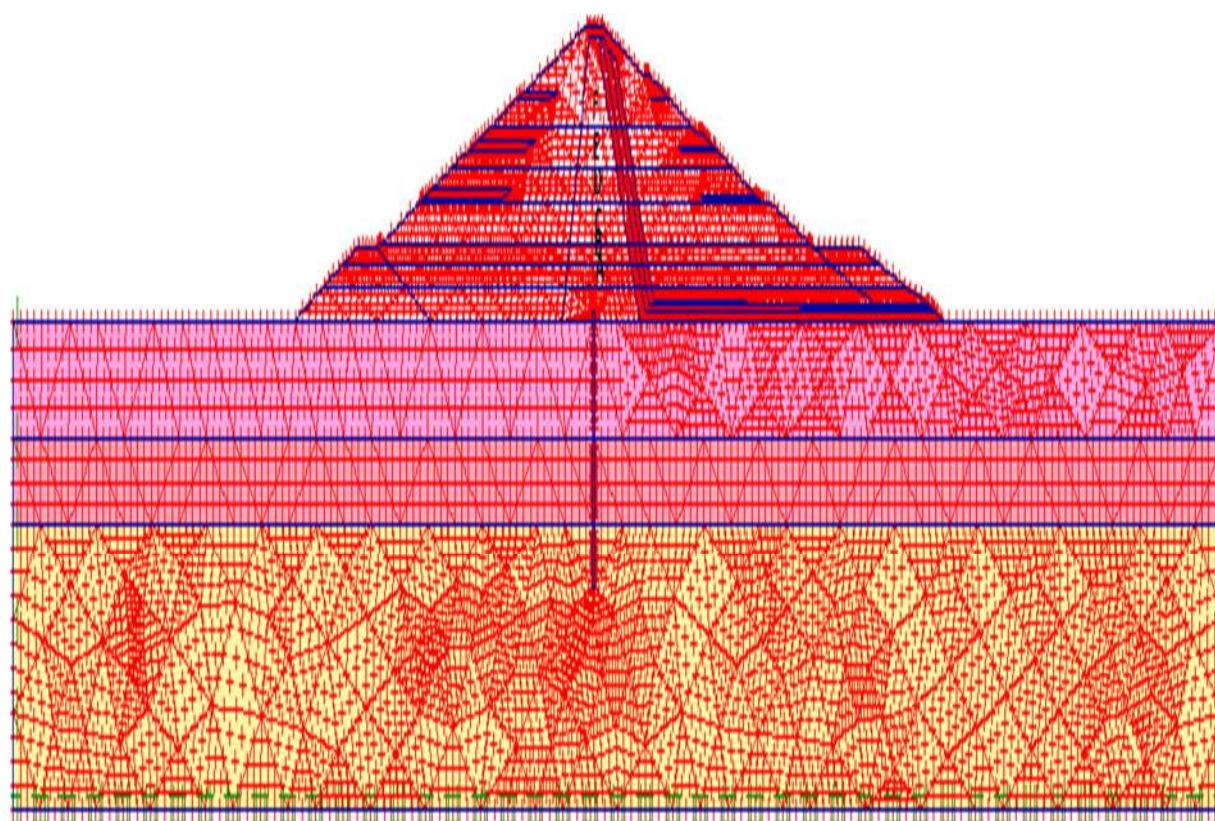
شکل ۵- ۱۷ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم نیم‌رخ عرضی ۱۹- ۱۹ پس از تحکیم لایه ششم

در مرحله محاسبات برای به‌دست آوردن نمودار نشست-زمان در لایه‌های مختلف، در مقطع ۱۳-۱۳، به‌ترتیب چهار نقطه A، B، C و D در ارتفاع ۵، ۱۰/۱۵، ۱۵ و ۲۰/۲ متر در نظر گرفته شده است و در مقطع ۱۹-۱۹، به‌ترتیب شش نقطه A، B، C، D، E و F در ارتفاع ۷، ۱۱/۴، ۱۶، ۲۴/۳، ۳۱ و ۳۹/۷ متر در نظر گرفته شده است که در شکل‌های ۱۸-۵ و ۱۹-۵ نشان داده شده است. در شکل‌های ۲۰-۵ و ۲۱-۵، نمودارهای نشست-زمان در دو مقطع ۱۳-۱۳ و ۱۹-۱۹ نشان داده شده است. در مقطع ۱۳-۱۳، بیشترین جابه‌جایی تجمعی رخ داده ۹۹۳ میلی‌متر و این مقدار در مقطع ۱۹-۱۹ به ۱۲۳۰ میلی‌متر می‌رسد.

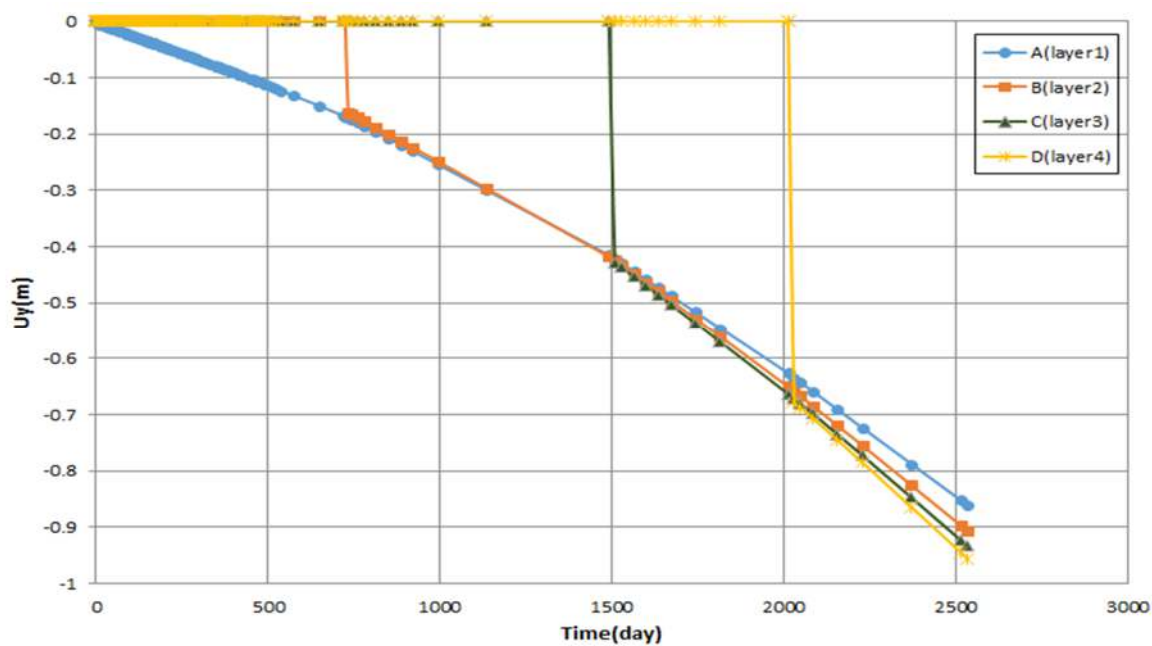
همان‌طور که انتظار می‌رود، با توجه به روند خاکریزی‌های صورت گرفته در مقطع ۱۹-۱۹ که نسبت به مقطع ۱۳-۱۳ حجم بیشتری دارد، تغییر شکل در مقطع ۱۹-۱۹ نسبت به مقطع ۱۳-۱۳ بیشتر بوده و در نتیجه نشست بیشتری صورت گرفته است.



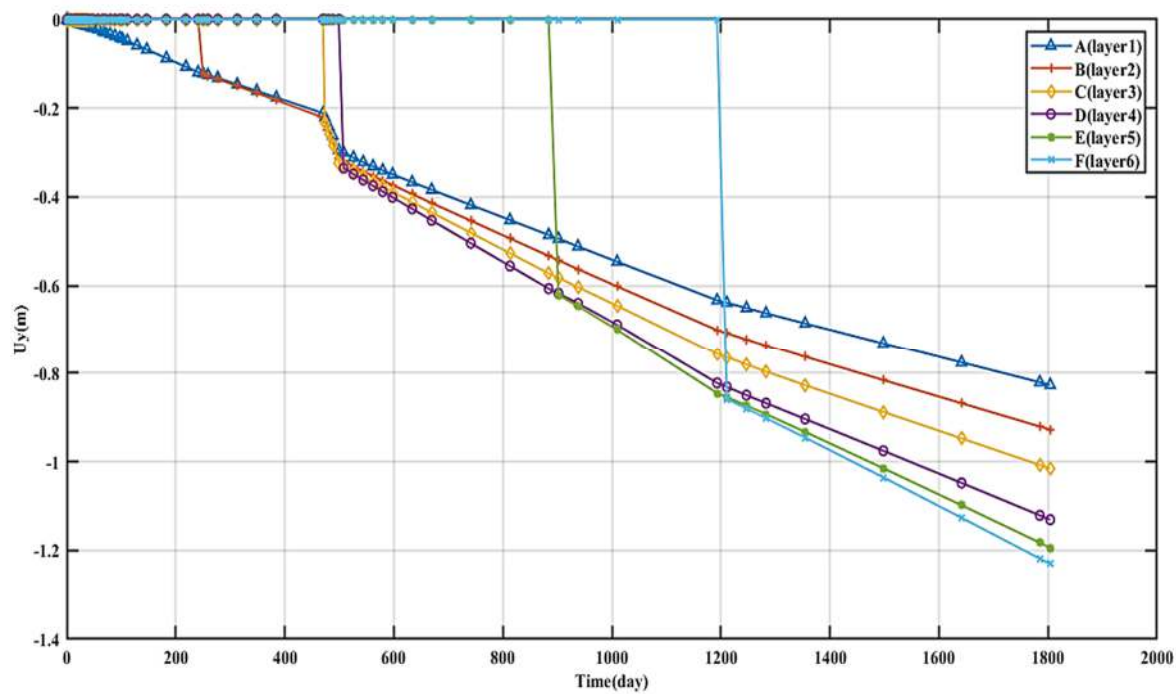
شکل ۵-۱۸- نقاط مبنا برای محاسبه نشست در مقطع ۱۳-۱۳



شکل ۵-۱۹- نقاط مبنا برای محاسبه نشست در مقطع ۱۹-۱۹



شکل ۵-۲۰- نمودار نشست - زمان مقطع ۱۳-۱۳ در نرم افزار



شکل ۵-۲۱- نمودار نشست - زمان مقطع ۱۹-۱۹ در نرم افزار

۵ - ۵ - ابزار دقیق سد نرماب

از آن جا که مشاهده و ثبت رفتار سدهای خاکی طی مرحله ساخت و دوران بهره‌برداری اهمیت بسیار زیادی دارد، از این رو به‌منظور دستیابی به این هدف، ابزار و وسایل مناسبی در پی، تکیه‌گاه‌های جانبی، بدنه و سازه‌های جانبی سد نصب شده و داده‌های حاصل به‌صورت مستمر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. داده‌های ثبت شده توسط این ابزارها می‌تواند مورد استفاده طراحان سد و بهره‌بردارها قرار گیرد و در صورت احتمال وقوع خطر، هشدارهای لازم را برای پیشگیری بدهد. وجود این نوع اطلاعات، علاوه بر ارزیابی رفتار فعلی سد، ارزیابی پارامترهای پیش‌بینی شده در مرحله طراحی را ممکن ساخته و مبنای علمی دقیق‌تری را برای طراحی سدهایی که در آینده ساخته خواهند شد، در اختیار مهندسان قرار خواهد داد. بنابراین اهداف سیستم ابرابندی در سدهای خاکی را می‌توان به شرح زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- بررسی عملکرد سد از نظر پایداری و امکان بروز آسیب‌ها و موارد خسارت‌آور و ناخواسته به‌منظور تامین دوام سد و دادن هشدار برای جلوگیری از شکستن سد و تلفات ناشی از آن.

۲- دسترسی به فهم دقیق‌تر رفتار سدها در مقیاس واقعی و کمک به توسعه مباحث تحقیق و پیشبرد مرزهای دانش در حوزه سدسازی

۳- کنترل و مقایسه رفتار سد حین ساخت با فرضیات در نظر گرفته شده در طراحی

۴- پیش‌بینی و تشخیص پدیده‌های مخرب حین بهره‌برداری از سد و جلوگیری از رشد آن‌ها

۵- استفاده از نتایج در تصحیح تئوری‌ها، بهینه کردن آن‌ها در طرح‌های آتی و ارزیابی نرم‌افزارهای مورد استفاده.

با در نظر گرفتن شرایط پی و دیگر عوامل، برای ابرابندی سد نرماب شش مقطع عرضی (مقاطع عرضی شماره ۷-۷، ۱۱-۱۱، ۱۳-۱۳، ۱۵-۱۵، ۱۹-۱۹ و ۲۲-۲۲) در نظر گرفته شده است که در این تحقیق، مقاطع ۱۳-۱۳ و ۱۹-۱۹، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، زیرا در مقطع ۱۹-۱۹، ارتفاع خاکریزی به چهل متر رسیده است که می‌تواند در تجزیه و تحلیل عددی بیشتر مفید واقع شود.

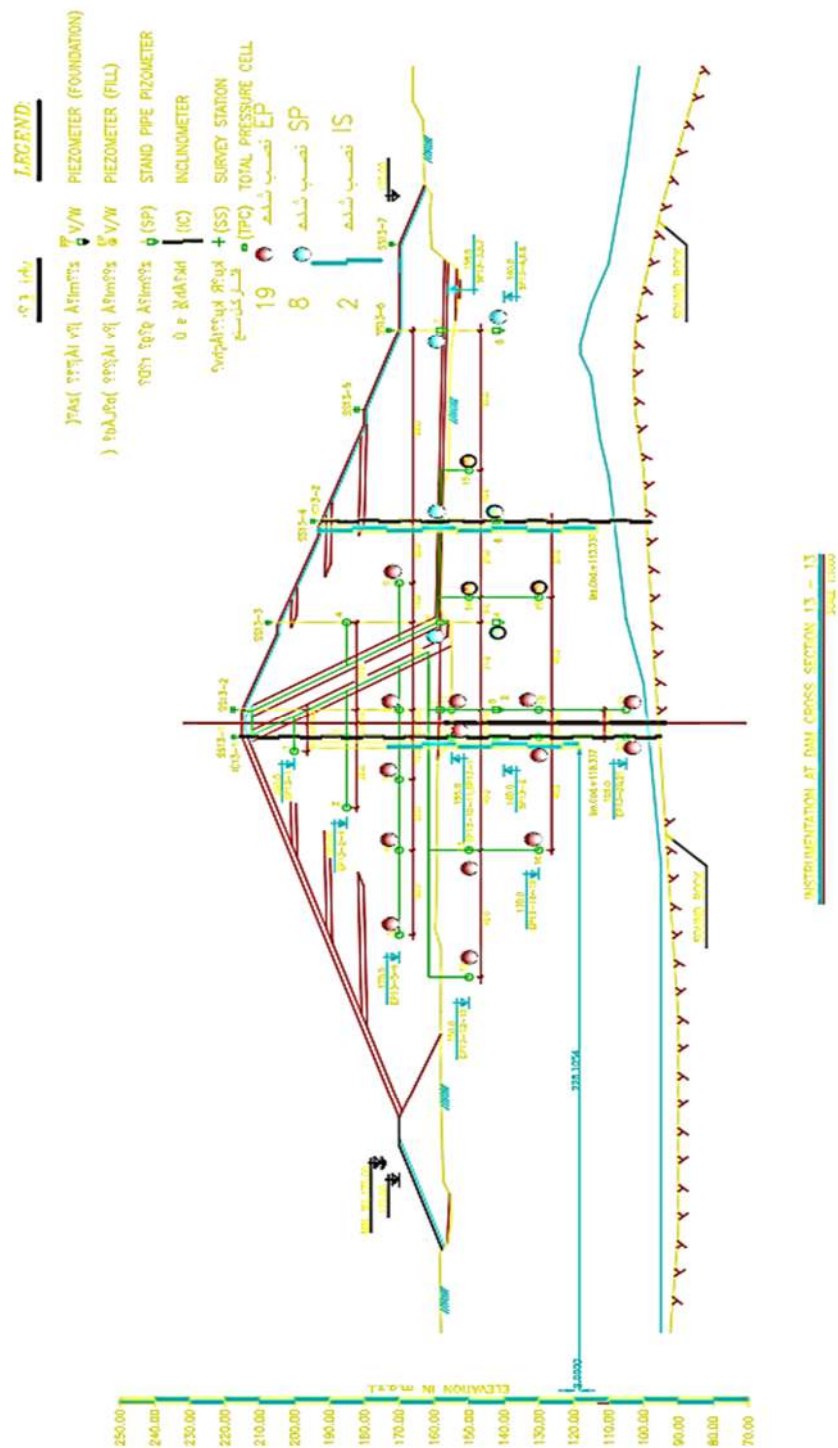
ابزارهای به کار رفته در سد نرماب در جدول ۵-۲ نشان داده شده است:

جدول ۵-۲- تعداد و انواع ابزار نصب شده در ترازهای مختلف در سد تا پایان آذر ۱۳۹۶ [۴۶].

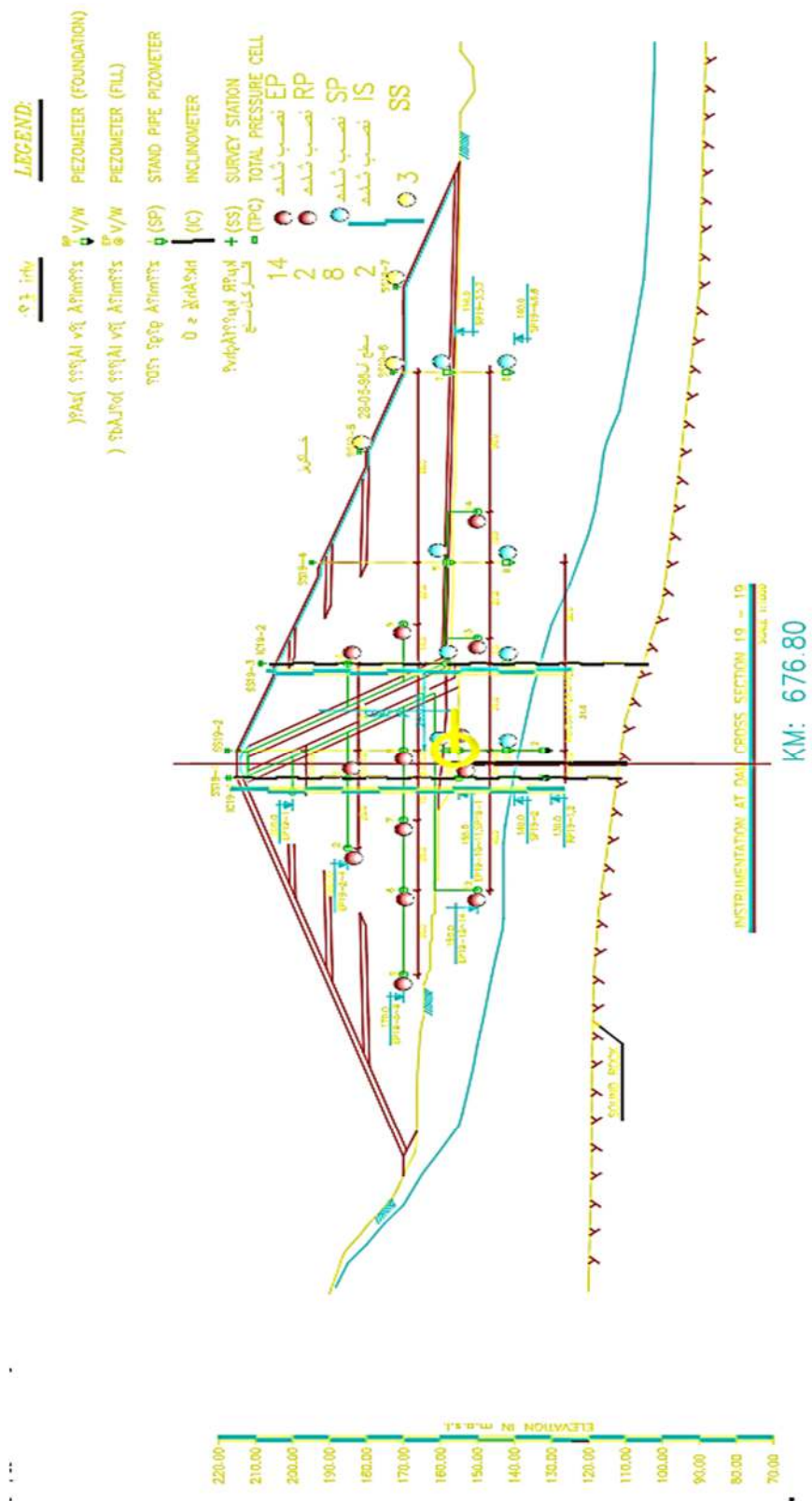
تعداد ابزار دقیق نصب شده تا پایان ۹۶/۰۹/۳۰ (تجمعی)																								
ردیف	نوع دستگاه	مقطع ۷-۷			مقطع ۱۱-۱۱			مقطع ۱۳-۱۳			مقطع ۱۵-۱۵			مقطع ۱۷-۱۷			مقطع ۱۹-۱۹			مقطع ۲۱-۲۱			مجموع نصب شده	تعداد کل ابزار
		تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل		
۱	پیرومتر الکتریکی سنگ (RP)	۱۵۵	۲	۲	۱۴۰	۲	۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۴۰	۲	۲	۸	۸
۲	پیرومتر الکتریکی خاک (EP)	۲۰۰	۰	۱۸۵	۱۷۰	۰	۲	۲۰۰	۰	۱۸۵	۱۷۰	۰	۲	۲۰۰	۰	۱۸۵	۱۷۰	۰	۲	۱۵۶	۲	۲	۸۹	۱۱۰
۳	پیرومتر لوله قائم (SP)	۱۵۵	۱	۲	۱۴۰	۲	۳	۱۵۵	۴	۴	۱۴۰	۴	۴	۱۵۶	۴	۴	۱۴۰	۴	۴	۱۵۶	۱	۳	۴۷	۴۹
۴	الحراف / نشست سنج (IS)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۱	۱۱
۵	نقشه برداری (SS)	۲۱۵	۰	۲۰۵	۱۹۳	۱۸۰	۲	۲۱۵	۰	۲۰۵	۱۹۳	۱۸۰	۲	۲۱۵	۰	۲۰۵	۱۹۳	۱۸۰	۲	۱۷۰	۱	۲	۹	۴۹

۴	سول فشار کل (TPC)	۵		مجموع
		چاه مشاهده‌ای (OW)	چاه مشاهده‌ای (OW)	
-	-	تکیه‌گاه راست		۷
-	-			
-	-			
-	-			
۲۰۰	۱۸۵	OW-6	L:۱۳۶,۲۱	۲۲
۰	۰	OW-5	L:۱۴۶,۱۸	
۱	۲	OW-4	L:۱۴۲,۰۰	
-	-	OW-3	L:۱۴۷,۷۵	
-	-	تکیه‌گاه چپ		۲۷
-	-			
-	-			
-	-			
-	-	OW-2	L:۱۵۲,۹۲	۳۱
-	-	OW-1	L:۱۵۷,۳۳	
-	-	OW-12	L:۱۴۷,۵۰	
-	-	OW-11	L:۱۴۷,۹۰	
-	-	تکیه‌گاه چپ		۲۴
-	-			
-	-			
-	-			
-	-	OW-10	نصب نشده	۲۸
-	-	OW-9	نصب نشده	
-	-	OW-7	نصب نشده	
-	-	OW-7	L:۱۴۵,۳۹	
۲		۹		۱۷۵
۴		۱۲		۲۴۳

در شکل‌های ۲۲-۵ و ۲۳-۵، ابزارهای نصب شده در این مقاطع تا سال ۹۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۲- نقشه ابزاربندی مقطع ۱۳-۱۳ سد نرماب [۴۶].



شکل ۵-۲۳- نقشه ابزاربندی مقطع ۱۹-۱۹ [۴۶].

۵-۶- صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی و ابزار دقیق

نشست‌های زمان ساخت سد در اثر نیروی وزن لایه‌های بالاتر بر روی لایه‌های زیرین و همچنین بر اثر زمان‌هایی که برای استهلاک اضافه فشار آب حفره‌ای در زمان ساخت در نظر گرفته شده است، اتفاق می‌افتد. بررسی تئوریک نشست سد در زمان ساخت نشان می‌دهد که اگر خاکریزی به صورت لایه لایه انجام گیرد نیم‌رخ نهایی نشست به صورت سهمی شکل بوده و نشست حداکثر در ۳۰ تا ۴۰ درصد ارتفاع سد اتفاق می‌افتد و گاهی تا ۵۰ درصد، که نادر است. همچنین بر اساس تئوری، حداکثر میزان نشست در طول ساخت حدود ۱ تا ۳ درصد ارتفاع سد است. با توجه به اینکه نرم‌افزار PLAXIS 2D نشست هر لایه‌ای که ساخته می‌شود را با کل نشست‌هایی که تا آن زمان محاسبه کرده است، جمع می‌کند، در نتایج خروجی نشست کل نرم‌افزار، حداکثر نشست‌ها در تاج سد متمرکز می‌شود، در حالی که حداکثر نشست‌ها باید در تراز میانی سد اتفاق بیفتد.

در مدل‌های عددی تهیه شده، پس از تحلیل میزان نشست و تغییرشکل لایه‌ها بعد از هر مرحله، شکل‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۱ به‌دست آمده است که نتایج نشست را نسبت به زمان نشان می‌دهند. در مورد این نتایج باید دقت نمود که نشست‌ها در هر لایه نسبت به زمان و همچنین در یک زمان مشخص برای لایه‌های مختلف به صورت تجمعی افزایش یافته است [۴۹].

برای به‌دست آوردن نمودار نشست-ارتفاع هر نقطه لازم است اطلاعات به‌دست آمده از شکل‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۱ مورد بازنگری قرار گیرند و پس از آن نمودارهای نشست رسم شود. برای این منظور ابتدا جدول شماره ۵-۳ و ۵-۴ تهیه شده و نتایج به‌دست آمده از تحلیل نرم‌افزار در پایان ساخت هر لایه (phase) در مقاطع ۱۳-۱۳ و ۱۹-۱۹ در آن درج شده است. میزان تغییرشکل قایم در هر تراز از طریق نرم‌افزار به‌دست آمده و به‌عنوان Δh_{ij} در جدول درج می‌شود که i ، لایه مورد نظر و j ، فاز مورد نظر را نشان می‌دهد. برای مثال با توجه به شکل ۵-۱۸ و جدول ۵-۳، وقتی که در فاز اول، خاکریزی لایه اول انجام شده است، نشست نقطه A، ۱۵۶ میلی‌متر است. وقتی که در فاز دوم، خاکریزی لایه دوم انجام شده است، نشست نقطه A و B به‌ترتیب ۴۰۱ و ۴۱۸ میلی‌متر است. وقتی که در فاز سوم، خاکریزی لایه سوم انجام شده است، نشست نقطه A، B، C به‌ترتیب ۶۱۲، ۶۵۰ و ۶۶۵ میلی‌متر است. وقتی که در فاز چهارم، خاکریزی لایه چهارم انجام شده است، نشست نقطه A، B، C و D به ترتیب ۸۴۷، ۹۰۷، ۹۴۰ و ۹۵۸ میلی‌متر است که به صورت تجمعی افزایش یافته است.

جدول ۵-۳- مرحله اول محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳

	P_1	P_2	P_3	P_4
$L_4(D)$				$\Delta h_{ff} = 958$
$L_3(C)$			$\Delta h_{rr} = 665$	$\Delta h_{rf} = 940$
$L_2(B)$		$\Delta h_{rr} = 418$	$\Delta h_{rr} = 650$	$\Delta h_{rf} = 907$
$L_1(A)$	$\Delta h_{11} = 156$	$\Delta h_{1r} = 401$	$\Delta h_{1r} = 612$	$\Delta h_{1f} = 847$

جدول ۵-۴- مرحله اول محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
$L_6(F)$						$\Delta h_{ff} = 1231$
$L_5(E)$					$\Delta h_{dd} = 846$	$\Delta h_{df} = 1194$
$L_4(D)$				$\Delta h_{ff} = 607$	$\Delta h_{fd} = 823$	$\Delta h_{ff} = 1131$
$L_3(C)$			$\Delta h_{rr} = 324$	$\Delta h_{rf} = 572$	$\Delta h_{rd} = 756$	$\Delta h_{rf} = 1016$
$L_2(B)$		$\Delta h_{rr} = 221$	$\Delta h_{rr} = 312$	$\Delta h_{rf} = 533$	$\Delta h_{rd} = 701$	$\Delta h_{rf} = 928$
$L_1(A)$	$\Delta h_{11} = 119$	$\Delta h_{1r} = 211$	$\Delta h_{1r} = 294$	$\Delta h_{1f} = 468$	$\Delta h_{1d} = 633$	$\Delta h_{1f} = 827$

پس از تکمیل جدول‌های بالا، با توجه به این که میزان نشست در هر مرحله به صورت تجمعی به لایه‌های بعدی منتقل می‌شود، برای به دست آوردن میزان نشست هر لایه (به جز لایه اول) در هر مرحله، میزان نشست لایه پایین از لایه بالا کسر می‌شود ($\Delta h_{ff} = \Delta h_{ff} - \Delta h_{rr} = 958 - 940 = 18$) و میزان نشست در لایه اول با استفاده از رابطه $\delta h_{ij} = \Delta h_{ij} - \Delta h_{(i-1)j}$ محاسبه می‌شود:

جدول ۵-۵- مرحله دوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳

	P_1	P_2	P_3	P_4
L_4				$\delta h_{ff} = 18$
L_3			$\delta h_{rr} = 15$	$\delta h_{rf} = 33$
L_2		$\delta h_{rr} = 17$	$\delta h_{rr} = 38$	$\delta h_{rf} = 60$
L_1	$\Delta h_{11} = 156$	$\delta h_{1r} = 245$	$\delta h_{1r} = 211$	$\delta h_{1f} = 235$

جدول ۵-۶- مرحله دوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
L_6						$\delta h_{76} = 37$
L_5					$\delta h_{55} = 23$	$\delta h_{56} = 63$
L_4				$\delta h_{44} = 35$	$\delta h_{45} = 67$	$\delta h_{46} = 115$
L_3			$\delta h_{33} = 12$	$\delta h_{34} = 39$	$\delta h_{35} = 55$	$\delta h_{36} = 88$
L_2		$\delta h_{22} = 10$	$\delta h_{23} = 18$	$\delta h_{24} = 47$	$\delta h_{25} = 68$	$\delta h_{26} = 101$
L_1	$\Delta h_{11} = 119$	$\delta h_{12} = 92$	$\delta h_{13} = 83$	$\delta h_{14} = 192$	$\delta h_{15} = 147$	$\delta h_{16} = 194$

پس از به دست آوردن نتایج نشست، در این مرحله محاسبات ذیل انجام و نتایج برای تکمیل جدول های ۵-۷ و ۵-۸ درج می شود. با توجه به ماهیت نصب ابزار دقیق نشست سنج، روش اجرا به این صورت است که پس از خاکریزی یک لایه، فشردن آن و نشست آنی خاک، ابزار در محل مورد نظر نصب می گردد و تراز نصب پس از تثبیت به دقت قرائت می شود. با توجه به این که نشست لایه صورت گرفته و پس از آن ابزار دقیق نصب می شود، بنابراین Δh_{ii} تمام لایه ها صفر خواهد بود، در حالی که در نرم افزار این موضوع نادیده گرفته می شود:

$$\Delta h_{ii} = \Delta h_{11} = \Delta h_{22} = \Delta h_{33} = \Delta h_{44} = \Delta h_{55} = \Delta h_{66}$$

برای محاسبه نشست نقاط دیگر، به این صورت عمل می شود که نشست تجمعی نقطه مورد نظر برابر است با نشست مرحله قبلی به علاوه نشست لایه در مرحله جدید و جمع نشست های پایین همان نقطه که فرمول بندی آن به شرح ذیل است:

$$\Delta h_{11} = 0$$

$$\Delta h_{12} = \Delta h_{11} + \delta h_{12}$$

$$\Delta h_{13} = \Delta h_{12} + \delta h_{13}$$

$$\Delta h_{14} = \Delta h_{13} + \delta h_{14}$$

$$\Delta h_{22} = 0$$

$$\Delta h_{23} = \Delta h_{22} + \delta h_{23} + \delta h_{13}$$

$$\Delta h_{24} = \Delta h_{23} + \delta h_{24} + \delta h_{14}$$

$$\Delta h_{33} = 0$$

$$\Delta h_{34} = \Delta h_{33} + \delta h_{34} + \delta h_{24} + \delta h_{14}$$

$$\Delta h_{35} = \Delta h_{34} + \delta h_{35} + \delta h_{25} + \delta h_{15}$$

$$\Delta h_{44} = 0$$

$$\Delta h_{45} = \Delta h_{44} + \delta h_{45} + \delta h_{35} + \delta h_{25} + \delta h_{15}$$

$$\Delta h_{46} = \Delta h_{45} + \delta h_{46} + \delta h_{36} + \delta h_{26} + \delta h_{16}$$

$$\Delta h_{55} = 0$$

$$\Delta h_{56} = \Delta h_{55} + \delta h_{56} + \delta h_{46} + \delta h_{36} + \delta h_{26} + \delta h_{16}$$

$$\Delta h_{66} = 0$$

برای مثال برای به دست آوردن Δh_{56} (یعنی نشست لایه پنجم در فاز ششم) به صورت زیر عمل می‌شود:

$$\Delta h_{56} = 0 + 63 + 115 + 88 + 101 + 194 = 561$$

جدول ۵-۷- مرحله سوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۳-۱۳

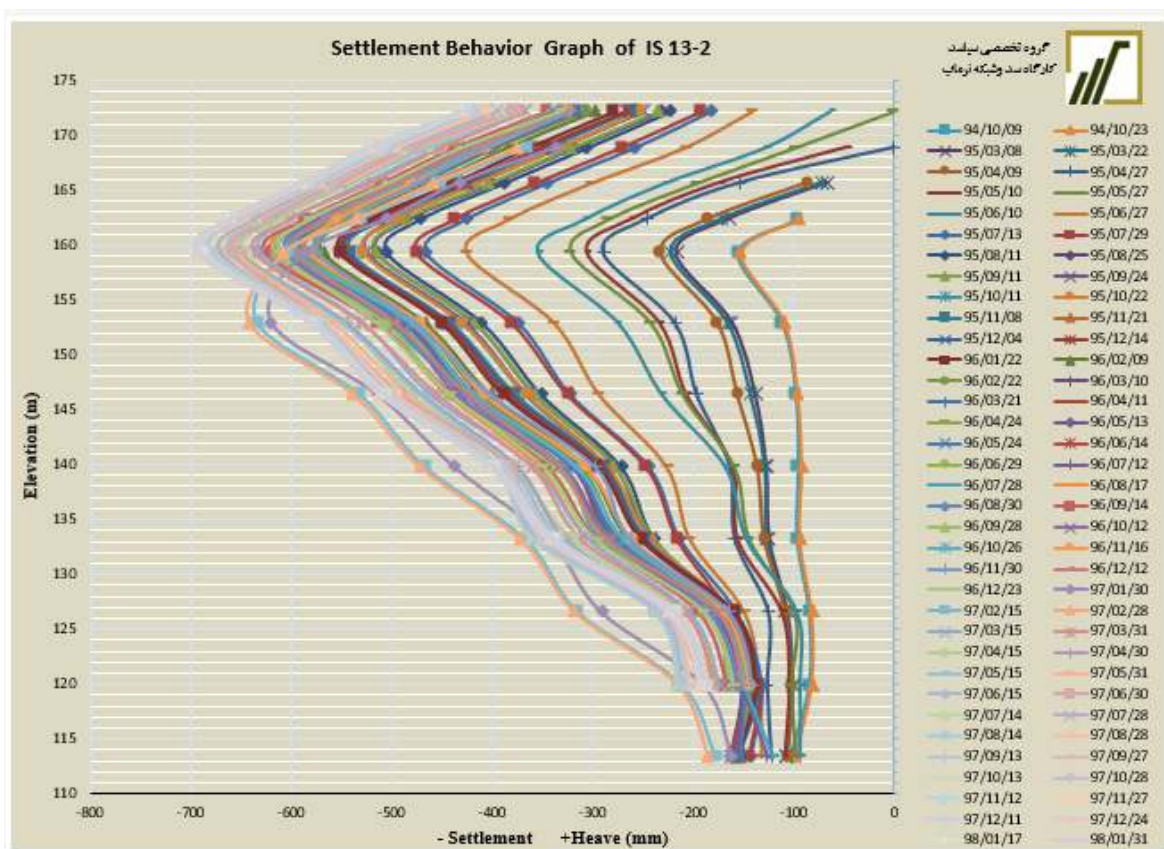
	P_1	P_2	P_3	P_4
L_4				.
L_3			.	۳۲۸
L_2		.	۲۴۹	۵۴۴
L_1	.	۲۴۵	۴۵۶	۶۹۱
پی				۵۹۳

جدول ۵-۸- مرحله سوم محاسبه میزان نشست خاکریز در دوره احداث در نیمرخ عرضی ۱۹-۱۹

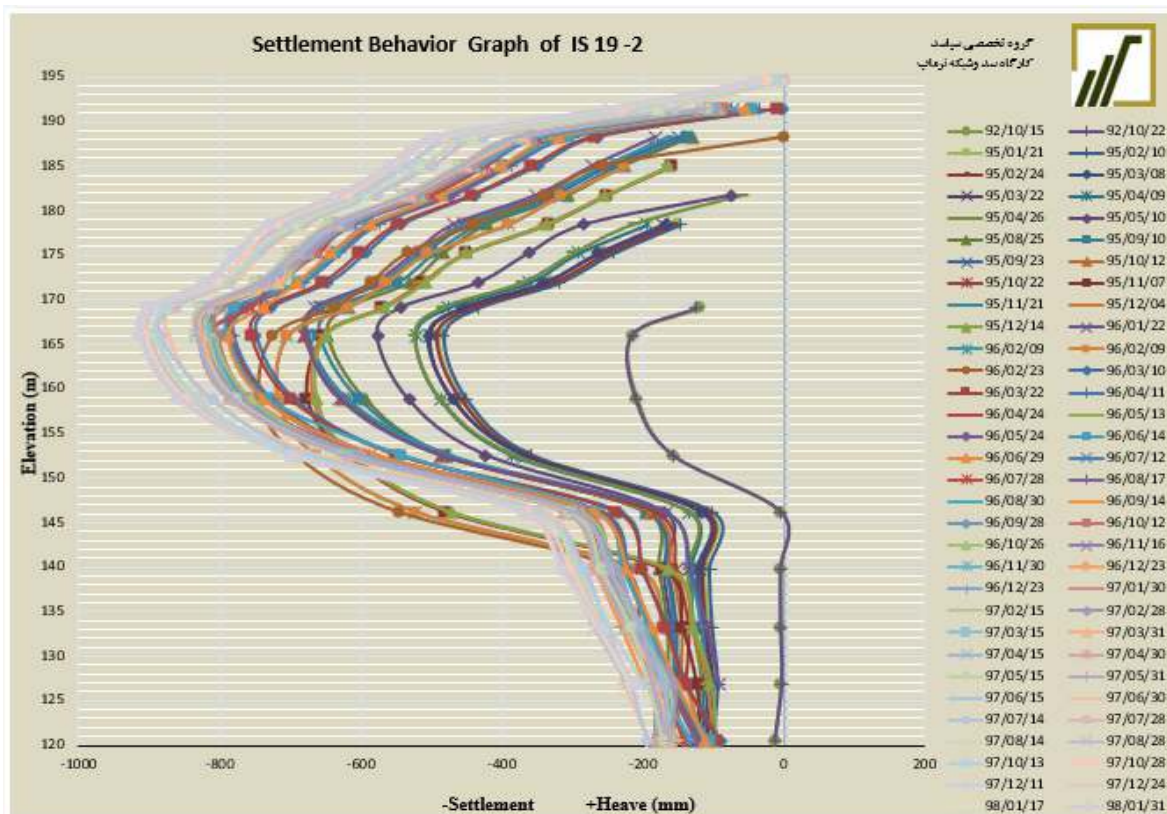
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
L_6						.
L_5					.	۵۶۱
L_4				.	۳۳۷	۸۳۵
L_3			.	۲۷۸	۵۴۸	۹۳۱
L_2		.	۱۰۱	۳۴۰	۵۵۵	۸۵۰
L_1	.	۹۲	۱۷۵	۳۶۷	۵۱۴	۷۰۸
پی						۴۰۷

در این مرحله نتایج به دست آمده با نتایج ابزار دقیق که در شکل های ۵-۲۴ و ۵-۲۵ نشان داده شده است، مقایسه و نتیجه به صورت شکل ۵-۲۶ و ۵-۲۷ نشان داده شده است. تراز کف سد از ارتفاع ۱۵۵ متر از سطح دریا شروع شده است.

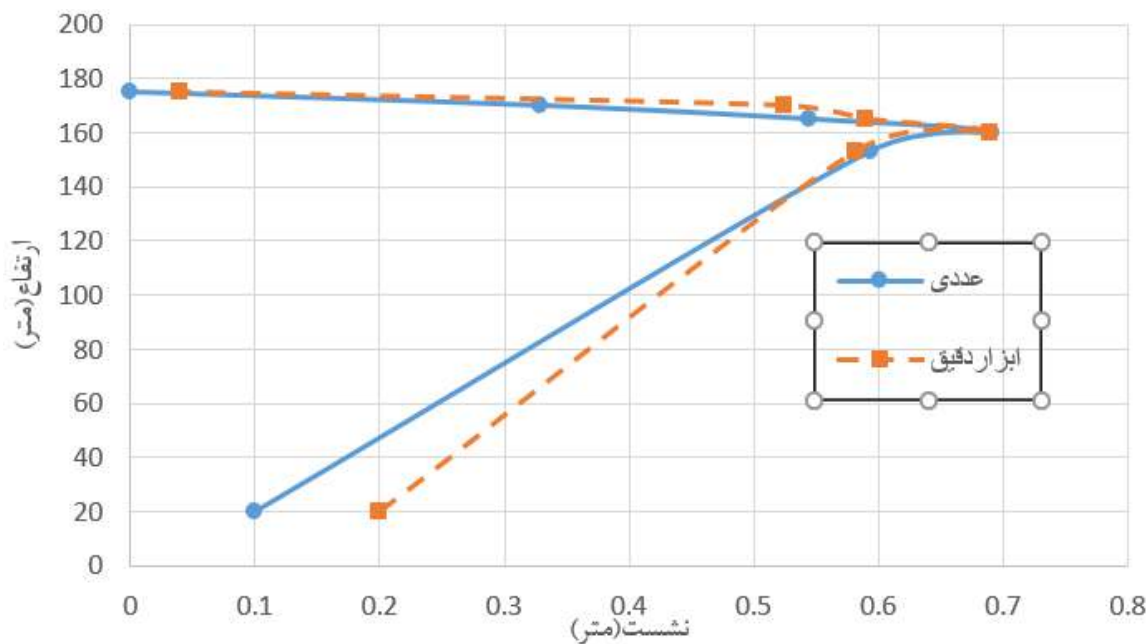
لازم به ذکر است که در ابتدا مقادیر به دست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر حاصل از ابزار دقیق اختلاف زیادی داشتند، بنابراین تحلیل برگشتی انجام شد. ابتدا با تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل، میزان تغییر نتایج حاصله در اثر تغییر هر یک از پارامترها تعیین شد و پارامترهای با تاثیر کمتر در آنالیز برگشتی حذف شد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مصالح نشان داد که نتایج حداکثر نشست در پوسته، به تغییر مقدار مدول الاستیسیته و ضریب پواسون حساسیت بسیار بالایی دارند. بنابراین در مرحله آنالیز برگشتی، میزان مدول الاستیسیته و ضریب پواسون تا جایی تغییر داده شد که رفتار واقعی سد، در مدل هم ایجاد شود.



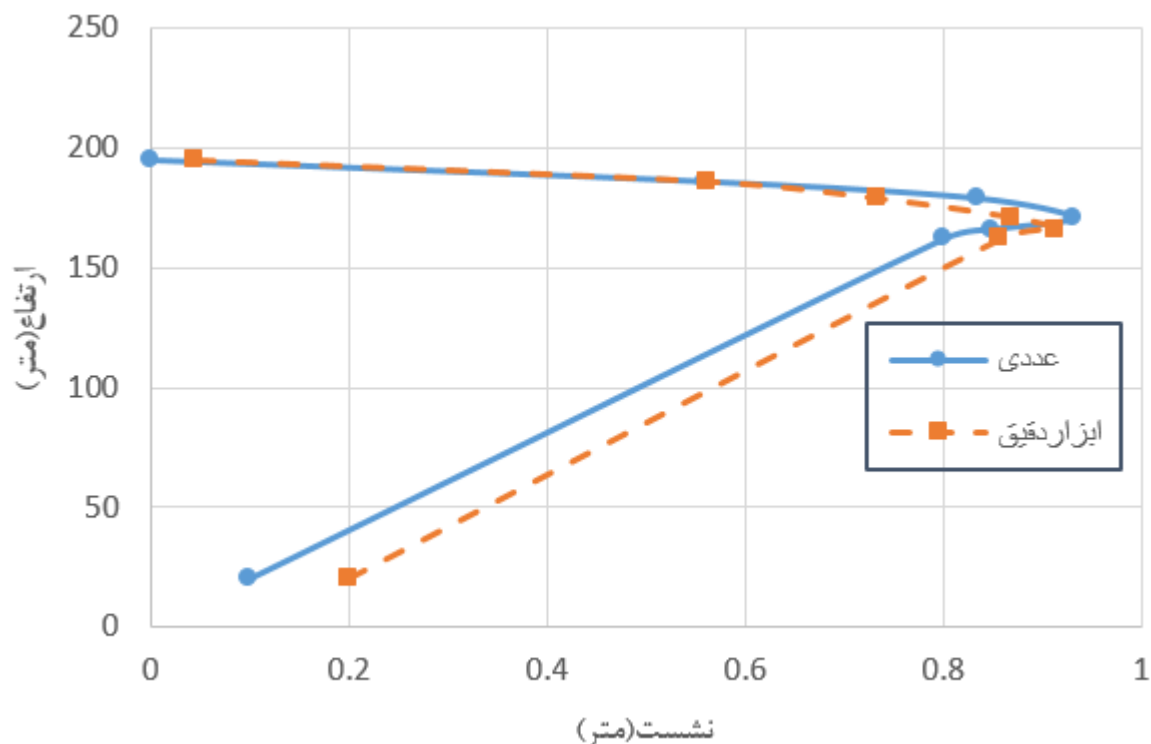
شکل ۵-۲۴- پروفیل های نشست سد نرماب در دوره ساخت برای مقطع ۱۳-۱۳ [۴۶].



شکل ۵- ۲۵- پروفیل‌های نشست سد نرماب در دوره ساخت برای مقطع ۱۹ - ۱۹ [۴۶].



شکل ۵- ۲۶- مقایسه نشست محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مقطع ۱۳ - ۱۳



شکل ۵- ۲۷ - مقایسه نشست محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مقطع ۱۹ - ۱۹

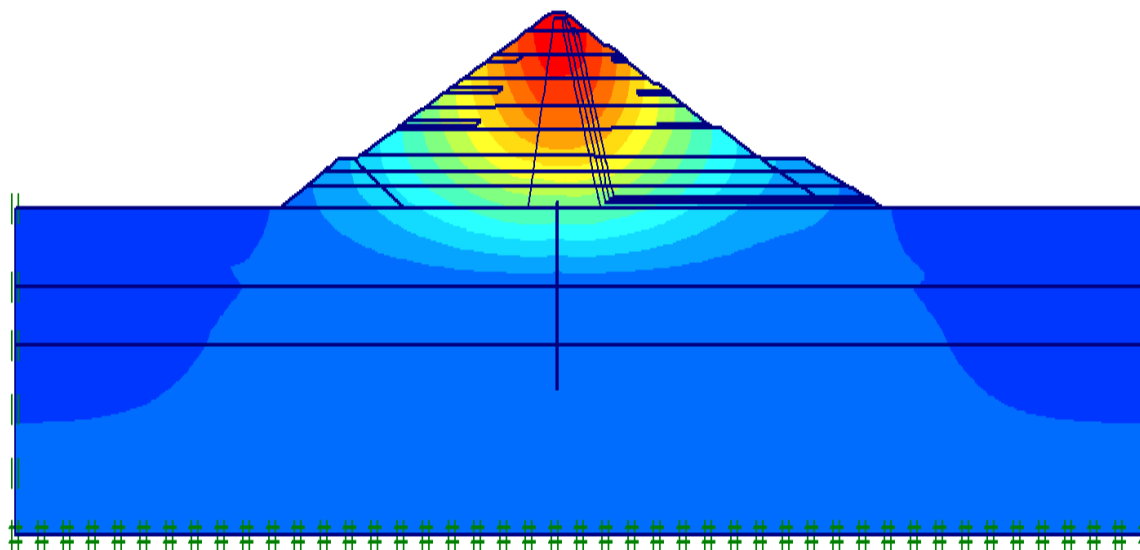
مقایسه نتایج جابجایی نشان می‌دهد که مدل عددی شبیه‌سازی شده با داده‌های ابزار دقیق هم‌خوانی خوبی دارد. مطابقت نشست پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده حاکی از آن است که پارامترهای طراحی سد، ویژگی‌های ژئومکانیکی و شبیه‌سازی رفتار مصالح با استفاده از مدل موهر-کولمب، به درستی در نظر گرفته شده است. بنابراین پس از تایید توانایی مدل عددی برای پیش‌بینی رفتار سد، در مراحل بعدی به تحلیل پایداری سد در مرحله پایان ساخت، آگیری و بلند مدت پرداخته می‌شود.

۵-۷- مدل‌سازی سد تا پایان ساخت

پس از انجام صحت‌سنجی و حصول اطمینان از هم‌خوانی داده‌های حاصل از مدل‌سازی با واقعیت، مدل‌سازی کامل بدنه سد را می‌توان انجام داد. برای مدل‌سازی سد تا پایان ساخت، سه لایه دیگر در نظر گرفته شده است که شامل دو لایه ۷ متری و یک لایه ۶ متری است. همچنین یک فاز برای محاسبه ضریب اطمینان^۱ در نظر

۱- Phi/c – reduction

گرفته شده است. با توجه به مدت زمان تحکیم لایه‌های قبلی، تعداد روزهای تحکیم هر لایه ۳۰۱ روز در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی‌ها، تغییر شکل قائم تجمعی سد نسبت به زمان برابر ۱/۲۸ متر است که در شکل ۵-۲۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۸ - توزیع جابه‌جایی‌های قائم پس از ساخت سد

حال برای به‌دست آوردن نمودار نشست-ارتفاع در شکل ۵-۲۹، همانند بخش قبل مراحل زیر انجام می‌شود تا نشست حداکثر به‌دست آید.

جدول ۵-۹- مرحله اول محاسبه میزان نشست خاکریز در پایان ساخت

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
L_9									۱۲۸۱
L_8								۱۱۳۵	۱۲۷۶
L_7							۹۲۱	۱۱۲۲	۱۲۴۸
L_6						۷۱۹	۹۰۴	۱۰۸۶	۱۱۹۷
L_5					۴۹۳	۶۹۷	۸۵۸	۱۰۱۷	۱۱۰۷
L_4				۳۵۱	۴۷۹	۶۶۰	۸۰۴	۹۴۱	۱۰۱۳
L_3			۱۸۸	۳۳۲	۴۴۰	۵۹۱	۷۱۲	۸۱۸	۸۶۷
L_2		۱۲۷	۱۸۲	۳۱۳	۴۰۷	۵۴۰	۶۴۶	۷۳۴	۷۷۲
L_1	۶۹	۱۲۲	۱۷۱	۲۸۳	۳۶۸	۴۸۲	۵۷۵	۶۴۵	۶۳۷

جدول ۵-۱۰- مرحله دوم محاسبه میزان نشست خاکریز در پایان ساخت

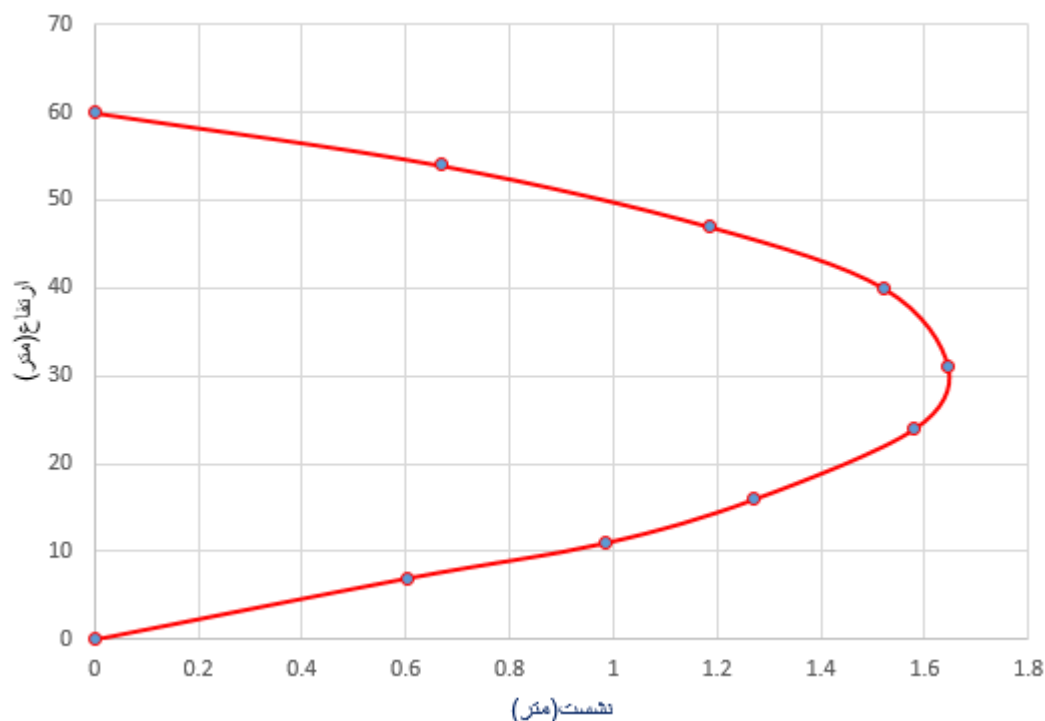
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
L_9									۵
L_8								۱۳	۲۸
L_7							۱۷	۳۶	۵۱
L_6						۲۲	۴۶	۶۹	۹۰
L_5					۱۴	۳۷	۵۴	۷۶	۹۴
L_4				۱۹	۳۹	۶۹	۹۲	۱۲۳	۱۴۶
L_3			۶	۱۹	۳۳	۵۱	۶۶	۸۴	۹۵
L_2		۵	۱۱	۳۰	۳۹	۵۸	۷۱	۸۹	۱۳۵
L_1	۶۹	۵۳	۴۹	۱۱۲	۸۵	۱۱۴	۹۳	۷۰	۲۸

جدول ۵-۱۱- مرحله سوم محاسبه میزان نشست خاکریز در پایان ساخت

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
L_9									۰
L_8								۰	۶۶۷
L_7							۰	۵۴۷	۱۱۸۶
L_6						۰	۴۲۲	۹۳۳	۱۵۲۱
L_5					۰	۳۲۹	۷۰۵	۱۱۴۷	۱۶۴۵
L_4				۰	۱۹۶	۴۸۸	۸۱۰	۱۱۷۶	۱۵۸۰
L_3			۰	۱۶۱	۳۱۸	۵۴۱	۷۷۱	۱۰۱۴	۱۲۷۲
L_2		۰	۶۰	۲۰۲	۳۲۶	۴۹۸	۶۶۲	۸۲۱	۹۸۴
L_1	۰	۵۳	۱۰۲	۲۱۴	۲۹۹	۴۱۳	۵۰۶	۵۷۶	۶۰۴

نشست حداکثر به دست آمده پس از پایان ساخت ۱/۶۴۵ متر است که در میانه ارتفاع سد رخ داده است که با

توجه به پیشینه مطالعات، نشان می دهد از این منظر، سد پس از پایان ساخت پایدار می ماند.

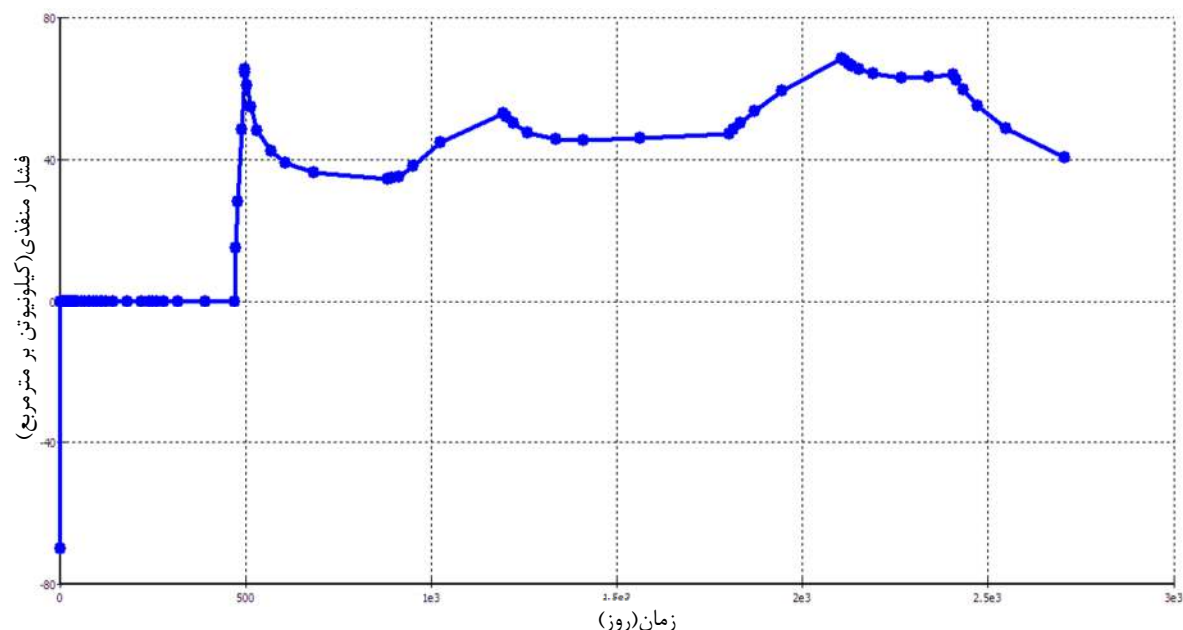


شکل ۵ - ۲۹ - نمودار نشست-ارتفاع پس از ساخت سد

۵ - ۷ - ۱ - تحلیل فشار آب منفذی

در طول ساخت سدهای خاکی ممکن است فشار آب منفذی اضافی در هسته سد به وجود آید، این فشار مربوط به آب مخزن سد و حرکت زه نیست بلکه مربوط به شرایط تراکم خاک و وجود آب درون منافذ خاک در هنگام احداث سد است و در این حالت وضعیت خاک اشباع کامل نیست. افزایش فشار آب منفذی در سدهای خاکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا افزایش فشار منفذی باعث کاهش تنش موثر می‌شود و در اثر آن مقاومت برشی خاک به دلیل رابطه مستقیمی که با تنش موثر دارد، کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت برشی نیز باعث به خطر افتادن پایداری سد می‌شود. هم‌چنین افزایش فشار منفذی باعث می‌شود که در مرحله آبگیری خطر گسیختگی هیدرولیکی وجود داشته باشد. در سد نرماب با پیشرفت خاکریزی و ساخت سد، به این علت که سرعت ساخت سد کم است، تا حدودی فشارهای منفذی ایجاد شده در پایان هر مرحله از ساخت، از بین می‌روند. در شکل ۵-۳۰ روند زایل شدن فشار آب منفذی را در سد نرماب در پایان ساخت نشان داده شده است. فشار آب با ساخت هر لایه از سد، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. این افزایش اولیه به علت افزایش تراز خاکریزی است و کاهش به این علت است که پس از ساخت هر لایه مدت زمانی برای تحکیم

لایه‌های زیرین آن در نظر گرفته شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در طول دوره ساخت تحکیم انجام می‌شود و فشار آب منفذی ایجاد شده بر اثر ساخت لایه‌های فوقانی، در پایان ساخت تقریباً از بین می‌رود.



شکل ۵ - ۳۰ - تغییرات فشار آب منفذی ضمن ساخت تا پایان ساخت

۵ - ۸ - مدل‌سازی مرحله آبگیری

پس از مرحله ساخت، سه مرحله برای مرحله آبگیری و همچنین یک فاز برای محاسبه ضریب اطمینان در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی در مرحله آبگیری رفتار مصالح بدنه در حالت CU و مدل رفتاری مصالح موهر-کولمب در نظر گرفته شده است:

مرحله اول : آبگیری تا ارتفاع ۱۰ متر با مدت زمان ۲۰۰ روز

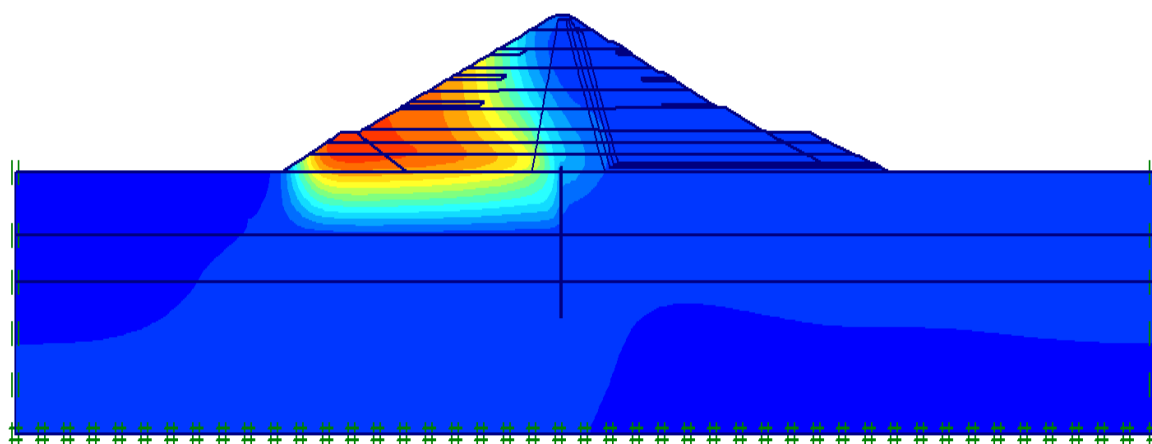
مرحله دوم : آبگیری تا ارتفاع ۳۰ متر با مدت زمان ۲۰۰ روز

مرحله سوم : آبگیری تا ارتفاع ۵۵ متر با مدت زمان ۲۰۰ روز

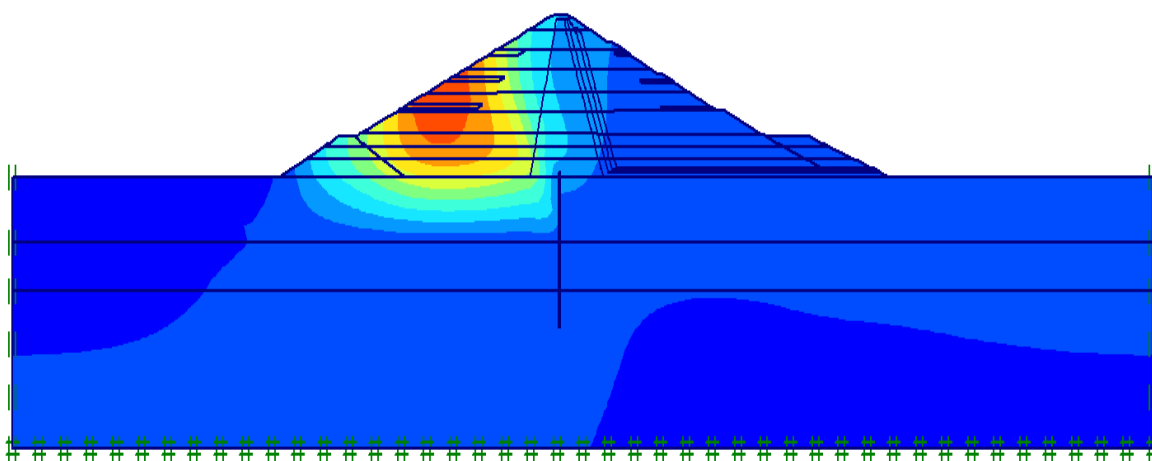
مرحله چهارم : محاسبه ضریب اطمینان

شکل‌های ۵-۳۱ تا ۵-۳۳، به ترتیب توزیع جابه‌جایی‌های قائم سد را در طی آبگیری مخزن با ترازهای ۱۰، ۳۰ و ۵۵ متر بالاتر از سطح بستر نشان می‌دهند. جابه‌جایی‌ها به ترتیب ۵۰، ۱۷۵ و ۲۶۳ میلی‌متر است که با توجه به افزایش تراز آب مخزن به تدریج افزایش یافته است و همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است بیشترین

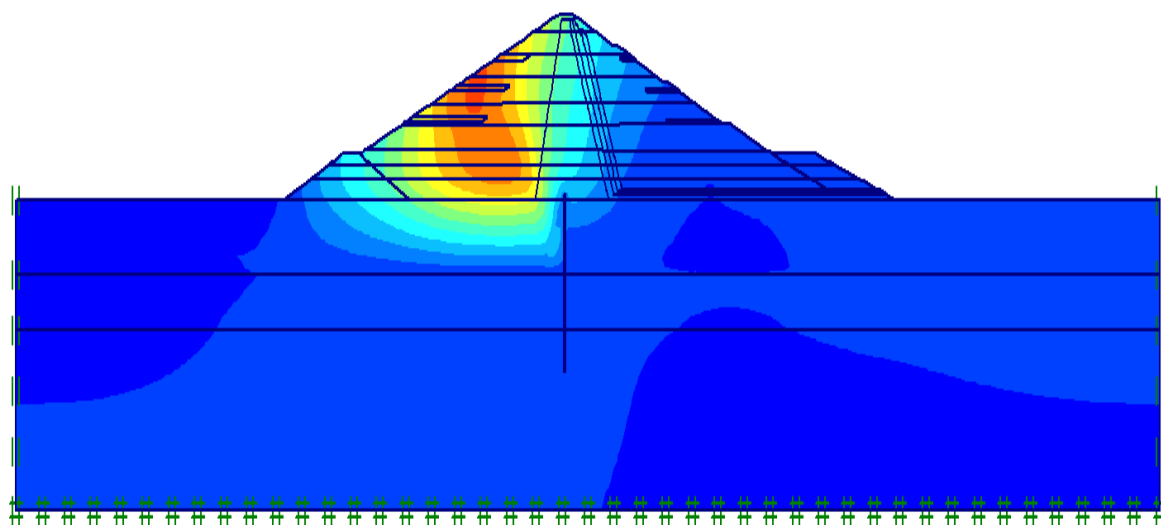
تغییر شکل‌ها در پوسته بالادست سد صورت گرفته است. پوسته بالادست پس از آبیگری سد، اشباع شده و با برقراری نیروهای بالابرنده، تنش‌های موثر آن کاهش می‌یابد و این امر سبب تورم مصالح می‌شود. برآیند تورم ناشی از کاهش تنش‌های موثر و نشست ناشی از رمبش مصالح، تغییر مکان‌های پوسته بالادست را رقم می‌زند. در پوسته پایین‌دست تغییرات چندانی پس از آبیگری رخ نداده و تنها به میزان اندکی به نشست‌های پایان ساخت افزوده شده است.



شکل ۵- ۳۱- تغییر شکل قایم سد در مرحله اول آبیگری



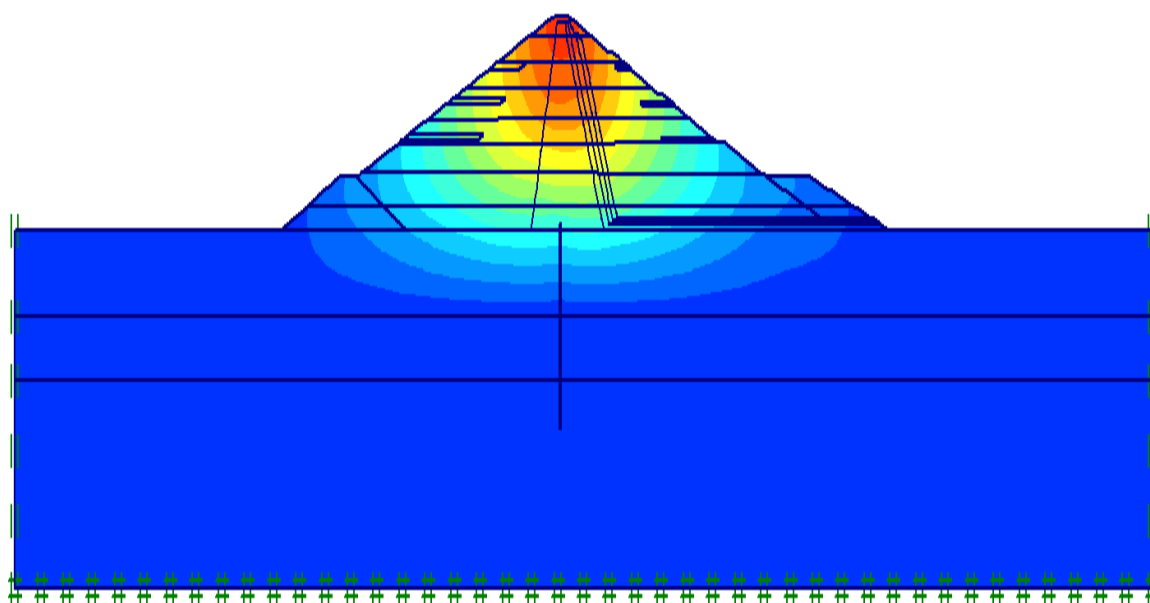
شکل ۵- ۳۲- تغییر شکل قایم سد در مرحله دوم آبیگری



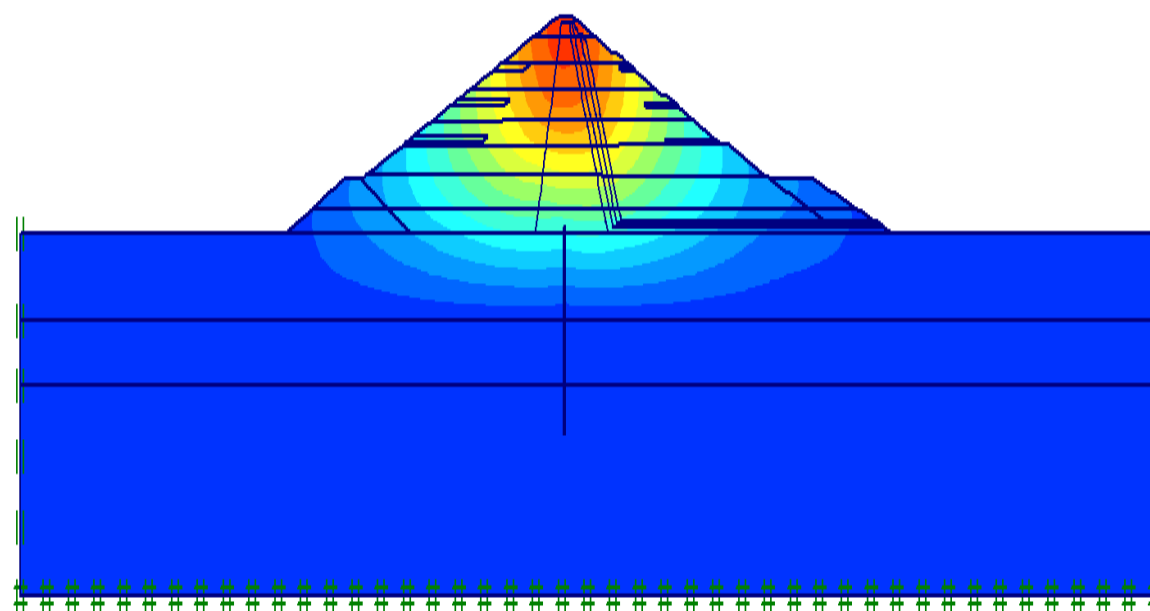
شکل ۵-۳۳ - تغییر شکل قایم سد در مرحله سوم آبیگری

۵-۹- تحلیل رفتار بلندمدت سد

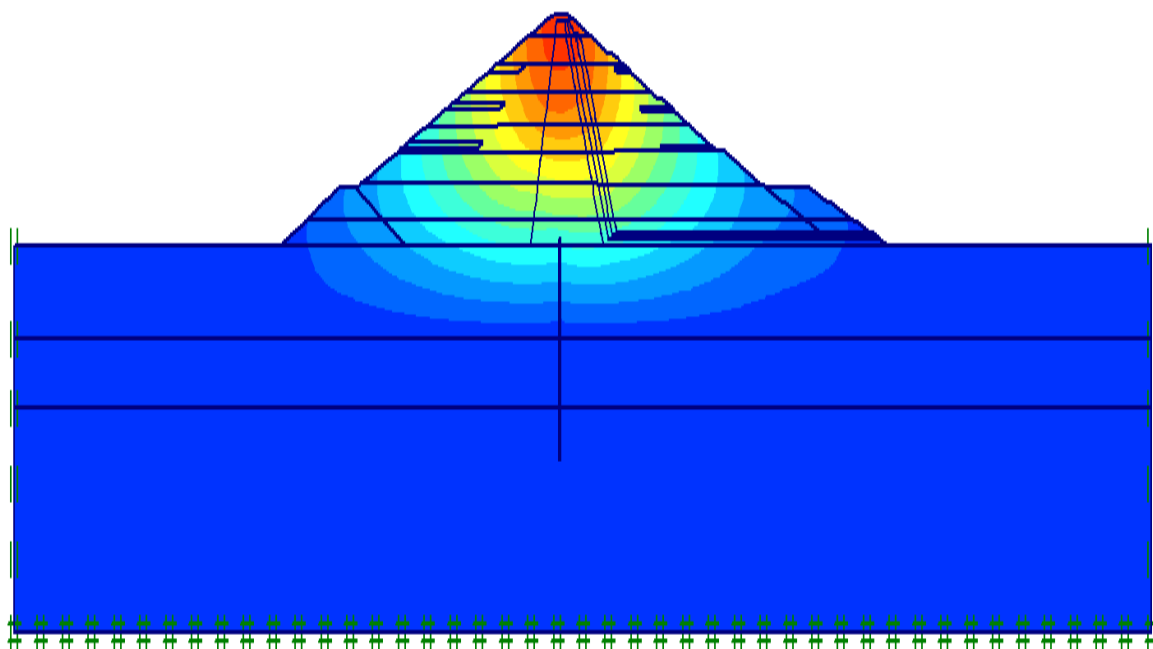
پس از ساخت سد، رفتار سد به منظور بررسی پایداری آن در بلندمدت تحلیل شده است. پس از ساخت کامل بدنه سد، به ترتیب چهار مرحله دیگر برای ۱ سال، ۵ سال، ۱۰ سال و ۳۰ سال پس از ساخت سد، تعریف شده است. مدل رفتاری مصالح موهر-کولمب و در حالت CU در نظر گرفته شده است. میزان جابجایی سد یک سال، پنج سال، ده سال و بیست سال پس از ساخت به ترتیب $1/7$ ، 2 ، $1/1$ و $2/2$ متر به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان سد نرماب تمایل به ثبات داشته و به سمت پایداری پیش رفته است. حاصل این نتایج در شکل‌های ۵-۳۴ تا ۵-۳۸ نشان داده شده است.



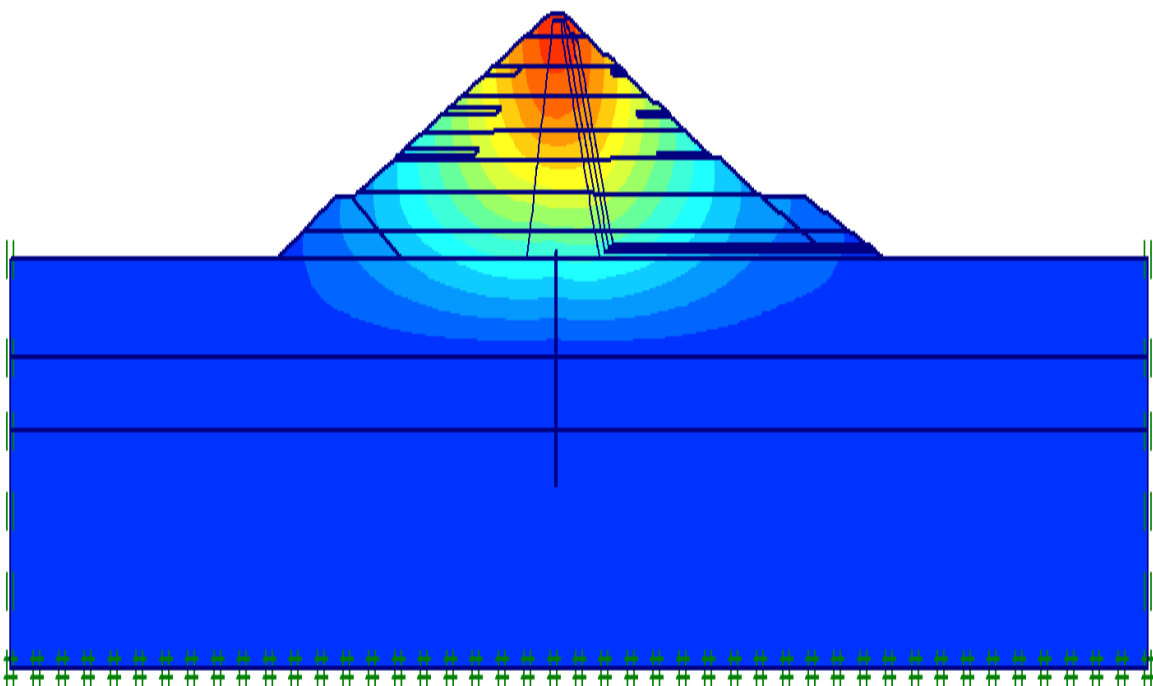
شکل ۵-۳۴- محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل یک سال پس از ساخت سد



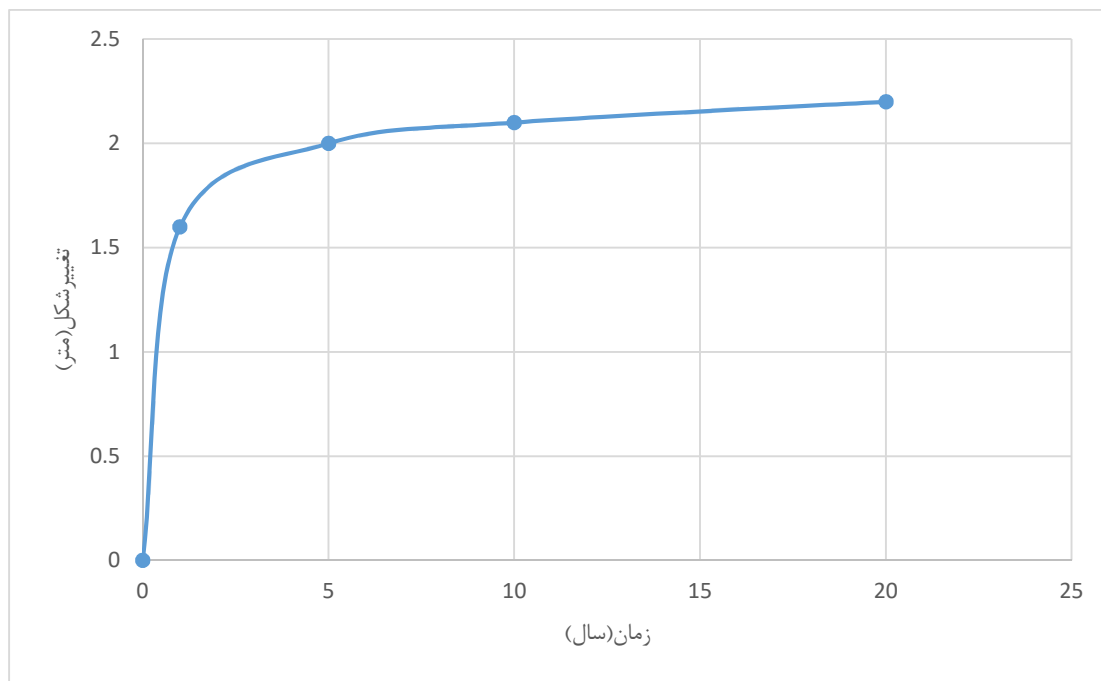
شکل ۵-۳۵- محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل پنج سال پس از ساخت سد



شکل ۵-۳۶- محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل ده سال پس از ساخت سد



شکل ۵-۳۷- محدوده توزیع جابه‌جایی‌های کل بیست سال پس از ساخت سد



شکل ۵-۳۸- نمودار تغییر شکل در برابر زمان

۵-۱۰- جمع بندی

در این فصل به تحلیل نشست سد خاکی نرماب در مرحله ساخت، آبیگری و بلندمدت پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که رفتار سد در این مراحل قابل قبول بوده است و سد پایدار باقی خواهد ماند.

فصل هشتم

نتیجہ گیری و پیشہاوا

۶ - ۱ - مقدمه

از آنجا که برای ساخت و اجرای سازه‌های عظیمی چون سدها، زمان و هزینه قابل توجهی صرف می‌شود، نگهداری و حفظ پایداری و کارایی این سازه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین به منظور پایش این سازه‌ها از وسایل و ابزارهای سخت افزاری (ابزار دقیق) و نیز نرم‌افزاری (تحلیل با استفاده از روش‌های عددی) به صورت مستمر استفاده می‌شود. حفاظت، مراقبت و کنترل رفتار سد نه تنها حفظ ثروت و سرمایه ملی و افزایش طول عمر آن را به همراه دارد، بلکه از لحاظ ایمنی و حفظ جان انسان‌ها و طبیعت نیز بسیار مهم است. با استفاده از ابزارگذاری و برنامه‌ریزی رفتارنگاری و نیز تحلیل‌های نرم‌افزاری، می‌توان پدیده‌ها و عوامل مخرب سد را شناسایی نمود. استفاده از ابزاردقیق و آنالیز برگشتی در بررسی عملکرد سد در حین ساخت و همچنین در ارزیابی پارامترهای طراحی و کنترل رفتار سد از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است و امروزه استفاده از آن در طراحی‌های مهندسی رو به افزایش است.

۶ - ۲ - نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات به دست آمده از ابزاردقیق سد خاکی نرماب و نیز با کمک مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های عددی، ارزیابی جامعی از عملکرد سد در دوران ساخت، اولین آبگیری و بلندمدت ارائه شده است. در این تحقیق در خصوص مواردی چون برآورد نشست سد، کنترل صحت فرضیات طراحی، تحلیل رفتار سد تا پایان ساخت، آبگیری و بلندمدت، اطمینان از قابل پذیرش بودن رفتارسد، ارائه معیارهای دقیق‌تر برای طراحی‌های آینده، نتایج مفیدی حاصل شده است.

مهم‌ترین نتایج را می‌توان در قالب گزاره‌های زیر بیان نمود:

- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و ابزاردقیق نشان داد که سازگاری قابل قبولی بین آن‌ها وجود دارد.
- مدل موهر-کولمب از ساده‌ترین مدل‌های رفتاری خاک است و از آنجایی که در این مدل تمام پارامترهای اساسی خاک در کلیه حالات رفتاری اعم از خمیری و کشسان وجود دارد، برای مدل کردن تمام حالات رفتاری

خاک مناسب است. در این تحقیق انطباق خوب نتایج به دست آمده از ابزار دقیق و نرم افزار موید انتخاب صحیح مدل‌های رفتاری خاک و هم‌چنین صحت پارامترها و فرضیات اولیه طراحی است.

- تحلیل رفتار سد پس از ساخت با بررسی ماکزیمم جابه‌جایی‌ها و ضریب اطمینان سد نشان می‌دهد که رفتار سد در حد قابل قبول بوده و سد پس از ساخت پایدار می‌ماند.

- خطوط تراز فشار آب منفذی تحلیل شده در ضمن ساخت سد نرماب نشان داد که در حین ساخت سد به این علت که سرعت ساخت سد کم است، فشارهای منفذی در هر مرحله از ساخت زایل می‌شوند.

- شبیه‌سازی عددی آبگیری مخزن در ترازهای ۱۰، ۳۰ و ۵۵ متر از سطح بستر به همراه بررسی جابه‌جایی‌ها و ضریب اطمینان نشان داد که رفتار سد در مرحله آبگیری قابل قبول بوده و سد پایدار می‌ماند.

- نمودار نشست-ارتفاع نشان داد که در سد نرماب بیشینه‌ی تغییرشکل در یک سوم میانی ارتفاع سد رخ می‌دهد و مقدار آن ۱/۶ متر است. با توجه به مطالعات USBR، ماکزیمم نشست سدهای خاکی در حین ساخت بین ۰ تا ۱ درصد و حداکثر بین ۲ تا ۴ درصد ارتفاع سد متغیر بوده است. بنابراین حداکثر نشست سد نرماب منطقی بوده است.

- در تحلیل بلندمدت بیشینه جابجایی سد پس از پنج سال به ۲ متر می‌رسد و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند که حاکی از ایمن بودن سد در دراز مدت است.

- تجربه سدسازی در جهان نشان می‌دهد اگر یک سد خاکی یا سنگریزه‌ای در هنگام ساخت و اولین آبگیری پایدار بماند، در طول مدت بهره‌برداری نیز احتمال ناپایداری کمتری خواهد داشت. بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده در این پایان نامه برای سد نرماب، این موضوع در خصوص این مورد مطالعاتی نیز مورد تایید است.

۶ - ۳ - پیشنهادها

در این تحقیق، با توجه به فرض امتداد خاکریز و بستر سد (به‌طور قابل ملاحظه) در راستای محور عمود بر صفحه، شبیه‌سازی‌های عددی با مدل‌سازی هندسی دو بعدی کرنش صفحه‌ای قابل اطمینان است. با این وجود، شبیه‌سازی‌های عددی تحقیق حاضر با مدل‌سازی هندسی سه بعدی، نتایج واقع‌گرایانه‌تری به دست خواهد

داد، که می‌توان از نرم‌افزارهای عددی سه بعدی نظیر FLAC 3D ، Abaqus و RS بهره برد. همچنین، در راستای این تحقیق می‌توان با شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی توسط نرم‌افزارهای مذکور، رفتار لرزه‌ای سد نرماب را نیز مورد بررسی قرار داد.

بنابراین با توجه به مطالب فوق می‌توان موضوعات زیر را نیز برای مطالعات آتی پیشنهاد داد:

- بررسی سه بعدی رفتار و پایداری سد خاکی نرماب در طی احداث و آبگیری
- بررسی سه بعدی رفتار و پایداری سد خاکی نرماب در طی افت سریع تراز آب مخزن
- بررسی سه بعدی رفتار و پایداری لرزه‌ای سد خاکی نرماب
- بررسی سه بعدی رفتار و پایداری لرزه‌ای سد خاکی نرماب در طی روانگرایی
- استفاده از مدل‌های رفتاری دیگر برای قسمت‌های مختلف بدنه سد و مقایسه با تحلیل‌های این پروژه

منابع

منابع

- [۱] قنبری، ع. "اصول مهندسی سدهای خاکی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه خوارزمی.
- [۲] وفائیان، م. (۱۳۸۵). "اطلاعات اجرایی در مورد سدهای خاکی"، چاپ دوم، انتشارات ارکان دانش اصفهان
- [۳] رحیمی، ح. (۱۳۹۲). "سدهای خاکی"، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران
- [۴] صدر نژاد، س.ا. (۱۳۸۴). "سدهای خاکی و تحلیل عددی آن"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر
- [۵] براجا، ام. داس. (۱۹۴۱). "اصول مهندسی ژئوتکنیک"، ترجمه شاپور طاحونی، چاپ شانزدهم، انتشارات پارس آیین
- [6] Naylor, D. J., Maranh, J. R., Neves, E. M. D. & Pinto, A. V. (1997). "A back-analysis of Beliche Dam," *Geotechnique*, 47(2), pp 221-233.
- [7] Szostak-chrzanowski, A. Massiera, M. Hoan, F. L. E. and Whitaker, C. (2002). "Verification of Material Parameters of Earthen Dams at Diamond Valley Lake Using Geodetic Measurements," pp. 1-13.
- [۸] شمسایی، ا. فرانکلین، ب. (۱۸ تا ۲۰ آذر ۱۳۸۱). "بررسی تغییرات تنش و جابجایی‌ها در سدهای خاکی در اثر آبیگری مخزن سد"، سومین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران.
- [9] Vladimirov, V. B., Zaretskii, Y. K., and Orekhov, V. B. (2003). "A mathematical model for monitoring the rock-earthen dam of the Hoa Binh hydraulic power system," *Power Technol. Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 161-166.
- [۱۰] نیرومند، ح. میرقاسمی، ع. ا. پاکزاد، م. (۶ و ۷ خرداد ۱۳۸۲). "رفتارنگاری بدنه سد کرخه در دوران ساخت با استفاده از نتایج ابزار دقیق و آنالیز برگشتی"، ۱۳۸۲ کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، تهران.
- [11] Turk, M. R. (2004). "Numerical Analyses of the Performance of the Drtjščica Earth Dam,".
- [12] Szostak-Chrzanowski, A. and Massiera, M. (2006). "Relation Between Monitoring And Design Aspects of Large Earth Dams," *3rd IAG/12th FIG Symp. Bad.*,
- [13] Bayrak, T. (2007). "Modelling the relationship between water level and vertical displacements on the Yamula Dam, Turkey," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 289-297.

- [14] Sukru, O. Berilgen, M. M. Kilic, H. Edil, T. B. and Kutay Ozaydin, I. (2007). "Staged construction and settlement of a dam founded on soft clay," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 133, no. 8, pp. 1003–1016.
- [۱۵] رحمانی، ک. پیروتی، ص. ارمغانی ا. "بررسی نشست سدهای خاکی با استفاده از روش المان محدود (بررسی نشست سد مهاباد بعنوان مطالعه موردی)، فصلنامه علمی - تخصصی معدن.
- [16] Szostak-chrzanowski, A. Chrzanowski, A. Massiera, M. Bazanowski, M. and Whitaker, C. (2008). "Study of a Long-Term Behavior of Large Earth Dam Combining Monitoring and Finite Element Analysis Results," *Water*, pp. 1–10.
- [17] Gikas V. and Sakellariou, M. (2008). "Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring," *Eng. Struct.*, vol. 30, no. 11, pp. 3074–3081.
- [۱۸] بدو، ک. افخمی فرد، م. ا. (اردیبهشت ۱۳۸۷). "تحلیل نشست سد شهر چای ارومیه در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، صفحات ۱ - ۸.
- [19] Participation, W. I. Symposium, N. Nikkhah, M. and Attaie, S. (2009). "Monitoring Instrumentation Results in Mollasadra Dam Embankment Under Operation Stage,".
- [20] Mohammadi, M. Nabati, M. and Noury, M. (2010). "Maku dam monitoring by comparison of results of instrumentantion and computer software," *J. Food, Agric. Environ.*, vol. 8, no. 3-4 PART 2, pp. 1010–1015,.
- [21] Vladimirov, V. B. Zaretskii, Yu. k. and Orekhov, V. B. (2003). "A Mathematical Model for Monitoring the Rock-Earthen Dam of the Hoa Binh Hydraulic Power System," *Comput. Geotech.*, vol. 37, no. 6, pp. 47–52.
- [۲۲] کیوانی پور، م. محرم پور، م. و مرندی، س. م. (پاییز ۱۳۹۰). "مقایسه عملکرد نرم افزار اجزا محدود plaxis در رفتارنگاری دو سد سیرجان و بار در مقایسه با نتایج ایزاردقیق"، چهارمین کنفرانس ملی عمران، تهران.
- [۲۳] طیب نژاد، ا. ر. میهن دوست، ر. (بهار ۱۳۸۰). "بررسی رفتار بدنه سد مارون با استفاده از نتایج شبکه‌ای ابزار دقیق در دوران ساخت و آب گیری"، مجله علمی - پژوهشی، دوره یازدهم.
- [۲۴] داوری، س. وفائیان م. و کوشا، ب. (۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۲). "تحلیل نشست سد خاکی سبلان در زمان ساخت و بهره‌برداری به روش اجزا محدود و مقایسه با داده‌های ابزاربندی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شیمی نیکبخت سیستان و بلوچستان.
- [۲۵] حسن زاده، م. بهروز سرند، ف. (۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۲). "بررسی نشست سد خاکی به کمک روش المان محدود و مقایسه نتایج با داده‌های ایزاردقیق (مطالعه‌ی موردی سد زنوز)، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران"، دانشکده مهندسی شیمی نیکبخت سیستان و بلوچستان.
- [26] Latifi, N. Marto, A. and Khari, M. (2012). "Monitoring results of Alborz earth dam during

- construction,” *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 17 S, no. June, pp. 2474–2484.
- [27] Derakhshandi, M. Pourbagherian, H. Baziar, M. Shariatmadari, N. and Sadeghpour, A. (2014). “Numerical analysis and monitoring of a rockfill dam at the end of construction (case study: Vanyar dam),” *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 326–337.
- [28] Arefpour S. and Engineering, C. (2015). “Monitoring of Alborz Earth Dam During The Operation , Using Calibration and Numerical Results,” vol. 3, no. 1, pp. 125–151.
- [29] Pantazis, G. Skarlatos, D. and Pelecanos, L. (2016). “Long-term geodetic monitoring of seasonal deformations of earth dams and relevant finite element verification,”.
- [30] Karoui, H. and Bouassida, M. (2016). “ Assessment of observed of behavior of Sidi El Barrak Dam (Tunisia),” *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9.
- [31] Ma, H. and Chi, F. (2016). “Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams,” *Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 498–509.
- [۳۲] مناف پور، م. قهرمان نژاد، م. (۹ و ۱۰ دی ۱۳۹۵). “ بررسی نشست‌های سد خاکی قلعه چای عجب شیر تحت بارگذاری‌های هیدرولیکی مختلف مخزن سد با استفاده از مدل عددی، همایش بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- [33] Rashidi M. and Haeri, S. M. (2017). “Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling,” *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 709–725.
- [۳۴] جعفری دهکردی، ص. علی محمدی نافچی، ر. (۲۵ اسفند ۹۶). “ ارزیابی نشست در سد خاکی چغاخور با استفاده از نرم افزار plaxis و sigma، اولین کنفرانس ملی توسعه پایدار در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران
- [35] Jostad, H. P. Palmieri, F. Andresen, L. and Boylan, N. (2018). “Numerical prediction and back-calculation of time-dependent behaviour of Ballina test embankment,” *Comput. Geotech.*, vol. 93, pp. 123–132.
- [36] Wu, Y. (2019). “Multi-physics coupling analysis of clayey core wall of high earth-rockfill dam,” *Springer Theses*.
- [37] Pelecanos, L. Skarlatos, D. & Pantazis, G. (2018). “Finite element analysis of the monitored long-term settlement behaviour of Kouris earth dam in Cyprus” , In *9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering* .
- [38] Rashidi, M. Heidari, M. and Azizyan, G. “Numerical analysis and Monitoring of an embankment dam during construction and first impounding case study: Siah Sang Dam,” *Sci. Iran.*, vol. 25, no. 2A, pp. 505–516, 2018.
- [۳۹] محمدی، ج. عبادی، ح. سپاس، ع. و میرنورانی، س. ع. (۱۸ و ۱۹ مهر ۱۳۹۷). “ ارزیابی نشست سد سنگریزه‌ای با هسته رسی و نیار در طول ساخت به روش اجزا محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق، اولین کنفرانس ملی مهندسی زیرساخت‌ها، دانشگاه ارومیه.

- [40] Beiranvand B. and Komasi, M. (2019). “Monitoring and numerical analysis of pore water pressure changes Eyvashan dam during the first dewatering period,” *J. Appl. Res. Water Wastewater*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7,.
- [41] Undayani, C. S. Partono, W. and Retno Wardani, S. P. (2019). “Displacement analysis of dam based on material parameters using numerical simulation and monitoring instrumentation,” *MATEC Web Conf.*, vol. 258, p. 05013.
- [42] Javanmard, M. Amiri, F. and Safavi, S. M. (2019). “Instrumentation readings versus numerical analysis of Taham Dam,” *Int. J. Eng. Trans. A Basics*, vol. 32, no. 1, pp. 28–35.
- [۴۳] براجا، ام. داس. (۱۹۹۹)، پی‌های سطحی، ظرفیت باربری و نشست، ترجمه عبدالمتمین ستایش، رحمان محسنی آستانی و مقداد رمضان زاده بادلی، چاپ پنجم، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه امیرکبیر
- [44] Braja M. Das, *advanced soil mechanics*, vol. 53, no. 9. 1997.
- [45] R. Fell, P. MacGregor, D. Stapledon, and G. Bell, *Geotechnical Engineering of Dams*. 2005.
- [۴۶] شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵، گزارش تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بدنه سد
- [۴۷] شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد مخزنی نرماب
- [۴۸] گزارش‌های مهندسين مشاور آب و توسعه پایدار، ۱۳۸۵
- [۴۹] T. Manual PLAXIS 2D, “Version 8.”

Abstract

The settlement is one of the factors that can change the conditions of dams and causes serious damage to them. Estimating the rates of these settlement play an important role in control of stability and deformation of the embankment dams during the construction and design of the body and its related structures.

In the present study, the aim is studying of the settlement of Narmab dam using numerical modeling during construction and the first impounding. The Narmab dam is a homogeneous embankment dam with a height of 60 m, width of 10 m and the crest length of 807 m and reservoir volume 115 m^3 , which is built in Minudasht County. To control settlement of the fondation and body of Narmab dam, five extensometer stations were used in order to measure settlement of the fondation and body of Narmab dam which 2 different sections were used in this study. using the numerical analysis and considering the geotechnical parameters of the foundation and body of the dam, geological profile, pressure due to overburden and the level of underground water, The settlement and total deformation of the foundation and body of the dam have been modeled. Numerical modeling was performed using PLAXIS software, taking into account the step-by-step construction and in accordance with the implementation process of the dam. The results show that the data obtained from numerical modeling were in good agreement with the instrumentation data. In addition, it is observed that the dam function is appropriate in relation to the pore pressure, settlement and stresses. The maximum settlement at the end of construction occurs in the middle third of the dam height and is 1.6 m. This value is approximately 3% of the dam height, indicating that the dam behavior is acceptable. The pore water pressure created by the layer-by-layer construction of the dam disappears at each stage due to the consolidation, so that at the end of the construction phase, it can be ignored. In the long-term analysis, the maximum displacement of the dam after five years reaches 2 meters and then it remains almost constant, which indicates that the dam is safe in the long term.

Key words: homogeneous embankment dam, settlement, numerical analysis, PLAXIS 2D software, instrumentation



Shahrood university of technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Rock mechanic Engineering

Analysis of behavior of Narmab embankment dam using numerical modeling

By : Elham Mohammadgholipoor

Supervisors

Dr seyed mohamad esmail Jalali

Dr Mehdi Norouzi

July 2020