





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی

عنوان:

بررسی عملکرد دیوار آب بند پی سد نرماب

نگارنده:

علی دلاکی

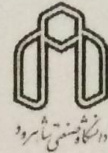
استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور:

دکتر علی عالی انوری

تیر ۱۳۹۸



شماره: ۹۶۹۱۴۱۰۸-۲۶
تاریخ: ۹۸/۰۴/۲۵

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای علی دلاکی با شماره دانشجویی ۹۶۰۶۶۲۴ رشته مهندسی معدن گرایش تونل و فضای زیرزمینی تحت عنوان بررسی عملکرد دیوار آببند پی سد نرماب در تاریخ ۹۸/۴/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: **فرب**...) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر علی عالی انوری		
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی نوروزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر شکرالله زارع	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیلات تکمیلی) باید از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم اثر

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند.

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان....

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است.

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

تشکر و قدردانی

در آغاز از استاد بزرگ و دانشمند جناب آقای سید محمد اسماعیل جلالی که راهنمایی این پایان نامه را به عهده داشته‌اند کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر علی عالی انوری که استاد مشاور این پایان نامه بوده‌اند نیز قدردانی می‌نمایم.

از داوران گرامی آقایان دکتر شکر ا... زارع و دکتر مجید نیکخواه که زحمت داوری و تصحیح این پایان نامه را به عهده داشتند کمال سپاس را دارم.

خالصانه از تمامی اساتید و معلمان و مدرسانی که در مقاطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده‌اند متشکرم.

از کلیه هم دانشگاهیان و همراهان عزیز و دوستان خوبم نهایت سپاس را دارم.

تعهد نامه

اینجانب علی دلاکی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن - مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی عملکرد دیوار آب بند پی سد نرماب تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 ارایه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار 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 بافت های 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 .

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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

برای کنترل تراوش پی، روش‌های مختلفی از جمله احداث پتوی نفوذناپذیر بالادست، ترانشه‌های رسی، پرده تزریق و دیوار آب‌بند وجود دارد. سد نرماب از نوع خاکی همگن به ارتفاع ۶۰ متر، طول تاج ۸۰۷ متر و حجم مخزن ۱۱۵ میلیون متر مکعب است. با توجه به عمق زیاد آبرفت پی سد مورد مطالعه، برداشت آبرفت تا رسیدن به سنگ بستر سالم میسر نبوده و استفاده از پرده تزریق آب‌بند به دلیل عدم تزریق‌پذیری جنس لایه‌های پی آن غیر ممکن است. بر این اساس در سد نرماب از دیوار آب‌بند برای کنترل تراوش در پی استفاده شده است. اساس این روش افزایش طول مسیر خطوط جریان و در نتیجه کاهش گرادیان هیدرولیکی و دبی جریان عبوری است. دیوارهای آب‌بند بر اساس وضعیت زمین‌شناسی پی و وضعیت فیزیکی و مکانیکی آن طراحی شده و اهمیت فوق‌العاده‌ای به منظور کنترل تراوش و ایمن‌سازی پی سد دارند. در این پروژه تحلیل تراوش از پی و بدنه سد در حال ساخت نرماب به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS انجام شده است. در سد نرماب نگرانی، در مورد دیوار آب‌بند است و لازم است، شرایط آن پایش شود و تمهیدات لازم برای تعمیر و تقویت دیوار آب‌بند در صورت نیاز انجام شود. در این تحقیق هدف، بررسی طرح آب‌بندی و عملکرد دیوار آب‌بند در سد خاکی نرماب واقع در شهر مینودشت استان گلستان، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS ۲D است. تحلیل تراوش انجام شده با نرم‌افزار Plaxis نشان دهنده پیوستگی در جریان پایدار و توزیع خطوط جریان و هم‌پتانسیل به صورت منطقی است. به لحاظ پایداری سد که به صورت جانبی برآورد شده نیز مشخص شده که سد دارای توان‌مندی در مهار تغییرشکل‌ها است. همچنین تحلیل تنش موثر نشان می‌دهد که روند اجرای دیوار آب‌بند به صورت پایین به بالا در طراحی سد با موفقیت اجرا شده و عملکرد آن نیز با کاهش تنش عمقی و هدایت جریان به محدوده سد تایید می‌شود. این مساله نشان دهنده کاهش نفوذپذیری رسوبات توسط دیوار آب‌بند است.

کلمات کلیدی: سد خاکی، دیوار آب‌بند، نشت، روش اجزای محدود، نرم‌افزار PLAXIS

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ضرورت و اهمیت تحقیق.....	۶
۳-۱- اهداف تحقیق.....	۸
۴-۱- روش تحقیق.....	۹
۵-۱- مراحل انجام کار.....	۹
۶-۱- ساختار پایان نامه.....	۱۰

فصل دوم: مبانی طراحی و اجرای دیوار آب بند

۱-۲- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- انواع دیوار آب بند.....	۱۵
۱-۲-۲- دیوار آب بند تمام قد.....	۱۵
۱-۱-۲-۲- ترانشه آب بند.....	۱۵
۲-۱-۲-۲- بتن پلاستیک.....	۱۵
۳-۱-۲-۲- ترانشه پر شده از گل روان.....	۱۶
۴-۱-۲-۲- دیوار دیافراگمی.....	۱۶
۵-۱-۲-۲- تزریق.....	۱۶
۶-۱-۲-۲- شمع کوبی.....	۱۷
۲-۲-۲- دیوار آب بند نیمه قد.....	۱۷
۳-۲- اجرای دیوارهای آب بند.....	۱۷

- ۱۸-۳-۲- ترانشه گل روان.....
- ۱۸-۳-۲- دیوار آب بند از جنس بتن معمولی یا بتن پلاستیک.....
- ۱۹-۳-۳- دیوار آب بند سیمان - بنتونیت.....
- ۲۰-۴-۲- احداث سکو.....
- ۲۱-۵-۲- اجرای مسیر راهنما.....
- ۲۲-۶-۲- حفاری بارت های دیوار آب بند.....
- ۲۳-۷-۲- روش های حفاری.....
- ۲۳-۱-۷-۲- گراب مکانیکی.....
- ۲۳-۲-۷-۲- گراب هیدرولیکی.....
- ۲۳-۳-۷-۲- ضربه ای.....
- ۲۴-۴-۷-۲- هیدروفرز.....
- ۲۸-۸-۲- معیار انتخاب مصالح دیوار آب بند.....
- ۲۸-۱-۸-۲- شرایط و مقررات سازه ای.....
- ۳۱-۲-۸-۲- شرایط زمین.....
- ۳۲-۳-۸-۲- شرایط محلی.....
- ۳۳-۹-۲- اتصال دیوار آب بند به سازه و بستر نفوذناپذیر.....
- ۳۳-۱-۹-۲- اتصال در بالا.....
- ۳۴-۲-۹-۲- اتصال در کف.....
- ۳۵-۱۰-۲- شکل و ابعاد دیوار آب بند بتن پلاستیک.....
- ۳۵-۱۱-۲- بتن پلاستیک و ویژگی های آن.....
- ۳۶-۱-۱۱-۲- مشخصات بتن پلاستیک.....
- ۳۷-۲-۱۱-۲- مدول الاستیسیته بتن پلاستیک.....

- ۳۷ ۲-۱۱-۳- ترکیب بتن پلاستیک
- ۳۹ ۲-۱۱-۴- تغییر شکل پذیری بتن پلاستیک
- ۳۹ ۲-۱۱-۴-۱- قوانین عمومی رفتاری
- ۴۱ ۲-۱۱-۴-۲- عوامل مؤثر در تغییر شکل
- ۴۲ ۲-۱۱-۵- مقاومت بتن پلاستیک
- ۴۳ ۲-۱۱-۵-۱- عوامل مؤثر در میزان مقاومت
- ۴۳ ۲-۱۱-۶- نفوذ پذیری بتن پلاستیک
- ۴۴ ۲-۱۱-۶-۱- عوامل مؤثر بر نفوذ پذیری
- ۴۵ ۲-۱۱-۷- فرسایش بتن پلاستیک
- ۴۶ ۲-۱۲- سابقه موضوع
- ۵۸ ۲-۱۳- جمع بندی

فصل سوم: معرفی ساختگاه سد نرماب و اجزای سد

- ۶۰ ۳-۱- معرفی سد
- ۶۱ ۳-۲- موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی
- ۶۴ ۳-۲-۱- معرفی ارکان پروژه
- ۶۵ ۳-۲-۲- شناسنامه طرح
- ۶۵ ۳-۳- زمین شناسی عمومی
- ۶۷ ۳-۴- زمین شناسی مهندسی
- ۶۷ ۳-۴-۱- زمین ریخت شناسی
- ۶۸ ۳-۴-۲- سنگ چینه شناسی
- ۶۸ ۳-۴-۲-۱- سازندهای ناپیوسته

۶۹	.....	۳-۴-۲- سنگ بستر ساختگاه سد
۶۹	.....	۳-۴-۳- زمین ساخت ساختگاه سد
۷۲	.....	۳-۵- خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ پی
۷۲	.....	۳-۵-۱- نحوه عملیات حفاری های اکتشافی
۷۲	.....	۳-۵-۲- موقعیت گمانه های اکتشافی
۷۳	.....	۳-۵-۳- مواد پوششی
۷۴	.....	۳-۵-۴- بافت تراکمی
۷۴	.....	۳-۵-۵- نفوذپذیری در آبرفت های بستر رودخانه و مواد لسی در تکیه گاه ها
۷۶	.....	۳-۵-۶- نفوذپذیری سنگ بستر
۷۷	.....	۳-۵-۷- کیفیت سنگ بستر
۷۷	.....	۳-۵-۸- هیدروژئولوژی ساختگاه سد
۷۹	.....	۳-۶- مشخصات کلی دیوار های آب بند پروژه
۸۰	.....	۳-۷-۱- دیوار آب بند بتن پلاستیک سد نرماب
۸۰	.....	۳-۷-۱- روش اجرا
۸۴	.....	۳-۷-۲- مصالح مورد نیاز
۸۵	.....	۳-۷-۳- تجهیزات کارگاه حفاری دیوار آب بند
۸۵	.....	۳-۷-۴- تهیه و نحوه استفاده از دوغاب بنتونیت در سد مورد بررسی
۸۷	.....	۳-۷-۵- بتن پلاستیک
۸۸	.....	۳-۸- جمع بندی

فصل چهارم: شبیه سازی های عددی و تحلیل نتایج

۹۰	۴-۱- مقدمه
----	-------	------------

- ۹۰-۲-۴ طراحی دیوار آب بند و آنالیز بازگشتی.....
- ۹۱-۳-۴ رویکرد عددی مورد استفاده در تحلیل.....
- ۱۰۲-۱-۳-۴ مدل مکانیکی برای قبل از اجرای دیوار آب بند.....
- ۱۱۰-۲-۳-۴ مدل مکانیکی برای بعد از اجرای دیوار آب بند.....
- ۱۱۹-۳-۳-۴ تحلیل تراوش در بدنه و بستر سد.....
- ۱۲۱-۴-۳-۴ بررسی عملکرد دیوار آب بند.....
- ۱۲۷-۵-۳-۴ ابزار دقیق نرماب.....
- ۱۳۲-۶-۳-۴ انجام صحت سنجی و کالیبراسیون داده ها.....

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۳۶-۱-۵ نتیجه گیری.....
- ۱۳۸-۲-۵ پیشنهادات.....
- ۱۴۰-منابع و مأخذ.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- نحوه اجرای ترانشه گل روان ۱۸
- شکل ۲-۲- نحوه اجرای دیوار آب بند معمولی یا پلاستیکی ۱۹
- شکل ۳-۲- نحوه اجرای دیوارهای سیمان - بنتونیتی ۱۹
- شکل ۴-۲- ترتیب حفاری گمانه هادی ا، پانل اولیه II و پانل ثانویه III در یک پروژه ۲۰
- شکل ۵-۲- احداث سکو و مسیر راهنما ۲۰
- شکل ۶-۲- ابعاد گایدوال ۲۱
- شکل ۷-۲- پلات فورم سد گلستان و گایدوال دیوار آب بند سد پارام اهر ۲۱
- شکل ۸-۲- عملیات تریپان زنی سد شهریار میانه ۲۲
- شکل ۹-۲- هم پوشانی بارت های اولیه و ثانویه ۲۳
- شکل ۱۰-۲- گراب مکانیکی ۲۴
- شکل ۱۱-۲- گراب هیدرولیکی ۲۴
- شکل ۱۲-۲- دستگاه ضربه ای گردش معکوس ۲۵
- شکل ۱۳-۲- دستگاه هیدروفرز ۲۵
- شکل ۱۴-۲- قسمت های مختلف ابزار حفاری دستگاه هیدروفرز ۲۷

- شکل ۲-۱۵- نحوه اتصال دیوار آب بند در بالا (سازه فوقانی)..... ۳۴
- شکل ۲-۱۶- نمودار تنش - کرنش و مدول الاستیسیته برای بتن پلاستیک..... ۴۰
- شکل ۲-۱۷- نمودار عمومی تنش- کرنش بتن پلاستیک..... ۴۰
- شکل ۲-۱۸- آزمایش سه محوری بر روی بتن پلاستیک..... ۴۱
- شکل ۲-۱۹- آزمایش سه محوری بر روی بتن پلاستیک ۴۲
- شکل ۲-۲۰- تأثیر نسبت C/W و مواد مضاف در نفوذپذیری مصالح بتن پلاستیک..... ۴۴
- شکل ۳-۱- موقعیت سد نرماب..... ۶۲
- شکل ۳-۲- پلان سد نرماب..... ۶۳
- شکل ۳-۳- تصویر ماهواره‌ای محدوده طرح..... ۶۳
- شکل ۳-۴- نمایی از سد نرماب..... ۶۴
- شکل ۳-۵- نقشه زمین‌شناسی ساختگاه سد نرماب..... ۶۷
- شکل ۳-۶- نقشه موقعیت مقاطع و گمانه‌های اکتشافی..... ۷۲
- شکل ۳-۷- نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی..... ۷۹
- شکل ۳-۸- انواع کاترهای دستگاه هیدروفرز برای شرایط مختلف ژئولوژیکی..... ۸۲
- شکل ۳-۹- دستگاه هیدروفرز BC-۵۰..... ۸۲
- شکل ۳-۱۰- چگونگی پانل بندی دیوار آب‌بند بر اساس روش P و S..... ۸۳
- شکل ۳-۱۱- نمایی از یک پانل دیوار آب بند..... ۸۳
- شکل ۳-۱۲- چرخه حفاری، ماسه زدایی و انتقال گل بنتونیت تازه به پانل..... ۸۴

- شکل ۴-۱- مدل هندسی تهیه شده برای شرایط سد قبل از اجرای دیوار آب بند.۹۴
- شکل ۴-۲- تعریف شرایط مرزی برای مدل هندسی تهیه شده سد قبل از اجرای دیوار آب بند.۹۴
- شکل ۴-۳- مدل هندسی تهیه شده برای شرایط سد بعد از اجرای دیوار آب بند.۹۵
- شکل ۴-۴- تعریف شرایط مرزی برای مدل هندسی تهیه شده سد بعد از اجرای دیوار آب بند.۹۶
- شکل ۴-۵- وضعیت تانسورهای تنش در فضای سه بعدی مور - کولمب.۹۸
- شکل ۴-۶- نتایج تعریف مدل رفتاری و تخصیص خواص به مدل قبل از اجرای آب بند.۹۸
- شکل ۴-۷- نتایج تعریف مدل رفتاری و تخصیص خواص به مدل بعد از اجرای آب بند.۹۹
- شکل ۴-۸- وضعیت توزیع تنش برجا در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۰
- شکل ۴-۹- وضعیت فشار آب منفذی اولیه در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۰
- شکل ۴-۱۰- وضعیت توزیع تنش برجا در محدوده سد بعد از اجرای آب بند.۱۰۱
- شکل ۴-۱۱- وضعیت فشار آب منفذی اولیه در محدوده سد بعد از اجرای آب بند.۱۰۱
- شکل ۴-۱۲- وضعیت تغییرشکل و جابجایی کل در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۳
- شکل ۴-۱۳- وضعیت جابجایی افقی ناشی از جریان پایدار در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۳
- شکل ۴-۱۴- وضعیت جابجایی قائم ناشی از جریان پایدار در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۴
- شکل ۴-۱۵- وضعیت تنش برجا کل بعد از آبدگیری در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۵
- شکل ۴-۱۶- وضعیت تنش برجا موثر بعد از آبدگیری در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۵
- شکل ۴-۱۷- وضعیت توزیع تنش برشی بعد از آبدگیری در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۶
- شکل ۴-۱۸- وضعیت کرنش کل در محدوده سد قبل از اجرای آب بند.۱۰۶

- شکل ۴-۱۹- وضعیت فشار آب منفذی نهایی در محدوده سد قبل از اجرای آب بند..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۰- وضعیت هد فعال آب زیرزمینی در محدوده سد قبل از اجرای آب بند..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۱- وضعیت درجه اشباع شدگی طی آبدگیری در محدوده سد قبل از اجرای آب بند..... ۱۰۸
- شکل ۴-۲۲- وضعیت جریان سیال در محدوده سد قبل از اجرای آب بند..... ۱۰۸
- شکل ۴-۲۳- وضعیت توزیع نقاط پلاستیک در محدوده سد قبل از اجرای آب بند..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۴- وضعیت تغییرشکل و جابجایی کل در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آب بند..... ۱۱۱
- شکل ۴-۲۵- وضعیت جابجایی افقی ناشی از جریان پایدار در محدوده سد بعد از اجرای آب بند... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۶- وضعیت جابجایی قائم ناشی از جریان پایدار در محدوده سد بعد از اجرای آب بند... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۷- وضعیت تنش برجا کل بعد از آبدگیری در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۸- وضعیت توزیع تنش برشی بعد از آبدگیری در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۹- وضعیت کرنش کل در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۴
- شکل ۴-۳۰- وضعیت کرنش برشی در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۴
- شکل ۴-۳۱- وضعیت فشار آب منفذی نهایی در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۵
- شکل ۴-۳۲- وضعیت هد فعال آب زیرزمینی در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۵
- شکل ۴-۳۳- وضعیت درجه اشباع شدگی طی آبدگیری در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۶
- شکل ۴-۳۴- وضعیت جریان سیال در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۶
- شکل ۴-۳۵- وضعیت توزیع نقاط پلاستیک در محدوده سد بعد از اجرای آب بند..... ۱۱۸
- شکل ۴-۳۶- وضعیت توزیع خطوط هم پتانسیل در محدوده سد و دیوار آب بند..... ۱۲۰

- شکل ۴-۳۷- وضعیت کنتورهای حرکت جریان در محدوده سد و دیوار آب بند..... ۱۲۰
- شکل ۴-۳۸- وضعیت توزیع تنش برشی نهایی بعد از لحاظ نمودن جریان انتقالی در محدوده سد و دیوار آب بند..... ۱۲۱
- شکل ۴-۳۹- وضعیت جابجایی در محدوده هسته سد..... ۱۲۲
- شکل ۴-۴۰- وضعیت کرنش در محدوده هسته سد..... ۱۲۳
- شکل ۴-۴۱- وضعیت تنش در محدوده هسته سد..... ۱۲۴
- شکل ۴-۴۲- وضعیت فشار آب منفذی فعال در محدوده هسته سد..... ۱۲۵
- شکل ۴-۴۳- وضعیت هد فعال آب زیرزمینی در محدوده هسته سد..... ۱۲۶
- شکل ۴-۴۴- مقاطع عرضی بدنه سد..... ۱۳۰
- شکل ۴-۴۵- پایش های سلول فشار در مقطع عرضی شماره ۱۱..... ۱۳۱
- شکل ۴-۴۶- پایش های پیزومتر الکتریکی خاک در مقطع عرضی شماره ۱۱..... ۱۳۱
- شکل ۴-۴۷- پایش های نشست سنج در مقطع عرضی شماره ۱۱..... ۱۳۲
- شکل ۴-۴۸- وضعیت صحت سنجی میدان تنش در محدود هسته سد..... ۱۳۳
- شکل ۴-۴۹- وضعیت صحت سنجی فشار آب منفذی در محدود هسته سد..... ۱۳۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- میزان نفوذ پذیری برای مصالح نفوذ ناپذیر ۴۳
- جدول ۱-۳- شناسنامه طرح در یک نگاه ۶۵
- جدول ۲-۳- مشخصات دسته درزه‌ها در تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد نرماب ۷۰
- جدول ۳-۳- مشخصات دسته درزه‌ها در تکیه‌گاه راست ساختگاه سد نرماب ۷۱
- جدول ۴-۳- تغییرات و میانگین نفوذپذیری به روش لوفران در آبرفت‌های محدوده ساختگاه سد ۷۴
- جدول ۵-۳- ابعاد دیوارهای آب بند پروژه سد و شبکه نرماب ۷۶
- جدول ۶-۳- مشخصات دوغاب بنتونیت به کار رفته در سد مورد بررسی ۸۶
- جدول ۷-۳- نسبت های ارائه شده در طرح اختلاط بتن پلاستیک ۸۷
- جدول ۸-۳- ماهیت و تعداد دفعات کنترل های انجام شده بر روی سیمان ۸۸
- جدول ۱-۴- پارامترهای ورودی برای مدل سازی الاستوپلاستیک در Plaxis ۹۶
- جدول ۲-۴- پارامترهای ورودی برای شبیه سازی این مطالعه ۹۷
- جدول ۳-۴- تعداد و انواع ابزار ۱۲۸
- جدول ۴-۴- جدول تناوب حداقل قرائت های ابزار ۱۳۰

فصل اول

کلیات

سد سازی از دیرباز از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه دولت‌ها و جوامع بوده، تا جایی که توسعه صنعت سد سازی عاملی بسیار مهم در حفظ اقتدار، استقلال و اعمال قدرت یک دولت در مراودات سیاسی به خصوص در برابر کشورهای همسایه اش است. این موضوع با توجه به پدیده گرم شدن زمین، افزایش جمعیت و محدودیت منابع آب در آینده اهمیت ویژه‌ای به خود می‌گیرد، به گونه‌ای که اندیشمندان سیاسی، سال‌های آینده را سال‌های جنگ آب در جهان معرفی می‌کنند. این امر در کشورهایی نظیر ایران که بخش اعظمی از مساحت آن در ناحیه گرم و خشک بوده و میانگین بارشی پایینی ندارد از اهمیت دوچندانی بر خوردار است. موارد ذکر شده در کنار کاربردهای مهم دیگر سدسازی نظیر تولید انرژی، کنترل سیلاب، استفاده‌های گردشگری، کشاورزی و... سبب می‌شود سد سازی همواره از جمله راهبردی‌ترین موارد در کانون توجه ویژه دولت‌ها و ملت‌ها باشد [رحیمی، ۱۳۹۲].

سدهای خاکی به دلیل کاربرد مصالح ارزان قیمت، اجرای ساده و امکان اجرای آن‌ها بر روی بسترهای آبرفتی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. سدهای خاکی یکی از قدیمی‌ترین تأسیسات ساختمانی هستند که انسان به دلیل نیازهای اولیه‌اش در زمینه عملیات کشاورزی و تأمین آب شرب مبادرت به ساخت آن کرده است. امروزه با پیشرفت علم مکانیک خاک و توسعه امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، سدهای خاکی به یکی از مهم‌ترین سازه‌های حفظ و ذخیره آب تبدیل شده‌اند [حقیقت‌اندیش و همکاران، ۱۳۹۴].

شرایط اقلیمی کشور و نیاز آن به احداث سازه‌های ذخیره آب، احداث سدهای مخزنی را در دستور کار برنامه‌ریزان قرار داده است. این سدها به عنوان سازه‌های مهارکننده آب‌های سطحی و کنترل سیلاب، امکان استفاده بیشتر از آب رودخانه‌ها را فراهم می‌نمایند. آب ذخیره شده در پشت سد به دلیل داشتن پتانسیل بالا همیشه به دنبال راهی برای فرار است و بنابراین در توده متخلخل پی و بدنه سدهای خاکی نفوذ کرده و به طرف پایین دست نشت پیدا می‌کند [حسینی و سی‌وسه‌مرده، ۲۰۱۵]. چنانچه در

قسمت انتهایی سدها، سرعت نشت جریان آب افزایش یابد، ممکن است این سرعت بالا سبب حرکت ذرات خاک شده و پدیده رگاب ایجاد کند. این پدیده تسریع کننده پدیده مهم دیگری تحت عنوان زیرشویی می شود. نتایج مطالعات محققین مختلف نشان می دهد که هر چه اثرات مخرب نشت تقلیل یابد، به همان اندازه هزینه های ساخت و نگهداری این سد کاهش می یابد. یکی از مهم ترین نکات در مراحل طراحی و ساخت سد های خاکی نشت از بدنه و پی سد است [داسیلوا، ۲۰۰۶]. بنابراین محاسبه میزان نشت آب در بدنه و پی سدهای خاکی و ارزیابی روش های کنترل یا کاهش این مشکل، ضروری است [سلیمانی و اخترپور، ۲۰۱۱].

با توجه به اهمیت پایداری سدهای خاکی باید تراوش زیاد در پی آن ها به شکل مناسبی محدود شود. برای جلوگیری از مشکلاتی که بر اثر نشت آب به داخل بدنه و پی سدهای خاکی ایجاد می شود، باید کوشش کرد تا با ایجاد مانع در مسیر جریان نشت و کاهش انرژی، مقدار آن را به حداقل رساند. روش هایی که در حال حاضر به منظور کاهش مقدار نشت در بدنه و پی سدهای خاکی مورد استفاده مهندسان قرار دارد به شرح زیر است [Mahmood، ۲۰۱۲]:

- استفاده از هسته با نفوذپذیری بسیار کم در بدنه سد

- استفاده از رویه آب بند در سطح بالادست سد

- استفاده از ترانشه و دیوار آب بند در پی

- استفاده از پرده تزریق در پی

- استفاده از دیوارهای آب بند نازک (دیافراگم) فلزی، بتنی و غیره.

به طور کلی آب بندی و کنترل نشت در سدهای خاکی معمولاً با دو روش انجام می شود، اولین روش، شامل کاهش مقدار نشت با ایجاد دیوار آب بند، ترانشه های دوغابی، پرده های تزریق، دیوار بتنی، دیوار دیافراگمی و غیره است، که تقریباً در همه ی این روش ها با طولانی شدن مسیر نشت، مقادیر نشت

کاهش می‌یابد. این طولانی شدن مسیر باعث کاهش گرادیان هیدرولیکی می‌شود و در نتیجه جریان نشت کاهش می‌یابد. دومین روش، ایجاد خروجی امن برای نشت آب است، مانند: فیلترها، زهکش‌های ماسه‌ای، ستون‌های سنگی، خندق‌ها و چاه‌های کمکی [کیانی‌فر، ۱۳۹۰].

روش مناسب برای آب‌بندی یک سد به عوامل مختلفی بستگی دارد یکی از روش‌های معمول برای کنترل تراوش و کاهش نفوذ پذیری پی سدها استفاده از دیوارهای آب‌بند است. عمده‌ترین کاربرد دیوارهای آب‌بند در پی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای است. این گونه المان‌های آب‌بند از تغییر شکل پذیری بالا، نفوذپذیری کم و مقاومت فشاری متناسب با فشارهای اعمال شده برخوردار بوده و استفاده از آنها در خاک‌های ریزشی، زمین‌های سست و اشباع، خاک‌های ریزدانه و نیز گاهی جهت ترمیم هسته رسی سدها مقرون به صرفه‌تر از سایر روش‌ها است. وقتی که پروژه یک سد در زمین‌های با خاک ضعیف مطرح می‌شود باید دیوار آب‌بند انعطاف پذیر و نرم باشد تا در مقابل تغییر مکان‌های زمین مقاوم باشد و مقاومت کافی برای تحمل تنش‌های ناشی از وزن سد را داشته باشد. ضمن اینکه بایستی به وظیفه کنترل تراوش خود به طور صحیح عمل نماید.

دیوارهای آب‌بند بر اساس وضعیت زمین شناسی پی و وضعیت فیزیکی و مکانیکی آن طراحی شده و اهمیت فوق العاده ای در جهت کنترل تراوش و ایمن سازی پی سد دارند. با توجه به امتداد یافتن دیوار آب‌بند در داخل هسته رسی جهت آب‌بندی مطلوب‌تر، و همچنین با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ پی، اندرکنش هسته و پی با دیوار آب‌بند در حالات مختلف بارگذاری استاتیکی و دینامیکی حائز اهمیت فراوان است. عدم کارایی دیوار آب‌بند، غالباً در اثر گسیختگی و یا شکستگی دیوار آب‌بند در محل اتصال دیوار آب‌بند و هسته سد پیش می‌آید که نتیجه آن نشت زیاد از قاعده هسته و بعضاً تخریب سد است [سلیمانی و اخترپور، ۲۰۱۱].

دیوار آب‌بند دیواری است با نفوذپذیری پایین که در پی سد ساخته می‌شود و تا داخل یک لایه نفوذناپذیر ادامه می‌یابد تا بتواند جایگزین مصالح نامناسب بستر نفوذپذیر شده و از جریان زهاب زیر

سد جلوگیری نماید. انتخاب مواد بر اساس عملکرد دیوار، امکانات ساخت و ساز و مشخصات زمین اطراف پیش‌بینی می‌شود. مصالح جایگزین شده در زمان اجرای دیوار آب‌بند، مخلوطی از شن و ماسه، بنتونیت، سیمان و آب است که به نام بتن پلاستیک شناخته می‌شود. این بتن از آن جهت پلاستیک نام‌گذاری شده است که قابلیت تغییر شکل‌پذیری و محدوده رفتار پلاستیک بالایی دارد. عامل اصلی ایجاد کننده ویژگی پلاستیک پودر بنتونیت است. هدف استفاده از بتن پلاستیک، نفوذپذیری پایین و مدول الاستیسیته نزدیک به خواص مصالح محیط مجاور با انتخاب مناسب اجزای بتن پلاستیک است [اصدقی اصل، ۱۳۸۰].

با توجه به این‌که تخریب تعداد قابل توجهی از سدها ناشی از عدم کارایی مطلوب دیوار آب‌بند بوده است، می‌توان به اهمیت ویژه این‌گونه سازه‌ها پی برد. عدم کارایی دیوار آب‌بند، غالباً در اثر گسیختگی و یا شکستگی دیوار و یا نفوذ آب در محل اتصال دیوار آب‌بند و هسته سد پیش می‌آید که نتیجه‌ی آن نشست هسته و در برخی موارد تخریب سد است. آب‌بندهای بتن پلاستیک به علت کارایی مناسب، شکل‌پذیری و نفوذناپذیری مطلوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. امتیاز مهم این‌گونه دیوارهای آب‌بند استفاده از آن‌ها در تعمیر هسته آسیب دیده سدهای خاکی و سنگریزه‌ای است. ضمناً این‌گونه آب‌بندها در مکان‌هایی که سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بالاست از ارزش زیادی برخوردارند. در نهایت اهداف عمومی که دیوار آب‌بند با بتن پلاستیک تأمین می‌نمایند عبارتند از: کاهش تراوش، کاهش فشار بالازدگی^۱، کاهش گرادیان هیدرولیکی آب خروجی از پایین دست سازه و از بین بردن خطر آب شستگی ذرات پایین دست سازه و عدم خالی شدن تدریجی زیر پی سازه [قضاوی و همکاران، ۱۳۸۳].

سد نرماب در شهرستان مینودشت استان گلستان از نوع خاکی همگن با هسته‌ی رسی بوده و دارای حجم مفید مخزن ۱۲۵ میلیون مترمکعب است. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۶۰ متر، عرض تاج آن ۱۰ متر و طول تاج سد ۸۰۷ متر و همچنین عرض پی ۴۱۲ متر است. هدف از احداث سد نرماب، علاوه

^۱ uplift

بر تأمین حداقل نیاز زیست محیطی رودخانه‌های منطقه، تأمین حدود ۸۵ میلیون متر مکعب آب مورد نیاز بخش کشاورزی در شبکه نرماب، ۵۶ میلیون مترمکعب نیاز کشاورزی در پایین دست سد وشمگیر، ۲۳ میلیون مترمکعب نیاز شرب و ۲ میلیون مترمکعب نیز برای تأمین نیازهای بخش صنایع است. همچنین مجموع منابع آب زیرزمینی قابل مصرف در فعالیت‌های کشاورزی شبکه در شرایط توسعه حدود ۷۹ میلیون مترمکعب خواهد بود که به صورت تلفیقی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. ذخیره سازی رژیم سیلابی رودخانه‌های نرماب، چهل‌چای و خرمالو در مخزن سد نرماب و رهاسازی آن مطابق با نیازهای زراعی در اراضی پایاب، اصلاح سیستم‌های توزیع آب از طریق احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی مدرن، توسعه کشاورزی در اراضی تحت پوشش، رها سازی آب تنظیم شده برای قسمتی از اراضی تحت پوشش سد وشمگیر، کاهش میزان رسوبات وارده به مخزن سد وشمگیر و بهبود وضعیت آن، استفاده صحیح از منابع آب زیرزمینی و تلفیق آن با آب سطحی و تأمین آب شرب و صنعت منطقه، از اهداف ساخت سد نرماب است [شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان].

با توجه به میزان اهمیت سد، طراحی مناسب آب‌بندی پی و تکیه‌گاه‌های سد نرماب، یکی از مسائل مهم و مورد توجه و بررسی قرار گرفته است، که می‌توان با مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی اقدامات انجام شده را بررسی و در نهایت راه‌کارهایی برای اصلاح دیوار آب‌بند ارائه کرد.

۱-۲- ضرورت و اهمیت تحقیق

کلیه سدها معمولاً در زمانی که آب در پشت آن‌ها ذخیره می‌شود، دارای مقداری نشت هستند که این میزان نشت باید از حد مجاز بیشتر نشود. از مسایل مهم در اجرای سدهای خاکی آب‌بندی پی و تکیه‌گاه‌های آن‌ها است. بنابراین برای مشخص شدن بهترین روش آب‌بندی و طراحی آن نیاز به تحقیقات دقیق درمورد نفوذپذیری لایه‌های موجود در پی و تکیه‌گاه‌های سد است.

از آنجا که سدها به ندرت روی زمین‌های کاملاً ناتراوا ساخته می‌شوند، بنابراین در اغلب موارد جریان آب از زیر سد وجود دارد. فرار آب ذخیره شده در پشت سدهای خاکی از طریق پی سد در صورتی که

کنترل مناسب وجود نداشته باشد، می‌تواند باعث بروز مشکلات جدی برای سد شود. بیش‌ترین مشکل، ناشی از افزایش گرادیان خروجی آب بوده است که سبب شناوری ذرات خاک در پاشنه‌ی سد و در نتیجه آغاز حرکت ذرات خاک می‌شود. کنترل تراوش از زیر پی سدها همان‌طور که در مقدمه بیان شد به روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد. جنس لایه‌های زمین در محل پی سد، میزان اهمیت سد، تکنولوژی اجرایی قابل دسترسی و عوامل اقتصادی از جمله عوامل موثر در انتخاب روش کنترل تراوش از زیر پی سد است. دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک به دلیل نفوذپذیری اندک، مقاومت کافی در مقابل تنش‌های وارده و قابلیت تغییر شکل‌پذیری بالایی که دارند می‌توانند کرنش‌های وارده از طرف پی تحت انواع بارگذاری‌های سد و مخزن و شرایط مختلف هیدرولیکی جریان را تحمل نمایند. با این حال به دلیل قرارگیری این دیوار در بستر آبرفتی گاه‌ها غیر همگن و نفوذ بخشی از این دیواره در هسته رسی سد خاکی، مسائل مختلفی از لحاظ رفتاری برای دیوار آب‌بند مطرح است. از جمله نشست دیوار آب‌بند طی گذشت زمان تحت تنش‌های ناشی از خاکریزی بالای آن، امکان بروز ترک هیدرولیکی در دیوار آب‌بند به دلیل ضخامت کم آن و بالا بودن گرادیان هیدرولیکی، خطر پدیده رگاب در پی، امکان نشست جریان آب از محل تماس دیوار آب‌بند با هسته رسی. از این رو بررسی رفتار دیوار آب‌بند بتن پلاستیک و عملکرد متقابل دیوار با جسم سد خاکی و پی مورد علاقه محققین و طراحان سدهای خاکی است [Deshmukh et al, ۱۹۸۷].

با توجه به این‌که در محل اتصال دیوار آب‌بند به هسته رسی، گرادیان هیدرولیکی بالایی وجود دارد و همچنین با گذشت زمان و فشار بیشتر خاکریز بالای دیوار، نشست قابل ملاحظه‌ای در خود دیوار اتفاق می‌افتد، احتمال وقوع پدیده فرسایش، نشست آب و وقوع ترک در دیوار در محل اتصال وجود دارد [Pashazadeh, ۲۰۱۱]. بنابراین یکی از مواردی که برای طرح هر سیستم آب‌بندی و به‌خصوص دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در سدهای خاکی باید مورد توجه قرار گیرد، اتصال آن با بدنه سد و طرح اختلاط بتن پلاستیک است. از این‌رو مدل‌سازی عددی سد به همراه پی و دیوار آب‌بند و نوع اتصال آن با هسته و انجام تحلیل‌های عددی تراوش، در برآورد و بررسی طرحی مناسب برای سیستم‌های

مختلف اتصال و نیز امکان بررسی تأثیر کیفی پارامترهای مهم دخیل در دبی عبوری و گرادیان هیدرولیکی ماکزیمم در محل اتصال، مفید است.

در حال حاضر در سد نرماب نگرانی، در مورد دیوار آببند است و لازم است شرایط آن پایش شود و تمهیدات لازم برای تعمیر و تقویت دیوار آببند در صورت نیاز انجام شود. معمولاً پس از احداث دیوار آببند، پایش انجام می‌شود تا چگونگی عملکرد دیوار مشخص شود تا در صورت نیاز تزریق انجام شود. یکی از مواردی که ممکن است با وجود آن‌ها نیاز به تزریق و یا هر اقدام ضروری دیگر باشد ایجاد پانلهایی در داخل دیوار آببند است که در صورت بازشدگی یا انحراف، تزریق انجام می‌شود. یکی دیگر از دلایل این است که، طراحی درست نباشد و یا این که کیفیت اجرا مناسب نباشد و آب-بندی به صورت کامل محقق نشود. مشکلات اجرایی در سه بخش تأمین مصالح، طرح اختلاط و مشکلات عملیاتی قابل بررسی است. عدم تأمین مصالح مناسب، طرح نامناسب اختلاط آن‌ها و در نهایت اجرای نامناسب دیوار آببند هر یک می‌تواند مشکلات جدی در عملکرد دیوار آببند به وجود آورد. همچنین در صورت اجرای مناسب دیوار آببند ممکن است با گذشت زمان دیوار آببند به دلیل جابه‌جایی‌های زمینی آسیب ببیند و در عمل وظیفه آببندی را به درستی انجام ندهد. از این رو بررسی عملکرد دیوار آببند پی سد نرماب یکی از مسائل دارای اهمیت است.

۱-۳- اهداف

سد مخزنی نرماب با اهداف ذخیره‌سازی رژیم سیلابی رودخانه‌های نرماب، چهل‌چای و خرمالو در مخزن سد نرماب و رهاسازی آن مطابق با نیازهای زراعی در اراضی پایاب، اصلاح سیستم‌های توزیع آب از طریق احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی مدرن، توسعه‌ی کشاورزی در اراضی تحت پوشش، رهاسازی آب تنظیم شده برای قسمتی از اراضی تحت پوشش سد وشمگیر، کاهش میزان رسوبات وارده به مخزن سد و بهبود وضعیت آن، استفاده‌ی صحیح از منابع آب زیرزمینی و تلفیق آن با آب سطحی و تأمین آب شرب و صنعت منطقه در دست احداث است. اما همان‌طور که گفته شد، ممکن

است پروژه احداث سد نرماب به دلیل عملکرد ضعیف دیوار آببند آن و در نتیجه فرار آب با شکست مواجهه شود. بنابر این اهداف انجام این پروژه عبارت‌اند از:

- بررسی طراحی دیوار آببند پی سد نرماب با توجه به داده‌های موجود

- بررسی چگونگی عملیات اجرایی و پایش حین اجرا

- مدل‌سازی و تحلیل عددی مدل

۱-۴- روش و مراحل انجام تحقیق

روش انجام تحقیق شامل مطالعات دفتری و بازدیدهای صحرایی و در نهایت تفسیر عددی داده‌ها و تحلیل نرم‌افزاری است. در این پایان‌نامه ابتدا گردآوری اطلاعات مربوط به طراحی، مصالح مورد استفاده، اجرا و پایش در هنگام اجرا انجام و سپس به تحلیل هر کدام از این اطلاعات پرداخته خواهد شد. در مطالعات دفتری با جمع‌آوری منابع، نقشه‌ها و داده‌های مرتبط با موضوع، هم‌زمان جدیدترین روش‌های اجرای دیوار آببند و میزان کارایی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله بعد اطلاعات تحلیل شده با طراحی مقایسه خواهد شد و در نهایت به بررسی عملکرد دیوار آببند و مقایسه عملکرد آن با حالت پیش‌بینی شده پرداخته خواهد شد. در پایان با ساخت یک مدل عددی اقدامات انجام شده تحلیل و بررسی خواهند شد. با انجام مطالعات میدانی و جمع‌آوری اطلاعات ابزارهای دقیق نصب شده در بدنه و پی سد از سایت سد نرماب و سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان و مهندسين مشاور طراح سد نرماب مدل‌سازی شده و مورد تحلیل عددی قرار گرفته و با استفاده از اطلاعات ابزارهای دقیق کار گذاشته شده در پی و بدنه سد، کالیبره می‌گردد و سپس رفتار دیوار آببند اجرا شده بتن پلاستیک مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۱-۵- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۵ فصل تنظیم شده است. در فصل اول به کلیات، اهمیت و اهداف تحقیق پرداخته شده است. فصل دوم مروری بر نگاشته‌ها و سوابق تحقیق در رابطه با موضوع پایان نامه است. در فصل سوم خصوصیات زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم با استفاده از نرم افزار plaxis مقدار نشت مدل سازی شده است و مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت در فصل نتایج به دست آمده جمع بندی و پیشنهادها ارائه می شود.

فصل دوم

مبانی طراحی و اجرای

دیوار آب‌بند

۲-۱ مقدمه

کنترل جریان تراوشی آب از پی و بدنه سدهای خاکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی، اجرا و بهره‌برداری از سدهای خاکی محسوب می‌شود. در میان روش‌های آب‌بندی و کنترل نشت در سدها می‌توان به روش‌های زیر اشاره نمود:

(۱) استفاده از پوشش نفوذ ناپذیر در بالادست

(۲) زهکشی

(۳) استفاده از پرده های آب‌بند

(۴) استفاده از دیوارهای آب‌بند درجا ریز

استفاده از دیوارهای آب‌بند در دو دهه ی اخیر به طور گسترده‌ای معمول شده است، روش اجرای این دیوارها عموماً به صورت حفاری یک ترانشه‌ی باریک (به اندازه‌ی ضخامت مورد نیاز دیوار) بدون استفاده از تکیه‌گاه جانبی (که به‌جای تکیه‌گاه جانبی از گل روان + آب استفاده می‌شود) و جایگزینی این مصالح با مصالح پرکننده‌ی خاصی که بعداً توضیح داده می‌شود، است. جزئیات طراحی و اجرای هر کدام از انواع دیوارها در بخش های بعدی توضیح داده می شود.

دیوارهای آب‌بند به انواع دیوارهایی گفته می‌شود که در زیر زمین به صورت پیوسته برای کنترل عبور و نشت آب از زیر سدها، دایک‌ها و ... ساخته می‌شوند [Ambraseys, ۱۹۶۷] و همچنین این دیوارها ممکن است برای جلوگیری از ریزش آب‌های زیرزمینی در داخل حفاری‌ها و خاکبرداری‌های در حین ساخت یا پس از آن و همچنین برای نگهداری آب‌های آلوده و خطرناک و جلوگیری از نشت آن به آب‌های زیرزمینی استفاده شود [Clough, ۱۹۶۶].

از مشخصات و امتیاز دیوار آب‌بند بتن پلاستیک می‌توان به نفوذ ناپذیری مطلوب، کارایی مناسب، ارزشمند بودن آن‌ها در مکان‌هایی که سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بالاست، استفاده از آن‌ها در تعمیر

هسته آسیب دیده سدهای خاکی و سنگریزه ای و شکل پذیری آنها اشاره کرد. کاربرد این دیوارها در کنترل تراوش در زیر سدها، ایجاد دیوار آببند حول یک ساختگاه و تخلیه آب از محل گودبرداری برای ساخت سازه مورد نظر، جلوگیری از پخش شدن مواد آلوده در آبهای زیرزمینی، در پیرامون یک ساختگاه به عنوان یک عامل مناسب میراکننده ارتعاشات مکانیکی یک پروژه مانند نیروگاه می- باشند. کاربرد اصلی آنها به عنوان دیوارهای آببند در زیر سدها است [کیانفر، ۱۳۹۵].

به طور کلی چهار نوع دیوار آببند وجود دارند که عبارتند از [کیانفر، ۱۳۹۵]:

۱. دیوارهای آببند از جنس خاک بنتونیت (SB)

۲. دیوارهای آببند از جنس سیمان - بنتونیت (CB)

۳. دیوارهای آببند از جنس بتن سخت یا معمولی

۴. دیوارهای آببند از جنس بتن نرم و پلاستیک

که بسته به مشخصات و شرایط طرح می توان از هر کدام از انواع فوق استفاده کرد. عمده تغییر شکل های وارده بر دیوار آببند در زیر سدها عبارتند از [کیانفر، ۱۳۹۵]:

الف - تغییر شکل های ناشی از نشست سازه (سد) تحت اثر وزن آن

ب- تغییر شکل های ناشی از نشست و خیز بستر پی در سازه (سد)

پ- بارهای اعمالی هنگام اجرا و بارهای ثانویه اعمالی در طول زمان بهره برداری که می- توانند سبب تغییر شکل های قائم و افقی گردند.

ت- بارهای ناشی از زلزله و انفجار و بارهای ناشی از خاک اطراف آببند که می توانند سبب تغییر شکل های قائم و افقی گردند.

بنابراین دیوار آب‌بند تحت اثر بارهای وارده باید بدون برداشتن ترک و از دست دادن آب‌بندی قادر به تحمل تغییر شکل‌های تحمیلی باشد [زوراسنا، ۱۳۸۶].

در بین دیوارهای آب‌بند، دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک به علت کارایی مناسب، شکل‌پذیری و نفوذناپذیری بالا، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. کار دیوار آب‌بند به ندرت توقف کامل تراوش زیر سد است، بلکه عمدتاً عهده دار جلوگیری از جریان‌های شدید است. عمده‌ترین وظیفه دیوار آب‌بند بتن پلاستیک، کنترل تراوش آب از زیر سد است. در مجموع با احداث دیوار آب‌بند بتن پلاستیک اهداف عمومی آب‌بندی زیر تأمین می‌شود [زوراسنا، ۱۳۸۶]:

(۱) کاهش تراوش

(۲) کاهش فشار برخاستی

(۳) عدم خالی شدن تدریجی خاک زیر سد در اثر آب شستگی

(۴) کاهش گرادیان هیدرولیکی آب خروجی از پایین دست سازه و از بین بردن خطر آب شستگی ذرات خاک در پایین دست

دیوار آب‌بند بتن پلاستیک متشکل از یک‌سری پانل مکعب مستطیل هم امتداد است که ارتفاع هر کدام از آن‌ها برابر با عمق لایه نفوذپذیر به علاوه عمق نفوذ در لایه تحتانی نفوذناپذیر است. نفوذ دیوار در لایه‌های تحتانی مثل سنگ بستر، جهت اتصال مناسب بین دیوار آب‌بند و لایه نفوذناپذیر صورت می‌گیرد.

طول دیوار آب‌بند نیز بستگی به طول منطقه‌ای دارد که قرار است دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در آن اجرا شود. مثلاً برای آب‌بندی پی سدها، طول دیوار آب‌بند بتن پلاستیکی بستگی به طول هسته سد در محل پی داشته و برای هر سدی مقدار مشخصی است. ضخامت پرده آب‌بند، تابعی از ضریب نفوذ پذیری بتن پلاستیک، گرادیان هیدرولیکی بحرانی و ضریب اطمینانی که طراح در نظر می‌گیرد، است.

البته در بسیاری از موارد امکانات اجرایی و ماشین آلات حفاری، ضخامت دیوار آب‌بند را به طراح تحمیل می‌کنند و در چنین حالتی طرح اختلاط، براساس ضخامت قابل اجرای دیوار آب‌بند ارائه می‌شود [Davidson و Graybeal، ۱۹۹۱].

۲-۲- انواع دیوارهای آب‌بند

کنترل تراوش از زیر پی سدها به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. جنس لایه‌های زمین در محل پی سد، میزان اهمیت سد و تکنولوژی اجرایی قابل دسترسی از جمله عوامل مؤثر در انتخاب روش کنترل تراوش هستند. پرده تزریق، آب‌بند سپری و دیوار آب‌بند از روش‌های اصلی و متداول کنترل تراوش از پی سدها هستند. به طور کلی دیوارهای آب‌بند را به تمام قد^۲، نیمه قد^۳ و پتوی غیر قابل نفوذ^۴ تقسیم می‌کنند. در ادامه هر یک از موارد بالا توضیح داده خواهد شد.

۲-۲-۱- دیوار آب‌بند تمام قد

دیوار آب‌بند تمام قد، تمام لایه نفوذپذیر را رد کرده و در داخل لایه نفوذ ناپذیر زیرین فرو می‌رود. انتخاب آن بستگی به میزان نفوذپذیری پی و لایه‌های زیرین آن، میزان آبی که تراوش می‌شود، مسائل ناشی از شدت تراوش آب در طولانی مدت و نهایتاً ارزش آب و مقایسه بین آب‌بند تمام قد با سایر گزینه‌ها دارد. انواع دیوار آب‌بند تمام قد در ادامه شرح داده می‌شود [Sherard، ۱۹۶۳]:

۲-۲-۱-۱- ترانشه آب‌بند^۵

کاربرد ترانشه آب‌بند در پی‌های نفوذپذیر کم عمق است. در شرایط لایه‌های قابل نفوذ با ضخامت کم، این روش یکی از اقتصادی‌ترین روش‌هاست [Sherard، ۱۹۶۳].

۲-۲-۱-۲- بتن پلاستیک^۶

^۲ Positive cutoff wall

^۳ Partial cutoff wall

^۴ Impervious blanket

^۵ Cutoff trench

بتن پلاستیک متشکل از مخلوط سیمان، آب، سنگدانه و بنتونیت است که گاهی می‌تواند همراه با ماسه و شن ریز نیز باشد. بتن پلاستیک بتنی با مقاومت بسیار کم‌تر از بتن معمولی، شکل‌پذیری زیاد و نفوذپذیری پایین است. در زمین‌های آبرفتی با خاک ضعیف که لازم است دیوار آب‌بند انعطاف‌پذیر باشد و نیز مقاومت کافی جهت تحمل تنش‌های ناشی از بارگذاری سد را داشته و هم‌چنین تراوش از زیر پی سد را کنترل کند، بتن پلاستیک مصالح مناسبی است. دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک دارای خصوصیات انعطاف‌پذیری بالا، نفوذپذیری کم و مقاومت فشاری متناسب با فشار اعمالی بوده و از این‌رو در مناطقی که پی سست، ضعیف و نفوذپذیری بالایی دارند به‌کار می‌روند [زوراسنا، ۱۳۸۶]:

۲-۲-۱-۳- ترانشه پر شده از گل روان^۶

این دیواره‌ها عمدتاً در امریکا توسط دراگلاین، بیل مکانیکی بازوبلند و گراب ساخته می‌شوند.

۲-۲-۱-۴- دیوار دیافراگمی^۷

دیوارهای دیافراگمی، یک سیستم آب‌بند است که از یک یا چند دیوار به فاصله چند متر از هم (معمولاً حدود ۳ متر) تشکیل شده است. ضخامت هر دیوار ۳۴ تا ۸۴ سانتیمتر است. جنس هر دیوار دیافراگمی می‌تواند از بتن یا بتن پلاستیک باشد. در بعضی از پروژه سدهای خاکی اجرا شده دیوارهای دیافراگمی از طریق تزریق نیز ساخته شده اند [زوراسنا، ۱۳۸۶].

۲-۲-۱-۵- تزریق^۸

تزریق عبارت است از پمپ کردن ماده تزریق به شکل مایع به درون حفره‌های خاک و سفت شدن آن که در نتیجه مقاومت مکانیکی خاک بهبود می‌یابد.

از تزریق برای موارد زیر می‌توان استفاده کرد [زوراسنا، ۱۳۸۶]:

^۶ Plastic concrete

^۷ Slurry trench

^۸ Diaphragm wall

^۹ Grouting

۱- نفوذناپذیر کردن یک منطقه در زیر یا اطراف یک سازه به منظور دستیابی اهداف زیر:

الف) به دست آوردن یک دیوار آببند دائمی (Cutoff wall) با کیفیت متوسط در عمق‌های زیاد و با کیفیت خوب در عمق‌های کم.

ب) احداث یک دیوار آببند موقت در دوره ساخت یک سازه

۲- تحکیم خاک پی به تنهایی و یا همراه با جلوگیری از تراوش آب

۲-۲-۱-۶- شمع کوبی^{۱۰}

با ساخت شمع‌های کنار هم دیوار آببند اجرا می‌شود. مزیت آن قابلیت اجرا در هر نوع زمینی از قبیل آبرفت با بولدر و سنگ‌های کارستیک است. مقاطع شمع‌ها می‌تواند دایره یا مربع باشد. روش‌های دیگری هم در این دسته بندی قرار می‌گیرد که کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲-۲- دیوار آببند نیمه قد^{۱۱}

هرگاه وضع لایه‌های پی سد طوری باشد که نفوذ پذیری با عمق کاهش یابد یا بستر سنگ در عمق زیادی واقع شده باشد و از لحاظ اقتصادی ساخت یک دیوار آببند تمام قد مقرون به صرفه نباشد، می‌توان از دیوار آببند نیمه قد (نیمه دیواره) استفاده کرد [Sherard، ۱۹۶۳].

۲-۳- اجرای دیوارهای آببند

نحوهی اجرای هر کدام از انواع دیوارها بسته به نوع آن‌ها، با هم تفاوت دارد. در زیر نحوه‌ی اجرای هر کدام از انواع دیوارها شرح داده شده‌است [مجد، ۱۳۹۴].

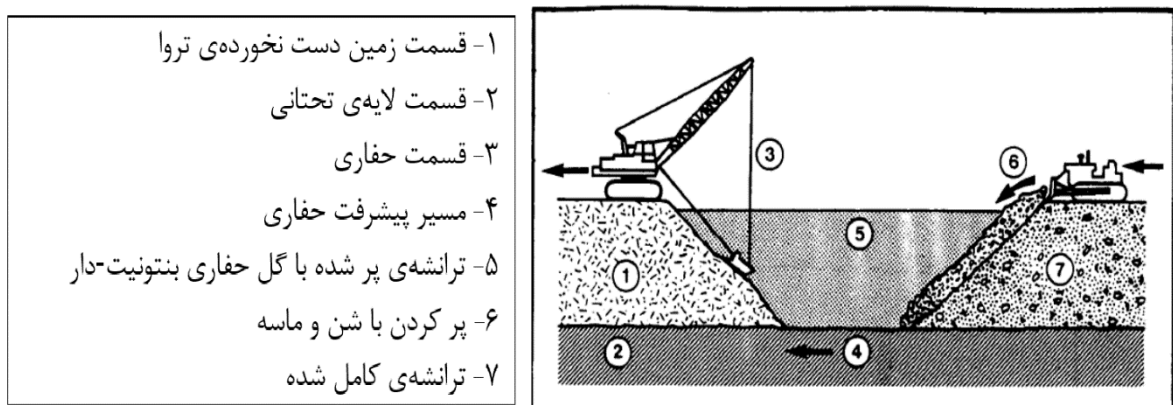
^{۱۰} Pile

^{۱۱} Partial cutoff wall

۲-۳-۱- ترانشه‌ی گل روان (خاک - بنتونیت)

اجرای این نوع از دیوارهای آب‌بند که بیشتر در آمریکای شمالی کاربرد داشته است، به این صورت است که ترانشه‌ی ای به عرض مورد نیاز توسط بیل مکانیکی یا کلامشل یا دراگ باکت در مجاورت دوغاب بنتونیت حفاری می‌شود و سپس این ترانشه با مخلوط با دانه بندی مناسب که اغلب از محل ترانشه برداشته شده و آغشته به گل بنتونیت است پر می‌شود [مجد، ۱۳۹۴].

باید دقت شود که عمل مخلوط نمودن شن و ماسه، گل روان با دقت خوب انجام بگیرد. در این روش برای حصول از آب‌بندی دیوار، عرض ترانشه باید در حدود ۱/۵ الی ۳ متر و با عمق متوسط ۲۵ متر کاربرد خواهد داشت. شکل ۱-۲ نحوه‌ی اجرای این دیوار را به طور کامل نشان می‌دهد.

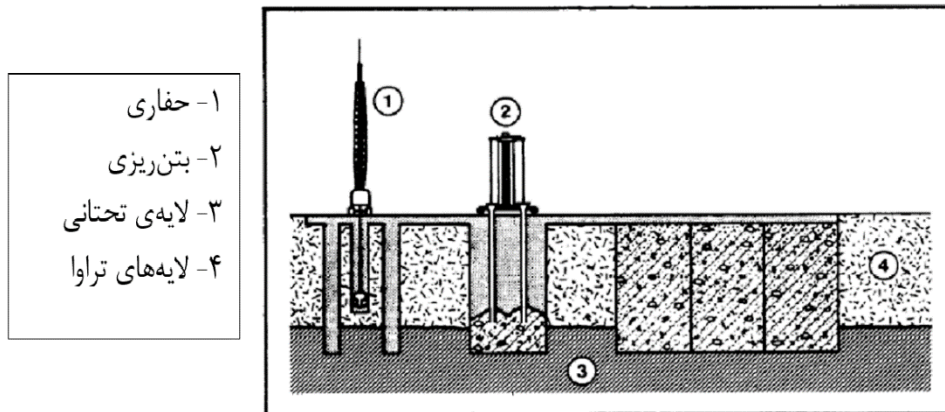


شکل ۱-۲، نحوه‌ی اجرای ترانشه گل روان [ICOLD, ۱۹۸۵]

۲-۳-۲- دیوار آب‌بند از جنس بتن معمولی یا بتن پلاستیک

این نوع از دیوارها با روش معمول ریختن بتن درجا ساخته می‌شود. حفاری برای این نوع از دیوارها با دوغاب بنتونیت انجام می‌گیرد و سپس بتن ریزی با بتن معمولی یا بتن پلاستیک رس‌دار توسط لوله‌های ترمی صورت می‌گیرد. اجرای این دیوارها به صورت تناوبی در پانل‌هایی با استفاده از درزبندهای انتهایی برای بتن معمولی امکان پذیر است. در دیوارهای از جنس بتن پلاستیک آب‌بندی درزه با توجه به مقاومت نسبتاً کم مصالح سخت شده‌ی آن از طریق هم‌پوشانی پانل‌های مجاور به اندازه

حدود ۱۰ الی ۲۰ سانتی متر امکان پذیر است. شکل ۲-۲، نحوه‌ی اجرای این نوع از دیوارها را نشان می‌دهد [شکوری، ۱۳۹۲].

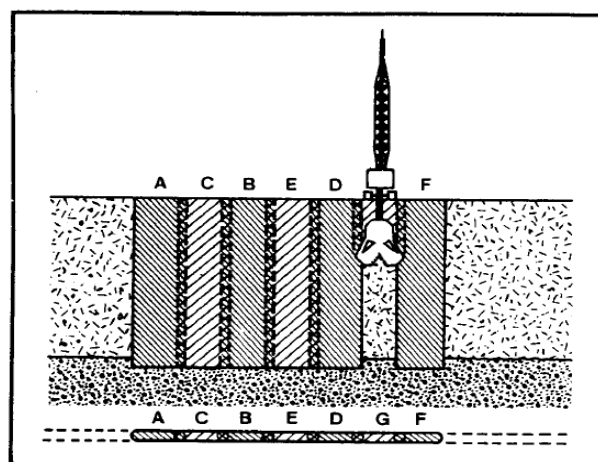


شکل ۲-۲، نحوه‌ی اجرای دیوار آب‌بند معمولی یا پلاستیکی [ICOLD, ۱۹۸۵]

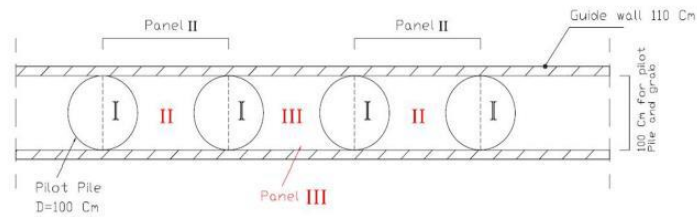
۲-۳-۳- دیوارهای آب‌بند سیمان - بنتونیت (CB)

این دیوارها به ضخامت ۰/۵ الی ۱/۵ متر بوده و به صورت درجا اجرا می‌شوند. روش اجرا چنین است که ابتدا حفاری با استفاده از دوغاب بنتونیت - سیمان صورت می‌گیرد و ظرف چند ساعت سخت شده و مستقیماً به عنوان مواد آب‌بندی جداره‌ی دیوار عمل می‌نماید [شکوری، ۱۳۹۲].

شکل ۲-۳ و ۲-۴ نحوه‌ی اجرای این نوع از دیوارها را نشان می‌دهد.



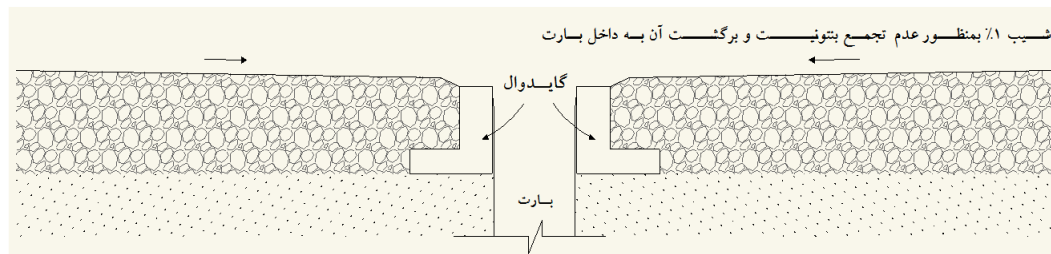
شکل ۲-۳، نحوه‌ی اجرای دیوارهای سیمان - بنتونیتی (CB) [ICOLD, ۱۹۸۵]



شکل ۲-۴، ترتیب حفاری گمانه هادی ا، پانل اولیه II و پانل ثانویه III در یک پروژه [چراغی، ۱۳۹۳]

۲-۴- احداث سکو

به منظور ایجاد محل مناسب جهت استقرار جرثقیل‌های حفاری و رفت و آمد تراک میکسرهای حامل بتن و ماشین آلات جمع آوری و حمل خاک‌های مازاد حفاری و همچنین جلوگیری از ورود و نفوذ آب‌های سطحی و تسهیل در دفع و عدم تجمع بنتونیت و لجن‌های خروجی از بارت‌ها در حین بتن ریزی، اجرای پلات‌فورم طبق کروکی زیر (شکل ۲-۵) در مسیر دیوار آب‌بند ضرورت دارد [شکوری، ۱۳۹۲].



شکل ۲-۵، احداث پلات‌فورم و گایدوال [چراغی، ۱۳۹۳]

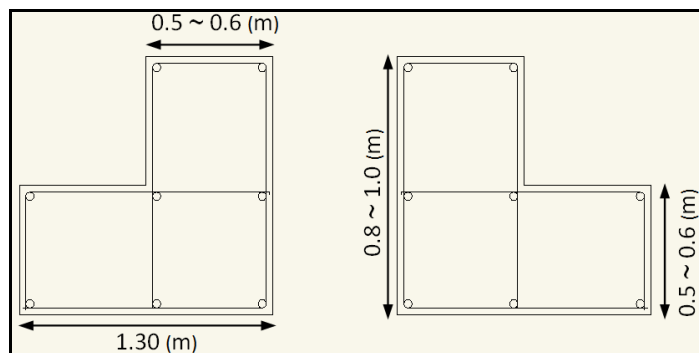
برای اجرای راحت‌تر دیوار دیافراگمی، این دیوار به قطعات کوچک‌تری به نام پانل تقسیم می‌شود. ابعاد و شکل پانل‌ها بسته به شرایط زمین، عمق اجرای دیوار، موقعیت اجرای پانل در سازه، نوع تجهیزات حفاری و ... در اشکال مختلفی از قبیل I، T، U، L و ... طراحی و اجرا می‌شوند.

نحوه انجام عملیات حفاری بدین صورت است که پس از اجرای دیوار راهنما، پانلی که طول زیادی دارد به سه قسمت تقسیم می‌شود. ابتدا دستگاه گراب در محل بارت اول مستقر و تراز شده و پس از حفاری این محدوده، عملیات حفاری بارت‌های دوم و سوم انجام می‌گیرد. در ادامه دستگاه به همین

ترتیب پانل‌های بعدی را حفاری می‌کند. در صورت نیاز، هم‌زمان با حفاری هر بارت و جهت جلوگیری از ریزش جداره‌های بارت در حین حفاری، گل بنتونیت به صورت مداوم به درون چال هدایت می‌شود. نقش اصلی گل حفاری حفظ پایداری ترانسه حفاری شده در برابر فشارهای جانبی ناشی از آب‌های زیرزمینی، خاک و سرباره روی پلاتفرم است که این عمل با تشکیل کیک بنتونیتی انجام می‌شود [چراغی، ۱۳۹۳].

۲-۵- اجرای مسیر (دیوار) راهنما

به‌منظور ایجاد امکان اجرای دقیق بارت‌های دیوار آب‌بند در مسیر مورد نظر و همچنین جلوگیری از ریزش جداره‌های بالایی بارت‌ها در هنگام اجرای عملیات حفاری و بتن ریزی، اجرای گایدوال طبق کروکی زیر (شکل ۲-۶) بر روی پلات فرم ضروری است. بخشی از اجرای گایدوال در سد پارام اهر در شکل ۲-۷ آورده شده است.



شکل ۲-۶، ابعاد گایدوال [چراغی، ۱۳۹۳]



پلات فرم جهت استقرار ماشین‌آلات حفاری - سد گلستان (۱۳۷۶) اجرای گایدوال دیوار آب‌بند - سد پارام اهر (۱۳۷۳)

شکل ۲-۷، سکوی سد گلستان و مسیر راهنمای دیوار آب‌بند سد پارام اهر [چراغی، ۱۳۹۳]

۲-۶- حفاری بارت‌های دیوار آب‌بند

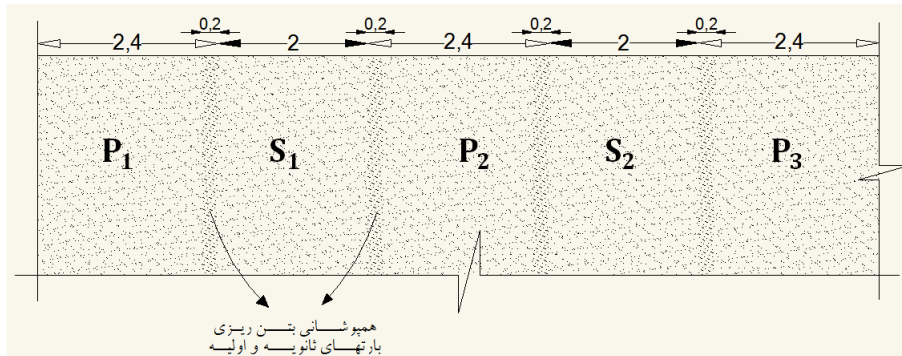
عملیات حفاری اجزای دیوار آب‌بند (بارت‌ها) با استفاده از ماشین آلات مخصوص صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از: گراب مکانیکی، گراب هیدرولیکی و هیدروفرز. به‌منظور جلوگیری از ریزش جداره‌های بارت‌ها در حین عملیات حفاری، گل حفاری که مخلوطی از آب و بنتونیت (دوغاب بنتونیت) است، با غلظت مناسب توسط مالاکسورهای برقی با دور مناسب (حدود ۲۴۰۰ دور در دقیقه) تهیه و پس از ذخیره‌سازی در حوض بنتونیت توسط شیلنگ برزنتی ۴ اینچی به داخل بارت انتقال می‌یابد. در صورت برخورد با لایه‌های سنگی (Boulder) و یا سخت که اجرای حفاری با گراب امکان‌پذیر نباشد، از ترپان یا چکش حفاری استفاده می‌شود. لایه‌ی سخت توسط ترپان خرد شده و یا از حالت متراکم خارج می‌شود و سپس مواد حاصل با گراب خارج می‌شود. شکل ۲-۸ عملیات ترپان زنی سد شهریار میانه را نشان می‌دهد [شکوری، ۱۳۹۲].



شکل ۲-۸، عملیات ترپان زنی سد شهریار میانه [چراغی، ۱۳۹۳]

روش اجرای کار به‌منظور آب‌بندی بین بارت‌های دیوار آب‌بند به‌شرح زیر است: ابتدا گایدوال به طول‌های متناوب ۲/۴۰ سانتی متری و ۲ متری تقسیم و خط‌کشی و شماره‌گذاری می‌شود. در مرحله‌ی اول، حفاری و بتن‌ریزی بارت‌های ۲/۴۰ متری انجام می‌شود. در واقع در این مرحله، حفاری و بتن‌ریزی پانل‌های اولیه انجام می‌شود که با مشخصه‌ی P_i (اندیس i شماره پانل مورد نظر است) بیان می‌گردد. در مرحله‌ی بعدی، حفاری بارت‌های میانی در فواصل ۲ متری (پانل‌های S_i) انجام می‌شود که

در ضمن حفاری این پانل‌ها، هر یک از بارت‌های اولیه به اندازه‌ی ۲۰ سانتی‌متر از طرفین تراشیده شده و پس از بتن ریزی با بتن‌های قبلی یکپارچه می‌گردند. بارت‌های اولیه و ثانویه طبق شکل ۹-۲ با هم همپوشانی دارند.



شکل ۹-۲، هم پوشانی بارت‌های اولیه و ثانویه [چراغی، ۱۳۹۳]

۷-۲- روش‌های حفاری

با توجه به عمق حفاری و نوع سنگ و آبرفت در منطقه می‌توان از روش‌های زیر جهت حفاری استفاده کرد:

۱-۷-۲- گراب مکانیکی

مناسب حفاری تا ۱۲۰ متر در آبرفت، به‌علت امکان زدن تریان قادر به حفاری در سنگ‌های نرم و هوازده، آبرفت با بولدر. در شکل ۲-۱۰، نمایی از یک دستگاه گراب مکانیکی نشان داده شده‌است.

۲-۷-۲- گراب هیدرولیکی

تا عمق ۵۰ متر مناسب برای انواع آبرفت بدون بولدر و نامناسب در سنگ. در شکل ۲-۱۱ نمایی از یک دستگاه گراب هیدرولیکی نشان داده شده‌است.

۳-۷-۲- ضربه‌ای گردش معکوس

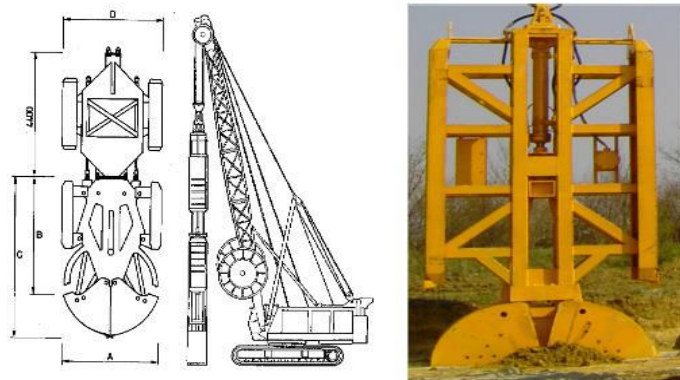
تا عمق ۸۰ متر و مناسب برای آبرفت با بولدر و سنگ. در شکل ۲-۱۲.

۴-۷-۴- هیدروفرز

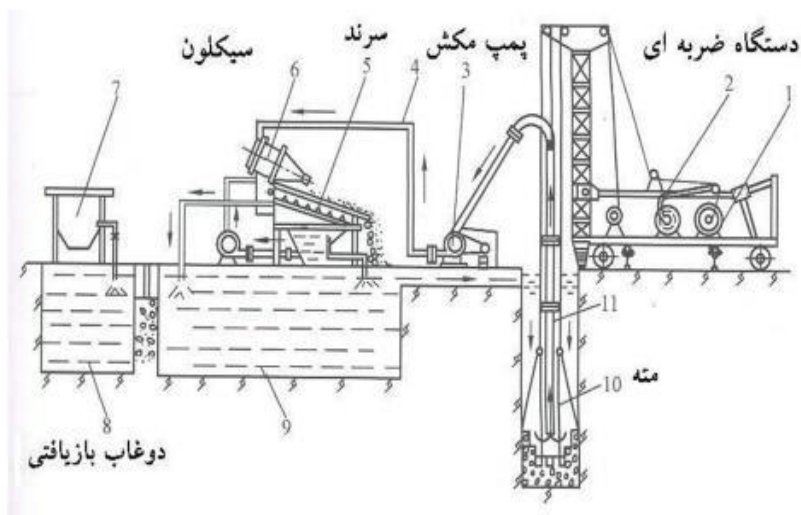
حفاری دورانی با گردش معکوس برای اعماق زیاد و شرایط سخت تر زمین. نامناسب در آبرفت با بولدر مقاوم و سنگ های شکسته حداکثر عمق ۱۵۰ متر. در شکل ۲-۱۳ نمایی از یک دستگاه هیدروفرز نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰، گراب مکانیکی [چراغی، ۱۳۹۳]



شکل ۲-۱۱، گراب هیدرولیکی [چراغی، ۱۳۹۳]



شکل ۲-۱۲، دستگاه ضربه ای گردش معکوس [چراغی، ۱۳۹۳]



شکل ۲-۱۳، دستگاه هیدروفروز [چراغی، ۱۳۹۳]

هیدروفروز، نوعی دستگاه حفاری است که جهت تأمین این نوع نیازها، توسط یک شرکت فرانسوی ساخته شده است این دستگاه از سه جزء تشکیل شده است: (۱) جرثقیل (۲) قاب فولادی دربرگیرنده هیدروفروز (۳) واحد گل (ساخت و احیای گل). جرثقیل سنگین حامل حرکت‌دهنده و تجهیزات تولید نیرو^{۱۲} و کابینت کنترل عملیات هیدروفروز و انحراف‌سنج با سیستم‌های کامپیوتری است. قاب فولادی که سیستم برش را هدایت می‌کند در برگیرنده ابزار دقیق مربوط به انحراف سنجی^{۱۳} و کنترل

^{۱۲} Power pack

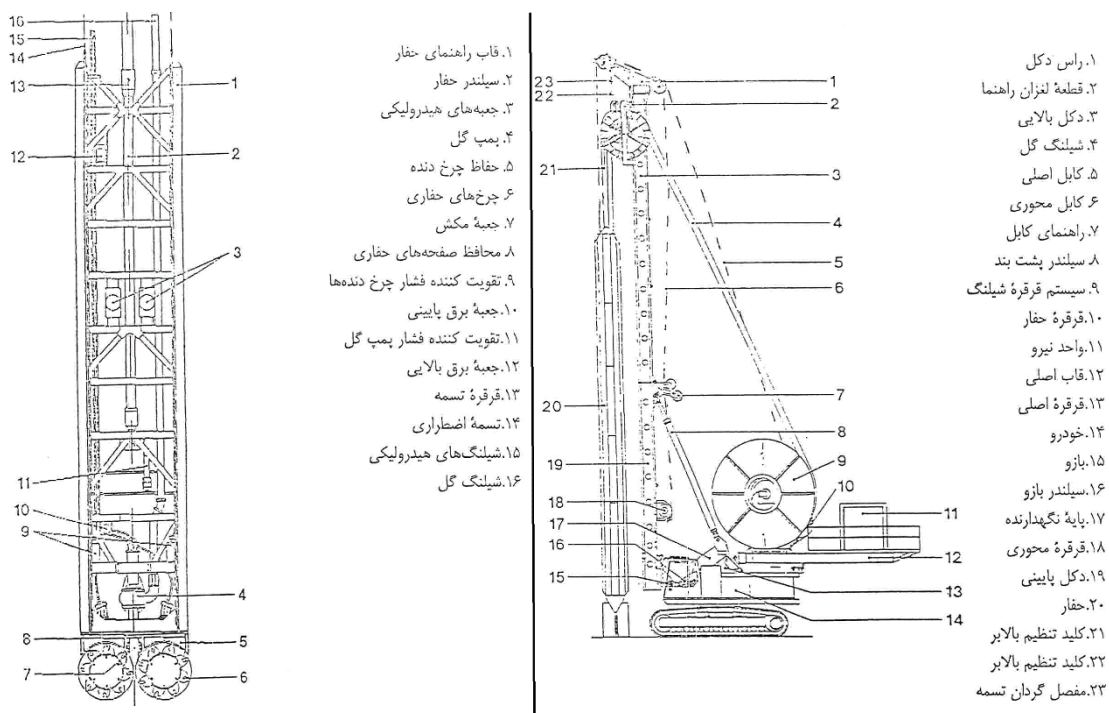
^{۱۳} Inclinator

جک‌های هیدرولیکی تنظیم‌کننده‌ی انحراف‌های جانبی است. در قسمت انتهائی این قاب، ۳ موتور هیدرولیکی قوی قرار دارند. دو موتور، دارای محور افقی، برای به گردش درآوردن چرخ‌های حفاری مجهز به تیغه و ناخن‌های حفاری است. چرخ‌های حفاری در دو جهت مخالف با سرعت ۱۰ الی ۲۰ دور در دقیقه می‌گردند و نیروی زیادی از طریق ناخن‌های حفاری، به سنگ مورد حفاری وارد می‌کنند. موتور سومی برای راه‌اندازی پمپ گل است که ورودی آن در بالای ۲ چرخ حفاری، درست در محل تجمع خاک و سنگ حفاری شده^{۱۴} قرار دارد. پمپ حاضر مخلوط زمین حفاری شده و گل حفاری را با دبی ۳۰۰ متر مکعب در ساعت مکیده و به سطح زمین و سپس واحد تصفیه گل منتقل می‌کند. مخلوط پمپ شده پس از صاف شدن و ماسه‌گیری، مجدداً به ترانسه برمی‌شود. گل حفاری (مخلوط عمل آمده‌ی آب و بنتونیت)، در واحد ساخت گل تهیه شده و در حوضچه‌ها یا سیلوهای مخصوص گل، جهت احیای گل حفاری برگشتی از ترانسه‌ها، نگهداری می‌شود. تکنیک هیدروفرز ملاحظات علمی و به‌طور عمده پیوستگی بتن و طبیعت خاک، ایجاب می‌کند که حداکثر طول ترانستی در هر بار حفاری، محدود باشد. بنابراین دیواره غشائی، الزاماً از قسمت‌های مجزا که پانل^{۱۵} نامیده می‌شود تشکیل می‌شود. روش حفاری با هیدروفرز، به‌گونه‌ای است که ابتدا پس از حفر تعدادی از پانل‌های اولیه، پانل‌های ثانویه در بین دو پانل اولیه، بتن‌ریزی شده مجاور، حفاری می‌شود. نکته ویژه و مهم این تکنیک، ایجاد اتصال بین پانل‌ها و تأمین پیوستگی دیواره بتنی است. هنگام حفاری پانل ثانویه، به‌دلیل بزرگ‌تر بودن طول قالب هیدروفرز (۲/۴۰ متر) از طول نوار خاکی باقی‌مانده بین دو پانل اولیه به اندازه ۱۰ سانتیمتر در هر طرف حفاری خراشیده می‌شود که پس از بتن‌ریزی پیوستگی را تأمین می‌کند. طراحی این سیستم جدید حفاری به نحوی است که می‌تواند در طیف وسیعی از انواع خاک‌ها، از خاک‌های بدون چسبندگی (سیلت، ماسه، شن و قلوه‌سنگ) تا سنگ سخت، اجزای دیواره غشائی یا شمع‌ها را حفاری کند. واحد تصفیه گل سرعت حفاری با سختی زمین، نسبت عکس داشته و از ۲۰ متر مربع در ساعت برای زمین‌های نرم تا ۱ مترمربع در ساعت، برای

^{۱۴} spil

^{۱۵} Panel

زمین‌های سخت تغییر می‌کند. استفاده از این دستگاه، به علت نداشتن لرزش یا ایجاد شوک برای مناطق شهری بسیار مناسب است. دستگاه استاندارد هیدروفرز، برای حفاری انواع دیواره‌های با عرض ۶۰ الی ۱۲۰ سانتی‌متر و تا عمق ۶۰ متر یا کمتر، به کار می‌رود. جهت حفاری عمق‌های تا ۱۲۵ متر، مدل‌های ویژه‌ای ساخته شده است. در شکل ۲-۱۴، قسمت‌های مختلف ابزار حفاری دستگاه هیدروفرز نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴، قسمت‌های مختلف ابزار حفاری دستگاه هیدروفرز [چراغی، ۱۳۹۳]

مواد کنده شده به همراه گل حفاری، توسط پمپ گریز از مرکز تعبیه شده در کنار چرخ‌های حفاری و از طریق شبکه لوله به واحد ماسه زدایی منتقل می‌شود. گل حفاری با مشخصات مناسب نیز دائماً به پانل در حال حفاری پمپ می‌شود. انحرافات ابزار حفار، شامل انحراف محور حفار، به صورت جابجایی محورهای افقی (محور طولی دیوار آب‌بند و محور عمود بر آن) و چرخش ابزار حول این محورها باید دائماً اندازه‌گیری و رفتار سنجی شود. به دلیل وجود اجتناب ناپذیر انحراف در حفاری، باید بین دو پانل مجاور، مقداری هم‌پوشانی در نظر گرفته شود. مشخصات گل حفاری، در حین اجرای یک پانل، برای جلوگیری از ریزش دیواره گود و جلوگیری از نفوذ آب زیرزمینی به داخل پانل، باید دائماً کنترل

شود. این مشخصات، شامل گرانی، pH، میزان آب صافی شده، ضخامت کیک گل، درصد ماسه و چگالی گل حفاری است. برای لخته نشدن گل بنتونیت ساکن، نباید در حفاری یک پانل، وقفه ایجاد شود، در صورت ایجاد وقفه طولانی، باید دیواره گود با حرکت ابزار حفاری در عمق و به هم زدن گل، تمیز شود و گل حفاری مناسب، جایگزین گل لخته شده شود.

۲-۸- معیارهای انتخاب مصالح دیوار آب‌بند

مصالح مصرفی برای یک دیوار آب‌بند باید به گونه‌ای باشد که این دیوار در سراسر عمر مفید قادر به کنترل نشت آب باشد. بنابراین مصالح مصرفی باید تحت شرایط و ویژگی‌ها و اصول خاصی انتخاب شوند. به طور کلی شرایط و ویژگی‌های دیوار آب‌بند به سه دسته تقسیم می‌شوند [زوراسنا، ۱۳۸۶]:

۱. شرایط و مقررات سازه‌ای

۲. شرایط زمین

۳. شرایط محلی

۲-۸-۱- شرایط و مقررات سازه‌ای

الف- نفوذ پذیری:

عمده‌ترین هدف از احداث دیوار آب‌بند، کنترل نشت و ایجاد حایل برای جلوگیری از تراوش آب از یک لایه‌ی نفوذ پذیر است و این منوط به نفوذپذیری پایین مصالح تشکیل دهنده دیوار است. به طور کلی نفوذپذیری پرده‌ی آب‌بند، بخشی مربوط به ویژگی‌های طبیعی مواد تشکیل دهنده و بخشی مربوط به امکان وجود درزه‌ها و ترک‌های عمده در پرده‌ی آب‌بند است. این موارد به علت پیوسته نبودن پرده‌ی آب‌بند، وجود درز یا ترک و یا بازشدگی اتصالات و بالاخره قرار گرفتن پی در لایه‌های کم تراوا بروز می‌نماید [Cook, ۱۹۸۹].

ب- تغییر شکل

عمده ی تغییر شکل های تحمیلی بر دیوار آب بند عبارتند از :

۱. تغییر شکل های ناشی از سازه (سد) تحت اثر وزن سد [Baxter, ۲۰۰۰].
 ۲. تغییر شکل های ناشی از نشست و خیز بستر پی بر اثر سنگینی وزن سد [Baxter, ۲۰۰۰].
 ۳. بارهای اعمالی هنگام اجرا (بسته به تکنیک ساخت و بارهای ثانویه اعمالی در طول زمان بهره برداری که می توانند باعث تغییر شکل های قائم و افقی گردند [Daghigh, ۱۹۹۳].
 ۴. تغییر شکل افقی و عمودی بر اثر اولین آبیگری و سپس به علت وارد شدن بارهای تناوبی در اثر استفاده از سد به عنوان مخزن [Cook, ۱۹۸۹].
 ۵. بارهای ناشی از زلزله و انفجار و بارهای ناشی از خاک پیرامون دیوار آب بند نیز می توانند سبب تغییر شکل های قائم و افقی گردند [Daghigh, ۱۹۹۳].
- بنابراین دیوار آب بند برای هر کدام از بارهای بالا و ترکیب آنها تحلیل می شود. روش های تحلیل و بررسی رفتار واقعی دیوار آب بند به شرح زیر است [Cook, ۱۹۸۹]:
- ۱- روش الاستو - پلاستیک: این روش بر پایه ی مدول (ضریب) عکس العمل خاک ها همراه با قوانین رفتار مصالحه، و تشخیص دامنه ی الاستیک (برگشت پذیر) و سپس مرحله ی پلاستیک (برگشت ناپذیر) است.
 - ۲- روش تفاضل محدود: تقریباً قدیمی ترین روش تحلیل عددی است که بر پایه ی معادلات دیفرانسیل عمل کرده و در آن مقادیر اولیه و مرزی به مدل معرفی می شود. در روش تفاضل محدود، هر یک از مشتقات معادلات حاکم مستقیماً با یک توصیف جبری بر حسب متغیرهای مدل (مانند تنش و

جابجایی در نقاط مجزای هندسه مدل تعریف می‌شود. این متغیرها در داخل المان‌های مدل تعریف نشده است [Davidson, ۱۹۸۱].

۳- روش اجزاء محدود: در این روش تمرکز اصلی بر روی تغییر مقادیر کمیت‌های مدل (مانند تنش و جابجایی در هر یک از المان‌ها با استفاده از توابعی است که بر اساس پارامترهای مدل تعریف می‌شود. فرمول‌بندی در این روش بر پایه‌ی محاسبه‌ی مقادیر مربوط به پارامترها بوده به گونه‌ای که خطای محاسبات و یا خطای انرژی به حداقل ممکن برسد [Davidson, ۱۹۸۱].

پ- مقاومت فشاری مصالح سخت شده

با توجه به این که این گونه دیوارها، دیوارهای باربر ناست لازم نیست این دیوار دارای مقاومت فشاری بالایی باشد و برعکس برای این که به مصالحی با تغییر شکل‌پذیری زیاد برسیم بایستی مصالح با حداقل مقاومت فشاری انتخاب شود به همین علت منطقی است که مقاومت فشاری مصالح به کار گرفته شده حداکثر از چند کیلوگرم بر سانتی متر مربع بزرگتر نباشد. با این وجود مصالح باید دارای استحکام کافی باشند تا شرایط ذیل حاصل شود [Cook, ۱۹۸۹]:

- تحمل بار سازه را بنماید.
- در برابر تنش‌های خاک در عمق‌های مختلف مقاوم باشد.
- مقاوم در برابر فرسایش باشد.
- شکست هیدرولیکی

۲-۸-۲- شرایط زمین

دیوارهای آب‌بند را می‌توان برای انواع خاک‌ها که بستگی به خاک پی دارد طراحی نمود. بنابراین مصالح پرکننده‌ی دیوار باید برای شرایط متفاوت طراحی و اجرا شود که به موارد زیر بستگی دارد [زوراسنا، ۱۳۸۶]:

الف- ویژگی زمین‌شناسی و خصوصیات فیزیکی خاک‌ها

در زمین‌های با نفوذپذیری خیلی زیاد ($k > 10^{-3}$ m/s) دوغاب سیمان از بدنه‌ی ترانشه به داخل توده‌ی خاک نفوذ کرده و به طور مؤثری می‌تواند آن را آب‌بند نماید. بنابراین برای چنین شرایطی می‌توان با طراحی دوغاب مناسب، آب‌بندی مورد نیاز طرح را اجرا کرد [زوراسنا، ۱۳۸۶].

ب- پارامترهای مهندسی خاک

با دانستن پارامترهای مهندسی خاک که شامل زوایای اصطکاک داخلی و چسبندگی است، می‌توان به موارد زیر دست یافت:

۱- مطالعه‌ی پایداری ترانشه‌ی دیوار، طراحی دانسیته و گرانروی دوغاب خودگیر و هم‌چنین نقش دوغاب حفاری در ترانشه.

۲- انتخاب بهترین نوع ماشین حفاری، که خود این امر بر انتخاب مصالح اثر خواهد گذاشت.

پ- عمق لایه‌های نفوذناپذیر پی

در طراحی دیوارهای آب‌بند، عمق دیوار به عمق لایه‌های نفوذناپذیر بستگی دارد و عمق این لایه‌ها در موارد زیر تأثیر می‌گذارد:

- نوع وسایل و تجهیزاتی که برای اجرای دیوار به کار می‌رود.

- انتخاب ضخامت مناسب برای دیوار به کار می‌رود.

- انتخاب ضخامت مناسب برای دیوار به منظور جلوگیری از انحراف در هنگام حفاری و تحمل تنش -
های حاصل از خاک و در نهایت کنترل شیب برای جریان آب نشتی در کف ترانشه‌ی حفاری شده
[Cook, ۱۹۸۹].

ت- ویژگی های هیدرولیکی:

ویژگی های هیدرولیکی و سطح آب زیرزمینی موجود در محل اجرای پروژه بر طراحی و اجرای دیوار حائل تأثیر دارد. بنابراین قبل از طراحی باید مطالعات زیر در محیط کار انجام شود:

۱. مطالعات پیژومتری: مطالعه و تعیین تراز آب زیرزمینی، میزان دبی و نفوذ پذیری مصالح پلاستیک کلا ممکن است برای خشک نمودن و نفوذناپذیر کردن توده‌ی خاک کافی نباشد [Cook, ۱۹۸۹].

۲. تجزیه‌ی آب: آب‌های خورنده شامل آب خالص، آب اسیدی، آب های سولفاته است. مصالح انتخاب شده باید در برابر خوردگی شیمیایی مقاوم باشند. لذا با بررسی عوامل فوق بایستی بهترین مصالح و مناسب ترین نوع سیمان را تعیین نمود [Cook, ۱۹۸۹].

آب‌ها ممکن است دارای نمک‌های لخته‌ساز هم چون سولفات‌ها و کلرایدها باشند که ممکن است بر اساس تراکم یونی منجر به پدیده‌ی روانگرایی و یا باعث تغلیظ گردند. از این رو لازم است ترکیب شیمیایی این مواد مورد توجه و بررسی قرار گیرد. لذا در هنگام و بررسی ترکیب مصالح دیوار تعدیل نمودن مقدار رس، یا افزایش محافظ کلوئیدی بایستی مورد توجه قرار گیرد [زوراسنا، ۱۳۸۶].

۲-۸-۳- شرایط محلی

در طراحی دیوارهای آب‌بند شرایط محل اجرای دیوار آب‌بند بسته به این که مصالح مورد نیاز در محل باشد یا نباشد و هم چنین شرایط استفاده از وسایل لازم برای اجرا، تأثیر به‌سزایی دارد [۱۹۸۵، ICOLD].

۲-۹- اتصال دیوار آب‌بند به سازه و بستر نفوذناپذیر

دیوار آب‌بند باید به طور قابل قبول و مطمئنی به لایه‌های زیرین نفوذناپذیر و همچنین در بالا به سازه‌ی مورد نظر (سد) اتصال داده شود. اگر لایه‌های زیرین و اطراف پرده‌ی آب‌بند در عمق برای نفوذناپذیری مورد شک و تردید باشد، باید برای جلوگیری از خطر نشت آب عملیات تزریق سیمان در داخل این نقاط انجام گیرد. اتصال دیوار آب‌بند شامل اتصال به کف و اتصال به سازه‌ی فوقانی، مسئله حساسی است که برای عملکرد مناسب دیوار از لحاظ جلوگیری از نشت باید مورد توجه قرار گیرد [شکوری، ۱۳۹۲].

۲-۹-۱- اتصال در بالا (سازه‌ی فوقانی)

در مورد دیوارهای آب‌بند با مصالح خاک - بنتونیت در محل اتصال به سازه‌ی فوقانی این احتمال وجود دارد که با گذشت زمان و فشار بیشتر خاکریز بالای دیوار، در خود دیوار نشست قابل ملاحظه‌ای رخ دهد. در صورت وقوع چنین پدیده‌ای از محل اتصال دیوار با سازه انتظار وقوع ترک در دیوار و نشت آب وجود دارد و در این مورد برای جلوگیری از وقوع نشت لازم است خاکریزی از مصالح کوبیده شده، دیوار را در محل در بر گیرد. در مورد دیوارهای آب‌بند از مصالح نوع دیگر، نیز در صورتی که به عنوان دیوار آب‌بند در زیر سد با هسته‌ی رسی نفوذناپذیر به کار رود، با توجه به این که در محل اتصال دیوار به هسته‌ی رسی در زیر سد گرادیان بالایی وجود دارد، احتمال وقوع پدیده‌ی فرسایش و نشت زیاد آب از این محل وجود دارد در نتیجه توسط دو روش عمده یا ترکیبی از آن دو، مقدار گرادیان در این محل از طریق طولانی کردن مسیر تراوش کاهش داده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از [شکوری، ۱۳۹۲]:

- امتداد دیوار آب‌بند در داخل هسته‌ی رسی تا یک طول محدود

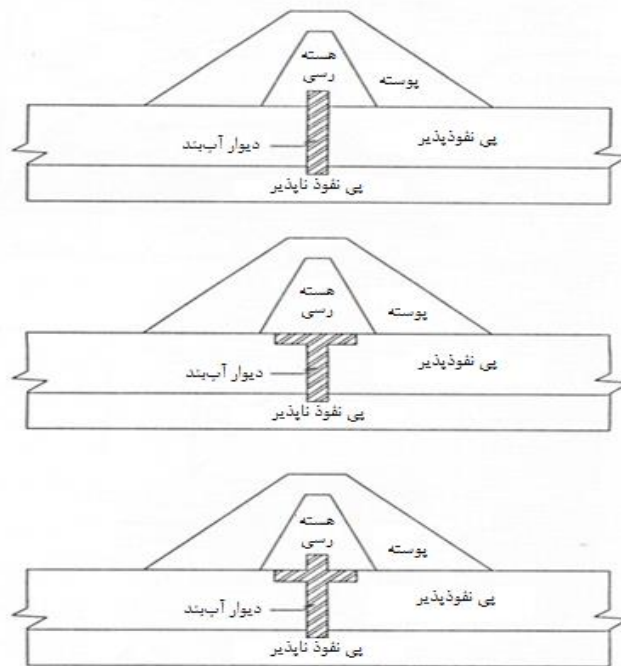
- اجرای یک لایه‌ی نفوذناپذیر از مصالح دیوار آب‌بند به صورت افقی در مجاورت دیوار و در

مرز اتصال پی به هسته‌ی رسی

- ترکیب هر دو روش مذکور در بالا.

در شکل ۲-۱۵ نمایی از هر کدام از روش‌های بالا نشان داده شده است.

در مورد اتصال پرده‌ی آب‌بند به قسمت آب‌بند بالادست (برای سدهای پوشش‌دار نفوذناپذیر در بالادست) باید دقت و توجه زیادی کرد.



شکل ۲-۱۵، نحوه‌ی اتصال دیوار آب‌بند در بالا (سازه‌ی فوقانی) [شکوری، ۱۳۹۲]

۲-۹-۲- اتصال در کف

دیوار آب‌بند باید به طور مطمئن و قابل قبولی به لایه‌ی نفوذناپذیر متصل شود. در بعضی مواقع

برای اتصال مناسب دیوار به بستر، تزریق دوغاب بنتونیتی یا سیمان در پیرامون محل صورت می‌گیرد.

این تزریق توسط حفر گمانه‌ها با استفاده از لوله‌های از قبل کار گذاشته شده در خود بتن قابل اجرا

است [Cook, ۱۹۸۹]، اما اغلب به علت حفظ پیوستگی بتن از قرار دادن لوله های فوق الذکر اجتناب می شود و با فرو نمودن لوله های ترمی در درون بتن تازه، تزریق صورت می گیرد.

۲-۱۰- شکل و ابعاد دیوار آب بند بتن پلاستیک

دیوار آب بند بتن پلاستیک متشکل از یک سری مکعب مستطیل های هم امتداد است که ارتفاع هر کدام از آن ها (H) برابر با عمق لایه ی نفوذناپذیر (h) به علاوه ی عمق نفوذ در لایه ی تحتانی تر است. نفوذ دیوار در لایه های تحتانی (مثلا سنگ بستر) جهت ایجاد اتصال مناسب بین دیوار آب بند و لایه های نفوذناپذیر صورت می گیرد. این عمق نفوذ غالباً بین ۸۰ الی ۱۵۰ سانتی متر است، اما در کل می توان مقدار آن را در سدهای کوتاه برابر موارد زیر دانست [Das, ۱۹۹۳]:

$$s \approx \frac{h}{1.3} \quad (1-2)$$

$$H = h + s \quad (2-2)$$

$$H = \frac{11}{13} h \quad (3-2)$$

۲-۱۱- بتن پلاستیک و ویژگی های آن

با توجه به این که تخریب تعداد قابل توجهی از سدها ناشی از عدم کارایی مطلوب دیوار آب بند بوده است می توان به اهمیت ویژه ی اینگونه سازه ها پی برد [Daghigh, ۱۹۹۳]. عدم کارایی دیوار آب بند غالباً در اثر گسیختگی و یا شکستگی دیوار آب بند و یا نفوذ آب در محل اتصال دیوار آب بند و هسته ی سد، پیش می آید که نتیجه ی آن نشست هسته و گاهی تخریب سد است. برای این که چنین اتفاقاتی نیفتد نیاز به دیوار آب بندی انعطاف پذیر، شکل پذیر و دارای دوام و تراکم پذیری کم خواهد بود و در عین حال مقاومت کافی برای تحمل تنش های اضافی غیر معمول را داشته باشد و بتن پلاستیک مصالح مناسبی است که علاوه بر برآورد کردن مقاومت و تغییر شکل بالا می تواند برای کنترل نشست و نفوذپذیری نیز به کار رود [Ambraseys, ۱۹۶۷].

در ادامه خواص مکانیکی و هیدرولیکی بتن پلاستیک ارائه شده است.

۲-۱۱-۱- مشخصات بتن پلاستیک

بتن پلاستیک معمولاً دارای مقاومت گسیختگی 1400 lb/in^2 یا 100 kg/cm^2 یا کم‌تر است و

بستگی اساسی به مشخصات مصالح تشکیل دهنده و نسبت‌های اختلاط دارد [Ambraseys, ۱۹۶۷].

بتن‌های پلاستیک در مقایسه با بتن معمولی دارای سختی کم‌تری هستند ولی سختی آن‌ها چندین برابر سختی مصالح اطراف است [Ambraseys, ۱۹۶۷]، و این خصوصیت، یک رفتار مهم را به دیوارهای آب‌بند می‌بخشد. تغییر شکل پذیری بالا که توسط بتن معمولی قابل دستیابی نیست و مقاومت آن که توسط انواع دیگر دیوارهای آب‌بند قابل دستیابی نیست و این رفتار مناسب در حالی است که نفوذ ناپذیری دیوار نیز حفظ شده است [شکوری، ۱۳۹۲].

از عوامل دیگر که دیوار آب‌بند بتن پلاستیک را گزینه‌ی مناسبی می‌نماید، این است که در جایی که قرار است یک سربار اضافی مانند وزن یک سد اعمال شود یا موقعی که فشار هیدرولیکی زیادی به وجود می‌آید که هر دو مورد، نیاز به مقاومت زیاد است. بر عکس در حالتی که مصالح نسبتاً سستی در مقابل دیوار قرار دارد که قرار است تغییر شکل قابل توجهی تا رسیدن به تعادل نهایی انجام دهد، نیاز به دیواری است که تغییر شکل‌های مرتبط را بدون آن که گسیختگی و عدم آب‌بندی در آن به وجود آید تحمل نماید. چنین سازگاری ژئو مکانیکی در صورتی به وجود خواهد آمد که دیوار آب‌بند مذکور اساساً مشخصات مشابهی نسبت به محیط خاکی اطراف خود از خود نشان دهد. از این رو مدول خاک مجاور یا اطراف دیوار یک خصوصیت مرتبط با خصوصیات مصالح دیوار بوده و به عنوان شاخص و پارامتری برای انعطاف پذیری مورد نیاز مصالح دیوار است [شکوری، ۱۳۹۲].

۲-۱۱-۲- مدول الاستیسیته بتن پلاستیک

برای این که دیوار بتن پلاستیک عملکرد خوبی داشته باشد باید مدول الاستیسیته‌ی بتن پلاستیک در حالت تعادل و عادی تقریباً مساوی مدول مصالح خاکی اطراف باشد که در این صورت باید نمودارهای تنش و کرنش برای خاک و بتن پلاستیک مشابه باشد [Ambraseys، ۱۹۶۷] چرا که این انتظار می‌رود که این دو مصالح در کنار هم در هر شرایط بارگذاری و تغییرات شرایط محیطی بر هم منطبق باشند.

مدول یانگ (مدول تک محوری) با رسم منحنی تنش - کرنش از یک آزمایش تک محوری به دست می‌آید. هم چنین از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای نیز می‌توان از طریق برون یابی برای به دست آوردن مدول یانگ استفاده کرد [Bowels، ۱۹۸۸]، ولی عوامل زیر می‌تواند بر روی نتایج آزمایش‌ها تاثیر بگذارد.

به‌طور کلی مدول خاک را می‌توان به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر تخمین زد [Ambraseys، ۱۹۶۷]:

$$E = \sqrt{\sigma_v \frac{1+\gamma k}{\gamma}} \quad (۴-۲)$$

k : ضریب تنش جانبی است. این رابطه وقتی معتبر است که k بین ۰/۵ الی ۲ و ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی ۲ باشد.

۲-۱۱-۳- ترکیب بتن پلاستیک

در بتن معمولی که نسبت سیمان به آب بزرگتر از ۲ است، ذرات بلورین سیمان به یکدیگر آن چنان گره خواهند خورد که تشکیل یک بافت متبلور را می‌دهند و این بافت دچار تغییر شکل خیلی کمی می‌شود. برای آن که چنین سیستمی دارای قابلیت حرکتی مشخص شود، لازم است که به طور کاذب بین بلورهای سیمان فاصله بیفتد، ساده‌ترین راه برای رسیدن به این هدف افزودن آب به سیمان است. بتن تازه در این حالت ناپایدار بوده و در نتیجه برای پایداری سیستم لازم است مواد پایدار

کننده، که اثری در مقاومت بتن نیز نداشته باشد به آن افزوده شود. این عامل پایدار کننده اغلب بنتونیت است. برای دستیابی به این منظور می توان از بتن یا ملات پلاستیک استفاده نمود. بتن پلاستیک از موارد زیر ساخته می شود [شکوری، ۱۳۹۲]:

الف- گل روان بنتونیتی: این ماده دارای گرانروی زیاد بوده و نقش آن عبارت است از معلق نگاه داشتن ذرات سیمان، شن و ماسه به هنگام اجرای عملیات و مهم تر از آن اطمینان از پلاستیسیته و نفوذناپذیری آن است. به طور کلی گل روان بنتونیتی یا اصطلاحاً گل حفاری سه نقش عمده بر عهده دارد:

۱. خنک کننده ی سیستم و ابزار حفاری ترانشه

۲. نقش سیال منتقل کننده ی خرده سنگ ها و مصالح دآن های

۳. نقش پایدار کننده ی سطوح ترانشه توسط فشار هیدرواستاتیکی و ایجاد پدیده ی فیلتر کیک در سطوح ترانشه درصد بنتونیت (با توجه به وزن آب) بر پایه ی میزان ترکیب آن با آب بین ۲ تا ۱۲ درصد است [Cook، ۱۹۸۹].

ب- سیمان: میزان سیمان مصرفی در بتن پلاستیک نسبت به آب با توجه به نوع سیمان مصرفی بین ۰/۱ تا ۰/۳ متغیر است [Cook، ۱۹۸۹] که رعایت این محدودیت باعث ایجاد چسبندگی و مقاومت زیاد خواهد شد.

پ- سنگدانه ها: میزان کل سنگدانه های مصرفی در بتن پلاستیک حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد کل حجم بتن را در بر می گیرد [Daghigh، ۱۹۹۳]. این میزان حجم شن و ماسه مانع به هم چسبیدن پیوسته ی ذرات و در نتیجه کاهش تغییر شکل پذیری می شود. حداکثر قطر درشت دانه تا ۳۰ میلی متر و درصد مواد ریزدانه نباید زیاد باشد. چنان چه مواد ریزدانه ی کلئیدی زیاد باشد، در آن صورت مقدار

بنتونیت را باید کاهش داد. به طور خلاصه هر چه مصالح سنگریزه‌های درشت دانه‌تر و سختی آنها بیشتر باشد مقاومت فشاری بتن پلاستیک بیش تر خواهد شد [Daghigh, ۱۹۹۳].

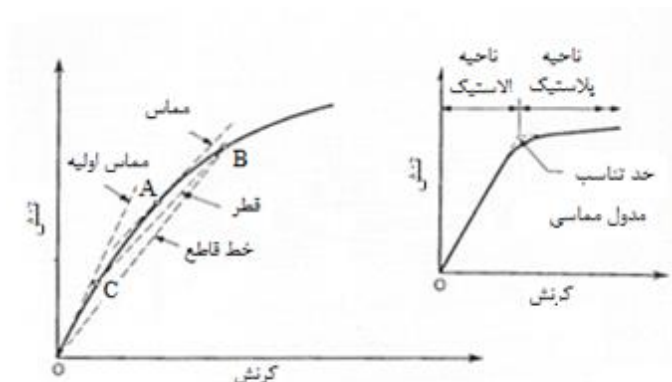
ت- آب: آب مصرفی باید عاری از هر گونه ترکیبات شیمیایی مضر هم چون سولفات‌ها، کربنات‌ها و کلرایدها باشد. در اثر استفاده از آب‌های ناخالص، مصالح مورده استفاده، به صورت کلوخه‌های ریز معلق یا دلمه در مخلوط ظاهر شده و ویسکوزیته‌ی مخلوط را کاهش می‌دهند. بنابراین تحلیل آب مصرفی در این موارد ضروریست.

ث- رس: رس مورد استفاده در بتن پلاستیک از مصالح محلی موجود در ساختگاه بوده و هنوز هیچ گونه استانداردی در رابطه با مشخصه‌های فنی آن ارائه نشده است و تنها از هر نوع رسی که قابل استفاده در هسته‌ی سدهای خاکی باشد، می‌توان در این نوع بتن استفاده نمود.

۲-۱۱-۴- تغییر شکل پذیری بتن پلاستیک

۲-۱۱-۴-۱- قوانین عمومی رفتاری

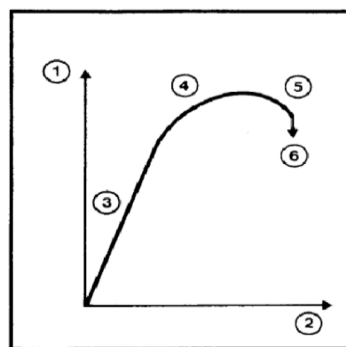
نمودار تنش و کرنش برای یک نمونه بتن پلاستیک به صورت شکل ۲-۱۶ خواهد بود [۱۹۶۷، Ambraseys]. در صورتی که قسمت ریزدانه (بنتونیت و رس) در بتن پلاستیک، اجزاء غالب باشد منحنی تنش-کرنش از منحنی (الف) در شکل ۲-۱۶ پیروی خواهد کرد و اگر قسمت اصلی تشکیل دهنده‌ی بتن پلاستیک شن و ماسه باشد از منحنی (ب) پیروی خواهد کرد.



شکل ۲-۱۶، نمودار تنش - کرنش و مدول الاستیسیته برای بتن پلاستیک [Ambraseys، ۱۹۶۷]

مدول یانگ برای قسمت راست منحنی به کار می‌رود و اگر چنین قسمت راستی وجود نداشته باشد، مدول یانگ به مماس اولیه منحنی در تنش مساوی صفر اطلاق می‌شود، که به آن مدول مماس اولیه گویند [Ambraseys، ۱۹۶۷]. علاوه بر تعریف بالا برای مدول یانگ در چنین مواردی تعاریف گوناگون دیگری بسته به کاربرد مفهوم مدول یانگ وجود دارند. یکی از آن‌ها مدول مماسی است که برای هر وضعیت تنش روی منحنی تنش - کرنش مانند نقطه A قابل اعمال بوده و برابر شیب خط مماس بر نقطه A که به آن مدول مماسی گویند. نوع دیگری از مدول، مدول سکانتی (وتری) است و همان‌گونه که در شکل مذکور دیده می‌شود، برابر شیب خطی است که از مبدأ مختصات به هر نقطه (B) مورد نظر رسم می‌شود. مدول سکانت به خاطر این که تغییر شکل واقعی را در هر نقطه‌ی مورد نظر به دست می‌دهد دارای کاربرد عملی‌تری است.

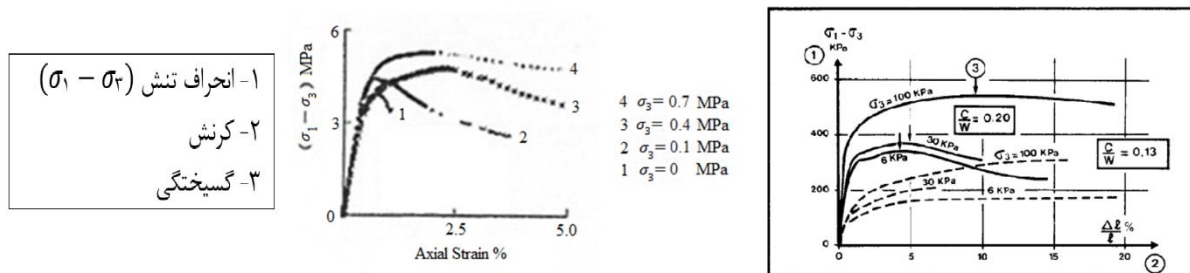
در بیشتر مصالحی که در ساخت آن‌ها از سیمان استفاده می‌شود، بعد از سخت شدن تنش محوری در آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. اگر این مصالح تحت اثر یک تنش محوری قرار بگیرند ابتدا تغییر شکل بسیار مختصر الاستیک داشته و پس از این مرحله جسم با چند درصد تغییر شکل به مرحله‌ی پلاستیک وارد شده و سپس گسیخته می‌شود (شکل ۲-۱۷).



شکل ۲-۱۷، نمودار عمومی تنش - کرنش بتن پلاستیک [ICOLD، ۱۹۸۵].

(۱) تنش، (۲) کرنش (تغییر شکل)، (۳) محدوده‌ی الاستیک، (۴) محدوده‌ی پلاستیک، (۵) خزش (۶) گسیختگی

از طرفی واضح است که اگر مصالح به حد کافی تحت فشار همه جانبه قرار بگیرند، تمام مصالح تغییر شکل پلاستیک خواهد داشت. بتن‌های پلاستیک با اعمال فشار تقریباً ۰/۱ مگاپاسکال به حد پلاستیک می‌رسند و افزایش در نسبت فشار جانبی به مقاومت فشاری (σ_3) موجب افزایش تغییر شکل پلاستیک می‌شود (شکل ۲-۱۸).



شکل ۲-۱۸، آزمایش سه محوری بر روی بتن پلاستیک [ICOLD، ۱۹۸۵]

۲-۴-۱۱-۲ عوامل مؤثر در تغییر شکل

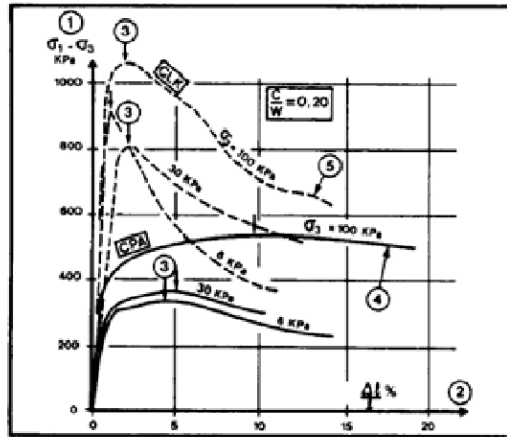
مقاومت و تغییر شکل پذیری به میزان زیادی به یکدیگر مربوط هستند و هر عاملی که بر روی یکی از آن‌ها اثر بگذارد دیگری را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین عوامل مهم مؤثر بر روی مقاومت و تغییر شکل پذیری عبارتند از [Ambraseys، ۱۹۶۷]:

۱. نسبت سیمان به آب (C/W) ۲. نوع سیمان ۳. از دست دادن آب به علت عمل

زهکشی

اصولاً مقاومت و تغییر شکل پذیری تابعی از (C/W) و نوع سیمان و دانه بندی مصالح هستند و هر قدر نسبت C/W بزرگتر و یا سختی مصالح دانه‌های یا تیز گوشه بودن آن‌ها بیشتر شود، مقاومت فشاری بیشتر می‌شود و هم چنین پیوستگی مصالح دانه‌های نیز مقاومت فشاری را افزایش می‌دهند نتایج آزمایشات بر روی دو نوع بتن پلاستیک با مشخصات خاص تغییرات مقاومت و تغییر شکل پذیری با نسبت سیمان به آب و نوع سیمان نشان داده می‌شود (شکل ۲-۱۹).

- ۱- انحراف تنش $(\sigma_1 - \sigma_3)$
- ۲- کرنش
- ۳- گسیختگی
- ۴- نوع سیمان P
- ۵- سیمان نوع روباره‌ی آهن
گدازی BLF با ۷۰٪ روباره (CLK)



شکل ۲-۱۹، آزمایش سه محوری بر روی بتن پلاستیک (تاثیر نوع سیمان و در فشار قرار گرفتن) [۱۹۸۵، ICOLD]

هم‌چنین میزان بنتونیت هم بر روی تغییر شکل‌پذیری تاثیر دارد. به طور خلاصه تاثیر میزان بنتونیت بر تغییر شکل‌پذیری را می‌توان با موارد زیر بیان کرد:

الف - مدول الاستیک اولیه بتن پلاستیک تحت شرایط سه محوری و تحکیم یافتگی تا ۳ برابر می‌تواند افزایش یابد.

ب- مقاومت سه محوری تحکیم یافته بتن پلاستیک تا ۱۰ برابر بیشتر از مقاومت تک محوری (تحکیم نیافته) است [Clough، ۱۹۶۶].

پ- سرعت بارگذاری و تنش‌های همه جانبه تاثیر به سزایی در کرنش گسیختگی بتن پلاستیک خواهد داشت.

۲-۱۱-۵- مقاومت بتن پلاستیک

برای به وجود آمدن یک تغییر شکل وسیع بایستی تا حد امکان مقاومت فشاری بتن (R_c) با توجه به فشارهای جانبی دیوار انتخاب شود. از این رو طبق استاندارد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه بایستی چند برابر بیش‌تر از فشارهای جانبی انتخاب شود. این مقاومت بایستی به اندازه‌ی باشد که

تحمل تنش های خاک را به هنگام عملیات اجرایی و دوران بهره برداری از سد را بنماید [شکوری، ۱۳۹۲].

۲-۱۱-۵-۱- عوامل مؤثر در میزان مقاومت

الف) نسبت سیمان به آب (C/W): اصولاً مقاومت تابعی از (C/W) است و با گذشت زمان تغییر می کند. هر چه نسبت (C/W) بزرگتر باشد مقاومت فشاری بیش تر می شود.

ب) نوع سیمان: عملکرد انواع سیمان بستگی به میزان (C/W) دارد.

پ) نسبت و دانه بندی مخلوط: با افزایش مصالح سنگ دانه و تیز گوشه بودن آنها، مقاومت فشاری افزایش پیدا می کند.

د) بنتونیت: میزان بنتونیت، تأثیر ثانویه دارد و وجود آن در مخلوط بتن به صورت کاهش مقاومت و افزایش پلاستیسیته تأثیر می گذارد [Cook، ۱۹۸۹].

۲-۱۱-۶- نفوذپذیری بتن پلاستیک

هدف اصلی از ساخت دیوار آب بند، کاهش نشت و تراوش در سایت است. در عمل نفوذپذیری دیوار آب بند ساخته شده بیشتر از نفوذپذیری نمونه های آزمایشگاهی با همان نوع بتن است و نفوذپذیری این دیوارها مربوط به درز ترک هایی است که در دیوار آب بند وجود دارد. جدول ۱-۲ میزان نفوذپذیری طراحی برای انواع دیوارهای آب بند را نشان می دهد [Clough، ۱۹۶۶].

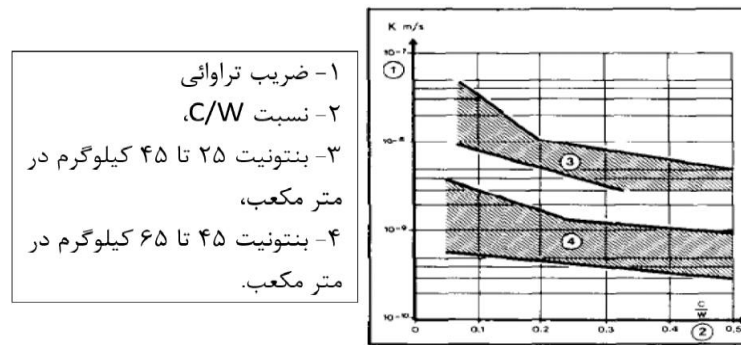
جدول ۱-۲، میزان نفوذ پذیری برای مصالح نفوذ ناپذیر [Clough، ۱۹۶۶].

نوع دیوار	بتن معمولی	بتن پلاستیک	دوغابی	تزییقی
نفوذپذیری (cm/s)	10^{-7} - 10^{-8}	10^{-6} - 10^{-7}	10^{-5} - 10^{-6}	10^{-4}

۲-۱۱-۶-۱- عوامل مؤثر بر روی نفوذپذیری

الف) میزان نسبت سیمان به آب: با افزایش نسبت سیمان به آب (C/W) نفوذپذیری مصالح

کاهش پیدا می‌کند [Cook, ۱۹۸۹]. شکل ۲-۲۰ این موضوع را نشان می‌دهد.



- ۱- ضریب تراوایی
- ۲- نسبت C/W.
- ۳- بنتونیت ۲۵ تا ۴۵ کیلوگرم در متر مکعب،
- ۴- بنتونیت ۴۵ تا ۶۵ کیلوگرم در متر مکعب.

شکل ۲-۲۰، تأثیر نسبت C/W و مواد مضاف در نفوذپذیری مصالح بتن پلاستیک [ICOLD, ۱۹۸۵]

ب) بنتونیت با نسبت سیمان به آب ثابت، با افزایش کمی بنتونیت ضریب نفوذپذیری تا حداقل ۱۰

برابر کاهش پیدا می‌کند، شکل ۲-۲۲ این مطلب را نشان می‌دهد [Cook, ۱۹۸۹].

پ) تأثیر مصالح خشک کننده: با افزایش نسبت مصالح خشک کننده، نفوذ پذیری کاهش پیدا می‌کند

و علت آن را می‌توان به این صورت بیان کرد که قسمتی از آب عبوری از بتن در محدوده‌ی نیروی این

بخش قرار گرفته و جذب سطحی می‌شود.

ت) مصالح دانه‌ای (سنگدانه‌ها): به علت وجود سنگدانه‌ها در بتن، مسیر مؤثر حرکت آب به میزان قابل

ملاحظه‌ای طولانی‌تر می‌شود. پس ممکن است سنگدانه‌ها اثر قابل توجهی در کاهش نفوذپذیری بتن

داشته باشد. البته این اثر عملاً ناچیز است، زیرا نفوذپذیری خمیر بنتونیت بیش‌ترین تأثیر را بر

نفوذپذیری بتن دارد. جهت سنجش نفوذپذیری از دستگاه تعیین نفوذپذیری استفاده می‌شود به این

صورت که آب تحت فشار از بالای نمونه‌ای که اطراف آن با ماده‌ی غیر قابل نفوذ پوشانده شده است،

عبور داده و از روی دبی خروجی اندازه‌گیری شده و رابطه‌ی داری میزان نفوذپذیری از فرمول ۲-۵

به‌دست می‌آید [ICOLD, ۱۹۸۵]:

$$\frac{dq}{dt} = K \frac{1}{A} \frac{\Delta h}{L} \quad (5-2)$$

$$\frac{dq}{dt} : \text{دبی جریان آب بر حسب } \frac{m^3}{s}$$

$$A : \text{سطح مقطع نمونه بر حسب } m^2$$

$$\Delta h : \text{افت در فشار آب قبل و بعد از عبور از نمونه بر حسب } m$$

$$K : \text{نفوذپذیری بر حسب } \frac{m}{s}$$

$$L : \text{طول نمونه بر حسب } m$$

۲-۱۱-۷- فرسایش بتن پلاستیک

در مواردی که ارتفاع سد و ارتفاع هیدرولیکی متناظر آن بالا بوده و با یک پی نفوذپذیر تزریق ناپذیر روبه رو باشیم، استفاده از دیوار آب‌بند از جنس بتن پلاستیک امری اجتناب ناپذیر است. در چنین مواردی به دلیل اختلاف هد هیدرولیکی زیاد بین بالادست و پایین دست و ضخامت کم دیوار آب‌بند، ممکن است گرادیان هیدرولیکی بسیار بالایی در دیوار به وجود آید. بنابراین یکی از مهم‌ترین مسائل در طرح مخلوط بتن پلاستیک توجه به مساله‌ی فرسایش بتن پلاستیک است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت در برابر فرسایش رابطه‌ی نزدیکی با مقاومت فشاری مصالح در معرض فرسایش دارد [Cook, ۱۹۸۹].

۲-۱۲- سابقه موضوع

دشموخ^{۱۶} و همکاران در سال ۱۹۸۷، در مقاله‌ای به بررسی دیوار آب‌بند بتن پلاستیک برای کنترل تراوش سد Salaudi پرداخته‌اند. در این مقاله در بررسی مراحل ساخت و کنترل کیفیت دیوار آب‌بند در این سد، توضیح داده شده که نفوذپذیری سد Salaudi تغییرات خیلی زیاد در نقاط مختلف دارد. بنابراین سیستم دیوار آب‌بند بتن پلاستیک روش مناسبی برای کنترل تراوش از این سد است. گول^{۱۷} و همکاران در سال ۱۹۸۷، در مقاله‌ای به بررسی کنترل تراوش در سدهای خاکی به وسیله دیوار آب‌بند پرداخته‌اند. در این مقاله روش‌های کنترل تراوش در سد Kapur در هند پرداخته شده- است که علاوه بر دیوار آب‌بند از پتوی نفوذناپذیر نیز برای کنترل تراوش استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بدون پتو، حتی برای ۹۰٪ عمق دیوار آب‌بند، تراوش فقط ۵۰٪ کاهش می‌یابد. در این سد پتوی نفوذناپذیر بالادست راه حل خوبی است. طول بهینه‌ی پتو ۵ تا ۵/۷ برابر ارتفاع دریاچه است. کیژنگ^{۱۸} و همکاران در سال ۱۹۹۲، در تحقیقی به بررسی تحلیل غیر خطی دیوار بتن پلاستیک، بررسی نتایج آزمایشگاهی بتن پلاستیک مورد استفاده در دیوار آب‌بند و تأثیر نوع سازه و شرایط بارگذاری دیوار آب‌بند در رفتار بتن پلاستیک پرداخته شده است. نتیجه‌ی این مقاله این است که بتن پلاستیک مزایای زیادی نسبت به بتن معمولی در مقایسه‌ی نیازهای کنترل تراوش، ملاحظات اقتصادی، ایمنی سازه‌ای را دارد. بنابراین در دیوار آب‌بند بتن پلاستیک معقول‌تر به نظر می‌رسد. داویدسون^{۱۹} در سال ۱۹۹۲، به مطالعه‌ی موردی دیوار آب‌بند سد Mud Mountain و بررسی کمی دیوار آب‌بند و رفتارها و نحوه‌ی اجرای آن در این سد پرداخته است. در این مقاله نشان داده شده است که در هسته‌ی این سد به دلیل تراوش زیاد مشکلات زیادی برای هسته ایجاد شده است و دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در هسته و پی برای کنترل تراوش ساخته می‌شود. پرازو^{۲۰} و همکاران در سال

^{۱۶} Deshmukh et al

^{۱۷} Geol et al

^{۱۸} Qizheng et al

^{۱۹} Davidson

^{۲۰} Perazzo et al

۱۹۹۲، به بررسی میزان کارایی سدهای خاکی با دیوار آب‌بند پرداخته‌اند و استفاده از دیوار آب‌بند با روش‌های جلوگیری از تراوش را مقایسه کرده‌اند. در این تحقیق این نکته بیان شده که مجموعه‌ای متشکل از دیوار آب‌بند و چاه فشارشکن و پتوی نفوذناپذیر دآن‌های پایین دست به عنوان گزینه‌ی بهینه استفاده می‌شود.

کریم نیا (۱۳۷۸) به مطالعه رفتار غیر خطی دیوار آب‌بند سد کرخه با استفاده از روش‌های عددی پرداخته است. نتایج این پایان‌نامه این بود که در ساخت دیوارهای آب‌بند مورد استفاده در پی همگن، غالباً از بتن پلاستیک با مشخصات نزدیک به پی اطراف استفاده می‌شود، بنابراین در طول دیوار در مجاورت پی همگن، تغییرات تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در دیوار و پی به صورت یکنواخت و در حد قابل تحمل به وسیله‌ی بتن پلاستیک است. لیکن، در قسمت‌هایی از دیوار که در مجاورت هسته‌ی رسی قرار می‌گیرد، به دلیل اختلاف زیاد میان مشخصات هسته و دیوار آب‌بند تغییرات قابل توجهی در تنش‌ها و تغییر شکل‌های دیوار آب‌بند و هسته‌ی رسی ایجاد می‌شود. به گونه‌ای که چنانچه نسبت مدول الاستیسیته‌ی دیوار آب‌بند و هسته‌ی رسی بالا رود وقوع لغزش میان دیوار و هسته‌ی احتمالی خواهد بود، لذا در این قسمت‌ها باید از مصالح مناسب بین دیوار و هسته استفاده شود بطوری که اصطکاک مناسب با دیوار آب‌بند ایجاد شود. همچنین به این نکته اشاره شده در صورتی که از بتن با مدول الاستیسیته‌ی بالا در ساخت دیوار استفاده شود در قسمت‌های بالا به طور مناسب آرماتورگذاری شود. شهبازیان اهری و همکاران (۱۳۷۹) در مقاله‌ای به بررسی اندرکنش استاتیکی سد، پی و دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در پی‌های ناهمگن سدهای خاکی پرداخته‌اند. در این مقاله به بررسی پارامتریک اندرکنش دیوار و پی مجاور آن برای تعیین اهمیت هرکدام از پارامترهای مرتبط به مسأله داشته تا وضعیت تنش - کرنش‌های به وجود آمده در مصالح دیوار آب‌بند را تا حدودی روشن سازد. از نتایجی که در این مقاله به دست آمد این بود که دیوار آب‌بند در داخل پی ناهمگن تا حدودی از کرنش‌های پی پیروی می‌کند و همچنین نشان داده شده که با افزایش طول امتداد یافته‌ی دیوار داخل هسته (نیلینگ)، مقادیر کرنش دیوار به شدت افزایش می‌یابد و مدول الاستیک مصالح بتن پلاستیک تأثیر

چندانی روی کرنش‌های واقع شده در آن ندارد ولی مقاومت بالای مصالح دیوار به شدت مقادیر کرنش دیوار را تحت تأثیر قرار داده و کاهش می‌دهد. میرقاسمی^{۲۱} در سال ۱۹۹۹، در مقاله‌ای به بررسی گرادیان هیدرولیکی بحرانی در بتن پلاستیک پرداخته است. در این مقاله نتایج آزمایشگاهی که بر روی طرح اختلاط‌های مختلف بتن پلاستیک انجام شده ارائه شده است و در مورد گرادیان هیدرولیکی بحرانی در این آزمایش‌ها بحث شده است. از نتایجی که در این مقاله به دست آمده این است که اسلامپ بتن پلاستیک با افزایش بنتونیت و مصالح سیمانی افزایش می‌یابد و بنتونیت مقاومت فشاری را کاهش ولی شکل‌پذیری را بهبود می‌بخشد. همچنین فرسایش نمونه‌ها از همین فاکتورهایی که روی مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد، اثر می‌پذیرد. کریم‌نیا^{۲۲} و همکاران در سال ۲۰۰۰، در مقاله‌ای رفتار آب در دیوار آب‌بند همگن و ناهمگن را بررسی کردند. آن‌ها همچنین سد کرخه را در پی ناهمگن مدل‌سازی کردند و پس از آن نتایج را با مدل مشابه، اما در پی همگن مقایسه کردند. نتایج حاصل از تحلیل در پی همگن نشان می‌دهد که اگر ضریب الاستیسیته‌ی پی و دیوار آب‌بند نزدیک به یکدیگر باشد، تنش و کرنش دیوار تنظیم و قابل قبول است. پاکزاد و همکاران (۱۳۸۰) به منظور مطالعه‌ی اندرکنش استاتیکی سد، پی و دیوار آب‌بند بتن پلاستیکی سد کرخه را با استفاده از نرم افزار CA ۲ مدل‌سازی عددی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از تحلیل پارامتریک مدل دیوار آب‌بندی سد، عوامل مختلف از قبیل ضریب الاستیسیته، مقاومت بتن پلاستیک، خواص اتصال دیوار و پی، خواص پی و هسته‌ی رسی سد و چگونگی اتصال دیوار به هسته‌ی سد و اثرات آن بر تنش و کرنش دیوار آب‌بندی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مقدار کرنش‌ها در فاز نهایی از ساخت دیوار آب‌بند بسیار بحرانی است. مقدار زیادی از تفاوت بین کرنش دیوار آب‌بند در هسته‌ی رسی و مقدار کرنش دیوار مجاور نشان می‌دهد دیوار سخت به سمت هسته می‌لغزد و در هسته نیلینگ رخ می‌دهد. یکی از نتایج جالب توجه این تحلیل وقوع کرنش پلاستیک، تقریباً در تمام سطوح دیوار است. همچنین مشاهده شد که با افزایش نفوذ دیوار به هسته‌ی رسی، کرنش‌های اضافی در دیوار که داخل پی و به‌خصوص در

^{۲۱} Mirghasemi

^{۲۲} Karimnia et al

پی مجاور هسته‌ی رسی است افزایش خواهد یافت. صدقی اصل (۱۳۸۰)، به بررسی اثر موقعیت بهینه دیوار آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی پرداخت و به این نتیجه رسید که بهترین مکان برای کنترل نشت و زیر شویی، پاشنه و پنجه سد است. میرقاسمی^{۲۳} و همکاران در سال ۲۰۰۱، در مقاله‌ای به بررسی مشخصات مکانیکی بتن پلاستیک (مطالعه‌ی موردی سد کرخه) پرداخته‌اند. در این مقاله بتن پلاستیک تحت آزمایش قرار گرفته و تأثیر نوع پارامترها را بر روی نتایج آزمایش بررسی کرده‌اند. از نتایج این مقاله این بود که مقاومت فشاری بتن پلاستیک با نسبت آب به سیمان، مقدار بنتونیت، نسبت سنگدانه به سیمان، شکل سنگدانه، نوع و خاصیت سیمان، سن بتن و نحوه ساخت بتن بستگی دارد. همچنین مقاومت و تغییرشکل پذیری خیلی به هم وابسته‌اند و فاکتورهایی که به یکی تأثیر می‌گذارد بر دیگری نیز تأثیر می‌گذارد. صدر کریمی و همکاران (۱۳۸۱) بر روی دیوار آب‌بند سد ارسباران، الگوی توزیع تنش، تغییر شکل و اندرکنش دیوار آب‌بند بتن پلاستیکی و زمین مجاور پی طی عملکرد سد، با استفاده از دو روش الاستیک و ویسکوالاستیک و نرم افزار ANSYS مطالعه کردند. نتایج نشان می‌دهد که اولاً، میزان کرنش جذب شده توسط دیوار آب‌بند، بطور قابل توجهی به نسبت بنتونیت به سیمان و همچنین زاویه‌ی اصطکاک بین بتن پلاستیک و خاک مجاور بستگی دارد. ثانیاً، با توجه به رفتار ویسکوالاستیک بتن پلاستیک، دیده می‌شود که حتی پس از توسعه‌ی سد و با گذشت زمان، بتن پلاستیکی تغییر شکل را گسترش می‌دهد و کرنش جذب شده توسط دیوار به تدریج به خاک مجاور منتقل می‌شود. اولی پور و همکاران (۱۳۸۲) در مقاله‌ای به بررسی اندرکنش دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک در پی و بدنه سدهای خاکی و بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی دیوار آب‌بند پرداخته‌اند و توضیحاتی در مورد مدل‌سازی دیوار آب‌بند و رفتار آن در نرم‌افزار ارائه شده‌است. از نتایجی که در این مقاله به دست آمد این است که بر اساس تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل انتخابی، دیوار آب‌بند در تمام ترازها به مرحله‌ی پلاستیک می‌رسد و تغییر شکل‌های پلاستیک و ماندگار در آن باقی می‌-

^{۲۳}Mirghasemi et al

ماند. بنابراین به هنگام مدل‌سازی این مصالح باید رفتار مصالح را به صورت غیر خطی مدل نمود. هم-چنین هر چقدر سختی نسبی مصالح هسته‌ی رسی نسبت به دیوار آب‌بند بتن پلاستیک بیش‌تر باشد پدیده‌ی نیلینگ نیز شدیدتر خواهد بود و پدیده‌ی نیلینگ در صورتی که شدید باشد موجب مشکلاتی در هسته‌ی رسی از جهت ایجاد ترک‌های کششی و گسیختگی در هسته‌ی رسی خواهد شد.

رعیتی (۱۳۸۲) به بحث در مورد تحلیل دینامیکی مجموعه‌ی پی و دیوار آب‌بند در سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله پرداخته است و نتایج به‌دست آمده را بر روی مجموعه‌ی پی و دیوار آب‌بند سد کرخه مورد تحلیل و بررسی قرار داده است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که انجام تحقیقات عددی به منظور بررسی کمی و کیفی رفتار دیوار آب‌بند در مواردی که ارتفاع سد قابل توجه بوده و پی سد از لحاظ تغییر شکل پذیری ناهمگن باشد، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین مطابق تحلیل‌های انجام گرفته در کلیه‌ی مراحل بارگذاری ماکزیمم تغییر مکان افقی و کرنش برشی در دیوار آب‌بند در مجاورت هسته‌ی رسی و در بالای دیوار آب‌بند رخ می‌دهد به نحوی می‌توان گفت امتداد یافتن دیوار داخل هسته‌ی رسی که برای کاهش نشست از محل اتصال هسته‌ی رسی و پی است، به حد چشمگیری مقادیر کرنش و تنش دیوار داخل پی مجاور هسته‌ی رسی را بالا می‌برد. هر چه طول امتداد یافته‌ی دیوار در هسته‌ی رسی بیش‌تر باشد کرنش در دیوار داخل پی به‌طور کلی بالاتر خواهد بود. همچنین برای تأمین سلامتی دیوار و پایین نگه داشتن مقادیر کرنش حادث شده در دیوار آب‌بند طول نفوذ یافته در داخل هسته‌ی رسی را تا حد امکان کاهش داده و مصالح اطراف دیوار آب‌بند را خیلی سست انتخاب نکرد و با توجه به رسیدن دیوار آب‌بند و پی اطراف آن به مرحله‌ی پلاستیک در تحلیل‌های پایان ساخت و آگیری اولیه به نظر می‌رسد که بایستی مدل‌های عددی مرتبط با این موضوع حتماً مصالح را به صورت غیرخطی در نظر گرفت. قضاوی و همکاران (۱۳۸۳) رفتار دینامیکی دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک در سدهای خاکی را مورد بررسی قرار دادند. تحلیل‌های انجام یافته در مرحله‌ی پایان ساخت سد و در شرایطی که دریاچه سد خالی است، صورت پذیرفته و رفتار مصالح سد، پی سد و دیوار آب‌بند بتن پلاستیک به طور ایده آل الاستیک خطی فرض شده است. جهت

شبهه سازی بارگذاری زلزله از موج سینوسی با دامنه‌ی نوسانات $g/4$ ، مدت زمان ۵ ثانیه و فرکانس نوسانات $5/2$ هرتز استفاده شده است. نتایج تحلیل‌های انجام یافته با نرم‌افزار PLAXIS ۱۰٫۲ نشان می‌دهد که حداکثر تنش‌های کششی و برشی بیشینه‌ی دیوار در مرز بین هسته و پی سد ایجاد می‌شود و با سخت‌تر شدن مصالح دیوار میزان این تنش‌ها در دیوار افزایش می‌یابند. جعفری^{۲۴} و همکاران در سال ۲۰۰۴، به بررسی برآورد رفتار دینامیک سد خاکی مسجد سلیمان با استفاده از آزمایش نیروی لرزه پرداخته‌اند. در طول آزمایشات پاسخ بدنه‌ی سد در سه جهت مورد آزمایش قرار گرفت و تحریک لرزه‌ای نیز اندازه‌گیری شده در کنار آزمایش‌های دینامیکی در جابجایی دو بعدی و سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام شد. تأثیر مدل‌سازی هندسی سد و تکیه‌گاه و عمق پی در مدل مورد تحقیق قرار گرفت. در این تحقیق نتایج آزمایش نیروی لرزه و مدل‌سازی عددی بدنه‌ی سد نشان داده شده و مورد بحث قرار گرفته است. پاکزاد^{۲۵} و همکاران در سال ۲۰۰۵، در مقاله‌ای به توضیح در مورد طراحی و اجرای دیوار آب‌بند سد کرخه پرداخته‌اند و ضوابط طراحی و اجرای بزرگترین دیوار آب‌بند اجرا شده در جهان را توضیح داده‌اند. در این مقاله اشاره شده دیوار آب‌بند سد کرخه در حدود ۱۹۰۰۰۰ متر مربع بزرگترین دیوار آب‌بند که تاکنون در جهان ساخته شده است. در سایت سد کرخه به کار بردن دیوار آب‌بند از لحاظ اقتصادی و اجرایی و دوام و کارایی برای آب‌بندی بهتر از پرده‌ی تزریق است. رامپلو^{۲۶} و همکاران در سال ۲۰۰۸، در مقاله‌ای به بررسی پاسخ زلزله در سدهای خاکی همگن پرداخته‌اند و نتایج تغییر مکان و تنش‌ها را برای این نوع تحلیل در سدهای خاکی نشان داده‌اند و نتایج شتاب برای تاج سد را نشان داده‌اند. در این مقاله از نرم‌افزار PLAXIS استفاده شده است و تغییرات جابجایی و شتاب برای تاج سد ارائه کرده است. قبادیان و خدائی (۱۳۸۸)، به بررسی تأثیرات دیوار آب‌بند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود پرداختند. در این تحقیق

^{۲۴} Jafari et al

^{۲۵} Pakzad et al

^{۲۶} S . Rampello et al

به منظور بررسی دقیق تأثیر هر یک از عوامل مذکور بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی مدلی کامپیوتری تهیه کردند که در آن معادله عمومی جریان آب در خاک همگن اشباع در شرایط همسان و غیر همسان با استفاده روش احجام محدود و الگوریتم گوس - سایدل حل شده است. به منظور صحت سنجی مدل تهیه شده از نتایج اندازه گیری آزمایشگاهی و همچنین نتایج مدل WinMseep که یک مدل پذیرفته شده است، استفاده شده است. یکی از مزیت‌های نسبی مدل مذکور در نظر گرفتن نفوذپذیری برای دیوار آب‌بند است. نتایج این تحقیق نشان داد که با احداث یک دیوار آب‌بند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (بدون دیوار آب‌بند) کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان هیدرولیکی خروجی در موقعیتی که دیوار آب‌بند در پایین دست احداث شود، دیده می‌شود. در شرایط وجود دو دیوار آب‌بند یکی در پاشنه و دیگری در پنجه سد و یک زهکش در حد فاصل آن‌ها هر چقدر زهکش در فاصله بیش‌تری از پاشنه احداث شود تأثیر آن در کاهش نیروی زیرفشار کل و گرادیان خروجی بیشتر است. علاوه بر این با افزایش عمق دیوار آب‌بند بالادست در مقایسه با دیوار آب‌بند پایین دست مقدار گرادیان خروجی کاهش می‌یابد. شدت این کاهش برای دیوار آب‌بند پایین دست با عمق کوتاه‌تر مشهودتر است. توزیع فشار بالابرنده و گرادیان خروجی محاسبه شده برای شرایط خاک همسان و غیر همسان در زیر سازه تطابق بسیار نزدیکی با نتایج مدل WinMSeep داشت. پاکباز و همکاران (۲۰۰۹)، با مدل 2D-Seep به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. شعاعی و همکاران (۱۳۹۰) به منظور پیدا کردن یک ارتفاع خاکریزی حداکثر بحرانی، یک سد خاکی با هسته‌ی رسی، پی آبرفتی و دیوار آب‌بند بتن پلاستیک با ابعاد مشخص را توسط برنامه‌ی اجزای محدود PLAXIS به صورت دو بعدی مدل کردند و اثر عمق نفوذ دیوار آب‌بند در هسته‌ی سد و هم‌چنین مشخصه‌های مقاومتی هسته‌ی رسی و پی آبرفتی در

تشکیل محدوده‌ی خمیری مورد بررسی قرار دادند. با توجه به مطالعات صورت گرفته نتایج زیر به دست آمده است:

- در مرحله‌ی پایان ساخت، تا عمق نفوذ ۵ متری دیوار به داخل هسته، اثری از نقاط پلاستیک در دیوار مشاهده نمی‌شود اما از عمق نفوذ ۱۰ متری به بعد، نقاط پلاستیک در طول دیوار پدید می‌آید. در واقع با ابعاد و پارامترهای در نظر گرفته شده در آن تحقیق، عمق نفوذ ۱۰ متری به عنوان عمق نفوذ حداکثر شناخته می‌شود.

- مرحله‌ی پایان ساخت از لحاظ وضعیت تشکیل نقاط پلاستیک بحرانی‌ترین مرحله است.

- افزایش مشخصه‌های مقاومتی پی آبرفتی اثر بسیار بیشتری در کاهش نقاط پلاستیک در مقایسه با افزایش مشخصه‌های مقاومتی هسته‌ی رسی دارد..

حقیقی و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی و تحلیل اثر تراوش در سدهای خاکی با طراحی دیوار آب‌بند پرداختند و نتیجه گرفتند که در سدهای خاکی بعد از آبیگری و در طول بهره برداری سد، مسیرهای جریان حالت پایدار در بدنه سد ایجاد می‌شود، تا وقتی که سطح مخزن در یک تراز ثابت بماند مسیرهای جریان نیز ثابت خواهند بود، در صورتی که تراز آب در مخزن سد در رقوم نرمال باشد، بیشترین دبی خروجی از بدنه سد و پی آن خواهد داشت. آنچه که در تراوش آب از بدنه سد و پی آن حائز اهمیت است، دبی خروجی از بدنه سد و گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده در هسته و پی است. در این تحقیق که به منظور محاسبات تراوش صورت پذیرفته است، تعیین خطوط هم پتانسیل فشار آب و سطح جریان و محاسبه دبی خروجی از بدنه و پی و محاسبه گرادیان هیدرولیکی در هسته سد و پی با استفاده از مدل عددی مورد تحلیل قرار گرفته است. تحلیل های تراوش سد در دو حالت بدون تمهیدات آب‌بندی و با تعبیه دیوار آب‌بند تا سنگ کف انجام شد. با توجه به مقادیر دبی خروجی و گرادیان در مقطع بحرانی سد حاصل شد که دبی خروجی در حالت بدون تمهیدات آب‌بندی در حدود ۱۵۸ لیتر بر ثانیه خواهد بود که دبی خروجی با تعبیه دیوار آب‌بند به مقدار حدود ۶ لیتر بر ثانیه

کاهش یافت. همچنین گرادیان حداکثر در پایین دست هسته از مقدار $2/8$ به $0/05$ و همچنین نیروی بالابر در پایین دست بدنه از مقدار $0/4$ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به مقدار صفر کاهش یافت. لذا به نظر می رسد، می توان با احداث دیوار آببند در سدهایی که حجم مخزن کمی دارند و دیوار آببند در ابتدا پیش بینی نشده است افزایش ارتفاع سد و افزایش میزان برداشت آب از مخزن را در نظر گرفت.

منصوری^{۲۷} و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی اثر طول زهکش افقی و دیوار آببند بر نشت و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی ناهمگن با شبیه سازی عددی پرداختند. در این تحقیق طولهای مختلف زهکش و همچنین عمق و موقعیت های مختلف دیواره در زیر سد با نرم افزار Seep/w مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش طول زهکش افقی، سبب افزایش ناچیز مقدار نشت و گرادیان هیدرولیکی می شود و همچنین مناسب ترین موقعیت دیواره آببند در وسط پی سد است و با افزایش عمق دیواره مقدار نشت کاهش می یابد. اسدی سخمارسی^{۲۸} و همکاران (۲۰۱۴)، اثر دیوار آب-بند برای نشت در سدهای خاکی همگن با نرم افزار Seep/w پرداختند که در این تحقیق اثر عمق، موقعیت و نفوذپذیری دیوار آببند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که بهترین موقعیت دیوار آببند در فاصله $0/4$ تا $0/6$ عرض سد، از پاشنه سد است و همچنین میزان بهینه نفوذپذیری دیوار آببند بین $10e-8$ متر بر ثانیه است که با مقدار واقعی پارامترها در سد خاکی کرخه مورد مقایسه قرار گرفت که تقریباً برابر بودند اما عمق بدست آمده دیوار آببند. با استفاده از نرم افزار ۳،۵ درصد بیش تر از مقدار واقعی است که دلیل این اختلافها فرض همگن بودن سد است که در واقعیت سد خاکی کرخه نا همگن است. منصوری^{۲۹} و همکاران (۲۰۱۴)، با نرم افزار Seep/w به بررسی اثر موقعیت های مختلف دیوار آببند با زاویه های مختلف در زیر یک سد فرضی بر میزان زیرفشار پرداختند و نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مایل نمودن دیواره آببند باعث کاهش نیروی زیرفشار می-شود.

^{۲۷} Mansuri et al

^{۲۸} Asadi Sakhmarsi et al

^{۲۹} Mansuri et al

مرتضوی^{۳۰} و سلیمانی (۲۰۱۵)، به بررسی نشت از سد خاکی با نرم افزارهای Seep/w و Seep-۳D پرداختند که در این تحقیق، گرادیان هیدرولیکی در دو نرم‌افزار دو بعدی و سه بعدی برابر با ۰/۵ به دست آمد که از گرادیان هیدرولیکی بحرانی کم‌تر است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد اگر دیوار آب‌بند در پنجه سد قرار گیرد در کاهش نشت بیشتر موثر خواهد بود و گرادیان هیدرولیکی خروجی تقریباً سه چهارم گرادیان هیدرولیکی بحرانی خواهد بود. کیانفر (۱۳۹۵)، در بررسی خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی سد نرماب، پارامترهای مؤثر در طراحی آب‌بند و جلوگیری از نشت را مورد ارزیابی قرار داد و با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی، ضخامت زیاد آبرفت و مدل‌سازی نشت در نرم‌افزار Seep/w، بهترین روش آب‌بندی برای پی سد نرماب را دیوار آب‌بند بتن پلاستیک تعیین کرد. کریمی‌پور (۱۳۹۶)، اثر هر کدام از سیستم‌های پتوی رسی و دیوار آب‌بند به صورت جداگانه و همچنین به صورت ترکیبی را در کاهش میزان نشت (در چهار حالت) مورد مطالعه قرار داد. همچنین اثر پتوی رسی بر پایداری دامنه‌های بالادست و پایین دست سد در حالت تراوش پایدار مورد مطالعه قرار داد. به منظور انجام این مطالعه از مقطع سد خاکی غدیر و داده‌های آن بهره گرفت. علاوه بر برآورد ویژگی‌های تراوش، خطوط هم‌پتانسیل، فشار آب و سطح جریان در بدنه سد، مقدار گرادیان هیدرولیکی با استفاده از مدل عددی SEEP در هسته و پنجه سد نیز مورد تحلیل و بررسی قرار داد. نتایج مطالعات نشان داد که با اجرای پتوی رسی، مقدار نشت عبوری از بدنه سد حدود ۱۷ درصد کاهش می‌یابد و با ایجاد پرده آب‌بند در زیر هسته سد و اجرای همزمان پتوی رسی مقدار نشت از فونداسیون ۲۴ درصد و مقدار کل نشت از سد در حدود ۱۸ درصد کاهش پیدا می‌کند و با افزایش ۴۰ درصدی عمق پرده آب‌بند در بستر میزان نشت از فونداسیون ۳۰ درصد و کل نشت خروجی از سد در حدود ۳۱ درصد کاهش یافته و اجرای پتوی رسی تأثیری در پایداری دامنه بالادست و پایین دست سد ندارد. لو^{۳۱} و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل برای محاسبه جریان با استفاده از روش قطعه، با در نظر گرفتن جریان دو بعدی با توجه به اثرات دیوار آب‌بند ارائه کردند. همچنین اثرات ضخامت دیوار برش

^{۳۰} Mortazavi et al

^{۳۱} Luo et al

- (W)، نفوذ دیوار و عرض حفاری بر جریان را در این مدل به خوبی مورد توجه قرار دادند. سیواکومار^{۳۲} و همکاران (۲۰۱۸)، به مطالعه عددی بر تغییر شکل دیافراگم دیوار آببند تحت فشار نشت در خاک- های نفوذناپذیر پرداختند و نتایج خود را به صورت زیر بیان کردند:
- با افزایش هد فشار، تغییر شکل و انحراف در بالا دست و پایین دست دیوارهای آببند افزایش می- یابد.
- در پایین دست دیوار آببند نسبت به بالادست بیشتر تحت تاثیر تغییر شکل و انحراف قرار گرفته است.
- در بالادست دیوار آببند موقعیت نقطه‌ای که دارای حداکثر جابه‌جایی است، با افزایش فشار جابه‌جا می‌شود.
- با افزایش تراکم نسبی خاک، تغییر شکل و انحراف در بالادست و پایین دست دیواره‌های آببند، کاهش می‌یابد.

^{۳۲} Sivakumar et al

جدول ۲-۲ خلاصه‌ای از تحقیقات پیشین

ردیف	محقق	سال	موضوع تحقیق
۱	دشموخ و همکاران	۱۹۸۷	بررسی دیوار آب‌بند بتن پلاستیک برای کنترل تراوش سد Salaudi
۲	گول و همکاران	۱۹۸۷	روش‌های کنترل تراوش در سد Kapur در هند
۳	داویدسون	۱۹۹۲	بررسی کمی دیوار آب‌بند و رفتارها و نحوه‌ی اجرای آن در سد Mud Mountain
۴	پرازو و همکاران	۱۹۹۲	بررسی میزان کارایی سدهای خاکی با دیوار آب‌بند
۵	کریم نیا	۱۳۷۸	مطالعه رفتار غیر خطی دیوار آب‌بند سد کرخه با استفاده از روش‌های عددی
۶	شهبازیان اهری و همکاران	۱۳۷۹	بررسی اندرکنش استاتیکی سد، پی و دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در پی‌های ناهمگن سدهای خاکی
۷	میرقاسمی و همکاران	۱۹۹۹	بررسی گرادیان هیدرولیکی بحرانی در بتن پلاستیک
۸	کریم‌نیا و همکاران	۱۳۸۰	پیش‌بینی نرخ تزریق در شکستگی سنگ با شبیه‌سازی عددی
۹	پاکزاد و همکاران	۱۳۸۰	مطالعه‌ی اندرکنش استاتیکی سد، پی و دیوار آب‌بند بتن پلاستیکی سد کرخه، با استفاده از نرم افزار CA ۲
۱۰	صدقی اصل	۱۳۸۰	بررسی اثر موقعیت بهینه دیوار آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی
۱۱	میرقاسمی و همکاران	۲۰۰۱	بررسی مشخصات مکانیکی بتن پلاستیک (مطالعه‌ی موردی سد کرخه)
۱۲	صدر کریمی و همکاران	۱۳۸۱	الگوی توزیع تنش، تغییر شکل و اندرکنش دیوار آب‌بند بتن پلاستیکی و زمین مجاور پی طی عملکرد سد ارسباران، با استفاده از دو روش الاستیک و ویسکوالاستیک
۱۳	اولی پور و همکاران	۱۳۸۲	بررسی اندرکنش دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک در پی و بدنه سدهای خاکی و بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی دیوار آب‌بند
۱۴	رعیتی	۱۳۸۲	تحلیل دینامیکی مجموعه‌ی پی و دیوار آب‌بند در سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله
۱۵	قضاوی و همکاران	۱۳۸۳	رفتار دینامیکی دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک در سدهای خاکی
۱۶	جعفری و همکاران	۲۰۰۴	برآورد رفتار دینامیک سد خاکی مسجد سلیمان با استفاده از آزمایش نیروی لرزه
۱۷	پاکزاد و همکاران	۲۰۰۵	طراحی و اجرای دیوار آب‌بند سد کرخه
۱۸	رامپلو و همکاران	۲۰۰۸	بررسی پاسخ زلزله در سدهای خاکی همگن
۱۹	پاکباز و همکاران	۲۰۰۹	ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش

۲۰	قبادیان و خدائی	۱۳۸۸	بررسی تأثیرات دیوارآب‌بند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود
۲۱	حقیقی و همکاران	۱۳۹۲	بررسی و تحلیل اثر تراوش در سدهای خاکی با طراحی دیوارآب‌بند
۲۲	منصوری و همکاران	۲۰۱۳	به بررسی اثر طول زهکش افقی و دیوارآب‌بند بر نشت و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی ناهمگن با شبیه سازی عددی
۲۳	اسدی سخمارسی و همکاران	۲۰۱۴	اثر دیوارآب‌بند برای نشت در سدهای خاکی همگن با نرم افزار Seep/w
۲۴	منصوری و همکاران	۲۰۱۵	بررسی نشت از سد خاکی با نرم افزارهای Seep/w و D ³ Seep
۲۵	کیانفر	۱۳۹۵	بررسی خصوصیات زمین شناسی و ژئوتکنیکی سد نرماب
۲۶	کریمی‌پور	۱۳۹۶	بررسی اثر هر کدام از سیستم‌های پتوی رسی و دیوار آب‌بند به صورت جداگانه و همچنین به صورت ترکیبی در کاهش میزان نشت
۲۷	سیواکومار و همکاران	۲۰۱۸	مطالعه عددی بر تغییر شکل دیافراگم دیوار آب‌بند تحت فشار نشت در خاک- های نفوذناپذیر

۲-۱۳- جمع‌بندی

با توجه به مطالبی که در این فصل به آن‌ها پرداخته شد، روش‌های مختلفی برای آب‌بندی سدها وجود دارد که براساس مزیت‌ها و نقاط ضعف هر روش، استفاده از دیوار آب‌بند برای این سد، روش مناسب و بهینه انتخاب شده‌است. بنابراین بررسی عملکرد دیوار آب‌بند برای سد نرماب اهمیت ویژه‌ای دارد که در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

فصل سوم

معرفی ساختگاه سد

نرماب و اجزای سد

۳-۱- معرفی سد

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 ارائه شده است. محدوده فوق در بخش میانی حوضه آبریز رودخانه گرگان قرار دارد که از شرق به رودخانه 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 ماهانه مشاهده شده در منطقه ۰/۵- و متوسط حداکثر ماهانه ۳۵/۹ درجه سانتی گراد می باشد. تعداد روزهای یخبندان حداکثر ۳۰ روز می باشد که عموماً بسیار کم تر از آن است. متوسط تبخیر در محل سد نرماب ۱۶۰۰ میلی متر است.

در طرح سد نرماب سازه های ذیر لحاظ شده است [شرکت آب منطقه ای استان گلستان، ۱۳۸۵]:

- بدنه سد نرماب 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 چهل چای به همراه کانال و تونل انتقال آب حوزه رودخانه چهل چای
 - بند انحرافی خرمالو به همراه کانال و تونل انتقال آب حوزه رودخانه خرمالو
- با توجه به آب قابل استحصال از طرح سد نرماب، با احتساب منابع آب زیرزمینی و در نظر گرفتن الگوی کشت پیشنهادی، میتوان سطحی معادل ۲۲۰۰۰ هکتار را به زیر کشت آبی برد. همچنین پیش بینی شده است که حدود ۲۵ میلیون مترمکعب آب به صورت سالیانه صرف مصارف شرب و صنعت شود. اجزای شبکه آبیاری و زهکشی جهت رسیدن به اهداف فوق، به شرح ذیل می باشد:

- بند تنظیمی مینودشت

- کانال های اصلی RM و LM

- کانال‌های درجه یک و دو در ساحل چپ و راست
- شبکه زهکش‌های اصلی درجه یک و دو در ساحل چپ و راست
- شبکه آبیاری و زهکشی فرعی (درجه ۳)
- ایستگاه پمپاژ، جهت انتقال دبی از ترار ۹۰ به ترار ۱۲۵ متر

۳-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

ساختگاه سد نرماب در شمال خاوری ایران، استان گلستان و در فاصله حدود ۴ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان مینودشت واقع شده است. مختصات جغرافیایی محل سد مذکور به شرح زیر است [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵]:

$$\text{تکیه‌گاه راست} = \begin{cases} X = ۳۵۷۳۷۲,۴۷ \\ Y = ۴۱۱۶۷۴۴,۸۷ \end{cases}$$

$$\text{تکیه‌گاه چپ} = \begin{cases} X = ۳۵۶۲۰۲,۱۰ \\ Y = ۴۱۱۶۸۷۳,۷۵ \end{cases}$$

راه دسترسی به محل سد نرماب از طریق جاده آسفالتی مینودشت - جنگل ده امکان پذیر است. جاده مذکور از جناح چپ محور سد عبور می‌نماید.

ساختگاه سد انحرافی چهل چای نیز در جنوب خاوری ۵ کیلومتر با مینودشت فاصله دارد. مختصات جغرافیایی محل سد انحرافی مزبور به شرح ذیل است:

$$\text{تکیه‌گاه راست} = \begin{cases} X = ۳۵۹۴۹۵,۵ \\ Y = ۴۱۱۹۱۴۴,۰ \end{cases}$$

$$\text{تکیه‌گاه چپ} = \begin{cases} X = ۳۵۹۴۳۹,۰ \\ Y = ۴۱۱۹۱۲۲,۰ \end{cases}$$

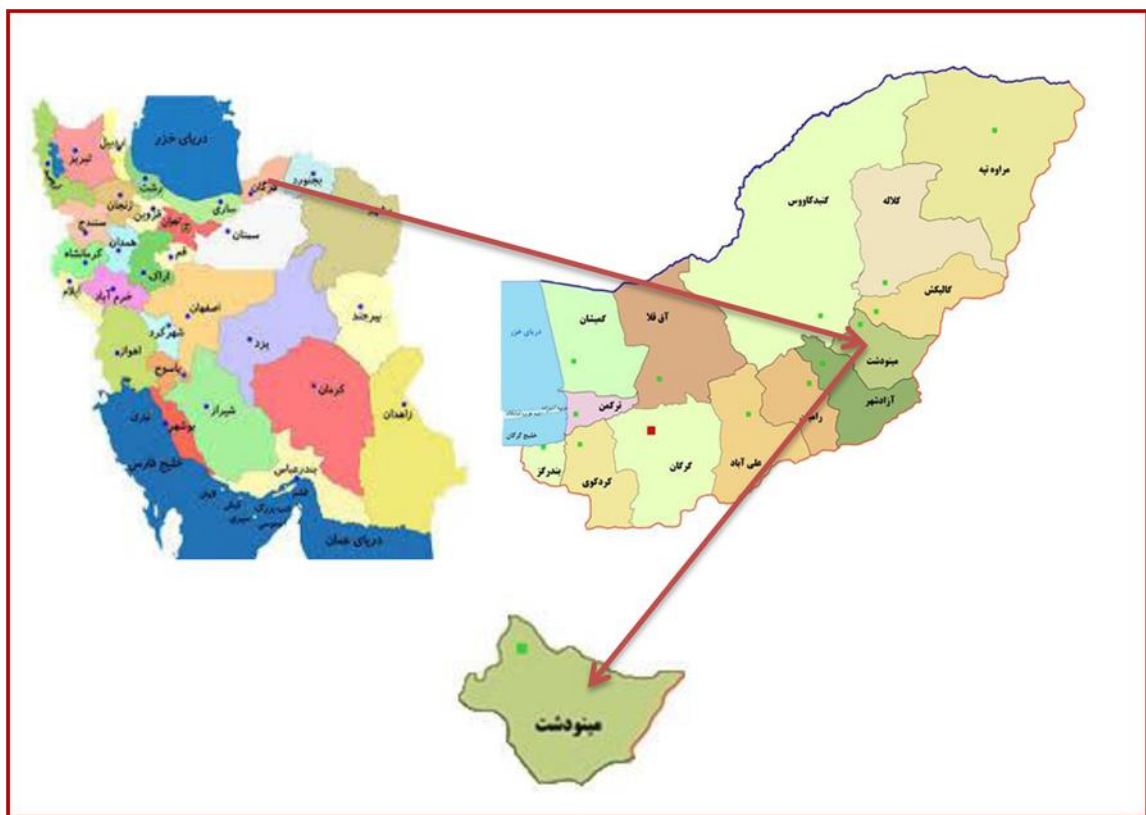
راه دسترسی به محل سد انحرافی چهل چای از طریق جاده آسفالتی شهرستان مینو دشت-روستای نالاج امکان پذیر است. جاده مزبور از جناح چپ محور سد انحرافی عبور می‌کند.

ساختگاه سد انحرافی خرمالو در جنوب باختری شهرستان مینودشت و جنوب خاوری شهرستان آزاد شهر در نظر گرفته شده است. این ساختگاه حدوداً ۶ کیلومتر با شهرستان آزاد شهر فاصله داشته و پس از عبور از روستای خاندوز ساختگاه مذکور قابل دسترسی است.

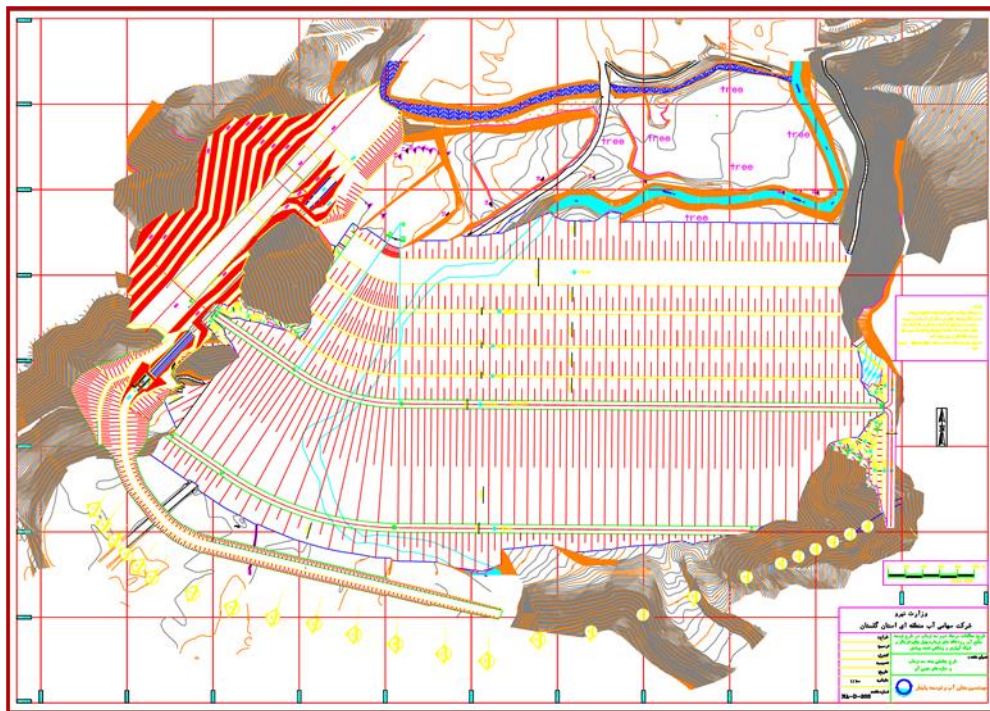
$$\text{تکیه گاه راست} = \begin{cases} X = 346452,5 \\ Y = 4104051,0 \end{cases}$$

$$\text{تکیه گاه چپ} = \begin{cases} X = 359439,0 \\ Y = 4119122,0 \end{cases}$$

در شکل های ۱-۳ تا ۴-۳ موقعیت، پلان، تصویر ماهواره ای و نمای سد نرماب نشان داده شده است.



شکل ۱-۳، موقعیت سد نرماب [شرکت آب منطقه ای استان گلستان]



شکل ۳-۲، پلان سد نرمام [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵]



شکل ۳-۳- تصویر ماهواره‌ای محدوده طرح [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵]



شکل ۳-۴، نمایی از سد نرماب

۳-۲-۱- معرفی ارکان پروژه

- کارفرمای پروژه: شرکت سهامی آب منطقه ای استان گلستان
- مشاور پروژه: شرکت مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار
- پیمانکار پروژه: شرکت مهندسی سپاسد

۳-۲-۲- شناسنامه طرح در یک نگاه

جدول ۳-۱، شناسنامه طرح در یک نگاه [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵]

ردیف	نوع سد	خاکی همگن
۱	حجم کل مخزن در تراز نرمال	۱۱۵ میلیون مترمکعب
۲	حجم کل خاکریزی بدنه	۶ میلیون مترمکعب
۳	حداکثر ارتفاع سازه ای سد	۶۰ متر
۴	تراز تاج سد	۲۱۵ متر بالاتر از سطح دریا
۵	تراز کف سد	۱۵۵ متر بالاتر از سطح دریا
۶	طول تاج	۸۰۷ متر
۷	سیستم انحراف	دو رشته تونل به طول ۵۵۰ متر و قطر ۴,۵ متر
۸	نوع سرریز	آزاد
۹	تراز لبه سرریز	۲۰۴ متر بالاتر از سطح دریا
۱۰	عرض سرریز	۴۰ متر

۳-۳- زمین شناسی عمومی ساختگاه سد

از دیدگاه زمین شناسی منطقه‌ای، گستره طرح در مرز دو زون گرگان- دشت و زون کپه داغ- هزار مسجد واقع شده‌است. منطقه مورد مطالعه بخشی از حاشیه شمالی رشته کوه‌های چین خورده و رانده شده البرز است و رشته کوه‌های کپه داغ- هزار مسجد، در شمال استان خراسان که تا مرز ترکمنستان گسترش دارد، در جهت غربی خود به رشته کوه‌های البرز می‌پیوندد. هر چند که این رشته کوه‌ها در دوره کرتاسه و دوره‌های قبل از آن اغلب به صورت حوضه دریائی مستقل از حوضه البرز و جدا از آن بوده ولی گهگاه نیز با آن حوضه در ارتباط و احیاناً با آن یکی بوده است [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵].

ساختار سد نرماب در محور سد بر روی سنگهای آندزیت بازالت سیلورین (شکل ۳-۵) قرار گرفته است. بازگشایی پرتال‌های خروجی و ورودی سیستم انحراف آب و بررسی های بعمل 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 محور سد نامتقارن و دارای شیب‌های دامنه‌ای نسبتاً تندی است که کف دره ضمن دارا بودن شیب بسیار ملایم به طرف رودخانه، با رسوبات ضخیم آبرفت‌های رودخانه-ای پوشیده شده‌است.

رسوبات آبرفتی بستر رودخانه دارای ضخامتی حدود ۶۰ متر متشکل از لایه‌های ریزدانه و درشت دانه بوده که در طی حفاری گمانه‌ها در این قسمت مواردی دال بر وجود آرتزین دیده شده‌است. 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 شده‌است.

خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مشتمل بر چهار مورد کلی زیر است:

الف- توصیف عمومی نهشته‌های آبرفتی شامل رنگ، دانه‌بندی، تراکم و تغییر لایه.

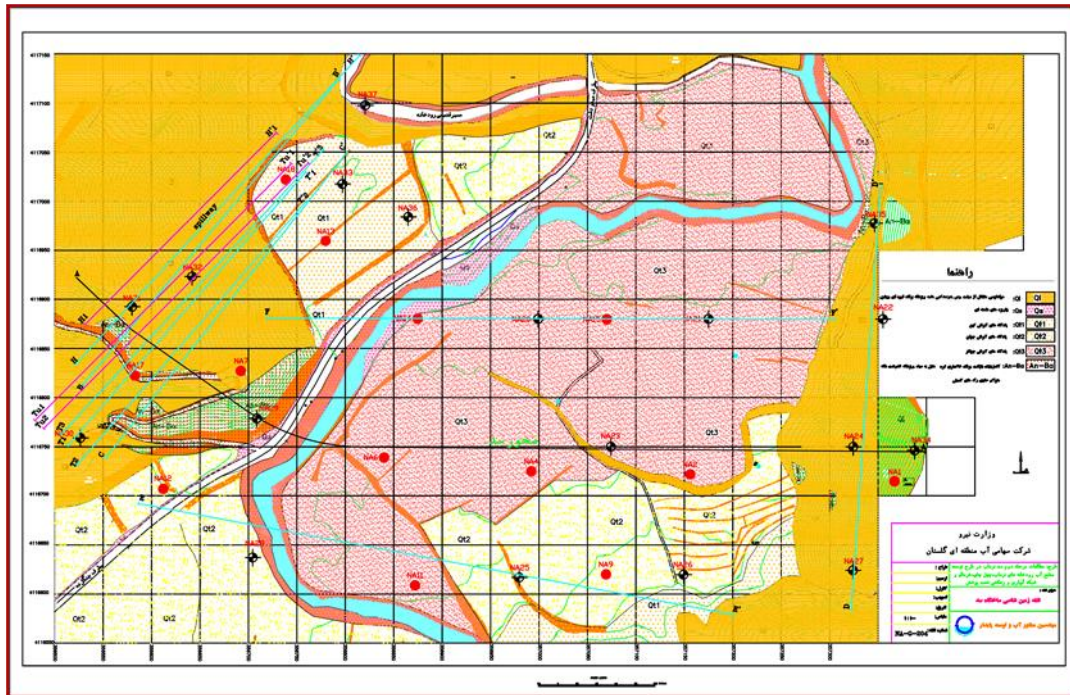
ب- توصیف عمومی توده‌ی سنگ شامل جنس، رنگ، درجه‌ی فرسایش، هوازدگی، نحوه‌ی گسترش درز و شکاف‌ها، نوع مواد پرکننده، توصیف زون‌های خرد شده یا زون‌های گسله.

پ- توصیف ویژگی‌هایی نظیر، درصد مغزه‌بازیافتی (C.R) و شاخص کیفی توده سنگ (RQD).

ت- توصیف خلاصه نتایج حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری (لوفران و لوژان) و آزمایش‌های ضربه و نفوذ استاندارد (SPT یا CPT).

هدف از مطالعات ژئوتکنیکی، شناخت زمین‌شناسی زیرسطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی برای طراحی سد و سازه‌های وابسته است، به طوری که بتوان ارزیابی صحیحی از مشخصه‌های ژئوتکنیکی سنگ بستر در ساختگاه سد به دست آورد. بدین منظور یک سری بررسی‌های ژئوتکنیکی شامل انجام حفاری‌های اکتشافی، آزمایش‌های صحرایی درون چاهی و همچنین انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی به مرحله اجرا در آمده 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 [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵].



شکل ۳-۵، نقشه زمین‌شناسی ساختگاه سد نرماب [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵]

۳-۴- زمین‌شناسی مهندسی

۳-۴-۱- زمین ریخت‌شناسی ساختگاه

رودخانه‌ی نرماب، از جنوب شهرستان مینودشت باروند جنوب غربی- شمال شرقی عبور می‌کند. با توجه به شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه، ساختگاهی در فاصله حدود ۴ کیلومتری جنوب غربی شهرستان مینودشت و در کوهپایه‌های رشته‌کوه البرز برای احداث سد انتخاب شده است. مقطع محور انتخابی تقریباً نامتقارن و دارای شیب‌های دامنه‌ای نسبتاً تندی است، به طوری که شیب دامنه‌ای تکیه‌گاه راست از پادگانه‌ی آبرفتی ساحل راست رودخانه تا تراز ۲۱۰ متر بالاتر از سطح دریا حدوداً ۳۰ درجه است، از این تراز شیب دامنه‌ای به ۳۹ درجه افزایش می‌یابد، کف دره به وسیله‌ی

رسوبات ضخیم آبرفت‌های رودخانه‌ای پوشیده شده و دارای شیب بسیار ملایم به طرف رودخانه است. رودخانه‌ی نرماب در بستری U شکل حرکت می‌کند که دیواره‌های آن دارای شیب تند و نزدیک به 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، حدوداً به ۱۰ متر می‌رسد که به صورت دیواره‌ی نزدیک به قائم قابل مشاهده است.

شیب دامنه‌ای تکیه‌گاه چپ از بستر رودخانه‌ی فعلی تا حدود ۱۶۵ متر بالاتر از سطح دریا، حدود ۳۸ درجه و از تراز ۱۶۵ تا 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 [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان].

۳-۴-۲- سنگ چینه شناسی

حوضه آبریز رودخانه گرگان رود (رودخانه‌های چهل چای، نرماب و خرمالو) بر بخشی از حوضه رسوبی هزار مسجد کپه داغ منطبق بوده و لیتولوژی واحدهای سنگی و چینه شناسی آن از مشخصات این حوضه تبعیت می‌نماید. این زون به صورت باریکه طولی 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 تفکیک می‌باشند. گروه اول، سازندهای ناپیوسته که مربوط به رسوبات دوران چهارم بوده و آبرفت‌های عهد حاضر را تشکیل می‌دهند که توده سنگ 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 می‌شود [گزارش‌های مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار]:

۳-۴-۲-۱- سازندهای ناپیوسته

این رسوبات مربوط به رسوبات دوران چهارم بوده و شامل رسوبات آبرفت‌های رودخانه‌ای، پادگانه‌های آبرفتی، خاک‌های برجای حاصل از فرسایش و واریزه‌های دامنه‌ای است.

۳-۴-۲- سنگ بستر ساختگاه

سنگ بستر ساختگاه از دو دیدگاه بررسی شده‌است که شامل بررسی صحرایی و نتایج حاصله از تشریح میکروسکوپی می‌باشد. به‌طور 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 است که هم به‌صورت فنوکریست و هم به‌صورت میکروولیت‌های پلاژیوکلاز قابل رویت می‌باشند. سنگ بستر آندزیتیک بازالت در ساختگاه سد نرماب، عمدتاً به رنگ خاکستری تیره متمایل به سیاه و به‌طور پراکنده متمایل به سبز، ریزدانه و متراکم، حاوی رگه و رگچه‌های سفید رنگ کلسیتی است. این سنگ‌ها دارای سطحی سخت و خشن می‌باشند. در محدوده‌ی هوازده، زمینه اکسیده یا حاوی اکسید آهن است که به همین دلیل زمینه یا متن سنگ به رنگ قهوه‌ای روشن می‌باشند. در قسمت‌هایی که سنگ بستر متمایل به سبز است به دلیل وجود کلریت است. بافت سنگ بستر ساختگاه، پورفیریتیک، میکروولیتی و اینترسرتال است [گزارش‌های مهندسين مشاور آب و توسعه پایدار].

۳-۴-۳- زمین ساخت ساختگاه سد

توده سنگ آندزیتیک بازالت که ساختگاه اصلی محل سد را تشکیل می‌دهد، به وسیله‌ی شبکه‌ای از درز، شکاف‌ها و گسله‌های فرعی و کوچک قطع شده‌است. 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 گردید. ویژگی دسته درزه‌های هر کدام از تکیه‌گاه‌ها به شرح زیر است:

الف- تکیه‌گاه چپ: با توجه به وجود پوشش گیاهی و واریزه‌های دامنه‌ای و رخنمون بسیار کم سنگ بستر، مشاهده‌ی زون‌های برشی و گسل در این تکیه‌گاه امکان‌پذیر ناست. بر اساس درزه‌نگاری انجام شده در تکیه‌گاه چپ و گالری حفر شده در این تکیه‌گاه چهار دسته درزه‌ی اصلی شناسایی شده‌است. ویژگی‌های هر کدام از دسته درزه‌ها در جدول شماره‌ی ۳-۲ ارائه شده‌است.

ب- تکیه‌گاه راست: ویژگی‌های هر کدام از ناپیوستگی‌ها به طور خلاصه در جدول شماره ۳-۳ و نتایج حاصل از ناپیوستگی‌های این تکیه‌گاه نیز در شکل‌های شماره ۳-۸ و ۳-۹ ارائه شده است.

جدول ۳-۲، مشخصات دسته درزه‌ها در تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد نرماب [گزارش‌های مهندسیین مشاور آب و توسعه پایدار]

ردیف	نوع درزه	شیب/جهت بزرگ‌ترین شیب (درجه)	فاصله تکرار دسته درزه‌ها (متر)	توصیف	سایر مشخصات
۱	دسته درزه J _۱	۰۵۷/۸۷	۰/۵-۱/۵	فاصله تکرار کم	بازشدگی درزه‌ها عمدتاً بسیار کم تا کم، زبر، صاف، صفحه‌ای برخی دارای پرشدگی، رس، کلسیت، اکسید آهن، ندرتاً کوارتز و زئولیت، آثار خش لغزه نیز مشاهده شده است.
۲	دسته درزه J _۲	۱۸۴/۳۱	۱ - ۲/۵	فاصله تکرار درزه‌ها متوسط	عمدتاً بازشدگی بسیار کم، زبر، صفحه‌ای، برخی دارای پرشدگی کلسیت، رس، اکسید آهن.
۳	دسته درزه J _۳	۱۸۵/۸۳	۲ - ۴	فاصله تکرار درزه‌ها زیاد	بازشدگی بسیار کم، صفحه‌ای، صاف، زبر، رس، کلسیت، آثار اکسید آهن و منگنز در سطح درزه‌ها، آثار خش لغزه نیز مشاهده شده است.
۴	دسته درزه J _۴	۰۸۷/۸۳	۲/۵ - ۵	فاصله تکرار درزه‌ها بسیار زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، پرشدگی رس، کلسیت، اکسید آهن و منگنز بسیار کم.

جدول ۳-۳. مشخصات دسته درزه‌ها در تکیه‌گاه راست ساختگاه سد نرماب [گزارش‌های مهندسیین مشاور آب و توسعه پایدار]:

ردیف	نوع درزه	شیب/ جهت بزرگ‌ترین شیب (درجه)	فاصله تکرار دسته درزه‌ها (متر)	توصیف	سایر مشخصات
۱	دسته درزه J _۱	۱۸۴/۲۵	۰/۵ - ۲	فاصله تکرار متوسط	عمدتاً بازشدگی بسیار کم تا کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، برخی دارای پرشدگی رس، ندرتاً کلسیت و کوارتز و زئولیت.
۲	دسته درزه J _۲	۰۶۷/۸۶	۱/۵ - ۳	فاصله تکرار متوسط تا زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، پرشدگی به وسیله‌ی رس، اکسید آهن، کلسیت، آثار خش لغزه.
۳	دسته درزه J _۳	۰۲۳/۶۴	۳ - ۴	فاصله تکرار زیاد	عمدتاً بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، پرشدگی، رس، کلسیت، ندرتاً کوارتز.
۴	دسته درزه J _۴	۱۲۲/۶۸	۳/۵ - ۵	فاصله تکرار بسیار زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، رس، کلسیت، ندرتاً کوارتز و زئولیت.
۵	دسته درزه J _۵	۲۲۵/۶۸	۴ - ۶	فاصله تکرار بسیار زیاد	بازشدگی بسیار کم، زبر، صاف، صفحه‌ای، رس و کلسیت.

۳-۵- خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ پی

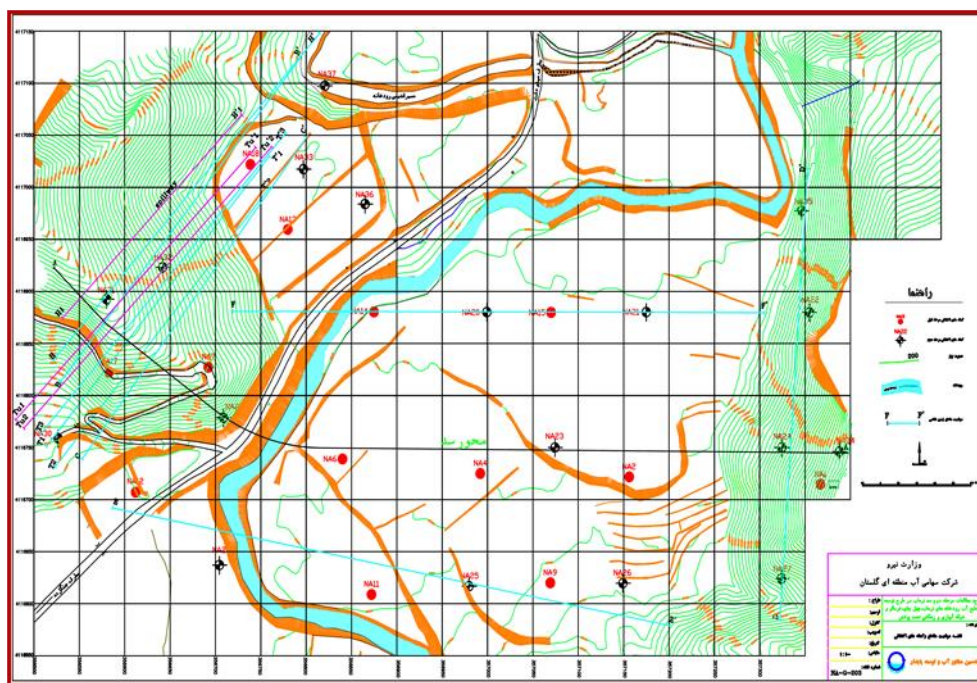
هدف از مطالعات ژئوتکنیکی، شناخت زمین‌شناسی زیر سطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی برای طراحی سد و سازه‌های وابسته است، به طوری که بتوان ارزیابی صحیحی از مشخصه‌های ژئوتکنیکی سنگ بستر در ساختگاه سد به دست آورد.

۳-۵-۱- نحوه عملیات حفاری‌های اکتشافی

عملیات حفاری‌های اکتشافی توسط دستگاه‌های حفاری دورانی و با استفاده از مغزه‌گیر دو جداره (دبل تیوب کربارل) به طول حداکثر ۳ متر در هر ران با قطرهای ۱۰۱، ۸۶ و ۷۶ میلیمتر و با توجه به خصوصیات آبرفت و سنگ انجام گرفته است.

۳-۵-۲- موقعیت گمانه‌های اکتشافی

نقشه موقعیت مقاطع و گمانه‌های اکتشافی مزبور در شکل شماره ۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۶، نقشه موقعیت مقاطع و گمانه‌های اکتشافی [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵]

۳-۵-۳- مواد پوششی

مواد پوششی در محدوده‌ی محل سد شامل پادگانه‌های آبرفتی، واریزه‌های دامنه‌ای، خاک‌های برجای حاصل از فرسایش، لس و آبرفت‌های بستر رودخانه است. بررسی‌های ژئوتکنیکی در مواد پوششی، عمدتاً در آبرفت‌های بستر رودخانه و پادگانه‌های آبرفتی انجام شده است. ۶۱ حلقه گمانه در مصالح مزبور برای شناخت مناطق سست احتمالی، گسترش و تعیین ضخامت آن‌ها حفر گردیده است. مصالح تشکیل‌دهنده‌ی نهشته‌های آبرفتی بستر رودخانه دارای ضخامت حداکثر ۶۴/۵ متر، متشکل از لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه، عمدتاً شامل رس، سیلت، ماسه، شن، قلوه سنگ و ندرتاً تخته سنگ، است. بر اساس آزمایش‌های دانه‌بندی در نمونه‌های اخذ شده از مواد پوششی که از گمانه‌های اکتشافی بدست آمده، لایه‌بندی تحت‌الارضی پی آبرفتی سد نرماب به دو لایه ریزدانه و درشت‌دانه تقسیم‌بندی شده است. لایه ریزدانه از ماسه، سیلت، رس و ندرتاً با پراکندگی شن تشکیل شده است. لایه‌های درشت‌دانه عمدتاً شامل سیلت، ماسه، شن و قلوه‌سنگ می‌باشند که به صورت متناوب در بستر سیلابی رودخانه رسوب گذاری شده‌اند. در محدوده‌ی محور، دو لایه درشت‌دانه‌ی نسبتاً ضخیم به صورت تناوب در بین لایه‌های ریزدانه تفکیک شده است [گزارش‌های مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار].

۳-۵-۴- بافت تراکمی

بافت تراکمی در پی آبرفتی سد نرماب عمدتاً در محدوده‌ی متراکم تا خیلی متراکم قرار می‌گیرد. در برخی از گمانه‌های حفر شده در مواد آبرفتی به مناطقی با بافت سست تا متوسط نیز برخورد شده است.

۳-۵-۵- نفوذپذیری در آبرفت‌های بستر رودخانه و مواد لسی در تکیه‌گاه‌ها

در مواد پوششی ساختگاه سد، تعداد ۳۶۷ آزمایش نفوذپذیری به روش لوفران با بار ثابت و افتان برای تعیین نفوذپذیری رسوبات آبرفتی انجام شده است. بر اساس این نتایج میانگین نفوذپذیری نهشته‌های آبرفتی $10^{-2} \times 1/11$ سانتی‌متر بر ثانیه است، که بیانگر نفوذپذیری زیاد این رسوبات است. شایان ذکر است که آبرفت‌های بستر رودخانه را عمدتاً دو لایه متناوب ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل داده‌اند. نفوذپذیری در لایه‌های ریزدانه عمدتاً بین 10^{-5} تا 10^{-8} سانتی‌متر بر ثانیه متغیر بوده (بیانگر نفوذ پذیری بسیار کم) و لایه‌های درشت‌دانه بین 10^{-1} تا 10^{-4} متغیر می‌باشند 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 آبگیری مخزن لایه‌های آرتزین آب مخزن را به پایین دست هدایت نماید. در جدول ۳-۶ تغییرات و میانگین نفوذپذیری در آبرفت‌های ساختگاه سد آورده شده است [گزارش‌های مهندسیین مشاور آب و توسعه پایدار].

جدول ۳-۴، تغییرات و میانگین نفوذپذیری به روش لوفران در آبرفت‌های محدوده ساختگاه سد گزارش-های مهندسیین مشاور آب و توسعه پایدار [

ملاحظات	موقعیت گمانه	نفوذپذیری لوفران (cm/sec)			تعداد آزمایش	شماره گمانه
		میانگین	حداکثر	حداقل		
	تکیه‌گاه راست	$3/1 \times 10^{-3}$	$8/1 \times 10^{-3}$	$4/6 \times 10^{-5}$	۵	NA۱
	بستر رودخانه	2×10^{-4}	$1/7 \times 10^{-3}$	1×10^{-7}	۱۱	NA۲
	بستر رودخانه	$6/4 \times 10^{-4}$	3×10^{-3}	1×10^{-7}	۱۰	NA۴
	بستر رودخانه	$2/7 \times 10^{-2}$	1×10^{-1}	1×10^{-7}	۱۱	NA۶

	تکیه‌گاه چپ	$3/1 \times 10^{-4}$	$6/8 \times 10^{-4}$	$2/4 \times 10^{-5}$	۳	NA۷
	بستر رودخانه	2×10^{-4}	$2/4 \times 10^{-3}$	1×10^{-7}	۱۲	NA۹
	بستر رودخانه	$9/9 \times 10^{-3}$	1×10^{-1}	1×10^{-7}	۱۱	NA۱۱
	پادگانه آبرفتی ساحل چپ بالا دست محور	2×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-8}	۵	NA۱۲
	پادگانه آبرفتی ساحل چپ پایین دست محور	$2/5 \times 10^{-4}$	$1/5 \times 10^{-3}$	1×10^{-8}	۷	NA۱۳
	بستر رودخانه	$1/2 \times 10^{-3}$	$7/1 \times 10^{-3}$	1×10^{-7}	۸	NA۱۴
	بستر رودخانه	$2/1 \times 10^{-2}$	1×10^{-1}	1×10^{-7}	۱۰	NA۱۵
	بالا دست محور ساحل راست	5×10^{-6}	2×10^{-5}	1×10^{-8}	۴	NA۱۶
	پادگانه آبرفتی ساحل چپ پایین دست محور	Impervious	Impervious	Impervious	۲	NA۱۷
	تکیه‌گاه چپ بالا دست محور	$6/5 \times 10^{-4}$	1×10^{-1}	Impervious	۳	NA۱۸
	بستر رودخانه	$2/6 \times 10^{-1}$	$2/4 \times 10^{-2}$	Impervious	۲۶	NA۲۰
	بستر رودخانه	$3/1 \times 10^{-3}$	$2/9 \times 10^{-4}$	Impervious	۲۳	NA۲۱
	تکیه‌گاه راست	$1/16 \times 10^{-4}$	$2/9 \times 10^{-2}$	$3/8 \times 10^{-5}$	۳	NA۲۲
	حاشیه تکیه‌گاه راست	$8/4 \times 10^{-3}$	8×10^{-2}	Impervious	۱۸	NA۲۳
	قسمت مرکزی	3×10^{-5}	$1/2 \times 10^{-4}$	Impervious	۱۱	NA۲۴

۳-۵-۶- 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 توده سنگ است. شبکه‌ی دسته درزه‌ها، سیستم زهکشی آب‌های نفوذی در داخل توده‌ی سنگ را به عهده داشته و با بررسی‌های انجام یافته و مطالعه‌ی آماری درزه‌ها، میزان بازشدگی درزه‌ها به طور متوسط در حدود $0/01$ میلیمتر برای لوژان‌های بین ۱ تا ۵ لوژان و برای بیش از ۵ لوژان کوچک‌تر از یک میلی‌متر برآورد گردیده 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 تأثیر لیتولوژی و خصوصیات توده سنگ است. باز شدن درزه‌ها و شسته شدن مواد ثانوی هوازده (سنگ‌های هوازده) تحت اعمال فشار آب در آزمایش لوژان، شرایط لازم را برای افزایش میزان نفوذپذیری در دسته درزه‌های توده سنگ ایجاد می‌کند. در قسمت‌هایی از توده سنگ 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 توده سنگ در ناپایداری‌های تکیه‌گاه‌ها و پی نیز مؤثر 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 توده سنگ 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 تا حد غیر قابل نفوذ می‌رسد [گزارش-
های مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار].

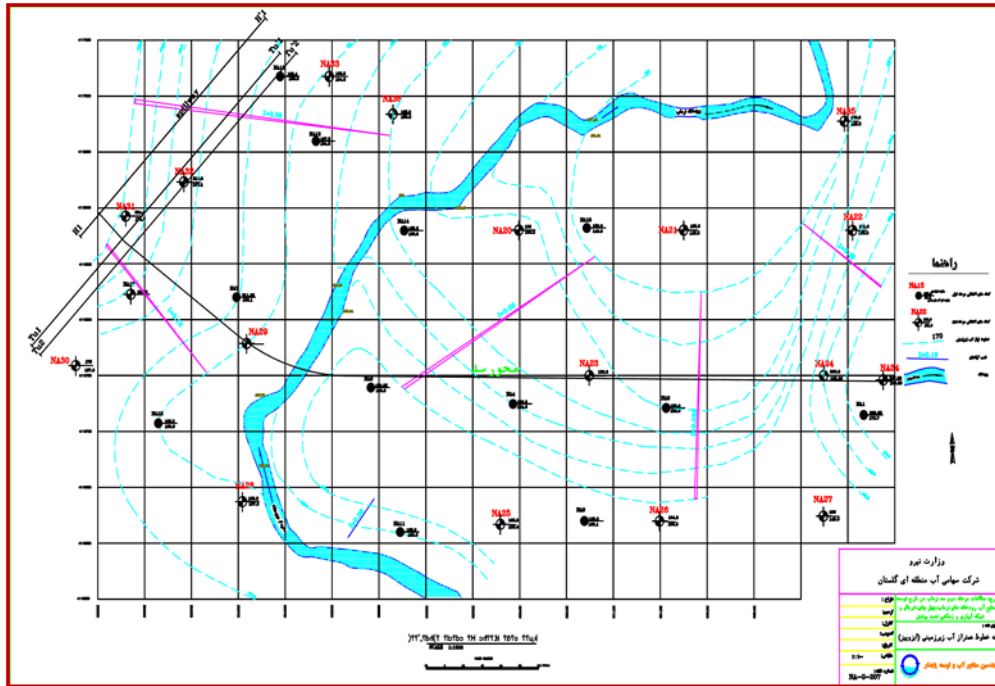
۳-۵-۷- کیفیت سنگ بستر

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 توده سنگ مورد توجه بوده و شکستگی‌هایی که در حین حفاری ایجاد شده است در نظر گرفته نشده است. شرایط کیفی توده سنگ از دیدگاه درجه سلامت، هوازگی و کیفیت ویژه‌ی آن با توجه به گمانه‌های حفر شده و موقعیت آن‌ها متفاوت بوده ولی به طور کلی توده سنگ ساختگاه به جز قسمت‌هایی که تحت تأثیر شرایط تکتونیکی منطقه و یا عوامل فرسایشی شدیداً خرد و هوازده می‌باشند، در سایر بخش‌ها از شرایط بسیار خوبی برخوردار بوده و مجموعه‌ی توده سنگ یکپارچه و یکدست دارای مقاومت خوبی است. با توجه به آرامش نسبی تکتونیکی منطقه‌ی مورد مطالعه، گسترش سیستم درز و ترک محدود به چهار دسته درزه‌ی اصلی بوده و لذا خردشدگی و شکستگی توده سنگ پی عمدتاً از چهار دسته درزه 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 [گزارش‌های مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار].

۳-۵-۸- هیدروژئولوژی ساختگاه سد

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

بر اساس نتایج بدست آمده، نفوذپذیری متوسط توده‌ی آبرفتی $10^{-2} \times 1/1$ سانتی‌متر بر ثانیه برآورد گردیده 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 بکنند. در توده سنگ 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 ۳-۷) مؤید این نکته است که سطح ایستایی در تکیه‌گاه راست بالاتر از تراز سطح رودخانه بوده و نشان دهنده‌ی شیب هیدرولیکی سفره آب زیرزمینی به سمت رودخانه است. گرادیان هیدرولیکی در تکیه‌گاه راست به طور متوسط ۰/۱۹ تا ۰/۲۲ درصد و در تکیه‌گاه چپ به طور متوسط ۰/۱۲ درصد و در بستر رودخانه حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ درصد است [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵].



شکل ۳-۷، نقشه خطوط هم تراز آب زیرزمینی [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵]

۳-۶- مشخصات کلی دیوارهای آب بند پروژه

احداث دیوار آب‌بند در ۴ بخش مختلف پروژه حاضر شامل سد نرمام، بندهای انحرافی خرمالو و چهل‌چای و بند تنظیمی مینودشت دیده شده است. بر اساس نقشه‌های در دسترس، مشخصات این دیوارها در بخش‌های مختلف به شرح ذیل می‌باشد:

سد نرمام: دیوار آب‌بند سد نرمام با طول ۵۸۸ متر در امتداد محور اصلی سد قرار گرفته است. در طرح موجود، این دیوار بتن پلاستیک با عمق حداکثر ۶۸ متر و سطح حدود ۴۴۵۰۰ متر مربع پیش‌بینی شده و در ترازهای پایین‌تر (تا عمق حداکثر ۸۰ متر) احداث پرده آب‌بند با تزریق از طریق لوله‌های تعبیه شده در دیوار در نظر گرفته شده است. لیکن با توجه به صعوبت تزریق زیر دیوار و امکانات شرکت مهندسی تابان (شامل ماشین‌آلات تخصصی و نیروی متخصص) و نیز تجربه احداث دیوار آب‌بند با اعماق بیشتر، این شرکت احداث دیوار تا عمق حداکثر ۹۰ متر و حذف پرده آب‌بند زیر دیوار را پیشنهاد نموده و روش اجرا را با این فرض ارائه می‌نماید. با توجه به معین نبودن مشخصات بتن

پلاستیک در اسناد ارائه شده، مقاومت فشاری آن حدود $15-20 \text{ kg/cm}^2$ فرض می‌گردد. بر این اساس سیستم آب‌بندی پی سد متشکل از دیوار آب‌بند بتن پلاستیک با عمق حداکثر ۹- متر در بخش میانی و پرده آب‌بند در جناحین خواهد بود.

خلاصه مشخصات دیوارهای آب‌بند پروژه سد و شبکه نرماب در جدول ۳-۷ ارائه شده است.

جدول ۳-۵، ابعاد دیوارهای آب‌بند پروژه سد و شبکه نرماب [گزارش‌های مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار]

بخشهای مختلف	طول دیوار (m)	حداکثر عمق (m)	ضخامت (m)	سطح (m^2)
پی سد نرماب	۵۸۸	۹۰	۱/۰	۴۴۵۰۰
بند انحرافی خرمالو	۶۸	۷	۰/۸	۴۰۰
بند انحرافی چهل‌چای	۷۰	۹	۰/۸	۵۰۰
بند تنظیمی مینودشت	۱۶۰	۱۵	۰/۶	۲۲۰۰

در این پروژه تنها دیوار آب‌بند سد نرماب مورد نظر است.

۳-۷- دیوار آب‌بند بتن پلاستیک سد نرماب

۳-۷-۱- روش اجرا

با توجه به سیستم ترکیبی فرض شده (پرده آب‌بند و دیوار بتن پلاستیک)، اتصال مناسب دیوار به پرده آب‌بند بایستی در نظر گرفته شود. بنابر این دیوار آب‌بند در محل اتصال واقع در جناحین سد (نقاط Q و P) پس از تزریق گمانه‌های پرده آب‌بند در محل اتصال و با در نظر داشتن مقدار همپوشانی لازم احداث می‌گردد. از آنجا که خاکریزی بدنه سد در هر بخش مستلزم اتمام احداث دیوار آب‌بند تحتانی است، با لحاظ کردن مشخصات فنی خاکریزی در مورد حداکثر اختلاف ارتفاع مجاز خاکریزی بدنه در طول سد، احداث دیوار از یک سمت شروع شده و پس از اتمام بخشی از آن

(همزمان با ادامه عملیات)، خاکریزی نیز شروع می‌گردد. به‌منظور اجرای دیوار آب‌بند مراحل زیر صورت می‌گیرد:

۱- تهیه نقشه‌های اجرایی دیوار آب‌بند از قبیل نقشه‌های پانل بندی، تعیین میزان همپوشانی پانل‌ها طبق مشخصات فنی، تعیین تراز اجرایی و فازبندی مسیر دیوار آب‌بند و طراحی راه‌های دسترسی لازم جهت انتقال دستگاه حفاری.

۲- ساخت حوضچه‌های گل حفاری: این حوضچه‌ها شامل حوضچه گل تازه، گل کارکرده، آب تازه و ایستگاه پمپاژ است. حجم حوضچه‌ها به گونه‌ای طراحی می‌گردد که همواره حداقل ۲/۵ برابر حجم بزرگترین پانل، ذخیره گل تازه وجود داشته باشد (۶۰۰ مترمکعب). پیش‌بینی می‌شود در این پروژه به احداث ۳ حوضچه گل نیاز باشد.

۳- خاکبرداری و آماده‌سازی بستر تا تراز ۱۵۵ متر جهت اجرای رس تماسی و بدنه در محل احداث پانل‌های موردنظر.

۴- اجرای رس تماسی به عرض ۴ متر و خاکریزی بدنه با عرض حداقل ۵۰ متر در محور سد تا ارتفاع ۲ متری (تراز ۱۵۷) مطابق مشخصات فنی لازم.

۵- اجرای سکو رسی، ساخت گایدوال و سکو محل استقرار دستگاه حفاری طبق مشخصات فنی به گونه‌ای که استقرار دستگاه حفاری و پایداری آن تضمین گردد.

۶- لوله‌کشی و انتقال لوله‌های گل تازه و کارکرده به محل پانل.

۷- انتقال دستگاه حفاری هیدروفورز (شکل ۳-۸ و ۳-۹) (برای حفاری پانل‌های با عمق حداقل ۳۰ متر و حداکثر ۹۰ متر) به محل حفاری پانل‌ها و ست کردن دستگاه از لحاظ موقعیت، امتداد و قایم بودن [شرکت مهندسی توسعه آب تابان].



for normal soil



for medium hard rock



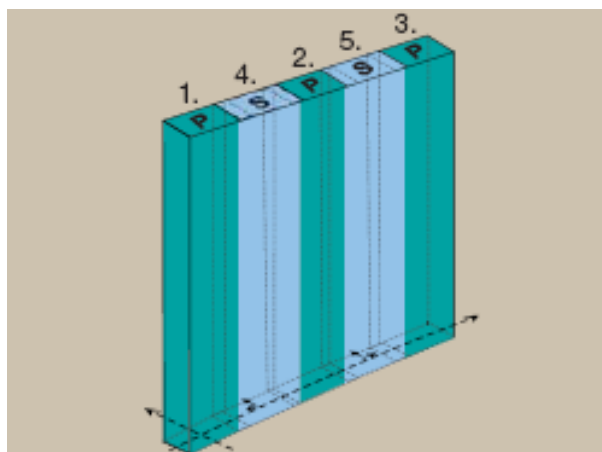
for hard rock

شکل ۳-۸، انواع کاترهای دستگاه هیدروفرز برای شرایط مختلف ژئولوژیکی [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]



شکل ۳-۹، دستگاه هیدروفرز BC-۵۰ [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]

۸- انجام عملیات حفاری تا رسیدن به تراز مورد نظر طبق مشخصات فنی. حفاری ها بر اساس روش P و S (پانل‌های اولیه و ثانویه) (شکل ۳-۱۰) صورت می گیرند. در شکل ۳-۱۱ نمایی از یک پانل آب-بند نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۱۰، چگونگی پانل بندی دیوار آب‌بند بر اساس روش P و S [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]



شکل ۳-۱۱، نمایی از یک پانل دیوار آب‌بند [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]

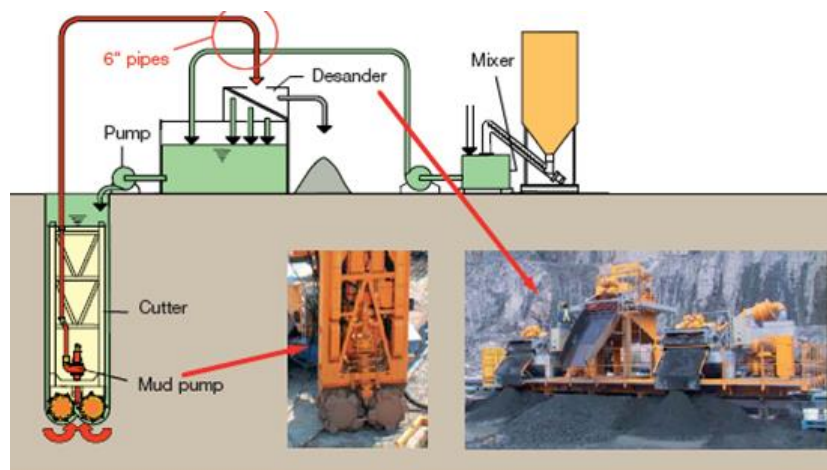
۹- پس از اتمام کار حفاری و انجام کنترل‌های لازم، عملیات بتن ریزی صورت می‌گیرد. کار بتن ریزی با استفاده از لوله‌های ترمی انجام می‌شود. برای پانل‌های با عمق بیش از ۳۵ متر با یک لوله ترمی کار بتن ریزی صورت می‌گیرد. برای پانل‌های کم عمق می‌توان عملیات حفاری سه پانلی را مورد بررسی قرارداد و چنانچه به تایید دستگاه نظارت برسد، عملیات بتن ریزی این گونه پانل‌ها با دو لوله ترمی (جهت افزایش راندمان) صورت خواهد گرفت.

۱۰- همگام با پیشرفت اجرای دیوار آب‌بند، عملیات برچیدن گایدوال و تریم دیوار انجام می‌شود. پس از اتمام عملیات اجرایی و گذشت ۷ روز عملیات برداشتن گایدوال ها و سکو صورت گرفته و متناسباً عملیات خاکریزی هسته رسی ادامه خواهد یافت.

۳-۷-۲- مصالح مورد نیاز

حدود مصالح لازم برای احداث دیوار آب‌بند تقریباً ۵۸۰۰۰ متر مکعب بتن پلاستیک با مقاومت فشاری ۱۵ تا ۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع شامل [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]:

- بنتونیت : ۲,۰۰۰ تن
- سیمان : ۹,۰۰۰ تن
- ماسه ۰ تا ۵ میلی‌متر : ۲۴,۰۰۰ متر مکعب
- شن ریز ۵ تا ۹/۵ میلی‌متر : ۱۰,۰۰۰ متر مکعب
- شن درشت ۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر : ۲۰,۰۰۰ متر مکعب



شکل ۳-۱۲، چرخه حفاری، ماسه زدایی و انتقال گل بنتونیت تازه به پانل [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]

۳-۷-۳- تجهیزات کارگاه حفاری دیوار آب‌بند

- دستگاه حفاری هیدروفرز: ۲ دستگاه
- دستگاه ماسه زدا (BE^{۵۰۰}) desander: ۲ دستگاه
- پمپ جهت سیر کوله حوضچه‌های گل تازه و کارکرده و تجهیزات وابسته: ۳۳ دستگاه
- لوله‌های انتقال گل به پانل و انتقال مصالح حفاری به دیسندر و حوضچه گل
- تجهیزات و ماشین آلات عملیات خاکی شامل :
- لودر ۹۶۶: ۱ دستگاه
- کمپرسی جهت انتقال مصالح حاصل از حفاری: ۲ دستگاه
- بیل مکانیکی جهت پیش حفاری پانل‌ها: ۱ دستگاه
- دو سیلوی ۱۶۰ تنی جهت نگهداری پودر بنتونیت جهت ساخت گل حفاری
- دستگاه توزین اتوماتیک بنتونیت خشک.
- دیزل ژنراتور با ظرفیت ۵۰ KWA: ۱ دستگاه
- آزمایشگاه مجهز کنترل کیفیت گل حفاری
- جرثقیل با ظرفیت ۳۵ تن جهت نگهداری لوله‌های ترمی: ۱ دستگاه

۳-۷-۴- چگونگی تهیه و نحوه استفاده از دوغاب بنتونیت در دیوار آب‌بند سد

استفاده از دوغاب بنتونیت برای جلوگیری از ریزش دیوارهای ترانشه، در هنگام استفاده از بتن پلاستیک لازم دانسته شده است. اثر تحکیمی به دلیل ویژگی تیکسوتروپی دوغاب که حاوی بنتونیت، آب و مواد فعال کننده است ایجاد می‌گردد. عمده‌ترین خصوصیت دوغاب وزن مخصوص آن است که

بستگی به مقدار توده خشک در واحد حجم داشته و در محدوده مقادیر طراحی شده ۱/۰۵ تا ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار می‌گیرد. دامنه تغییرات لزجت دوغاب بین ۴۰ تا ۵۰ ثانیه با مخلوط مارش توصیه شده است. جهت جلوگیری از تنزل کیفیت دوغاب درصد ماسه آن کمتر از ۴٪ در نظر گرفته شده و در ضمن آزمایشات لازم جهت تعیین دانسیته لزجت درصد ماسه دوغاب طبق استانداردهای ASTM به عمل آمده است. استفاده مکرر از دوغاب تحکیم یافته، پس از بازسازی آن به وسیله دستگاه‌های هیدروسیکلون و الک ویبره و کسب کیفیت مناسب مجاز می‌باشد. مشخصات دوغاب بنتونیت به شرح جدول ۳-۸ است [شرکت مهندسی توسعه آب تابان].

جدول ۳-۶، مشخصات دوغاب بنتونیت به کار رفته در سد مورد بررسی [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]

اندازه	پارامتر
۱/۱۵ - ۱/۰۵ گرم بر سانتیمتر مکعب	وزن مخصوص
کمتر از ۲۰ مگاپاسکال	لزجت پلاستیک
۴۰ تا ۵۰ ثانیه (مخروط مارش)	لزجت مشروط
۲۴ ساعت در ۰/۰۳ کیلوگرم	پایداری
کمتر از ۵٪ در ۲۴ ساعت	تسلیم ویژه
۰/۵ تا ۱ پاسکال	نقطه تسلیم
کمتر از ۴٪	درصد ماسه
کمتر از ۳۰ سانتیمتر مکعب در ۳۰ ثانیه	دبی آب
۷ تا ۱۱/۵	Ph

برای تهیه دوغاب از میکسرهای سریع^{۳۳} استفاده می‌گردد. درصد اختلاط بنتونیت به مقدار دستیابی به دانسیته دوغاب مورد نظر (مقدار تغییرات مجاز کمتر مساوی ۰/۲٪) و مدت اختلاط دوغاب در میکسر توسط آزمایشگاه تعیین، که برای انواع مختلف میکسر متفاوت و معمولاً بین ۵ تا ۱۲ دقیقه است. پس از مخلوط کردن، دوغاب مستقیماً در ترانشه یا در مخزن عمل آوری (حجمی مساوی حجم یک پانل با عمق حداکثر)، که باید برای مواقع اضطراری در دسترس باشد، ریخته می‌شود.

^{۳۳} Flush Mixer

۳-۷-۵- بتن پلاستیک مورد استفاده

دیوار آب‌بند^{۳۴}، صفحات نازک متشکل از نوعی بتن انعطاف پذیر موسوم به بتن پلاستیک است که در ترانشه‌های حفر شده با روش حفاری بسته در بسترهای آبرفتی رودخانه تا اعماق نسبتاً زیاد اجرا می‌گردد. در بتن معمولی اتصال ذرات سیمان به صورت صلب و سخت است و نیز در صورت زیاد بودن عمق بتن ریزی، ذرات بتن با سرعت‌های متفاوت ته نشین می‌گردند و آب در بالا قرار می‌گیرد. برای ایجاد یک بتن پایدار، انعطاف پذیر در مقابل بارهای وارده و نفوذ ناپذیر باید به آن موادی اضافه نمود که این عامل غالباً بنتونیت است. به این مخلوط که ترکیبی از آب، سیمان بنتونیت و مصالح دانه‌ای می‌باشد، بتن پلاستیک می‌گویند. پس از تحلیل اقتصادی و آزمایش کیفیت و دانه‌بندی در آزمایشگاه، از مصالح حاصل از گودبرداری نیز میتوان با تأیید دستگاه نظارت در طرح اختلاط بتن پلاستیک به- عنوان یک طرح اختلاط اولیه نسبت‌های مشخصه را برای ۱ متر مکعب ارائه داد که در جدول ۳-۹ آورده شده است [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵].

جدول ۳-۷، نسبت‌های ارائه شده در طرح اختلاط بتن پلاستیک [شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵].

نوع توده	مقدار
سیمان	۱۰۰-۳۰۰ کیلوگرم
بنتونیت	نسبت وزنی به آب ۶ تا ۱۰٪
شن و ماسه	۱۴۰۰-۱۶۰۰ کیلوگرم
آب	۴۵۰-۶۰۰ لیتر

قبل از شروع کارها در مقیاس صنعتی، یادداشتی راجع به روش اعمال شده، طبق موارد زیر تهیه می‌-

گردد [Brinkgreve و دیگران، ۲۰۱۱]:

- مواد مخلوط شده به کار رفته.

^{۳۴} Curing bunker

- روش اندازه‌گیری عناصر سازنده و وسیله‌ی مورد استفاده برای اطمینان از این که کنترل‌ها در دفعات مناسب انجام شده‌اند.
 - مدت زمان مخلوط کردن.
 - راه‌های اتخاذ شده برای اطمینان از دمایی که در آن دوغاب باید تهیه و نگهداری شود.
- در جدول های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ ماهیت و تعداد دفعات کنترل های انجام شده بر روی سیمان و انواع مختلف دوغاب نشان داده شده است.

جدول ۳-۸، ماهیت و تعداد دفعات کنترل‌های انجام شده بر روی سیمان شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵.

تعداد دفعات	ماهیت کنترل
یک بار در هر دفعه دریافت سیمان	زمان گیرش سیمان
یک بار هنگام دریافت سیمان	مقاومت فشاری تک محوری ۷ روزه سیمان
یک بار در هر دریافت سیمان	بلین سیمان

جدول ۳-۱۱، ماهیت و حداقل تعداد دفعات کنترل‌ها برای انواع مختلف دوغاب شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵

۳-۸- جمع‌بندی

- سازندهای ساختگاه سد نرماب به دو گروه متمایز قابل تفکیک می‌باشند. گروه اول، سازندهای ناپیوسته که مربوط به رسوبات دوران چهارم بوده و آبرفت‌های عهد حاضر را تشکیل می‌دهند که توده سنگ ساختگاه سد را پوشش داده‌اند. گروه دوم سنگ بستر ساختگاه می باشد که تکیه‌گاه‌های ساختگاه سد را تشکیل داده‌اند.

در این بخش به معرفی کامل سد و اجزای آن پرداخته شد تا به طور صحیح به مدل‌سازی و تحلیل نتایج که در بخش بعدی ارائه خواهد شد، پرداخته شود.

فصل چهارم

شبیه‌سازی‌های عددی و

تحلیل نتایج

در این فصل ابتدا به طراحی دیوار آب‌بند و تحلیل بازگشتی پرداخته و در مرحله بعد رویکرد عددی مورد استفاده در تحلیل بیان خواهد شد. مدل‌های مکانیکی برای قبل و بعد از اجرای دیوار آب‌بند ساخته و تحلیل تراوش در بدنه و بستر سد انجام خواهد شد. در نهایت به بررسی عملکرد دیوار آب‌بند و انجام اعتبارسنجی مدل پرداخته می‌شود.

۴-۲- طراحی دیوار آب‌بند و تحلیل بازگشتی

هنگامی که یک دیوار آب‌بند سد طراحی یا اجرا می‌شود، به‌منظور ارزیابی عملکرد آن در راستای تغییرات محیط ژئوتکنیکی که بر روی خصوصیات ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهندسی محدوده و بستر سد تاثیر دارد، از تحلیل بازگشتی استفاده می‌شود. هدف از به‌کارگیری این رویکرد، ارزیابی عملکرد سد و دیوار آب‌بند بعد از عملیات آب‌گیری و طی شرایط حالت پایدار^{۳۵} سد است. بدین منظور عموماً از روش‌های تحلیل استاتیکی (و بعضاً دینامیکی) بهره گرفته می‌شود. در مهندسی ژئوتکنیک رویکردهایی که به‌منظور تحلیل بازگشتی مطرح می‌شوند، عموماً برای حالت بلندمدت مد نظر است. زیرا که تغییرات سد را نسبت به شرایط بلندمدت و بعد از آب‌گیری مشخص می‌کند. به‌طوری‌که برخی تغییرشکل‌ها (که ناشی از میدان تنش برجا) در محدوده سد هستند، با اجرای دیوار آب‌بند تغییر کرده و ماهیت جدیدی ناشی از کرنش پلاستیک به خود می‌گیرند که عمدتاً به دلیل جریان سطحی (آب پشت سد) و فشار آب منفذی است. با انجام تحلیل بازگشتی می‌توان شرایط تنش-کرنش که با هدف آگاهی از رفتار سد در حالات مختلف ساخت و بهره‌برداری است، برآورد و میزان تغییرشکل‌های قبل و بعد از ایجاد دیوار آب‌بند را در سد به‌صورت مکانی تحلیل کرده و گزارش نمود. همچنین با به‌کارگیری از این نتایج می‌توان عملکرد دیوار آب‌بند را نیز مورد بررسی قرار داد.

^{۳۵} Steady state

یکی از پرکاربردترین رویکردهایی که امروزه به صورت گسترده توسط متخصصان زمین‌شناسی و ژئوتکنیک برای ارزیابی دیوار آب‌بند مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های عددی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری است. در این مطالعه نیز این رویکردها برای تحلیل رفتاری سد مد نظر است. در این راستا اهداف زیر برای تحلیل تراوش مورد توجه است:

- ارزیابی تغییرشکل‌های کل و جزئی اجزای سد قبل و بعد از اجرای دیوار آب‌بند،
- تغییرات میدان تنش و کرنش برجا و رابطه تنش-کرنش برای محدوده سد در مقطع بحرانی سد برای قبل و بعد از اجرای دیوار آب‌بند،
- تغییرات فشار آب منفذی در لحظه آب‌گیری و تحلیل بلندمدت سد برای ارزیابی وضعیت تراوش،
- محاسبه گرادیان هیدرولیکی در هسته سد و نقاط تمرکز جریان،
- تغییرات هد (فشار بر حسب هد آب) هیدرولیکی و جریان آب در زیر و داخل هسته سد قبل و بعد از اجرای دیوار آب‌بند،

۴-۳- رویکرد عددی مورد استفاده در تحلیل

روش‌های عددی مشتمل بر روش‌های مختلفی از جمله روش اجزای محدود^{۳۶} (FEM)، روش اجزای مجزا^{۳۷} (DEM)، روش اجزای مرزی^{۳۸} (BEM) است. از این میان روش اجزای محدود (FEM) که برای تحلیل در محیط‌های پیوسته توسعه داده شده است، در مطالعات محیط‌های خاکی و آبرفتی قابل استفاده است. با در نظر گرفتن رفتار خاک‌ها، به صورت الاستیک-پلاستیک خطی و معتبر بودن معیار گسیختگی مور-کولمب می‌توان رفتار مکانیکی خاک‌ها را در برابر نیروهای وارده و تنش‌های برجای حاکم بر ساختگاه‌های مختلف توسط روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود تحلیل نمود.

^{۳۶} Finite Element Method

^{۳۷} Distinct Element Method

^{۳۸} Boundary Element Method

نرم افزار Plaxis به عنوان یک برنامه کامپیوتری تحلیل دوبعدی^{۳۹} به منظور تحلیل پایداری، تغییر شکل، نشست، تراکم، تحکیم و نشست تحت شرایط استاتیکی و دینامیکی در زمینه ژئوتکنیک معرفی و توسعه داده شده است. این توانمندی سبب می شود، این نرم افزار، به راحتی در تحلیل محیط های مختلف که تغییر شکل های آن محیط مد نظر است، به کار گرفته شود. در تحلیل های عددی اجزای محدود، تحلیل به صورت اجرای شبکه بندی بنام نودها (گره ها) استوار است که تغییرات مکانی (جابجایی)، تمرکز تنش بر روی این گره ها و شبکه ها به صورت پیوسته مورد ارزیابی قرار می گیرد. انجام تحلیل پیوسته، کاربری راحت، امکان تعریف شرایط به صورت گرافیکی، ارایه نتایج به صورت گرافیکی از جمله مهم ترین ویژگی های نرم افزار Plaxis است. بیان مبانی تئوریک مبتنی بر روش FEM و نرم افزار Plaxis در مجال بحث نیست. اما مزایای اصلی این نرم افزار از جمله توانمندی بالای آن در تحلیل های عددی و ارایه جواب های گرافیکی و دقیق یکی از مهم ترین رویکردهای مد نظر در استفاده آن به شمار می آید.

در این پژوهش از نرم افزار Plaxis به منظور ارزیابی طراحی طراحی سامانه آب بند و انجام تحلیل برگشتی برای بررسی میزان آبگذری و تغییر شکل های ناشی از وضعیت توزیع میدان تنش - کرنش در محدوده بستر سد در مقطع بحرانی آن بهره گرفته شده است. بدین منظور از دو گروه شبیه سازی برای شناخت شرایط ژئوتکنیکی ایجاد شده در محدوده سد ناشی از اجرای دیوار آب بند و میزان موفقیت عملکردی دیوار آب بند اجرا شده در سد، استفاده شده است. هر کدام از گروه های شبیه سازی برای تحلیل تراوش که در بخش قبل بیان شد، مورد توجه بوده است. نتایج حاصل از تغییر شکل های رخ داده قبل و بعد از اجرای دیوار آب بند در تفسیر نتایج تغییرات تراوشی و ارزیابی شرایط فشار آب منفذی ایجاد شده در محدوده محور سد، هسته و بدنه ی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. هر گروه از شبیه سازی ها در سه مرحله مدل سازی به شرح زیر قابل تقسیم بندی است:

- مدل سازی هندسی و اعمال شرایط مرزی مدل

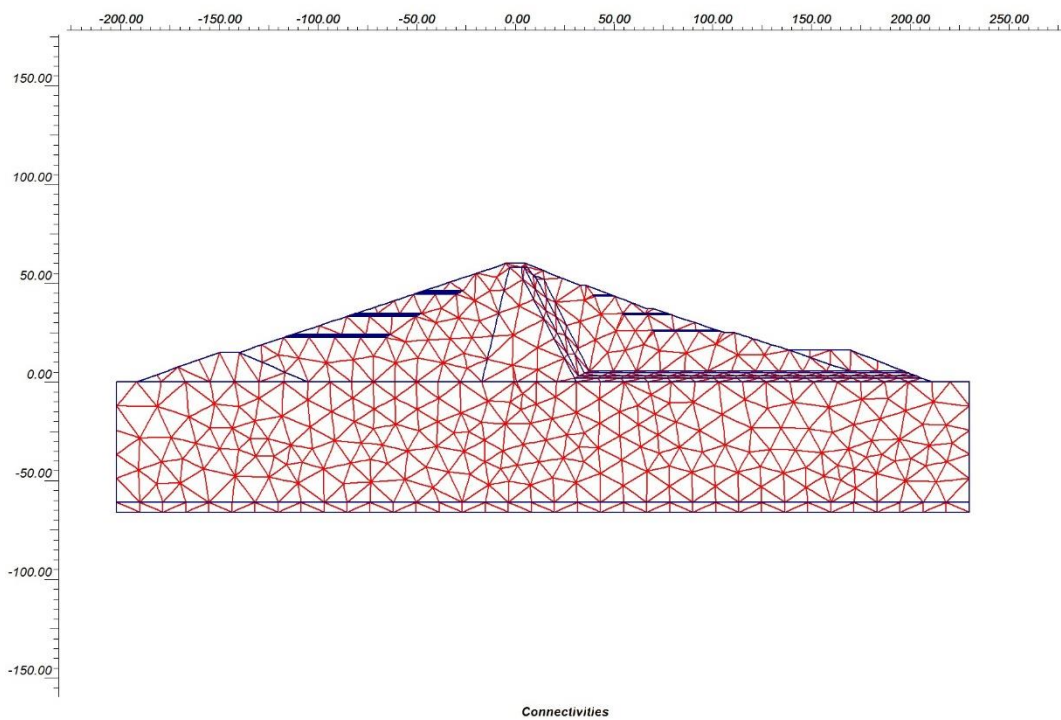
- تخصیص خواص و مدل رفتاری مدل

^{۳۹}Two-dimensional

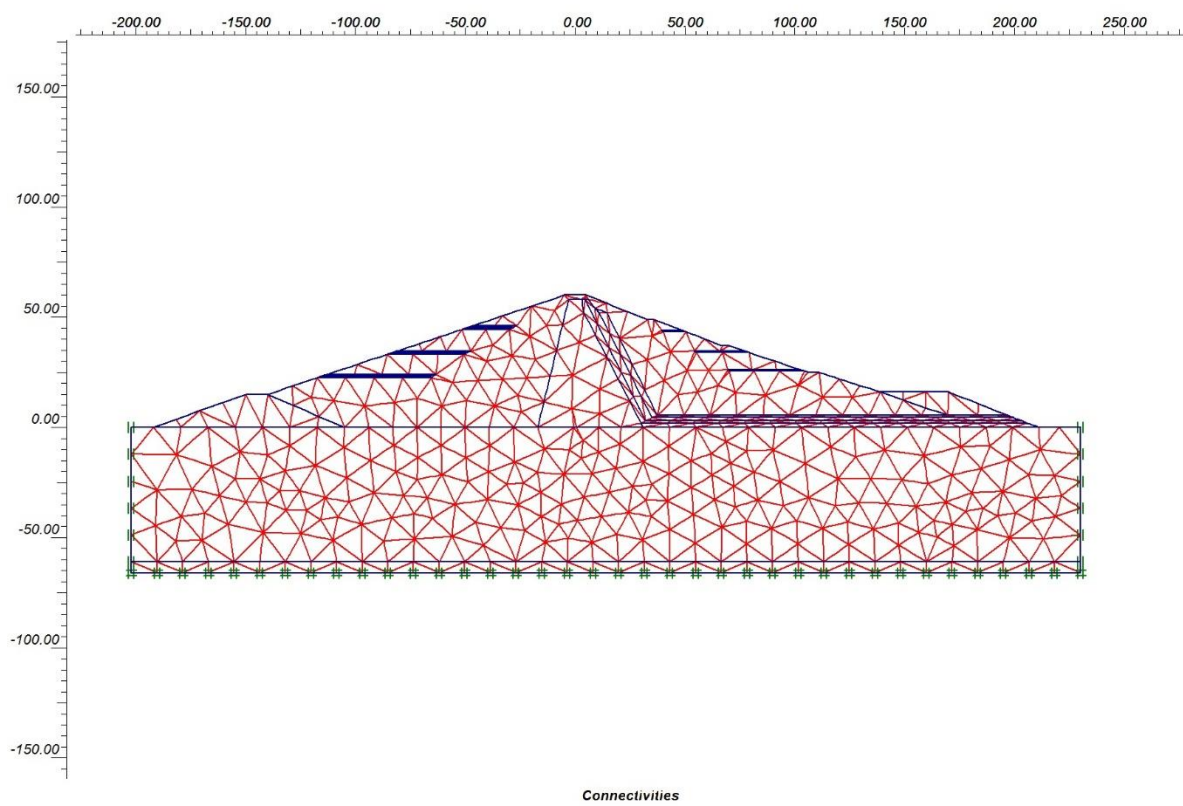
- مدل‌سازی مکانیکی و تحلیل‌های تراوش

در مرحله مدل‌سازی هندسی، با استفاده از داده‌های طراحی برای مقطع بحرانی سد (پروفیل اصلی)، خصوصیات هندسی سد و بستر آبرفتی آن که حاصل انجام آزمایش‌ها و پیمایش‌های زمین‌شناسی مهندسی است با رعایت مقیاس وارد مدل می‌شود. بدین منظور، با تعیین مقیاس مناسب در ارزیابی‌ها، تعداد گره‌های تحلیل مشخص می‌شود. سپس با در نظر گرفتن شرایط مرزی، این ویژگی‌ها در مدل تعریف می‌شود. بعد از ساخت مدل هندسی در مرحله اول، با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های ژئوتکنیکی (آزمایشگاهی و برجا)، خصوصیات خواص و مصالح به مدل اختصاص داده شده و مدل رفتاری بسته به نوع گسیختگی (معیار گسیختگی معتبر در محیط) در مدل تعریف می‌شود. در این مرحله مدل آماده انجام عملیات تحلیل بوده و باتوجه به نوع تحلیل (بلندمدت)، شرایط آب منفذی، افت و سطح اولیه و نهایی در هر گروه از شبیه‌سازی‌ها وارد می‌شود. در مرحله نهایی، مدل تحت سیکل‌های تغییرشکلی به‌عنوان محیط پلاستیک در ۳۰۰ سیکل با لحاظ نمودن تغییرات میانه در مرحله اول و حذف تغییرات میانه در مرحله دوم، حل می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تحلیل مربوط به عملکرد دیوار آب‌بند مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج تفسیر می‌شود.

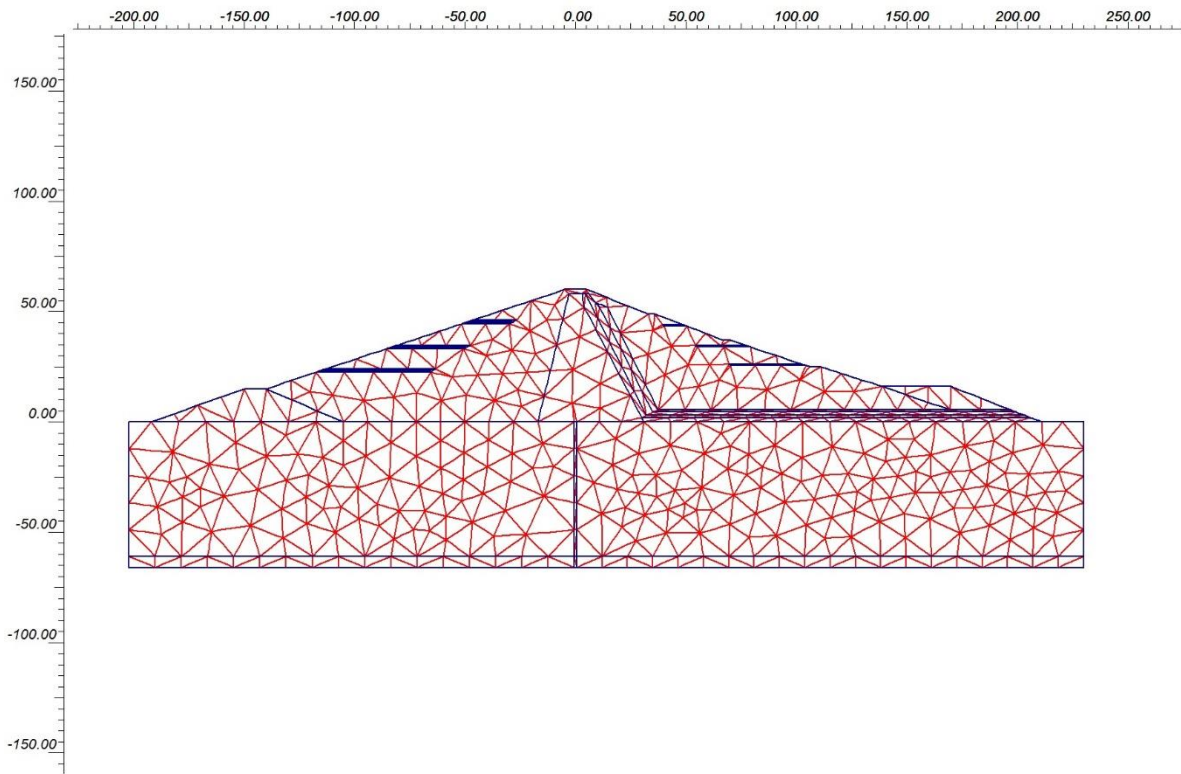
در مرحله مدل‌سازی هندسی، بعد از پیاده‌سازی هندسه سد و بستر اصلی که دیوار آب‌بند در آن اجرا می‌شود، شرایط مرزی به صورت بستن مرزهای بی‌نهایت به‌منظور عدم جلوگیری از انعکاس و یا انکسار تغییرشکل و میدان تنش در محیط صورت می‌پذیرد. اشکال ۴-۱ تا ۴-۴، هندسه‌ی مدل‌های تهیه شده برای هر دو گروه شبیه‌سازی به همراه شرایط مرزی تعریف شده برای این گروه‌ها نشان داده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مرزهای مدل بسته به موقعیت قرارگیری در یک یا هر دو جهت بسته شده‌اند.



شکل ۴-۱، مدل هندسی تهیه شده برای شرایط سد قبل از اجرای دیوار آببند

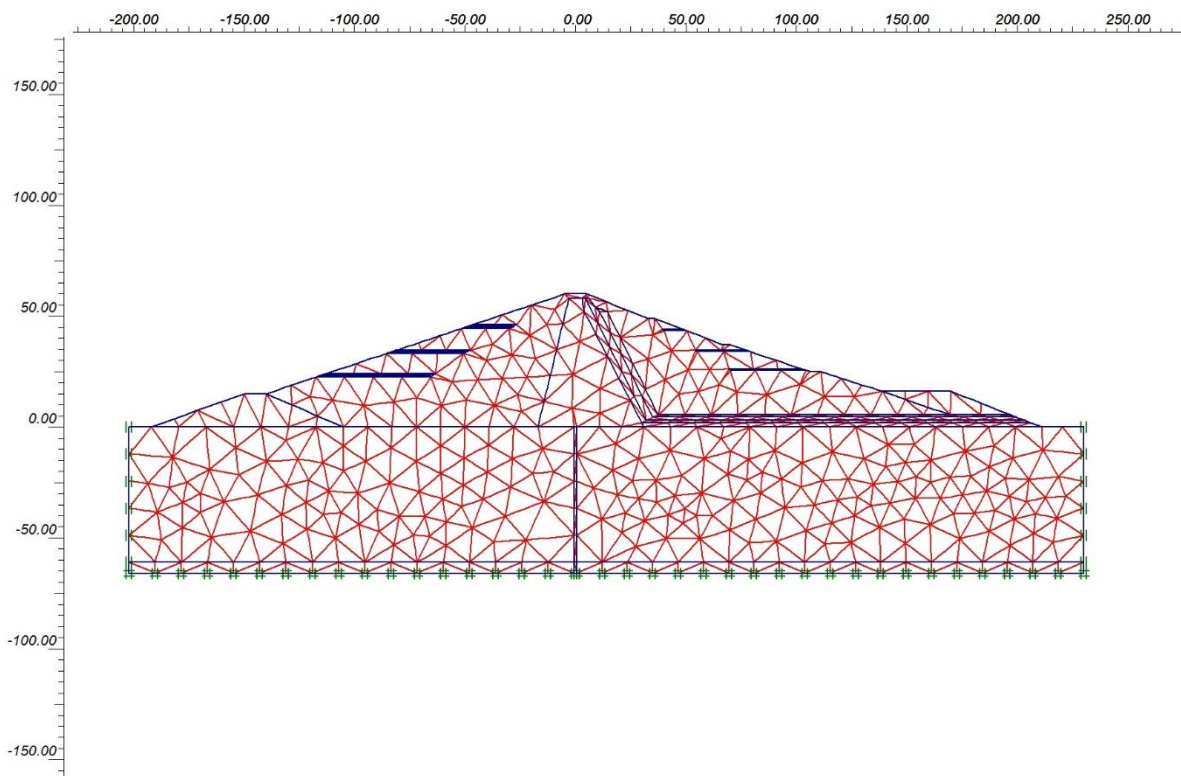


شکل ۴-۲، تعریف شرایط مرزی برای مدل هندسی تهیه شده سد قبل از اجرای دیوار آببند



Connectivities

شکل ۴-۳، مدل هندسی تهیه شده برای شرایط سد بعد از اجرای دیوار آببند



Connectivities

شکل ۴-۴، تعریف شرایط مرزی برای مدل هندسی تهیه شده سد بعد از اجرای دیوار آب‌بند بعد از این مرحله، خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح که از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی برآورد شده است، به مصالح مدل تخصیص داده می‌شوند. جدول ۴-۱، پارامترهای ورودی نرم‌افزار Plaxis برای تخصیص خواص به مصالح سد نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، خصوصیات اصلی مربوط به مدل رفتاری الاستوپلاستیک ارائه شده است. مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک به عنوان مهم‌ترین مدل‌های رفتاری در محیط خاک و سنگ هستند که به صورت قابل قبولی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این جدول برای هر کدام از مصالح موجود در مدل هندسی به صورت تک تک باید تعریف شود. در جدول ۴-۲، خصوصیات مورد استفاده در این شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است.

مدل رفتاری به کار گرفته شده در این مطالعه، مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب است. این مدل رفتاری برپایه پوش گسیختگی تحت تنش‌های نرمال و برشی به صورت صفحه‌ای و فضایی، امکان تحلیل گسیختگی به هر دو صورت کششی و فشاری (برش) را ممکن می‌سازد [Brinkgreve, ۲۰۱۱]. تحلیل تنش به صورت یک تانسور ۹ عنصری که ۶ عنصر مستقل دارد مد نظر در تحلیل‌های فضایی است.

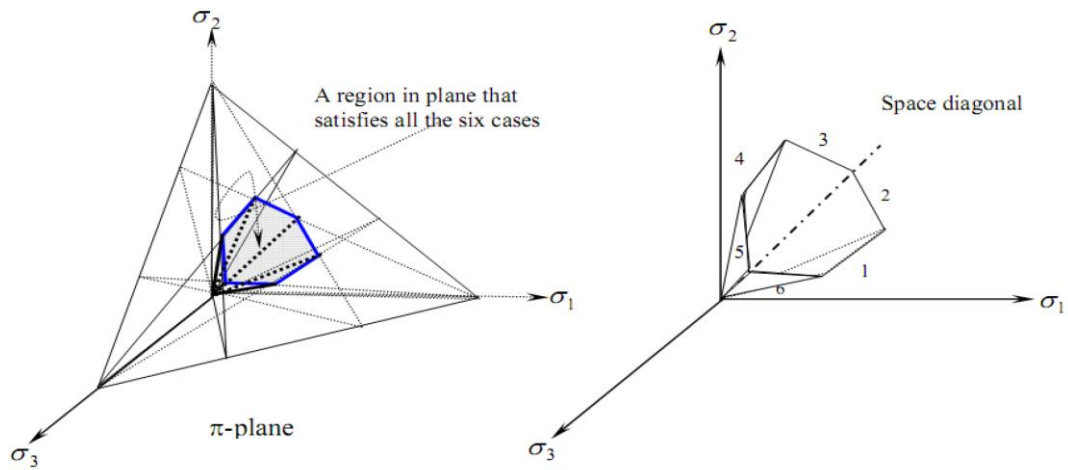
جدول ۴-۱، پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی الاستوپلاستیک در Plaxis

واحد	پارامتر	ماده
kN/m^3	γ_{unsat}	وزن مخصوص خشک
kN/m^3	γ_{sat}	وزن مخصوص اشباع
kN/m^2	E_{ref}	مدول الاستیسته
-	ν	نسبت پواسون
kN/m^2	C_{ref}	چسبندگی خاک
Degree	φ	زاویه اصطکاک داخلی
Degree	ψ	زاویه اتساع
m/dey	K	ضریب هدایت هیدرولیک

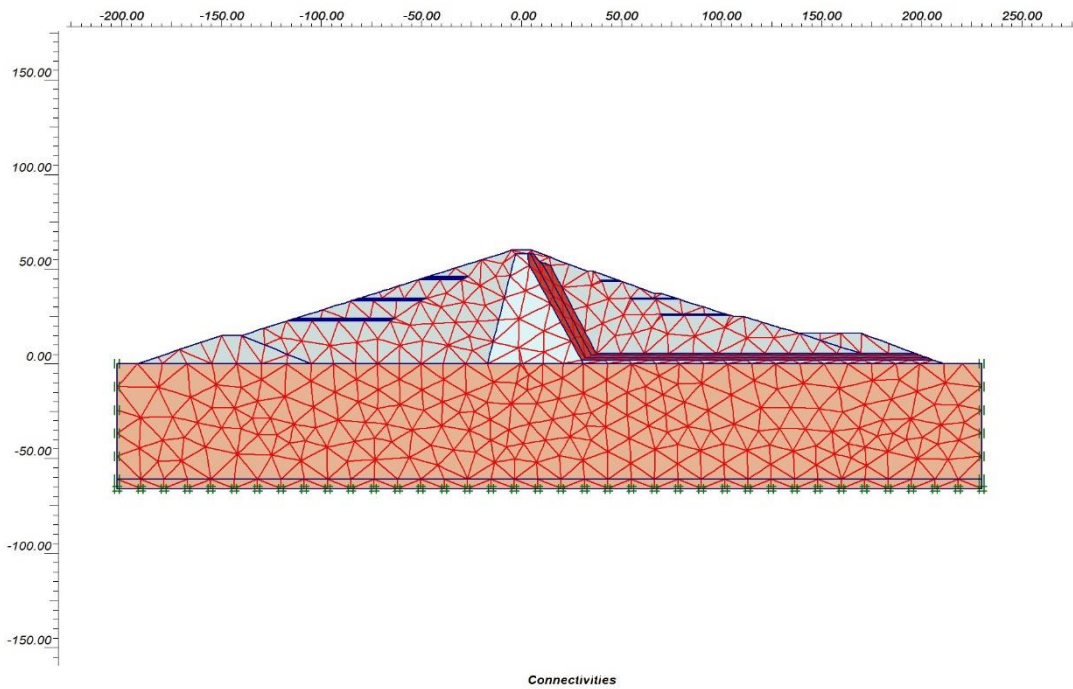
جدول ۴-۲، مقادیر پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی

پارامتر ورودی	رسوبات	بدنه ریزدانه	هسته سد	فیلتر	زهکش	آب‌بند
γ_{unsat}	۲۰/۴	۲۰/۴	۲۰/۶	۲۰/۰۰	۲۰/۰۰	۲۳/۷۵
γ_{sat}	۲۱/۰۰	۲۱/۰۰	۲۱/۰۰	۲۰/۷	۲۰/۷	۲۳/۷۵
E_{ref}	۲۳۰۰۰	۱۸۵۰۰	۱۸۵۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۶۵۲۲۶۷/۷
ν	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۵
C_{ref}	۲۵	۲۷	۲۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱۳
ϕ	۲۸	۲۲	۳۰	۳۸	۳۸	۳۰
ψ	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۸	۸	۰/۰۰
k	۸۶/۴	$۸/۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۸/۶ \times ۱۰^{-۵}$	۸/۶۴	۸/۶۴	$۸/۶ \times ۱۰^{-۶}$

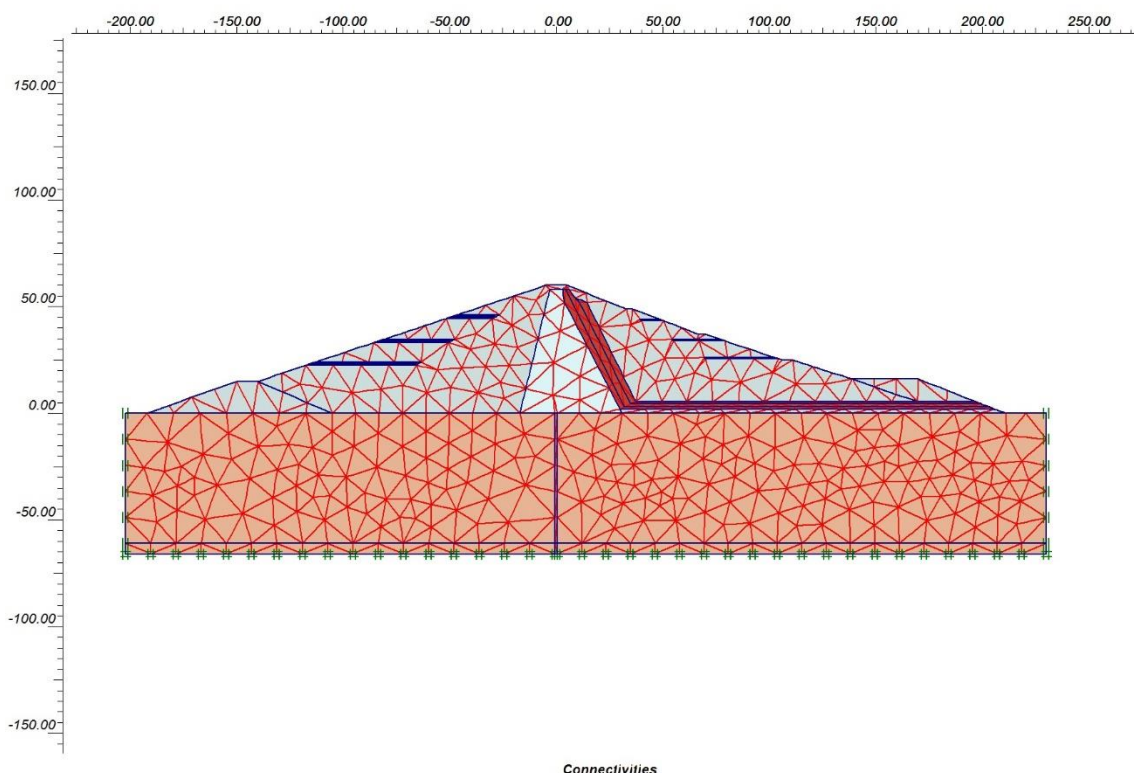
وضعیت گسیختگی ۶ مولفه مستقل از تانسور تنش در شکل ۴-۵، نشان داده شده است. همچنین اشکال ۴-۶ و ۴-۷، مدل تخصیص خواص و مدل رفتاری که برای هر دو گروه مدل هندسی تعریف گردیده شده است را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۵، وضعیت تانسورهای تنش در فضای سه بعدی مور - کولمب

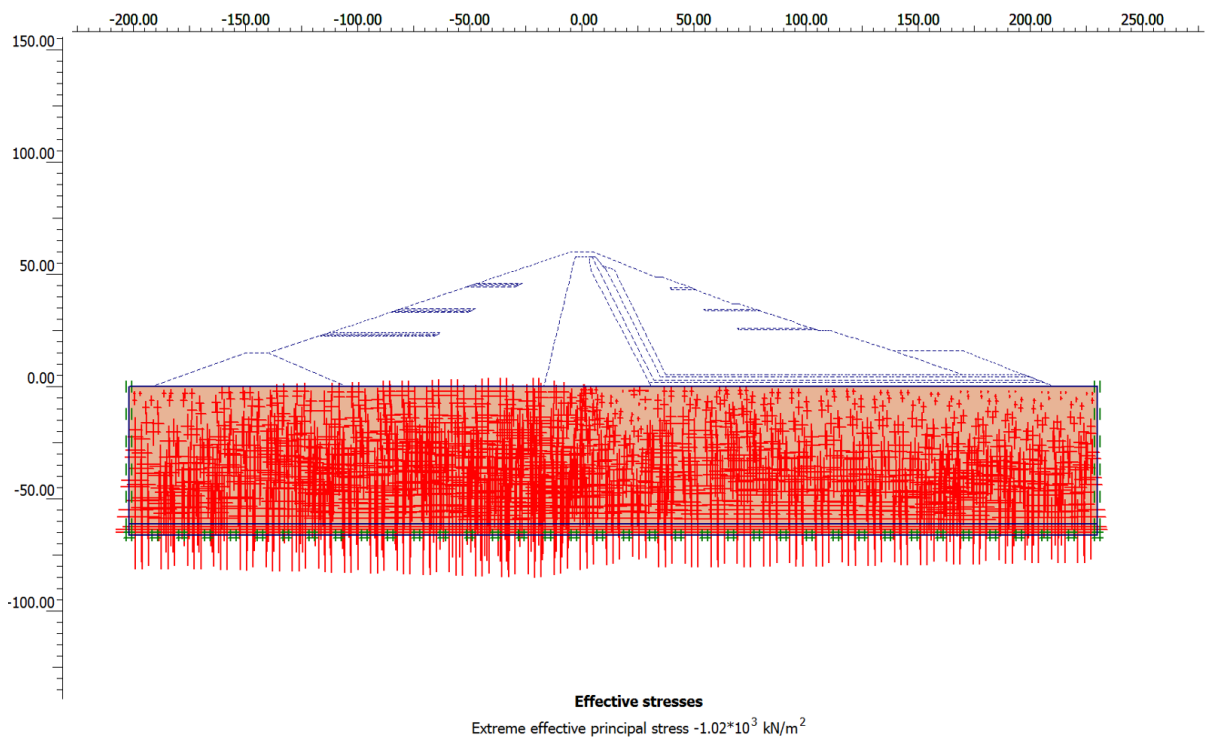


شکل ۴-۶، نتایج تعریف مدل رفتاری و تخصیص خواص به مدل قبل از اجرای سامانه آببند

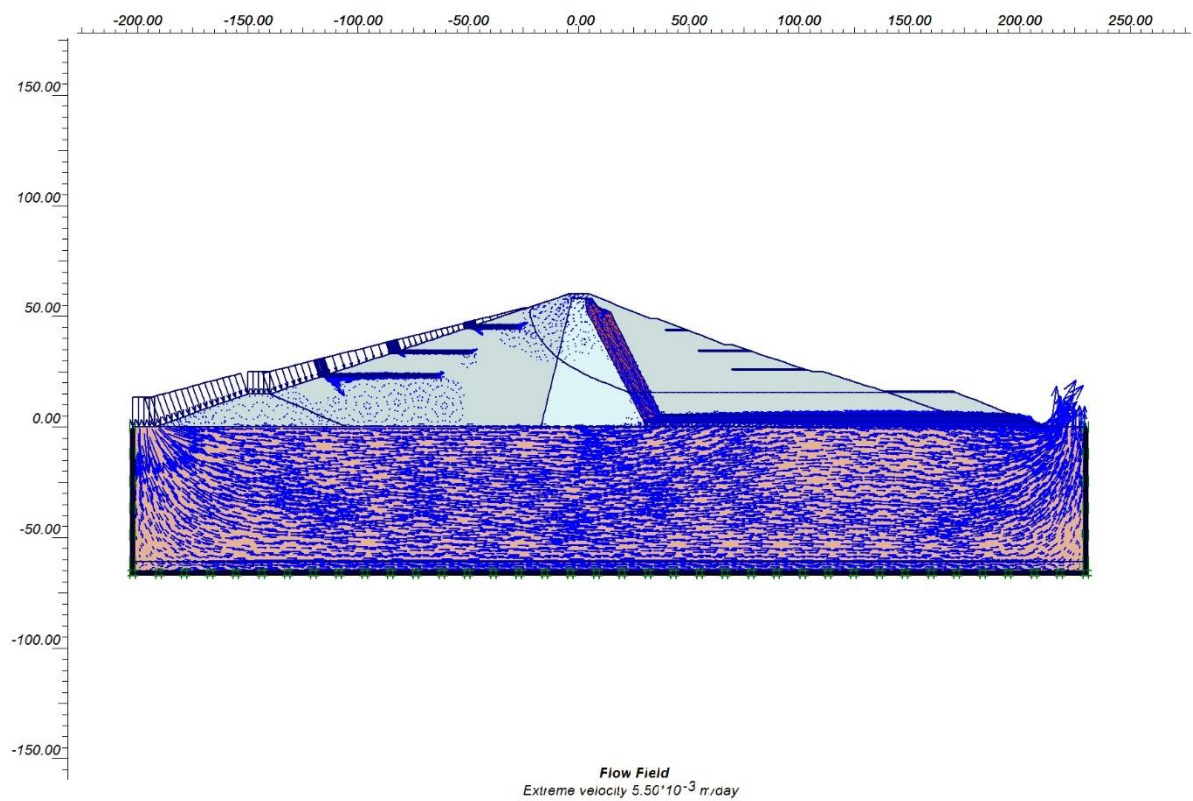


شکل ۴-۷، نتایج تعریف مدل رفتاری و تخصیص خواص به مدل بعد از اجرای سامانه آب‌بند

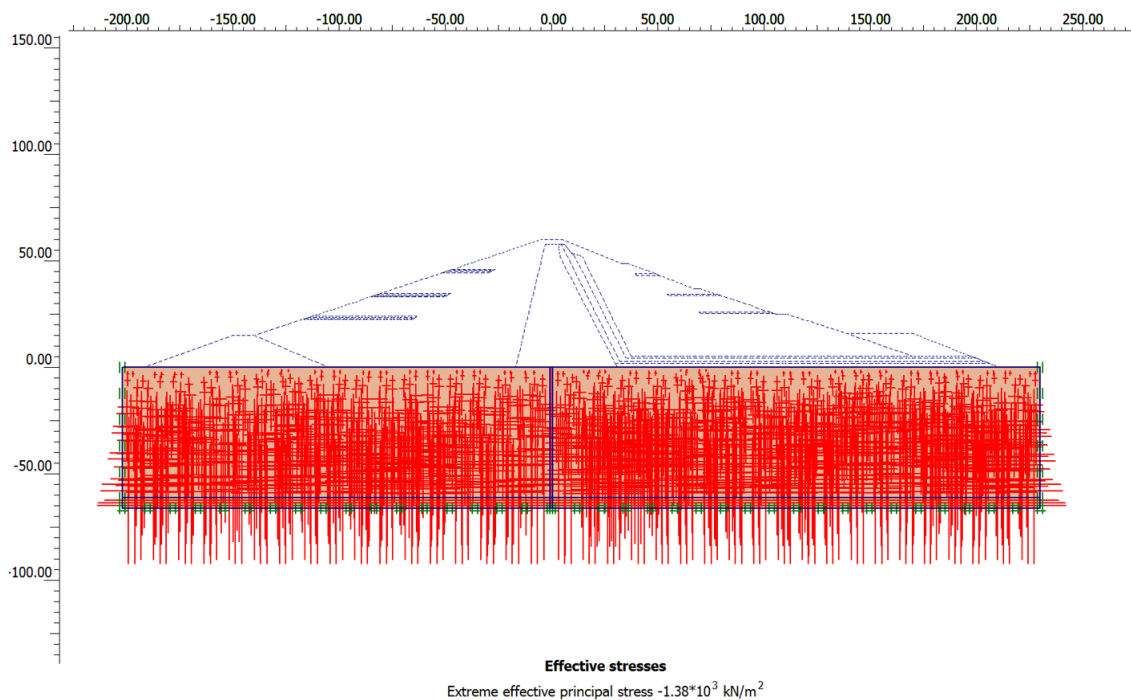
بعد از تعریف خصوصیات مصالح و مدل‌های رفتاری برای مصالح و بدنه سد، مدل آماده‌سازی شده و میدان تنش برجا و وضعیت آب در مدل تعریف می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، با توجه به تحلیل تراوش صورت گرفته در این پژوهش، وضعیت آب برای حالت پایدار و بلند مدت در سد ارایه شده است. بنابراین باید ویژگی‌های میدان تنش برجا به صورت استاتیک و فشار آب به صورت حالت پایدار در مدل تعریف شود. اشکال ۴-۸ تا ۴-۱۱، اجزای تنش برجا و جریان پایدار را در سد برای شرایط اولیه ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات اجزای تنش و فشار آب برابر قوانین تنش در خاک به صورت توزیع عمقی صورت گرفته که نشان‌دهنده پیاده‌سازی دقیق و مناسب مدل همراه با شرایط محیط و قانون هوک است. با توجه به قانون هوک، در محیط‌های ایزوتروپ و همگن که دارای انیزوتروپی قابل توجه نیستند (مانند محیط سطحی و پوسته بالایی زمین) با افزایش عمق در شرایط تنش برجا، فشار آب منفذی افزوده می‌شود. این مساله در مدل‌ها قابل مشاهده است.



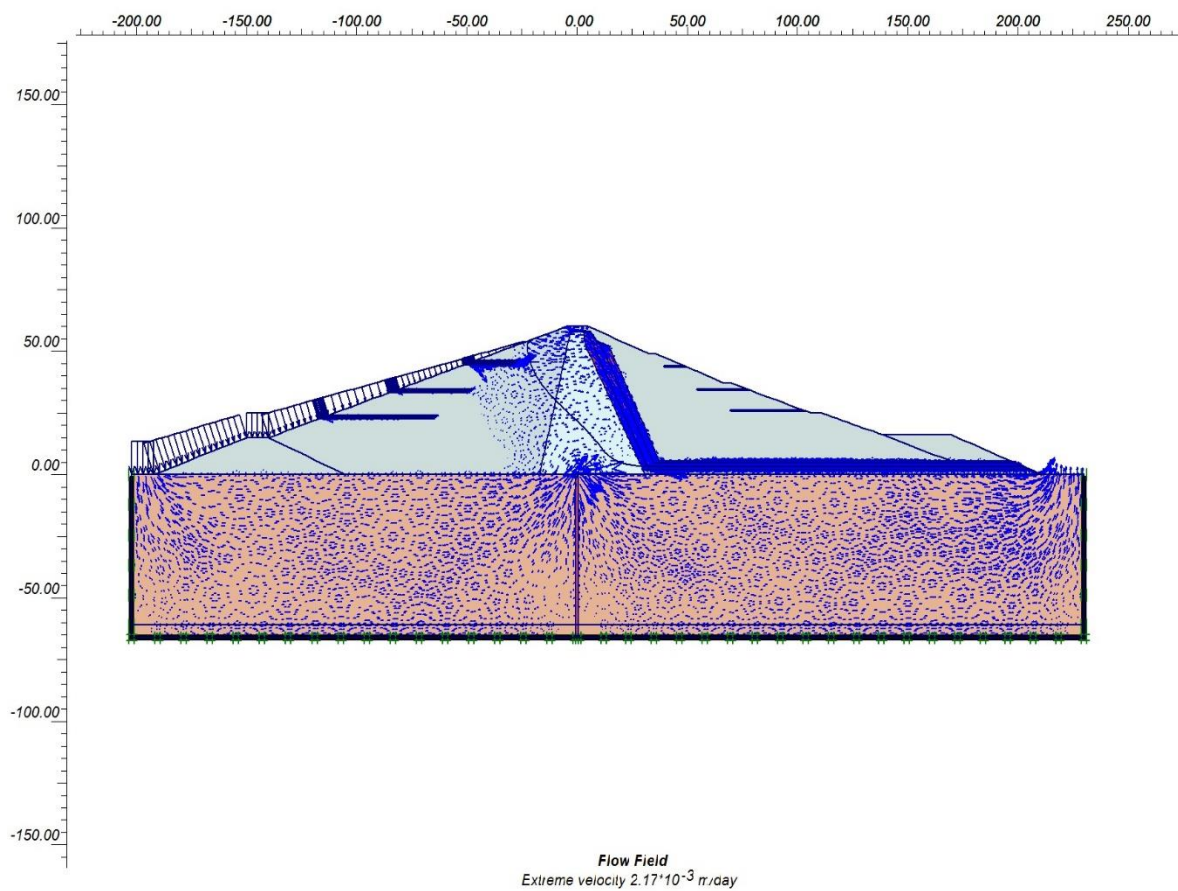
شکل ۴-۸، وضعیت توزیع تنش برجا در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند



شکل ۴-۹، وضعیت جریان آب در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند



شکل ۴-۱۰، وضعیت توزیع تنش برجا در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند

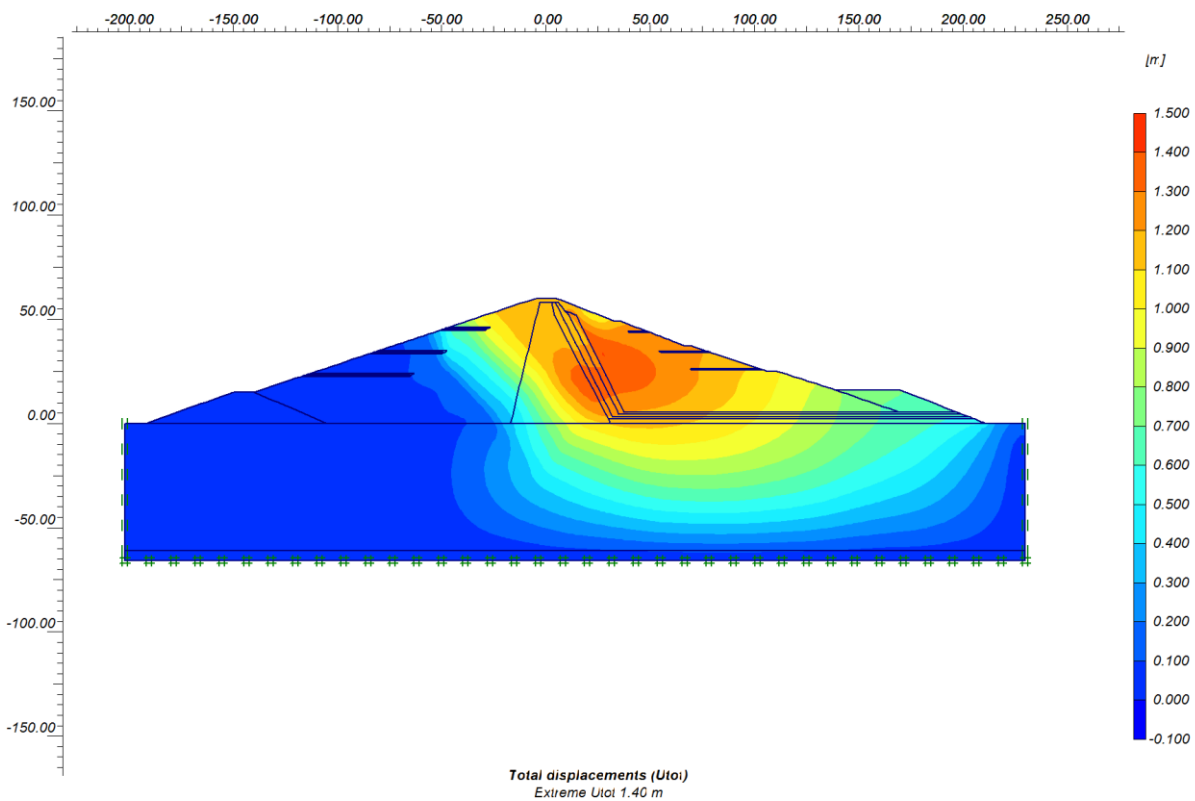


شکل ۴-۱۱، وضعیت جریان آب در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند

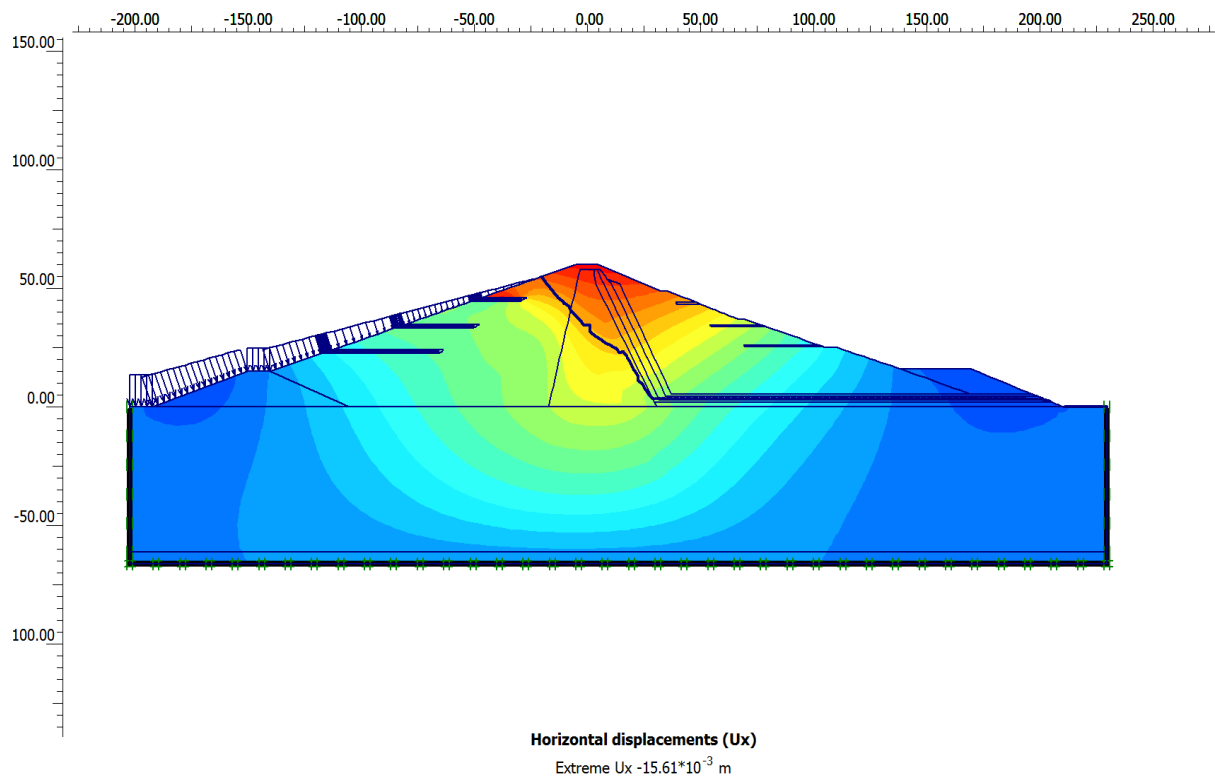
با توجه به شکل‌های ۸-۴ و ۱۱-۴، مشاهده می‌شود که وضعیت توزیع تنش برجا در محدوده سد قبل و بعد از اجرای سامانه آب‌بند تغییری نمی‌کند چراکه تنش‌های برجا در حالتی ایجاد می‌شوند که هنوز سد ایجاد نشده، به‌همین دلیل تنش‌های برجا فقط در فونداسیون ایجاد شده‌اند و توزیع تنش در هر دو حالت یکسان است. همچنین وضعیت جریان با توجه به شکل ۹-۴ و ۱۱-۴، مشاهده می‌شود در حالتی که سامانه آب‌بند اجرا شده حداکثر سرعت جریان $m/day \cdot 10^{-3} * 2/17$ است، در حالی که قبل از اجرای سامانه آب‌بند این مقدار برابر با $m/day \cdot 10^{-3} * 5/50$ است، که این تفاوت در مقدار ناشی از عملکرد صحیح دیوار آب‌بند است.

۴-۳-۱- مدل مکانیکی برای قبل از اجرای دیوار آب‌بند

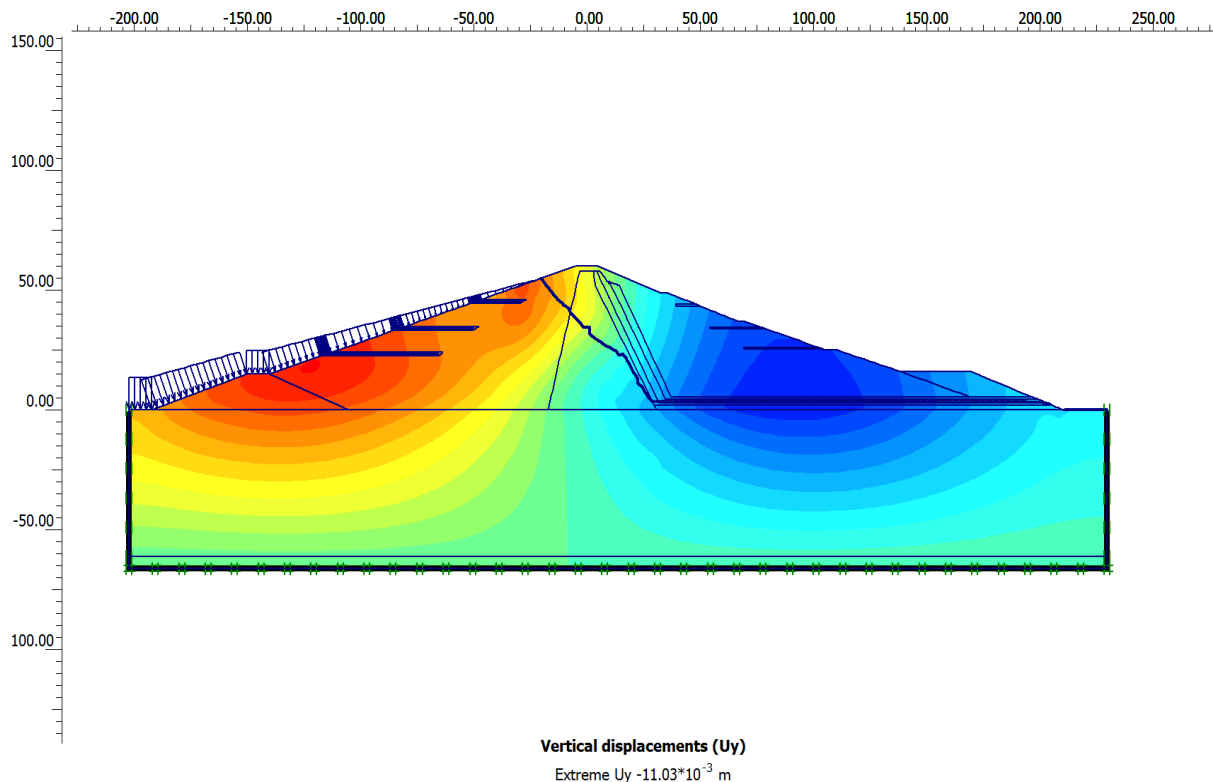
در مرحله مدل‌سازی مکانیکی، مدل نهایی و آماده تحلیل می‌شود. بدین منظور مدل طی سیکل‌های مشخص تحت رفتار پلاستیک مورد حل (محاسبات) قرار گرفته و خروجی تحلیل مورد بررسی و تفسیر قرار می‌گیرد. در مدل‌سازی مکانیکی، تغییر شکل‌های ایجاد شده در سد و محیط از شرایط اولیه به شرایطی که بعد از آب‌گیری سد و ساخت دیوار آب‌بند، محاسبه شده و میزان تغییرات و جابجایی‌ها در گره‌های تحلیل برآورد می‌شود. این اطلاعات در ارزیابی تراوش از بدنه و بستر سد در طی مراحل قبل و بعد از ساخت دیوار آب‌بند و طی آب‌گیری سد (تحلیل بلندمدت) مورد استفاده است. در اشکال ۴-۱۲ تا ۴-۲۲، نتایج حاصل از حل مدل مکانیکی برای شبیه‌سازی قبل از اجرای دیوار آب‌بند ارائه داده است.



شکل ۴-۱۲، وضعیت تغییر شکل و جابجایی کل در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند

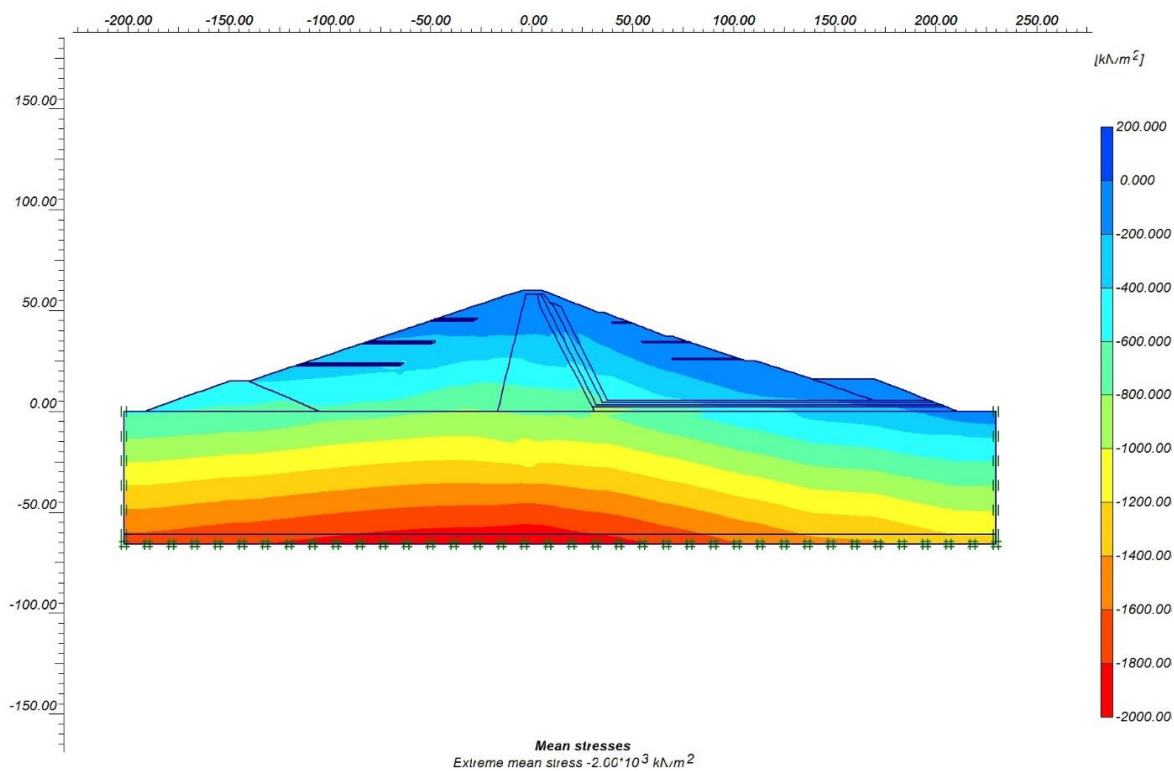


شکل ۴-۱۳، وضعیت جابجایی افقی ناشی از جریان پایدار در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند

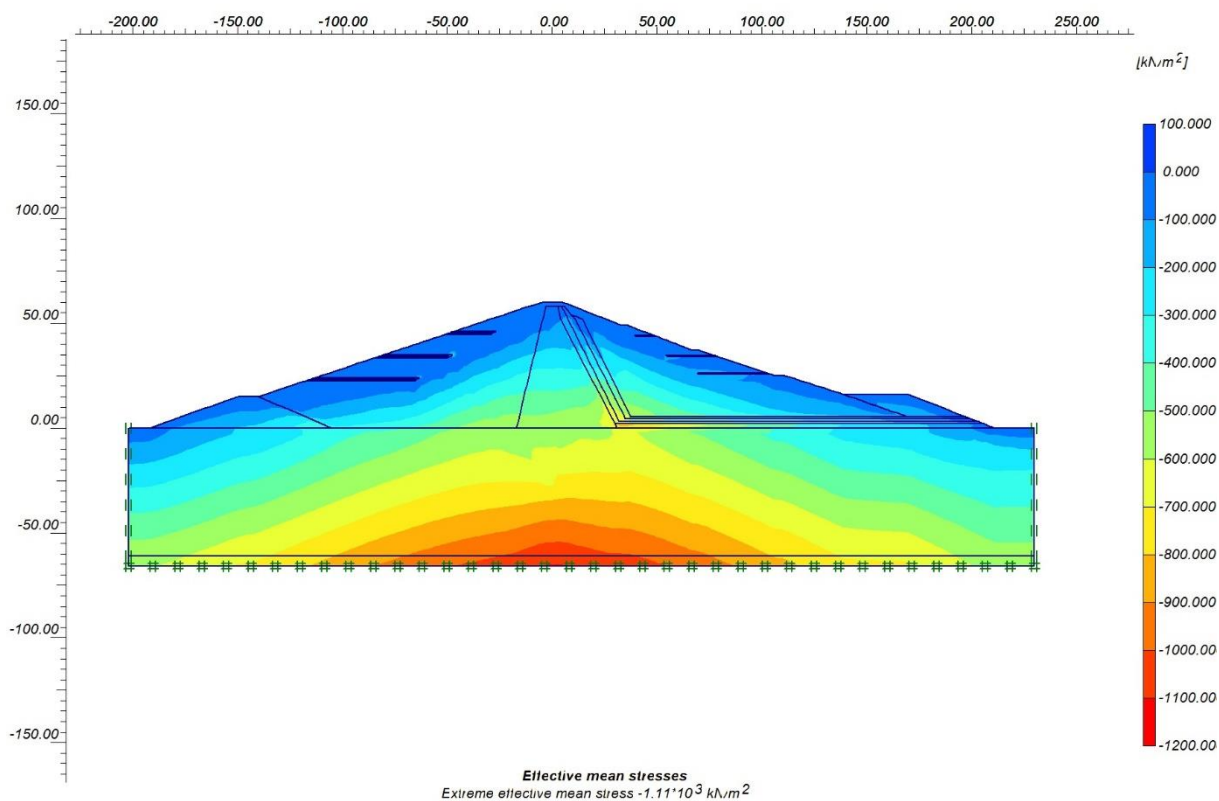


شکل ۴-۱۴، وضعیت جابجایی قائم ناشی از جریان پایدار در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند

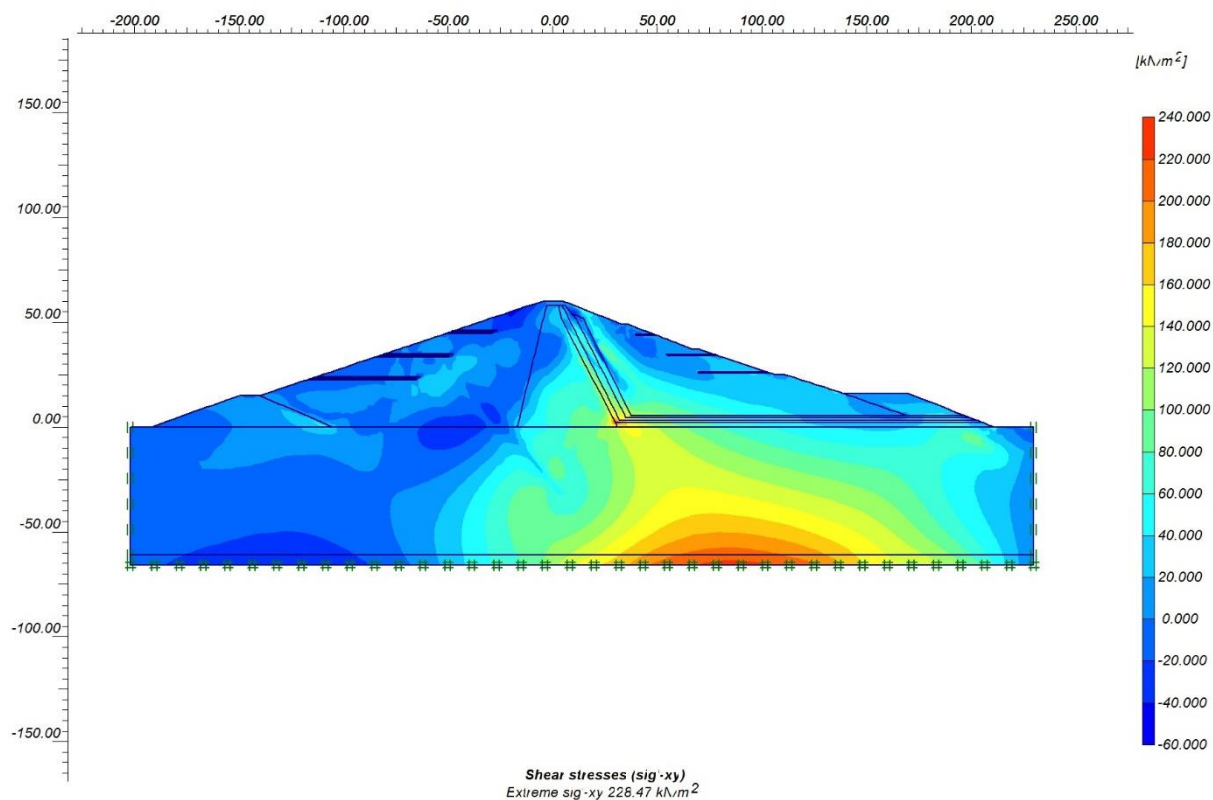
در شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴، وضعیت جابجایی‌های افقی و قائم مشاهده می‌شود. با توجه به کانتورهای جابجایی، حداکثر تغییر مکان‌های افقی و قائم در تاج سد و در بالادست و به سمت مخزن سد توزیع شده‌است و مقدار آن قابل قبول برای پایداری سد است. بخش‌های قرمز رنگ دارای مقادیر حداکثر هستند و بخش‌های آبی کم‌ترین مقادیر را دارند.



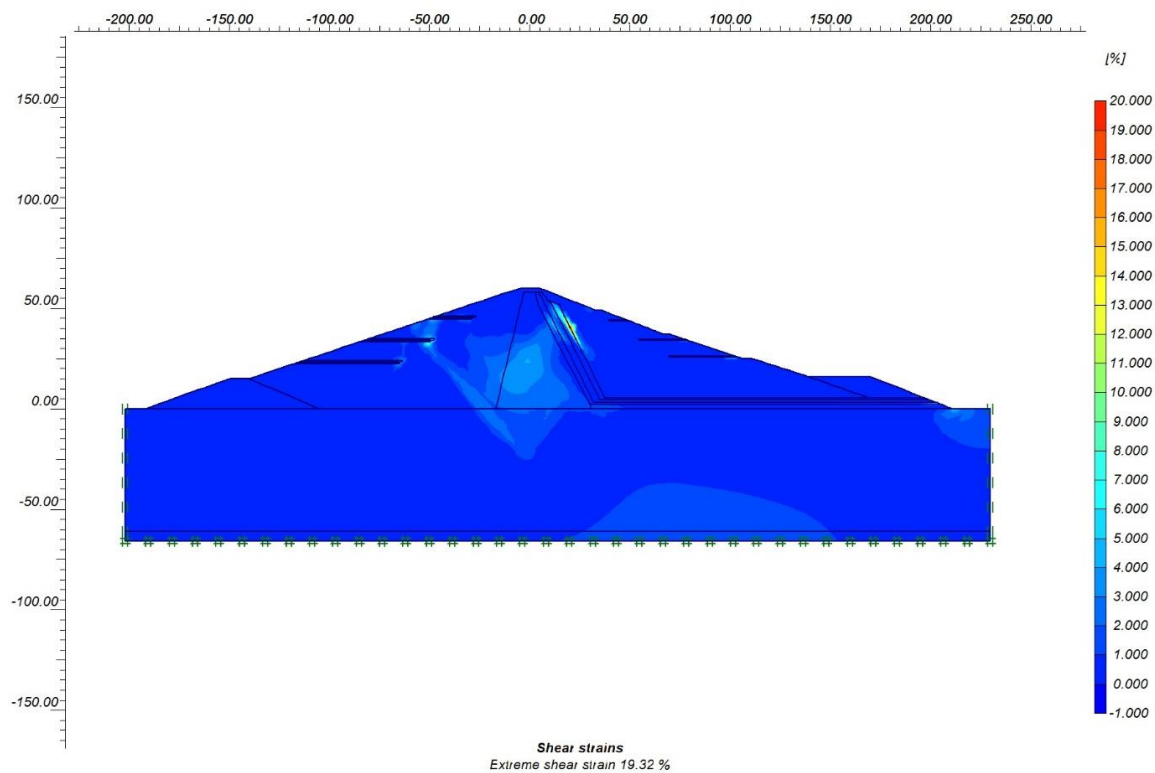
شکل ۴-۱۵، وضعیت تنش برجا کل بعد از آب‌گیری در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آب‌بند



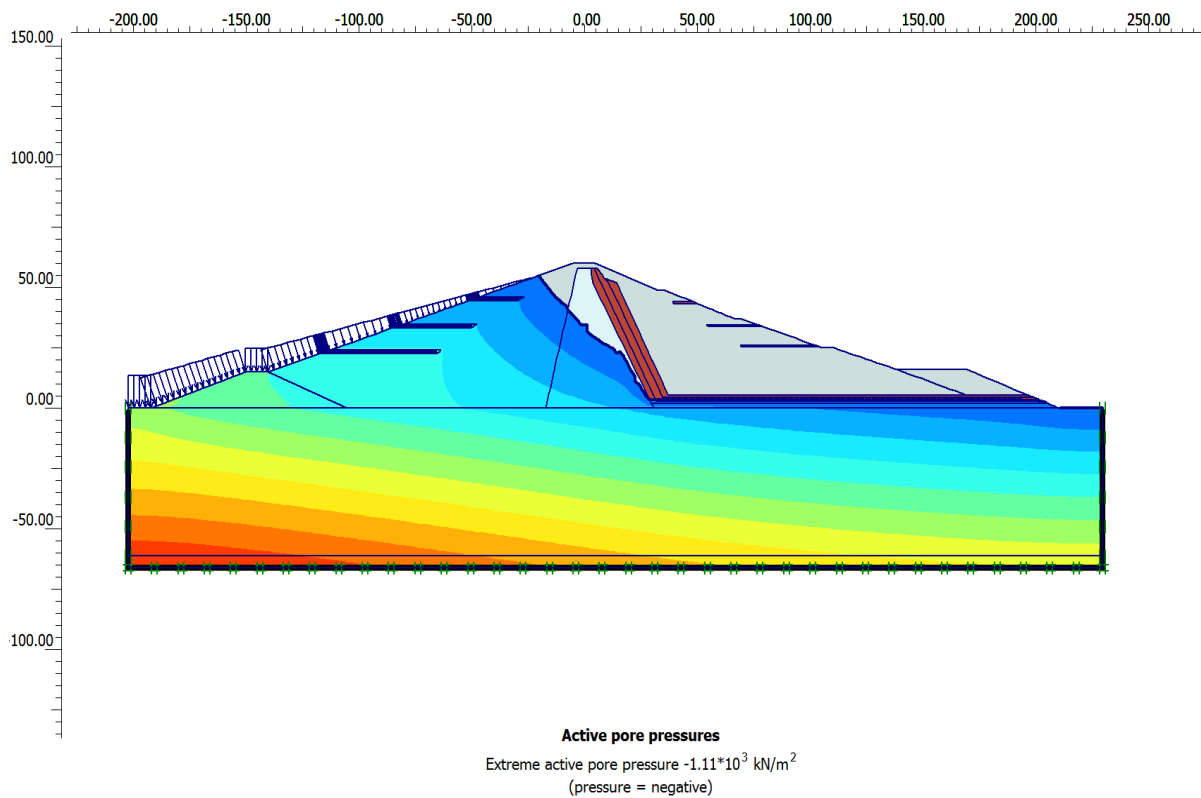
شکل ۴-۱۶، وضعیت تنش برجا موثر بعد از آب‌گیری در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آب‌بند



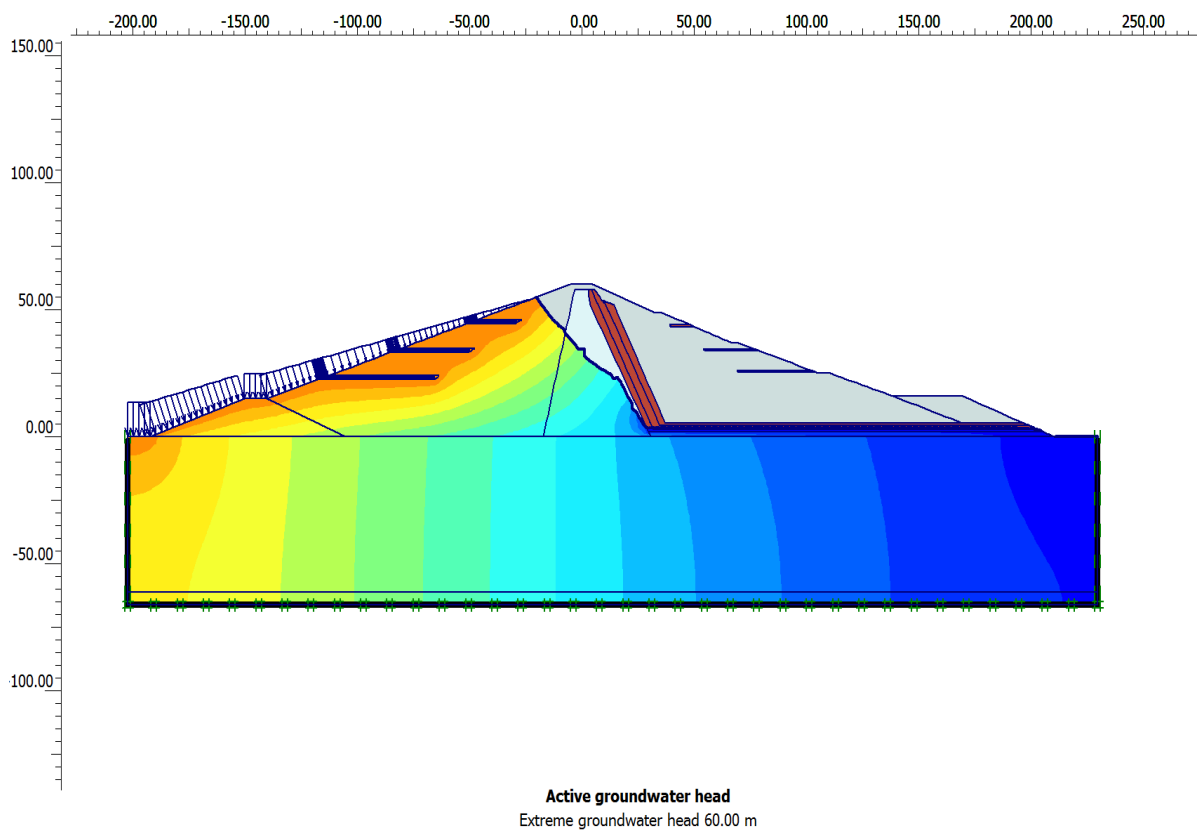
شکل ۴-۱۷، وضعیت توزیع تنش برشی بعد از آب‌گیری در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آب‌بند



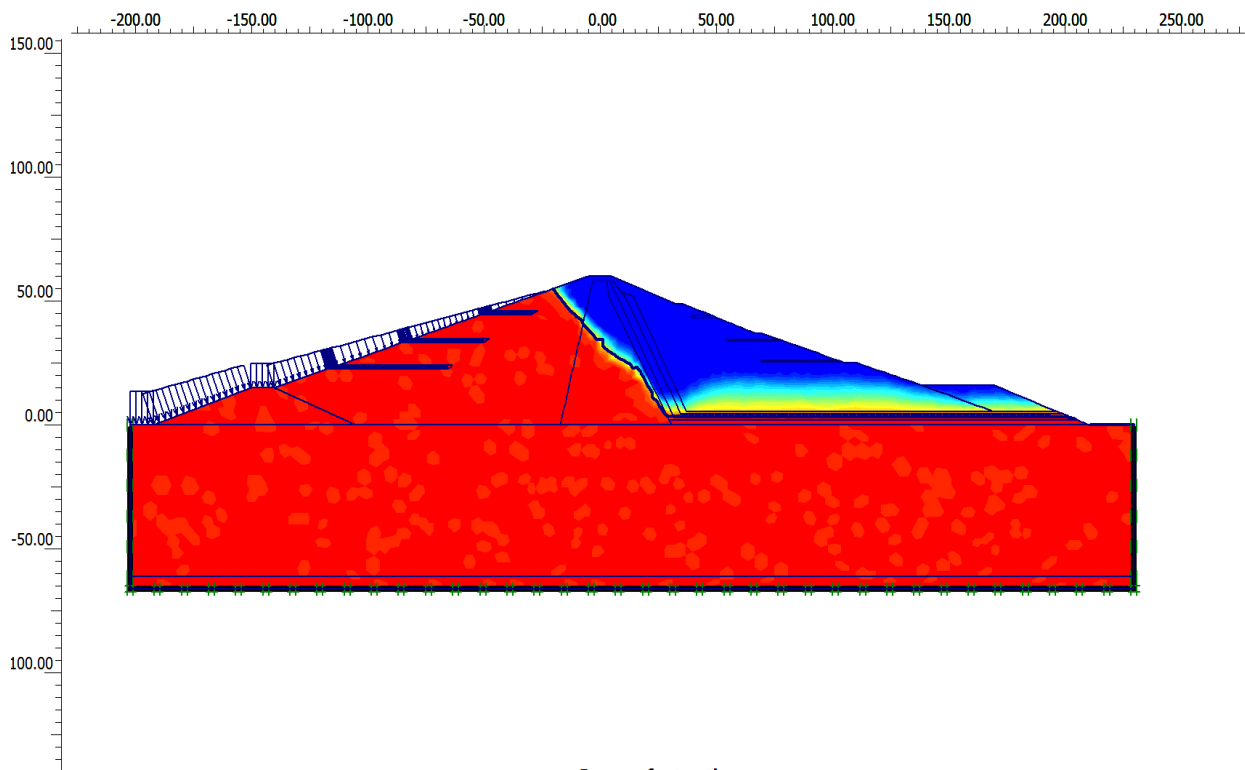
شکل ۴-۱۸، وضعیت کرنش کل در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آب‌بند



شکل ۴-۱۹، وضعیت فشار آب منفذی نهایی در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند

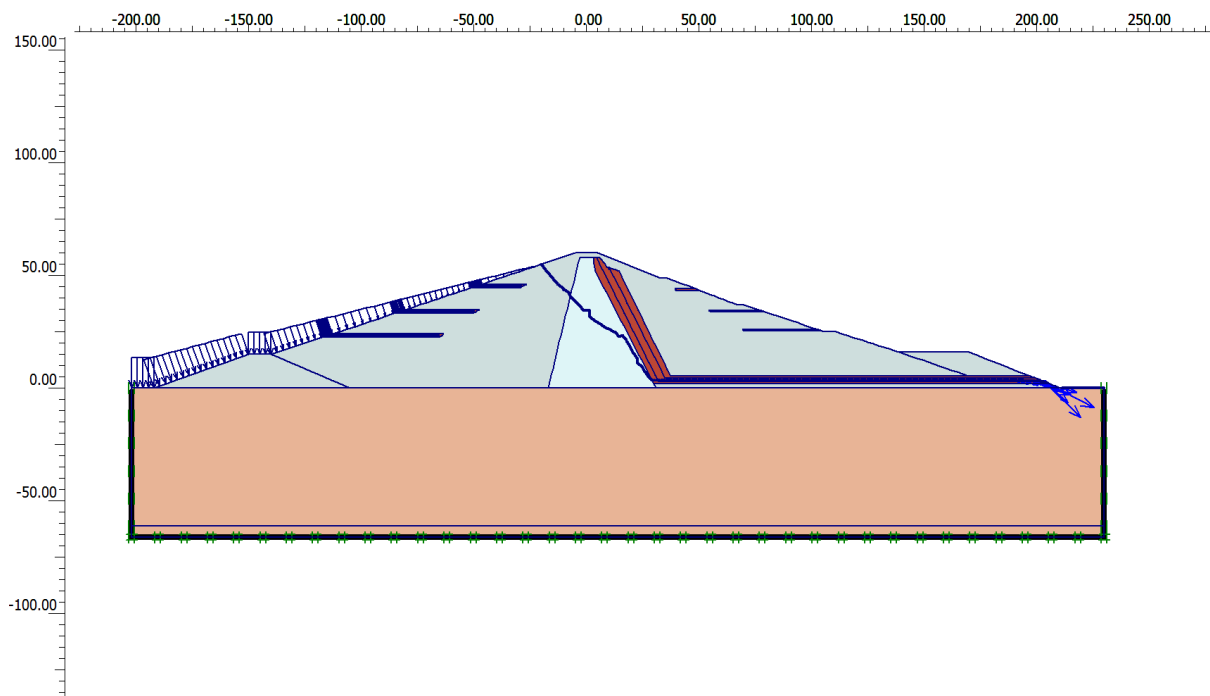


شکل ۴-۲۰، وضعیت هد فعال آب زیرزمینی در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند



Degree of saturation
Extreme degree of saturation 100.87%

شکل ۴-۲۱، وضعیت درجه اشباع شدگی طی آبدگیری در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند



Flow field
Extreme velocity 23.80 m/day

شکل ۴-۲۲، وضعیت جریان سیال در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آببند

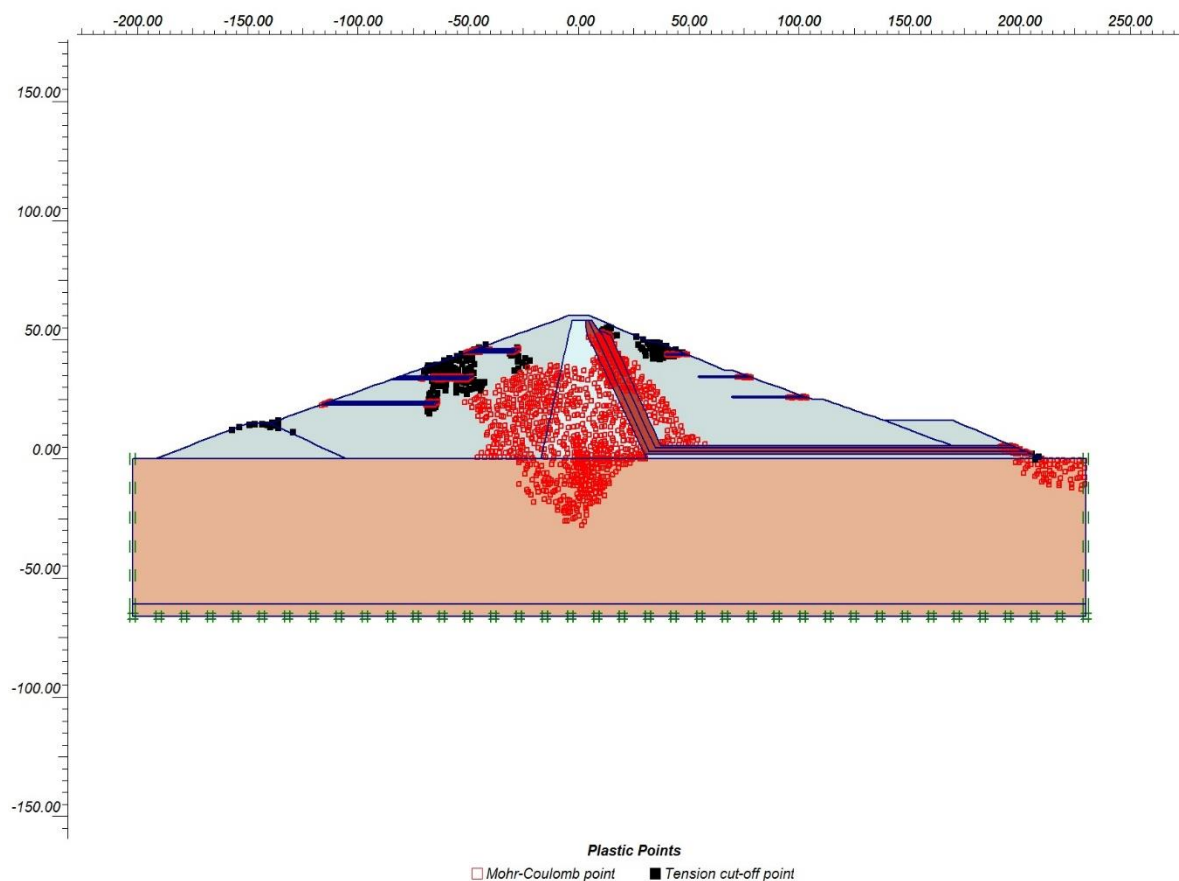
با توجه به شکل‌های ۴-۱۹ تا ۴-۲۲ که می‌توان گفت مهم‌ترین و قابل بحث‌ترین قسمت مدل‌سازی و تحلیل نتایج هستند، فشار آب‌منفذی، هد آب زیر زمینی، درجه‌ی اشباع شدگی و جریان آب قابل مشاهده و تحلیل هستند. با توجه به شکل ۴-۱۹ هر چه به بخش‌هایی که نفوذپذیری کم‌تری دارند نزدیکتر می‌شویم فشار منفذی بیشتر شده و در نهایت در نزدیکی دیواره پایین که غیر قابل نفوذ می‌باشد فشار منفذی به حداکثر مقدار خود رسیده است. همچنین در شکل ۴-۲۰ خطوط هم‌پتانسیل مشاهده می‌شود که تمام نقاط روی این خطوط دارای هد برابر هستند. همان‌طور که مشخص است در بالادست سد، بخشی که مخزن سد قرار دارد و آبگیری در آن انجام می‌شود هد آب نسبت پایین دست دست بیشتر است و به صورت منظم با حرکت به سمت بالادست سد هد آب نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۴-۲۱ درجه اشباع شدگی طی آبگیری در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آب‌بند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در محدوده‌ای که سد آبگیری می‌شود درصد اشباع ۱۰۰ درصد است و هرچه به تاج سد نزدیک می‌شویم این درصد کم‌تر می‌شود. هر چه حجم بیشتری از بدنه سد اشباع باشد احتمال خطر بیشتر است و برای پایداری بیشتر سد باید اقدامی انجام شود تا قسمت کمتری از بدنه سد اشباع باشد که احداث زهکش یک روش برای این اقدام است. بدین صورت که با ایجاد زهکش بالا ترین خط جریان^{۴۰} پایین‌تر قرار می‌گیرد و هر چه زهکش طول بیشتری داشته باشد بخش اشباع‌شده کم‌تر می‌شود.

شکل ۴-۲۲ وضعیت جریان سیال در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آب‌بند را نشان می‌دهد. با توجه به این که شبکه جریان در هسته رسی سد ایجاد می‌شود، از بدنه تا هسته سد زهکش ایجاد می‌شود تا آب از هسته جریان پیدا کند و وارد زهکش شود و دیگر بخش‌های سد نفوذپذیر بماند و این اتفاق در شکل به وضوح قابل مشاهده است و همچنین مشاهده می‌شود که حداکثر سرعت جریان آب قبل از اجرای آب‌بند 23.80 m/day است.

^{۴۰} Phreatic line

در شکل زیر وضعیت توزیع نقاط پلاستیک مشاهده می‌شود که تمرکز توزیع نقاط در محدوده هسته سد است.

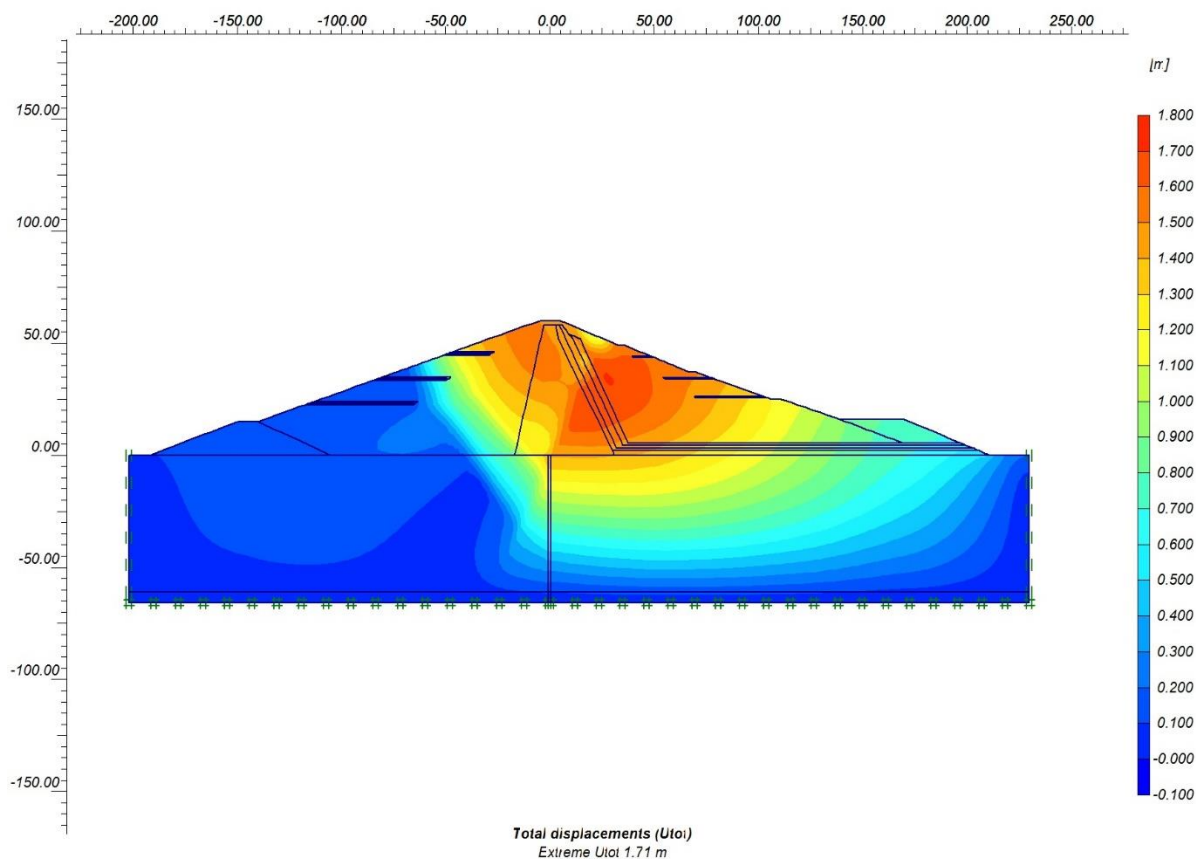


شکل ۴-۲۳، وضعیت توزیع نقاط پلاستیک در محدوده سد قبل از اجرای سامانه آب‌بند

۴-۳-۲- مدل مکانیکی برای بعد از اجرای دیوار آب‌بند

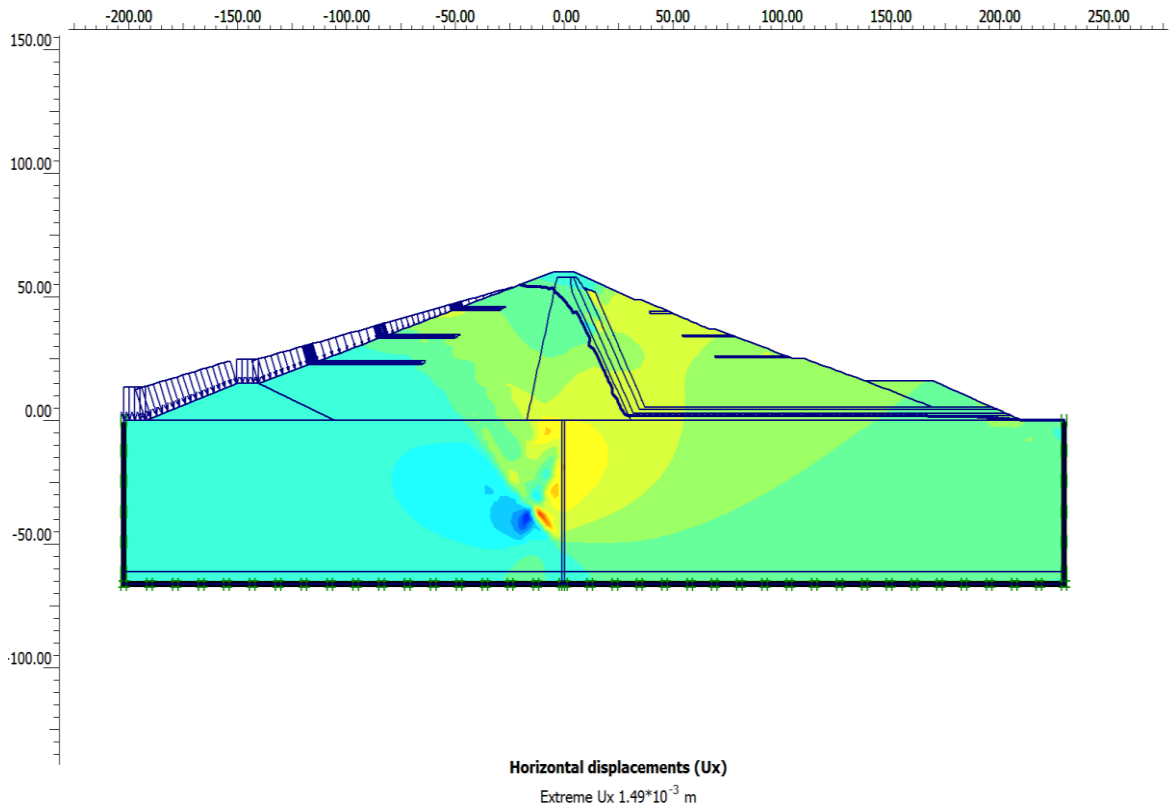
این مرحله نیز همانند مرحله مربوط به قبل از اجرای دیوار آب‌بند است. اما تفاوت اصلی این بخش، اجرا شدن دیوار آب‌بند است. وجود دیوار آب‌بند باعث افت فشار آب منفذی و جریان در رسوبات و انتقال آن به نواحی سد به‌خصوص هسته سد می‌شود که در نتایج ارائه شده در طی عملیات صحرایی و ابزار دقیق نیز قابل ملاحظه بوده و در طراحی‌های هسته سد مد نظر است. در چنین شرایطی ارزیابی تراوش در بدنه و بستر سد و به‌خصوص هسته آن بسیار مهم به‌شمار می‌آید. تغییرشکل‌های ناشی از عملیات آب‌گیری سد (تحلیل بلندمدت) سبب گسترش بیشتر نواحی پلاستیک و تمرکز تنش

در بدنه سد خواهد شد. در اشکال ۴-۲۴ تا ۴-۳۵، نتایج حاصل از حل مدل مکانیکی برای شبیه‌سازی بعد از اجرای دیوار آب‌بند ارائه شده‌است.

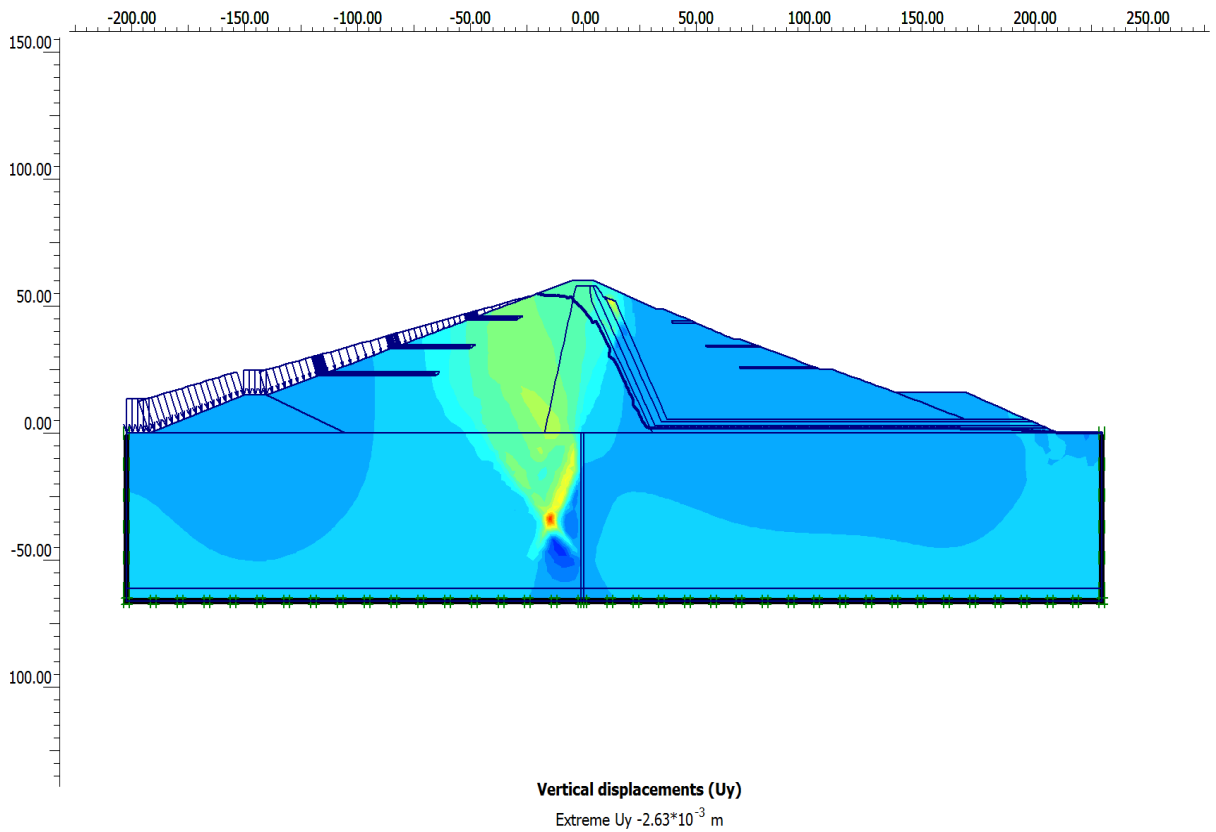


شکل ۴-۲۴، وضعیت تغییر شکل و جابجایی کل در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آب‌بند

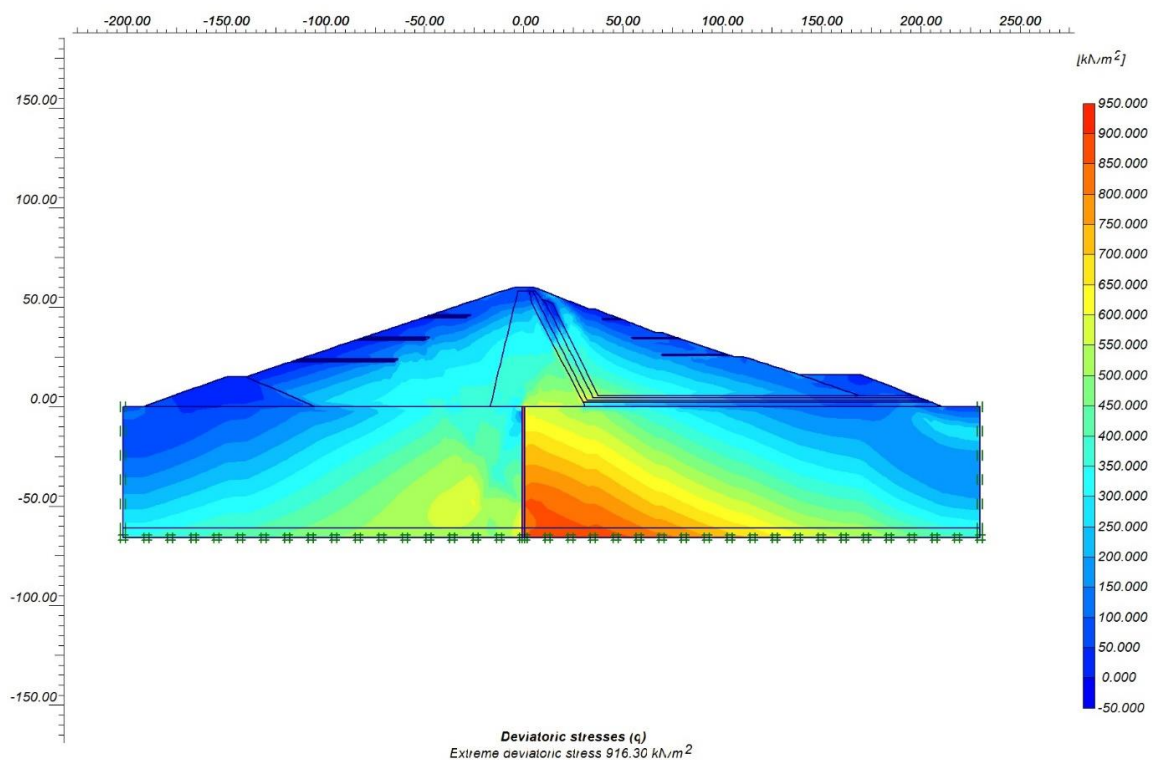
در شکل‌های ۴-۲۵ و ۴-۲۶، وضعیت جابجایی‌های افقی و قائم بعد از اجرای سامانه آب‌بند مشاهده می‌شود. با توجه به کانتورهای جابجایی، حداکثر تغییر مکان‌های افقی و قائم در تاج سد و در بالادست و به سمت مخزن سد توزیع شده‌است و مقدار آن قابل قبول برای پایداری سد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ که مربوط به جابجایی‌ها قبل از اجرای سامانه آب‌بند هستند و مقایسه آن‌ها با ۴-۲۵ و ۴-۲۶، وضعیت پایداری در حصو سامانه آب‌بند تغییرات محسوسی را داشته است.



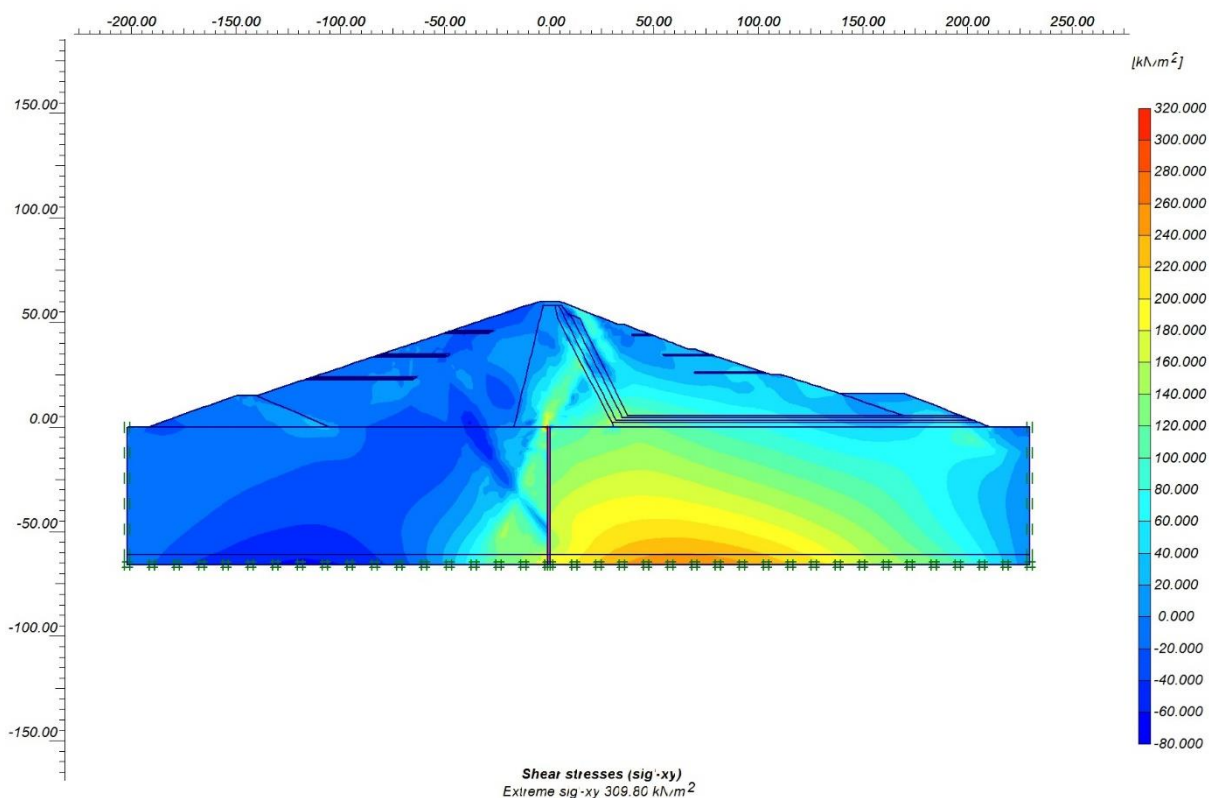
شکل ۴-۲۵، وضعیت جابجایی افقی ناشی از جریان پایدار در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند



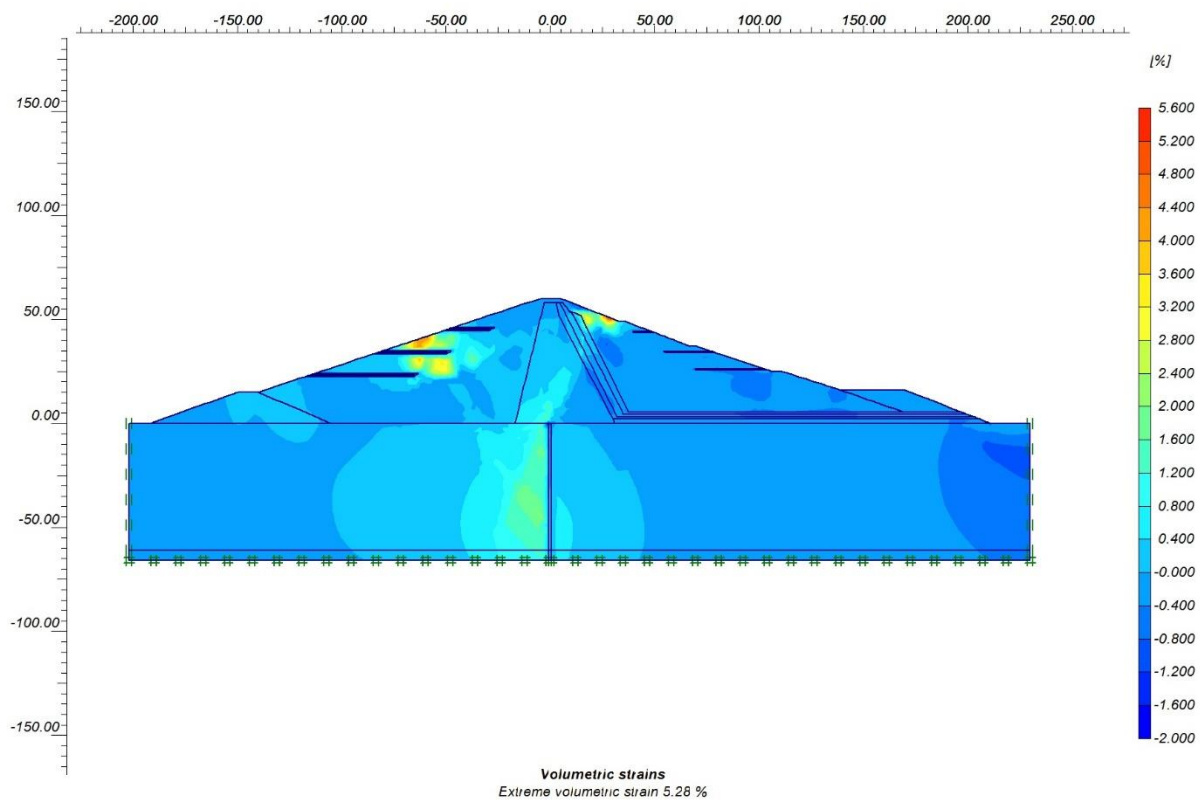
شکل ۴-۲۶، وضعیت جابجایی قائم ناشی از جریان پایدار در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند



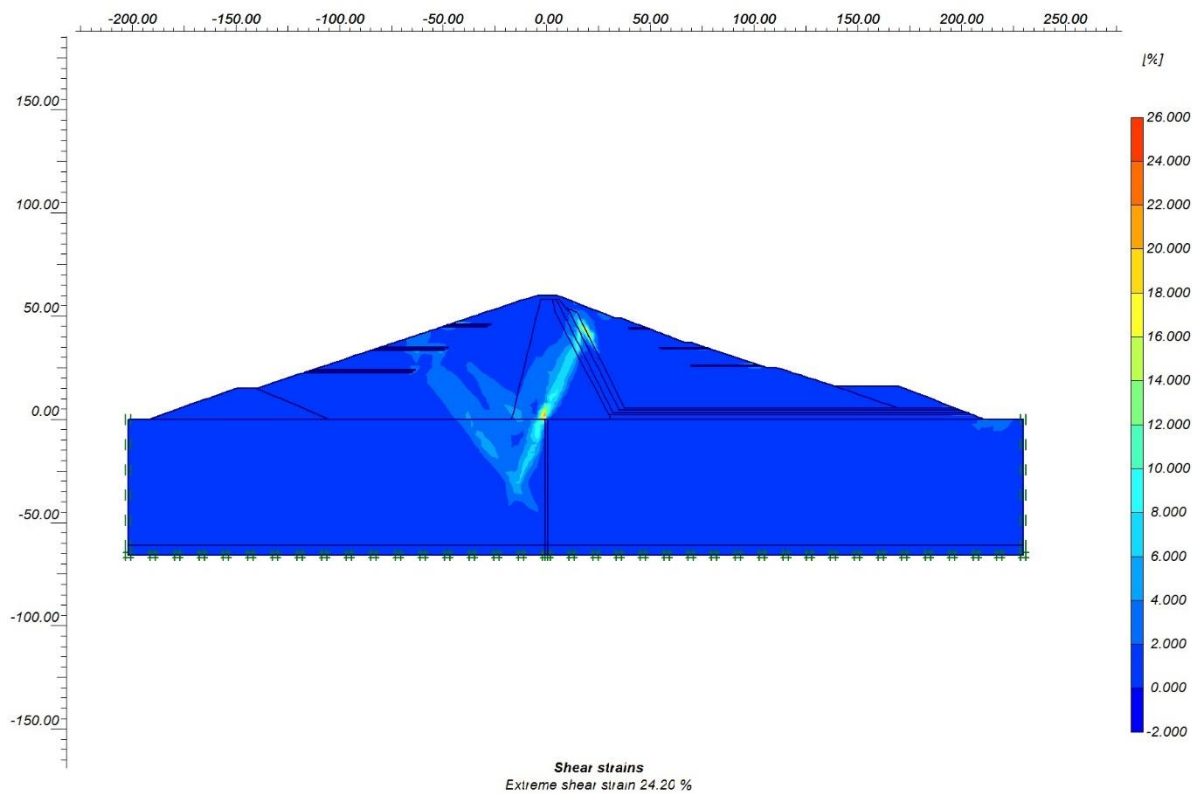
شکل ۴-۲۷، وضعیت تنش برجا کل بعد از آب‌گیری در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آب‌بند



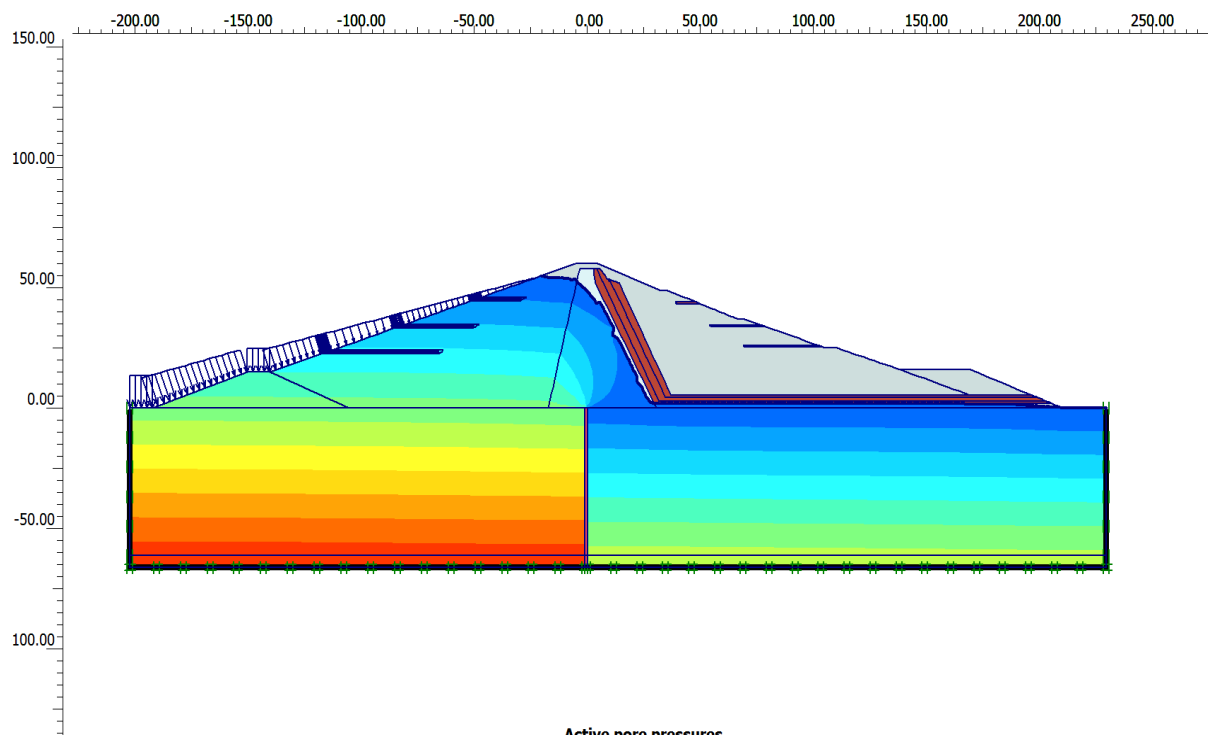
شکل ۴-۲۸، وضعیت توزیع تنش برشی بعد از آب‌گیری در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آب‌بند



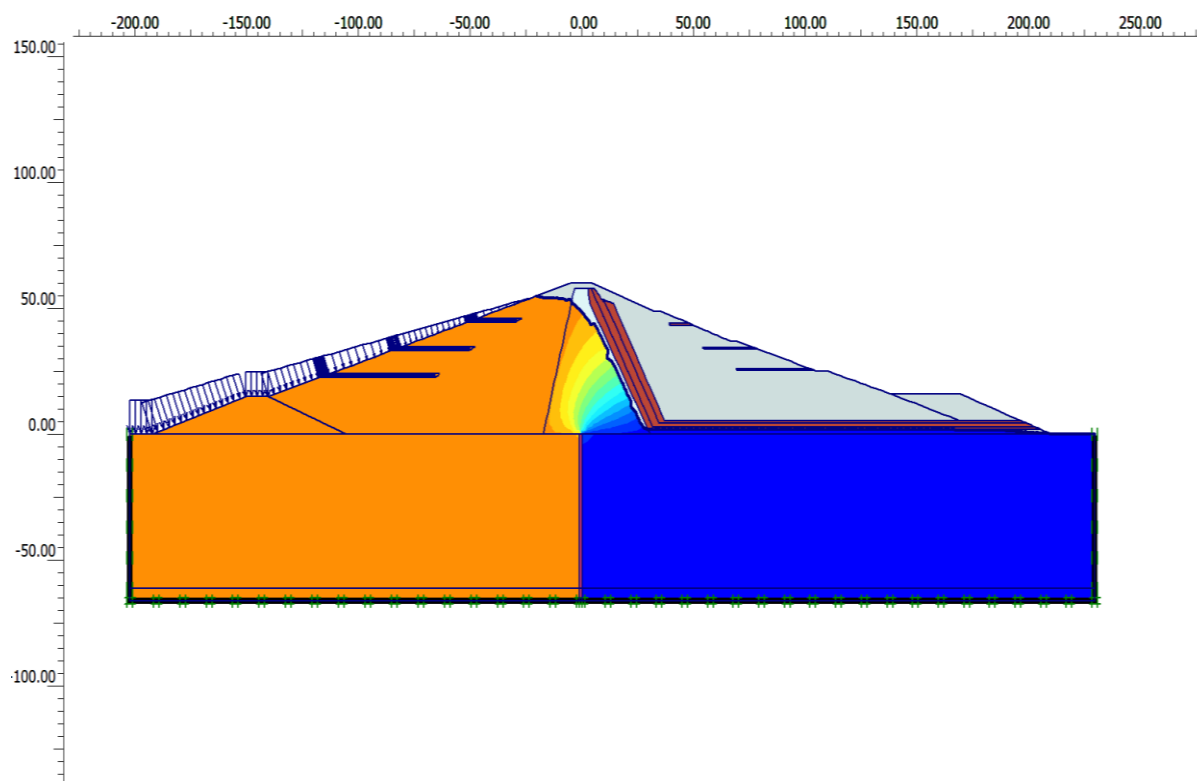
شکل ۴-۲۹، وضعیت کرنش کل در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند



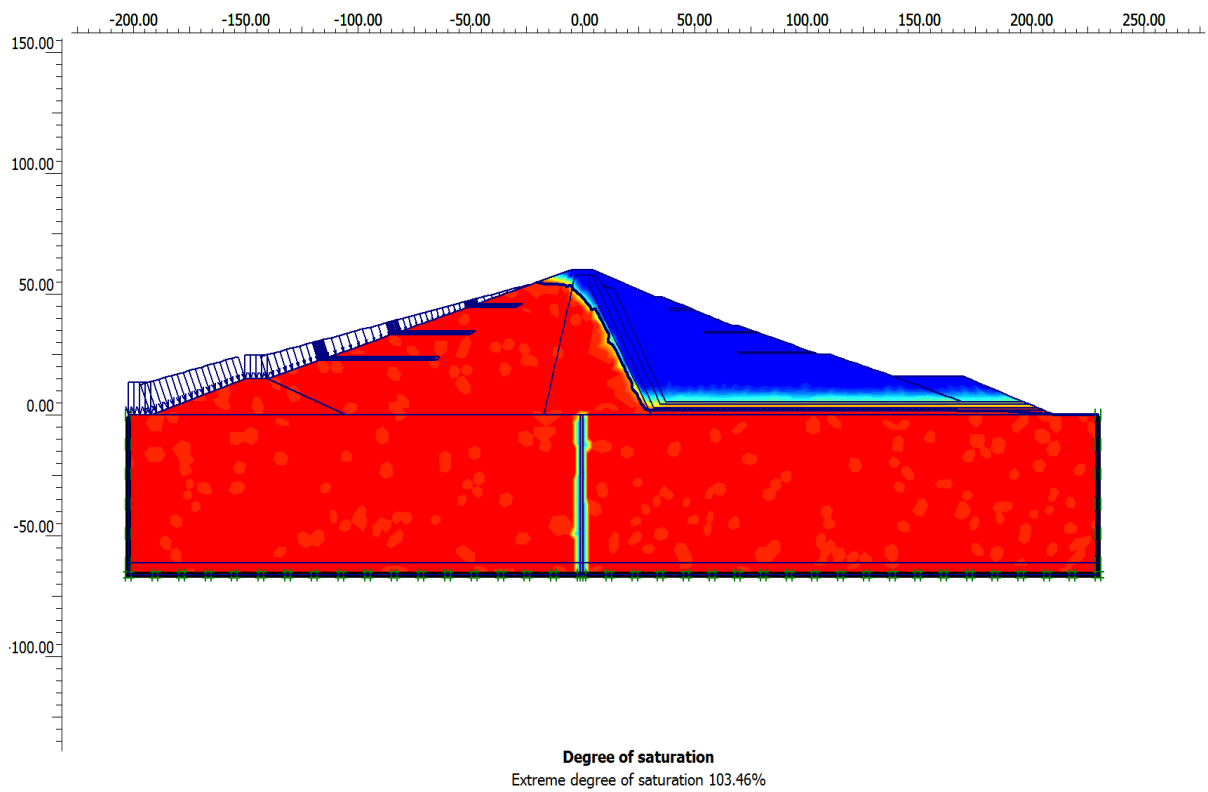
شکل ۴-۳۰، وضعیت کرنش برشی در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند



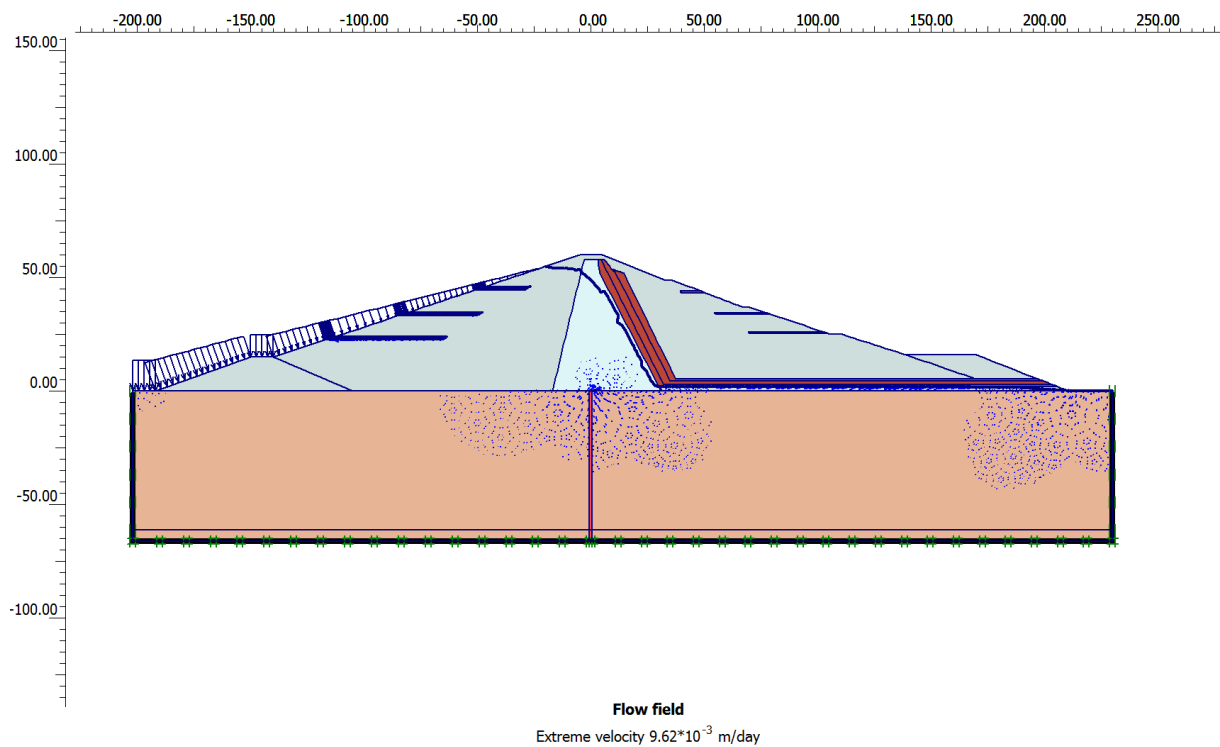
شکل ۴-۳۱، وضعیت فشار آب منفذی نهایی در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند



شکل ۴-۳۲، وضعیت هد فعال آب زیرزمینی در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند



شکل ۴-۳۳، وضعیت درجه اشباع شدگی طی آب‌گیری در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آب‌بند



شکل ۴-۳۴، وضعیت جریان سیال در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آب‌بند

همانند مدل‌های مکانیکی برای حالت قبل از اجرای سامانه آب‌بند، شکل‌های ۴-۳۱ تا ۴-۳۴، شامل فشار آب‌منفذی، هد آب زیر زمینی، درجه‌ی اشباع شدگی و جریان آب، نیز از مهم‌ترین و قابل بحث‌ترین قسمت مدل‌سازی و تحلیل نتایج هستند. با توجه به شکل ۴-۳۱ هر چه به بخش‌هایی که نفوذپذیری کم‌تری دارند نزدیکتر می‌شویم فشار منفذی بیشتر شده و در نهایت در نزدیکی دیواره پایین که غیر قابل نفوذ می‌باشد فشار منفذی به حداکثر مقدار خود رسیده است، در اینجا با حضور سامانه آب‌بند فشار منفذی در پشت دیوار آب‌بند افزایش یافته، و این به دلیل آن است که دیوار آب‌بند در پی باعث کاهش نفوذ پذیری شده و این کاهش نفوذ پذیری باعث افزایش فشار منفذی در بخش‌های پشت دیوار آب‌بند شده است. همچنین در شکل ۴-۳۲ خطوط هم‌پتانسیل مشاهده می‌شود که تمام نقاط روی این خطوط دارای هد برابر هستند. با توجه به شکل مشاهده می‌شود هد آب-زیرزمینی در بیشترین مقدار برابر با ارتفاع آب پشت سد یعنی ۶۰ متر است. همان‌طور که مشخص است در بالادست سد، بخشی که مخزن سد قرار دارد و آبگیری در آن انجام می‌شود هد آب نسبت پایین دست دست‌بیشتر است و به صورت منظم با حرکت به سمت بالادست سد هد آب نیز افزایش می‌یابد.

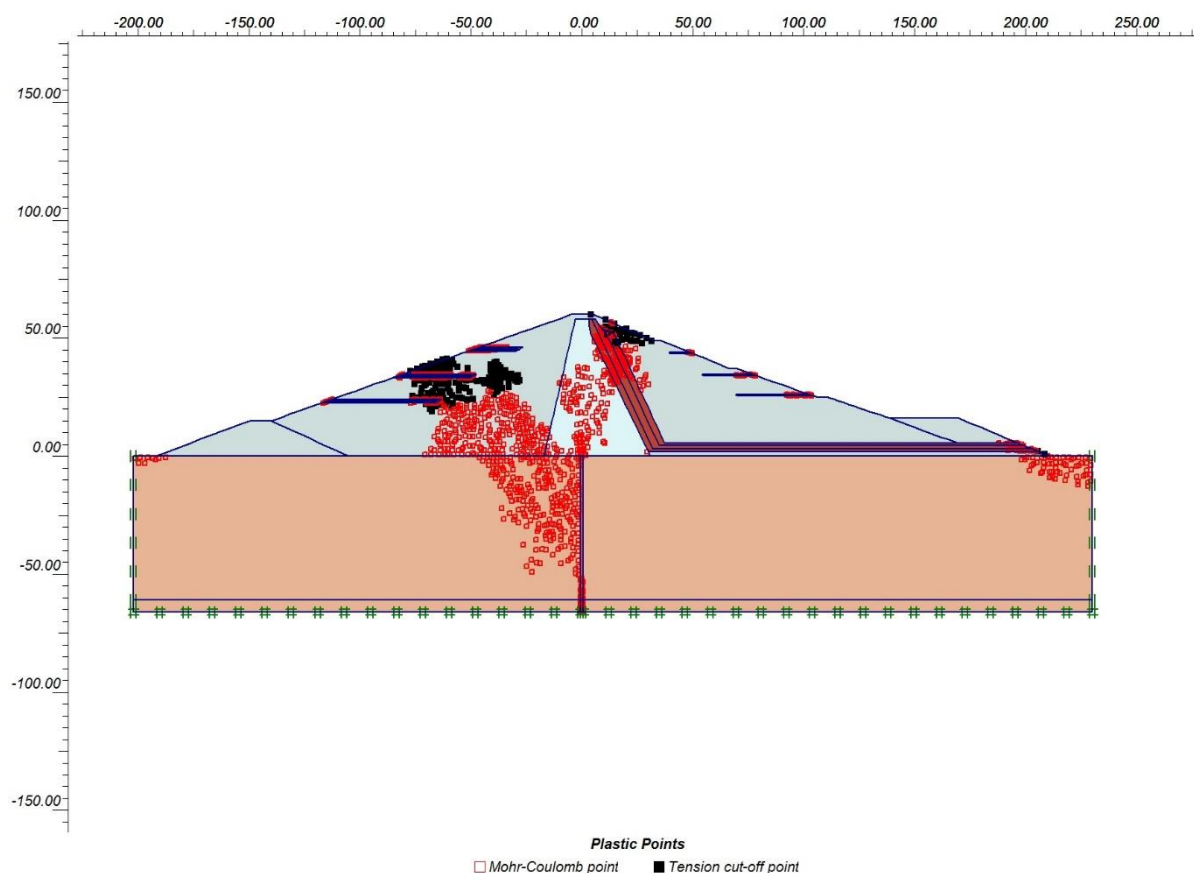
شکل ۴-۳۳ درجه اشباع شدگی طی آب‌گیری در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آب‌بند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در محدوده‌ای که سد آبگیری می‌شود درصد اشباع ۱۰۰ درصد است و هرچه به تاج سد نزدیک می‌شویم این درصد کمتر می‌شود. به بیان دیگر، درجه اشباع زیر سطح ایستابی ۱۰۰ درصد و تا وزن محدود بالای سطح ایستابی به صفر کاهش می‌یابد. هر چه حجم بیشتری از بدنه سد اشباع باشد احتمال خطر بیشتر است و برای پایداری بیشتر سد باید اقدامی انجام شو تا قسمت کمتری از بدنه سد اشباع باشد که احداث زهکش یک روش برای این اقدام است. بدین صورت که با ایجاد زهکش بالا ترین خط جریان^{۴۱} پایین‌تر قرار می‌گیرد و هر چه زهکش طول بیشتری داشته باشد بخش اشباع‌شده کمتر می‌شود. همچنین در اطراف دیوار آب‌بند تغییرات درجه

^{۴۱} Phreatic line

اشباع قابل مشاهده است. در نهایت در شکل ۴-۳۴ وضعیت جریان سیال در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با حضور دیوار آببند حداکثر سرعت کاهش چشم‌گیری داشته است و به مقدار $10^{-2} m/day * 9.62$ رسیده است.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده و مقایسه مدل‌ها در دو حالت قبل و بعد از اجرای سامانه آببند، مشاهده می‌شود مقادیر نشت کاهش چشم‌گیری داشته است که نشان‌دهنده عملکرد صحیح دیوار آببند پی سد نرماب است.

در شکل زیر وضعیت توزیع نقاط پلاستیک مشاهده می‌شود که تمرکز توزیع نقاط در محدوده هسته سد و در پشت دیوار آببند است.

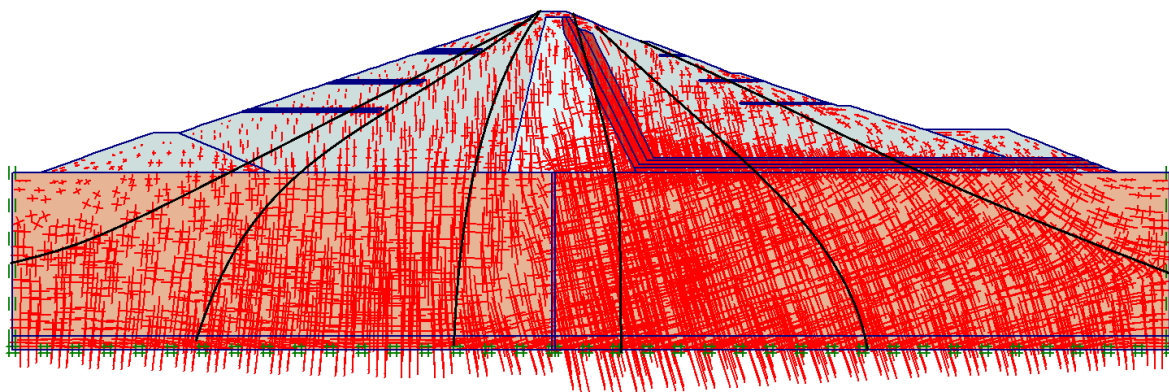


شکل ۴-۳۵، وضعیت توزیع نقاط پلاستیک در محدوده سد بعد از اجرای سامانه آببند

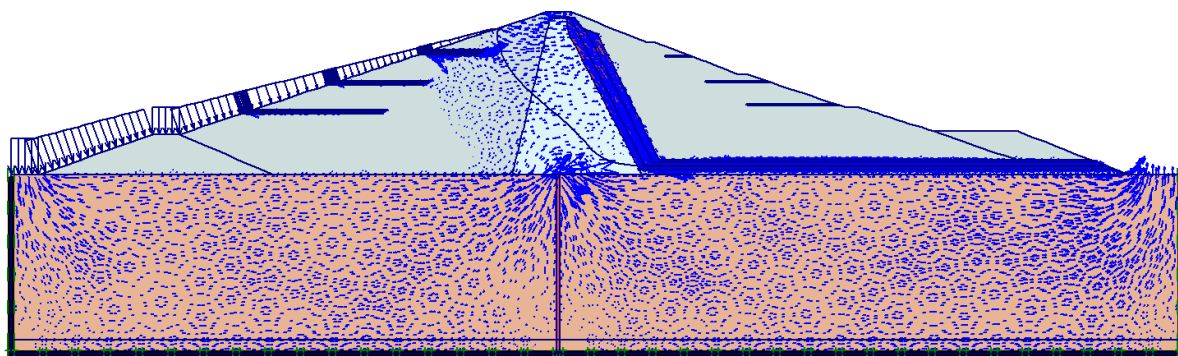
۴-۳-۳- تحلیل تراوش در بدنه و بستر سد

تحلیل تراوش در محدوده سد، نیازمند بررسی وضعیت جریان در محدوده سد و توزیع خطوط هم-پتانسیل و جریان است. خطوط جریان و هم-پتانسیل به صورت عمود بر هم هستند. تخمین وضعیت خطوط هم-پتانسیل در بدنه سد زمانی که دیوار آببند اجرا شده است، می‌تواند در برآورد موقعیت مکانی خطوط جریان بسیار موثر باشد. این مساله نیز بر روی برآورد وضعیت جریان در بدنه و بستر سد اثر دارد. شکل ۴-۳۶، وضعیت خطوط هم-پتانسیل برآورد شده برای محدوده سد بعد از اجرای دیوار آببند و شکل ۴-۳۷، وضعیت توزیع و جریان در محدوده سد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌شود، وجود دیوار آببند سبب شده که خطوط هم-پتانسیل موازی بر دیوار آب-بند بوده و جریان را به سمت هسته سد و پایین دست سد هدایت کنند. این مساله در شرایط میدانی نیز قابل مشاهده بوده و در طراحی‌های پایداری سد لحاظ می‌شود. این مساله نیز وضعیت قرارگیری خطوط هم-پتانسیل و عملکرد حرکت خطوط جریان را تصدیق نموده و کارامدی تحلیل را نشان می‌دهد. اگر نتایج حاصل از این وضعیت توزیع جریان در بدنه سد با وضعیت تنش برشی (که به صورت مستقیم باهم در ارتباط هستند) مجدداً باز آرایشی شود، وضعیت توزیع تنش برجا نهایی بعد از تغییر در وضعیت جریان در محدوده سد، به صورت شکل ۴-۳۸، خواهد بود. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، اجرای دیوار آببند سبب شده تا میزان تنش برشی برجا در محدوده بستر کاهش پیدا کرده و تمرکز اصلی آن به سمت بالادست و هسته سد باشد. همچنین تاثیر جریان خروجی از پایین دست سبب ایجاد اضافه فشار آب منفذی در بخش پایین دست سد شده و این نیز به نوبه خود بر روی افزایش تنش برشی در این محدوده تاثیر گذاشته است. تغییر جریان در محدوده دیوار آببند سبب شده که در بخش بالادست سد و بخش مخزنی دیوار آببند، افت تنش برشی مشاهده شود. این مساله نیز بر عملکرد صحیح دیوار آببند تاکید دارد. به‌طوریکه وضعیت جریان در محور دیوار آببند

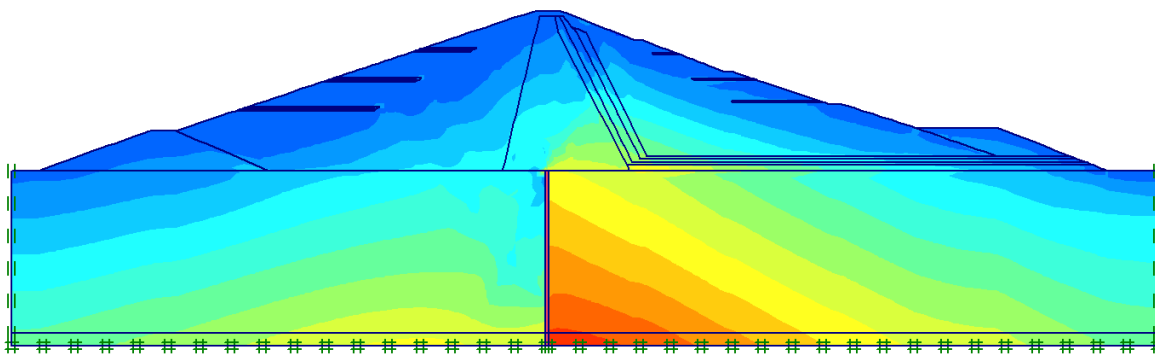
به صورت دورشونده است. از سوی دیگر جریان رو بالا در محدوده سد عامل ایجاد اتساع در خاک بوده و نیازمند انجام عملیات صحیح تحکیمی در بستر سد و یا به سازی در محدوده گالری ها است که بتواند به صورت قابل توجهی فشار آب را در محدوده کناری و زیرین سد مهار نماید.



شکل ۴-۳۶، وضعیت توزیع خطوط هم پتانسیل در محدوده سد و دیوار آب بند



شکل ۴-۳۷، وضعیت کنتره های حرکت جریان در محدوده سد و دیوار آب بند

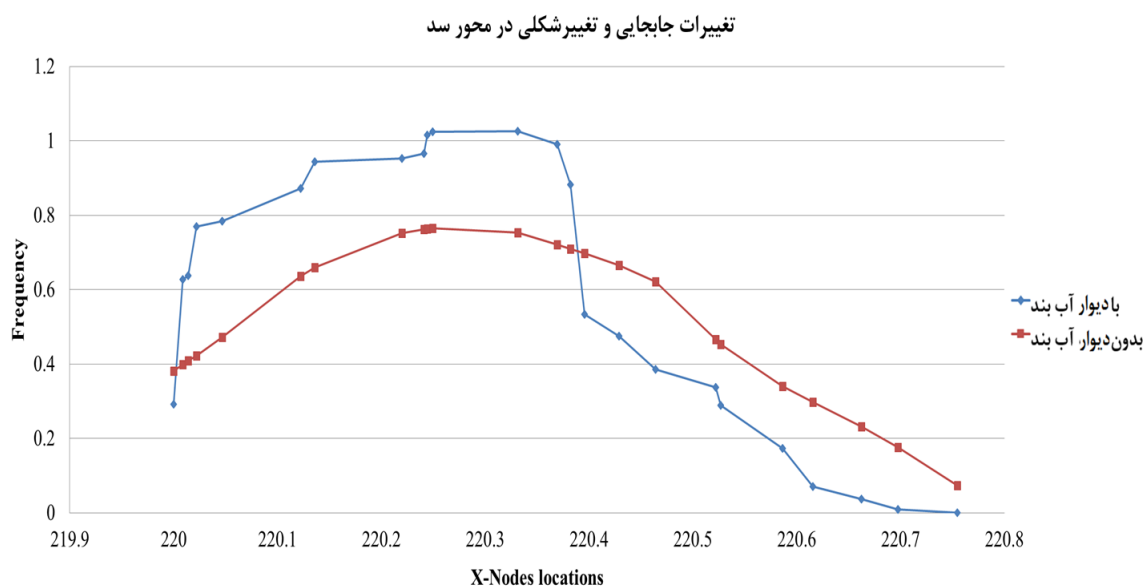


شکل ۴-۳۸، وضعیت توزیع تنش برشی نهایی بعد از لحاظ نمودن جریان انتقالی در محدوده سد و دیوار آببند

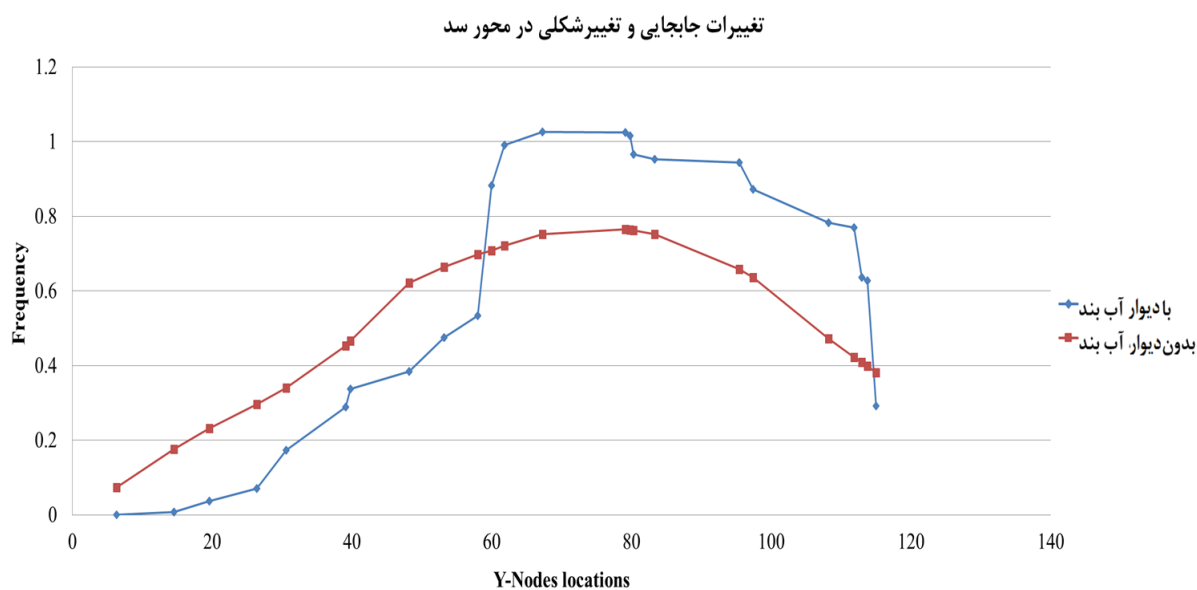
۴-۳-۴- بررسی عملکرد دیوار آببند با مقایسه مدل‌ها در دو حالت قبل و بعد از اجرای

سامانه آببند

در تحلیل آبگذری و طراحی دیوار آببند، عمده مساله پیش روی تحلیل، تغییرشکل‌های مبتنی بر تنش- کرنش، میدان تنش و میزان تغییرات فشار آب منفذی موثر است. در این راستا این تغییرات برای هر دو حالت قبل و بعد از اجرای دیوار آببند در محدوده هسته مورد ارزیابی قرار گرفته که در اشکال ۴-۳۹ تا ۴-۴۱، آورده شده است. همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌شود، زمانی که دیوار آببند اجرا نشده، این عوامل تغییرات محدودی در محدوده هسته سد داشته‌اند که با اجرای دیوار آببند این تغییرات گسترده‌تر شده است. این مساله بیانگر حرکت و تاثیر جریان حاصل از اجرای دیوار آببند در محدوده هسته سد است. اما افت تنش در محدوده سد شکل ۴-۴۱، نشان دهنده عملکرد زهکش‌ها در راستای کاهش فشار آب منفذی است. از سوی دیگر، گسترش کرنش در محدوده هسته نشان دهنده رفتار پلاستیک هسته ریزدانه است که حاصل از تنش برجا و فشار آب منفذی در آن است.



(الف)

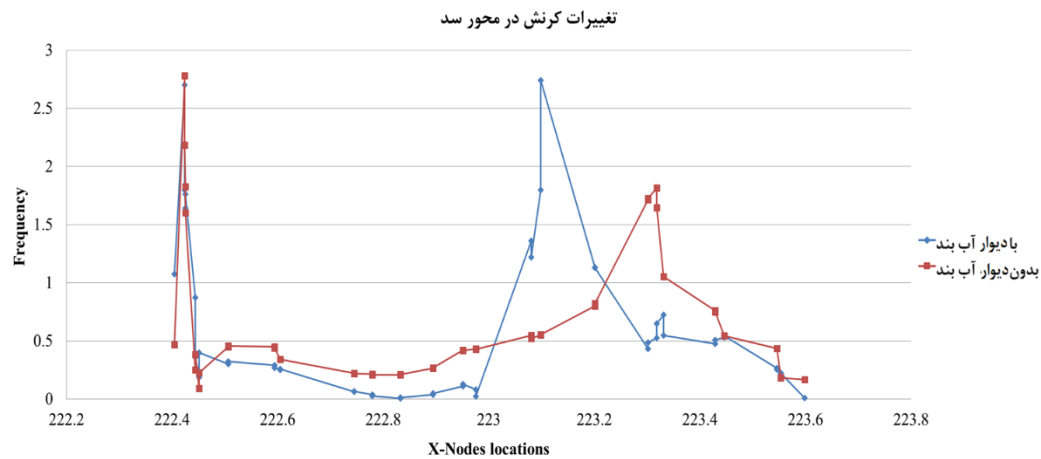


(ب)

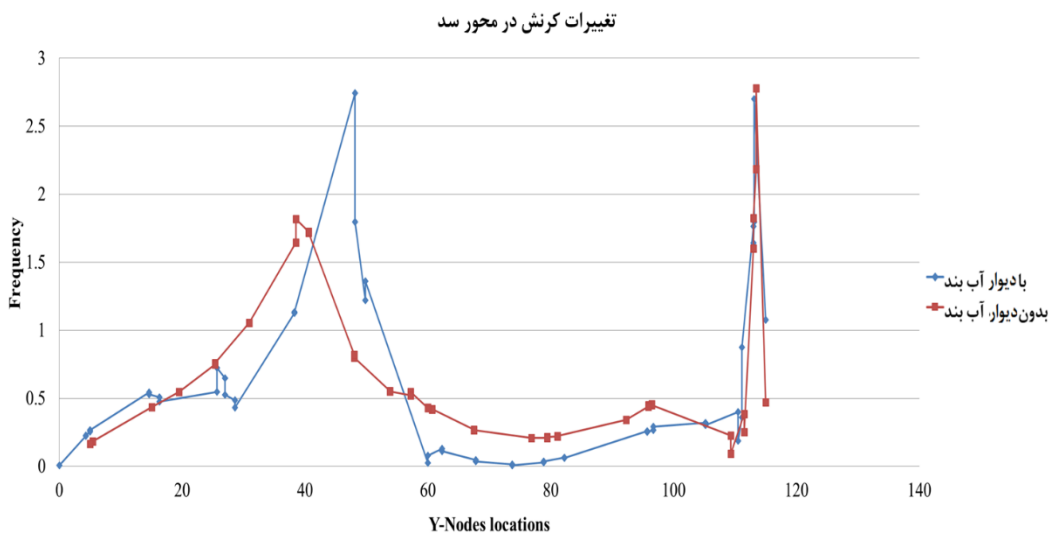
شکل ۴-۳۹، وضعیت جابجایی در محدوده هسته سد: (الف) محور X و (ب) محور Y

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، در شکل (الف) و (ب) نمودار تغییرات جابه‌جایی در محور سد در دو حالت با دیوار آب‌بند و بدون دیوار آب‌بند، که در آن محور افقی نمودار موقعیت طولی (الف) و عرضی (ب) نقاط در هسته سد، و محور قائم نمودار جابه‌جایی را نشان می‌دهد که تفاوت تغییر شکل‌ها با دیوار آب‌بند و بدون دیوار آب‌بند در طول هسته سد و عرض آن که برابر با ارتفاع سد از پی

تا تاج سد است، مشهود است. همان‌طور که در نمودار مشخص است جابه‌جایی افقی در مخزن سد و جابه‌جایی قائم در تاج سد بیشترین مقدار را دارد و تغییرات جابه‌جایی با و بدون دیوار آب‌بند نیز قابل مشاهده است.



(الف)

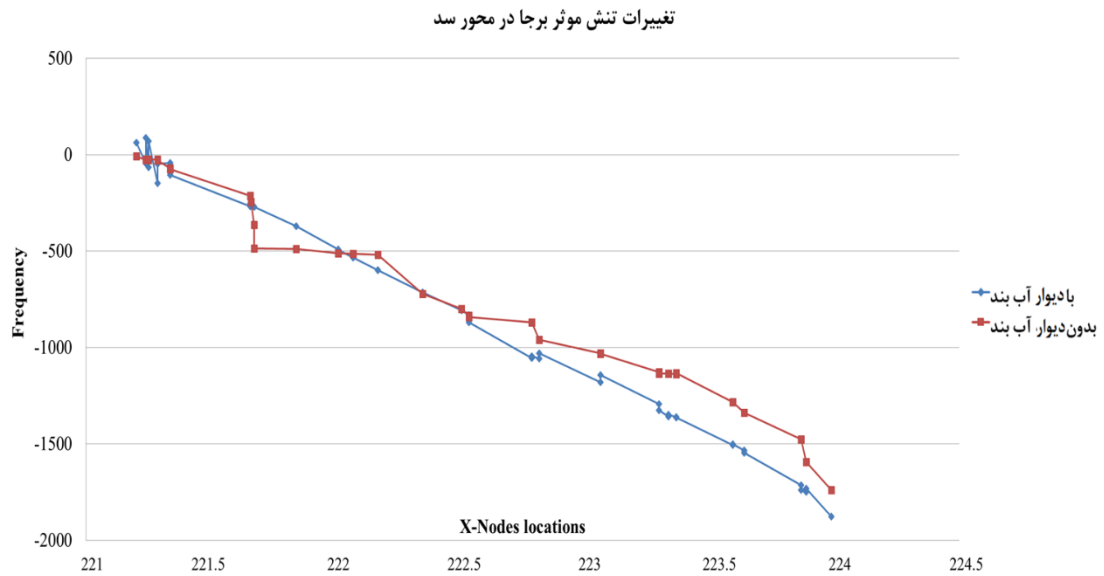


(ب)

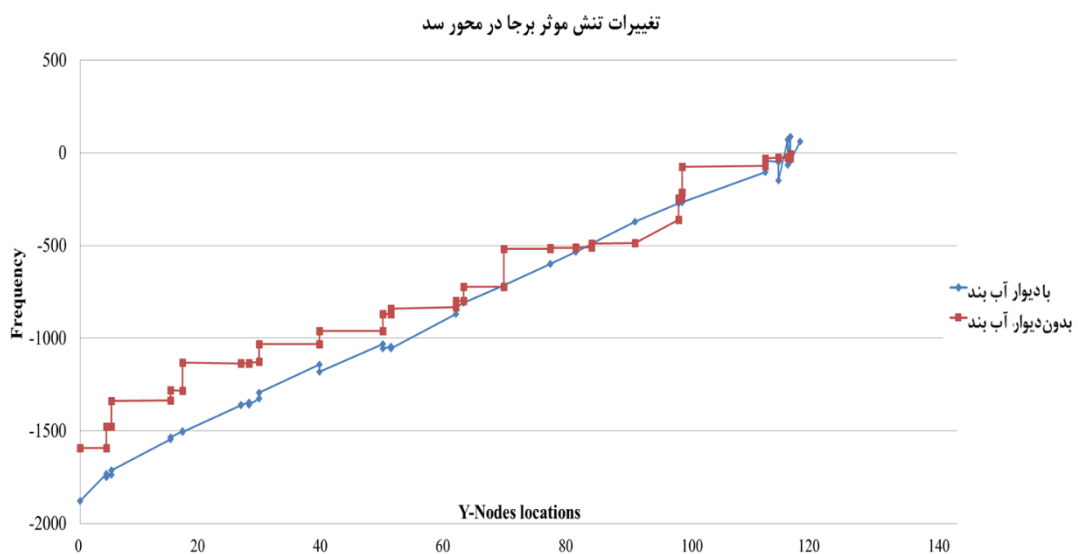
شکل ۴-۴۰، وضعیت کرنش در محدوده هسته سد: (الف) محور X و (ب) محور Y

در شکل ۴-۴۰ وضعیت کرنش در دو بخش طولی (الف) و عرضی (ب) محدوده هسته سد را نشان می‌دهد که در آن محور افقی موقعیت نقاط و محور قائم کرنش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات کرنش در حالتی که دیوار آب‌بند وجود دارد و در حالتی که دیوار آب‌بند

وجود ندارد متفاوت است و تغییرات در حالتی که دیوار آب‌بند وجود دارد در بخش‌های تاج سد نسبت به حالتی که دیوار آب‌بند وجود ندارد کم‌تر است و این نشان‌دهنده عملکرد مناسب دیوار آب‌بند است.



(الف)

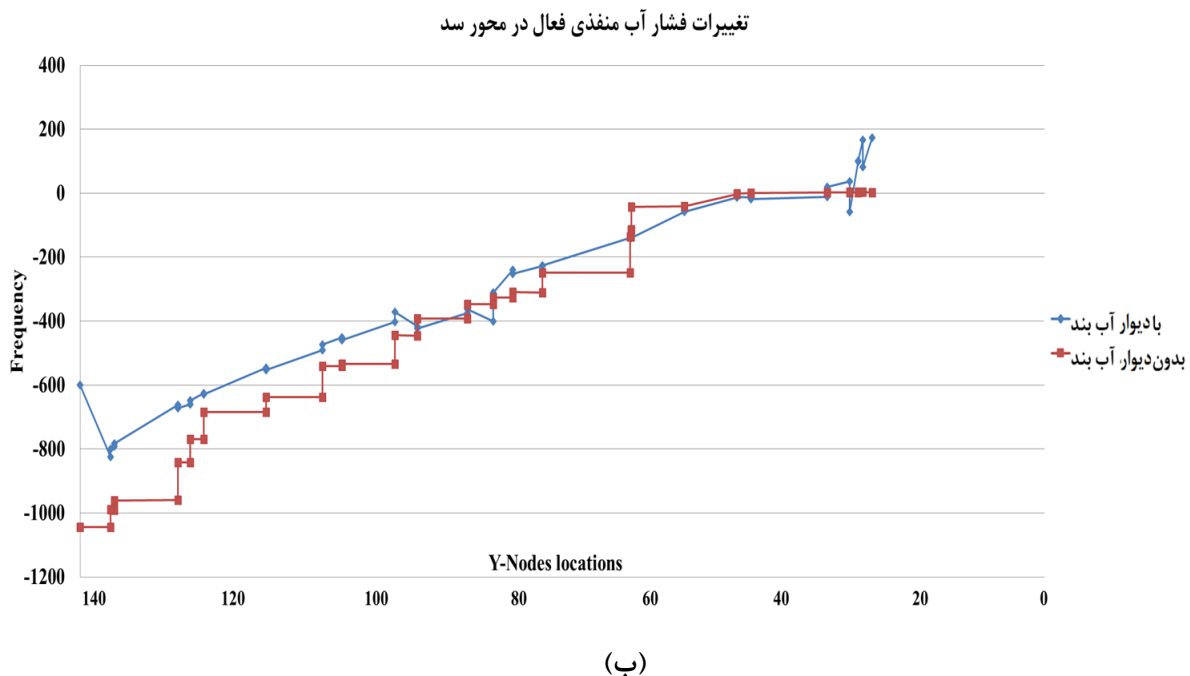
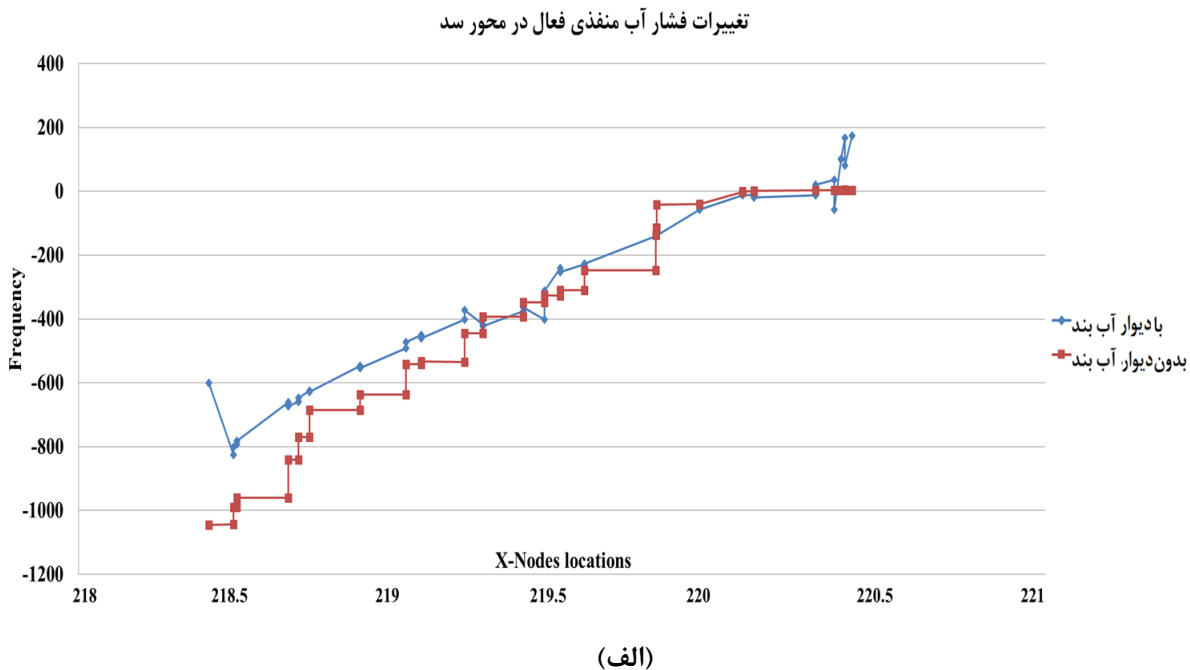


(ب)

شکل ۴-۴۱. وضعیت تنش در محدوده هسته سد: (الف) محور X و (ب) محور Y

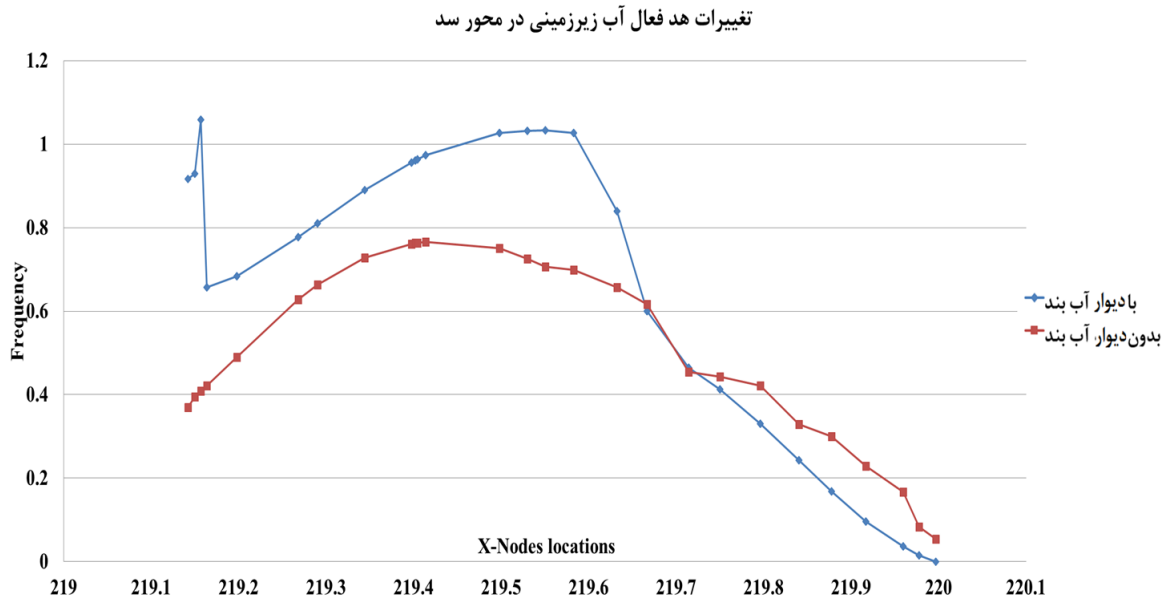
در شکل ۴-۴۱ تغییرات تنش موثر در دو محور طولی و عرضی در هسته سد نشان داده شده است. با توجه به نمودار، تنش در حالتی که دیوار آب‌بند وجود دارد در هر دو محور طولی و عرضی هسته

نسب به حالتی که دیوار آب‌بند وجود ندارد کم‌تر است و هرچه تنش کم‌تر باشد تغییر شکل کم‌تر است و این نیز نشان‌دهنده عملکرد صحیح دیوار آب‌بند است.

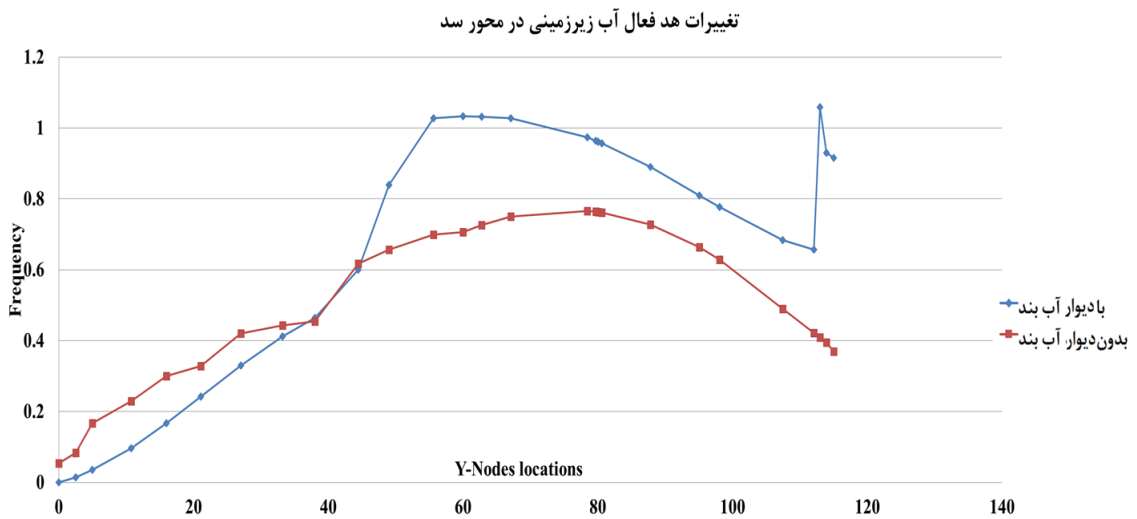


شکل ۴-۴۲، وضعیت فشار آب منفذی فعال در محدوده هسته سد: (الف) محور X و (ب) محور Y
 شکل ۴-۴۲ نیز نشان‌دهنده تغییرات فشار آب‌منفذی در دو محور طولی و عرضی هسته سد را نشان می‌دهد. که با توجه به نمودار در حالتی که دیوار آب‌بند وجود دارد، فشار منفذی در پشت دیوار آب-

بند یعنی در مخزن سد بیشتر است، چون هر چه نفوذ پذیری کم تر باشد، فشار منفذی در آن ناحیه بیش تر می شود، که این افزایش فشار نشان دهنده نفوذپذیری کم دیوار آب بند و عملکرد صحیح آن است.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۴۳، وضعیت هد فعال آب زیرزمینی در محدوده هسته سد: (الف) محور X و (ب) محور Y

در شکل ۴-۴۳، تغییرات هد آب زیرزمینی در دو محور طولی و عرضی محدوده هسته سد، نشان داده شده است. باتوجه به نمودار هد آب در بالا دست سد دارای بیشترین مقدار خود است.

۴-۳-۵- ابزار دقیق سد نرماب

با در نظر گرفتن شرایط پی و دیگر عوامل، برای ابزار بندی سد نرماب هفت مقطع عرضی در نظر گرفته شده است (جدول ۴-۳) که در بستر رودخانه قرار دارند (مقاطع عرضی شماره ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۹، ۲۲).

هدف از ابزار بندی و رفتارسنجی سد عبارتند از:

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

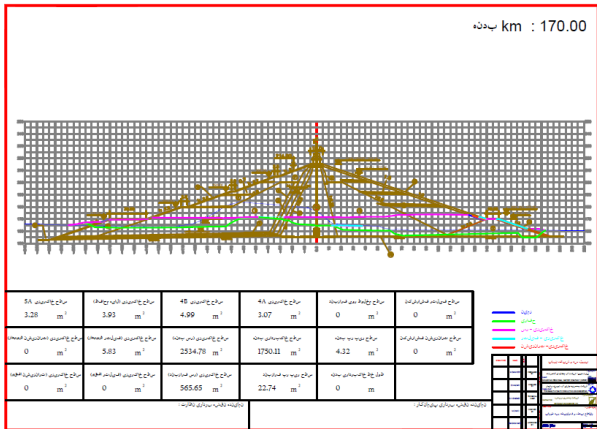
- پیش بینی و تشخیص پدیده های مخرب حین بهره برداری از سد

- کنترل و جلوگیری از رشد پدیده های مخرب

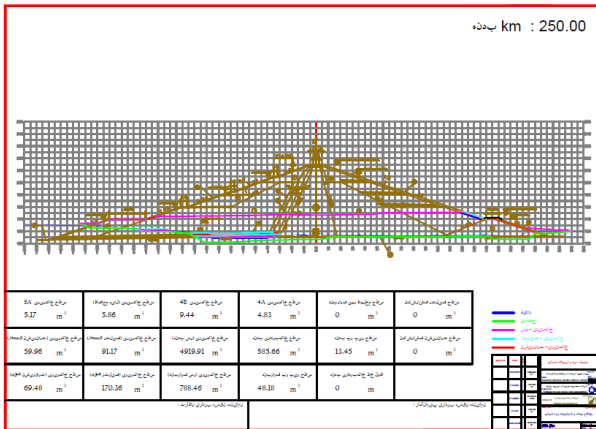
در شکل ۴-۴۴ مقاطع عرضی بدنه سد مشاهده می شود.

جدول ۳-۴، تعداد و انواع ابزار نصب شده در ترازهای مختلف در سد تا پایان آذر ۱۳۹۶، [شرکت مهندسی توسعه آب تابان]

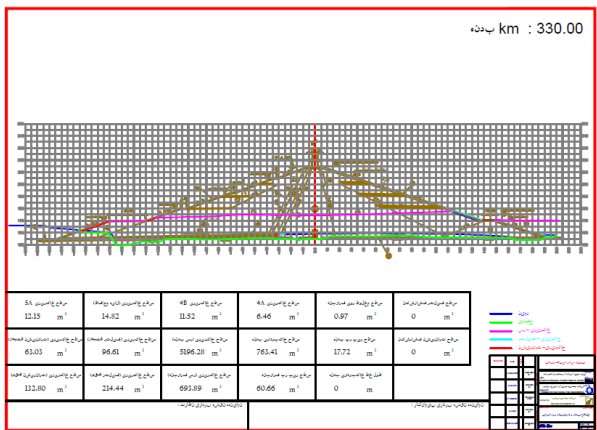
تعداد ابزار دقیق نصب شده تا پایان ۹۶/۰۹/۳۰ (تجمعی)																							
ردیف	نوع دستگاه	مقطع ۷-۷			مقطع ۱۱-۱۱			مقطع ۱۳-۱۳			مقطع ۱۵-۱۵			مقطع ۱۷-۱۷			مقطع ۱۹-۱۹			مقطع ۲۲-۲۲			
		تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	تراز	تعداد نصب شده	تعداد کل	
۱	پیزومتر الکتریکی سنگ (RP)	۱۵۵	۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
۲	پیزومتر الکتریکی خاک (EP)	۱۸۵	۳	۱۷۰	۱۸۵	۳	۱۷۰	۱۸۵	۳	۱۷۰	۱۸۵	۳	۱۷۰	۱۸۵	۳	۱۷۰	۱۸۵	۳	۱۷۰	۱۸۵	۳	۱۷۰	
۴	پیزومتر لوله قائم (SP)	۱۵۵	۲	۱۴۰	۱۵۵	۳	۱۴۰	۱۵۵	۴	۱۴۰	۱۵۵	۴	۱۴۰	۱۵۶	۴	۱۴۰	۱۵۶	۴	۱۴۰	۱۵۶	۴	۱۴۰	
۵	انحراف اتساع سطح (IS)	-	-	-	۱۲۵/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۶	نقشه برداری (SR)	۲۱۵	۲	۱۹۳	۲۱۵	۲	۱۹۳	۲۱۵	۲	۱۹۳	۲۱۵	۲	۱۹۳	۲۱۵	۲	۱۹۳	۲۱۵	۲	۱۹۳	۲۱۵	۲	۱۹۳	
۷	سطح فشار کل (TPC)	-	-	-	۲۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۸	چاه مشاهده ای (OW)	تکیه گاه راست						تکیه گاه چپ															
		OW-۶	OW-۵	OW-۴	OW-۳	OW-۲	OW-۱	OW-۱۲	OW-۱۱	OW-۱۰	OW-۹	OW-۸	OW-۷										
		L:۱۳۶.۲۲	L:۱۴۶.۱۸	L:۱۴۲.۰۰	L:۱۴۷.۷۵	L:۱۵۲.۹۲	L:۱۵۷.۳۳	L:۱۴۷.۵۰	L:۱۴۷.۹۰	تصیب نشده	تصیب نشده	تصیب نشده	تصیب نشده	L:۱۶۵.۳۹									
	مجموع	۷	۲۲	۲۷	۳۱	۲۴	۲۸	۱۷	۱۷۵	۲۴۳													



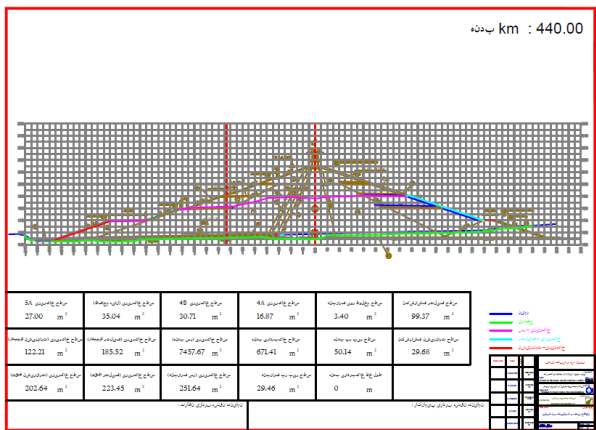
SEC : 7-7
km : 165.40



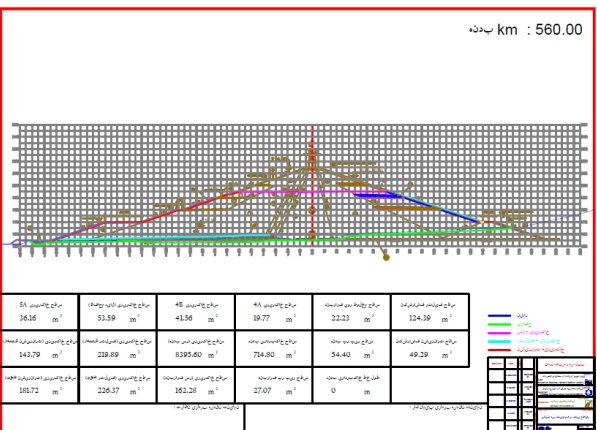
SEC : 11-11
km : 249.60



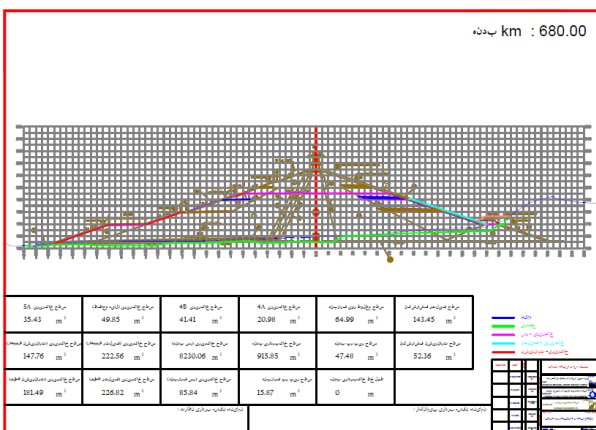
SEC : 13-13
km : 326.45



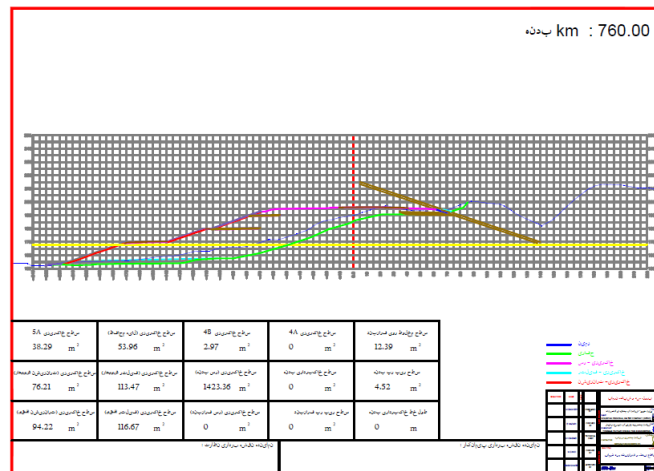
SEC : 15-15
km : 436.40



SEC : 17-17
km : 556.70



SEC : 19-19
km : 676.80



SEC : 22-22
km : 756.70

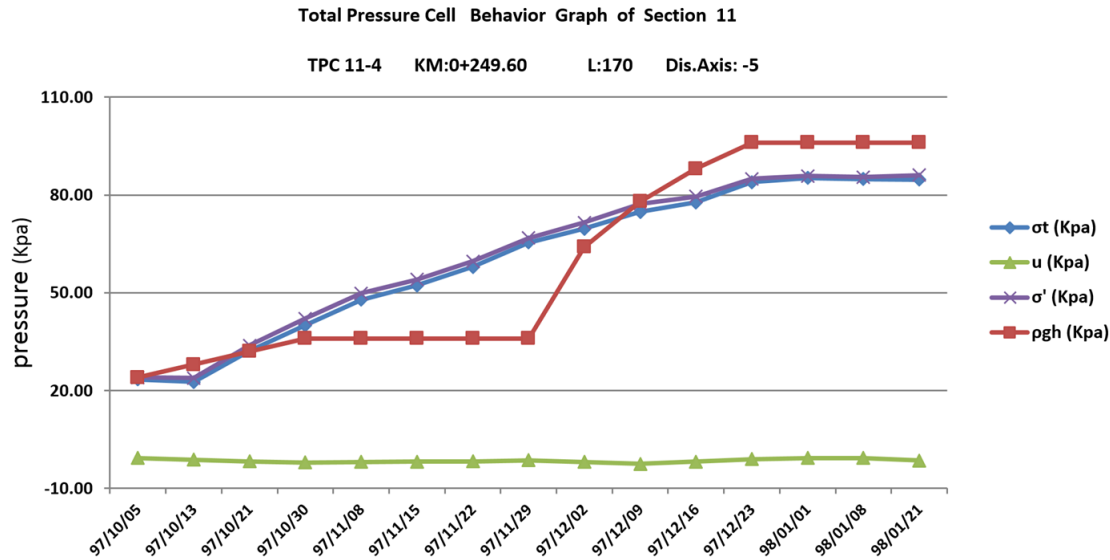
شکل ۴-۴۴، مقاطع عرضی بدنه سد [مهندسين مشاور آب و توسعه پايدار]

به منظور به دست آوردن و ثبت سوابق کامل کلیه جنبه‌های کارکرد سد ضروری است، دستگاه‌های تعبیه شده در بدنه و پی سد طی برنامه منظمی قرائت شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. تناوب قرائت ابزار باید حداقل معادل جدول شماره ۴-۴ باشد.

جدول ۴-۴، تناوب حداقل قرائت‌های ابزار

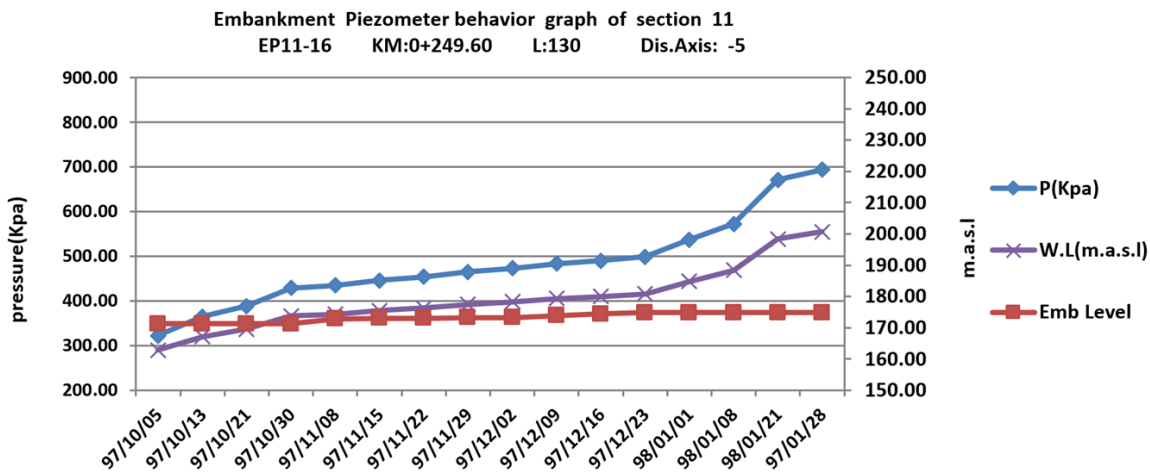
ضمن بهره برداری		حین ساخت	نوع وسیله
سالهای بعد	سال نخست		
ماهانه	هفتگی	هفتگی	پیزومترهای الکتریکی
ماهانه	ماهانه	پس از نصب هر هفته	پیزومترهای لوله قائم
سالی دو بار	چهار بار	پس از نصب در کل طول لوله و ماهانه	انحراف سنجه‌ها
دائمی و بر حسب شرائط جوی	دائمی و بر حسب شرائط جوی	پس از نصب به طور دائم	ایستگاه هواشناسی
دائمی	نصب قبل از ابگیری و به طور دائمی	-	ایستگاه سنجش سطح آب
ماهانه	ماهانه	ماهانه	شتاب نگار

برخی از نتایج تجزیه و تحلیل شده از برداشت‌های ابزار دقیق (برای مثال در مقطع شماره ۱۱) در شکل های ۴-۴۵ تا ۴-۴۷، آورده شده‌است.



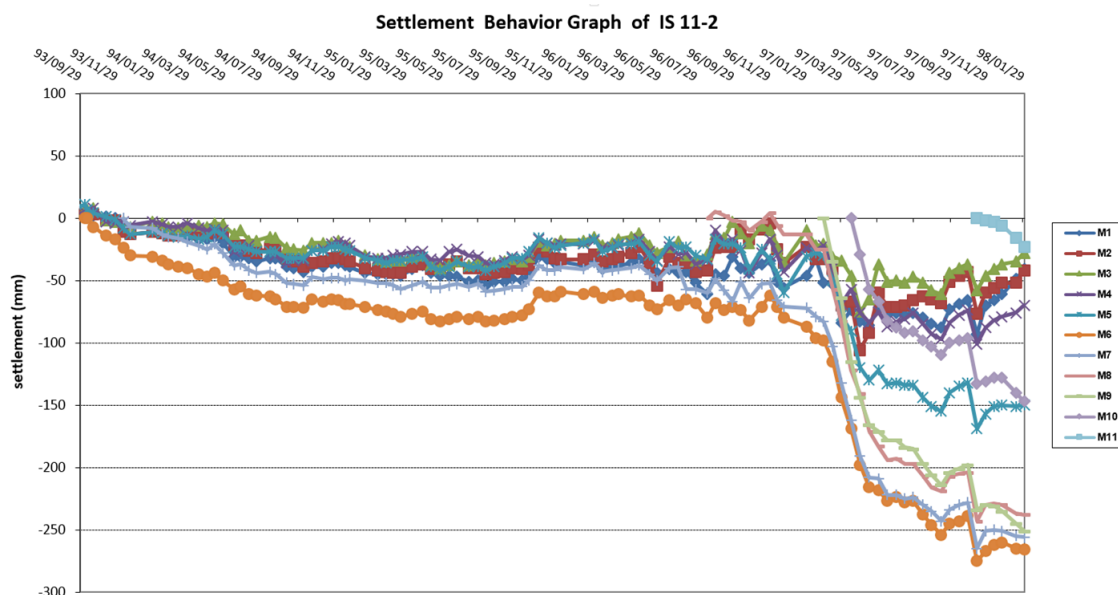
شکل ۴-۴۵، پایش‌های سلول فشار در مقطع عرضی شماره ۱۱

در شکل بالا نمونه‌ای از پایش‌های ابزار سلول فشار در مقطع شماره ۱۱ مشاهده می‌شود. در این نمودار نقاط آبی‌رنگ نشان دهنده تنش کل، نقاط سبز رنگ فشار آب منفذی، نقاط بنفش رنگ تنش موثر و نقاط قرمز فشار آب است، که در بازه‌ی زمانی مشخص توسط ابزار سلول فشار پایش شده است.



شکل ۴-۴۶، پایش‌های پیزومتر الکتریکی خاک در مقطع عرضی شماره ۱۱

در شکل بالا نمونه‌ای از پایش‌های پیزومتر الکتریکی خاک در مقطع عرضی شماره ۱۱، در بازه‌ی زمانی مشخص، نشان داده شده‌است. محور سمت چپ، فشار و محور سمت راست، ارتفاع از سطح دریا را نشان می‌دهد.



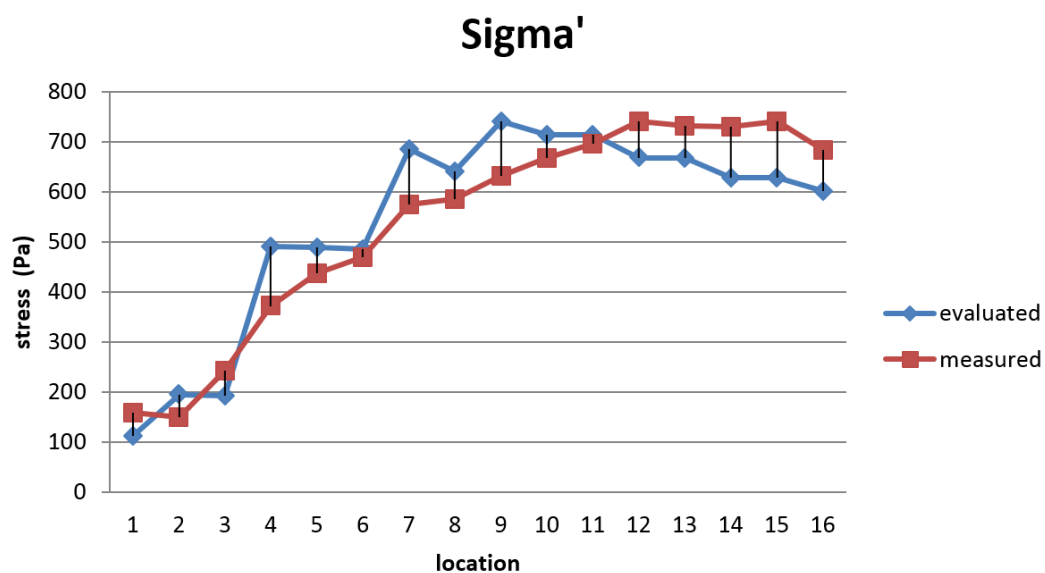
شکل ۴-۴۷، پایش‌های نشست‌سنج در مقطع عرضی شماره ۱۱

شکل ۴-۴۷، نیز پایش‌های نشست‌سنج را در مقطع عرضی شماره ۱۱، در بازه زمانی مشخص، نشان می‌دهد.

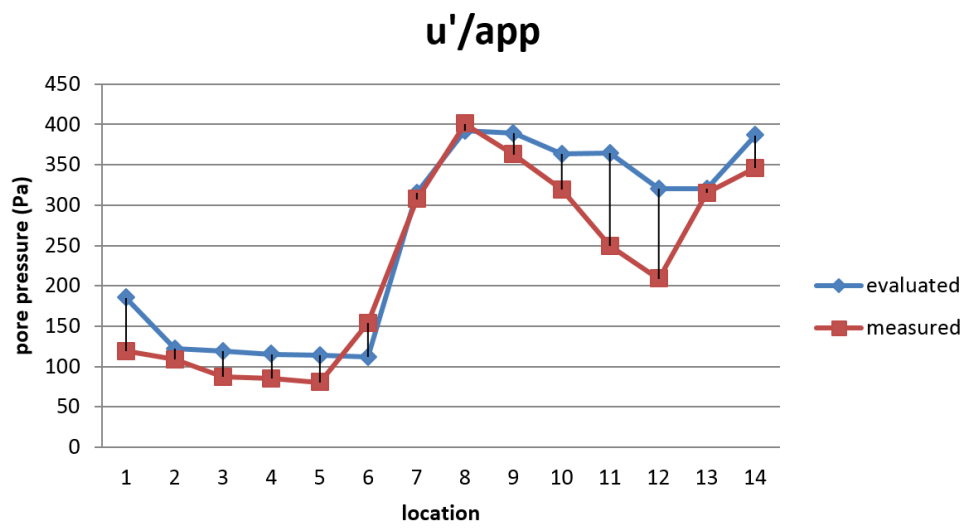
۴-۳-۶- صحت سنجی و کالیبراسیون داده‌ها

به منظور ارزیابی نتایج برآورد شده در شبیه‌سازی عددی، اقدام به کالیبراسیون داده‌ها و ارزیابی مقایسه‌ای پارامترهای اصلی تحلیل با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مربوط به ابزار دقیق اجرا شده در محدوده سد نرماب شده است. از بین قرائت‌های ابزار دقیق شامل، نشست‌سنج، پیزومترها، سلول فشار و انحراف‌سنج‌ها که شامل تعداد بسیار زیادی داده است، دو پارامتر اصلی تنش و فشار آب منفذی که در این مطالعه نقش اساسی دارند انتخاب شده و در محدوده موقعیت بخش پایینی هسته سد (موقعیت

قرارگیری ابزار دقیق ثبت کننده تنش-کرنش) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا نتایج برآورد شده تنش و مقدار فشار آب منفذی استخراج شده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط عملیات ابزاربندی با نتایج حاصل از اطلاعات شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار به صورت مقایسه‌ای ترسیم و روند تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از ارزیابی مقایسه‌ای در اشکال ۴-۴۸ و ۴-۴۹، ارائه شده است. همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از عملیات صحت‌سنجی با روند تغییرات اندازه‌گیری شده با مدل مشابهت دارد. وجود مقداری تفاوت در اشکال عموماً به دلیل شرایط زمین‌شناسی متفاوت، عملکرد دیوار آب‌بند، وجود مناطق رسی و گسله و غیره است که معمولاً در شبیه‌سازی مد نظر قرار نمی‌گیرد.



شکل ۴-۴۸، وضعیت صحت‌سنجی میدان تنش در محدود هسته سد



شکل ۴-۴۹، وضعیت صحت سنجی فشار آب منفذی در محدود هسته سد

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۵-۱- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمون‌های ژئوتکنیکی (صحرایی و آزمایشگاهی) و همچنین با توجه به بررسی‌های میدانی ساختگاه سد و انجام تحلیل‌های عددی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Plaxis می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- با توجه به تحلیل‌های نشت انجام شده با استفاده از نرم‌افزار Plaxis، میزان آبگذری از پی سد نرماب بدون استفاده از سیستم آب‌بندی در مقایسه با استفاده از سامانه دیوار آب‌بند تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد که این امر سبب توجه ویژه به طراحی، پایش حین اجرا و همچنین در زمان بهره‌برداری از دیوار آب‌بند، می‌شود.
- با توجه به گستردگی پی و همچنین نزدیکی خصوصیات مصالح با یکدیگر، طراحی سد به صورت سد همگن خاکی عملکرد خوبی نشان داده که با اجرای دیوار آب‌بند سبب افزایش کرنش‌ها در بدنه سد شده است. این مساله بر روی پایداری سد تاثیر نداشته و سد استحکام خوبی را در مهار گسترش ناحیه پلاستیک از خود نشان داده است.
- به‌طور کلی نتایج تحلیل‌ها، رفتار مناسب سازه سد را در برابر شرایط مختلف بارگذاری تایید می‌نماید. تغییر مکان‌ها، تنش‌ها و فشار آب‌های منفذی در حد قابل قبول بوده و تحلیل تراوش انجام شده با نرم افزار Plaxis نشان دهنده پیوستگی در جریان پایدار و توزیع خطوط جریان و هم‌پتانسیل به صورت منطقی است. به لحاظ پایداری سد که به صورت جانبی برآورد شده نیز مشخص شده که سد دارای توان‌مندی در مهار تغییر شکل‌ها است با این حال تغییرات میدان تنش-کرنش و جابه‌جایی‌های نشان دهنده امکان رخداد گسیختگی در پایین دست پوسته سد است که نیازمند بررسی دقیق‌تری است.
- تحلیل تنش مؤثر نشان می‌دهد که روند اجرای دیوار آب‌بند به صورت پایین به بالا در طراحی سد با موفقیت اجرا شده و عملکرد آن نیز با کاهش تنش عمقی و هدایت جریان به محدوده

سد تایید می‌شود. این مساله نشان دهنده کاهش نفوذپذیری رسوبات توسط دیوار آب‌بند است.

- نتایج تحلیل تراوش نشان می‌دهد زمانی که دیوار آب‌بند اجرا نشده، تغییرشکل‌های حاصل از تنش، کرنش و فشار آب منفذی عامل رخداد تغییرات در محدوده سد و گسترش آن در رسوبات پی است ولی با اجرای دیوار آب‌بند این تغییرات محدودتر شده است. از طرفی این مساله سبب تمرکز تنش در بالادست سد شده که بیانگر حرکت و تاثیر جریان حاصل از اجرای دیوار آب‌بند در محدوده سد است. اما افت تنش در محدوده هسته سد نشان دهنده فعالیت زهکش‌ها در راستای رفع فشار آب منفذی است. از سوی دیگر، گسترش کرنش در محدوده هسته سد نشان دهنده پدیده رفتار پلاستیک هسته و پایین‌دست است که حاصل از تنش برجا و فشار آب‌منفذی در آن است.

- وجود دیوار آب‌بند سبب شده که خطوط هم‌پتانسیل موازی و خطوط جریان عمود بر دیوار آب‌بند عمل کرده و جریان را به سمت هسته سد هدایت کنند. این مساله در شرایط میدانی نیز قابل مشاهده بوده و در طراحی‌های پایداری سد لحاظ می‌شود. همچنین باتوجه به وضعیت جریان در هسته سد و پایین دست بدنه تمرکز دارد. این مساله نیز وضعیت قرارگیری خطوط هم‌پتانسیل را در مدل‌سازی توجیه کرده و کارآمدی تحلیل را نشان می‌دهد.

- نتایج تحلیل تراوش نشان می‌دهند که اجرای دیوار آب‌بند سبب شده که میزان تنش برشی برجا در محدوده بستر کاهش پیدا کرده و تمرکز اصلی آن به سمت بالادست و هسته سد باشد. همچنین تاثیر جریان خروجی از پایین دست سبب ایجاد اضافه فشار آب منفذی در بخش پایین دست سد شده و این نیز به نوبه خود بر روی افزایش تنش برشی در این محدوده تاثیر گذاشته است. همچنین تغییر جریان در محدوده دیوار آب‌بند سبب گردیده که در بخش بالادست سد و بخش مخزنی دیوار آب‌بند، افت تنش برشی مشاهده و برآورد شود. این

مساله نیز بر عملکرد صحیح دیوار آب‌بند تاکید دارد. بطوری که وضعیت جریان در محور دیوار آب‌بند به صورت دورشونده است.

- با انجام صحت سنجی داده‌های مربوط به نتایج برآورد شده برای پارامترهای میدان تنش و فشار آب منفذی در محدوده هسته سد با نتایج ابزار دقیق اجرا شده در این محدوده مشخص شده است که عملیات شبیه‌سازی به درستی صورت گرفته زیرا که تغییرات این پارامترها دارای روندی مشابه هستند. وجود مقداری تفاوت در نمودارها عموماً به دلیل شرایط زمین-شناسی متفاوت، عملکرد دیوار آب‌بند، وجود زون‌های رسی و گسله، لنزهای مدفون و... است که معمولاً در شبیه‌سازی مد نظر قرار نمی‌گیرد.

۵-۲- پیشنهادها

با توجه به اینکه تحلیل‌های ساختگاهی از جمله مهم‌ترین مباحث مطرح در زمینه طراحی و مدیریت سدهای خاکی همگن با هسته رسی هستند، با در نظر گرفتن روند پیاده‌سازی شده در این تحقیق موارد زیر به عنوان مواردی که نیازمند انجام تحلیل‌ها و ارزیابی‌های دقیق‌تر دارد، برای محدوده سد پیشنهاد می‌شود:

- باتوجه به مشاهده تغییرات پلاستیک و گسترش نقاط پلاستیک در محدوده سد (هسته و بدنه) بعد از اجرای دیوار آب‌بند، تحلیل ساختاری سازه سد برای گسیختگی دامنه‌ای به-خصوص در پایین دست پیشنهاد می‌شود.
- با در نظر گرفتن وضعیت جریان در محدوده سد پیشنهاد می‌شود با به کارگیری رویکردهای زمین‌شناسی مهندسی و ژئوفیزیکی پروفیل دقیق محدوده سد و بستر آن تهیه شود. این پروفیل امکان تحلیل تغییرات پی را برای محدوده سد فراهم می‌نماید.
- پیشنهاد می‌شود، یک سری آزمایش‌های بیشتری بر روی بتن پلاستیک برای ارزیابی میزان آب‌خوری، استهلاک و خوردگی رسوبات و تاثیر آن بر روی بتن انجام گیرد و نتایج به صورت یک کار جامع ارائه شود.

منابع و مأخذ

منابع و ماخذ

- اولی پور، م؛ میر قاسمی، ع و ا. ستاری کرکزلو، د.، ۱۳۸۲، " اندرکنش دیوارهای آببند بتن پلاستیکی در پی و بدنه سد های خاکی " ، چهارمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت ۱۳۸۲ ، تهران ایران.
- بسطامی. ا، باقرزاده خلخالی. ا، (۱۳۹۷). " ارزیابی روش های آببندی پی بر میزان تراوش سد نرماب ". کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام ایران - تبریز (پایتخت گردشگری کشورهای اسلامی).
- پاکزاد، م، شهبازیان اهری، ر. و میرقاسمی، ع.الف.، ۱۳۸۰، " بررسی اندرکنش استاتیکی سد، پی و دیوار آببند بتن پلاستیک در پی های ناهمگن سدهای خاکی " ، چهارمین کنفرانس سدسازی، تهران، ایران.
- چراغی، آ. " اندرکنش دیوار آببند بتن پلاستیکبا پی و سد خاکی دارای هسته رسی (با مطالعه موردی)" ، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۳.
- حقیقت اندیش، س.، قادری، ک.، محمدی، م. و بارانی، غ. ۱۳۹۴، بهینه سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با روش تکامل رقابتی جوامع (SCE)، مجله پژوهش آب ایران، جلد ۹ ، شماره ۳ ، صفحات ۱۹-۲۶.
- حقیقی، س.، جعفر قلی زاده، ه. و تقی زاده، س. ۱۳۹۲، " بررسی و آنالیز اثر تراوش در سدهای خاکی با طراحی دیوار آب بند" ، فصل نامه صنعت مقاوم سازی و به سازی، نشریه ۲۴ ، صفحات ۴۱-۴۶.
- رحیمی، ح. ۱۳۹۲، سدهای خاکی، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران.

- رعیتی، م.، ۱۳۸۲، ”آنالیز دینامیکی مجموعه ی پی و دیوار آببند در سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله“ ، پایان‌نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد، به راهنمایی دکتر عباس سروش، دانشکده‌ی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- زوراسنا، ذ، ۱۳۷۸ ، ”تحلیل تنش - کرنش سیستم‌های مختلف اتصال دیوار آببند بتن پلاستیک در محل اتصال به هسته‌ی سدهای خاکی“، پایان‌نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد، به راهنمایی دکتر امیر حمیدی، دانشکده‌ی فنی مهندسی دانشگاه تربیت معلم.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان، خلاصه سیمای طرح.
- شعاعی، م.، ۱۳۹۰، ”بررسی تأثیر عمق نفوذ دیوار آببند بتن پلاستیک و مشخصات هسته و پی آبرفتی بر تشکیل ناحیه‌ی خمیری در سدهای خاکی“ ، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ایران.
- شهبازیان اهری، رضا؛ علی اصغر میرقاسمی و مهدی پاکزاد، ۱۳۷۹، بررسی اندرکنش استاتیکی سد، پی و دیوار آببند بتن پلاستیک در پی‌های ناهمگن سدهای خاکی، چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، تهران.
- شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵، گزارش روش اجرای دیوار آببند سد نرماب.
- شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۸۵، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد مخزنی نرماب.
- شرکت مهندسی توسعه آب تابان
- شکوری، ب. محمدی، م.ع. و منافپور، م.، ۱۳۹۲ ، ”بررسی تأثیر میزان عمق نفوذ دیوار آببند بتن پلاستیک در هسته‌ی رسی سد مخزنی عنبران“ ، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، اردبیل ایران.
- صدر کریمی، ج. و سلیمانیان، رضا، ۱۳۸۱، ”تحلیل الاستیک و ویسکوالاستیک دیوار آببند سد ارسباران“ ، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران.

- صدقی اصل، م. ۱۳۸۰، "اثر موقعیت بهینه پرده آببند در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۲۱ آبان، دانشگاه کرمان، کرمان، ایران.
- قبادیان، ر. و خدائی، ک. ۱۳۸۸، "تأثیرات دیواره آببند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۴، شماره ۴، صفحات ۱۴۸-۱۶۰.
- قضاوی، م. صفرزاده، ذ. و هاشم الحسینی، ح. ۱۳۸۳، "تحلیل لرزه‌های دیوارهای آببند بتن پلاستیک در سدهای خاکی"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران.
- کریم‌نیا، م. ۱۳۷۸. "مطالعه رفتار غیر خطی دیوار آببند سد کرخه با استفاده از روش‌های عددی" مجموعه مقالات سی‌امین گردهمایی علوم عمرانی.
- کریمی‌پور، ا. ۱۳۹۶، "تأثیر اجرای پتوی رسی و دیوار آببند بر میزان نشت و پایداری سد خاکی با هسته رسی" دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و مدیریت بحران، خرداد ماه ۱۳۹۶.
- کیانفر، م. (۱۳۹۵). "بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ساختگاه سد خاکی نرماب با تأکید بر پارامترهای مورد نیاز جهت طراحی دیوار آببند"، کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه یزد.
- کیانفر، م. مهرنهاد، ح. کیانفر، محمدجواد. ۱۳۹۵، "انتخاب روش مناسب آببندی پی و تکیه‌گاه‌های سد نرماب بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی و شرایط زمینشناسی مهندسی"، دومین همایش ملی پژوهش‌های مهندسی عمران، تهران، سالن همایش‌های دانشگاه شهید بهشتی، ۲۸ مرداد ۱۳۹۵.

- کیانی فر. ر، (۱۳۹۰)، "اجرای پرده آب بند در زیر دیوار آب بند در ساختگاه های با ضخامت زیاد آبرفت"، مجموعه مقالات سی امین گردهمایی علوم زمین.
- مجد، مهرداد. " تعیین طرح اختلاط بتن پلاستیک مورد استفاده در دیوار آب بند سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۴.
- مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار، " گزارش شناخت مطالعات زمین شناسی-زمین شناسی مهندسی-لرزه خیزی سد مخزنی نرماب.
- یوسفی، م. پرویزی، م. صدقی اصل. ۱۳۹۵، " مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پرده آب بند بر کنترل نشت و پدیده جوشش در پی سازه های هیدرولیکی " ، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست ، دوره ۴۸ ، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵ ، صفحه ۳۱۵ تا ۳۲۹.

- Ambraseys, N. N. And Sarma, S. K. (۱۹۶۷), "The Response of Earth Dams to Strong Earthquakes", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering-Geotechnique ۱۷, pp. ۱۸۱-۲۱۳.
- Asadi Sakhmarsi, A., Akhbari, H., Naeimi, P., and Kiapey, A. ۲۰۱۴. The effect of the cutoff wall conditions on the seepage characteristics of homogeneous earth-fill dams using SEEP/W, WALIA journal, ۳۰(S۲), ۱۷۶-۱۸۲.
- Bath, K.J. (۱۹۹۰), "Finite Element Procedures in Engineering Analysis".
- Baxter, D.Y. (۲۰۰۰), "Mechanical Behavior of Soil-Bentonite Cutoff Walls", Dissertation Submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in Partial Fulfillment of

the requirements for Degree of Doctor Philosophy in Civil Engineering.

- Bowels, Joseph, E. (1988), "Foundation Analysis and Design", McGraw-Hill Book Company, 816P.
- Brinkgreve R.B.J., Swolfs W.M., Engin E. (2011). Plaxis Introductory: Student Pack and Tutorial Manual. CRC Press, 116 p.
- Clough, R. W. & Chopra, A. K. (1966), "Earthquake Stress Analysis in Earth Dams", ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol.92, No.2, pp.197-211.
- Cook, R. D., Malkus, D. S. and Plesha, M. E., (1989), "Concepts and Application of Finite Element Analysis", 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, pp 176-180, 293-297.
- Das, B. M. (1993), "Principles of Soil Dynamics" Pws-Kent Publishing Co, Boston. Daghig, Y. (1993). "Numerical Simulation of Dynamic Behaviour of an Earth Dam During Seismic Loading", Thesis Presented to Delf University of Technology Netherland in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor in Technical Sciences, June 1993.
- Dasilva, J. 2006. Optimization of concrete gravity dams foundation systems, 22nd International congress on large dams-ICOLD, 18 June, Barcelona, Spain.
- Davidson, R. R. & Beger, D. J. And Ridlen, D. W. (1981) "Numerical Modeling of Earth Structures: Some thing to Consider", Transportation Research Record.

- Davidson, R.R., J. Levallois, and K. Graybeal. (۱۹۹۱)., “Seepage Cutoff Wall for Mud Mountain Dam,” Slurry Walls: Design, Construction, and Quality Control ,ASTM STP ۱۱۲۹, Eds. D.B. Paul, R.R. Davidson, and N.J. Cavalli, Philadelphia ,PA, pp. ۳۰۹-۳۲۳ (published ۱۹۹۲).
- Deshmukh, D, M., ghasemi, A.A. and Shadravan, B., (۱۹۸۷), “The World’s Largest Cutoff Wall at Salaudi Dam”, Hayropower & dams, Issue Two, ۱۹۸۷.
- G. Y. Luo . J. S. Qiu . H. Cao\ . H. Pan (۲۰۱۸)“Simplified method for calculating inflow into a deep excavation with consideration of the effects of cutoff walls”, (۲۰۱۸), Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature ۲۰۱۸.
- Geol, LEE, Chang-, et al. (۱۹۸۷), Anti-vascular endothelial growth factor treatment augments tumor radiation response under normoxic or hypoxic conditions. *Cancer research*, ۲۰۰۰, ۶۰,۱۹: ۵۵۶۵-۵۵۷۰.
- Hosainy, E. and Siosemarde, M. ۲۰۱۵. Seepage analysis in body and foundation of Sang Siah Dam using the Seep/W, Science Journal (CSJ), ۳۶(۴), ۱۶۹۷-۱۷۰۱.
- ICOLD ۱۹۸۵, “Filling Material Watertight Cut Off Walls”. Bulletin No. ۵۱
- Jafari, M.,K., Davoodi, M., (۲۰۰۴), “Dynamic Characteristics Evaluation of Masjedssoleiman Embankment Dam Using Forced Vibration Test”, ۱۳th World Conference on Earthquake Engineering.

- Karimnia M., Shahkarami A., (۲۰۰۰), “Study on The Behavior of Cut-off-walls in Homogeneous and Heterogeneous Dam Foundations”.
- G. Y. Luo ., J. S. Qiu., H. Cao., (۲۰۱۸), “Simplified method for calculating inflow into a deep excavation with consideration of the effects of cutoff walls ”. *Hydrogeology Journal*, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature ۲۰۱۸.
- Mahmood, R. S. (۲۰۱۲). Preparation of Design Charts for Estimation of the Length of an Upstream Impervious Blanket in a Homogenous Earth Dam. *Journal of Engineering*, ۱۸(۷), ۸۵۹-۸۶۷.
- Mansuri B., Salmasi F. and Oghati B. ۲۰۱۴. Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam, *Geotechnical and Geological Engineering* ۳۲, ۱۱۶۵-۱۱۷۳.
- Mansuri, B. and Salmasi, F. ۲۰۱۳. Effect of Horizontal Drain Length and Cutoff Wall on Seepage and Uplift Pressure in Heterogeneous Earth Dam with Numerical Simulation, *Journal of Civil Eng, Urban*, ۳(۳), ۱۱۴-۱۲۱.
- Mansuri B., Salmasi F. and Oghati B. ۲۰۱۴. Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam, *Geotechnical and Geological Engineering* ۳۲, ۱۱۶۵-۱۱۷۳.
- Mirghasemi, A.A, (۱۹۹۹), “Critical Hydraulic Gradient of Plastic Concrete”, *Geotechnical Engineering Conference (GEOTROPIKA* ۹۹).

- Mirghasemi, A.A, Moshashai, H. (۲۰۰۱), “Plastic Concrete Specification a Case Study Karkhe Dam Project”, International Conference on Civil Engineering, Bangalore, July ۲۰۰۱.
- Mortazavi, M. and Soleimani, S. ۲۰۱۵. Leakage Analysis of Embankment Dams Using SEEP/W, ۳D SEEP Software, Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, ۵(۱۰), ۱۲۲-۱۲۸.
- Pakzad, M., Mirghasemi, A.A. and Shadravan, B., (۲۰۰۵), “The World’s Largest Cutoff Wall at Karkheh Dam”, Hayropower & dams, Issue Two, ۲۰۰۵.
- Pashazadeh, A., & Chekaniazar, M. (۲۰۱۱). Estimating an Appropriate Plastic Concrete Mixing Design for Cutoff Walls to Control Leakage under the Earth Dam. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, ۱(۹), ۱۲۹۵-۱۲۹۹.
- Pakbaz, M. S., Dardaei, A., & Salahshoor, J. (۲۰۰۹). Evaluation of performance of plastic concrete cutoff wall in Karkheh Dam using ۳-D seepage analysis and actual measurement. *Journal of Applied Sciences*, ۹(۴), ۷۲۴.
- Qizheng W., Qingyou W. and Jialu P.U., (۱۹۹۲), “Mechanical Properties of Plastic Concrete and Nonlinear Structural Analysis of Plastic Concrete Cut-off Wall”, *Computational Mechanics in Structural, Recent Development and Future*, ۱۹۹۲, pp:۲۷۳-۲۸۵.
- Rampello, S., Cascone, E., & Grosso, N. (۲۰۰۹). Evaluation of the seismic response of a homogeneous earth dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۲۹(۵), ۷۸۲-۷۹۸.

- S. Sivakumar , N. Almas Begum, P.V. Premalathac. “Numerical study on deformation of diaphragm cut off walls under seepage forces in permeable soils”. Computers and Geotechnics ۱۰۲ (۲۰۱۸) ۱۵۵–۱۶۳.
- Soleymani, S. and Akhtarapur, A. ۲۰۱۱. Seepage Analysis for Shurijeh Reservoir Dam Using Finite Element Method, Geo-Frontiers ۲۰۱۱, ۳۲۲۷-۳۲۳۴.
- Vaezinejad, S. M., Marandi, S. M., & Salajegheh, E. (۲۰۱۸). Inverse modelling of leakage through earth dams (case study: Baft dam, Iran). Geotechnical Research, ۱-۱۳.

Abstract

Water leakage and internal erosion in the body and the earth's dam are the root causes of many problems and failures in these dams. There are several methods for controlling the penetration of the penetration, including the construction of an upright impermeable blanket, clay trenches, injection membranes, and cut-off-wall. Narmab Dam is a homogeneous earth with a height of 70 meters, a crown length of 107 meters and a reservoir volume of 110 million cubic meters. Due to the high depth of the alluvium in the studied dam, the removal of the desired layer is not possible until reaching the normal bedrock. The use of an injection seal is not possible due to the non-injectable nature of the layers. Based on this, a dam wall has been used for controlling leakage in the earthquake dam in the Narmab dam. The basis of this approach is to increase the length of the paths of the flow lines, thereby reducing the hydraulic gradient and the flow of infiltration. Cut-off-wall is designed based on the geological status of rock mass and its physical and mechanical status and is of great importance for controlling leakage and damping. Considering the extension of the sealing wall inside the clay core for more optimal sealing, as well as considering the geological status and physical and mechanical characteristics of the rock, the interaction of the core and the pipe with the wall in different situations of static and dynamic loading Importance is abundant. The leakage analysis of dam and body construction is done by the finite element method using PLAXIS software in steady-state mode. With the help of this software, it is possible to plot current and potential lines and calculate flow rates for a certain section of the soil. In the Narmab dam, the concern is about the wall of the seals, and it is necessary to monitor the conditions and make arrangements to repair and strengthen the sealing wall if needed. In this research, the aim of this study was to investigate the sealing and sealing performance of the dam wall in the Narmab dam located in Minoodasht city of Golestan province, using the PLAXIS 2D software.

Keywords: earth Dam, cut-off-wall Wall, seepage , Finite Element Method, PLAXIS Software



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces Engineering

**Evaluation of constructed cut-off-wall in foundation of
NARMAB dam**

By: Ali Dallaki

Supervisor:

Dr Syed-Mohammad Esmail Jalali

Advisor:

Dr Alianvari

July ۲۰۱۹