

تحلیل اجزای محدود سدهای زیرزمینی و نکات مهم در طراحی و اجرای آنها - مطالعه موردی سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان

محمد حاجی عزیزی^{۲*}، محمود رحمانی^۱ و نجف بیگلری^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: سدهای زیرزمینی، مدیریت منابع آب، مناطق کویری، روش اجزای محدود.</p>	<p>مدیریت منابع آب در کشور های کم آب از جمله ایران از موارد اجتناب ناپذیر است. یکی از راههای موثر برای مدیریت منابع آب احداث سد های زیرزمینی است. سد های زیرزمینی به منظور ذخیره و کنترل آب زیرزمینی طراحی و احداث می شوند تا آب قابل شرب در دسترس قرار گیرد. از محاسن سد های زیرزمینی نسبت به سدهای احداث شده بر روی سطح زمین، تبخیر بسیار کم و بهداشتی ماندن آب در مخزن سد است. از طرف دیگر اجرای سد های زیرزمینی در مناطق کویری تاثیر منفی بر محیط زیست ندارند زیرا از جریان آب شیرین به محیط های شور کویر جلوگیری می شود. در این مقاله روش اجزای محدود برای تحلیل سد زیرزمینی در منطقه ی کویری استان سمنان ارائه گردیده است. همچنین نکات موثر طراحی و اجرایی این گونه سد ها ارائه می گردد که در طراحی و اجرای صحیح این گونه سد ها بسیار موثر هستند. نتایج حاصل از تحلیل پایداری و تغییر مکان سد، نتایج خوب و قابل قبولی می دهد. در پایان این چکیده گزارف نیست اگر گفته شود که با توسعه و پیشرفت احداث سد های زیرزمینی در دنیا می توان از جنگ های آینده ی بشر برای آب شیرین جلوگیری کرد.</p>

۱- مقدمه

و یا بسیار کم هستند، آب زیرزمینی تنها منبع آب قابل دسترس است [۲]. وجود منابع آب مورد نیاز در مناطق خشک و کم آب، ارتباط زیادی به میزان بارندگی در آن مناطق در طول سال دارد. کمبود بارندگی و تبخیرهای سطحی جریان آب در مناطق خشک مانع از ایجاد جریان دائمی آب زیرزمینی است که همین امر موجب مشکلاتی از قبیل مسائل زیست محیطی و تامین آب منطقه می شود [۳]. وجود خاکهای ریز غیر چسبنده و فرسایش آن توسط باد و جریان های سطحی، تاثیر منفی قابل توجهی در آبخوان ها دارد [۴ و ۵]. بنابراین ضروری است که برای مدیریت منابع آب در هر منطقه برنامه ریزی دقیقی انجام گیرد به طوری که بهره برداری از منابع آب نیز باید به

در چرخه هیدرولوژیکی، آب زیرزمینی زمانی شکل می گیرد که آبهای سطحی حفره های سنگها و خاک را در زیر سطح زمین اشباع کنند. شکل ژئولوژیکی طبیعی که توانایی ذخیره و انتقال آب را دارد به نام لایه آبدار شناخته می شود [۱]. منابع آب زیرزمینی یکی از گزینه های مورد توجه در زندگی انسان امروزی برای تامین آب است. در مناطق خشک که آب های سطحی وجود ندارند

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mhazizi@razi.ac.ir

۱. عضو هیات علمی دانشگاه سمنان، دانشکده ی عمران
۲. استادیار، دانشگاه رازی کرمانشاه، دانشکده ی مهندسی

سدهای روی سطح زمین دارای مزایایی از قبیل عدم تبخیر زیاد آب از مخزن سد، عدم آلودگی آب مخزن سد، عدم تشکیل رسوب در مخزن سد و مشکلات بهداشتی برای آب شرب سد [۱۴] است. سدهای زیرزمینی علاوه بر آن که می توانند مشخصات لازم برای تامین آب مورد نیاز را داشته باشند، راحتی اجرای آن ها نسبت به سدهای روی سطح زمین، از دیگر مزایای آن ها است [۱۵ و ۱۶ و ۱۷]. البته مشخصات لایه های زمین و جنس و شیب آن ها و همچنین مقدار گنجایش مخزن از عوامل تعیین کننده ی انتخاب محل سد زیرزمینی است که زمان و تلاش زیادی برای تعیین آن ها نیاز است [۱۸ و ۱۹]. سد زیرزمینی نباید در زمین های شور ساخته شود، اما در صورت لزوم می توان با خشک نمودن دوره ای مخزن و یا نگهداری تراز آب در محلی مناسب در زیر سطح زمین از شور شدن آب جلوگیری کرد.

با توجه به تبخیر بسیار کم آب در مخازن آب های زیرزمینی و مشکلات کم زیست محیطی آن، گزاف نیست که اگر گفته شود ایجاد و توسعه ی سدهای زیرزمینی در سراسر جهان می تواند از جنگ های آینده ی بشر بر سر آب شرب جلوگیری کند.

استان سمنان تقریباً دوسوم گستره ی آبریز کویر مرکزی ایران را در بر می گیرد و از دیدگاه زمین شناسی در زون های البرز جنوبی و ایران مرکزی قرار دارد. متوسط بارش سالانه ی این استان از ۱۵۰ میلی متر تجاوز نمی کند. بنابراین تامین آب در مناطق کویری و کم آب آن بسیار ضروری و پر اهمیت است. یکی از راهکارهای مناسب برای تامین آب این مناطق احداث سدهای زیرزمینی است که خوشبختانه مسولین استان به این امر توجه داشته اند. در این مقاله علاوه بر بررسی نکات مهم طراحی و اجرایی سدهای زیرزمینی، به تحلیل اجزای محدود سد زیرزمینی آبخوری در منطقه ی بهجت آباد استان سمنان پرداخته می شود.

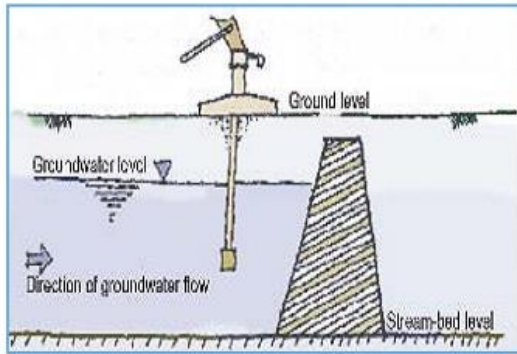
دقت مدیریت شود، هر چند وجود مشکلات متعدد از جمله مشکلات مالی در مراحل مختلف کار، همواره به عنوان موانع کار مطرح است.

سد های زیرزمینی بهترین گزینه برای مقابله با کمبود آب شرب در مناطق خشک و کویری است [۶]. در واقع سد زیرزمینی سازه ای است که به منظور قطع جریان طبیعی آب از میان لایه ی آبدار طراحی شده است و محلی مناسب برای ذخیره آب زیرزمینی را فراهم می سازد. تمایل به ساخت سدهای زیرزمینی بیشتر در نواحی خشک، نیمه خشک و گرمسیری وجود دارد. سدهای زیرزمینی به عنوان منابع آبی کوچک در نظر گرفته می شوند. استفاده از منابع آب زیرزمینی در فصل های خشک، تنها برای مصارف شرب انسان و دام مناسب است [۷]. به نظر می رسد که اولین سد زیرزمینی در زمان رومی ها ساخته شده است و بعد ها توسط تمدن های باستانی در شمال آفریقا جهت ذخیره آب نیز تکرار شده است [۱]. در تحلیل و بررسی آب زیرزمینی به عنوان یک منبع مناسب، همواره باید مسائل محیط زیست، اقتصادی و اجتماعی را در نظر داشت تا کمترین خسارت ناشی از احداث سدهای زیرزمینی به وجود آید [۸]. در دهه ی اخیر توجه به منابع آب زیرزمینی یکی از گزینه های کلیدی بوده است [۹]. نیشگاک و همکارانش [۱۰] و همچنین اداره ی منابع سبز ژاپن [۱۱]، فناوری سدهای زیرزمینی و توسعه ی آن را در سراسر دنیا مورد توجه قرار داده اند. همچنین مطالعات مختلفی [۱۲ و ۱۳] در معیارهای طراحی، احداث و اجرا و تاثیرات محیط زیستی سدهای زیرزمینی انجام شده است. یک سد زیرزمینی سازه ای است که پایین تر از سطح زمین طبیعی ساخته می شود و مانع جریان طبیعی آب زیرزمینی خواهد شد، در نتیجه آب در پشت سد ذخیره خواهد شد و با پمپاژ آن قابل بهره برداری برای مصارف مختلف است. در مناطقی که احداث سد بر روی سطح زمین امکان پذیر نیست و یا با مشکلات زیادی مواجه است، سد های زیر زمینی بهترین گزینه هستند. احداث سدهای زیرزمینی در مقابل

۲- انواع سدهای زیرزمینی

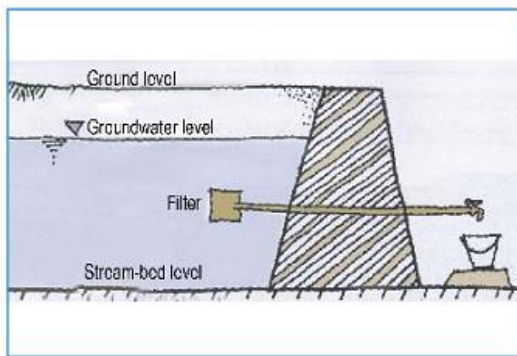
سدهای زیرزمینی به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۲-۱- سدهای زیرسطحی



این سدها در مقابل جریان آب در لایه آبدار زیر زمین قرار می‌گیرند و کاملاً در زیر سطح زمین قرار دارند. در شکل ۱ نمای از سد زیر سطحی زیرزمینی مشاهده می‌گردد که نحوه ی استخراج آب از آن به دو راه مختلف نشان داده شده است.

۲-۲- سدهای مخزن ماسه‌ای



شکل ۱- نمای تقریبی از سد زیرزمینی با مقطع دوزنقه و نحوه ی استخراج آب از آن [۲]

این گونه سدها در بالای سطح زمین ساخته می‌شوند و رسوبات ناشی از جریان آب در پشت آن ها جمع می‌گردد. در این سد ها، ذرات شن و ماسه ی حمل شده توسط آب در فصل بارندگی در پشت سد جمع می‌شود و تشکیل آبرفت می‌دهند آنگاه آب در این آبرفت‌ها ذخیره می‌شود. سدهای ذخیره ماسه‌ای در چند مرحله ساخته می‌شوند تا به تدریج ذرات درشت دانه در پشت سد انباشته گردد و معمولاً ذرات ریزدانه از روی سد سرریز می‌شوند [۲۰]. شکل های ۲ و ۳ سد ذخیره ماسه ای را نشان می‌دهند. هرچند که این گونه سد ها کاملاً در زیر سطح زمین ساخته نمی‌شوند اما با جمع شدن آبرفت در پشت آن ها و ذخیره ی آب در آبرفت، جزو سد های زیرزمینی قرار گرفته اند.



شکل ۲- ساخت سد مخزن ماسه ای و تشکیل آبرفت در پشت آن



شکل ۳- سد مخزن ماسه ای پس از اتمام مراحل ساخت و ذخیره ی آب در آبرفت پشت آن

۳- جنس، مزایا و معایب سدهای زیرزمینی

۳-۱- جنس سدهای زیرزمینی

- با توجه به این که سد و آب جمع شده در پشت آن در زیر سطح زمین ذخیره شده است، سطح زمین می تواند همانطور که در گذشته کاربرد داشته است، مورد استفاده قرار گیرد.
- آب اضافی در فصل بارندگی ذخیره می شود و از هرز رفتن آن جلوگیری می گردد.
- دما و خواص آب زیرزمینی در طی سال تغییر قابل توجهی ندارند. بنابراین استفاده از آن برای مصارف مختلف با اعتماد زیادی صورت می گیرد.
- ساخت سد زیرزمینی در مقایسه با سدهای سطحی، ساده تر است و کنترل زیادی که در سدهای روی سطح زمین نیاز است در ساخت آنها مورد نیاز نیست.
- فاجعه های غیر قابل جبرانی که در اثر تخریب سد های روی سطح زمین به وجود می آید در سد های زیرزمینی امکان پذیر نیست.
- سد زیرزمینی را می توان به صورت مرحله به مرحله ساخت. بنابراین نتیجه کار قبل از اتمام ساخت سد قابل مشاهده است.
- با استفاده از سد زیرزمینی می توان سطح آب زیرزمینی در منطقه را کنترل کرد.
- با استفاده از سد زیرزمینی می توان از ورود آب شیرین به زمین های شور و هرز رفتن آن جلوگیری کرد.
- تاسیسات لازم برای برداشت آب از مخزن بسیار ساده و کم هزینه است. مثل ایجاد چاه و نصب پمپ برای استخراج آب.
- تبخیر آب از مخزن، بر خلاف سد روی سطح زمین بسیار کم است. در عمق بیشتر از ۶۰ cm میزان تبخیر، تقریباً به صفر می رسد [۲۱ و ۲۰].
- میکروبها توانایی تولید مثل در آب های زیر زمینی را ندارند. بنابراین ریسک آلودگی آب در زیرزمین نسبت به آبهای سطحی کم است.

برای ساخت یک سد زیرزمینی، ابتدا ترانشه ای در محلی مناسب از عرض درّه زده می شود تا به سنگ بستر و یا لایه ای محکم و نفوذ ناپذیر برسیم. سپس سد زیرزمینی در محل ترانشه ساخته می شود و اطراف دیوار نیز با مصالح مناسب پر می گردد. جهت انتخاب جنس سد زیرزمینی با توجه به ارتفاع آن می توان از جدول ۱ استفاده کرد.

جدول ۱- جنس سد زیرزمینی و ارتفاع مناسب برای آن

جنس سد زیرزمینی	ارتفاع مناسب برای سد (m)
سپرهای فلزی	۲
مصالح ریزدانه ی رسی	۳
بتن مسلح	۴
سنگ چینی	۵
بتن غیر مسلح	۶
بتن پلاستیک	۶-۲۰

معمولاً سدهای زیرزمینی در فصل خشک که کمترین مقدار جریان آب برقرار است، ساخته می شوند. از مواد مختلفی مثل رس، بتن، مصالح سنگی همچون لاشه سنگ، بتن مسلح، آجر، پلاستیک، قیر و گونی، ورقه های فلزی و پی وی سی (PVC) می توان برای ساخت سطح نفوذ ناپذیر سدهای زیرزمینی استفاده کرد.

۳-۲- مزایای سدهای زیرزمینی

- در این قسمت مزایای سد های زیرزمینی تشریح می گردد.
- اگر ارتفاع سد کم باشد، حجم آب ذخیره شده در پشت سد زیاد است زیرا آب در فاصله زیادی از محدوده ی پشت سد ذخیره می شود.

- در صورت هر گونه مشکل برای سد، دسترسی به آن جهت رفع مشکل بسیار سخت و پرهزینه است.

۴- انتخاب مکان مناسب برای سد های زیرزمینی

اشتباه در انتخاب منطقه ی مناسب برای سد زیرزمینی موجب پتانسیل کم ذخیره ی آب می شود. این اشتباهات را می توان به ترتیب زیر بر شمرد:

- عمق کم ضخامت لایه ی آبرفت، که موجب ذخیره ی کم آب در مخزن می شود.
- ساخت سد در خاکی با نفوذپذیری کم.
- ساخت سد در محل هایی که باعث شور شدن آب می شود.
- احداث چاه نامناسب با جذب کم که باعث کاهش میزان برداشت آب می شود.
- فرار آب از شکافهای موجود در بستر نفوذناپذیر مخزن.
- محدودیت های مربوط به مالکیت زمین ها.

بهترین منطقه برای ساخت سد زیرزمینی محلی است که خاک منطقه از مصالح درشت دانه تشکیل شده باشد و لایه ای سنگی یا نفوذ ناپذیر در عمق مناسب و به شکل تقریباً کاسه ای، در بالادست سد وجود داشته باشد. همچنین بهتر است سد در مسیر آبراهه ساخته شود تا آب حاصل از بارندگی در آن مسیر جریان یابد. منطقه بهینه برای ساخت یک سد زیرزمینی، ناحیه بین کوه و زمین همواره می باشد که شیب ملایمی داشته باشد. معمولاً شیب توپوگرافی مناسب برای ساخت سد $4 - 2\%$ است اما در نهایت می توان سد را در نواحی با شیب $16 - 10\%$ نیز ساخت [۲۰].

- آلودگی آب زیرزمینی توسط حشرات و حیوانات امکان پذیر نیست.
- بر خلاف سدهای روی سطح زمین، در سدهای زیرزمینی سطح زمین توسط آب اشغال نمی شود و نیازی به جابجایی روستاها در نزدیکی های سد نیست.
- بر خلاف سدهای روی سطح زمین، هوای اطراف مخزن آب، مرطوب نمی شود و تاثیر تخریبی روی آثار باستانی نخواهد داشت.
- مشکل تجمع رسوب و کاهش حجم ذخیره ی آب خیلی کم است.
- ساخت سد زیرزمینی ساده تر و ارزان تر از سد های روی سطح زمین است و نگه داری آن به مراتب راحت تر انجام می گیرد.

۳-۳- معایب سدهای زیرزمینی

- در سد زیرزمینی زمان طولانی برای ذخیره آب نیاز است زیرا آب نه تنها در پشت سد بلکه در فاصله زیادی از بالادست سد نیز ذخیره می شود.
- معمولاً برداشت آب از مخزن سد های زیرزمینی با استفاده از پمپ صورت می گیرد. بنابراین هزینه بهره برداری نسبت به سدهای روی سطح زمین بیشتر است.
- درصد ریزدانه های خاک مخزن عامل تعیین کننده، برای ظرفیت مخزن است. اگر خاک ریز دانه باشد خاک فقط توانایی جذب 5% آب را دارد [۲۰].
- کنترل احداث چاههای غیر مجاز در اطراف سد به راحتی امکان پذیر نیست و بازرسی های مداوم و دقیق لازم است.

۵- تحلیل اجزای محدود سدهای زیرزمینی

در این بخش از مقاله نکات لازم جهت تحلیل اجزای محدود سدهای زیرزمینی بررسی می گردد و در ادامه تحلیل اجزای محدود سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان و نتایج حاصل از آن آورده می شود.

نرم افزار پلاکسیس یک برنامه اجزای محدود است که از روش غیرصریح برای مدل سازی عددی استفاده می کند. اغلب برنامه های اجزای محدود، ماتریس المان ها را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کل می سازند. به عبارتی حوزه تعریف تابع از تعداد متناهی المان با تعداد ثابتی گره تشکیل شده است. تغییر مکان های داخل هر المان با استفاده از تابع شکل که جابجایی های گرهی را به هم مرتبط می کند، تخمین زده می شود. معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبی اولیه با مجموعه معادلات جبری جایگزین می شوند. و به این ترتیب ماتریس سختی کل شکل می گیرد. با حل دستگاه معادلات جابجایی نقاط تعیین می شود و به کمک آنها می توان تنش ها و کرنش های هر المان را بدست آورد. در روش های غیرصریح یک ارتباط قوی بین متغیرهای گرهی مختلف در طول یک گام محاسباتی وجود دارد و قبل از این که سازگاری و تعامل به دست آید، چند فرایند تکرار لازم است. مشخصات روش اجزای محدود نرم افزار پلاکسیس را می توان به ترتیب زیر خلاصه نمود،

گام زمانی نسبتاً بزرگ است.

تلاش محاسباتی زیاد در هر گام زمانی و تکرار برای دنبال کردن قانون مشخصه ی غیرخطی لازم است.

در فرایند محاسباتی همیشه باید دو نکته را در نظر گرفت، ۱- پایداری ۲- دنبال کردن مسیر حل.

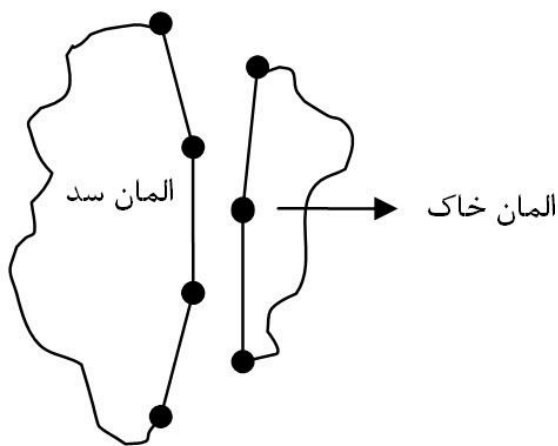
ماتریس سختی باید ذخیره شود، حتی با وجود کاربرد تکنیک هایی نظیر عرض باند، باز هم حافظه ی زیادی لازم است.

جهت پیگیری تغییر مکان ها و کرنش های بزرگ تلاش محاسباتی اضافی لازم است.

۵-۱- المان فصل مشترک سد زیرزمینی و خاک

اطراف آن

مقدار تغییر شکل المان فصل مشترک، کوچک در نظر گرفته می شود و مدل در نظر گرفته شده برای آن، مدل الاستیک-پلاستیک کامل است. در المان فصل مشترک، مولفه های سختی برشی، سختی عمودی، چسبندگی، زاویه ی اصطکاک داخلی و زاویه ی اتساع معرفی می شود. شکل ۴ المان فصل مشترک و گره های المان خاک و سد را نشان می دهد.



شکل ۴- گره های المان فصل مشترک خاک و سد

مقدار کرنش فصل مشترک برای گره ها ی نشان داده شده از رابطه ی زیر به دست می آید،

$$\varepsilon = T B d \quad (1)$$

که T ماتریس انتقال و d تغییر مکان گره است. ماتریس های T و B از روابط زیر به دست می آیند،

$$T = \begin{bmatrix} \frac{x_{\xi}}{\sqrt{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}} & \frac{y_{\xi}}{\sqrt{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}} \\ -\frac{y_{\xi}}{\sqrt{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}} & \frac{x_{\xi}}{\sqrt{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.5(1 - \xi_c) & 0 & -0.5(1 + \xi_c) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -0.5(1 - \xi_c) & 0 & -0.5(1 + \xi_c) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

۳-۵- شرایط مرزی

تحلیل سد در حالت دو بعدی و کرنش مسطح انجام شده است (شکل ۵). تغییر مکان مرزهای کناری سمت راست و چپ، فقط در جهت محور X برابر با صفر در نظر گرفته می شود و تغییر مکان مرز پایین در هر دو جهت محور X و Y برابر با صفر در نظر گرفته می شود.

۶- سد زیرزمینی آبخوری

روستای آبخوری از توابع استان سمنان و در منطقه ای به نام بهجت آباد واقع شده است. نیاز به آب شرب برای مردم این منطقه از ضروریات است تا علاوه بر رفع نیاز آب شرب منطقه، از مهاجرت آن ها به شهر جلوگیری شود. شکل ۵ مقطع عرضی و شبکه ی تغییر شکل یافته ی تحلیل اجزای محدود سد زیرزمینی آبخوری را نشان می دهد. لازم به ذکر است که با توجه به حساسیت مقادیر تنش-کرنش در اطراف سد مش بندی در اطراف سد ریزتر از مش بندی در مکان های دور از سد باشد انتخاب شده است به طوری که حساسیت کمتری نسبت به اطراف سد در تغییرات تنش-کرنش دارند. در عمیق ترین مقطع، ارتفاع سد حدود ۲۰ متر است به طوری که این ارتفاع در کناره های سد به ۴ متر می رسد. در واقع محل احداث سد بر روی سنگ بستری است که شکل کاسه ای دارد. با توجه به ارتفاع ۲۰ متری سد در عمیق ترین مقطع و ضرورت انعطاف پذیر بودن آن در زیر زمین، جنس سد از بتن پلاستیک انتخاب شده است. بتن پلاستیک انعطاف پذیری خوبی دارد و امکان ترک خوردگی در آن کم است. جهت انتخاب نوع و مقدار مصالح بتن پلاستیک برای سد زیرزمینی، ترکیب جدول ۲ در نظر گرفته شده است. این

که مختصات محلی گره ی المان خاک در کنار سد است. بردار نیروی هر المان از رابطه ی زیر به دست می آید،

$$f = \int_{\Gamma} B^T T^T \sigma d\Gamma \quad (4)$$

همچنین ماتریس سختی هر المان نیز از رابطه ی زیر به دست می آید،

$$k = \int_{\Gamma} B^T T^T D^e T B d\Gamma \quad (5)$$

که D^e ماتریس الاستیسیته ی المان است. اگر المان رفتار پلاستیک داشته باشد ماتریس الاستیسیته ی D^e به D^{ep} تبدیل می شود که از رابطه ی زیر به دست می آید،

$$D^{ep} = D^e - \frac{(D^e \frac{\partial G}{\partial \sigma})(D^e \frac{\partial F}{\partial \sigma})^T}{(\frac{\partial F}{\partial \sigma})^T D^e \frac{\partial G}{\partial \sigma}} \quad (6)$$

که F تابع تسلیم (به عنوان مثال تابع تسلیم موهر کولمب) و G تابع پتانسیل پلاستیک است که در قانون جریان پیوسته تابع F و G با یکدیگر برابر هستند.

۲-۵- روش فرمول بندی المان ها

هر المان شامل تعدادی گره است. هر گره درجه ی آزادی معینی دارد که به تعداد مجهولات مربوط به آن گره مرتبط است. مجهولات هر گره در تحلیل حاضر به تغییر مکان گره مربوط می شود. در یک المان، میدان تغییر مکان $\underline{u} = (u_x, u_y)^T$ از مقادیر گره ای در بردار $\underline{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ با استفاده از توابع انترپوله و ماتریس N مطابق رابطه ی زیر به دست می آید،

$$\underline{u} = N \underline{v} \quad (7)$$

که N تابع انترپوله است و بردار \underline{v} از حل معادله ی تعادل $KU = F$ به دست می آید. در معادله ی تعادل، بردار کرنش از رابطه ی زیر به دست می آید،

$$\underline{\varepsilon} = L \underline{u} \quad (8)$$

که L اپراتور دیفرانسیل است و به صورت رابطه ی ۹ نوشته می شود،

نمودار تنش افقی در اطراف سد را نشان می دهد. فشار محدود کننده ی سد در دو طرف بالادست و پایین دست باعث کم شدن تنش افقی در بدنه ی سد گردیده است. شکل ۸ تغییر مکان افقی سد را نشان می دهد که بیشترین مقدار این تغییر مکان در پای سد و به مقدار حدود ۱ میلیمتر است. شکل ۹ تغییر مکان قائم سد را نشان می دهد که بیشترین مقدار آن در حدود ۰/۵ میلیمتر است.

یکی از نکات مهم در ارتباط با سد های زیرزمینی دسترسی خیلی سخت به سد پس از احداث و بهره برداری از آن است که می توان گفت تقریباً غیر قابل دسترس هستند. بنابراین کلیه ی موارد احتمال خطر برای سد را باید پیش بینی کرد و تمهیدات لازم برای آن را در نظر گرفت.

ترکیب منتج از مرجع [۲۲] است. این سد با استفاده از برنامه ی اجزای محدود پلاکسیس تحلیل شده است و نتایج به دست آمده با توجه به ابعاد انتخابی سد نتایج خوب و قابل قبولی است. مدل در نظر گرفته شده برای سد، الاستیک و برای خاک اطراف آن موهر-کولمب در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مشخصات فیزیکی خاک مشاهده می گردد.

با توجه به این که در هر دو طرف سد زیرزمینی فشار محدود شونده ی خاک وجود دارد مقادیر تنش و کرنش در سد، مقادیر ناچیزی است. شکل ۶، بالادست سد را نشان می دهد که توسط جریان آب زیرزمینی اشباع شده است و پایین دست سد (سمت چپ) خشک است. علت تغییر شکل سد نیز همین فشار جانبی ناشی از خاک اشباع در بالادست سد است.

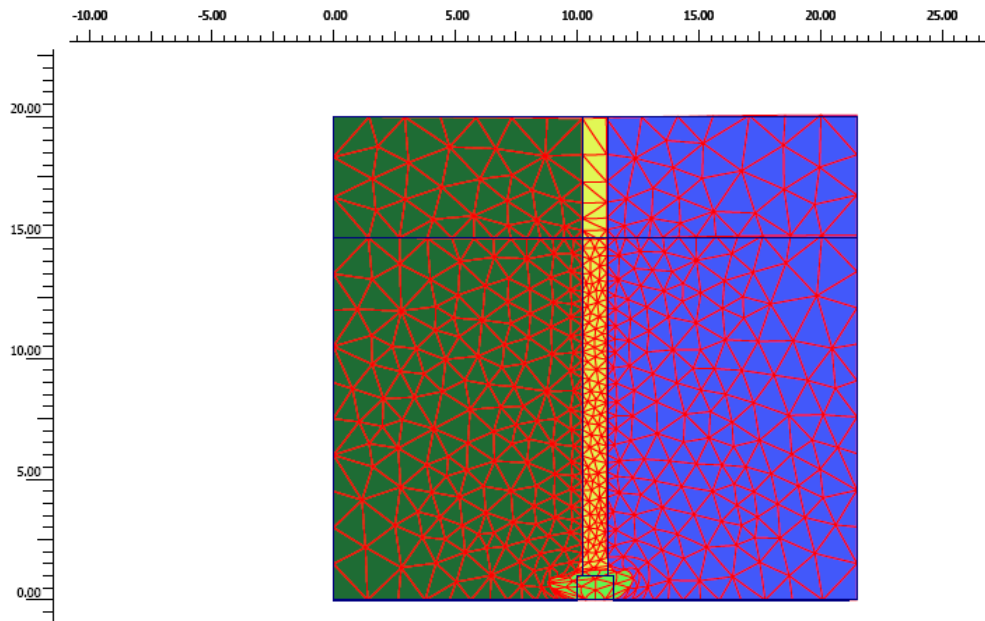
ضخامت سد ۱۰۰ سانتیمتر انتخاب شده است که بر روی پایه ای به عرض ۱۵۰ سانتیمتر قرار گرفته است به طوری که پایه نیز بر روی سنگ بستر قرار گرفته است. شکل ۷

جدول ۱- ترکیب و مقادیر لازم برای بتن پلاستیک در سد زیرزمینی آبخوری

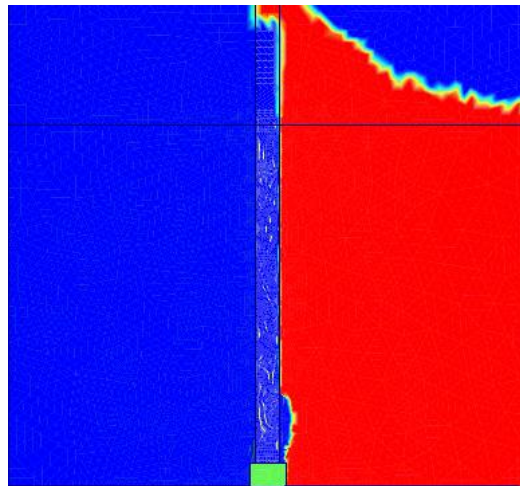
وزن مخصوص سیمان (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان (W/C)	نسبت بتونیت به سیمان (B/C)	اسلامپ (cm)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	
					۵-۹mm	۱۹mm-۹/۵
۲۲۰	۱/۸۲	۰/۱۸	۲۲	۷۰۵	۳۰۰	۴۹۵

جدول ۲- مشخصات خاک

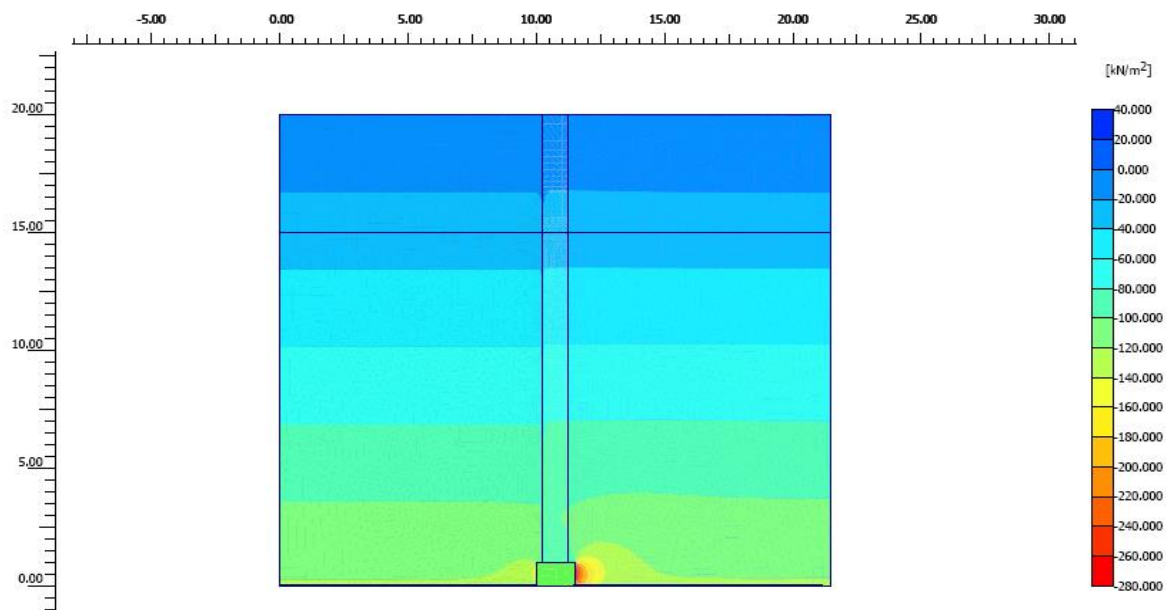
زاویه ی اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص خاک (kN/m ³)	وزن مخصوص اشباع خاک (kN/m ³)	مدول الاستیسیته (Mpa)	ضریب پواسون
۳۵°	۱۸	۲۲	۸۰	۰/۲۵



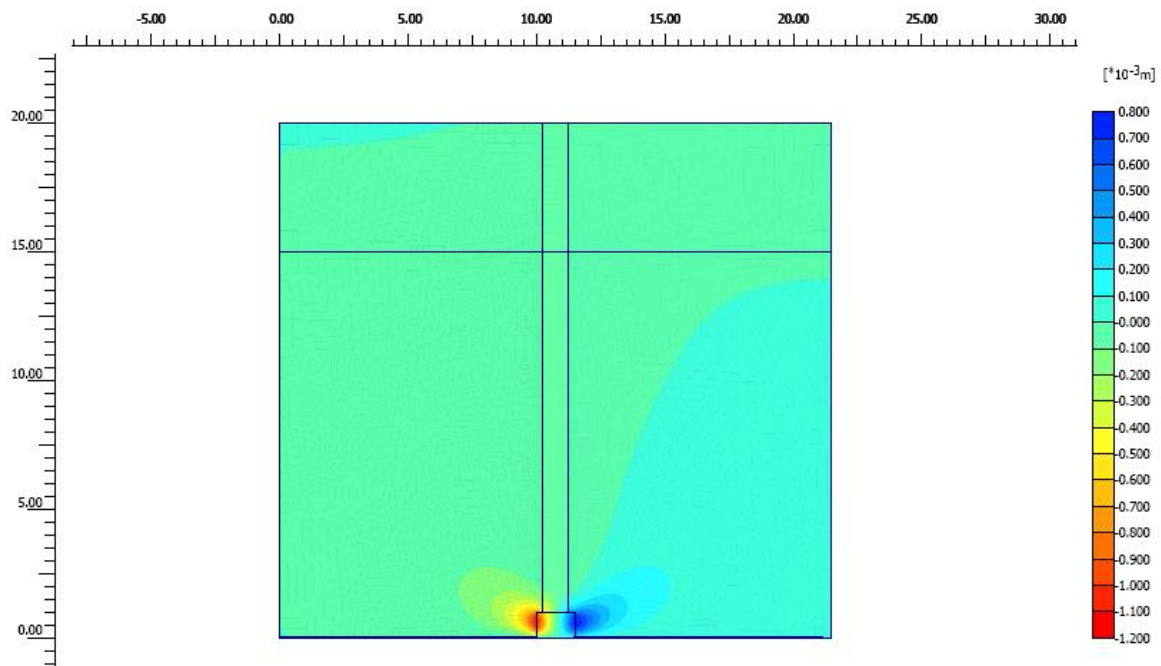
شکل ۵- مقطع عرضی و شبکه ی تغییر شکل یافته ی سد



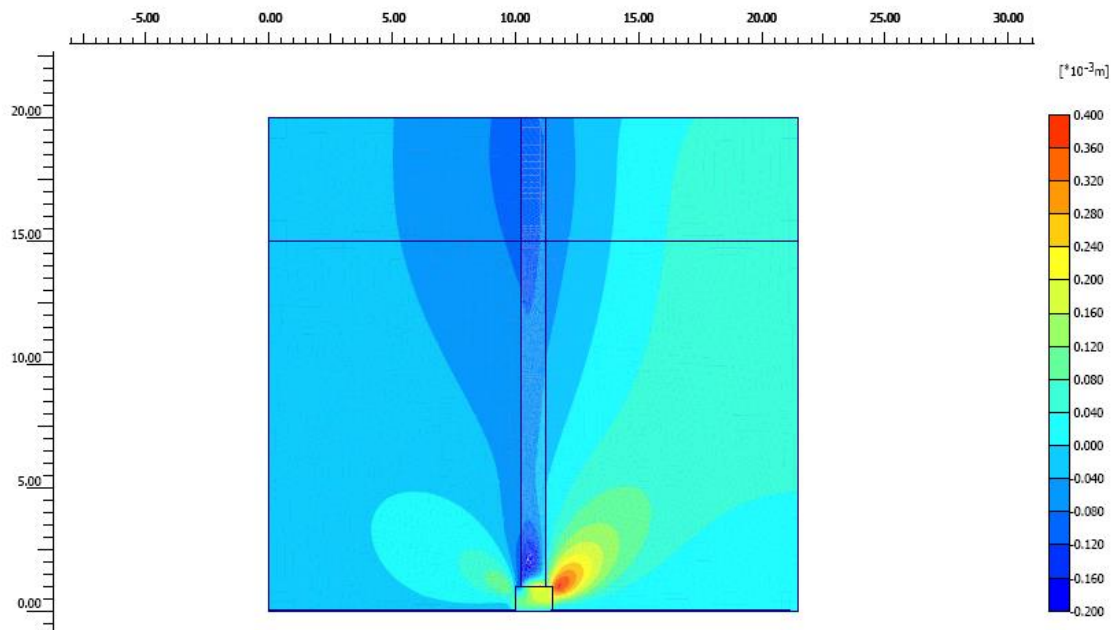
شکل ۶- اشباع شدن بالادست سد (سمت راست) و خشک ماندن پایین دست سد (سمت چپ)



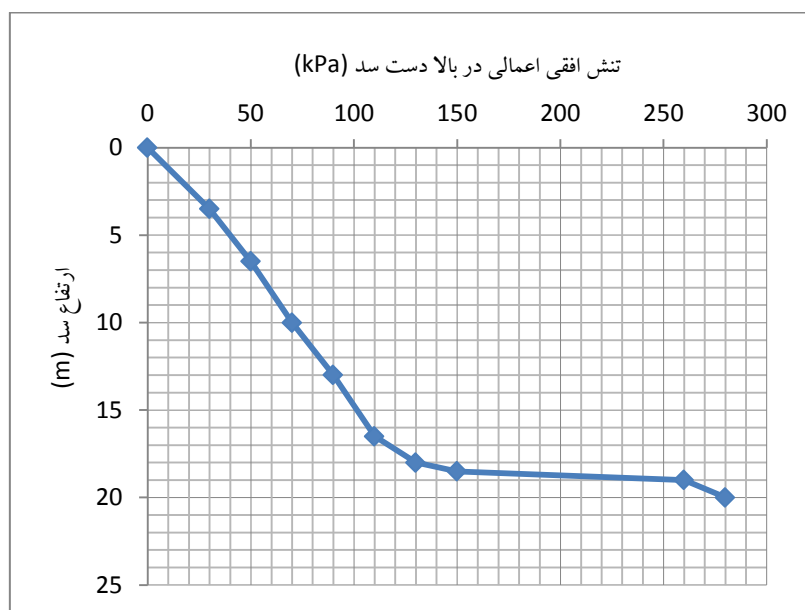
شکل ۷- تنش افقی در اطراف سد



شکل ۸- تغییر مکان افقی اطراف سد



شکل ۹- تغییر مکان قائم در اطراف سد



شکل ۱۰- فشار افقی وارد بر سد در ترازهای مختلف آن

۷- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل تنش-کرنش سد زیر زمینی و نکات مهم طراحی و اجرایی مورد بررسی قرار گرفته است. سد زیرزمینی از بالادست تحت فشار جانبی خاک اشباع و از پایین دست تحت فشار جانبی خاک خشک قرار می گیرد. تغییر مکان جانبی سد ناچیز و فشار جانبی وارد بر آن

قابل توجه نیست. سد زیرزمینی آبخوری، بر روی شالوده ای به ضخامت یک متر و عرض ۱/۵ متر قرار می گیرد به طوری که خود شالوده نیز بر روی سنگ بستر قرار گرفته است. جنس انتخابی برای سد، بتن پلاستیک است که دارای انعطاف پذیری مناسبی برای سد زیرزمینی است که پس از احداث، تقریباً غیر قابل دسترس است. با توجه به این که آب زیرزمینی منطقه ی آبخوری به کویر می ریزد،

تشکر و قدردانی

از دانشکده ی عمران دانشگاه سمنان به خاطر در اختیار گذاشتن نرم افزار پلاکسیس تشکر و قدردانی می شود. همچنین از بخش منابع طبیعی جهاد کشاورزی سمنان که به عنوان کارفرمای طرح اطلاعات لازم و همکاری های مفیدی داشتند تشکر و قدردانی می شود به ویژه از مهندس هاشمی که همکاری قابل تقدیری را در این طرح داشته اند.

طراحی سد آبخوری مشکلات محیط زیستی به وجود نمی آورد. از طرفی اجرای این سد علاوه بر رفع مشکل آب آشامیدنی مردم و دام روستای آبخوری، از مهاجرت بی رویه ی اهالی روستا به شهر جلوگیری می کند. بی شک یکی از راهکارهای موثر رفع مشکل کم آبی در استان های خشک و کم آب، از جمله استان سمنان، احداث سدهای زیرزمینی است.

مراجع

- [1] Yilmaz, M. (2003), "Control of groundwater by underground dams", thesis for the degree of Master of Science, School of natural and applied sciences.
- [2] Onder, H. and Yilmaz, M. (2005), "Underground Dams: A tool of sustainable development and management of groundwater resources", *European Water*, 35-45.
- [3] Tricoli, D. (1998), "Procedura di valutazione dell'effetto di interventi sul territorio sulle aratteristiche di deflusso, il caso di Keita in Niger", *Universita` degli studi di Padova facolta` di Ingegneria*, Tesi di dottorato di ricerca.
- [4] Rodier, J.A. (1966), "Evaluation of annual runoff in tropical African Sahel" ORSTOM.
- [5] Rodier, J.A. (1994), "General characteristics of surface hydrology in arid and semi-arid areas of Africa and their consequences for development" ORSTOM.
- [6] Tsumuro, T. (1998), "Applying Environment Related Technology: Environmental Measures in the Construction Industry", *Business Leaders' Inter-Form for Environment 21*, Japan.
- [7] Foster, S. (2002), "Subsurface dams to augment groundwater storage in terrain for human subsistence- Brazilian experience", world bank publication.
- [8] Alley, W.M., Reily, T.E., and Franke, O.L. (1999), "Sustainability of Ground-Water Resources", U. S. Geological Survey Circular 1186, Denver, Colorado.
- [9] Hanson, G., Nilsson, A. (1986), "Ground-water dams for rural-water supplies in developing countries", *Ground Water* 24 (4), 497-506.
- [10] Nishigaki, M., Kankam-Yeboah, K., Komatsu, M. (2004) "Underground dam technology in some parts of the world", *Journal of Groundwater Hydrology*, 46 (2), 113-130.
- [11] Japan Green Resources Agency (2004), "Technical Reference for Effective Groundwater Development", Kanagawa, Japan.
- [12] Nagata, S., Azuma, K., Asano, M., Nishijima, T., Shiiba, H., Yang, D.S., Nakata, R. (1994), "Nakajima subsurface dam, water policy and management: solving the problems", *Proceedings of 21st Annual Conference on Water Resources Planning and Management Div./ASCE*.
- [13] Osuga, K. (1997), "The Development of Groundwater Resources on the Miyakojima Islands, Freshwater Resources in Arid lands", *United Nations University Press*.
- [14] Nilsson, A. (1988) "Groundwater dams for small-scale water supply", *IT Publications*, London, 1988, 64 pp.
- [15] Hansson, G., Nilsson, A. (1986), "Groundwater dams for rural water supplies in developing countries", *Groundwater*, 24 (4), 497-506.

- [16] Cavalcanti, N.B., Brito, L.T., Silva, D.A., Anjos, J.B., Mariano do Rego, M. (1999), "Alternativa tecnologica para aumentar a disponibilidade de agua no semi-arido", Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, Campina Grande, 3 (1), 111-115.
- [17] Cavalcanti, N.B., Resende, G.M. (2001), "Avalicao de barreiros e finalidade da agua armazenada na regioao semi-arida da Bahia", Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, Campina Grande, 5 (3), 568-570.
- [18] United Nations, Department of technical co-operation for development (1985), "Integrated development plan Dodoma region", AGRAR-UND HYDROTECHNIK GMBH.
- [19] Nilsson, A. (1985), "Siting of groundwater dams for rural water supply in developing countries: hydrogeological and planning aspects", Proceedings of the Fifth World Congress on Water Resources, vol. 3, pp. 1287-1296.
- [20] SubSurface Dams: a simple safe and affordable technology for pastoralists (2006), s.l. : VSF-Belgium , TLDP-project.
- [21] Diettrich, T. (2005), "Artificial ground-water recharge by means of subsurface dams", Conference of the omas EK.
- [22] Mahboubi, A. and Ajorloo, A. (2005), Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression ,” Cement and Concrete Research, Vol. 35, Issue 2, Feb., pp 412-419.