

سلام الغلام



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

بررسی تاثیر تدریجی افزایش رسوب برنشت از فونداسیون

سد خاکی با استفاده از نرم افزار Geostudio

(مطالعه موردی: سد خاکی ارداک)

نگارنده: سیده مریم ضیائی

اساتید راهنما

دکتر احمد احمدی

دکتر جلیل ابریشمی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۶۶۲۷۲
تاریخ: ۹۶/۶/۲۷

با اسامه متعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و باد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سیده مریم ضیائی با شماره دانشجویی ۹۳۱۱۲۵۴ رشته مهندسی عمران گرایش آب و سازه های هیدرولیکی تحت عنوان بررسی تاثیر تدریجی افزایش رسوب بر نشست از فونداسیون سد شاکی با استفاده از نرم افزار Geostudio (مطالعه موردی: سد شاکی اردکان) که در تاریخ ۹۶/۰۶/۱۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۸۸.۵) درجه کارشناسی ارشد ☒ مردود ☐			
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	احمد احمدی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	جلیل ارینمی	دانشیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	عبدالاحد جویانی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	امیرعباس عابدینی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	مهدی نجمی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

توضیح: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

پدر و مادرم

آنان که فروغ نگهبان و روشنی رویشان سربایه های جاودانی زندگی ام هستند، آنان که راستی قائم در شگفتی قاتشان تجلی یافت. در برابر وجود کرامی شان زانوی ادب بر زمین می نهم

و برادرم

که همواره در طول تحصیل متحمل زحمت بود و تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودش مایه دلگرمی من می باشد.

و خواهرم

که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است.

و به تمام آزاد مردانی که نیک می اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارند.

شکر و قدردانی:

سپاس و ستایش خدای راجل و جلالت که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، در فشان. آفریدگاری که خویش را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیا زما ید اکنون که به یاری خداوند بزرگ توانسته ام برگمی دیگر از زندگی خویش را ورق بزنم، لازم می دانم از زحمات اساتید محترم، جناب آقای دکتر احمد احمدی و جناب آقای دکتر جلیل ابریشمی که با راهنمایی های ارزنده، بنده را در تهیه و نگارش این پایان نامه یاری نمودند شکر و قدردانی نمایم.

در انتها لازم می دانم از شرکت مهندسی مشاور آب پوی که با در اختیار گذاشتن اطلاعات مربوط به سد خاکی ارداک بنده را در انجام این تحقیق یاری کردند نیز شکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **سیده مریم ضیائی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه (مطالعه Geostudio با استفاده از نرم افزار بررسی تاثیر تدریجی افزایش رسوب برنشت از فونداسیون سد خاکی

موردی: سد خاکی ارداک) تحت راهنمایی جناب آقای دکتر احمد احمدی و دکتر جلیل ابریشمی متعهد می شوم:

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

مالکیت نتایج و حق نشر

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

پدیده رسوب‌گذاری و انباشت آن به دلیل کم شدن حجم مفید مخزن، ناپایداری سد و ضررهای اقتصادی یکی از مواردیست که همواره مورد مطالعه و بررسی پژوهشگران و مهندسان بوده است. علاوه بر این پدیده، مساله نشت در سد خاکی به دلیل بالا بودن گرادیان هیدرولیکی و متخلخل بودن بدنه و پی سد و با توجه به مسائل اقتصادی، ضروری و مهم می باشد. برای جلوگیری از نشت آب از فونداسیون سد خاکی، به روش های مختلفی زیر بدنه سد را آب‌بندی و یا تقریباً آب‌بندی می‌کنند که این امر اگر چه به مقدار زیادی از نشت فونداسیون می‌کاهد اما هزینه های قابل توجهی دارد، که گاه اقتصادی به نظر نمی‌رسد. با توجه به اینکه کاهش نفوذپذیری کف مخزن به دلیل افزایش تدریجی رسوبات به صورت علمی-تجربی اثبات می‌شود، بدین معنا که رسوبات وارد شده به مخزن به تدریج روی یکدیگر انباشته شده و ضمن افزایش تراکم رسوبات قبلی، بر ضخامت رسوب و کاهش نفوذپذیری کف مخزن تاثیر دارند به گونه‌ای که شاید بتوان انتظار داشت، پس از چند سال محدود عملاً نفوذپذیری کف مخزن بسیار ناچیز گردد، که در این حالت عملاً سیستم‌های آب‌بندی پی، دیگر نقشی در کاهش نشت آب از پی سد ندارند. در این تحقیق طبق رسوبات وارده در هر نیمسال، برای ۵ سال اولیه بهره برداری از سد، مدلسازی توسط $seep/w$ برای سد خاکی ارداک انجام شد و تحلیل برای سه حالت وجود دیوار آب بند و رسوب، وجود دیوار آب بند و بدون رسوب، و بدون دیوار آب بند و با رسوب انجام و با یکدیگر مقایسه شد. با تحلیل و اندازه گیری مقادیر نشت در دو حالت وجود دیوار آب بند و وجود رسوب و وجود دیوار آب بند و عدم وجود رسوب مشخص شد که انباشت رسوبات پشت سد باعث حدود ۵۸ درصد کاهش نشت در حالت با آب بند و با رسوب در مقایسه با عدم وجود رسوب می شود. همچنین باتوجه به نتایج به دست آمده از تحلیل در نرم افزار و هزینه های ساخت دیوار آب بند و مقدار آب نشت یافته از پی سد، با فرض هدر رفت تمامی آب نشت یافته از پی در حالت بدون آب بند و وجود رسوب و با در نظر گرفتن قیمت آب ۱۰۰۰ تومان برای هر متر مکعب و مقایسه هزینه ها با یکدیگر مشخص شد که با حذف دیوار آب بند حدود ۴/۹۱۸ میلیارد تومان ذخیره می شود.

کلمات کلیدی: نشت، رسوب‌گذاری، سد خاکی ارداک، دیوار آب بند، $seep/w$

مقاله مستخرج از پایان نامه

ضیایی, سیده مریم و احمد احمدی, ۱۳۹۵, بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد علویان با استفاده از روش کاهش سطح, مدل Gstar3 Mike3, پانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران, قزوین, انجمن هیدرولیک ایران, دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول : کلیات.....
۲	۱-۱- مقدمه:.....
۳	۱-۲- ضرورت و اهداف تحقیق.....
۵	۱-۳- روش تحقیق.....
۵	۱-۴- ساختار پایان نامه:.....
۷	فصل دوم : مفاهیم اولیه و پیشینه تحقیق.....
۸	۲-۱- مقدمه.....
۸	۲-۲- سدهای خاکی و سنگریزه ای.....
۸	۲-۲-۱- تعریف.....
۸	۲-۲-۲- دلایل استفاده روزافزون از سدهای خاکریزه ای.....
۹	۲-۳- تراوش در سدهای خاکی.....
۱۰	۲-۳-۱- تحلیل جریان.....
۱۵	۲-۴- روش های کاهش تراوش آب از داخل فونداسیون سد خاکی.....
۱۵	۲-۴-۱- دیوار جداکننده یا نفوذناپذیر.....
۲۲	۲-۴-۲- سپر کوبی فلزی.....
۲۳	۲-۴-۳- پتوهای نفوذناپذیر در بالادست.....
۲۳	۲-۵- چاه های زهکش.....
۲۴	۲-۶- رسوب گذاری در سدها.....
۲۴	۲-۶-۱- مقدمه.....
۲۵	۲-۶-۲- فرایند رسوب گذاری در مخازن.....
۲۶	۲-۷- مطالعات پیشین.....
۳۱	فصل سوم : معرفی نرم افزار SEEP/W.....
۳۲	۳-۱- مقدمه.....
۳۲	۳-۲- معادله لاپلاس.....
۳۴	۳-۳- نرم افزار Geostudio.....
۳۵	۳-۳-۱- مدل سازی عددی در نرم افزار Geostudio.....
۳۵	۳-۴- حل عددی حرکت آب در خاک با مدل عددی seep/w.....
۳۵	۳-۴-۱- مقدمه.....
۳۶	۳-۴-۲- معرفی نرم افزار seep/w.....
۳۸	۳-۴-۳- ابزارهای تنظیم نمای دید.....
۳۹	۳-۴-۴- انتخاب نوع تحلیل و معیارهای همگرایی.....
۴۰	۳-۴-۵- تعریف خصوصیات فیزیکی مدل با استفاده از منوی keyin.....

۴۴	۳-۴-۶-ترسیم هندسه مدل.....
۴۶	۳-۴-۷- اختصاص دادن Material به ناحیه.....
۴۶	۳-۴-۸-مش بندی.....
۴۷	۳-۴-۹- اختصاص شرایط مرزی.....
۴۸	۳-۴-۱۰- قرائت و اندازه گیری دبی.....
۴۹	۳-۴-۱۱- اجرای مدل.....
۴۹	۳-۴-۱۲- مشاهده نتایج.....
۵۱	۳-۵- بررسی صحت و دقت عملکرد نرم افزار.....
۵۵	فصل چهارم: روش تحقیق و مدل سازی سد.....
۵۶	۴-۱- مقدمه.....
۵۶	۴-۲- معرفی سد ارداک.....
۵۶	۴-۲-۱- کلیات پروژه سد ارداک.....
۵۷	۴-۲-۲- سیمای کلی طرح.....
۵۹	۴-۲-۳- محل و موقعیت طرح.....
۵۹	۴-۲-۴- راه های دسترسی به طرح.....
۶۱	۴-۲-۶- رواناب.....
۶۳	۴-۲-۶- رسوب.....
۶۳	۴-۲-۷- بدنه سد.....
۶۴	۴-۲-۸- آب بندی و تحکیم پی و جناحین سد.....
۶۵	۴-۲-۹- منابع قرضه و مصالح سد.....
۶۸	۴-۲-۱۰- مشخصات سطح و حجم مخزن سد.....
۷۰	۴-۳- محاسبات.....
۷۵	۴-۳-۱- محاسبه متوسط رسوب و متوسط حجم آب.....
۷۸	۴-۳-۲- محاسبات مربوط به حجم و ارتفاع رسوبات و آب و نیز طول رسوبات در امتداد رودخانه.....
۸۰	۴-۳-۳- نفوذپذیری اشباع مصالح.....
۸۲	۴-۴- مدل سازی در نرم افزار.....
۸۲	۴-۴-۱- مدل سازی سد با حضور آب بند و بدون رسوب.....
۸۹	۴-۴-۲- مدل سازی سد بدون آب بند و حضور رسوب.....
۹۰	۴-۴-۳- مدل سازی سد با حضور آب بند و حضور رسوب.....
۹۱	۴-۴-۴- مدل سازی سد با حضور آب بند و بدون حضور رسوب.....
۹۳	فصل پنجم: نتایج و بحث.....
۹۴	۵-۱- مقدمه.....
۹۴	۵-۲- مدل سازی با حضور آب بند و بدون رسوب.....
۹۶	۵-۳- مدل سازی بدون آب بند و با وجود رسوب.....
۹۸	۵-۴- مدل سازی با حضور آب بند و حضور رسوب.....
۱۰۰	۵-۵- جمع بندی نتایج حاصل از نشت پی در سه حالت.....
۱۰۳	۵-۶- مطالعات اقتصادی.....
۱۰۳	۵-۶-۱- هزینه ساخت دیوار آب بند.....

۱۰۴	۵-۶-۲- قیمت آب.....
۱۰۴	۵-۷- تجزیه و تحلیل و نتیجه گیری.....
۱۰۹	فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۱۱۰	۶-۱- مقدمه.....
۱۱۱	۶-۲- جمع بندی و نتیجه گیری.....
۱۱۲	۶-۳- پیشنهادات برای توسعه تحقیق.....
	مراجع.....
۱۱۳	

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۲) مقطع عرضی سد.....	۱۴
شکل (۲-۲) المان بندی سد.....	۱۵
شکل (۳-۲) قسمت بزرگ نمایی شده شبکه اجزا محدود.....	۱۵
شکل (۴-۲) سد CHAFFEY-ترانشه آب بند غلتک کاری شده.....	۱۶
شکل (۵-۲) مراحل اجرای دیوار جداکننده بتنی.....	۱۷
شکل (۶-۲) نحوه اجرای دیوار جداکننده خاکی.....	۱۸
شکل (۷-۲) محدوده دانه بندی خاکریز دیوار جداکننده خاکی در سد خانکوبان.....	۱۸
شکل (۸-۲) ترتیب اجرای دیوارهای ساخته شده با ملات دوغاب.....	۱۹
شکل (۹-۲) رابطه میان نوع خاک پی و نوع دوغابی که می توان در آن تزریق نمود.....	۲۰
شکل (۱۰-۲) جزئیات اصولی لوله تزریق به روش منچتر.....	۲۱
شکل (۱۱-۲) جزئیات دیوار سپرکوبی شده در سد سويفت- آمریکا.....	۲۳
شکل (۱۲-۲) پتوی ناتراوا در بالادست سد.....	۲۳
شکل (۱۳-۲) نمای شماتیک رسوب گذاری در مخزن سد.....	۲۵
شکل (۱-۳) منوی SET.....	۳۸
شکل (۲-۳) صفحه نمایش برنامه SEEP/W.....	۳۹
شکل (۳-۳) تعیین نوع تحلیل تراوش از پنجره ANALYSIS TYPE و انتخاب اعداد سعی و خطا.....	۴۰
شکل (۴-۳) تعریف مصالح.....	۴۱
شکل (۵-۳) معرفی مصالح در حالت اشباع.....	۴۲
شکل (۶-۳) جعبه KEYIN MATERIAL برای خاک اشباع/غیراشباع.....	۴۳
شکل (۷-۳) جعبه CONDUCTIVITY FUNCTION.....	۴۳
شکل (۸-۳) تعریف مشخصات خاک غیر قابل نفوذ.....	۴۴
شکل (۹-۳) منوی DROW REGIONS برای مشخص کردن ناحیه بین نقاط به صورت دستی.....	۴۵
شکل (۱۰-۳) جعبه DROW MATERIALS و اختصاص مصالح به ناحیه ها.....	۴۶
شکل (۱۱-۳) پنجره MESH PROPERTIES از نوار DROW برای مش بندی.....	۴۷
شکل (۱۲-۳) اختصاص شرایط مرزی هیدرولیکی.....	۴۸
شکل (۱۳-۳) تعریف شرایط مرزی هیدرولیکی.....	۴۸
شکل (۱۴-۳) رسم FLUX SECTION با استفاده از نشانگر موس.....	۴۹
شکل (۱۵-۳) منوی DROW CONTOURS برای انتخاب کنتورها.....	۵۰
شکل (۱۶-۳) پنجره DROW GRAPH برای رسم نمودارهای مختلف.....	۵۱
شکل (۱۷-۳) مقطع سد خاکی همگن.....	۵۲
شکل (۱۸-۳) مشخصات مقطع سد خاکی همگن.....	۵۳
شکل (۱۹-۳) مدل تحلیل شده توسط نرم افزار.....	۵۳
شکل (۲۰-۳) دبی خروجی در مقطع SEEPAGE FACE.....	۵۴

- شکل (۳-۲۱) مقدار SEEPAGE FACE ارائه شده توسط نرم افزار ۵۴
- شکل (۴-۱) سیمای کلی طرح ارداک ۵۸
- شکل (۴-۲) موقعیت راه های دستیابی به محل طرح ارداک ۶۰
- شکل (۴-۳) مقطع عرضی سد و مصالح آن ۶۴
- شکل (۴-۴) پوش دانه بندی مصالح ریزدانه و درشت دانه سد ارداک ۶۶
- شکل (۴-۵) پوش دانه بندی مصالح لایه های فیلتر، زهکش، لایه محافظ پوسته و لایه های انتقالی سد ارداک ۶۷
- شکل (۴-۶) نمودارهای حجم و سطح بر حسب ارتفاع سد ارداک ۶۹
- شکل (۴-۷) مقطع عرضی مرکزی و جناحین سد ارداک ۷۳
- شکل (۴-۸) برش زمین شناسی در امتداد محور سد ارداک ۷۴
- شکل (۴-۹) منحنی میزان ارتفاع رسوب و مجموع آب و رسوب در محل سد ۸۰
- شکل (۴-۱۰) ترسیم خطوط بین نقاط و ناحیه بندی در نرم افزار ۸۳
- شکل (۴-۱۱) معرفی خصوصیات مصالح اشباع در مدل سازی ۸۴
- شکل (۴-۱۲) معرفی مشخصات مصالح اشباع/غیراشباع با استفاده از اندازه ذرات در مدل عددی ۸۵
- شکل (۴-۱۳) اختصاص دادن مصالح به ناحیه ها در مدل عددی ۸۶
- شکل (۴-۱۴) انجام مش بندی در مدل ۸۷
- شکل (۴-۱۵) ترسیم شرایط مرزی در مدل ۸۸
- شکل (۴-۱۶) تعیین مقطع اندازه گیری دبی در مدل ۸۹
- شکل (۴-۱۷) تحلیل مقطع ۱ در نیمسال ۱ سال اول حالت بدون آب بند و وجود رسوب ۹۰
- شکل (۴-۱۸) تحلیل مقطع ۲ در نیمسال ۱ سال اول حالت بدون آب بند و وجود رسوب ۹۰
- شکل (۴-۱۹) تحلیل مقطع ۱ در نیمسال ۱ سال اول در حالت با وجود آب بند و رسوب ۹۱
- شکل (۴-۲۰) تحلیل مقطع ۱ در نیمسال ۱ سال اول در حالت با وجود آب بند و بدون رسوب ۹۲
- شکل (۵-۱) نمودار تغییرات نشت از پی در دو حالت با اب بند با رسوب و بدون رسوب در ۵ سال اول ۱۰۱
- شکل (۵-۲) نمودار تغییرات نشت از پی در حالت بدون اب بند با رسوب در ۵ سال اول ۱۰۲
- شکل (۵-۳) نمودار تغییرات نشت نسبت به نشت اولیه ۱۰۲

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲) متوسط رسوب گذاری سالانه در مخازن سدها در برخی کشورها.....	۲۵
جدول (۱-۴) مشخات مخزن سد خاکی ارداک.....	۵۷
جدول (۲-۴) رواناب ۵۰ ساله سد ارداک.....	۶۲
جدول (۳-۴) سطح و حجم مخزن سد.....	۶۸
جدول (۴-۴) محاسبه حجم رسوب و حجم آب.....	۷۷
جدول (۵-۴) ارتفاع رسوب و آب و طول رسوب.....	۷۹
جدول (۶-۴) مقدار نفوذپذیری مصالح.....	۸۱
جدول (۷-۴) تغییرات ضریب نفوذپذیری در رسوبات آبرفتی.....	۸۱
جدول (۱-۵) نتایج تحلیل مدل در پنج سال با حضور آب بند و بدون رسوب.....	۹۴
جدول (۲-۵) نتایج مدل سازی در پنج سال اول با وجود رسوب و بدون آب بند.....	۹۶
جدول (۳-۵) نتایج تحلیل در سال اول با وجود رسوب و آب بند.....	۹۸
جدول (۴-۵) مجموع نتایج حاصل از تحلیل مدل.....	۱۰۰
جدول (۵-۵) هزینه ساخت دیوار آب بند.....	۱۰۳

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه:

کشور ایران روی بخش نسبتاً خشک کره زمین قرار دارد. برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده از منابع موجود آب امری حیاتی محسوب می‌شود و مهار سیلاب‌ها و آب‌های جاری به کمک احداث سد (سازه‌هایی به منظور ذخیره سازی آب برای مقاصد مختلف)، از امور زیر بنایی در رشد و توسعه ایران به شمار می‌رود. آب ذخیره شده در پشت سد به دلیل بار هیدرولیکی، همواره در پی یافتن راهی برای نفوذ از پی، جناحین یا بدنه سد می‌باشد. این عامل سبب می‌شود که یک جریان فعال از درون لایه های پی و بدنه سدهای خاکی نفوذ کرده و به طرف پایین‌دست، نشت پیدا کند. بروز این تراوشات در سد اجتناب ناپذیر است، اما می‌بایست طوری مهار شود تا اولاً در مدت ۱۰۰-۵۰ سال بهره برداری سد، نتواند به پایداری و ایمنی سد لطمه ای بزند، ثانیاً حجم بالای تراوشات، توجیهات اقتصادی طرح را زیر سوال نبرد. این موضوع نه تنها برای بدنه سد بلکه برای پی و سطح اتصال بین سد و پی نیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. با وجود تمام پیشرفت های صورت گرفته در علم مهندسی ژئوتکنیک، معضل تراوش تا امروز اصلی ترین مشکلی است که در سد ها بروز میکند. در طول تاریخ موارد متعددی از مشکل افزایش، در سدهای مختلف مشاهده شده است. در برخی مواقع به دلیل عدم مطالعات و تحقیقات کافی و عدم به کارگیری روش‌های مناسب طراحی، بسیاری از سدهای ساخته شده با مشکل تراوش غیر پیش‌بینی شده مواجه می‌شوند. در اینگونه موارد فرایند اصلاح و ترمیم جهت معضل تراوش به کار گرفته می‌شود. اجرای پرده آب‌بند تزریقی، احداث پوشش نفوذناپذیر بالادست، اضافه نمودن زهکش و... از جمله موارد ممکن در کاهش تراوش به شمار می‌روند.

۱-۲- ضرورت و اهداف تحقیق

آببندکردن پی در سدهای خاکی، از مسائلی است که ضمن صرف زمان قابل ملاحظه با مشکلات و هزینه‌های سنگین اجرایی روبروست. این در حالی است که پخش رسوب در مخازن سدهای خاکی، خود باعث کاهش تدریجی نفوذپذیری کف و لذا کاهش تدریجی نشت آب می‌گردد. می‌توان حدس زد که پس از چندسال، مقدار نشت به حد غیر قابل ملاحظه برسد و عملاً آب بندی پی، دیگر تاثیر چندانی نداشته باشد. این امر تابعی از میزان آورد رسوب در سال های مختلف می‌باشد، لذا یک سوال مطرح می‌شود که آیا در یک سد خاکی معین می‌توان از آببند کردن اولیه پی صرف نظر نمود و اجازه داد تا مقداری آب از پی نشت کند و این مقدار به صورت طبیعی و با وارد شدن رسوبات کاهش یابد؟

هدف از انجام این پایان‌نامه، محاسبه میزان نشت آب از فونداسیون سد خاکی ارداک و تغییرات آن در طول چند سال اولیه با توجه به پخش رسوب، ضخامت آن و به تبع، تغییرات نفوذپذیری کف مخزن در دو حالت با و بدون دیوار آب بند و مقایسه آنها با یکدیگر می باشد که توسط نرم افزار seep/w انجام می شود. بدیهی است در این مقایسه، ضمن در نظر گرفتن هزینه دیوار آببند، مساله هدر رفت آب از پی در طول سال های اولیه، امکان و یا عدم امکان استفاده از آن در آبخوان های پایین دست سد، مدنظر قرار خواهد گرفت. به عبارتی، خروج آب از پی در سال های اولیه با هزینه های آببند کردن پی، مشکلات اجرایی و زمان لازم برای آن، مقایسه شده و معین می‌گردد که آیا می توان از آببند کردن پی سد خاکی مذکور صرف نظر نمود یا ضروری است که این هزینه های سنگین انجام پذیرد و زمان قابل ملاحظه ای به آن اختصاص یابد. لذا سوالات اساسی زیر و پیش فرض های مربوط، مطرح می شود:

۱- چرا در این تحقیق برای کاهش نشت، از تاثیر رسوبات برای جایگزینی دیوار آب‌بند استفاده شده است؟

با توجه به هزینه‌های سنگین احداث دیوار آب‌بند و از طرفی غیر قابل اجتناب‌پذیر بودن وجود و انباشته شدن رسوبات در پشت سد در سال‌های بهره‌برداری سد، ممکن است به تدریج نشت از فونداسیون کم شود و عملاً بعد از مدتی، آب‌بند تاثیر چندانی نداشته باشد که به این ترتیب ممکن است بتوان از هزینه‌های سنگین ساخت دیوار آب‌بند جلوگیری کرد.

۲- در این تحقیق مدل‌سازی در نرم‌افزار برای رواناب و رسوبات فقط در چند سال اولیه استفاده شده است. چرا؟

پیش‌بینی می‌شود که عموماً در حدود ۵ سال اولیه، مقدار رسوبات وارد شده به مخزن سد به اندازه‌ای باشد که به صورت قابل ملاحظه‌ای میزان نشت از پی را کاهش دهد، لذا مقدار نشت در این سال‌های اولیه محاسبه می‌گردد. بدیهی است محاسبات نشان خواهد داد که آیا زمان در نظر گرفته شده کافی است یا اضافه و یا کم می‌باشد.

۳- چرا در این تحقیق برای مدل‌سازی از نرم‌افزار seep/w استفاده شده است؟

اگر خواسته باشیم نتایج آنالیز به طور فیزیکی و واقعی باشند لازم است که در مدل‌سازی آب زیر زمینی، جریان غیراشباع نیز در نظر گرفته شود و در خاک‌ها، ضریب هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از فشار آب منفذی یا میزان رطوبت خاک تغییر می‌کند. نرم‌افزار seep/w علاوه بر توانایی‌های متعدد دیگر، این روابط را به صورت تابع پیوسته‌ای مدل‌سازی می‌کند، در حالتی که اکثر نرم‌افزارهای مشابه این مساله را در نظر نمی‌گیرند.

Seep/w برای محاسبات جریان اشباع و غیراشباع فرموله شده و می‌تواند مسائل مربوط به جریان‌های نامحبوس را به راحتی حل کند.

۱-۳- روش تحقیق

در این تحقیق از مدل سازی عددی و از نرم افزار seep/w که یکی از زیر مجموعه های نرم افزار GeoStudio می باشد و برای محاسبه مقادیر نشت به کار می رود، استفاده می شود. با توجه به میزان آورد رسوب، پخش آن، آورد رودخانه و برنامه ریزی منابع آب در هر سال و بلکه در هر نیمسال، ارتفاع آب و ارتفاع رسوبات در هر نیمسال از چند سال اولیه محاسبه شده و مقدار نشت آب از پی در حالت های وجود رسوبات با دیوار آب بند و بدون دیوار آب بند محاسبه می گردد. از آنجا که این محاسبات در فضای دو بعدی صورت می پذیرد، با توجه به مقطع عرضی دره، تعدادی مقطع برای سد خاکی در نظر گرفته شده و برای هر فاصله ای از عرض دره، یک مقطع به عنوان مقطع موثر انتخاب می شود، لذا مقدار نشت آب برای کل سد به دست می آید. از مقایسه میزان نشت آب از پی برای حالت های مختلف، بررسی اقتصادی هزینه های احداث پرده آب بند و هزینه های هدررفت آب در حالت بدون دیوار آب بند، معین می گردد که کدامیک ارزش اقتصادی بیشتری نسبت به دیگری دارد.

۱-۴- ساختار پایان نامه:

این پایان نامه در قالب ۶ فصل طراحی شده است که مباحث ذکر شده در فصل ها به صورت زیر می باشد

درفصل اول به کلیاتی در مورد تحقیق پرداخته و هدف از انجام آن بحث شده است.

درفصل دوم ابتدا توضیحی در مورد پدیده نشت از سدهای خاکی و رسوب گذاری در سدها داده شده است و در انتها به کارهای انجام شده در این زمینه توسط محققین پیشین پرداخته شده است.

فصل سوم ابتدا به معرفی معادله لاپلاس و حل تحلیلی آن در مساله نشت و سپس به حل عددی آن در نرم افزار اختصاص یافته، در انتها نحوه کار و مدل سازی با نرم افزار seep/w به طور مفصل تشریح و تایید عملکرد نرم افزار صورت پذیرفته است.

فصل چهارم پس از بیان و ارائه مشخصات و خصوصیات مخزن سد ارداک مقاطع انتخابی جهت مدل سازی معرفی شده و تحلیل لازم روی مقاطع یاد شده و در حالت های مختلف به کمک نرم افزار انجام شده است.

نتایج تحلیلی که از مدل سازی مقاطع در نرم افزار به دست آمده در فصل پنجم آورده شده و ضمن ارائه مسائل اقتصادی طرح، بررسی ها و تجزیه و تحلیل های لازم انجام پذیرفته است.

و نهایتاً در فصل ششم، نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات برای توسعه تحقیق، ارائه شده است.

فصل دوم

مفاهيم اوليه و پيشينه تحقيق

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی سدخاکی، تشریح مفاهیم مورد بحث اعم از نشت و رسوب، و سپس به بررسی روش‌های کنترل و کاهش دبی نشت از پی پرداخته، در ادامه مطالعات و تحقیقات انجام شده در این زمینه ارائه شده است.

۲-۲- سدهای خاکی و سنگریزه‌ای

۲-۲-۱- تعریف

سدهای ساخته شده از مصالح حاصل از خاکبرداری، بدون اضافه کردن هرگونه مصالح چسباننده مصنوعی، سدهای خاکریزه‌ای نامیده می‌شوند. در چنین سدهایی مصالح طبیعی بدون اضافه کردن هرگونه مصالح چسباننده، به صورت لایه لایه (و گاه به صورت توده) ریخته شده و توسط ماشین آلات سنگین کوبیده و متراکم گردند. ساخت چنین سدهایی بیشتر متکی بر نیروی ماشین آلات سنگین است تا نیروی کارگر.

سدهای خاکریزه‌ای^۱ به دو دسته مهم سدهای خاکی^۲ و سدهای سنگریزه‌ای^۳ تقسیم می‌شوند. سد خاکی سدی است که بیش از ۵۰ درصد مصالح آن را خاک متراکم شده تشکیل دهد. سد سنگریزه‌ای، بیش از ۵۰ درصد مصالح به کار رفته، مصالح سنگی درشت‌دانه است [۱].

۲-۲-۲- دلایل استفاده روزافزون از سدهای خاکریزه‌ای

^۱ - Embankment dam

^۲ -Earth dam

^۳ -Rockfill dam

دلایل متعددی برای استفاده از سدهای خاکریزه‌ای وجود دارد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. مناسب بودن برای دامن‌های وسیعی از عرض دره از دره‌های عریض تا گلوگاه‌های با شیب‌های دامن نسبتاً تند

۲. مناسب بودن برای طیف وسیعی از وضعیت شالوده از بستر سنگی تا نهشته‌های نرم با قابلیت فشردگی یا خاک نسبتاً نفوذپذیر

۳. امکان استفاده از مصالح طبیعی که از منابع قرضه‌ی نزدیک محل به دست می‌آید.

۴. قابلیت انعطاف طراحی برای انواع مختلف مصالح از مصالح خاکی تا مصالح سنگی

۵. قابلیت ماشینی کردن عملیات اجرایی

۶. عدم نیاز به تکنولوژی و مهارت‌های نسبتاً بالا جهت اجرا

و.....[۱]

با توجه به دلایل بالا و اینکه سدهای خاکی امروزه زیاد به کار می‌روند، مهندسان و محققان بررسی زیادی روی این سدها انجام داده‌اند. که در ادامه به دو بحث مهم نشت و رسوب‌گذاری در این گونه سد ها و پژوهش‌های انجام شده توسط محققان و مهندسان پرداخته می‌شود.

۲-۳- تراوش^۴ در سدهای خاکی

آبی که در پشت یک سد خاکی یا سنگریزه‌ای ذخیره شده است به علت اختلاف بار آبی که در دوطرف سازه‌های آبی احداث شده روی پی‌های نفوذپذیر وجود دارد، به طور دائم از داخل خاکریز سد و فونداسیون به سمت پایین دست تراوش می‌نماید. به دلایل متعددی که در ادامه بیان شده، باید فرایند نشت آب از داخل یا زیر سد، تحلیل و مورد کنترل و یا مهار قرار گیرد.

⁴ -seepage

۱. مقدار جریانی که در اثر تراوش آب از داخل بدنه‌ی سد و فونداسیون از دست می‌رود باید مشخص و در محدوده مجازی که توسط طراح یا کارفرما معین می‌گردد، باشد.

۲. توزیع فشار منفذی در داخل سد و فونداسیون باید مشخص باشد تا از این توزیع بتوان برای انجام تحلیل‌های پایداری استفاده کرد.

۳. با محاسبه شیب هیدرولیکی در نقطه‌ی خروج جریان آب را، می‌توان احتمال آب شستگی در این نقطه را مورد ارزیابی قرار داد [۲].

طراحی سدهای خاکی و خاکریزها در ابتدا تقریباً به طور کامل براساس دانش تجربی و پذیرش مقطع سدهایی بوده که دارای عملکرد خوب بوده‌اند و تنها در آنها تغییراتی با توجه به نوع خاک و فونداسیون مربوطه می‌داده‌اند. ولی امروزه به طرح علمی سدهای خاکی پرداخته می‌شود. بیشترین عامل پیشرفت تحقیقات در ارتباط با مسئله تراوش تاثیر بالای آن بر روی پایداری سدها به عنوان یکی از علل تخریب آنهاست. که برای اولین بار توسط ترزاقی^۵ به درستی توضیح داده شده است [۳].

۲-۳-۱- تحلیل جریان

جریان آب در خاک تا آنجا که مربوط به مساله تراوش در سد خاکی می‌شود، از قانون تجربی دارسی پیروی می‌کند بدین ترتیب که مقدار جریان مستقیماً به گرادیان هیدرولیکی^۶ بستگی دارد این قانون می‌تواند به یکی از شکل‌های زیر باشد:

$$v = ki \quad (1-2)$$

$$Q = ki \Delta$$

⁵ -Terzaghi

⁶ -Hydraulic Gradient

که در آن v سرعت خروج، k ضریب نفوذپذیری، Q مقدار دبی آب، A سطح مقطع جریان می‌باشد. اگر آب از میان یک توده همگن خاک به نحوی جریان یابد که حفرات خاک، کاملاً پر از آب بوده و هیچ تغییری در اندازه این حفرات به وجود نیاید، مقدار آبی که در مدت معین از یک یا چند جهت به جزء کوچکی از خاک وارد می‌شود، باید برابر مقدار آب خروجی از وجه دیگر این جزء باشد (رابطه پیوستگی). این شرط، که مبین حقیقی است که آب و خاک هر دو غیر قابل تراکم هستند، را می‌توان برای یک حالت سه بعدی با معادله زیر بیان نمود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-2)$$

این معادله به معادله پیوستگی موسوم است. در این معادله، u, v, w سه مولفه سرعت (v_0) به ترتیب در جهات x, y, z هستند. اگر $\frac{dh}{dl}$ مشخصه گرادیان هیدرولیکی در جهت جریان و $\frac{dh}{dx}, \frac{dh}{dy}, \frac{dh}{dz}$ سه مولفه آن باشند،

قانون داریسی را می‌توان با معادلات زیر مشخص نمود:

$$v_0 = k \frac{-dh}{dl}$$

$$\begin{aligned} u &= k_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ v &= k_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ w &= k_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-3)$$

با جایگزینی معادله (2-3) در معادله (2-2)، می‌توان معادله کلی جریان دائم آب از میان یک خاک غیرایزوتروپیک را به دست آورد.

⁷ - Coefficient of Permability

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4-2)$$

چنانچه k_x و k_y و k_z با یکدیگر برابر باشند، معادله تبدیل به معادله لاپلاس^۸ می شود که در واقع جریان دائم آب از میان یک خاک ایزوتروپیک را می توان از آن به دست آورد که در زیر آمده است

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (5-2)$$

لازم به ذکر است که نرم افزار در هر دو حالت قادر به حل جریان آب در خاک می باشد. در مساله تراوش در سد خاکی می توان با دقت مناسب فرض کرد که فقط با حالت دو بعدی جریان مواجه هستیم، که با حل معادله لاپلاس می توان جواب های نظری برای مساله جریان دائمی^۹ آب از داخل سد خاکی تحت این شرایط بدست آورد [۳].

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (6-2)$$

حل تحلیلی معادله لاپلاس تحت شرایط مرزی خاص بسیار مشکل می باشد، خصوصا هنگامی که مصالح مختلف و هندسه های پیچیده نیز در نظر گرفته شود. لذا برای حل معادله مربوط از روش های:

(۱) رسم شبکه جریان

(۲) استفاده از معادلات تقریبی به دست آمده از معادله داریسی

(۳) استفاده از روش های عددی همانند روش های تفاضل محدود^{۱۰} یا المان محدود^{۱۱}

(۴) استفاده از تشابه الکتریکی

^۸ - Laplace Equation

^۹ -Steady state

^{۱۰} - Finite Differences

^{۱۱} -Finite Element

(۵) استفاده از مدل های آزمایشگاهی (قیاس فیزیکی)

استفاده می شود که در میان آنها ، روش های عددی به دلیل دقت نسبتاً زیاد و در عین حال هزینه - های نسبی کم، کاربرد فراوانی دارند. در این قسمت مختصری در مورد روش المان محدود که در تحقیق حاضر نیز از آن استفاده شده است، آورده می شود.

۲-۳-۱-۱- روش المان محدود

روش المان محدود یکی از پرکاربردترین روش های عددی در زمینه مهندسی است که این روش حاصل کار الکساندر هرنیکوف^{۱۲} (۱۹۴۱) و ریچارد کورانت^{۱۳} (۱۹۴۲) می باشد. با این که روش کار این دو دانشمند کاملاً متفاوت بود، اما یک ویژگی مشترک داشت: تقسیم یک دامنه پیوسته (ماده) به یک سری زیردامنه (قطعات کوچکتر ماده) به نام المان (اجزا) بود [۴]. این روش به صورت شناخته شده امروزی وسیله ترنر^{۱۴} و همکاران (۱۹۶۵) برای استفاده در تحلیل ساختمان ارائه شد در این روش هندسه مساله با یک سری المان تقسیم می شود که در نقاط گرهی با یکدیگر ارتباط دارند و روابط تنش- کرنش تغییرشکل پذیری را می توان با تغییر در شرایط مساله تحلیل نمود. انعطاف پذیری زیاد این روش در مدل سازی ها اعمال شرایط مرزی متنوع و همچنین توسعه کدهای توانمند باعث شده که این روش یکی از پرکاربرد ترین روش های عددی است.

از روش المان محدود می توان برای حل مساله جریان در محیط های متخلخل پیچیده

استفاده نمود. بعضی از این پیچیدگی ها عبارتند از :

الف) مصالح با نفوذپذیری های مختلف یا ناهمسانگرد

ب) هندسه های پیچیده

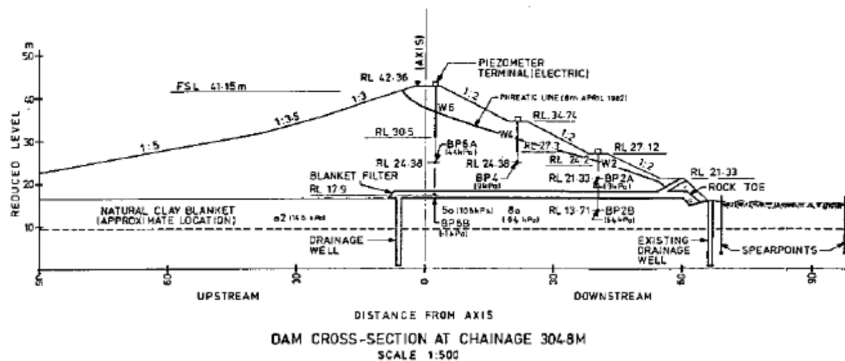
¹² -Alexander Hrennikoff

¹³ -Richard Courant

¹⁴ -Turner

پ) شرایط مرزی و آزاد متنوع

در روش اجزای محدود، هندسه مدل به المان‌های متعددی که عموماً در گره‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند، تقسیم می‌گردد. میدان هد کل در داخل ناحیه جریان با استفاده از توابع درون‌یابی در داخل هر المان تقریب زده می‌شود. این توابع مقادیر هد را در گره‌های المان درون‌یابی می‌نمایند. با حل یک دسته معادله می‌توان فشارهای منفذی و جریان عبوری از بدنه سد و فونداسیون را محاسبه نمود. میزان دقت جواب‌ها بستگی به تعداد المان‌های مورد استفاده برای تقریب زدن میدان جریان پیوسته دارد [۵].

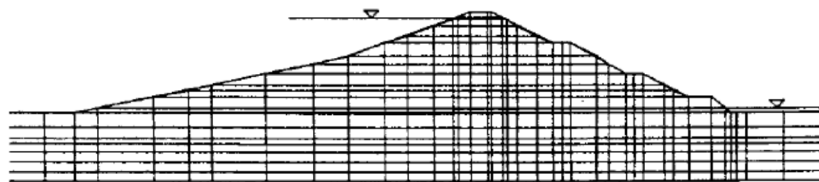


شکل (۱-۲) مقطع عرضی سد [۵]

یک نمونه از مسائلی که به راحتی می‌توان با استفاده از روش اجزای محدود حل نمود، مساله تراوش آب در داخل یک سد خاکی همانند شکل (۱-۲) می‌باشد. در این شکل، مقادیر اندازه‌گیری شده، موقعیت سطح آب آزاد (فریاتیک) و فشارهای پیزومتریک اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف نشان داده شده است. در شکل‌های (۲-۲) و (۳-۲) نوع المان‌بندی به کار رفته برای حل مساله تراوش نشان داده شده است. مرزهای جانبی باید در فاصله‌ای از خاکریز در نظر گرفته شوند که تاثیری بر جواب‌های بدست آمده و الگوی جریان آب نداشته باشند.



شکل (۲-۲) المان بندی سد [۶]



شکل (۳-۲) قسمت بزرگ نمایی شده شبکه اجزا محدود [۶]

۴-۲- روش‌های کاهش تراوش آب از داخل فونداسیون سد خاکی

در صورتی که طراحی سد به درستی انجام شده باشد، آهنگ تراوش آب از داخل بدنه سد خاکی معمولاً بسیار ناچیز است و اکثر مشکلات در اثر نشت آب از داخل پی سد به وجود می‌آیند. در ادامه روش‌های کاهش میزان تراوش آب از داخل پی سد خاکی را به اختصار مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۴-۱- دیوار جداکننده یا نفوذناپذیر^{۱۵}

دیوار جداکننده یا نفوذناپذیر می‌تواند یک یا ترکیبی از انواع ذکر شده در زیر باشد:

۲-۴-۱-۱- ترانشه‌های آب‌بند^{۱۶}

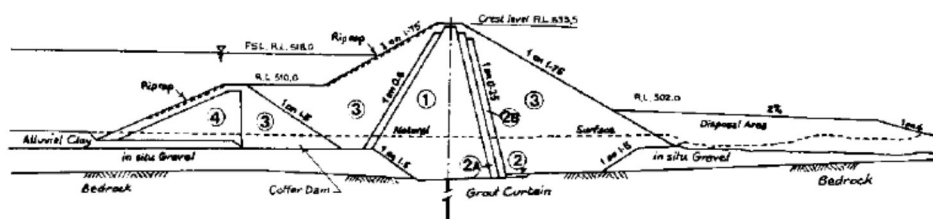
در صورتی که عمق خاک نفوذپذیر خیلی زیاد نباشد، با حفر ترانشه ای در پی سد و خارج کردن مصالح نفوذپذیر و سپس جایگزینی آن با مصالح نفوذپذیری کم می‌توان حائلی در برابر جریان آب

¹⁵ -Cut of Wall

¹⁶ -Core Trench

ایجاد نمود. عمق این ترانشه معمولاً تا سنگ بستر امتداد می یابد ولی این عمق می تواند در داخل مصالح نفوذپذیر بالاتر از سنگ بستر نیز اجرا گردد.

عمق معمول ترانشه های آب بند بین ۶ تا ۱۰ متر متغیر می باشد زیرا در اعماق بیشتر کاهش سطح آب در داخل ترانشه بسیار مشکل شده و مسائلی نیز در رابطه با پایداری دیوارهای ترانشه مطرح می گردد. در چنین مواقعی استفاده از ترانشه های آب بند بنتونیتی و یا دیگر انواع آب بند ها دارای صرفه اقتصادی بیشتری می باشند. برای جلوگیری از شسته شدن مصالح در ترانشه های آب بند غلتک کاری شده، چنانچه در شکل (۲-۴) نشان داده شده است، می توان یک ناحیه فیلتر در سمت پایین دست سد اجرا نمود [۷].



راهنمای نواحی مشخص شده روی شکل:

(1) رس شنی ناتراوا، (2, 2A, 2B) فیلترهای شن و ماسه ای، (3) سنگریز، (4) رس

شکل (۲-۴) سد Chaffey- ترانشه آب بند غلتک کاری شده [۷]

۲-۱-۴-۲ دیوار جداکننده بتنی

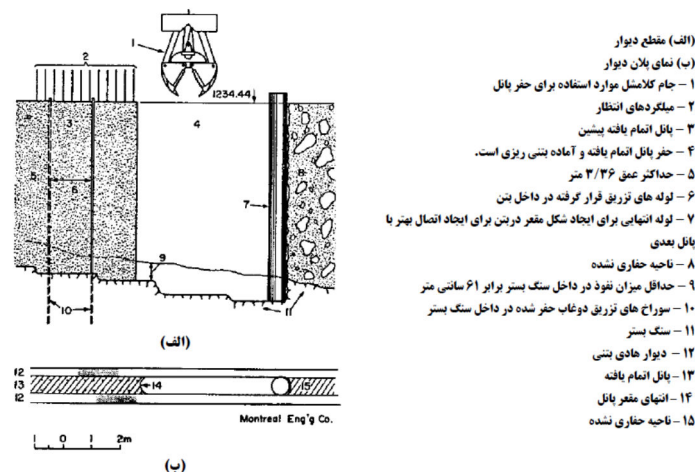
دیواره های بتنی را می توان به صورت یک ترانشه وبا استفاده از یک سری شمع های درجا که به یکدیگر همپوشانی دارند اجرا نمودند.

در شکل (۲-۵) روش اجرای دیوار بتنی نمایش داده شده است. در ابتدا دو دیوار بتنی هادی احداث می گردند و سپس با استفاده از دستگاه حفار از نوع کلامشل^{۱۷} خاک بین دو هادی برداشته می شود و در حین عملیات خاک برداری، حفره ایجاد شده با استفاده از دوغاب بنتونیت باز نگه داشته می شود.

¹⁷ - Clam shell

در انتهای حفره ایجاد شده از مهارهای استوانه‌ای یا لوله‌ای شکل استفاده می‌گردد. این کار باعث می‌شود که مقطع پانلی به شکل نیم دایره در اومده و اتصال آن با مقطع ساخته شده پیشین راحت‌تر گردد. سپس بتن با استفاده از لوله ترمی به داخل حفره ای که با استفاده از بنتونیت باز نگه داشته شده است، ریخته می‌شود. ضخامت معمول چنین دیواره‌های در حدود ۰/۶ متر می‌باشد. با چنین روشی می‌توان دیواره‌هایی تا عمق ۵۰ متر احداث نمود. گرچه برای چنین اعماق بزرگی بهتر است ضخامت دیوار در حدود ۱ تا ۱/۲ متر اجرا گردد، تا همپوشانی بین دیوارها راحت تر انجام گیرد [۸].

در حین اجرای سد، تنش‌های بسیار بالایی بر دیواره بتنی تحمیل خواهد شد، بنابراین بهتر است که دیوار در مرکز خاکریز که حرکات جانبی دارای کمترین مقدار می باشند، اجرا گردد. دیوار بتنی همچنین ممکن است در اثر اصطکاک جداری منفی ایجاد شده و در اثر نشست پی تحت وزن بدنه سد خرد گردد [۸].



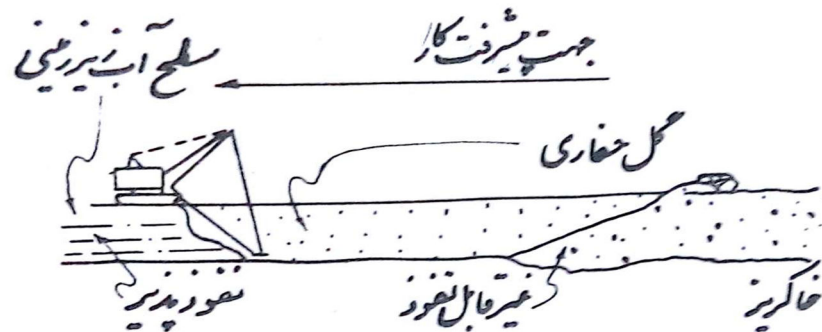
شکل (۵-۲) مراحل اجرای دیوار جداکننده بتنی [۸]

۲-۴-۱-۳- دیوار جداکننده خاکی (به کمک ترانشه و گل حفاری)^{۱۸}

در این روش یک دستگاه حفاری نظیر بیل مکانیکی یا دراگ‌لاین ترانشه‌ای را در میان خاک قابل نفوذ تا عمقی که به لایه غیرقابل نفوذ برسد، حفاری می‌نماید و برای جلوگیری از ریزش دیواره‌های ترانشه

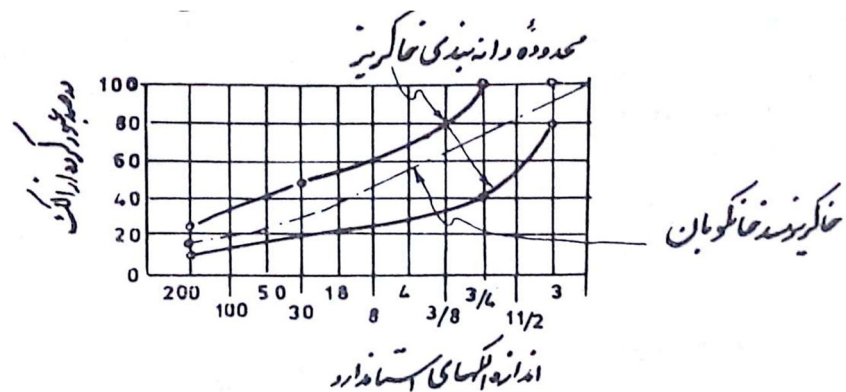
¹⁸ -Slurry wall

از گل حفاری استفاده می شود. شکل (۶-۲). بعد از آن که به طول کافی از ترانسه حفاری شد و کف آن آماده گردید، پر کردن ترانسه شروع می شود.



شکل (۶-۲) نحوه اجرای دیوار جداکننده خاکی [۳]

خصوصیات فیزیکی خاک خاکریز کاملاً کنترل شده است و به طور کلی خوب دانه بندی شده، غیر قابل نفوذ (پس از خاکریزی) و به اندازه کافی درشت دانه است تا پس از اجرای آن حداقل نشت را دارا باشد، ممکن است مقداری از گل حفاری را با این خاک مخلوط نمود تا قابلیت نفوذ خاک را تقلیل دهد. محدوده دانه بندی خاک چنین خاکریزی در شکل (۷-۲) نشان داده شده است [۳].

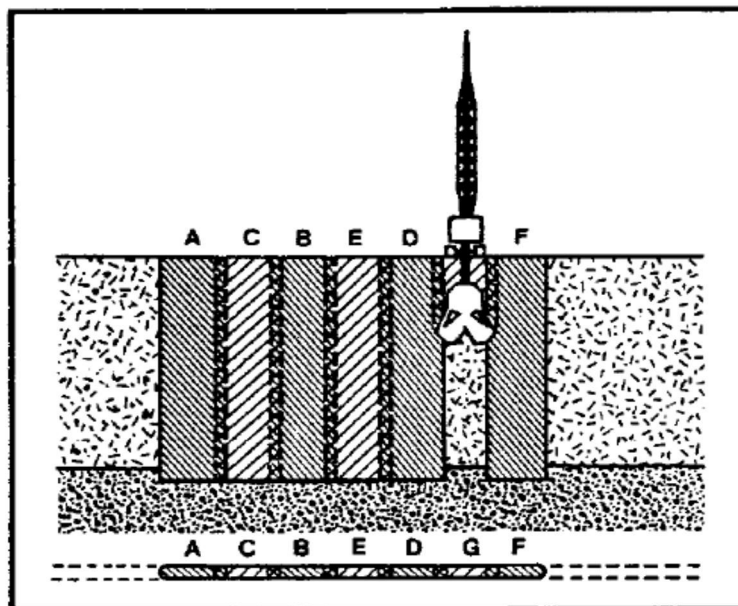


شکل (۷-۲) محدوده دانه بندی خاکریز دیوار جداکننده خاکی در سد خانکوبان [۳]

۲-۴-۱-۴- تزریق

تزریق دوغاب به داخل خاک‌های نفوذپذیر و سنگ، روش رایج و دائمی برای جلوگیری از جریان آب زیرزمینی است. البته در اغلب موارد دیواری که به این ترتیب به وجود می‌آید کاملاً نفوذپذیر نیست. روش اجرایی تزریق به صورت شماتیک در شکل (۲-۸) نمایش داده شده است [۹].

این نوع دیواره‌ها معمولاً بین ۰/۵ تا ۱/۵ متر ضخامت دارند. در این روش ترانشه توسط دوغاب بنتونیت سیمان موسوم به ملات دوغاب حفر شده و پس از اتمام مراحل حفاری ترانشه به دوغاب اجازه می‌دهد که سخت گردد. پانل‌ها به ترتیب A-B-C-D-E-F-G حفر می‌گردند به طوری که پانل‌های ثانویه قبل از سخت شدن پانل‌های اولیه حفر می‌شوند. مزیت این کار این است که بر خلاف دیوارهای بتنی درزهای اجرایی در انتهای پانل‌ها وجود نخواهند داشت. بدین ترتیب احتمال نشت در محل این درزها کم می‌شود [۱۰ و ۱۱].

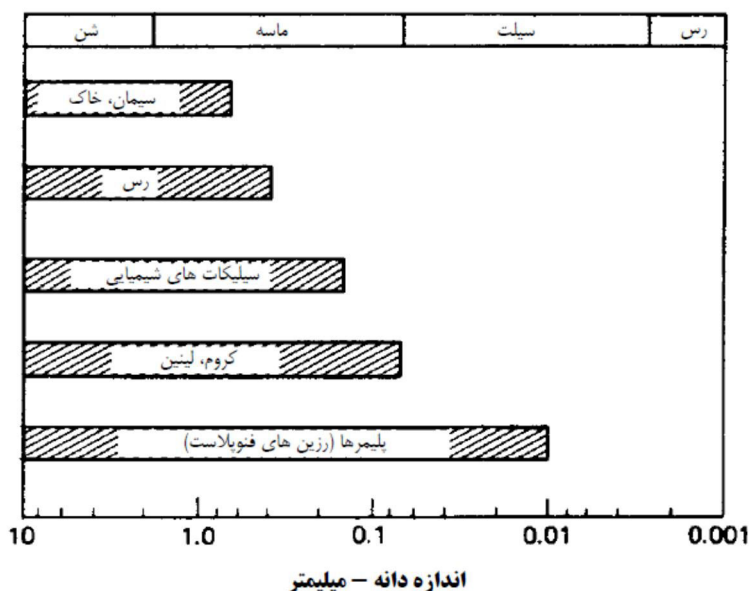


شکل (۲-۸) ترتیب اجرای دیوارهای ساخته شده با ملات دوغاب [۱۰]

الف) تزریق در لایه آبرفت

بسته به هزینه اجرا قابلیت نفوذ در داخل خاک و عملکرد دوغاب، از انواع مختلفی از دوغاب‌ها می‌توان برای انجام تزریق استفاده نمود. قابلیت نفوذ دوغاب عامل اصلی در انتخاب آن است و در دوغاب‌هایی که حاوی ذرات جامد هستند (به طور مثال سیمان و رس) اندازه نسبی ذرات تشکیل دهنده دوغاب و اندازه حفرات دارای اهمیت می‌باشد. انواع دوغاب‌ها و نوع خاک‌هایی که از دوغاب‌ها برای اجرای عملیات تزریق می‌توان در آنها استفاده نمود در شکل (۲-۹) نشان داده شده است [۱۱ و ۱۲].

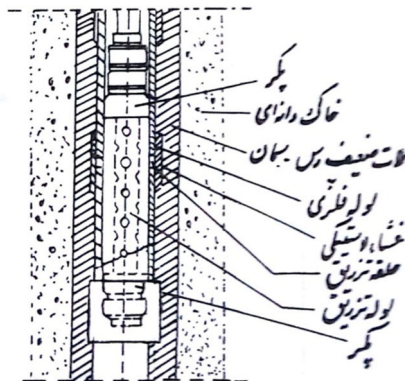
نوع خاک پی



شکل (۲-۹) رابطه میان نوع خاک پی و نوع دوغابی که می‌توان در آن تزریق نمود [۱۳ و ۱۴]

همانطور که مشاهده می‌شود برای پی‌های ماسه‌ای از تزریق سیمان - خاک و رس، پی‌های سیلتی از تزریق کروم یا پلیمرها استفاده شود.

در حال حاضر رضایت بخش ترین روش برای تزریق در نهشته های آبرفتی، روش تیوب فرانسوی منچتز^{۱۹} می باشد. شکل (۲-۱۰) عناصر این روش را نشان می دهد.



شکل (۲-۱۰) جزئیات اصولی لوله تزریق به روش منچتز^[۳]

گرچه این روش تزریقی هزینه زیادی دارد، ولی دارای این مزیت است که از همان لوله تزریق می توان برای هر زمان دلخواه برای انجام تزریق اضافی با تغییر نوع دوغاب استفاده نمود. آبرفت هایی از جنس ماسه، شن و قلوه سنگ، به همین روش تا اعماقی بیش از ۱۰۰ متر تزریق شده اند. (به طور مثال در سدهای آسوان و ترزاقی^{۲۰} [۱۴]).

ب) تزریق در سنگ:

معمولا در هنگام ساخت اکثر سدهای بزرگ لازم است که بستر سنگی قرار گرفته که در زیر تراز آب بند نیز با انجام عملیات تزریق در برابر جریان آب حفاظت گردد. در چنین مواردی عملیات تزریق شامل حفر ردیفی از حفرات است به طوری که دوغاب با فشار داخل آب تزریق می شود و این فشار در داخل آن تزریق می شود و این فشار باعث نفوذ دوغاب به داخل سنگ می گردد.

¹⁹ -Manchettes

²⁰ - Aswan and Terzaghi Dams

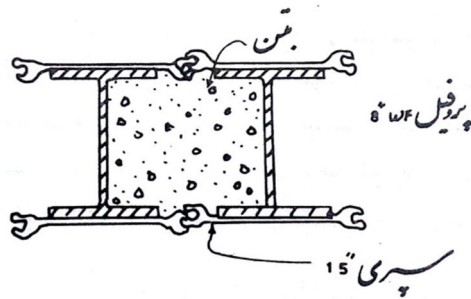
یکی از مسائل مربوط به دوغاب‌های سیمانی، آب انداختن آن‌ها می‌باشد. این مساله زمانی رخ می‌دهد تزریق به آرامی انجام گیرد یا دوغاب برای مدتی بدون حرکت باقی بماند به طوری که ذرات سیمان ته‌نشین شوند. بدین جهت دوغاب باید قبل از تزریق به طور دائم توسط دستگاه همزن همزده شود. در صورتی که نفوذ پذیری سنگ کم باشد، سرعت تزریق هرچه به انتهای فرآیند تزریق نزدیک می‌شویم کاهش می‌یابد. در این حالت تزریق باید تا جایی ادامه یابد که آب اضافی ناشی از آب انداختن که به سطح آمده است با دوغاب تازه جایگزین گردد.

۲-۴-۲- سپر کوبی فلزی

استفاده از سپر کوبی فلزی در گذشته رونق بسیار داشت ولی امروزه استفاده از آن کاهش یافته است. دلیل این مساله این حقیقت است که سپر کوبی تاثیر محدودی در جلوگیری از وقوع نشت داشته (به علت عبور جریان از بین درزهای سپرها) و عملیات سپرکوبی می تواند باعث آسیب دیدن و اعوجاج سپر گردد [۱۴]. در عین حال هزینه های نسبتا بالای آنها، عموما مانع استفاده از این روش می شود. بنابراین تازمانی که می توان از روش های دیگر کنترل تراوش که ارزان تر نیز هستند استفاده نمود ، به کار گیری روش سپر کوبی چندان مناسب نیست [۳].

در شکل (۲-۱۱) روش سپرکوبی در سد سویفت^{۲۱} آمریکا نشان داده شده است.

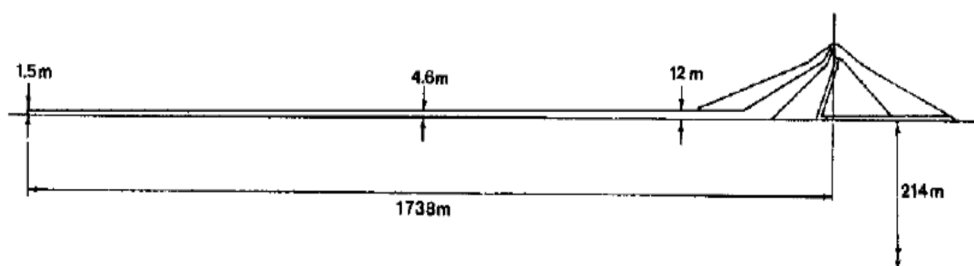
²¹ -Swift



شکل (۱۱-۲) جزئیات دیوار سپرکوبی شده در سد سویت-آمریکا [۳]

۲-۴-۳- پتوهای نفوذناپذیر در بالادست

در صورتی که احداث آببند بسیار هزینه بر باشد، (به طور مثال به دلیل وجود لایه آبرفت عمیق) با احداث یک پتوی ناتراوا در بالادست سد می‌توان میزان افت جریان تراوش در داخل فونداسیون را کاهش داد. سد تاربلا در پاکستان که مقطع عرضی آن در شکل (۱۲-۲) نشان داده شده است به چنین روشی احداث گردیده است. هدف از احداث پتو، افزایش طول مسیر تراوش آب در داخل فونداسیون است به طوری که شیب های هیدرولیکی کاهش یافته و بنابراین میزان افت جریان نیز تقلیل می یابد [۱۴].



شکل (۱۲-۲) پتوی ناتراوا در بالادست سد [۱۴]

۲-۵- چاه های زهکش

چاه‌هایی که نقش آزاد کننده فشار آب را دارند روش کمکی مهمی است که اغلب همراه سایر روش‌های کنترل تراوش داده می‌شود. این چاه‌ها نه تنها، تقریباً در همه موارد همراه پوشش غیرقابل

نفوذ بالادست استفاده می‌شوند، بلکه همراه با سایر روش‌ها به منظور اطمینان کافی و جلوگیری از عدم ایجاد فشار هیدرواستاتیکی زیاد در پایین دست که ممکن است منجر به آب‌بردگی و شستن دانه‌ها گردد، مورد استفاده قرار گیرند. این چاه‌ها همچنین میزان تراوش و جریان کنترل نشده در پایین دست سد را کاهش می‌دهند و در نتیجه ایجاد و یا خروج آب از چشمه‌ها را کنترل می‌نمایند. تراوش کنترل نشده ممکن است موجب خسارات فراوانی گردد که با احداث چاه‌های زهکش شاید بتوان از وقوع این خسارات جلوگیری به عمل آورد [۳].

۲-۶- رسوب گذاری در سدها

۲-۶-۱- مقدمه

احداث سد در عرض رودخانه، از طریق کاهش سرعت و ظرفیت حمل رسوبات جریان، رژیم رودخانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این تاثیر سبب می‌شود حجم عظیمی از رسوبات در مخزن ته‌نشین شوند و از حجم مفید مخزن بکاهند. در مناطق خشک و نیمه خشک، به خاطر ضعف پوشش گیاهی، در بارش‌ها فرسایش خاک بیشتر و کاهش عمر مفید مخازن شدیدتر است. همچنین یافتن مکانی مناسب برای احداث سد مخزنی جدید که قابلیت ذخیره میزان قابل توجهی آب را همراه داشته باشد، بسیار مشکل و رو به کاهش است. از این رو رسوب‌گذاری و کاهش حجم مخازن به عنوان یک مشکل مهندسی و زیست محیطی مطرح است.

آمار نشان می‌دهد که مجموع ذخیره مخازن سدها در سطح جهان در حدود ۷۰۰ میلیارد متر مکعب بوده که از این مقدار سالیانه به طور میانگین ۰/۵ تا ۱ درصد به علت رسوب‌گذاری از بین می‌رود [۱۵].

جدول (۲-۱) متوسط نرخ رسوب گذاری را در برخی از کشورها نشان می‌دهد.

محدوده نرخ رسوب‌گذاری سالانه در ایران ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد تخمین زده می‌شود [۱۶].

در کشور ایران، طبق آمار وزارت نیرو در انتهای سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰، تعداد ۳۲۰ سد با مجموع حجم مخزنی ۴۲ میلیارد متر مکعب در حال بهره برداری بود [۱۵]. با احتساب مجموع حجم

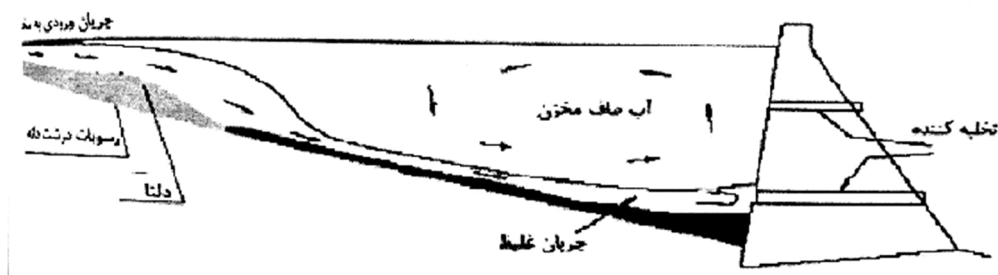
مخازن ۴۲/۶ میلیارد مترمکعب و نرخ رسوبگذاری متوسط ۰/۶۵ درصد در ایران، سالانه معادل ۲۷۷ میلیون مترمکعب رسوب وارد سدهای کشور می‌شود.

جدول (۱-۲) متوسط رسوب گذاری سالانه در مخازن سدها در برخی کشورها [۱۶]

کشور	متوسط نرخ رسوب گذاری سالانه، %
چین	۲/۳
ترکیه	۱/۵
هندوستان	۰/۷۲
ایران	۰/۶۵
مراکش	۰/۴۵
امریکا	۰/۲۲
ژاپن	۰/۱۵

۲-۶-۲- فرایند رسوب گذاری در مخازن

ساز و کار رسوب گذاری در مخزن به این صورت است که در هنگام رسیدن جریان رودخانه حاوی رسوبات به مخزن، سرعت جریان به شدت کاهش یافته به طوری که ظرفیت حمل آن کاهش می‌یابد و در نتیجه رسوبات درشت‌دانه در ابتدای بالادست مخزن ترسیب کرده و یک دلتا تشکیل می‌دهند. رسوبات ریزدانه همراه جریان به نزدیکی بدنه سد منتقل شده و در آنجا ترسیب می‌کنند. با توجه به روند رسوب گذاری مذکور، سه ناحیه مجزا، به لحاظ پروفیل طولی رسوب گذاری در مخزن، قابل تشخیص است که در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است [۱۷].



شکل (۲-۱۳) نمای شماتیک رسوب گذاری در مخزن سد [۱۷]

۷-۲- مطالعات پیشین

همانطور که گفته شد محققین زیادی برای جلوگیری از نشت، چه از درون بدنه و چه از پی سدها، مطالعاتی انجام داده‌اند و اکثراً نظر به احداث پرده آب‌بند برای جلوگیری از نشت از فونداسیون سد خاکی داشته‌اند. مطالعات انجام شده عمدتاً بر اساس تحلیل ریاضی و آنالیز عددی مسائل نشت استوار بوده است. از طرفی برای پدیده رسوب‌گذاری در مخازن سد ها محققین بسیاری برای حذف رسوب از مخازن با ایجاد مخازن رسوب‌گیر و... مطالعاتی انجام داده‌اند. اما تا کنون برای استفاده از رسوب در جهت حذف یا کاهش عمق پرده آب‌بند مطالعات زیادی انجام نشده است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود.

اولین مطالعات انجام شده در مورد بهینه سازی جریان نشتی از پی سدهای خاکی توسط ترزاقی انجام گرفته است. وی با آنالیز نشت حاصله از بدنه و پی سدهای خاکی با توجه به ضریب نفوذپذیری مصالح متشکله نتایج خویش را ارائه داد. نتیجه کار ایشان به این صورت بود که هرچه نسبت نفوذپذیری هسته نسبت به پی و پوسته کمتر باشد، نشت حاصله کاهش می‌یابد [۱۸].

حسین خلیلی شایان و تکلدانی (۱۳۹۱)، به بررسی نیروی زیر فشار، گرادیان خروجی، دبی نشت در شرایط حضور یک دیوار سپری و بلانکت در بندهای انحرافی پرداختند و معادلات بدون بعد برای تغییرات عمق پرده آب بند و فاصله از مبدا را ارائه نمود.

صدقی اصل و همکاران [۲۰] در سال ۱۳۸۴، اثر موقعیت بهینه پرده آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار دادند و موقعیت بهینه دو پرده آب‌بند و زهکش را در زیر سد نشان داده شده و روابطی برای نسبت دبی نشت در حالت وجود دیوار آب‌بند به عدم حضور آن ارائه نمودند.

همچنین در سال ۱۹۷۰ نیومن و ویتerspون^{۲۲} [۲۱] نشت از پی و بدنه سدهای خاکی را به روش اجزای محدود مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده کردند که این روش قادر است تا مسائل آب زیرزمینی را به خوبی شبیه سازی نماید. اما در مقایسه با روش تفاضلات محدود از پیچیدگی های ریاضی بیشتری برخوردار است

ریچارد و ردی^{۲۳} [۲۲] (۲۰۰۷) ، به بررسی جامع پیشینه تحقیق در ارتباط با پدیده نشت آب در خاک و چگونگی وقوع پدیده پایپینگ در خاک های مختلف پرداختند. نتایج بررسی آنها نشان داد که اولین ابزارها برای طراحی سدهای خاکی برای مقاومت در برابر پدیده نشت در سال های ۱۹۱۰ تا ۱۹۳۵ توسعه پیدا کرد.

پاکباز^{۲۴} و همکاران [۲۳] نیز در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مدل $seep/w$ به ارزیابی ساخت دیوار آب بند بتن پلاستیک در تکیه گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که با ساخت دیوار آب بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می یابد.

نعیمی و همکارانش [۲۴] (۱۳۹۰) ، به بررسی میزان تأثیر دیوار و پرده آب بند بر کاهش نشت با افزایش عمق نفوذ در محور و تکیه گاه راست سد مخزنی میرزای شیرازی به روش عددی پرداختند. در این پژوهش با توجه به اهمیت مسئله نشت و نیز به منظور نمایش جریان به صورت سه بعدی، محدوده محور و جناح راست سد توسط نرم افزار المان محدود $SEEP 3D$ مدل شده و میزان تأثیر دیوار و پرده آب بند با افزایش عمق نفوذ بر کاهش نشت مورد بررسی قرار گرفته است. پس از این محاسبه، مقدار نشت از محور و جناح راست سد در طول یک سال ۲۲۵۴۸۲۴۰ متر مکعب برآورد شده که با افزایش عمق نفوذ دیوار و پرده آب بند از ۲۰ به ۳۰ متری در زیر تراز پی نشت به طور قابل ملاحظه ای کاهش

²² - Neuman and Wither Spoon

²³ - Richards and Ready

²⁴ -Pakbaz

می‌یابد که با استفاده از تمهیدات بکار رفته دیوار و پرده آب‌بند، میزان نشت در طول یک سال به ۴۴۱۵۰۴۰ متر مکعب می‌رسد و حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

صدقی اصل و همکاران [۲۵] به بررسی عوامل مؤثر بر نشت از پی دایک‌های ساحلی در سال ۲۰۱۲ پرداختند. آنها یک مدل آزمایشگاهی به طول ۹ متر و ارتفاع و عرض یک متر را با اسکلت فولادی و جداره‌های شیشه‌ای و پلاکسی گلاس ساختند و مصالح پی را ماسه تمیز ساحلی در نظر گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت طول بهینه بلانکت و عمق پرده آب بند به عمق آب مخزن و ضخامت پی به منظور حداقل نمودن دبی نشتی و کنترل فرسایش درونی به ترتیب ۸ و ۰/۸ است.

جای^{۲۵} و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش تفاضل محدود مبتنی بر روش انتقال مختصات برازش مرزی به بررسی نشت از زیر سدها و فراز بندها به کمک معادله پواسون پرداختند.

یوسفی و همکارانش [۲۷] به بررسی اثر عوامل مؤثر بر پدیده جوشش از پی سازه‌های هیدرولیکی مستقر بر پی‌های آبرفتی یک مدل آزمایشگاهی پرداختند. در این مدل آزمایشگاهی پرده آب‌بند به عنوان متغیر عمقی، از ورق پلکسی گلاس ساخته شده و ترازهای پیزومتریک در دو وجه پایین دست و بالادست فلوم با استفاده از پیزومترهای شفاف با قطر کم اندازه‌گیری شدند. تأثیر موقعیت، عمق دیواره آب‌بند بر مقدار دبی نشت و گرادیان خروجی در قالب نمودارهای بی بعد مشاهده شد و نتایج نشان داد که در نسبت عمق پرده آب بند $d/D=0/46$ با نسبت بیشترین تراز آب بالادست $h/h_m=1$ پدیده جوشش رخ نمی‌دهد. مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدوده مساعدی قرار دارند.

اصغر امامعلی زاده قناتی [۲۸] و همکاران در سال ۱۳۹۲، به بررسی روش‌های آب بندی مخزن سد گردیان جلفا پرداختند. با تحقیقات انجام شده به طراحی آب بند را برای این سد در نظر گرفتند و

²⁵ -Jie

نشت از این سد در حالت بدون آب بند $1571083 \text{ m}^3/\text{year}$ و با حضور آب بند $165738 \text{ m}^3/\text{year}$ به دست آمد که نشان می دهد ۹۰ نشت در حضور آب بند درصد کاهش یافت.

خشایارسنگی [۲۹] در سال ۱۳۹۲، به برآورد میزان تراوش در ساختگاه سد سیمره پرداخت. با محاسبه نشت ها در حالت های مختلف پرده آب بند، در حالت نرمال نشت بدون پرده آب بند، $1/55 \text{ m}^3/\text{s}$ با پرده ناقص ۵۲۰ متر، $0/98 \text{ m}^3/\text{s}$ با پرده ناقص تا عمق ۵۰۰ متر نشت به مقدار $0/89 \text{ m}^3/\text{s}$ و پرده آب بند کامل $0/27 \text{ m}^3/\text{s}$ به دست آورد.

رانجا راجو^{۲۶} [۳۰] و همکاران، قابلیت حذف رسوب حوضچه های رسوب گیر در سال ۱۹۹۹ مورد بررسی قرار دادند. پس از انجام بررسی های آزمایشگاهی بر روی قابلیت مخازن، داده های آزمایشگاهی موجود از گذشته تا حال گردآوری شد. آنگاه دقت روابط تجربی و روش های تحلیلی موجود برای قابلیت ارزیابی شده و روابط جدید را ارائه کردند.

سامه کانتوش^{۲۷} [۳۱] نیز در سال ۲۰۰۹، مطالعات آزمایشگاهی خود را با عنوان تاثیر هندسه مخازن سطحی بر روی الگوی جریان و توزیع رسوب بار معلق انجام داد. وی با ساختن مخازن با هندسه و اشکال مختلف، مقادیر سرعت و غلظت رسوب برای یک شرایط ورودی ثابت اندازه گیری و مقایسه کرد. هدف اصلی آزمایشات انجام شده بدست آوردن مقطعی بهینه با کمترین میزان رسوب گذاری است.

²⁶ -Ranja Raju

²⁷ -Kantoush

فصل سوم

معرفی نرم افزار seep/w

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به تشریح معادله وسپس حل آن به کمک نرم افزار seep/w و معرفی نرم افزار می پردازیم.

۳-۲- معادله لاپلاس

برای تحلیل جریان آب در یک محیط متخلخل اشباع، می توان از معادله لاپلاس کمک گرفت. معادله لاپلاس معادله ای است دیفرانسیلی با مشتقات جزئی که از اهمیت و کاربرد فراوانی در ریاضیات، فیزیک و مهندسی برخوردار است. معادله یاد شده، علاوه بر مساله نشت و حرکت آب در محیط متخلخل اشباع، در زمینه های دیگری همچون جریان های پتانسیل، الکترو مغناطیس و ستاره شناسی کاربرد دارد [۲۳].

در حالت سه بعدی و در یک محیط متخلخل همگن و همسان و برای شرایط دائمی، معادله لاپلاس به صورت زیر نشان داده می شود:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (۳-۱)$$

که پارامترهای مختلف آن در فصل قبل معرفی گشتند.

همچنین بدین صورت نوشته می شود:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (۳-۲)$$

یا

$$\text{Div grad } \phi = 0$$

که div همان دیورژانس است و grad همان گرادیان، یا

$$\Delta \phi = 0$$

Δ عملگر لاپلاس است.

جواب های معادله لاپلاس توابع همسازی^{۲۸} نامیده می شود.

اگر طرف راست، یک تابع سه متغیره، $f(x, y, z)$ در نظر گرفته شود، برای مثال

$$\Delta \phi = f \quad (3-3)$$

این معادله، معادله پواسون نامیده می شود. معادله لاپلاس و پواسون ساده ترین مثال های معادلات دیفرانسیل جزئی بیضوی اند. عملگر دیفرانسیل جزئی (که شاید در هر بعدی تعریف شده باشد) یا عملگر لاپلاس، لاپلاس نما نامیده می شود.

برای حل معادله فوق، از روش های عددی نظیر روش اجزای محدود می توان استفاده نمود. همان طور که در فصل قبل گفته شد نرم افزار geo studio قادر به حل معادله جریان آب در خاک در حالت غیر ایزوتروپیک (برابر نبودن ضریب نفوذپذیری در جهت های مختلف) و همچنین در حالت ایزوتروپیک (معادله لاپلاس) می باشد.

شرایط مرزی

حل عددی یک مدل، نیاز به دانستن و اعمال شرایط مرزی دارد. در کل چهار نوع شرایط مرزی وجود دارد: دیریشله، نیومن، رابین و مختلط.

- شرط مرزی دیریشله^{۲۹}: یعنی مقدار متغیر وابسته بر روی مرزها مشخص باشد.
- شرط مرزی نیومن^{۳۰}: یعنی مشتق عمودی متغیر وابسته بر سطح روی مرزها مشخص باشد.
- شرط مرزی رابین^{۳۱}: هنگامی که شرط مرزی اعمال شده ترکیب خطی از دو شرط نیومن و دیریشله باشد.

²⁸ -Consistency

²⁹ -Dirichlet Boundray condition

³⁰ -Neumann Boundray condition

- شرط مرزی مختلط^{۳۲}: هنگامی که شرایط مرزی در قسمتی از مرز درپیشله و در قسمت دیگر نیومن باشد.

برای معادله لاپلاس شرایط درپیشله و یا نیومن کافی است. یعنی با در دست داشتن یکی از شرایط هم مقدار تابع بدست می آید و هم مشتق عمود بر آن و هم شرط مرزی رابین برای آن اشتباه است. جواب معادله لاپلاس در داخل مرزها تحلیلی است. اصل برهمنهی در مورد جواب های این معادله صادق است یعنی هر ترکیب خطی از جواب های معادله خود جواب معادله است [۳۲].

۳-۳- نرم افزار Geostudio

بسته نرم افزاری Geostudio برای انجام مدل سازی یک سد، کنترل پارامترهایی از یک خاک را داراست که شامل موارد زیر است:

- SEEP/w تحلیل جریان و تراوش در خاک، بررسی شبکه جریان در سدها و تعیین میزان نشت

- SLOP/w تحلیل پایداری دینامیکی و استاتیکی شیب ها

- SIGMA/w تحلیل توزیعی تنش-کرنش در خاک طی خاکریز چند مرحله ای

- CTRAN/w تحلیل توزیع آلاینده ها در خاک

- QUAKE/w تحلیل دینامیکی خاک

- TEMP/w

- AIR/w

- VADOSE/w

که از این هشت نرم افزار موجود در بسته نرم افزاری Geostudio از seep/w در این پایان نامه استفاده شده است.

³¹ -Rabin Boundray condition

³² -Mixed Boundray condition

۳-۳-۱- مدل سازی عددی در نرم افزار Geostudio

مدل سازی عددی در واقع روشی است که به کمک آن از یک فرایند فیزیکی که در دنیای واقعی رخ می دهد، شبیه سازی ریاضی می شود. در این روش فرایند مورد بررسی در قالب یک محیط ریز شده شبیه سازی می شود و سپس روی طیف وسیعی از متغیرهای آن پژوهش می شود.

روش های عددی در مسائل مهندسی می توانند کاربردهای زیادی داشته باشند در گذشته به علت نبود امکانات رایانه ای کافی و همچنین زمان بر بودن انجام محاسبات بیشتر از روابط تجربی استفاده می شد باید توجه داشت که حل دقیق مسائل ژئوتکنیکی با استفاده از روش های تجربی و عددی به تنهایی ممکن نیست ترکیب این دو روش می تواند، ما را در حل مسائل پیچیده کمک کند. اساس روش های عددی تبدیل یک محیط با بینهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است. موقعیت تعداد و ارتباط نقاط یاد شده توسط مش بندی مشخص می شود. امروزه با توجه به پیشرفت سریع علم کامپیوتر استفاده از روش های عددی برای حل مسائل ژئوتکنیکی گسترش چشمگیری داشته است.

از کاربردهای این نرم افزار همچنین می توان به آنالیز و طراحی پروژه های ژئوتکنیکی، عمرانی، هیدرولیکی و معدن نام برد.

۳-۴- حل عددی حرکت آب در خاک با مدل عددی seep/w

۳-۴-۱- مقدمه

در seep/w که یکی از زیربرنامه های نرم افزار Geo Studio می باشد ، به حل عددی معادله لاپلاس (در خاک ایزوتروپیک) و حل معادله آب در خاک (در حالت غیرایزوتروپیک) در پی و همچنین به

بررسی شرایط تراوش و جریان آب در خاک می پردازد. در ادامه توانایی های این نرم افزار و تشریح روش پرداخته می شود.

۳-۴-۲- معرفی نرم افزار seep/w

نرم افزار seep/w که زیر مجموعه ای از نرم افزار Geostudio می باشد به صورت عددی جریان آب را در یک محیط متخلخل به روش اجزا محدود شبیه سازی می کند. این نرم افزار برای مدل سازی تراوش و توزیع فشار آب منفذی در محیط های متخلخل نظیر خاک و سنگ تهیه شده است. از قابلیت های این برنامه، ترسیم گراف آب عبوری از درون خاک، بردارهای سرعت، ترسیم خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل و محاسبه دبی عبوری از مقطع مشخصی از خاک استفاده می شود [۳۲]. در این نرم افزار فرمول بندی ها طوری انجام شده است که هم برای مسائل ساده و هم در مسائل بسیار پیچیده تراوش می تواند مورد استفاده قرار گیرد. این برنامه قابلیت این را دارد که در شرایط پایدار (steady state) آنالیز را انجام داده و شرایط آب و خاک را در حالت های مرحله ای بررسی کند [۳۳].

نرم افزار یاد شده یک نرم افزار تحلیلی جامع می باشد که قادر است جریان را در هر دو حالت اشباع و غیر اشباع مدل کند. توانایی این نرم افزار برای مدل کردن جریان در محیط غیر اشباع، منجر گشته تا شرایط بسیار واقعی تر نسبت به سایر نرم افزارها گردد. در حالی که بسیاری از نرم افزارهای دیگر قادر به در نظر گرفتن این توابع در کنار یکدیگر نیستند. در این نرم افزار امکان استفاده از تمام شرایط مرزی ممکن از قبیل هد کل، هد فشار و همچنین شرایط خروج آب از مدل در یک مساله تراوش وجود دارد. با توجه به اینکه نرم افزار تحلیل غیر اشباع انجام می دهد، لذا امکان تعریف تابع نفوذ پذیری در این نرم افزار وجود دارد. رابطه ضریب نفوذ پذیری با فشار منفذی، به صورت نقطه ای تعریف می شود و نرم افزار با استفاده از روش های برازش منحنی، یک منحنی به این نقاط برازش داده و در تحلیل از آنها استفاده می کند. در تحلیل مدل های دارای سطح آزاد جریان و شرایط مرزی

از نوع خروج آب از مدل، از آنجایی که هم موقعیت محل خروج آب از مدل و هم ضرایب نفوذپذیری در نقاط مختلف مدل نامعلوم می باشند، لذا برنامه از دو سعی و خطا در داخل هم استفاده می کند. بدین ترتیب که ابتدا با یک شرط مرزی مفروض مساله را حل می کند تا جایی که دیگر ضریب نفوذپذیری در نقاط مختلف مدل تغییر نکنند، در این حالت سعی و خطای اول همگرا شده و برنامه با این فرضیات شرایط مرزی را کنترل می نماید. اگر شرایط مرزی در حال خروج در محل خروج آب از مدل ارضا شده باشد، سعی و خطای دوم نیز خاتمه می یابد. در غیر این صورت با اعمال تغییرات لازم بر روی شرایط مرزی، مساله دوباره تحلیل و این روند تا اصول همگرایی ادامه می یابد [۳۴].

در سدهای خاکی، در داخل جسم سد و در محدوده سطح آزاد آب، محیط به دو قسمت اشباع و غیراشباع تقسیم می شود که جریان در هر دو محیط و نیز بین دو محیط وجود دارد. همانطور که گفته شد، ضریب نفوذپذیری خاک اشباع با تغییرات درصد رطوبت یا تغییرات مکش حفره ای تغییر می کند و در این نوع جریان، قانون داری و رابطه پیوستگی در هر دو محیط صادق است. با داشتن رابطه محتوای رطوبت حجمی برحسب مکش حفره ای و ضریب نفوذپذیری می توان معادله تراوش را با استفاده از سعی و خطا حل نمود. چون مقدار ضریب نفوذپذیری در هر نقطه از محیط در ابتدای امر معلوم نیست، ابتدا با فرض محیط اشباع، معادله تراوش حل شده و فشار منفذی در هر المان از محیط محاسبه می شوند، سپس با استفاده از مقدار فشار منفذی در مرکز هر المان، مقدار ضریب نفوذپذیری آن المان تعیین شده معادله تراوش با نفوذپذیری جدید مجددا حل می شود. این روند تا حصول همگرایی ادامه می یابد [۳۴ و ۳۵].

مدل سازی هر نوع پروژه در محیط نرم افزار Seep/w دارای چند گام مشترک است، تعیین نوع تحلیل اعم از تراوش در جریان ماندگار و شرایط غیرماندگار، ترسیم هندسه مدل، تعیین خصوصیات فیزیکی مصالح موجود در مدل، اختصاص شرایط مرزی، حل مدل و استخراج نتایج [۳۴]. لازم به ذکر است که این برنامه قابلیت این را دارد که مدل گرافیکی را از هر قسمت به قسمت دیگر وارد کند و سپس مدل گرافیکی موجود را برای آنالیز مورد نظر تکمیل کند.

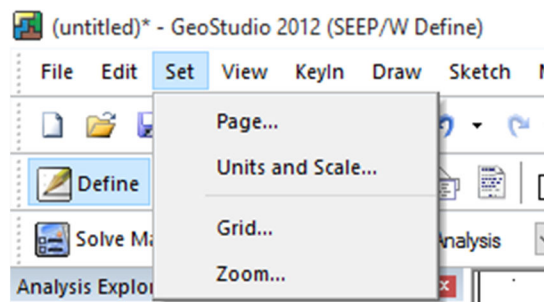
Rulon در سال ۱۹۸۵ در یک مدل آزمایشگاهی، یک شیب خاکی را ایجاد کرد که درون آن یک لایه غیر قابل نفوذ جاگذاری شده و سپس آب را کم کم روی شیب پاشید و به این ترتیب تراوش را در شیب شبیه سازی کرده سپس آنچه Rulon در آزمایشگاه ایجاد کرده بود با نرم افزار seep/w بررسی شد و مشخص شد که نتایج تقریباً با هم برابرند.

در ادامه نحوه مدل سازی در این نرم افزار توضیح داده می شود.

۳-۴-۳- ابزارهای تنظیم نمای دید

۳-۴-۳-۱- تنظیمات منوی set

این منو و امکانات آن در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱): منوی Set

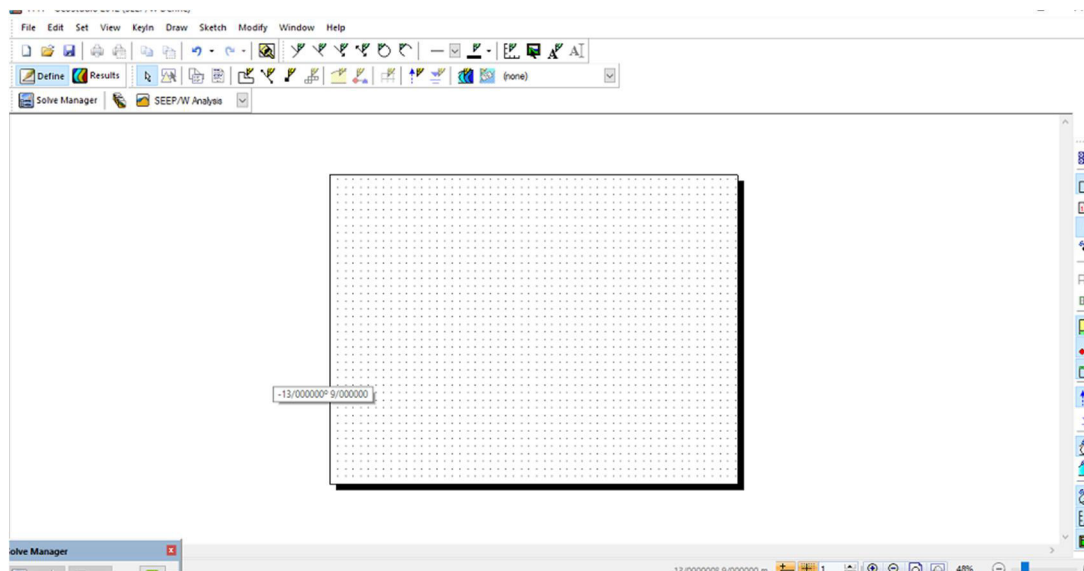
از صفحه باز شده در شکل (۳-۱) منوی page، اندازه صفحه نمایش را بر اساس طول و عرض، برحسب میلیمتر و یا اینچ مشخص می کند.

یکی دیگر از منوهای موجود در set منوی scale می باشد که این منو جهت تنظیمات مقیاس ها و واحد ها تعبیه شده است. در این پنجره با انتخاب یکای فوت یا متر می توان نوع سیستم واحدی حاکم بر تحلیل را مشخص کرد.

Grid جعبه ای دیگر از منوی set می باشد که فاصله گریدها را که به نوعی عامل کمکی در مدل سازی هستند به وسیله آن تنظیم می کنیم. برای انتخاب اولیه می توان این فاصله را برابر واحد انتخاب کرد.

آخرین جعبه از منوی set، جعبه Axes می باشد که به وسیله آن مختصات را تنظیم کرده و اندازه و بازه ی عددی آن را به نرم افزار تخصیص می دهیم.

صفحه نمایش این برنامه در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.

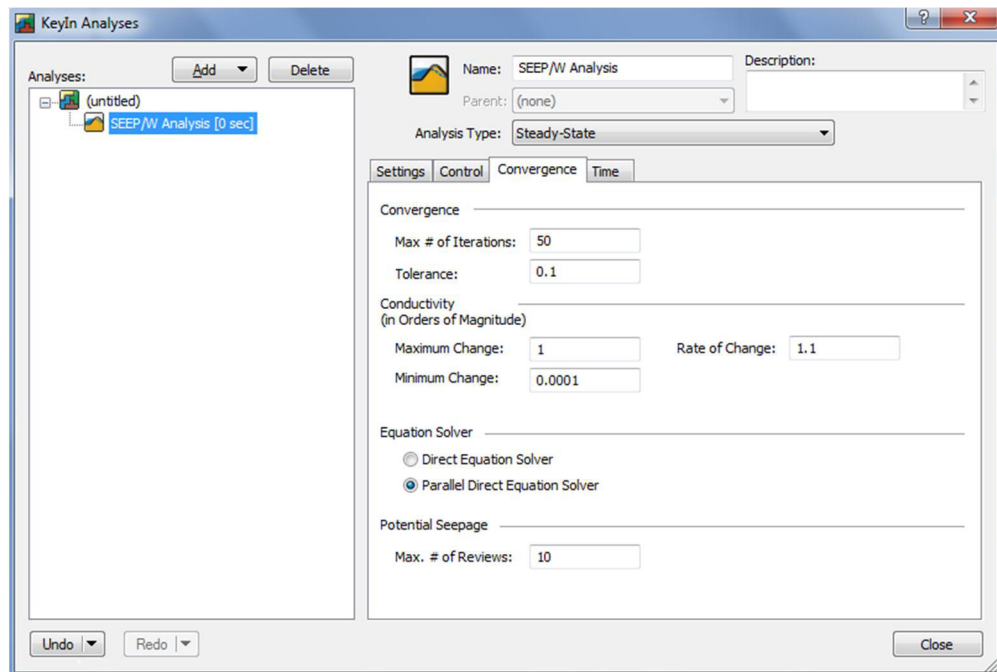


شکل (۲-۳): صفحه نمایش برنامه seep/w

۳-۴-۴- انتخاب نوع تحلیل و معیارهای همگرایی

جهت تعریف مشخصات مدل از قبیل نوع تحلیل اعم از تحلیل ماندگار و تحلیل غیر ماندگار، تعداد گام های سعی و خطا، خطای انتخابی، طول گام های زمانی از جهت اجرای پروژه مطابق شکل (۳-۳) از پنجره Analysis Setting واقع در منوی KeyIn استفاده می شود. در این پنجره از گزینه Type جهت تعیین نوع تحلیل اعم از ماندگار Steady و غیر ماندگار Transient و اعمال شرایط اولیه در تحلیل

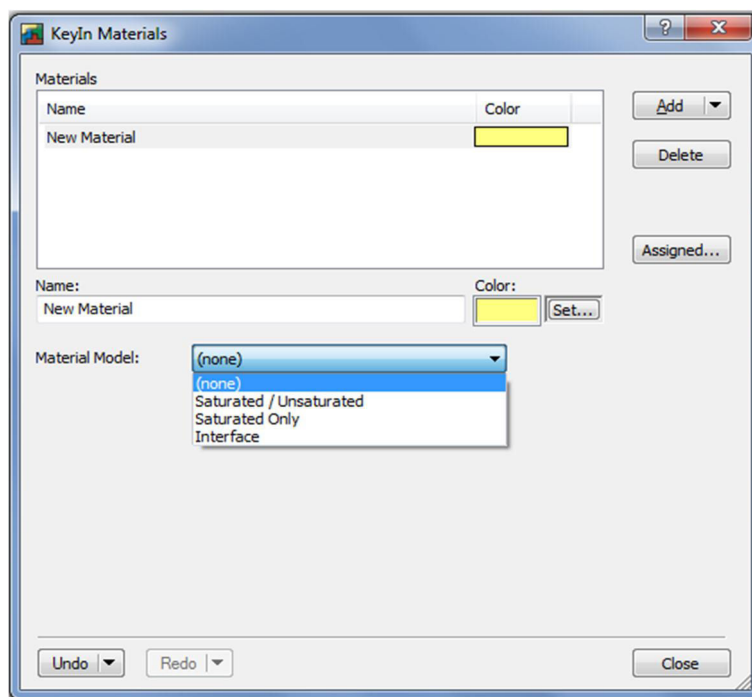
غیر ماندگار استفاده می‌شود. از پنجره Convergence جهت تعیین حداکثر تعداد سعی و خطا و حداقل و حداکثر میزان تغییرات در هر گام زمانی می‌توان بهره برد.



شکل (۳-۳) تعیین نوع تحلیل تراوش از پنجره Analysis Type و انتخاب اعداد سعی و خطا و مقدار خطای انتخابی در هر گام

۳-۴-۵- تعریف خصوصیات فیزیکی مدل با استفاده از منوی keyin

جهت تعریف حالات مختلف مصالح و خصوصیات فیزیکی آنها اعم از نفوذپذیری، زاویه حرکت آب در خاک و نسبت سرعت افقی و قائم، فشار آب حفره ای، ضریب ذخیره ویژه باید مطابق شکل (۳-۴) از منوی KeyIn گزینه Material را انتخاب کرد.

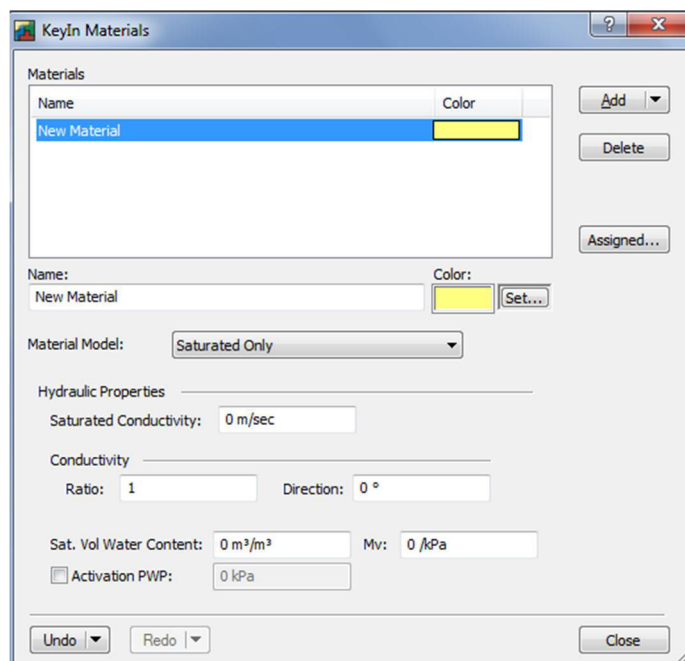


شکل (۴-۳) تعریف مصالح

هنگامی که این منو را باز می‌کنیم برای معرفی شرایط نفوذپذیری خاک سه حالت خاک فقط اشباع (Saturated Only) خاک اشباع/غیراشباع (Saturated/Unsaturated)، خاک غیر قابل نفوذ (Interface) وجود دارد (شکل (۴-۳)).

۳-۴-۵-۱- خاک فقط اشباع (Saturated Only)

مطابق شکل (۵-۳) در حالت اشباع باید عبوردهی هیدرولیکی Saturated Conductivity، زاویه حرکت آب در خاک (چرخش محورهای مختصات) Direction، نسبت عبوردهی هیدرولیکی در راستای محورهای مختصات Raito، ضریب ذخیره ویژه اشباع Sat. VolWater Content، فشار آب حفره‌ای تعیین و تعریف کرد.



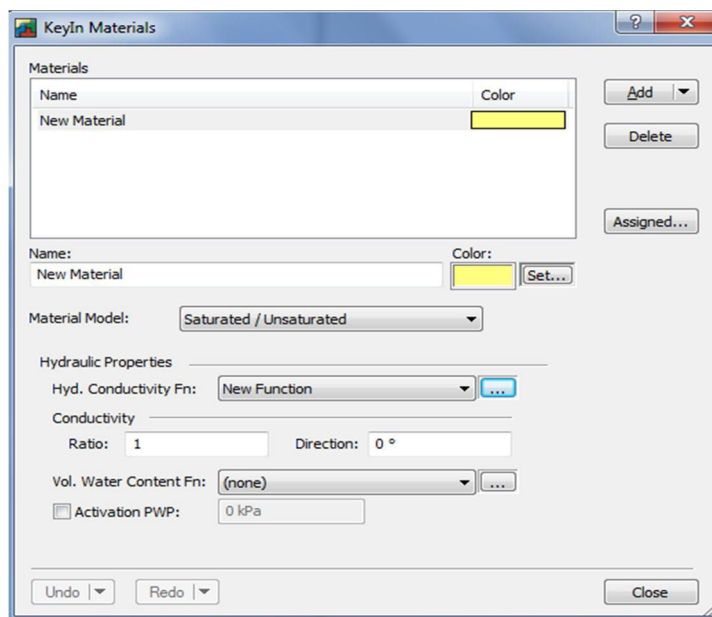
شکل (۳-۵): معرفی مصالح در حالت اشباع

باید توجه کرد ضریب نفوذپذیری تعریف شده، در راستای X است و ضریب نفوذپذیری در راستای Y به وسیله عوامل Raito و Direction به دست می‌آید.

۳-۴-۵-۲- خاک اشباع/غیر اشباع (Saturated/Unsaturated)

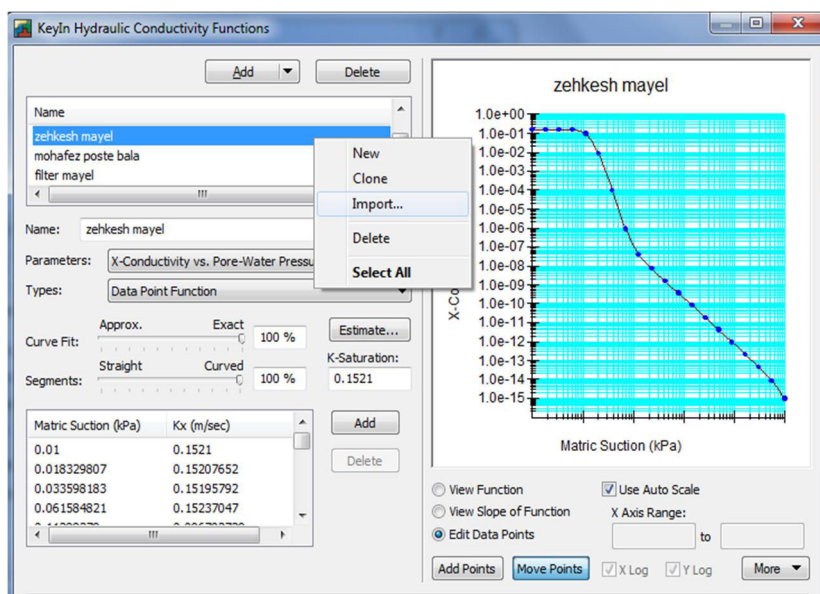
یکی از قابلیت های ویژه این برنامه، امکان مدل نمودن شرایط خاک نیمه اشباع است که بر نفوذپذیری تاثیر دارد. فلسفه ی این امر از نظر تئوری به این صورت است که نفوذپذیری خاک ها در حالت نیمه اشباع کمتر از حالت اشباع است، زیرا حباب های هوای موجود در خاک مانع حرکت آب در خاک شده و در نتیجه، آنالیز تراوش و جریان خاک های نیمه اشباع در حالت نیمه اشباع به نتایج غیر واقعی منجر می شود. برای جلوگیری از این خطا می توان یک تابع تعریف کرد که نفوذپذیری در آن بازه به صورت خطی تغییر کند و در خارج از این بازه ثابت در نظر گرفته شود.

در این حالت بعد از باز کردن منوی KeyIn Material از قسمت Material Model گزینه Saturated/Unsaturated را انتخاب می کنیم که به صورت شکل (۳-۶) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۶): جعبه KeyIn Material برای خاک اشباع/غیراشباع

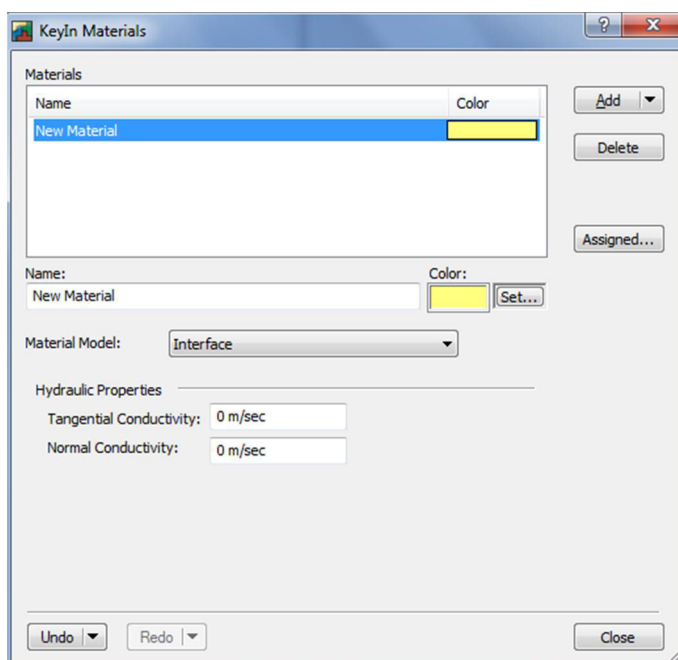
در این حالت بایستی برای نفوذپذیری تابعی تعریف کرد که برای این منظور از قسمت Hyd. Conductivity fn تابع را که میتواند با استفاده از اندازه سنگدانه ها و یا.. باشد، تعریف کرد. (از قسمت Estimate و با مشخص کردن نفوذپذیری خاک اشباع) و یا اگر این تابع قبلا در نرم افزار Geo Studio تعریف شده است مطابق شکل (۳-۷) وارد و انتخاب کرد.



شکل (۳-۷): جعبه Conductivity Function

۳-۴-۵-۳ - خاک غیر قابل نفوذ (Interface)

همانطور که می دانیم خاک غیر قابل نفوذ می تواند جریان بسیار کمی را از خود عبور دهد. چون این جریان نسبت به بقیه مناطق بسیار ناچیز و غیر قابل توجه است می توان ضریب عبور هیدرولیکی آن را برابر صفر در نظر گرفت. اما برای دقت بیشتر می توان ضریب عبور دهی مماسی و عادی را مانند شکل (۳-۸) در نظر گرفت.



شکل (۳-۸): تعریف مشخصات خاک غیر قابل نفوذ

۳-۴-۶- ترسیم هندسه مدل

۳-۴-۶-۱ - مشخص کردن نقاط

گام بعدی در مدلسازی به وسیله این نرم افزار رسم هندسه مدل می باشد که برای این منظور می توان به دو طریق از منوی KeyIn و یا Draw استفاده کرد. با استفاده از منوی KeyIn و با انتخاب گزینه KeyIn Point می توان با دادن مختصات نقاط، آنها را رسم کرد.

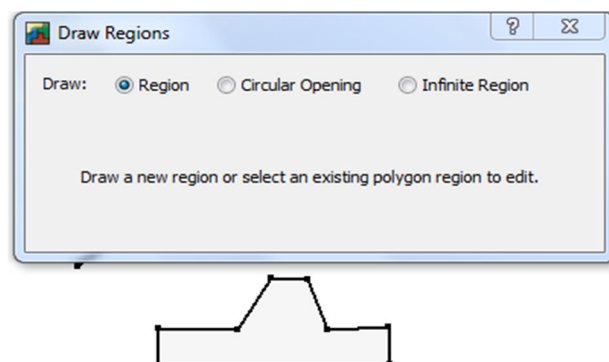
از منوی Drow به وسیله گزینه Point می توان استفاده کرد و به صورت دستی با کلیک روی صفحه نرم افزار، نقاط را مشخص کرد.

۳-۴-۶-۲- ترسیم خط ها

پس از مشخص کردن نقاط در صفحه با داشتن شماره هر نقطه می توان از نوار KeyIn و منوی Line بین نقطه ها خط را مشخص کرد و یا Drow و منوی Line بین نقاط موجود در صفحه خطوط بین آنها را رسم کرد.

۳-۴-۶-۳- ترسیم ناحیه ها

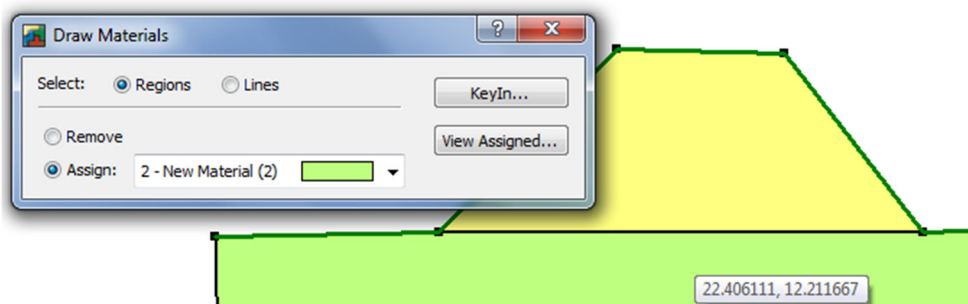
گام بعدی در ترسیم مدل مربوط به رسم ناحیه ها می باشد که این گام برای اختصاص دادن مصالح مورد نظر به هر ناحیه در مراحل بعدی، صورت می گیرد. برای این کار یا از نوار KeyIn و گزینه Regions و یا از منوی Drow و گزینه Regions (شکل (۳-۹)) به صورت دستی ناحیه مورد نظر ترسیم می شود.



شکل (۳-۹): منوی Drow Regions برای مشخص کردن ناحیه بین نقاط به صورت دستی

۳-۴-۷- اختصاص دادن Material به ناحیه

پس از مشخص شدن منطقه و خط در صفحه برای اختصاص دادن نوع ماده ای که قبلاً تعریف کردیم از نوار Drow گزینه Material را انتخاب می کنیم و با توجه به منطقه مورد بررسی ابتدا نوع ماده را از بین ماده های که قبلاً تعریف کرده انتخاب کرده و با مشخص کردن خط یا منطقه قسمت مورد بررسی به وسیله نشانگر که بسته به انتخاب خط یا منطقه به شکل یک خط یا مربع می باشد، به اختصاص دادن ماده موردنظر به قسمت های مختلف صفحه کار می پردازیم (شکل (۳-۱۰)).



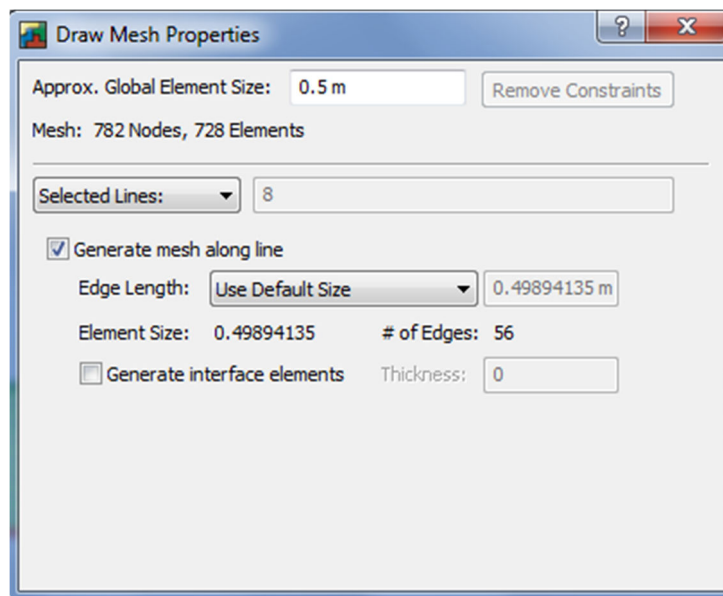
شکل (۳-۱۰): جعبه Draw Materials و اختصاص مصالح به ناحیه ها

انتخاب نوع خط بیشتر برای تعریف دیواره های آببند با عرض کم است و معمولاً به طور غیرقابل نفوذ (Interface) تعریف می شود.

۳-۴-۸- مش بندی

پس از کشیدن و بستن مناطق نوبت به مش بندی می رسد و برای این کار از نوار Drow گزینه Mesh Properties را انتخاب می کنیم. در ابتدا در بالای پنجره اندازه مش ها را تعیین می کنیم. هرچه ابعاد

ریزتری داشته باشیم دقت کار بالا می‌رود، اما در عوض زمان رسیدن به جواب قابل قبول بیشتر طول می‌کشد. سپس نوع مش بندی را با توجه به دقت کار و طرح انتخاب می‌کنیم. (شکل (۳-۱۱))



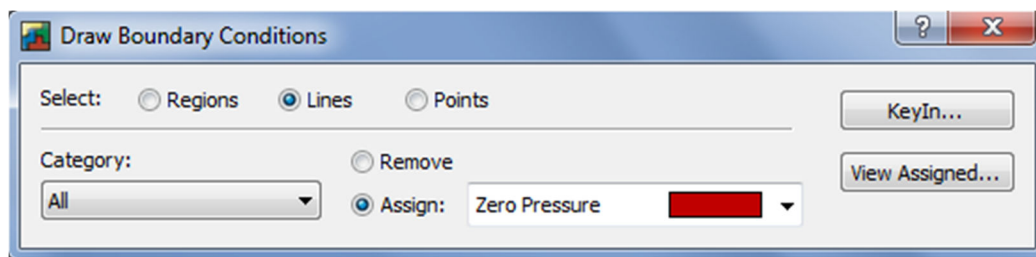
شکل (۳-۱۱): پنجره Mesh Properties از نوار Drow برای مش بندی

۳-۴-۹- اختصاص شرایط مرزی

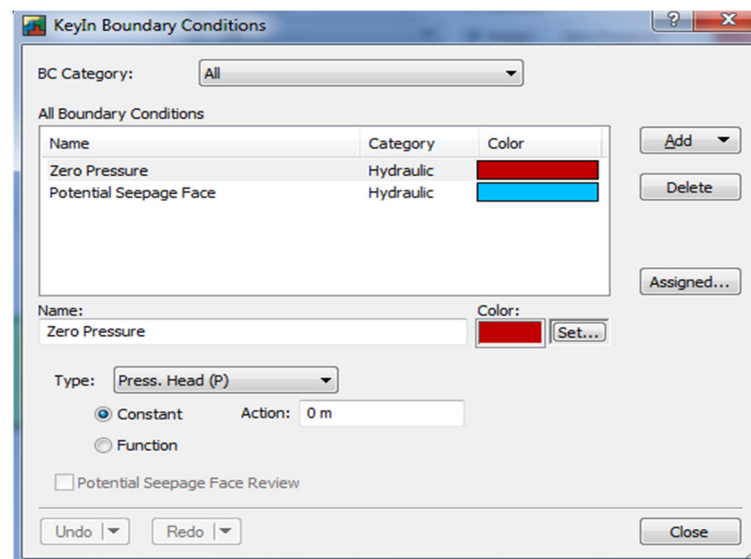
به منظور نمایش شرایط مرزی می‌توان از گزینه Boundary Condition موجود در منوی Drow استفاده کرد. با انتخاب این گزینه پنجره‌ای مطابق شکل (۳-۱۲) ظاهر خواهد شد. برای تعریف انواع مختلف شرایط مرزی ابتدا گزینه KeyIn را زده تا پنجره KeyIn Boundray Condition ظاهر شود. ابتدا باید از نوار Type نوع شرایط مرزی را با توجه به قسمت مورد نظر انتخاب شود. شرایط مرزی Pressure Head برای حالت وجود یک سطح با بار آبی ثابت برای تمام نقاط این سطح به کار می‌رود. به عنوان مثال چنانچه اطمینان از ظهور سطح آب در بخش پایین دست وجود داشته باشد. برای این شرایط مرزی از نوع Pressurre Head تعریف می‌شود. در حالی که از محل خروج سطح آب در بخش شیب دار پایین دست اطمینان وجود نداشته باشد از شرایط Total Flux(Q) یا Unit Flux(q) همراه با روشن کردن گزینه Potential Seepage Face Review استفاده می‌شود (شکل (۳-۱۳)).

باید توجه داشت دو شرط مرزی Head و Pressure Head هر دو دارای مفاهیم یکسانی هستند، با این تفاوت که شرط مرزی Head رقوم را از کف نیز علاوه بر Pressure Head در نظر می گیرد.

البته تمام حالات گفته شده فقط در حالت ماندگار تعریف می شوند و مقادیر ثابت (Constant) را در دو حالت بالادست و پایین دست به ما می دهد. برای تعریف حالت غیرماندگار باید گزینه Function را فعال کنیم و نمودار آن را بر اساس داده های موجود رسم می کنیم تا نرم افزار از آن استفاده کند.



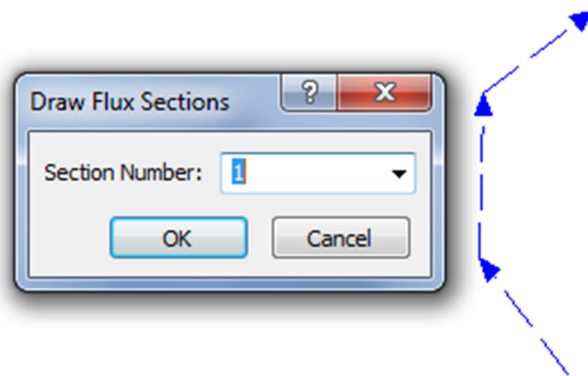
شکل (۳-۱۲): اختصاص شرایط مرزی هیدرولیکی



شکل (۳-۱۳): تعریف شرایط مرزی هیدرولیکی

۳-۴-۱۰- قرائت و اندازه گیری دبی

در این نرم افزار می توان مقطعی به دلخواه را در واحد عرض با تعریف مختصات ابتدا یا انتهای مقطع انتخاب و یا به صورت دستی رسم و مقدار دبی را محاسبه کرد. که رسم روش دستی در شکل (۳-۱۴) نمایش داده شده است.



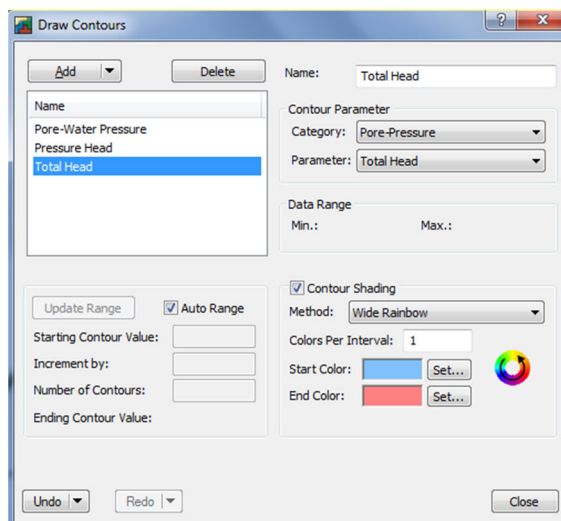
شکل (۳-۱۴): رسم Flux Section با استفاده از نشانگر موس

۳-۴-۱۱- اجرای مدل

پس از انجام مراحل فوق، مدل ایجاد شده را ذخیره کرده و از منوی Tools دستور Verify را انتخاب می کنیم. در این حالت مجموعه هشدارها، خطاها، و نوع المان بندی ها مشخص خواهد شد. در صورت نبودن اشکال در ورود داده ها، می توان اقدام به حل پروژه با انتخاب دستور Slove از پنجره Tools و اجرای دستور Start نمود.

۳-۴-۱۲- مشاهده نتایج

پس از اجرای نرم افزار، می توان اقدام به مشاهده نتایج در قالب کنتورها با استفاده از گزینه  استفاده نمود. مشاهده کنتور، تغییرات پارامترهای مختلف و شخصی سازی تعداد رنگ آنها مطابق شکل (۳-۱۵) از نوار Drow گزینه Contours...  استفاده کرد.



شکل (۳-۱۵): منوی Draw Contours برای انتخاب کنتورها

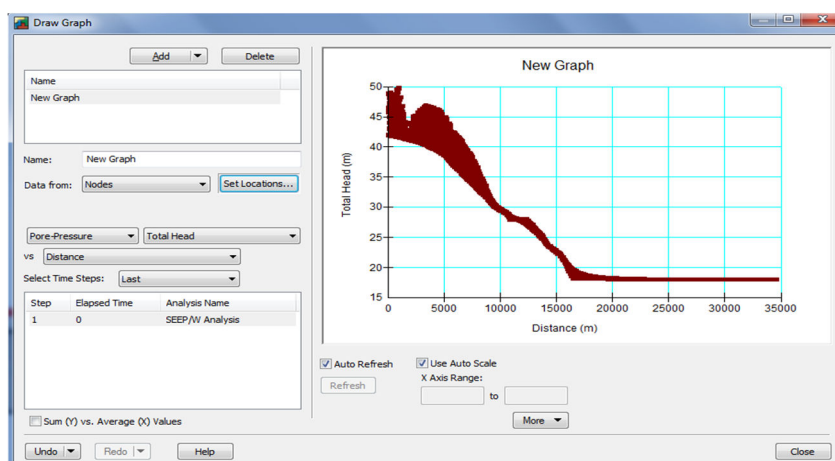
همچنین برای نمایش مقدار هر کنتور از گزینه Contoure Lables استفاده می گردد. برای مشاهده مقدار دبی نشت شده از هر مقطع کافیت منوی Flux Lables را انتخاب کرده و بر روی مقطع Flux Section رسم شده کلیک می کنیم تا عدد مربوط به مقدار نشت در واحد عرض مقطع انتخابی نمایان شود.

جهت نمایش خطوط جریان ابتدا منوی Flow Pathes از نوار Draw را انتخاب میکنیم. سپس بر روی هر نقطه از محیط کلیک می کنیم، در صورت وجود خط مسیر جریان را از آن نقطه نمایش می دهد.

به منظور مشاهده بردار های سرعت در سراسر مدل گزینه Vector از نوار Draw را فعال می کنیم. این نرم افزار قابلیت ارائه نتایج را به فرم نموداری داده در قالب صفحه گسترده داراست. برای این منظور از پنجره Graph نوار Draw استفاده می کنیم. پس از انتخاب این گزینه پنجره ای مطابق شکل (۳-۱۶) باز می شود. که با استفاده از آن می توان حالات مختلفی از نمودارهای سرعت، گرادیان هیدرولیکی بحرانی، فشار آب و.... را رسم کرد.

برای این کار ابتدا یک نمودار جدید ایجاد کرده، سپس از پایین صفحه نوع و جنس پارامتر مورد نظر را انتخاب می کنیم .

برای مشخص کردن قسمت مورد نظر جهت رسم از گزینه های Data Form و Set Location استفاده می کنیم.



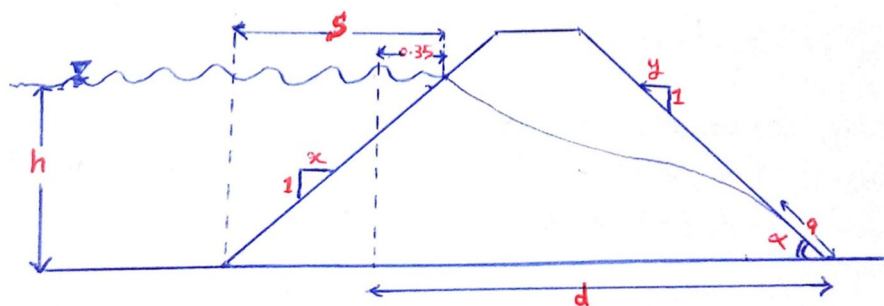
شکل (۳-۱۶): پنجره Draw Graph برای رسم نمودارهای مختلف

۳-۵- بررسی صحت و دقت عملکرد نرم افزار

برای مشخص کردن دقت و صحت حل مسائل توسط نرم افزار و کاربر، یک نمونه مساله ساده تراوش در حالت ماندگار از بدنه سد خاکی به صورت دستی تحلیل و جوابهای آن با حل همان مساله توسط نرم افزار مقایسه می شود.

مثال زیر ابتدا با بهره گیری از روابط تجربی موجود به صورت دستی حل می گردد:

مثال: اگر ضریب نفوذپذیری در یک سد خاکی همگن $c \cdot 10^{-4}$ باشد میزان دبی خروجی از واحد طول بدنه سد خاکی با توجه به شکل های (۳-۱۷) و (۳-۱۸) را محاسبه کنید.



شکل (۳-۱۷) مقطع سد خاکی همگن

طبق روابط ارائه شده توسط کاساگرانده^{۳۳}، مقدار دبی نشت یافته از بدنه سد خاکی همگن که از طول آن عبور می کند (q) را می توان از رابطه ی زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} q &= ka \sin^2 \alpha \\ a &= \sqrt{h^2 - d^2} \end{aligned} \quad (۴-۳)$$

$$30^\circ < \alpha < 60^\circ$$

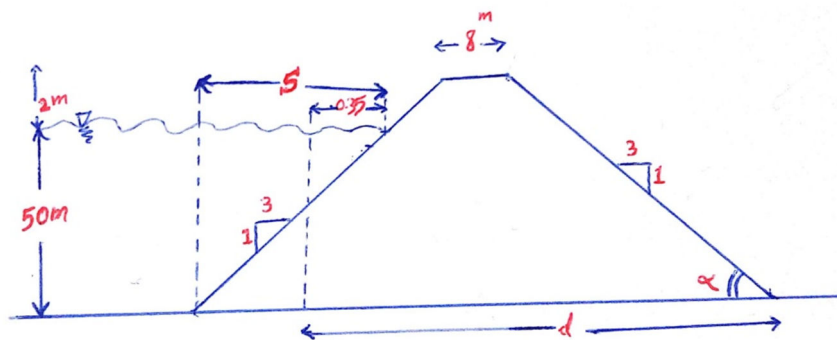
که سایر پارامترها در روی شکل نشان داده شده اند.

معادله فوق همچنین برای زاویه کوچکتر از ۳۰ درجه پاسخ های مناسبی می دهد و برای زاویه بزرگتر از ۶۰ تا ۹۰ درجه (که در سد های خاکی به طور نادر اتفاق می افتد) حداکثر تا ۲۵ درصد خطا دارد. در حالتی که $\alpha < 30^\circ$ باشد، رابطه ی پیشنهادی وی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} a &= d - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \\ q &= ka \tan^2 \alpha \end{aligned} \quad (۵-۳)$$

چنانچه مشخصات سد خاکی همگن را به صورت شکل زیر در نظر گیریم:

³³ - Casa grande



شکل (۱۸-۳) مشخصات مقطع سد خاکی همگن

برای محاسبه دبی عبوری از واحد طول مقطع، مطابق زیر عمل می گردد:

$$\tan \alpha = \frac{1}{3} \rightarrow \alpha = 18.435^\circ$$

$$\cot \alpha = 3 \quad \sin \alpha = 0.3162$$

$$\alpha < 30^\circ$$

$$s = 50 * 3 = 150 \text{ m}$$

$$d = 52 * 3 + 8 + 2 * 3 + 0.3 * 150 = 215 \text{ m}$$

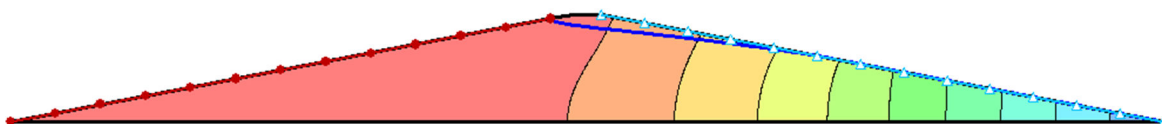
$$a = 215 - \sqrt{215^2 - 50^2 * 3^2} = 60.671^\circ$$

$$q = 10^{-4} * 60.971 * \frac{12}{3} = 6.77 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

حل مساله در نرم افزار:

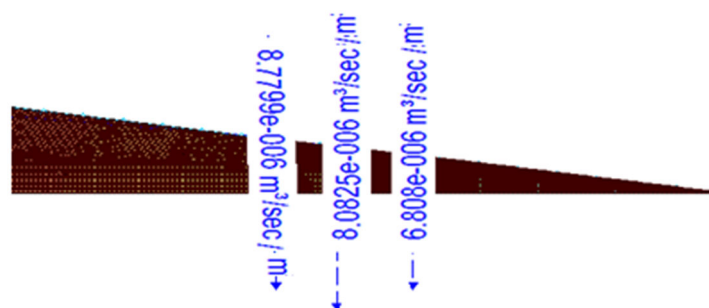
حال همین مساله توسط نرم افزار یاد شده مدل سازی و تحلیل می شود.

در شکل زیر مدل ساخته شده توسط نرم افزار مشاهده می گردد:



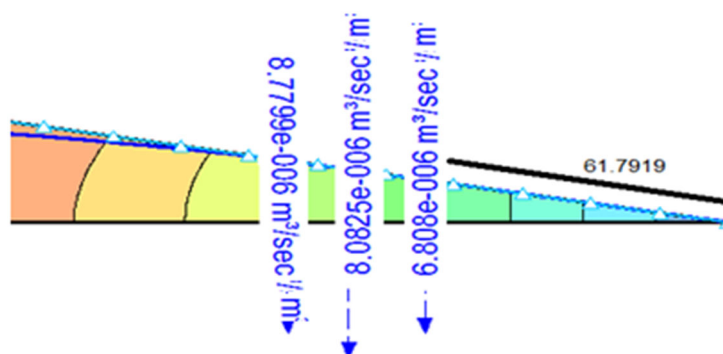
شکل (۱۹-۳) مدل تحلیل شده توسط نرم افزار

با توجه به شکل (۳-۲۰) دبی به دست آمده توسط نرم افزار ($6.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) می باشد که با مقدار حل دستی در قسمت قبل که ($6.77 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) به دست آمد تقریباً برابر و یکسان است.



شکل (۳-۲۰) دبی خروجی در مقطع seepage face

نکته قابل توجه این است که دبی درست در مقطع شروع seepage face یا همان پارامتر a در حل دستی در نرم افزار باید اندازه گیری شود همان طور که در شکل (۳-۲۱) مشاهده می شود پارامتر a در حل دستی مقدارش با مقدار ارائه شده توسط نرم افزار برابر است.



شکل (۳-۲۱) مقدار ارائه شده توسط نرم افزار seepage face

از مقایسه پاسخ های به دست آمده در دو روش، می توان اطمینان پیدا کرد که مدل سازی توسط نرم افزار به درستی انجام گرفته و تحلیل نرم افزار کاملاً قابل قبول می باشد. البته دقت و صحت نرم افزار انتخابی در مسائل مختلف توسط کاربران متعدد به اثبات رسیده است.

فصل چهارم

روش تحقیق و مدل سازی سد

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی سد خاکی ارداک و سپس به مدل سازی آن در نرم افزار seep/w پرداخته شده و در انتها روش محاسبه مقدار حجم رسوبات و آب و ارتفاع آنها مورد بررسی قرار می-گیرد.

۴-۲- معرفی سد ارداک

۴-۲-۱- کلیات پروژه سد ارداک

مطالعات مرحله اول سد ذخیره ای ارداک توسط کمیته عمران جهادسازندگی خراسان در سال ۱۳۶۸ انجام پذیرفته است. در این مرحله از مطالعات دو گزینه سد خاکی و سد بتنی وزنی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت سد خاکی با هسته مرکزی همراه با سرریز به صورت نیلوفری و سرریز اضطراری به صورت اوجی و شوت، تونل جهت سیستم انحراف با هدف بکارگیری در دوران بهره برداری به عنوان آبگیر آبیاری و تخلیه کننده تحتانی به تصویب رسیده است.

انجام و مطالعات مرحله دوم با هدف تامین آب کشاورزی در سال ۱۳۷۳ توسط شرکت مهندسی آب پوی انجام گردیده است. پس از اتمام مطالعات مرحله دوم طرح و تصویب آن توسط دفتر فنی آب وزارت نیرو طرح مدتی را کد بود و سرانجام در سال ۱۳۷۸ احداث سد در دستور کار شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان قرار گرفت و بازنگری مطالعات مزبور با هدف تامین آب شرب شهر مشهد از مشاور طرح خواسته شد. در راستای انجام مطالعات تکمیلی مرحله دوم، این مشاور با هدف اقتصادی نمودن طرح، مطالعات برنامه ریزی منابع آب را با در نظر گرفتن تراز نرمال مطالعات مرحله دوم انجام و بر اساس آن نسبت به بازنگری کلیه اجزا طرح شامل بدنه سد، سرریز و تونل ها اقدام نمود. پس از مطالعات انجام شده گزینه احداث سد خاکی با هسته رسی به همراه دیوار آب بند بتن پلاستیک،

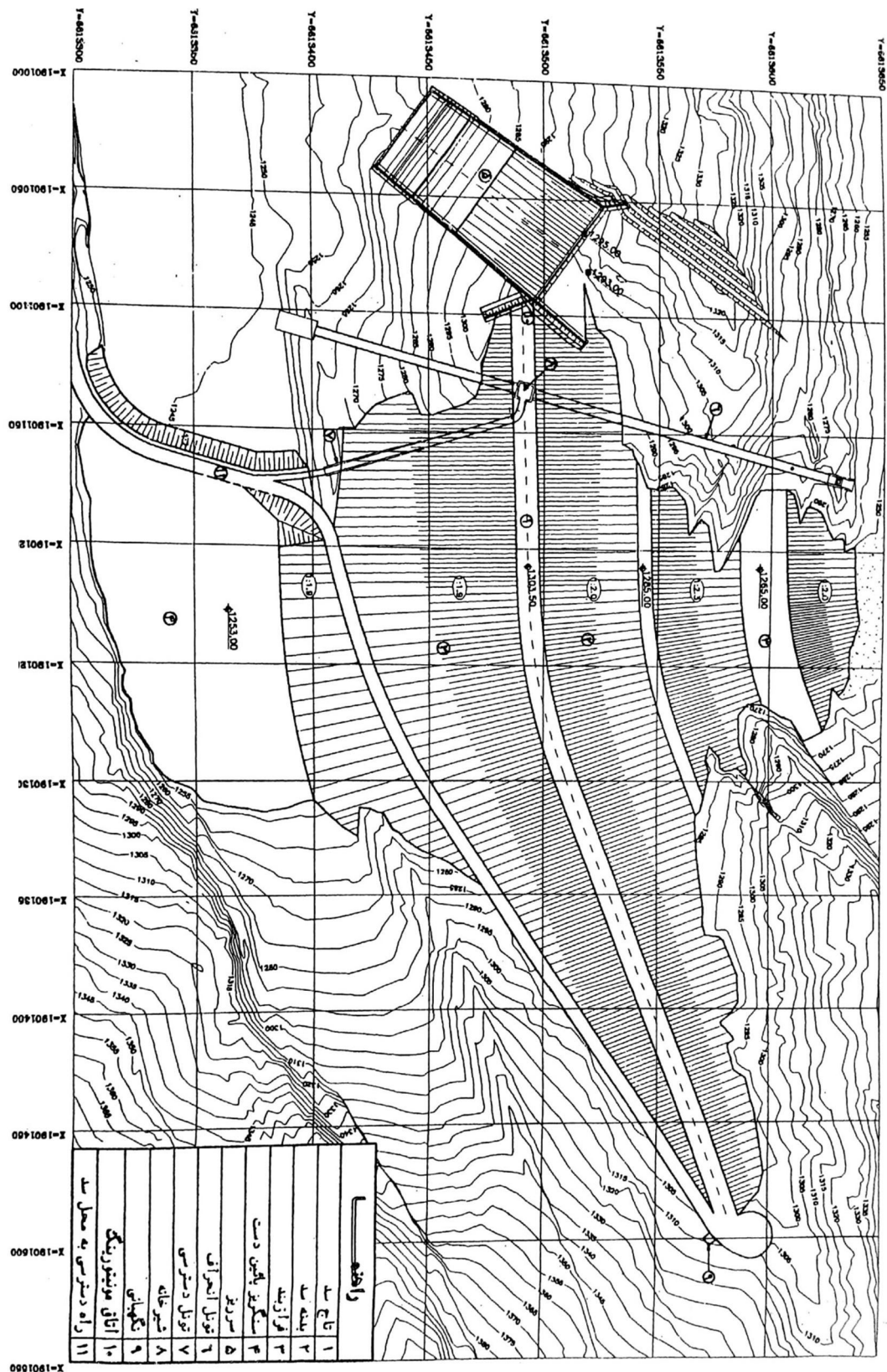
سرریز از نوع اوجی به همراه شوت و حوضچه آرامش از نوع پرتابی و یک تونل به منظور انحراف و آبیگری به عنوان گزینه برتر، اقتصادی و فنی انتخاب گردید [۳۶].

۴-۲-۲- سیمای کلی طرح

سد ذخیره ای ارداک به منظور تامین بخشی از آب شرب مشهد و تامین حقابه های اراضی کشاورزی پایاب سد بر روی رودخانه ارداک که یکی از سر شاخه های رودخانه کشف رود می باشد در محل اتصال دو رودخانه آبد و میانمرغ احداث شده است. تنظیم متوسط سالانه سد ارداک که یکی از مشخصات مخزن می باشد $30/30$ میلیون متر مکعب است که از این مقدار میزان $11/33$ میلیون متر مکعب سهم حقابه بوده (معادل $0/38$) و بقیه جهت مصارف شهری به مشهد منتقل می شود (سایر مشخصات مخزن در جدول (۴-۱) نشان داده شده است). این سد دارای ارتفاع $53/5$ متر از بستر رودخانه با هسته مرکزی و دیواره آب بند به طول 410 و عرض 10 متر می باشد و راه دسترسی به محل سد یک راه روستایی درجه دو به عرض $7/20$ متر و طول تقریبی 8 کیلومتر در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-۱) سیمای کلی طرح ارداک نشان داده شده است.

جدول (۴-۱): مشخصات مخزن سد خاکی ارداک [۳۶]

حجم مخزن در تراز نرمال	30 میلیون متر مکعب
حجم مفید مخزن	$23/92$ میلیون متر مکعب
حجم مرده مخزن	$6/08$ میلیون متر مکعب
حجم سالانه آورد رودخانه	$32/69$ میلیون متر مکعب
سطح مخزن در تراز نرمال	$166/9$ هکتار



شکل (۴-۱): سیمای کلی طرح ارداک [۳۶]

۴-۲-۳- محل و موقعیت طرح

محل سد ارداک در ۶۹ کیلومتری شمال غرب شهر مشهد در بخش گلبهار و در نزدیکی روستای ارداک واقع شده است. رودخانه ارداک یکی از سرشاخه های کشف رود است که از سمت چپ (شمال) به این رودخانه می پیوندد. کشف رود پس از عبور از دشت مشهد و رشته کوه های مزدوران به هریود پیوسته و وارد دشت قره قوم در ترکمنستان می شود.

۴-۲-۴- راه های دسترسی به طرح

جهت دستیابی به محل طرح از شهر مشهد ابتدا با طی مسافت ۲۴ کیلومتر به شهر طوس می رسیم. از شهر طوس سپس در مسیر جاده روستایی به سمت غرب حرکت کرده و پس از طی مسافت ۴۱ کیلومتر و عبور از روستاهای گوارشک، نقاب، انداد، درنگ آباد و دوله به روستای ارداک واقع در جناح چپ روخانه می رسیم. محل احداث سد در چهار کیلومتری شمال روستای ارداک و در محل اتصال دو رودخانه آبقد و میانمرغ قرار دارد. موقعیت راه های دسترسی به محل طرح و روستاهای منطقه در شکل (۴-۲) با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ نشان داده شده است.

۴-۲-۵- رواناب

رودخانه ارداک از بهم پیوستن دو شاخه بقمچ و آبقد در منتهی الیه خروجی حوزه آبریز ارداک تشکیل شده است. این رودخانه یکی از سرشاخه‌های عمده و اصلی کشف‌رود است که از سمت شمال به این رود می‌پیوندد. درصد توزیع ماهانه رواناب رودخانه مذکور نشان می‌دهد که از آبان‌ماه همزمان با شروع فصل بارندگی در منطقه، میزان دبی افزایش یافته تا اینکه در اردیبهشت ماه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. حداقل مطلق دبی رودخانه نیز بر اساس آمارهای موجود در حدود ۱۲۰ لیتر در ثانیه می‌باشد. جهت برآورد رواناب روش‌های تجزیه و تحلیل مختلفی به کار گرفته شده است و در نهایت مقدار حجم متوسط رواناب سالانه رودخانه ارداک در حدود ۳۲/۶۹ میلیون متر مکعب برآورد گردیده است. سری بلند مدت رواناب ۵۰ ساله رودخانه ارداک از سال اول بهره‌برداری (سال ۱۳۸۱) تا سال ۵۰ ام که عمر مفید سد می‌باشد، بر اساس مطالعات هیدرولوژی تخمین زده شده است که در جدول (۴-۲) ارائه گردیده است.

جدول (۴-۲): رواناب ۵۰ ساله سد ارداک [۳۶]

سال	رواناب متوسط سالانه (میلیون متر مکعب)										
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن
1	5.78	4.11	1.21	0.73	0.86	0.72	0.63	1.03	1.59	1.55	1.78
2	7.58	6.08	2.36	1.77	1.60	1.60	1.60	2.02	2.19	2.28	2.36
3	6.14	5.31	4.78	3.29	1.57	1.57	1.57	2.16	1.99	1.83	1.91
4	5.69	4.92	4.43	3.05	1.46	1.46	1.46	2.00	1.85	1.69	1.77
5	6.84	16.79	7.51	5.14	2.44	2.07	1.49	2.30	1.50	1.37	2.02
6	2.87	3.52	1.86	1.60	1.60	1.60	1.69	1.95	1.86	1.86	1.86
7	5.47	12.47	4.56	3.67	1.79	1.49	2.64	2.62	2.50	2.27	1.82
8	6.26	5.42	4.88	3.36	1.60	1.60	1.60	2.20	2.04	1.86	1.95
9	5.74	4.96	4.47	3.08	1.47	1.47	1.47	2.02	1.86	1.71	1.78
10	1.98	1.98	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.72	1.98	1.89
11	6.04	5.22	4.70	3.24	1.54	1.54	1.54	2.13	1.96	1.80	1.88
12	5.04	4.75	2.93	1.48	1.40	1.10	1.22	1.28	2.62	2.35	3.14
13	5.18	4.88	3.02	1.52	1.43	1.13	1.25	1.31	2.69	2.41	3.23
14	4.69	4.41	2.73	1.38	1.30	1.02	1.13	1.19	2.43	2.18	2.92
15	4.21	3.43	1.85	0.85	0.63	1.26	2.14	2.81	2.28	2.02	1.78
16	5.94	5.14	4.62	3.19	1.52	1.52	1.52	2.09	1.93	1.77	1.85
17	10.29	12.59	7.47	2.27	1.67	2.04	0.95	1.44	1.58	1.21	2.11
18	2.02	2.02	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.75	2.02	1.93
19	6.04	4.29	1.26	0.76	0.90	0.75	0.65	1.13	1.66	1.62	1.86
20	10.38	12.70	7.54	2.29	1.69	2.05	0.96	1.46	1.60	1.22	2.13
21	2.98	2.00	1.57	1.57	1.57	1.57	1.66	2.25	2.16	1.91	2.08
22	4.99	4.69	2.90	1.46	1.38	1.09	1.21	1.26	2.59	2.32	3.11
23	5.09	4.79	2.96	1.49	1.41	1.11	1.23	1.29	2.64	2.37	3.18
24	4.68	3.02	1.79	1.02	1.66	0.93	1.26	1.80	2.05	1.96	2.08
25	5.96	5.16	4.64	3.20	1.53	1.53	1.53	2.10	1.94	1.77	1.86
26	10.27	6.85	5.01	3.54	3.47	4.07	1.37	1.89	2.15	2.47	2.29
27	5.99	4.25	1.25	0.75	0.89	0.75	0.65	1.12	1.65	1.61	1.85
28	5.06	4.76	2.94	1.49	1.40	1.11	1.22	1.28	2.63	2.36	3.16
29	1.97	1.97	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.71	1.97	1.88
30	10.08	12.33	7.32	2.22	1.64	1.99	0.93	1.41	1.55	1.18	2.07
31	4.61	2.98	1.77	1.00	1.64	0.92	1.25	1.78	2.02	1.93	2.05
32	5.68	4.91	4.42	3.05	1.45	1.45	1.45	2.00	1.84	1.69	1.77
33	1.89	1.89	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.64	1.89	1.81
34	6.18	5.35	4.81	3.32	1.58	1.58	1.58	2.17	2.01	1.84	1.92
35	4.33	3.39	2.09	1.66	1.58	1.58	1.58	1.83	1.92	1.83	2.17
36	5.23	4.92	3.04	1.53	1.45	1.14	1.26	1.33	2.71	2.44	3.26
37	5.16	4.86	3.00	1.51	1.43	1.13	1.25	1.31	2.68	2.40	3.22
38	5.59	4.84	4.36	3.00	1.43	1.43	1.43	1.97	1.82	1.66	1.74
39	4.63	2.99	1.77	1.01	1.65	0.92	1.25	1.78	2.02	1.94	2.06
40	9.87	6.59	4.82	3.40	3.33	3.91	1.32	1.82	2.07	2.37	2.20
41	2.02	2.02	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.75	2.02	1.93
42	9.70	21.58	5.09	1.38	1.91	2.11	0.40	0.56	1.13	1.17	1.86
43	4.73	3.06	1.81	1.03	1.68	0.94	1.28	1.82	2.07	1.98	2.10
44	2.85	3.49	1.85	1.59	1.59	1.59	1.67	1.93	1.85	1.85	1.85
45	5.77	4.99	4.49	3.10	1.48	1.48	1.48	2.03	1.87	1.72	1.79
46	4.22	3.44	1.85	0.85	0.63	1.26	2.14	2.81	2.28	2.02	1.79
47	9.86	24.20	10.82	7.41	3.51	2.98	2.15	3.32	2.16	1.97	2.91
48	4.81	5.65	3.92	1.77	1.29	1.51	0.83	0.85	0.85	1.17	1.41
49	5.11	4.81	2.97	1.50	1.41	1.12	1.24	1.30	2.65	2.38	3.19
50	2.86	3.50	1.85	1.59	1.59	1.59	1.68	1.94	1.85	1.85	1.85
جمع	5.53	5.89	3.50	2.14	1.60	1.54	1.40	1.77	2.00	1.90	2.17
											3.25

۴-۲-۶- رسوب

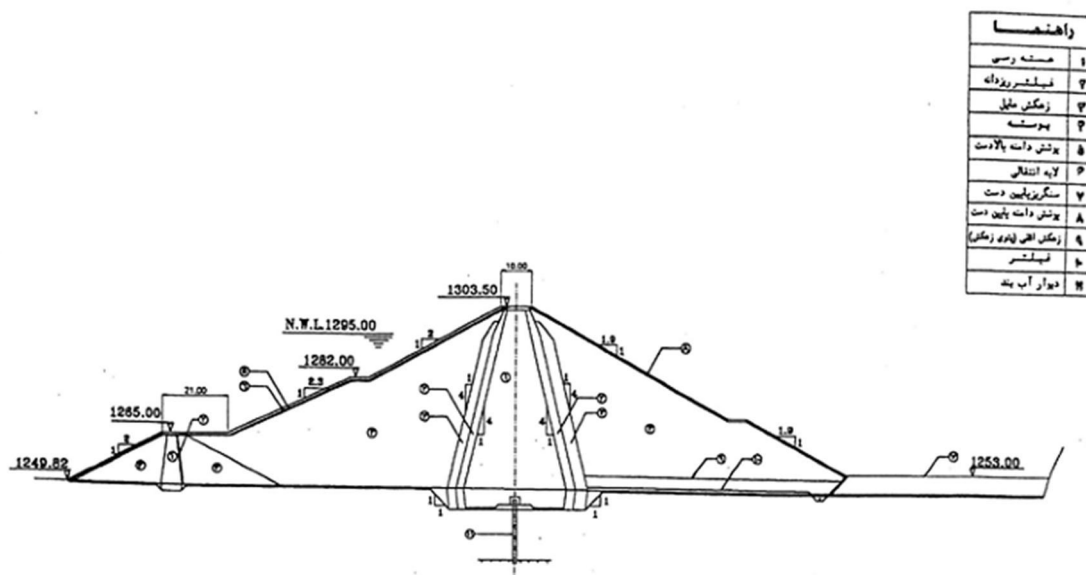
رسوبات رودخانه ارداک بر اساس گزارش جهادسازندگی در سال ۱۳۶۸ به طور متوسط از قرار غلظت ۵/۴ کیلوگرم در متر مکعب بوده و حجم رسوب سالانه آن در حدود ۰/۱۵ میلیون متر مکعب تخمین زده می‌شود بنابراین حجم رسوبات پنجاه سالانه مخزن ۷/۵ میلیون متر مکعب خواهد بود.

۴-۲-۷- بدنه سد

سد ارداک در تنگه ای باریک با عرض بستر ۵۵ متر به طول ۴۱۰ متر و عرض ۱۰ متر احداث شده است. بر اساس طراحی های هیدرولیکی انجام شده و با در نظر گرفتن تراز نرمال ۱۲۹۵ متر از سطح مبنا، و تراز تاج سد ۱۳۰۳/۵ متر از سطح مبنا انتخاب گردیده است. همانطور که در شکل (۳-۴) ملاحظه می شود بدنه سد شامل پوسته، هسته رسی، پنجه سنگی، ریپ راپ، لایه انتقالی، پتوی زهکش، فیلتر و زهکش می باشد. مطالعات انجام شده نشان داده اند که سنگ کف در محل سد پایین بوده و در محل هسته بایستی در حدود ۲۰ متر آبرفت برداشته شده تا هسته به سنگ متصل گردد. با توجه به مناسب بودن شرایط و به منظور اقتصادی بودن طرح در مسیر رودخانه بدنه سد بر روی پی آبرفتی قرار گرفته و در محل هسته رسی در حدود ۶ متر آبرفت برداشته شده و در زیر هسته تا سنگ کف که در حدود ۱۶ متر می باشد، یک دیواره آب بند بتن پلاستیک به عرض ۱/۲ متر پیش بینی شده است. در جناحین هسته رسی سد با توجه به کاهش ضخامت آبرفت به سنگ کف متصل خواهد شد [۳۶].

در طراحی بدنه سد، تحلیل های پایداری، تنش-کرنش و تراوش انجام شده است. این تحلیل ها نشان دهنده کفایت شیب های بدنه بوده و مقدار تراوش از کل بدنه سد و در شرایط وجود سطح آب در تراز نرمال و در حالت دائمی، حدود ۱۱/۴ متر مکعب در روز برآورد گردیده است. معماری تاج سد به گونه

ایست که علاوه بر ایجاد امکان جهت عبور وسایل نقلیه مورد نیاز، قرار دادن کابل‌های برق و ابزار دقیق و نیز عبور عابر پیاده بر روی آن، ایمنی افراد و زیبایی تاج نیز تامین شود [۳۶].



شکل (۳-۴): مقطع عرضی سد و مصالح آن [۳۶]

۸-۲-۴- آب بندی و تحکیم پی و جناحین سد

رسوبات آبرفتی پی سد ارداک غالباً شامل مواد درشت دانه شن و ماسه، قلوه سنگ و به مقدار کمی مواد ریزدانه است. ضخامت این رسوبات در محدوده پی سد ۲۰ متر بوده و نفوذ پذیری آنها در مکان‌های مختلف متفاوت است که مقادیر آن از حدود $۱۰^{-۶}$ تا $۱۰^{-۲}$ متر بر ثانیه تغییر می‌کند که با توجه به این اندازه گیری‌ها و تقریباً متوسط و طبق گزارش مربوطه به مقدار $۱۰^{-۴} \times ۳/۵$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به جهت کنترل تراوش در آب پی آبرفتی، دیوار آب بند بتن پلاستیک طراحی شده و سنگ بستر زیر دیواره در موارد لازم تزریق آب بندی می‌شود. در جناحین سد که بدنه سد بر روی سنگ بستر قرار می‌گیرد، علاوه بر تزریق آب‌بند پی که عامل اصلی آب‌بندی پی سد می‌باشد، تزریق تحکیمی در زیر هسته رسی به جهت تحکیم پی انجام شده است. (شایان ذکر است که در این تحقیق

اثرات تزریق بر تراوش در نظر گرفته نشده و فقط دیوار آب بند در کنترل تراوش مد نظر قرار گرفته است).

با توجه به سطح نسبتاً کم دیوار و تقریباً یکسان بودن بار آبی در طول دیوار بتنی، ضخامت دیواره آب بند در تمام قسمت ها به صورت یکسان و برابر ۱/۲ متر طراحی شده است. این دیوار از پایین به سنگ بستر غیرهوازده (یک متر نفوذ در داخل سنگ غیر هوا زده) و از بالا به هسته رسی متصل می شود [۳۶].

۴-۲-۹- منابع قرضه و مصالح سد

به منظور تعیین محل مناسب برای تهیه منابع قرضه مختلف مورد لزوم ساخت سد و تاسیسات وابسته بررسی های صحرایی در محدود طرح انجام و پس از نمونه گیری و انجام آزمایشات مختلف بر روی آنها، محل هایی برای تهیه مصالح درشت دانه مخلوط (جهت استفاده در پوسته سد)، مصالح ریز دانه رسی (جهت استفاده در هسته آب بند سد) و شن و ماسه (جهت تهیه فیلتر، زهکش و بتن) و معدن سنگ معین گردیده که پوش دانه بندی این مصالح در شکل شماره (۴-۴) و (۴-۵) نمایش داده شده است و با توجه به آنها و فرمول (۴-۱) که در ادامه ارائه می گردد، نفوذپذیری اشباع هر یک از مصالحی که در گزارش نیامده، محاسبه و در نرم افزار استفاده شده است. همچنین برای حالت اشباع/غیراشباع از اندازه ذرات این مصالح برای رسم منحنی تغییرات نفوذپذیری، در نرم افزار استفاده گردیده است.

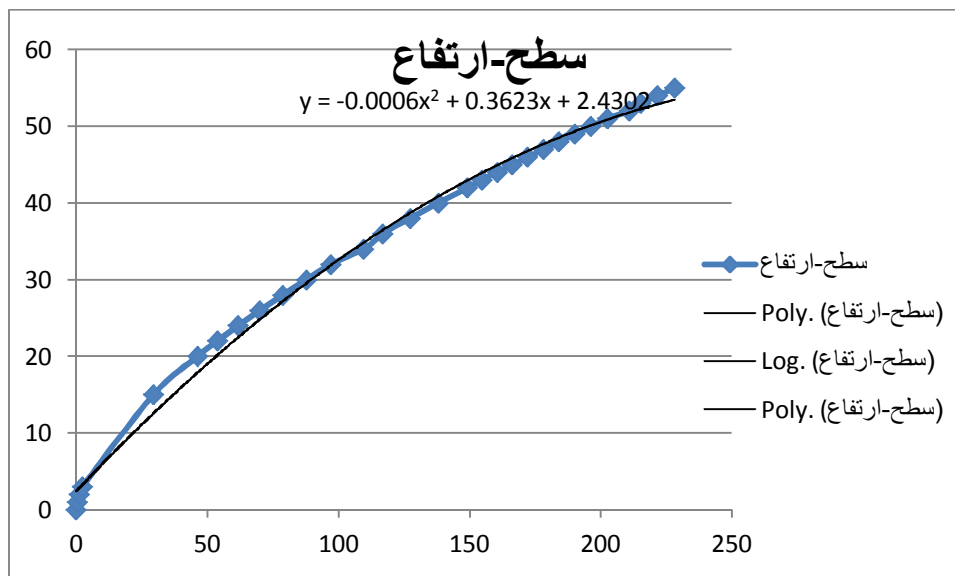
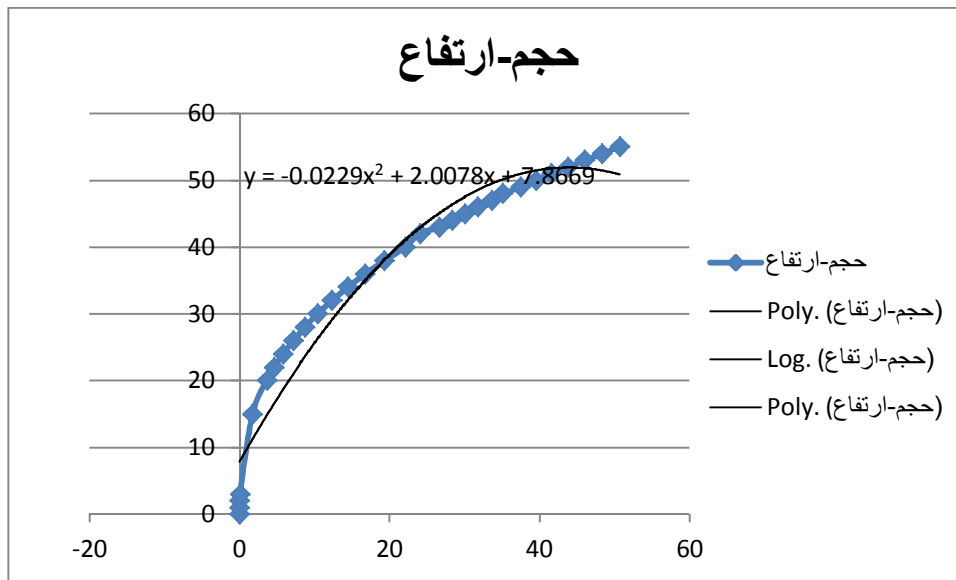
۴-۲-۱۰- مشخصات سطح و حجم مخزن سد

مشخصات سطح و حجم مخزن برحسب ارتفاع دریاچه سد ارداک در جدول (۴-۳) آورده شده است.

جدول (۴-۳): مقادیر سطح و حجم مخزن سد در برابر ارتفاع [۳۶]

ارتفاع	حجم (میلیون متر مکعب)	سطح (هکتار)
۰	۰	۰/۴۱
۱	۰	۱/۲۲
۲	۰/۰۱	۲/۳۲
۳	۰/۰۳	۲۹/۴۱
۱۵	۱/۷	۴۶/۲۹
۲۰	۳/۶۱	۵۳/۸
۲۲	۴/۶۳	۶۱/۷۲
۲۴	۵/۸۱	۷۰/۰۲
۲۶	۷/۱۶	۷۸/۷
۲۸	۸/۶۹	۸۷/۷۵
۳۰	۱۰/۴	۹۷/۱۵
۳۲	۱۲/۳۱	۱۰۹/۶
۳۴	۱۴/۴۳	۱۱۶/۹
۳۶	۱۶/۷۵	۱۲۷/۴
۳۸	۱۹/۲۹	۱۳۸/۱
۴۰	۲۲/۰۶	۱۴۹/۱
۴۲	۲۴/۰۲	۱۵۴/۸
۴۳	۲۶/۶۴	۱۶۰/۵
۴۴	۲۸/۲۹	۱۶۶/۳
۴۵	۳۰	۱۷۲/۱
۴۶	۳۱/۷۷	۱۷۸/۱
۴۷	۳۳/۶۱	۱۸۴/۱
۴۸	۳۵/۱	۱۹۰/۲
۴۹	۳۷/۴۷	۱۹۶/۳
۵۰	۳۹/۵۱	۲۰۲/۶
۵۱	۴۱/۶	۲۱۰/۹
۵۲	۴۳/۷۷	۲۱۵/۳
۵۳	۴۶	۲۲۱/۷
۵۴	۴۸/۳	۲۲۸/۲
۵۵	۵۰/۶۷	

با توجه به مقادیر حجم و سطح داده شده و ارتفاع آنها، در نرم افزار اکسل نمودارهای مربوط به سطح و حجم مخزن نسبت به ارتفاع رسم گردید که در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶): نمودارهای حجم و سطح بر حسب ارتفاع سد ارداک

۴-۳- محاسبات

از آنجا که مقدار نشت عموماً در چند سال اول و به دلیل عدم وجود رسوب در کف دریاچه می تواند قابل ملاحظه باشد و سپس به تدریج با افزایش ارتفاع رسوبات از میزان نشت کاسته می شود، در این تحقیق میزان نشت از پی سد در ۵ سال اولیه بهره برداری مورد بررسی قرار گرفته و پیش بینی شده است که از آن پس مقدار نشت به صورت قابل ملاحظه ای کاهش یابد. به دلیل اختلاف در آورد رودخانه و برداشت آب در نیمسال های مختلف، و برای دقت بیشتر، در مجموع ۱۰ نیمسال مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به گزارشات مشاور طرح، غلظت رسوبات $5/4 \text{ kg}$ در هر متر مکعب آورد رودخانه، حجم رسوبات در هر سال به طور میانگین $0/15$ میلیون متر مکعب، وزن مخصوص رسوبات $1/177$ تن بر متر مکعب و حجم کل رسوبات در ۵۰ سال عمر مفید سد $7/5$ میلیون متر مکعب می باشد. با توجه به حجم مرده مخزن که در جدول (۴-۱) ذکر شد و بدین ترتیب ارتفاع رسوبات و آب ها در این نیمسال ها محاسبه و طبق آنها برای شرایط دائمی مدل سازی برای آنها انجام شد.

• محاسبه وزن مخصوص رسوبات

$$32/69 \text{ ml.m}^3 = \text{متوسط رواناب سالانه}$$

$$7/5 \text{ ml.m}^3 = \text{حجم رسوبات ۵۰ ساله}$$

$$882630000 \text{ kg} = 32/69 * 10^6 * 5/4 * 50 = \text{وزن رسوبات در ۵۰ سال}$$

$$882630000 \div 7/5 = 1176/84 \text{ kg/m}^3 \quad \text{وزن مخصوص رسوبات}$$

شایان ذکر است که با توجه به نقشه توپوگرافی منطقه، شیب رودخانه در منطقه بالادست سد معادل یک درصد محاسبه و بر اساس آن و منحنی حجم-ارتفاع، طول رسوبات نیز محاسبه گردید.

برای مدل سازی، از مقاطع نشان داده شده در شکل (۴-۷)، که مقاطع عرضی بدنه سد ارداک در مرکز و جناحین سد را نمایش می‌دهد و همچنین از شکل (۴-۸)، که برش زمین شناسی در امتداد محور سد را ارائه می‌نماید استفاده گردید. به این ترتیب که با توجه به ضخامت آبرفت و عمق سنگ کف، دو مقطع ۱ و ۲ برای محاسبه نشت از برش زمین شناسی انتخاب گردید، تا بتوان مقدار نشت را که برای هر مقطع به صورت دو بعدی در نرم افزار محاسبه کرد و با توجه به طولی از بستر نفوذپذیر که به هر یک از دو مقطع یاد شده تعلق می‌گیرد، مقدار دبی کل (که مشابه حالت سه بعدی است) را محاسبه نمود، یعنی برای محاسبه نشت از پی به صورت سه بعدی (و برای کل سد) با ضرب مقدار نشت هر یک از مقاطع ۱ و ۲، که برای واحد طول به دست می‌آید، در طول مرتبط و منطبق با آن، نشت کلی از پی سد به دست می‌آید.

با توجه به شکل (۴-۸) و موقعیت مقاطع انتخابی ۱ و ۲ و وضعیت سنگ کف (بستر نفوذناپذیر)، و مقیاس در نظر گرفته شده در شکل یاد شده که طول دیوار آببند را ۴۱۰ متر بیان می‌نماید (معادل ۲۰/۵ سانتیمتر در روی نقشه):

- طول پی نفوذپذیر مرتبط با مقطع ۱ در امتداد محور سد:

$$(410 \div 20/5) * 7/35 = 147 \text{ m}$$

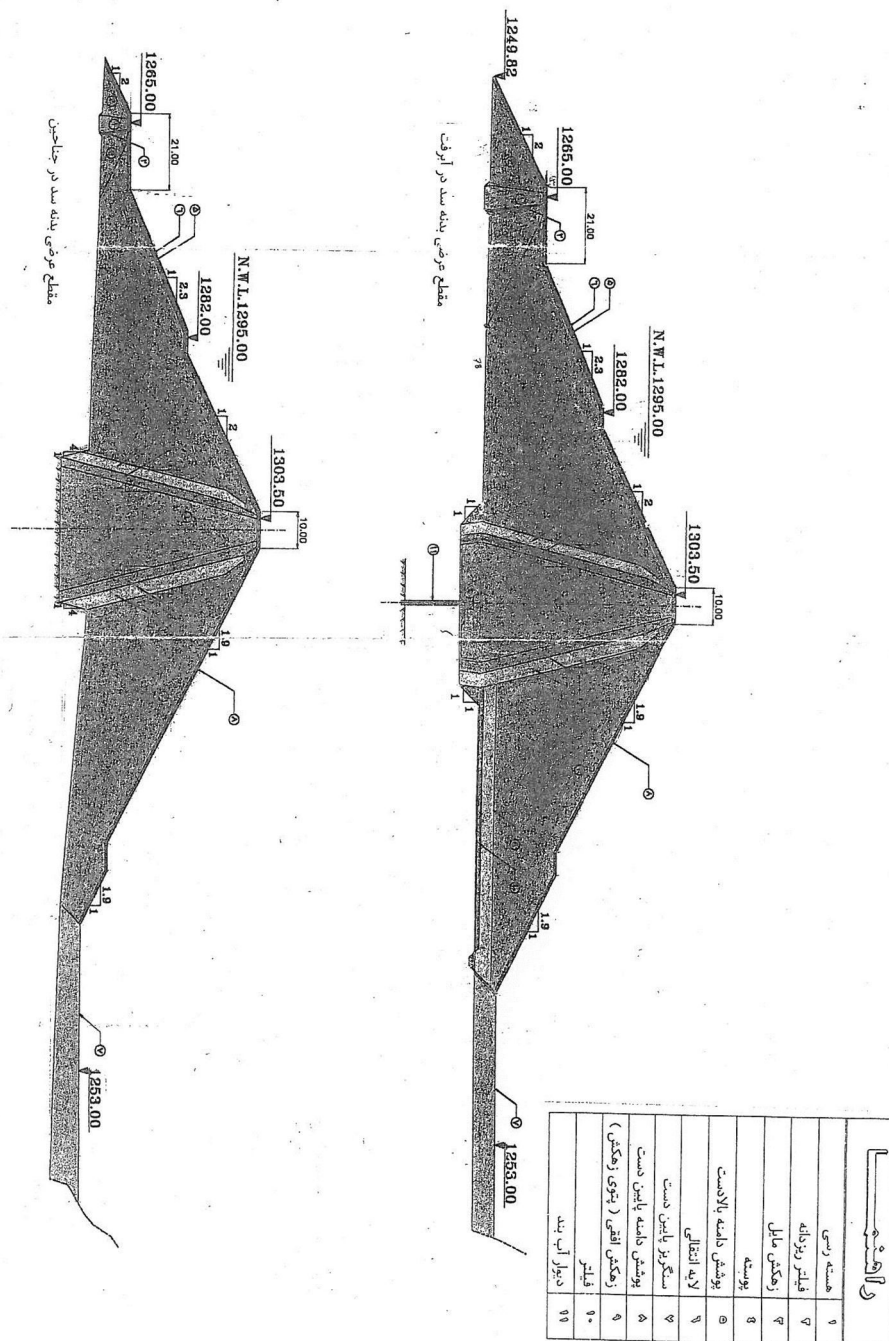
- طول پی نفوذپذیر مرتبط با مقطع ۲ در امتداد محور سد:

$$(410 \div 20/5) * 3/7 = 74 \text{ m}$$

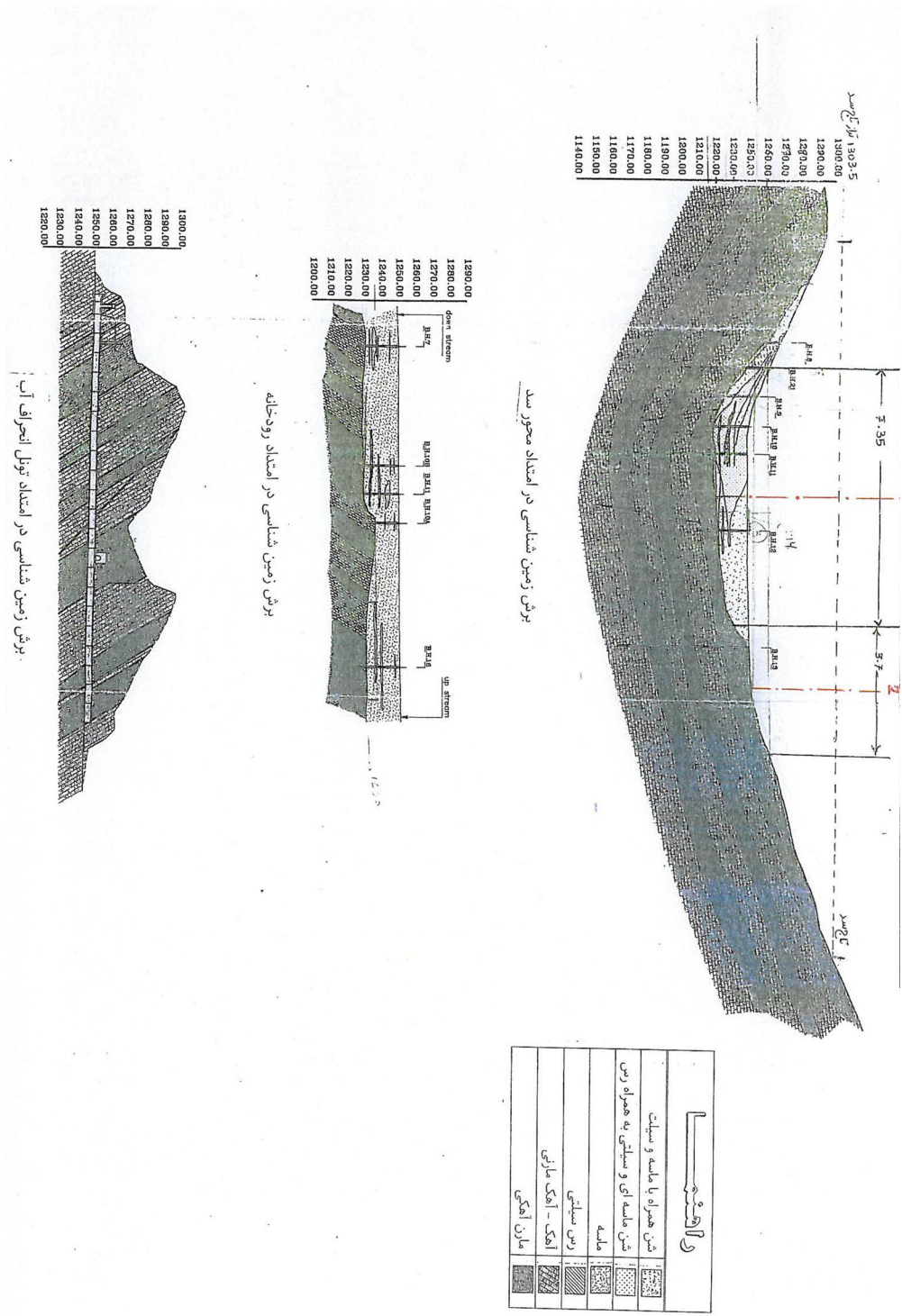
با توجه به برش زمین‌شناسی در شکل (۴-۸)، در دیگر مقاطع عرضی، پی آبرفتی وجود ندارد بنابراین مقدار نشت از پی آن مقاطع معادل صفر بوده، از مدل سازی آنها صرف نظر می‌گردد.

در این مدل‌سازی با توجه به دانه‌بندی مصالح مختلف که در گزارش سد خاکی ارداک آمده بود واز فرمول (۴-۱)، ضریب نفوذپذیری برای مصالح مختلفی که در گزارش نیامده است، محاسبه و در نرم افزار قرار داده شده است.

درمقاطع ذکر شده آنالیز تراوش برای سه حالت بدون آب بند و حضور رسوب، با آب بند و بدون رسوب و با آب بند و حضور رسوب انجام می‌شود و نتایج حالات مختلف تفسیر و ارزیابی و با یکدیگر مقایسه می‌گردند.



شکل (۴-۷): مقطع عرضی مرکزی و جناحین سد ارداک [۳۶]



شکل (۸-۴): مقاطع طولی زمین شناسی سدارداک [۳۶]

۴-۳-۱- محاسبه متوسط رسوب و متوسط حجم آب

طبق گزارش مصوب مربوط به پروژه سد ارداک، تخصیص آب کشاورزی $11/51 = 30/3 * 0/38$ میلیون متر مکعب در سال است که فرض می شود همه آن باید در نیمسال اول (با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه از اول اردیبهشت تا پایان مهر) در اختیار کشاورزی قرار داده شود.

تخصیص متوسط آب شرب $18/79 = 30/3 * 0/62$ میلیون متر مکعب برآورد شده که نظر به اولویت تامین آب کشاورزی و امکان تامین آب شرب شهر مشهد از سایر منابع (در کوتاه مدت) فرض می گردد پس از تامین آب مورد نیاز کشاورزی، هر مقدار که از حجم مخزن امکان پذیر بود (و حداکثر تا ۱۳ میلیون متر مکعب) در نیمسال ۱ به آب شرب اختصاص داده می شود و مابقی نیاز و در صورت وجود آب، در نیمسال ۲ (از اول ماه آبان تا آخر فروردین) به این امر اختصاص پیدا خواهد کرد.

جدول (۴-۴)، مقدار حجم رسوب و حجم آب موجود در مخزن را در نیمسال های مختلف و برای ۵ سال اولیه بهره برداری نشان می دهد. شایان ذکر است که در استخراج جدول (۴-۴) و با توجه به بررسی های مشاور، درصد حجمی رسوبات معادل $0/00459 = 32/69 \div 0/15$ در نظر گرفته شده و در عین حال، از حجم آب مدیریت شده در مخزن، میزان تبخیر حذف گشته و در نظر گرفته نشده است.

برای نمونه نحوه محاسبه مقدار ارتفاع آب و رسوب برای نیمسال ۱ سال اول در زیر آورده شده است.

طبق جدول (۴-۲) مقدار آورد رودخانه برای نیمسال اول سال اول $8/26 \text{ mcm}$ می باشد.

حجم رسوبات : $0/00459 * 8/26 = 0/038 \text{ mcm}$

حجم آب تنها : $8/26 - 0/038 = 8/222 \text{ mcm}$

در این نیمسال مقدار حجم تجمعی رسوبات برابر با همان حجم رسوبات یعنی $0/038$ می باشد.

حجم تجمعی رسوب - حجم مرده مخزن = حجم آب موجود در بالای تراز رسوبات $= 6/08 - 0/038 = 6/042$

در پایان نیمسال اول

با توجه به اینکه مقادیر رسوب و آب در پایان ۶ ماه می باشد بنابراین برای مدل سازی در نرم افزار از مقادیر متوسط آنها استفاده کردیم.

$$\left(\frac{\text{حجم رسوب نیمسال مورد نظر}}{2} \right) + \text{مقدار حجم تجمعی رسوب در نیمسال قبل} = \text{متوسط رسوب}$$

$0/019 \text{ mcm} = 0/038 \div 2$ متوسط رسوب در نیمسال ۱ سال ۱

$3/021 \text{ mcm} = 6/042 \div 2$ متوسط آب در نیمسال ۱ سال ۱

جدول (۴-۴): محاسبه حجم رسوب و حجم آب (احجام به میلیون متر مکعب)

سال	*نیمسال	آورد رودخانه	حجم رسوبات	حجم آب تنها	حجم تجمعی رسوبات	حجم آب موجود در بالای رسوبات در پایان نیمسال	متوسط حجم رسوب	متوسط حجم آب
۱	۱	۸/۲۶	۰/۰۳۸	۸/۲۲۲	۰/۰۳۸	۶/۰۴۲	۰/۰۱۹	۳/۰۲۱
	۲	۱۴/۱۸	۰/۰۶۵	۱۴/۱۱۵	۰/۱۰۳	۵/۹۷۷	۰/۰۷۰۵	۶/۰۰۹۵
۲	۱	۱۵/۰۱	۰/۰۶۹	۱۴/۹۴۱	۰/۱۷۲	۵/۹۰۸	۰/۱۳۷۵	۵/۹۴۳
	۲	۲۲/۳۶	۰/۱۰۳	۲۲/۲۵۷	۰/۲۷۵	۱۲/۷۷۳	۰/۲۲۳۵	۹/۳۴۰۵
۳	۱	۱۸/۰۹	۰/۰۸۳	۱۸/۰۰۷	۰/۳۵۸	۶/۲۷	۰/۳۱۶۵	۹/۵۲۱۵
	۲	۱۷/۷۲	۰/۰۸۱	۱۷/۶۳۹	۰/۴۳۹	۱۸/۱۱۹	۰/۳۹۸۵	۱۲/۱۹۴۵
۴	۱	۱۶/۷۸	۰/۰۷۷	۱۶/۷۰۳	۰/۵۱۶	۱۰۳/۱۴	۰/۴۷۷۵	۱۴/۲۱۶۵
	۲	۱۶/۴۲	۰/۰۷۵	۱۶/۳۴۵	۰/۵۹۱	۲۰/۸۶۹	۰/۵۵۳۵	۱۵/۵۹۱۵
۵	۱	۳۵/۴۴	۰/۱۶۳	۳۵/۲۷۷	۰/۷۵۴	۳۱/۶۳۶	۰/۶۷۲۵	۲۶/۲۵۲۵
	۲	۱۹/۱۸	۰/۰۸۸	۱۹/۰۹۲	۰/۸۴۲	۴۴/۹۳۸	۰/۷۹۸	۳۸/۲۸۷**

* با توجه به نیاز آبی کشاورزی در منطقه، نیمسال ۱ از ۲/۱ تا ۷/۳۰ (اول ماه ۲ تا آخر ماه ۷) و نیمسال ۲، از

۸/۱ تا ۱۳/۳۱ سال بعد در نظر گرفته شده است.

** حجم آب موجود در مخزن، با توجه به آورد رودخانه و ذخیره های قبلی، حداکثر در تراز تاج سرریز منظور شده است.

۴-۳-۲- محاسبات مربوط به حجم و ارتفاع رسوبات و آب و نیز طول رسوبات در امتداد رودخانه

همانطور که قبلاً اشاره گردید؛ با توجه به محاسبات مربوط به حجم آب و رسوب در جدول (۴-۴) و نیز ارتباط بین حجم و سطح مخزن که در جدول (۴-۳) آمده است و با استفاده از درونیابی ارتفاع آب و رسوبات که در جدول (۴-۳) ارائه گشته، طول رسوبات در امتداد رودخانه بالادست محاسبه شده است (جدول (۴-۵))، شایان ذکر است که طبق گزارشات مربوطه و بر اساس توپوگرافی منطقه و مقادیر سطح در هر ارتفاع که در گزارشات نیز آمده است شیب‌ها محاسبه شد ولی با توجه به متفاوت بودن شیب‌ها در هر ارتفاع و همچنین پیش‌بینی تاثیر کم این تغییرات در مقدار نشت، شیب مخزن سد در بالادست آن و در محدوده نزدیک به سد را برابر میانگین آنها یعنی معادل ۰/۰۱ فرض شده است.

در ادامه به عنوان مثال ارتفاع رسوب در نیمسال ۱ در سال اول به صورت زیر محاسبه می‌شود:

طبق جدول (۴-۳):

ارتفاع (m)	حجم (mcm)
۲	۰/۰۱
۳	۰/۰۳

حجم رسوب در این نیمسال ۰/۰۱۹ mcm بنابراین با استفاده از درونیابی داریم:

$$y - 3 = \frac{3 - 2}{0.03 - 0.01} (0.019 - 0.03) = 2.45 \text{ m}$$

ارتفاع رسوب و ارتفاع آب و رسوب در تمامی نیمسال‌ها مانند این روش و طبق جدول (۴-۳) محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۴-۵) آورده شده است.

شایان ذکر است با توجه به شیب ۱ درصد رودخانه طول رسوبات محاسبه شد و در جدول (۴-۵) آورده شده است و به عنوان مثال برای نیمسال ۱ سال اول داریم:

۱۰۰* ارتفاع رسوب = طول رسوبات

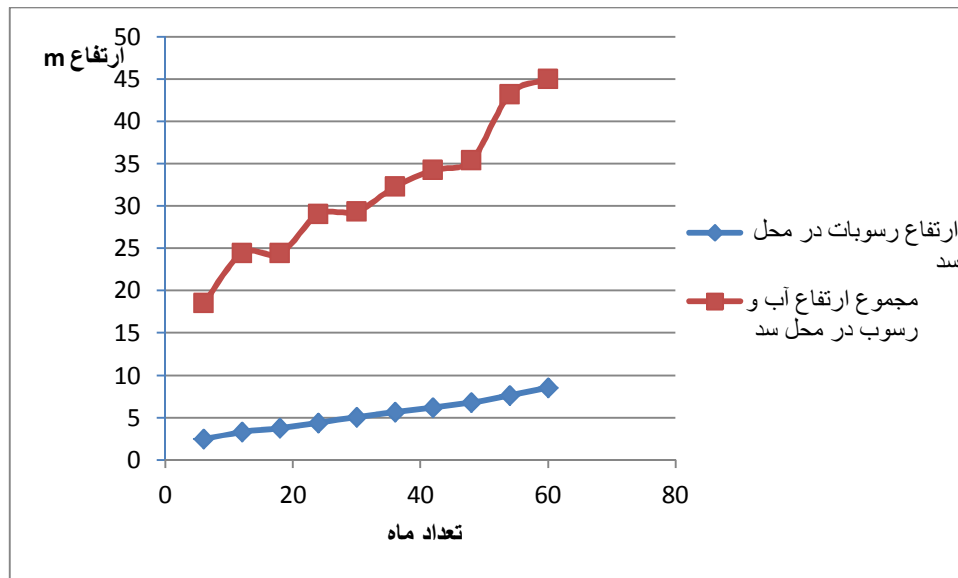
$$m \quad 245 = 10 * 24.5 = \text{طول رسوبات در نیمسال ۱ سال اول}$$

جدول (۴-۵): ارتفاع رسوب و آب و طول رسوب

سال	نیمسال	متوسط حجم رسوب (mcm)	متوسط حجم آب (mcm)	مجموع حجم آب و رسوب (mcm)	ارتفاع رسوب در محل سد (m)	ارتفاع مجموع (هد آب) (m)	طول رسوب (m)
۱	۱	۰/۰۱۹	۳/۰۲۱	۳/۰۴	۲/۴۵	۱۸/۵۰۷۸۱۲	۲۴۵
	۲	۰/۰۷۰۵	۶/۰۰۹۵	۶/۰۸	۳/۲۹۰۶۱۳	۲۴/۴۰۰۵۲	۳۲۹/۰۶۱۳
۲	۱	۰/۱۳۷۵	۵/۹۴۳	۶/۰۸	۳/۷۶۸۴۸۲	۲۴/۴۰۰۵۲	۳۷۶/۸۴۸۲
	۲	۰/۲۲۳۵	۹/۳۴۰۵	۹/۵۶۴	۴/۳۹۰۰۷۱	۲۹/۰۲۲۰۵۴۴	۴۳۹/۰۰۷۱
۳	۱	۰/۳۱۶۵	۹/۵۲۱۲	۹/۸۳۷۷	۵/۰۵۸۳۹۶	۲۹/۳۴۲۱۷۳۹۲	۵۰۵/۸۳۶۹
	۲	۰/۳۹۸۵	۱۲/۱۹۴۵	۱۲/۵۹۳	۵/۶۴۷۶۲۱	۳۲/۲۶۷۲۳۶۲	۵۶۴/۷۶۲۱
۴	۱	۰/۴۷۷۵	۱۴/۲۱۶۵	۱۴/۶۹۴	۶/۲۱۵۳۱۵	۳۴/۲۲۷۵۸۶	۶۲۱/۵۳۱۵
	۲	۰/۵۵۳۵	۱۵/۵۹۱۵	۱۶/۱۴۵	۶/۷۶۱۴۵۱	۳۵/۴۷۸۴	۶۷۶/۱۴۵۱
۵	۱	۰/۶۷۲۵	۲۶/۲۵۲۵	۲۶/۹۲۵	۷/۶۱۶۵۸۵	۴۳/۱۷۲۷۳	۷۶۱/۶۵۸۵
	۲	۰/۷۹۸	۳۸/۲۸۷	۳۹/۰۸۵	۸/۵۱۸۴۲۸	*۴۹/۷۹۱۶۷	۸۵۱/۸۴۸۲

* به دلیل اینکه از تراز نرمال بالاتر است در مدل سازی ارتفاع آن معادل ارتفاع تراز نرمال یعنی ۴۵ متر فرض گردید.

در شکل (۹-۴) روند تغییرات ارتفاع رسوبات و نیز مجموع آب و رسوبات را در محل سد نشان می دهد.



شکل (۹-۴): منحنی میزان ارتفاع رسوب و مجموع آب و رسوب در محل سد

۳-۳-۴- نفوذپذیری اشباع مصالح

در گزارشات سد خاکی ارداک میزان نفوذ پذیری اشباع پوسته سد $2.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ، هسته سد $5.87 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ و دیوار آب بند 10^{-8} m/s گزارش شده است. برای بدست آوردن دیگر نفوذپذیری ها از روابط تجربی استفاده شده است [۳۵].

همانگونه که قبلا اشاره گردید، یکی از روابط تجربی که برای بدست آوردن میزان نفوذ پذیری خاک ها استفاده می شود رابطه هیزن (Hazen) به صورت زیر است با استفاده از این فرمول و پوش دانه بندی مصالح (شکل (۴-۵)) و مقدار D_{10} ، نفوذپذیری مصالح محاسبه شده و در جدول (۴-۶) آورده شده است.

$$K = 0.01 * (D_{10}^2) \quad (۱-۴)$$

در معادله فوق:

K: ضریب نفوذپذیری خاک ها (m/s)

D_{10} : اندازه موثر (قطری که ۱۰ درصد خاک از آن عبور می کند) بر حسب mm

جدول (۴-۶): مقدار نفوذپذیری مصالح محاسبه شده با فرمول (۴-۱)

میزان نفوذپذیری (m/s)	
فیلتر	$10^{-3} \times 1/2$
زهکش افقی	۰/۲۷
زهکش مایل	۰/۱۵۲۱
محافظ پوسته پایین دست	۱۰۶/۰۹
لایه انتقالی	۱۸/۴۹

میزان نفوذ پذیری رسوبات در گزارش مشاور مربوط نیامده است ولی با توجه به نوع دانه بندی ذرات

آن معمولاً بین 10^{-2} تا 10^{-9} سانتیمتر بر ثانیه طبق جدول (۴-۷) تغییر می کند.

جدول (۴-۷) تغییرات ضریب نفوذپذیری در رسوبات آبرفتی (سانتیمتر بر ثانیه) [۳۹]

نوع رسوبات	رس	ماسه دانه ریز و سیلت مخلوط ماسه و رس	ماسه ، ماسه + شن بدون ذرات ریز	شن و سنگریزه بدون ذرات ریز
نفوذپذیری	بدون نفوذ پذیری (یا خیلی کم)	نفوذ پذیری کم	نفوذ پذیری زیاد	نفوذپذیری خیلی زیاد
	10^{-9} تا 10^{-7}	10^{-6} تا 10^{-4}	10^{-3} تا 10^{-1}	10^{-2} تا 10

با توجه به اینکه جنس مصالح منطقه سد ارداک که بیشتر در گروه سوم یعنی ماسه دانه ریز و سیلت مخلوط ماسه و رس می باشد در این تحقیق نفوذپذیری رسوبات 10^{-5} سانتی متر بر ثانیه (10^{-7} متر بر ثانیه) فرض گشته است.

۴-۴- مدل سازی در نرم افزار

در این قسمت به چگونگی مدل سازی سد در حالت های مختلف بدون آب بند و بدون حضور رسوب، بدون آب بند و حضور رسوب، با آب بند و حضور رسوب در نرم افزار seep/w بر اساس آنچه در فصل ۳ اشاره گردید، پرداخته می شود.

۴-۴-۱- مدل سازی سد با حضور آب بند و بدون رسوب

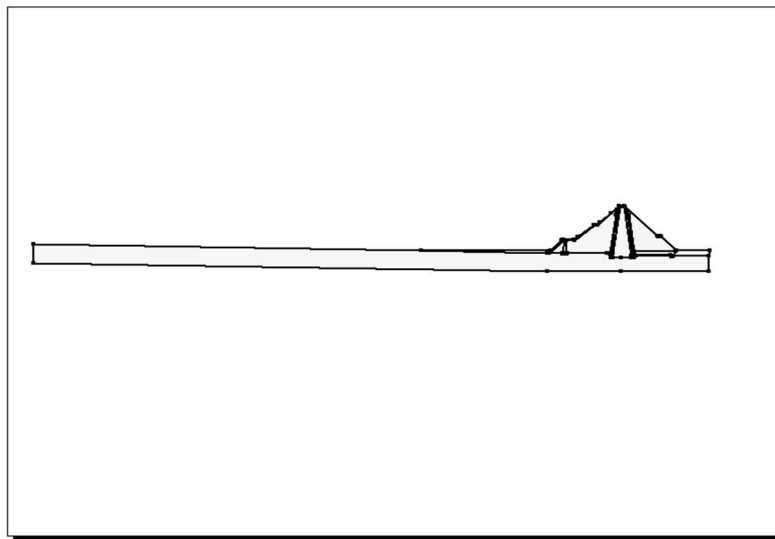
ابتدا همان طور که در فصل ۳ توضیح داده شد برای انجام تنظیمات اولیه از منوی KeyIn گزینه Analyses را انتخاب کرده سپس از طریق بخش Analyses type نوع تحلیل را در حالت تراوش حالت پایدار (Steady state) قرار داده شد.

۴-۴-۱-۱- معرفی هندسه مدل

در گام بعد با توجه به شکل سد (۴-۷) و مشخص کردن مختصات نقاط کلیدی، این مختصات را از طبق قسمت ۳-۴-۶-۱ به نرم افزار داده شده سپس از منوی Drow گزینه Line خطوط بین نقطه ها رسم گردید.

سپس از قسمت Set بخش Unit and Scale مقیاس به گونه ای تنظیم گردید که کل شکل داخل صفحه قرار بگیرد.

طبق آنچه در بند ۳-۴-۶-۳ گفته شد، بین نقاط و خطوط رسم شده، ناحیه ها که نشان دهنده هر بخش از سد مانند پی، فیلتر، هسته و... هستند و با توجه به جنس مصالح انجام می شود را به صورت جداگانه رسم گردیدند. (شکل (۴-۱۰)).

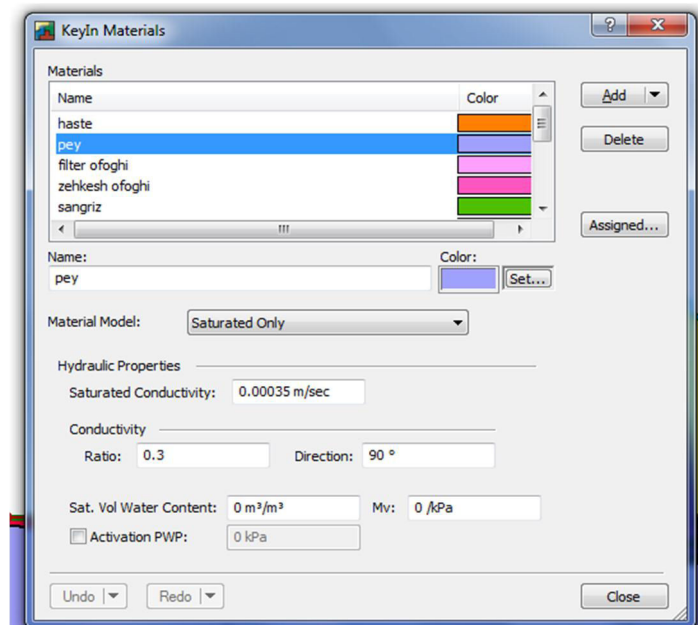


شکل (۱۰-۴): ترسیم خطوط بین نقاط و ناحیه بندی در نرم افزار

۴-۱-۲- معرفی مشخصات مصالح

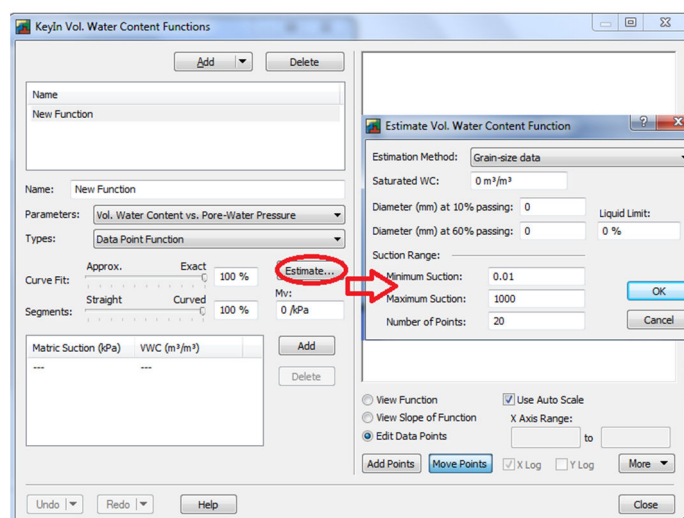
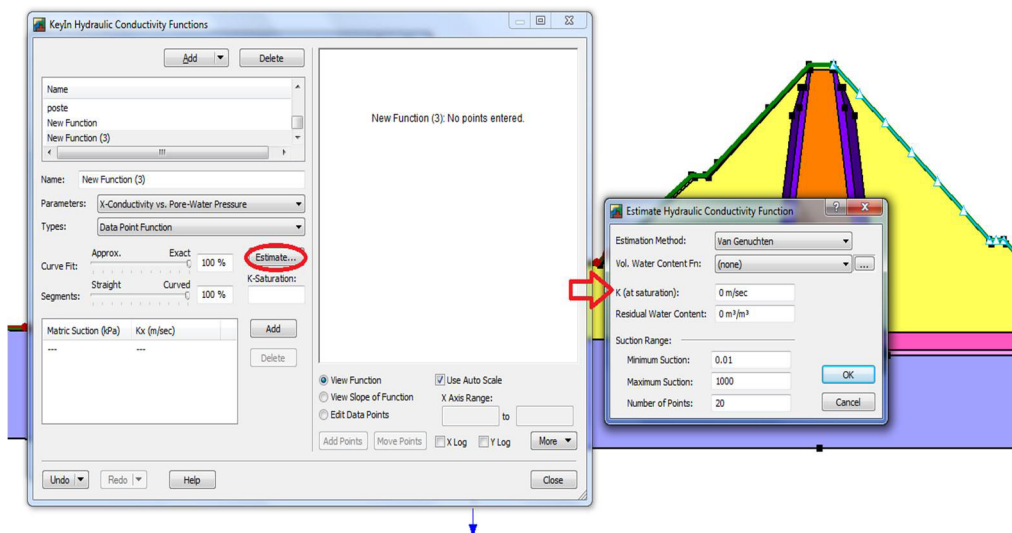
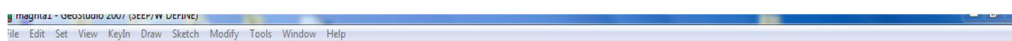
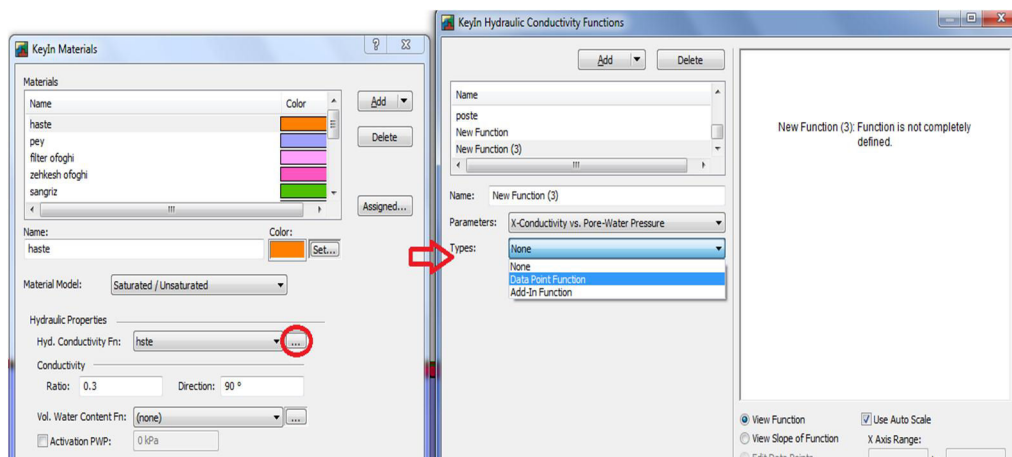
برای این منظور از منوی KeyIn منوی Materials را انتخاب و پس از Add نمودن مصالح موردنظر، اسم و رنگ آن انتخاب شده از قسمت Material Model به صورت زیر تنظیم گردید.

برای مصالحی که قطعا پایین تر از سطح آب می باشند مانند فونداسیون، فیلتر افقی، زهکش افقی، سنگریز پایین دست و رسوبات گزینه Saturated only را انتخاب و مقدار ضریب نفوذپذیری اشباع که در قسمت ۳-۳-۴ ذکر شد را در Saturated conductivity وارد و در قسمت Raito نسبت $\frac{K_x}{K_y}$ را با توجه به گزارشات مهندسین مشاور مربوط، این ضریب $\frac{1}{3}$ در نظر گرفته شد. همچنین در بخش direction عدد ۹۰ درجه را وارد کردیم. در انتها قسمت مربوط به مقدار آب قرار دارد که با توجه به اینکه تحلیل در حالت پایدار است نقشی ندارد. (شکل (۱۱-۴))



شکل (۴-۱۱): معرفی خصوصیات مصالح اشباع در مدل سازی

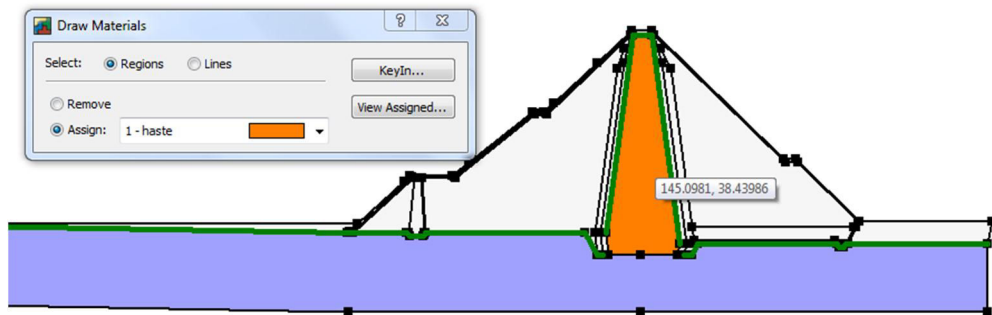
سپس مصالحی که بالاتر از تراز آب هستند یا تراز آب از میان آن ها می گذرد مانند پوسته، هسته و... از نوع saturated/unsaturated تعریف شدند. برای این مصالح با استفاده از پوش دانه بندی ارائه شده در شکل های (۴-۴) و (۴-۵) از قسمت ساخت تابع (Hyd. Conductivity Fn) و از قسمت type حالت Data-point Function تابع مورد نظر بر حسب اندازه ذرات رسم گردید. مطابق شکل (۴-۱۲).



شکل (۴-۱۲): معرفی مشخصات مصالح اشباع/غیراشباع با استفاده از اندازه ذرات در مدل عددی

۴-۱-۴-۳- تخصیص مصالح

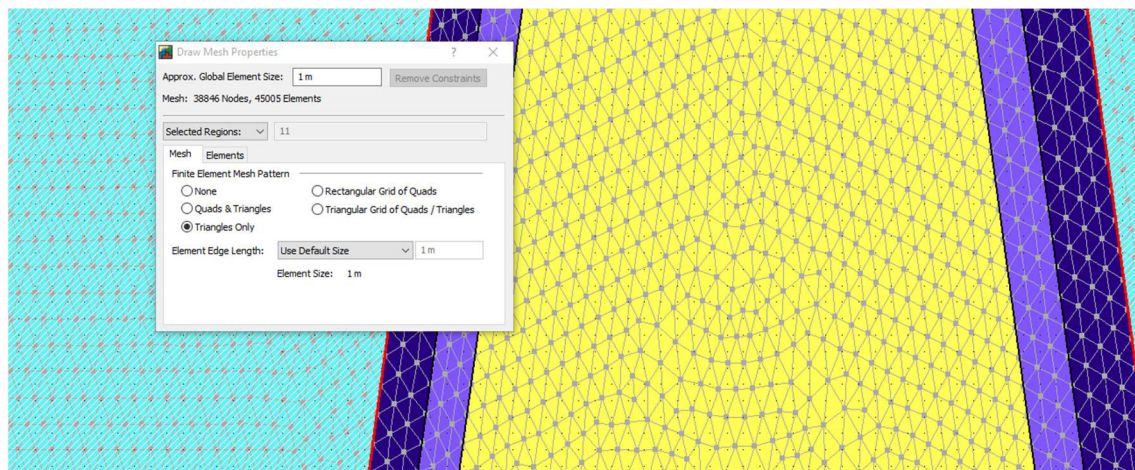
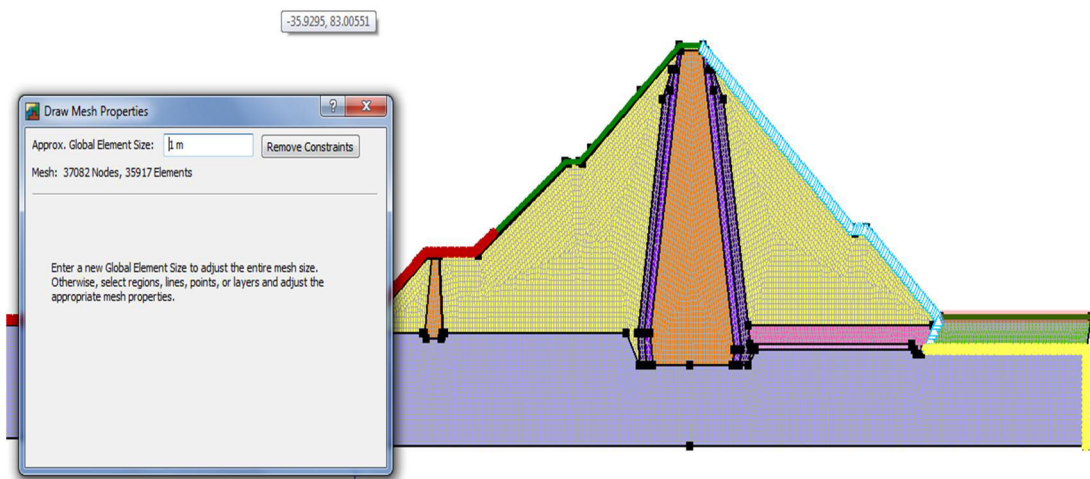
بدین منظور طبق قسمت ۷-۴-۳ مصالح معرفی شده را به ناحیه های مختلف اختصاص می دهیم. (شکل (۴-۱۳)).



شکل (۴-۱۳): اختصاص دادن مصالح به ناحیه ها در مدل عددی

۴-۱-۴-۴- انجام مش بندی

بعد از انجام مراحل فوق، لازم است تا عمل مش بندی به منظور تقسیم منطقه به المان هایی جهت حل عددی معادله دیفرانسیل حاکم انجام می گیرد. در این مدل برای انجام دقیق تر محاسبات، مش بندی مطابق شکل (۴-۱۴) مانند آنچه در قسمت ۳-۸-۴ گفته شد و با استفاده از المان های مثلثی سه گرهی با طول اضلاع حداکثر معادل ۱ متر برای تمامی مصالح صورت پذیرفت. شایان ذکر است که استفاده از المان های با ضلع حداکثر برابر $0.5m$ تغییری در پاسخ ها به وجود نیاورد و تنها زمان محاسبات را طولانی تر می نمود و نیز المان های با اضلاع بزرگتر (۲ متر) تا حدودی پاسخ ها را متفاوت می نمود لذا انتخاب ۱ متر برای حداکثر طول اضلاع، مناسب تشخیص داده شد.



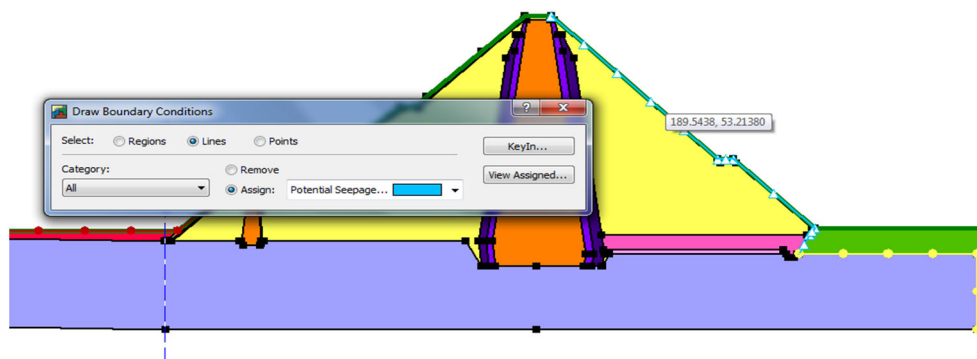
شکل (۴-۱۴): انجام مش بندی در مدل

۴-۱-۵- تخصیص شرایط مرزی

جهت مدل سازی عددی، لازم است که شرایط مرزی به مدل اعمال گردد برای این منظور از قسمت KeyIn وارد بخش Boundary Condition شده و شرایط مرزی مد نظر تعریف گردید. در مجموع دو تیپ شرایط مرزی وجود دارد یکی هد آب ثابت مانند آنچه در مخزن بالادست و یا در قسمت پایین دست سد رخ می دهد، برای این قسمت در بخش type، گزینه Head انتخاب و سپس مقدار آب موجود در هر نیمسال را که در جدول (۴-۵) نشان داده شده است، وارد گردید.

نوع دیگر شرایط مرزی، وجه تراوش است یعنی سطحی که خط اول جریان به آن برخورد می کند و شرایط آن نامعلوم است و مقدار Q در آن صفر در نظر گرفته می شود که آن نیز در تمامی وجه پایین دست تخصیص داده شد.

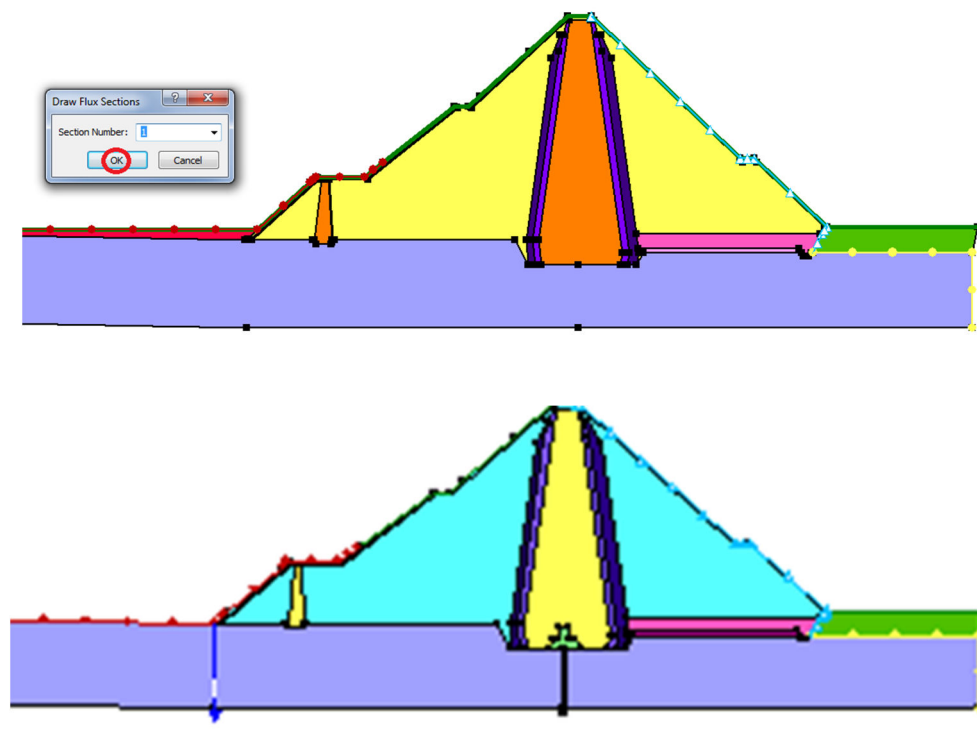
سپس از قسمت Draw بخش Boundary condition مطابق شکل (۴-۱۶) شرایط مرزی تعریف شده به مرزهای مدنظر تخصیص داده می شود.



شکل (۴-۱۵): ترسیم شرایط مرزی در مدل

۴-۱-۴-۶ تعیین مقطع اندازه گیری دبی

برای تعیین مقطعی که قرار است مقدار نشت در آن معین شود، از منوی Draw و گزینه Flux section استفاده می شود. همانطور که در شکل (۴-۱۷) مشاهده می شود و از آنجا که در تحقیق حاضر فقط نشت از پی سد مد نظر می باشد، مقطع مورد نظر قبل از بدنه سد و روی رسوبات انتخاب گردید تا بدین صورت میزان نشت عبور شده از بدنه سد در محاسبات وارد نگردد بلکه فقط اثر رسوبات و آب بند مورد مطالعه قرار گیرد.



شکل (۴-۱۶): تعیین مقطع اندازه گیری دبی در مدل

۴-۱-۷- تحلیل مدل

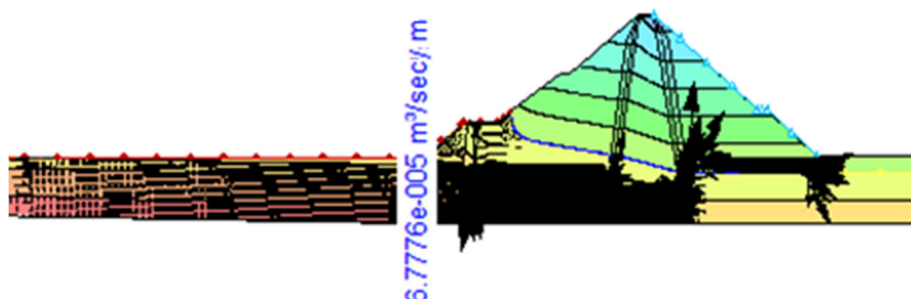
برای تحلیل مدل از منوی tools و گزینه Slove Analysis استفاده می‌گردد و سپس نتایج محاسبات را می‌توان در منوی Window، گزینه Countour مشاهده نمود. تحلیل مدل برای ۵ سال (۱۰ نیمسال) و در ۳ حالت ذکر شده در قسمت ۴-۴ انجام شد که تحلیل نتایج و بحث در مورد آنها در فصل بعد به طور مفصل آورده می‌شود.

۴-۲- مدل سازی سد بدون آب‌بند و حضور رسوب

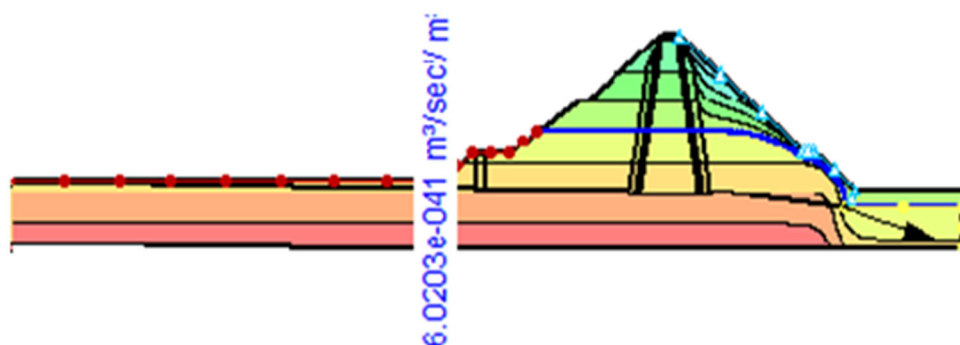
مدل‌سازی در این حالت طبق مراحل ذکر شده در قسمت قبل انجام شد در این حالت در بخش هندسه مدل با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول (۴-۵) برای رسوبات در هر نیمسال نقاط مربوط به مختصات آنها داده شده و در بخش معرفی مصالح برای پی با توجه به اینکه در گزارشات مربوط به سد و اینکه بیشتر مصالح کف رودخانه از جنس شن ماسه ای وسیلتی به همراه رس می

باشد ضریب نفوذپذیری $m/s \cdot 10^{-4} \cdot 3/5$ در نظر گرفته شد. با توجه به وجود رسوبات برای آنها هم طبق قسمت ۳-۳-۴ نفوذپذیری آنها به مدل داده شد، همچنین به دلیل وجود پی و رسوبات در تراز پایین تر از سطح آب حالت saturated only برای آنها انتخاب گردید.

در این مدل سازی مانند حالت قبل، تحلیل برای ۱۰ نیمسال مختلف انجام شد که در شکل های (۱۸-۴) و (۱۹-۴) نتیجه دبی عبوری برای نیمسال ۱ سال اول در مقطع ۱ و ۲ در این حالت نمایش داده شده است.



شکل (۱۷-۴): تحلیل مقطع ۱ در نیمسال ۱ سال اول حالت بدون آب بند و وجود رسوب

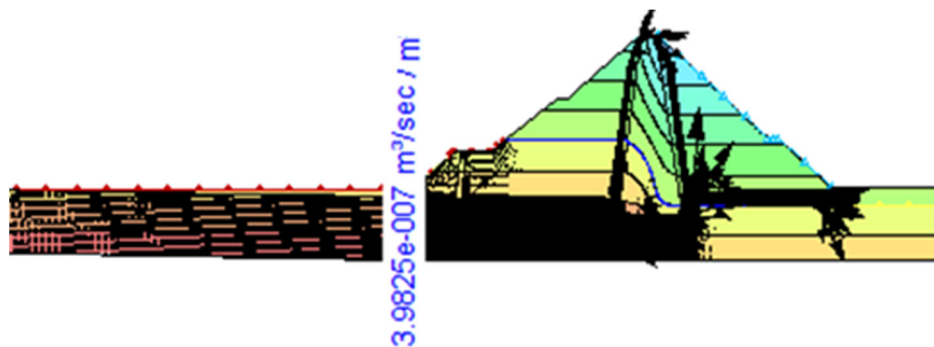


شکل (۱۸-۴): تحلیل مقطع ۲ در نیمسال ۱ سال اول حالت بدون آب بند و وجود رسوب

۳-۴-۴- مدل سازی سد با حضور آب بند و حضور رسوب

مدل سازی در این حالت نیز مانند قسمت های قبل انجام شد و رسوبات نیز مانند قسمت ۴-۴-۲ به مدل داده شد و در بخش معرفی مصالح برای پی مانند حالت قبل ضریب نفوذپذیری 10^{-4} m/s در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به قسمت ۴-۳-۳ ضریب نفوذپذیری رسوبات به نرم افزار داده شد و به دلیل اینکه رسوبات و پی پایین تر از سطح آب می باشند حالت *saturated only* برای آنها در نظر گرفته شد. در این مدل آب بند نیز مدل سازی شد و ضریب نفوذپذیری آن طبق قسمت ۴-۳-۳ در نرم افزار تعریف گردید.

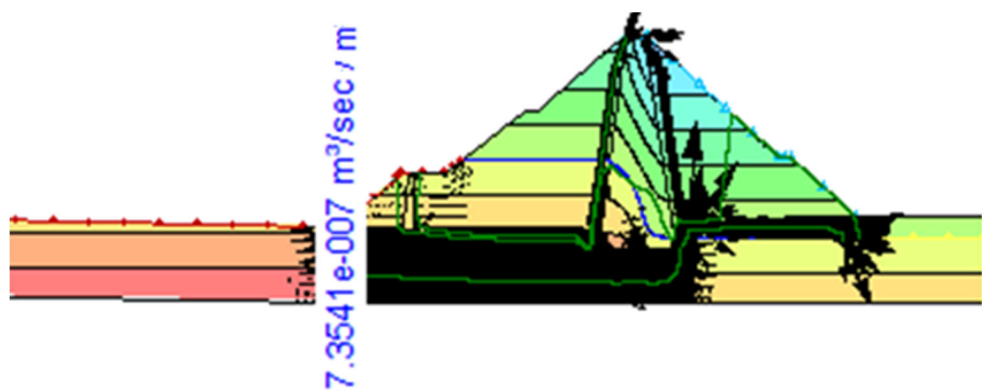
در این مدل سازی مانند حالت قبل تحلیل برای ۱۰ نیمسال مختلف انجام شد که در شکل زیر نتیجه دبی عبوری برای نیمسال ۱ سال اول در مقطع ۱ در این حالت نمایش داده شده است. (شکل (۴-۲۱)).



شکل (۴-۱۹): تحلیل مقطع ۱ در نیمسال ۱ سال اول در حالت با وجود آب بند و رسوب

۴-۴-۴- مدل سازی سد با حضور آب بند و بدون حضور رسوب

مدل سازی در این حالت مانند قسمت ۴-۴-۳ انجام شد با این تفاوت که در این مدل رسوب برای نرم افزار تعریف نشد. در شکل (۴-۲۲) نتیجه دبی عبوری برای نیمسال ۱ سال اول در مقطع ۱ در این حالت نمایش داده شده است.



شکل (۴-۲۰): تحلیل مقطع ۱ در نیمسال ۱ سال اول در حالت با وجود آب بند و بدون رسوب

فصل پنجم

نتایج و بحث

۵-۱- مقدمه

در فصل حاضر، از پایان نامه نتایج بدست آمده از مدل عددی $seep/w$ جهت محاسبه نشت آب از پی سد خاکی ارداک برای ۳ حالت، با حضور آببند و بدون رسوب، بدون حضور آببند و با وجود رسوب، و همچنین با حضور آببند و حضور رسوب ارائه و مورد تحلیل قرار گرفته، سپس به بررسی اقتصادی طرح پراخته می شود.

۵-۲- مدل سازی با حضور آب بند و بدون رسوب

طبق آنچه در فصل قبل گفته شد مدل سازی در نرم افزار $seep/w$ برای دو مقطع ۱ و ۲ و برای ۱۰ نیمسال انجام شد که نتایج مربوط در جدول (۵-۱) آورده شده است:

تحلیل در نیمسال ۱ و ۲ سال اول در نرم افزار $seep/w$ صورت گرفت که نتیجه آن در جدول (۵-۱) بیان شده است.

جدول (۵-۱): نتایج تحلیل مدل در پنج سال با حضور آب بند و بدون رسوب

			مقطع ۲	مقطع ۱
سال ۱	نیمسال ۱	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$6/02 \times 10^{-41}$	$7/35 \times 10^{-7}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$4/45 \times 10^{-39}$	$1/08 \times 10^{-4}$
	نیمسال ۲	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$1/41 \times 10^{-40}$	$8/88 \times 10^{-7}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$1/043 \times 10^{-38}$	$1/35 \times 10^{-4}$
سال ۲	نیمسال ۱	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$1/4 \times 10^{-40}$	$8/88 \times 10^{-7}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$1/033 \times 10^{-38}$	$1/31 \times 10^{-4}$
	نیمسال ۲	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$2/35 \times 10^{-37}$	$9/98 \times 10^{-7}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$1/74 \times 10^{-37}$	$1/47 \times 10^{-4}$

سال ۳	نیمسال ۱	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$1/0.04 \times 10^{-6}$	$2/11 \times 10^{-37}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$1/48 \times 10^{-4}$	$1/56 \times 10^{-35}$	نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$1/0.49 \times 10^{-6}$	$1/37 \times 10^{-37}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$1/54 \times 10^{-4}$	$1/0.2 \times 10^{-35}$	نشت کل از پی m^3/s
سال ۴	نیمسال ۱	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$1/0.4 \times 10^{-6}$	$1/19 \times 10^{-37}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$1/53 \times 10^{-4}$	$8/79 \times 10^{-36}$	نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$1/11 \times 10^{-6}$	$1/0.7 \times 10^{-37}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$1/64 \times 10^{-4}$	$7/89 \times 10^{-36}$	نشت کل از پی m^3/s
سال ۵	نیمسال ۱	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$1/26 \times 10^{-6}$	$8/0.6 \times 10^{-38}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$1/84 \times 10^{-4}$	$5/96 \times 10^{-36}$	نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$1/21 \times 10^{-6}$	$6/0.6 \times 10^{-38}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$1/78 \times 10^{-4}$	$4/48 \times 10^{-26}$	نشت کل از پی m^3/s

۵-۳- مدل سازی بدون آب بند و با وجود رسوب

طبق آنچه در فصل ۴ گفته شد مدل سازی در حالی که رسوب وجود داشته ولی دیوار آب بند حذف شده است در نرم افزار یاد شده برای دو مقطع ۱ و ۲ و برای ۱۰ نیمسال انجام شد که نتایج مربوط را می توان در جدول (۵-۲) مشاهده نمود:

جدول (۵-۲): نتایج مدل سازی در پنج سال اول با وجود رسوب و بدون آب بند

سال ۱	نیمسال ۱	مقطع ۱	$۶/۷۸ \times ۱۰^{-۵}$	مقطع ۲	$۶/۰۲ \times ۱۰^{-۴۱}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷		۷۴		طول مقطع (m)
		$۹/۹۷ \times ۱۰^{-۳}$		$۴/۴۵ \times ۱۰^{-۳۹}$		نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	$۷/۳۵ \times ۱۰^{-۵}$	مقطع ۲	$۱/۴۱ \times ۱۰^{-۴۰}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷		۷۴		طول مقطع (m)
		$۱/۰۸ \times ۱۰^{-۲}$		$۱/۰۴ \times ۱۰^{-۳۸}$		نشت کل از پی m^3/s
سال ۲	نیمسال ۱	مقطع ۱	$۷/۰۴ \times ۱۰^{-۵}$	مقطع ۲	$۱/۴۰ \times ۱۰^{-۴۰}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷		۷۴		طول مقطع (m)
		$۱/۰۴ \times ۱۰^{-۲}$		$۱/۰۳ \times ۱۰^{-۳۸}$		نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	$۷/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$	مقطع ۲	$۲/۳۵ \times ۱۰^{-۳۷}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷		۷۴		طول مقطع (m)
		$۱/۱۲ \times ۱۰^{-۲}$		$۱/۷۴ \times ۱۰^{-۳۵}$		نشت کل از پی m^3/s
سال ۳	نیمسال ۱	مقطع ۱	$۸/۲۱ \times ۱۰^{-۵}$	مقطع ۲	$۲/۱۱ \times ۱۰^{-۳۷}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷		۷۴		طول مقطع (m)
		$۱/۱۲ \times ۱۰^{-۲}$		$۱/۶ \times ۱۰^{-۳۵}$		نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	$۷/۵۹ \times ۱۰^{-۵}$	مقطع ۲	$۱/۳۷ \times ۱۰^{-۳۷}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷		۷۴		طول مقطع (m)

		نشت کل از پی m^3/s	$1/0.2 * 10^{-35}$	$1/12 * 10^{-2}$
سال ۴	نیمسال ۱	مقطع ۲	مقطع ۱	
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$1/19 * 10^{-37}$	$7/65 * 10^{-5}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$8/79 * 10^{-36}$	$1/12 * 10^{-2}$
	نیمسال ۲	مقطع ۲	مقطع ۱	
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$1/0.7 * 10^{-37}$	$7/72 * 10^{-5}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$7/89 * 10^{-36}$	$1/13 * 10^{-2}$
سال ۵	نیمسال ۱	مقطع ۲	مقطع ۱	
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$8/0.6 * 10^{-38}$	$8/77 * 10^{-5}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$5/96 * 10^{-36}$	$1/13 * 10^{-2}$
	نیمسال ۲	مقطع ۲	مقطع ۱	
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$6/0.6 * 10^{-38}$	$8/80.3 * 10^{-5}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$4/48 * 10^{-36}$	$1/13 * 10^{-2}$

۵-۴- مدل سازی با حضور آب بند و حضور رسوب

مطابق حالات قبل اما در شرایط وجود آب بند و حضور رسوب، مجدداً سد مدل سازی شد که نتایج

حاصله جهت نشت از پی سد در جدول (۵-۳) نشان داده شده است:

جدول (۵-۳) : نتایج تحلیل در سال اول با وجود رسوب و آب بند

۱ سال	نیمسال ۱	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$3/98 \times 10^{-7}$	$6/02 \times 10^{-41}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$5/85 \times 10^{-5}$	$4/46 \times 10^{-39}$	نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$4/35 \times 10^{-7}$	$1/41 \times 10^{-40}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$6/40 \times 10^{-5}$	$1/04 \times 10^{-38}$	نشت کل از پی m^3/s
۲ سال	نیمسال ۱	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$4/24 \times 10^{-7}$	$1/40 \times 10^{-40}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$6/23 \times 10^{-5}$	$1/12 \times 10^{-2}$	نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$4/52 \times 10^{-7}$	$2/35 \times 10^{-37}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$6/65 \times 10^{-5}$	$1/74 \times 10^{-35}$	نشت کل از پی m^3/s
۳ سال	نیمسال ۱	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$4/42 \times 10^{-7}$	$2/11 \times 10^{-37}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$6/50 \times 10^{-5}$	$1/56 \times 10^{-35}$	نشت کل از پی m^3/s
	نیمسال ۲	مقطع ۱	مقطع ۲	
		$4/43 \times 10^{-7}$	$1/37 \times 10^{-37}$	نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$
		۱۴۷	۷۴	طول مقطع (m)
		$6/51 \times 10^{-5}$	$1/02 \times 10^{-35}$	نشت کل از پی m^3/s

سال ۴	نیمسال ۱		مقطع ۲	مقطع ۱
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$۱/۱۹ \times ۱۰^{-۳۷}$	$۴/۵۰ \times ۱۰^{-۷}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$۸/۷۹ \times ۱۰^{-۳۶}$	$۶/۶۱ \times ۱۰^{-۵}$
	نیمسال ۲		مقطع ۲	مقطع ۱
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۳۷}$	$۳/۸۷ \times ۱۰^{-۷}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$۷/۸۹ \times ۱۰^{-۳۶}$	$۵/۶۹ \times ۱۰^{-۵}$
سال ۵	نیمسال ۱		مقطع ۲	مقطع ۱
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$۸/۰۶ \times ۱۰^{-۳۸}$	$۴/۰۹ \times ۱۰^{-۷}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$۵/۹۶ \times ۱۰^{-۳۶}$	$۶/۰۲ \times ۱۰^{-۵}$
	نیمسال ۲		مقطع ۲	مقطع ۱
		نشت از پی در واحد طول $m^3/s/m$	$۶/۰۶ \times ۱۰^{-۳۸}$	$۴/۰۵ \times ۱۰^{-۷}$
		طول مقطع (m)	۷۴	۱۴۷
		نشت کل از پی m^3/s	$۴/۴۸ \times ۱۰^{-۳۶}$	$۵/۹۶ \times ۱۰^{-۵}$

قابل توجه است که با توجه به اینکه در نیمسال ۲ سال ۵، تراز آب به مقداری بیشتر از تراز نرمال می رسد ، نشت از فونداسیون اهمیتی ندارد چون اگر هم از پی نشت نکند از روی سرریز خارج می شود بنابراین نشت این نیمسال از محاسبات مربوط به نشت کل حذف شد.

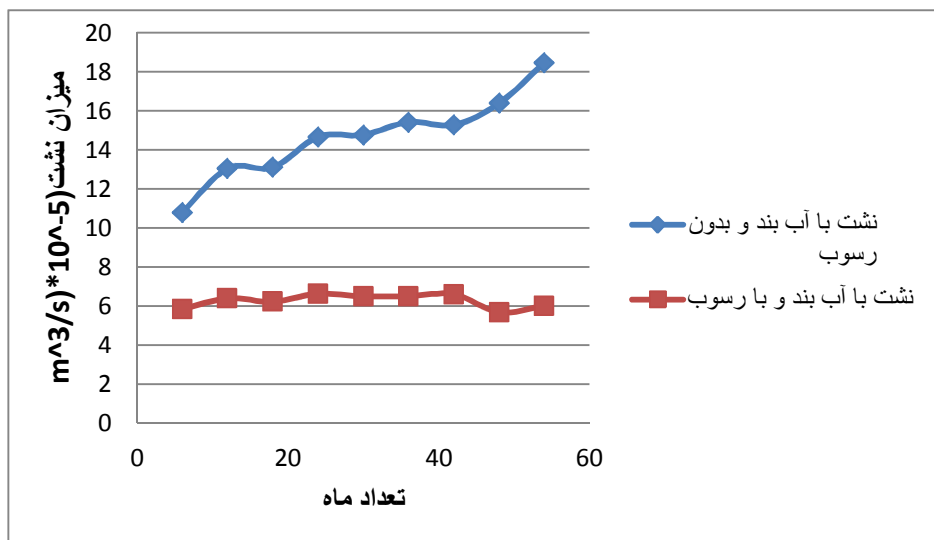
۵-۵- جمع بندی نتایج حاصل از نشت پی در سه حالت

با توجه به نتایج به دست آمده برای نشت از پی در مدل سازی های انجام گرفته در نرم افزار و تحلیل نتایج برای سه حالت در نظر گرفته شده در نیمسال های مختلف، مجموع نشت ها برای سه حالت و در ۵ سال محاسبه و در جدول (۴-۵) نشان داده شده است.

جدول (۴-۵): مجموع نتایج حاصل از تحلیل مدل

سال	نیمسال	نشت با آب بند بدون رسوب (m^3/s)	نشت بدون آب بند و با رسوب (m^3/s)	نشت با آب بند و با رسوب (m^3/s)
۱	۱	0.000108	$9/97 \times 10^{-3}$	$5/854 \times 10^{-5}$
	۲	$1/305 \times 10^{-4}$	$1/08 \times 10^{-2}$	$6/40038 \times 10^{-5}$
۲	۱	$1/31 \times 10^{-4}$	$1/02 \times 10^{-2}$	$6/2328 \times 10^{-5}$
	۲	$1/467 \times 10^{-4}$	$1/12 \times 10^{-2}$	$6/64587 \times 10^{-5}$
۳	۱	$1/477 \times 10^{-4}$	$1/207 \times 10^{-2}$	$6/4974 \times 10^{-5}$
	۲	$1/542 \times 10^{-4}$	$1/12 \times 10^{-2}$	$6/51504 \times 10^{-5}$
۴	۱	$1/527 \times 10^{-4}$	$1/125 \times 10^{-2}$	$6/61206 \times 10^{-5}$
	۲	$1/639 \times 10^{-4}$	$1/13 \times 10^{-2}$	$5/69 \times 10^{-5}$
۵	۱	$1/846 \times 10^{-4}$	$1/29 \times 10^{-2}$	$6/02 \times 10^{-5}$
	جمع	$1/31 \times 10^{-3}$	$9/63 \times 10^{-2}$	$5/65 \times 10^{-5}$

شایان ذکر است که اگرچه قرار گرفتن رسوبات جدید روی رسوبات قبلی باعث تراکم بیشتر رسوبات قبلی و کاهش نفوذپذیری آن می‌گردد اما به دلیل غیر قابل ملاحظه بودن این اثر در میزان نشت، در تحقیق حاضر از این اثر صرف نظر شده است. (البته این در جهت بیشتر گرفتن نشت نیز می‌باشد). در ادامه نتایج ذکر شده به صورت نمودار در شکل های (۱-۵) و (۲-۵) نمایش داده شده است.



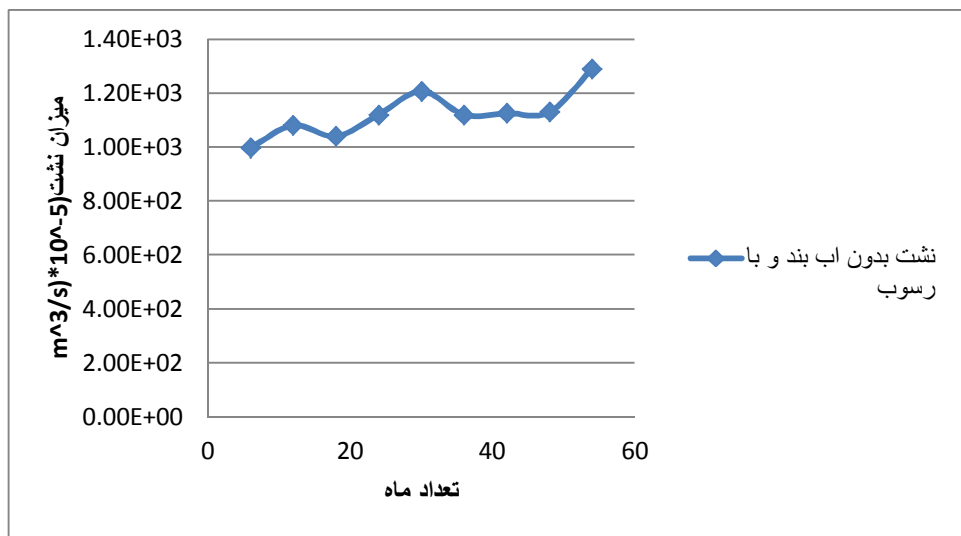
شکل (۱-۵) نمودار تغییرات نشت از پی در دو حالت با آب بند و بدون رسوب در ۵ سال اول

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مدل ها (جدول (۴-۵)) و شکل (۱-۵) مقدار درصد کاهش یافته نشت در حالت با آب بند و با رسوب نسبت به حالت با آب بند و بدون رسوب به طور میانگین عبارت است از:

$$[(1/32 * 10^{-3}) - (5/65 * 10^{-4})] \div (1/32 * 10^{-3}) * 100 = 0.57879 \approx 0.58$$

که مقدار کاهش یافته آن برای ۵ سال عبارتست از:

$$(1/32 * 10^{-3} - 5/65 * 10^{-4}) * 86400 * (365 \div 2) = 11904 / 84 m^3$$



شکل (۲-۵) نمودار تغییرات نشت از پی در حالت بدون آب بند با رسوب در ۵ سال اول

در شکل (۳-۵) مقادیر نشت برای سه حالت یا آب بند و بدون رسوب، با آب بند و بدون رسوب و بدون آب بند و با رسوب بر مقادیر نشت اولیه خود تقسیم و نمودار نسبی آن رسم گردیده است.



شکل (۳-۵) نمودار تغییرات نشت نسبت به نشت اولیه

۵-۶- مطالعات اقتصادی

۵-۶-۱- هزینه ساخت دیوار آب بند

هزینه ساخت و اجرای دیوار آب بند با توجه عملیات انجام شده و فهرست بها در پاییز سال ۸۱ توسط مشاور محاسبه گشته که در جدول (۵-۵) نشان داده شده است.

جدول (۵-۵): هزینه ساخت دیوار آب بند [۳۶]

عنوان	واحد	مقدار	هزینه هر واحد (ریال)	ضریب بالاسری	ضریب تعدیل	قیمت (ریال)
حفاری محل دیوار آب بند به طور کامل	M ^۳	۵۶۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱/۳۵	۲	۱۶۶۳۲۰۰۰۰۰
اضافه بها برای برخورد با بولدر	M ^۳	۲۷۰۰	۳۰۰۰۰۰	۱/۳۵	۲	۲۱۸۷۰۰۰۰۰۰
اضافه بها برای مصرف گل حفاری	M ^۳	۲۶۵۰	۴۰۰۰۰	۱/۳۵	۲	۲۸۶۲۰۰۰۰۰
مصرف ماسه برای دیوار	ton	۲۱۰۰۰	۱۰۰۰۰	1.35	۲	۵۶۷۰۰۰۰۰۰۰
ایجاد دیوار آب بند با بتن پلاستیک	M ^۳	۱۳۰۰۰	۱۷۰۰۰۰	۱/۳۵	۲	۵۹۶۷۰۰۰۰۰۰۰
تهیه بنتونیت	ton	۱۳۰۰	۳۱۰۰۰۰	۱/۳۵	۲	۱۰۸۸۱۰۰۰۰۰۰۰
جمع هزینه ها						۱۱۷۵۸۵۰۰۰۰۰۰

به منظور به روز کردن هزینه ها و با فرض حداقل ضریب تعدیل ۱۲ درصد در سال، هزینه ساخت دیوار آب بند در سال ۱۳۹۶ برابر است با:

$$۱/۱۷۵۸۵ * (۱/۱۲)^{۱۵} = ۶/۴۳۶ \quad \text{میلیارد تومان}$$

با در نظر گرفتن نرخ تورم ۱۵ درصد، مبلغ سود سالانه هزینه ساخت دیوار آب بند عبارت می شود از:

$$\text{میلیارد تومان} \quad ۰/۹۶۵۴ = ۰/۱۵ * ۶/۴۳۶$$

و چنانچه نرخ تورم معادل ۱۲ درصد در نظر گرفته شود، سود هزینه های یاد شده معادل مبلغ زیر خواهد شد:

$$\text{میلیارد تومان} \quad ۰/۷۷۲۳۲ = ۰/۱۲ * ۶/۴۳۶$$

۵-۶-۲- قیمت آب

مدیر عامل آب منطقه ای تهران در گزارشی در سال ۹۴ بیان کرد که قیمت آب خام با توجه به جدید بودن یا قدیمی بودن تاسیسات متفاوت است و با توجه به گزارشات ایشان و معاون برنامه ریزی و امور اقتصادی وزیر نیرو، قیمت های تمام شده آب سدها بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ تومان برای هر متر مکعب در تغییر است و همچنین اظهار کرده اند که این قیمت ها در سال ۹۵ و ۹۶ تغییری نداشته است [۳۷ و ۳۸]. بنابراین فرض گردد قیمت هر متر مکعب آب معادل ۱۰۰۰ تومان باشد.

۵-۷- تجزیه و تحلیل و نتیجه گیری

از مجموعه مطالب و محاسبات انجام شده مشخص می گردد که اگر از ساخت دیوار آب بند جهت جلوگیری از نشت آب از پی سد خاکی ارداک صرف نظر شود، با توجه به گزارش مشاور در مورد عملکرد مخزن، و نیز با در نظر گرفتن میزان رسوبات توزیع شده در کف مخزن در نیمسال های مختلف، کل آبی که از فونداسیون در ۵ سال اولیه بهره برداری نشت خواهد کرد و به پایین دست سد منتقل خواهد شد معادل است با:

$$m^3 \quad ۱۵۱۸۴۵۸/۴ = (۳۶۵ \div ۲) * ۸۶۴۰۰ * ۰/۰۹۶۳$$

و در نیمسال ۱۰ که سطح آب در مخزن از تراز تاج سرریز بالاتر می رود، چون در هر حال آب اضافی از روی تاج سرریز به پایین دست منتقل خواهد شد، مقدار نشت از پی عملاً تاثیری در مقایسه‌ها ندارد.

اما در نیمسال نهم که بیشترین سطح آب در مخزن و بیشترین مقدار نشت وجود دارد، میزان نشت از پی سد ارداک برای این حالت (عدم ساخت دیوار آب بند و با حضور رسوب) برابر خواهد بود با:

$$m^3 = 206194 * 185 * 86400 * 0.129 = 0.0129$$

۱- قبل از هر چیز و هر مقایسه و محاسبه لازم است یادآوری شود که آبی که از پی سد و با فرض عدم ساخت وجود آب بند، نشت می کند، هرگز به معنی هدررفت و از دست دادن آب نیست چرا که از طریق آبرفت کف به پایین دست منتقل شده، یا در کف رودخانه جاری می شود و یا به سفره آب زیرزمینی رسیده و آن را تغذیه می کند که کشاورزان و حقابه بران می توانند در پایین دست به وسیله پمپاژ و یا هر شکل دیگری از آن استفاده نمایند و حتی قسمتی از حقابه‌ها را از طریق تغذیه آبخوان پایین دست سد و یا جریان آب در کف رودخانه تامین نمود. بنابراین نشت این مقدار آب، عملاً در پایین دست استفاده یا ذخیره می شود.

۲- با فرض آنکه آب نشت یافته از زیر سد خاکی ارداک، به عنوان آب هدر رفته و غیر قابل دسترسی در نظر گرفته شود، کل قیمت آب هدررفته در طول ۵ سال اولیه به نرخ سال ۱۳۹۶ عبارت می شود از:

$$\text{میلیارد تومان } 1/518 = \text{تومان } 1518458458 * 1000 = 1518458/4$$

در حالی که هزینه ساخت دیوار آب بند براساس قیمت های ۱۳۹۶ حدود ۶/۴۳۶ میلیارد تومان است یعنی قیمت آب هدررفته کمتر از ۲۴ درصد هزینه دیوار است و لذا با حذف دیوار و استفاده از نفوذپذیری کم رسوبات می توان حدود ۷۶ درصد و یا حدود ۴/۹۱۸ میلیارد تومان (بر اساس قیمت

های سال ۱۳۹۶) صرفه‌جویی کرد. ضمن آنکه در طول زمان ساخت سد نیز صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای می‌شود.

۳- از نیمسال ۱۰ به بعد چنانچه آب نظیر این نیمسال در ترازى بالاتر از تاج سرریز قرار بگیرد و با توجه به توضیحات قبل، می‌توان گفت هیچ هزینه‌ای برای هدررفت آب نداریم و اگر فرض شود که نظیر نیمسال ۹، آب در دریاچه سد تقریباً در بیشترین حد ممکن باشد و فرض گردد که به رسوبات سال‌های بعد هم اجازه داده نمی‌شود تا در مخزن سد انباشته شده و بر ارتفاع رسوبات افزوده گردد، و با فرض هدررفت کامل آب و خارج شدن آن از دسترس، کل آبی که در هر سال از پی سد نشت خواهد کرد معادل می‌شود با:

$$206194 * (365 \div 185) = 406815 \quad m^3$$

و قیمت این آب هدررفته حدوداً برابر ۴۰۷ میلیون تومان برآورد می‌شود در صورتیکه سود هزینه‌های انجام شده جهت ساخت دیوار آب بند و با فرض نرخ سالانه ۱۵ درصد برابر خواهد بود با:

$$6/436 * 0/15 = 0/9654 \text{ میلیارد تومان} = 965/4 \text{ میلیون تومان}$$

که حدود ۲/۳۷ برابر قیمت آب هدررفته است.

مجدداً یادآوری می‌شود که یقیناً افزایش ارتفاع رسوبات و افزایش تراکم پذیری در سال‌های بعد باعث کاهش بیشتر نشت و صرفه‌جویی بیشتر در هزینه‌ها می‌گردد ضمن آنکه انتظار نمی‌رود که در تمام سال‌های بعد ارتفاع آب در مخزن سد در محدوده‌ی حداکثر ممکن باشد.

۴- اضافه می‌نماید که چنانچه قسمتی از هسته که در داخل پی ادامه یافته (و برای درگیر کردن هسته با پی لازم و ضروری است) نیز حذف گردد، مقدار نشت از پی در طول ۵ سال اولیه معادل ۱۵۴۵۲۶۴ متر مکعب و در نیمسال نهم ۲۴۵۵۴۸ متر مکعب شده که تغییر قابل ملاحظه‌ای ننموده و

در آن صورت نیز کل هزینه هدررفت آب (اگر آن را هدر رفتن فرض کنیم) در مقایسه با هزینه های ساخت دیوار آب‌بند و زمانی که برای این منظور صرف می گردد، بسیار پایین است.

۵- می توان این را نیز بیان نمود که نشت اضافی، اندکی از تبخیر را می کاهد اگرچه مقدار آن ممکن است ناچیز باشد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- مقدمه

همانطور که در ابتدا گفته شد، هدف از انجام این پایان نامه، محاسبه میزان نشت آب از فونداسیون سد خاکی ارداک و تغییرات آن در طول چند سال اولیه باتوجه به پخش رسوب وضخامت آن و به تبع تغییرات نفوذپذیری کف مخزن در دوحالت با و بدون دیوار آببند و مقایسه آنها با یکدیگر می باشد که توسط نرم افزار seep/w انجام می شود و بدیهی است در این مقایسه، ضمن در نظر گرفتن هزینه دیوار آببند، مساله هدر رفت آب از پی در طول سال های اولیه و امکان و یا عدم امکان استفاده از آن در آبخوان های پایین دست سد، مدنظر قرار گرفت. بدین منظور پایان نامه مذکور در شش فصل نوشته شده است.

در ابتدا به معرفی مفاهیم مانند نشت و رسوب و روش های کاهش نشت پرداخته سپس تاریخچه ای از مطالعات صورت گرفته پیرامون موضوعات مربوط به نشت و تعدادی از مطالعات در زمینه مطالعات مربوط به رسوب ارائه شد.

مدل سازی سد برای سه حالت با آببند و با رسوب، با آببند و بدون رسوب و بدون آببند و با رسوب با توجه به مشخصات سد خاکی ارداک که از شرکت آب پوی گرفته شده در نرم افزار Geo Studio انجام شد و نتایج مورد مقایسه قرار گرفت.

۶-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان نامه، تحلیل برای سد خاکی ارداک در سه حالت با آب بند و با رسوب، با آب بند و بدون رسوب و بدون آب بند و با رسوب در ۵ سال اولیه بهره‌برداری انجام شد که نتایج به طور مفصل در فصل ۵ ذکر شد، همچنین هزینه ساخت آب‌بند نیز محاسبه نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه گردید که در ادامه به آن پرداخته می‌شود:

۱- با توجه به گزارشات مشاور هزینه ساخت دیوار آب بند حدود ۶/۴۳۶ میلیارد تومان (معادل سال ۱۳۹۶) بدست آمد که با توجه به مقدار کل نشت در حالت بدون آب بند و با رسوب و قیمت آب، میزان آب خارج شده از پی معادل ۱/۵۱۸ میلیارد تومان است، حتی با فرض اینکه این مقدار آب را هدررفته بدانیم (که در واقعیت این آب در پایین دست برای مصارف مختلف همچون حقابه‌های کشاورزی و... استفاده می‌شود و یا به سفره آب زیرزمینی وارد می‌گردد) حدود ۴/۹۱۸ میلیارد تومان صرفه جویی می‌شود.

۲- با توجه به محاسبات انجام شده و با در نظر گرفتن آب نشت یافته از پی به عنوان آب هدر رفته، قیمت آب هدر رفته کمتر از ۲۴ درصد هزینه ساخت دیوار است.

۳- با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل سد خاکی ارداک در ۵ سال اولیه بهره‌برداری در حالت دیوار آب بند و رسوب و همچنین حالت دیوار آب بند و بدون رسوب، حدود ۵۸ درصد نشت در صورت وجود رسوب کاهش یافته است.

۴- با توجه به اینکه در نیمسال ۹ آب در بالاترین تراز نزدیک به تراز نرمال است و با فرض وجود دائمی آب در این تراز و اجازه ندادن انباشت رسوبات در سال‌های بعدی، قیمت آب هدر رفته حدود ۴۰۷ میلیون تومان برآورد شد و سود هزینه دیوار آب‌بند با فرض نرخ سود سالانه ۱۵ درصد ۹۶۵/۴ میلیون تومان برآورد شد که این مبلغ حدود ۲/۳۷ برابر قیمت آب هدررفته است.

با توجه به نتایج بدست آمده در این پایان نامه توصیه می‌شود در سدهای خاکی در ساخت دیوار آب-بند تجدید نظر شده و بصورت موردی، مطالعات نشت از پی و ضرورت یا عدم ضرورت ساخت دیوار آب بند، انجام پذیرد.

۳-۶- پیشنهادات برای توسعه تحقیق

در ادامه تحقیق حاضر، می‌توان پیشنهادات زیر را جهت تکمیل تحقیقات ارائه نمود:

- ۱- با توجه به اینکه بعد از حذف دیوار آب بند همچنان نشت وجود دارد پیشنهاد می‌گردد برای کم کردن هزینه ها و وقت دیوار آب بند به ارتفاع کمتر مثلاً ۵ متر ساخته شود و نتایج مقایسه گردد.
- ۲- نظر به اینکه رسوبات در طی سال‌ها روی یکدیگر انباشته می‌شود و بنابراین ضریب نفوذپذیری آنها کمتر می‌شود، می‌توان با در نظر گرفتن تراکم و نفوذپذیری به صورت لایه به لایه شاهد کاهش نشت از فونداسیون سد باشیم .
- ۳- ذخیره شدن آب در پشت سد باعث تبخیر آب می‌شود که این امر باعث کاهش ارتفاع آب پشت سد می‌شود و بنابراین می‌تواند باعث کاهش نشت از فونداسیون سد شود.
- ۴- با توجه به شیب منطقه و دریاچه سد و نیز توپوگرافی سد، توزیع رسوبات می‌تواند متفاوت و ناهمگون باشد به گونه ای که در قسمت های دور از سد درشت دانه ها و به تدریج که به سد نزدیک تر می‌شود دانه ریزترها ته نشین شوند و در نتیجه نفوذپذیری و تراکم رسوبات می‌تواند در نقاط مختلف دریاچه سد متفاوت و اثری اگرچه مختصر در میزان نشت داشته باشد بنابراین توصیه می‌شود اثر توزیع غیریکنواخت رسوبات در نظر گرفته شود.

مراجع

- [۱] طاحونی، ش. ۱۳۸۶ "اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد اول: مکانیک خاک" انتشارات پارس آیین
- [2] Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. (1992) *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*, A.A. Balkema, Rotterdam
- [۳] حائری، س.م. ۱۳۶۳ "اصول طرح سدهای خاکی" انتشارات گروه مهندسين عمران و صنايع
- [4] Strang, Gilbert, 2005, *Linear Algebra and Its Applications* (4th ed.), Brooks Cole, ISBN 978-0-03-010567-8
- [5] Baker, H.W. Editor (1985) "Issues in Dam Grouting", *Proceedings of Geotech. Eng. Div.*, ASCE Convention Denver, Colorado.
- [6] Desai, C.S. and Abel, J.F. (1972) *Introduction to the Finite Element Method*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [7] Hajnal, I., Marton, J. and Regele, Z. (1984) *Construction of Diaphragm Walls*, John Wiley and Sons, New York.
- [8] Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. (1992) *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- [۹] راهنمای تزریق در سازه های آبی/سازمان برنامه و بودجه، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، وزارت نیرو، ۱۳۷۸، (طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور) - تهران: سازمان برنامه و بودجه، مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات،
- [10] ICOLD Bulletin 51 (1985). "Filling Materials for Watertight Cut off Walls", Paris.
- [11] Houlsby, A.C. (1981) "Cement Grouting for Dams", *Australian Geomechanics*, No.3, pp.49-54.
- [12] Kassiff, G. and Henkin, E. (1967) *Proc. 3rd Asian Reg. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Haifa, Vol.I, p. 13.
- [13] Harr, M.E., 1962, "Ground water and Seepage", McGraw-Hill, New York
- [۱۴] آشنایی با سدهای خاکی، عبدالمجتبى ستایش ۱۳۹۲
- [15] Jacobsen, T., (2009). "Some aspects of reservoir sedimentation, Workshop on Reservoir Sedimentation Control", Regional Centre on Urban Flood Management, Karaj, Iran.
- [16] Imanshoar, F., Hassanzadeh, Y. and Aalami, M.T., (2009). "An introduction to", environmental impacts of sedimentation and erosion due to dam's construction Workshop on Reservoir Sedimentation Control, Regional Centre on Urban Flood Management, Karaj, Iran.
- [۱۷] مکانیک رسوب در آبراهه های روباز و مخازن سدها، علی خسرو نژاد، عاطفه پرورش ریزی، انتشارات نوآور، چاپ اول ۱۳۹۲
- [18] McNamee, J.; "Seepage into a Sheeted Excavation," *Geotechnique*, the Institution of Civil Engineers London, Vol. 4, No. 1, pp. 229-241, 1949.
- [۱۹] خلیلی شایان، ح.، تکلدانی، ا.، ۱۳۹۱، "برآورد آزمایشگاهی و عددی نیروی زیر فشار، دبی نشت و گرا دیان خروجی در شرایط حضور دیوار سپری و بلانکت در طراحی دیوار سپری"، سوکین سمینار ملی ژئوتکنیکی شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه.

[۲۰] صدقی اصل، محمد؛ حسن رحیمی و حسن خالقی، ۱۳۸۴، اثر موقعیت بهینه پرده آب بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه های آبی با استفاده از مدل عددی، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان، دانشگاه باهنر کرمان

[21] Neuman, S. P. and Witherspoon, P. A.; "Finite Element Method for Analyzing Steady Seepage with a Free Surface," *Water Resources Research*, Vol. 6, pp. 889–897, 1970.

[22] Richards, K. and Reddy, K.; "Critical Appraisal of Piping Phenomena in Earth Dams," *Bull Eng. Geol Environ.*, Vol. 66, pp. 381–402, 2007.

[23] Pakbaz M.S., 2009, "Evaluation of performance of plastic concert cutoff wall in Karkhe dam using 3-D seepage analysis and measurement", *Jornal of applied sciences*, 9, 4, pp. 724–730

[24] Naeimi, M. Gh. and Bayati, H.; "Investigation the Effect of Grout Wall and Curtain on Seepage Decrease with by Increase in Diffusion Depth in Right Side Axis of Mirzaye Shirazi Dam by Numerical Method," *6th National Congress on Civil Engineering*, Semnan, Iran, 2011 (in Persian).

[25] Sedghi-Asl, M.; Rahimi, H. and Khaleghi, H.; "Laboratory Investigation of the Seepage Control Measures under Coastal Dikes," *Experimental Techniques*, Vol. 36, No. 1, pp. 61–71, 2012.

[26] Jie, Y.; Jie, G.; Mao, Z. and Li, G.; 2004. "Seepage Analysis Based on Boundary-Fitted Coordinate Transformation Method," *Computer and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 279–283,

[27] Yousefi, M., et al., 2016. "Laboratory Investigation of the Effects of Sheet Pile on Seepage Control and Sand Boiling through Alluvial Foundation of Hydraulic Structures". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), pp. 315–328.

[۲۸] امامعلی زاده قناتی، ا.، گنبدی، م.، ب.، اصغر کلاهی، ا.، ۱۳۹۲، مطالعه روش های آب بندی سد گردیان جلفا "پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی (گرایش مهندسی)، دانشگاه دامغان

[۲۹] سنگی، خ.، ۱۳۹۲، "برآورد میزان تراوایی و مقدار تراوش در ساختگاه سد سیمره"، مهتاب قدس، فصلنامه شماره ۶۱، صفحه ۲۵–۲۹

[30] Ranja Raju K.G., Kothiyari U.S., et al., (1999, "sediment Removal Efficiency of settling Basin". *Jornal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol 125. No 5.

[31] Kantoush S.A., 2009, "Experimental Study on the Influence of the Geometry of shallow Reservoir on Flow Pattern and Sediments ". *PHD Thesis*.

[۳۲] عظیمیان، ا.، ر.، ۱۳۹۲، "دینامیک سیالات محاسباتی"، چاپ پنجم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان

[۳۳] پاک نیت، ا.، امین جواهری، ا.، ر.، ۱۳۹۵، "تحلیل استاتیکی و دینامیکی سد های خاکی با اسفاده از GeoStudio"، چاپ سوم، نشر علم عمران

[34] Krahn J., 2002, "seep/w version 5 manual", alberta, Canada

[35] An Engineering Methodology, July 2012 Edition "Seepage Modeling with SEEP/W" GEO-SLOPE International Ltd 1400, 633 – 6th Ave SW, Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5

[۳۶] شرکت آب پوی، ۱۳۸۱، "مجموعه گزارشهای سد ذخیره ای ارداک" انتشارات آب منطقه ای خراسان

[۳۷] خبرگزاری نسیم، دی ۱۳۹۴، گروه اقتصادی، حوزه نیرو

[۳۸] خبر گذاری صدا و سیما، شهریور ۹۴، گرو اقتصادی، حوزه عمومی، ۹۴۸۰۹

[۳۹] ضیائی، ح، ا، ۱۳۷۵، "تکنیک حفاری و اصول استخراج آبهای زیرزمینی" انتشارات چاپ گستر

Abstract

Sedimentation and its deposition due to the reduction of the reservoir active capacity, instability of dam and economic losses is one of the issues that has always been investigated by researchers and engineers. In addition, seepage in earth dam is an essential and important issue regarding the high hydraulic gradient, porosity of the body of the dam foundation and also economic issues. In order to prevent water seepage from earth dam foundation, the area below the body of the dam is sealed or almost sealed in different ways which although it reduces a large amount of foundation seepage, it imposes significant costs which sometimes does not seem economical. The reduction of the permeability of the reservoir floor due to the gradual increase of sediments is scientifically-experimentally proven. This means that sediments deposited in the reservoir, gradually accumulate on each other and while increasing the density of the previous sediments, they affect the thickness of sedimentation and decrease the permeability of the reservoir floor, so that it can be expected that the permeability of the reservoir floor will be very limited practically after a few years, which means no other foundation sealant systems will have a role in reducing the water seepage from the dam. In this research, modeling was done by seep/w for the Ardak earth dam based on the sediments deposited in each semester, for the first 5 years of operation of the dam, and an analysis was carried out for three modes namely presence of a cutoff wall with sediment, a cutoff wall without sediment, and sediment without a cutoff wall. Then they were compared with each other. Analyzing and measuring the amount of seepage in two states, the presence of a cutoff wall with sediment and the presence of a cutoff wall without sediment, it was found that the deposition of sediments behind the dam caused 58% reduction of seepage in a state of a cutoff wall with sediment compared to state without sediment. Furthermore, considering the results obtained from the software, the costs of building a cutoff wall and the amount of water seepage from the dam foundation, assuming the loss of all water leaked from the foundation in the state of without a cutoff wall with sediment, water rate of 1000 tomans per cubic meter and the comparison of costs with each other, it was determined that around 4.918 billion tomans is saved by removing the cutoff wall.

Keywords: Seepage, Sedimentation, Ardak earth dam, cutoff wall, seep/w



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering.

MSc Thesis in Hydraulic Structures Engineering

**Gradual Effect of Increasing Sediment on Seepage from
Earth Dam Foundation Using Geostudio Software
(Case study: Ardak Earth Dam)**

By: Seyed Maryam Ziaee

Supervisors:

Dr Ahmad Ahmadi

Dr Jalil Abrishami

September 2017