بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکز

دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش:

مهندسی عمران- مهندسی آب

عنوان:

تعیین میزان نشت از بدنه سدهای خاکی همگن با زهکش افقی در شرایط ماندگار با مدل های عددی

استاد راهنما

جناب آقای دکترعلی اکبر عظیمی

استاد مشاور

جناب آقای دکترمحمد رضا بازرگان لاری

پژوهشگر:

سید دانیال نصرتی

تابستان ۹۱

این ناچیز را اگر قدری است به:

رنجها و زحمتهای جبران ناپذیر پدرم ، آنکه قامت خم کرد
تا ایستاده بمانم

فداکاریها و محبتهای مادرم ، فرشته ای که لحظه لحظه
زندگیم ثمره ایثار اوست
و
بهترینهای بی بدیل زندگیم ، خواهر و برادر عزیزم
پیشکش می کنم.

تشکر وقدردانی

• شکر وسپاس فراوان پروردگار را که پرتو لطف و مهر بیکرانش روشنایی بخش کلبه حیاتم بوده و خوان نعمتش میهماندار تمام نیازهایم. ستایش پروردگار را که جهان را بر اساس علم و عدل و حکمت آفرید و به این بنده ناچیز توفیق ،انجام این پژوهش را ارزانی داشت.

• شایسته است در ابتدا از زحمات بی دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکترعلی اکبر عظیمی که هدایت و راهنمایی این پایان نامه را پذیرفته و همواره با رویی گشاده و اخلاقی نیکو ،مرا در نیل به اهدافم یاری رساندند ،صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

• از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمدرضا بازرگان لاری که بعنوان استاد مشاور از تجربیات ایشان بهره بسیار گرفتم کمال تشکر را دارم.

• از استاد محترم جناب آقای دکتر روح الله پروانه خواه که زحمت داوری پایان نامه را بر عهده گرفتند ،کمال تشکر و قدردانی را دارم.

• از زحمات دوست عزیزم جناب مهندس حسام محمدی که مرا در انجام تحقیق حاضر راهنمایی نمودند صمیمانه سپاسگزارم.

• در پایان از خانواده عزیز و بزرگوارم به واسطه فراهم نمودن امکاناتی که وجود آن شرط لازم در توفیق هر امری است ونیز راهنمائیهای ارزنده شان در تمام مراحل زندگی قدردانی می نمایم.

تعهد نامه اصالت پایان نامه کارشناسی ارشد

اینجانب سید دانیال نصرتی دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد نا پیوسته به شماره دانشجویی ۸۸۰٦۵۱٤۸۹۰۰ در رشته مهندسی عمران مهندسی آب که در تاریخ ۹۱/٦/۲۵از پایان نامه خود تحت عنوان :" تعیین مقدار نشت از بدنه ی سد های خاکی همگن با زهکش افقی در شرایط ماندگار " با کسب نمره ۱۸ و درجه دفاع نموده ام بدینوسیله متعهد می شوم :

۱- این پایان نامه حاصل تحقیق و پژوهش انجام شده توسط اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان نامه ، کتاب ، مقاله و ...) استفاده نموده ام ، مطابق ضوابط و رویه های موجود ، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست ذکر و درج کرده ام .

۲- این پایان نامه قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح ، پایین تر یا بالاتر) در سایر دانشگاهها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است .

۳- چنانچه بعد از فراغت از تحصیل ، قصد استفاده و هرگونه بهره برداری اعم از چاپ کتاب ، ثبت اختراع و ... از این پایان نامه داشته باشم ، از حوزه معاونت پژوهشی واحد مجوزهای مربوطه را اخذ نمایم .

٤- چنانچه در هر مقطع زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود ، عواقب ناشی از آن را بپذیرم و واحد دانشگاهی مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام هیچگونه ادعایی نخواهم داشت .

نام و نام خانوادگی : سید دانیال نصرتی

تاریخ و امضاء :

بسمه تعالی

درتاریخ : ۱۳۹۱/٦/۲۵

دانشجو کارشناسی ارشد آقای سید دانیال نصرتی از پایان نامه خود دفاع نموده وبا نمره ۱۸ بحروف هجده با درجه مورد تصویب قرار گرفت .

امضاء استاد راهنما

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول شناسه تحقیق.....۱

۱-۱ تعریف مسئله.....۲

۱-۲ اهداف.....۲

۱-۳ فرضیات.....۲

۱-٤چهار چوب تحقیق.....۳

۱-۵ ضرورت انجام.....٤

۱-٦برنامه اجرایی.....٤

۱-۷ مروری بر فصل ها.....۵

فصل دوم ادبیات پیشین.....٦

فصل سوم روشها و دیتا ها.....۱۸

۳- ۱ مقدمه.....۱۹

۳-۲ تواناییهای برنامه.....۱۹

۳-۲-۱ جریان نامحبوس.....۱۹

۳-۲-۲ نفوذ نزولات ۲۰

۳-۲-۳ نفوذ آب از مخزن ۲۱

۳-۲-٤ فشار آب منفذی مازاد.....۲۱

۳-۲-۵ نشت گذرا ۲۲

۳-۳ طرح مسئله و مدل‌سازی.....۲۳

۳-۳-۱طراحی، نوشتن متن و وارد کردن تصویر.....۲۳

۳-۳-۲ ایجاد شبکه گرافیکی (finite element) ۲۳

۳-۳-۳ استفاده ازگرافیک در نمایش گونه‌های خاک و شرایط مرزی.....۲٤

۳-۳-٤ ویرایش توابع از طریق نموار گرافیکی و صفحه کلید.....۲۵

۳-۳-۵ تعریف گرافیکی مقطع دبی.....۲۵

۳-۳-٦ تعریف گرافیکی سطح ایستایی آب ۲۵

۳-٤ محاسبه نتایج.....۲۵

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۳-۵ مشاهده نتایج..... ۲۷
۳-۵-۱ مشاهده مقادیر محاسبه شده در گره‌ها و المان‌های منطقه گوس ۲۷
۳-۵-۲ گراف..... ۲۷
۳-۵-۳ خطوط کانتور..... ۲۸
۳-۵-٤ مشاهده بردارهای سرعت..... ۲۸
۳-۵-۵ مشاهده نحوه حرکت سطح ایستایی آب..... ۲۹
۳-۵-٦ مشاهده مقدار دبی..... ۲۹
۳-۵-۷ مشاهده مسیر جریان..... ۳۰
۳-۵-۸ داده‌ها و گرافیک‌های خروجی..... ۳۰
۳-٦ نحوه آنالیز seepage..... ۳۰
۳-٦-۱ مدلسازی سیستم‌های جریان اشباع و غیراشباع..... ۳۱
۳-٦-۲ آنالیز شرایط ماندگار و ترانزیت(غیرماندگار) ۳۱
۳-٦-۳ هندسه محوری متقارن یا مسطحاتی دو بعدی..... ۳۱
۳-۷ شرایط مرزی ۳۱
۳-۷-۱ شرایط مرزی چندگانه..... ۳۱
۳-۷-۲ شرایط مرزی غیر ماندگار ۳۱
۳-۷-۳ مرور شرایط مرزی ۳۲
۳-۷-٤ هد به عنوان تابعی از حجم ۳۲
۳-۷-۵ مرز فشار..... ۳۲
۳-۸ مشخصات خاک..... ۳۲
۳-۸-۱ ضریب هدایت هیدرولیکی و ظرفیت حجمی آب به عنوان تابعی از فشار آب منفذی..... ۳۲
۳-۸-۲ مشخصات خاکهای هموژن و غیرهمسان..... ۳۳
۳-۹ اجرای عملیات المان محدود..... ۳۳
۳-۹-۱ المانهای یک اندازه چهار گوش یا مثلثی متناهی ۳۳
۳-۹-۲ المانهای نامتناهی..... ۳۳
۳-۹-۳ اضافه و حذف مرحله‌ای المان‌ها ۳۳

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۳-۱۰ پردازش ۳۲ بیتی..... ۳۳
۳-۱۰-۱ هیچ محدوده مشخصی برای اندازه مسئله وجود ندارد..... ۳٤
۳-۱۰-۲ عدم محدودیت در تعداد گامهای زمانی در آنالیز شرایط غیرماندگار ۳٤
۳-۱۰-۳ قطع کردن و ادامه دادن محاسبات..... ۳٤
۳- ۱۱ فرمولها..... ۳٤
۳-۱۲ نمونه ها..... ۳۷
فصل چهارم..... ٤٦
نتایج آنالیز و تفسیر..... ٤٦
٤-۱ مقدمه ٤۷
٤-۲ روشها..... ٤۹
٤-۳ اثر شرایط نیمه اشباع..... ۵۲
٤-۳- ۱ آنالیز مقایسه ای بین حالت اشباع و غیر اشباع..... ۵۳
٤-۳-۲ آنالیز و مقایسه مدل عددی با نمونه واقعی ۵۵
٤-٤ نتایج..... ۵۷
٤-۵ معادله کلی..... ٦۰
فصل پنجم..... ٦۱
۵-۱ نتایج..... ٦۲
۵-۲ پیشنهاد..... ٦۳
فصل ششم منابع و ماخذ..... ٦٤

فهرست شکل ها

عنوان صفحه

۳-۱- جریان غیر محبوس در یک سد خاکی..... ۲۰
۳-۲- جریان نفوذی از بالای یک لایه با نفوذپذیزی کم..... ۲۰
۳-۳ نفوذ آب از مخزن که منحصر به بالا آمدن سطح ایستایی آب می‌شود..... ۲۱
۳-٤- اتلاف فشار آب منفذی بعد از پائین آوردن سطح آب در سد خاکی..... ۲۲
۳-۵ نفوذ گذرای آب از بالای مخزن به داخل سد خاکی بعد از پر شدن مخزن..... ۲۲
۳-٦ حرکت سطح جدایی آب در سد خاکی بعد از پائین آوردن سطح آب مخزن..... ۲۳
۳-۷ المان‌بندی چهارگوش..... ۲٤
۳-۸ تعریف شرایط مرزی با موس..... ۲٤
۳-۹ اضافه کردن نقطه روی تابع هدایت هیدرولیکی با موس..... ۲۵
۳-۱۰گراف نتیجه در مقابل تعداد دفعات..... ۲٦
۳-۱۱ گراف در مقابل مکش..... ۲٦
۳-۱۲ مقادیر محاسبه شده در گره‌ها..... ۲۷
۳-۱۳نمودار هد- زمان..... ۲۸
۳-۱٤نمایش خطوط کانتور..... ۲۸
۳-۱۵مشاهده نحوه حرکت سطح ایستایی آب..... ۲۹
۳-۱٦ مشاهده مقدار دبی..... ۲۹
۳-۱۷ مشاهده مسیر جریان..... ۳۰
۳-۱۸نمونه‌ای از تابع هدایت هیدرولیکی..... ۳۵
۳-۱۹نمونه‌ای از نمودار مشخصات آب..... ۳٦
۳-۲۰ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ۳۷
۳-۲۱نمونه مدل شده در نرم افزار..... ۳۸
۳-۲۲نمونه مدل شده در نرم افزار..... ۳۸

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

۳-۲۳نمونه مدل شده در نرم افزار..... ۳۸

۳-۲٤ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ۳۹

۳-۲۵ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ۳۹

۳-۲٦ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ۳۹

۳-۲۷ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ٤۰

۳-۲۸ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ٤۰

۳-۲۹ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ٤۰

۳-۳۰ نمونه مدل شده در نرم افزار..... ٤۱

٤-۱ L و Δh.درسد..... ٤۹

٤-۲ سدهای مورد مطالعه..... ۵۰

٤-۳ تابع ضریب نگهداشت..... ۵۱

٤-٤ تابع ضریب نگهداشت ۵۱

٤-۵ $Q/ksat$ و $\Delta h2/L$نمودار سدهای مختلف بر حسب ۵۲

٤-٦- نمایش های حباب های هوا در بین ذرات خاک در شرایط نیمه اشباع..... ۵۳

٤-۷ دبی خروجی برای حالت اشباع..... ۵۳

٤-۸ دبی خروجی برای حالت نیمه اشباع..... ۵۳

٤-۹ دبی خروجی برای حالت اشباع..... ۵٤

٤-۱۰ دبی خروجی برای حالت نیمه اشباع..... ۵٤

٤-۱۱ معادله درجه ۲ برای کل نقاط..... ۵۷

٤-۱۲ معادله برای بازه ۰.۲-۲..... ۵۷

٤-۱۳ معادله برای بازه ۰.۲-۲..... ۵۸

٤-۱٤ معادله برای بازه ٤-۸..... ۵۸

٤-۱۵ معادله برای بازه ۱۸-۸..... ۵۹

٤-۱٦ معادله برای بازه ۳۰-۱۸..... ۵۹

فصل اول

شناسه پایان نامه

۱-۱ بیان مسئله

حرکت آب درون بدنه سد یکی از مشکلات اساسی فراروی مهندسان ژئوتکنیک است. به طور کلی در مسائل مربوط به نشت ، توده خاک یک محیط پیوسته محسوب می شود که دارای تعداد بیشماری منافذ بهم پیوسته است. بنابراین نشت اجتناب ناپذیر است و برای بهینه سازی دبی عبوری باید به محاسبه دقیق نشت پرداخت و شناخت کامل از نشت عبوری بدست آورد. محاسبه نشت تاثیر بسزایی در پایداری سد ها داشته و تخمین دقیق آن موجب کاهش هزینه های اجرایی میگردد.ما سعی داریم مدل های پیچیده محاسبه دبی نشت را به روش ساده‌تری تبدیل کنیم.

۱-۲ اهداف

نشت، نفوذ یا حرکت آرام آب از میان توده خاک است. به وجود آمدن نشت در سد های خاکی باعث اتلاف آب ، کاهش پایداری سد و در نهایت باعث ایجاد خطرات جانی می شود. از این جهت تجزیه و تحلیل و آنالیز نشت آب در سد های خاکی اولین گام موثر و یکی از مهمترین مسائلی است که در طراحی سد ها مورد توجه متخصصین امر قرار می گیرد.

تهیه یک روش مناسب در زمینه حل مسائل نشت از درون سد خاکی و برآورد دقیق مقدار دبی عبوری از اهداف اصلی این تحقیق می باشد. جهت تامین این هدف و ارائه راهکار مناسب ، رابطه ای ارائه شده که در حد بسیار قابل قبولی میزان دبی عبوری از بدنه سد را تخمین می زند.

۱-۳ فرضیات

مطالعه ریاضی حرکت آبهای زیر زمینی از دو قانون بنام قانون دارسی و قانون میزان نگهداشت تبعیت می‌کند. روش حل ریاضی باید یک نظام جهت‌دار از معادله بین زمینه فیزیکی (شامل ژئومتری لایه، همگن و غیرهمگن بودن و قابلیت نفوذ و شاید پایدار و غیرپایدار بودن در هر لایه) با شرایط مرزی بروز داده شده از هد، فشارها یا سرعت‌های جریان، ریشه گرفته شده باشد.

راه‌حلهای تحلیلی برای مشکلات آبهای زیرزمینی متعدد با شرایط ایده‌ال یا ساده شده در کتابهای هیدروژئولوژیکی موجود می‌باشد. ولی اکثر مسائل آب‌های زیرزمینی شرایط غیرایده‌ال دارند و راه‌حل تحلیلی آنها در دسترس نیست. مانند شرایط نشت از بین مغزه‌های نفوذناپذیر خاکریزها، که در این تحقیق مورد رسیدگی قرار گرفته است.

بنابراین راه حل‌ها برای این مسائل می‌توانند با چندین روش بدست آیند:

- گراف دستی شبکه جریان ارزانترین روش است. این روش برای مسائل پایدار کاربرد دارد و نشت غیراشباع را نادیده می‌گیرد و نیز یک روش تقریبی است.

- روش مقیاسی الکتریکی، شبیه‌سازی وضعیت‌های حالت پایدار یا ناپایدار را میسر می‌سازد ولی جزء تراوش غیراشباع را باز هم نادیده می‌گیرد. علاوه بر این کار پر زحمتی است و از دهه ۱۹۷۰ کمتر به کار رفته است.

- روش‌های مدل سازی عددی می‌توانند راه‌حل‌های معقولی را برای مشکلات اصلی آب‌های زیرزمینی فراهم سازد. یک واریته از کدها و روش‌های عددی کار آمد، برای حل مسائل حالت پایدار و ناپایدار موجود است و بسیاری از آنها می‌توانند نشت غیراشباع را به حساب آورند.

این تحقیق نتایج یک تحقیق عددی را با استفاده از روش اجزاء محدود، با دقت مناسب برای رسیدگی به نشت آب‌های زیرزمینی از بین خاکریزهای همگن و غیرهمگن با هسته نفوذپذیر در شرایط پایدار در حالت غیراشباع را ارائه می‌دهد.

۱-۴ چهار چوب

تا کنون محققین و صاحب نظران مطالعات موثر و تلاش های بسیاری در ارتباط با نشت و کنترل آن در سد های خاکی انجام داده اند. لیکن ، با توجه به طراحی خاص هر سد و بهینه نمودن هزینه و کنترل پایداری ، مطالعات نشت آب از زمینه هایی است که تحقیقات بیشتری را ایجاب می نماید. در این مقاله سد های خاکی همگن مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت آنالیز نشت و ساخت مدل های لازم از برنامه رایانه ای سیپ دبلیو استفاده گردیده است.

در این تحقیق میزان دبی نشت از خاکریز در پایین‌دست اندازه گرفته می‌شود و با استفاده از عددهای بدست آمده روشی برای تخمین دبی نشت از سدها و خاکریزها برای کنترل پایداری خاکریزها ارائه می‌شود. همچنین این تحقیق نتایج یک بررسی عددی نشت از میان خاکریزهای همگن با زهکش افقی در پنجه با

اشکال مختلف را با در نظر گرفتن جریان غیراشباع ارائه می‌دهد و یک روش ساده برای تخمین نشت از میان سدها بصورت یک فرمول ارائه می‌نماید. مراحل نتایج تخمین از سدها که می‌توان با در دست داشتن ارتفاع آب پشت سد و فاصله افقی بین نزدیکترین نقطه زهکش افقی در پائین‌دست و نقطه برخورد سطح آب با رویه بالادست و ضریب نفوذپذیری ، دبی نشت را تعیین نمود

۱-۵ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

افزایش سریع و سرسام آور جمعیت در دنیا احتیاجات روزافزون بشر به فراورده های کشاورزی و دامی و نیاز جامعه به منابع انرژی موجب گردیده که تا حد امکان از هر قطره آبی استفاده صحیح و بهره برداری کامل بعمل آید چنانکه اهمیت آب با داستان زندگی بشر شروع می شود. چنانچه می دانیم وسعت اراضی مستعد به کشاورزی در کشور ایران قابل توجه است ولی به علت کمبود آب و آشنا نبودن کشاورزان به روش استفاده صحیح از آن امر کشاورزی را در سطح پایین نگه داشته است ضرورت امر این است که دستگاههای مسئول برای مهار و ذخیره نمودن آب های موجود کشور که بدون بهره برداری از دسترس خارج می شود برنامه ریزی و اقدامات مفید و جدی به عمل آورده و راه استفاده صحیح از آب را به عموم آموزش دهند تا مساله کمبود آب حل شده و موجب شکوفایی اقتصادی مملکت گردد. احداث سد یکی از راههایی است که می تواند ما را در رسیدن به اهداف بالا سوق دهد . در سدسازی بهره برداری و نگهداری از سد به نوعی مهمتر از اجرای سد است چنانچه می دانیم یکی از علل تخریب سدهای خاکی نشت از بدنه می باشد که باید روشهایی برای کنترل و جمع آوری این نشت اتخاذ شود که در صورت کنترل نکردن آن صدمات و زیانهای جبران ناپذیری به وجود می آورد.

۱-۶ برنامه اجرایی

سیپ دبلیو یک محصول نرم افزاری با المانهای متناهی است که از آن می‌توان در مدل سازی نحوه جابجایی و توزیع فشار آب منفذی در داخل مواد متخلخل مثل خاک و صخره استفاده کرد. فرمولاسیون جامع و گسترده آن امکان آنالیز مسائل ساده و بسیار پیچیده نشت آب را فراهم می‌آورد. این نرم افزار در آنالیز و طراحی پروژه‌های ژئوتکنیکی، عمرانی، هیدرولوژیکی و معدن کاربرد دارد همچنین یک برنامه کلی آنالیز نشت آب است که هم جریان محیطهای اشباع و هم غیر اشباع را مدل سازی می‌کند. این نرم افزار قادر است از دیگر نرم افزارهای مشابه مسائل را واقعی تر حل کند و محدوده وسیعتری را نیز پوشش می‌دهد. سد های مورد بحث در این تحقیق دارای خصوصیات یکسانی هستند.

برای اینکه نتایج آنالیز به طور فیزیکی واقعی باشند لازم است که در مدل سازی آب زیرزمینی جریان غیراشباع را نیز در نظر بگیریم. در خاکها، ضریب هدایت هیدرولیکی و میزان گنجایش حجمی آب، یا آب

ذخیره شده به صورت تابعی از فشار آب منفذی تغییر می‌کند. نرم افزار سیپ دبلیو ، این روابط را به صورت تابع پیوسته‌ای مدل سازی میکند. اکثر نرم افزارهای مشابه این مسئله را در نظر نمی‌گیرند که به جای آن از یک سری فرضیات غیر واقعی فیزیکی استفاده می‌کنند که در واقع توابعی مرحله‌ای هستند. به عنوان مثال، درفشار آب منفذی صفر و بزرگتر از آن (یعنی زیر سطح ایستایی آب)، مقدار هدایت هیدرولیکی آب به صورت اشباع فرض می‌شود و یا در فشار آب منفذی کوچکتر از صفر (یعنی بالای سطح ایستایی آب)، مقدار هدایت هیدرولیکی آب صفر است. استفاده از چنین توابع مرحله‌ای غیر واقعی در مدل سازی قابلیت هدایت هیدرولیکی خاک و میزان گنجایش حجمی آب می‌تواند منجر به نتایج نادرست شود.

۱-۷ محتوای پایان نامه

این تحقیق در ٦ فصل به ترتیب زیر تدوین شده است:

- در فصل اول با عنوان شناسه رساله به بیان مسئله، هدف ، فرضیات، ضرورت انجام کار، چهارچوب تحقیق و برنامه اجرایی می پردازیم

- در فصل دوم به ادبیات پیشین موضوع می پردازیم.

- در فصل سوم به معرفی نرم افزار استفاده شده در تحقیق می پردازیم و اطلاعات جمع آوری شده از ۱۲۰ سد مورد مطالعه را ارائه می دهیم.

- فصل چهارم به بررسی خروجی های نرم افزار و بحث و بررسی نتایج اختصاص دارد.

- در فصل پنجم به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات می پردازیم.

- منابع و ماخذ هم محتوای فصل ششم خواهد بود.

فصل دوم

تاریخچه مطالعات سد و مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱ تاریخچه

مهندسی سد از آغاز خود در گذشته های دور از کارهای ابتدائی و ساده؛ سیستم هایی که هر روز پیچیده تر می شود، تکامل یافته است. سد سازی کهن یک هنر اولیه و آزمایشی منتج از تجارب و آزمونهای ساده بود اما طی قرنهای متمادی بتدریج با علم در آمیخت.

سدهای اولیه با استفاده علمی از آبرفتی که در مسیر جریان وجود داشته و بلاواسطه قابل دسترسی بود، به صورت ناپایدار و متزلزل ساخته شده و به راحتی بوسیله سیل شسته می‌شد. در نتیجه، طی هزاران سال اعتماد چندانی به سدهای خاکی به وجود نیامد. اما ساخت سد با مصالح سنگی در بسیاری از نقاط دنیا طرفداران بیشتری داشت. در وادی الغراوی در نزدیکی حلوان مصر، بقایای جا مانده از سد الکفاره که زمان احداث آن بین سالهای ۲۶۰۰ تا ۲۹۰۰ قبل از میلاد تخمین زده می شود، هنوز توجه بیننده را به خود جلب می کند. این سد از نوع سنگریزه ای و به ارتفاع ۱۴ متر با رویه های ساخته شده از سنگ تراشیده و هسته سنگ لاشه ای – شنی بود. به نظر می رسد که بخش مرکزی آن اندکی پس از ساخت یا در آخرین مرحله ساخت بوسیله سیل تخریب شده باشد. علت شکست بسیاری از سدها در طول تاریخ عدم پیش بینی کافی برای سرریز بوده است[1].

مهارت سازندگان سدها به تدریج در طول قرنهای متمادی افزایش یافت. رومیان سدهای زیادی با مصالح بنایی و ملات بسیار با دوام احداث کردند که از برخی از آنها هنوز هم بهره برداری می شود و سرریزهای بزرگ آنها گواه بر درک رومیان از مبانی مهندسی است. برخی از مورخین بر این باورند که اولین سد قوسی را رومیان ساخته اند. سد بزرگی از این نوع که انسان را تحت تاثیر قرار می دهد. در نزدیکی داراس در مرز ترکیه و سوریه بر روی یکی از شاخه های رودخانه خابور ساخته شد. کریسس مهندس روم شرقی و مقیم اسکندریه در حدود ۵۶۰ سال قبل از میلاد، شرحی مستند در مورد این سد **تهیه کرد**. برای افزایش پایداری سازه تکیه گاههای پر شیب شکافته در دو طرف قوس به شکافهای مزبور گیر داده شده و برای مهار **سیل** دریچه های خاصی تعبیه شده است. علیرغم داشتن چنین ویژگی های مهم اسناد قدیمی اطلاع زیادی از ابعاد سازمان این طرح بدست نمی دهند.

طی قرن نوزدهم، پیشرفت قابل توجهی در مهندسی سدهای وزنی در اروپا حاصل گردید. در سال ۱۸۵۳ مهندس فرانسوی ام. دو سازیلی توصیه کرد که فشار داخل سد پایین تر از حد معین نگه داشته شده و نیز ابعاد آن طوری تعیین شود که از لغزش جلوگیری به عمل آید. ۲۵ سال بعد، مفهوم حفظ نتیجه نیروها در داخل یک سوم میانی هر صفحه افقی بوسیله دبل بو. جی ام رانگین انگلیسی به تفصیل تشریح و روشن گردید. مفاهیم پیشنهاد شده بوسیله ام. دوسازیلی و رانگین راه را برای تحلیل منطقی سدها گشود.

در حالی که معیار یک سوم میانی بطور عام برای تامین مقاومت سدهای وزنی تحت بار متوسط در مقابل واژگونی پذیرفته شده بود، مهندسین به اهمیت فشار بر کنش و لغزش پی می بردند. در این راستا، در طراحی سد ویرنوی در انگلیس که طی سالهای ۱۸۸۲ تا ۱۸۹۰ ساخته شد، یک سیستم زهکشی برای کاهش فشار برکنش پیش بینی گردید.

از اوائل قرن بیستم پیشرفت مهمی در تکنولوژی بتن سدها که شامل مخلوطهای دقیقاً کنترل شده، لرزش، سیمانهای مخصوص، انواع پوزولان، دانه بندی شن و ماسه، هوادهی سرمایش و مواد افزودنی می باشد، به دست آمده است.

در قرن نوزدهم با آغاز استفاده از ماشین آلات به جای حیوانات در حمل مصالح، متراکم ساختن خاکریز و غیره، توسعه سدهای خاکی شتاب بیشتری گرفت. انتقال از دوره گریدرها و گاریهای اسبی، غلطکهای صاف و ماله‌کشی بزودی با تعمیم استفاده از ماشین آلات سنگین مانند غلطک پاچه بزی و کشنده های با یدک چرخ زنجیری به صورت کامل انجام گرفت. تا سال ۱۹٤۰ تجهیزات بزرگ ویژه برای جابه جایی و تراکم خاک و سنگ ساخته شده بود. در دو دهه ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ غلطک لرزان در وهله اول برای متراکم کردن شن و ماسه و سپس برای متراکم کردن سنگریزه ها مقبولیت گسترده ای پیدا کرد. این وسیله در انتخاب و ساخت سدهای سنگریزه ای متراکم به جای خاکریز یا سنگریزه ای غیر متراکم تاثیر زیادی داشت.

با افزایش زیاد توانائیهای انسان در سدسازی، روندکار به سوی احداث سدهای خاکی بزرگ گرایش یافت و با شناخت عمومی از قابلت این نوع سد برای انطباق با شرایط مختلف ساختگاه نسبت به سدهای صلبتر، این گرایش رو به فزونی گذاشت.

برخی سدهای سنگریزه ای غیر متراکم دارای رویه تامره ای با نشست و نشت بسیار مواجه شده و مطلوبیت خود را از دست دادند و لذا مهندسن در دهه پنجم قرن حاضر به سدهای سنگریز دارای هسته خاکی و در دهه هفتم این قرن به سدهای سنگریز متراکم با رویه بتنی روی آوردند[2].

تا قرن بیستم بخش اعظم دانش مورد استفاده در طراحی خاکریزها تجربی بوده و مقاومت آنها در مقابل نیروهای وارده به آسانی قابل تعیین نبود، مقادیر حدی عمدتاً بر اساس حوادث و شکستها مورد ارزیابی قرار

گرفت. بر عکس، روشهای تحلیلی برای طراحی سدهای بتنی و بنایی با وجود اینکه در مفاهیم ساده گرفته شده بود نسبتاً قابل اطمینان بودند. مثلاً سدهای وزنی با ابعاد بزرگ طراحی می شد تا مقاومت کافی در مقابل لغزش و واژگونی داشته باشد. برای این قبیل سازه ها معمولاً کمترین تنش کششی محاسبه می شد.

تحلیل عددی سدهای خاکی و سدهای بتنی در ۵۰ سال گذشته پیشرفت بسیار کرده است. در این خصوص علوم تاثیر مهمی داشته و مهندسین را قادر ساخته تا علیرغم محدود نمودن ساختگاههای کاملاً مطلوب سازه های بزرگ، با صرفه و قابل اطمینان طراحی کنند. تداوم تلفیق رویکردهای علمی و عملی مبنای بسیار خوبی را برای پیشرفتهای بیشتر فراهم می کند. همان طور که می دانیم یکی از علل تخریب سدهای خاکی نشت از بدنه می باشد که باید روشهایی برای کنترل و جمع آوری این نشت اتخاذ شود. بدست آوردن نشت از بدنه نیاز به رسم خط فریاتیک و شبکه جریان و در نهایت استفاده از انواع فرمولها دارد.

نشت آب در سدهای خاکی و نحوه کنترل آن، اولین گام موثر و یکی از مهمترین مسائلی است که در طراحی سدها مورد توجه خاص متخصصین امر قرار می‌گیرد. دانش و آگاهی از قوانین بنیادی نشت به متخصصین اجازه می‌دهد تا از بوجود آمدن مشکلات جدی در کنترل نشت جلوگیری کرده و بهترین نوع سیستم کنترل نشت را انتخاب نمایند. آگاهی از تاثیر پارامترهای زیادی که در نشت آب دخالت دارند می‌تواند در رفع سریعتر مشکلات طراحی کمک شایانی بنماید[3].

یکی از مهمترین مسائل در سدهای خاکی مسئله حرکت بطئی آب در بدنه سد و نیز معمولاً در شالوده آن می‌باشد. این حرکت بطئی که به نام زه‌آب نامیده می‌شود، هم به لحاظ محاسبه مقدار تلفات آب که ممکن است درصد مهمی را تشکیل دهد و هم به لحاظ پایداری سد و هم به لحاظ محاسبه زیر فشار، محاسبه ضخامت و طول زهکش‌ها، بررسی لزوم چاههای کاهش فشار، بررسی لزوم تزریق، طرح دیواره آب بند و موارد دیگر حائز اهمیت می باشد. تا قبل از سال 1965 بیش از ۲۰۰ سد خاکی با شکست روبرو شده‌اند که بعضی از آنها تلفات جانی نیز داشته‌اند. بعضی از این سدها حتی قبل از شروع به کار و بهره‌برداری شکسته شده و برخی پس از پر شدن مخزن و یا در زمانهای بعد تخریب گردیده‌اند، بر طبق گزارشات واصله ۲۵ درصد از این خرابیها به علت وجود زه‌آب غیر مجاز و شسته شدن خاک در اثر زه‌آب بوده است، بنابراین لازم است تا به منظور جلوگیری از خرابیهای حاصل از زه‌آب مقدار جریان زه در بدنه و شالوده سد خاکی به طور دقیق تعیین گردیده و به میزان پیش‌بینی شده محدود گردد .

۲-۲ روش های محاسبه زه آب سدهای خاکی[7]

روشهای متعددی برای محاسبه زه‌آب سدهای خاکی وجود دارند که عبارتند از:

۱- روش سنتی رسم شبکه جریان که از طریق تعداد بسیار زیاد آزمون و خطا انجام گرفته، وقت‌گیر بوده و در نهایت نیز از دقت کمی برخوردار است.