بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

سدهای خاکی
و
تحلیل عددی آن

تألیف:

سید امیرالدین صدرنژاد

دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

صدرنژاد، امیرالدین، ۱۳۳۳-
سدهای خاکی و تحلیل عددی آن / تألیف امیرالدین صدرنژاد.—
تهران: دانشگاه شهید رجائی، .۱۳۸۴
۷۱۲ص.: مصور، جدول، نمودار.
ISBN 978-964-95589-6-7
فهرستنویسی بر اساس اطلاعات فیپا.
نمایه.

۱. سدهای خاکی. ۲. سدهای خاکی – طرح و ماسبه.
الف. دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی. ب. عنوان.

۴س۴ص/۵۴۳ TC ۶۲۷/۸۳
کتابخانه ملی ایران ۸۴-۲۱۷۱۴ م

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	: سدهای خاکی و تحلیل عددی آن
تألیف	: سید امیرالدین صدرنژاد
چاپ اول	: زمستان ۱۳۸۴
چاپ دوم	: بهار ۱۳۹۰
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	: سعیدی
چاپ	: زیتون
ناظرفنی	: غلامرضا کارگریان مروستی
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۱۱۰۰۰ تومان
شابک	: ۹۷۸ – ۹۶۴ – ۹۵۵۸۹ –۶– ۷

ISBN: 978-964-95589-6- 7

کلیهٔ حقوق این اثر برای مولف و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان – کد پستی ۱۶۷۸۸ – صندوق پستی ۱۶۳ – ۱۶۷۸۵ – تلفن: ۹ – ۲۲۹۷۰۰۶۰
نمابر: ۲۲۹۷۰۰۷۰ پست الکترونیک sru@srttu.edu

فصل اول

معرفی سدهای خاکی

مقدمه

با افزایش روزافزون نیاز زندگی انسان به انرژی دست اندازی بشر به منابع مختلف این نعمت الهی گسترش یافته و وی را وادار به توسعه علم و دانش و فن آوری مربوطه می‌نماید.

در میان انرژی‌های یادشده مناسبترین آن از دیدگاه حفاظت محیط زیست انرژی تولیدی از نیروگاههای آبی تشخیص داده‌شده‌است. امکان پذیری استفاده از این پدیده در گرو ساخت سدهای بلند برای ذخیره سازی آب و تجهیزات کنترل و مهار آن است.

An artistic impression of the Bakun Hydroelectric Project in Malaysia

۱-۱) تاریخچه

۱-۱-۱) تاریخچه‌ای از سدسازی در ایران

سرزمین پهناور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرارگرفته است و توزیع ناموزون جریانهای سطحی محدودیتهای عمده‌ای را در اثر استفاده بهینه در آب، این عنصر حیاتی، بوجود آورده است. به علاوه قسمت اعظم این جریانها قبل از اینکه مورد استفاده قرارگیرند، از دسترس خارج شده و به سوی دریا سرازیر می‌گردند. از آنجایی که تأمین آب همواره نیاز اساسی بشر برای استفاده‌های کشاورزی، صنعتی و آب شرب شهرها بوده است، لذا مهار سیلابها و آبهای جاری از طریق احداث سد، از کارهای اساسی و زیربنایی محسوب شده و برای رسیدن به خودکفایی اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

این نیاز از دیرباز در کشورمان مورد توجه بوده و آثار بی‌شماری از سدهای قدیمی با قدمت چندهزار ساله در گوشه و کنار این سرزمین گواه بارزی بر این مدعاست و آثاری که در این زمینه بدست آمده است، نشان می‌دهد که پیشینیان و نیاکان ما از قرنها پیش

با دانش و فن سدسازی آشنایی کامل داشته و با احداث تأسیسات مختلف و انواع سدها که پس از گذشت صدها سال هنوز استوار و پایدار باقی مانده‌اند، تحسین و تعجب متخصصان و صاحب‌نظران بین‌المللی را در عصر حاضر برانگیخته‌اند. از جمله سدهای قدیمی موجود در کشورمان می‌توان به سد داریوش روی رودخانه کر اشاره کرد که عمری بیش از ۲۵۰۰ سال دارد. همچنین سد بهمن‌شیر که عمری بیش از ۲۰۰۰ سال دارد و سد میزان در شوشتر که عمری در حدود ۱۷۰۰ سال دارد و بند امیر روی رودخانه کر که ۱۰۰۰ سال عمر دارد و هنوز هم در حال بهره‌برداری است.

هم اکنون نیز با توجه به نیازهای ذکر شده، صنعت سدسازی با جدیت بیشتری در کشور ما و نقاط دیگر جهان دنبال می‌شود. از جمله سدهای خاکی که در کشورمان در دست اقدام یا بهره‌برداری است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

سد مارون در بهبهان به ارتفاع ۱۶۵ متر، سد کرخه در اندیمشک به ارتفاع۱۲۷ متر، سد کوار (میرزای شیرازی) در شیراز به ارتفاع ۶۰ متر، سد طالقان در سنگبان به ارتفاع ۱۲۵ متر، سد گاومیشان در کامیاران به ارتفاع ۱۳۶ متر، سد علویان در مراغه به ارتفاع ۷۰ متر، سد سولگان۴ در آق‌بلاغ به ارتفاع ۸۵ متر.

در مورد سد کرخه که یکی از سدهای بزرگ دنیا می‌باشد می‌توان به مشخصات زیر اشاره کرد:

نوع سد، سد خاکی هسته‌دار است که حداکثر عرض آن در پی ۱۱۰۰ متر و عرض تاج آن ۱۲ متر می‌باشد(در تراز ۲۳۴ متر از سطح دریا). طول تاج سد ۳۰۳۰ متر می‌باشد که رتبهٔ ششم را در دنیا دارد. ارتفاع سد ۱۲۷ متر است. حجم کل مخزن ۷/۳ میلیارد مترمکعب(۳۶ برابر حجم مخزن سد کرج) که در سطح بهره‌برداری به ۵/۶ میلیارد متر مکعب می‌رسد. حجم کل خاکبرداری این سد ۱۵ میلیون متر مکعب و حجم کل خاکریزی آن ۳۲ میلیون متر مکعب می‌باشد.

۱-۱-۲) تاریخچه‌ای از سدسازی در جهان

اولین سد خاکی تاریخ دار در جهان سد ***سعد- الکفرا*** واقع در جنوب قاهره درکشورمصر است که در سالهای ۲۷۵۰ تا ۲۹۵۰ قبل از میلاد ساخته شده است . این

سد خاکی شاید اولین سد خاکی است که حدود ۴۸۰۰ سال قبل ساخته شد. این سد ۱۲ متر ارتفاع و دارای دو دیواره قلوه سنگی با فاصله ۳۶ متر و ضخامت ۲۴ متر در پی بوده و حد فاصل دو دیواره با مواد خاکی معمولی پر شده است. گزارشات حاکی از خرابی این سد در اثر تلاش برای افزایش ارتفاع آن بوده است .

سد خاکی دیگری در سیلان در ۵۰۰ سال قبل از میلاد متشکل از ۱۳ میلیون متر مکعب مصالح ساخته شد. حدود سال۱۲۰۰ بعد از میلاد سد دیگری در سیلان با ۱۲ تا ۲۷ متر ارتفاع و طول ۱۴ کیلومتر ساخته شد. در همان زمان سدهای خاکی دیگری در هند مانند سد ***مادوک ماسور*** (Madduk-Masur) (سال ساخت ۱۵۰۰ بعد از میلاد) با ۳۰ متر ارتفاع ساخته شد که با تلاش برای افزایش ارتفاع بخاطر نداشتن سر ریز تخریب شد.

در ابتدا غالباً سدها از مصالح زمینی همگن محلی بصورت یکنواخت و بوسیله کارگران و اجرای عمل تحکیم لایه‌ها بوسیله حرکت دادن حیوانات و کوبیده شدن بوسیله سم أنها ساخته می‌شدند. در سال ۱۷۸۹ سد ***استرچو دورینتز*** (Estrecho de Rientes) در اسپانیا ساخته شد. این سد ۴۶ متر ارتفاع داشت اما درست پس از آبگیری در اثر نشت آب تخریب و شسته شد. از این پس جهت جلوگیری از نشت تلاش زیادی صورت پذیرفت، بطوریکه در سال ۱۸۲۰ در سد ثلفورد از خاک رس بصورت پالوده در هسته سد استفاده گردید.

تا اواخر قرن ۱۹ روش پمپ نمودن آب در بدنه سد مرسوم بوده‌است. به این ترتیب در ساخت سد مصالح بصورت قلوه سنگ و ماسه و لای به محل، حمل شده و تحت کنترل مورد استفاده در ساخت بخشهای مختلف بدنه سد واقع می‌گردید. نمونه دیگری از سد سنگریزه‌ای، سد ***فورت پک*** (Fort Peck Dam) در آمریکاست که دارای ۷۶ متر ارتفاع بوده و مصالح مصرفی آن ۱۰۰ میلیون متر مکعب بوده است. در سال ۱۹۳۸ لغزشی باعث ناپیوستگی بدنه شد. در حالیکه سدهای دیگری در همان زمان ساخته شد که هنوز تحت بهره‌برداری می‌باشند و برخی نیز مظنون به احتمال وقوع روانگرائی در آنها در اثر وقوع زلزله می‌باشند. با وقوع شکست سد در این گونه سدها، سیل گل بدون امکان خبر قبلی از خطرات بزرگ در این وقایع برای شهرها بوده است .

در سال ۱۸۵۶ دارسی قانون خویش را برای عبور جریان آب در محیط متخلخل چه در بدنه سد و چه در لایه‌های زیر پی ارائه نمود. از این پس شبکه جریان در بدنه و پی سد و ارائه تخمین ناحیه نیمه اشباع و محاسبه فشار آب در مسیر جریان آب معمول گردید.

اولین غلطک با موتور بخاری در سال ۱۸۵۹ در انگلستان توسط شرکت توماس اویلینگ (Thomas Availing)تولید و در سال ۱۸۶۶ تکمیل شد. این ابزار باعث امکان کوبیدن مکانیکی لایه‌های خاکی را فراهم آورده و تا سال ۱۹۰۴ بصورت غلطک‌های پاچه‌بزی در آمریکا تکمیل گردید. این ماشین باعث اعمال بار متمرکز بوسیله پاهای غلطک بر خاک می‌شود.

در ۴۰ سال اخیر دانش مکانیک خاک توسعه پیدا نموده و رفتار سدهای خاکی را می‌توان با دقت مورد نیاز از قبل پیش بینی نموده و ضرایب اطمینان را در مقابل شکست و نسبت نشت آب و میزان نشست را تعیین کرد.

بعداً غلطک های ارتعاشی امکان تراکم بهتر بدنه سدهای خاکی را فراهم آورده و باعث افزایش سرعت کار و افزایش ارتفاع برخی سدها مانند سد ***نورک*** (Nurek Dam) (شکل۱-۱) با ارتفاع ۳۱۲ متر در روسیه گردید.

شکل۱-۱: سد نورک در شوروی سابق

در برخی نواحی مصالح ریزدانه غیر قابل نفوذ در مصالح طبیعی موجود درمحل یافت نشده و یا فاصله معدن آن زیاد بوده که حملش مقرون به صرفه نمی‌باشد. در چنین شرایطی یک لایه از مصالح نفوذناپذیر دیگر مانند دال بتنی یا لایه آسفالتی را می‌توان در سطح بالا دست سد اجرا نمود. استفاده از باتیمان (Bitumen) اولین بار به این منظور در سال ۱۳۰۰ قبل از میلاد بکار گرفته شد. این روش در سال ۱۸۹۳ در سد دیگادی‌کودلاگو (Diga-di-Codelago) در ایتالیا بصورت لایه آسفالت برروی صفحه رخ بالادست بکارگرفته شد. دالهای بتنی در سدهای کوچک در استان کالیفرنیای آمریکا در سال ۱۸۹۶ در سد تاسمانیا (Tasmania) در ۱۲-۱۹۱۰ استفاده شد. تا سال ۱۹۷۴ سدهای بتنی تا ارتفاع ۱۰۰ متر در سراسر جهان ساخته شد. با ساخت و توسعه ابزار آلات مکانیکی برای جابجایی خاک و بکارگیری تکنولوژی مکانیزه در کار عموماً با افزایش ارتفاع هزینه اجرای کار به همان نسبت تغییر چندانی ننمود. در زمینه اجرا از پراهمیت‌ترین موارد اقتصادی مورد تحقیق کاهش هزینه اجرایی در ساخت سدهاست.

نوع دیگری از تکنولوژی در ساخت سدها استفاده از روش مسلح کردن مصالح خاکی است. این روش ابتدا در فرانسه و سپس در سراسر جهان متداول گردید. در این موارد مصالح مصرفی عموماً مواد حاصل از عملیات حفاری بوده که با کابلهای فولادی (Tendons) در حالت کشیده و فشرده نمودن خاک نگهداشته می‌شوند. ترکیب این مصالح یک سازه خاکی با چسبندگی زیاد همانند دیوار بتنی با شکل پذیری نسبتا زیاد حاصل می‌نماید. در این حالت حتی می‌توان دیواره رخ سازه خاکی را بصورت قائم با پایداری کافی ایجاد و حفظ نمود. از محاسن ویژه این روش کاهش عرض دیوار در پایه و کوتاه نمودن طول کانالهای آبی مورد نیاز (تونل فشار، تونل خروجی انحراف و آبراهه سرریز) در جهت اقتصادی شدن طرح می‌باشد.

از محاسن دیگر همچنین اجرای رخ پایین دست سد بصورت قائم است. حتی در این حالت احتمال جریان روگذر از سد را می‌توان پذیرفت. از نمونه این سدها می‌توان سد والون دس‌بیمز(Vallon des Bimes) در فرانسه (۱۹۷۲)را نام برد. در این روش مخارج مربوط به ساخت سرریز مطابق شکل ۱-۲ (الف) صرف جوئی شده است.

شکل ۱-۲ (ب) نمونه‌ای از این سدها را با تغییرات مختصر نشان میدهد. در این حالت

دال بتنی حذف و بجای آن لاشه سنگ درشت بصورت محافظت شده در تورهای فولادی بکارگرفته شده است. از موارد تحقیقاتی می‌توان ارائه ویژگیهای لایه‌های نفوذناپذیر مناسب برای بکارگیری در بدنه این سدها را رقم زد .

1 Random fill 2 Watertight membrane 3 Steel tendons
4 Concrete slabs (1.5 m x 1.5 m)

Vallon des Bimes Dam, France—In reinforced earth (After P. Londé)

1 Reinforced earth or rock 2 Reinforcement

شکل۱-۲: (الف) سد والون دس‌نیمر در فرانسه با خاک مسلح

(ب) گزینه دیگر برای ساخت بند انحراف

در این نوع سد انتخاب مصالح مناسب و متراکم نمودن آن و تعیین تراز منحنی سطح پی و تعیین موقعیت لایه نفوذناپذیر بااهمیت است .

اولین سد قوسی بوسیله رومی‌ها در قرن اول میلادی در شمال ایتالیا و جنوب فرانسه ساخته شد. سد پونته آلتو (Ponte-Alto) به ارتفاع ۵ متر در سالهای ۱۶۱۱ تا ۱۶۱۳ ساخته شد. این سد در سال ۱۷۵۲ ارتفاعش تا ۱۷ متر بصورت قوسی با شعاع ۱۵ متر و

در ضخامت ۴ متر افزایش یافت. در سالهای ۵ – ۱۸۲۴ ارتفاع سد مجددا تا ۲۵ متر اضافه شد و اکنون با ارتفاع ۳۴ متر تحت بهره برداری می‌باشد . با توجه به این عمر طولانی شاید بتوان نتیجه گرفت که انتخاب شرایط پی سد در ابتدا مناسب بوده است.

در نیمه قرن بیستم سدهائی با ارتفاع ۲۵۰ متر و حتی ۳۰۰ متر و بیشتر ساخته شده است. در این گونه سدها سه مسأله اساسی بصورت مقاومت و ضریب اطمینان سازه سد، کفایت پی سد و بررسی و کنترل آثار متعددی در اثر بلندی سازه و وزن آب ذخیره شده مورد توجه قرار گرفته است.

نتیجه عمومی این تاریخچه آنست که اگر وضعیت پی سد مناسب باشد، سایر مسائل از درجه دوم اهمیت برخوردار می‌باشند. در این صورت آنچه در درجه اول حائز اهمیت است *مقاومت و پایداری پی سد* است. در این زمینه وضعیت انعطاف پذیری بدنه اصلی سد از حالت نسبتاً صلب تا طراحی سد انعطاف پذیری با بلوکهای بتنی شل و یا بدنه سدهای سنگ ریزه‌ای و یا سد خاکی با هسته رسی و یا بالاخره سد تیغه دار بسیار حائز اهمیت و در پایداری سد در طول زمان موثر است. هر یک از حالات ذکر شده بیانگر تغییر شکلهای مختلف در بدنه سد تا رسیدن به حالت شکست می‌باشد.

بخش بزرگی از مطالعه و طراحی سد مربوط به مطالعه وضعیت فیزیکی و مکانیکی و در دسترس بودن مصالح مصرفی است. عموماً بخش وسیعی از مخارج ساخت سد بصورت کار مزد بوده و گاهی هم ممکن است مربوط به ماشین آلات گران قیمت مورد استفاده در ساخت سد باشد. برای بهینه سازی میزان مخارج سد عواملی مانند زمان ساخت که در ارتباط با شیوه و روش کار می‌باشد بسیار مؤثر است. اصولا هر چه زمان ساخت کوتاه‌تر باشد وضعیت به شرایط بهینه نزدیک تر می‌شود. البته سرعت در عملیات بتن ریزی درقطر زیاد باعث رودررویی با مشکل تولید حرارت حین مراحل اولیه گیرش بتن و افزایش صدمات ناشی از آن می‌شود. از طرفی دیگر سرعت در خاک‌ریزی در بدنه سد باعث افزایش فشار آب منفذی در لایه‌های زیرین شده و با گذشت زمان باعث نشست بدنه خاک‌ریز می‌گردد. ضریب اطمینان یک سد به تنشها و کرنشهای حقیقی که در طول ساخت و بهره‌برداری سد حاصل می‌شود بستگی خواهد داشت. ویژگی و قدرت مدلهای ریاضی که در شرایط گوناگون برای تحلیل تنش ها و کرنشها بکار گرفته می‌شود

حساسیت قابل توجهی در کیفیت پیش بینی ها داشته و اغلب صدمات وارده بر سدها در اثر عدم پیش‌بینی و ضعف در مدلهای بکار رفته در محاسبات بوده است. البته هرگونه غفلت و سهل‌انگاری و یا برخورد ضعیف و کم توجهی به جزئیات مورد نیاز طرح در اجرا و نگهداری سد می‌تواند مخاطرات بزرگی را حاصل نماید.

از دیگر موارد پر اهمیت، اندرکنش سد با خطر سیل و پیش‌بینی تغییر وضعیت پی سد در مقابل بارهای وارده می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه غالباً سدها مطابق شرایط استاندارد روز قبلاً طراحی و ساخته نشده اند، و یا اینکه شرایط پیش‌بینی شده مربوطه درست نبوده است، بهترین کار در مورد چنین سدهایی بررسی و مرور مجدد تحلیل و طراحی سد و پیش‌بینی صحیح نتایج و شرایط می‌باشد.

۱-۲) تقسیم بندی سدهای خاکی

سدهای خاکی را می‌توان به انواع زیر تقسیم بندی نمود:

۱-۲-۱) *سدهای خاکی همگن*

این نوع سدها عموماً از یک نوع خاک ساخته می‌شوند. انتخاب این نوع خاک بیشتر تابع خاکی است که در محل به فاصله مختصر از محل ساخت سد فراوان است. طراحان عموماً ترجیحشان بر آنست که بدنه سد را به نواحی مختلفی تقسیم نموده و مصالح را در دو گروه نفوذپذیر و نفوذناپذیر و یا نیمه نفوذناپذیر در هر ناحیه استفاده کنند. معمولاً در سد همگن گاهاً لایه‌هایی از مصالح نفوذپذیر بعنوان فیلتر استفاده شده که وجود این لایه‌ها باعث تغییر نوع این سدها نمی‌شود. عموماً سدهای همگن را نمی‌توان در ارتفاع بلند ساخت .

مقطع سد همگن می‌تواند از مواد نفوذپذیر مانند شن و یا ماسه و یا خرده‌سنگ، ساخته شده و برای نفوذناپذیر نمودن آن از یک لایه عایق زهاب در سطح شیب بالادست استفاده نمود.

۱-۲-۲) *سدهای غیر همگن*

در این سدها عموماً هسته نفوذناپذیر وظیفه جلوگیری از عبور آب در بدنه سد را بعهده داشته و دو بخش بالادست و پائین دست بدنه (Shells) از مصالح نفوذپذیردانه‌ای در

جهت ایجاد پایداری بدنه سد ساخته می‌شوند.

شکل ۱-۳: اشکال مختلف سطح مقطع سد خاکی برروی پی‌های مختلف

در صورتی که مصالح مختلف نفوذپذیر در محل موجود باشد ، مصالحی که درشت دانه‌تر و نفوذپذیرتر باشد در لایه‌های خارجی مصرف می‌شود. نواحی مختلف در این سدها بالایه‌های فیلتر جدا شده تا اگر مصالح در دو بخش بالا و پایین دست از نفوذپذیری لازم برخوردار نباشد، زهاب از طریق فیلترها دفع گردد.

۱-۲-۲-۱) *سدهای سنگریزه‌ای با هسته مرکزی*

سدهایی هستند که از مصالح سنگریزه‌ای که عموماً از حفاری و انفجار زمینهای سنگی یا لاشه سنگهای طبیعی ناشی از عملیات‌حفاری مسیر تونل انحراف یا سرریز بوجود می‌آیند، ساخته می‌شوند. این سدها لزوماً دارای یک هسته مرکزی برای آب‌بند نمودن