



اصول مهندسی سدهای خاکی

دکتر علی قنبری

عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران

دانشگاه خوارزمی

تهران ۱۳۹۳

سرشناسیه	:	قبري، علي، ۱۳۲۸
عنوان و نام پديدآور	:	اصول مهندسي سدهاي خاكي / علي قبري
مشخصات نشر	:	تهران: دانشگاه خوارزمي، ۱۳۹۳
مشخصات ظاهري	:	۳۴۶ ص؛ مصور، جدول، نمودار
شابک	:	۹۷۸ ۹۶۲ ۶۷۰۶ ۹۰ ۳ ۱۲۰۰۰۰
وضعيت فهرست‌نویسی	:	فبا
یادداشت	:	ویرانده
یادداشت	:	کتابنامه
موضوع	:	سدهاي خاكي
موضوع	:	سدهاي خاكي / طرح و سازهات
موضوع	:	سدهاي خاكي
نسخه فزوده	:	دانشگاه خوارزمي
زده‌بندی کنگره	:	۱۳۳۳/۵۱۳۳۳۶-۶۳۹۳
زده‌بندی دیرویی	:	۸۳۶۱۷
شماره کتاب‌شناسی ملی	:	۳۶۴۹۸۹۸



عنوان کتاب	:	اصول مهندسي سدهاي خاكي
نویسنده	:	دکتر علي قبري
ویراستار	:	دکتر علي قبري
طراح جلد	:	شیرازه علامتي
صفحه‌آرا	:	صادق غریب‌زاده
ناشر	:	دانشگاه خوارزمي
چاپ و صحافی	:	دانشگاه خوارزمي
نوبت چاپ	:	اول، ۱۳۹۳
شابک	:	۹۷۸ ۹۶۲ ۶۷۰۶ ۹۰ ۳ ۱۲۰۰۰۰
شمار	:	۱۲۰۰۰۰
قیمت	:	۱۲۰۰۰۰ ریال
نشانی	:	تهران، خیابان مفتح، شماره ۲۳، کد پستی: ۱۵۷۹۰-۱۴۹۱۱
مرکز پخش	:	۸۸۳۱۱۸۶۶

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.

پیش گفتار

طراحی سد قبل از آن که یک دانش مستقل باشد، مسئله‌ای از مسائل مهندسی عمران است که تخصص‌های گوناگونی در آن مشارکت دارند. بر همین اساس نگارش یک کتاب جامع برای سدسازی کاری بسیار دشوار است. هم‌اکنون چندین کتاب بین‌المللی با حجم بیش از ۱۰۰۰ صفحه در دسترس علاقه‌مندان قرار دارد، با این حال نمی‌توان ادعا کرد که با وجود هر یک از آن‌ها می‌توان از کتاب‌های دیگر بی‌نیاز شد. از سوی دیگر در دوره کارشناسی مهندسی عمران در قالب درس‌های «اصول مهندسی سد» و «سدهای کونه» لازم است مقدمات دانش سدسازی به دانشجویان آموزش داده شود.

نگارنده با توجه به تجربه کاری خود به عنوان مهندس طراح سد و مدرس درس‌های سدسازی در مقاطع کارشناسی و تحصیلات تکمیلی به این نتیجه رسیده است که هر چند تسلط بر کتاب‌های مرجع بین‌المللی برای مهندسان طراح به عنوان اصلی‌ترین ابزار ضرورت دارد، ارجاع دانشجویان کارشناسی به این کتاب‌ها نتیجه چندان موفقیت‌آمیزی نخواهد داشت. اغلب دانشجویان به نگارش جزوه‌های کلاسی بسنده می‌کنند و فرصت کافی برای مطالعه کتاب‌های قطور را ندارند.

با توجه به دو مقدمه بالا، نگارنده تصمیم گرفت کتابی کم‌حجم و مقدماتی برای آشنایی علاقه‌مندان به طراحی سد تدوین کند. در عین حال نویسنده اذعان دارد که این اثر، مرجعی برای طراحان

سد محسوب نمی‌شود. هرچند در این کتاب همه انواع سد معرفی شده‌اند و مطالعات پایه برای همه آن‌ها به اجمال بیان شده است. تمرکز اصلی کتاب بر طراحی سدهای خاکی است. بدیهی است برای طراحی سدهای بتنی و سدهای بزرگ دیگر در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری درس‌های مرتبط ارائه و مراجع مناسب معرفی می‌گردد.

در اینجا لازم است از دوستان عزیزم آقایان دکتر جلال بازرگان (دانشگاه زنجان)، دکتر علی نورزاد (دانشگاه شهید بهشتی)، دکتر محسن صابرمآهانی (دانشگاه علم و صنعت ایران)، دکتر امیرحسین صادق‌پور (دانشگاه کاشان)، دکتر میثم فدایی (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله)، دکتر رضا مهین‌روستا (دانشگاه تربیت مدرس) و دکتر مجتبی مهرآیین (دانشگاه خوارزمی) که نگارنده را در تدوین این اثر یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از دانشجویان عزیز دانشگاه خوارزمی که با مطالعه متن اولیه کتاب اشکالات آن را برطرف نمودند کمال تشکر را دارم. نهایتاً مراتب تشکر خود را از دکتر عطاء شاکری (دفتر ارتباط با صنعت دانشگاه خوارزمی) و دکتر محمد شادروی‌منش (مرکز نشر دانشگاه خوارزمی) اعلام می‌دارم و از خداوند متعال برای همه این عزیزان، سلامتی و توفیق عبادت مسئلت دارم.

از خوانندگان محترم استدعا دارم اشکالات و خطاهای احتمالی در ویرایش، محاسبات و بیان مطالب علمی را به این جانب گوشزد نمایند.

علی قنبری - بهار ۱۳۹۳

فهرست مطالب

فصل اول

کلیاتی درباره انواع سدها

۱۵	۱-۱- مقدمه
۱۶	۲-۱- انواع سدها
۱۷	۱-۲-۱- سدهای خاکی
۱۸	۲-۲-۱- سدهای بتنی
۲۱	۳-۲-۱- سدهای لاستیکی
۲۲	۴-۲-۱- سدهای مخزنی
۲۲	۵-۲-۱- سدهای تنظیمی
۲۳	۶-۲-۱- سدهای انحرافی
۲۴	۷-۲-۱- سدهای باطله یا رسوب گیر
۲۵	۸-۲-۱- سدهای تفریحی
۲۵	۹-۲-۱- سدهای تبخیری
۲۶	۱۰-۲-۱- سدهای زیرزمینی
۲۷	۳-۱- تاریخچه سدسازی در ایران و جهان
۳۷	۴-۱- اهداف موردنظر در ساخت سد
۳۷	۱-۴-۱- تأمین آب شرب و کشاورزی

۳۹ ۱-۴-۲- تولید برق و جایگاه نیروگاه‌های برق‌آبی

فصل دوم

پلان کلی یک پروژه سدسازی

- ۴۵ ۱-۲- مقدمه
- ۴۶ ۲-۲- سیستم انحراف آب
- ۴۶ ۱-۲-۲- فرازبند و نشیببند
- ۴۸ ۲-۲-۲- تونل‌های انحراف آب
- ۴۹ ۲-۲-۳- خشکه اندازی گودال پی
- ۵۰ ۳-۲- سیستم آب‌بندی پی
- ۵۱ ۴-۲- سازه‌های هیدرولیکی
- ۵۱ ۱-۴-۲- سیستم آبیگری
- ۵۳ ۲-۴-۲- سیستم سرریز
- ۵۷ ۳-۴-۲- حوضچه‌های آرامش
- ۵۷ ۵-۲- سایر اجزای طرح سدسازی
- ۵۹ ۶-۲- مراحل طراحی در یک پروژه سدسازی
- ۶۰ ۷-۲- انتخاب ساختگاه برای سد
- ۶۱ ۸-۲- عوامل مؤثر در انتخاب نوع سد

فصل سوم

مطالعات پایه در طرح‌های سدسازی

- ۶۵ ۱-۳- مقدمه
- ۶۶ ۲-۳- عوامل انسانی در یک پروژه سدسازی
- ۶۷ ۳-۳- ترکیب گروه مشاور طراح سد
- ۶۸ ۴-۳- مطالعات زمین‌شناسی
- ۶۸ ۵-۳- مطالعات لرزه‌خیزی
- ۶۹ ۶-۳- مطالعات نقشه‌برداری
- ۷۰ ۷-۳- مطالعات منابع آب

۷۳	۸-۳- مطالعات منابع قرضه
۷۳	۹-۳- مطالعات اجتماعی
۷۵	۱۰-۳- مطالعات ارزیابی زیست محیطی
۷۶	۱۱-۳- مطالعات ارزیابی اقتصادی طرح

فصل چهارم

طراحی هندسی مقطع سدهای خاکی و بتنی

۷۸	۱-۴- مقدمه
۷۹	۲-۴- محاسبه رقوم چهارگانه سد
۸۰	۳-۴- محاسبه ارتفاع آزاد مخزن
۸۳	۱-۳-۴- محاسبه طول آزاد دریاچه (Fe)
۸۴	۲-۳-۴- محاسبه ارتفاع موج (Hw)
۸۵	۳-۳-۴- محاسبه ارتفاع بالا زدگی آب (Rs)
۸۵	۴-۳-۴- محاسبه ارتفاع برآمدگی سطح آب (S)
۸۶	۵-۳-۴- محاسبه ارتفاع لازم برای جبران نشستها
۸۷	۴-۴- طراحی اولیه هندسه سدهای خاکی
۹۰	۵-۴- طراحی اولیه هندسه سدهای سنگریز با رویه بتنی
۹۴	۶-۴- طراحی اولیه هندسه سدهای بتنی - وزنی
۹۶	۷-۴- طراحی اولیه هندسه سدهای هسته آسفالتی

فصل پنجم

مضاح برای ساخت سد

۱۰۱	۱-۵- مقدمه
۱۰۲	۲-۵- روش های شناسایی منابع قرضه
۱۰۴	۳-۵- مضاح برای ساخت سدهای بتنی
۱۰۴	۱-۳-۵- شن و ماسه برای ساخت بتن
۱۰۵	۲-۳-۵- پوزولان برای سدهای بتن غلطکی
۱۰۷	۴-۵- مضاح برای ساخت هسته سدهای خاکی

- ۱۰۸ ۵-۵- مصالح برای پوسته سدهای خاکی
- ۱۰۹ ۵-۶- مصالح سنگریز
- ۱۱۰ ۵-۷- مصالح لایه سنگچین
- ۱۱۱ ۵-۸- مصالح بیلتر
- ۱۱۱ ۵-۹- مصالح برای هسته های آسفالتی
- ۱۱۱ ۵-۱۰- مصالح ژئوسنتتیک برای سدها
- ۱۱۲ ۵-۱۱- مصالح شن و ماسه سیمانی شده
- ۱۱۴ ۵-۱۲- مصالح دیگر برای ساخت سدها

فصل ششم

خاک های مشکل آفرین

- ۱۱۷ ۶-۱- مقدمه
- ۱۱۸ ۶-۲- انواع خاک های مشکل آفرین
- ۱۱۹ ۶-۲-۱- خاک های تورم پذیر
- ۱۲۰ ۶-۲-۲- خاک های فروریزی
- ۱۲۱ ۶-۲-۳- خاک های شور و انحلال پذیر
- ۱۲۳ ۶-۲-۴- خاک های آلی
- ۱۲۳ ۶-۲-۵- خاک های آلوده و زمینهای دفن زباله
- ۱۲۴ ۶-۲-۶- خاک های دستی
- ۱۲۴ ۶-۳- خاک های واگرا
- ۱۲۶ ۶-۴- روش های آزمایشگاهی شناسایی خاک های واگرا
- ۱۲۷ ۶-۴-۱- آزمایش سوراخ سوزن (پین هول)
- ۱۲۸ ۶-۴-۲- آزمایش تجزیه شیمیایی
- ۱۳۲ ۶-۴-۳- آزمایش هیدرومتری دوگانه برای شناسایی واگرایی
- ۱۳۳ ۶-۴-۴- آزمایش کرامب برای شناسایی واگرایی
- ۱۳۴ ۶-۵- روش های صحرائی شناسایی خاک های واگرا

فصل هفتم

روش‌های آب‌بندی و کنترل تراوش در سدها

- ۱-۷- مقدمه ۱۳۸
- ۲-۷- روش‌های مختلف تحلیل تراوش در سدها ۱۴۱
- ۳-۷- روش‌های آب‌بندی پی سد ۱۴۳
- ۴-۷- محاسبه نشست از پی یک سد بدون آب‌بند ۱۴۷
- ۵-۷- محاسبه نشست از پی با وجود بلانکت رسی ۱۴۸
- ۶-۷- محاسبه نشست از پی با وجود ترانشه رسی ۱۴۹
- ۷-۷- محاسبه نشست از پی با وجود دیوار آب‌بند ۱۵۱
- ۸-۷- محاسبه نشست در سیستم‌های ترکیبی ۱۵۳
- ۹-۷- حل دو مسئله نمونه از محاسبه نشست برای پی سد ۱۵۴
- ۱۰-۷- محاسبه نشست از بدنه سد ۱۵۸
- ۱۱-۷- تحلیل تراوش با نرم‌افزار ۱۶۱
- ۱۲-۷- حل یک نمونه با استفاده از نرم‌افزار Seep/w ۱۶۳
- ۱۳-۷- مثال نمونه از محاسبه نشست برای بدنه سد همگن ۱۶۵
- ۱۴-۷- مثال نمونه از محاسبه نشست برای بدنه سد خاکی هسته‌دار ۱۶۷
- ۱۵-۷- تحلیل تراوش با ترسیم شبکه جریان ۱۶۸
- ۱۶-۷- نشست و گرادیان هیدرولیکی مجاز ۱۷۲
- ۱۷-۷- پدیده‌های مخرب ناشی از گرادیان هیدرولیکی بالا ۱۷۲

فصل هشتم

طراحی فیلتر، زهکش و سنگچین برای سدهای خاکی

- ۱-۸- مقدمه ۱۷۷
- ۲-۸- طراحی ضخامت فیلتر ۱۷۸
- ۳-۸- طراحی دانه‌بندی فیلتر ۱۸۱
- ۱-۳-۸- طراحی دانه‌بندی فیلتر بر مبنای روش ترزاقی ۱۸۱
- ۲-۳-۸- طراحی دانه‌بندی فیلتر بر مبنای روش USBR ۱۸۲

- ۱۸۵ ۳-۳-۸- طراحی دانه‌بندی فیلتر بر مبنای آزمایش NEF
- ۱۸۶ ۴-۳-۸- نکاتی پیرامون طراحی فیلتر
- ۱۸۷ ۴-۸- طراحی زهکشها
- ۱۸۸ ۱-۴-۸- طراحی ابعاد زهکشها
- ۱۹۰ ۲-۴-۸- طراحی دانه‌بندی زهکشها
- ۱۹۱ ۵-۸- طراحی پوشش شیروانیهای سد
- ۱۹۲ ۱-۵-۸- طراحی لایه سنگچین بر اساس رکوردهای اجرایی
- ۱۹۳ ۲-۵-۸- طراحی لایه سنگچین بر اساس روابط تجربی
- ۱۹۴ ۳-۵-۸- طراحی فیلتر زیر لایه سنگچین
- ۱۹۵ ۴-۵-۸- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح مناسب برای سنگچین
- ۱۹۶ ۵-۵-۸- طراحی پوشش شیروانی پایبندست
- ۱۹۶ ۶-۸- مثال از طراحی فیلتر و زهکشها در یک سد خاکی

فصل نهم

تحلیل پایداری سدهای بتنی وزنی

- ۲۰۶ ۱-۹- مقدمه
- ۲۰۸ ۲-۹- بارهای وارد بر سدهای وزنی
- ۲۱۷ ۳-۹- ترکیب بارگذاری
- ۲۱۸ ۴-۹- معیارهای ارزیابی پایداری سدهای وزنی
- ۲۱۹ ۵-۹- روش‌های تحلیل سدهای وزنی
- ۲۲۲ ۶-۹- مسائل حل شده

فصل دهم

تحلیل پایداری شیروانیها در سدهای خاکی

- ۲۳۰ ۱-۱۰- مقدمه
- ۲۳۱ ۲-۱۰- روش‌های مختلف تحلیل پایداری
- ۲۳۳ ۳-۱۰- تعریف ضریب اطمینان
- ۲۳۵ ۴-۱۰- انواع روش‌های تعادل حدی

- ۲۳۵ ۱۰-۴-۱- شیب‌های نامحدود:
- ۲۳۷ ۱۰-۴-۲- روش دایره سوئدی
- ۲۳۸ ۱۰-۴-۳- روش سطح لغزش صفحه‌ای
- ۲۳۸ ۱۰-۴-۴- روش چندگوه‌ای:
- ۲۳۹ ۱۰-۴-۵- روش‌های مبتنی بر قطعات قائم
- ۲۴۳ ۱۰-۵- انتخاب روش مناسب تحلیل
- ۲۴۵ ۱۰-۶- حالت‌های مختلف تحلیل پایداری
- ۲۴۶ ۱۰-۷- انتخاب نوع تحلیل
- ۲۴۹ ۱۰-۸- حالت‌های مختلف تحلیل پایداری برای یک سد خاکی
- ۲۴۹ ۱۰-۸-۱- پایان ساخت
- ۲۵۱ ۱۰-۸-۲- تراوش پایدار - مخزن پر
- ۲۵۲ ۱۰-۸-۳- تراوش پایدار - مخزن نیمه‌پر
- ۲۵۴ ۱۰-۹- پارامترهای مصالح بدنه و پی
- ۲۵۴ ۱۰-۹-۱- روش‌های تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح پی
- ۲۵۶ ۱۰-۹-۲- روش‌های تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح بدنه
- ۲۵۸ ۱۰-۱۰- استفاده از نرم‌افزار برای تحلیل پایداری شیبها
- ۲۵۸ ۱۰-۱۰-۱- تحلیل شبه‌استاتیک سد نمونه شماره یک
- ۲۶۵ ۱۰-۱۰-۲- تحلیل شبه‌استاتیک سد نمونه شماره ۲
- ۲۶۹ ۱۰-۱۱- نمودارهایی برای تخمین سریع و تقریبی ضریب اطمینان شیبهای ساده
- ۲۷۱ ۱۰-۱۲- مسائل حل شده:

فصل یازدهم

تحلیل تنش-کرنش سدهای خاکی

- ۲۷۸ ۱۱-۱- مقدمه
- ۲۷۹ ۱۱-۲- تحلیل تنشهای اولیه در ساختگاه
- ۲۸۰ ۱۱-۳- تحلیل لایه به لایه
- ۲۸۱ ۱۱-۴- تحلیل آبگیری اولیه

۲۸۲	۵-۱۱- تحلیل تنش - کرنش سدهای خاکی با استفاده از نرم افزار
۲۸۳	۶-۱۱- قوس زدگی
۲۸۶	۷-۱۱- ترک خوردگی در سدهای خاکی
۲۸۸	۸-۱۱- نشستهای اختلافی در بدنه سد
۲۸۹	۹-۱۱- شکست هیدرولیکی
۲۹۲	۱۰-۱۱- توصیه هایی برای جلوگیری از وقوع شکست هیدرولیکی
۲۹۴	۱۱-۱۱- شکست ذرات در مصالح سنگریز
	فصل دوازدهم
	تحلیل لرزه ای سدهای خاکی
۲۹۷	۱-۱۲- مقدمه
۲۹۹	۲-۱۲- تحلیل شبه استاتیک
۳۰۰	۱-۲-۱۲- محدودیتها و مرایای روش شبه استاتیک
۳۰۱	۲-۲-۱۲- ضریب شتاب شبه استاتیک (ضریب زلزله)
۳۰۳	۳-۲-۱۲- ضریب شتاب شبه استاتیک قائم
۳۰۴	۳-۱۲- تحلیل دینامیکی
۳۰۷	۴-۱۲- تحلیل تغییر مکان های ماندگار
۳۰۸	۱-۴-۱۲- روش بلوک لغزشی نیومارک
۳۱۲	۲-۴-۱۲- روش سید و مکدیسی
۳۱۵	۵-۱۲- محدوده کاربرد روش های مختلف تحلیل لرزه ای بر اساس نشریه ۶۲۴
۳۱۷	۱-۵-۱۲- درجه بندی اهمیت سد بر اساس پتانسیل خطر
۳۱۸	۲-۵-۱۲- تحلیلهای مورد نیاز در طرح لرزه ای سدها
۳۲۰	۶-۱۲- روانگرایی در سدهای خاکی
۳۳۱	مراجع
۳۳۷	واژه نامه