

۲۵۳۸۸۴۸

روش‌های بهسازی خاک

طراحی و اجرا

تألیف:

دکتر حمید علی الهی

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

مهندس شایان محجوبی

(کارشناس ارشد ژئوتکنیک)

انتشارات جهاد دانشگاهی

واحد صنعتی امیرکبیر

سرشناسه	: علی الهی، حمید، ۱۳۵۸-
عنوان و نام پدیدآور	: روش‌های بهسازی خاک: طراحی و اجرا/ تألیف حمید علی الهی، شایان محجوبی.
مشخصات نشر	: تهران: جهاددانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، انتشارات، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	: ۵۱۲ ص: مصور، جدول.
شابک	: ۵۸۰۰۰۰ ریال: I-304-210-964-978: ISBN;
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۵۰۱-۵۱۲.
موضوع	: خاک - بهسازی- Soil remediation
موضوع	: زمین‌شناسی ساختاری-Geology, Structural
شناسه افزوده	: محجوبی، شایان، ۱۳۷۱-
شناسه افزوده	: جهاددانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر. انتشارات
رده‌بندی کنگره	: TD۸۷۸
رده‌بندی دیوید	: ۶۲۸/۵۵
شماره کتابخانه	: ۵۷۱۶۶۲۷

این کتاب در حاشه ۹۷/۰۹/۱۹ شورای نشر کتاب
جهاددانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر پس از طی مراحل
ارزیابی علمی، مجوز چاپ و انتشار دریافت نموده است.



روش‌های بهسازی خاک-طراحی و اجرا

تألیف: دکتر حمید علی الهی، مهندس شایان محجوبی

ناشر	: جهاددانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر
مدیر مسؤول	: دکتر مهدی ورسه‌ای
نوبت چاپ	: اول
سال چاپ	: ۱۳۹۸
قطع	: وزیری
شمارگان	: ۱۰۰۰ نسخه
قیمت	: ۵۸۰۰۰۰ ریال
طراح	: آرزو انصاری
چاپخانه	: نیک پرداز



ISBN: 978-964-210-304-1

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۲۱۰-۳۰۴-۱

نمایشگاه و فروشگاه دائمی: تهران، خیابان حافظ، روبروی خیابان سمیه، جنب دانشگاه صنعتی امیرکبیر،
انتشارات جهاددانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر تلفن: ۹۸۱ ۹۵۰ ۶۶ ۹۸۲+ تلفکس: ۹۸۲ ۹۵۰ ۶۶ ۹۸۲+
www.jdamirkabir.ac.ir
فروشگاه اینترنتی:

پیشگفتار

امروزه ضمن توسعه صنعت راه و ساختمان و رشد پروژه‌های عمرانی (از جمله ساختمان سازی، سد سازی، تونل سازی، راه سازی و غیره) نیاز به یافتن بستر خاکی مناسب و یا ارتقای کیفیت بسترهای خاکی مساله‌دار به‌منظور ساخت و ساز، افزایش یافته است. بستر خاکی به منزله ریشه، پایه و اساس ساختمان می‌باشد و وجود نقص آن در این بستر، پروژه‌های عمرانی را با خطر جدی مواجه می‌نماید. در اغلب کشورها به خصوص در کشور ایران، وجود خاک‌های مساله‌دار به چالشی بزرگ برای مهندسين عمران تبدیل شده است. از این رو، بهسازی خاک، امری اجتناب‌ناپذیر برای پروژه‌های عمرانی می‌باشد. با پیشرفت و رشد پروژه‌های عمرانی، در سال‌های اخیر روش‌ها و تکنولوژی‌های بهبود و بهسازی خاک‌ها رشد چشم‌گیری داشته است و این موضوع متوقف نشده و روز شاهد ارائه روش‌های جدید می‌باشیم. از طرفی با توجه به فقدان کتاب جامع در زمینه بهسازی خاک از صراحی تا اجرا از نظر آموزشی و کاربردی و با توجه به تجربه چندین ساله تدریس و تحقیق در این زمینه، ریسنگان را بر آن داشت تا کتابی در مورد بهسازی خاک تألیف و تدوین نمایند. چهارچوب اصلی این کتاب براساس کتاب جدید مبانی و اجرای بهسازی زمین تهیه شده توسط Jie Han در سال ۲۰۱۵ می‌باشد، ولی در جهت تکمیل مباحث مطرح شده از تمامی مراجع معتبر و به روز مربوطه استفاده شده است. شاید یکی از ویژگی‌های اصلی کتاب حاضر، مثال‌ها و تمرین‌های متنوع مباحث بهسازی خاک می‌باشد که به صورت جمع‌بندی شده به ندرت در مراجع فارسی یافت می‌شود. این کتاب می‌تواند به‌عنوان یک مرجع برای دانشجویان مهندسی عمران به خصوص گرایش ژئوتکنیک و همچنین برای مهندسان مشاور و پیمانکاران مفید باشد.

کتاب حاضر در ۹ فصل تنظیم شده است. هدف اصلی فصول اول و دوم کتاب، آشنایی کلی با دانش بهسازی خاک و همچنین خاک‌های مساله‌دار می‌باشد. در هفت فصل بعدی روش‌های مختلف بهسازی شامل: ۱- تراکم دینامیکی ۲- روش جایگزینی عمیق ۳- پیش بارگذاری خاک ۴- تسلیح برجای خاک ۵- تزریق ۶- اختلاط عمیق و ۷- خاک مسلح، با هدف بهبود خاک‌های مساله‌دار از طراحی تا اجرا به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. البته روش‌های بهسازی محدود به روش‌های مذکور نبوده و بسیار گسترده‌تر از مباحث این کتاب می‌باشند. لذا، روش‌های بهسازی ارائه شده در کتاب حاضر جزو متداول‌ترین و اصلی‌ترین روش‌ها به خصوص در کشور ایران است.

در اینجا نویسندگان بر خود واجب می‌دانند که از کمک‌های بی‌دریغ آقای مهندس دشت‌آرا و خانم مهندس رحمانی و همچنین خانواده‌های عزیزمان که ما را در تهیه این کتاب یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایند.

بی‌شک این مجموعه نیز همانند بسیاری از متون علمی دیگر با توجه به حجم و تنوع گسترده مطالب ارائه شده در آن، بی‌نقص نبوده که یادآوری آن توسط خوانندگان نکته سنج می‌تواند موجب اصلاح و بهبود کیفیت کتاب در ویرایش‌های بعدی باشد.

امید است مطالب ارائه شده در این کتاب بتواند مورد توجه و استفاده دانشجویان، مهندسان و کارشناسان رهنمای مختلف عمرانی قرار گیرد.

حمید علی‌الهی-شایان محجوبی

دی ۱۳۹۷

فهرست

فصل ۱: جایگاه بهسازی خاک در مهندسی عمران	۱۷
۱-۱ مقدمه	۱۷
۲-۱ انواع خاک‌های مساله‌دار	۱۸
۳-۱ مشکلات ژئوتکنیکی	۲۰
۴-۱ تاریخچه استفاده از روش‌های بهسازی خاک	۲۱
۵-۱ انواع روش‌های بهسازی خاک و اسحا روش بهسازی	۲۲
۶-۱ ملاحظات طراحی	۳۲
۷-۱ کنترل و تضمین کیفیت	۳۳
۸-۱ معرفی محدوده بهسازی خاک	۳۴
۹-۱ نگاه اجمالی به فصول کتاب	۳۷
تمرین‌های فصل اول	۳۹
فصل ۲: خاک‌های مساله‌دار	۴۱
۱-۲ مقدمه	۴۱
۲-۲ خاک‌های رمبیده	۴۱
۱-۲-۲ پارامترهای فیزیکی برای شناسایی خاک‌های رمبیده	۴۴

۴۶	۲-۲-۲ مراحل محاسبه نشست حاصل از رمبندگی
۴۷	۳-۲-۲ روش‌های بهسازی خاک‌های رمبنده
۵۳	۳-۲-۳ خاک‌های متورم شونده
۵۵	۱-۳-۲ آزمایش تورم آزاد
۵۶	۲-۳-۲ آزمایش فشار تورم
۶۰	۳-۳-۲ طبقه‌بندی خاک‌های متورم شونده
۶۱	۱-۳-۲ ملاحظات لازم در احداث شالوده بر روی خاک‌های تورمی
۶۸	۴-۲ خاک‌های ان-لال‌پذیر
۶۹	۵-۲ خاک‌های روان‌ترا
۷۲	۱-۵-۲ روش‌های بهسازی خاک‌های روان‌ترا
۷۴	۶-۲ خاک‌های واگرا
۷۶	۱-۶-۲ روش‌های تشخیص خاک‌های واگرا
۸۱	۲-۶-۲ روش بهسازی خاک‌های واگرا
۸۴	تمرین‌های فصل دوم
۸۵	فصل ۳: تراکم دینامیکی خاک
۸۵	۱-۳ مقدمه
۸۸	۲-۳ اصول روش تراکم دینامیکی
۹۱	۳-۳ ملاحظات طراحی
۱۰۳	۴-۳ مراحل و پارامترهای طراحی روش تراکم دینامیکی
۱۰۶	۵-۳ عملیات اجرایی تراکم دینامیکی عمیق
۱۰۸	۶-۳ کنترل کیفیت و تضمین
۱۱۰	۷-۳ روش تراکم ضربه‌ای سریع (RIC)
۱۱۱	۱-۷-۳ مزایا و محدودیت‌های روش تراکم ضربه‌ای سریع

۱۱۱	۲-۷-۳ ملاحظات طراحی تراکم ضربه‌ای سریع
۱۱۴	۸-۳ پارامترهای طراحی روش تراکم ضربه‌ای سریع
۱۱۶	۹-۳ مراحل اجرایی عملیات تراکم ضربه‌ای سریع
۱۱۷	۱۰-۳ کنترل کیفیت و تضمین
۱۱۸	تمرین‌های فصل سوم
۱۱۹	فصل ۴: تراکم ارتعاشی خاک
۱۱۹	۱-۴ مقادیر
۱۲۳	۲-۴ اصول عملکرد روش تراکم ارتعاشی
۱۲۴	۳-۴ تفاوت‌های اصلی تراکم سطحی و عمیق
۱۲۵	۴-۴ تغییرات حجمی و تراکم خاک
۱۲۶	۵-۴ تغییرات حجمی با اجرای تراکم بر روی خاک
۱۲۸	۶-۴ معیارهای طراحی
۱۲۹	۷-۴ نمودار تراکم نسبی-ضریب تاثیر
۱۳۰	۸-۴ پارامترهای طراحی
۱۳۴	۹-۴ جایگزینی عمیق خاک
۱۳۹	۱۰-۴ کاربردها
۱۳۹	۱۱-۴ مزایا و محدودیت‌ها
۱۴۱	۱۲-۴ اصول طراحی
۱۴۱	۱-۱۲-۴ عملکرد ستون‌های دانه‌ای و بتنی
۱۴۲	۲-۱۲-۴ تراکم
۱۴۲	۳-۱۲-۴ مکانیزم‌های انتقال بار
۱۵۰	۴-۱۲-۴ شکل‌های گسیختگی

۱۵۱.....	۱۳-۴ ملاحظات طراحی
۱۵۴.....	۱-۱۳-۴ تاثیر تراکم
۱۵۵.....	۲-۱۳-۴ ظرفیت باربری
۱۶۰.....	۴-۱۳-۳ نشست ستون‌ها
۱۶۷.....	۴-۱۳-۴ تحکیم ستون‌ها
۱۷۳.....	۵-۱۳-۴ کنترل پایداری
۱۷۵.....	۶-۱۳-۴ رانگرایی
۱۷۷.....	۷-۱۳-۴ ستون‌های سنگی با ژئوسنتتیک دورگیر (محصور شده)
۱۸۳.....	۱۴-۴ مراحل و پارامترهای طراحی
۱۸۳.....	۱-۱۴-۴ ستون‌های سنگی
۱۸۶.....	۲-۱۴-۴ ستون‌های بتنی
۱۸۷.....	۴-۱۴-۳ ستون‌های سنگی با ژئوسنتتیک دورگیر (محصور کننده)
۱۹۷.....	۱۵-۴ ساخت و اجرا
۱۹۷.....	۱-۱۵-۴ ستون‌های تراکمی ماسه‌ای
۱۹۸.....	۲-۱۵-۴ ستون‌های سنگی
۲۰۱.....	۳-۱۵-۴ ستون‌های سنگی کوبیده شده
۲۰۲.....	۴-۱۵-۴ ستون‌های بتنی ارتعاشی
۲۰۲.....	۵-۱۵-۴ ستون‌های با سختی (مدول) کنترل شده
۲۰۳.....	۶-۱۵-۴ ستون‌های سنگی با ژئوسنتتیک دورگیر (محصور کننده)
۲۰۴.....	۱۶-۴ کنترل کیفیت و تضمین
۲۰۷.....	۱-۱۶-۴ پارامترهای اجرا
۲۰۹.....	۲-۱۶-۴ ارزیابی عملکرد
۲۱۲.....	تمرین‌های فصل چهار

۲۱۵	فصل ۵: پیش بارگذاری خاک
۲۱۵	۱-۵ مقدمه
۲۱۸	۲-۵ مزایا و معایب استفاده از روش پیش بارگذاری
۲۱۹	۳-۵ کلیات روش پیش بارگذاری
۲۱۹	۱-۳-۵ معرفی پیش تحکیمی خاک
۲۲۰	۲-۳-۵ تنش و جابه‌جایی زمین
۲۲۲	۳-۳-۵ نظریه تحکیم شعاعی
۲۲۸	۴-۱-۵ پیش بارگذاری ترکیبی با خلاء (مکش) و خاکریزی
۲۲۸	۵-۳-۵ پیش بارگذاری سربار
۲۳۰	۴-۵ ملاحظات طراحی روش پیش بارگذاری
۲۳۰	۱-۴-۵ زهکش‌های قائم
۲۳۵	۲-۴-۵ طراحی پیش بارگذاری
۲۴۱	۳-۴-۵ اثر سربار در عملیات پیش بارگذاری
۲۴۷	۵-۵ پارامترها و مراحل طراحی روش پیش بارگذاری
۲۴۷	۱-۵-۵ پارامترهای طراحی
۲۴۸	۲-۵-۵ مراحل طراحی روش پیش بارگذاری
۲۶۰	۶-۵ نکات اجرایی روش پیش بارگذاری
۲۶۰	۱-۶-۵ زهکش‌های قائم
۲۶۲	۲-۶-۵ لایه‌ی زهکشی
۲۶۳	۳-۶-۵ پیش بارگذاری با خاکریز
۲۶۴	۴-۶-۵ پیش بارگذاری با خلاء
۲۶۶	۵-۶-۵ پایش به کمک ابزار دقیق
۲۷۰	۷-۵ کنترل کیفیت و تضمین

۲۷۲.....	تمرین‌های فصل پنجم.....
۲۷۵.....	فصل ۶: تسلیح برجای خاک.....
۲۷۵.....	۱-۶ مقدمه.....
۲۷۷.....	۲-۶ مهارها.....
۲۸۱.....	۱-۲-۶ اصول روش طراحی.....
۲۸۵.....	۱-۲-۶ فرضیات طراحی دیوارهای مهار.....
۲۹۸.....	۳-۲-۶ پارامترها و مراحل طراحی دیوارهای مهار.....
۳۰۲.....	۴-۲-۶ مراحل اجرا و نصب مهارها.....
۳۰۴.....	۵-۲-۶ کنترل کیفیت و تضمین.....
۳۰۶.....	۳-۶ میخ‌کوبی خاک.....
۳۱۰.....	۱-۳-۶ اصول طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده.....
۳۱۴.....	۲-۳-۶ فرضیات طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده.....
۳۲۸.....	۳-۳-۶ پارامترها و فرایند طراحی.....
۳۳۱.....	۴-۳-۶ مراحل ساخت و اجرای دیوارهای میخ‌کوبی شده.....
۳۳۴.....	۵-۳-۶ کنترل کیفیت و تضمین.....
۳۳۵.....	تمرین‌های فصل ششم.....
۳۳۹.....	فصل ۷: روش‌های تزریق در خاک.....
۳۳۹.....	۱-۷ مقدمه.....
۳۴۱.....	۲-۷ تزریق نفوذی.....
۳۴۲.....	۳-۷ تزریق شیمیایی.....
۳۴۴.....	۴-۷ تزریق تراکمی.....
۳۴۵.....	۵-۷ تزریق شکافتنی.....

۳۴۶	۶-۷ تزریق جبرانی
۳۴۷	۷-۷ تزریق با فشار بالا
۳۴۹	۸-۷ کاربردها روش های مختلف تزریق
۳۵۰	۹-۷ مزایا و محدودیت های روش های مختلف تزریق
۳۵۰	۱۰-۷ مفاهیم روش تزریق
۳۵۰	۱-۱۰-۷ رفتار رئولوژیکی
۳۵۳	۱-۱۰-۷ مصالح تزریق
۳۵۴	۱-۱۰-۷ شوری تزریق
۳۵۸	۱۱-۷ مفاهیم روش های تراکمی
۳۵۹	۱۲-۷ شکست چیدمانی در خاک
۳۶۱	۱۳-۷ مکانیزم های جریان دوغاب با فشار بالا
۳۶۳	۱-۱۳-۷ تشکیل ستون های تزریق با فشار بالا
۳۶۴	۱۴-۷ فرضیات طراحی
۳۶۴	۱-۱۴-۷ تزریق نفوذی
۳۷۱	۲-۱۴-۷ تزریق تراکمی
۳۷۳	۳-۱۴-۷ تزریق شکافتنی
۳۷۴	۴-۱۴-۷ تزریق جبرانی
۳۷۴	۵-۱۴-۷ تزریق پرفشار
۳۷۶	۱۵-۷ پارامترها و مراحل طراحی
۳۷۸	۱۶-۷ عملیات اجرایی
۳۸۱	۱۷-۷ کنترل کیفیت و تضمین
۳۸۲	تمرین های فصل هفتم

فصل ۸: اختلاط عمیق خاک	۳۸۳
۸-۱ مقدمه	۳۸۳
۸-۲ به کارگیری روش مناسب	۳۸۵
۸-۳ کاربردهای استفاده از روش اختلاط عمیق	۳۸۶
۸-۴ مزایا و معایب استفاده از روش اختلاط عمیق	۳۸۹
۸-۵ اصول استفاده از روش اختلاط عمیق	۳۹۰
۸-۵-۱ واکنش شیمیایی	۳۹۰
۸-۵-۲ خواص خاک‌های پایدارسازی شده	۳۹۳
۸-۵-۳ نوع مایه‌های پدیدار کننده	۳۹۳
۸-۵-۴ درصد ماده‌های بایارکت	۳۹۵
۸-۵-۵ تاثیر مواد افزودنی	۳۹۶
۸-۵-۶ تاثیر آب مخلوط	۳۹۶
۸-۵-۷ تاثیر نوع خاک	۳۹۷
۸-۵-۸ تاثیر درصد رطوبت	۳۹۷
۸-۵-۹ تاثیر درصد ماسه	۳۹۸
۸-۵-۱۰ تاثیر درصد ماده‌ی آلی	۳۹۸
۸-۵-۱۱ تاثیر مقدار pH	۳۹۹
۸-۵-۱۲ تاثیر زمان عمل‌آوری	۴۰۰
۸-۵-۱۳ تاثیر مقاومت دراز مدت	۴۰۰
۸-۵-۱۴ تاثیر دمای عمل‌آوری	۴۰۱
۸-۵-۱۵ تاثیر خشک شدن و هیدراتاسیون مجدد خاک	۴۰۳
۸-۵-۱۶ تاثیر انرژی مخلوط سازی	۴۰۳
۸-۵-۱۷ تاثیر غیر یکنواختی	۴۰۴

۴۰۵	۶-۸ مقاومت موثر
۴۰۵	۱-۶-۸ مقاومت در محل
۴۰۷	۷-۸ مودهای گسیختگی احتمالی ستون‌های اختلاط عمیق
۴۰۹	۸-۸ انتقال تنش بین ستون‌های اختلاط عمیق و خاک اطراف آن
۴۱۰	۹-۸ فرضیات طراحی
۴۱۰	۱-۹-۸ خواص معمول خاک پایداری شده
۴۱۳	۲-۹-۸ شکال معمول و ابعاد ستون‌ها
۴۱۳	۳-۹-۸ ظرفیت باربری ستون‌ها
۴۱۵	۴-۹-۸ نسبت ستون‌ها
۴۱۹	۵-۹-۸ نشست نسبی ستون‌های اختلاط عمیق
۴۲۲	۶-۹-۸ پایداری خاکریزها تقویت شده با ستون
۴۲۳	۷-۹-۸ طراحی برای گودبرداری‌ها
۴۲۵	۶-۹-۸ کنترل لغزش داخلی
۴۲۶	۸-۹-۸ کنترل واژگونی داخلی
۴۲۷	۹-۹-۸ کنترل لغزش پایه
۴۲۸	۱۰-۹-۸ کنترل واژگونی خارجی
۴۲۸	۱۱-۹-۸ بلندشدگی کف
۴۲۹	۱۲-۹-۸ کنترل تراوش
۴۳۰	۱۳-۹-۸ کنترل پایداری کلی
۴۳۰	۱۴-۹-۸ استفاده از ستون‌های اختلاط عمیق به منظور کاهش خطر روانگرایی
۴۳۱	۱۰-۸ پارامترها و مراحل طراحی روش اختلاط عمیق
۴۳۱	۱-۱۰-۸ پارامترهای طراحی
۴۳۲	۲-۱۰-۸ روند انجام طراحی

۴۳۶	۱۱- اجرای روش اختلاط عمیق خاک.....
۴۳۹	۱۲- کنترل کیفیت و تضمین.....
۴۴۳	تمرین‌های فصل هشتم.....
۴۴۵	فصل ۹: خاک مسلح.....
۴۴۵	۱-۹ مقدمه.....
۴۴۶	۲-۹ اختار خاک مسلح.....
۴۴۷	۳-۹ انواع مسلح کننده‌ها.....
۴۴۸	۳-۹-۱ مسلح کننده های فلزی.....
۴۴۸	۳-۹-۲ مسلح کننده های لیمری.....
۴۵۹	۴-۹ کاربردهای مختلف ژئوسنتتیک‌ها.....
۴۶۳	۴-۹-۱ استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در مالوده‌های سطحی.....
۴۶۷	۴-۹-۲ استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در سبیل‌ها.....
۴۶۹	۴-۹-۳ استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در دیوارهای خاک مسلح.....
۴۷۰	۴-۹-۴ استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در کوله پل.....
۴۷۳	۴-۹-۵ استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در مدفن‌های زباله.....
۴۷۳	۵-۹ طراحی دیوارهای خاک مسلح.....
۴۹۰	۶-۹ کنترل کیفیت و تضمین.....
۴۹۱	۷-۹ رفتار لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح (AASHTO, ۲۰۱۷).....
۴۹۹	تمرین‌های فصل نهم.....
۵۰۱	فهرست مراجع.....