

بهبودی خاک

اصول و کاربرد

تالیف

ژی هان

مترجمین

سید هادی بهادری - دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه ارومیه

آراز هاشمی نژاد - دانشجوی دکتری مهندسی عمران - خاک و پی دانشگاه ارومیه

هان، جی، 1963-.

بہسازی خاک: اصول و کاربردها / تالیف هان جی، مترجمین سید هادی
بہادری و آراز ہاشمی نژاد، ارومیه: انتشارات دانشگاه ارومیه، 1397.

920ص: مصور. - (انتشارات دانشگاه ارومیه، 256).

شابک: 978-600-8681-49-6

کتابنامہ.

1- خاک— تثبیت. 2- پی سازی . الف، بہادری، سید هادی، مترجم. ب.

ہاشمی نژاد، آراز، مترجم همکار. ج. عنوان. د. فروست.

شماره ملی: 5522976— رده کنگره: TA، 749، 9ب2، 1397.

عنوان: بہسازی خاک: اصول و کاربردها

مولف: هان جی

مترجم: سید هادی بہادری و آراز ہاشمی نژاد

ناشر: انتشارات دانشگاه

سال نشر: 1397

سر انتشارات: 256

شابک: 978-600-8681-49-6

تقدیم به آفریدگار اندیشه

پیش‌گفتار مؤلف

در بسیاری از کشورها، استفاده از بهسازی خاک برای حل مشکلات ژئوتکنیکی امری متداول است، به ویژه زمانی که ساخت و ساز در خاک‌های مسئله دار و شرایط ژئوتکنیکی پیچیده صورت می‌گیرد. پیشرفت‌های اخیر در تجهیزات، مصالح و روش‌های طراحی باعث شده است که فناوری‌های بهسازی خاک بسیار موثرتر، کارآتر و اقتصادی‌تر از پیش شود. در عین حال، تجربه استفاده از فناوری‌های بهسازی خاک نشان می‌دهد که کاربرد عملی فراتر از تئوری است. برخی پیمانکاران، فناوری‌های اختصاصی، روش‌های طراحی و ساخت خود را برای مزایای رقابتی توسعه داده‌اند. بسیاری از کتاب‌های موجود در

زمینه بهسازی خاک بر روی مفهوم، کاربرد و مطالعه موردی متمرکز شده است. در عین حال، کتاب‌های معدودی به اصول و روش‌های طراحی بهسازی خاک پرداخته است. این کتاب هر دو جنبه تئوری و عملی در طراحی و ساخت بسیاری از روش‌های بهسازی خاک را که عمدتاً جنبه کاربردی دارند، پوشش می‌دهد. این کتاب شامل روند طراحی همراه با جزئیات دقیق برای بسیاری از روش‌های بهسازی خاک است که کاربرد عملی آنها را به سادگی ممکن می‌سازد. مثال‌های طراحی و تمرینات متعددی در این کتاب ارائه شده است که خواننده را در فهم بهتر اصول بنیادی هر روش بهسازی خاک و چگونگی کاربرد آن برای مسائل واقعی ژئوتکنیکی یاری می‌رساند. این کتاب می‌تواند به عنوان کتاب درسی برای دانشجویان کارشناسی و تحصیلات تکمیلی (کارشناسی ارشد و دکتری)، کتاب مرجع برای محققین و مهندسين و به عنوان راهنما برای پیمانکاران بهسازی خاک برای پیاده سازی روش‌های بهسازی خاک در پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گیرد.

Jie Han

Professor of Geotechnical Engineering

Department of Civil, Environmental, & Architectural Engineering

University of Kansas

USA

2015

پیشگفتار مترجمین

علم ژئوتکنیک به عنوان یکی از قدیمی ترین علوم با تکیه بر دانش فنی، تجربیات فنی و ابتکارات اجرایی چندین ساله و نیز بیش از یک قرن توسعه اصول و مبانی علمی، امروزه امکان طراحی و اجرای بسیاری از پروژه‌های بزرگ را فراهم ساخته است. یکی از مهمترین کاربردهای دانش ژئوتکنیک، بهره گیری از مبانی آن در راستای ساخت بستری مناسب جهت ساخت پروژه‌های واقع در محدوده خاک‌های مساله دار است. بستر مناسب از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک به بستری گفته می‌شود که در آن، خاک دارای ظرفیت باربری و مقاومت برشی کافی در مقابل بارگذاری طرح بوده و نشست‌های تحکیمی و تغییرات حجمی انبساطی و انقباضی ناشی از بارگذاری در توده خاک در محدوده مجاز باشد. از این رو، ساخت

چنین بستر مناسبی در عموم پروژه‌ها به ویژه در پروژه‌های واقع بر خاک‌های مساله دار، موضوعی چالش برانگیز است. با این حال، با رشد روز افزون ارزش زمین و لزوم احداث سازه‌ها بر روی خاک‌های مساله دار، روند توسعه و استفاده از روش‌هایی به منظور بهسازی خاک که زمانی مقرون به صرفه نبود، اکنون قابل توجیه می‌باشد.

از مهم‌ترین مشکلات اساسی که توسعه روش‌های بهسازی خاک در عرصه جهانی و به خصوص در ایران با آن مواجه است، کمبود کتب و منابع آموزشی، استانداردها و ضوابطی است که راه مجریان و مشاوران را در مسیر مطالعه، طراحی و اجرای این روش‌ها هموار و تسهیل نماید. نگاهی به کلیه کتب و مراجع موجود مرتبط با این موضوع نمایانگر آن است که مراجع مدون و جامعی که در برگیرنده کلیه موارد فوق باشد، اندک است. تقریباً بخش اعظمی از کتب، مراجع، استانداردها و ضوابط موجود در زمینه بهسازی خاک در اصول و مبانی تحلیل و طراحی روش‌های بهسازی خاک به طور کفایت بحث و تحلیل ننموده و جامعه مهندسی در این زمینه از این ضعف رنج می‌برد. مطلب فوق عاملی بوده است که مترجمین را به سمت فکر و تلاش جهت رفع کمبودهای موجود از طریق ترجمه کتابی جامع و کامل در موضوع تحلیل و طراحی روش‌های بهسازی خاک سوق دهد. کتاب حاضر که ترجمه و تدوین آن از سال 1395 آغاز گردیده است، به اصول و مبانی تحلیل و طراحی انواع روش‌های بهسازی خاک می‌پردازد و تلاشی است که هدف آن برطرف نمودن کمبودهای موجود در کشور می‌باشد.

این کتاب، برگردان به فارسی کتاب

Principles and Practices of Ground Improvement

از انتشارات وایلی در سال 2015، نوشته آقای دکتر ژئی هان¹ هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه کانساس آمریکا می‌باشد. به جرات می‌توان گفت این کتاب جامع ترین و بروزترین کتاب حال حاضر در حوزه تحلیل و طراحی روش‌های بهسازی خاک می‌باشد که به هر دو جنبه تئوری و عملی در طراحی و ساخت بسیاری از روش‌های بهسازی خاک که عمدتاً جنبه کاربردی دارند، می‌پردازد. این کتاب که در 10 فصل تدوین شده است، شامل روند تحلیل و طراحی برای بسیاری از روش‌های بهسازی خاک است و در قالب مثال‌ها و تمرینات متعدد به اصول بنیادی هر روش بهسازی خاک و چگونگی کاربرد آن برای مسائل واقعی ژئوتکنیکی می‌پردازد.

از آنجاکه ترجمه متن از یک زبان به زبان دیگر و حفظ اصالت و مفهوم متن اصلی در ترجمه کاری است بس دشوار، در ترجمه کتاب سعی گردیده تا حتی‌المقدور مفاهیم روشن و دقیق ارائه گردد، با این

¹ Jie Han

حال مترجمین سپاسگزار از نظرات تکمیلی و اصلاحی صاحب‌نظران خواهند بود. بی تردید ارسال هرگونه پیشنهاد و گزارش هرگونه اشکال به آدرس پست الکترونیکی مترجمین به آدرس h.bahadori@urmia.ac.ir و a.hasheminezhad@urmia.ac.ir ضمن تقدیر، در چاپ‌های بعدی کتاب مورد استفاده قرار خواهند گرفت. در خاتمه، مترجمین بر خود لازم می‌دانند، از زحمات سرکار خانم میترا لیلی‌بابت ویراستاری کتاب، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

سیدهادی بهادری

آراز هاشمی‌نژاد

تابستان 1397

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول (مقدمه)
3	1- مقدمه
4	1-2-1 مصالح ژئومکانیکی مسئله‌دار و شرایط
4	1-2-1-1 مصالح ژئومکانیکی مسئله‌دار
6	1-2-2-1 شرایط مشکل‌آفرین
6	1-3-1 مشکلات ژئوتکنیکی و گسیختگی‌ها
6	1-4-1 طبقه بندی روش‌های بهسازی خاک
6	1-4-1-1 پیشرفت‌های تاریخی
8	1-4-1-2 طبقه بندی
12	1-4-1-3 شرح کلی، عملکرد و کاربرد
12	1-5-1 انتخاب روش بهسازی خاک
12	1-5-1-1 ضرورت بهسازی خاک
23	1-5-1-2 عوامل انتخاب روش‌های بهسازی خاک
26	1-5-1-3 فرآیند انتخاب
26	1-6-1 ملاحظات طراحی
27	1-7-1 ساخت
29	1-8-1 کنترل کیفیت و اطمینان
29	1-9-1 پیشرفت‌های اخیر و روند توسعه‌های آتی
29	1-9-1-1 پیشرفت‌های اخیر
30	1-9-1-2 روند توسعه‌های آتی
31	1-10-1 ساختار کتاب
32	مسائل
33	منابع

فصل دوم (مصالح ژئومکانیکی، آزمایش‌ها و طراحی‌ها)

37	1-2-1 مقدمه
38	1-2-2 مصالح خاکی ژئومکانیکی و مشخصات آنها

فهرست مطالب ب

38	1-2-2- گروه بندی
40	2-2-2- مشخصات فیزیکی
44	3-2-2- مشخصات مکانیکی
57	4-2-2- مشخصات هیدرولیکی
59	5-2-2- تراکم مصالح خاکی ژئومکانیکی
66	3-2- ژئوسنتتیک‌ها و ویژگی‌های آنها
66	1-3-2- انواع ژئوسنتتیک‌ها
69	2-3-2- عملکرد
73	3-3-2- مشخصات و روش‌های آزمایش
91	4-2- آزمایش‌های درجا
91	1-4-2- آزمایش نفوذ استاندارد
95	2-4-2- آزمایش نفوذ مخروط
100	3-4-2- آزمایش برش پره
103	4-4-2- آزمایش پرسیمتری
106	5-4-2- آزمایش بارگذاری صفحه
108	5-2- طراحی شالوده‌های سطحی
108	1-5-2- ظرفیت باربری
112	۲-۵-۲- نشست
123	3-5-2- تحکیم
124	6-2- تحلیل پایداری شیروانی
124	1-6-2- مقدمه
126	۲-۶-۲- روش‌های تحلیل پایداری
140	7-2- تحلیل دیوار حائل
140	1-7-2- نوع دیوار
141	۲-۷-۲- ضریب فشار جانبی خاک
143	3-7-2- تئوری رانکین
145	4-7-2- تئوری کولمب
146	8-2- تحلیل روانگرایی
146	1-8-2- پتانسیل روانگرایی

فهرست مطالب ج

153	..... ۲-۸-۲- نشست ناشی از زلزله
155	..... مسائل
165	..... منابع

فصل سوم) تراکم سطحی و عمیق

171	..... 1-3- مقدمه
172	..... 2-3- اصول تراکم
172	..... 3-3- تراکم رایج
172	..... 1-3-3- مقدمه
174	..... 2-2-3- اصول
180	..... 3-3-3- الزامات طراحی
186	..... 4-3-3- فرایند و پارامترهای طراحی
188	..... 5-3-3- مثال طراحی
190	..... 6-3-3- ساخت
191	..... 7-3-3- کنترل کیفیت و اطمینان
193	..... 4-3- تراکم هوشمند
193	..... 1-4-3- مقدمه
195	..... 2-4-3- اصول
201	..... 3-4-3- ملاحظات طراحی
205	..... 4-4-3- ساخت
206	..... 5-4-3- کنترل کیفیت و اطمینان
206	..... 5-3- تراکم دینامیکی عمیق
206	..... 1-5-3- مقدمه
210	..... 2-5-3- اصول
213	..... 3-5-3- ملاحظات طراحی
226	..... 4-5-3- فرآیند و پارامترهای طراحی
227	..... 5-5-3- مثال طراحی
230	..... 6-5-3- ساخت
232	..... 7-5-3- کنترل کیفیت و اطمینان

د فهرست مطالب

233	6-3- تراکم ضربه‌ای سریع
233	3-6-1- مقدمه
234	3-6-2- اصول
234	3-6-3- ملاحظات طراحی
239	3-6-4- روند و پارامترهای طراحی
240	3-6-5- مثال طراحی
241	3-6-6- ساخت
241	3-6-7- کنترل کیفیت و اطمینان
242	3-7- تراکم ارتعاشی
242	3-7-1- مقدمه
246	3-7-2- اصول
253	3-7-3- ملاحظات طراحی
258	3-7-4- روند و پارامترهای طراحی
259	3-7-5- مثال طراحی
262	3-7-6- ساخت
263	3-7-7- کنترل کیفیت و اطمینان
264	مسائل
271	منابع

فصل چهارم) بیش حفاری و جایگزینی

277	4-1- مقدمه
277	4-1-1- مفاهیم پایه
278	4-1-2- سازگاری
278	4-1-3- کاربردها
279	4-1-4- مزایا و معایب
279	4-2- اصول و مبانی
279	4-2-1- توزیع فشار
281	4-2-2- حالت‌های گسیختگی
282	4-3- ملاحظات طراحی

فهرست مطالب

283	1-3-4- گسیختگی برشی کلی در ناحیه جایگزینی
284	2-3-4- گسیختگی سوراخ کننده در ناحیه جایگزینی
286	3-3-4- گسیختگی پی توزیع شده
287	4-3-4- گسیختگی سوراخ کننده ناحیه جایگزینی در خاک درجا
288	5-3-4- حداقل ظرفیت باربری و ضریب اطمینان
289	6-3-4- نشست یک پی بر روی خاک لایه‌ای با عرض نامحدود
290	7-3-4- نشست یک پی در ناحیه جایگزینی با مساحت محدود
293	4-4- پارامترها و روند طراحی
293	1-4-4- پارامترهای طراحی
294	2-4-4- روند طراحی
295	5-4- مثال طراحی
305	6-4- ساخت
305	1-6-4- انتخاب مصالح پرکننده
305	2-6-4- حفاری
306	3-6-4- جایگذاری و تراکم
306	7-4- کنترل کیفیت و اطمینان
306	1-7-4- موقعیت و ابعاد
306	2-7-4- مصالح پرکننده متراکم
307	3-7-4- ارزیابی عملکرد
308	مسائل
311	مراجع

فصل پنجم) جایگزینی عمیق

313	1-5- مقدمه
313	1-1-5- مفاهیم اولیه
317	2-1-5- سازگاری
318	3-1-5- کاربردها
318	4-1-5- مزایا و محدودیت‌ها
320	2-5- اصول و مبانی

فهرست مطالب و

320	..... کاربردها	1-2-5
321	..... متراکم سازی	2-2-5
321	..... ساز و کار انتقال بار	3-2-5
329	..... حالت‌های گسیختگی	4-2-5
331	..... ملاحظات طراحی	3-5
331	..... اصول کلی	1-3-5
333	..... تاثیر چگال سازی (متراکم سازی)	2-3-5
335	..... ظرفیت باربری	3-3-5
340	..... نشست	4-3-5
348	..... تحکیم	5-3-5
355	..... پایداری	6-3-5
360	..... طراحی ستون‌های دانه‌ای با پوشش ژئوسنتتیکی	7-3-5
368	..... پارامترهای طراحی و روند	4-5
368	..... ستون‌های دانه‌ای	1-4-5
369	..... ستون دانه‌ای با پوشش ژئوسنتتیکی	2-4-5
370	..... مثال‌های طراحی	5-5
379	..... ساخت	6-5
379	..... ستون‌های تراکمی ماسه‌ای	1-6-5
380	..... ستون‌های سنگی	2-6-5
381	..... ستون‌های درشت دانه کوبشی	3-6-5
382	..... ستون‌های بتنی ارتعاشی	4-6-5
382	..... مدول کنترل شده (سختی) ستون‌ها	5-6-5
383	..... ستون‌های دانه‌ای با پوشش ژئوسنتتیکی	6-6-5
383	..... کنترل کیفیت و اطمینان	7-5
383	..... موقعیت‌ها و ابعاد	1-7-5
384	..... مصالح خاگریزی	2-7-5
385	..... پارامترهای نصب	3-7-5
388	..... ارزیابی عملکرد	4-7-5
391	..... مسائل	

فهرست مطالب ز

منابع 399

فصل ششم) زهکشی و آب‌زدایی

409	1-6- مقدمه
413	2-6- اصول جریان آب در مصالح خاکی
413	1-2-6- رابطه برنولی
415	2-2-6- شبکه جریان
417	3-2-6- فشار آب حفره‌ای و نیروی بالارونده
419	4-2-6- تنش‌های ناشی از تراوش
422	3-6- فیلتراسیون
422	1-3-6- مقدمه
423	2-3-6- اصول
429	3-3-6- الزامات طراحی
438	4-3-6- پارامترها و روند طراحی
439	5-3-6- مثال طراحی
440	6-3-6- ساخت
441	7-3-6- کنترل کیفیت و اطمینان
441	4-6- زهکشی
441	1-4-6- مقدمه
445	2-4-6- اصول
448	3-4-6- الزامات طراحی
459	4-4-6- پارامترها و روند طراحی
460	5-4-6- مثال‌های طراحی
463	6-4-6- ساخت
464	7-4-6- کنترل کیفیت و اطمینان
464	5-6- آب‌زدایی (آب‌گیری)
464	1-5-6- مقدمه
470	2-5-6- اصول
473	3-5-6- الزامات طراحی

فهرست مطالب ح

478	4-5-6 پارامترهای طراحی و روش
482	5-5-6 مثال طراحی
483	6-5-6 ساخت
484	7-5-6 کنترل کیفیت و اطمینان
485	مسائل
495	منابع

فصل هفتم) پیش بارگذاری

499	1-7 مقدمه
499	1-1-7 مفاهیم پایه
501	2-1-7 سازگاری
502	3-1-7 کاربردها
502	4-1-7 مزایا و محدودیتها
503	2-7 اصول
503	1-2-7 پیش فشرده سازی
504	2-2-7 تنش و جابجایی خاک
507	3-2-7 تئوری تحکیم
513	4-2-7 پیش بارگذاری ترکیبی مکشی و خاکریز
514	5-2-7 پیش بارگذاری سربار
516	3-7 ملاحظات طراحی
516	1-3-7 زهکش‌های قائم
521	2-3-7 پیش بارگذاری
527	3-3-7 تاثیر سربار
534	4-7 پارامترها و روند طراحی
534	1-4-7 پارامترهای طراحی
535	2-4-7 روند طراحی
536	5-7 مثال طراحی
547	6-7 ساخت
547	1-6-7 زهکش‌های قائم

فهرست مطالب ط

547	2-6-7- لایه زهکشی
549	3-6-7- پیش بارگذاری خاکریزی
550	4-6-7- پیش بارگذاری مکشی
552	7-7- کنترل کیفیت و اطمینان
552	1-7-7- مصالح
553	2-7-7- جزئیات ساخت
553	3-7-7- پایش میدانی
556	4-7-7- ارزیابی عملکرد
557	مسائل
563	منابع

فصل هشتم) اختلاط عمیق و تزریق

569	1-8- مقدمه
570	2-8- اختلاط عمیق
570	1-2-8- مقدمه
577	2-2-8- اصول
602	3-2-8- ملاحظات طراحی
623	4-2-8- پارامترها و روند طراحی
625	5-2-8- مثال طراحی
628	6-2-8- ساخت
631	7-2-8- کنترل کیفیت و اطمینان
635	3-8- تزریق
635	1-3-8- مقدمه
640	2-3-8- اصول
657	3-3-8- ملاحظات طراحی
671	4-3-8- پارامترها و روند طراحی
672	5-3-8- مثال طراحی
673	6-3-8- ساخت
676	7-3-8- کنترل کیفیت و اطمینان

فهرست مطالب ی

677مسائل

685منابع

فصل نهم) تسلیح در جای خاک

6951-9- مقدمه

6962-9- مهارهای خاک

6961-2-9- مقدمه

7012-2-9- اصول

7073-2-9- ملاحظات طراحی

7214-2-9- پارامترها و روند طراحی

7235-2-9- مثال طراحی

7256-2-9- ساخت

7267-2-9- کنترل کیفیت و اطمینان

7273-9- میخکوبی خاک

7271-3-9- مقدمه

7312-3-9- اصول

7373-3-9- ملاحظات طراحی

7534-3-9- پارامترها و روند طراحی

7555-3-9- مثال طراحی

7566-3-9- ساخت

7587-3-9- کنترل کیفیت و اطمینان

760مسائل

767منابع

فصل دهم) تسلیح خاکریز

7691-10- مقدمه

7712-10- شیبهای مسلح شده با ژئوسنتتیک

7711-2-10- مقدمه

7732-2-10- اصول

فهرست مطالب ک

777	10-2-3- تحلیل و طراحی
788	10-2-4- پارامترها و روند طراحی
794	10-2-5- ساخت
795	10-2-6- کنترل کیفیت و اطمینان
796	10-3-3- خاکریز مسلح شده با ژئوسنتتیک
796	10-3-1- مقدمه
797	10-3-2- اصول
799	10-3-3- ملاحظات طراحی
808	10-3-4- پارامترها و روند طراحی
811	10-3-5- ساخت
813	10-3-6- کنترل کیفیت و اطمینان
813	10-4-4- خاکریزهای مسلح شده با ژئوسنتتیک با خاکریزهای پشتیبان
813	10-4-1- مقدمه
815	10-4-2- اصول
826	10-4-3- ملاحظات طراحی
833	10-4-4- پارامترها و روند طراحی
835	10-4-5- ساخت
836	10-4-6- کنترل کیفیت و اطمینان
836	10-5-5- دیوارهای خاکی تثبیت شده از نظر مکانیکی
836	10-5-1- مقدمه
838	10-5-2- اصول
844	10-5-3- الزامات طراحی
851	10-5-4- پارامترها و روند طراحی
858	10-5-5- ساخت
859	10-5-6- کنترل کیفیت و اطمینان
860	10-6-6- پی مسلح شده با ژئوسنتتیک
860	10-6-1- مقدمه
861	10-6-2- اصول
865	10-6-3- ملاحظات طراحی

فهرست مطالب ل

872	4-6-10- پارامترها و روند طراحی
876	5-6-10- ساخت
876	6-6-10- کنترل کیفیت و اطمینان
876	7-10- راه‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک
876	1-7-10- مقدمه
879	2-7-10- اصول
890	3-7-10- ملاحظات طراحی برای راه‌های فاقد روسازی
897	4-7-10- پارامترها و روند طراحی برای راه‌های فاقد روسازی
897	5-7-10- ملاحظات طراحی برای راه‌های دارای روسازی
903	6-7-10- پارامترها و روند طراحی برای راه‌های دارای روسازی
904	7-7-10- مثال‌های طراحی
908	8-7-10- ساخت
909	9-7-10- کنترل کیفیت و اطمینان
910	مسائل
917	منابع

فصل اول

مقدمه

فصل (1) مقدمه

1- مقدمه

با گسترش تمدن و شهرنشینی، نیازهای رو به رشدی جهت استفاده از زمین برای زندگی بهتر و حمل و نقل ایجاد شد. ساختمان‌های مسکونی و تجاری، ساختمان‌های بلند اداری، بزرگراه‌ها، خطوط راه آهن، تونل‌ها، خاکریزها و سدها به طور فزاینده‌ای ساخته شدند و در آینده نیز بی وقفه ساخته خواهند شد. با کاهش دسترسی به محل‌های مناسب با شرایط ژئوتکنیکی مطلوب جهت ساخت و ساز، نیاز به استفاده از محل‌های نامناسب و یا تا حدودی مناسب افزایش یافته است. در نتیجه، مهندسين با چالش‌ها و مشکلات ژئوتکنیکی رو به رشدی مانند شکست برشی، نشست‌های تفاضلی و یا کلی بزرگ، ناپایداری، روانگرایی، فرسایش و تراوش آب مواجه هستند. گزینه‌های مقابله با شرایط ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی مسئله دار عبارتند از:

- 1) اجتناب از محل موردنظر
- 2) طراحی روسازی‌های مناسب
- 3) حذف و جایگزینی مصالح ژئومکانیکی مسئله دار با مصالح ژئومکانیکی مرغوب، و
- 4) بهبود ویژگی‌های مصالح ژئومکانیکی و شرایط ژئوتکنیکی (هوسمن²، 1990)

بهبود شرایط ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی در بسیاری از پروژه‌ها بیش از پیش الزامی شده است. امروزه، بهسازی خاک بخش مهمی از پروژه‌های ژئوتکنیکی را در بر می‌گیرد. اصطلاحات مختلفی مانند: بهسازی خاک، تثبیت خاک، اصلاح زمین و اصلاح خاک در ادبیات فنی موضوع استفاده شده است. واژه "بهسازی خاک" رایج ترین اصطلاح مورد استفاده در متون فنی است که برای این کتاب نیز انتخاب شده است.

1-2-2- مصالح ژئومکانیکی مسئله دار و شرایط

1-2-1- مصالح ژئومکانیکی مسئله دار

مصالح ژئومکانیکی شامل تمامی مواد مورد استفاده در کاربردهای ژئوتکنیکی است که متشکل از مصالح ژئومکانیکی طبیعی، فرآوری شده و بهسازی شده می‌باشد. مصالح ژئومکانیکی طبیعی عمدتاً خاک و سنگ هستند. اونیل³ و ریس⁴ (1999)، واژه مصالح ژئومکانیکی میان رده را به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی مابین خاک و سنگ، پیشنهاد دادند. مصالح ژئومکانیکی میان رده چسبنده، دارای مقاومت فشاری محصور نشده مابین 0/5 تا 5 مگاپاسکال است، در حالیکه مصالح ژئومکانیکی میان رده غیرچسبنده، دارای SPT

² Hausmann

³ O'Neill

⁴ Reese

مابین 50 تا 100 است. اغلب سنگ‌ها و مصالح ژئومکانیکی میان رده، مستحکم و سخت هستند که از این جهت برای کاربردهای ژئوتکنیکی مناسب می‌باشند. به هر حال در کاربردهای ژئوتکنیکی، خاک‌های طبیعی، به ویژه خاک رس و لای نرم، ماسه سست، خاک متورم شونده، خاک فروریزی و یخ زده می‌توانند مسئله ساز باشند.

مصالح ژئومکانیکی فرآوری شده از سایر مصالح ساخته می‌شوند. به عنوان مثال: سنگ دانه‌ها از خرد شدن تخته سنگ ساخته می‌شوند. روسازی‌های آسفالتی بازیافتی (RAP⁵) از روسازی‌های آسفالتی قدیمی تولید می‌شوند. سنگ دانه‌های سبک از گرمایش سنگ شیل خام، خاک رس و یا سنگ لوح درون کوره‌های دوار در دمای بالا تولید می‌شود که منجر به منبسط شدن مواد شده و پس از خنک کردن، خرد کردن و در نهایت الک کردن، از آنها برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. مصالح ژئومکانیکی فرآوری شده عمدتاً برای خاکریزها استفاده می‌شوند که محدوده وسیعی از خاکریزهای دانه‌ای، خاکریزهای سبک، خاکریزهای مهار نشده، مصالح بازیافتی، خاکستر، مواد زائد جامد و مشتقات زیستی را در بر می‌گیرد. به علت تنوع زیاد مواد خاکریز، برخی از آنها می‌توانند در اصلاح مشخصات و خواص خاک بکار روند (مانند خاکریز دانه‌ای یا خاکستر)، اما باقی آنها می‌توانند در کاربردهای ژئوتکنیکی مشکل آفرین شوند (مانند خاکریز مهار نشده و لجن). خاکریز مهار نشده و یا متراکم نشده اغلب سست بوده و تحکیم نمی‌یابد، بنابراین تحت اثر وزن خود دچار نشست می‌شود.

مصالح ژئومکانیکی بهسازی شده، مصالحی هستند که به صورت هیدرولیکی، مکانیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، خواص و مشخصات مصالح آنها اصلاح شده است. به عنوان مثال: الیاف می‌توانند به صورت مکانیکی با شن و یا خاک رس ترکیب شوند تا خاک مسلح ایجاد شود. سنگ آهک یا سیمان را می‌توان برای ایجاد خاک تثبیت شده با آهک یا سیمان به خاک اضافه نمود. باکتری‌های نیترات زدا را می‌توان به خاک اضافه نمود تا با ایجاد حباب‌های گازی بی اثر نیتروژنی، درجه اشباع ماسه را کاهش داد (هی⁶ و همکاران، 2013). در نتیجه این کار، پتانسیل روانگرایی ماسه به حداقل می‌رسد. مصالح ژئومکانیکی بهسازی شده اغلب محصول نهایی بهسازی خاک هستند؛ در نتیجه برای کاربردهای ژئوتکنیکی مشکل آفرین نخواهند شد.

جدول (1-1)، مصالح ژئومکانیکی مشکل آفرین و مشکلات بالقوه آنها را ارائه می‌کند. برخی از مصالح ژئومکانیکی طبیعی و خاکریزها، هدف نهایی بهسازی خاک هستند. هنگامی که در این کتاب از مصالح ژئومکانیکی طبیعی سخن به میان می‌آید، اغلب منظور سنگ و خاک است، زیرا در کاربردهای اجرایی معمولاً از این واژگان استفاده می‌شود.

جدول (1-1) مصالح ژئومکانیکی مشکل آفرین و مشکلات بالقوه آنها

نوع مواد	نام	مشکلات بالقوه
طبیعی	رس نرم	مقاومت کم، تراکم پذیری بالا، تغییر شکل خزشی گسترده، نفوذپذیری کم
	لای	مقاومت کم، تراکم پذیری بالا، پتانسیل روانگرایی بالا، نفوذپذیری کم، فرسایش زیاد
	خاک معدنی	تراکم بالا، تغییر شکل خزشی گسترده
	ماسه سست	مقاومت کم، تراکم پذیری بالا، پتانسیل روانگرایی بالا، نفوذپذیری بالا، فرسایش زیاد
خاکریز	خاک متورم شونده	تغییر حجم زیاد
	بادرفت	تغییر حجم زیاد، پتانسیل فروریزش زیاد

⁵ Recycled Asphalt Pavement

⁶ He

مقاومت کم، تراکم پذیری بالا، ناهمسانی، پتانسیل فروریزش بالا	خاکریز مهارنشده
حاوی آب زیاد، مقاومت کم، تراکم پذیری بالا	مواد لایروبی
حاوی آب زیاد، مقاومت کم، تراکم پذیری بالا	خاکریز بهسازی شده
ناهمسانی، تغییرات زیاد خواص و مشخصات	مواد بازیافتی
مقاومت کم، تراکم پذیری بالا، ناهمسانی و پتانسیل فرسایش بالا	زباله‌های جامد
مقاومت کم، تراکم پذیری بالا، پتانسیل فرسایش بالا	محصولات بیولوژیکی

1-2-2- شرایط مشکل آفرین

علاوه بر مصالح ژئومکانیکی مشکل آفرین، مسائل و مشکلات ژئوتکنیکی ممکن است به دلیل شرایط مشکل آفرین طبیعی و یا فعالیت‌های انسانی به وجود آیند. شرایط مشکل آفرین طبیعی عبارتند از: شرایط آب و هوایی، هیدرولیکی و یا ژئولوژیکی مانند زلزله، حفره‌ها و گودال‌ها، سیلاب، باد و چرخه‌های یخبندان. نمونه‌هایی از شرایط ژئوتکنیکی مشکل آفرین عبارتند از: وجود مصالح ژئومکانیکی نامطمئن، سطح بالای آب زیرزمینی، سنگ بستر شیب‌دار و شیب‌های تند. فعالیت‌های انسانی عمدتاً مربوط به ساخت و ساز بر روی خاک و زیر خاک می‌باشند و می‌توانند از عوامل تاثیرگذار بر شرایط ژئوتکنیکی باشند. به عنوان مثال حفاری، تونل زنی، شمع کوبی، زهکشی سریع آب‌های سطحی، ارتفاع دادن به آب‌های سطحی با ساخت سدها و خاکریزها و عقب نشینی آب‌های زیرزمینی. همچنین فعالیت‌های انسانی می‌توانند کاربرد بارهای استاتیکی، دینامیکی و ضربه‌ای را نیز تغییر دهند.

1-3- مشکلات ژئوتکنیکی و گسیختگی‌ها

مشکلات رایج ژئوتکنیکی عبارتند از: کاهش ظرفیت باربری، نشست‌های کلی و تفاضلی بزرگ، فشار همه جانبه، جابجایی زمین، ناپایداری، روانگرایی، فرسایش و تراوش آب. دلایل و اصول این مسائل ژئوتکنیکی در جدول (1-2) ارائه شده است. زمانی که مشکلات ژئوتکنیکی به خوبی شناسایی نشده و شدت بگیرند، می‌توانند به شکست‌های سنگین مالی و جانی منجر شوند.

1-4-4- طبقه بندی روش‌های بهسازی خاک

1-4-1- پیشرفت‌های تاریخی

روش‌های بهسازی خاک از دوران باستان استفاده شده است. به عنوان مثال، حدود 6000 سال پیش (عصر حجر جدید)، اقوام بانپو در چین برای حفاظت از تیرهای چوبی در زمین از ستون‌های کوبیده شده استفاده می‌کردند (چن⁷ و همکاران، 1995). روش‌های متراکم سازی خاک با کوبه از عصر حجر جدید بکار گرفته شده است. انواع مختلف کوبه‌ها از کوبه‌های سنگی (در عصر حجر جدید) تا کوبه‌های آهنی (در حدود هزار سال پیش) استفاده شده است. یک نوع کوبه توسط هشت تا دوازده نفر از مردم بکار گرفته می‌شد، بدین صورت که این افراد طناب متصل به کوبه را می‌کشیدند تا آن را بلند کرده و با رها سازی آن به زمین ضربه بزنند (چن و همکاران، 1995). حدود سه هزار و پانصد سال پیش، در عراق از نی‌ها به شکل طناب‌هایی بهم بسته شده (با قطر تقریباً 100 میلی متر) به عنوان زهکش‌های مسطح جهت کاهش فشار آب منفذی در بناهای بالاتر از سطح زمین استفاده شده است. حدود

⁷ Chen

دو هزار سال پیش، رومی‌ها از آهک برای ساخت راه‌ها استفاده می‌کردند. بیش از هزار سال پیش در دوران سلسه‌ها، مردم چین با استفاده از شن و علف‌های هرز، دیوارهای حائل خاکی ساختند تا با حفظ امنیت مرزی و جاده‌ها، از آنها علیه متجاوزان محافظت کنند. حدود پانصد سال پیش (در سلسله مینگ چین) از ترکیب آهک و خاک رس در نسبت (تقریباً 3:7 یا 4:6) جهت ساخت پی متراکم آهکی-خاکی استفاده شده است (چن و همکاران، 1995).

روش‌های نوین بهسازی خاک از دهه 1920 توسعه یافت. به عنوان مثال، استفاده از زهکش‌های شنی جهت تسریع در تحکیم خاک نرم برای اولین بار در سال 1925 پیشنهاد شد و در سال 1926 به نام دنیل دی. موران⁸ در ایالات متحده آمریکا به ثبت رسید. اداره کل بزرگراه‌های کارولینای جنوبی در ایالات متحده آمریکا برای ساخت جاده در سال 1926 از الیاف پنبه‌ای به عنوان مسلح کننده بستر استفاده نمود و روش ارتعاشی- شناوری جهت تحکیم خاک سست فاقد چسبندگی در سال 1937 در آلمان توسعه یافت. اولین نوع زهکش قائم پیش ساخته توسط والتر جلمن⁹ در سال 1947 در کشور سوئد گسترش یافت. فرناندو لیزی¹⁰ روش پایه شمع¹¹ را به منظور پشتیبانی از پی، در سال 1952 در ایتالیا توسعه داد و ثبت جهانی کرد. در دهه 1960، روش‌های متعددی جهت بهسازی خاک وجود داشت، از جمله استفاده از فولادهای مسلح کننده برای دیوارهای حائل توسط هنری ویدال¹² در فرانسه، تراکم دینامیکی توسط لوییس منارد¹³ در فرانسه، اختلاط عمیق در ژاپن و سوئد و روش تزریق تحت فشار در ژاپن. در سال 1986، جی. پی. ژیرود¹⁴ اذعان داشت که توسعه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها، انقلاب بزرگی در مهندسی ژئوتکنیک بوده است (ژیرود، 1986).

جدول 1-2) مشکلات ژئوتکنیکی و علل احتمالی

مشکل	مبنای نظری	علل احتمالی
شکست باربری	فشار اعمالی بیشتر از ظرفیت نهایی خاک است.	اعمال فشار زیاد، بار مایل، سطح باربری کوچک، مقاومت پایین خاک
نشست کلی و تفاضلی زیاد	قانون هوک و تغییر آرایش ذرات	اعمال فشار زیاد، سطح باربری بزرگ، خاک با قابلیت تراکم بالا، خاک غیریکنواخت، تغییر شکل خزشی زیاد
متراکم سازی با آب	فشار تورمی بیشتر از کشش آستانه گسیختگی است.	اعمال فشار بالا، خاک فروریزی، آب
جابجایی زمین	فشار تورمی بیشتر از فشار اعمالی است.	آب، خاک متورم شونده، خاک منجمد، دمای پایین

⁸ Daniel D. Moran

⁹ Walter Kjellman

¹⁰ Fernando Lizzi

¹¹ Root Pile

¹² Henri Vidal

¹³ Louis Menard

¹⁴ J. P. Giroud

سازه خاکی مرتفع، شیب تند، فشار آب زیاد، خاک نرم، اضافه بار بالا، سرعت بالای بارگذاری	تنش برشی بیشتر از مقاومت برشی، نیروی محرک بزرگتر از نیروی مقاوم، و گشتاور محرک بیشتر از گشتاور مقاوم است.	ناپایداری (لغزش، واژگونی و گسیختگی شیب ها)
زلزله، سیلت و ماسه روان، سطح بالای سفره‌های آب زیرزمینی	به علت افزایش فشار آب حفره ای، تنش موثر صفر می‌گردد.	روانگرایی
آب جاری، سرعت بالای جریان آب، فرسایش پذیری بالا (لای و ماسه)	تنش برشی ناشی از آب بیشتر از حداکثر مقاومت برشی مجاز خاک است.	فرسایش
سطح بالای آب، خاک نفوذپذیر	قانون دارسی	تراوش

1-4-2- طبقه‌بندی

بسیاری از روش‌های بهسازی خاک کاربردهای اجرایی دارند. تیمی تحقیقاتی برای برنامه تحقیقاتی بزرگراه استراتژیکی U.S. در پروژه SHRP II R02 تشکیل شد و راه‌حل‌های ژئوتکنیکی برای بهسازی خاک، خاکریزی سریع و روند تثبیت سطح روسازی‌های در حال بهره برداری را بررسی و در نهایت 46 روش بهسازی خاک را مطابق جدول (1-3) ارائه نمودند (شفر^{۱۵} و برگ^{۱۶}، 2012). محققان و سازمان‌های مختلف از جمله میشل (1981) در گزارش خود در مورد بهسازی خاک، هاسمن (1990)، یه^{۱۷} و همکاران (1994)، جامعه بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک (ISSMGE)، کمیته TC17 (چو^{۱۸} و همکاران، 2009) و گروه SHRP II R02 به رهبری شفر و برگ (2012)، روش‌های بهسازی خاک را بر اساس معیارهای مختلف دسته‌بندی کردند (جدول 1-4). واضح است که هر روش دسته‌بندی، مزایا و استدلالات خود را دارد، اما محدودیت‌هایی را نیز به دنبال دارد. این موضوع ناشی از این حقیقت است که چندین روش بهسازی خاک می‌تواند در یک یا چند گروه طبقه بندی شود. به عنوان مثال، ستون‌های سنگی می‌تواند عملکرد تراکمی، جایگزینی، زهکشی و تسلیح را ایفا کند؛ هرچند که عملکرد اصلی ستون‌های سنگی، جایگزینی است.

در این کتاب، روش طبقه بندی پیشنهادی توسط یه و همکاران (1994) با اندکی اصلاحات مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه، روش‌های بهسازی خاک را می‌توان در یک نوع طبقه بندی در یکی از دو گروه بهسازی سطحی و عمیق و در طبقه‌بندی دیگری در گروه‌های خاکبرداری و خاکریزی دسته بندی کرد. در این کتاب، روش بهسازی سطحی به روشی اطلاق می‌شود که عمق اجرایی آن کمتر و یا مساوی 3 متر باشد، در حالیکه بهسازی عمیق، عمق اجرایی بیشتر از 3 متر را در بر می‌گیرد. تسلیح خاکریزی شامل روش‌هایی است که از تسلیح فلزی و یا ژئوسنتتیکی برای مسلح سازی سازه خاکریز استفاده می‌شود، در حالیکه تسلیح برجا، شامل روش‌هایی است که از مهار زمین یا میخکوبی خاک برای خاکبرداری استفاده می‌شود.

¹⁵ Schaefer

¹⁶ Berg

¹⁷ Ye

¹⁸ Chu

جدول 1-3) روش‌های بهسازی خاک برای زیرساخت‌های حمل و نقل

ریزشمع‌ها	تسلیح با الیاف در سیستم‌های روسازی	ستون‌های سنگدانه‌ای
استفاده درجا از مواد بازیافتی آسفالت	محصور شدگی با ژئوسل‌ها در سیستم‌های روسازی	استفاده مجدد مفید از مواد دور ریختنی
پوشش جزئی	ساخت سکوه‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک	بهسازی بیولوژیکی بستر
زهکش‌های قائم پیش ساخته (PVD ها) و پیش بارگذاری خاکریز	خاکریزهای مسلح شده با ژئوسنتتیک	تراکم با انفجار
تراکم ضربه‌ای سریع	سیستم‌های روسازی مسلح شده با ژئوسنتتیک	تزریق حجمی پرکننده
شیب‌های خاکی مسلح	جداسازی ژئوسنتتیک در سیستم روسازی	سیستم‌های تزریق شیمیایی
شمع‌های متراکم ماسه‌ای	ژئوسنتتیک در زهکشی روسازی	تثبیت شیمیایی بستر و اساس
میخکوبی خاک	ستون‌های محصور شده با ژئوتکستایل	خاکریزهای با تکیه‌گاه ستونی
میخکوبی خاک	غلتک‌های متراکم سازی با انرژی بالا	تثبیت خاک ترکیبی با ستون‌های قائم
سیستم دیوار خاکی تثبیت شده به صورت مکانیکی	خاکریز هیدرولیکی + تحکیم مکشی + زهکش‌های ژئوکامپوزیتی	تزریق تراکمی
تراکم معمولی	خاکریز سبک حبابی تزریقی	شمع‌های پیوسته
پیش بارگذاری مکشی با و بدون PVD ها	تراکم هوشمند/پایش تراکم یکپارچه غلتکی	تراکم دینامیکی عمیق
تراکم ارتعاشی	تزریق تحت فشار	روش‌های اختلاط عمیق
ستون‌های بتنی ارتعاشی	خاکریز سبک، ژئوفوم پلی استیری منبسط شونده (EPS)، خاکریز سیمانی با چگالی کم	سوراخ کردن/تزریق و میخکوبی خاک‌های حفاری شده
	تثبیت مکانیکی بستر و اساس	الکترو-اسمزی
	تثبیت مکانیکی سیستم دیوارهای خاکی	حفاری و جایگزینی

منبع: (شفر و برگ، 2012)

جدول 1-4) طبقه بندی روش‌های بهسازی خاک

مرجع	معیار	رده بندی
میشل (1981)	سازه ای/عملکردی	1. تراکم عمیق برجای خاک‌های فاقد چسبندگی 2. پیش تراکم 3. تزریق 4. افزودنی‌ها 5. حرارتی 6. تسلیح
هاسمن (1990)	فرآیندی	1. بهسازی مکانیکی 2. بهسازی هیدرولیکی 3. بهسازی فیزیکی و شیمیایی 4. بهسازی با استفاده از محصورسازی
یه و همکاران (1994)	عملکردی	1. جایگزینی 2. تراکم عمیق 3. زهکشی و تحکیم 4. تسلیح 5. بهسازی حرارتی 6. تثبیت شیمیایی
ISSMGE TC17 (چو و همکاران، 2009)	نوع خاک و مصالح تشکیل دهنده آن	1. بهسازی خاک بدون افزودنی‌ها در خاک‌های فاقد چسبندگی و یا مصالح خاگریز 2. بهسازی خاک بدون افزودنی‌ها در خاک‌های چسبنده 3. بهسازی خاک با افزودنی‌ها و یا تزریق 4. بهسازی خاک با افزودنی‌های تزریقی 5. تسلیح خاک
شفر و برگ (2012)	کاربردی	1. شکل‌دهی سازه خاکی 2. متراکم سازی خاک‌های فاقد چسبندگی 3. خاگریزی بر روی خاک‌های نرم 4. دیوار خاکی آبنند 5. روسازی با عملکرد بهبود یافته 6. پایداری 7. زهکشی و تحکیم خاک نرم 8. ساخت اجزای تکیه گاهی قائم 9. تکیه گاه جانبی زمین 10. کاهش روانگرایی 11. پر کردن حفرات
ادامه جدول 1-4)		

1. متراکم سازی 2. جایگزینی 3. زهکشی و تحکیم 4. تثبیت شیمیایی 5. تسلیح 6. بهسازی حرارتی و بیولوژیکی	عملکردی	کتاب حاضر
---	---------	-----------

1-4-3- شرح کلی، عملکرد و کاربرد

جدول (1-5) شرح، مزایا و کاربردهای عمده روش‌های بهسازی خاک را که در این کتاب مورد بررسی قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد.