

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

مکانیک خاک غیر اشباع



# مڪانيڪ خاڪ غير اشباع

نينگ لو  
ويليام جى. ليڪوس

ترجمه  
دڪتر مصطفى زمانيان

۱۳۹۷



۶۸۱

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

مکانیک خاک غیراشباع/ نینگ لو - ویلیام جی. لیکوس

ترجمه دکتر مصطفی زمانیان

Ning Lu, William J. Likos, *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, INC., USA, 2004.

ویراستار: ندا نوری

حروف‌نگار و صفحه‌آرا: سمیرا دهقان

طراح جلد: امیرشاهرخ فریوسفی

ناظر چاپ: صفر ممیزاد

چاپ اول: ۱۳۹۷

شمارگان: ۵۰۰

قیمت: ۶۰۰,۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

سرشناسه:	لو، نینگ، ۱۹۶۰-م. Lu, Ning
عنوان و نام پدیدآور:	مکانیک خاک غیراشباع/ نینگ لو، ویلیام جی. لیکوس؛ ترجمه مصطفی زمانیان.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری:	بیست‌وهشت، ۵۸۶ص:، مصور، جدول.
شابک:	۹۷۸ ۹۶۴ ۴۵۷ ۴۱۳ ۹
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیا
یادداشت:	واژه‌نامه؛ کتابنامه؛ نمایه.
موضوع:	خاک -- مکانیک؛ Soil mechanics؛ خاک -- رطوبت؛ Soil moisture
شناسه افزوده:	لیکوس، ویلیام جی.؛ Likos, William J
شناسه افزوده:	زمانیان، مصطفی، ۱۳۶۲-، مترجم
شناسه افزوده:	دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات
شناسه افزوده:	Shahid Beheshti University. Printing & Publishing Center
رده‌بندی کنگره:	۱۳۹۷ م۷/ن۹/ت۷۱۰ TAY
رده‌بندی دیویی:	۶۲۴/۱۵۱۳۶
شماره کتابشناسی ملی:	۵۱۴۱۲۸۵

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴

www.pub.sbu.ac.ir  
unipress@mail.sbu.ac.ir

## فهرست مطالب

نشانه‌ها	پانزده
پیشگفتار مترجم	بیست‌وسه
پیشگفتار	بیست‌وپنج
مقدمه	بیست‌وهفت
<b>فصل اول. شرایط غیراشباع خاک</b>	<b>۱</b>
۱.۱. پدیده خاک غیراشباع	۱
۱.۱.۱. تعریف مکانیک خاک غیراشباع	۱
۲.۱.۱. ماهیت بین‌رشته‌ای مکانیک خاک غیراشباع	۲
۳.۱.۱. طبقه‌بندی پدیده‌های خاک غیراشباع	۴
۲.۱. اهداف و ساختار کتاب	۷
۱.۲.۱. ساختار فصل‌ها	۷
۲.۲.۱. سرفصل‌های ژئومکانیک و ژئوتکنیک زیست‌محیطی	۱۰
۳.۱. خاک غیراشباع در طبیعت و در اجرا	۱۰
۱.۳.۱. خاک غیراشباع در چرخه هیدرولوژی	۱۰
۲.۳.۱. مقیاس جهانی فاکتورهای آب‌وهوایی	۱۱
۳.۳.۱. ساختار خاک و ناحیه غیراشباع	۱۴
۴.۳.۱. کاربردهای مهندسی خاک غیراشباع	۱۷
۴.۱. پروفیل‌های تنش، فشار آب حفره‌ای و رطوبت	۱۹
۱.۴.۱. تنش در خاک غیراشباع	۱۹
۲.۴.۱. پروفیل‌های تنش و رطوبت در خاک اشباع: شکل شماتیک	۲۰
۳.۴.۱. پروفیل‌های تنش و رطوبت غیراشباع: شکل شماتیک	۲۱
۴.۴.۱. تحلیل گرافیکی تنش	۲۲
۵.۱. متغیرهای حالت، ویژگی مصالح و قوانین رفتاری	۲۵
۱.۵.۱. پیش‌بینی یک پدیده	۲۵
۲.۵.۱. هد هیدرولیکی در جایگاه متغیر حالت	۲۷
۳.۵.۱. تنش مؤثر به‌منزله یک متغیر حالت	۳۰
۴.۵.۱. تنش نرمال خالص به‌منزله متغیر حالت	۳۲

۳۳	۶.۱. مکش و پتانسیل آب درون خاک
۳۳	۱.۶.۱. مکش کل خاک
۳۴	۲.۶.۱. پتانسیل آب حفره‌ای
۳۸	۳.۶.۱. واحدهای مکش خاک
۳۹	۴.۶.۱. رژیم‌های مکش و منحنی مشخصه آب و خاک
۴۳	مسائل فصل اول
۴۵	بخش ۱ اصول بنیادی
۴۷	فصل دوم. متغیرهای مصالح
۴۷	۱.۲. مشخصات فیزیکی آب و هوا
۴۷	۱.۱.۲. خاک غیراشباع همچون یک سیستم چندفازی
۴۸	۲.۱.۲. دانسیته هوای خشک
۵۰	۳.۱.۲. دانسیته آب
۵۲	۴.۱.۲. ویسکوزیته آب و هوا
۵۴	۵.۱.۲. رژیم‌های جریان
۵۷	۲.۲. فشار نسبی و رطوبت نسبی
۵۷	۱.۲.۲. رطوبت نسبی در مکانیک خاک غیراشباع
۵۷	۲.۲.۲. اجزای تشکیل‌دهنده و فشار نسبی هوا
۶۰	۳.۲.۲. تعادل بین آب آزاد و هوا
۶۲	۴.۲.۲. تعادل بین آب و هوای حفره‌ای
۶۳	۵.۲.۲. رطوبت نسبی
۶۴	۶.۲.۲. نقطه شبنم
۶۵	۳.۲. دانسیته هوای مرطوب
۶۵	۱.۳.۲. تأثیر بخار آب در دانسیته هوا
۶۶	۲.۳.۲. فرمولاسیون دانسیته هوای مرطوب
۶۹	۴.۲. کشش سطحی
۶۹	۱.۴.۲. منشأ کشش سطحی
۷۴	۲.۴.۲. افت فشار در دو سوی فصل مشترک آب و هوا
۷۸	۵.۲. کاویتاسیون آب
۷۸	۱.۵.۲. کاویتاسیون و جوشش
۸۰	۲.۵.۲. فشار هیدرواستاتیک اتمسفری
۸۲	۳.۵.۲. فشار کاویتاسیون
۸۵	مسائل فصل دوم

۸۷	فصل سوم. تعادل بین وجهی
۸۷	۱.۳. انحلال هوا در آب
۸۷	۱.۱.۳. قانون هنری
۸۹	۲.۱.۳. وابستگی به دما
۸۹	۳.۱.۳. ضریب انحلال پذیری حجمی
۹۱	۴.۱.۳. ثابت قانون هنری و ضریب انحلال پذیری حجمی
۹۲	۵.۱.۳. تصحیح مؤلفه بخار
۹۳	۶.۱.۳. ضریب انحلال پذیری جرمی
۹۳	۲.۳. فصل مشترک جامد- مایع- گاز
۹۳	۱.۲.۳. تعادل بین دو قطره آب
۹۴	۲.۲.۳. تعادل در فصل مشترک جامد- مایع- گاز
۹۷	۳.۲.۳. زاویه تماس
۹۸	۴.۲.۳. فصل مشترک جامد- مایع- گاز در خاک غیراشباع
۱۰۲	۳.۳. پایین آوردن فشار بخار
۱۰۲	۱.۳.۳. مفاهیم معادله کلوین
۱۰۳	۲.۳.۳. اثبات معادله کلوین
۱۰۸	۳.۳.۳. چگالش مؤینگی
۱۱۱	۴.۳. منحنی مشخصه آب- خاک
۱۱۱	۱.۴.۳. مکش خاک و آب درون خاک
۱۱۲	۲.۴.۳. مدل لوله مؤین
۱۱۵	۳.۴.۳. مدل کره های معادل
۱۲۱	۴.۴.۳. نتیجه گیری
۱۲۱	مسائل فصل سوم
۱۲۵	فصل چهارم. مؤینگی
۱۲۵	۱.۴. معادله یانگ- لاپلاس
۱۲۵	۱.۱.۴. هلال سه بعدی
۱۲۸	۲.۱.۴. تعادل هیدرواستاتیک در لوله مؤین
۱۳۰	۲.۴. ارتفاع صعود مؤینگی
۱۳۰	۱.۲.۴. صعود مؤینگی در لوله
۱۳۲	۲.۲.۴. مدل ناودانک مؤین
۱۳۴	۳.۲.۴. صعود مؤینگی در خاک ایده آل

۱۳۶	..... ۴.۲.۴ صعود موئینگی در خاک
۱۳۸	..... ۳.۴ سرعت صعود موئینگی
۱۳۸	..... ۱.۳.۴ فرمولاسیون هدایت هیدرولیکی در شرایط اشباع
۱۳۹	..... ۲.۲.۴ فرمولاسیون هدایت هیدرولیکی غیراشباع
۱۴۲	..... ۳.۳.۴ صحت‌سنجی تجربی
۱۴۶	..... ۴.۴ توزیع اندازه حفره‌های موئین
۱۴۶	..... ۱.۴.۴ مبنای تئوری
۱۴۷	..... ۲.۴.۴ هندسه حفره‌ها
۱۵۰	..... ۳.۴.۴ روش محاسباتی
۱۵۵	..... ۵.۴ تنش مکشی
۱۵۵	..... ۱.۵.۴ نیروهای بین دو ذره کروی
۱۵۷	..... ۲.۵.۴ فشار در لنز آب
۱۵۹	..... ۳.۵.۴ تنش مؤثر ناشی از موئینگی
۱۶۰	..... ۴.۵.۴ پارامتر تنش مؤثر و درصد رطوبت
۱۶۲	..... مسائل فصل چهارم
۱۶۵	..... بخش ۲ پدیده تنش
۱۶۷	..... فصل پنجم. وضعیت تنش‌ها
۱۶۷	..... ۱.۵ تنش مؤثر در خاک غیراشباع
۱۶۷	..... ۱.۱.۵ دیدگاه ماکرومکانیک
۱۶۹	..... ۲.۱.۵ دیدگاه میکرومکانیک مسئله
۱۷۰	..... ۳.۱.۵ تنش بین دو دانه کروی با زاویه تماس غیرصفر
۱۷۵	..... ۴.۱.۵ رژیم‌های فشار حفره‌ای
۱۷۶	..... ۲.۵ پسماند
۱۷۶	..... ۱.۲.۵ مکانیسم پسماند
۱۷۸	..... ۲.۲.۵ پسماند بطری جوهر
۱۸۰	..... ۳.۲.۵ پسماند زاویه تماس
۱۸۱	..... ۴.۲.۵ پسماند در منحنی مشخصه آب- خاک
۱۸۴	..... ۵.۲.۵ پسماند در پارامتر تنش مؤثر
۱۸۴	..... ۶.۲.۵ پسماند در منحنی مشخصه تنش مکشی
۱۸۷	..... ۳.۵ معرفی تانسور تنش
۱۸۷	..... ۱.۳.۵ تانسورهای تنش نرمال خالص، مکش ماتریسی و تنش مکشی
۱۹۰	..... ۲.۳.۵ تانسورهای تنش در خاک غیراشباع: توصیف مفهومی



۱۹۵	۴.۵. کنترل تنش با انتقال محور
۱۹۵	۱.۴.۵. اصول و مبانی انتقال محور
۱۹۶	۲.۴.۵. تعادل در یک سیستم هوا-آب- HAE
۱۹۸	۳.۴.۵. تعادل در یک سیستم آب- هوا- خاک- HAE
۱۹۸	۴.۴.۵. منحنی مشخصه مصالح HAE
۱۹۹	۵.۴.۵. آزمایش با تنش متغیر کنترل شده
۲۰۲	۵.۵. نمایش گرافیکی تنش
۲۰۲	۱.۵.۵. نمایش تنش نرمال خالص و مکش ماتریسی
۲۰۷	۲.۵.۵. نمایش تنش مؤثر
۲۱۲	مسائل فصل پنجم
۲۱۵	<b>فصل ششم. مقاومت برشی</b>
۲۱۵	۱.۶. معیار گسیختگی موهر- کولمب توسعه یافته
۲۱۵	۱.۱.۶. معیار موهر- کولمب برای خاک اشباع
۲۱۶	۲.۱.۶. مشاهده‌های آزمایشگاهی مقاومت برشی غیراشباع
۲۲۴	۳.۱.۶. معیار موهر-کولمب توسعه یافته
۲۲۶	۴.۱.۶. معیار موهر-کولمب توسعه یافته بر حسب تنش‌های اصلی
۲۲۸	۲.۶. پارامترهای مقاومت برشی برای معیار موهر-کولمب توسعه یافته
۲۲۸	۱.۲.۶. تفسیر نتایج آزمایش سه‌محوری
۲۳۱	۲.۲.۶. تفسیر نتایج آزمایش برش مستقیم
۲۳۳	۳.۶. تنش مؤثر و معیار موهر-کولمب
۲۳۳	۱.۳.۶. غیرخطی بودن پوش موهر-کولمب توسعه یافته
۲۳۵	۲.۳.۶. رویکرد تنش مؤثر
۲۳۷	۳.۳.۶. اندازه‌گیری پارامتر $\chi$ در حین گسیختگی
۲۴۰	۴.۳.۶. تطبیق و تلفیق بین $\Phi_B$ و $\chi_f$
۲۴۱	۵.۳.۶. اعتبار تنش مؤثر به‌منزله متغیر حالت برای مقاومت
۲۴۲	۴.۶. پارامترهای مقاومت برشی برای معیار موهر-کولمب
۲۴۲	۱.۴.۶. تفسیر نتایج آزمایش برش مستقیم
۲۴۴	۲.۴.۶. تفسیر نتایج آزمایش سه‌محوری
۲۴۶	۵.۶. نمایش جامع پوش گسیختگی
۲۴۶	۱.۵.۶. چسبندگی موئینگی به‌منزله یک تابع مشخصه در خاک غیراشباع
۲۵۰	۲.۵.۶. تعیین مقدار چسبندگی موئینگی
۲۵۸	۳.۵.۶. نتیجه‌گیری

۲۵۹	مسائل فصل ششم
۲۶۳	فصل هفتم. مکش و پروفیل‌های فشار خاک
۲۶۳	۱.۷. مکش ثابت و پروفیل‌های درصد رطوبت
۲۶۳	۱.۱.۷. رژیم‌های مکش در خاک غیراشباع
۲۶۵	۲.۱.۷. راه‌حل‌های تحلیلی برای پروفیل‌های مکش ماتریسی
۲۶۸	۳.۱.۷. پارامترهای هیدرولوژی برای انواع خاک‌ها
۲۶۸	۴.۱.۷. پروفیل‌های مکش ماتریسی برای انواع خاک‌ها
۲۶۹	۵.۱.۷. پروفیل‌های درصد رطوبت برای نمونه خاک‌های متفاوت
۲۷۴	۲.۷. پارامتر تنش مؤثر ماندگار و پروفیل‌های تنش
۲۷۴	۱.۲.۷. پروفیل‌های پارامتر تنش مؤثر ( $\chi$ )
۲۷۶	۲.۲.۷. پروفیل‌های مکش و رژیم‌های آن
۲۸۶	۳.۲.۷. پروفیل‌های تنش مکشی برای انواع خاک‌ها
۲۸۸	۴.۲.۷. نتیجه‌گیری
۲۸۹	۳.۷. فشار خاک در حالت سکون
۲۹۰	۱.۳.۷. قانون هوک تعمیم‌یافته
۲۹۲	۲.۳.۷. پروفیل‌های ضریب فشار خاک در حالت سکون
۲۹۴	۳.۳.۷. عمق ترک
۲۹۷	۴.۷. فشار محرک خاک
۲۹۷	۱.۴.۷. معیار گسیختگی موهر-کولمب برای خاک‌های غیراشباع
۲۹۸	۲.۴.۷. وضعیت گسیختگی محرک رانکین
۳۰۱	۳.۴.۷. پروفیل‌های فشار محرک خاک برای تنش مکشی ثابت
۳۰۳	۴.۴.۷. پروفیل‌های فشار محرک خاک برای شرایط تنش مکشی متغیر
۳۰۵	۵.۴.۷. پروفیل‌های فشار محرک خاک با ترک‌های کششی
۳۰۷	۵.۷. فشار مقاوم خاک
۳۰۷	۱.۵.۷. شرایط گسیختگی مقاوم رانکین
۳۱۰	۲.۵.۷. پروفیل‌های فشار مقاوم خاک برای تنش مکشی ثابت
۳۱۲	۳.۵.۷. پروفیل‌های فشار مقاوم خاک برای تنش مکشی متغیر
۳۱۴	۴.۵.۷. نتیجه‌گیری
۳۱۶	مسائل فصل هفتم
۳۱۹	بخش ۳ پدیده جریان
۳۲۱	فصل هشتم. جریان‌های پایدار
۳۲۱	۱.۸. مکانیسم‌های جریان آب‌وهوا

۳۲۱	۱.۱.۸. پتانسیل جریان آب
۳۲۲	۲.۱.۸. مکانیسم‌های جریان هوا
۳۲۲	۳.۱.۸. رژیم‌های جریان آب حفره‌ای و جریان هوای حفره‌ای
۳۲۴	۴.۱.۸. قانون جریان پایدار برای آب
۳۲۶	۲.۸. نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی
۳۲۶	۱.۲.۸. نفوذپذیری در مقایسه با رسانایی
۳۲۸	۲.۲.۸. مقدار، تغییرپذیری و آثار مقیاس
۳۲۹	۳.۸. تابع هدایت هیدرولیکی
۳۲۹	۱.۳.۸. مدل مفهومی تابع هدایت هیدرولیکی
۳۳۲	۲.۳.۸. پسماند در تابع هدایت هیدرولیکی
۳۳۲	۳.۳.۸. رسانایی نسبی
۳۳۴	۴.۳.۸. آثار نوع خاک
۳۳۶	۴.۸. موانع موئینگی
۳۳۶	۱.۴.۸. موانع موئینگی طبیعی و مهندسی شده
۳۳۸	۲.۴.۸. موانع موئینگی مسطح
۳۴۱	۳.۴.۸. موانع موئینگی مایل
۳۴۵	۵.۸. تبخیر و نفوذ پایدار
۳۴۵	۱.۵.۸. نفوذ افقی
۳۴۷	۲.۵.۸. تبخیر و نفوذ قائم
۳۵۵	۶.۸. جریان پایدار بخار
۳۵۵	۱.۶.۸. قانون فیک برای جریان بخار
۳۵۵	۲.۶.۸. تغییرات دما و فشار بخار
۳۵۷	۳.۶.۸. گرادیان دانسیته بخار
۳۵۹	۷.۸. انتشار پایدار هوا در آب
۳۵۹	۱.۷.۸. مبنای تئوری
۳۶۱	۲.۷.۸. انتشار هوا در سیستمی با انتقال محور
۳۶۳	مسائل فصل هشتم
۳۶۵	<b>فصل نهم. جریان‌های گذرا</b>
۳۶۵	۱.۹. اصول جریان سیال حفره‌ای
۳۶۵	۱.۱.۹. اصل بقای جرم
۳۶۶	۲.۱.۹. جریان گذرای اشباع
۳۶۷	۳.۱.۹. جریان گذرای غیراشباع
۳۷۱	۲.۹. سرعت نفوذ

۳۷۱	..... نفوذ افقی گذرا	۱.۲.۹
۳۷۵	..... نفوذ گذرای قائم	۲.۲.۹
۳۷۸	..... پروفیل رطوبت گذرا در شرایط نفوذ قائم	۳.۲.۹
۳۸۱	..... پروفیل‌های مکش و رطوبت گذرا	۳.۹
۳۸۱	..... اهمیت مکش و رطوبت گذرای خاک	۱.۳.۹
۳۸۲	..... حل تحلیلی جریان گذرای غیراشباع	۲.۳.۹
۳۸۸	..... مدل‌سازی عددی جریان گذرای غیراشباع	۳.۳.۹
۳۹۱	..... اصول جریان هوای حفره‌ای	۴.۹
۳۹۱	..... اصل بقای جرم برای هوای تراکم‌پذیر	۱.۴.۹
۳۹۳	..... معادله حاکم بر جریان هوای حفره‌ای	۲.۴.۹
۳۹۴	..... خطی‌سازی معادله جریان هوا	۳.۴.۹
۳۹۶	..... نوسان سینوسی فشار اتمسفریک	۴.۴.۹
۳۹۷	..... تحلیل پمپاژ اتمسفریک	۵.۹
۳۹۷	..... پمپاژ اتمسفریک	۱.۵.۹
۳۹۸	..... چارچوب نظری	۲.۵.۹
۴۰۰	..... تحلیل سری‌های زمانی	۳.۵.۹
۴۰۲	..... تعیین نفوذپذیری هوا	۴.۵.۹
۴۰۸	..... مسائل فصل نهم	

۴۰۹	..... بخش ۴ مدل‌سازی و اندازه‌گیری متغیرهای مصالح	
۴۱۱	..... فصل دهم. اندازه‌گیری مکش	
۴۱۱	..... ۱.۱۰. مروری بر روش‌های اندازه‌گیری	
۴۱۴	..... ۲.۱۰. مکش سنج	
۴۱۴	..... ۱.۲.۱۰. ویژگی‌های مصالح HAE	
۴۱۵	..... ۲.۲.۱۰. اصول اندازه‌گیری کشش سنج	
۴۱۸	..... ۳.۱۰. روش‌های انتقال محور	
۴۱۸	..... ۱.۳.۱۰. آزمایش‌های خنثی و آزمایش‌های استخراج آب حفره‌ای	
۴۱۹	..... ۲.۳.۱۰. صفحات فشار	
۴۲۱	..... ۳.۳.۱۰. سلول‌های فشار تمپ	
۴۲۴	..... ۴.۱۰. سنسورهای هدایت الکتریکی یا گرمایی	
۴۲۵	..... ۵.۱۰. روش‌های اندازه‌گیری رطوبت	
۴۲۵	..... ۱.۵.۱۰. مکش کل و رطوبت نسبی	
۴۲۶	..... ۲.۵.۱۰. رطوبت سنج ترموکوپل	
۴۳۲	..... ۳.۵.۱۰. رطوبت سنج آیینة سردشده	

۴۳۳	..... سنسورهای پلیمری مقاومت- ظرفیت
۴۳۷	..... ۶.۱۰. روش‌های کنترل رطوبت
۴۳۷	..... ۱.۶.۱۰. کنترل رطوبت هم‌فشار
۴۴۰	..... ۲.۶.۱۰. کنترل رطوبت دوفشاری
۴۴۳	..... ۷.۱۰. روش کاغذ فیلتر
۴۴۳	..... ۱.۷.۱۰. اصول اندازه‌گیری کاغذ فیلتر
۴۴۵	..... ۲.۷.۱۰. روش آزمایش و کالیبراسیون
۴۴۹	..... ۳.۷.۱۰. صحت، دقت و عملکرد
۴۵۳	..... مسائل فصل دهم
۴۵۷	..... فصل یازدهم. اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی
۴۵۷	..... ۱.۱۱. بررسی اجمالی تکنیک‌های اندازه‌گیری
۴۵۸	..... ۲.۱۱. تکنیک‌های اندازه‌گیری حالت ماندگار
۴۵۸	..... ۱.۲.۱۱. روش هد ثابت
۴۶۳	..... ۲.۲.۱۱. روش جریان ثابت
۴۶۸	..... ۳.۲.۱۱. روش سانتیفریوژ
۴۷۲	..... ۳.۱۱. تکنیک‌های اندازه‌گیری در حالت گذرا
۴۷۲	..... ۱.۳.۱۱. قابلیت انتشار هیدرولیکی
۴۷۳	..... ۲.۳.۱۱. روش نفوذ افقی
۴۷۸	..... ۳.۳.۱۱. روش‌های جریان خروجی
۴۸۰	..... ۴.۳.۱۱. روش‌های پروفیل آنی
۴۹۰	..... مسائل فصل یازدهم
۴۹۱	..... فصل دوازدهم. مدل‌های مکش و هدایت هیدرولیکی
۴۹۱	..... ۱.۱۲. مدل‌های منحنی مشخصه آب- خاک
۴۹۲	..... ۱.۱.۱۲. پارامترهای مدل‌سازی SWCC
۴۹۴	..... ۲.۱.۱۲. مدل بروکس و کوری (BC)
۴۹۸	..... ۳.۱.۱۲. مدل ون‌گنوختن ()
۵۰۲	..... ۴.۱.۱۲. مدل فردلاند و زینگ (FX)
۵۰۵	..... ۲.۱۲. مدل‌های هدایت هیدرولیکی
۵۰۸	..... ۱.۲.۱۲. مدل‌های تجربی و ماکروسکوپیک
۵۱۶	..... ۲.۲.۱۲. مدل‌های آماری
۵۲۴	..... مسائل فصل دوازدهم

۵۲۷	..... منابع
۵۴۳	..... واژه‌نامه فارسی- انگلیسی
۵۶۱	..... واژه‌نامه انگلیسی- فارسی
۵۷۹	..... نمایه

## نشانه‌ها

واحد	شرح	نشانه
N.m	ثابت هاماکر	A
m <sup>2</sup>	مساحت، مساحت مقطع عرضی	A
m <sup>2</sup>	تصویر مساحت مقطع عرضی	A'
-	ثابت دامنه اتمسفری	A <sub>n</sub>
-	ثابت مدلسازی SWCC	A
kPa	پارامتر مقاومت برشی	a
m	عرض پی	B
-	ضریب طبیعی برای فشار اسمزی	B <sub>2</sub> , B <sub>3</sub>
$\frac{\text{mol}}{\text{l}}$ , mol/m <sup>3</sup>	تمرکز مولاریته محلول	C
1/m	ظرفیت رطوبتی ویژه به منزله تابعی از هد	C(h)
kPa	دامنه فشار هوا	C <sub>n</sub>
بی بعد	ثابت مدلسازی SWCC	C <sub>r</sub>
1/kPa	ظرفیت رطوبتی ویژه به منزله تابعی از مکش	C(ψ)
بی بعد	تابع تصحیح مدلسازی SWCC	C(ψ)
kPa	چسبندگی	c
kPa	چسبندگی مؤثر	c'
kPa	چسبندگی موئینگی	c''
m	قطر کره	D
m	عمق پی	D
C/m <sup>2</sup>	جابه‌جایی الکتریک	D
m <sup>2</sup> /s	پراکندگی	D
m <sup>2</sup> /s	ضریب پراکندگی بخار آب	D <sub>v</sub>
m <sup>2</sup> /s	ضریب پراکندگی هوای آزاد	D <sub>0</sub>
m	قطر ۱۰ درصد ذرات ریزتر	D <sub>10</sub>
m	قطر ۵۰ درصد ذرات ریزتر	D <sub>50</sub>
m	ضخامت لایه مرزی در مرز آب و هوا	d
m	قطر لوله موئینگی	d

پانزده

m	اندازهٔ حفرات نماینده، قطر حفره	d
m	حداکثر قطر حفره در بسته‌بندی مکعبی ساده	$d_{sc}$
m	حداکثر قطر حفره در بسته‌بندی چهارضلعی بسته	$d_{th}$
N.m/kg	انرژی آزاد در واحد جرم	E
kPa	مدول یانگ	E
بی‌بعد	نسبت تخلخل	e
بی‌بعد	نسبت تخلخل در شل‌ترین حالت	$e_{max}$
بی‌بعد	نسبت تخلخل در متراکم‌ترین حالت	$e_{min}$
N	نیروی برآیند، نیروی عکس‌العمل	F
بی‌بعد	عامل پتانسیل واندروالس	f
بی‌بعد	متغیر بی‌بعد تغییر شکل‌پذیری برای فشار زمین	G
بی‌بعد	وزن مخصوص دانه‌های جامد	$G_s$
$m/s^2$	شتاب ثقل	g
Kg/kg	ضریب جرمی حل‌شوندگی برای نمونه‌های گازی نام	$H_i$
$kg/m^3$	درجهٔ رطوبت مطلق محلول	$H_v$
$kg/m^3$	درجهٔ رطوبت مطلق آب آزاد	$H_{v,sat}$
m	هد مکش (مقدار مطلق هد مکش ساختاری)	h
m	هد ورود هوا	$h_a$
m	میانگین هد مکش	$h_{avg}$
m	ارتفاع موئینگی بیشینه	$h_c$
m	هد ارتفاع	$h_e$
m	هد مکش در جبههٔ ترشدگی	$h_i$
L/L	ضریب حجمی حل‌شوندگی برای نمونه‌های گازی نام	$h_i$
m	هد مکش ساختاری (هد مکش منفی)	$h_m$
m	هد مکش اسمزی	$h_o$
m	هد فشار	$h_p$
m	هد کل	$h_t$
m	هد مکش در پشت جبههٔ ترشدگی	$h_0$
بی‌بعد	گرادیان هیدرولیکی	i
بی‌بعد	اندیس‌های سری	i, j, m, s
$m^2$	نفوذپذیری ذاتی	K
بی‌بعد	هدایت هیدرولیکی غیراشباع مقیاس‌شده	K
بی‌بعد	ضریب فشار جانبی محرک	$K_a$

شانزده



بی بعد	ضریب فشار جانبی محرک، شرایط غیراشباع	$K_{au}$
mol/L.bar	ثابت قانون هنری برای نمونه‌های گازی نام	$K_{Hi}$
بی بعد	ضریب فشار جانبی مقاوم	$K_p$
بی بعد	ضریب فشار جانبی مقاوم، شرایط غیراشباع	$K_{pu}$
بی بعد	ضریب فشار جانبی در حالت سکون	$K_0$
m/s	هدایت هیدرولیکی	$k$
m/s	هدایت هیدرولیکی هوا	$k_a$
m/s	هدایت هیدرولیکی نسبی هوا	$k_{ra}$
m/s	هدایت هیدرولیکی نسبی آب	$k_{rw}$
m/s	هدایت هیدرولیکی اشباع	$k_s, k_{sw}$
m/s	هدایت هوای اشباع	$k_{sa}$
m/s	هدایت هیدرولیکی آب	$k_w$
m/s	هدایت هیدرولیکی در جهت $x, y$ و $z$	$k_x, k_y, k_z$
m/s	هدایت هیدرولیکی غیراشباع	$k_\psi$
m	عرض انحراف برای مانع موئینگی	$L$
m	طول نمونه خاک	$L$
بی بعد	پارامتر مقاومت برشی	$M$
mol/L	جرم مولار محلول	$M$
kg	جرم نمونه‌ها $i$	$M_i$
بی بعد	شاخص سری	$m$
بی بعد	متغیر شاخص	$N$
mol <sup>-1</sup>	عدد آووگادرو، $6.02 \times 10^{23}$	$N_A$
بی بعد	پارامترهای ظرفیت باربری	$N_c, N_q, N_\gamma$
%	تخلخل	$n$
بی بعد	ثابت مدلسازی $SWCC$	$n$
بی بعد	شاخص سری	$n$
%	تخلخل پرشده از هوا	$n_a$
mol	مقدار مولاریته نمونه گازی نام	$n_i$
kPa <sup>2</sup>	مجذور فشار هوا	$p$
kPa	میانگین تنش	$p$
بی بعد	هد مکش بر اساس لگاریتم هد برحسب سانتی‌متر آب	$pF$
kPa	میانگین تنش مؤثر	$p'$
بی بعد	متغیر جریان بی بعد	$Q$

هفده

$m^2/s$	ظرفیت پراکندگی برای موانع موئینگی	Q
m	جابه‌جایی نفوذ	Q
$m^3/s$	نرخ جریان حجمی	Q
$m^3/s$	نرخ کل شار سیال	q
m/s	سرعت تخلیه سیال	q
Jol/mol.K	ثابت جهانی گازها	R
m	شعاع انحنای منیسکی	R
m	شعاع دانه خاک	R
m/K	ثابت اتمسفریک خشک	$R_d$
m	میانگین انحنای منیسکی	$R_m$
m/K	ثابت اتمسفریک مرطوب	$R_v$
m	شعاع اصلی سطح تماس آب- هوا	$R_1, R_2$
m	شعاع لوله موئینگی	r
m	شعاع حفره معادل	r
m	شعاع حفره کلوین	$r_k$
m	شعاع حفره	$r_p$
m	شعاع سطح تماس آب- هوا، بیانگر لنز چنبره‌مانند آب	$r_1, r_2$
%	درجه اشباع	S
$m^2/kg$	ناحیه سطحی ویژه	S
%	درجه اشباع مؤثر	$S_e$
%	درجه اشباع پسماند	$S_r$
1/m	ذخیره ویژه	$S_s$
$m/s^{1/2}$	توانایی جذب از طریق موئینگی	s
K	دمای مطلق	T
بی‌بعد	زمان بی‌بعد برای خاستن موئینگی	T
K	دمای نقطه شبنم	$T_d$
K	دمای مجازی	$T_v$
N/m	کشش سطحی	$T_s$
K	دمای مرجع	$T_o$
s	زمان	t
m	ضخامت نازک آب	t
kPa	فشار آب منفذی	u
kPa	فشار هوای منفذی، فشار هوا	$u_a$

kPa	فشار ورود هوا (حباب‌سازی)	$u_b$
kPa	فشار هوای خشک	$u_d$
kPa	مکش انتقالی بین حالت‌های اشباع و غیراشباع	$u_e$
kPa	فشار گیج	$u_g$
kPa	فشار جزئی نمونه‌گازی نام	$u_i$
kPa	فشار بخار اشباع	$u_{sat}$
kPa	فشار بخار جزئی	$u_v$
kPa	فشار بخار اشباع	$u_{v,sat}$
kPa	فشار بخار اشباع	$u_{vo}$
kPa	فشار آب منفذی، فشار آب	$u_w$
kPa	فشار مطلق فاز $x$	$u_x$
kPa	فشار مطلق فاز $y$	$u_y$
kPa	مکش ساختاری	$(u_a - u_w)$
kPa	مکش ورود هوا	$(u_a - u_w)_b$
$m^3$	حجم نمونه نام	$V_i$
$m^3$	حجم کل	$V_t$
$m^3$	حجم حفره	$V_b$
$m^2/s$	ویسکوزیته کینماتیک	$\nu$
m/s	سرعت تخلیه	$v$
L	حجم جزئی نمونه‌گازی نام	$v_i$
%	درصد آب وزنی	$w$
kg	وزن آب منفذی	$w$
%	درصد آب وزنی در درجه اشباع ۱۰۰٪	$w_{sat}$
%	درصد آب وزنی در بسته‌بندی مکعبی ساده	$w_{sc}$
%	درصد آب وزنی در بسته‌بندی چهارضلعی بسته	$w_{th}$
%	مقدار آب کاغذ صافی	$w_{fp}$
بی‌بعد	فاکتور تصحیح برای ضریب حل‌شوندگی هوا در آب	$X$
m	جهت‌های مختصات کارترین	$x, y, z$
بی‌بعد	مسافت بی‌بعد	$Z$
m	عمق ترک	$Z_c$
deg	جهت تنش اصلی	$\alpha$
deg	زاویه تماس	$\alpha$
1/kPa	پارامتر توزیع اندازه حفره، پارامتر مدلسازی SWCC	$\alpha$

نورده

deg	زاویه تماس خشک	$\alpha_d$
m <sup>2</sup> /N	متراکم‌شوندگی بالک خاک	$\alpha_s$
deg	زاویه تماس تر	$\alpha_w$
1/m	پارامتر توزیع اندازه حفره، پارامتر مدلسازی <i>SWCC</i>	$\beta$
بی‌بعد	پارامتر پخش‌شوندگی هوا	$\beta$
m <sup>2</sup> /N	متراکم‌شوندگی آب	$\beta_w$
بی‌بعد	تابع شکل برای جاذبه واندروالسی	$\Gamma$
kN/m <sup>3</sup>	وزن واحد آب	$\gamma$
kN/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص آب	$\gamma_w$
بی‌بعد	جزء تغییر	$\delta$
بی‌بعد	ثابت دی‌الکتریک جزئی	$\varepsilon$
rad	زاویه اولیه فاز	$\varepsilon$
بی‌بعد	کرنش	$\varepsilon$
%	تخلخل	$\varepsilon$
بی‌بعد	مؤلفه‌های کرنش در جهات $x, y, z$	$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$
بی‌بعد	پارامتر مدلسازی <i>SWCC</i>	$\eta$
بی‌بعد	پارامتر افزایش پراکندگی بخار	$\eta$
%	مقدار آب حجمی مقیاس‌شده	$\theta^*$
deg	زاویه پرشدگی	$\theta$
%	مقدار آب حجمی	$\theta$
%	مقدار آب حجمی پسماند	$\theta_r$
%	مقدار آب حجمی اشباع	$\theta_s$
%	مقدار آب حجمی	$\theta_w$
بی‌بعد	پارامتر برازش برای پارامتر تنش مؤثر	$\kappa$
J/kg	گرمای نهان تبخیر	$\lambda$
K/Km	نرخ زوال اتمسفری استاندارد	$\lambda$
بی‌بعد	متغیر انتقال بولتزمن	$\lambda$
بی‌بعد	پارامتر مدلسازی <i>SWCC</i>	$\lambda$
kg/m.s	ویسکوزیته دینامیکی	$\mu$
J/mol یا J/kg	پتانسیل شیمیایی	$\mu$
بی‌بعد	نسبت پواسون	$\mu$
J/mol یا J/kg	پتانسیل شیمیایی ناشی از انحنای سطح تماس	$\mu_c$
J/kg	پتانسیل شیمیایی هوای خشک	$\mu_{da}$

بیست

J/mol یا J/kg	پتانسیل شیمیایی ناشی از جاذبه واندروالس	$\mu_f$
J/mol یا J/kg	پتانسیل شیمیایی نمونه نام	$\mu_i$
J/mol یا J/kg	پتانسیل شیمیایی ناشی از تمرکز محلول	$\mu_o$
J/mol یا J/kg	پتانسیل شیمیایی کل	$\mu_t$
J/kg	پتانسیل شیمیایی بخار آب	$\mu_v$
J/kg	پتانسیل شیمیایی حالت مرجع	$\mu_o$
$m^3/mol$	حجم مولار جزئی هوای خشک	$v_{da}$
$m^3/mol$	حجم مولار جزئی بخار آب	$v_v$
$m^3/mol$	حجم مولار جزئی آب	$v_w$
kPa	فشار اسمزی	$\pi$
m	شعاع سطح تماس آب- هوا	$\rho$
$Kg/m^3$	چگالی هوا	$\rho_a$
$Kg/m^3$	چگالی هوای مرطوب	$\rho_{a,moist}$
$Kg/m^3$	چگالی هوای اولیه	$\rho_{a0}$
$Kg/m^3$	چگالی هوای خشک	$\rho_d$
$Kg/m^3$	چگالی دانه‌های جامد	$\rho_s$
$Kg/m^3$	چگالی بخار آب (رطوبت مطلق)	$\rho_v$
$Kg/m^3$	چگالی آب	$\rho_w$
kPa	تنش کل	$\sigma$
kPa	تنش مؤثر	$\sigma'$
kPa	تنش ناشی از چسبندگی موئینگی	$\sigma_c$
kPa	تنش افقی کل	$\sigma_h$
kPa	تنش نرمال کل	$\sigma_n$
kPa	تنش نرمال مؤثر	$\sigma'_n$
kPa	تنش قائم کل	$\sigma_v$
kPa	تنش اصلی حداکثر	$\sigma_1$
kPa	تنش اصلی میانی	$\sigma_2$
kPa	تنش اصلی حداقل	$\sigma_3$
kPa	تنش نرمال خالص	$\sigma - u_a$
kPa	تنش نرمال خالص در صفحه گسیختگی	$(\sigma_f - u_a)_f$
kPa	تنش برشی	$\tau$
بی بعد	عامل انحنا	$\tau$
m	قطر مولکول آب جذب شده	$\tau$

بیست و یک

kPa	تنش برشی در گسیختگی	$\tau_f$
deg	زاویه شیب برای مانع موئینگی	$\varphi$
deg	زاویه اصطکاک داخلی، با توجه به مکش ساختاری	$\varphi^b$
deg	زاویه اصطکاک داخلی مؤثر	$\varphi'$
بی بعد	پارامتر تنش مؤثر	$\chi$
kPa	تنش مکشی	$\chi(u_a - u_w)$
بی بعد	پارامتر تنش مؤثر در لحظه گسیختگی	$\chi_f$
kPa	فشار مکش	$\psi$
kPa	فشار ورود هوا	$\psi_{aev}$
kPa	فشار ورود هوا (حباب‌سازی)	$\psi_b$
kPa	مکش ماتریسی	$\psi_m$
kPa	مکش اسمزی	$\psi_o$
kPa	مکش کل	$\psi_t$
kPa	مکش ساختاری فرای جبهه ترشدگی	$\psi_0$
kg/mol	جرم مولکولی نمونه $\lambda_m$	$\omega_i$
kg/mol	جرم مولکولی هوا	$\omega_a$
kg/mol	جرم مولکولی هوای خشک	$\omega_d$
kg/mol	جرم مولکولی هوای خشک	$\omega_{da}$
kg/mol	جرم مولکولی آب یا بخار آب	$\omega_w, \omega_v$
بی بعد	کارآمدی مانع موئینگی	$\omega$
rad/s	سرعت زاویه‌ای	$\omega$
	روش پروفیل آنی	$IPM$
%	حد مایع	$LL$
%	حد روانی	$PL$
%	شاخص روانی	$PI$
بی بعد	عدد رینولدز	$Re$
%	رطوبت نسبی	$RH$
	منحنی مشخصه آب- خاک	$SWCC$
	سیستم بسته‌بندی مکعبی ساده	$SC$
	سیستم بسته‌بندی چهارضلعی بسته	$TH$
	سیستم طبقه‌بندی متحد خاک	$USCS$

## پیشگفتار مترجم

این کتاب مقدمه‌ای جامع بر اصول مکانیک خاک غیراشباع شمرده می‌شود. در مکانیک خاک غیراشباع، برخلاف مکانیک خاک کلاسیک، فاز سومی به سیستم دوفاز خاک افزوده می‌شود. برای بررسی خاک غیراشباع، افزون بر اصول مکانیک و هیدرولیک، به دانش فیزیک بین‌سطحی مصالح (ترمودینامیک) نیز نیاز داریم. این مجموعه برای دانشجویان دوره‌های کارشناسی ارشد، دکترا و همچنین، برای محققانی که در زمینه مکانیک خاک و سنگ، هیدرولیک و هیدروودینامیک محیط‌های متخلخل کار می‌کنند، مفید است. برای استفاده بهینه از این کتاب، آشنایی با مفاهیم مکانیک خاک کلاسیک ضرورت دارد. مطالب این کتاب به دوازده فصل تقسیم شده است. در فصل اول، به تعاریف مکانیک خاک غیراشباع، ماهیت بین‌رشته‌ای آن و معرفی پدیده‌های این خاک پرداخته شده و اهداف و ساختار کتاب نیز در این فصل تشریح شده است. در فصل دوم، متغیرهای مصالح، اعم از مشخصات فیزیکی آب و هوا و فشار و رطوبت نسبی، معرفی و بر اساس آن فصل مشترک جامد-مایع-گاز با چند مثال ساده و کاربردی بیان شده است. در فصل سوم، تعادل بین فازهای مایع، گاز و جامد توضیح داده شده است. در فصل چهارم، به پدیده مؤینگی و عوامل مؤثر در آن پرداخته شده و ارتفاع صعود مؤینگی و نیز عوامل مؤثر بر این پدیده در خاک به تفصیل بررسی شده است. فصل پنجم به وضعیت تنش در خاک اختصاص دارد و آن را، از دو دیدگاه میکرومکانیک و ماکرومکانیک، بررسی می‌کند. در این فصل، رژیم‌های فشار حفره‌ای بر اساس درجه اشباع و نیز عوامل مؤثر در پسماند در فرایندهای تر و خشک شدن خاک مطرح می‌شود. فصل ششم مقاومت برشی خاک غیراشباع را بررسی می‌کند و هدف آن توسعه معیار مقاومت برشی موهر-کولمب برای استفاده در مکانیک خاک غیراشباع است. در فصل هفتم، مکش و پروفیل‌های فشار خاک، به‌منظور ارزیابی فشار جانبی در شرایط سکون، مقاوم و محرک تشریح شده است. فصل‌های هشتم و نهم به جریان آب در خاک غیراشباع، در شرایط پایدار و ناپایدار (گذرا)، می‌پردازد. فصل دهم، به روش‌های اندازه‌گیری مکش و نیز ابزار و تجهیزات مورد نیاز پرداخته است و در آن، اصول و مکانیسم این تجهیزات ارزیابی می‌شود. در فصل یازدهم نیز، ابزار و تکنیک‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی مطرح شده است. فصل دوازدهم مدل‌های رفتاری مورد استفاده برای مدلسازی مکش و هدایت هیدرولیکی را مطرح می‌کند. در مجموع، هدف از این کتاب طرح

چارچوبی کلی و جامع برای آشنایی با مفاهیم اساسی مورد استفاده در مکانیک خاک غیراشباع است. بر این اساس، در فصل‌های ابتدایی کتاب، مقدمه‌ای درمورد اصول و مفاهیم مورد نیاز خاک غیراشباع بیان شده و از فصل ششم به بعد، اصول کاربردی و توسعه مکانیک خاک کلاسیک برای کاربرد در مکانیک خاک غیراشباع مطرح می‌شود.

در ترجمه این کتاب، سعی شد حتی‌الامکان از ترجمه تحت‌اللفظی خودداری و از واژگان و اصطلاحات رایج در مکانیک خاک و زبان فارسی استفاده شود. پس از اتمام ترجمه کتاب، متن آن برای ویرایش، در اختیار سه تن از اعضای هیئت علمی، با تخصص ژئوتکنیک، قرار گرفت. پس از دریافت دیدگاه‌های ارزشمند استادان و اعمال آن‌ها در متن، تیم تخصصی ویرایش کتابخانه مرکزی دانشگاه شهید بهشتی، با دقت و وسواس مثال‌زدنی، به ویرایش و تطبیق کتاب با نسخه اصلی پرداخت و به همین دلیل روند چاپ کتاب، پس از پایان ترجمه، بیش از دو سال به طول انجامید. در این مدت، هدف همه افرادی که در تهیه، داوری و ویرایش کتاب نقش داشتند تهیه مجموعه‌ای با کمترین اشکالات علمی و ساختاری بود که، ضمن روان بودن متن، با اصول نگارش فارسی نیز منطبق باشد. بدین ترتیب، بر خود لازم می‌دانم از زحمات سرکار خانم آذر مه سنجری، معاون محترم مرکز نشر آثار علمی، و همکاران ایشان تشکر ویژه‌ای داشته باشم. شایان ذکر است که، در مدت داوری و ویرایش کتاب، ترجمه دیگری از آن منتشر شد که فقط مجموعه‌ای از فصل‌های کتاب را دربر داشت. بدیهی است بیان دیدگاه‌های ارزشمند خواننده محترم، ضمن کمک به اصلاح و ارتقای کتاب، مزید امتنان این‌جانب نیز خواهد بود.

مصطفی زمانیان

۱۳۹۷



## پیشگفتار

اگرچه بخش چشمگیری از مطالب پیش رو، در زمینه مهندسی ژئوتکنیک، دربرگیرنده خاک‌های غیراشباع است؛ رویکرد تحلیل و طراحی کلاسیک همچنان شرایط حالت حدی را، که بیانگر خاک کاملاً خشک یا کاملاً اشباع است، در نظر می‌گیرد. اولین عامل برای در نظر گرفتن چنین فرضی این است که اندازه‌گیری مشخصات خاک‌های دارای یک فاز سیال (برای نمونه، آب یا هوا) بسیار ساده‌تر از خاک‌های دارای دو فاز سیال (برای نمونه، آب و هوا با هم) است. ابتدایی‌ترین توجیه برای چنین فرضی این است که این رویکرد را محافظه‌کارانه بدانیم. مثلاً مقاومت برشی یک خاک اشباع، در نسبت تخلخل یکسان و در شرایط غیراشباع، کمتر از مقاومت برشی همان خاک است. به هر حال، برخی ملاحظات در دهه‌های گذشته ارزیابی مجدد این رویکرد را ضروری می‌دانند.

نخست، فرض شرایط خاک اشباع در برخی کاربردها، همچون ارزیابی تورم پی‌های روی خاک‌های متورم‌شونده یا منبسط‌شونده، مناسب نیست. دوم، پیشرفت‌های تکنولوژی سبب بهبود توانایی ما در اندازه‌گیری، مشخصه‌سازی و پیش‌بینی خواص، رفتار و عملکرد خاک‌های غیراشباع می‌شود. سوم، هزینه‌های در حال افزایش ساخت‌وساز اعتماد همیشگی به محافظه‌کاری را کاهش داده است؛ در نتیجه، انگیزه و محرک کاربرد اصول مکانیک خاک غیراشباع در مسائل مهندسی ژئوتکنیک، در مواردی که شرایط خاک غیراشباع حاکم است، روندی رو به افزایش دارد.

متأسفانه، آموزش و تدریس مریبان در حوزه مکانیک خاک غیراشباع، در حال حاضر، محدود است. این محدودیت تا اندازه‌ای ناشی از کم‌تعداد بودن آموزش‌دهندگان است که در این زمینه آموزش دیده باشند؛ همچنین، حاصل اندک بودن دوره‌های رسمی در این حوزه و کمبود کتاب‌هایی است که بر اصول مکانیک خاک غیراشباع تأکید می‌کنند.

کتاب مکانیک خاک غیراشباع، به‌طور کلی، در پاسخ به تقاضای بسیار مهندسان ژئوتکنیک، که در مکانیک خاک غیراشباع دانش و اطلاعات دارند، و نیز در پاسخ به محدودیت‌های کنونی در تحقیق و آموزش مکانیک خاک غیراشباع نگاشته شده است. نویسندگان در نگارش این کتاب، در طرح مطالب، به‌جای کاربردها، بر اصول تمرکز کرده‌اند زیرا دانش پایه مبتنی بر اصول بهتر حفظ می‌شود و در عمق و وسعت کاربردهایی که در ادامه ذکر خواهند شد، مفیدتر است.

این کتاب، با توجه به تنش و مقاومت خاک‌های غیراشباع، ارزیابی انتقادی در بالاترین سطح دانش موجود را مطرح می‌کند. اصول فیزیک میکروسکوپی در کنار چارچوب ترمودینامیک ماکروسکوپی، برای نگهداشت آب و وضعیت تنش در خاک‌های غیراشباع، پوشش داده شده است. بیان جامع نویسنده، درمورد تکنیک‌های مدلسازی و اندازه‌گیری، نه تنها یادگیری اصول را افزایش می‌دهد بلکه منبع مورد اعتمادی برای بحث‌های بعدی نیز به‌شمار می‌رود. نتیجه کلی کتاب برخورد جامع و کافی با موضوعی را نشان می‌دهد که به‌روشنی و مؤثر نوشته شده و باید، طی سالیان سال، کتابی ارزشمند و منبعی برای ارجاع باقی بماند.

چارلز دی. شاکلفورد  
استاد دانشکده مهندسی عمران  
دانشگاه کلرادو  
فورت کالینز، کلرادو

## مقدمه

هدف اصلی این کتاب فراهم کردن بستری کامل در اصول مکانیک خاک غیراشباع، با استفاده از سه چشم‌انداز کلی ترمودینامیک، مکانیک و هیدرولوژی است. این کتاب به‌منظور راهنمایی اولین دوره در این موضوع نوشته شده و در درجه نخست، برای دانشجویان کارشناسی، کارشناسی ارشد و نیز محققانی که در زمینه‌های کلی بیشتری از مهندسی ژئوتکنیک، علوم خاک، مهندسی محیط‌زیست و هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی سررشته دارند، در نظر گرفته شده است.

در نگارش این کتاب، ایده اصلی این بوده است که اولین کتاب در هر شاخه‌ای از مکانیک باید بر اصولی بنیادی تأکید داشته باشد که پدیده‌های مورد نظر را شامل می‌شود. رویکردی اصول‌محور بیشترین فایده را برای خوانندگان دارد و به‌ویژه، در موضوع مکانیک خاک غیراشباع که زمینه تحقیقاتی و کاربردی نوآمد، پویا و به‌سرعت در حال ظهوری است، مناسب به‌نظر می‌رسد. دیدگاه کلی ما در یادگیری با این جمله توماس هنری هاکسلی (۱۸۹۵-۱۸۲۵) بیان می‌شود: «معلومات اندک‌اند و مجهولات نامحدودند؛ می‌شود چنین انگاشت که ما روی جزیره‌ای در دل اقیانوس توضیح‌ناپذیری قرار داریم. نسل در پی نسل، وظیفه ما این است که کمی بیشتر از این زمین را احیا کنیم.» امیدواریم که این کتاب پیش‌زمینه و انگیزه لازم را برای آن‌هایی فراهم آورد که در پی کشف و احیای اقیانوس آن دسته از مسائل مکانیک خاک غیراشباع‌اند که طبیعت و جامعه عرضه می‌کند.

مقدمه‌ای جامع در مورد مکانیک خاک غیراشباع، در فصل نخست، گردآوری شده تا نقشه راه را، برای ادامه کتاب، در اختیار خوانندگان قرار دهد. فصل اول این موارد را دربر می‌گیرد: مقدمه‌ای کلی در زمینه پدیده‌های خاک غیراشباع (۱.۱)، ساختار و محدوده کتاب (۲.۱)، بحث در مورد نقش مکانیک خاک غیراشباع در طبیعت و کاربرد مهندسی (۳.۱)، تفاوت‌های اساسی مکانیک خاک غیراشباع و مکانیک خاک کلاسیک (اشباع) (۴.۱)، مقدمه‌ای درباره متغیرهای حالت و ماده و قوانین رفتاری که زبان مکانیک خاک غیراشباع را شکل می‌دهند (۵.۱)، مقدمه‌ای در مورد مفاهیم مکش و پتانسیل آب حفره‌ای برای خاک غیراشباع (۶.۱).

باقی کتاب در چهار بخش پیشرو و مرتبط عرضه شده است. بخش I اصول پایه کاربردی در مکانیک خاک غیراشباع را بیان می‌کند. بخش II و III، به‌ترتیب، کاربرد این اصول در

پدیده‌های تنش و جریان در خاک غیراشباع را نشان می‌دهند. در نهایت، بخش IV تکنیک‌های اصلی اندازه‌گیری و مدل‌سازی استفاده‌شده برای متغیرهای حالت و ماده در توصیف این پدیده‌های تنش و جریان را توصیف و ارزیابی می‌کند.

در نگارش سه بخش اول این کتاب، چشم‌اندازی پیشنهاد شده که اصول فیزیک میکروسکوپی و چارچوب ترمودینامیک ماکروسکوپی را، برای نگهداشت آب حفره‌ای و حالت تنش در خاک غیراشباع، با هم ترکیب می‌کند. برای توصیف پدیده جریان غیراشباع، دو رابطه ساختاری به نام منحنی مشخصه آب- خاک و منحنی مشخصه هدایت هیدرولیکی مورد نیاز است. برای پدیده تنش غیراشباع، ادعا می‌کنیم که به رابطه‌ای اضافی، به نام منحنی مشخصه تنش مکشی، نیاز داریم.

مطالب بیان‌شده در این کتاب نتیجه تدریس مکانیک خاک غیراشباع در مؤسسه School of Mines کلرادو و دانشگاه میسوری- کلمبیا، طی چهار سال گذشته، برای دانشجویان کارشناسی ارشد است. این کتاب دربرگیرنده مطالب کافی برای دوره‌ای برابر با یک ترم، همراه با آزمایشگاه، و در ادامه درس‌های ژئومکانیک یا ژئوزیست‌محیطی است. مسائلی در انتهای هر بخش آورده شده که راه‌حل آن‌ها در تارنمای ناشر به نشانی [www.wiley.com](http://www.wiley.com) موجود است.

اگرچه بسیاری از همکاران در عرضه کتاب، به شکل حاضر، یاریگر بوده‌اند؛ هر خطا، پیش‌داوری یا اشتباهی بر عهده ماست. از این افراد، که بسیار سخاوتمندانه بازنگری‌های روشنگرانه‌ای برای دست‌کم یک فصل داشته‌اند، سپاسگزاریم: جینی کاررا، ماندار م. دولکار، سوزان ایستز، شمین جه، جاناتان و. گود، د. ووگان گریفیتس، لارینو ر. هویوس، ناصر خلیلی، ک. ک. مورالیتاران، هارولد و. اولسن، پاول م. سانتی، چارلز د. شاکلفورد، رادهی س. شرما، الکساندر ویلاس، و چانگفو وی.

نینگ لو

ویلیام ج. لیکوس

## فصل اول

### شرایط غیراشباع خاک

#### ۱.۱. پدیده خاک غیراشباع

##### ۱.۱.۱. تعریف مکانیک خاک غیراشباع

تعریف دقیق مکانیک خاک غیراشباع<sup>۱</sup> همواره چالشی آکادمیک به‌شمار رفته است و اتفاق نظر خاصی در مورد آن وجود ندارد. با بازبینی تعریف کلاسیک مکانیک خاک که ترزاقی<sup>۲</sup> در حدود شصت سال پیش انجام داد، شاید بتوان حدود و زمینه‌هایی ترسیم کرد. در نخستین کتاب ترزاقی در سال ۱۹۴۳، با عنوان *تئوری مکانیک خاک*<sup>۳</sup>، مکانیک خاک بدین صورت تعریف شده است: «مکانیک خاک عبارت است از کاربرد قوانین مکانیک و هیدرولیک در مسائل مهندسی مرتبط با رسوبات و سایر نهشته‌های تحکیم‌نیافته ذرات جامد تولیدشده از تجزیه و فروپاشی فیزیکی و شیمیایی سنگ‌ها، صرف‌نظر از اینکه دربردارنده مخلوطی از ترکیبات آلی باشند یا نباشند». برای بیان چنین تعریفی از مکانیک خاک، ترزاقی به سه اصل بنیادی اشاره دارد: ۱. مصالح زمین‌شناسی؛ ۲. اصول مکانیک و هیدرولیک؛ ۳. مسائل مهندسی.

برای استفاده تئوریک یا عملی از مکانیک خاک غیراشباع در مهندسی ژئوتکنیک، باید تعریف مقدماتی ترزاقی را اصلاح کرد. مصالح خاکی مرتبط با مکانیک خاک غیراشباع تقریباً همان مصالح تعریف‌شده در مکانیک خاک ترزاقی‌اند که در شرایط ویژه غیراشباع قرار دارند. عبارت توصیفی «غیراشباع» دربردارنده مفهومی مشابه با مفهوم نیمه‌اشباع است و نشان می‌دهد که درجه اشباع آب حفره‌ای مقداری کمتر از واحد است. به بیان دقیق‌تر، یک فاز سوم به سیستم دوفاز خاک اشباع افزوده می‌شود. در عرصه مدرن آموزشی و یا حرفه‌ای مهندسی ژئوتکنیک، زمانی که به‌طور معمول گستره بررسی خاک به شرایطی همچون شرایط مصالح

---

1. unsaturated soil mechanics  
3. *Soil Mechanics Theory*

2. Karl Terzaghi