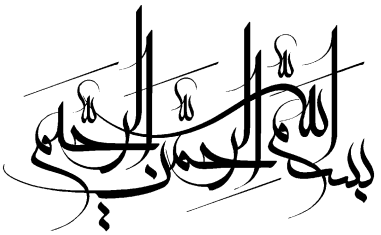


مکانیک خاک غیراشباع

تألیف

دکتر کاظم بدو

توجه

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلّفان و مصنّفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیهٔ فایل‌های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازهٔ کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود.

سرشناسه	**بدو، کاظم، ۱۳۳۷ -**
عنوان و نام پدیدآور	**مکانیک خاک غیراشباع/ تالیف کاظم بدو**
	ویراستار علمی حسین رضایی؛ ویراستار ادبی فاطمه مدرسی.
مشخصات نشر	**ارومیه: دانشگاه ارومیه، ۱۴۰۲.**
مشخصات ظاهری	**۴۶۳ ص.**
فروست	**انتشارات دانشگاه ارومیه؛ ۳۲۷.**
شابک	**978-622-5791-22-0**
وضعیت فهرست نویسی	**فیپا**
موضوع	**خاک -- مکانیک -- راهنمای آموزشی (عالی) -- Soil mechanics -- Study and teaching (Higher)**
موضوع	**خاک -- رطوبت -- راهنمای آموزشی (عالی) -- Soil moisture -- Study and teaching (Higher)**
موضوع	**خاک – نفوذپذیری Soil permeability**
شناسه افزوده	**رضایی، حسین، ۱۳۴۰-، ویراستار**
شناسه افزوده	**دانشگاه ارومیه Urmia University**
رده بندی کنگره	**۷۱۰TA**
رده بندی دیویی	**۶۲۴/۱۵۱۳۶۰۷۶**
شماره کتابشناسی ملی	**۹۱۶۳۲۳۶**

مرکز انتشارات دانشگاه ارومیه

ارومیه، تلفن: ۳۱۹۴۲۲۷۴ -۳۲۷۷۹۹۳۰ -۰۴۴ ، دورنگار: ۳۲۷۷۹۹۳۰ -۰۴۴

عنوان: مکانیک خاک غیراشباع

تألیف: کاظم بدو

ناشر: انتشارات دانشگاه ارومیه

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: طاها نگار

نوبت چاپ: اول

سال چاپ:۱۴۰۲

شمارگان: ۷۰۰ نسخه

قیمت پشت جلد: ۲۷۰۰۰۰ تومان

شابک: ۰-۲۲-۵۷۹۱-۶۲۲-۹۷۸

به نام خدا

پیشگفتار

بناها و سازه‌ها در روی زمین ساخته می‌شوند و با لایه‌های خاکِ زیرسطحیِ زمین، اندرکنش نشان می‌دهند. در اغلب نقاط زمین، تراز آب زیرزمینی پائین‌تر از سطح زمین و در عمق مشخصی قرار دارد و موجب می‌شود قشری از لایه‌های زمین به صورت غیراشباع، دارای مکش و فشار آب حفره‌ای منفی و قشری نیز به صورت اشباع، با فشار آب حفره‌ای مثبت باشند. اغلب بناها و سازه-های ساخته شده توسط انسان، در روی قشر غیراشباع زمین احداث می‌شوند که از چهار فاز دانه-های جامد، آب، هوا و جلد انقباضی تشکیل شده است. به همین جهت، اهمیت شناخت از رفتار لایه‌های غیراشباع خاک موجب شده است که دانشمندان و مهندسین دست‌اندرکار در مهندسی ژئوتکنیک، مطالعهٔ رفتار خاک‌های غیراشباع را به عنوان یک ضرورت مورد توجه ویژه قرار دهند. اهمیت مطالعهٔ خاک‌های غیراشباع از نگاه مهندسی برای اولین بار در کتاب مکانیک خاک کارل ترزاقی[1] در اوایل قرن نوزدهم میلادی دیده می‌شود. برگزاری اولین کنفرانس خاک‌های غیراشباع در سال ۱۹۹۵ میلادی در فرانسه و به دنبال آن دومین کنفرانس در سال ۱۹۹۸ در چین، سومین کنفرانس در سال ۲۰۰۲ در برزیل، چهارمین کنفرانس در سال ۲۰۰۶ در آمریکا، پنجمین کنفرانس در سال ۲۰۱۰ در اسپانیا، ششمین کنفرانس در سال ۲۰۱۴ در استرالیا، هفتمین کنفرانس در سال ۲۰۱۸ در هنگ‌کنگ و هشتمین کنفرانس در سال ۲۰۲۳ در یونان، همگی اهمیت موضوع مکانیک خاک‌های غیراشباع را نشان می‌دهد.

درس رفتار خاک‌های غیراشباع یکی از دروس تخصصی مهم در رشته‌های کارشناسی ارشد و دکتری ژئوتکنیک در مهندسی عمران به شمار می‌رود. همچنین این درس یک درس میان‌رشته‌ای محسوب می‌گردد و مطالب آن در سایر رشته‌های علوم و مهندسی چون آب، محیط‌زیست، زمین-شناسی و کشاورزی نیز کاربرد دارد.

پس از یک دهه و اندی تدریس درس رفتار خاک‌های غیراشباع در رشتهٔ دکتری ژئوتکنیک، اینجانب برآن شدم تا کتاب حاضر را به رشته تحریر درآورم تا دانشجویان، مهندسین و متخصصین

---

[1]- Karl Terzaghi

گرامی بخشی از مطالب مربوط به این موضوع را به صورت مدوّن در قالب یک کتاب در اختیار داشته باشند. وظیفهٔ خود می‌دانم از دانشمندان برجسته این علم، آقایان پروفسور فردلاند[1] و پروفسور باربور[2] (اساتید بازنشسته دانشگاه ساسکاچوان کانادا) و پروفسور رُو[3] (استاد دانشگاه کوئینز کانادا) با احترام یاد کنم. این اساتید بزرگوار، حق استادی به گردن اینجانب داشته و یادگیری این شاخه از مهندسی ژئوتکنیک را مدیون راهنمایی‌ها و تألیفات آنان می‌دانم. از دانشجویان عزیزی که در طی سالیان متمادی در کلاس‌های دروس مکانیک خاک، مکانیک-خاک پیشرفته و رفتار خاک‌های غیراشباع اینجانب شرکت نموده و با طرح مباحث و سؤالات مهم مرا به تفکر، مطالعه و تحقیق بیشتر در زمینهٔ رفتار خاک‌های غیراشباع راغب نموده‌اند نیز قدردانی می‌نمایم.

کتاب حاضر مشتمل بر ۸ فصل به شرح زیر است: در فصل اول به طور اجمال تاریخچه و مبانی مکانیک خاک غیراشباع، مثال‌های از مسائل مربوط به خاک‌های غیراشباع، انواع خاک‌های غیراشباع و فازهای خاک غیراشباع، تشریح شده است. فصل دوم به ویژگی‌ها و روابط فازی یا روابط جرمی- حجمی خاک‌های غیراشباع می‌پردازد. فصل سوم به موضوع مهم متغیرهای حالت تنش، تاریخچه متغیرها، شرایط حدی و آزمایش‌های آزمایشگاهی متغیرهای حالت تنش می-پردازد. فصل چهارم مکش در خاک‌های غیراشباع را توضیح می‌دهد. در این فصل به موضوعاتی چون تئوری مکش، موئینگی، اندازه‌گیری مکش‌ها شامل مکش کل، مکش کالبدی و مکش اسمزی پرداخته شده است. در فصل پنجم قوانین جریان آب و هوا در خاک‌های غیراشباع شامل قوانین دارسی و فیک (قانون انتشار یا دیفیوژن) و ضرایب نفوذپذیری فازهای آب و هوا تشریح شده است. فصل ششم نحوهٔ اندازه‌گیری و دستگاه‌های اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری فازهای آب و هوا را توضیح می‌دهد. در فصل هفتم به موضوع مهم مبانی انتقال آلودگی در خاک‌های اشباع و غیراشباع پرداخته شده است. ابتدا انواع فرآیندهای انتقال آلودگی و معادلات مربوطه توضیح داده شده و در آخر، رابطهٔ بین ضریب انتشار مولکولی و درصد رطوبت در خاک‌های غیراشباع مورد بحث قرار گرفته است. در فصل هشتم تعدادی از مدل‌های فیزیکی آزمایشگاهی

---

[1]- Prof. D. G. Fredlund (University of Saskatchewan, Canada)
[2]- Prof. S. L. Barbour (University of Saskatchewan, Canada)
[3]- Prof. R. K. Rowe (Queen's University, Canada)

برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در خاک‌های نزدیک اشباع و غیراشباع تشریح شده‌اند که حاصل تحقیقات انجام شده توسط مؤلف در این زمینه است.

همان‌طورکه از محتوای مطالب تشریح شده در فصول هشت‌گانهٔ کتاب پیداست، از میان موضوعات گسترده و متنوع در زمینهٔ رفتار خاک‌های غیراشباع، رفتار هیدرولیکی آنها چون مکش، نفوذپذیری، جریان آب و هوا و دینامیک انتقال آلودگی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. امید است این مطالب مورد استفادهٔ مخاطبین محترم اعم از اساتید، دانشجویان، مهندسین و کارشناسان عزیز فعال در رشته‌های مختلف مهندسی خصوصاً مهندسی ژئوتکنیک قرار گیرد. بدیهی است به دلیل گستردگی موضوعات مطرح در زمینهٔ رفتار خاک‌های غیراشباع، مطالب ارائه شده در این کتاب شامل تمامی این موضوعات نبوده و بخشی از این مطالب را پوشش می‌دهد. به این دلیل، از خوانندگان محترم درخواست می‌شود برای تکمیل اطلاعات خود در زمینهٔ رفتار خاک‌های غیراشباع، ضمن مراجعه به منابع و مآخذ ارائه شده در آخر کتاب، به کتب تألیفی معتبر و ارزشمند دیگر نیز مراجعه نمایند.

کاظم بدو

استاد گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه

تابستان سال ۱۴۰۲

فهرست مطالب

فصل اول - **مقدمه‌ای بر خاک‌های غیراشباع** ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- نقش آب و هوا ۴

۱-۳- مثال‌هایی از مسائل مربوط به خاک‌های غیراشباع ۷

۱-۳-۱- ساخت و بهره‌برداری از یک سد خاکی ۷

۱-۳-۲- شیروانی‌های طبیعی در معرض تغییرات محیطی ۱۰

۱-۳-۳- انباشت آب در زیر استخر ذخیرهٔ فاضلاب ۱۲

۱-۳-۴- پایداری حفاری‌های با سطح قائم و یا نزدیک قائم ۱۲

۱-۳-۵- ظرفیت باربری خاک در پی‌های سطحی ۱۳

۱-۳-۶- ظرفیت باربری خاک در پی‌های سطحی ۱۵

۱-۳-۷- تغییر حجم خاک در خاک‌های تورمی ۱۶

۱-۳-۸- خاک‌های رمبنده ۱۸

۱-۳-۹- خلاصهٔ مثال‌هایی از مسائل مربوط به خاک‌های غیراشباع ۱۸

۱-۴- پروفیل‌های تیپ از خاک‌های غیراشباع ۱۹

۱-۴-۱- پروفیل تیپ خاک پسماند گرمسیری ۲۰

۱-۴-۲- پروفیل تیپ خاک‌های تورمی ۲۲

۱-۵- اهمیت شناخت از رفتار خاک‌های غیراشباع ۲۵

۱-۶- فازهای خاک غیراشباع ۲۹

۱-۶-۱- تعریف یک فاز ۲۹

۱-۶-۲- مرز بین آب و هوا یا جلد انقباضی ۳۰
۱-۷- تعاریف و واژگان فنی ۳۱
سؤال‌ها ۳۴

فصل دوم - **ویژگی‌ها و روابط فازی در خاک‌های غیراشباع** ۳۹
۲-۱- مقدمه ۳۹
۲-۲- ویژگی‌های فازها ۴۱
۲-۲-۱- دانسیته و حجم مخصوص ۴۱
۲-۲-۲- ویسکوزیته ۴۷
۲-۲-۳- کشش سطحی ۵۰
۲-۳- اندرکنش آب و هوا ۵۴
۲-۳-۱- حالت‌های جامد، مایع و بخار آب ۵۴
۲-۳-۲- بخار آب ۵۶
۲-۳-۳- حل شدن هوا در آب ۵۷
۲-۴- روابط جرمی- حجمی ۶۲
۲-۴-۱- پوکی ۶۲
۲-۴-۲- نسبت تخلخل ۶۳
۲-۴-۳- درجهٔ اشباع خاک ۶۵
۲-۴-۴- درصد رطوبت ۶۶
۲-۴-۵- دانسیتهٔ خاک ۶۶
۲-۴-۶- روابط جرمی- حجمی پایه ۶۷
۲-۴-۷- تغییرات در خصوصیات جرمی- حجمی ۷۱
۲-۴-۸- دانسیتهٔ ترکیب دانه‌ها، آب و هوا در اثر تراکم فاز هوا ۷۳
سؤال‌ها ۸۱

فصل سوم - **متغیرهای حالت تنش** ۸۴
۳-۱- مقدمه ۸۴
۳-۲- تاریخچهٔ تعریف حالت تنش ۸۵
۳-۲-۱- نظریهٔ تنش مؤثر برای یک خاک اشباع ۸۶
۳-۲-۲- روابط تنش مؤثر برای یک خاک غیراشباع ۸۷
۳-۳- متغیرهای حالت تنش برای خاک‌های غیراشباع ۹۵
۳-۳-۱- آنالیز تعادل برای خاک‌های غیراشباع ۹۶
۳-۳-۲- متغیرهای حالت تنش ۱۰۰
۳-۳-۳- خاک‌های اشباع به عنوان حالت خاصی از خاک‌های غیراشباع ۱۰۳
۳-۳-۴- خاک‌های خشک ۱۰۵
۳-۴- شرایط حدی حالت تنش ۱۰۸
۳-۵- آزمایش‌های آزمایشگاهی متغیرهای حالت تنش ۱۱۰
۳-۵-۱- نظریهٔ انتقال محور ۱۱۱
۳-۵-۲- آزمایش‌های خنثی برای ارزیابی متغیرهای حالت تنش ۱۱۳
۳-۵-۳- سایر شواهد آزمایشگاهی برای تأیید متغیرهای حالت تنش پیشنهادی ۱۱۴
۳-۶- آنالیز تنش ۱۱۸
۳-۶-۱- پروفیل‌های محلی (برجا) اجزای تنش ۱۱۹
۳-۷- نقش مکش اسمزی ۱۲۷
سؤال‌ها ۱۳۰

فصل چهارم - **مکش در خاک‌های غیراشباع** ۱۳۳
۴-۱- تئوری مکش خاک ۱۳۳

۴-۱-۱- اجزای مکش خاک ۱۳۶
۴-۱-۲- مقادیر تیپ مکش و وسایل اندازه‌گیری آنها ۱۳۹
۴-۲- موئینگی ۱۴۰
۴-۲-۱- ارتفاع موئینگی ۱۴۱
۴-۲-۲- فشار موئینگی ۱۴۴
۴-۲-۳- ارتفاع موئینگی و اثرات شعاع ۱۴۶
۴-۳- اندازه‌گیری مکش کل خاک ۱۴۸
۴-۴- اندازه‌گیری مکش کالبدی خاک ۱۴۸
۴-۴-۱- دیسک‌های سرامیکی با فشار ورود هوای بالا ۱۴۹
۴-۴-۲- اندازه‌گیری مستقیم فشار آب حفره‌ای منفی خاک ۱۵۴
۴-۵- اندازه‌گیری مکش اسمزی خاک ۱۶۶
۴-۵-۱- تکنیک‌های عصاره‌گیری ۱۶۷
سؤال‌ها ۱۷۰

فصل پنجم - **قوانین جریان آب و هوا در خاک‌های غیراشباع** ۱۷۳
۵-۱- جریان آب ۱۷۴
۵-۱-۱- عامل محرک برای فاز آب ۱۷۷
۵-۱-۲- قانون دارسی برای خاک‌های غیراشباع ۱۸۱
۵-۱-۳- ضریب نفوذپذیری فاز آب ۱۸۳
۵-۲- جریان هوا ۲۰۰
۵-۲-۱- نیروی محرکهٔ فاز هوا ۲۰۱
۵-۲-۲- قانون فیک برای فاز هوا ۲۰۱
۵-۲-۳- ضریب نفوذپذیری فاز هوا ۲۰۶
۵-۳- انتشار (دیفیوژن) ۲۱۰

۵-۳-۱- دیفیوژن هوا از میان آب ۲۱۰
۵-۳-۲- دیفیوژن شیمیایی از میان آب ۲۱۴
۵-۳-۳- دیفیوژن هوا از میان خاک غیراشباع ۲۱۵
۵-۴- خلاصه قوانین جریان ۲۱۸
سؤال‌ها ۲۲۰

فصل ششم - **تعیین ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع** ۲۲۴
۶-۱- مقدمه ۲۲۴
۶-۲- اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آب ۲۲۵
۶-۲-۱- روش‌های مستقیم برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آب ۲۲۵
۶-۲-۲- دستگاه اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آب و هوا برای خاک‌های پسماند غیراشباع ۲۳۴
۶-۲-۳- روش‌های غیرمستقیم برای محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع ۲۳۶
۶-۲-۴- استفاده از کدهای کامپیوتری برای محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع ۲۵۳
۶-۳- اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری هوا ۲۵۵
۶-۴- اندازه‌گیری انتشار (دیفیوژن) ۲۶۷
۶-۴-۱- مکانیزم‌های انتشار هوا از میان دیسک‌های با ورود هوای بالا ۲۶۸
۶-۴-۲- اندازه‌گیری ضریب انتشار هوا ۲۷۰
۶-۴-۳- نشانگرهای حجم هوای منتشر شده ۲۷۴
سؤال‌ها ۲۸۳

فصل هفتم - **مبانی انتقال آلودگی در خاک‌های غیراشباع** ۲۸۶
۷-۱- مقدمه ۲۸۶

۷-۲- حرکت آلودگی از میان محیط متخلخل اشباع ۲۹۱
۷-۳- فرآیند انتقال آلودگی به طریقهٔ فرارفت (ادوکشن) ۲۹۱
۷-۴- فرآیند انتقال آلودگی به طریقهٔ انتشار مولکولی (دیفیوژن) ۲۹۲
۷-۵- انتقال آلودگی با فرآیندهای فرارفت - انتشار مولکولی ۲۹۴
۷-۶- انتقال آلودگی با فرآیند پخش ۲۹۵
۷-۷- فرآیند جذب ۲۹۷
۷-۸- فرآیندهای زوال بیولوژیکی و رادیواکتیو ۲۹۹
۷-۹- معادلات دیفرانسیل حاکم بر انتقال آلودگی در خاک‌های اشباع ۳۰۰
۷-۱۰- انتقال آلودگی در خاک‌های غیراشباع ۳۰۲
۷-۱۱- رابطهٔ بین ضریب انتشار مولکولی و درصد رطوبت
در خاک‌های غیراشباع ۳۰۸
سؤال‌ها ۳۲۰

فصل هشتم- **مدلهای آزمایشگاهی انتقال آلودگی در خاک‌های غیراشباع** ۳۲۳
۸-۱- مقدمه ۳۲۳
۸-۲- مدلسازی آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی
در یک لندفیل مهندسی ۳۲۵
۸-۲-۱- مدل آزمایشگاهی انتشار مولکولی از میان خاک دانه‌ای
(ماسهٔ ریزدانه) نزدیک اشباع ۳۲۸
۸-۲-۲- مدل آزمایشگاهی انتشار مولکولی از میان خاک دانه‌ای
غیراشباع (ماسهٔ درشت‌دانه و شن ریزدانه) ۳۳۴
۸-۲-۳- مدل آزمایشگاهی انتشار مولکولی از میان خاک-
سیلت رسی متراکم نزدیک اشباع ۳۴۴
۸-۲-۴- مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایهٔ خاک سیلت-
رسی روی ماسهٔ ریزدانه (هر دو در حالت نزدیک اشباع) ۳۴۷

۸-۲-۵- مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایهٔ خاک سیلتِ نزدیک اشباع روی شن ریزدانهٔ غیراشباع ۳۵۳
۸-۲-۶- مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایهٔ خاک سیلتِ نزدیک اشباع روی زهکش سنگ‌دانه‌ای غیراشباع، تحت جریان آب با سرعت بالا و متوسط ۳۶۸
۸-۲-۷- مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایهٔ خاکِ سیلت رسی نزدیک اشباع روی زهکش سنگ‌دانه‌ای غیراشباع، تحت جریان آب با سرعت کم ۳۹۴
سؤال‌ها ۴۰۸

منابع و مآخذ ۴۱۱
ضمیمه ۴۴۹
واژه‌یاب ۴۵۳

۱

مقدمه‌ای بر مکانیک خاک‌های غیراشباع

۱-۱- مقدمه

موضوع مکانیک خاک شامل ترکیبی از مکانیک مهندسی و خواص خاک‌ها است که به دلیل گستردگی می‌تواند طیف وسیعی از انواع خاک‌ها را در بر بگیرد. حفره‌های این خاک‌ها یا می‌توانند کاملاً با آب اشباع شوند و یا به همراه آب، مایعات و یا گازهای دیگری (مانند هوا) نیز در حفره‌ها جایگزین شوند. توسعهٔ علم مکانیک خاک کلاسیک باعث شده است تا در کنار خاک‌هایی که به طور معمول در طبیعت یافت شده‌اند و دارای رفتار شناخته شده‌ای هستند، انواع دیگری از خاک‌ها نیز که دارای رفتار خاصی هستند توجه محققین و مهندسین را به خود جلب کند. از این نوع خاک‌ها به خاک‌های غیراشباع می‌توان اشاره نمود.

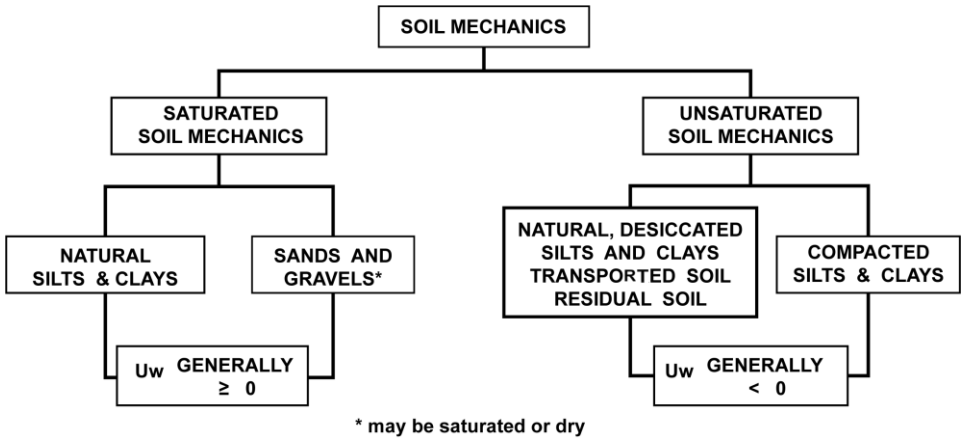
تاکنون تالیفات ارزشمندی در خصوص رفتار خاک‌های غیراشباع به چاپ رسیده است و در دسترس علاقمندان قرار دارد. از اوایل دهۀ پنجاه میلادی تاکنون کنفرانس‌های بین المللی مختلفی در ارتباط با خاک‌های غیراشباع و موضوع‌های مرتبط با این نوع خاک‌ها مانند رفتار خاک‌های تورمی، برگزار شده است که مجموعه مقالات آنها در دسترس قرار دارد. از سال ۱۹۹۵ میلادی نیز به طور مرتب "کنفرانس بین‌المللی مکانیک خاک‌های غیراشباع[1]" در کشورهای مختلف برگزار می‌شود که دانشمندان عرصۀ ژئوتکنیک در این کنفرانس‌ها آخرین یافته‌های خود را با دیگران به اشتراک می‌گذارند. تاکنون دانشمندان زیادی در حوزۀ مهندسی ژئوتکنیک، در تدوین و اشاعۀ علم مکانیک خاک‌های غیراشباع تلاش‌های شایان تقدیری نموده‌اند که از یافته‌ها و تالیفات تعدادی از آنها در تهیۀ این کتاب استفاده شده است [۱-۱ الی ۱-۱۷].

در مهندسی، مواد بسیاری وجود دارد که رفتار آنها با اصول و مفاهیم مکانیک خاک کلاسیک و اشباع سازگار نیست. معمولاً، وجود بیش از دو فاز (دانه‌ها، آب و هوا) در خاک غیراشباع باعث می‌شود که کار کردن با این نوع خاک در کارهای مهندسی قدری دشوارتر از کار کردن با خاک اشباع باشد. خاک‌هایی که غیراشباع هستند طیف وسیعی از خاک‌ها را شامل می‌شوند که توصیف کامل رفتار آنها با استفاده از مبانی کلاسیک مکانیک خاک‌های اشباع ناممکن است.

موضوع کلی مکانیک خاک را می‌توان به دو بخش خاک‌های اشباع و خاک‌های غیراشباع تقسیم نمود (شکل ۱-۱) [۱-۱۸]. فرق بین رفتار خاک‌های اشباع با رفتار خاک-های غیراشباع به دلیل وجود تفاوت‌های اساسی در ماهیت و رفتار مهندسی آنها است. خاک غیر اشباع دارای بیش از دو فاز است و فشار آب حفره‌ای نسبت به فشار هوای حفره-ای، منفی است. هرگونه خاک در نزدیکی سطح زمین که در محیطی نسبتاً خشک قرار داشته باشد، در معرض فشار آب حفره‌ای منفی و شرایط غیراشباع قرار خواهد گرفت.

[1]- International Conference on Unsaturated Soils

در یک عملیات عمرانی، فرآیند خاکبرداری، دست خورده شدن خاک و سپس تراکم مجدد آن، منجر به تولید یک خاک غیراشباع می‌شود. این مواد دستهٔ بزرگی از خاک‌ها را تشکیل می‌دهند که توصیف و تحلیل رفتار آنها در چارچوب مکانیک‌خاک کلاسیک دشوار است.



شکل ۱-۱- تقسیم‌بندی مکانیک خاک [۱-۱۸]

رسوبات طبیعی خاک که سطح وسیعی از زمین را پوشانده‌اند، دارای مقادیر نسبتاً کمی از آب در بافت خود هستند. خاک‌های رسی که دارای خاصیت خمیری بالایی هستند و در معرض تغییرات محیطی قرار دارند، دسته‌ای از مواد را تشکیل می‌دهند که به نام خاک‌های تورمی (خاک‌های دارای خاصیت افزایش‌حجمی) شناخته می‌شوند. کاهش حجم خاک نیز عیناً ممکن است مشکلاتی را در عملیات مهندسی به وجود آورد. خاکهای سیلتیِ سست غالباً هنگام قرار گرفتن در معرض رطوبت محیط و همچنین تحت اثر بارگذاری، دچار فروپاشی می‌شوند. فشار آب حفره‌ای در هر دو مورد فوق در ابتدا منفی است و تغییرات حجم (افزایش و یا کاهش) در این نوع خاک‌ها، در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ای رخ می‌دهد.

خاکهای پسماند[1] در سالهای اخیر موجب بروز مشکلاتی در عملیات عمرانی شده است. عامل اولیه در بروز رفتارهای نامتعارف در این نوع خاکها وجود فشار آب حفره‌ای منفی در آنها است. تلاش‌های متعددی از طرف دانشمندان و مهندسین برای توصیف و تحلیل رفتار خاک‌های فوق صورت پذیرفته؛ لیکن همهٔ این تلاش‌ها با موفقیت همراه نبوده است.

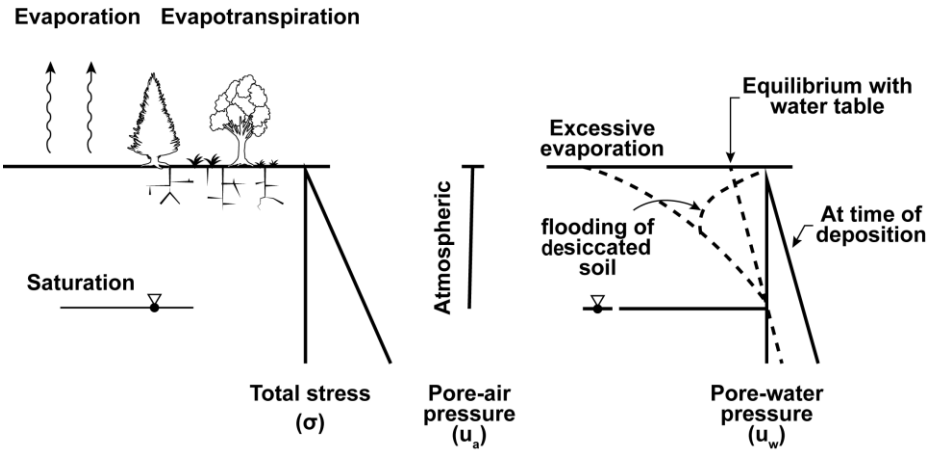
خاک غیراشباع معمولاً با داشتن سه فاز تعریف میشود: (۱) دانه‌های جامد، (۲) آب و (۳) هوا. با این وجود، ممکن است صحیح‌تر باشد که وجود یک فاز چهارم یعنی جلد انقباضی[2] یا حدّ فاصل بین هوا و آب را نیز برای این نوع خاک تشخیص دهیم [۱-۱۹]. توجیه و نیاز به فاز چهارم در ادامهٔ مطالب این فصل مورد بحث قرار گرفته است. با وجود حتی‌کمترین میزان هوا، خاک غیراشباع می‌شود. مقدارکمی از هوا که به دلیل وجود حباب‌های هوای محبوس شده[3] در خاک رخ می‌دهد، موجب فشرده شدن آب داخل منافذ خاک می‌شود. معمولاً وجود هوای بیشتر در حفره‌های خاک است که باعث می‌شود فاز هوا به‌صورت پیوسته[4] درآید. در این حالت اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین فشار آب حفره‌ای و فشار هوای حفره‌ای به‌وجود می‌آید که موجب می‌شود اصول و مبانی مورد استفاده در مکانیک خاک‌های اشباع را نتوان در خاک‌های غیراشباع مورد استفاده قرار داد.

۱-۲- نقش آب و هوا

آب و هوا نقش مهمی در اشباع شدن و یا غیراشباع شدن خاک بازی می‌کند. آب با تبخیر از سطح زمین یا با تبخیر و تعرّق از طریق پوشش گیاهی خاک، خارج می شود (شکل ۱-۲) [۱-۱۸]. این فرآیندها باعث ایجاد شار آب[5] به سمت بالا در خاک می‌شوند. از طرف دیگر بارندگی و سایر شکل‌های بارش، شار به سمت پایین را در داخل خاک ایجاد می-

[1]- Residual soils
[2]- Contractile skin
[3]- Occluded air bubbles
[4]- Continuous air phase
[5]- Water flux

کند. اختلاف بین این دو شار در اشل محلی بیشتر بستگی به شرایط فشار آب حفره‌ای در داخل خاک دارد.



شکل ۱-۲- توزیع تنش در حین خشک شدن خاک [۱-۱۸]

یک شار خالص رو به بالا موجب خشک شدن و ترک خوردن تدریجی تودهٔ خاک می‌شود؛ در صورتی‌که یک شار خالص رو به پایین در نهایت؛ موجب اشباع شدن توده خاک می‌شود. در کنار سایر عوامل مؤثر، تراز سطح آب زیرزمینی از این شار خالص تأثیر می‌پذیرد. هنگامی‌که هیچ شاری در سطح زمین اتفاق نیفتد، یک تراز هیدرواستاتیک نسبت به ترازآب‌زیرزمینی، یک‌وضعیت‌تعادل‌را نشان‌خواهدداد. در دوره‌های خشکسالی، فشار آب حفره‌ای نسبت به فشار هیدرواستاتیک آب، منفی‌تر می‌شود و در دوره‌های ترسالی عکس شرایط فوق اتفاق می‌افتد.

چمن‌ها، درختان و گیاهان دیگری که در زمین در حال رشد هستند با اعمال یک مکش به آب حفره‌ای از طریق تبخیر و تعرق، خاک را به طرف خشک شدن سوق می‌دهند [۱-۲۰]. بیشتر گیاهان قبل از رسیدن به نقطه پژمرده شدن، قادر به اعمال ۱-۲ مگاپاسکال (۱۰-۲۰ اتمسفر) مکش در آب حفره‌ای هستند [۱-۲۱]. همچنین تبخیر و تعرق موجب تحکیم و خشک شدن توده خاک می‌شود.

مکش اعمال شده به آب حفره‌ای در تمام جهات عمل می‌کند و می‌تواند از فشار جانبی خاک نیز بیشتر شود. وقتی این حالت اتفاق می‌افتد، حالت ثانویهٔ غیراشباع شدن خاک یعنی ترک خوردن اتفاق می‌افتد.

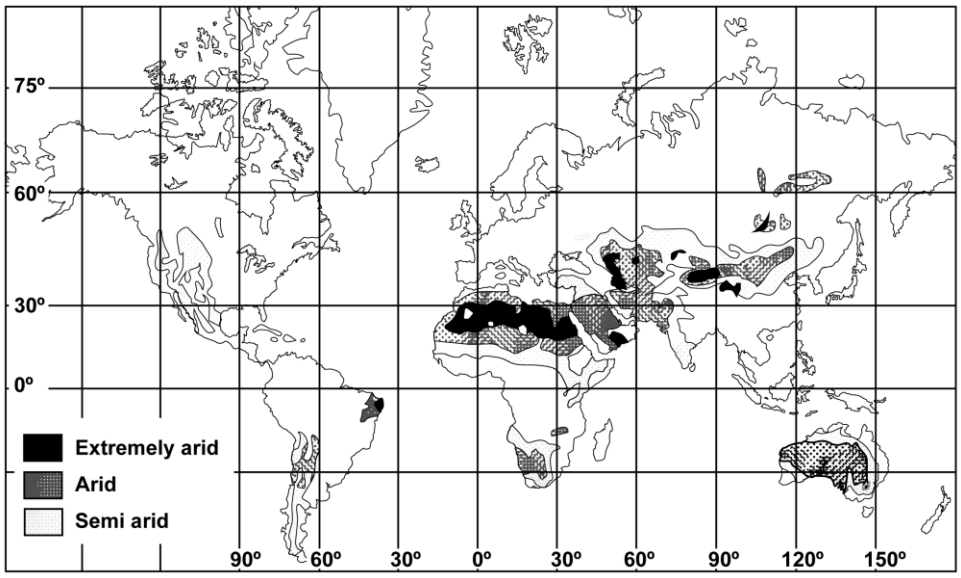
سال به سال نهشته‌های خاک در معرض تغییرات مختلف محیطی قرار می‌گیرند. این وضعیت توزیع فشار آب حفره‌ای خاک را دستخوش تغییر می‌کند که به نوبهٔ خود موجب تورم و یا کاهش حجم توده‌های خاک می‌شود. در اثر تغییرات محیطی، توزیع فشار آب حفره‌ای نسبت به عمق خاک می‌تواند اشکال مختلفی به خود بگیرد (شکل ۱-۲).

مناطق قابل توجهی از سطح زمین به عنوان مناطق خشک طبقه‌بندی می‌شوند. تبخیر سالانه از سطح زمین در این مناطق بیش از میزان بارش سالانه است. شکل (۱-۳) طبقه بندی اقلیمی مناطق بسیار خشک و نیمه خشک جهان را نشان می‌دهد. میگس[1] [۱-۲۲] برای نقشه‌برداری از این مناطق از شاخص رطوبت تورنت‌وِیت[2] [۱-۲۳] استفاده کرد. او بیابان‌های سرد را مستثنی کرد. مناطقی با شاخص تورنت‌وِیت کمتر از ۴۰- مناطق خشک را نشان می‌دهد. حدود ۳۳ درصد از سطح زمین، خشک و نیمه خشک هستند [۱-۲۴].

مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً دارای سطح آب زیرزمینی عمیق هستند و خاک-های مستقر در بالای سطح آب زیرزمینی دارای فشار آب حفره‌ای منفی هستند. خاک‌ها به دلیل تبخیر بیش از حد و تبخیر و تعرق به حالت غیراشباع در می‌آیند. تغییرات اقلیمی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در درصد رطوبت لایه‌های خاک نزدیک سطح زمین می‌گذارد. فشار آب حفره‌ای خاک پس از تر شدن در اثر جذب رطوبت، افزایش می‌یابد و به سمت مقادیر مثبت پیش می‌رود؛ در نتیجه، تغییراتی درحجم و مقاومت برشی خاک ایجاد می‌شود. بسیاری از خاک‌ها هنگام خیس شدن تورم و انبساط شدیدی پیدا می‌کنند. سایر خاک‌ها به از دست دادن قابل توجه مقاومت برشی به هنگام خیس شدن شناخته شده‌اند. تغییر در فشار آب حفره‌ای منفی خاک پس از بارندگی‌های شدید، علت اصلی رانش در بیشتر

[1]- Meigs
[2]- Tornthwaite moisture index

شیروانی‌های خاکی محسوب می‌شود. کاهش در ظرفیت باربری و مدول ارتجاعی خاک نیز با افزایش فشار آب حفره‌ای خاک همراه است. این پدیده‌ها نشان دهنده نقش مهمی است که فشار آب حفره‌ای منفی در کنترل رفتار مکانیکی خاک‌های غیراشباع ایفا می‌کند.



شکل ۱-۳- مناطق خیلی خشک، خشک و نیمه‌خشک جهان [۱-۲۲ و ۱-۲۴]

۱-۳- مثال‌هایی از مسائل مربوط به خاک‌های غیراشباع

مسائل مربوط به خاک‌های غیراشباع شبیه مسائل خاک‌های اشباع است. وجه مشترک تمام این مسائل وجود فشار آب حفره‌ای منفی در منافذ خاک است. در ادامه، مثال‌هایی از این نوع مسائل مورد بحث قرار گرفته است.

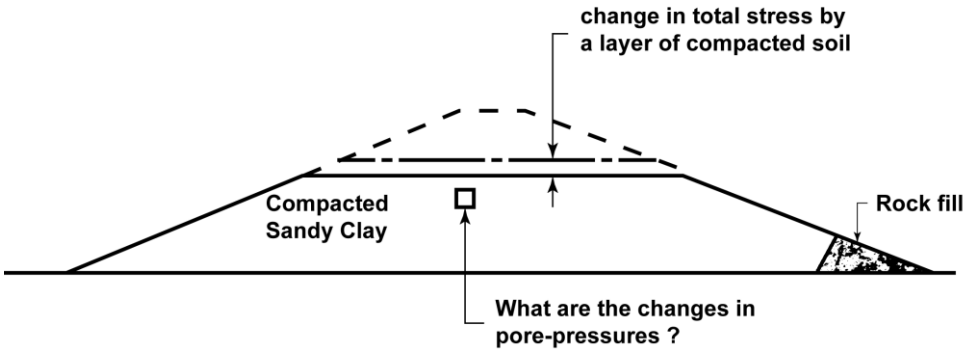
۱-۳-۱- ساخت و بهره‌برداری از یک سد خاکی

ساخت یک سد خاکی همگن را در نظر می‌گیریم. ساخت این نوع سد شامل متراکم کردن لایه لایه خاک در ضخامت‌های ۱۵ سانتی‌متری تا تراز کامل سد است. خاک متراکم شده دارای درجهٔ اشباعی حدود ٪۸۰ خواهد بود. شکل (۱-۴) سد را در نیمهٔ تراز نهایی آن با یک لایه خاک تازه متراکم شده، نشان می‌دهد. فشار هوای حفره‌ای در لایهٔ

تازه متراکم شده تقریباً برابر با فشار اتمسفریک[1] است. فشار آب حفره‌ای نیز منفی و بسیار پایین‌تر از فشار مطلقِ صفر[2] می‌باشد.

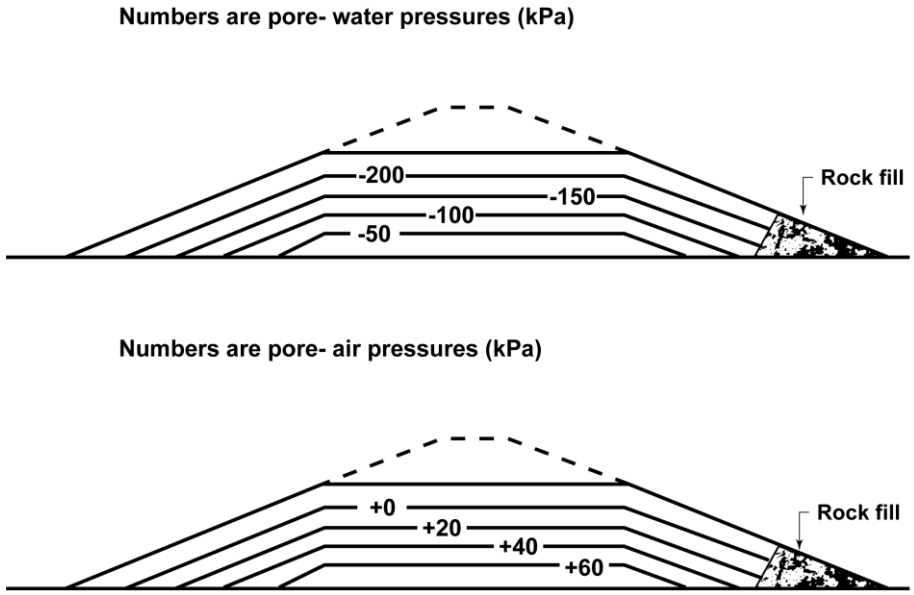
خاک در ارتفاعات پایین‌تر در اثر فشار ناشی از لایه‌های بالاتر فشرده می‌شود. اجرای هر لایهٔ خاک موجب افزایش‌تنش‌کل در بدنهٔ خاکی سد می‌شود. تراکم خاک موجب تغییردر فشار آب و فشار هوای حفره‌ای می‌شود. احداث سد معمولاً به قدر کافی سریع است؛ طوری‌که تغییر حجم خاک در شرایط زهکشی نشده انجام می‌پذیرد. در هر لحظه در حین ساخت، منحنی‌های هم‌فشار آب و هوای حفره‌ای می‌تواند مطابق شکل (۱-۵) رسم شوند [۱-۱۸].

در عمل، هنگامی‌که یک لایهٔ خاکریز در حال اجرا است، مقداری استهلاک فشار آب حفره‌ای رخ خواهد داد و فشار هوای حفره‌ای نیز به اتمسفر تخلیه و مستهلک خواهد شد. همچنین فشار آب حفره‌ای ممکن است از تبخیر و تراوش از سطح سد نیز تأثیر بپذیرد. تمام تغییرات انجام پذیرفته در فشار آب حفره‌ای ممکن است موجب تغییر در حجم و حالت تنش در بدنهٔ سد نیز بشود.



شکل ۱-۴- تغییر در فشار آب‌حفره‌ای در اثر اجرای یک لایهٔ‌خاک در یک سدِ تا نیمه‌ساخته‌شده [۱-۱۸]

[1]- Atmospheric pressure
[2]- Zero absolute pressure



شکل ۱-۵- منحنی‌های هم‌فشار آب و هوای حفره‌ای در یک سد تا نیمه ساخته شده [۱-۱۸]

پس از اتمام ساخت، آبگیری سد فشار آب حفره‌ای را تغییر خواهد داد (شکل ۱-۶). این وضعیت یک حالت گذرا با شرایط مرزی جدیدی را در بدنهٔ سد ایجاد خواهد کرد. پس از اتمام آبگیری سد و گذشت زمان، شرایط پایدار ایجاد شده و سپس سد در معرض تغییرات محیطی قرار خواهد گرفت (شکل ۱-۷).

تجزیه و تحلیل تمام حالت‌های تشریح شده در بالا نیازمند درک صحیح از رفتار خاک-های غیراشباع است. این تجزیه‌وتحلیل‌هاباید‌درقالب‌مفاهیمی‌چون‌تراوش‌اشباع/غیراشباع، تغییر حجم و تغییر در مقاومت برشی خاک انجام پذیرد. تغییر در مقاومت برشی خاک می‌تواند در قالب تغییر در فاکتور اطمینان صورت پذیرد.