

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اصول نظریه خمیری

در

مکانیک خاک

اصول نظریهٔ خمیری
در
مکانیک خاک

دکتر علی نورزاد
احسان بدخشان

۱۳۹۶



۶۸۰

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

اصول نظریه خمیری در مکانیک خاک
علی نورزاد - احسان بدخشان

ویراستار: اکرم کیانی
حروف‌نگار و صفحه‌آرا: سمیرا دهقان
طراح جلد: امیرشاهرخ فریوسفی
ناظر چاپ: صفر ممیزاد
چاپ: ۱۳۹۶
شمارگان: ۵۰۰
قیمت: ۲۶۰۰۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

سرشناسه:	نورزاد، علی، ۱۳۳۹-
عنوان و نام پدیدآور:	اصول نظریه خمیری در مکانیک خاک، علی نورزاد، احسان بدخشان.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری:	دوازده، ۳۶۰ص: مصور، جدول.
فروست:	مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی؛ ۶۸۰
شابک:	۹۷۸ ۹۶۴ ۴۵۷ ۴۱۲ ۲
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیا
یادداشت:	واژه‌نامه؛ کتابنامه: ص. ۳۱۹؛ نمایه.
موضوع:	خاک -- مکانیک؛ Soil mechanics؛ منحنی‌های تنش کرنش؛ Stress-strain curves؛ تحلیل خمیری؛ Plastic analysis (Engineering)
شناسه افزوده:	بدخشان، احسان، ۱۳۶۷ -
شناسه افزوده:	دانشگاه شهید بهشتی
رده‌بندی کنگره:	۱۳۹۶ الف۸۷/ن۱۰/تأ۷۱
رده‌بندی دیویی:	۶۲۴/۱۵۱۳۶
شماره کتابشناسی ملی:	۵۱۲۰۵۶۰

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴

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

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	یازده
فصل ۱. مفاهیم پایه نظریه خمیری در ژئومکانیک.....	۱
۱.۱. تقریب‌های کلی از پاسخ تک‌محوری مصالح.....	۲
۲.۱. مفهوم تعمیم‌یافته معیار تسلیم و گسیختگی.....	۴
۳.۱. تعمیم مفاهیم خمیری کامل و سخت‌شوندگی کرنش برای مصالح.....	۶
۴.۱. تعیین کرنش خمیری، تغییرشکل و نظریه‌های جریان خمیری.....	۱۲
۵.۱. مروری بر فرضیات اساسی نظریه خمیری: یکتایی راه‌حل.....	۱۷
فصل ۲. فرمولاسیون ارتجاعی - کاملاً خمیری.....	۲۵
۱.۲. فرضیات کلی.....	۲۵
۲.۲. نمایش هندسی سطح گسیختگی.....	۲۶
۳.۲. انتخاب تغییرناپذیرهای تنش برای بیان ریاضی.....	۲۸
۴.۲. معیارهای گسیختگی برای مصالح ژئوتکنیکی.....	۳۱
۱.۴.۲. معیار گسیختگی موهر - کولمب.....	۳۱
۲.۴.۲. معیار دراکر - پراگر و دیگر معیارهای اشتقاق‌یافته.....	۳۴
۳.۴.۲. معیارهای اصلاح‌شده بر اساس تقریب‌های پوش موهر - کولمب.....	۳۶
۴.۴.۲. تقریب‌های غیرخطی در قسمت‌های نصف‌النهاری.....	۴۰
۵.۲. استخراج رابطه ساختاری.....	۴۴
۱.۵.۲. فرمولاسیون ماتریسی.....	۴۷
۶.۲. پیامدهای یک قانون جریان غیرهمراه.....	۴۹
فصل ۳. فرمولاسیون همسان کرنش - سخت‌شونده.....	۵۱
۱.۳. آزمایش‌های سه‌محوری و بیان ریاضی آن‌ها.....	۵۱

۵۳	..... ۱.۱.۳ معیار موهر - کولمب در فضای سه‌محوری
۵۵	..... ۲.۱.۳ رفتار یک مصالح با معیار کاملاً خمیری موهر - کولمب
۵۸	..... ۳.۱.۳ بازنگری خصوصیات مکانیکی کلی مصالح دانه‌ای
۶۲	..... ۲.۳ سخت‌شوندگی حجمی، مدل حالت بحرانی
۶۲	..... ۱.۲.۳ فرمولاسیون در فضای سه‌محوری $\{p, q\}$
۶۷	..... ۲.۲.۳ توضیحاتی در مورد عملکرد
۷۰	..... ۳.۲.۳ مشخصات ماتریس ساختاری
۷۲	..... ۳.۳ مدل سخت‌شوندگی انحرافی
۷۲	..... ۱.۳.۳ فرمولاسیون در فضای سه‌محوری $\{p, q\}$
۷۶	..... ۲.۳.۳ نحوه عملکرد
۷۹	..... ۳.۳.۳ ویژگی‌های ماتریس ساختاری
۸۰	..... ۴.۳ سخت‌شوندگی ترکیبی حجمی - انحرافی
۸۵	..... ۵.۳ تعیین ماتریس ساختاری تحت شرایط زهکشی نشده
۸۷	..... فصل ۴. قواعد سخت‌شوندگی ترکیبی همسان - کینماتیک
۸۸	..... ۱.۴ خمیری سطح مرزی، مفهوم سخت‌شوندگی حجمی
۸۹	..... ۱.۱.۴ فرمولاسیون در فضای سه‌محوری $\{p, q\}$
۹۴	..... ۲.۱.۴ توضیحاتی در مورد اجرا
۹۷	..... ۳.۱.۴ تعمیم و مشخصه ماتریس ساختاری
۱۰۰	..... ۲.۴ خمیری سطح مرزی؛ مفهوم سخت‌شوندگی انحرافی
۱۰۱	..... ۱.۲.۴ فرمولاسیون در فضای سه‌محوری $\{P, Q\}$
۱۰۷	..... ۲.۲.۴ توضیحاتی در مورد کاربرد
۱۱۰	..... ۳.۲.۴ تعمیم و مشخصه ماتریس ساختاری
۱۱۵	..... فصل ۵. انتگرال‌گیری عددی روابط ساختاری
۱۱۵	..... ۱.۵ روش انتگرال‌گیری اوپلر
۱۱۷	..... ۲.۵ انتگرال‌گیری عددی از فرمولاسیون $\{p, q\}$
۱۱۷	..... ۱.۲.۵ روش کنترل تنش

۱۱۸	۲.۲.۵. روش‌های کنترل کرنش.....
۱۲۱	۳.۵. مثال‌های عددی از انتگرال‌گیری در فضای $\{p, q\}$
۱۲۲	۱.۳.۵. مدل حالت بحرانی، آزمایش فشاری زهکشی شده $p = \text{const.}$
۱۲۳	۲.۳.۵. مدل سخت‌شوندگی انحرافی، آزمایش فشاری زهکشی شده سه‌محوری.....
۱۲۴	۳.۳.۵. مدل سخت‌شوندگی انحرافی، آزمایش فشاری زهکشی نشده سه‌محوری.....
۱۳۰	۴.۵. روش‌های کلی انتگرال‌گیری عددی.....
۱۳۰	۱.۴.۵. مسئله الگوریتمی.....
۱۳۲	۲.۴.۵. نظریه نزدیک‌ترین تصویر نقطه.....
۱۳۴	۳.۴.۵. الگوریتم‌های نگاشت بازگشتی.....
۱۴۱	فصل ۶. مقدمه‌ای بر آنالیز حدی.....
۱۴۲	۱.۶. فرمولاسیون نظریه‌های کران بالاوپایین.....
۱۴۸	۲.۶. مثال‌هایی از کاربرد تئوری‌های حدی در مهندسی ژئوتکنیک.....
۱۴۸	مصالح ترسکا.....
۱۵۸	مصالح موهر- کولمب.....
۱۶۳	فصل ۷. توصیف ناهمسانی ذاتی مصالح ژئوتکنیکی.....
۱۶۴	۱.۷. فرمولاسیون گسیختگی ناهمسان.....
۱۶۵	۱.۱.۷. مشخصات معیار گسیختگی براساس روش صفحه بحرانی.....
۱۶۷	الف) معیار ترسکا.....
۱۶۸	ب) معیار جداکننده کششی.....
۱۶۹	ج) معیار کولمب.....
۱۷۰	د) مثال‌های عددی.....
۱۷۸	۲.۱.۷. فرمولاسیون معیار گسیختگی با در نظر گرفتن تانسور میکرو ساختار.....
۱۸۱	الف) معیار موهر- کولمب.....
۱۸۴	ب) معیار ترسکا- فن میسر.....
۱۸۶	۲.۷. توصیف فرایند تغییر شکل غیرارتجاعی.....
۱۸۶	۱.۲.۷. فرمولاسیون خمیری برای روش صفحه بحرانی.....

۲.۲.۷. فرمولاسیون خمیری دربرگیرنده تانسور ساختار میکرو..... ۱۸۹

۳.۲.۷. مثال‌های عددی..... ۱۹۱

فصل ۸. رویکردهای کلی در رفتار مکانیکی خاک‌ها و سنگ‌ها..... ۱۹۵

۱.۸. خصوصیات اساسی مکانیکی در آزمایش‌های یک‌سویه، تحت شرایط زهکشی شده..... ۱۹۶

۱.۱.۸. اثر فشار محصورکننده بر تراکم و اتساع..... ۱۹۷

۲.۱.۸. اثر زاویه لود و پدیده محلی شدن کرنش..... ۲۰۴

۲.۸. پاسخ زهکشی نشده محیط‌های دانه‌ای، ارزیابی فشار حفره‌ای، روانگرایی..... ۲۱۰

۳.۸. خصوصیات مکانیکی در آزمایش‌های سیکلیک، حلقه‌های هسترزیس و روانگرایی..... ۲۱۵

۴.۸. ناهمسانی ذاتی، مشخصه‌های مقاومتی سنگ‌های رسوبی..... ۲۱۸

۵.۸. شناسایی پارامترهای اساسی مصالح برای خاک‌ها و سنگ‌ها..... ۲۲۱

۱.۵.۸. ملاحظات کلی در مورد روش‌های شناسایی..... ۲۲۲

۲.۵.۸. مثال‌هایی از مدل سخت‌شوندگی انحرافی..... ۲۲۳

فصل ۹. مدل رفتاری CANAsand..... ۲۳۳

۱.۹. شرایط تسلیم ماده..... ۲۳۴

۲.۹. قانون جریان خمیری..... ۲۳۵

۱.۲.۹. نظریه اول: قانون جریان همراه..... ۲۳۵

۲.۲.۹. نظریه دوم: قانون جریان غیرهمراه..... ۲۳۶

۳.۹. شرط سازگاری..... ۲۳۷

۴.۹. معادلات رفتاری ارتجاعی - کاملاً خمیری میان جزء تنش و کرنش..... ۲۳۸

۵.۹. مدل CANAsand..... ۲۳۹

۱.۵.۹. سطح حالت نهایی..... ۲۴۲

۲.۵.۹. سطح حالت تراکم..... ۲۴۴

۳.۵.۹. سطح حالت مرزی..... ۲۴۶

۶.۹. شبیه‌سازی‌های رفتار ارتجاعی - خمیری خاک با مدل CANAsand..... ۲۵۱

۷.۹. توسعه رفتار برشی ساده سیکلیک در مدل CANAsand..... ۲۵۱

۸.۹. شبیه‌سازی‌های پاسخ زهکشی نشده با مدل CANAsand..... ۲۵۶

فصل ۱۰. سایر مدل‌های رفتاری پیشرفته و نکته‌های تکمیلی.....	۲۶۵
۱.۱۰. دیگر الگوهای خمیری پیشرفته برای مواد متخلخل.....	۲۶۵
۲.۱۰. الگوهای خمیری برای مواد دانه‌ای.....	۲۶۷
۳.۱۰. الگوی خمیری دراکر- پراگر.....	۲۶۸
۴.۱۰. مدل تیلور- زینکوویچ.....	۲۷۰
۵.۱۰. مدل تک پارامتری لدی- دانکن.....	۲۷۱
۶.۱۰. شاخص‌های سطح شکست.....	۲۷۲
۷.۱۰. الگوی دو پارامتری لدی.....	۲۷۴
۸.۱۰. الگوهای حالت حد بحرانی.....	۲۷۶
۹.۱۰. فرمول‌بندی مدل‌های کم-کلی و کم-کلی اصلاح‌شده.....	۲۷۶
۱۰.۱۰. انتقال به فضای تنش کلی.....	۲۸۲
۱۱.۱۰. مقاومت برشی زهکشی‌نشده.....	۲۸۴
۱۲.۱۰. الگوی خمیری هیس (HISS).....	۲۸۴
۱.۱۲.۱۰. مفهوم حالت آشفته (DSC).....	۲۸۵
۲.۱۲.۱۰. فرمول‌بندی مفهوم حالت آشفته.....	۲۸۷
۳.۱۲.۱۰. الگوی پایه‌ای هیس (HISS).....	۲۸۸
۴.۱۲.۱۰. تعیین پارامترهای مصالح برای مدل هیس (HISS).....	۲۹۱
۵.۱۲.۱۰. پارامتر آشفستگی.....	۲۹۱
۱۳.۱۰. پارامترهای نهایی.....	۲۹۲
۱.۱۳.۱۰. پارامتر تغییر فاز.....	۲۹۳
۲.۱۳.۱۰. پارامتر سخت‌شوندگی.....	۲۹۴
۳.۱۳.۱۰. پارامتر غیرهمراه.....	۲۹۴
۴.۱۳.۱۰. پارامترهای ارتجاعی.....	۲۹۵
۱۴.۱۰. قوانین سخت‌شوندگی.....	۲۹۵
۱.۱۴.۱۰. سخت‌شوندگی همسان.....	۲۹۵
۲.۱۴.۱۰. سخت‌شوندگی کینماتیک.....	۲۹۶
۳.۱۴.۱۰. قانون سخت‌شوندگی پراگر.....	۲۹۷

۲۹۷	..... قانون سخت‌شوندگی زیگلمر
۲۹۸	..... قانون سخت‌شوندگی میکس
۳۰۰	..... مدل‌های رفتاری غیرهمسان در خاک‌های رسی
۳۰۱	..... مدل MEL
۳۰۲	..... مدل رفتاری MIT-E3
۳۰۲	..... مدل رفتاری S-CLAY1
۳۰۲	..... مدل چندصفحه‌ای
۳۰۳	..... اثر ناهمسانی روی رفتار سیکلیک ماسه
۳۰۶	..... اثر ناهمسانی ذاتی روی سختی مصالح
۳۰۹	..... اثر ناهمسانی ذاتی بر زاویه اصطکاک
۳۱۰	..... سیکلیک
۳۱۲	..... مدل‌های رفتاری ناهمسان چندصفحه
۳۱۹	..... منابع
۳۲۷	..... پیوست
۳۲۷	..... تمرین‌های پیشنهادی
۳۲۸	..... تمرین‌های کوتاه اضافی
۳۳۵	..... واژه‌نامه فارسی-انگلیسی
۳۴۵	..... واژه‌نامه انگلیسی-فارسی
۳۵۵	..... نمایه

پیشگفتار

این کتاب مقدمه‌ای جامع بر مفهوم اساسی نظریهٔ خمیری برای مصالح ژئوتکنیکی است. این مجموعه برای دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترا و همچنین محققانی که در زمینهٔ مکانیک خاک و سنگ کار می‌کنند، گردآوری شده است. این مجموعه برای مهندسان آشنا با مفاهیم مکانیک محیط پیوسته قابل توجه است. مفاهیم این کتاب به ده فصل تقسیم شده است. فصل ۱ تا ۸ این کتاب از یک سری دست‌نوشته تهیه شده است که توسط پروفسور پوروشسب^۱ در دانشگاه همیلتون، ایالت اونتاریو و کشور کانادا گردآوری شده بود. فصل ۹ خلاصه‌ای از نتایج رسالهٔ دکترای مؤلف اول به‌راهنمایی پروفسور پوروشسب در دانشگاه کنکوردیای کانادا و فصل ۱۰ با استفاده از به‌روزترین مقالات معتبر در این زمینه تکمیل شده است.

فصل یک خلاصه‌ای از مفاهیم ابتدایی و فرضیه‌های پایه و فصل ۲ مروری بر فرمولاسیون ارتجاعی - کاملاً خمیری برای مصالح ژئومکانیکی است. این فصل معیارهای کلی گسیختگی مصالح ژئوتکنیکی و فرایند شناسایی عملگرهای ساختاری را بیان می‌کند. تمرکز فصل ۳ بر فرمولاسیون همسان کرنش - سخت‌شونده است. مطالب بیان‌شده در این فصل از لحاظ هدف با دیگر کتاب‌های موجود در این زمینه بسیار متفاوت است. در این فصل در مورد مفاهیم سخت‌شوندگی حجمی، انحرافی و همچنین حالت ترکیبی حجمی - انحرافی بحث می‌شود. فصل ۴ قوانین سخت‌شوندگی همسان - کینماتیک را با توجه به مفاهیم خمیری سطح مرزی بیان می‌کند. چارچوب استنتاج‌شده در این فصل، توسعهٔ مفاهیم سخت‌شوندگی همسان کلاسیک برای بارهای سیکلیک/نوسانی، به‌خصوص برای موضوع برگشت‌پذیری تغییرشکل در شرایط تنش معکوس است. مطالب این فصل بسیار پیشرفته و ممکن است فهم آن برای خواننده اندکی دشوار باشد. در فصل ۵ به بررسی روش‌های انتگرال‌گیری عددی می‌پردازیم. در فصل ۶ نیز مقدمه‌ای بر آنالیزهای حدی، شامل کاربرد تئوری‌های کران‌بالا و کران‌پایین مطرح می‌شود. این دو فصل به‌لحاظ محتوایی مقدماتی و به‌منظور ارائهٔ پیشینه‌ای کلی در مورد محدودهٔ کاربرد مربوطه بیان شده است. در فصل ۷ ناهمسانی ذاتی مصالح ژئومکانیکی توصیف می‌شود. در این فصل دو چارچوب متفاوت استنتاج شده است، مورد نخست روش صفحهٔ بحرانی و مورد دیگر تغییرناپذیرهای ترکیبی تانسور تنش و تانسور ساختار میکرو مصالح است.

1. Prof. Pietruszczak

فهم این فصل نیز ممکن است اندکی دشوار باشد و به خوانندگان در سطح پیشرفته توصیه می‌شود. فصل ۸ دیدگاهی کلی از پاسخ آزمایشگاهی مصالح ژئومکانیکی فراهم می‌آورد. این فصل مکمل تئوری‌های بیان شده در فصل‌های ۳، ۴ و ۷ به‌منظور بررسی الگوهای اساسی وابسته به پاسخ هر دو مصالح خاک و سنگ است. در فصل ۹ مدل رفتاری ارتجاعی-خمیری (CANAsand) بر اساس مفهوم سطح تراکم، توسعه داده شده برای شبیه‌سازی رفتار ماسه اشباع در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده تحت بارهای سیکلیک/نوسانی بررسی می‌شود. در نهایت، در فصل ۱۰ سایر مدل‌های رفتاری پیشرفته هیدرومکانیکی و میرومکانیکی و نکته‌های تکمیلی برای مصالح ژئومکانیکی بیان می‌شود.

هدف مقدماتی این کتاب ایجاد پیش‌زمینه‌ای اجمالی، اما جامع در مورد رفتار خمیری خاک/سنگ برای خواننده است. با وجود این، این مجموعه چند مبحث مهم، از جمله توصیف تغییر شکل محلی، مدل‌های رفتاری خاک‌های نیمه‌اشباع و ... را پوشش نمی‌دهد. بنابراین، این کتاب را می‌توان به‌منزله مقدمه‌ای برای پاسخ غیرارتجاعی مصالح ژئومکانیکی در نظر گرفت. در پایان، از تمامی صاحب‌نظران و دانشجویان عزیز تقاضا داریم که منت نهاده و با آرای خود، نقایص موجود در این کتاب را به آدرس الکترونیکی زیر ارائه کنند.

علی نورزاد-احسان بدخشان

۱۳۹۶

فصل ۱

مفاهیم پایه نظریه خمیری در ژئومکانیک

نظریه خمیری ابتدا برای توصیف رفتار مکانیکی فلزات خارج از ناحیه ارتجاعی توسعه داده شد. نخستین تلاش در سال ۱۸۷۰ در یک فرمولاسیون ریاضی توسط سنت دی ونانت^۱ توسعه داده شد که با مطالعات تئوریک لوی^۲ و مشاهدات آزمایشگاهی ترسکا^۳ ارتباط نزدیکی داشت. (پیشینه‌ای از سیر تاریخی پیشرفت‌های مهم را می‌توان در [۱-۳] یافت).

نخستین تلاش‌های قابل توجه در چارچوب نظریه خمیری فلزات برای مصالح ژئوتکنیکی^۴ در سال ۱۹۵۰ توسط دراکر و پراگر^۵ انجام شد. آنها شکل کلاسیک معیار کولمب را برای شرایط سه‌بعدی توسعه دادند. پس از گذشت دو دهه، توسعه سریعی در زمینه فرمولاسیون محدوده وسیعی از مفاهیم سخت‌شوندگی کرنش، شامل تعیین میزان تغییرشکل خمیری به هنگام تنش‌های معکوس ایجاد شده است (پیشینه تاریخی در مورد پیشرفت‌های مهم انجام گرفته را می‌توان در [۴-۵] ملاحظه کرد).

در این فصل خلاصه‌ای از مفاهیم پایه نظریه خمیری فراهم می‌شود. ابتدا مقدمه‌ای فشرده از بخش‌های بعد که روش‌های مدل‌کردن پاسخ مکانیکی مصالح ژئوتکنیکی را توضیح می‌دهد، ارائه می‌شود. آن‌گاه چارچوب مفاهیم پایه‌ای مفهومی شرح داده می‌شود، سپس فرضیات پایه، از جمله پایداری، یکتایی راه‌حل و مانند آن مرور می‌شود.

1. S. de Venant
3. Tresca
5. Drucker and Prager

2. Levy
4. geomaterials