



دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد

(گرایش خاک و پی)

عنوان:

# کاربرد یک مدل حالت بحرانی ماسه ها برای آنالیز گسترش جانبی در اثر زلزله

توسط:

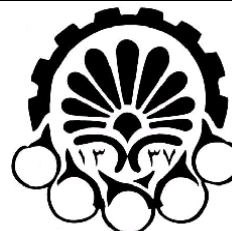
رشید زندیان

استاد راهنما:

دکتر سید محمدرضا امام

بهمن ماه ۱۳۸۷

بسمه تعالی  
فرم اطلاعات پایان نامه  
کارشناسی ارشد و دکترا



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
معاونت پژوهشی

تاریخ:.....

پیوست:.....

نام و نام خانوادگی: رشید زندیان

دانشجوی: آزاد  بورسیه  معادل

شماره دانشجویی: ۸۵۱۲۴۰۲۷

دانشکده: عمران و محیط زیست رشته تحصیلی: ژئوتکنیک

نام و نام خانوادگی استاد راهنما: دکتر سیدمحمدرضا امام

عنوان پایان نامه به فارسی: کاربرد یک مدل حالت بحرانی ماسه‌ها برای آنالیز گسترش جانبی در اثر زلزله

عنوان پایان نامه به انگلیسی:

Application of a critical state constitutive model for sands for the analysis of lateral spreading due to Earthquake

نوع پروژه: کارشناسی ارشد  دکترا   
کاربردی  بنیادی  توسعه‌ای  نظری

تاریخ شروع: ۱۳۸۶/۷/۱

تاریخ خاتمه: ۱۳۸۷/۱۰/۲۱

تعداد واحد: ۶

سازمان تأمین کننده اعتبار:

واژه‌های کلیدی به فارسی: مدل رفتاری حالت بحرانی، روانگرایی، تحلیل عددی، CANLEX، FLAC.

واژه‌های کلیده به انگلیسی:

Critical State Constitutive Model, Liquefaction, Numerical Analysis, FLAC, CANLEX.

نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه:

استاد راهنما:

دانشجو:

تاریخ: ۱۳۸۷/۱۱/۲۱

امضاء استاد راهنما:

نسخه ۱: معاونت پژوهشی

نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر

تاریخ: ۱۳۸۷/۱۱/۱۵



اینجانب رشید زندیان متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت. کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

رشید زندیان

امضا

## تشکر و قدردانی

خالصانه‌ترین مراتب قدردانی خود را به استاد عزیز و گرانقدرم جناب آقای **دکتر سید محمدرضا امام** که با متانت و مهربانی فراوان راهنمایی این تحقیق را بر عهده داشتند تقدیم می‌دارم و از خداوند بزرگ برای ایشان آرزوی بهروزی و سعادت را مسئلت دارم.

از اساتید محترمی که داوری این پایان نامه را تقبل فرمودند بسیار سپاسگزارم.

از کلیه اساتید گرامی دانشکده عمران و محیط زیست که در طول دوران تحصیل افتخار بهره‌مندی از محضر ایشان را داشته‌ام سپاسگزاری می‌نمایم.

از پدر و مادر بزرگووارم که در تمام مراحل زندگی، همراه و مشوق من بودند کمال تقدیر و تشکر را دارم و از خداوند بزرگ سلامت و سعادت این عزیزان را مسئلت دارم.

## دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

### چکیده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان :

کاربرد یک مدل حالت بحرانی ماسه ها برای آنالیز گسترش جانبی در اثر زلزله

ارائه شده توسط رشید زندیان شماره دانشجویی ۸۵۱۲۴۰۲۷ گرایش ژئوتکنیک

استاد راهنما : دکتر سید محمدرضا امام تاریخ تحویل : ۱۳۸۷/۱۰/۱۶

در طول چند دهه گذشته پیشرفت در تکنولوژی کامپیوتر و روشهای عددی، مانند اجزاء محدود و یا تفاضل محدود، راه‌هایی برای حل مسایل مرزی پیچیده در مهندسی ژئوتکنیک فراهم آورده اند. پیشرفت بیشتر در توانایی آنالیز، بستگی به در نظر گرفتن فرمولهای ریاضی مناسب تر برای روابط رفتاری مصالح دارد. از سال ۱۹۶۰ مدل‌های رفتاری ساده و پیشرفته برای پیش‌بینی پاسخ تنش-کرنش خاک تحت شرایط بارگذاری مختلف، توسعه یافتند تا با استفاده از آنها مدل کردن رفتار انواع سازه‌ها در شرایط مختلف بارگذاری امکان پذیر گردد. از جمله این شرایط، روانگرایی در خاکهای ماسه‌ای شل و اشباع می‌باشد. مدل امام و همکاران (Imam et al., 2005) می‌تواند رفتار ماسه‌ها، به ویژه ماسه‌های غیرمترکم را پیش‌بینی کرده و ویژگی‌های خاص این مواد را در مدلسازی منظور نماید. از جمله این ویژگیها که تاثیر قابل توجهی بر رفتار اینگونه ماسه‌ها دارند عبارتند از: اثر ناهمسانی رفتار ماسه‌ها که باعث تفاوت رفتار آنها در بارگذاری سه محوری فشاری و کششی می‌شود، روانگرایی استاتیکی در شرایط زهکشی نشده، اثرات نسبت تخلخل و فشار تحکیم بر رفتار زهکشی شده و زهکشی نشده، رفتار تحت تحکیم ناهمسان، و اثر مسیر تنش اعمال شده بر رفتار. با توجه به امکانات این مدل در منظور کردن جنبه‌های مختلف رفتار ماسه‌ها، همچنین توانایی گسترده نرم افزار FLAC در مدلسازی مصالح ژئوتکنیکی و کاربرد روز افزون آن، و همچنین نبودن یک مدل رفتاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها در این نرم افزار، مدل امام و همکاران در زبان برنامه نویسی FISH به این نرم‌افزار اضافه گردید تا امکان مدلسازی و بررسی رفتار سازه‌های تشکیل شده از خاک ماسه‌ای به کمک این برنامه فراهم شود. بررسی درستی کارکرد برنامه با مدل کردن انواع آزمایشهای سه محوری بر روی ماسه توپورا، سنجیده شد و نتایج حاصله با نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی مقایسه گردید که تطابق خوبی بین نتایج حاصل گشت.

پس از اطمینان از درستی کارکرد برنامه، از مدل امام و همکاران در مدلسازی یک سازه خاکی با خاک ماسه‌ای استفاده شد تا سازگاری نتایج بدست آمده از برنامه نوشته شده با رفتار واقعی اندازه گیری شده یک سازه خاکی، و همچنین سازگاری با پیش‌بینی‌های دیگر مدل‌های رفتاری سنجیده شود. برای اینکار خاکریز پروژه CANLEX که به منظور ایجاد روانگرایی جریان (flow liquefaction) بر روی ماسه شل و اشباع Syncrude تحت بارگذاری سریع طراحی و اجرا شده بود، با استفاده از مدل امام و همکاران مدلسازی شد. برای مدلسازی خاکریز پروژه CANLEX، در ابتدا معادله خط (منحنی) حالت بحرانی و پارامترهای مدل برای ماسه Syncrude با استفاده از آنالیز برگشتی آزمایشهای سه محوری تعیین شدند. پس از مدلسازی، نتایج حاصله با نتایج اندازه‌گیری شده توسط سیستم ابزارگذاری و همچنین نتایج آنالیز دانشگاه‌های آلبرتا و UBC مورد مقایسه قرار گرفت.

در خاکریز پروژه CANLEX، نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند که جابجایی افقی در پایین دست خاکریز بیشتر می‌باشد. بدلیل آنکه المانهایی که در پایین دست سد وجود دارند، در شرایط آزمایش سه محوری کششی هستند و مقاومت و سختی کمتری دارند. درحالیکه نواحی بالادست، تحت شرایط آزمایش سه محوری فشاری، تحت برش قرار می‌گیرند و مقاومت و سختی بیشتری را از خود نشان می‌دهند. این امر بخوبی با مدل امام و همکاران در نظر گرفته می‌شود در حالیکه با استفاده از مدل دانشگاه UBC و یا مدل موهر-کلمب این امکان وجود ندارد. همچنین فشار آب حفره‌ای محاسبه شده با استفاده از آنالیز حاضر نسبت به فشار آب حفره‌ای محاسبه شده توسط آنالیز انجام شده در دانشگاه آلبرتا، به مقادیر اندازه گیری شده نزدیکتر می‌باشد.

کلمات کلیدی : مدل رفتاری حالت بحرانی، روانگرایی، تحلیل عددی، CANLEX، FLAC

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه و کلیات .....	۱
فصل دوم: حالت‌های روانگرایی خاکهای ماسه‌ای و نیاز به مدل رفتاری مناسب برای پیش‌بینی آنها.....	۳
۱-۲- مفهوم روانگرایی .....	۳
۲-۲- ضرورت داشتن یک مدل رفتاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها .....	۹
فصل سوم: مبانی و مفاهیم اولیه مدلسازی .....	۱۱
۱-۱- اصول اولیه مدلسازی .....	۱۱
۱-۱-۱- تابع تسلیم (yield function) .....	۱۱
۱-۱-۲- تابع پتانسیل پلاستیک (A plastic potential function) .....	۱۳
۱-۱-۳- قانون سخت‌شوندگی / نرم‌شوندگی .....	۱۴
۱-۱-۴- رفتار دو بعدی الاستیک خطی - پلاستیک کامل .....	۱۵
۱-۱-۵- رفتار دو بعدی الاستیک خطی - پلاستیک سخت‌شونده .....	۱۵
۱-۱-۶- رفتار دو بعدی الاستیک خطی - پلاستیک نرم‌شونده .....	۱۷
۱-۱-۷- مقایسه با رفتار واقعی خاکها .....	۱۷
۱-۲- اصول مدلسازی خاکهای دانه‌ای با استفاده از مکانیک حالت بحرانی .....	۱۸
۱-۲-۱- پارامتر حالت (State parameter) .....	۲۱
۱-۲-۲- حالت پایدار یا حالت بحرانی .....	۲۱
۱-۲-۳- انحنای (SSL) .....	۲۳
۱-۲-۴- اثر حالت اولیه بر حالت بحرانی .....	۲۵
۱-۲-۵- اثر سرعت کرنش بر حالت بحرانی .....	۲۶
۱-۲-۶- اثر مسیر تنش بر حالت بحرانی .....	۲۶
۱-۲-۷- اثر نحوه تهیه نمونه آزمایشگاهی .....	۲۷
۱-۲-۸- دلایل استفاده از پارامتر حالت (y) به جای نسبت تخلخل (e) .....	۲۹
فصل چهارم: معرفی یک مدل حالت بحرانی برای پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها .....	۳۱
۱-۴- مطالعات تاریخچه ای .....	۳۱
۲-۴- رفتار ماسه شل و آغاز جریان روانگرایی .....	۳۲
۳-۴- معرفی مدل امام و همکاران به عنوان یک مدل حالت بحرانی برای پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها .....	۳۵
۱-۳-۴- اجزاء مدل .....	۳۵

۳۶	..... ۱-۱-۳-۴- سطح تسلیم (Yield Surface)
۳۹	..... ۱-۱-۳-۴- الف شکل سطح تسلیم برای ماسه ها
۴۳	..... ۱-۱-۳-۴- ب ناهمسانی ناشی از اعمال تنش
۴۳	..... ۲-۱-۳-۴- معیار شکست
۴۴	..... ۳-۱-۳-۴- قانون جریان و قانون پتانسیل
۴۵	..... ۴-۱-۳-۴- تعیین پارامترهای اتساعی در آزمایشهای TC و TE
۴۹	..... ۵-۱-۳-۴- قانون سخت شوندگی
۴۹	..... ۵-۱-۳-۴- الف سخت شوندگی "اندازه سطح تسلیم"
۵۳	..... ۵-۱-۳-۴- ب سخت شوندگی ناشی از شکل (Shape hardening)
۵۳	..... ۶-۱-۳-۴- الاستیسیته همسان
۵۴	..... ۲-۳-۳-۴- تعیین روابط تنش - کرنش
۵۶	..... ۳-۳-۳-۴- کالیبره کردن مدل
۵۶	..... ۱-۳-۳-۴- خط حالت بحرانی
۵۷	..... ۲-۳-۳-۴- پارامترهای سخت شوندگی شکلی
۵۷	..... ۳-۳-۳-۴- پارامترهای تنش - اتساع
۵۷	..... ۴-۳-۳-۴- پارامترهای سختی پلاستیک
۵۸	..... ۵-۳-۳-۴- پارامترهای الاستیک
۵۸	..... ۴-۳-۳-۴- کارایی مدل
۵۹	..... ۱-۴-۳-۴- مدلسازی رفتار ماسه توپورا
۵۹	..... ۱-۱-۴-۳-۴- رفتار زهکشی نشده و همسان تحکیم یافته ماسه توپورا
۶۳	..... ۲-۱-۴-۳-۴- ماسه غیرهمسان تحکیم یافته
۶۵	..... ۳-۱-۴-۳-۴- مدل کردن رفتار زهکشی شده
۶۶	..... ۴-۱-۴-۳-۴- آزمایشهای سه محوری کششی
۶۸	..... ۵-۱-۴-۳-۴- مقایسه رفتار ماسه در آزمایشهای سه محوری فشاری و کششی
۷۱	..... ۲-۴-۳-۴- مدلسازی رفتار ماسه بسیارشل اتاوا
۷۴	..... فصل پنجم: برنامه نویسی مدل رفتاری امام و همکاران در FISH و بررسی صحت درستی آن
۷۴	..... ۱-۵- آشنایی با نرم افزار FLAC
۷۸	..... ۲-۵- بررسی صحت درستی برنامه
۹۰	..... فصل ششم: معرفی پروژه CANLEX و نتایج مدلسازی دانشگاه UBC و آلبرتا
۹۰	..... ۱-۶- مقدمه
۹۱	..... ۲-۶- آزمایش CANLEX
۹۳	..... ۳-۶- آزمایش سانترفوژ

۹۵	۳-۶ روانگرایی ماسه Syncrude .....
۹۷	۴-۶ مدل سازی عددی پروژه CANLEX .....
۹۷	۱-۴-۶ نتایج دانشگاه UBC از مدل سازی عددی پروژه CANLEX .....
۱۰۲	۲-۴-۶ نتایج دانشگاه آلبرتا از مدل سازی عددی پروژه CANLEX .....
۱۰۳	۱-۲-۴-۶ مدل کردن ماسه سربرار .....
۱۰۴	۲-۲-۴-۶ نتایج تحقیق دانشگاه آلبرتا .....
۱۰۸	فصل هفتم: مدلسازی پروژه CANLEX با استفاده از مدل امام و همکاران .....
۱۰۸	۱-۷ مقدمه .....
۱۰۸	۲-۷ بدست آوردن پارامترهای مدل برای ماسه Syncrude .....
۱۱۵	۳-۷ خط حالت بحرانی برای ماسه Syncrude .....
۱۱۶	۴-۷ مدلسازی پروژه CANLEX .....
۱۲۴	فصل هشتم: خلاصه و نتیجه گیری و ارائه پیشنهادهاى پژوهشى .....
۱۲۴	۱-۸ خلاصه و نتیجه گیری .....
۱۲۵	۲-۸ ارائه پیشنهادهاى پژوهشى .....
۱۲۷	منابع و مراجع .....
۱۳۲	علائم اختصارى .....



## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳ مشخصات بعضی از نمونه‌ها .....	۲۲
جدول ۱-۴ مشخصات فیزیکی ماسه‌های مورد تحقیق .....	۴۱
جدول ۲-۴ پارامترهای مدل برای ماسه اوتاوا و توپورا .....	۵۸
جدول ۱-۵ مقایسه حل ضمنی و صریح .....	۷۶
جدول ۲-۵ پارامترهای مدل .....	۸۰
جدول ۱-۶ پارامترهای مدل دانشگاه UBC در پیش بینی رفتار ماسه Syncrude .....	۹۷
جدول ۲-۶ پارامترهای مصالح در آنالیز دانشگاه UBC .....	۹۹
جدول ۳-۶ دانشگاه UBC: فشار آب حفره‌ای اضافی پیش بینی شده و اندازه‌گیری شده و مقادیر جابجایی‌ها در خط ۲ ابزارگذاری .....	۱۰۱
جدول ۴-۶ پارامترهای مدل دانشگاه آلبرتا برای ماسه بستر .....	۱۰۲
جدول ۵-۶ دانشگاه آلبرتا- خلاصه آنالیزهای بارگذاری ناشی از ماسه سربار .....	۱۰۴
جدول ۶-۶ دانشگاه آلبرتا: مقادیر پیش بینی شده و اندازه‌گیری شده تغییرات تراز آب در خط ۱ ابزارگذاری برای حالت ۳ .....	۱۰۵
جدول ۱-۷ پارامترهای مدل برای ماسه Syncrude .....	۱۰۹
جدول ۲-۷ مقایسه فشار آب حفره‌ای اضافی (برحسب کیلوپاسکال) در خط ۱ ابزارگذاری .....	۱۲۰
جدول ۳-۷ مقایسه فشار آب حفره‌ای اضافی (kPa) در خط ۱ ابزارگذاری و با فرض نفوذپذیری بدست آمده از رابطه ۱-۷ .....	۱۲۲
جدول ۴-۷ مقایسه فشار آب حفره‌ای اضافی (kPa) در خط ۲ ابزارگذاری و با فرض نفوذپذیری بدست آمده از رابطه ۱-۷ .....	۱۲۳

## فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان	صفحه
شکل ۲-۱ رفتار زهکشی نشده Toyoura	۴
شکل ۲-۲ رفتار شماتیک خاک غیرچسبنده در آزمایش سه محوری فشاری استاتیکی	۵
شکل ۲-۳ شمایی از رفتار روانگرایی سیکی	۶
شکل ۲-۴ شمایی از رفتار تحرک سیکی	۶
شکل ۲-۵ فلوجارت روانگرایی خاکها	۹
شکل ۳-۱ تابع تسلیم	۱۲
شکل ۳-۲ تابع پتانسیل	۱۳
شکل ۳-۳ مثالی از قانون سخت شوندگی / نرم شوندگی	۱۴
شکل ۳-۴ رفتار دو بعدی مصالح پلاستیک کامل	۱۵
شکل ۳-۵ انواع سخت شوندگی	۱۶
شکل ۳-۶ رفتار دوبعدی مصالح سخت شونده	۱۶
شکل ۳-۷ رفتار دو بعدی مصالح نرم شونده	۱۷
شکل ۳-۸ رفتار واقعی خاکها با سخت شوندگی / نرم شوندگی	۱۷
شکل ۳-۹ تعریف نسبت تخلخل بحرانی با استفاده از آزمایش برش مستقیم	۱۸
شکل ۳-۱۰ آزمایش سه محوری که به حالت بحرانی رسیده است	۱۹
شکل ۳-۱۱ آزمایش سه محوری که رفتار اتساعی در کرنش‌های بزرگ دارد	۲۰
شکل ۳-۱۲ تعریف پارامتر حالت $\psi$	۲۱
شکل ۳-۱۳ مقایسه حالت بحرانی آزمایش‌های زهکشی شده و زهکشی نشده (نمونه‌های با تنش تحکیمی $p > 1000 \text{kPa}$ در شکل نیامده است)	۲۳
شکل ۳-۱۴ SSL برای ماسه Leighton انحنایی مانند ماسه Erksak را نشان می‌دهد (نقاط نشان داده شده در شکل حاصل از آزمایش‌های سه محوری فشاری هستند)	۲۴
شکل ۳-۱۵ SSL برای ماسه Erksak (نقاط نشان داده شده در شکل حاصل از آزمایش‌های سه محوری فشاری زهکشی نشده هستند)	۲۴
شکل ۳-۱۶ تغییرات دانه‌بندی ماسه Erksak در فشار 8MPa	۲۵
شکل ۳-۱۷ اثر حالت اولیه بر حالت بحرانی	۲۵
شکل ۳-۱۸ اثر مسیر تنش بر حالت بحرانی (ماسه Erksak)	۲۶
شکل ۳-۱۹ اثر مسیر تنش بر حالت بحرانی (ماسه Toyoura)	۲۷

- شکل ۳-۲۰ اثر نحوه تهیه نمونه آزمایشگاهی بر حالت بحرانی ..... ۲۷
- شکل ۳-۲۱ پراکندگی در خط حالت بحرانی (ماسه Erksak ، ۳۸ نمونه) ..... ۲۸
- شکل ۳-۲۲ مسیرهای تنش زهکشی نشده (ماسه Erksak ) ..... ۳۰
- شکل ۴-۱ نرم شوندگی در آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری و کاهش حجم در آزمایشهای CDS زهکشی شده (a) مسیرهای تنش برای آزمایش CDS زهکشی شده و آزمایش زهکشی نشده (b) آزمایش استاتیکی زهکشی نشده (c) تغییرات حجمی در آزمایش CDS ..... ۳۳
- شکل ۴-۲ رفتار زهکشی نشده ماسه توپورا در سه محوری فشاری و کششی ..... ۳۵
- شکل ۴-۳ سطوح تسلیم برای ماسه ACE، ACC، IC ..... ۳۷
- شکل ۴-۴ تنش‌های برشی مقاوم حداکثر بدست آمده از مسیر تنش موثر زهکشی نشده ..... ۴۱
- شکل ۴-۵ تغییرات  $\sin\phi_f$  با پارامتر حالت در TC و TE ..... ۴۴
- شکل ۴-۶ تغییرات  $M_{PT}$  و  $(M_{CS} - M_{PT})$  با پارامتر حالت در آزمایشهای TC و TE ..... ۴۶
- شکل ۴-۷ تغییرات زاویه اصطکاک در تغییر فاز با پارامتر حالت در آزمایشهای TC و TE ..... ۴۷
- شکل ۴-۸ تغییرات منحنی پتانسیل پلاستیک و نسبت تنش در بیک آن در آزمایش سه محوری زهکشی شده فشاری برای ماسه متراکم (۱) در تغییر فاز (۲) شکست (۳) حالت بحرانی ..... ۴۹
- شکل ۴-۹ تعیین پارامتر تراکم پذیری (C) (a) ماسه اوتاوا (b) ماسه توپورا ..... ۵۲
- شکل ۴-۱۰ رفتار سه محوری فشاری زهکشی نشده ماسه توپورا که تا  $e=0.833$  تحکیم یافته‌اند ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۱ رفتار سه محوری فشاری زهکشی نشده ماسه توپورا که تا  $e=0.735$  تحکیم یافته‌اند ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۲ تاثیر پارامتر تراکم پذیری C بر پیش‌بینی رفتار سه محوری فشاری زهکشی نشده ماسه توپورا ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۳ رفتار سه محوری زهکشی نشده فشاری ماسه شل توپورا که تا  $e=0.907$  تحکیم یافته‌اند ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۴ روانگرایی ماسه توپورا  $e=0.930$  در آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۵ پیش‌بینی مدل همراه با داده‌های آزمایشگاهی در سه محوری زهکشی نشده فشاری  $e=0.900$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۶ رفتار سه محوری زهکشی نشده فشاری غیرهمسان تحکیم یافته ماسه شل توپورا با  $e=0.900$  ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۷ رفتار سه محوری زهکشی نشده فشاری ماسه متراکم توپورا که به طور ناهمسان تا  $k_0=0.37$  تحکیم یافته‌اند ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۸ رفتار سه محوری زهکشی شده فشاری ماسه توپورا که تا  $50 \text{ kPa}$  تحکیم یافته‌اند ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۹ رفتار سه محوری زهکشی شده فشاری ماسه توپورا که تا  $100 \text{ kPa}$  تحکیم یافته‌اند ..... ۶۶
- شکل ۴-۲۰ رفتار سه محوری زهکشی نشده کششی ماسه شل توپورا که تا  $e = 0.802 \sim 0.817$  تحکیم یافته‌اند ..... ۶۷

- شکل ۴-۲۱ روانگرایی کامل ماسه توپورا که تا نسبت تخلخل  $0.860$  یا بیشتر در آزمایش سه محوری زهکشی نشده کششی تحکیم یافته‌اند ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۲ مقایسه رفتار زهکشی شده TC و TE ماسه توپورا که تا  $500$  کیلو پاسکل تحکیم یافته‌اند... ۶۹
- شکل ۴-۲۳ مقایسه رفتار زهکشی نشده ماسه شل توپورا در TC و TE ..... ۶۹
- شکل ۴-۲۴ مقایسه رفتار زهکشی نشده ماسه شل توپورا در TC و TE که تا کرنشهای بزرگ، برش خورده‌اند ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۵ تفاوت رفتار پیش بینی شده در TC و TE برای ماسه شل توپورا در  $e=0.860$  ..... ۷۱
- شکل ۴-۲۶ مسیرهای تنش ممکنه برای ماسه خیلی شل اوتاوا ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۷ رفتار ماسه خیلی شل اوتاوا در آزمایشهای دو مرحله‌ای زهکشی نشده-شده، برش زهکشی شده بعد از اینکه نمونه به PPP-UESP رسید شروع می‌شود (a) آزمایش زهکشی شده P ثابت (b) آزمایش زهکشی شده فشاری ..... ۷۲
- شکل ۵-۱ سیکل انجام محاسبات در نرم‌افزار FLAC ..... ۷۵
- شکل ۵-۲ آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=2000$  kPa و  $e=0.833$  در فضای p-q ..... ۸۰
- شکل ۵-۳ آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=2000$  kPa و  $e=0.833$  در فضای q-Axial Strain ..... ۸۱
- شکل ۵-۴ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری با  $P_c=2000$  kPa و  $e=0.833$  ..... ۸۱
- شکل ۵-۵ آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=1000$  kPa و  $e=0.833$  ..... ۸۲
- شکل ۵-۶ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=1000$  kPa و  $e=0.833$  ..... ۸۳
- شکل ۵-۷ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $e=0.735$  ..... ۸۴
- شکل ۵-۸ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری غیرهمسان تحکیم یافته  $e=0.900$  ..... ۸۵
- شکل ۵-۹ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری غیر همسان تحکیم یافته  $e=0.748$  ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده فشاری  $e=0.810, 0.866, 0.960$  و ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۱ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده فشاری،  $P_c=100$  kPa و ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۲ مقایسه نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده کششی  $e=0.860, 0.866, 0.876$  ..... ۸۹
- شکل ۶-۱ پلان و مقطع عرضی سایت CANLEX ..... ۹۲
- شکل ۶-۲ پلان خطوط ابزارگذاری در زیر خاکریز رسی ..... ۹۳

- شکل ۳-۶ مدل سانتریفوژ و محل ابزارگذاری‌های آن، ابعاد برحسب میلیمتر ..... ۹۴
- شکل ۴-۶ عکس‌العمل مدل سانتریفوژ در مقابل بارگذاری (a) فشار آب حفره‌ای (b) نشست سطحی (c) تغییر شکل مدل در اثر اولین سربار ۶۰ کیلوپاسکالی ..... ۹۵
- شکل ۵-۶ رفتار زهکشی نشده ماسه (a) Syncrude آزمایش سه محوری فشاری و کششی (b) آزمایش برش مستقیم (c) آزمایش سیلندر توخالی ..... ۹۶
- شکل ۶-۶ دانشگاه UBC: رفتار زهکشی نشده نمونه‌های بازسازی شده (a) آزمایش سه محوری (b) آزمایش برش مستقیم ..... ۹۸
- شکل ۷-۶ دانشگاه UBC: رفتار پیش بینی شده در حالت زهکشی نشده (a) جابجایی (b) کنترل فشار آب حفره‌ای کل ..... ۹۹
- شکل ۸-۶ دانشگاه UBC: رفتار پیش بینی شده در حالت تنش-جریان (a) جابجایی (b) کنترل فشار آب حفره‌ای کل ..... ۱۰۱
- شکل ۹-۶ محل پیزومترها در خط ۲ ابزارگذاری ..... ۱۰۲
- شکل ۱۰-۶ دانشگاه آلبرتا: بیشترین فشار آب حفره‌ای اضافی در وسط لایه ماسه‌ای بستر برای ساخت ایمن خاکریز بر روی لایه بستر ..... ۱۰۲
- شکل ۱۱-۶ دانشگاه آلبرتا: کنتورهای فشار آب حفره‌ای اضافی در پایان بارگذاری در حالت ۳ ..... ۱۰۵
- شکل ۱۲-۶ دانشگاه آلبرتا: مکان پیزومترها در خط ۱ ابزارگذاری ..... ۱۰۵
- شکل ۱۳-۶ دانشگاه آلبرتا: مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده فشار آب حفره‌ای در پیزومتر P18A ..... ۱۰۶
- شکل ۱۴-۶ دانشگاه آلبرتا: کنتورهای زاویه  $\alpha_{\sigma}$  ..... ۱۰۷
- شکل ۱-۷ نتایج آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=294.6$  kPa و  $e=0.819$  فضای q-Axial Strain ..... ۱۰۹
- شکل ۲-۷ نتایج آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=294.6$  kPa و  $e=0.819$  فضای p-q ..... ۱۱۰
- شکل ۳-۷ مقایسه نتایج آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده فشاری،  $P_c=294.6$  kPa و  $e=0.819$  ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۷ نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=377$  kPa و  $e=0.810$  ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۷ مقایسه نتایج آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده فشاری،  $P_c=377$  kPa و  $e=0.810$  ..... ۱۱۲
- شکل ۶-۷ آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=201.6$  kPa و  $e=0.724$  در فضای p-q ..... ۱۱۲
- شکل ۷-۷ آزمایش سه محوری زهکشی نشده فشاری  $P_c=201.6$  kPa و  $e=0.724$  ..... ۱۱۳
- شکل ۸-۷ مقایسه نتایج آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده فشاری،  $P_c=201.6$  kPa،  $e=0.724$  ..... ۱۱۳
- شکل ۹-۷ آزمایش سه محوری زهکشی نشده کششی  $P_c=202$  kPa و  $e=0.824$  ..... ۱۱۴
- شکل ۱۰-۷ مقایسه نتایج آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده کششی  $P_c=202$  kPa،  $e=0.824$  ..... ۱۱۵

- شکل ۷-۱۱ منحنی حالت بحرانی برای ماسه Syncrude با استفاده از نتایج آزمایشهای سه محوری فشاری دانشگاه LAVAL ..... ۱۱۶
- شکل ۷-۱۲ معادله منحنی حالت بحرانی برای ماسه Syncrude با استفاده از آزمایشهای سه محوری فشاری دانشگاه LAVAL در فضای e-Lnp ..... ۱۱۶
- شکل ۷-۱۳ الگوی جابجایی در پروژه CANLEX و با استفاده از مدل "حالت بحرانی" و با فرض نفوذپذیری لایه بستر مطابق فرایض دانشگاه UBC ..... ۱۱۸
- شکل ۷-۱۴ الگوی جابجایی در پروژه CANLEX و با استفاده از مدل "حالت بحرانی" و با فرض نفوذپذیری لایه بستر مطابق رابطه ۷-۱ ..... ۱۱۹
- شکل ۷-۱۵ مقایسه مقاومت و سختی در آزمایشهای سه محوری فشاری و سه محوری کششی،  $P_c=294.6 \text{ kPa}$  و  $e=0.819$  ..... ۱۱۹
- شکل ۷-۱۶ الگوی جابجایی در پروژه CANLEX و با استفاده از مدل موهرکلمب ..... ۱۲۰
- شکل ۷-۱۷ الگوی فشار آب حفره‌ای در پروژه CANLEX و با استفاده از مدل "حالت بحرانی" و فرض نفوذپذیری لایه بستر مطابق فرایض دانشگاه UBC ..... ۱۲۱
- شکل ۷-۱۸ الگوی فشار آب حفره‌ای در پروژه CANLEX و با استفاده از مدل "حالت بحرانی" و فرض نفوذپذیری لایه بستر مطابق رابطه ۷-۱ ..... ۱۲۲
- شکل ۷-۱۹ نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی در خط ۱ ابزارگذاری ..... ۱۲۳

## فصل اول

### مقدمه و کلیات

تغییرشکل‌های جانبی زمین که در زمینهای با شیب کم (نزدیک به صفر) متشکل از خاکهای ماسه‌ای سست و اشباع بر اثر پدیده روانگرایی (liquefaction) رخ می‌دهند، یکی از معمول‌ترین و مهم‌ترین علل ایجاد خسارت در زمان وقوع زلزله یا مدتی پس از آن می‌باشد. این تغییرشکلها به صورت دائمی بوده و میزان آنها معمولاً بین چند سانتیمتر تا چندین متر در موارد مختلف تغییر می‌کند. موارد و مثالهای متعددی از خسارتهای شدید به شریانهای حیاتی، سازه‌های زیرزمینی، کانالها، جاده‌ها و پی سازه‌ها بر اثر این پدیده مشاهده شده است. این پدیده عمدتاً بعلت افزایش فشار آب منفذی و یا ایجاد روانگرایی در خاکهای ماسه‌ای اشباع در حین زلزله به وجود می‌آیند.

یکی از شاخص‌ترین و مهم‌ترین پدیده‌هایی که بعنوان عامل مهم در پیدایش گسترش جانبی نقش دارد، کاهش مقاومت مخلوط خاک تحت بارهای وارده می‌باشد. این پدیده بعلت افزایش فشار آب منفذی در اثر اعمال تنشهای برشی و در نتیجه آن تمایل خاک غیرمتراکم به کاهش حجم به وجود می‌آید و در اثر آن نیروهای بین دانه‌ای در فاز جامد خاک و در نتیجه مقاومت آن کاهش می‌یابد. همچنین بعلت ترکیب نیروهای استاتیکی و دینامیکی که بر سیستمی از خاکهای روانگرا و غیرروانگرا اعمال می‌شود، پیش‌بینی مقدار جابجایی در اثر گسترش جانبی پیچیده به نظر می‌رسد. همچنین تحلیل این مسئله نیاز به یک آنالیز غیرخطی دینامیکی سه بعدی بر خاک غیرهمسان و ناهمگن دارد. پیش از این، Yasuda و همکاران (۱۹۹۰)، Towhata و همکاران (۱۹۹۰)، Hamada و همکاران (۱۹۸۷) از مدل‌های الاستیک و دوبعدی برای پیش‌بینی جابجایی‌های ناشی از گسترش جانبی در زلزله‌های Niigata (۱۹۶۴) و Nihinkai-Chubu

(۱۹۸۳) استفاده می‌کردند. بدیهی است که اگر از مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر برای پیش بینی پاسخ تنش- کرنش خاکها در شرایط بارگذاری مختلف استفاده گردد، نتایج مطلوبتر و به واقعیت نزدیکتر خواهد بود.

مدل امام و همکاران (Imam et al., 2005) می‌تواند رفتار ماسه‌ها، بویژه ماسه‌های غیرمترکم را پیش‌بینی کرده و ویژگی‌های خاص این مواد را در مدلسازی منظور نماید. از جمله این ویژگی‌ها که تاثیر قابل توجهی بر رفتار اینگونه ماسه‌ها دارد، اثر ناهمسانی رفتار ماسه‌ها که باعث تفاوت رفتار آنها در بارگذاری سه محوری فشاری و کششی می‌شود، روانگرایی استاتیکی در شرایط زهکشی نشده، اثرات نسبت تخلخل و فشار تحکیم بر رفتار زهکشی شده و زهکشی نشده، رفتار تحت تحکیم ناهمسان، و اثر مسیر تنش اعمال شده بر رفتار می‌باشد. با توجه به امکانات این مدل در منظور کردن جنبه‌های مختلف رفتار ماسه‌ها، همچنین توانایی گسترده نرم افزار FLAC در مدلسازی مصالح ژئوتکنیکی و کاربرد روز افزون آن، و همچنین نبودن یک مدل رفتاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها در این نرم افزار، مدل امام و همکاران در زبان برنامه نویسی FISH به این نرم‌افزار اضافه گردید تا امکان مدلسازی و بررسی رفتار سازه‌های تشکیل شده از خاک ماسه‌ای، بویژه مطالعه روانگرایی ماسه‌های غیرمترکم و اشباع به کمک این برنامه فراهم شود. بررسی درستی کارکرد برنامه با مدل کردن انواع آزمایشهای سه محوری بر روی ماسه توپورا، سنجیده شد و نتایج حاصله با نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی مقایسه گردید که تطابق خوبی بین نتایج حاصل گشت. پس از اطمینان از درستی کارکرد برنامه، از مدل امام و همکاران در مدلسازی یک سازه خاکی با خاک ماسه‌ای استفاده شد تا سازگاری نتایج بدست آمده از برنامه نوشته شده با رفتار واقعی اندازه گیری شده یک سازه خاکی، و همچنین سازگاری با پیش بینی‌های دیگر مدل‌های رفتاری سنجیده شود. برای اینکار خاکریز پروژه CANLEX که به منظور ایجاد روانگرایی جریانی (flow liquefaction) بر روی ماسه شل و اشباع Syncrude تحت بارگذاری سریع طراحی و اجرا شده بود، با استفاده از مدل امام و همکاران مدلسازی شد.

پس از بیان مقدمه در فصل اول، انواع حالت‌های روانگرایی خاکهای ماسه‌ای در فصل دوم توضیح داده شده و اینکه چرا به مدل رفتاری مناسب برای پیش بینی روانگرایی نیاز است، پاسخ داده می‌شود.

در فصل سوم، نگاهی کوتاه به اصول و مفاهیم اولیه مدلسازی خواهیم داشت. در فصل چهارم، تایخچه‌ای از مدلسازی مختصراً توضیح داده شده و مدل امام و همکاران مفصلاً توضیح داده می‌شود. در فصل پنجم، مدل امام و همکاران که با استفاده از زبان برنامه نویسی خاص نرم افزار FLAC که تحت نام FISH شناخته می‌شود، برنامه نویسی شده و صحت درستی آن برنامه نوشته شده با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در فصل ششم، آزمایش CANLEX که یک آزمایش روانگرایی تحت بارگذاری استاتیکی می‌باشد، معرفی می‌گردد. همچنین نتایج مدلسازی دانشگاه UBC و آلبرتا از پروژه CANLEX آورده شده است. در فصل هفتم، پروژه CANLEX با استفاده از مدل امام و همکاران مدلسازی شده و نتایج حاصله با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه گردیده است. در فصل آخر پایان نامه نتایج کلی به‌مراه پیشنهادها جهت ادامه تحقیق ارائه می‌شود. در این پایان‌نامه در موارد مناسب از علائم اختصاری استفاده شده تا مانع از خستگی خواننده شود. علائم اختصاری بکار رفته در متن پایان‌نامه، به تفصیل در انتها آمده است.



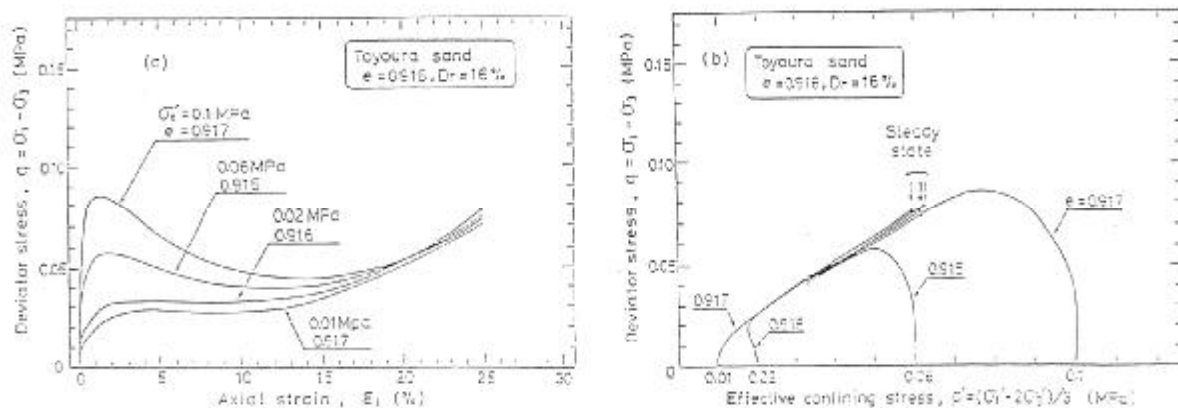
## فصل دوم

### حالت‌های روانگرایی خاکهای ماسه‌ای و نیاز به مدل رفتاری مناسب برای پیش بینی آنها

#### ۲-۱- مفهوم روانگرایی

چندین سال طول کشید تا پدیده روانگرایی خاک بخوبی شناخته شد. ترزاقی و پک (۱۹۴۸) برای توصیف از دست رفتن ناگهانی مقاومت ماسه‌های خیلی شل که باعث لغزشهای جریانی می‌شد از عبارت "روانگرایی فاجعه بار" استفاده کردند. Mogami and Kubo (۱۹۵۳) از عبارت روانگرایی برای توصیف روانگرایی ناشی از زلزله استفاده کردند. از سال ۱۹۶۴ به بعد، و پس از وقوع زلزله تاریخی Niigata، تحقیقات زیادی برای شناخت و توصیف روانگرایی خاک انجام شد.

Castro (۱۹۶۹) روانگرایی را بعنوان نرم شوندگی و گسیختگی ماسه شل تا رسیدن به حالت نهایی تغییر شکل تحت تنشهای موثر و حجم ثابت، که آنرا حالت پایدار (steady state) نامید، تعریف کرد. Seed و دیگران (۱۹۸۳) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روانگرایی را حالت تنش موثر صفر بر اثر بارگذاری سیکلی توصیف کردند. Ishihara (۱۹۹۳) نتایج آزمایشهای سه محوری زهکشی نشده بر روی ماسه شل توپورا را طبق شکل ۲-۱ گزارش کرده است. این نتایج شمایی از رفتار نمونه‌های ماسه با نسبت تخلخل یکسان ولی فشار همه جانبه متفاوت تحت بارگذاری سه محوری فشاری در شرایط زهکشی نشده را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۱ رفتار زهکشی نشده ماسه Toyoura [1]

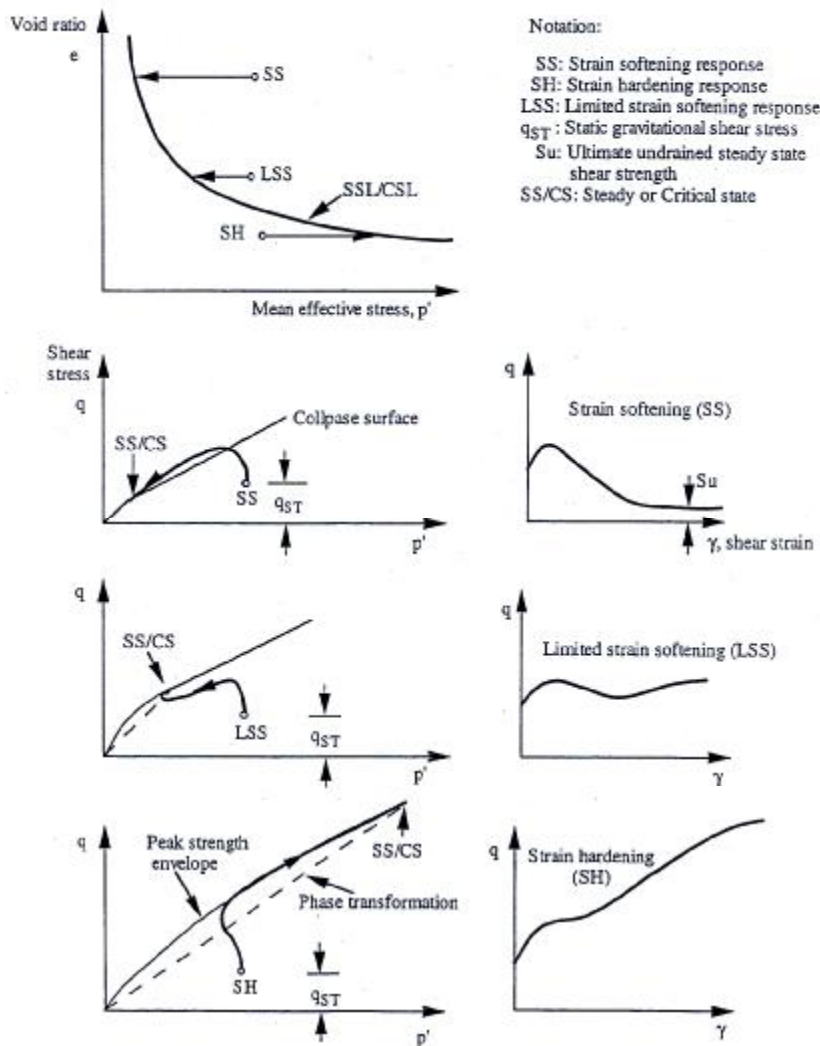
ماسه‌های خیلی شل (دانسیته نسبی = ۰.۱۶) نرم شوندگی قابل ملاحظه‌ای در شرایط زهکشی نشده دارند. در اینحالت تنش برشی ابتدا به مقدار حداکثر خود می‌رسد و سپس نرم شوندگی اتفاق افتاده و سرانجام به شرایط بحرانی یا حالت پایدار می‌رسد. در فشار همه جانبه کم و نسبت تخلخل یکسان، ماسه تا رسیدن به حالت بحرانی، رفتار سخت شونده دارد. برای ماسه با دانسیته بیشتر، رفتار مشابهی دیده می‌شود و تنها شرایط حالت پایدار در تراز تنش بالاتری بوجود می‌آید (Ishihara, 1993).

شکل ۲-۲ خلاصه‌ای از رفتار خاکهای دانه‌ای را که به صورت سه محوری فشاری زهکشی نشده بارگذاری شده‌اند، نشان می‌دهد. در فضای  $e-p'$ ، خاکی که نسبت تخلخل آن بیشتر از خط حالت بحرانی است، در کرنشهای بزرگ رفتار نرم شونده (Strain softening) داشته و در صورتیکه نسبت تخلخل آن کمتر از خط حالت بحرانی باشد، در کرنشهای بزرگ رفتار سخت شونده (Strain hardening) خواهد بود. ممکن است خاکی با نسبت تخلخل بیشتر ولی نزدیک به حالت بحرانی داشته باشیم، در این صورت رفتار نرم شونده محدود (Limited Strain Softening) خواهد بود تا اینکه به حالت شبه پایدار (Quasi-Steady state) برسد. بعد از این حالت، خاک رفتار سخت شونده داشته تا آنکه سرانجام به حالت بحرانی می‌رسد.

اگر یک شیب تماماً از خاک نرم شونده تشکیل شده باشد و تنشهای برشی موجود از مقاومت باقیمانده بزرگتر باشد، شکست و روانگرایی جریانی در صورتی اتفاق می‌افتد که خاک شروع به نرم شوندگی کند. این شکست می‌تواند در اثر بارگذاری استاتیکی و یا دینامیکی شروع شود. Sasitharan و همکاران (۱۹۹۳) نشان دادند که در اثر افزایش تدریجی تراز آب زیرزمینی و کاهش تنش موثر، روانگرایی استاتیکی می‌تواند اتفاق افتد.

اگر یک سازه خاکی تماماً از خاک سخت شونده تشکیل شده باشد، به طور کلی شکست رخ نخواهد داد مگر اینکه خاک در اثر بازپخش فشار آب حفره‌ای شل شود. اگر یک سازه خاکی هم از خاکهای نرم شونده و هم سخت شونده تشکیل شده باشد و خاکهای نرم شونده به کرنش نرم شوندگی برسند، گسیختگی و لغزش جریانی فقط در صورتی اتفاق می‌افتد که بعد از توزیع تنش ناشی از نرم شوندگی خاکهای نرم شونده،

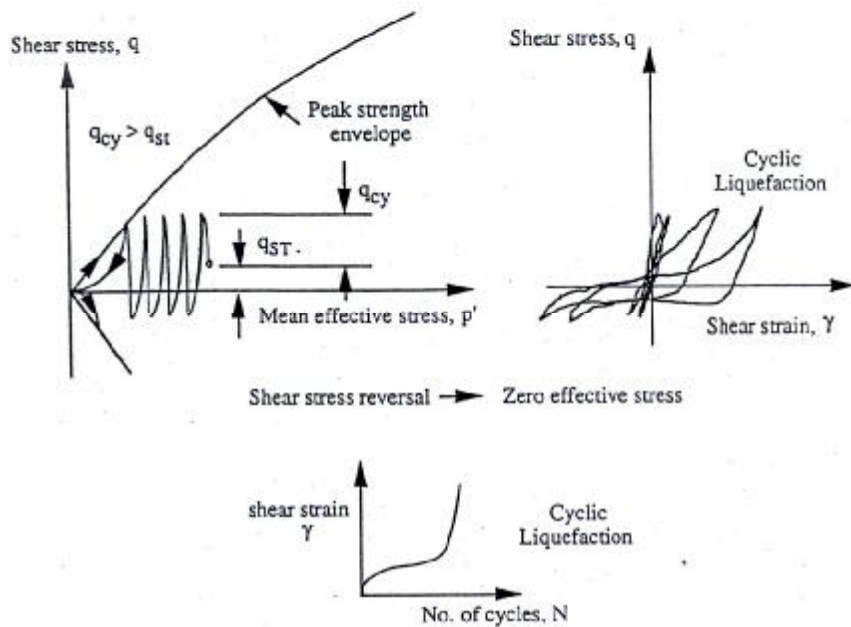
خاکهای سخت شونده قادر به تحمل تنشهای برشی موجود نباشند. شروع لغزش ناشی از جریان روانگرایی می تواند بعلت بارهای سیکلی (مانند زلزله) و یا استاتیکی مانند بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و یا ریزش باران زیاد باشد.



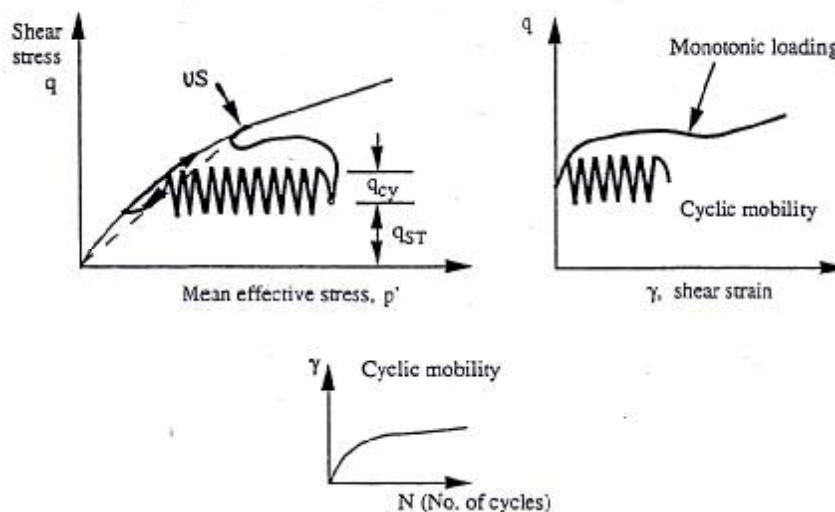
شکل ۲-۲ رفتار شوماتیک خاک غیرچسبنده در آزمایش سه محوری فشاری استاتیکی [1]

در طول بارگذاری زهکشی نشده سیکلی، تقریباً همه خاکهای دانه‌ای در کرنشهای کوچک به فشار آب حفره‌ای مثبت می‌رسند. اگر در ضمن بارگذاری سیکلی، تغییر جهت تنش برشی (Shear stress reversal) داشته باشیم، تنش موثر می‌تواند تا رسیدن به نقطه تنش موثر صفر پیشرفت کند (شکل ۲-۳). برای وقوع تغییر جهت تنش برشی شرایط شیب زمین معمولاً باید مسطح یا بطور ملایم شیب دار باشد. هنگامی که یک المان خاک به حالت تنش موثر صفر می‌رسد، خاک سختی بسیار کمی داشته و تغییرشکل‌های بزرگ در طول بارگذاری سیکلی به وقوع می‌پیوندد. برای خاکهای متراکم، ممکن است بارگذاری سیکلی برای کاهش

تنش موثر تا مقدار لازم برای رسیدن به شرایط فوق کافی نباشد و در نتیجه، تغییرشکلها کوچکتر خواهند بود. هنگامی که بارگذاری سیکلی متوقف می‌گردد، تغییرشکلها، غیر از آنهایی که وابسته به توزیع مجدد فشار آب حفره‌ای هستند، متوقف می‌شوند. اگر هیچگونه تغییر جهت تنش برشی نداشته باشیم، تنش موثر موجود به صفر نمی‌رسد و روانگرایی سیکلی همراه با تغییرشکل‌های محدود خواهیم داشت.



شکل ۲-۳ شمایی از رفتار روانگرایی سیکلی [1]



شکل ۲-۴ شمایی از رفتار تحرک سیکلی [1]