

# ژئوتکنیک لرزه‌ای مهندسی

تالیف:

Ikuo Towhata

ترجمه:

احمد رضا مظاهری

عضو هیئت علمی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)

مسعود پاک نهاد

عضو هیئت علمی گروه عمران، مرکز آموزش عالی محلات



نشر علم عمران

[www.elme-omran.com](http://www.elme-omran.com)

[Info@elme-omran.com](mailto:Info@elme-omran.com)

عضو:



انجمن فنی، نشر علم عمران کتابخانه ملی

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه	توهاتا، ايكو Towhata، Ikuo
عنوان و پديد آورنده	ژئوتکنیک لرزه‌ای مهندسی / تالیف ايكو توهاتا ؛ ترجمه مسعود پاک‌نهاد، احمدرضا مظاهری.
مشخصات نشر	تهران : علم عمران ، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ۳۰۹ ص: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: ۳۰۰۰۰۰ ریال 978-600-517-644-5
عنوان اصلی:	Geotechnical earthquake engineering, c2008
موضوع	: کتاب حاضر همچنین با عنوان "مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای" با ترجمه امیدرضا بهادری‌نژاد، محمدسعید پارسامهر، انتشارات مصفاى الوند، ۱۳۹۶ ترجمه و فیبا دریافت کرده است، مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، زلزله - مهندسی،
موضوع	: Earthquake engineering، خاک - مکانیک، Soil mechanics
شناسه افزوده	: پاکستان، مسعود، ۱۳۴۴ - مترجم
شناسه افزوده	: مظاهری، احمدرضا، ۱۳۶۴ - ، مترجم
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۶ ت ۹۷۹ / ۶ / ۶۵۴ TA
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۴ / ۱۷۶۲
شماره کتابخانه ملی	: ۴۹۸۶۸۶



نشر علم عمران

ژئوتکنیک لرزه‌ای مهندسی

تالیف: Ikuo Towhata

ترجمه: مسعود پاک‌نهاد، احمدرضا مظاهری

پاییز ۱۳۹۶

چاپ اول

علم عمران

حروف‌چینی و صفحه‌آرایی

۳۰۹ صفحه خشتی

تعداد و قطع صفحات

۱۰۰۰

شمارگان

۳۰۰۰۰۰ ریال

بهای کتاب

ISBN 978-600-5176-44-5

شابک ۹۷۸-۶۰۰-۵۱۷۶-۴۴-۵

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان آرا، بین خیابان‌های ۱۶ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱،

تلفن: ۸۸۳۵۳۹۳۰، دورنگار: ۸۸۳۵۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

## مقدمه

## نویسنده

### پیشگفتار

این کتاب نتیجه فعالیت های طولانی من در هر دو زمینه تحقیق و تدریس است. چاپ این کتاب با همکاری مالی وزارت آموزش و فرهنگ و صنعت میسر شده است. بعنوان تدریس، مطالب را برای اولین بار از سال ۱۹۸۵ برای تدریس دینامیک خاک در انستیتوی تکنولوژی در بانکوک، تایلند تدریس کرده ام. یافته های میدانی و آزمایشگاهی را از مطالب چاپ شده و تعدادی دست نویس جمع آوری کرده ام. از آنجا که تکنولوژی کامپیوتر خیلی در دهه های ۸۰ پیشرفت نکرده بود، دست نویس ها بصورت قطعات بریده شده و کنار هم گذاشته شده بصورت دستی بودند و بسیاری از صفحات بصورت دست نویس بودند. پس از آن در سال ۱۹۹۵ در دانشگاه توکیو همان موضوع را تدریس کرده ام. از آن زمان به بعد من اطلاعات بسیاری از نتایج تحقیقات میدانی و تست های آزمایشگاهی و همچنین تحلیل های عددی به آن اضافه کرده ام. و امکان آن پیدا شد که همه آن بصورت رسانه کامپیوتری در آمده و تدریس آن آسانتر شود. خواننده میتواند ببیند که کتاب حاوی نوشته های ژاپنی در میان کلمات انگلیسی نیز هست. زیرا این متن برای تدریس در توکیو آماده شده بود. هدف اصلی این کتاب جمع آوری داده هایی مفید برای فهم و وضعیت تکنولوژی پیشرفته و کاربردهای آن در موضوعات نوین است. فهم موارد اساسی اهمیت دارد زیرا در عمل و تئوری ها و شیوه تفکرمان در مورد مسائل فرضیات بسیاری را قبول می کنیم. و این سیاست من بوده است که با استفاده از آزمایشات و پیش زمینه های دانش نشان دهم چرا در عمل این ایده ها بکار می روند. این تفکر و ایده اکنون نیز تغییر نکرده است.

جمع آوری اطلاعات پیش زمینه برای یک شخص واحد بسیار ساده هم نیست. لازم است که بسیاری از نشریات خوانده شوند، که بعضی در نیمه اول قرن بیستم به چاپ رسیده اند و تعدادی در نشریات محلی به چاپ رسیده اند. کار غیر ممکن نیست اما، جمع آوری این اطلاعات در وهله اول یک کار بسیار زمان بر است، و همچنین دسترسی به بسیاری از منابع نشریات قدیمی اکنون نیز ساده نیست. بنابر این من در این کتاب تلاش کرده ام اطلاعات را هر چقدر که میسر بوده جمع آوری کنم تا در زمان مطالعات نسل جدید خوانندگان صرفه جویی شود. بنابر این بسیاری از شکل های نشریات اصلی بازتولید شده است. علاوه بر این تلاش کرده ام سایت های با اهمیت را بازدید کرده و عکس هایی را برای نشان دادن ایده های عملی و معنادار کردن مطالب تهیه نم. اگرچه نتیجه کامل نیست، اما اطلاعات این کتاب میتواند برای خوانندگانی که نیاز به درک عملی وضعیت فعلی کنند مفید خواهد بود تا بتوانند در کار فعلی و آینده خود بهبود ایجاد کنند. این خصوصاً اهمیت دارد زیرا گسترش جامعه ما مسائل جدیدی را ایجاد می کند و روش های جدیدی را برای حل آنها بصورت مداوم نیاز خواهد داشت.

یک مسئله با اهمیت در این کتاب اطلاعات فوق العاده زیاد آن است. برای هر خواننده جوان که به تازگی مهندسی ژئوتکنیک و مهندس خاک را آغاز کرده است، اهمیت دارد که یک دید کلی پیدا کرده و بعد جزئیات مطالب را یاد بگیرد. تعداد کل صفحات و محتوی این کتاب میتواند مانع تلاش آنها شود. به

همین منظور من تصمیم گرفتم که محتوی کتاب را به سه بخش تقسیم کنم، بخش مقدماتی، پیشرفته و متفرقه. لذا خواننده می تواند به جای نیاز به خواندن سرتاسر کتاب، فقط قسمتی از مطالب مورد نیاز و دلخواه خود را انتخاب کند. مطالب متفرقه به معنای بی اهمیت بودن آن نیست، بعضی از اوقات موضوعات بسیار جالبی را در آنها میتوان یافت. بنابراین این توصیه می شود که خوانندگان جوان نگاه کلی به این صفحات نیز داشته باشند. از سوی دیگر انتظار نمی رود که خوانندگان از ابتدا تا انتهای کتاب را صفحه به صفحه بصورت پیوسته مطالعه کنند.

من امیدوارم که اطلاعات آورده شده در این کتاب به خوانندگان برای گسترش دانش و فعالیت هایشان در زمینه مهندسی ژئوتکنیک کمک کند. مطمئنا در محتوی این کتاب موضوعات با اهمیت دیگری آورده نشده است. من در صفحه شخصی خود اصلاحات و مطالب جدید را اضافه خواهم کرد. به خوانندگان توصیه می شود که از سایت آزمایشگاه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی دانشگاه توکیو، ژاپن بازدید نمایند

Ik uo Towhata

ژوئن ۲۰۰۷

## مقدمه

## مترجمین

امروزه با گسترش علم ژئوتکنیک، لزوم شناخت دقیق تر رفتار خاک در زمان وقوع زلزله و پس از آن بیشتر از گذشته احساس می گردد. با شناخت درست عوامل محرک ایجاد لرزش و بررسی دقیق خاک محل می توان حرکت زمین در حین زلزله و تغییر شکل های ماندگار بعد از وقوع زلزله را پیش بینی نمود. به منظور شناخت عوامل محرک لازم است شناخت دقیقی از منابع تولید زلزله و گسل های موجود ایجاد گردد، انواع امواج ناشی از زلزله، سرعت انتشار و نحوه مستهلک شدن انرژی آنها به خوبی بررسی گردد. علاوه بر آن نیاز است تا شناخت دقیقی از خصوصیات خاک نیز حاصل شود که این موضوع می تواند با انجام تست های آزمایشگاهی و صحرایی استاتیکی و دینامیکی ایجاد شود.

کتاب حاضر ترجمه کتاب *Geotechnical Earthquake Engineering* نوشته آقای پروفیسور Ikuo Towhata می باشد که توسط انتشارات Springer در سال ۲۰۰۸ چاپ شده است. یازده فصل در کتاب پیشرو آمده است که در فصل اول و دوم مسائل مقدماتی ژئوتکنیک لرزه ای مورد بحث قرار گرفته و پس از آن در فصول سوم، چهارم و پنجم مباحث مربوط به زلزله شناسی، انتشار امواج و اثراتی که زمین لرزه می تواند ایجاد کند پرداخته شده است. در فصل ششم پاسخ دینامیکی در خاکها و اثراتی که لای های خاک می تواند بر امواج زلزله از سنگ بستر تا سطح زمین بگذارد بررسی شده است. به منظور ارزیابی رفتار خاک لازم است تا شناخت دقیقی از مشخصات دینامیکی خاک صورت گیرد که این موضوع با معرفی و شناخت تست های صحرایی و آزمایشگاهی در فصول بعدی کتاب حاصل شده است.

امید است که ترجمه این کتاب بتواند موجب آشنایی بیشتر پژوهشگران و دانشجویان با مبانی و موضوعات مطرح در مهندسی ژئوتکنیک باشد. همچنین با توجه به موضوعات مطرح شده در این کتاب، می تواند به عنوان مرجع مفیدی در دروس دینامیک خاک، ژئوتکنیک لرزه ای، مبانی مهندسی لرزه ای در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مورد استفاده دانشجویان و اساتید محترم در کشور عزیزمان قرار گیرد.

مسعود پاکنهاد، احمدرضا مظاهری

# فهرست

## مطالب

۲-۳- نواحی با احتمال وقوع زمین لرزه‌های بزرگ.....	۴۳
۳-۳- لرزه خیری به علت تحریک مخزن آب.....	۴۶
مراجع .....	۴۷

### فصل چهارم: انتشار امواج در فضای الاستیک..... ۴۹

۱-۴- موج‌های زلزله: موج برشی S.....	۵۰
۲-۴- موج‌های زلزله: موج طولی P.....	۵۱
۳-۴- ایده‌آل سازی انتشار موج قائم.....	۵۳
۴-۴- انتشار قائم موج برشی S در سطح زمین.....	۵۵
۶-۴- تمرین شماره ۱- بزرگ نمایی حرکت زمین.....	۵۹
۷-۴- امواج زلزله: موج رابلی.....	۵۹
۸-۴- امواج زلزله: موج لاو.....	۶۱
۹-۴- پاسخ محیط الاستیک به تحریک سطحی.....	۶۳
۱۰-۴- انتقال و اثرات موج در محل تلاقی دو لایه (اینترفیس).....	۶۴
۱۱-۴- محاسبه انرژی موج لرزه ای.....	۶۶
۱۲-۴- ترافیک- ایجاد ارتعاش در زمین.....	۶۷
مراجع .....	۶۹

### فصل پنجم: اثرات زمین لرزه..... ۷۱

۱-۵- شدت حرکت زلزله.....	۷۲
۲-۵- شدت زلزله اصلاح شده.....	۷۴
۳-۵- ابزار آلات تعیین شدت زلزله.....	۷۵
۴-۵- بزرگی زلزله.....	۷۷

### فصل اول: اصول مقدماتی در مکانیک خاک..... ۱

۱-۱- خواص فیزیکی خاک.....	۲
۲-۱- وزن و دانسیته خاک.....	۳
۳-۱- تنش موثر و فشار آب حفره ای.....	۵
۴-۱- ملاحظات و تغییرات حجم.....	۹
۵-۱- تغییر شکل برشی و مقاومت ماسه.....	۱۳
۶-۱- اتساع یا تغییرات حجم برشی.....	۱۴
۷-۱- آزمایش برش زهکشی نشده یا با حجم ثابت.....	۱۶
۸-۱- فشار آب حفره ای اضافی و دیاگرام مسیر تنش.....	۱۷
۹-۱- دستگاه برش سه محوری.....	۱۹
۱۰-۱- نفوذ در غشا.....	۲۱
۱۱-۱- دینامیک مقدماتی.....	۲۳
۱۲-۱- آزمایش نفوذ استاندارد.....	۲۵
۱۳-۱- جریان آب زیرزمینی.....	۲۸
۱۴-۱- نوار برش.....	۳۱
مراجع .....	۳۲

### فصل دوم: مقدمه..... ۳۵

۱-۲- اهداف مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای.....	۳۶
۲-۲- مسائل ژئوتکنیکی که در حین زلزله با آن مواجه می‌شویم.....	۳۷
۳-۲- دیاگرام کلی نمایش رابطه مابین مسائل لرزه ای ژئوتکنیک.....	۳۸

### فصل سوم: دانش زلزله شناسی..... ۳۹

۱-۳- گسیختگی گسل بعنوان علت زلزله.....	۴۰
--	----

۶-۱۷- تمرین شماره ۲ تحلیل پاسخ دینامیکی بر روی خاک الاستیک ..... ۱۴۲  
مراجع ..... ۱۴۳

#### فصل هفتم: تحلیل شبه استاتیکی محدود ..... ۱۴۵

۷-۱- ضریب زلزله ..... ۱۴۶  
۷-۲- روش اصلاح شده ضریب زلزله ..... ۱۵۱  
۷-۳- حرکت قائم ..... ۱۵۳  
۷-۴- امتداد نیروی اینرسی زلزله در طراحی ..... ۱۵۶  
مراجع ..... ۱۵۷

#### فصل هشتم: آزمایشات صحرائی ..... ۱۵۹

۸-۱- آزمایشات صحرائی برای سرعت موج برشی ..... ۱۶۰  
۸-۲- عملیات اکتشاف در چاه بصورت معلق ..... ۱۶۱  
۸-۳- آزمایش عرضی گمانه ..... ۱۶۴  
۸-۴- روابط تجربی مابین N-SPT و Vs در خاک‌های آبرفتی ..... ۱۶۵  
۸-۵- رابطه ما بین N-SPT و Vs در خاک‌های شنی ..... ۱۶۷  
۸-۶- رابطه مابین N-SPT و Vs در خاک‌های پلیستوسن ..... ۱۶۹  
۸-۷- روش انکسار لرزه‌ای برای اکتشاف و بررسی خاک ..... ۱۷۱  
۸-۸- تکنیک انباشته کردن برای حذف نویز از سیگنال ..... ۱۷۳  
۸-۹- آزمایش نفوذ وزنه سوئدی ..... ۱۷۶  
۸-۱۰- لرزش‌های خفیف (ریز لرزه) ..... ۱۷۸  
۸-۱۱- بررسی خاک سطحی بوسیله ثبت امواج سطحی ..... ۱۸۳  
مراجع ..... ۱۸۶

#### فصل نهم: پاسخ دینامیکی مدل‌ها در حالت مدول خاک به فرم

#### اعداد مختلط ..... ۱۸۷

۹-۱- مدل کردن رابطه تنش - کرنش با اعداد مختلط ..... ۱۸۸  
۹-۲- نسبت میرایی در دینامیک خاک و نسبت میرایی بحرانی ..... ۱۹۰  
۹-۳- ارتفاعش میرا در مدل اعداد مختلط ..... ۱۹۱  
۹-۴- ارتفاعش اجباری در مدل اعداد مختلط ..... ۱۹۳

۵-۵- تاریخچه زمانی حرکت زمین ..... ۷۹  
۵-۶- تاثیر وضعیت خاک محل بر روی حداکثر شتاب ..... ۸۰  
۵-۷- چند رکورد حرکت زلزله‌های مشهور ..... ۸۱  
۵-۸- حرکت زمین در حین زلزله مکزیک در سال ۱۹۸۵ ..... ۸۳  
۵-۹- قدرت تاریخچه زمانی شتاب ..... ۸۴  
۵-۱۰- فاصله از منبع زلزله ..... ۸۶  
۵-۱۱- تخمین شدت حرکت زلزله ..... ۸۷  
۵-۱۲- تخمین زمان تداوم حرکت زلزله ..... ۸۸  
۵-۱۳- تعیین زلزله طراحی ..... ۹۰  
۵-۱۴- آسیب‌های زلزله در خانه‌های سنتی ..... ۹۲  
۵-۱۵- مطالعات شناسایی خرابی‌های ناشی از زلزله ..... ۱۰۰  
مراجع ..... ۱۰۴

#### فصل ششم: آنالیز پاسخ دینامیکی ..... ۱۰۵

۶-۱- رفتار مستقل از نرخ کرنش در خاک رس ..... ۱۰۶  
۶-۲- اهمیت تجزیه و تحلیل جامع با اعداد مختلط ..... ۱۰۶  
۶-۳- پاسخ زودگذر ..... ۱۱۰  
۶-۴- انجام آنالیزها در دامنه زمانی یا دامنه فرکانسی ..... ۱۱۲  
۶-۵- انتگرال گیری عددی معادله حرکت در بازه زمانی ..... ۱۱۴  
۶-۶- روش بتای نیومارک ..... ۱۱۶  
۶-۷- مقدمه‌ای بر تحلیل پاسخ لرزه‌ای ..... ۱۱۹  
۶-۸- بزرگ‌نمایی حرکت در آبرفت سطحی ..... ۱۲۰  
۶-۹- اهمیت حرکت بیرون زدگی ها ..... ۱۲۳  
۶-۱۰- پاسخ لرزه‌ای خاک‌های چند لایه ..... ۱۲۴  
۶-۱۱- بزرگ‌نمایی حرکت در بالای تپه ها ..... ۱۲۶  
۶-۱۲- تحلیل بزرگ‌نمایی ناشی از تپه ها ..... ۱۲۸  
۶-۱۳- اثرات بزرگ‌نمایی محاسبه شده توپوگرافی تپه ای ..... ۱۳۰  
۶-۱۴- مشاهدات ثبت شده از اثرات توپوگرافی ..... ۱۳۱  
۶-۱۵- تئوری توابع بسمل ..... ۱۳۴  
۶-۱۶- شرایط مرزی نامتناهی ..... ۱۳۶

۱۰-۱۵- نسبت میرایی در خاک رس .....	۲۵۱
۱۰-۱۶-تأثیرات زمان تحکیم بر روی میرایی خاک رس .....	۲۵۲
۱۰-۱۷-منحنی های $G-\gamma$ و $h-\gamma$ در نمونه های دست نخورده .....	۲۵۴
۱۰-۱۸- تغییر شکل دینامیکی خاک های شنی .....	۲۵۵
۱۰-۱۹- جمع آوری نمونه های دست نخورده خاک .....	۲۵۷
۱۰-۲۰- روش منجمد کردن نمونه های ماسه ای .....	۲۶۲
۱۰-۲۱- میزان دست خوردگی نمونه .....	۲۶۲
۱۰-۲۲- رابطه مابین سرعت سطحی و کرنش در توده خاک .....	۲۶۵
۱۰-۲۳- رفتار سیکلی غیر خطی بتونیت سدیم .....	۲۶۶
۱۰-۲۴- رفتار سیکلی غیرخطی ضایعات جامد شهری .....	۲۶۸
..... مراجع	۲۷۸

### فصل یازدهم: مدل های تنش - کرنش ..... ۲۷۹

۱۱-۱- مدل های تنش - کرنش هایپربولیک و رامبرگ - اسگود .....	۲۸۰
..... (Ramberg-Osgood)	
۱۱-۲- اتساع ماسه تحت اثر برش زهکشی شده چرخه ای .....	۲۸۳
۱۱-۳- تئوری الاستو پلاستیک .....	۲۸۶
۱۱-۴- اتساع در شرایط بارگذاری چرخه ای .....	۲۹۱
۱۱-۵- مدل فنرهای غیرخطی چندگانه .....	۲۹۳
۱۱-۶- تحلیل المان گسسته .....	۲۹۶
..... مراجع	۳۰۰

۹-۵- انتشار موج در خاک با مدل اعداد مختلط .....	۱۹۵
۹-۶- جواب های عددی حقیقی در زمین با مدول الاستیک مختلط .....	۱۹۶
۹-۷- بزرگ نمایی بستر بیرون زده در حالت زمین با مدول اعداد مختلط .....	۱۹۸
۹-۸- تمرین شماره ۴ تحلیل پاسخ توده خاک چند لایه .....	۱۹۹
۹-۹- تغییرات مدول برشی در محل تلاقی لایه های خاک .....	۲۰۰
۹-۱۰- مدل خطی معادل .....	۲۰۳
۹-۱۱- تئوری سری های فوریه .....	۲۰۴
۹-۱۲- تحلیل طیف پاسخ با سری فوریه .....	۲۰۷
۹-۱۳- تحلیل دینامیکی با مدل خطی معادل .....	۲۱۱
۹-۱۴- مثال تحلیل خطی معادل .....	۲۱۳
۹-۱۵- پردازش حرکت زلزله .....	۲۱۶
۹-۱۶- نکات بیشتر در باره مدل خطی معادل .....	۲۲۱
..... مراجع	۲۲۳

### فصل دهم: تست های آزمایشگاهی برای خصوصیات دینامیکی

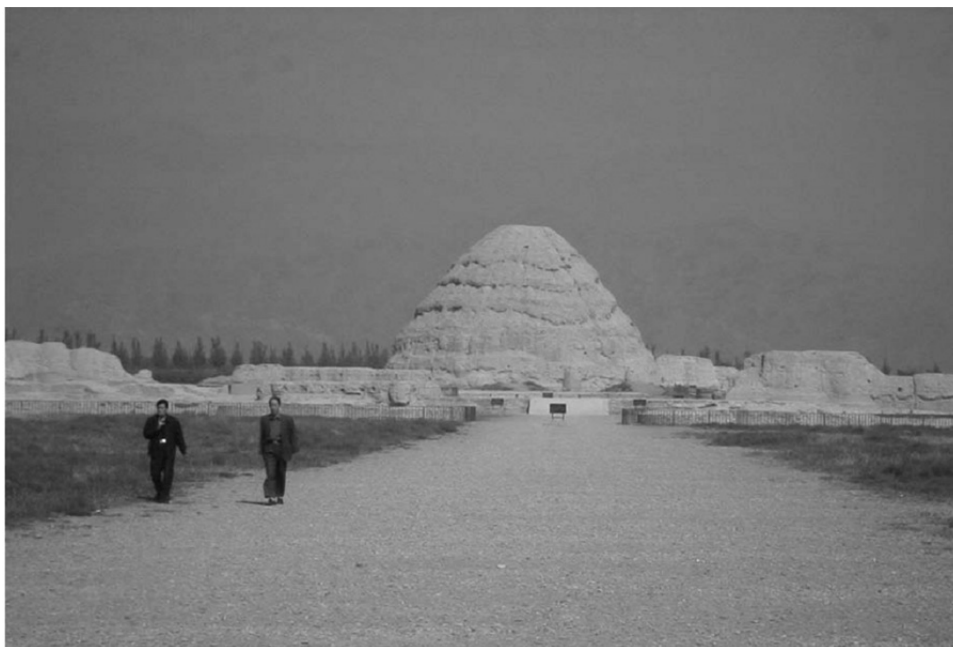
#### خاک ..... ۲۲۵

۱۰-۱- آزمایش ستون تشدید (رزونانس) بر روی خاک ها .....	۲۲۶
۱۰-۲- اصول اساسی در تفسیر اثرات بزرگ نمایی کرنش بر روی مدول برشی و نسبت میرایی .....	۲۲۸
۱۰-۳- عوامل موثر بر روی مدول و میرایی ماسه .....	۲۲۹
۱۰-۴- عوامل موثر در مدول و میرایی رس .....	۲۳۱
۱۰-۵- مدول برشی ماسه در دامنه کرنش کوچک .....	۲۳۲
۱۰-۶- اثرات دامنه کرنش بر روی مدول برشی .....	۲۳۶
۱۰-۷- اثرات تنش موثر بر روی مدول برشی ماسه .....	۲۳۸
۱۰-۸- نسبت میرایی ماسه .....	۲۳۹
۱۰-۹- وابستگی ماهیت رس به نرخ بارگذاری .....	۲۴۰
۱۰-۱۰- اثرات پلاستیسیته بر روی رفتار سیکلی خاک های رس .....	۲۴۳
۱۰-۱۱- اثرات دانسیته بر روی مدول برشی خاک رس .....	۲۴۵
۱۰-۱۲- تأثیرات سن بر روی مدول برشی خاک رس .....	۲۴۶
۱۰-۱۳- تأثیرات دامنه کرنش بر روی مدول برشی خاک رس .....	۲۴۸
۱۰-۱۴- افت مدول برشی در خاک رس .....	۲۴۹



## فصل اول

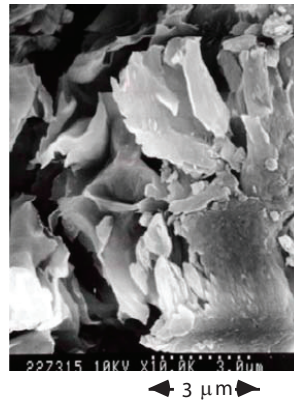
### اصول مقدماتی در مکانیک خاک



مقبره **Li Yuanhao**: مردم Tangut پادشاهی خود در غرب Xia را در منطقه خود مختار فعلی Ningxia Hui در شمال شرقی چین بنا کردند. اولین امپراتور ، Li Yuanhao ، حکومت خود را در ۱۰۳۸ آغاز کرد و امپراطوریش با عایدات تجارت از جاده ابریشم بسیار شکوفا شد. مقبره او در نزدیک شهر Yinchuan با کاشی‌های زیبایی تزئین شده است.



شکل ۱-۱- تصویر میکروسکوپی از شن Toyoura



شکل ۱-۲- تصویر میکروسکوپی دیجیتال از خاک رس بنتونیت (Towhata et al. 1993)

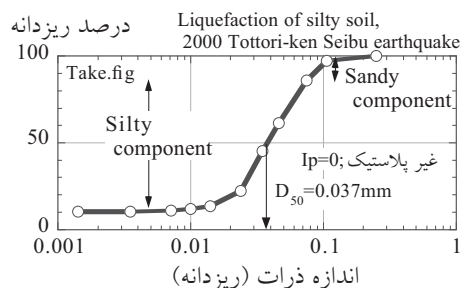
### ۱-۱- خواص فیزیکی خاک

خاک‌ها اصولاً به دو دسته، خاکهای دانه‌ای و خاکهای چسبنده، طبقه‌بندی می‌شوند. خاکهای دانه‌ای شن، ماسه و سیلت بدون چسبندگی می‌باشد (شکل ۱-۱). و خاکهای چسبنده ذرات رسی را شامل می‌شوند (شکل ۱-۲). خصوصیات مکانیکی خاک‌های دانه‌ای وابسته به تماس و اصطکاک دانه‌ها با یکدیگر است از اینرو مقدار نیروی تماسی و شکل هندسی مجموعه دانه‌ها نقش - باید یاد آور شویم که مقدار نیروی فشاری تماسی در واحد سطح خاک را تنش موثر می‌نامند که مهمترین مفهوم در مکانیک خاک امروزی است. در خاک‌های رسی علاوه بر اصطکاک بین ذرات، اندرکنش شیمیایی و الکتریکی بین ذرات رس نیز موثر هستند. از این رو مقاومت برشی، اگر تاریخچه تنش - کرنش اجازه دهد، حتی در حالتی که تنش موثر صفر است، فعال خواهد شد. حد روانی ( $LL$ ) و حد پلاستیک ( $PL$ )، که حدود اتربرگ نامیده می‌شوند، علاوه بر تنش موثر، دو پارامتر مهم برای اندازه‌گیری مقدار اثر مابین ذرات می‌باشند. نشانه خمیری  $PI$  یا  $I_p$  بصورت  $PI=LL-PL$  تعریف می‌شود.

بطور کلی،  $PI$  بیشتر خاک‌های رسی بین ۴۰ تا ۸۰ قرار می‌گیرد با این استثنا که در بنتونیت (Sodium smectite group) این مقدار ۴۰۰ و یا بیشتر است. بر اساس آیین نامه مکانیک خاک سال ۲۰۰۶ ژاپن، علامت  $\%$  در جلو عدد  $PI$  قرار داده نمی‌شود.

اختلاف مهم دیگر بین خاکهای دانه‌ای و رسی در اندازه دانه‌ها می‌باشد. اندازه دانه‌ها بر قابلیت هدایت هیدرولیکی (نفوذ پذیری یا قابلیت جریان آب سطحی در میان خاک) موثر است. در مکانیک خاک مرسوم است که دانه‌های بزرگتر از ۷۵ میکرون را ماسه و دانه‌های بزرگتر از ۲۰۰۰ میکرون (۲ میلی متر) را شن نامیده شوند. از طرف دیگر، ذرات کوچکتر از ۵ میکرون رس هستند که در ذرات رس نیروهای الکتریکی و شیمیایی (چسبندگی) مهم است. سیلت (خاکهای نرم و یکنواخت و خاک دارای رس) به ذرات مابین ۵ تا ۷۵ میکرون گفته می‌شود. سیلت‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند، گروه اول سیلت پلاستیک است که شامل مواد رسی دارای چسبندگی است. گروه دوم غیر پلاستیک است که ترکیبی از دانه‌های مشابه ماسه بدون چسبندگی است. اختلاف دو گروه خاکهای سیلتی را باید بخاطر داشته باشیم.

شکل ۱-۳ توزیع اندازه دانه‌های سیلت غیر پلاستیک که در اثر روانگرایی حین زلزله بیرون آمده است را نشان می‌دهد. محور قائم درصد وزن جمعیت ریزتر از اندازه ذرات در محور افقی را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که تقریباً بیش از ۸۰ درصد دانه‌ها در محدوده سیلت قرار دارد. اندازه دانه‌های در ۵۰ درصد عبوری را اندازه دانه متوسط  $D_{50}$  می‌نامند. یعنی قطری که ۵۰ درصد وزنی دانه‌ها از آن ریزتر می‌باشند.



شکل ۱-۳- منحنی توزیع اندازه دانه‌های خاک سیلتی روان شده

## ۱-۲- وزن و دانسیته خاک

دانسیته نسبی ( $G_s$ ) برابر دانسیته جرمی مصالح تشکیل دهنده تقسیم بر دانسیته آب است. لذا یک واحد حجمی دانه‌های خاک به مقدار  $G_s \gamma_w$  وزن دارد. از آنجا که بصورت مشابه از مواد سیلیکاتی ساخته شده اند، مقدار  $G_s$  بسیاری از خاک‌ها، خواه ماسه باشند و یا رسی، مابین محدوده  $2/6$  تا  $2/75$  قرار می‌گیرد.

وزن خاک عامل مهمی در محاسبه فشار خاک است. زمانیکه وزن خاک در واحد حجم،  $\gamma$ ، معلوم باشد، فشار قائم (تنش قائم یا نیروی فشاری قائم در واحد سطح) در عمق  $z$  بصورت  $\sigma_z = \gamma z$  محاسبه می‌شود. محدوده مقدار  $\gamma$  بصورت تقریبی برای خاک‌های خشک ۱۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب و برای خاک‌های قرار گرفته در زیر تراز آب سطحی ۱۹ تا ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب است. زمانی که فضای خالی مابین ذرات خاک کاملاً با آب، بدون

هیچگونه حباب گاز یا هوا پر شده باشد، خاک را اشباع می‌نامیم. میزان اشباع در آب با درجه اشباع شدگی بیان می‌شود ( $S_r$ ). زمانیکه خاک کاملاً اشباع باشد  $S_r = 1.0 (100\%)$  است و زمانیکه خشک باشد  $S_r = 0$  است. بنابراین وزن واحد خاک بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

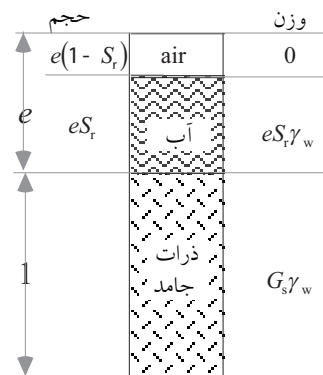
$$\gamma = \frac{\gamma_w G_s + e S_r \gamma_w}{1 + e} \quad (1-1)$$

که  $\gamma_w$  وزن واحد آب (۹/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب) و  $e$  نسبت تخلخل است که برابر نسبت حجمی فضاهای خالی مابین دانه‌های جامد به حجم فاز جامد است، شکل ۱-۴ را ببینید. همچنین میزان آب با نسبت وزنی بصورت زیر بیان می‌شود:

مقدار آب  $w$  برابراست با نسبت وزن آب به چگالی نسبی خاک.

$$w = \frac{e S_r}{G_s} \quad (2-1)$$

در عمل خاک‌های قرار گرفته در زیر آب سطحی را با اطمینان ۱۰۰ درصد اشباع شده در نظر گرفته و در معادله ۱-۲ مقدار  $S_r = 1.0$  در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱-۴- تعریف نسبت تخلخل

قسمت بعدی، تنش موثر، که به مفهوم مقدار نیروی تماسی مابین دانه‌های خاک است، را بررسی خواهد کرد. تنش موثر نقش بسیار مهمی در مکانیک خاک بازی می‌کند زیرا رفتار خاک به شدت تحت تاثیر نیروی تماسی بین دانه‌ها می‌باشد. در مقابل، تنش معمول که ناشی از بارهای وارده بر واحد سطح خاک هستند و به نام تنش کلی شناخته می‌شوند اهمیت کمتری دارد. تنش‌های قائم که قبلاً به آن اشاره شد یکی از انواع این تنش است. رفتار مکانیکی خاک مانند مقاومت روانگرایی ماسه، وابستگی زیادی به وضعیت قرار گیری دانه‌ها آن دارد. قرارگیری متراکم تر دانه‌ها رفتار ماسه را بهبود می‌بخشد. این ویژگی را نمی‌توان کاملاً با نسبت تخلخل ( $e$ ) - بیان نمود زیرا مقادیر نسبت تخلخل ماسه‌ها بر اساس اندازه دانه‌ها و صافی سطوح آن متغیر است و هر ماسه‌ای در حداکثر مقدار نسبت تخلخل بصورت مشابهی می‌تواند ضعیف باشد. بنابراین پارامتر جدیدی که دانسیته نسبی  $D_r$  نامیده

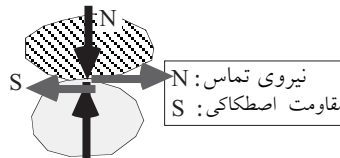
می‌شود، تعریف می‌گردد. زمانیکه ماسه در ضعیف‌ترین حالت قرار دارد  $D_r = 0\%$  است ( $e = e_{max}$ ) و  $D_r = 100\%$  برای زمانی است که ماسه متراکم‌ترین حالت را دارد ( $e = e_{min}$ ).

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100\% \quad (3-1)$$

مقادیر  $e_{min}$  و  $e_{max}$  با روشهای متعددی در شرایط بدون تنش قائم قابل اندازه‌گیری هستند. برای مثال، ته نشینی ملایم ماسه خشک یا ته نشینی در آب برای اندازه‌گیری وضعیت حداقل فشردگی دانه‌ها بکار می‌رود،  $e_{max}$ ، و آزمایش با لرزاندن نمونه برای محاسبه متراکم‌ترین حالت ادامه می‌یابد،  $e_{min}$ . توجه داشته باشید که وضعیت حداقل و حداکثر فشردگی تحت اثر فشارهای بالاتر تغییر می‌کند. یعنی وضعیت  $D_r = 0\%$  می‌تواند غیر فشرده‌تر از وضعیت فشردگی تحت اثر بار ۱۰۰ کیلو پاسکال باشد.

### ۱-۳- تنش موثر و فشار آب حفره ای

ماسه‌ای در عمق ۱۰۰ متری دارای صلیبیت برشی و مقاومت برشی بالاتری از همان نوع ماسه در سطح زمین است. اگر چه قسمتی از این اختلاف بعلت دانسیته و تاریخچه ژئولوژیکی است، اما علت اصلی این موضوع نیروی تماسی قوی بین ذرات ماسه است. از آنجا که لغزیدن ذرات نسبت به هم ماهیتی اصطکاکی دارد (شکل ۱-۵) با افزایش نیروی تماسی لغزیدن دانه‌ها از روی هم مشکل‌تر خواهد بود و صلیبیت کلی برشی و مقاومت را افزایش خواهد داد. بنابراین، ماسه قرار گرفته در عمق بوسیله نیروهای تماسی بزرگ ناشی از وزن لایه‌های فوقانی تقویت خواهد شد.



شکل ۱-۵- نمایش گرافیکی نقش نیروهای تماسی مابین دانه‌ها

اختلاف مابین تنش موثر و تنش کلی با در نظر گرفتن تنش‌های حفره‌ای بدست می‌آید. فشار حفره‌ای به مفهوم فشار آب و یا هوای داخل حفره‌ها است (فضای خالی مابین دانه‌های جامد). زمانیکه خاک با آب اشباع شده است، فشار حفره‌ای هوا اهمیتی نخواهد داشت، فشار آب حفره‌ای را با نماد  $u$  نشان می‌دهند. از آنجا که فشار آب حفره‌ای یکی از مشخصه‌های مهم خاک است، فشار قائم (تنش کلی قائم) شامل اثرات فشار حفره‌ای آب نیز خواهد بود.

همانگونه که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، فشار آب حفره‌ای اثری بر روی ایجاد و تشکیل مقاومت اصطکاکی در نقطه تماس ندارد. برای مشخص کردن این مسئله، یک شن را که در سطح زمین قرار گرفته است را با نمونه‌ای از همان شن که در عمق ۱۰۰۰۰ متری زیر آب واقع شده است را مقایسه می‌کنیم. واضح است که مقدار تنش حفره‌ای در نمونه اول صفر است و در نمونه دومی برابر ۱۰۰ مگا پاسکال. علیرغم تنش بالایی که وجود دارد،

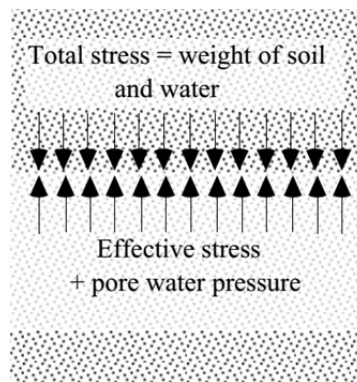
شن قرار گرفته در بستر دریا به علت فشار تماسی صفر همان نرمی را دارد. توجه داشته باشید که فشار آب حفره‌ای در عمق ۱۰۰۰۰ متری برابر ۱۰۰ مگا پاسکال است که برابر با تنش قائم کلی است.

ایده تنش موثر،  $\sigma'$ ، برای فهمیدن بحث فوق معرفی می‌شود علامت پریم نمادی برای نمایش تنش موثر است.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4-1)$$

برای وضوح بیشتر، و با توجه به شکل ۱-۶-۱a، در بستر دریا تنش موثر بصورت زیر خواهد بود:

$$\sigma' = \sigma - u = 100MPa - 100MPa = 0MPa$$



شکل ۱-۶-۱a- محاسبه تنش موثر.

در تنش برشی موضوع تنش موثر ظاهر نمی‌شود چون فشار آب حفره‌ای هیچ مولفه برشی ندارد.

شکل ۱-۶-۱b تعادل نیروهای ستونی از خاک را برای فهم اهمیت تنش موثر نشان داده است. وزن ستون خاک با مقطع عرضی واحد برابر با تنش کل

$\sigma$  است. این تنش در معادلات تعادل دارای مولفه قائم فشار آب حفره‌ای  $\int_A^{A'} u \cos \theta ds$  است و نیروهای تماسی  $\sum N_j \cos \theta_j$  در امتداد AA'، که  $N_j$

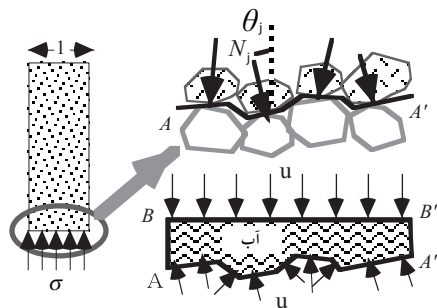
مقدار نیروی تماسی برای  $\theta$  و  $\theta_j$  است. جمع و انتگرال گیری نیروها در امتداد AA' که انتهای منحنی شکل ستون خاک است، از میان حفره‌ها و نقاط تماس دانه‌ها می‌گذرد اما از داخل دانه‌ها رد نمی‌شود. معادله تعادل نشان می‌دهد که انتگرال گیری آب حفره‌ای در امتداد AA' برابر با فشار حفره‌ای  $u$

در صفحه مستقیم بالایی BB' است (AB و A'B' کوچکتر و یامساوی  $BB' = 1$  هستند)

با مقایسه معادلات (۴-۱) و (۵-۱) خواهیم داشت.

$$\sigma' = \sum N_j \cos \theta_j \quad (6-1)$$

بنابراین تنش موثر به معنای جمع نیروهای تماسی دانه‌ها در واحد سطح در امتداد دلخواه است.

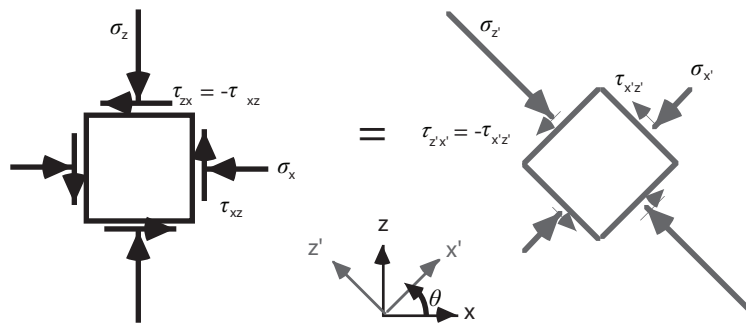


شکل ۱-۶-۲- بیان مفهوم فیزیکی تنش موثر

در فضای دو بعدی نشان داده شده در شکل ۷-۱، سه مولفه تنش کلی وجود دارد و در میان آنها تنش‌های نرمال  $\sigma_x$  و  $\sigma_z$  مولفه تنش موثر دارند، نکته مهم این است که اختلاف تنش و یا مولفه برشی برای هر دو تنش موثر و تنش کلی ثابت است.

$$\sigma_z - \sigma_x = \sigma'_z - \sigma'_x \quad (۷-۱)$$

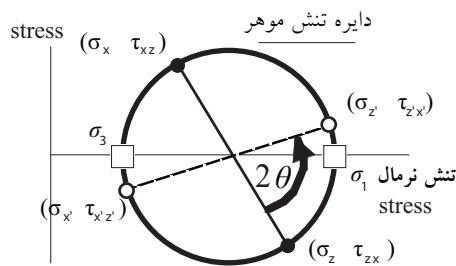
برای هر وضعیت تنش داده شده، مقادیر اسمی مولفه تنش ها،  $\sigma_x$ ،  $\sigma_z$ ، و  $\tau_{xy}$ ، با انتخاب دستگاه مختصات تغییر خواهد کرد (امتدادهای x و z). در شکل ۷-۱ تنش قائم در حالت فشاری مثبت و تنش برشی زمانیکه در جهت حرکت عقربه ساعت مثبت در نظر گرفته شده است. پس از دوران سیستم مختصات به اندازه  $\theta$  در جهت حرکت عقربه ساعت از  $x-z$  به سیستم  $x'-z'$  مقادیر مولفه‌های جدید تنش را با استفاده از تئوری دایره تنش موثر می‌توان بدست آورد (شکل ۸-۱).



شکل ۱-۷- مولفه‌های تنش در معرض دوران سیستم مختصات

با انتقال دایره موهر به اندازه  $2\theta$  خواهیم داشت :

$$\begin{aligned}\sigma_{x'} &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cos 2\theta + \frac{\tau_{zx} - \sigma_{xz}}{2} \sin 2\theta \\ \tau_{x'z'} &= \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \sin 2\theta + \frac{\tau_{zx} + \tau_{xz}}{2} - \frac{\tau_{zx} - \tau_{xz}}{2} \cos 2\theta \\ \sigma_{z'} &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cos 2\theta - \frac{\tau_{zx} - \sigma_{xz}}{2} \sin 2\theta \\ \tau_{z'x'} &= -\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \sin 2\theta + \frac{\tau_{zx} + \tau_{xz}}{2} - \frac{\tau_{zx} - \tau_{xz}}{2} \cos 2\theta\end{aligned}\quad (8-1)$$



شکل ۸-۱- بیان مولفه‌های تنش پس از دوران محورهای مختصات

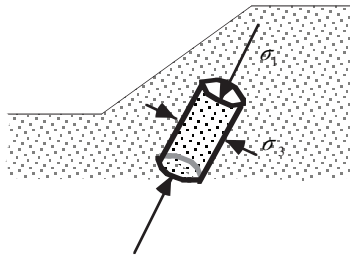
معادله ۸-۱ را می‌توان با توجه به  $\tau_{zx} = -\tau_{xz}$  ساده تر کرد. این نکته مهم است که یاد آور شویم مقدار متوسط تنش‌های نرمال مستقل از دوران مختصات است.

$$\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} = \frac{\sigma_{x'} + \sigma_{z'}}{2} \quad (9-1)$$

در شکل ۸-۱ دیده می‌شود که دایره تنش محور افقی را در دو نقطه زیر قطع می‌کند. از آنجا که این نقاط دارای مختصات قائم صفر هستند، مشخص می‌شود که هر وضعیت تنشی داری دو صفحه خاص است که فقط در آن دارای مولفه‌های قائم بوده و تنش برشی در آن صفر است (رابطه ۱-۱۰). این مولفه‌های تنش، تنش‌های اصلی نامیده می‌شوند: تنش اصلی حداکثر  $\sigma_1$  که بزرگتر از تنش اصلی حداقل  $\sigma_3$  است. امتداد و جهت مولفه‌های تنش اصلی با استفاده از روابط هندسی نشان داده شده در شکل ۸-۱ بدست می‌آید. امتداد صفحه تنش  $\sigma_1$  از صفحه  $\sigma_z$  با زاویه  $\beta$  موافق با حرکت عقربه ساعت مشخص می‌شود.

$$\beta = -\frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{zx}}{\sigma_z - \sigma_x} \quad (11-1)$$





شکل ۱-۹- بازسازی میدان تنش در وضعیت نمونه سه بعدی.

یکی از مهمترین اهداف آزمایش فشار سه محوری و آزمایش محصور نشده در مکانیک خاک ایجاد وضعیت تنش‌های اصلی در نمونه‌های خاک استوانه‌ای و اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها است. که این وضعیت معادل وضعیت میدان تنش نشان داده شده در شکل ۱-۹ می‌باشد. توجه داشته باشید که تمامی بحث فوق که درباره تنش کل بود، دقیقاً در مورد مولفه‌های تنش موثر نیز صادق است.

#### ۱-۴- ملاحظات و تغییرات حجم

حجم خاک با تغییرات تنش موثر تغییر می‌کند. به عبارت دقیق‌تر، اندازه فضا (که فضای خالی و یا حفره نامیده می‌شود) مابین دانه‌ها زمانیکه نیروهای تماسی بین دانه‌ها افزایش یابد، کاهش می‌یابد. این پدیده را تحکیم اولیه می‌گویند. زمانیکه گام افزایش تنش موثر  $\Delta P'$  کوچک باشد، مابین  $\Delta P'$  و کرنش حجمی خاک  $\Delta \epsilon_{vol}$  رابطه مستقیم وجود دارد.

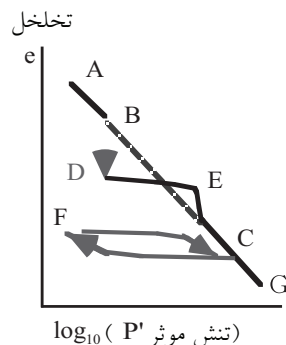
$$\Delta \epsilon_{vol} = m_v \Delta P' \quad (12-1)$$

در این رابطه  $m_v$  تراکم پذیری حجمی خاک نامیده می‌شود. مشکل نشست ناشی از تحکیم در خاک‌های رسی نرم که در معرض بارهای اضافی و یا پمپاژ آب هستند شناخته شده است. هر دو عامل فعالیت‌های انسانی فوق تنش موثر را افزایش داده و نشست زمین را افزایش می‌دهند.

تئوری کلاسیک تحکیم ترزاقی بیان می‌کند که تغییرات حجم خاک متناسب با افزایش تنش موثر قائم است. با بیان دقیق‌تر نسبت خطی بین تغییرات حجم و افزایش تنش موثر برقرار نیست و در عمل یک رابطه نیمه لگاریتمی خطی مانند AG که در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است، استفاده می‌شود.

۱. زمانیکه تحکیم از یک وضعیت گل روان آغاز می‌شود و مقدار تنش موثر  $P'$  بصورت مداوم افزایش می‌یابد، وضعیت خاک مسیر خطی ABCG را طی خواهد کرد، که این وضعیت در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. در این حالت گفته می‌شود خاک بصورت عادی تحکیم یافته است و تنش جاری، حداکثر تنش است که تا حالا خاک تجربه کرده است. این حالت مشابه لایه‌های رسوبی است که بصورت مداوم رسوب گذاری اتفاق می‌افتد.

۲. شکل ۱-۱۰ را باید نمودار  $e - \log P$  بنامیم اما بصورت معمول آنرا نمودار  $e - P$  می‌نامند. به هر حال، محور افقی مقادیر تنش قائم موثر و یا میانگین هر سه تنش موثر در امتدادهای متعامد را نشان می‌دهد (میانگین تنش اصلی موثر).

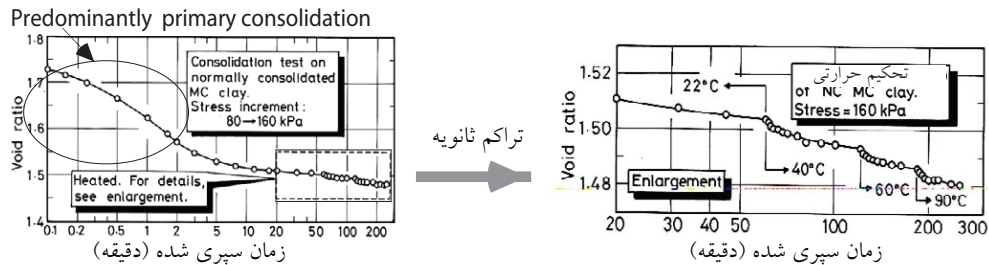


شکل ۱-۱-۱۰- دیاگرام تحکیم خاک  $e - \log P$ .

۳. زمانیکه تنش موثر در نقطه B ثابت نگه داشته شود، روند فشار ثانویه آغاز می‌شود و حجم نمونه با گذشت زمان کاهش می‌یابد. سپس بارگذاری تا نقطه D ادامه می‌یابد و خاک رسی مسیر DEC را طی می‌کند. تا رسیدن به نقطه E مقدار تغییرات حجم ناچیز است؛ پس از جاری شدن در نقطه E، خاک بصورت عادی تحکیم یافته خواهد شد. این اغلب حالتی است که نقطه E بالاتر از خط تحکیم نرمال AG.
۴. کاهش تنش بر روی CF را باربرداری می‌نامند. اما با وجود باربرداری از نمونه نسبت تخلخل (یا حجم خاک) به سطح اولیه در A بر نمی‌گردد. این موضوع به دلیل تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر خاک است. بارگذاری مجدد انجام می‌گیرد و از نقطه F به سمت C از مسیر FC اتفاق می‌افتد تا رسیدن به نقطه G مجدداً تحکیم نرمال شروع می‌شود.
۵. خاک در شرایط CFC را خاک بیش تحکیم یافته می‌گویند. خاک بیش تحکیم یافته خاک‌هایی هستند که تحت اثر بارگذاری تغییرات اندکی در آنها رخ می‌دهد. نسبت بیش تحکیم یافتگی بصورت زیر تعریف می‌شود.

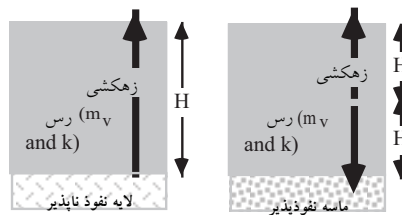
$$OCR \equiv \frac{\text{بیشترین تنش موثر}}{\text{تنش موثر فعلی}} = \frac{P'_C}{P'}$$

۶. مقایسه منحنی DEC و FCG با ارزش است؛ تراکم حجمی چشمگیری پس از نقطه میانی آغاز می‌شود. توجه داشته باشید که این ویژگی در اثر مکانیزم‌های مختلفی ایجاد می‌شود. مقایسه دوم یا کهنگی (تراکم حجمی تحت اثر تنش ثابت BD) با تغییرات حجمی کمتری در DE همراه است و انتقال وضعیت تنش از حالت باربرداری CF، بارگذاری مجدد FC به فشردگی اولیه CG در مسیر FCG مهم است.
- تحکیم اولیه ایجاد شده با فشار بر روی ساختمان دانه‌های خاک بواسطه تغییر تنش موثر بوجود می‌آید. دانش زیادی درباره تراکم ثانویه وجود ندارد. شکل ۱-۱۱ افزایش تراکم ثانویه رس بوسیله حرارت احتمالی خروج حرارتی مولکول H<sub>2</sub>O را نشان می‌دهد که بصورت الکتریکی در سطح ماده رسی جذب می‌شود.



شکل ۱-۱۱- افزایش تراکم ثانویه با گرم کردن رس (Towhata et al. 1993).

زمان لازم برای خاتمه نشست تحکیمی (خاتمه تحکیم اولیه) معمولاً یکی از کارهای عملی مهم است. در عمل، زمان تحکیم وابسته است به مقدار آبی که از زمین خارج می‌شود (تراکم پذیری حجمی  $m_v$ )، ضخامت لایه خاک (و به بیان دقیق تر ارتفاع زهکشی  $H$ ) و سهولت جریان آب در داخل رس (نفوذ پذیری رس). همانگونه که در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است ضخامت  $H$  طول زهکشی آب است. بسیاری از دانشجویان، با این مقدار  $H$  و ضخامت لایه رسی سردرگم می‌شوند. زمانیکه -دوطرف لایه رسی لایه ای با نفوذ پذیری زیاد باشد، مقدار  $H$  نصف ضخامت لایه رس خواهد بود.



شکل ۱-۱۲- خروج آب از خاک و نشست ناشی از تحکیم

شکل ۱-۱۳ نتایج تئوری تحکیم ترازقی را برای حالتی که سطح زمین با  $\Delta P$  در لحظه  $t = 0$  بارگذاری شده است را نشان می‌دهد. مقدار بدون بعد زمان و درجه تحکیم به ترتیب بصورت زیر تعریف می‌شوند:

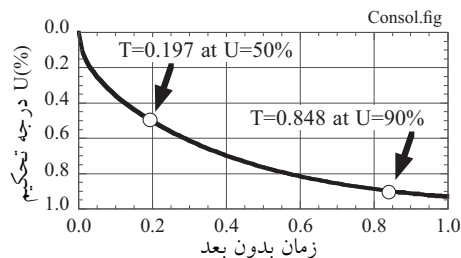
$$T = \frac{\left( \frac{k}{m_v \gamma_w} \right) \times \text{time}}{H^2} \text{ and} \quad (13-1)$$

$U =$  مقدار نشست نهایی / مقدار نشست

مقدار  $\gamma_w$  ۹/۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب برای واحد حجم آب است. توجه داشته باشید که نشست نهایی بصورت (ضخامت خاک)  $m_v \Delta P$  داده شده است. همانگونه که قبلاً گفته شد، این ضخامت خاک می‌تواند با فاصله زهکشی  $H$  متفاوت باشد. منحنی نشان داده شده در شکل ۱-۱۳ هیچوقت به  $U=100\%$  نمی‌رسد. در عمل، زمان برای ایجاد تحکیم  $U=90\%$  بصورت معمول بعنوان یک ایده از زمانی که برای تحکیم لازم است پذیرفته می‌شود.

$$T = 0.848 \text{ and Time needed for } 90\% \text{ consolidation} = 0.848 \times \frac{H^2}{k/m_v \gamma_w} \quad (14-1)$$

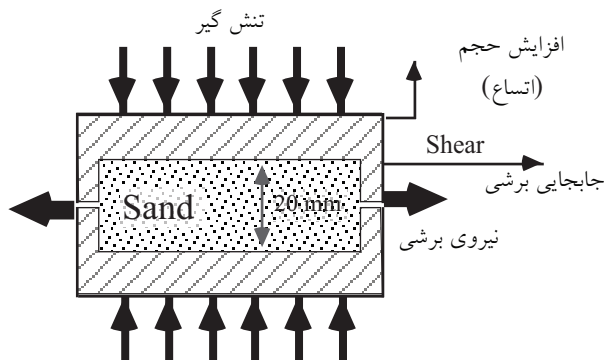
بنابراین زمان تحکیم متناسب با  $H^2$  افزایش می‌یابد. برای کاهش زمان تحکیم، می‌توان طول زهکشی به حداقل مقدار ممکن کاهش داد.



شکل ۱-۱۳- روند تئوری ترزاقی از نشست ناشی از تحکیم

### ۱-۵- تغییر شکل برشی و مقاومت ماسه

درک مفهوم برش در آزمایش برش مستقیم نسبت به آزمایش سه محوری قابل درک تر و آسان تر است. شکل ۱-۱۴ دستگاه برش مستقیم را نشان می‌دهد، که در آن نمونه ماسه ما بین دو جعبه صلب قرار گرفته است. پس از اعمال تنش موثر (محصوریت) در امتداد قائم، جعبه‌ها تمایل به جابجایی افقی خواهد داشت و شکستگی برشی در نمونه اتفاق می‌افتد. تنش برشی بصورت معمول از تقسیم نیروی برشی بر سطح مقطع نمونه بدست می‌آید. از آنجا که کرنش در نمونه یکنواخت نیست، چگونگی تغییر شکل برشی با تغییر مکان برشی بیان می‌شود. جابجایی قائم جعبه فوقانی تغییرات حجم ماسه در حین برش را نشان می‌دهد (اتساع).



شکل ۱-۱۴- آزمایش برش مستقیم