۱۳۷۸ /۱۰/ ۲۷

مرکز ... ایران
... ...

به نام خداوند جان و خرد

# بررسی پایداری شیبهای خاکی با استفاده از روش شبکه خطوط تغییر طول صفر

بوسیله

**شهاب چولایی وکیلی**

پایان نامه

ارائه شده به دانشکده تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته

مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی

۱۴۸۰۴

از

دانشگاه شیراز

شیراز، ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه : **عالی**

امضاء اعضا کمیته پایان نامه:

دکتر مجتبی جهان اندیش ، استادیار راه و ساختمان (رئیس کمیته)

دکتر ارسلان قهرمانی ، استاد راه و ساختمان

دکتر قاسم حبیب آگهی ، دانشیار راه و ساختمان

دکتر نادر هاتف ، استادیار راه و ساختمان

دکتر سید احمد انوار ، استادیار راه و ساختمان

**فروردین ۱۳۷۸**

۲۷۶۶۸

تقدیمی ناچیز ولی خالصانه به

**پدرم، آنکه فضای اندیشه را با اعتقاد و صلابت در برابر دیدگانم جلوه‌گر ساخت،**

**مادرم، که مرا همواره از بیکران عشق و محبت و از خود گذشتگی تمام نشدنی‌اش سیراب نمود،**

و نیز تقدیمی بس کوچک

**به تمامی آنانکه در این پهناور هستی تفکـــر را بـــا تدبیر، اعتقاد را با قرارداد و در نهایت عشق را بـــا احساس جایگزین نساختند.**

۲۷۶۶۸

# سپاسگزاری

انجام پروژه های اینچنینی اگر چه با نـام یکنفـر ثبـت مـی شـود ولـی مسـلما حداقل آن یکنفر می داند که به اتمام رسانیدن آن را مدیون اشخاص دیگـری نـیز هست.

از استاد عزیز آقای دکتر مجتبی جهان اندیش که مرا در پیشبرد و اتمـام ایـن پایان نامه مورد لطف و محبت خویش قرار داده اند و از رهنمودهای علمـی ایشـان بهره فراوان گرفتم، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین آقای دکتر ارسلان قهرمانی که با ارائه نظرات و پیشنهادات خـود مـرا یاری نموده اند، صمیمانه سپاسگذارم. نیز از آقایان دکتر قاسم حبیب آگهی، دکتر نادر هاتف و دکتر احمد انوار که در طول دوره کار مرا مورد بررسی و عنـایت خـود قرار دادند متشکرم.

از آقای مهندس حسن چیذری دانشجوی کارشناسی ارشد بخش کـامپیوتر بـه خاطر کمک و مساعدت در کلیه امور و نـیز کلیـه دوسـتان و عزیزانـم در خوابگـاه ملاصدرا که در سراسر ایام ایـن پـروژه یـار و یـاور قطعـی مـن بودنـد صمیمانـه و خالصانه متشکرم.

همچنین از عزیزانـم پـدر، مـادر، شـبنم، حسـن و علـی کـه در دوری بارهـا و مشکلات را به تنهایی تحمل نمودنـد و همـواره مـرا از الطـاف خویـش بهـره منـد ساختند کمال امتنان را دارم.

نیز از همسرم خانم مهشید ابراهیمی که همواره در شادیها و غمهایم شـریک و در لحظات دشواری همراه و همدم من بوده و هست، بینهایت سپاسگذارم.

در پایان از تمامی کسانی که خودآگاه و ناخودآگاه در اتمام مراحل این پـروژه مـرا یاری ساخته اند و نامشان در بالا ذکر نشد پـوزش مـی طلبـم و از آن ذات لایـزال برایشان طلب سعادت و خوشبختی می نمایم.

# چکیده


بررسی پایداری شیبهای خاکی با استفاده از روش شبکه خطوط تغییر طول صفر.

توسط

شهاب چولایی وکیلی

معادلات تعادل بر روی خطوط تغییر طول صفر یا خطوط با کرنش خطی صفر (Zero Extension Line) در مهندسی خاک از اهمیت بالایی برخوردارند، چراکه در مسائل ژئومکانیک میدان تغییر مکان مناسب (شبکه خطوط تغییر طول صفر) از جنبه عملی بیشتری برخوردار است.

با حل معادلات تعادل بر روی خطوط تغییر طول صفر می توان مقادیر تغییر مکان و تنش را بطور همزمان برای میدان یاد شده بدست آورد.

پایداری شیبهای خاکی توسط شبکه خطوط تغییر طول صفر در خاک مورد بررسی قرار گرفت.

مدهای مختلف تغییر مکان در شرایط مرزی در نظر گرفته شد. برای خاک پارامترهای وابسته به میدان کرنش برشی اختیار شد.

برای آنالیز شیب به ترتیب زیر عمل می کنیم:

با حل همزمان معادلات تعادل ومشخصه های کرنش مقادیر تنش و مختصات نقاط شبکه بدست می آید. حال با اعمال شرایط مرزی تغییرمکانی، مقادیر تغییر مکان جزئی در نقاط شبکه، میدان تغییر مکان جزئی، میدان کرنش برشی جزئی و همچنین توزیع نیرو بر روی مرز بدست می آید.

با دنبال کردن مراحل فوق برای سایر شرایط مرزی جزئی، میدانهای تغییر مکان وکرنش برشی و نیز توزیع نیرو بدست می آید.

با انتگرال گیری از توزیع نیرو، نیروی برایند بر روی مرز بدست می آید که با رسم آن منحنی بار-تغییر مکان برای خاک بدست می آید.

برای طراحی شیب می خواهیم بدانیم که اگر توزیع نیرو بر روی مرز معلوم باشد، شکل شیب چگونه خواهد بود؟

دو برنامه کامپیوتری مدون جهت آنالیز و طراحی کلیه شیبهای خاکی براساس روش شبکه خطوط تغییر طول صفر نوشته شد که به تعیین رفتار بار تغییر شکل و نیز طراحی شیب می پردازند.

# فهرست مطالب


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| **فهرست اشکال** | ح |
| **فصل اول مقدمه** | ۱ |
| ۱-۱ هدف | ۱ |
| ۱-۲ تاریخچه | ۴ |
| **فصل دوم تئوری** | ۱۸ |
| ۲-۱ مقدمه | ۱۸ |
| ۲-۲ برپایی معادلات مشخصه های تنش و کرنش و نیز معادلات خطـوط تغیـیر طول صفر | ۲۰ |
| **فصل سوم برپاسازی روش تحقیق** | ۳۴ |
| ۳-۱ مقدمه | ۳۴ |
| ۳-۲ طرح مسئله | ۳۶ |
| ۳-۳ روش حل | ۳۸ |
| **فصل چهارم برخی مسائل ویژه** | ۴۱ |
| ۴-۱ مقدمه | ۴۱ |
| ۴-۲ آخرین خط (منحنی) تغییر طول صفر | ۴۱ |
| ۴-۳ تخمین تغییرات روی جهت مثبت مشخصه ها بر روی کرانه‌ها | ۴۳ |
| ۴-۴ ثابت فرض کردن آخرین نقطه روی شیب | ۴۴ |
| ۴-۵ مدهای مختلف تغییر مکان | ۴۴ |
| ۴-۶ نیروهای جسمی | ۴۶ |
| ۴-۷ برپایی معادلات بروی نقطه منفرد (Singularity) | ۴۶ |
| ۴-۸ اختیار کردن مشخصه در نزدیکی نقطه منفرد | ۴۷ |
| ۴-۹ درون یابی مورد استفاده قرار گرفته | ۴۷ |
| ۴-۱۰ کرانه با شرایط مرزی تنش معلوم (سطح آزاد خاک یا صورت شیب) | ۴۸ |

۴-۱۱ کرانه با شرایط مرزی تغییر مکان معلوم (ناحیه محدود به سازه یا پی) ۵۰
**فصل پنجم حصول نتایج** ۵۳
۵-۱ مقدمه ۵۳
۵-۲ مسائل مربوط به حالت بدون حرکت ۵۴
۵-۲-۱ بررسی ظرفیت باربری پی متکی بر خاکهای رسی ۵۴
۵-۲-۲ ظرفیت باربری پی متکی بر خاکهای ماسه ای ۵۶
۵-۳ مسائل مربوط به حرکت با زاویه اتساع ثابت ۵۸
۵-۳-۱ مسائل مربوط به بررسی ظرفیت باربری با حرکت ۵۹
۵-۳-۱-۱ پی بر روی خاک رسی ۵۹
۵-۳-۱-۲ پی بر روی خاک ماسه ای متراکم ۶۷
۵-۳-۲ مسائل مربوط به پایداری شیب با حرکت و زاویه اتساع ثابت ۷۴
۵-۳-۲-۱ آنالیز شیب ماسه ای ۷۴
۵-۳-۲-۲ طراحی شیب ماسه ای ۸۲
**فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات** ۹۰
پیوست الف - شرح برنامه ANAZEL ۹۵
پیوست ب - متن برنامه ANAZEL ۱۰۱
فهرست منابع ۱۵۲
صفحه چکیده و صفحه عنوان به زبان انگلیسی

# فهرست اشکال

**شکل** **صفحه**


شکل (۲-۱) دایره مور برای تغییر فرم نسبی ۱۸
شکل (۲-۲) منحنی تغییرات نسبت تنش و تغییر فرم نسبی حجمی با تغییر فرم نسبی برشی ۱۹
شکل (۲-۳) میزان تنش برای المان مفروض ۲۰
شکل (۲-۴) دایره مور برای حالت تعادل حدی ۲۱
شکل (۲-۵) دایره مور کرنش ۲۶
شکل (۳-۱) زوایای مربوط به کرانه‌های خاک با افق ۳۶
شکل (۳-۲) ناحیه خاکی مورد بررسی $OA_0A_3$ ۳۷
شکل (۴-۱) مسیرهای مثبت و منفی مشخصه ها ۴۴
شکل (۴-۲) دوران حول بالا ۴۵
شکل (۴-۳) دوران حول پایین ۴۵
شکل (۴-۴) ناحیه انتقالی و تغییر آن تحت اثر میدان تغییر مکان ۴۶
شکل (۴-۵) المان فرضی و وابستگی یک نقطه به رئوس ۴۸
شکل (۴-۶) کرانه با شرایط مرزی تنش معلوم ۴۹
شکل (۴-۷) دایره مور برای شرایط مرزی تنش معلوم ۴۹
شکل (۴-۸) دایره مور برای شرایط مرزی تغییر شکل معلوم ۵۱
شکل (۵-۱) شبکه Z.E.L برای رس بر روی پی صاف. ۵۵
شکل (۵-۲) شبکه Z.E.L برای رس بر روی پی زبر. ۵۵
شکل (۵-۳) شبکه Z.E.L برای ماسه بر روی پی صاف. ۵۶
شکل (۵-۴) شبکه Z.E.L برای ماسه بر روی پی زبر (زبری مجاز ترزاقی). ۵۷
شکل (۵-۵) شبکه Z.E.L برای ماسه بر روی پی کاملا زبر. ۵۷
شکل (۵-۶) نمو اول برای دوران حول راست بر روی رس. ۶۰
شکل (۵-۷) شبکه Z.E.L. به ازای نشست نسبی0.115 (دوران حول راست ). ۶۱
شکل (۵-۸) شبکه Z.E.L. به ازای نشست نسبی0.115 (دوران حول چپ ). ۶۱

شکل (۵-۹) شبکه.Z.E.L به ازای نشست نسبی0.115 (انتقال). ۶۲
شکل (۵-۱۰) توزیع نیرو به ازای نشستهای نسبی مختلف برای دوران حول سمت چپ پی. ۶۳
شکل (۵-۱۱) توزیع نیرو به ازای نشستهای نسبی مختلف برای دوران حول سمت راست پی. ۶۴
شکل (۵-۱۲) توزیع نیرو به ازای نشستهای نسبی مختلف برای انتقال. ۶۵
شکل (۵-۱۳) انتگرال نیرو به ازای نشستهای مختلف برای رس. ۶۶
شکل (۵-۱۴) تغییرات محل تاثیر نیرو به ازای نشستهای مختلف برای رس. ۶۷
شکل (۵-۱۵) توزیع نیرو بـر روی پـی ماسـه ای در حـالت انتقـال بـه ازای نشستهای نسبی ۶۸
شکل (۵-۱۶) توزیع نیرو بـر روی پـی ماسـه ای در حـالت انتقـال بـه ازای نشستهای نسبی ۶۸
شکل (۵-۱۷) توزیع انتگرال نیرو برای سه مد مختلف تغییر مکان برای پـی بر روی خاک ماسه ای. ۶۹
(شکل ۵-۱۸) شبکه .Z.E.L برای مثال قسـمت ۵-۳-۱-۲، بـه ازای نشسـت نسبی 0.06 و انتقال به درون خاک. ۷۱
(شکل ۵-۱۹) شبکه .Z.E.L برای مثال قسـمت ۵-۳-۱-۲، بـه ازای نشسـت نسبی 0. 2 و انتقال به درون خاک. ۷۱
(شکل ۵-۲۰) شبکه .Z.E.L برای مثال قسـمت ۵-۳-۱-۲، بـه ازای نشسـت نسبی 0.13 و دوران حول راست. ۷۲
(شکل ۵-۲۱) شبکه .Z.E.L برای مثال قسـمت ۵-۳-۱-۲، بـه ازای نشسـت نسبی 0.2 و دوران حول راست. ۷۲
(شکل ۵-۲۲) شبکه .Z.E.L برای مثال قسـمت ۵-۳-۱-۲، بـه ازای نشسـت نسبی 0.09 و دوران حول چپ. ۷۳
(شکل ۵-۲۳) شبکه .Z.E.L برای مثال قسـمت ۵-۳-۱-۲، بـه ازای نشسـت نسبی 0. 2 و دوران حول چپ. ۷۳
(شکل ۵-۲۴) مثال شیب به ازای نشست نسبی 0.025 در حـالت انتقـال بـه درون ماسه (زاویه شیب 30 درجه). ۷۵
(شکل ۵-۲۵) مثال شیب به ازای نشست نسـبی 0. 2 در حـالت انتقـال بـه ۷۵

درون ماسه (زاویه شیب 30 درجه).
(شکل ۵-۲۶) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۷۶
درون ماسه (زاویه شیب 10 درجه).
(شکل ۵-۲۷) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۷۷
درون ماسه (زاویه شیب 20 درجه).
(شکل ۵-۲۸) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۷۷
درون ماسه (زاویه شیب 30 درجه).
(شکل ۵-۲۹) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۷۸
درون ماسه (زاویه شیب 40 درجه).
(شکل ۵-۳۰) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۷۸
درون ماسه (زاویه شیب 50 درجه).
(شکل ۵-۳۱) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۷۹
درون ماسه (زاویه شیب 60 درجه).
(شکل ۵-۳۲) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۷۹
درون ماسه (زاویه شیب 70 درجه).
(شکل ۵-۳۳) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۸۰
درون ماسه (زاویه شیب 80 درجه).
(شکل ۵-۳۴) مثال شیب به ازای نشست نسبی 2 .0 در حالت انتقال به ۸۰
درون ماسه (زاویه شیب 90 درجه).
(شکل ۵-۳۵) شکل ۵-۳۴ در فرم اغراق آمیز توزیع نیرو. ۸۱
(شکل ۵-۳۶) تغییرات انتگرال نیرو با نشست نسبی به ازای زوایای شیب ۸۲
مختلف.
(شکل ۵-۳۷) طراحی شیب ماسه‌ای مثال قسمت ۵-۳-۲-۲ (سربار 600). ۸۴
(شکل ۵-۳۸) مقایسه آنالیزهای مختلف بر اساس پارامتر زاویه اصطکاک ۸۵
داخلی اولیه، حداکثر و واقعی.
(شکل ۵-۳۹) طراحی شیب ماسه‌ای مثال قسمت ۵-۳-۲-۲ (سربار 300). ۸۷
(شکل ۵-۴۰) طراحی شیب ماسه‌ای مثال قسمت ۵-۳-۲-۲ (سربار 400). ۸۷
(شکل ۵-۴۱) طراحی شیب ماسه‌ای مثال قسمت ۵-۳-۲-۲ (سربار 500). ۸۸
(شکل ۵-۴۲) طراحی شیب ماسه‌ای مثال قسمت ۵-۳-۲-۲ (سربار 600). ۸۸

(شکل ۵-۴۴) طراحی شیب ماسه‌ای مثال قسمت ۵-۳-۲-۲ (سربار 600) و چسبندگی دو برابر شده مثال یاد شده. ۸۹

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱ هدف

اطلاعات بار تغییر فرم در خاک اهمیت زیادی داردواین امکان موجود است که با دقت زیاد واز طریق عملی آن را بدست آوریم.

هدف از این تحقیق استفاده از ایده خطوط تغییر طول صفردر بدست آوردن الگوریتم جدیدی برای بررسی مسئله پایداری شیبهای خاکی است.

مطالعات گذشته نشان داده بود که با تقریب نسبتا خوب میتوان با ثابت فرض کردن زاویه اتساع خاک به بررسی مسائل بار تغییر فرم خاک نمود. همچنین در حیطه مسائل پایداری ،مسائل پی و دیوار حائل توسط محققین مختلف(چنانچه در بخش بعد خواهد آمد.)مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به مطالب یاد شده در بالا ، بر آن شدیم تا با متغیر فرض کردن زاویه اتساع خاک وبا استفاده از ایده شبکه خطوط تغییر طول صفر به بررسی مسئله پایداری شیبهای خاکی بپردازیم.

در این تحقیق سعی بر آن شده است تا حد ممکن کلی ترین حالت برای مسئله در نظر گرفته شود.

در این تحقیق جنبه های مختلف زیر مورد بررسی قرار می گیرد:

۱-خاک میتواند درشت دانه یا ریز دانه باشد.

۲-زاویه شیب بگونه ای میتواند تغییر کند که عملا بررسی مسائل پی ودیوار حائل نیز (با مشکلات خاص خودشان) امکان پذیر است.

۳-زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک متغیرو وابسته به میدان تغییرشکل برشی فرض می شود.

۴-سه مد مختلف تغییر شکل مورد بررسی قرار میگیرد.این سه مد عبارتند از:

-دوران حول راس شیب

- دوران حول پنجه شیب

-انتقال درون توده

۵-سازه مجاور با کرانه خاکی، که عملا یکی از شرایط مرزی میباشد، میتواند زبریا صاف باشد.

۶-به دلیل آنکه مسئله را در کلی ترین حالت مورد بررسی قرار دادهایم، علاوه بر آنکه توانائی بررسی مسئله پایداری شیب را داریم ،در آن واحد قادر به بررسی مسائل مربوط به پی و دیوار حائل را نیز هستیم.

اگرچه شاید ضروری بنظر نیاید، ولی بمنظور کنترل جوابها برنامه های کمکی نوشته شده تا توانایی قیاس نتایج در حالات حدی را با تحقیقات گذشته داشته باشیم.

برمبنای مطالب عنوان شده ، می توان اینطور استنباط کرد که تئوری خطوط تغییر طول صفر ابزاری کارآمد جهت حل مسائل محیطهای خاکی می باشد. از آنجا که شبکه مذکور از نظر ریاضی معادلات ساده ای دارد، همانطور که اشاره شد برای پیش‌بینی‌های نظری میدانهای مختلف مورداستفاده واقع شده است . شاید مهمترین کاربرد شبکه خطوط تغییر طول صفر تعیین رفتار بار - تغییر فرم برای سازه های درتماس با خاک باشد.

با توجه به برخی خواص شبکه خطوط تغییر طول صفر که در بالا به آن اشاره شد و نیز اهمیت مسائل مربوطه به پایداری شیروانیهای خاکی برآن شدیم تا از روش مذکور در تحلیل پایداری شیروانیهای خاکی بهره بگیریم .

در این تحقیق می خواهیم روندی را دنبال کنیم که توسط آن بتوانیم به رابطه بار-تغییر فرم شیب های خاکی دست یابیم.

بدین منظور ابتدا با در نظر گرفتن تغییر مکان صفر و اعمال شرایط مرزی به حل معادلات تعادل و تعیین مختصات نقاط شبکه تغییر طول صفر می پردازیم. (این معادلات در فصول آتی به تفضیل مورد بررسی قرار می گیرند.)

پس از آن به تعیین نیروی لازم برای به تعادل حدی Limit (Equilibrium ) در آوردن شیب می‌پردازیم. (متناظر با تغییر مکان صفر)

حال با افزودن نمو (Incremental ) شرایط مرزی تغییر مکانهای مربوط به نقاط شبکه خطوط تغییر طول صفر که در گام قبل محاسبه شده و اکنون متأثر از تغییر مکانهای مرزی می باشند را حساب می کنیم. براحتی می توان با برقراری روابط بین اضلاع چند ضلعی (سه یا چهار ضلعی) ایجاد شده از نقاط شبکه خطوط تغییر طول صفر به محاسبه کرنش برشی درون هر المان بپردازیم. با معلوم بودن کرنش برشی درون هر المان می توان از فرض وابسته بودن زوایای اصطکاک داخلی و اتساع خاک به کرنش برشی استفاده نمود و در هر نمو (Increment ) آنها را پیدا نمود. پس از این مرحله می توان مجدداً به حل معادلات تعادل و تعیین نقاط درون شبکه پرداخت و مراحل فوق را از شروع تأثیر نمو تغییرمکان (Incremental displacement ) تا تعیین مجدد مقادیر زوایای اصطکاک داخلی و اتساع خاک ادامه داد. با همگرائی مقادیر $\phi$ و$\upsilon$ می توان به تعیین نیروی لازم برای به تعادل حدی (Limit Equilibrium ) در آوردن شیب پرداخت. مراحل فوق را تا نمو (Increment ) آخر ادامه می دهیم. در نهایت ما قادر خواهیم بود رابطه بار- تغییر فرم شیب فوق را بدست آوریم.

سپس می توانیم مکانیزمهای مختلف تغییر مکان را به شیب فوق اعمال کنیم و بحرانی ترین مکانیزم را بدست آوریم، سپس با ثابت فرض کردن مکانیزم به تغییر زاویه شیب و مطالعه مجدد رابطه بار - تغییر فرم بپردازیم.

## ۱-۲ تاریخچه :

امروزه دانش مکانیک خاک واهمیت آن مانند علوم دیگر روز به روز رو به فزونی است و این بخصوص به این علت است که تجربیات گذشته در این زمینه بدون گسترش تئوریهای ممکن و راه حلهای اقتصادی‌تر تکافوی حل مسائل جدید را درعمل نمی نماید. بعلاوه بسط مسائل محیط دانه ای در رابطه با مکانیک عملی بطور اعم گسترش مکانیک خاک را ایجاب می کند که کاربرد عملی آن به نوبه خود روز افزون است. اگر چه هنوز موارد ناشناخته ویا ناتمام درباره خاک پیش رو قرار دارد.

از جمله مسائلی که همواره خصوصاً در ۵۰-۴۰ سال اخیر مورد توجه مهندسین قرار گرفته است مسئله مربوط به رفتار تغییر شکل خاک تحت بارگذاری می باشد. پیشتر از آن به رفتار خاک فقط در لحظه خرابی و انهدام (Failure) توجه می شده است و رفتار تغییر شکل خاک بجز مسائل نظیر نشست و تحکیم هرگز مورد بحث قرار نگرفته است . هدف اصلی برنامه تحقیقاتی که از سال ۱۹۶۷ در دانشگاه کمبریج آغاز شد، یافتن رابطه ای مناسب از رفتار تنش تغییر شکل نسبی برای خاک بود که بتوان بغیر از حالت انهدام درمحدوده بارهای مجاز ، مقدار تغیر شکل خاک و در نتیجه رابطه بار وتغییر شکل را برای مسائل مهندسی بدست آورد.

بطور کلی در تحقیقات مذکور از دو نوع دستگاه استفاده می شد:

اول دستگاه برش که نسبت به دستگاه برش استاندارد از فرم بهتری برخوردار بود و از آن جهت تعیین رابطه تنشها و تغییر شکلهای نسبی در ماسه استفاده می شد.

دستگاه دوم که دستگاه فشار خاک نامیده شده است دستگاهی است که به وسیله آن در حالت تغییر شکل دو بعدی یک صفحه صلب بدرون توده ای از ماسه محلی به نام لیتون بوزارد رانده می شد. در هردو وسیله یاد شده