

## بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی‌های منفرد قرار گرفته در بالادست شیروانی‌ها

اورنگ فرزانه<sup>۱\*</sup>، فرج‌الله عسکری<sup>۲</sup> و امیرحسین بزرگ حداد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار دانشکده مهندسی عمران پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup>استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

<sup>۳</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱/۲۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۱۱/۱۰، تاریخ تصویب ۸۷/۱۲/۱۸)

### چکیده

در این مقاله به بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی های منفرد واقع در بالادست شیب ها و مقایسه نتایج آن با جواب‌های حاصل از روش‌های نظری پرداخته شده است. در بررسی آزمایشگاهی، پس از ساخت دستگاه های بارش ماسه و بارگذاری مدل، آزمون های مختلفی روی مدل‌های کوچک مقیاس انجام گرفته است. از سوی دیگر برای یافتن پاسخ‌های نظری از نرم افزاری به نام TRASS استفاده شده که قادر است ظرفیت باربری پی‌های واقع در بالادست شیب ها را در حالت سه بعدی از روش مرز بالای آنالیز حدی محاسبه نماید. مقایسه نتایج، هماهنگی به نسبت خوبی را بین نتایج آزمایشگاهی و نظری نشان می دهد.

**واژه های کلیدی:** مدل سازی آزمایشگاهی، ظرفیت باربری، تحلیل سه بعدی، پی های واقع بر شیب

### مقدمه

مدل های فیزیکی برای اندازه گیری بار حدی پی های واقع روی شیروانی ها در حالات سه بعدی ساخته شده و مکانیزم گسیختگی آنها بررسی شده اند [۱۰].

در این مقاله ابتدا مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده و پس از آن به چگونگی طراحی و ساخت دستگاه آزمایش پرداخته شده است. در ادامه توضیحات مختصری درباره برنامه TRASS ذکر شده است سپس انواع آزمون های انجام شده در جریان این تحقیق شرح داده شده و نتایج آن با نتایج حاصل از برنامه TRASS مقایسه شده است.

شایان ذکر است که در این مقاله، کلمه "آزمایش" اغلب به آزمایش های انجام یافته روی مصالح برای تعیین مشخصات فیزیکی و مقاومتی و کلمه "آزمون" به آزمایش‌های انجام شده روی مدل فیزیکی اطلاق شده است.

مشخصات فیزیکی و مقاومتی ماسه مورد استفاده در آزمون های مدل پس از بررسی گزینه‌های مختلف، ماسه ای که از این پس به نام ماسه فیروز کوه نامیده می‌شود به عنوان مصالح مناسب برای ساخت مدل‌ها انتخاب شد. این ماسه قبلاً در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده فنی

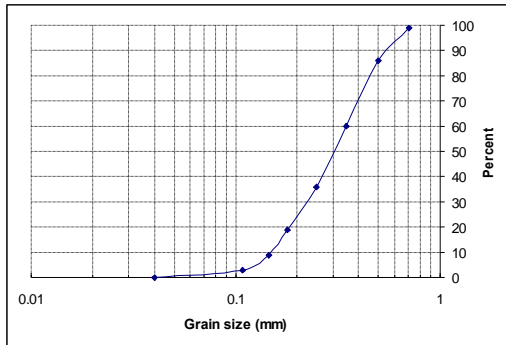
پایداری شیروانی ها و ظرفیت باربری پی ها، دو گروه از مسائل اساسی در مکانیک خاک هستند که تا کنون به طور نظری و گاهی آزمایشگاهی توسط محققان مختلف بررسی شده‌اند. از دیدگاه تئوریک این بررسی‌ها اغلب با استفاده از یکی از روش‌های تعادل حدی، خطوط مشخصه و تحلیل حدی و در حالت دوبعدی انجام یافته است. در سالیان اخیر بررسی سه بعدی پایداری شیروانی‌ها نیز مورد توجه تعدادی از محققان قرار گرفته است که از آن جمله می توان به تحقیقات انجام شده توسط چن و شامو [۱]، فرزانه و عسکری [۲]، هولند [۳]، لشینسکی و هوانگ [۴]، میخالفسکی [۵] و یوگای [۶] اشاره کرد. مجموعه تحقیقاتی نیز در دهه گذشته در دانشکده فنی دانشگاه تهران انجام گرفته (عسکری [۷]، نخعی [۸] و گنجیان [۹]) که در آن از روش مرز بالای تحلیل حدی استفاده شده و برای انجام تحلیل، نرم‌افزاری بنام TRASS تهیه شده دیده است.

هدف از تحقیق حاضر، مقایسه نتایج نظری حاصل از نرم افزار TRASS با نتایج تجربی حاصل از آزمایش بر روی مدل های فیزیکی کوچک مقیاس است. بدین منظور پس از طراحی و ساخت یک دستگاه آزمایش،

در بخش های آتی خواهیم دید، با استفاده از آنالیز برگشتی محاسبه شده است.

جدول ۱: مشخصات ماسه فیروزکوه.

G <sub>s</sub>	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	D <sub>50</sub>	F %	Cu	Cc	K (cm/sec)
۲/۶۵۸	۰/۹۴۳	۰/۶۰۳	۰/۳	۰	۲/۵۸	۰/۹۷	۰/۰۱۲۵



شکل ۱: منحنی توزیع دانه بندی ماسه فیروزکوه.

## طراحی و ساخت دستگاه

در تعیین مشخصات دستگاه آزمایش موارد ذیل از ابتدا در نظر گرفته شده است:

- ابعاد دستگاه باید به اندازه‌ای باشد که هنگام انجام آزمون‌ها جداره‌ها تأثیری بر مکانیزم گسیختگی نداشته باشند. بدین منظور، شالوده‌ای با ابعاد مورد نظر برای انجام آزمون‌ها توسط نرم افزار TRASS مدل شد و با توجه به شکل و ابعاد مکانیزم گسیختگی به دست آمده از تحلیل‌ها، ابعاد مناسب برای مدل فیزیکی و به دنبال آن، ابعاد دستگاه تعیین شد. این مورد در ادامه بیشتر توضیح داده شده است.

- تراکم خاک در ترازهای مختلف یکسان باشد.

- پارامترهایی که در برنامه TRASS قابل تغییر هستند، در مدل نیز قابل تغییر باشند.

- بارگذاری در مدل را بتوان با روش‌های کنترل تنش و کنترل کرنش انجام داد.

در شکل (۲) تصویر دستگاه طراحی شده در این تحقیق ارائه شده است. اجزای مختلف دستگاه که در شکل شماره گذاری شده اند، عبارت‌اند از: مخزن خاک (۱)، جعبه بارش (۲)، بازوی متحرک (۳)، دکل (۴)، شاسی دستگاه (۵)، فلکه برای بالا بردن جعبه بارش (۶)، پیچ یا سینی بارگذاری (۷).

دانشگاه تهران و در جریان چند تحقیق دیگر استفاده شده است (حقیقت [۱۱]، خاکی خطیسی [۱۲]، میرلطیفی [۱۳]). ماسه مذکور، ماسه سیلیسی شکسته با دانه بندی یکنواخت تولید شده در معادن فیروزکوه (با شماره ۱۶۱) است.

منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه در شکل (۱) و سایر مشخصات این ماسه نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. این مصالح، دانه بندی به نسبت یکنواختی دارد که در جریان ساخت مدل به روش بارش (که در ادامه توضیح داده خواهد شد) تفکیک نشده و می‌تواند برای ساخت مدل‌های فیزیکی همگن مورد استفاده قرار گیرد.

درصد رطوبت متوسط ماسه مورد استفاده در دمای محیط آزمایشگاه به طور تقریبی ۰/۵ درصد است.

زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی خاک، مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده ظرفیت باربری هستند و در تحقیق حاضر دقت خاصی بر تعیین این پارامترها صورت گرفته است. این پارامترها در ابتدا با استفاده از آزمایش برش مستقیم تعیین شدند.

پس از انجام اولین سری آزمایش‌های برش مستقیم ملاحظه شد که نتایج از نظر تکرار پذیری در تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک بسیار مناسب بوده و این پارامتر در تمامی آزمایش‌ها برابر ۳۲ درجه به دست آمد.

میزان چسبندگی در مدل‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس، تاثیر بسزایی در نتایج دارد. برای مثال اگر ظرفیت باربری یک پی با ابعاد کوچک که روی خاکی با زاویه اصطکاک داخلی ۳۲ درجه واقع شده با استفاده از فرمول‌های متداول ظرفیت باربری محاسبه شود، با چسبندگی صفر مقدار ظرفیت باربری حدود ۰/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و با چسبندگی ۰/۱، ظرفیت باربری حدود ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع خواهد بود.

به علت تأثیر بسیار زیاد میزان چسبندگی خاک بر ظرفیت باربری، آزمایش‌هایی با سرعت بارگذاری افقی کم (۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه) انجام شد. مقدار چسبندگی در این سری آزمایش‌ها بین ۱ تا ۳ کیلوپاسکال (۰/۱ تا ۰/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) متغیر بوده است. در کاربردهای متعارف به طور معمول از چسبندگی‌های با مقدار کم به دست آمده از آزمایش برش مستقیم، صرف نظر می‌شود. ولی در تحقیق حاضر به دلیل حساسیت نتایج آزمون‌ها به میزان چسبندگی، این پارامتر چنانکه

زاویه‌های شیب شیروانی تا ۳۲ درجه را داشته باشد. برای تأمین این هدف، جداره‌های مخزن به صورت متحرک طراحی شده است و می‌توان با تعویض آنها زاویه شیب شیروانی را تغییر داد.

یکی دیگر از ویژگی‌های مخزن این است که می‌توان با قرار دادن یک جداره شیشه‌ای در محل محور تقارن مخزن و انجام آزمون در یکی از دو نیمه متقارن، نحوه تشکیل مکانیزم گسیختگی را مشاهده کرد.

### - جعبه بارش

در ساخت مدل‌های فیزیکی، همگن بودن مدل اهمیت اساسی داشته و باید تا حد امکان میزان تراکم یا وزن مخصوص خاک در نقاط مختلف مدل یکسان باشد. ساخت مدل‌ها با استفاده از سیستم بارش ماسه<sup>۱</sup> یکی از روش‌های مناسب برای حصول تراکم یکنواخت است. بر اساس این روش وزن مخصوص خاک با نمونه‌گیرهایی که به روش بارش ماسه از ارتفاع‌های مختلف پر می‌شوند، اندازه‌گیری شده و نتایج این آزمایش‌ها در بخش طراحی و ساخت دستگاه به شکل منحنی ارائه شده است (شکل ۴).

دو پارامتر مهم دیگر، یعنی قطر چشمه‌ها و فاصله آنها برای ماسه مورد استفاده به کمک آزمون و خطا به نحوی تعیین شد که محدوده مناسب برای ارتفاع ریزش ماسه به راحتی توسط دستگاه قابل انتخاب باشد. مقادیر مناسب به ترتیب ۳/۵ میلی‌متر برای قطر چشمه و ۱۵ میلی‌متر برای فاصله آنها به دست آمد.

### - بازوی متحرک

هدف از طراحی این قسمت، نصب سیستم بارگذاری بر روی آن است. همانطور که گفته شد، این دستگاه قابلیت بارگذاری به روش کنترل تنش و یا کنترل تغییر مکان را دارد.

### - دکل

طراحی دکل برای تأمین ارتفاع لازم برای بارش انجام گرفته است. با تغییر ارتفاع جعبه بارش نسبت به تراز بالای مدل آزمایشگاهی شیروانی، وزن مخصوص خاک تغییر می‌کند. منحنی تغییر وزن مخصوص ماسه فیروزکوه با تغییر ارتفاع ذکر شده برای اولین لایه خاکریزی در مدل در شکل (۴) ملاحظه می‌شود.



شکل ۲: دستگاه ساخته شده برای انجام آزمون‌های مدل.

### - مخزن خاک

مخزن خاک، قسمت اصلی دستگاه است و شیروانی داخل این مخزن مدل می‌شود. برای تخمین ابعاد مخزن فرض شده است که آزمون‌ها روی شیروانی دارای زاویه شیب ۲۵ درجه و با استفاده از یک صفحه بارگذاری  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  (به عنوان پی) با فاصله ۵ سانتی‌متر از لبه شیب انجام شود. تحلیل‌های لازم با استفاده از برنامه TRASS و مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه انجام شد و ابعاد مکانیزم گسیختگی در این مدل که در شکل (۳) نشان داده شده است به این شرح به دست آمد:

حداکثر عمق تشکیل مکانیزم گسیختگی ۱۷ سانتی‌متر؛ حداکثر پهنای تشکیل مکانیزم گسیختگی ۳۸ سانتی‌متر؛ حداکثر طول تشکیل منحنی گسیختگی ۵۰ سانتی‌متر. بر اساس این نتایج و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۵ الی ۲ برای عدم قطعیت‌های موجود، طول و عرض و ارتفاع مخزن خاک به ترتیب ۹۰، ۶۰ و ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شده است.



شکل ۳: مکانیزم حاصل از برنامه TRASS.

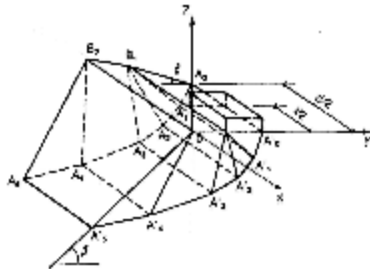
ویژگی‌های بخش‌های اصلی دستگاه به این شرح است:

با توجه به زاویه اصطکاک داخلی ماسه فیروزکوه (۳۲ درجه)، باید این دستگاه قابلیت انجام آزمون‌ها با

### آشنایی با نرم افزار TRASS

همان گونه که در ابتدای مقاله اشاره شد، در سالیان اخیر بررسی سه بعدی پایداری شیروانی‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است که در این راستا مجموعه تحقیقات وسیعی نیز در دهه گذشته در دانشکده فنی دانشگاه تهران انجام یافته و در حال انجام است (عسکری [۷]، نخعی [۸]، گنجیان [۹]). در این تحقیقات از روش مرزبالای تحلیل حدی استفاده شده و برای انجام تحلیل، نرم‌افزاری بنام TRASS پایه ریزی شده است.

مکانیسم مورد استفاده در برنامه TRASS در شکل (۵) نشان داده شده است [۲]. این مکانیسم متشکل از بلوک های پنج و یا شش وجهی با وجوه مستوی است که فقط حرکتی انتقالی دارند و تعداد آنها را می‌توان تغییر داد.



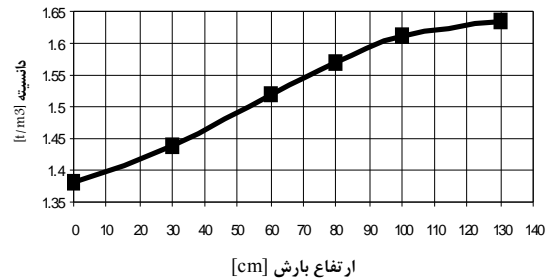
شکل ۵: مکانیسم مورد استفاده در برنامه TRASS.

ایجاد مکانیسم گسیختگی از پای شیب شروع شده و با توجه به پارامترهای انتخاب شده، به سمت شالوده ادامه می‌یابد. در شروع محاسبات، مکانیسمی فرضی توسط کاربر تعریف می‌شود. سپس میدان سرعت نظیر این مکانیسم و ضریب اطمینان پایداری و یا ظرفیت باربری شالوده توسط برنامه محاسبه شده و در مراحل بعدی به روش سعی و خطا، مکانیسم بهینه به دست می‌آید.

فرمول‌بندی این برنامه بر اساس قضیه مرز بالای روش آنالیز حدی پایه ریزی شده است. کاربرد قضیه مرز بالا نیز نیازمند محاسبه کار نیروهای داخلی و خارجی است. کار نیروهای داخلی مربوط به کار انجام شده روی سطوح کف، جانبی و بین بلوک‌ها و کار نیروهای خارجی شامل کار ناشی از وزن توده خاک و کار نیروهای وارد بر شالوده است.

با توجه به قضیه مرز بالا، از آن مساوی قرار دادن کار نیروهای داخلی و خارجی رابطه‌ای به دست می‌آید که مقدار ظرفیت باربری شالوده از آن قابل استخراج است.

برای حصول تراکم یکنواخت در ارتفاع مدل، ساخت مدل به صورت لایه لایه با ارتفاع بارش ثابت برای هر لایه انجام گرفته است.



شکل ۴: نمودار تغییرات وزن مخصوص خاک با ارتفاع بارش.

### شاسی دستگاه

مخزن خاک باید متحرک بوده و روی شاسی حرکت کند تا جعبه بارش بتواند تمام سطح مخزن را پوشش دهد. بدین ترتیب در راستای طولی، اندازه شاسی ۱۵۰ سانتی‌متر انتخاب شد. عرض شاسی به اندازه عرض مخزن بوده و ارتفاع پایه های شاسی نیز ۵۰ سانتی‌متر است. مهارهایی برای جلوگیری از سقوط مخزن در اطراف شاسی تعبیه شده است.

به دلیل آنکه سطح قاعده جعبه بارش از سطح مخزن خاک در راستای طولی کوچک‌تر است، هر لایه باید در دو تا سه مرحله ریخته شود. در این شرایط این امکان وجود دارد که در مرز دو بخش از یک لایه که در دو مرحله مختلف ریخته شده، ناهمگنی مختصری به وجود آید.

### سیستم‌های بارگذاری

#### الف - سیستم بارگذاری به روش کنترل تغییر مکان

این سیستم بر اساس امکان اعمال یک تغییر مکان مشخص بر پی طراحی شده و به یک رینگ اندازه گیری نیرو و گیج مربوط به آن و یک تغییر مکان سنج تجهیز شده است. تغییر مکان مورد نظر توسط پیچی که در بازوی متحرک تعبیه شده به پی اعمال می‌شود.

#### ب - سیستم بارگذاری به روش کنترل بار

در این روش با استفاده از یک سینی که روی یک میله قرار دارد، بار به پی اعمال می‌شود. نحوه افزایش بار با اضافه کردن وزنه بوده و بنابر این نیازی به استفاده از نیروسنج نیست.

۵ آزمون مختلف (B1 تا B5) و بررسی نحوه گسیختگی خاک، فاصله ۳ سانتی متر به عنوان فاصله مناسب برای انجام آزمایش ها انتخاب شد (جدول ۳).

جدول ۳: نتایج آزمون های سری B.

نام آزمون	وزن مخصوص ماسه (تن بر مترمکعب)	a/B	نوع مدل (کامل یا نیمه)	نوع گسیختگی	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)
B1	۱/۶۱	۰/۴	کامل	کلی بدون تاثیر شیب	۱/۳۵
B2	۱/۶۱	۰/۳	کامل	کلی با تاثیر شیب	۱/۱۵
B3	۱/۶۱	۰/۲	کامل	موضعی	-
B4	۱/۶۱	۰/۲	کامل	موضعی	-
B5	۱/۶۱	۰/۳	کامل	کلی با تاثیر شیب	۱/۱۷

آزمون های مرحله سوم (۶ آزمون C1 تا C6) برای بررسی اثر نوع بارگذاری انجام شد (جدول ۴). در آزمون های A و B سیستم بارگذاری به روش کنترل تغییر مکان بوده و در آزمون های سری C از سیستم بارگذاری به روش کنترل بار استفاده شد.

مقایسه نتایج این آزمون ها با نتایج آزمون های دو مرحله قبل (به ویژه آزمون های B2 و B5) نشان دهنده حدود ۵٪ اختلاف است. بنابراین بقیه آزمون ها با همان روش بارگذاری به روش کنترل تغییر مکان انجام داده شد. آزمون های مرحله چهارم (D1 تا D9) با هدف آماده سازی مدل برای بررسی شکل مکانیزم گسیختگی زیر پی و مقایسه آن با مکانیزم گسیختگی حاصل از برنامه TRASS انجام گرفت (جدول ۵).

آزمون های این مرحله با قرار دادن شیشه به جای جداره فلزی در محور تقارن مخزن خاک انجام شد (شکل ۶). برای انجام این آزمون ها ابتدا باید به نحوی اصطکاک جداره شیشه ای با خاک به حداقل می رسید. برای این هدف از روغن سیلیکون استفاده شد. همچنین لایه هایی از ماسه رنگی در ساخت مدل مورد استفاده قرار گرفت تا تغییر شکل خاک و شکل مکانیزم گسیختگی از پشت شیشه قابل تشخیص باشد.

چنان که گفته شد، آزمون های انجام شده و مقایسه نتایج تحلیلی با آنها در تحقیق حاضر در راستا و ادامه تحقیقات انجام شده در دانشکده فنی دانشگاه تهران تعریف شده است و هدف از آن، مقایسه نتایج آزمایش های تجربی روی مدل های فیزیکی کوچک مقیاس با نتایج نظری حاصل از نرم افزار TRASS است.

در راستای رسیدن به این هدف چند سری آزمون با هدف های خاص انجام شده است. در این آزمون ها یک پی با ابعاد  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  روی شیبی با زاویه ۲۵ درجه مدل شده است.

در اولین مرحله ۵ آزمون (A1 تا A5) روی مدل شیروانی های متشکل از ماسه با دانسیته های مختلف انجام شد. فاصله لبه پی از لبه شیروانی ۵ سانتی متر انتخاب شد و اعمال بار به روش کنترل تغییر شکل انجام گرفت.

بر اساس نتایج این آزمون ها حداقل وزن مخصوص خاک برای ایجاد گسیختگی کلی در زیر پی، ۱/۴۵ تن بر متر مکعب به دست آمد (جدول ۲). از بررسی شکل مکانیزم گسیختگی در این حالت، مشاهده شد که به دلیل فاصله پی از لبه شیب، تأثیر شیب بر شکل گسیختگی ناچیز است.

جدول ۲: نتایج آزمون های سری A.

نام آزمون	وزن مخصوص ماسه (تن بر مترمکعب)	a/B	نوع مدل (کامل یا نیمه)	نوع گسیختگی	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)
A1	۱/۶۱	۰/۵	کامل	کلی بدون تاثیر شیب	۱/۳۵
A2	۱/۵۱	۰/۵	کامل	کلی بدون تاثیر شیب	۱/۱۷
A3	۱/۴۵	۰/۵	کامل	برش پانچ	-
A4	۱/۶۱	۰/۵	کامل	کلی بدون تاثیر شیب	۱/۴۰
A5	۱/۶۱	۰/۵	کامل	کلی بدون تاثیر شیب	۱/۳۵

در مرحله دوم، آزمون هایی برای تعیین فاصله مناسب پی از لبه شیروانی انجام گرفت. با افزایش فاصله پی از لبه شیب، اثر شیب به خوبی دیده نمی شد. از سوی دیگر با کمتر شدن این فاصله، گسیختگی کلی رخ نداده و گسیختگی های موضعی مشاهده می شد. بنابراین با انجام



شکل ۶: آزمون‌های مدل سری D.

تحلیل اهمیت ویژه ای دارد. بنابراین در نظر گرفته شد که این پارامتر با به کار بردن آنالیز برگشتی تخمین زده شود. در این راستا در مرحله پنجم:

الف) ۴ آزمون (E1 تا E4) بر روی مدل‌هایی از پی‌های واقع بر خاک مسطح (بدون شیب) انجام شد و ظرفیت باربری پی در آنها تعیین شد (جدول ۶).

ب) با استفاده از ضرائب ظرفیت باربری پیشنهاد شده توسط ترزاقی، میرهوف و هسن، مقدار ضریب چسبندگی ماسه با انجام تحلیل برگشتی تعیین شد.

پ) با توجه به نزدیک بودن نتایج این سه تحلیل که در جدول (۷) نشان داده شده است، ضریب چسبندگی خاک حدود ۰/۰۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شد.

در جدول (۸)، خلاصه ای از نتایج آزمون‌های انجام شده ارائه شده است.

با در نظر گرفتن میزان چسبندگی ۰/۰۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقدار ظرفیت باربری در همه آزمون‌هایی که در آنها فاصله پی از لبه شیروانی ۰/۳ متر بود (آزمون‌های B2 و B5، C و D) با نتایج تحلیل‌های انجام شده با برنامه TRASS مقایسه شد (جدول ۹).

حداقل و حداکثر اختلاف نتایج در آزمون‌های B به ترتیب برابر با ۱۱ و ۱۳ درصد، در آزمون‌های C برابر با ۱۸ و ۳۱ درصد و در آزمون‌های D برابر با ۱۲ و ۲۰ درصد است.

اگر میانگین نتایج در آزمون‌ها با نتایج تحلیل‌ها مقایسه شود، ملاحظه می‌شود که این نتایج در تحلیل‌ها نسبت میانگین نتایج آزمون‌ها بیشتر هستند و تفاوت نتایج در آزمون‌های B، C و D به ترتیب ۱۲، ۲۲ و ۱۵ درصد است.

جدول ۴: نتایج آزمون‌های سری C.

نام آزمون	وزن مخصوص ماسه (تن بر مترمکعب)	a/B	نوع مدل (کامل یا نیمه)	نوع گسیختگی	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)
C1	۱/۶۱	۰/۳	کامل	کلی با تأثیر شیب	۱/۱۰
C2	۱/۶۱	۰/۳	کامل	کلی با تأثیر شیب	۱/۱۲
C3	۱/۶۱	۰/۳	کامل	کلی با تأثیر شیب	۱/۰۰
C4	۱/۵۱	۰/۳	کامل	کلی با تأثیر شیب	۰/۸۰
C5	۱/۵۱	۰/۳	کامل	کلی با تأثیر شیب	۰/۸۸
C6	۱/۵۱	۰/۳	کامل	کلی با تأثیر شیب	۰/۸۸

جدول ۵: نتایج آزمون‌های سری D.

نام آزمون	وزن مخصوص ماسه (تن بر مترمکعب)	a/B	نوع مدل (کامل یا نیمه)	نوع گسیختگی	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)
D1	۱/۶۱	۰/۳	نیمه	کلی با تأثیر شیب	۱/۰۵
D2	۱/۶۱	۰/۳	نیمه	کلی با تأثیر شیب	۱/۰۷
D3	۱/۶۱	۰/۳	نیمه	کلی با تأثیر شیب	۱/۰۵
D4	۱/۵۱	۰/۳	نیمه	کلی با تأثیر شیب	۰/۸۰
D5	۱/۵۱	۰/۳	نیمه	کلی با تأثیر شیب	۰/۷۸
D6	۱/۵۱	۰/۳	نیمه	کلی با تأثیر شیب	۰/۷۵
D7	۱/۶۱	۰/۳	نیمه	برش پانچ	-
D <sup>۱</sup>	۱/۶۱	۰/۵۰	نیمه	برش پانچ	-
D9	۱/۶۱	۰/۳۳۳	نیمه	برش پانچ	-

همان‌طور که گفته شد در ازای تغییرات کوچک در مقدار ضریب چسبندگی، تغییرات زیادی در میزان ظرفیت باربری نظری مدل خواهیم داشت. به دلیل همین حساسیت، برآورد میزان چسبندگی خاک برای کاربرد در

<sup>۱</sup> - در این آزمون به جای پی ۱۰×۱۰ از پی ۱۰×۵ سانتی‌متری

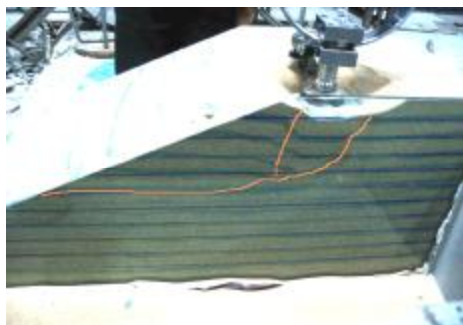
استفاده شد.

- ابعاد پی در آزمون D8 و D9 برابر ۶×۶ سانتی‌متر است.

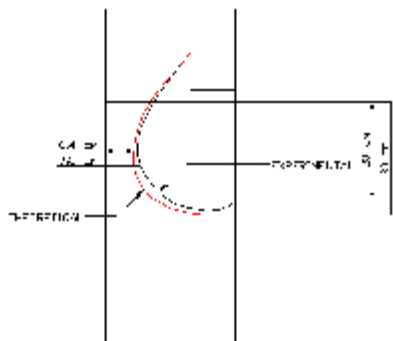


جدول ۹: مقایسه نتایج آزمون ها با نرم افزار TRASS.

نام آزمون	ظرفیت باربری آزمون (Kg/Cm2)	ظرفیت باربری TRASS (Kg/Cm2)	اختلاف نتایج %
B2	۱/۱۵	۱/۳۰	۱۳
B۵	۱/۱۷	۱/۳۰	۱۱
C۱	۱/۱۰	۱/۳۰	۱۸
C۲	۱/۱۲	۱/۳۰	۱۶
C۳	۱/۰۰	۱/۳۰	۳۰
C۴	۰/۸۰	۱/۰۵	31
C۵	۰/۸۸	۱/۰۵	19
C۶	۰/۸۸	۱/۰۵	19
D۱	۱/۰۵	۱/۲۰	14
D۲	۱/۰۷	۱/۲۰	12
D۳	۱/۰۵	۱/۲۰	14
D۴	۰/۸۰	۰/۹۰	13
D۵	۰/۷۸	۰/۹۰	15
D۶	۰/۷۵	۰/۹۰	20



شکل ۷: شکل مکانیزم گسیختگی مجاور جدار شیشه ای (آزمون G).



شکل ۸: مقایسه شکل مکانیزم در آزمون های سری G با نتایج برنامه TRASS.

شکل مکانیزم گسیختگی

برای مقایسه شکل مکانیزم گسیختگی در مدل و

جدول ۶: نتایج آزمون های سری E (ظرفیت باربری مدل پی های واقع بر زمین مسطح (بدون شیب)).

نام آزمون	وزن مخصوص ماسه (تن بر مترمکعب)	نوع گسیختگی	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
E1	۱/۶۱	کامل	۱/۴۰
E2	۱/۶۱	کامل	۱/۴۰
E3	۱/۵۱	کامل	۱/۲۱
E4	۱/۵۱	کامل	۱/۲۱

بدین ترتیب به طور کلی چنان که در جداول (۸) و (۹) ملاحظه می شود، مقایسه نتایج حاصل از برنامه TRASS با نتایج آزمون های مدل، بیانگر نزدیکی جواب های دو روش و قابل قبول بودن نتایج حاصل از نرم افزار TRASS به عنوان جوابی مرز بالا و در عین حال، نزدیک به مقادیر واقعی است. به عبارت دیگر، با توجه به مرز بالا بودن جواب های حاصل از نرم افزار TRASS، تقریب اضافی حاصل از نتایج تحلیل با نرم افزار ذکر شده بسیار منطقی و رضایت بخش است.

جدول ۷: چسبندگی به دست آمده از آنالیز برگشتی با استفاده از روابط مختلف.

رابطه	چسبندگی (Kg/Cm2)
ترزاقی	۰/۰۱۸۶
میرهوف	۰/۰۱۸۷
هنسن	۰/۰۱۹۶

جدول ۸: خلاصه نتایج آزمون ها و مقایسه نتایج آنها با نتایج نرم افزار TRASS.

نام آزمون	وزن مخصوص ماسه (تن بر مترمکعب)	a/B	نوع مدل (کامل یا نیمه)	ظرفیت باربری در آزمون (Kg/Cm2)
A1-A۵	۱/۴۵-۱/۶۱	۰/۵	کامل	۱/۱۷-۱/۴۰
B1-B5	۱/۶۱	۰/۴-۰/۲	کامل	۱/۱۵-۱/۳۵
C1-C6	۱/۶۱-۱/۵۱	۰/۳	کامل	۰/۸-۱/۱۲
D1-D9	۱/۶۱-۱/۵۱	۰/۵-۰/۳	نیمه	۰/۷۵-۱/۰۷

آزمایشگاهی با انجام آزمون‌هایی روی مدل‌های کوچک مقیاس، مورد توجه قرار گرفته است.

بدین منظور دستگاهی طراحی شد که توسط آن امکان مدل‌سازی شیروانی‌های با عرض محدود با استفاده از سیستم بارش ماسه فراهم شد.

پس از طراحی، ساخت و کالیبراسیون دستگاه آزمایش، مدل‌های فیزیکی متعددی از پی‌های واقع بر شیروانی‌ها در حالت سه‌بعدی ساخته شد و ضمن اندازه‌گیری بار حدی، شکل مکانیزم گسیختگی آنها بررسی شد.

برای به دست آوردن نتایج نظری از روش مرز بالای آنالیز حدی استفاده شده است. به این دلیل که ضریب چسبندگی خاک در تعیین ظرفیت باربری مدل‌های کوچک مقیاس اهمیت زیادی دارد، در این تحقیق نحوه برآورد این پارامتر مورد توجه قرار گرفته و در نهایت، چسبندگی بسیار کم ماسه استفاده شده در آزمون‌ها یک بار از نتایج آزمایش برش مستقیم و بار دیگر با آنالیز برگشتی برآورد شده است.

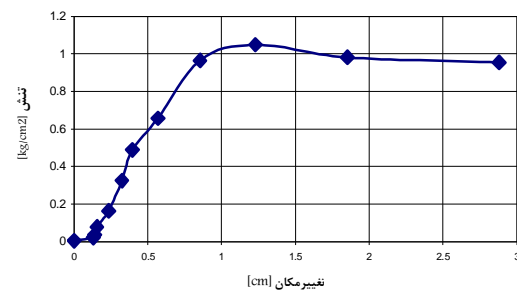
به طور کلی در تحقیق انجام یافته، هماهنگی به نسبت خوبی بین بار حدی و شکل مکانیزم گسیختگی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و نظری مشاهده شده است و قابل قبول بودن نتایج حاصل از نرم افزار TRASS به عنوان جوابی مرز بالا و در عین حال نزدیک به مقادیر واقعی تأیید شده است.

### تقدیر و تشکر

این تحقیق در چارچوب یکی از طرح‌های تحقیقاتی تعریف شده در مرکز مقابله با سوانح طبیعی انجام شده که بدین وسیله از مسئولان این مرکز تشکر و قدردانی می‌شود.

تحلیل، آزمون G انجام شد. همان طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، گوه گسیختگی در این آزمون درست در زیر صفحه بارگذاری تشکیل شده و بر اثر مجاورت شیب این گوه به سمت شیب مایل است. در محدوده‌ای که این گوه تشکیل شده است، برش خطوط افقی مجاور جداره شیشه‌ای دیده می‌شود. این گوه در شکل ذکر شده با خطوط پررنگ مشخص شده است. از مقایسه شکل مکانیزم در آزمون‌ها با شکل متناظر در تحلیل (شکل ۸)، هماهنگی مناسبی میان نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مشاهده می‌شود.

شکل (۹) نمودار تنش- تغییر مکان را در آزمون G نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که ماسه در حین گسیختگی، رفتار نرم شونده‌ای از خود نشان داده است.



شکل ۹: نمودار تنش- تغییر مکان در آزمون G.

### جمع بندی و نتیجه گیری

در ادامه بررسی‌های نظری انجام شده توسط محققان مختلف در سالیان اخیر در ارتباط با پایداری سه بعدی شیروانی‌ها و شالوده‌های واقع در بالادست آنها و بویژه تحقیقات انجام شده در این زمینه در دانشکده فنی دانشگاه تهران، در تحقیق حاضر مقایسه نتایج نظری حاصل از کاربرد روش مرز بالای آنالیز حدی و

### مراجع

- 1 - Chen, R. H. and Chameau, J. L. (1983) "Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes." *Geotechnique*, London, Vol. 33, No. 1, PP. 31-40.
- 2 - Farzaneh, O. and Askari F. (2003). "Three-Dimensional Analysis of Nonhomogeneous Slopes." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 2, PP. 137-145.
- 3 - Hovland, H. J. (1977). "Three-dimensional slope stability analysis." *J. Geotech. Engineering, ASCE*, Vol. 103, No. 9, PP. 971-986.
- 4 - Leshchinsky, D. and Huang, C. (1992). "Generalized three dimensional slope stability analysis." *J. Geotech. Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 11, PP. 1748-1764.



- 5 - Michalowski, R. L. (1989). "Three dimensional analysis of locally loaded slopes." *Geotechnique*, London, Vol. 39, No. 1, PP. 27-38.
- 6 - Ugai, K. (1985). "Three-dimensional slope stability analysis of vertical cohesive slopes." *Soils and Found.*, Tokyo, Vol. 25, No. 3, PP. 41-48.
- 7 - Askari, F. (1999). *Static and Dynamic Three-Dimensional Analysis of Homogeneous and Nonhomogeneous Slopes by Limit Analysis*, PhD Thesis, Tehran University, Faculty of Engineering (in Persian).
- 8 - Nakhaea, J. (2002). *Influence of Pore Water Pressures on Three Dimensional Stability of Slopes by Upper Bound Limit Analysis*, MSc Thesis, Tehran University, Faculty of Engineering
- 9 - Ganjian, N. (2003). *Three Dimensional Stability of Convex Slopes*, MSc Thesis, Tehran University, Faculty of Engineering (in Persian).
- 10 - Bozorghadad, A. (2003). *Experimental Modeling of Three Dimensional Bearing Capacity of Footings on Slopes*, MSc Thesis, Tehran University, Faculty of Engineering (in Persian).
- 11 - Haghghat, S. (2001). *Investigation of Total Stress and Lateral Strains Ratio Effects on Undrained Behavior of Saturated Sandy Soils by Stress Path Triaxial Tests*, MSc Thesis, Tehran University, Faculty of Engineering (in Persian).
- 12 - Khaki Khatibi, A. (2002). *Methods of Improving the Under Footings' Soil Behavior against Liquefaction*, MSc Thesis, Tehran University, Faculty of Engineering (in Persian).
- 13 - Mirlatifi, S. (2003). *Study of Seismic Behavior of Reinforced Soil Walls by 1g Shaking Table Tests*, MSc Thesis, Tehran University, Faculty of Engineering (in Persian).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 -Raining Technique