



## طراحی و ساخت جعبه برشی مستقیم به منظور بررسی تنش برشی خاک به کمک دستگاه تست کشش

علی حاجی احمد<sup>۱</sup>، پوریا شجاعی<sup>۲</sup>، حمید عبدالملکی<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب عضو هیات علمی، دانشجوی دوره‌ی کارشناسی و دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های

کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: [hajiahmad@ut.ac.ir](mailto:hajiahmad@ut.ac.ir)

### چکیده

به منظور بررسی تنش برشی خاک به طور دقیق و مشاهده‌ی رفتار خاک در برابر نیروی افقی وسیله‌ای تحت عنوان جعبه‌ی برشی مستقیم خاک طراحی و ساخته شد. این وسیله که با توجه به نمونه‌های قبلی طراحی شده است به کمک دستگاه کشش باقابلیت رسم نمودار نیرو-جابجایی روش نوین و دقیقی را ارائه می‌کند. آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های خاک کنترل شده آزمایشگاهی با الک‌های معین در دو حالت خشک و مرطوب انجام گردید و نمودار نیرو-جابجایی هر یک از موارد استحصال شد. همچنین اثر سرعت کشش و رطوبت خاک بر نیروی کشش مشخص شد.

**واژه‌های کلیدی:** تنش برشی خاک، جعبه‌ی برشی مستقیم، دستگاه کشش، نیرو-جابجایی

### مقدمه

خاک آمیخته‌ای از دانه‌ها است که این دانه‌ها، گاهی دارای ویژگی چسبندگی (سیمانی شدن) و گاهی فاقد این ویژگی هستند؛ این در حالی است که سنگ‌های مبدأ تشکیل این خاک‌ها، شامل مجموعه‌ای از دانه‌های مختلف بوده که با پیوندهای شیمیایی به یکدیگر متصل شده‌اند.

مقاومت برشی خاک در درجه اول، از اصطکاک داخلی میان دانه‌ها ناشی می‌شود، بنابراین مقاومت برشی در یک صفحه تقریباً متناسب است با تنش مؤثر عمود بر سطح آن صفحه. خاک از قفل و بند (اتصال داخلی) میان دانه‌ها، مقاومت برشی زیادی به دست می‌آورد. اگر دانه‌ها به صورت خیلی متراکمی به یکدیگر متصل شده باشند در اثر تغییر شکل برشی تمایل به دور شدن از یکدیگر دارند.

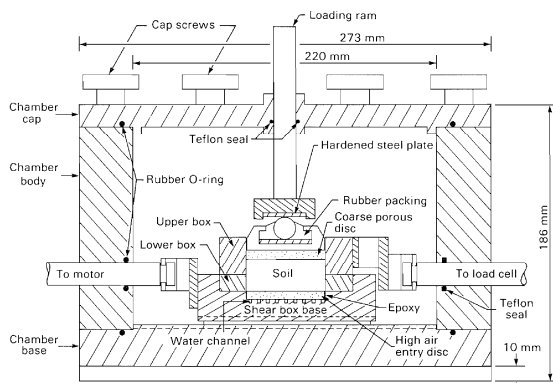


کلمب<sup>۱</sup> آزمون برش مستقیم را اولین بار در سال ۱۷۷۶ انجام داد که قدیمی‌ترین آزمایش برش محسوب می‌شود. این آزمایش همچنین متداول‌ترین روش برای تعیین مقاومت برشی زهکشی شده (مقاومت برشی بر اساس تنش مؤثر) خاک غیر چسبنده است. در شکل ۱، نمایی از دستگاه آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. هدف از این آزمایش، برش دادن نمونه از وسط آن و در امتداد سطح گسیختگی است.



شکل ۱- نمونه‌ی قدیمی دستگاه کشش مستقیم خاک به همراه آویز بار عمودی و حسگر مکانیکی

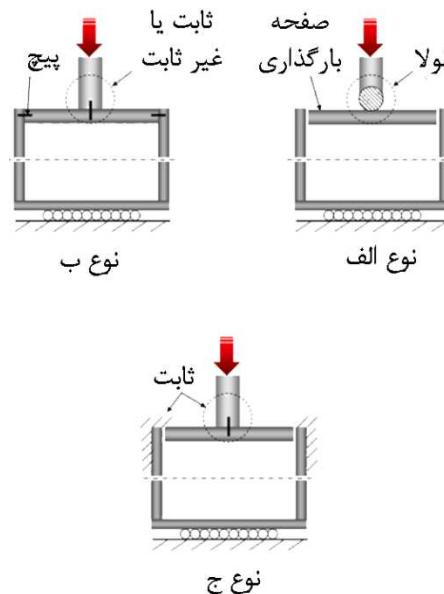
همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، دستگاه برش مستقیم وسیله‌ای برای اعمال بار عمودی به سطح فوقانی نمونه دارد. دو صفحه متخلخل در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرند و حرکت آب به داخل یا خارج نمونه را میسر می‌سازد. جعبه برش مستقیم معمولاً استوانه‌ای یا مکعبی شکل بوده و دو نیمه با ضخامت یکسان دارد که داخل یکدیگر متصل می‌شوند. نیمه پایینی جعبه به دستگاه متصل بوده و ثابت است و نیمه بالایی آن در جهت افقی حرکت می‌کند. برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های عمودی و افقی از گیج‌های عقربه‌ای استفاده می‌شود. البته در دستگاه برش مستقیم معمولی، می‌توان برش نمونه خاک را با فشار دادن جعبه برش تحتانی انجام داد (Gan *et al.* 1988; Taylor, 1948; Skempton & Bishop, 1950).



شکل ۲- تصویر برش خورده‌ی جعبه برشی خاک



دستگاه برش مستقیم را می‌توان به سه نوع اصلی طبقه‌بندی نمود (Shibuya et al., 1997). نوع الف توسط Skempton & Bishop (1950) پیشنهاد شده است. در این روش چون صفحه بارگذاری و جعبه برش بالایی مستقل از یکدیگر می‌باشد، صفحه در حال بارگذاری می‌تواند چرخیده و بالا و پایین رود (شکل ۳-الف).



شکل ۳- انواع مختلف جعبه برش

در نوع ب که توسط Jewell & Wroth (1987) طراحی شده است صفحه بارگذاری و جعبه برش فوقانی به صورت صلب به هم متصل هستند و پژوهشگر مشخص می‌کند که آیا صفحه بارگذاری و پیستون به هم متصل باشند یا خیر (شکل ۳-ب).

نوع ج، توسط Mikasa (1960) طراحی شده و در آن جعبه برش بالایی از صفحه بارگذاری جدا بوده و صفحه بارگذاری به پیستون ثابت است (شکل ۳-ج).

Ghesteme et al (2014) با اندازه‌گیری و مقایسه مقاومت در برابر برش خاک دارای ریشه زیاد با خاک آیش به این نتیجه رسیدند که در طول آزمون برش، وجود ریشه باعث افزایش قابل توجهی در تنش برشی و انرژی تغییر شکل می‌شود اما اثر معنی‌داری بر کشش خاک و تنش پسماند ندارد. Lehane & Liu (2013) تصحیحاتی را برای تعیین و جبران اصطکاک مکانیکی در جعبه برش پیشنهاد دادند و با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده در دو جعبه برش مختلف برای سه نوع شن، آزمایش‌هایی را در مقادیر مختلفی از تنش نرمال مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با انجام تصحیح می‌توان زاویه اصطکاک بیشینه و بحرانی مواد دانه‌ای را در سطوح پایین تنش در دستگاه جعبه برش تعیین نمود. امروزه از روش‌های المان مجزا (Liu, 2006) و نیز روش المان محدود (Chau & Zhao, 2015) نیز برای شبیه‌سازی آزمون برش خاک استفاده می‌شود.



## مواد و روش‌ها

دستگاه کشش وسیله‌ای است که به کمک سلول بار<sup>۲</sup> یا نیروسنج، بار وارده بر اجسام تحت آزمایش قرارگرفته را مشخص می‌کند. این نیرو می‌تواند به صورت کشش یا فشار اعمال شود. همچنین سرعت اعمال نیرو قابل تنظیم است که اثر آن بر روی آزمایش قابل توجه است. در شکل ۳ تصویر یک نمونه سلول بار (لودسل) آورده شده است.

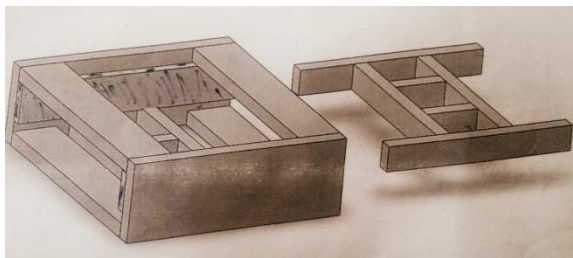


شکل ۳- نیروسنج کششی مورد استفاده در آزمایش

## طراحی و ساخت

با توجه به نمونه‌های قبلی جعبه‌ی برشی و در نظر گرفتن سازوکار دستگاه کشش و قابلیت رسم نمودار وسیله‌ی آزمایشی مناسب طراحی و ساخته شد. در طراحی این وسیله حرکت عمودی دستگاه کشش به کمک قرقره‌ای با اصطکاک ناچیز به حرکت افقی تبدیل می‌شود. همان‌طور که گفته شد جعبه‌ی برشی از یک مکعب به‌عنوان مخزن نمونه‌ی خاک تشکیل شده است، به طوری که نیمه‌ی پایینی ثابت و نیمه‌ی بالایی از یک درجه آزادی در راستای افق برخوردار است تا عمل برش خاک از وسط صورت پذیرد.

حرکت نیمه‌ی بالایی به وسیله‌ی ریل‌های صنعتی تعبیه شده در دو طرف جعبه امکان‌پذیر است. این ریل‌ها از حداقل اصطکاک برخوردارند تا آزمون با بالاترین دقت و کمترین خطا میسر شود.



شکل ۴- نمای سه‌بعدی جعبه برشی طراحی شده

در بررسی‌های صورت گرفته برای انتخاب جنس جعبه‌ی برشی مطابق شکل ۴ چوب مناسب‌ترین ماده برای ساخت انتخاب شد که با قابلیت برش و نصب ساده‌ی قطعات به هم از اولویت برخوردار بود. سعی شد به کمک مواد پوشاننده از تماس مستقیم خاک با دیواره‌ی داخلی جعبه جلوگیری شود تا خوردگی چوب اتفاق نیافتد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود جعبه‌ی برشی در راستای دستگاه کشش قرار می‌گیرد تا از ایجاد هرگونه نیروی جانبی و غیر موازی با سطح افق جلوگیری به عمل آید.

#### معادلات ریاضی

بدون در نظر گرفتن اهمیت افزایش حجم خاک، کولمب پیشنهاد کرد که مقاومت برشی خاک را می‌توان به وسیله ترکیبی از چسبندگی و اصطکاک داخلی خاک، توضیح داد.

$$T_f = c + \sigma_f \tan \Phi \quad (1)$$

$T_f$  نیروی کشش،  $c$  ضریب همچسبی،  $\sigma_f$  بار عمودی و  $\Phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد.



شکل ۵- جعبه‌ی برشی ساخته شده و نصب شده بر روی دستگاه کشش در حال آزمایش نمونه خاک

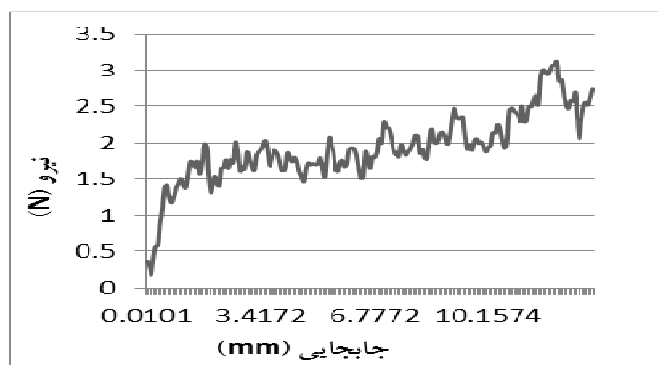


## نتایج و بحث

نمونه‌های خاک مورد مطالعه به دو صورت خشک و مرطوب همچنین الک شده و غیر الک شده مورد آزمایش قرار گرفت. مخزن مکعبی شکل جعبه با ابعاد ۶ سانتی‌متر از نمونه پر شده و با شروع کشش دستگاه، عمل برش به وسیله لبه‌ی بالایی جعبه صورت می‌گیرد.

## خاک خشک با دانه‌بندی درشت

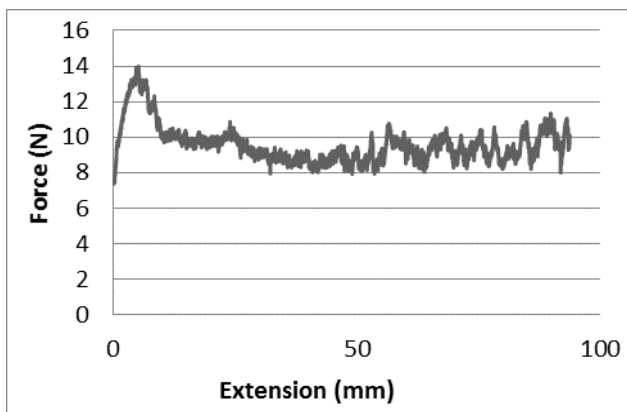
آزمون اول با نمونه خاک خشک شده به وسیله‌ی اجاق برقی به مدت ۲۴ ساعت صورت گرفت. تا هیچ رطوبتی در نمونه باقی نمانده باشد. سپس از الک با تعداد دانه ۱۸ عدد در هر اینچ مربع عبور داده شد و روی الک ۳۵ عدد باقی ماند. نمودار حاصل از آزمون با سرعت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه به شکل زیر به دست آمد.



شکل شماره ۶- نمودار نیرو-جابجایی خاک خشک (الک ۱۸-۳۵)

## خاک الک نشده خشک

در این آزمون نمونه خاک کاملاً خشک بدون الک شدن مورد آزمون قرار گرفت تا شرایط طبیعی خاک مورد مشاهده باشد. سرعت این آزمون ۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. مشاهده شد که حداکثر نیروی برش بعد از ۸ میلی‌متر جابجایی اتفاق افتاد.

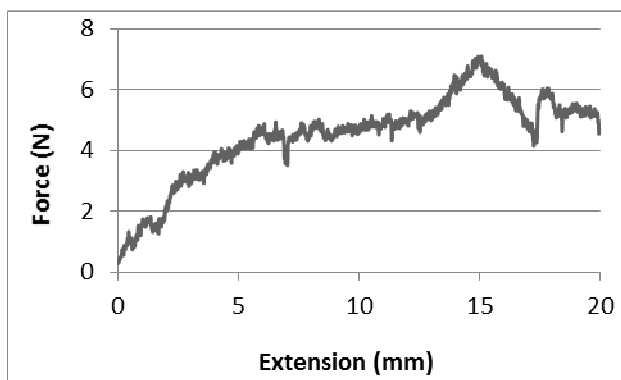


شکل ۷- نمودار نیرو-جابجایی خاک خشک الک نشده

### خاک الک نشده‌ی مرطوب

در این آزمون برخلاف آزمون‌های گذشته از خاک با رطوبت ۲۵ درصد استفاده شد. همانند آزمون قبل بدون الک کردن به صورت مخلوطی از ذرات با اندازه‌های مختلف آزمون انجام شد سرعت کشش دستگاه ۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد.

حداکثر نیروی ۷ نیوتنی پس از ۱۵ میلی‌متر جابجایی رخ داد.

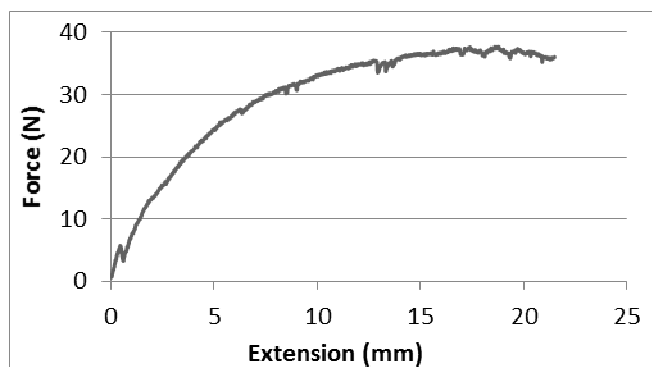


شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی خاک الک نشده مرطوب

### خاک الک شده‌ی مرطوب

در این آزمون مجدداً یک نمونه خاک با رطوبت کنترل شده مورد آزمون قرار گرفت. رطوبت این نمونه ۱۵ درصد انتخاب شد. نمونه‌ی مورد آزمایش از الک شماره‌ی ۳۵ عبور داده شده بود در نتیجه حاوی ذرات رس بوده که نتیجه‌ی آن ایجاد حالت خمیری در خاک است.

سرعت این آزمون ۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. حداکثر نیروی برش ۳۷ نیوتنی در ۱۹ میلی‌متر از جابجایی رخ داد.



شکل ۹- نمودار نیرو- جابجایی خاک الک (۳۵) شده مرطوب

#### نتیجه‌گیری

در این آزمایش، چهار نمونه خاک مختلف با ویژگی‌های منحصربه‌فرد انتخاب و مورد آزمون قرار گرفت تا رفتار خاک در برابر رطوبت، بافت خاک و سرعت کشش مشاهده شود. از جمله نتایج حاصل می‌شود به موارد زیر اشاره کرد.

#### نتایج

خاک مرطوب مقاومت بیشتری نسبت به برش دارد. افزایش حد روانی خاک، کاهش مقاومت برشی را به همراه دارد. وجود ذرات درشت باعث نوسان در نمودار می‌شود. سرعت پایین کشش از نوسان در نمودار جلوگیری می‌کند.

#### محاسن آزمایش برش مستقیم

ساده بودن آزمایش و سهولت آماده نمودن نمونه‌های آزمایش ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین آزمایش برای خاک‌های ماسه‌ای خشک و اشباع دقت میلی‌متری باقابلیت رسم نمودار همزمان

#### تشکر و قدردانی

از همکاری تمام افرادی که ما را در کلیه‌ی مراحل این آزمایش یاری کردند کمال تشکر را داریم، از جمله: جناب آقایان مهندس کریمی، هاشمی و حسام جواهر پور و همچنین خانم‌ها پوروشسب و عطایی.





۱. رحیمی، ح. ۱۳۸۴. مکانیک خاک، انتشارات دانش و فن.

2. Chau, K.-T. & Zhao, J. (Eds.). 2015. Springer Series in Geomechanics and Geoenvironmental Engineering. Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium: Springer International Publishing.
3. Gan, J. K. M. Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. 1988. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Can. Geotech. J.*, 25(3), 500–510. doi:10.1139/t88-055
4. Ghestem, M. Veylon, G. Bernard, A., Vanel, Q., & Stokes, A. 2014. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant and Soil*, 377(1-2), 43-61. doi:10.1007/s11104-012-1572-1
5. Jewell, R. A. & Wroth, C. P. 1987. Direct shear tests on reinforced sand. *Géotechnique*, 37(1), 53–68. doi:10.1680/geot.1987.37.1.53
6. Lehane, B. M. & Liu, Q. B. 2013. Measurement of Shearing Characteristics of Granular Materials at Low Stress Levels in a Shear Box. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(1), 329-336.
7. Liu, S. H. 2006. Simulating a direct shear box test by DEM. *Can. Geotech. J.*, 43(2), 155–168.
8. Mikasa, M. 1960. New direct shear test apparatus, Proc. 15th Annual Convention of Japan Society of Civil Engineering, Tokyo, 45-48
9. Shibuya, S. Mitachi, T. & Tamate, S. 1997. Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear. *Géotechnique*, 47(4), 769–790.
10. Skempton, A. W. & Bishop, A. W. 1950. The Measurement of the Shear Strength of Soils. *Géotechnique*, 2(2), 90–108.
11. Taylor, D. W. 1948. *Fundamentals of soil mechanics*: J. Wiley. Retrieved from [http://books.google.com/books?id=z\\_IRAAAAMAAJ](http://books.google.com/books?id=z_IRAAAAMAAJ)



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## Design and development of a direct shear box for evaluating soil shear stress by the means of traction test device

### Abstract

In order to precisely evaluate the "soil shear stress" and observe soil treatment against horizontal force, a device entitled "direct shear box" was designed and developed. This device, which has been designed according to the existing soil samples, provides a new and accurate method by using the "tension test device" with "force-displacement" charting capabilities. Tests conducted on controlled laboratory soil samples with particular sieves in both dry and wet conditions were done and the "force-displacement" chart was then resulted. Furthermore, the effect of strain rate and soil moisture on tension was determined.

**Keywords:** soil shear stress, direct shear box, traction test device, force-displacement