



## شبیه‌سازی اجزا محدود آزمون‌های فشار تک‌محوری محصور، نیمه‌محصور و نشست صفحه جهت بررسی انطباق تنش تسلیم با تنش پیش تراکم خاک

مجتبی نادری بلداجی<sup>\*</sup>، ابولفضل حاجیان، داوود قنبریان

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

<sup>\*</sup>نویسنده مسئول: naderi.mojtaba@agr.sku.ac.ir

### چکیده

هدف اصلی این پژوهش، شبیه‌سازی اجزاء محدود آزمون فشار تک‌محوری محصور، نیمه‌محصور و نشست صفحه جهت بررسی منحنی‌های تنش-جابجایی و موقعیت نقطه بیشینه انحنای نسبت به تنش تسلیم شبیه‌سازی شده است. در این مطالعه، سه آزمون مذکور در نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. دو روش نقطه بیشینه انحنای و کاساگرانده جهت تخمین تنش پیش تراکم از منحنی‌های شبیه‌سازی شده در تنش‌های تسلیم ۲۰، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال استفاده گردید. نتایج نشان داد تنش در نقطه بیشینه انحنای در آزمون محصور منطبق بر تنش تسلیم شبیه‌سازی شده ولی در دو آزمون نیمه محصور و نشست صفحه‌ای کمتر از آن می‌باشد. با استفاده از روش کاساگرانده، تنش پیش تراکم در هر سه آزمون از تنش تسلیم شبیه‌سازی شده بالاتر بود. نتایج آزمون‌های تجربی تراکم محصور نشان داد که نقطه بیشینه انحنای تخمین دقیق‌تری از تنش پیش تراکم به دست می‌دهد که با نتایج شبیه‌سازی نیز انطباق داشت.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، تنش پیش تراکم، روش اجزا محدود، نقطه بیشینه انحنای، روش کاساگرانده.

### مقدمه

نقطه تغییر رفتار مکانیکی خاک از حالت برگشت‌پذیر به ماندگار، تنش پیش تراکم ( $\sigma_{pc}$ ) نامیده می‌شود (Gregory et al., 2006). به طور کلی تا زمانی که تنش‌های وارده بر خاک از تنش پیش تراکم تجاوز نکند، تغییر شکل در خاک برگشت‌پذیر و ناچیز است. اما زمانی که تنش اعمال شده از این حد عبور کند، تغییر شکل ماندگار خواهد شد (Davidowski, 2001). این شاخص بر خواص فیزیکی و مکانیکی که بطور سنتی در ارزیابی سیستم‌های تردد و خاک‌ورزی استفاده می‌شود برتری دارد، زیرا در برنامه‌ریزی برای عملیات مزرعه بطور مستقیم قابل استفاده است. بنابراین هدف اصلی از تعیین تنش پیش تراکم، تعیین ظرفیت باربری خاک یا تنش در آستانه تراکم است، تا با محدود نمودن بارگذاری (در اثر تردد) به مقادیر کمتر از تنش پیش تراکم، خطر تراکم (یا تغییر شکل ماندگار) به حداقل برسد.

تنش پیش تراکم برای سالیان زیادی در تحقیقات خاک‌ورزی، مدیریت تردد در مزرعه و حفظ پایداری ساختمان خاک در برابر نیروهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار گرفته است. ارزیابی تنش پیش تراکم به مدیریت مناسب و پایدار خاک کمک می‌کند (Koolen, 1994; Lebert and Horn, 1991). واتز و همکاران (Watts et al., 1999) گزارش کردند که تنش پیش تراکم به عنوان شاخصی بحرانی برای تنفس خاک نیز قابل استفاده است. به طوری که اعمال تنش‌های بیشتر از تنش پیش تراکم سبب کاهش تنفس خاک (به دلیل از بین رفتن خلل و فرج پیوسته) می‌شود.

روش‌های مختلفی تاکنون برای تعیین حد استحکام خاک (تنش پیش تراکم) مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از (۱) روش ادومتر یا تحکیم‌سنج که بارگذاری در آن به صورت گام به گام و با فواصل زمانی طولانی صورت می‌گیرد به طوری که تغییرات حجم نمونه مورد آزمایش با زمان اندک باشد، (۲) آزمایش فشردگی محصور (Confined compression test) که توسط مهندسين کشاورزی و خاک شناسی به عنوان روش سریع و آسان برای تعیین تنش پیش تراکم و تراکم‌پذیری خاک‌ها استفاده

می‌گردد و ۳) آزمایش نشست صفحه (Plate sinkage test) که به عنوان یک روش در محل (In situ) برای تعیین ظرفیت باربری خاک استفاده می‌شود. روش‌های دیگری نیز مانند فشار تک محوری نیمه محصور (Semi-confined compression) توسط محققین بررسی شده است (Mosaddeghi et al., 2007). اگر چه تا کنون تنش پیش تراکم به عنوان یک آستانه برای شروع افزایش تراکم در خاک مورد استفاده بوده، با این حال برخی تحقیقات اخیر حاکی از آن است که حتی با اعمال تنش تا حدی کمتر از تنش پیش تراکم، تغییر شکل‌های ماندگار معنی‌داری در خاک به جا مانده که بیانگر این حقیقت است که استفاده از تنش پیش تراکم بعنوان یک حد تسلیم برای خاک چندان هم قابل اطمینان نیست (Keller et al., 2012).

یکی از راهکارهای موثر در بررسی مسائل پیچیده‌ای مانند آنچه در بالا بحث شد شبیه‌سازی اجزا محدود مسئله می‌باشد بنحوی که بتوان عوامل مختلف موثر بر رفتار تنش- کرنش در آزمون‌های تک‌محوری محصور، نیمه محصور و نشست صفحه در خاک را بررسی نمود. بدین وسیله می‌توان تخمین دقیق‌تری از تنش پیش تراکم در صورت استفاده از آزمون‌های مختلف به دست آورد. لذا هدف اصلی در این پژوهش، شبیه‌سازی اجزا محدود آزمون تک‌محوری محصور، نیمه محصور و نشست صفحه در خاک و تعریف آن به صورت ماده‌ای با رفتار الاستیک- پلاستیک جهت بررسی منحنی‌های تنش- جابجایی و موقعیت نقطه بیشینه انحنای نسبت به تنش تسلیم شبیه‌سازی شده است.

## مواد و روش‌ها

### شبیه‌سازی اجزا محدود

در این مطالعه، آزمون فشار تک‌محوری محصور، نیمه محصور و نشست صفحه در خاک به صورت متقارن حول محور (Axi-symmetric) با استفاده از نرم افزار آباکوس (ABAQUS) شبیه‌سازی شد. خاک با رفتار الاستیک - پلاستیک با معیار تسلیم دراکر- پراگر و معیار برش خطی و قانون جریان همراه تعریف شد (صدرنژاد، ۱۳۷۹). پارامترهای مورد نیاز برای این مدل‌ها نسبت پواسون، مدول کشسانی، تنش تسلیم و زاویه اصطکاک داخلی دراکر- پراگر با توجه به شرایط مسأله و پژوهش‌های قبلی انتخاب شد (Naderi-Boldaji et al., 2014). با اجرای شبیه‌سازی، از داده‌های تنش- جابجایی جهت تخمین تنش نقطه بیشینه انحنای و تنش پیش تراکم استفاده شد.

طرحواره آزمون‌های محصور، نیمه‌محصور و نشست صفحه در خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. با انتخاب تقارن محوری، نمونه خاک و پیستون در سیستم مختصات X-Y ایجاد شدند و محور Y به عنوان محور دوران در نظر گرفته شد. نوع نمونه خاک تغییر شکل پذیر انتخاب شد. در آزمون محصور، نمونه خاک با ارتفاع ۶۰ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر و در آزمون نیمه‌محصور با ارتفاع ۶۰ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر رسم گردید (Mosaddeghi et al., 2007). این ابعاد معمولاً در نمونه برداری‌های مزرعه‌ای برای آزمون محصور استفاده شده است (Arvidsson and Keller, 2004; Mosaddeghi et al., 2004). پیستون به شکل صلب شبیه‌سازی شد. پیستون در هر دو آزمون با قطر ۱۰۰ میلی‌متر ترسیم شد. در آزمون نشست صفحه نمونه خاک با ارتفاع ۱۵۰ و قطر ۵۰ میلی‌متر رسم گردید. به منظور انتخاب بهینه ارتفاع و قطر خاک در مسأله نشست صفحه جهت جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی بر حل مسأله، تحلیل‌های حساسیت نسبت به ارتفاع و قطر نمونه خاک انجام شد.

### تعیین تنش پیش تراکم از منحنی‌های شبیه‌سازی شده لگاریتم تنش - جابجایی

#### • نقطه بیشینه انحنای

نقطه بیشینه انحنای در منحنی‌های شبیه‌سازی شده تنش - جابجایی با استفاده از روش تحلیلی داویدوسکی و کولن (Davidowski and Koolen, 2004) و داویدوسکی و همکاران (Davidowski et al., 2001) در نرم افزار اکسل تعیین شد. جهت تعیین نقطه بیشینه انحنای شیب خط مماس بر منحنی (Mq) از زوج داده‌های لگاریتم تنش- جابجایی ( $\log \sigma, Z_j$ ) از رابطه ۱ و اختلاف بین دو شیب خط مماس متوالی ( $k$ ) از رابطه ۲ محاسبه شد:

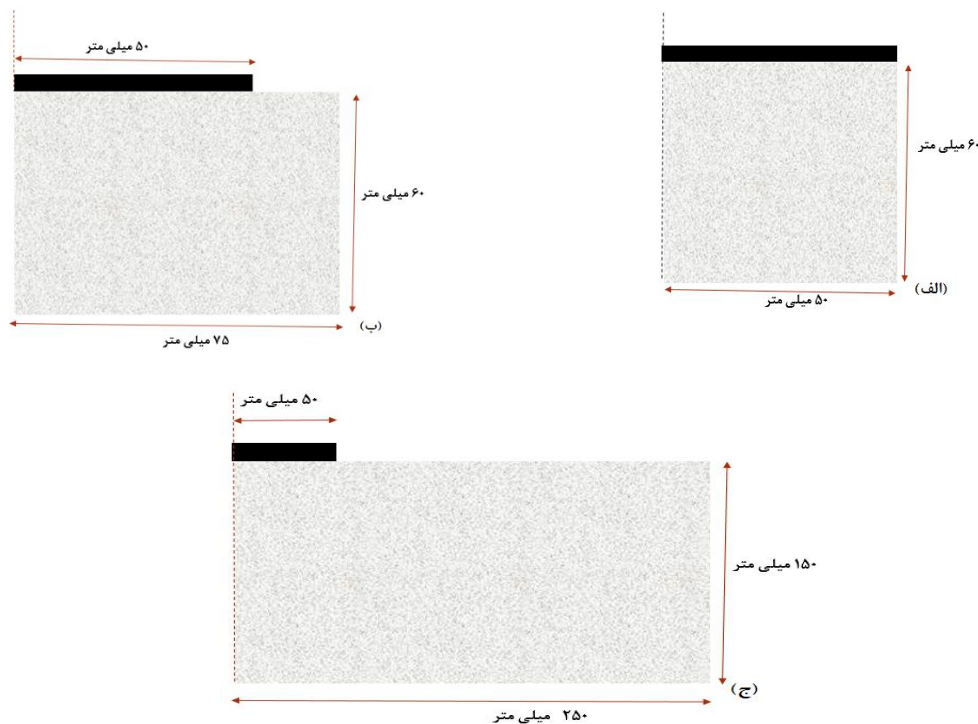
$$Mq = \frac{Z_{j+1} - Z_j}{\log \sigma_{j+1} - \log \sigma_j} \quad (1)$$

$$k = m_{q+1} - m_q \quad (2)$$

حداکثر انحنا در منحنی لگاریتم تنش - جابجایی در تنش  $(\sigma_{pc})$  اتفاق می افتد که  $k$  حداکثر باشد. شکل ۲- الف یک نمونه نمودار لگاریتم تنش -  $k$  را برای تنش تسلیم ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان می دهد که نقطه بیشینه انحنا آن نیز در ۲۰۰ کیلوپاسکال واقع شده است.

• روش کاساگراند

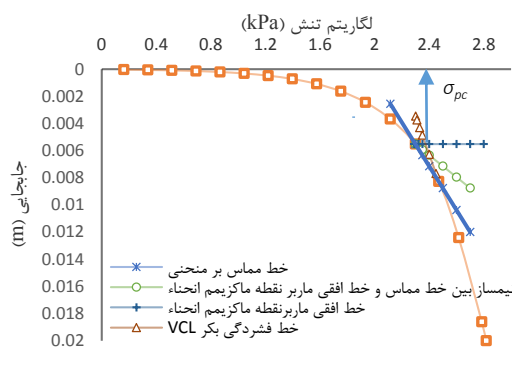
روش ترسیمی کاساگراند با بهره گیری از روش تحلیلی داویدوسکی و کولن (Davidowski and Koolen, 2004) و داویدوسکی و همکاران (Davidowski et al., 2001) در نرم افزار اکسل اجرا شد. نیمساز بین امتداد خط مماس بر منحنی نیمه لگاریتمی و امتداد افقی در نقطه بیشینه انحنا  $(\sigma_{pc}$  و  $Z_{pc})$  از رابطه ۳ حاصل شد.



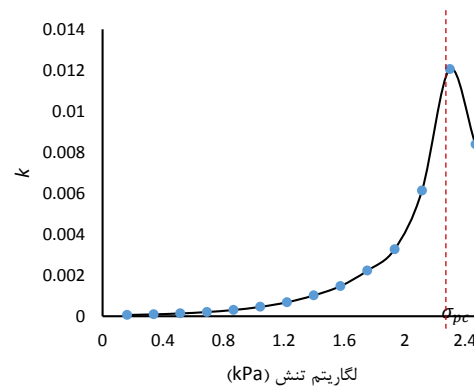
شکل ۱- مدل هندسی و ابعاد آزمون های الف) محصور، ب) نیمه محصور و ج) نشست صفحه.

$$\frac{1}{2} m_T = \frac{z - z_T}{\log \sigma - \log \sigma_T} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $m_T$  شیب مماس بر منحنی نیمه لگاریتمی در نقطه بیشینه انحنا است. جهت تعیین امتداد خط فشردگی بکر (VCL)، با استفاده از داده های بعد از نقطه بیشینه انحنا، خط VCL بر روی منحنی برازش شد (شکل ۲-ب). تنش پیش تراکم به عنوان تنش متناظر با نقطه تقاطع معادله نیمساز بین خطوط مماس و افقی مار بر نقطه بیشینه انحنا و امتداد خط VCL به دست آمد.



ب



الف

شکل ۲- روش های تخمین تنش پیش تراکم از الف) تنش متناظر نقطه بیشینه انحنای (ب) روش تحلیلی - ترسیمی کاساگراند

### آزمون های تجربی

نمونه هایی از یک خاک لومی-رسی در رطوبت های ۸، ۱۷ و ۲۱٪ هر کدام در دو سطح چگالی ظاهری خشک ۱ و g در  $1/15 \text{ cm}^3$  در سیلندرهایی به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۶۰ میلی متر قالب گیری شدند. نمونه های قالب گیری شده تحت آزمون فشار تک محوری محصور با استفاده از دستگاه اینسترون قرار گرفت. هر نمونه در ابتدا تا ۱۰۰ kPa تحت تنش پیش بار قرار گرفت و پس از آن در سطوح تنش ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۱۰۰، و ۱۵۰ kPa بارگذاری مجدد با ۱۰ سیکل بارگذاری - باربرداری قرار گرفت. در نهایت نمودارهای تنش - کرنش برای هر نمونه آزمون تحلیل شد.

### نتایج و بحث

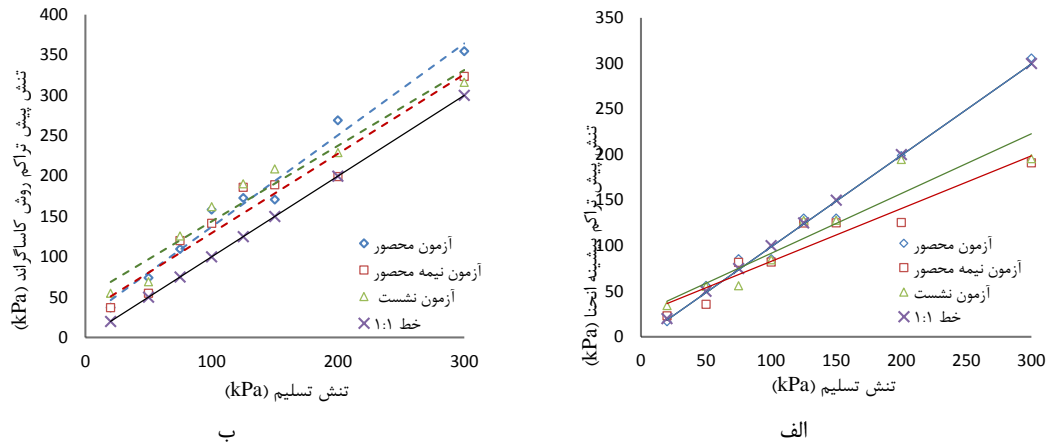
#### • نتایج شبیه سازی

شکل ۳ نتایج شبیه سازی سه آزمون محصور، نیمه محصور و نشست صفحه را در تنش های تسلیم از ۳۰۰-۳۰ کیلوپاسکال نشان می دهد. تنش پیش تراکم با استفاده از روش های نقطه بیشینه انحنای (۳-الف) و روش کاساگراند (۳-ب) از منحنی های لگاریتم تنش - جابجایی تخمین زده شد. شکل ۳-الف نشان می دهد که برای آزمون محصور، تنش پیش تراکم استخراج شده در نقطه بیشینه انحنای دقیقاً بر تنش های تسلیم شبیه سازی شده منطبق می باشد در حالی که در دو آزمون دیگر نقطه بیشینه انحنای تخمینی در تنش پیش تراکم به ویژه در تنش های تسلیم بالاتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال داشته است. در شکل ۳-ب مشخص است که روش کاساگراند تنش پیش تراکم را برای هر سه آزمون محصور، نیمه محصور و نشست صفحه بالاتر از تنش تسلیم برآورد نموده است. این نتایج تا حد زیادی تایید کننده نتایج تجربی مطالعات دیگر می باشد (Mosaddeghi et al., 2004).

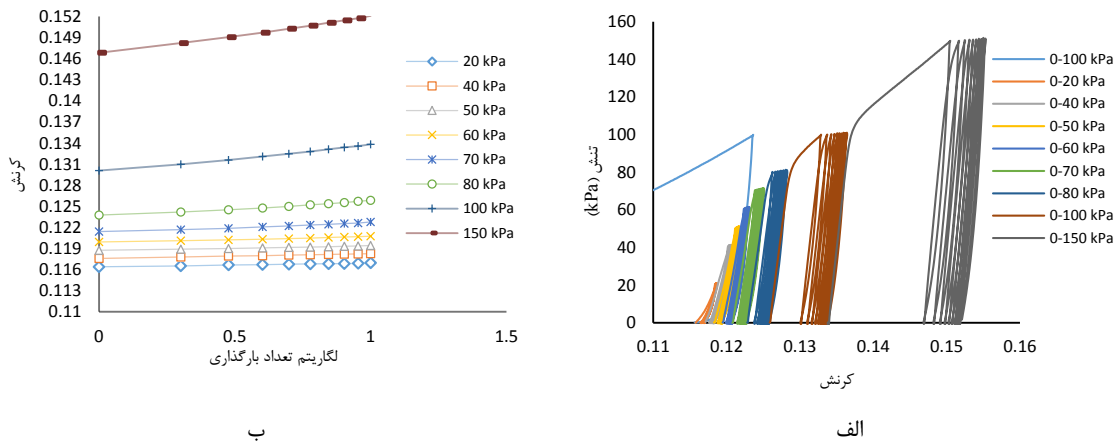
#### • نتایج تجربی

شکل ۴-الف نتایج تنش - کرنش یک نمونه خاک در رطوبت ۸٪ و چگالی ظاهری ۱ را در آزمون تراکم تک محوری محصور نشان می دهد. مشخص است که با تکرار بارگذاری در هر سطح تنش (چه پایین تر از تنش پیش تراکم ۱۰۰ و یا بالاتر از آن) کرنش های ماندگار ایجاد شده است. با این حال در سطوح تنش بالاتر از تنش پیش تراکم شدت کرنش های ماندگار بیشتر می باشد. شکل ۴-ب تغییرات کرنش پلاستیک در مقابل لگاریتم تعداد سیکل بارگذاری را برای سطوح مختلف تنش نشان می دهد. مشخص است که روابط خطی بین کرنش پلاستیک و لگاریتم تعداد سیکل بارگذاری برقرار است که شیب این خطوط با افزایش تنش به بالاتر از تنش پیش تراکم افزایش معنی داری نشان داد. جدول ۱ نتایج آزمون های تجربی در خصوص تخمین تنش پیش تراکم از آزمون های فشار تک محوری محصور با خاک های با رطوبت و چگالی های متفاوت را برای دو روش کاساگراند

و نقطه بیشینه انحنای نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نقطه بیشینه انحنای تخمین دقیق‌تری از تنش پیش‌تراکم (۱۰۰ کیلوپاسکال) را نسبت به روش کاساگراند نشان داده که با نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود برای آزمون محصور تطابق دارد.



شکل ۳- مقایسه تنش پیش‌تراکم (الف) روش بیشینه انحنای (ب) روش کاساگراند به ازای تنش تسلیم مختلف در سه آزمون



شکل ۴- الف) رفتار تنش- کرنش آزمون محصور خاک با رطوبت ۸٪ و چگالی  $1 \text{ g cm}^{-3}$  در اثر تکرار بارگذاری و ب) تغییرات کرنش با تکرار بارگذاری در سطوح مختلف تنش

جدول ۱- تنش پیش‌تراکم از نقطه بیشینه انحنای و روش کاساگراند با تنش پیش‌باری ۱۰۰ کیلوپاسکال در آزمون محصور

رطوبت (%)	چگالی ( $\text{g cm}^{-3}$ )	تنش بیشینه انحنای (kPa)	تنش پیش‌تراکم روش کاساگراند (kPa)
۸	۱	۱۰۵/۹	۱۲۳/۱
۸	۱/۱۵	۱۰۰/۷	۱۰۹/۴
۱۷	۱	۹۹/۷	۱۰۴/۵
۱۷	۱/۱۵	۱۰۳/۱	۱۰۶/۷
۲۱	۱	۱۰۲/۱	۱۰۶/۹
۲۱	۱/۱۵	۱۰۲/۶	۱۰۷/۲



## منابع

- صدرنژاد ا.ا. ۱۳۷۹. مبانی نظریه خمیری. چاپ اول. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. تهران. ۳۸۴ صفحه.
- Arvidsson J. and Keller T. 2004. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research* 77: 85-95.
- Dawidowski J. B. and Koolen A. J. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil and Tillage Research*, 31: 277-282.
- Dawidowski J.B., Morrison J.E. and Snieg M. 2001. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. *Transactions of the ASAE*, 44: 1059-1064.
- Gregory A. S., Whalley W.R., Watts C.W., Bird N.R.A., Hallett P.D. and Whitmore A.P. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89: 45-57.
- Keller T., Arvidsson j., Schjønning P., Lamande M., Stettler M. and Weisskopf P. 2012. In situ subsoil stress-strain behavior in relation to soil precompression stress. *Soil Science*, 177: 490-497.
- Koolen A. J. 1994. Mechanics of soil compaction. In: Soane B.D. and van Ouwerkerk C. (Eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier Amsterdam pp.23-44.
- Lebert M. and Horn R. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 19: 275-289.
- Mosaddeghi M.R., Koolen A.J., Hemmat A., Hajabbasi M.A. and Lerink P. 2007. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structured soils. *Journal of Terramechanics*, 44: 53-63.
- Mosaddeghi M.R., Hajabbasi M.A., Hemmat A. and Alexandrou A. 2004. Determination of pre-compaction stress of in situ tractor pre-compacted soil by plate sinkage and confined compression tests. 2004 CIGR International Conference. Beijing, China.
- Naderi-Boldaji M., Alimardani R., Hemmat A., Sharifi A., Keyhani A., Tekeste M.Z. and Keller T. 2014. 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction. Part II: Soil bin verification of the model in a clay-loam soil. *Soil and Tillage Research*, 114: 211-219.
- Watts C.W., Hallett P. D. and Dexter A. R. 1999. Effects of mechanical stresses and strains on soil respiration. In: *Effects of Mineral- Organic-Microorganism Interactions on Soil and Freshwater Environments* (Berthelin J: Huang P M: Bollag J M: Andreux F eds) pp 305-316. Plenum Publishers New York.

### **Finite element simulation of confined and semi-confined uniaxial compression and plate sinkage tests to investigate the coincidence of yield stress and precompression stress**

Mojtaba Naderi-Boldaji\*, Abolfazl Hajian, Davoud Ghanbarian  
Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

\*Corresponding Author: naderi.mojtaba@agr.sku.ac.ir

#### **Abstract**

The aim of this study was to simulate the confined and semi-confined uniaxial compression and plate sinkage tests using finite element method to investigate stress-strain curves and the position of the point of maximum curvature with respect to the simulated yield stress. In this study, the above mentioned tests were simulated in BAQUS. Two methods of the point of maximum curvature and Casagrande were used to estimate the precompression stress from the simulated stress-deformation curves at 20, 50, 75, 100, 125, 150, 200 and 300 kPa yield stresses. The results showed that the stress at the point of maximum curvature in the confined test was close to the simulated yield stress but in the semi-confined and plate sinkage tests was smaller than the simulated yield stress. Using the Casagrande's method, the precompression stress in the three tests was larger than simulated yield stress. The results of experimental confined compression tests indicated that the point of maximum curvature yielded a more accurate estimate of precompression stress which supported by the simulation results.

**Key words:** Soil compaction, Precompression stress, Finite element method, the point of maximum curvature, Casagrande method.