



توسعه و ارزیابی آزمایشگاهی یک مبدل اندازه‌گیری تنش عمودی خاک

مصطفی بهرامی^۱، مجتبی نادری بلداجی^{۲*}، داود قنبریان^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد؛ mostafa.bahrami.2@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد؛ m.naderi@ut.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد؛ ghanbarian-d@agr.sku.ac.ir

چکیده

یکی از گام‌های اساسی در مطالعه رفتار تراکم خاک تحت تردد ماشین‌های مزرعه اندازه‌گیری دقیق تنش در خاک می‌باشد. جهت جلوگیری از تراکم خاک تحت تردد ماشین، اساساً بایستی تنش انتشار یافته در هر عمق زیر تایر را در حدی کمتر از استحکام خاک کنترل نمود. در این مطالعه یک مبدل اندازه‌گیری تنش عمودی خاک توسعه و در آزمایشگاه تحت بار سطحی دایره‌ای (نشست صفحه) مورد ارزیابی قرار گرفت. با تعبیه یک لودسل مینیاتوری در یک محفظه آلومینیومی مبدلی استوانه‌ای به قطر ۷۰ و ارتفاع ۳۰ mm ساخته شد که قطر سطح انتقال تنش روی آن ۵۰ mm می‌باشد. آزمون‌های آزمایشگاهی با یک نمونه خاک لومی رسی در دو سطح رطوبت ۱۱ و ۱۶٪ و دو سطح چگالی ظاهری ۱۰۰۰ و ۱۱۵۰ kg m^{-۳} تحت بارگذاری سطحی دایره‌ای به قطر ۱۰۰ mm انجام شد. نتایج اندازه‌گیری با نتایج تحلیل مدل بوسینسک مقایسه شد. نتایج نشان داد که با تغییر چگالی از ۱۰۰۰ به ۱۱۵۰ kg/m^۳ تغییر چندانی در اختلاف تنش اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با مدل بوسینسک ندارد اما با تغییر رطوبت از ۱۱ تا ۱۶٪ تنش اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تنش خاک، اندازه‌گیری تنش، مبدل تنش

Development and Laboratory Evaluation of a Transducer for Vertical Soil Stress

Mustafa Bahrami¹, Mojtaba Naderi-Boldaji^{2*}, Davoud Ghanbarian³

¹ PhD student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
mostafa.bahrami.2@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
m.naderi@ut.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
ghanbarian-d@agr.sku.ac.ir

ABSTRACT

One of the most important steps in studying the compaction behavior of soil under farm machinery traffic is to provide an accurate measure of soil stress. To prevent soil compaction under tire passage, the stress at any depth beneath the tire needs to be controlled lower than soil strength. In the present study, a vertical stress transducer was developed and evaluated in laboratory under circular surface loading (plate sinkage). The stress transducer was developed with installing a miniature load cell inside a cylindrical aluminum housing (70 mm diameter, 30 mm height) with 50 mm diameter stress sensing surface. Laboratory tests were carried out with a clay loam soil at 11 and 16% water contents each at 1000 and 1150 kg m⁻³ bulk density under circular surface loading of a 100 mm diameter plate. The measured stress was compared with the analytical solution of Boussinesq. The results showed that by changing the density from 1000 to 1150 kg / m³, there is little variation in difference of stress measured and calculated with the Boussinesq model, but by changing the moisture content from 11 to 16%, the measured stress decreases.

Keywords: Soil stress, Stress measurement, Stress transducer



از جمله مهم‌ترین عوامل در تراکم خاک‌های کشاورزی تردد ماشین‌های کشاورزی سنگین بر روی خاک بخصوص در شرایط رطوبتی نامطلوب است. تنش اعمال شده بر سطح خاک توسط تایر ماشین در خاک منتشر شده و بسته به میزان استحکام خاک می‌تواند باعث تغییر شکل ماندگار و افزایش تراکم خاک شود (Arvidsson and Keller, 2007). از آنجا که فشردگی به خصوص در لایه‌های عمیق به راحتی قابل رفع نیست و نیاز به صرف انرژی زیاد دارد، بهترین راهکار مقابله با مشکل فشردگی خاک پیشگیری از آن است (Hamza and Anderson, 2005). خطر فشردگی خاک‌های کشاورزی اساساً به مقدار تنش (نیرو بر واحد سطح) اعمال شده در طی تردد ماشین‌ها بستگی دارد (Arvidsson et al., 2011). دانستن سطح تنش اعمالی در سطح تماس تایر - خاک و نحوه توزیع آن در زیر تایر حامل بار مهم‌ترین بخش هر مطالعه‌ای در خصوص مدیریت فشردگی و تردد بر روی خاک است (Keller et al., 2012). با دانستن میزان تنش و همچنین ارزیابی وضعیت استحکام خاک (ظرفیت باربری خاک)، جهت جلوگیری از افزایش فشردگی باید سطح تنش اعمالی به واسطه تردد ماشین را در حدی پایین‌تر از حد استحکام فشاری خاک (تنش پیش‌تراکم) کنترل نمود. در این خصوص مطالعات بسیار گسترده‌ای (Keller et al., 2016 Lamandé and Schjønning, 2011a, b, c;) تا کنون انجام شده است.

برای اندازه‌گیری تنش در خاک از حسگرهای متفاوتی تاکنون استفاده شده است. به‌طور کلی این حسگرها به دو دسته حسگرهای بر پایه فشار سیال و حسگرهای کرنش‌سنجی تقسیم می‌شوند (Naderi-Boldaji et al., 2016). یکی از حسگرهای ساده که برای اندازه‌گیری تنش خاک توسعه یافته حسگر بولینگ است (Bolling, 1987). بولینگ پیشنهاد داد که با استفاده از یک لوله با هد انعطاف‌پذیر (از جنس لاستیک سیلیکونی) قرار گرفته در یک عمق مشخص خاک و پایش فشار سیال درون لوله می‌توان تنش ایجاد شده در خاک در اثر تردد تایر را اندازه‌گیری نمود. (Raper and Arriaga, 2007) از حسگر بولینگ با هد کرووی برای اندازه‌گیری تنش در خاک تحت تردد تایر استفاده کردند. با حسگر بولینگ، تنش نرمال میانگین (تنش هیدرواستاتیک) در خاک اندازه‌گیری می‌شود. اساساً اصلی‌ترین مولفه تنش که باعث تراکم خاک می‌گردد تنش عمودی (σ_z) خاک است. از این رو در اغلب مطالعات حسگرهای کرنش‌سنجی با شکل‌های هندسی و ابعاد مختلف برای اندازه‌گیری تنش عمودی توسعه داده شده‌اند. حسگر ملقب به آرویدسون (Arvidsson, 1997) and Andersson برای اندازه‌گیری تنش عمودی خاک است. تنش با استفاده از لودسل کرنش‌سنجی جاسازی شده بر روی محفظه مکعبی اندازه‌گیری می‌شود. (Keller et al., 2016).

اغلب مبدل‌های تنش عمودی کرنش‌سنج‌هایی هستند که بر روی آلومینیوم، فولاد و یا غشای تیتانیوم چسبانده شده‌اند که پس از آن در یک محفظه از همان جنس قرار داده شده‌اند (Lamandé et al., 2015). اختلاف سفتی مبدل‌های کرنش‌سنجی (با محفظه فلزی) در مقایسه با خاک باعث ایجاد تمرکز تنش بر روی این نوع مبدل و بیش تخمینی در اندازه‌گیری تنش می‌شود (Kirby, 1999). در این مطالعه توسعه و آزمون یک حسگر استوانه‌ای کرنش‌سنجی برای اندازه‌گیری تنش عمودی خاک جهت استفاده در مطالعات انتشار تنش در خاک مد نظر قرار گرفت.

۲- بخش مواد و روش‌ها

۲-۱- نظریه انتشار تنش در خاک

انتشار تنش در خاک به‌طور کلاسیک توسط معادله بوسینسک (Boussinesq., 1885) و با فرض رفتار الاستیک برای خاک توصیف می‌شود. معادله بوسینسک برای مؤلفه تنش عمودی در هر عمق منتج از بار نقطه‌ای در سطح خاک با رابطه ۱ بیان می‌شود (شکل ۱):

$$\sigma_z = \left(\frac{3Pz^3}{2\pi r^5} \right) \quad (1)$$

که در آن r فاصله شعاعی از نقطه اعمال بار P تا نقطه محاسبه تنش، Z مولفه قائم عمق و σ_z مؤلفه قائم تنش است. فرولیش (Fröhlich, 1934) تنش قائم تحت بار نقطه‌ای سطحی را با رابطه ۲ محاسبه نمود (Defossez and Richard, 2002):

$$\sigma_z = \left(\frac{vPz^v}{2\pi r^{v+2}} \right) \quad (2)$$

که در آن v فاکتور تمرکز تنش نامیده می‌شود. در مقایسه با رابطه بوسینسک، فاکتور تمرکز تنش برای ماده الاستیک ۳ فرض می‌شود در حالی که در رابطه فرولیش این فاکتور بسته به خصوصیات فیزیکی و استحکام خاک متغیر است (Keller et al., 2014). تغییر رفتار خاک از الاستیک کامل به

الاستیک- پلاستیک باعث تغییر فاکتور تمرکز تنش می‌شود (Fröhlich, 1934).

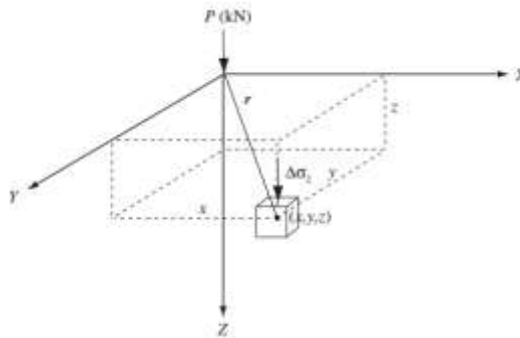


Figure 1. Soil vertical stress in depth z resulting from point load P on the surface for a homogeneous and elastic soil (Fredlund et al., 1993).

شکل ۱. تنش قائم در عمق z خاک منتج از بار نقطه‌ای P در سطح برای یک خاک همگن و الاستیک (Fredlund et al., 1993).

با تعمیم نظریه انتشار تنش تحت بار نقطه‌ای، تنش تحت بارهای سطحی نیز برای سطوح هندسی متفاوت حل شده است. در توزیع یکنواخت بار نرمال بر یک سطح دایره‌ای (همانند آزمایش نشست صفحه) (شکل ۲) تنش قائم در هر عمق z در زیر مرکز صفحه با استفاده از رابطه فرولینش برابر است با (Koolen, and Kuipers, 1983):

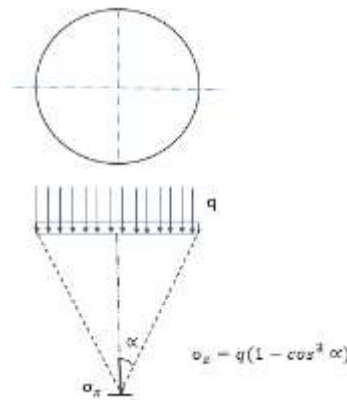


Figure 2. Distribution of stress at depth z in soil under uniform circular surface stress

شکل ۲. تنش در عمق z خاک تحت بارگذاری یکنواخت دایره‌ای سطحی

$$\sigma_z = q \left(1 - \left(\frac{z}{(R^2 + z^2)^{1/2}} \right)^\nu \right) \quad (3)$$

که در آن q تنش اعمالی بر سطح دایره‌ای، z عمق نقطه محاسبه تنش و R شعاع دایره است.

۲-۲- توسعه مبدل تنش

مبدل تنش توسعه داده شده در این مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. از یک لودسل مینیاتوری فشاری (CWFS, Bongshin, South Korea) با ظرفیت بار محوری ۲۰۰ کیلوگرم برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر سطح اندازه‌گیری تنش استفاده شد. قطر این لودسل ۲۸ mm و ارتفاع آن ۸ mm می‌باشد. این لودسل دارای یک سوراخ مرکزی ۶ mm است. همان‌طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده، قسمت برجسته اطراف سوراخ لودسل محل اعمال بار است. جهت استفاده از این لودسل یک محفظه آلومینیومی با قطر ۷۰ و ارتفاع ۳۰ mm ماشینکاری شد (شکل ۳-ب، ۳-ج). تنش وارده از

خاک توسط صفحه بارگذاری به قطر ۵۰ mm دریافت می‌شود. در زیر این صفحه یک تکیه‌گاه برای انتقال بار به قسمت حساس لودسل و یک پین برای عبور از سوراخ مرکزی لودسل و نگهداری آن قرار داده شد. سوراخی بر روی دیواره جانبی محافظه برای خروج کابل حسگر تعبیه شد. با این ظرفیت لودسل و ابعاد صفحه بارگذاری، امکان اندازه‌گیری تنش در خاک تا ۱ مگا پاسکال فراهم می‌شود.

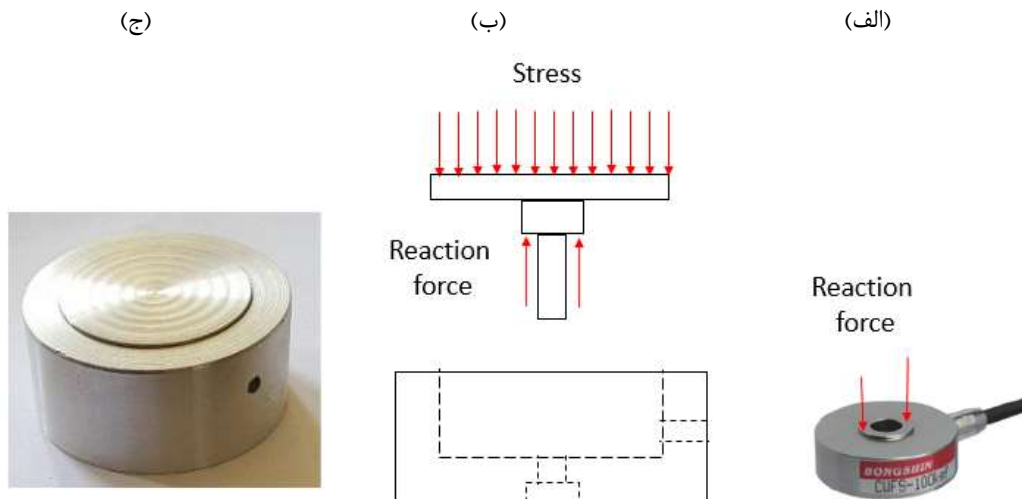


Figure 3. Stress transducer (A) miniature load cell (B) schematic of load cell's housing (C) load cell's housing

شکل ۳. مبدل اندازه‌گیری تنش (الف) لودسل مینیاتوری (ب) شماتیک محافظه لودسل (ج) محافظه لودسل

برای واسنجی این مبدل، از دستگاه استاندارد کشش و فشار (اینسترون سنتام، مدل STM20، ساخت ایران) استفاده شد. با اعمال بارهای مشخص با استفاده از دستگاه اینسترون بر روی مبدل، ولتاژ خروجی لودسل با استفاده از یک دیتالاگر (آترون، AL4، ساخت ایران) اندازه‌گیری و ثبت شد.

۲-۳- ارزیابی مبدل در اندازه‌گیری تنش خاک

برای کالیبراسیون مبدل قبل از نصب در خاک، مبدل تحت بارگذاری دستگاه آزمون اینسترون قرار گرفت. دستگاه آزمون اینسترون در حالت بارگذاری گام به گام تنظیم شد. در هر گام ۱۰۰ N و در کل ۱۰ گام به صورتی که بین گام‌ها ۱۵ ثانیه فاصله وجود داشت نیرو به مبدل وارد شد. سیگنال خروجی مبدل در هر گام با استفاده از دیتالاگر بر روی کامپیوتر ثبت شد. سپس ارتباط بین مقادیر بار اعمالی و سیگنال خروجی تحلیل شد. جهت آزمون این مبدل از آزمون بارگذاری صفحه‌ای استفاده شد. علت انجام آزمون‌های بارگذاری صفحه‌ای و بررسی انتشار تنش تحت آن در این مطالعه وجود حل تحلیلی صریح (رابطه ۳) و مشخص بودن شرایط مرزی بارگذاری (بارگذاری با توزیع یکنواخت در سطح خاک) برای این مسئله است. در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (نشست صفحه) از دستگاه آزمون اینسترون جهت اعمال تنش سطحی بر روی خاک با صفحه‌ای به قطر ۱۰۰ mm استفاده شد. برای این منظور یک خاک لومی رسی (با ۳۴٪ رس، ۳۰٪ سیلت و ۳۶٪ شن) در دو سطح رطوبت ۱۱ و ۱۶٪ درصد تهیه شد. خاک در دو سطح چگالی ۱۰۰۰ و ۱۱۵۰ kg m^{-۳} در یک سیلندر به قطر ۳۰۰ و ارتفاع ۲۵۰ mm از جنس تفلون قالب‌گیری شد. مبدل تنش در عمق ۱۵۰ mm سیلندر خاک در حالی که تا ارتفاع ۲۵۰ mm با خاک پر شده بود در نقطه مرکزی قرار داده شد. در هر خاک، آزمون نشست صفحه در چهار گام ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ mm با سرعت ثابت ۵۰۰ mm/min انجام شد. به این صورت، تنش در چهار گام متفاوت به سطح خاک اعمال شده است. ضمن اندازه‌گیری تنش در هر گام، با رابطه بوسینسک (با ضریب تمرکز تنش ۳) برای بارگذاری دایره‌ای تنش نظری در عمق ۱۵ cm محاسبه شد.



Figure 4. Instron Testing Machine

شکل ۴. دستگاه آزمون اینسترون

۳- نتایج و بحث

شکل ۵ نتایج واسنجی مبدل تحت بارگذاری با دستگاه اینسترون را نشان می‌دهد که یک رابطه کاملاً خطی بین تنش اعمالی و سیگنال خروجی نشان می‌دهد. معادله رگرسیونی به دست آمده در مرحله اندازه‌گیری تنش در خاک مورد استفاده قرار گرفت.

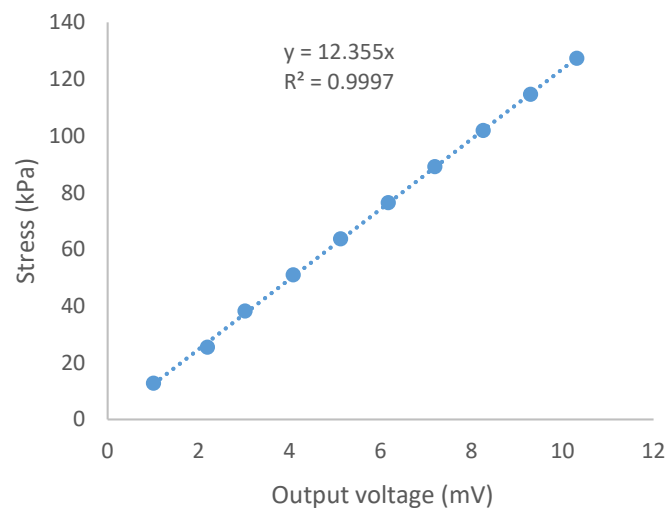
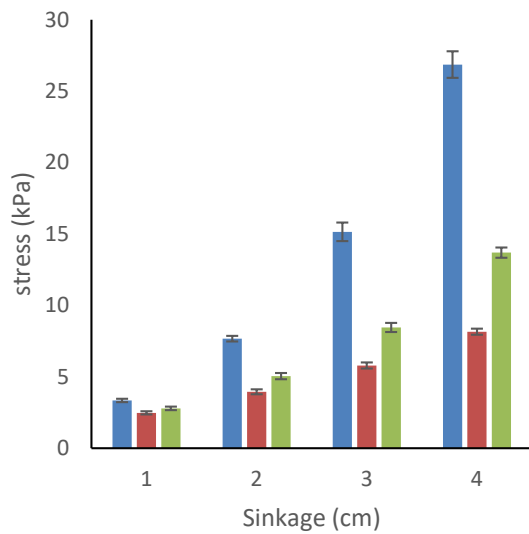


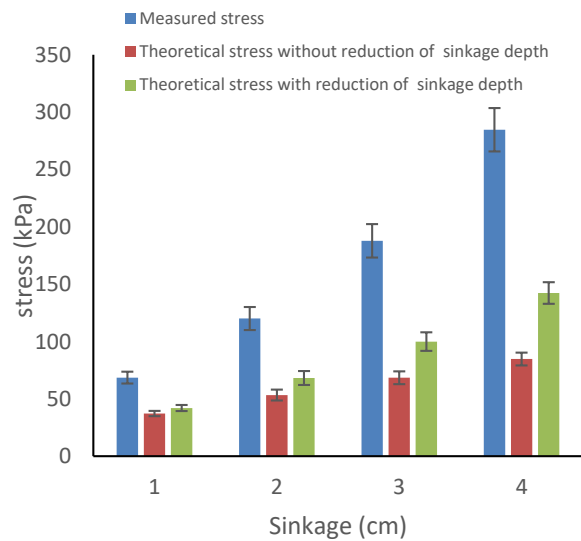
Figure 5. Calibration relationship of stress transducer

شکل ۵. رابطه واسنجی مبدل تنش

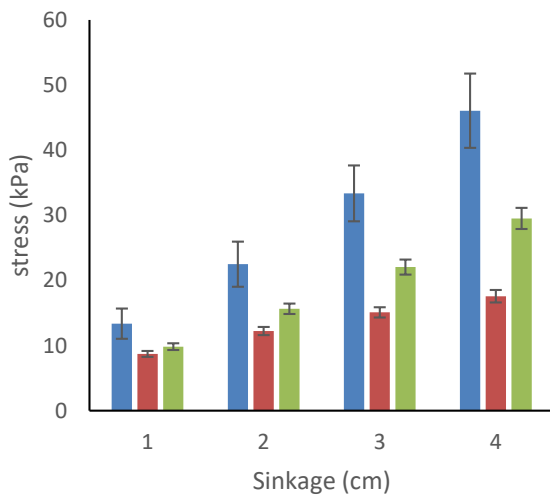
شکل ۶ تنش اندازه‌گیری شده در هر شرایط رطوبتی و چگالی خاک را همراه با تنش محاسبه شده نظری نشان می‌دهد. تنش نظری در دو حالت به دست آمد: ۱- بدون اصلاح عمق اندازه‌گیری تنش پس از نشست صفحه و ۲- با اصلاح عمق و کسر مقدار نشست صفحه. به نظر می‌رسد که تغییر چگالی از ۱۰۰۰ به ۱۱۵۰ kg m^{-3} در هر دو سطح رطوبت اثری در اختلاف تنش محاسبه شده با نظریه بوسینسک و تنش اندازه‌گیری شده ندارد. اما تغییر رطوبت از ۱۱٪ به ۱۶٪ در هر دو چگالی سبب کاهش اختلاف بین تنش اندازه‌گیری شده و تنش نظری شده است. با این حال در هر دو سطح رطوبت مشاهده می‌شود که تنش اندازه‌گیری شده با مبدل از تنش نظری بزرگ‌تر می‌باشد.



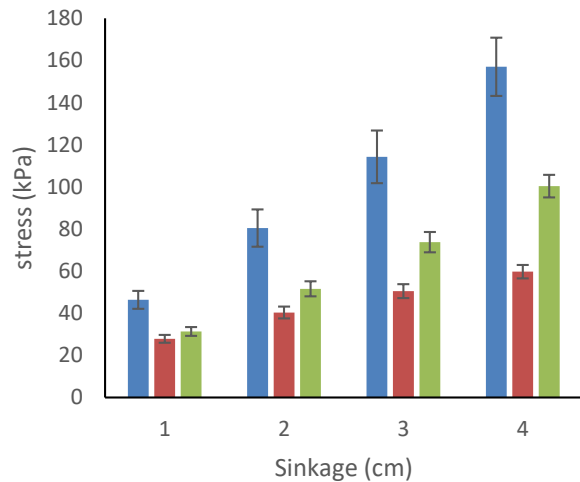
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

Figure 6. Measured and calculated stress (A) water content 11%, density 1000 kg m⁻³; (B) water content 11%, density 1150 kg m⁻³; (C) water content 16%, density 1000 kg m⁻³ and (D) water content 16%, density 1150 kg m⁻³
شکل ۶. تنش‌های اندازه‌گیری و محاسبه شده (الف) رطوبت ۱۱٪، چگالی ۱۰۰۰ kg m⁻³، (ب) رطوبت ۱۱٪، چگالی ۱۱۵۰ kg m⁻³، (ج) رطوبت ۱۶٪، چگالی ۱۰۰۰ kg m⁻³ و (د) رطوبت ۱۶٪، چگالی ۱۱۵۰ kg m⁻³

شکل ۷ تنش اندازه‌گیری شده در همه آزمون‌ها و تنش نظری با عمق اصلاح شده را در مقابل تنش اعمالی بر سطح دایره‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش محاسبه شده از نظریه بوسینسک بمراتب کوچک‌تر از تنش اندازه‌گیری شده با مبدل شده است. این اختلاف تا تنش ۲۰۰ kPa کمتر ولی در تنش‌های بزرگ‌تر مشهودتر می‌باشد. اساساً تمرکز تنش به واسطه ورود مبدل در خاک و به دلیل تفاوت در سفتی مبدل و خاک اطراف باعث بیش تخمینی تنش شده که این در توافق با مطالعات گذشته می‌باشد. تمرکز تنش به دلیل رفتار پلاستیک خاک می‌تواند مزید بر علت فوق باشد. با استفاده از رابطه ۳، یک فاکتور تمرکز تنش ظاهری با برابر قرار دادن σ_z با تنش محاسبه شده و اصلاح عمق محاسبه تنش با لحاظ عمق نشست صفحه به دست آمد. این فاکتور برای رطوبت ۱۱٪ و ۱۶٪ به ترتیب به اعداد ۵/۳۹، ۴/۷، ۴/۹۶ و به عنوان میانگین برای چگالی ۱۰۰۰ و ۱۱۵۰ kg m⁻³ بدست آمد که نشان دهنده کاهش فاکتور تمرکز با افزایش رطوبت است. Sohne (1958) پیشنهاد داد که با افزایش رطوبت و تغییر خاک از حالت خشک به حالت نرم این فاکتور از ۴ تا ۶ افزایش پیدا کند که با یافته‌های حاضر متفاوت است. Horn (1990) در مطالعه‌ای اعلام کرد که فاکتور تمرکز علاوه بر سفتی خاک به بار وارده بر خاک نیز بستگی دارد همچنین این فاکتور با کاهش تنش پیش تراکم افزایش می‌یابد. Trautner (2003) در نتایج



مطالعه خود برخلاف (1958) Sohne نشان داد که فاکتور تمرکز تنش در خاکهای خشک بیشتر است و این مسئله را با افزایش سرعت و جهت دار بودن انتشار تنش در خاک خشک توجیه کرد این یافته ها با یافته‌های (2011c) Lamandé and Schjønning مطابقت دارد.

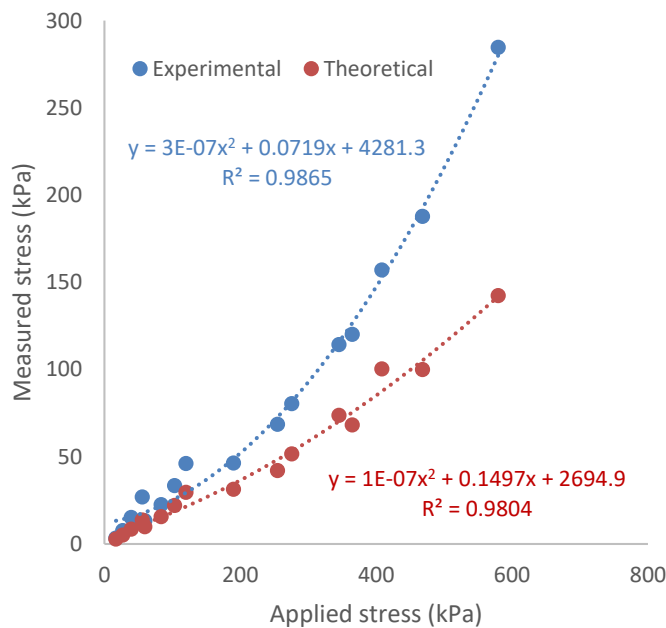


Figure 7. Curve fitting comparison of experimental measurement stress and theoretical stress with reduction of sinkage depth

شکل ۷. مقایسه برازش منحنی تنش اندازه‌گیری آزمایشگاهی و تئوری در حالت کاهش عمق نشست

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مبدل استوانه‌ای برای اندازه‌گیری تنش عمودی خاک ساخته و ارزیابی شد. در آزمون‌های آزمایشگاهی، با اعمال بار سطحی دایره‌ای در چهار سطح و سه تکرار تنش در عمق ۱۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری و با تنش محاسبه شده با رابطه بوسینسک مقایسه شد. به نظر می‌رسد که تغییر در چگالی خاک اثری چندانی در اختلاف تنش محاسبه شده با نظریه بوسینسک و تنش اندازه‌گیری شده ندارد. اما افزایش رطوبت سبب کاهش اختلاف بین تنش اندازه‌گیری شده و تنش نظری شده است. همچنین این تحقیق نشان داد که فاکتور تمرکز تنش با افزایش رطوبت کاهش یافته است.

۵- مراجع

- Arvidsson, J., & Andersson, S. (1997). Determination of soil displacement by measuring the pressure of a column of liquid. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*, (2A).
- Arvidsson, J., & Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 284-291.
- Arvidsson, J., Westlin, H., Keller, T., & Gilbertsson, M. (2011). Rubber track systems for conventional tractors—Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research*, 117, 103-109.
- Bolling, I. (1987). Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen-Neue Mess-und Rechenmethoden. (In German.) PhD Thesis. Technische Universität München. München
- Boussinesq, J. (1885). Applications of potentials for the study of equilibrium and movement of elastic solids. Paris: Gautier-Villars.
- Defossez P. and Richard G. (2002). Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil and Tillage Research* 67(1): 41-64
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fröhlich, OK. (1934). Druckverteilung imBaugrunde (pressure distribution in soil foundation). Springer. Wien p 178
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, 82(2), 121-145.



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



Buali Sims University

- Horn, R. (1990). Structure effect on strength and stress distribution in arable soils. *Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA)*.
- Keller, T., Arvidsson, J., Schjønning, P., Lamandé, M., Stettler, M., & Weisskopf, P. (2012). In situ subsoil stress-strain behavior in relation to soil precompression stress. *Soil Science*, 177(8), 490-497.
- Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P., & Selvadurai, A. P. (2014). Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, 140, 106-117.
- Keller, T., Ruiz, S., Stettler, M., & Berli, M. (2016). Determining soil stress beneath a tire: Measurements and simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 80(3), 541-553.
- Kirby, J. M. (1999). Soil stress measurement: Part I. Transducer in a uniform stress field. *Journal of agricultural engineering research*, 72(2), 151-160.
- Koolen, A. J., & Kuipers, H. (1983). Agricultural soil mechanics. *Advances Series in Agricultural Sciences* 13.
- Lamandé, M., & Schjønning, P. (2011a). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 57-70.
- Lamandé, M., & Schjønning, P. (2011b). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 71-77.
- Lamandé, M., & Schjønning, P. (2011c). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part III: Effect of soil water content. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 78-85.
- Lamandé, M., Keller, T., Berisso, F., Stettler, M., & Schjønning, P. (2015). Accuracy of soil stress measurements as affected by transducer dimensions and shape. *Soil and Tillage Research*, 145, 72-77.
- Naderi-Boldaji, M., Kazemzadeh, A., Hemmat, A., & Rustami, S. (2016). Development, experimental and field testing of a Bolling prob for measuring soil stress. *Iranian Journal of Biosystems Engineering* 47 (2): 291-300-(In Persian)
- Raper, R. L., & Arriaga, F. J. (2007). Comparing peak and residual soil pressures measured by pressure bulbs and stress-state transducers. *Transactions of the ASABE*, 50(2), 339-344.
- Sohne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*, 39, 290.
- Trautner, A. (2003). On soil behaviour during field traffic. *Swedish University of Agricultural Sciences* (Doctoral dissertation).

انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران