

توسعه آزمون آزمایشگاهی و مزرعه‌ای یک حسگر بولینگ برای اندازه‌گیری تنش در خاک

مجتبی نادری بلداجی^{۱*}، علی کاظم زاده^۲، عباس همت^۳، سجاد رستمی^۴

۱. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

۳. استاد گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

چکیده

در این مطالعه یک نمونه حسگر بولینگ استوانه‌ای برای اندازه‌گیری تنش در خاک تحت عبور تاپر ساخته و آزمون شد. این حسگر متشکل از یک هد لاستیکی برای حس کردن تنش در خاک، لوله PVC برای انتقال فشار، حسگر دیجیتالی فشار و یک سرنگ جهت اعمال فشار داخلی اولیه می‌باشد. با آزمون آزمایشگاهی حسگر در مخزن تحت فشار هوا در چهار سطح ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ kPa رابطه بین فشار هوای درون مخزن و فشار حسگر بولینگ مورد بررسی قرار گرفت که روابطی کاملاً خطی نشان داد. همچنین در چهار سطح فشار داخلی اولیه، اختلاف فشار حسگر بولینگ و فشار داخلی اولیه با فشار هوای داخل مخزن تناظر یک به یک با حدی (کمتر از ۵٪) از انحراف را نشان داد. آزمون مزرعه‌ای سه حسگر بولینگ نصب شده در عمق‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm تحت عبور تاپر تراکتور و کمباین تغییرات تنش با عمق را به خوبی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: عبور تاپر، تنش، فشردگی خاک، حسگر بولینگ.

مقدمه

تراکم خاک به عنوان مشکلی پیچیده و چند بعدی شامل تاثیر متقابل خاک- ماشین- گیاه- اقلیم شناخته می‌شود که دارای آثار قابل توجه اقتصادی و زیست محیطی بوده و معضلی در برابر کشاورزی پایدار می‌باشد (Hamza & Anderson, 2005). خاک‌ها تحت اثر وزنشان، بارهای خارجی (حاصل از تردد ماشین‌ها) و یا داخلی (حاصل از نیروهای مکش آب خاک) دچار کاهش حجم می‌شوند. اگر این کاهش حجم به دلیل کاهش حفره‌های هوا در خاک باشد فرایند تراکم (فشردگی) اتفاق می‌افتد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که تراکم خاک منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصولات، افزایش فرسایش ادوات و توان مورد نیاز خاک‌ورزی، افزایش آبدوی سطحی و استفاده غیر کارآمد آب و مواد غذایی در اثر زهکشی ضعیف خاک و محدودیت توسعه ریشه می‌شود. در سامانه‌های مدرن کشاورزی، خطر فشردگی خاک با افزایش عملیات‌های کشاورزی و تلاش برای بهره‌وری بیشتر که منجر به استفاده از تجهیزات و ماشین‌های سنگین‌تر شده رو به افزایش است (Keller et al., 2013).

از آنجا که فشردگی خاک به خصوص در لایه‌های عمیق به راحتی قابل رفع نیست و نیاز به صرف انرژی زیاد دارد، بهترین راه مقابله با مشکل فشردگی خاک پیشگیری از آن است (van den Akker, 2004). خطر فشردگی خاک‌های کشاورزی اساساً به میزان تنش اعمال شده بر خاک طی تردد ماشین‌ها بستگی دارد (Arvidsson et al., 2011). دانستن سطح تنش اعمال شده در سطح تماس تاپر- خاک و نحوه توزیع و انتشار آن در خاک زیر تاپر حامل بار مهم‌ترین بخش هر مطالعه‌ای در خصوص مدیریت تردد ماشین‌ها در مزرعه به منظور کنترل فشردگی خاک می‌باشد (Keller et al., 2007). با دانستن میزان تنش در هر نقطه از خاک و ارزیابی وضعیت استحکام خاک (ظرفیت باربری خاک) در آن نقطه، جهت جلوگیری از افزایش فشردگی باید سطح تنش اعمالی به واسطه عبور ماشین را در حدی پایین‌تر از حد استحکام (تسلیم) خاک کنترل نمود (Keller et al., 2012). در این راستا کاهش تنش در سطح تماس تاپر- خاک و یا افزایش استحکام خاک می‌تواند در کاهش خطر افزایش فشردگی به واسطه عبور ماشین موثر باشند. استحکام خاک تحت تاثیر ساختمان، اثر متقابل خاک- ریشه و پتانسیل ماتریک در خاک بوده و به سادگی قابل کنترل نیست، لذا کاهش تنش در سطح تماس تاپر- خاک و یا توزیع

* نویسنده مسئول: m.nadery_boldaji@yahoo.com

برای مثال، کربای (Kirby, 1999) گزارش کرد که در خاک‌های مستحکم (با مقاومت برشی یا تنش پیش‌تراکم بالا) مبدل‌های اندازه‌گیری تنش باعث بیش تخمینی و در خاک‌های با استحکام پایین (خاک با رطوبت زیادتر) نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهند. در استفاده از حسگرهای بولینگ، گزارش‌ها مبنی بر قابلیت اطمینان بیشتر این نوع حسگرها برای اندازه‌گیری تنش نرمال میانگین بوده چرا که به هم خوردگی خاک در حین نصب این نوع حسگر در شرایط مزرع‌ای کمتر می‌باشد (Gysi et al., 2003; Berli et al., 2000). مهم‌ترین عامل در ایجاد خطا با استفاده از این نوع حسگر تخمین نسبت پواسون خاک می‌باشد به نحوی که با استفاده از یک سیال تراکم‌ناپذیر (مانند آب) و با فرض نسبت پواسون $0/3$ برای خاک تفاوتی تا 40% بین فشار ایجاد شده در حسگر بولینگ و تنش نرمال میانگین اعمال شده از سمت خاک گزارش شده است (Berli et al., 2006). با استفاده از حسگرهای بولینگ حصول اطمینان از تماس بین حسگر و خاک اطراف با تغییر فشار داخلی اولیه^۳ حسگر به خوبی امکان پذیر بوده که این یک مزیت بسیار مهم نسبت به حسگرهای کرنش‌سنجی می‌باشد. ذکر این نکته نیز ضروری است که در هر نقطه از خاک تحت بارگذاری تایلر، اساساً علاوه بر تنش عمودی (در جهت عمود بر سطح بارگذاری) تنش‌های جانبی نیز اتفاق افتاده، لذا تغییر شکل‌های حاصله در خاک تحت تاثیر همزمان تنش عمودی و جانبی می‌باشند. از این منظر، حسگرهای بولینگ که میانگین تنش نرمال را اندازه‌گیری می‌کنند معیار بهتری از وضعیت تنش در خاک در مقایسه با لودسل‌های اندازه‌گیری تنش عمودی به دست می‌دهند (Keller, 2004). علاوه بر اندازه‌گیری حداکثر تنش در حین عبور، حسگرهای بولینگ به خوبی تنش‌های باقیمانده^۴ در خاک که بیانگر رفتار برگشت‌پذیری خاک پس از باربرداری می‌باشد را نشان می‌دهند (Raper & Arriaga, 2005).

لذا در این مطالعه، توسعه و آزمون یک حسگر بولینگ استوانه‌ای جهت استفاده در مطالعات انتشار تنش در خاک مد نظر قرار گرفت. اهداف این مطالعه به طور مشخص عبارتند از ۱- توسعه یک حسگر بولینگ استوانه‌ای، ۲- آزمون آزمایشگاهی در مخزن تحت فشار هوا در سطوح مختلف فشار داخلی اولیه حسگر و ۳- آزمون مزرع‌ای حسگر تحت عبور تایلر تراکتور و کمباین جهت اطمینان از صحت عملکرد حسگر.

هر چه یکنواخت‌تر آن (در سطح تماس تایلر- خاک) از راهکارهای بسیار مهم در کاهش خطر فشردگی خاک می‌باشد (Keller & Arvidsson, 2016).

به منظور درک روابط بین علت (تنش در خاک ناشی از بارگذاری مکانیکی) و اثر (تغییر در ساختار خاک) و همچنین توسعه مدل‌هایی که بتوانند در پیش‌بینی و کنترل فشردگی خاک کمک کنند، دانش انتقال و انتشار تنش در خاک مورد نیاز است (Keller et al., 2014). توسعه مدل‌های تحلیلی انتشار تنش در خاک که بر پایه نظریه بوسینسک (Boussinesq, 1885) در خصوص انتشار تنش در یک جسم الاستیک بنا نهاده شده‌اند، نیاز به آزمون و اندازه‌گیری تنش و اعتبارسنجی در شرایط متغیر خاک جهت به کارگیری عملی در مدیریت تردد ماشین‌ها در مزرعه دارند. در این راستا، اندازه‌گیری تنش در خاک تحت عبور تایلر از جمله چالش‌های فنی مطالعه انتشار تنش در خاک می‌باشد؛ چرا که صحت اندازه‌گیری‌های تنش در خاک تا حد زیادی تحت تاثیر نوع حسگر، ابعاد حسگر و مقدار به هم خوردگی خاک در حین نصب آن می‌باشد (Lamande et al., 2014). برای یک اندازه‌گیری دقیق تنش در خاک، تماس مطمئن بین حسگر و خاک، همچنین استحکام خاک اطراف حسگر از موارد بسیار مهم می‌باشند. کربای (Kirby, 1999) با استفاده از یک مدل اجزاء محدود نشان داد که حتی یک ناحیه نازک خاک به هم خورده اطراف حسگر موجب خطا در اندازه‌گیری تنش می‌شود؛ به نحوی که اگر استحکام ناحیه به هم خورده ضعیف‌تر از خاک اطراف باشد باعث کم تخمینی و اگر قوی‌تر باشد باعث بیش تخمینی تنش خواهد شد.

برای اندازه‌گیری تنش در خاک از حسگرهای متفاوتی تا کنون استفاده شده است. این حسگرها در دو دسته کلی حسگرهای لودسلی (بر پایه کرنش‌سنج‌ها) و بولینگ (بر پایه فشار سیال) (Bolling, 1987) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مبدل‌های کرنش‌سنجی عمدتاً برای اندازه‌گیری تنش نرمال (فقط در جهت عمودی) (Keller & Arvidsson, 2004; Lamande et al., 2007) و بعضاً تنش در شش جهت با استفاده از مبدل‌های SST^۲ (Horn et al., 2001; Pytko & Dabrowski, 2005; Pytko, 2003) به کار گرفته شده‌اند. عوامل زیادی از جمله نسبت ارتفاع به قطر المان فلزی مبدل، زوایای تیز مبدل، نسبت سفتی خاک به سفتی المان مبدل و رفتار تنش- کرنش خاک در ایجاد خطا در اندازه‌گیری تنش با استفاده از مبدل‌های کرنش‌سنجی موثر می‌باشند (Weiler & Kulhawy, 1982).

2. Initial inclusion pressure
3. Residual stress

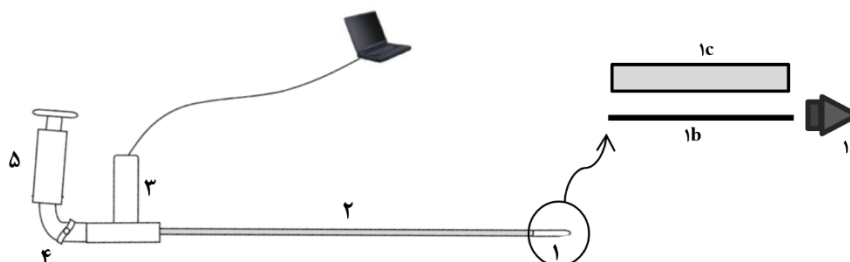
1. Stress state transducer

افزایش قوام هد جهت جلوگیری از خم شدن قسمت لاستیکی (۱c) در حین نصب استفاده شد. این مفتول از یک طرف در سوراخ ایجاد شده در مخروط آلومینیومی و از طرف دیگر در دهانه لوله PVC با یک بست مخصوص نصب شد. جهت آب-بندی هد لاستیکی حسگر، در دو سر از بست‌های فلزی و چسب مایع قوی استفاده شد. پس از نصب حسگر در داخل خاک، با استفاده از سرنگ و شیر تنظیم فشار، میزان فشار داخلی اولیه جهت اطمینان از برقراری تماس بین هد حسگر و خاک اطراف تنظیم می‌شود. با فشردن پیستون سرنگ به سمت پایین و با ورود حجم زیادتری از آب به داخل حسگر، قطر هد لاستیکی حسگر و فشار داخل حسگر افزایش می‌یابد. در حین اندازه‌گیری تنش در خاک، شیر کنترل فشار کاملاً بسته می‌باشد. با اعمال تنش از طرف خاک به اطراف هد حسگر، فشار مایع از طریق لوله PVC به حسگر دیجیتال فشار مایع انتقال یافته و تغییرات دینامیکی این فشار با استفاده از یک دیتالاگر و کامپیوتر قابل ثبت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ساختار حسگر بولینگ

شکل ۱ قسمت‌های تشکیل دهنده حسگر بولینگ را نشان می‌دهد. این حسگر شامل ۱- هد حسگر از جنس لاستیک سیلیکونی به طول ۱۷۰ و قطر خارجی ۲۰ mm در زمان فشار داخلی صفر، ۲- لوله PVC با قطر خارجی ۲۵ و طول mm ۱۵۰۰ جهت انتقال فشار از هد به حسگر دیجیتال فشار، ۳- حسگر دیجیتال فشار مایع (در این مطالعه از حسگر ECT 8472, Trafag Co. ساخت سوییس با ظرفیت ۶۰۰ kPa استفاده شد)، ۴- شیر کنترل حجم آب و فشار اولیه حسگر و ۵- سرنگ پرکن (با ظرفیت ۶۰ cc) می‌باشد. در این حسگر از آب به عنوان مایع انتقال فشار استفاده می‌شود که میزان تراکم‌پذیری آن ناچیز می‌باشد. شکل ۱ همچنین قسمت هد حسگر را به شکل گسترده با بزرگنمایی نشان می‌دهد. از یک مخروط آلومینیومی (۱a) در سر حسگر جهت نفوذ راحت‌تر در حین نصب استفاده شد. همچنین از یک مفتول آهنی (۱b) به قطر ۴ mm به منظور



شکل ۱- حسگر بولینگ و اجزاء تشکیل دهنده: ۱- هد حسگر، ۲- لوله PVC، ۳- حسگر دیجیتال فشار، ۴- شیر کنترل حجم آب و ۵- سرنگ پرکن. قسمت بزرگنمایی شده اجزاء هد حسگر را نشان می‌دهد: ۱a مخروط آلومینیومی، ۱b مفتول آهنی و ۱c شلنگ لاستیکی.

الاستیسیته (Timoshenko & Goodier, 1970) خواهیم داشت (Berli et al., 2006):

$$P_{\text{Boll}} \approx -\frac{1-\nu}{1+\kappa G} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که ν ضریب پواسون و G مدول برشی خاک و κ تراکم-پذیری مایع تحت فشار می‌باشد. با جایگزینی G با استفاده از رابطه ۲ می‌توان نوشت:

$$K = G \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$P_{\text{Boll}} \approx -\frac{2(1-\nu^2)}{3\kappa K(1-2\nu)+2(1+\nu)} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

از آنجا که حاصل ضرب تراکم‌پذیری آب و مدول حجمی خاک (K) مقدار کوچکی است ($\kappa K \approx 10^{-3}$)، عبارت $3\kappa K(1-2\nu)$ نزدیک به صفر بوده و می‌توان نوشت (Berli et al., 2006):

$$P_{\text{Boll}} \approx -2(1-\nu) \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22})}{2} = -2(1-\nu)\sigma_m \quad (\text{رابطه ۴})$$

اصول نظری اندازه‌گیری تنش در خاک با استفاده از حسگر بولینگ

شکل ۲ یک ماتریس دو بعدی خاک با ابعاد محدود تحت تاثیر تنش‌های اصلی σ_{11} و σ_{22} را در جهت محورهای کارتزین x_1 و x_2 نشان می‌دهد که در مرکز آن مقطع حسگر بولینگ پر شده از آب در جهت محور x_3 نشان داده شده است (Berli et al., 2006). فرض بر آن است که در ماتریس همگن خاک، فشار حسگر بولینگ (P_{Boll}) معادل (عکس‌العمل) تنشی است که در پوسته بیرونی غشاء لاستیکی حسگر به طور یکنواخت اعمال می‌شود (σ_0). از اثر ثقل در این مسئله صرف نظر می‌شود. مسئله حاضر را می‌توان با برهم نهی (تعادل) اثر تنش‌های تک محوری σ_{11} و σ_{22} و فشار حسگر بولینگ حل نمود. با فرض الاستیک بودن غشاء لاستیکی حسگر بولینگ و رفتار الاستیک خطی برای ماتریس خاک و با استفاده از نظریه

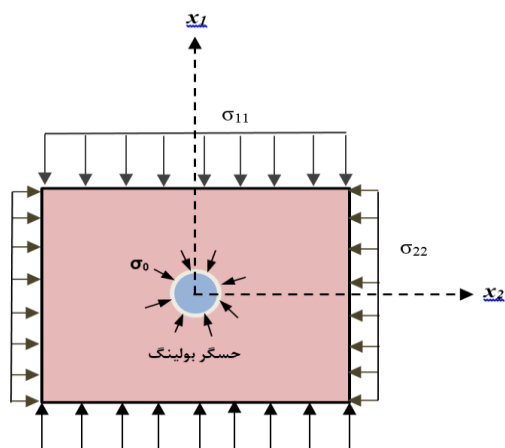
فرض الاستیک جواب‌های نسبتاً دقیقی از برآورد تنش با استفاده از رابطه ۴ ارائه می‌دهد (Berli *et al.*, 2006). با این حال مطالعات گسترده در این خصوص نشان می‌دهند که بخش الاستیک تغییر شکل خاک معمولاً غیر خطی (Ghezzehei & Or, 2001; Yong, 2003) و در تغییر شکل‌های بزرگ نیز رفتار خاک به شکل الاستیک - ویسکوپلاستیک می‌باشد (Vyalov, 1986). برلی و همکاران (Berli *et al.*, 2006) با شبیه‌سازی اجزاء محدود مسئله نشان داده شده در شکل ۲ و با فرض رفتار خاک به صورت الاستیک خطی - پلاستیک ایده‌آل نشان دادند که نسبت فشار بولینگ به تنش نرمال میانگین با افزایش تنش تسلیم خاک افزایش می‌یابد به نحوی که با فرض تنش تسلیم خاک برابر صفر این نسبت ۱ و با فرض تنش تسلیم ۵۰ kPa این نسبت تقریباً ۱/۴ به دست آمد.

آزمون آزمایشگاهی

پس از ساخت یک نمونه حسگر بولینگ، آزمون‌های آزمایشگاهی در محفظه تحت فشار هوا مطابق شکل ۳ انجام شد. بدین منظور یک سیلندر فلزی به طول تقریبی ۵۰۰ و قطر دهانه mm ۱۵۰ به صورت کاملاً بدون درز از طرفین بسته و لوله‌هایی جهت نصب حسگر دیجیتال فشار هوا، شیر ورود هوا با سوپاپ افزایشنده فشار، شیر خروج هوا و دهانه ورودی حسگر بولینگ بر روی مخزن تعبیه شدند. مطابق شکل ۳ پس از قرار دادن هد حسگر بولینگ درون محفظه و گازبندی دهانه ورودی با بست‌های فلزی و چسب، آزمون‌هایی در چهار سطح فشار اولیه بولینگ ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ kPa با افزایش فشار هوای مخزن تا ۲۵۰ kPa انجام شد. دو حسگر دیجیتال نصب شده بر روی بولینگ و مخزن هوا به دیتالاگر (آترون مدل AL4-8، ساخت ایران) متصل شده و داده‌های آن توسط نرم افزار مربوطه و یک کامپیوتر کیفی ثبت و ذخیره شدند.

آزمون مزرعه‌ای

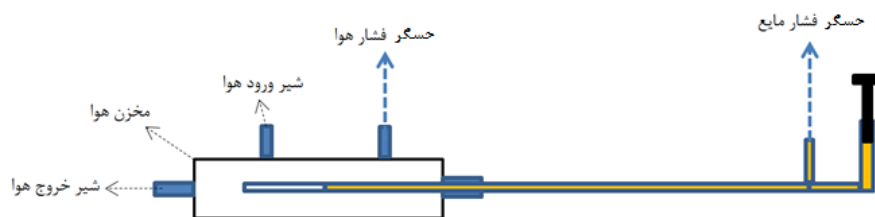
برای آزمون‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری تنش، سه حسگر بولینگ مشابه توسعه داده شدند. با استفاده از این سه حسگر امکان اندازه‌گیری تنش در سه عمق در زیر تایر و مطالعه رفتار انتشار تنش در خاک میسر خواهد شد. حسگرهای بولینگ باید به نحوی در خاک نصب شوند که حداقل به هم خوردگی خاک در حین نصب را داشته و مطابق شکل ۴ پس از نصب، مرکز هد لاستیکی حسگر در زیر مرکز تایر مورد آزمون قرار گیرد. با این نحوه نصب، هد حسگر میانگینی از تنش در اطراف خط مرکزی تایر و در یک لایه از خاک را اندازه‌گیری می‌کند که میانگین بهتری از وضعیت تنش در آن نقطه می‌باشد.



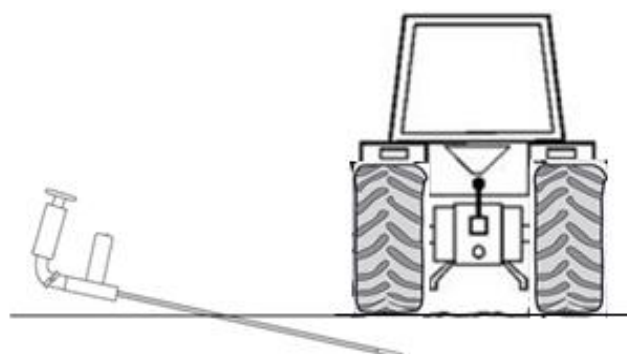
شکل ۲- ماتریس خاک تحت تاثیر تنش‌های اصلی σ_{11} و σ_{22} و مقطع حسگر بولینگ در مرکز

رابطه ۴ ارتباط بین فشار داخلی حسگر بولینگ و تنش‌های اعمال شده توسط ماتریس الاستیک (در اینجا خاک) را بیان می‌کند که مطابق با این رابطه، فشار حسگر از میانگین تنش نرمال (σ_m) اعمال شده بر ماتریس خاک اطراف غشاء لاستیکی بیشتر می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد که با فرض ضریب پواسون ۰/۳ برای خاک، فشار ایجاد شده در حسگر بولینگ با مایع کاری آب ۱/۴ برابر تنش نرمال میانگین اعمال شده از طرف خاک به غشاء بیرونی هد حسگر می‌باشد. رابطه ۳ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش نسبت پواسون خاک، این تفاوت کاهش می‌یابد طوری که در ضریب پواسون مفروض ۰/۵ تنش نرمال میانگین و فشار بولینگ دقیقاً برابر می‌شوند (Berli *et al.*, 2006). میزان تفاوت بین فشار داخلی حسگر و میانگین تنش نرمال ماتریس تحت تاثیر حاصل ضرب تراکم‌پذیری آب و مدول حجمی ماده ماتریس (KK در رابطه ۳) نیز می‌باشد. برای بولینگ پر شده با آب برای اندازه‌گیری تنش در خاک، نسبت فشار بولینگ به تنش نرمال میانگین وابستگی بسیار کمی به ضریب KK داشته و فقط تابعی از ضریب پواسون خاک می‌باشد (رابطه ۴). این یک مزیت قابل توجه برای حسگر بولینگ (در مقایسه با حسگرهای کرنش‌سنجی) می‌باشد که میزان سفتی خاک اطراف آنها تاثیر معنی‌داری بر اندازه‌گیری تنش ندارد. دامنه تغییرات نسبت پواسون در خاک‌های غیر اشباع و زهکشی شده کشاورزی بین ۰/۵-۰/۲۵ می‌باشد (Wood, 1990) لذا استفاده از نسبت پواسون ۰/۳ به طور میانگین برآورد قابل قبولی از تنش نرمال میانگین با استفاده از حسگر بولینگ به دست می‌دهد.

توجه به این نکته نیز ضروری است که رفتار خاک عموماً الاستیک خطی نمی‌باشد. در تغییر شکل‌های کوچک خاک،



شکل ۳- نحوه آزمون حسگر بولینگ در مخزن تحت فشار هوا



شکل ۴- نحوه قرار گیری حسگر بولینگ در خاک برای آزمون عبور تایر

قبل از نصب هر حسگر در ابتدا سوراخی به قطر ۳۰ mm (کمی ضخیم‌تر از قطر لوله حسگر) در راستای نصب هر حسگر با استفاده از یک میله (شکل ۵) در خاک زده شد. طول این سوراخ به نحوی محاسبه شد که مرکز هد لاستیکی حسگر بولینگ در زیر خط مرکزی تایر مورد آزمون قرار گیرد. پس از حفر سوراخ‌ها، حسگرهای بولینگ در عمق‌های مدنظر نصب گردیدند.

نصب حسگر در خاک

به منظور نصب صحیح سه حسگر بولینگ در عمق‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm (و یا دیگر عمق‌ها بر حسب نیاز) یک شاسی فلزی مطابق شکل ۵ ساخته شد. این شاسی چارچوبی به ضلع تقریباً ۱ m بوده که در یک وجه آن قطعه لوله‌هایی با زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درجه (نسبت به راستای افق) نصب شدند. محاسبه این زوایا به نحوی است که مرکز تایر تحت آزمون از نقطه ورود لوله حسگرها به خاک حدوداً ۶۰ cm فاصله دارد.



شکل ۵- شاسی فلزی سوراخ زنی و نصب حسگرهای بولینگ

آزمون عبور تراکتور و کمباین



شکل ۶- حسگرهای بولینگ نصب شده در آزمون عبور کمباین

برای آزمون حسگرهای بولینگ در شرایط مزرعه‌ای جهت اطمینان از عملکرد مناسب حسگرها و رفع عیوب احتمالی، قطعه‌ای از مزرعه آموزشی- پژوهشی دانشگاه شهرکرد پس از برداشت جو در تابستان ۹۴ تهیه شد. بافت خاک این مزرعه لوم شنی می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ گزارش شده است. ابتدا قطعه زمین برداشت شده تا عمق ۴۰ cm شخم برگردان شده و سپس با استفاده از دیسک کلوخه‌های سطح خاک خرد شده و ناهمواری‌های سطح زمین تسطیح شد. پس از شخم، به منظور افزایش استحکام و همچنین رطوبت خاک، قطعه زمین مذکور چندین مرتبه در بازه‌های زمانی یک هفته‌ای آبیاری غرقایی و پس از هربار آبیاری به مدت چند روز اجازه خشک شدن به آن داده شد. در نهایت زمانی که رطوبت خاک در حد 0.16 kg kg^{-1} (۱۶٪) بود (جدول ۱) آزمون‌های عبور انجام شد.

جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه در زمان آزمون

مشخصات بافت (g kg^{-1})	
شن	۶۵۰
سیلت	۱۶۰
رس	۱۹۰
مواد آلی	۵/۶
بافت خاک (USDA)	لوم شنی
مشخصات فیزیکی	
* رطوبت (kg kg^{-1})	۰/۱۵۷
* چگالی ظاهری خشک (Mg m^{-3})	۱/۵۲

* مقادیر گزارش شده میانگین عمق ۰-۴۵ cm می‌باشند.

پس از نصب حسگرها در عمق‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm، فشار داخلی اولیه حسگرها در ۱۰۰ kPa تنظیم شد. با این حد از فشار تماس خوبی بین هد حسگر و خاک اطراف احساس شد. جهت آزمون‌های عبور، در عبور اول تراکتور MF285 و در عبور دوم کمباین JD955 هر دو با سرعت تقریبی 0.5 m s^{-1} از روی حسگرها عبور داده شدند و خروجی حسگرها با نرخ داده- برداری ۵۰۰ Hz با استفاده از دیتالاگر و کامپوتر کیفی در مزرعه ثبت شد. شکل ۶ حسگرهای نصب شده در خاک در حین عبور کمباین را نشان می‌دهد. مشخصات تایرها و وزن اکسل تراکتور و کمباین آزمون شده در جدول ۲ داده شده است. جهت تعیین ابعاد سطح تماس تایرها با خاک، با استفاده از پودر گچ سفید نواحی مرزی تایر در تماس با زمین مشخص و سپس قطرهای بزرگ و کوچک بیضی سطح تماس اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

جدول ۲- مشخصات تایر، سطح تماس و وزن محورهای تراکتور و کمباین آزمون شده

مشخصات	
تراکتور	کمباین
MF285	JD955
تایر عقب*	۱۸/۴-۳۰
تایر جلو*	۷/۵-۲۰
فشار باد تایر عقب (kPa)	۱۲۵
فشار باد تایر جلو (kPa)	۳۵۰
طول سطح تماس چرخ جلو (mm)	۲۸۰
عرض سطح تماس چرخ جلو (mm)	۴۵۰
طول سطح تماس چرخ عقب (mm)	۵۸۰
عرض سطح تماس چرخ عقب (mm)	۱۸۰
وزن محور عقب (kg)	۱۶۹۴
وزن محور جلو (kg)	۱۳۰۰
ابعاد تایرها بر حسب اینچ می‌باشند.	۵۰۰۰

آزمون استاتیکی کاهش فشار باد تایر

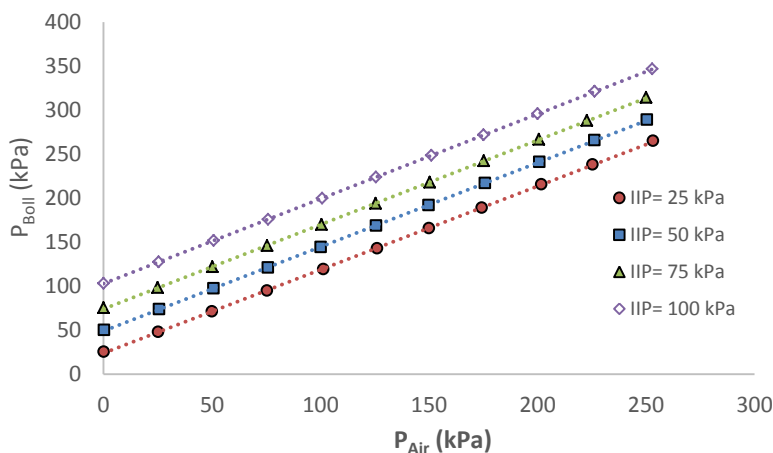
در این آزمون با قرار دادن تایر عقب تراکتور بر روی حسگرها فشار باد تایر کاهش داده شد. فشار باد تایر به تدریج از ۱۲۵ تا ۵۰ kPa در حالی که سه حسگر در حال اندازه‌گیری و ثبت تنش در عمق‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm بودند کاهش داده شد.

نتایج و بحث

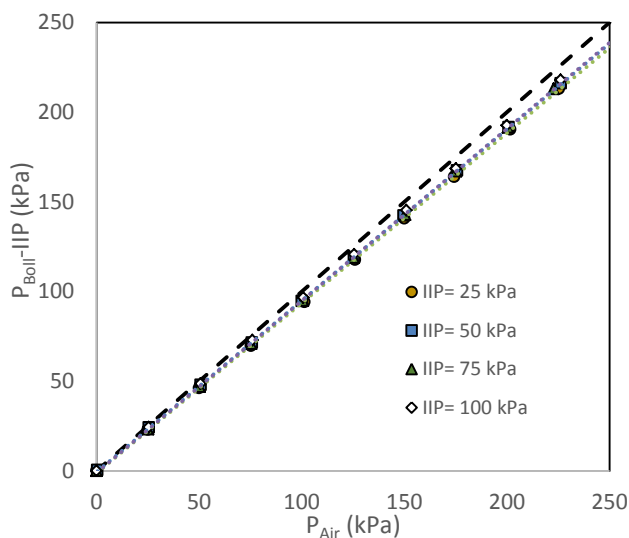
شکل ۷ ارتباط بین فشار بولینگ (P_{Boll}) و فشار هوا (P_{Air}) در آزمون مخزن هوا در چهار سطح فشار اولیه بولینگ (IIP) را نشان می‌دهد. روابط حاصله کاملاً خطی بوده و شیب این خطوط نیز با یکدیگر تفاوت ندارند. عرض از مبدا خطوط نیز بیانگر مقدار فشار اولیه بولینگ می‌باشد. شکل ۸ ارتباط بین فشار هوا و اختلاف فشار قرائت بولینگ و فشار اولیه ($P_{\text{Boll}} -$) را نسبت به خط ۱:۱ نشان می‌دهد. مشاهده شد که این ارتباط در حدی کمتر از ۵٪ از خط ۱:۱ انحراف داشته ولی

لاستیکی هد حسگر با سفتی (مدول حجمی) متفاوت از kPa 10^3-10^5 نشان دادند که تفاوت در سفتی غشاء لاستیکی تا زمانی که رفتار غشاء الاستیک باشد تاثیر معنی‌داری بر فشار داخلی حسگر ندارد.

ارتباط تحت تاثیر میزان فشار اولیه بولینگ نمی‌باشد. عدم تاثیر فشار اولیه بولینگ نشان می‌دهد که رفتار غشاء لاستیکی هد حسگر الاستیک خطی می‌باشد، لذا با افزایش فشار اولیه و افزایش قطر هد لاستیکی تاثیری بر اندازه‌گیری فشار نداشته است. برلی و همکاران (Berli et al., 2006) با شبیه‌سازی غشاء



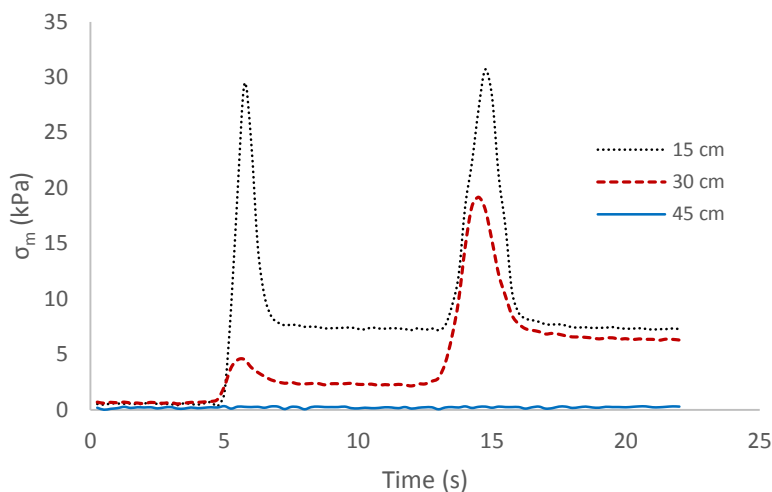
شکل ۷- ارتباط بین فشار بولینگ (P_{Boil}) و فشار هوای مخزن (P_{Air}) در فشارهای اولیه بولینگ (IIP) ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ kPa



شکل ۹- ارتباط بین اختلاف فشار قرائت شده و اولیه بولینگ ($P_{Boil} - IIP$) و فشار هوای مخزن (P_{Air}) در فشارهای اولیه (IIP) ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ kPa

احتمالاً به خاطر متراکم شدن خاک اطراف حسگر (تغییر شکل‌های ماندگار) پس از عبور چرخ جلو می‌باشد. سپس با عبور چرخ عقب تنشی بزرگتر در عمق ۳۰ cm ولی تنشی حدوداً یکسان در عمق ۱۵ cm اندازه‌گیری شده است. بعد از عبور چرخ عقب نیز حدی از تنش باقیمانده اندازه‌گیری شده است. مقدار تنش باقیمانده در حسگر بولینگ را می‌توان در ارتباط با تغییر شکل‌های ماندگار خاک دانست چرا که پس از باربرداری خاک، در صورت برگشت تغییر شکل‌ها، فشار بولینگ اساساً باید به میزان اولیه خود باز گردد.

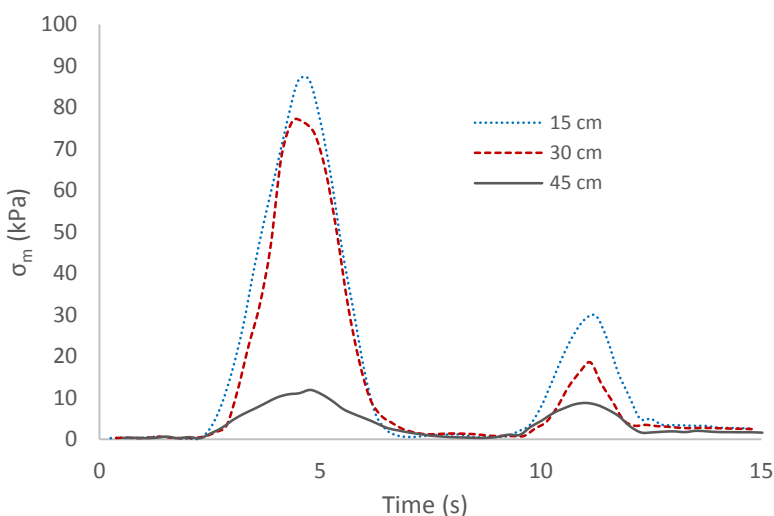
تغییرات تنش نرمال میانگین (σ_m) در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm در حین عبور تراکتور در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای فشار اولیه حسگرهای بولینگ ۱۰۰ kPa بود که از قرائت بولینگ کسر شده و تنش نرمال میانگین با استفاده از رابطه ۴ با فرض نسبت پواسون $0/3$ به دست آمد. واضح است که با عبور چرخ‌های تراکتور در عمق ۴۵ cm هیچ تنشی اعمال نشده در حالی که در دو عمق ۱۵ و ۳۰ cm تغییر تنش مشاهده می‌شود. بعد از عبور چرخ جلو سطحی از تنش باقیمانده در حسگرها مشاهده می‌شود که این



شکل ۱۰- تنش نرمال میانگین (σ_m) در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm در حین عبور چرخ‌های تراکتور MF285

کند (Keller & Lamande', 2010). همچنین مشاهده می‌شود که با عبور کمباین تنش‌های باقیمانده بسیار کوچکتری ثبت شده‌اند که توجیه این امر می‌تواند در افزایش تراکم خاک در عبور اول با تراکتور باشد. اصولاً با افزایش تراکم، برگشت‌پذیری تغییر شکل‌های خاک نیز زیاد می‌شود؛ لذا خاک اطراف هد حسگر و فشار داخلی آن تقریباً به مقدار اولیه بازگشته است. از دو شکل ۱۰ و ۱۱ همچنین مشخص می‌شود که مدت زمان بارگذاری- باربرداری در عبور چرخ جلوی تراکتور نسبت به چرخ عقب کوتاه‌تر بوده و در کمباین برای چرخ جلو (چرخ بزرگ‌تر) طولانی‌تر بوده است که به خاطر تفاوت در طول ناحیه تماس چرخ‌ها با زمین می‌باشد (جدول ۲).

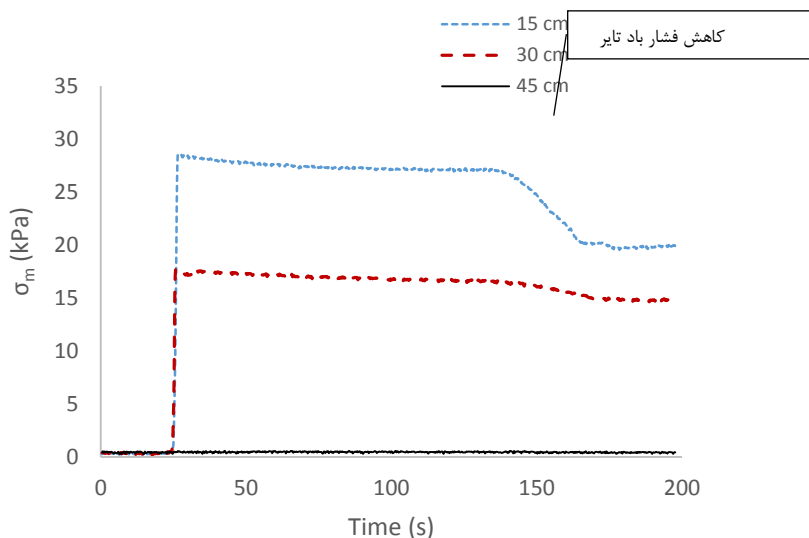
شکل ۱۱ تنش نرمال میانگین در حین عبور چرخ‌های کمباین را نشان می‌دهد. از آنجا که چرخ جلو کمباین چرخ بزرگ‌تر و سنگین‌تر می‌باشد، مشاهده می‌شود که تنش اعمال شده در عبور چرخ جلو به مراتب از تنش اعمال شده در عبور چرخ عقب بزرگ‌تر بوده و همچنین در عمق ۴۵ cm نیز این تنش انتشار یافته است. تنش اعمال شده با عبور کمباین حدوداً سه برابر تنش‌های اندازه‌گیری شده با عبور تراکتور می‌باشند که این به خاطر وزن سنگین‌تر محور جلو کمباین می‌باشد (بیش از ۳ برابر وزن محور عقب تراکتور). البته توجه به این نکته نیز ضروری است که تنش منتشر شده در خاک تحت کنترل تنش اعمال شده در سطح تماس تایر - خاک می‌باشد که این تنش با مساحت سطح تماس، وزن روی تایر و فشار باد تایر تغییر می‌-



شکل ۱۱- تنش نرمال میانگین (σ_m) در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm در حین عبور چرخ‌های کمباین JD955

سطح تماس تایر- خاک، تنش اعمال شده در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ cm با کاهش یافته در حالی که تنش در عمق ۴۵ cm بسیار ناچیز بوده است. با افزایش سطح تماس تایر - خاک تنش اعمال شده به سطح خاک کاهش یافته که منجر به کاهش تنش در عمق خاک نیز می‌گردد.

در شکل ۱۲ تغییرات تنش در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm با کاهش فشار باد تایر عقب تراکتور در حال سکون نشان داده شده است. پس از قرار گرفتن تایر بر روی حسگرها تنش ناگهان از صفر افزایش یافته و با گذشت زمانی حدود ۱۴۰ ثانیه تنش تقریباً ثابت و سپس با کاهش ناگهانی فشار باد و افزایش



شکل ۱۱- تنش نرمال میانگین (σ_m) در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm با کاهش فشار باد تایر عقب تراکتور MF285

اعمال شده با عبور چرخ عقب تراکتور زیادتر بوده که به خاطر وزن سنگین تر محور جلوی کمباین از محور عقب تراکتور می‌باشد. همچنین حسگر بولینگ کاهش تنش به واسطه کاهش فشار باد تایر ساکن را به خوبی تشخیص داد. حسگر ساخته شده در این مطالعه ابزار تحقیقاتی مفیدی در مطالعه رفتار انتشار تنش در خاک در مدیریت تردد و فشردگی می‌باشد.

سپاسگزاری

از دکتر ماتیاس استتler (Matthias Stettler) و دکتر توماس کلر (Thomas Keller) به ترتیب از دانشگاه علوم کاربردی برن سوئیس و موسسه تحقیقات کشاورزی آگروسکوپ زوریخ سوئیس برای اطلاعات علمی و فنی مفید در ساخت نمونه اولیه حسگر تشکر و قدردانی می‌گردد. از همکاری آقای مهندس هاشم رضایی (دانشجوی سابق کارشناسی دانشگاه شهرکرد) در ساخت نمونه اولیه حسگر بولینگ تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتیجه گیری کلی

در این مطالعه سه حسگر بولینگ استوانه‌ای برای اندازه‌گیری (انتشار) تنش تحت عبور تایر توسعه داده شدند. این حسگرها ظرفیت اندازه‌گیری تنش نرمال میانگین در خاک تا ۴۵۰ kPa را دارند. آزمون حسگر بولینگ در مخزن فشار هوا نشان داد که فشار اولیه حسگر بولینگ تأثیری بر شیب رابطه بین فشار هوا در مخزن و فشار ایجاد شده در حسگر بولینگ ندارد. همچنین نتایج نشان داد که غشاء لاستیکی هد حسگر رفتار الاستیک خطی داشته چرا که روابط بین اختلاف فشار بولینگ و فشار اولیه در مقابل فشار هوای مخزن بر هم منطبق بوده و تحت تأثیر میزان فشار اولیه داخلی بولینگ نمی‌باشد. آزمون مزرعه‌ای حسگر بولینگ در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ cm تحت عبور چرخ-های تراکتور و کمباین عملکردی مطلوب و قابل اطمینان از حسگرهای بولینگ نشان داد. سطح تنش اندازه‌گیری شده با عبور چرخ جلو کمباین (محور سنگین‌تر) به مراتب از تنش

REFERENCES

- Arvidsson, J., Westlin, H., Keller, T. & Gillberg, M. (2011). Rubber track systems for conventional tractors-effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research*, 117, 103-109.
- Berli, M., Kirby, J.M., Springman, S.M., Schulin, R. (2003). Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. *Soil and Tillage Research*, 73, 57-66.
- Berli, M., Eggers, C.G., Accorsi, M.L. & Or, D.

- (2006). Theoretical analysis of fluid inclusion for in situ soil stress and deformation measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1441–1452.
- Bolling, I. (1987). Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen-Neue Mess-und Rechenmethoden. (In German.) PhD Thesis. Technische Universität München, München.
- Boussinesq J. (1885). Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques. Gauthier-Villars. Paris. pp. 30.
- Ghezzehei, T.A. & Or, D. (2001). Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 624–637.
- Gysi, M., Klubertanz, G., Vulliet, L. (2000). Compaction of an Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland – field data and modelling. *Soil and Tillage Research*, 56, 117–129.
- 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, 121-145.
- Horn, R., Way, T. & Rostek, J. (2003). Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research*, 73, 101–106.
- Keller, T. (2004). *Soil compaction and soil tillage – Studies in agricultural soil mechanics*. PhD dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Keller, T. & Arvidsson, J. (2004). Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research*, 79, 171–205.
- Keller, T. & Lamandé, M. (2010). Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil and Tillage Research*, 111, 54-64.
- Keller, T. & Arvidsson, J. (2016). A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles. *Soil and Tillage Research*, 155, 116-123.
- Keller, T., Défossez, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J. & Richard, G. (2007). *SoilFlex*: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*, 93, 391-411.
- 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., Lamandé, M., Peth, S., Berli, M., Delenne, J.-Y., Baumgarten, W., Radjaï, F., Rajchenbach, J., Selvadurai, A.P.S. & Or, D. (2013). An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. *Soil and Tillage Research*, 128, 61-80.
- Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P. & Selvadurai, A.P.S. (2014). Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, 140C, 106-117.
- Kirby, J.M. (1999). Soil stress measurements: part I: transducer in a uniform stress field. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72, 151–160.
- Lamandé, M., Schjønning, P. & Tøgersen, F.A. (2007). Mechanical behaviour of an undisturbed soil subjected to loadings: effects of load and contact area. *Soil and Tillage Research*, 97, 91–106.
- Lamandé, M., Keller, T., Berisso, F., Stettler, M. & Schjønning, P. (2014). Accuracy of soil stress measurements as affected by transducer dimensions and shape. *Soil and Tillage Research*, 145, 72-77.
- Pytko J. (2005). Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil and Tillage Research*, 82, 77-88.
- Pytko, J. & Dabrowski, J. (2001). Determination of the stress–strain relationship for sandy soil in field experiments. *Journal of Terramechanics*, 38, 185-200.
- Raper, R.L. & Arriaga, F.G. (2005). Effect of vehicle load, transducer depth, and transducer type on soil pressures. ASAE Paper No. 051159. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Timoshenko, S.P. & Goodier, J.N. (1970). Theory of elasticity. 3rd ed. McGraw-Hill, Tokyo.
- van den Akker, J.J.H., 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil and Tillage Research*, 79, 113-127.
- Vyalov, S.S. (1986). Rheological fundamentals of soil mechanics. Elsevier, Amsterdam.
- Weiler, W.A. & Kulhawy, F.H. (1982). Factors affecting stress cell measurements in soil. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 108, 1529–1584.
- Wood, D.M. (1990). Soil behavior and critical state soil mechanics. 1st ed. Cambridge University Press.
- Yong, R.N. (2003). Influence of microstructural features on water, ion diffusion and transport in clay soils. *Applied Clay Science*, 23, 3-13.