

## مقاله پژوهشی

# بررسی نیروهای سه محوره وارد بر زیرشکن کجساق تک شاخه و دو شاخه در سرعت‌های پیشروی متفاوت

محمد عسکری<sup>۱\*</sup>، غلامحسین شاهقلی<sup>۲</sup> و یوسف عباسپور گیلانده<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران  
۲ و ۳- اساتید گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۷

## چکیده

در این تحقیق، نیروهای مقاوم افقی، عمودی و جانبی وارد بر زیرشکن کجساق در حالت‌های تک شاخه و دو شاخه در چهار سرعت پیشروی ۱/۸، ۲/۳، ۲/۹ و ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق ثابت ۴۰ سانتی‌متر بررسی شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. نیروهای افقی، عمودی و جانبی در هر آزمایش اندازه‌گیری و ثبت شدند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت، نیروهای مقاوم افقی، عمودی و جانبی به ترتیب در حالت تک شاخه به میزان ۱۴، ۳/۵ و ۱ درصد و در حالت دو شاخه به میزان ۱۳، ۱/۲ و ۱۱/۵ درصد افزایش می‌یابند. همچنین، با مقایسه این نیروها مشخص شد که نیروی مقاوم افقی حالت دو شاخه بیش از دو برابر حالت تک شاخه، نیروی مقاوم عمودی بیشتر از حالت تک شاخه اما نه دو برابر آن و نیروی مقاوم جانبی حالت دو شاخه بسیار کمتر از نیروی مقاوم جانبی حالت تک شاخه است. در حالت کلی، توصیه می‌شود که با استفاده از دو شاخه توأم کجساق به جای انواع تک شاخه آن، میزان نفوذ شاخه‌ها را در خاک افزایش، نیروی جانبی را کاهش و تعادل جانبی مجموعه تراکتور- زیرشکن را بهبود بخشید.

## واژه‌های کلیدی: تیغه باریک خاک‌ورز، دینامومتر، نیروی جانبی، نیروی مقاوم افقی

## مقدمه

ادوات کشاورزی با دینامومتر اندازه‌گیری می‌شوند. با در نظر گرفتن مزایا و معایب تمامی انواع دینامومترها، نوع قابی اتصال سه‌نقطه مناسب‌تر از دیگر انواع است (Askari et al., 2011). نیروهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی، تابعی از خصوصیات خاک، شکل هندسی ابزار، عمق خاک‌ورزی، سرعت خاک‌ورزی و عرض ادوات هستند (Glancey et al., 1996). در همین راستا می‌توان به رابطه پیش‌بینی نیروی کششی ادوات اشاره کرد که هرینگان و روتز (Harrigan & Rotz, 1995) در استاندارد ASABE

پیش‌بینی و اندازه‌گیری نیروی کششی مورد نیاز ادوات خاک‌ورز، عامل مهمی در انتخاب تراکتور و ادوات مناسب برای شرایط مزرعه‌ای خاص است (Alimardani et al., 2008). بنابراین، اندازه‌گیری این نیرو و تحقیق در مورد فرمول‌های پیش‌بینی آن، سهم ویژه‌ای از تحقیقات مهندسان ماشین‌های کشاورزی را به خود اختصاص داده است (Askari et al., 2011; Moenifar et al., 2013; Ramadhan, 2014; Ranjbarian et al., 2017). نیروهای وارد بر

2011 D497.7 ارائه داده‌اند:

$$D = F_i (A + B(S) + C(S^2)) WT \quad (1)$$

که در آن،

$D$  = نیروی کششی مورد نیاز ادوات (نیوتن)؛  
 $F_i$  = پارامتری بدون واحد مربوط به بافت خاک با مقادیر مختلف برای خاک‌های درشت، متوسط و ریز بافت؛  $A$  و  $B$  و  $C$  = پارامترهای مخصوص ابزار خاک‌ورز؛  $S$  = سرعت حرکت در مزرعه (کیلومتر بر ساعت)؛  $W$  = عرض ابزار خاک‌ورز (متر) یا تعداد شاخه‌های ابزار خاک‌ورز (ابزار چیزل مانند)؛ و  $T$  = عمق کار ابزار خاک‌ورز (سانتی‌متر).

بیشترین اختلاف مورد قبول نسبت به داده حاصل از این استاندارد،  $\pm 50\%$  درصد است که سعی دارد تمامی بافت‌های خاک را پوشش دهد (McLaughlin *et al.*, 2008). در این معادله، عامل سرعت پیشروی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر نیروی کششی مورد نیاز ادوات معرفی شده است. چنین معادله‌ای برای نیروی مقاوم عمودی و جانبی موجود نیست و معیاری رسمی برای ارزیابی نتایج حاصل از تحقیقات پیشین وجود ندارد. از طرفی، تحقیقاتی اندک درباره نیروهای مقاوم عمودی و جانبی ادوات خاک‌ورز وجود دارد (Spoor & Godwin, 1978; Kasisira & du Plessis, 2006) و معمولاً از آنها در تحقیقات صرف نظر می‌شود.

درباره اثر سرعت پیشروی بر نیروی کششی مورد نیاز ادوات خاک‌ورزی، تحقیقات فراوان است. سامرز و همکاران (Summers *et al.*, 1986) اثر سرعت پیشروی را بر نیروی کششی گاوآهن‌های برگردان‌دار، چیزل و بشقابی در سه نوع خاک بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که نیروی

کششی در گاوآهن برگردان‌دار تابع درجه دومی از سرعت پیشروی است اما این رابطه در مورد گاوآهن‌های چیزل و بشقابی خطی است. اسماعیل و برکهارت (Ismail & Burkhardt, 1993)، رابطه تغییرات سرعت پیشروی را با نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن چیزل رابطه‌ای خطی گزارش کردند. نتایج بررسی‌های اشرفی‌زاده (Ashrafi Zadeh, 2006) نشان می‌دهد که رابطه بین افزایش سرعت پیشروی و افزایش نیروی کششی مورد نیاز تیغه‌های باریک در سرعت‌های کمتر از ۸ کیلومتر بر ساعت در عمق‌های مختلف خاک‌ورزی رابطه‌ای خطی است. ساهو و رحمان (Sahu & Raheman, 2006) و معینی‌فر و همکاران (Moeenifar *et al.*, 2013) رابطه بین سرعت پیشروی و عمق کاری گاوآهن چیزل و نیروی کششی آن را خطی یافتند. رنجبریان و همکاران (Ranjbarian *et al.*, 2017) رابطه بین افزایش سرعت پیشروی و نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن برگردان‌دار، گاوآهن بشقابی و گاوآهن چیزل را خطی گزارش کردند.

یکی از روش‌های متداول برای از بین بردن سخت‌لایه‌ها، استفاده از زیرشکن است و انواع مختلفی از گاوآهن‌های زیرشکن در طرح‌های متنوع وجود دارد (Raper, 2002). اندازه‌گیری نیروهای وارد بر زیرشکن و چگونگی عملکرد آن در عملیات زیرشکنی، محققان ماشین‌های کشاورزی را به سمت طراحی زیرشکن‌های ایده‌آل، به ویژه از لحاظ مصرف انرژی، هدایت کرده است. از آنجا که زیرشکنی به نیروی کشش بالا و تراکتورهای پر قدرت نیاز دارد، زیرشکن مرسوم که استفاده از آن در بعضی از موارد به لحاظ به کارگیری تراکتورهای پر قدرت منتج به فشردگی مجدد خاک نیز می‌گردد جای خود را به زیرشکن کج‌ساق و پاراپلو داده است (Durairaj &

اینکه این نوع زیرشکن ابزار می‌فید برای از بین بردن لایه‌های سخت زیرسطحی است اما تحقیقات کاربردی درباره آن اندک است؛ کشاورزان در ایران معمولاً شناختی از کجساق ندارند و از آن استفاده نمی‌کنند. وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۴ اعلام کرد که ۴۲۱۲ دستگاه زیرشکن مرسوم در ایران وجود دارد که به دلیل مصرف انرژی بالا و منطبق نبودن تراکتورهای موجود با این ابزار، کمترین بازدهی انرژی را در میان ادوات خاک‌ورز دارند (Anon, 2015). با تحقیقات بیشتر و شناساندن زیرشکن کجساق به کشاورزان، می‌توان در جهت کاهش انرژی مصرفی حین عملیات زیرشکنی گام‌هایی مفید برداشت. به طور کلی، اهداف تحقیق حاضر بدین صورت است:

- ۱- بررسی اثر تغییرات سرعت پیشروی بر نیروهای مقاوم افقی، عمودی و جانبی وارد بر زیرشکن کجساق.
- ۲- اعتبارسنجی فرمول استاندارد ASABE در پیش‌بینی نیروی مقاوم افقی (نیروی کششی) زیرشکن کجساق.
- ۳- بررسی اثر دو شاخه کردن زیرشکن کجساق بر نیروهای وارد و تعادل جانبی مجموعه تراکتور-ادوات.

## مواد و روش‌ها

### زیرشکن کجساق

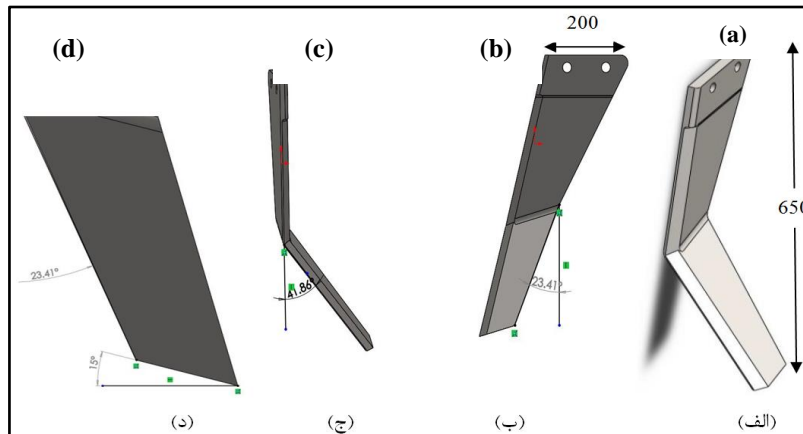
شاخه زیرشکن کجساق تحت بررسی از نوع استاندارد و حداکثر عمق کاری آن ۶۰ سانتی‌متر است. این شاخه از ورق فولادی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شده است و در حدود ۲۵ کیلوگرم وزن دارد. ارتفاع شاخه و طول آن در قسمت بالا به ترتیب ۶۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر است. زاویه جلوه‌دهی

Balasubramanian, 1997; Esehaghbeygi *et al.*, 2002). بررسی‌ها نشان می‌دهد زیرشکن کجساق عملکرد بهتری از زیرشکن پاراپلو داشته است (Celik & Raper, 2012). تحقیقات متنوعی در ارتباط با زیرشکن کجساق اجرا شده است، از آن جمله‌اند: نیروهای وارد بر زیرشکن کجساق تحت تأثیر شرایط کاری مختلف (Harrison & Licsko, 1989; Durairaj & Balasubramanian, 1997; Majidi Iraj & Raoufat, 1997; Raper, 2002; Raoufat *et al.*, 2016)، طراحی و ارزیابی تیغه‌های کجساق جدید با تغییر در زاویه‌های هندسی آن (Esehaghbeygi *et al.*, 2005; Jafari *et al.*, 2008; Jafari & Tavakoli Hashjin, 2016) مقایسه زیرشکن کجساق با زیرشکن مرسوم (Raoufat, 1998; Raper, 2007; Raoufat *et al.*, 2016)، طراحی و ساخت زیرشکن کجساق برای کاربردی خاص (Raoufat & Shahabzade, 2006)، ساخت و ارزیابی زیرشکن کجساق دوطرفه (Raoufat & Firuzi, 1998; Salar *et al.*, 2013) عملکرد دو تیغه کجساق رو در رو (توأم) (Raoufat & Mashhadi Mighani, 1998; Raoufat & Kazemi Najafabadi, 2007).

بررسی تحقیقات صورت گرفته نشان داد که که نیروی کششی مورد نیاز کجساق کمتر از نیروی کششی مورد نیاز زیرشکن مرسوم است (Kasisira & du Plessis, 2006; Raoufat *et al.*, 2016). به علاوه، نیروهای مقاوم جانبی و عمودی وارد بر زیرشکن کجساق از طرف خاک و مقایسه چیدمان‌های تک شاخه و دو شاخه روبه‌روی هم از نظر تمامی نیروهای وارد و تعادل مجموعه تراکتور- زیرشکن کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند یا اگر به آنها توجه شده نتایج در دسترس نیست. با

است (Durairaj & Balasubramanian, 1997; Esehaghbeygi *et al.*, 2005) (شکل ۱). البته، برخی محققان زاویه حمله بهینه کج‌ساق را ۷/۵ درجه گزارش نموده‌اند (Majidi Iraj & Raoufat, 1997).

قسمت پایینی شاخه و زاویه انحراف از خط عمود آن به ترتیب ۲۳/۴۱ و ۴۱/۸۶ درجه و در نتیجه، زاویه تمایل کج‌ساق ۴۸/۱۴ درجه است. زاویه حمله نیز ۱۵ درجه و از نظر نیروی کششی مورد نیاز، بهینه



شکل ۱- زیرشکن کج‌ساق. (الف) نمای ایزومتریک، (ب) نمای جانبی از چپ (زاویه جلوه‌ی قسمت زیرین شاخه = ۲۳/۴۱ درجه)، (ج) نمای روبه‌رو (زاویه انحراف از خط عمود = ۴۱/۸۶ درجه)، (د) نمای جانبی از راست (زاویه حمله = ۱۵ درجه) (ابعاد به میلی‌متر)

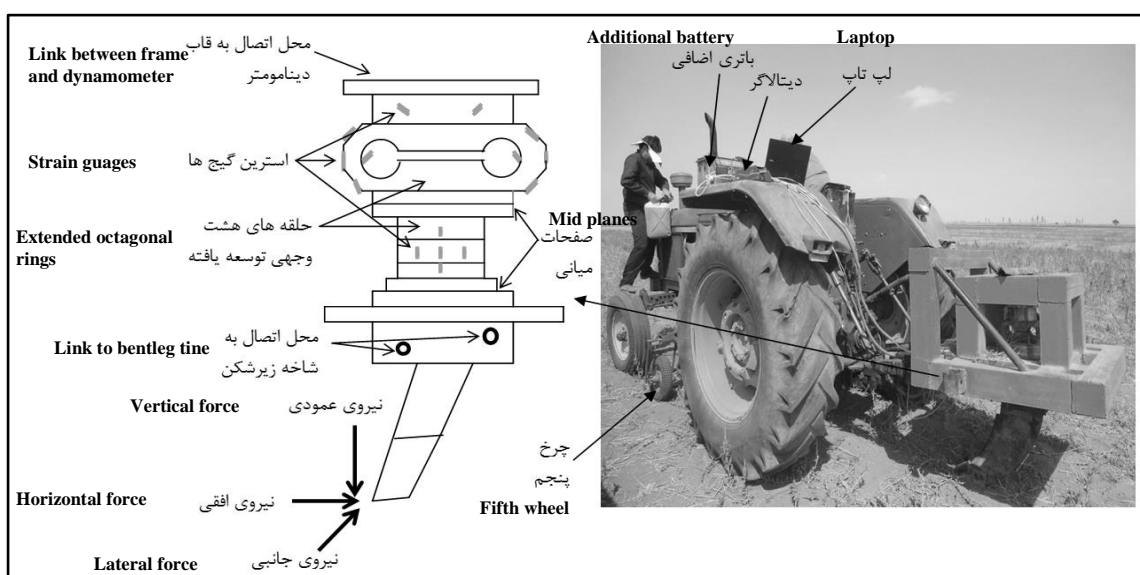
Fig. 1. The bentleg tine: a) isometric view, b) side left view (tine bottom forward angle=23.41°), c) front view (difference from vertical line=41.86°) and d) side right view (rake angle=15°) (dimensions in mm)

به منظور اتصال شاخه‌های جفتی گاوآهن کج ساق به دینامومتر سه محوره طراحی شود. این قاب مطابق با آنچه در شکل ۳ دیده می شود طراحی و ساخته شد. آزمون‌های مزرعه‌ای نشان داد که قاب طراحی شده دارای استحکام کافی برای آزمون‌های مزرعه‌ای شاخه‌های جفتی کج ساق تا عمق مورد نظر است (شکل ۳). سرعت واقعی حرکت تراکتور در مزرعه با چرخ پنجم اندازه‌گیری شد (شکل ۲). یک حسگر مغناطیسی به چرخ پنجم متصل است که چرخش چرخ‌دنده ۱۲ دندانه‌ای را ثبت می‌کند. با تقسیم عدد نشان داده شده در نمایشگر دیجیتال پالس‌متر بر عدد ۱۲، تعداد دور چرخ پنجم قابل محاسبه است. با داشتن محیط چرخ پنجم، مسافت طی شده محاسبه و با اندازه‌گیری مدت زمان مورد نیاز برای طی کردن این مسافت، سرعت واقعی حرکت تراکتور به دست می‌آید.

## ابزارهای اندازه‌گیری

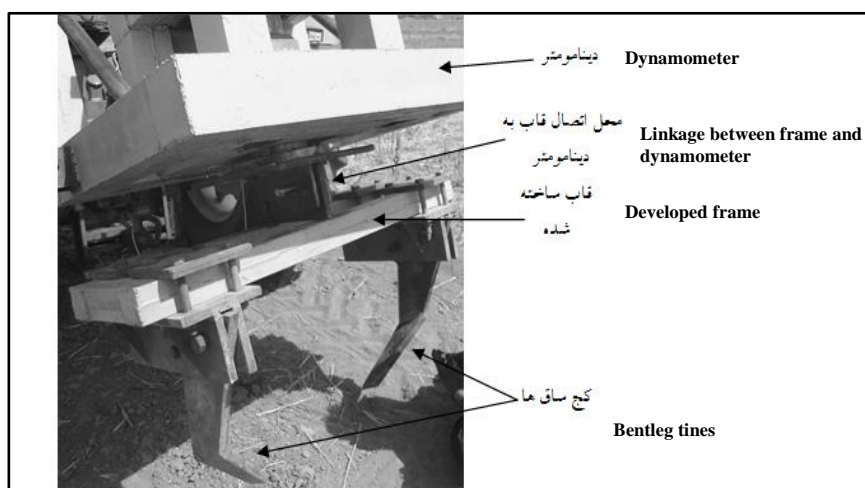
ابزارهای اندازه‌گیری استفاده شده در این تحقیق شامل دینامومتر اتصال سه نقطه، چرخ پنجم و سیستم جمع‌آوری داده است. در این تحقیق از دینامومتری استفاده شد که عباسپورگیلانده و خان‌رمکی (Abbaspour-Gilandeh & Khanramaki, 2013) ساخته‌اند. این وسیله قادر است تمامی نیروهای وارد بر یک شاخه از ابزار خاک‌ورز را تا بیشینه ۳۵ کیلو نیوتن اندازه‌گیری کند (شکل ۲). نحوه طراحی و ساخت دینامومتر و نیز نحوه اندازه‌گیری نیروهای متعامد افقی، عمودی و جانبی توسط آن، در تحقیق عباسپورگیلانده و خان‌رمکی (Abbaspour-Gilandeh & Khanramaki, 2013) ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری نیروهای وارد بر دو شاخه روبه‌روی هم از زیرشکن کج‌ساق، نیاز بود قابی



شکل ۲- دینامومتر، سیستم جمع‌آوری داده، زیرشکن کجساق و چرخ پنجم مورد استفاده در آزمون‌های مزرعه‌ای

Fig. 2. The used dynamometer, data logging system, bentleg tine and fifth wheel in field tests



شکل ۳- قاب طراحی شده به منظور اتصال شاخه‌های جفتی کجساق به دینامومتر

Fig. 3. The designed frame for connection double bentleg tines to dynamometer

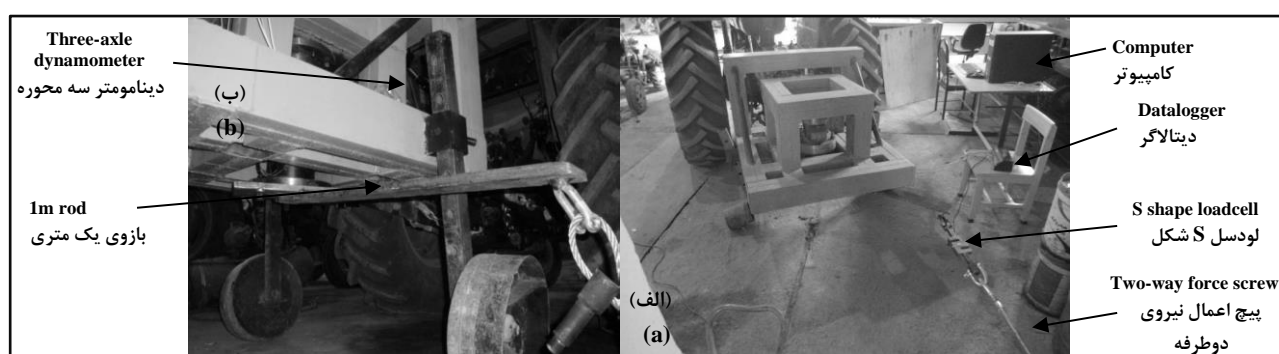
ثابت انواع داده‌های ورودی) است و قابلیت برنامه‌نویسی را نیز دارد، همچنین دارای ۱۲ کانال آنالوگ و ۱۶ کانال دیجیتال است و با جریان با ولتاژ ۲۲۰ ولت کار می‌کند. در نتیجه، دیتالاگر و لپ‌تاپ از طریق یک باتری ۱۲ ولتی اضافی و مبدل برق ۱۲ به ۲۲۰ ولت تغذیه می‌شدند (شکل ۲). فرکانس نمونه‌گیری دیتالاگر به صورت ۲۰ هرتز (۲۰ داده در ثانیه) تنظیم شد.

سیستم جمع‌آوری داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، شامل کرنش‌سنج‌های نصب شده روی دو حلقه هشت وجهی توسعه‌یافته<sup>۱</sup> نصب شده روی دینامومتر اتصال سه‌نقطه، دیتالاگر و لپ‌تاپ بود. سیگنال‌های دریافتی از کرنش‌سنج‌ها در دیتالاگر DT-800 (Data taker Co, Australia) رقمی شد و در انتهای هر کرت به لپ‌تاپ انتقال یافت. دیتالاگر مورد استفاده، چندمنظوره (دارای قابلیت

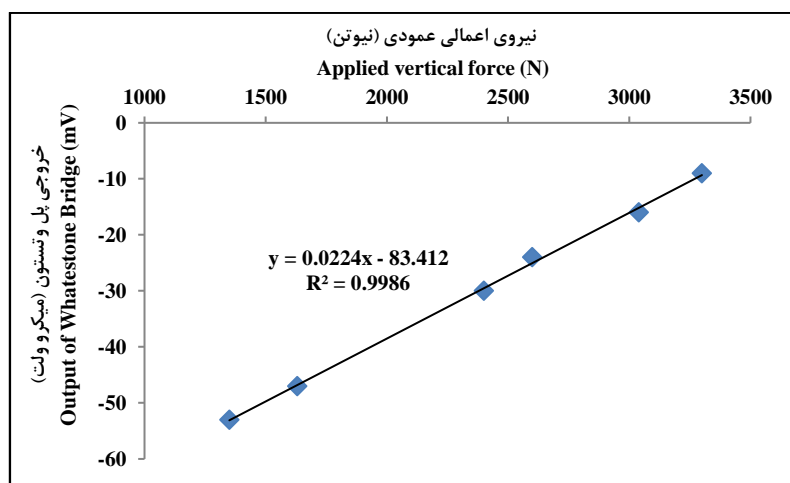
1- Extended Octagonal Ring Transducer (EORT)

صحت‌سنجی (کالیبراسیون) دینامومتر سه‌محوره  
 دینامومتر به دو صورت آزمایشگاهی و مزرعه‌ای صحت‌سنجی (کالیبره) شد. در آزمایشگاه، به قسمت پایین دینامومتر یک صفحه با بازویی به طول یک متر متصل شد به گونه‌ای که یک قلاب به انتهای بازو و قلاب دیگر به انتهای یک ستون ثابت جوش داده شد. برای اعمال نیرو به بازو و ثبت آن، از یک پیچ اعمال نیرو

دو طرفه (کالیبراسیون) دینامومتر سه‌محوره  
 دو طرفه و یک نیروی عمودی و جانبی توسط دینامومتر، صحت‌سنجی آزمایشگاهی این نیروها دنبال شد. برای نمونه، نتایج حاصل از صحت‌سنجی نیروی عمودی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- صحت‌سنجی (کالیبراسیون) آزمایشگاهی دینامومتر سه‌محوره، الف) دید از پشت و ب) دید از پایین  
 Fig. 4. The lab calibration of three-axle dynamometer: a) back view and b) bottom view



شکل ۵- صحت‌سنجی (کالیبراسیون) نیروی عمودی در آزمایشگاه  
 Fig. 5. Calibration of vertical force in lab

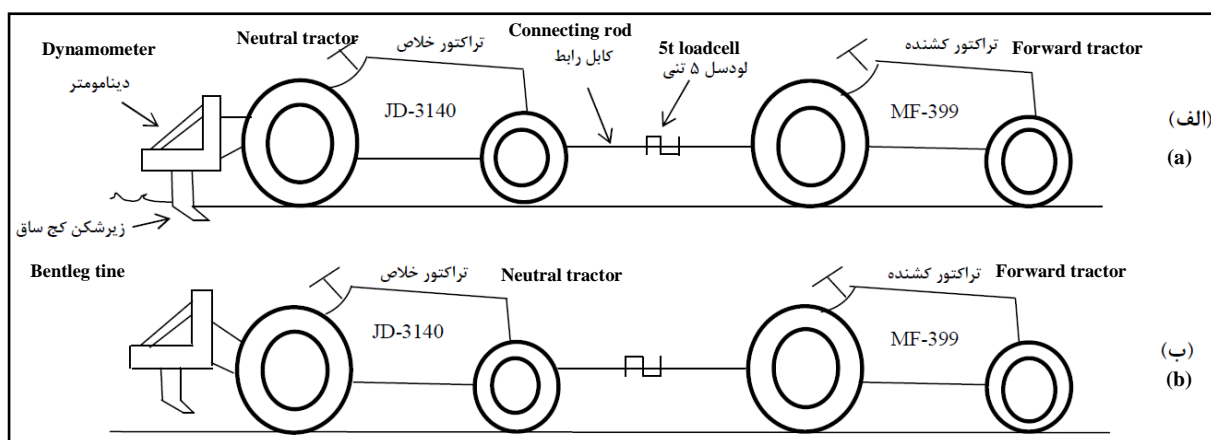
صحت‌سنجی مزرعه‌ای فقط در مورد نیروی مقاوم افقی و در دو مرحله اجرا شد. این عملیات صحت‌سنجی به کشش دو تراکتوری RNAM<sup>۱</sup> معروف است. در مرحله اول، تراکتور مسی فرگوسن

۳۹۹، مجموعه تراکتور جان دیر ۳۱۴۰ در حالت خلاص- دینامومتر- زیرشکن کج‌ساق را حین خاک‌ورزی و از طریق کابل رابط و لودسل ۵ تنی نصب شده بین دو تراکتور می‌کشید. در این وضعیت،

1- Regional Network for Agricultural Machinery

تنی در دو مرحله اول و دوم باید با نیروی مقاوم افقی (نیروی کششی) اندازه‌گیری شده با دینامومتر برابر باشد. با رسم دو سری نیرو، نمودار صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر به دست آمد (شکل ۷). شمای فنی دینامومتر به همراه نحوه تجزیه نیروهای وارد بر شاخه توسط واحد اندازه‌گیری نیروی دینامومتر به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

نیروهای کششی متفاوت با اعمال سرعت‌های پیشروی متفاوت در تراکتور کشنده به دست آمد (شکل ۶-الف). در مرحله دوم، تراکتور کشنده مجموعه تراکتور خلاص- دینامومتر- زیرشکن کچساق در حالت غیرعملیاتی را در همان سرعت‌های پیشروی مرحله اول می‌کشید (شکل ۶-ب). تفاوت نیروهای اندازه‌گیری شده با لودسل ۵

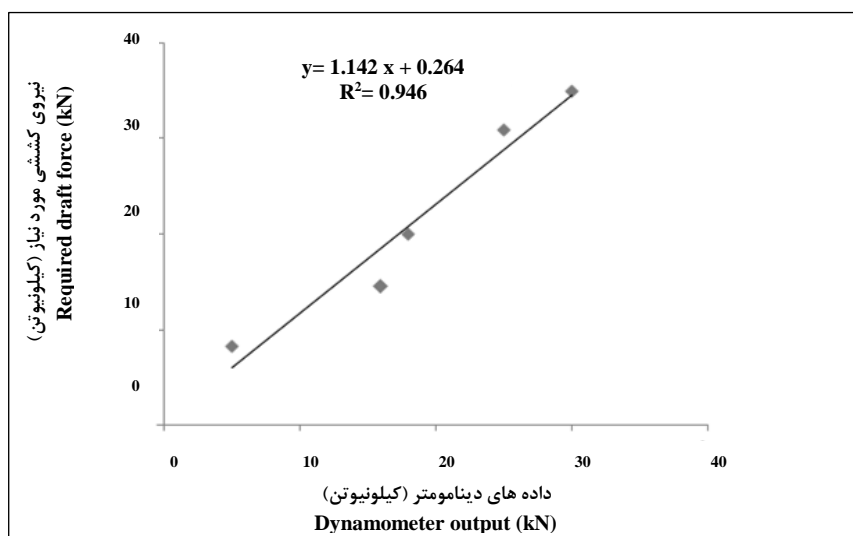


شکل ۶- صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر اتصال سه نقطه

الف) تراکتور کشنده در حال کشیدن تراکتور خلاص متصل به دینامومتر و زیرشکن کچساق حین خاک‌ورزی از طریق کابل رابط و لودسل پنج تنی است و ب) تراکتور کشنده در حال کشیدن تراکتور خلاص متصل به دینامومتر و زیرشکن کچساق در حالت عدم خاک‌ورزی از طریق کابل رابط و لودسل پنج تنی است

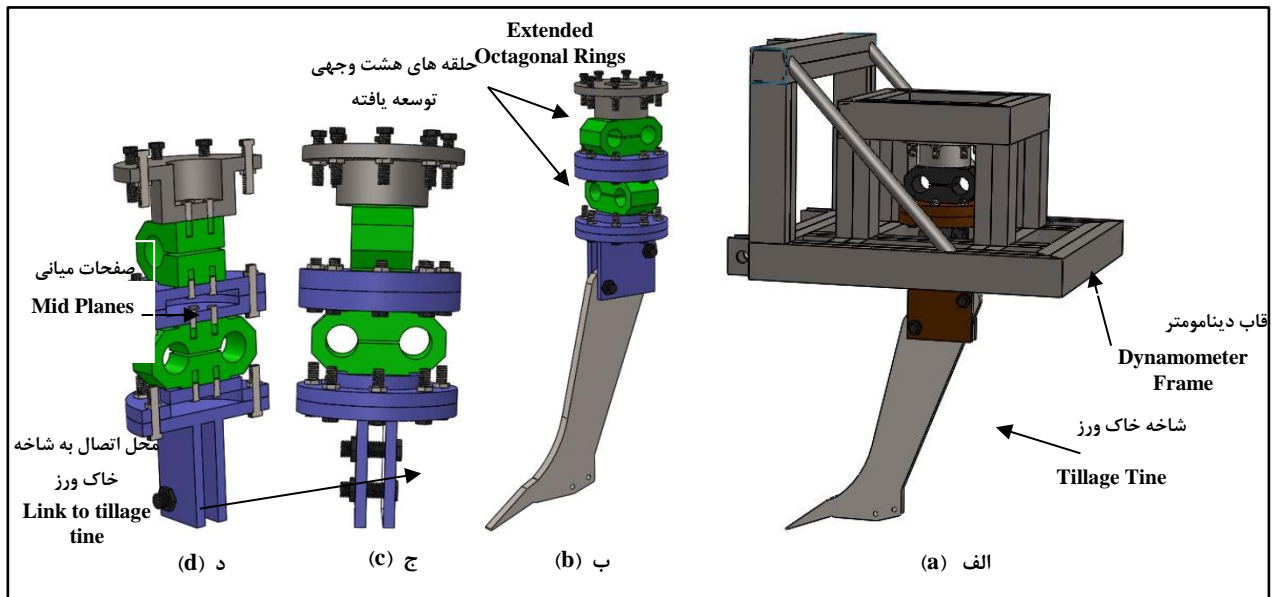
Fig. 6. Field calibration of three-point hitch dynamometer

a) The forward tractor is pulling the neutral tractor which connected to dynamometer and bentleg tine during tillage with the help of connecting rod and 5t loadcell and b) The forward tractor is pulling the neutral tractor which connected to dynamometer and bentleg tine during no-tillage with the help of connecting rod and 5t loadcell)



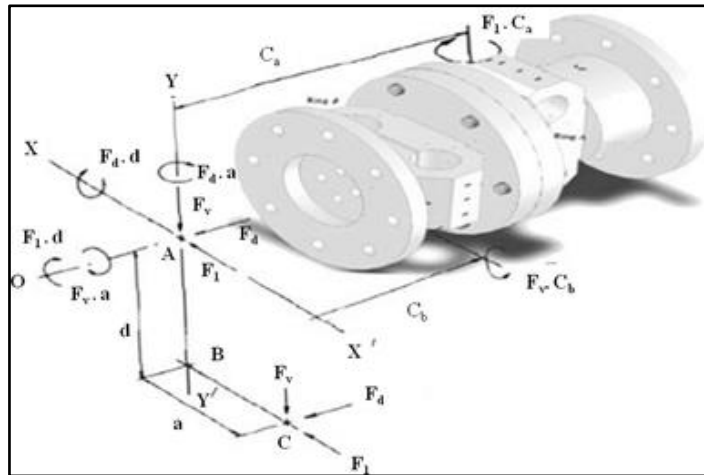
شکل ۷- نتایج به دست آمده از صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر

Fig. 7. Obtained results from the dynamometer field calibration



شکل ۸- شمای فنی دینامومتر سه محوره رسم شده در نرم افزار SolidWorks2013

الف) نمای کلی دینامومتر و شاخه، ب) واحد اندازه‌گیری نیرو و شاخه، ج) واحد اندازه‌گیری نیرو و د) تصویر برش خورده واحد اندازه‌گیری نیرو  
 Fig. 8. The technical schematic of three-axial dynamometer in solidwork 2013 software: a) total view of dynamometer and tine, b) tine and force measuring unit, c: force measuring unit and d: cut view of force measuring unit)



شکل ۹- تجزیه نیروها و گشتاورهای وارده به واحد اندازه‌گیری دینامومتر (Abbaspour-Gilandeh & Khanramaki, 2013)

( $F_d$  = نیروی کششی،  $F_l$  = نیروی جانبی و  $F_v$  = نیروی عمودی)

Fig. 9. Analysis of imposed forces and torques on dynamometer measuring unit (Abbaspour-Gilandeh & Khanramaki, 2013) ( $F_d$ = Horizontal (draft force),  $F_l$ = Lateral force and  $F_v$ = Vertical force)

### آزمون‌های مزرعه‌ای

(Godwin & Spoor, 1977)، ادوات زیرشکن‌مانند، اگر به صورت دو شاخه جفتی استفاده می‌شوند، فاصله عرضی میان شاخه‌ها باید بیش از دو برابر عمق کاری شاخه‌ها باشد تا تداخل عملکرد بین شاخه‌ها کم شود. در نتیجه، برای اجرای

آزمون‌های مزرعه‌ای در مزارع ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل (طول جغرافیایی  $48^{\circ}55'47''$ ، عرض جغرافیایی  $37^{\circ}33'57''$  و ارتفاع ۱۳۵۲ متر از سطح دریا) اجرا شد. طبق نظر گادوین و اسپور



۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند به دست آمد. با کسرکردن وزن استوانه‌های خالی وزن خاک خشک (بر حسب گرم) تعیین شد و با تقسیم کردن آن بر حجم استوانه نمونه‌برداری (بر حسب سانتی‌متر مکعب)، جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) به دست آمد. نتایج حاصل در جدول ۱ نشان داده شده است. برای نمونه‌برداری خاک با استوانه فلزی در هر نقطه مد نظر، گودال‌هایی تا عمق ۵۰ سانتی‌متری حفر گردید و استوانه‌ها در عمق‌های ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری به صورت افقی به دیواره گودال فرو برده شدند.

با در نظر گرفتن عوامل موثر شامل تعداد شاخه (تکی و دوتایی)، چهار سرعت پیشروی و چهار تکرار برای هر سرعت، جمعاً ۳۲ کرت آزمایشی (ابعاد هر کرت به صورت ۳ مترعرض در ۳۰ مترطول) در چهار بلوک بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در نظر گرفته شد. در هر کرت، چهار فاکتور شامل نیروهای مقاوم افقی، عمودی و جانبی به همراه سرعت واقعی پیشروی تراکتور اندازه‌گیری شد.

آزمون‌های مزرعه‌ای در عمق ۴۰ سانتی‌متر، فاصله عرضی میان شاخه‌ها ۹۰ سانتی‌متر تنظیم شد.

از تراکتور جان دیر ۳۱۴۰ با ۱۱۰ اسب بخار قدرت در آزمون‌های مزرعه‌ای استفاده شد. بافت خاک مزرعه، لومی رسی و ساختمان آن خاک‌دانه‌ای شکل تعیین شده است. رطوبت و سایر خصوصیات خاک در ۱۵ نقطه انتخاب شده به طور تصادفی در کل مزرعه و در دو عمق ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری رطوبت بر پایه وزن خشک، نمونه‌های خاک دو بار وزن شدند، یک بار پس از جمع‌آوری و بار دیگر بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس. با جایگذاری این داده‌ها در فرمول مربوط به محاسبه رطوبت وزنی بر پایه وزن خشک، میزان رطوبت به دست آمد. برای اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک، از هر عمق (۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متر) در نقاط تصادفی در کل مزرعه، در مجموع ۳۰ نمونه خاک با استوانه‌های استاندارد جمع‌آوری شد. وزن استوانه‌ها پس از آنکه به مدت

جدول ۱- بعضی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک  
Table 1- Some physical and chemical properties of soil

Property	خصوصیت (Property)
39.6 %	شن (Sand)
27.9 %	سیلت (Silt)
32.2 %	رس (Clay)
0.29 %	ماده آلی (Organic Matter)
7.62	اسیدیته (pH)
0.41 ds/m	هدایت الکتریکی (EC)
10.13 %	ظرفیت مزرعه‌ای بر پایه وزن خشک (Field Capacity (dry base))
1.35 g/cm <sup>3</sup>	جرم مخصوص ظاهری خاک (۰-۲۵ سانتی‌متری) (Bulk Density (0-25 cm))
1.46 g/cm <sup>3</sup>	جرم مخصوص ظاهری خاک (۲۵-۵۰ سانتی‌متری) (Bulk Density (25-50 cm))
9.3 %	رطوبت بر پایه وزن خشک (۰-۲۵ سانتی‌متری) (Humidity (dry base) (0-25 cm))
10.4 %	رطوبت بر پایه وزن خشک (۲۵-۵۰ سانتی‌متری) (Humidity (dry base) (25-50 cm))

## نتایج و بحث

موجود در فرمول استاندارد برای بازه‌ای وسیع از شرایط خاک و آزمون است و نمی‌توان انتظار داشت که داده‌های پیش‌بینی شده در فرمول به داده مزرعه‌ای بسیار نزدیک باشد (McLaughlin *et al.*, 2008).

نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی کششی مورد نیاز زیرشکن کج‌ساق در سرعت‌های مختلف در جدول ۲ آمده است. داده‌ها در فاصله ۲۵-۱۰ متری در طول هر کرت به دست آمده‌اند. ضریب‌های

جدول ۲- نیروی کششی مورد نیاز زیرشکن کج‌ساق در آزمون‌های مزرعه‌ای

Table 2- Required horizontal force of bentleg tine at field tests

اختلاف میان داده‌های دینامومتر و استاندارد (درصد) Difference between dynamometer and standard data (%)	میانگین داده‌های دینامومتر (کیلو نیوتن) Mean dynamometer data (kN)	پیش‌بینی فرمول استاندارد ASABE (کیلو نیوتن) ASABE prediction (kN)	سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت) Forward Speed (km/h)	تعداد شاخه Number of tines
21.4	5.1	6.49	1.8	1
17.3	5.45	6.59	2.3	
16.3	5.65	6.75	2.9	
16.1	5.82	6.94	3.5	
20.6	10.3	12.98	1.8	2
16.1	11.05	13.18	2.3	
15.6	11.39	13.5	2.9	
15.8	11.68	13.88	3.5	

حالت تک شاخه با افزایش سرعت پیشروی روندی نزولی دارد اما در نوع دوشاخه این روند تقریباً (به استثنای سرعت سوم)، نزولی است.

## اثر سرعت پیشروی و تعداد شاخه بر نیروی افقی

اثر سرعت پیشروی، تعداد شاخه و اثر متقابل آنها بر نیروهای متعامد افقی، عمودی و جانبی در جدول ۳ ارائه شده است. دیده می‌شود که اثر عوامل فوق و اثر متقابل آنها بر تمامی نیروها معنی‌دار است ( $P < 0.01$ ). تنها استثنا، اثر سرعت و اثر متقابل سرعت و شاخه بر نیروی عمودی است. مقایسه میانگین تیمارها و تغییرات نیروی کششی مورد نیاز زیرشکن کج‌ساق به واسطه تغییرات سرعت و تعداد شاخه به ترتیب در جدول ۴ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.

فرمول استاندارد ASABE، نیروی کششی مورد نیاز زیرشکن کج‌ساق را بیشتر از مقادیر به دست آمده در آزمون‌های مزرعه‌ای تخمین زده است و داده‌های مزرعه‌ای در حالت‌های تک شاخه و دو شاخه به ترتیب به میزان ۱۸ و ۱۷ درصد به طور میانگین نسبت به داده استاندارد کمتر است و در نتیجه داده‌های مزرعه‌ای در بازه  $\pm 50$  درصد فرمول استاندارد قرار دارد. مک لافلین و همکاران (McLaughlin *et al.*, 2008) و رنجبری‌ان و همکاران (Ranjbarian *et al.*, 2017) نیز در تحقیقات خود، بیشتر تخمین زده شدن نیروی کششی مورد نیاز ادوات تحت آزمون توسط استاندارد ASABE را گزارش داده‌اند. اختلاف میان داده‌های مزرعه‌ای و استاندارد در زیرشکن کج‌ساق دوشاخه نسبت به نوع تک شاخه کمتر است. این اختلاف در

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سرعت پیشروی و تعداد شاخه بر نیروهای وارده

Table 3- Analysis of variance of the effect of forward speed and number of tines on the imposed forces

میانگین مربعات (Mean of Square)			درجه آزادی df	منبع تغییرات Source of Variation
نیروی جانبی Lateral	نیروی عمودی Vertical	نیروی افقی Horizontal		
0.002**	0.003 <sup>ns</sup>	1.628**	3	سرعت Speed
19.422**	5.624**	250.902**	1	تعداد شاخه No of Tines
0.001**	0.000 <sup>ns</sup>	0.161**	3	سرعت × شاخه Speed × Tine
0.000	0.003	0.005	24	خطا Error
			31	کل Total

ns عدم وجود اختلاف معنی دار (Not significant) \*\* اختلاف معنی دار در سطح ۱٪ (Significant at 1%)

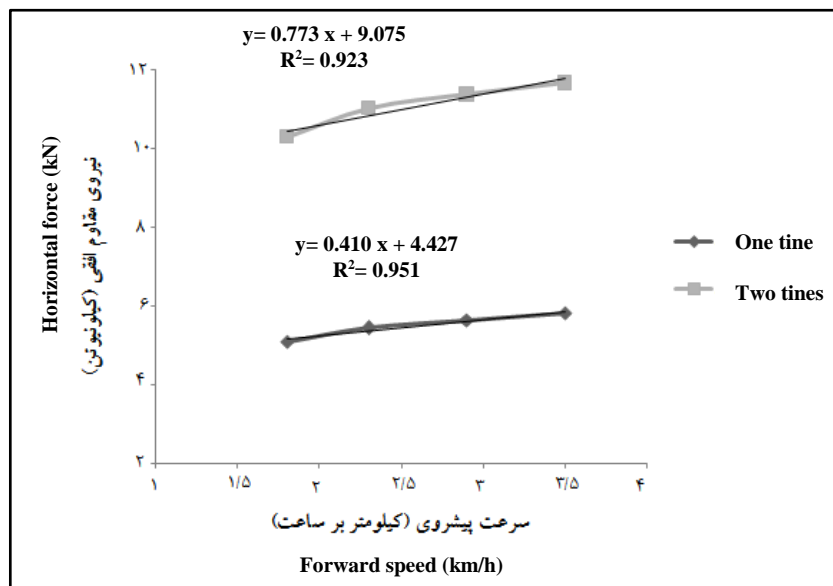
جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت) و تعداد شاخه بر نیروی افقی (کیلونیوتن)

Table 4- Comparison of mean about the effect of forward speed (km/h) and number of tines on the horizontal force (kN)

سرعت پیشروی Forward Speed				تعداد شاخه Number of tines
3.5	2.9	2.3	1.8	
5.82 <sup>d</sup>	5.65 <sup>c</sup>	5.45 <sup>b</sup>	5.1 <sup>a*</sup>	1
11.68 <sup>h</sup>	11.39 <sup>g</sup>	11.05 <sup>f</sup>	10.3 <sup>e</sup>	2

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آماری فاقد اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد می‌باشند.

In each column, the means with common letters do not have a statistically significant difference at the level of 5%.



شکل ۱۰- ارتباط بین سرعت پیشروی، تعداد شاخه، و نیروی افقی

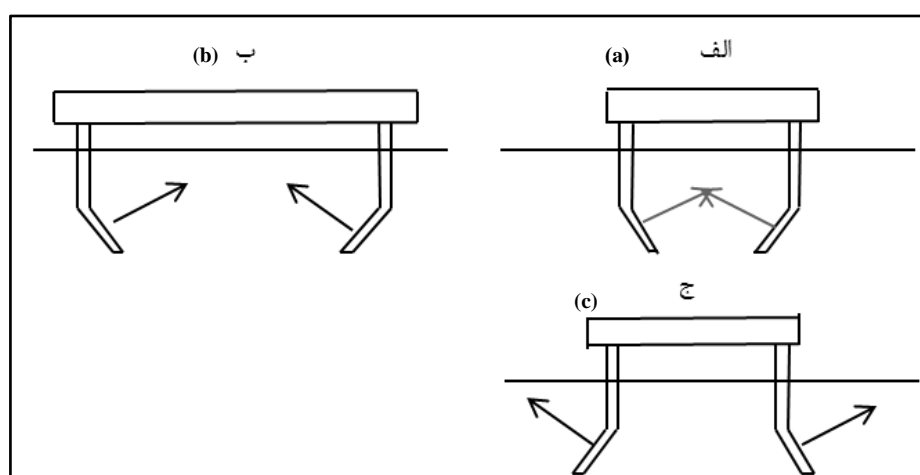
Fig. 10. The relation between forward speed, number of tines and horizontal force

Sheikh, 1989; Al-Suhaibani & Al-Janobi, 1997; Shahi *et al.*, 2010; Ramadhan, 2011; Ramadhan, 2014) اما این افزایش در حالت دو شاخه از سرعت ۲/۳ کیلومتر بر ساعت به بعد،

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی در هر دو حالت تک شاخه و دو شاخه، نیروی کششی مورد نیاز زیرشکن کجساق افزایش می‌یابد (Spoor & Godwin, 1978; Owen, 1989;

تا تداخل عملکرد به طور کامل از بین برود. در این صورت، نیروی مقاوم افقی دو شاخه جفتی دقیقاً دو برابر نیروی مقاوم افقی حالت تک شاخه می‌شود. رئوفت و مشهدی میغانی (Raoufat & Mashhadi, 1998) نیز فاصله عرضی بهینه ۱۲۲ سانتی‌متری را بین دو شاخه از کج‌ساق که بسیار بیشتر از دو برابر حداکثر عمق عمق کاری ۴۵ سانتی‌متری آنها بود، توصیه کرده‌اند. حداکثر فاصله عرضی میان شاخه‌ها که در مراحل طراحی و ساخت قاب جدید لحاظ شده بود، ۹۵ سانتی‌متر بود در نتیجه نباید عمق کاری شاخه‌های جفتی متصل به آن از ۳۵ سانتی‌متر بیشتر شود وگرنه قطعاً شاهد تداخل عملکرد شاخه‌ها خواهیم بود. به علاوه، با معکوس کردن جهت بسته‌شدن شاخه‌ها به قاب (شکل ۱۱-ج)، لایه‌های خاک زیرسطحی در جهت‌های نشان داده شده در شکل (به سمت بیرون) جابه‌جا می‌شوند و خاک میان شاخه‌ها تقریباً دست نخورده باقی خواهد ماند.

روند کندتری پیدا کرده است. علت پایین‌تر بودن همبستگی ( $R^2$ ) در حالت دو شاخه نسبت به حالت تک شاخه نیز همین امر است. با دو برابر شدن تعداد شاخه، نیروی کششی بیش از دو برابر (۱۰۲ درصد افزایش) حالت تک شاخه شده است. علت این امر این است که عملکرد دو شاخه با جهت ساقه معکوس با هم تداخل دارد. یعنی خاک جابه‌جا شده توسط شاخه سمت چپ، بار دیگر توسط شاخه سمت راست جابه‌جا می‌شود و بالعکس (شکل ۱۱-الف). علت تداخل نیز فاصله نامناسب (کم) عرضی نسبت به عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک‌ورزی میان شاخه‌هاست. با توجه به نتایج تحقیقات گذشته (Godwin & Spoor, 1977; Raoufat & Mashhadi, 1998) عمق کاری ۴۰ و فاصله عرضی ۹۰ سانتی‌متری بین شاخه‌ها در آزمون مزرعه‌ای و مشاهده تداخل عملکرد با وجود بیش از دو برابر بودن فاصله عرضی نسبت به عمق کاری، یا باید فاصله عرضی شاخه‌ها بیشتر شود (شکل ۱۱-ب) یا شاخه‌ها عکس حالت الف قرار گیرند (شکل ۱۱-ج)



شکل ۱۱- الف) تداخل بین شاخه‌ها در آزمون‌های مزرعه‌ای، ب) افزایش فاصله عرضی برای از بین بردن تداخل میان شاخه‌ها و ج) معکوس کردن جهت بسته‌شدن شاخه‌ها به قاب جفتی

Fig. 11. a) Interaction between tines at the field test, b) adding lateral distance between tines for termination the interaction and c) reverse of tines link to frame

بیشترین نیروی کششی مورد نیاز در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در حالت دو شاخه به میزان ۱۱/۶۸ کیلونیوتن و کمترین نیرو نیز در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در حالت تک شاخه به میزان ۵/۱ کیلونیوتن به دست آمده است. افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در دو حالت تک شاخه و دو شاخه باعث افزایش نیروی کششی به میزان ۱۴/۱ و ۱۳/۴ درصد شده است. شکل ۱۰ همچنین نشان می‌دهد که رابطه بین سرعت پیشروی و نیروی کششی مورد نیاز در هر دو حالت تعداد شاخه، خطی است ( $R^2 > 0.9$ ). این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیقات اسماعیل و برکه‌هات (Ismail & Burkhardt, 1993)، اشرفی زاده (Ashrafi Zadeh, 2006)، ساهو و رحمان (Sahu & Raheman, 2006)، معینی‌فر و همکاران (Moeenifar et al., 2013) و رنجبریان و همکاران (Ranjbarian et al., 2017) مشابه است. علاوه بر این، از شکل ۱۰ می‌توان دریافت که با افزایش سرعت پیشروی، نیروی مقاوم افقی کجساق جفتی نسبت به نوع تک شاخه آن، باز هم از دو برابر اندکی بیشتر است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که فقط اثر تعداد شاخه بر نیروی مقاوم عمودی معنی‌دار بوده ( $P < 0.01$ ) و تغییرات سرعت پیشروی و اثر متقابل تعداد شاخه و سرعت پیشروی بر مقدار نیروی عمودی معنی‌دار نشده است. مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۵ ارائه شده است.

#### اثر سرعت پیشروی و تعداد شاخه بر نیروی عمودی

جدول ۵ - مقایسه میانگین اثر سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت) و تعداد شاخه بر نیروی عمودی (کیلونیوتن)

Table 5- Comparison of mean about the effect of forward speed (km/h) and number of tines on the vertical force (kN)

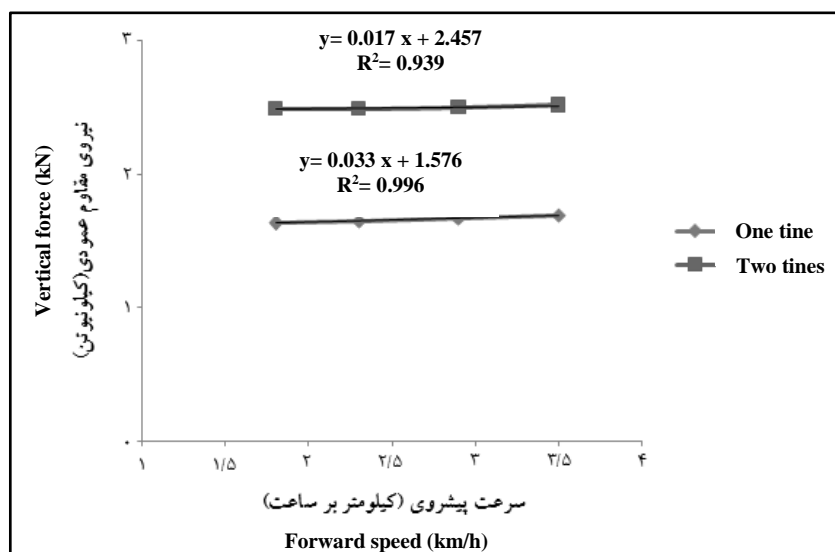
سرعت پیشروی Forward Speed				تعداد شاخه Number of tines
3.5	2.9	2.3	1.8	
1.69 <sup>b</sup>	1.67 <sup>b</sup>	1.65 <sup>b</sup>	1.63 <sup>b*</sup>	1
2.52 <sup>a</sup>	2.50 <sup>a</sup>	2.495 <sup>a</sup>	2.491 <sup>a</sup>	2

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون آماری فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشند.

In each column, the means with common letters do not have a statistically significant difference at the level of 5%.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که بیشترین نیروی مقاوم عمودی به میزان ۲/۵ کیلونیوتن در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در حالت دو شاخه و کمترین نیروی مقاوم عمودی به میزان ۱/۶۳ کیلونیوتن در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در حالت تک شاخه به دست آمده است. با دو برابر کردن تعداد شاخه ها، نیروی مقاوم عمودی به میزان ۵۰/۶ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو حالت تک شاخه و دو شاخه نیز نیروی عمودی به ترتیب به میزان ۳/۵ و ۱/۲ درصد افزایش می‌یابد و رابطه بین افزایش سرعت پیشروی و افزایش نیروی مقاوم عمودی در هر دو عمق، خطی است ( $R^2 > 0.9$ ).

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که بیشترین نیروی مقاوم عمودی به میزان ۲/۵ کیلونیوتن در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در حالت دو شاخه و کمترین نیروی مقاوم عمودی به میزان ۱/۶۳ کیلونیوتن در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در حالت تک شاخه به دست آمده است. با دو برابر کردن تعداد شاخه ها، نیروی مقاوم عمودی به میزان ۵۰/۶ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو حالت تک شاخه و دو شاخه نیز نیروی عمودی به ترتیب به میزان ۳/۵ و ۱/۲ درصد افزایش می‌یابد و رابطه بین افزایش سرعت پیشروی و افزایش نیروی مقاوم عمودی در هر دو عمق، خطی است ( $R^2 > 0.9$ ).



شکل ۱۲- ارتباط بین سرعت پیشروی، تعداد شاخه و نیروی مقاوم عمودی  
 Fig. 12. The relation between forward speed, no of tines and vertical force

بالایی دارد. جدول ۳ نشان می‌دهد که تغییرات سرعت پیشروی، تعداد شاخه و اثر متقابل آنها بر نیروی مقاوم جانبی معنی‌دار است ( $P < 0.01$ ). مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۶ ارائه شده است.

اثر سرعت پیشروی و تعداد شاخه بر نیروی جانبی نیروی جانبی وارد بر مجموعه تراکتور- ادوات، به دلیل تأثیر مستقیم بر حرکت مستقیم‌الخط تراکتور در مزرعه و حفظ تعادل آن، اهمیت

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت) و تعداد شاخه بر نیروی جانبی (کیلو نیوتن)

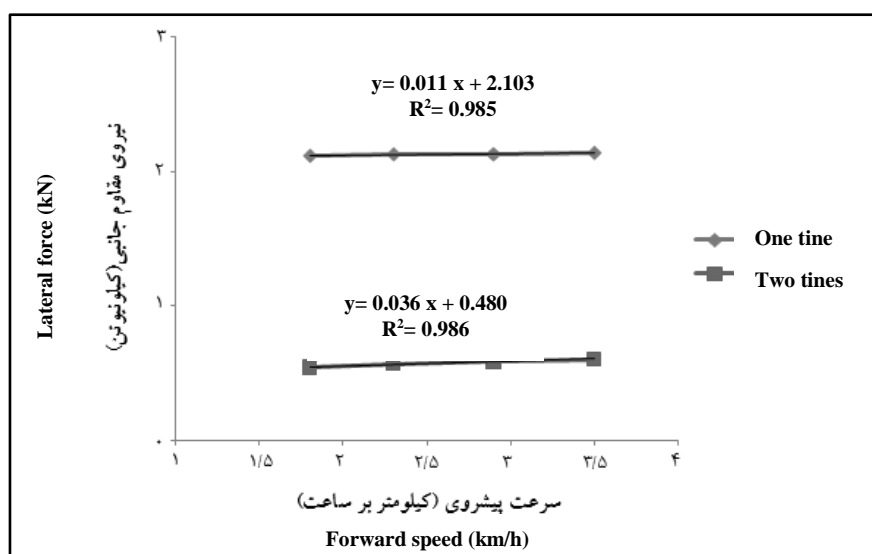
**Table 6- Comparison of mean about the effect of forward speed (km/h) and no of tines on the lateral force (kN)**

سرعت پیشروی Forward Speed				تعداد شاخه Number of tines
3.5	2.9	2.3	1.8	
2.14 <sup>h</sup>	2.13 <sup>g</sup>	2.129 <sup>f</sup>	2.124 <sup>e*</sup>	1
0.61 <sup>d</sup>	0.58 <sup>c</sup>	0.56 <sup>b</sup>	0.54 <sup>a</sup>	2

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون آماری فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشند. In each column, the means with common letters do not have a statistically significant difference at the level of 5%.

همچنین می‌بینیم که با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت، نیروی مقاوم جانبی در حالت‌های تک شاخه و دوشاخه به ترتیب به میزان ۱ و ۱۱/۵ درصد افزایش می‌یابد. رابطه بین افزایش سرعت پیشروی و افزایش نیروی مقاوم جانبی در هر دو حالت شاخه، خطی است ( $R^2 > 0.9$ ).

بیشترین نیروی مقاوم جانبی به میزان ۲/۱۴ کیلو نیوتن در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و حالت تک شاخه و کمترین آن به میزان ۰/۵۴ کیلو نیوتن در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و حالت دو شاخه به دست آمده است (شکل ۱۳). در اینجا مشاهده شد که با افزایش تعداد شاخه‌ها از یک به دو، نیروی مقاوم جانبی به میزان ۷۳ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- ارتباط بین سرعت پیشروی، تعداد شاخه، و نیروی مقاوم جانبی  
 Fig. 13. The relation between forward speed, no of tines and lateral force

### نتیجه گیری

پیش‌بینی کرده است و داده‌های مزرعه‌ای در بازه عددی استاندارد قرار دارند. همچنین مشخص شد که اختلاف میان داده‌های مزرعه‌ای و استاندارد، با افزایش سرعت پیشروی کاهش اما با افزایش تعداد شاخه افزایش می‌یابد.

- در حالت کلی، برای بهینه کردن عملکرد زیرشکن کجساق به شرط داشتن تراکتور سنگین، استفاده از شاخه‌های بیشتر توصیه می‌شود. این امر اگرچه مصرف سوخت را افزایش می‌دهد اما میل به نفوذ ابزار خاک‌ورز و تعادل مجموعه تراکتور- زیرشکن را افزایش می‌دهد.

- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای صرفه‌جویی در مصرف سوخت و انرژی در عملیات زیرشکنی، سرعت‌های پیشروی بالا چندان مناسب نیستند چون نیروی مقاوم افقی به شدت افزایش خواهد یافت. سرعت‌های پیشروی پایین نیز مناسب نیستند چون مدت زمان اجرای عملیات خاک‌ورزی افزایش می‌یابد. مناسب‌ترین سرعت پیشروی در عملیات زیرشکنی، سرعت‌های متوسط مانند ۲/۵ کیلومتر بر ساعت است.

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که:

- تغییرات سرعت پیشروی، تعداد شاخه و اثر متقابل آنها بر تمامی نیروهای وارده، به غیر از نیروی عمودی، معنی‌دار است. افزایش سرعت پیشروی به افزایش نیروهای مقاوم افقی، عمودی و جانبی می‌انجامد. با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت، نیروهای مقاوم افقی، عمودی و جانبی به ترتیب در حالت تک شاخه به میزان ۱۴/۱، ۳/۵ و ۱ درصد و در حالت دوشاخه به میزان ۱۳/۴، ۱/۲ و ۱۱/۵ درصد افزایش می‌یابد.

- افزایش تعداد شاخه منجر به افزایش در نیروی مقاوم افقی و عمودی و کاهش در نیروی مقاوم جانبی می‌شود. در حالت دو شاخه نسبت به تک شاخه، نیروی مقاوم افقی و عمودی به ترتیب حدود ۱۰۲ و ۵۰/۶ درصد افزایش و نیروی مقاوم جانبی به میزان ۷۳ درصد کاهش می‌یابد.

- مشخص شد که استاندارد ASABE نیروی کششی مورد نیاز زیرشکن کج ساق را در سرعت‌های مختلف بیشتر از داده‌های حاصل از آزمون‌های مزرعه‌ای

## مراجع

- Abbaspour-Gilandeh, Y., & Khanramaki, M. (2013). Design, construction and calibration of a triaxial dynamometer for measuring forces and moments applied on tillage implements in field conditions. *Metrology Society of India*, 28(2), 119-127.
- Alimardani, R., Fazel, Z., Akram, A., Mahmoudi, A., & Varnamkhasti, M. G. (2008). Design and development of a three-point hitch dynamometer. *Journal of Agricultural Technology*, 4(1), 37-52.
- Al-Suhaibani, S. A., & Al-Janobi, A. (1997). Draught requirements of tillage implements operating on sandy loam soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66(3), 177-182.
- Anon. (2015). Agricultural statistics paper, Ministry of Agricultural Jihad. Iran. (in Persian)
- Ashrafi Zadeh, S. R. (2006). Modelling of energy requirements by a narrow tillage tool (M. Sc. Thesis), Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan. Canada.
- Askari, M., Komarizade, M. H., Nikbakht, A. M., Nobakht, N., & Teimourlou, R. F. (2011). A novel three-point hitch dynamometer to measure the draft requirement of mounted implements. *Research in Agricultural Engineering*, 57, 128-136.
- Celik, A., & Raper, R. L. (2012). Design and evaluation of ground-driven rotary subsoilers. *Soil & Tillage Research*, 124(3), 203-210.
- Durairaj, C. D., & Balasubramanian, K. (1997). Influence of tool angles and speed on the soil reactions of a bent leg plough in two soils. *Soil & Tillage Research*, 44(3), 137-150.
- Esehaghbeygi, A., Tabatabaee Far, A., Raoufat, M. H., & Keyhai, A. R. (2002). Analytical models and predicting draft force of oblique blade subsoiler. *Journal of Agricultural Science*, 16(2): 239-251. (in Persian)
- Esehaghbeygi, A., Tabatabaee far, A., Keyhai, A. R., & Raoufat, M. H. (2005). Effect of depth and rake angle on the draft requirement of oblique blade subsoiler. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 36(4), 1045-1052. (in Persian)
- Glancey, J. L., Upadhyaya, S. K., Chancellor, W. J., & Rumsey, J. W. (1996). Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. *Soil & Tillage Research*, 37, 47-65.
- Godwin, R. J., & Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(4), 213-228.
- Harrigan, T. M., & Rotz, C. A. (1995). Draft relationships for tillage and seeding equipment. *Applied Engineering in Agriculture*, 11(3), 773-783.
- Harrison, H. P., & Licsko, Z. J. (1989). Soil reacting forces for models of three bentleg plows. *Soil & Tillage Research*, 15(1-2), 125-135.
- Ismail, W. I. W., & Burkhardt, T. H. (1993). Draft and fuel requirements measurement using tractor on-board data acquisition system, *Pertanika Journal of Science & Technology*, 1(1), 51-64.
- Jafari, R., Tavakoli Hashjin, T., & Raoufat, M. H. (2008). *Design, development and evaluation of a modified bentleg plow to increase energy usage efficiency. Proceedings of the 5<sup>th</sup> National Conference on Agricultural Machinery and Mechanization*. Aug. 27-29. University of Ferdowsi Mashhad, Iran. (in Persian)
- Jafari, R., & Tavakoli Hashjin, T. (2016). Performance evaluation of modified bentlegplow using finite element approach. *Iranian Journal of Agriculture Research*, 35(1), 63-72. (in Persian)
- Kasisira, L. L., & du Plessis, H. L. M. (2006). Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil. *Soil & Tillage Research*, 86(2), 185-198.
- Majidi Iraj, H., & Raoufat, M. H. (1997). Power requirement of a bentleg plow and its effects on soil physical conditions. *Iranian Journal of Agriculture Research*, 16(1), 1-16. (in Persian)
- McLaughlin, N. B., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Yang, X. M., Li, Y. X., Welacky, T. W., & Stewart, G. (2008). Energy inputs for conservation and conventional primary tillage implements in a clay loam soil. *Transactions of the ASABE*, 51, 1153-1163.



- Moenifar, A. M., Kalantari, D., & Mousavi Seyedi, S. R. (2013). Application of dimensional analysis in determination of traction force acting on a narrow blade. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 59, 1034-1039.
- Owen, G. T. (1989). Subsoiling forces and tool speed in compact soils. *Canadian Agricultural Engineering*, 31, 15-20.
- Ramadhan, M. N. (2011). Field study to evaluate the mechanical performance of the double tines longitudinally arranged subsoiler and its effect on some growth characteristics of barley hordeum vulgare L. (M. Sc. Thesis), College of Agriculture, Basrah University. Basrah. Iraq.
- Ramadhan, M. N. (2014). Development and performance evaluation of the double tines subsoiler in silty clay soil part1: draft force, disturbed area and specific resistance. *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 421, 293-313.
- Ranjbarian, S., Askari, M., & Jannatkah, J. (2017). Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(2), 154-162.
- Raoufat, M. H. (1998). *Comparison of performance of two models of deep plow*. International Conference on Agricultural Engineering. Aug. 24-27, Oslo, Norway.
- Raoufat, M. H., & Firuzi, S. (1998). Field evaluation of a dual bentleg plow. *Iranian Journal of Agriculture Research*, 17(2), 67-82. (in Persian)
- Raoufat, M. H., & Mashhadi Mighani, H. (1998). Appropriate tine spacing of a double bentleg plow for better tillage and efficient performance. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 30(2), 319-330. (in Persian)
- Raoufat, M. H., & Shahabzade, M. M. (2006). *Design, construction and evaluation of bentleg subsoiler for deep subsoiling in sugar cane fields*. Proceedings of the 4<sup>th</sup> National Conference on Agricultural Machinery and Mechanization. Sep. 15. University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian)
- Raoufat, M. H., & Kazemi Najafabadi, M. (2007). Performance of bentleg subsoiler with surface blades in clay soil. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 41(1), 117-128. (in Persian)
- Raoufat, M. H., Kavooosi, Z., Majidi Iraj, H., & Roustapour, O. R. (2016). *Technologies of tillage implements in line with Sustainable agriculture*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> National Conference on Agricultural Machinery and Mechanization. Sep. 7-8. University of Ferdowsi Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian)
- Raper, R. L. (2002). The influence of implement type, tillage depth and tillage timing on residue burial. *Transaction of the ASAE*, 455, 1281-1286.
- Raper, R. L. (2007). In-row subsoilers that reduce soil compaction and residue disturbance. *Applied Engineering Agriculture*, 23(3), 253-258.
- Sahu, R. K., & Raheman, H. (2006). Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosystem Engineering*, 94(2), 275-284.
- Salar, M. R., Eshaghbeygi, A., & Hemmat, A. (2013). Soil loosening characteristics of a dual bent blade subsurface tillage implement. *Soil & Tillage Research*, 134(2), 17-24.
- Shahi, N., Shahgholi, G., & Biranvand, M. (2010). *Modelling of soil-blade interaction and effect of speed and depth on subsoiler performance using discrete element method (DEM)*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. SEP. 15. University of Tehran. Karaj, Iran. (in Persian)
- Sheikh, G. S. (1989). Agricultural mechanization research development and planning. *Journal of Agricultural Science*, 21, 3-4.
- Spoor, G., & Godwin, R. J. (1978). An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(3), 243-259.
- Summers, J. D., Khalilian, A., Batchelder, D. G. (1986). Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils. *Transaction of the ASAE*, 291, 37-39.

**Research Paper****Field Assessment of Triaxial Forces on Single and Double Bentleg Plows  
at Various Forward Speeds****M. Askari\*, G. H. Shahgholi and Y. Abbaspour Gilandeh**

\*Corresponding Author: Assistant Professor of Mechanical Engineering of Biosystem, Faculty of Agricultural engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari. Iran. Email: engmohammadaskari@gmail.com.  
Received: 28 April 2017, Accepted: 26 February 2018

**Abstract**

In this research, horizontal, vertical and side forces on a single bentleg plow (SBLP) and a double bentleg plow (DBLP) at four forward speeds of 1.8, 2.3, 2.9 and 3.5 kmh<sup>-1</sup> and at the constant depth of 40 cm were evaluated. The experiment was arranged in the randomized complete block design with four replications. In each experiment, three perpendicular soil forces were measured and recorded. Results showed that increasing forward speed from 1.8 to 3.5 kmh<sup>-1</sup> resulted in increasing horizontal, vertical and side forces by 14%, 3.5% and 1% respectively for SBLP, and 13%, 1.2% and 11.5% respectively for DBLP. Other results indicated that horizontal force for DBLP was more than twice of that for SBLP. The vertical force was lower for SBLP but it was not more than half of that of DBLP, and the side force for DBLP was very less than that for SBLP. Generally, using the DBLP increases tine penetration and decreases side force which leads to balanced operation of the subsoiler and tractor, and therefore it is recommended.

**Keywords:** Dynamometer, Horizontal Force, Narrow Tillage Tine, Side Force

© 2021 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran.



[This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0 license\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)