



ارزیابی بازده کششی تراکتور مسی فرگوسن (MF285) در عملیات شخم با انواع تیغه‌های زیرشکن

غلامحسین شاهقلی^۱، عبدالمجید معین فر^۲

^۱ دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، gshahgoli@yahoo.com
^۲ دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، majid.mf93@gmail.com

چکیده

تراکم خاک یکی از مهمترین مشکلات در کشاورزی مدرن است. در سیستم های خاکورزی متفاوت، عملکرد محصول ممکن است در اثر تراکم خاک ایجاد شده در سالهای متمادی تحت تاثیر قرار گرفته و نامطلوب باشد، بنابراین در چنین شرایطی، خاکورزی عمیق توسط زیرشکن ها به منظور بهبود کیفیت خاک به خاطر شکستن تراکم خاک و ایجاد دانه بندی مناسب ضروری می باشد. اصلی ترین وظیفه یک تراکتور در مزرعه انجام عملیات های کششی مانند شخم زدن می باشد و مهمترین مبنای طراحی یک تراکتور عملکرد کششی بهینه آن در طی عملیات خاکورزی است. در این تحقیق عملکرد کششی تراکتور MF285 در عملیات شخم با انواع تیغه های زیرشکن مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین و کمترین نیروی کششی طی عملیات شخم با گاواهن پارابلو و کج ساق به ترتیب برابر با ۲۸/۹ و ۴/۹ کیلو نیوتن بدست آمد. کمترین میزان لغزش در فشار تورم ۱۱۰ کیلو پاسکال و رطوبت ۸ درصد رخ داد. بهترین بازده کششی مربوط به تیغه های کج ساق و پارابلو می باشد.

کلمات کلیدی: زیرشکن، بازده کششی، لغزش، مقاومت غلتشی

Evaluation MF285 tractor tractive efficiency during subsoiling with different tine types

Gholamhossein shahgoli, AbdolMajid Moinfar

University of Mohaghegh Ardabili, faculty of Agriculture and natural resources, Department of Biosystem Engineering
gshahgoli@yahoo.com

ABSTRACT

Soil compaction in of one of the modern agriculture problems. In different tillage systems soil compaction occurs because of different factors over the time which decreases crop yield. Hence subsoiling can shatter compacted layers and help to improve soil aggregation. The important dudty of the tractor during agricultural operations is pulling operations such and soil plowing. One the important bases in designing the tractor is its performance for tillage operations. In this research pulling performance of MF285 tractor in conduction subsoiling with different tines was evaluated. Maximum and minimum required draft were related to Paraplow and bentleg tines with values of 28.9 and 4.9 kN, respectively. Minimum slippage was obtained at tire inflation pressure of 110 kPa and soil moisture of 8%. Optimum trctive effincine was related to bentleg and paraplo. Tines.

Keywords: Tractive efficiency, subsoiler, Paraplow, rolling resistance



تراکم خاک یکی از مهمترین مشکلات در کشاورزی مدرن است. استفاده بیش از حد از ماشین‌ها، کشت فشرده، دوره تناوب کوتاه، و مدیریت خاک نامناسب منجر به تراکم می‌شود (Hamza and Anderson, 2005). در سیستم‌های خاکورزی حفاظتی، عملکرد محصول ممکن است در اثر تراکم خاک ایجاد شده در سالهای متمادی تحت تاثیر قرار گرفته و نامطلوب باشد. بنابراین حتی در چنین سیستم‌هایی، خاکورزی عمیق به منظور بهبود کیفیت پروفیل خاک ضروری می‌باشد (Schwab et al., 2002). فشردگی خاک نیروی مورد نیاز برای شل کردن خاک را افزایش می‌دهد که باعث افزایش مقاومت کششی ادوات و مصرف سوخت می‌شود (Chen and Yang, 2014). با توجه به عمق کاری زیاد، چسبندگی خاکها و رطوبت کم در طی عملیات خاکورزی، زیرشکن‌ها به توان مالبندی بالای تراکتور نیاز دارند (Sun et al., 2006). بنابراین بررسی نیروی مورد نیاز زیرشکنها، ارزیابی عملکرد کششی و مصرف سوخت تراکتورها در شرایط کاری مختلف امری ضروری بنظر می‌رسد. مقاومت کششی مورد نیاز ادوات و کیفیت خاکورزی، تابعی از خصوصیات خاک، شکل هندسی ابزار خاکورز، عمق و سرعت خاک ورزی و عرض ادوات است (Godwin, 2007; Loibl, 2006; Glancey et al., 1996; Mckey, 1985). شکل زیرشکن، عمق خاکورزی، رطوبت خاک و سرعت عملیات دارای بیشترین تاثیر با نیروی مورد نیاز خاکورزی و سطح خاک بهم خورده هستند (Celik and Raper, 2012). زیرشکن‌های کج ساق و پارابول نسبت به زیرشکن‌های مستقیم متداول ماکزیمم اختلال در خاک را توسط کمترین کشش فراهم میکنند درحالیکه اختلال در خاک سطحی کمینه باقی می‌ماند و باقی‌مانده های گیاهی بیشتری در سطح خاک باقی می‌ماند (Raper, 2007). در تحقیقات بسیاری اثر سرعت پیشروی و عمق بر مقاومت کششی مورد نیاز ادوات خاکورزی بررسی شده است. نتایج این تحقیقات نشان میدهد که با افزایش سرعت و عمق مقاومت کششی افزایش میابد (Ismail and Ashrafi Zadeh, 2006; Sahu and Raheman, 2006; Burkhardt, 1993). وظیفه تراکتور این است که با استفاده از توان موتور با حداقل مصرف سوخت بر نیروی کاری یک ابزار غلبه کند. انتقال تمامی توان موتور به ابزار ایده آل است اما در عمل به علت اتلاف انرژی توسط عواملی همانند لغزش، مقاومت غلتشی و نشست چرخ این امر غیرممکن است (Simikic et al., 2014). مفهوم لغزش چرخ در تراکتور همیشه یکی از عوامل کارآمد اصلی تأثیرگذار بر مصرف سوخت توسط تراکتور بوده است، با کاهش رطوبت مقاومت برشی خاک افزایش یافته در نتیجه نشست تایلر به داخل خاک و برش آن کاهش می‌یابد که این امر از لغزش بیشتر چرخ جلوگیری میکند (Fenyvesi et al., 2002). هنگامی که خاک مستحکم (خشک) است، پیوستگی آن بالا است که منجر به لغزش و مقاومت غلتشی کمتری میشود، درحالیکه در وضعیت پلاستیک (مرطوب) پیوستگی خاک کمتر شده بنابراین لغزش چرخ‌ها و مقاومت غلتشی بیشتر است، که باعث از دست دادن قدرت بیشتر و کاهش بهره‌وری تراکتور میشود (Battiatto et al., 2013). مقاومت غلتشی به طور فزاینده تحت تاثیر فشار تورم تایلر قرار میگیرد. فشار تورم رابطه معکوسی با مقاومت غلتشی دارد (Taghavifar and Mardani, 2013). هنگامی که لغزش چرخ تراکتور در محدوده ۷ تا ۱۵ درصد (که لغزش طبیعی در خاک است) تغییر میکند، کاهش فشار تورم باعث کاهش لغزش و مصرف سوخت می‌شود، در حالی که بهره‌وری کار را افزایش می‌دهد (Damanauskas et al., 2015). در هنگام اجرای عملیات خاکورزی در محدوده سرعت عملیاتی، به ویژه در خاک نرم، توان کششی توسط گیرایی بین چرخ محرک و خاک محدود می‌شود. به منظور بهره‌مندی کامل از قدرت موتور و استفاده از سرعت عملیاتی، باید عرض کاری افزایش یابد. به عبارت دیگر تراکتور باید با نیروی کشش بالا بکار گرفته شود. اما این وضعیت باعث میشود که لغزش چرخ محرک از حد مجاز تجاوز کند (Janulevičius et al., 2018). دو روش برای کاهش لغزش وجود دارد. استفاده از وزنه بالاست به منظور بالابردن وزن تراکتور و افزایش سطح تماس بین چرخ محرک و خاک از طریق بکارگیری چرخهایی با عرض بیشتر یا کاهش فشار تورم چرخ. محققان بیان کرده‌اند که روش دوم دارای مزیت‌های بیشتری است. باتوجه به افزایش سطح تماس فشار وارد بر خاک کاهش یافته و در نتیجه تراکم خاک کاهش می‌یابد (Saengprachatanarug et al., 2013). همچنین به علت افزایش سطح تماس چرخ با خاک مقاومت غلتشی کاهش می‌یابد (Molari et al., 2012).

هدف از این مطالعه ارزیابی بازده کششی و مصرف سوخت تراکتور MF285 در عملیات زیرشکنی با ساقه‌های متفاوت در شرایط عملیاتی متفاوت به منظور دست‌یابی به بازده کششی و مصرف سوخت بهینه می‌باشد.

۲- بخش مواد و روش‌ها

آزمون‌های مزرعه‌ای در ایستگاه پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردید. بافت خاک لومی (۰.۰۶٪ سیلت، ۴۳/۹۲٪ شن، ۲۴/۰۲٪ رس) بود. در این تحقیق از آزمایش فاکتوریل، در قالب طرح بلوکهای کامل تصادفی با ۳۶ تیمار شامل ۳ سطح رطوبت خاک، ۳ سطح رطوبتی خاک و چهار نوع تیغه زیرشکن در سه تکرار استفاده گردید. فاکتورهای اندازه‌گیری شده شامل لغزش، مقاومت غلتشی و نیروی کششی می‌باشد. بازده کششی با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$TE = \frac{D}{D + R} (100 - s) \quad (1)$$



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



که در آن D نیروی کشش (کیلو نیوتن)، R مقاومت غلتشی (کیلونیوتن)، S لغزش (%) می‌باشند.

برای اندازه‌گیری نیروی کششی ایجاد شده توسط تراکتور از یک دینامومتر اتصال سه نقطه استفاده شد که قابل تنظیم بوده و دارای سه مبدل رینگ‌گی هشت وجهی می‌باشد که هر یک از آن‌ها دارای هشت کرنش سنج مقاومتی است و نیروهای افقی وارد بر هر یک از بازوها را اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۱). این دینامومتر بین ابزار خاک‌ورزی و تراکتور قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری مقاومت غلتشی، تراکتور MF285 در حالت بدون بار توسط یک تراکتور دیگر کشیده شده و نیروی مورد نیاز توسط یک لودسل ۵ تنی نصب شده بین دو تراکتور اندازه‌گیری شد. سرعت واقعی حرکت تراکتور با در مزرعه با چرخ پنجم اندازه‌گیری شد (شکل ۲). یک حسگر مغناطیسی به چرخ پنجم متصل است که چرخش چرخنده ۱۲ دندانه‌ای را ثبت می‌کند. با تقسیم عدد نمایش داده شده در 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. که با داشتن سرعت واقعی و تئوری تراکتور لغزش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S(\%) = 1 - \frac{v_a}{v_t} \quad (2)$$

که در آن v_a سرعت واقعی، v_t سرعت تئوری می‌باشند.



Figure 1. Three-point connecting dynamometer used in this research

شکل ۱- دینامومتر اتصال سه نقطه بکار گرفته شده در این تحقیق



Figure 2 . The fifth wheel used to measure the actual speed of the tractor

شکل ۲- چرخ پنجم مورد استفاده برای اندازه‌گیری سرعت واقعی حرکت تراکتور



نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل محتوای رطوبت، فشار تورم تایر و نوع تیغه زیرشکن بر نیروی کششی، مقاومت غلتشی، لغزش چرخ‌های محرک و بازده کششی تراکتور MF285 در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل محتوای رطوبت، فشار تورم تایر و نوع تیغه زیرشکن بر نیروی کششی، مقاومت غلتشی، لغزش چرخ‌های محرک و بازده کششی تراکتور MF285

Table 1. Results of analysis of variance of the main and the mutual effects of moisture content, tire inflation pressure and type of sub-blade type on tensile strength, rolling resistance, wheel slip and tractor stretch efficiency MF285

Factor	DOF	Mean square			
		Draft	Slip	Rolling resistance	Tractive efficiency
Block	2	0.007	0.099	0.0038	3.84
Tine	3	205.9**	247.3**		84.99**
Moisture content (%)	2	584.6**	710.2**	0.017**	317.2**
Tire inflation pressure	2		529.4**	0.098**	292.2**
Tine× Moisture content (%)	6	15.36**	35.4**		2.9**
Tine× Tire inflation pressure	6		4.54**		120.7**
Moisture content (%)×Tire inflation pressure	4		8.5**	0.00081**	4.6**
Tine× Moisture content (%)×Tire inflation pressure	12		0.711**		0.729 ^{ns}
Error	70	0.024	0.013	0.000001	0.422
Total	107				

**highly significant, *significant, ^{ns}not significant

مقایسه میانگین اثر متقابل محتوای رطوبت-نوع تیغه در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص است که تیغه پارابلو پره دار دارای بیشترین مقدار نیروی کششی بوده و تیغه کج ساق دارای کمترین نیروی کششی می‌باشد. علت این امر می‌تواند به دلیل پره و شکل خاص تیغه پارابلو باشد که باعث تغییر شکل و خردشدگی بیشتر خاک شده و در نتیجه نیروی بیشتری نیز مصرف می‌کند. افزایش نیروی کشش در تیغه‌های دارای پره در کار محققان دیگر نیز گزارش شده است (Askari et al., 2017; Raper, 2007). از شکل (۳) می‌توان یافت که کاهش رطوبت تاثیر منفی بر نیروی کششی داشته است و در رطوبت ۸ درصد برای تمامی تیغه‌ها نیروی کشش افزایش یافته است با افزایش رطوبت استحکام بین ذرات خاک کمتر شده و عملاً خاک بجای خورد شدن برش می‌خورد و در نتیجه عبور زیرشکن از میان خاک مرطوب به نیروی کمتری نیاز دارد همچنین در تیغه پارابلو-پره دار به علت وجود پره کاهش رطوبت تاثیر بیشتری بر افزایش نیروی کشش داشته است در حالی که تیغه کج ساق بخاطر هندسه چاقو ماندش به راحتی در خاک حرکت کرده و کاهش رطوبت تاثیر چندانی بر افزایش نیروی کشش ندارد (Raper and Sharma, 2004).

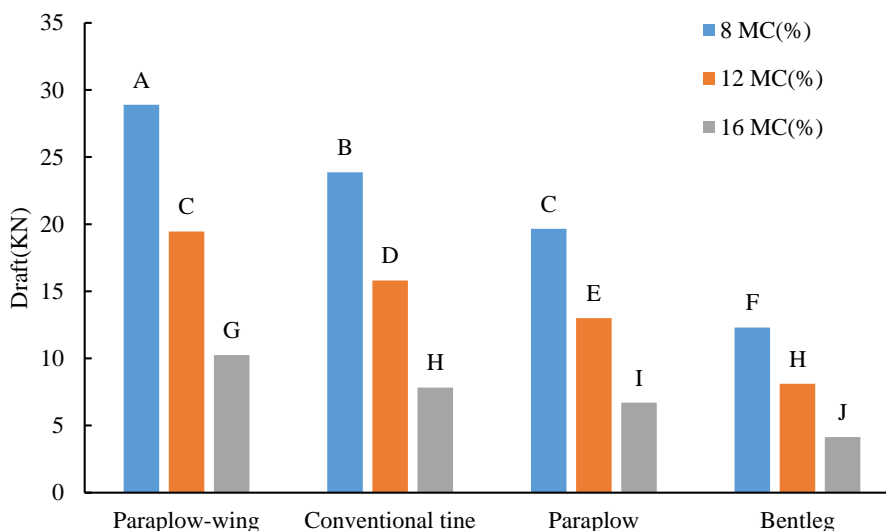


Fig 3. Mutual binary effects of moisture content and type of blade on draft

شکل ۳- اثر متقابل محتوای رطوبت-نوع تیغه بر نیروی کششی



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



مقایسه میانگین اثر متقابل محتوای رطوبت- فشار تورم تایر در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) می توان نتیجه گرفت که با کاهش فشار تورم تایر می توان از مقاومت غلتشی چرخها کاست. با کاهش فشار تورم نشست چرخ به داخل خاک کمتر شده و انرژی کمتری برای برهم زدن خاک مصرف می شود همچنین سطح تماس تایر با سطح خاک بیشتر شده و درگیری بهتری بین چرخ و خاک رخ می دهد که این امر باعث کاهش مقاومت غلتشی چرخ می شود (Damauskas et al., 2015). در شکل (۴) دیده می شود که افزایش رطوبت تاثیر منفی بر حرکت چرخ در خاک دارد و با افزایش رطوبت چسبندگی خاک به چرخ بیشتر شده که این امر باعث مصرف انرژی و افزایش مقاومت غلتشی می شود. همچنین در خاک های مرطوب تراکم خاک شدیدتر بوده و چرخ تا عمق بیشتری در خاک نفوذ کرده که همین امر باعث افزایش مقاومت غلتشی می شود (Fenyvesi et al., 2002). در تمامی فشارهای تورم مقدار افزایش مقاومت غلتشی بین رطوبت ۸ و ۱۲ درصد شدیدتر بوده است.

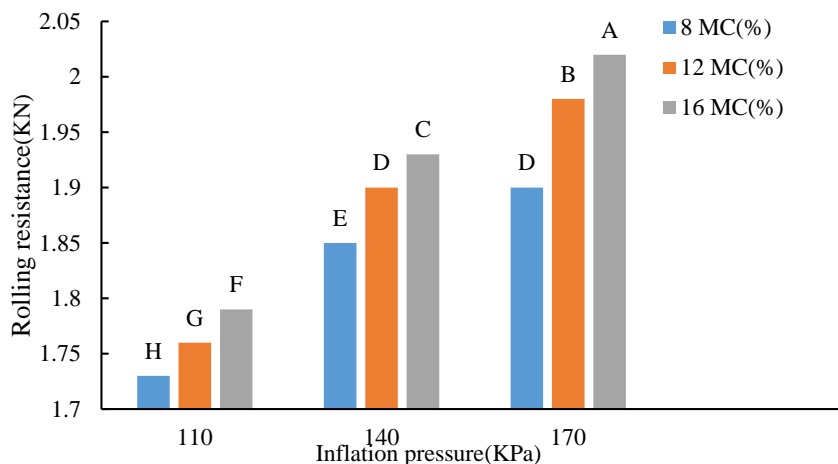


Fig 4. Mutual binary effects of moisture content and Inflation pressure on Rolling resistance

شکل ۴- اثر متقابل محتوای رطوبت-فشار تورم تایر بر مقاومت غلتشی

در جدول (۲) مقایسه میانگین های اثر متقابل فشار تورم تایر-محتوای رطوبت-نوع تیغه زیرشکن بر لغزش ارائه شده است. همانطور که از جدول (۲) مشخص است در شرایط مشابه حرکت با تیغه پارابلو-پره دار نسبت به سایر تیغه ها لغزش بیشتری در چرخ محرک تراکتور ایجاد می کند دلیل این امر می تواند به نیروی کشش بیشتری که به این تیغه ها وارد می شود نسبت داده شود. بنابر گفته محققان بسیاری نیروی کشش وارد بر تراکتور مهمترین علت ایجاد لغزش در چرخ تراکتور می باشد و برای ایجاد نیروی کشش چرخ ناگریز دچار لغزش می شود (Peca et al., 2010; Battiato and Diserens, 2013). با توجه به جدول (۲) افزایش فشار تورم عامل دیگری است که باعث افزایش لغزش می شود. محققان بسیاری بیان کرده اند که افزایش سطح تماس چرخ با زمین درگیری چرخ با خاک را بهتر می کند و از لغزش چرخ جلوگیری می شود کاهش فشار تورم یکی از راه هایی است که باعث افزایش سطح تماس چرخ با زمین می شود و در نتیجه لغزش را کاهش می دهد (Keller, 2005; Saengprachatanarug et al., 2013). در شرایط عادی کاهش رطوبت باعث کاهش لغزش می شود و چرخ راحت تر در خاک حرکت می کند اما از سوی دیگر در رطوبت های پایین نیروی کشش ایجاد شده بسیار بالاتر می باشد و عامل باعث افزایش لغزش شده است.

جدول ۲- مقایسه میانگین های اثر متقابل فشار تورم تایر-محتوای رطوبت-نوع تیغه زیرشکن بر لغزش

Table 2. Mutual binary effects of moisture content, Inflation pressure and type of blade on slip

Inflation pressure(Kpa)	Moisture content (%)	Tine			
		Paraplow-wing	Conventional tine	Paraplow	Bentleg
110	8	18.13 ^E	13.77 ^I	12.5 ^J	8 ^{PQ}
	12	11.27 ^L	10.01 ^N	7.96 ^{PQ}	6.25 ^{RS}
	16	6.2 ^S	5.9S ^T	5.74 ^T	3.88 ^V
140	8	21.27 ^C	15.5 ^G	15.08 ^H	9.6 ^O
	12	14.02 ^I	12.61 ^J	10.07 ^N	7.9 ^{PQ}
	16	8.14 ^P	7.82 ^{PQ}	7.65 ^Q	5.15 ^U
170	8	27.01 ^A	22.03 ^B	19 ^D	12 ^K
	12	17.8 ^E	16.02 ^F	12.88 ^J	10 ^N
	16	10.5 ^M	10.01 ^N	9.8 ^{NO}	6.6 ^R



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



در شکل (۵) مقایسه میانگین اثر متقابل محتوای رطوبت- نوع تیغه زیرشکن نمایش داده شده است. بیشترین بازده کششی برای تیغه کج ساق در رطوبت ۸ درصد و تیغه پارابلو در رطوبت ۱۲ درصد بدست آمده است که برابر با ۷۸/۵ درصد می باشد. همچنین کمترین بازده کششی برای تیغه کج ساق در رطوبت ۱۶ درصد برابر با ۶۴/۸ درصد و در تیغه پارابلو در رطوبت ۱۶ درصد برابر با ۷۱/۸ درصد بدست آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده بسته به رطوبت خاک و نیروی کشش و لغزش ایجاد شده هر یک از تیغه‌ها می توانند عملکرد خوب یا بدی داشته باشند هرگاه نیروی کشش بزرگتر از مقاومت غلتشی بوده و لغزش زیادی هم رخ ندهد بالاترین بازده کششی بدست می آید. همچنین در شکل (۶) مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت- فشار تورم بر بازده کششی نمایش داده شده است با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش فشار تورم به علت افزایش لغزش و مقاومت غلتشی بازده کششی تراکتور در تمامی رطوبت ها افت کرده است و کمترین مقدار ممکن بوده است.

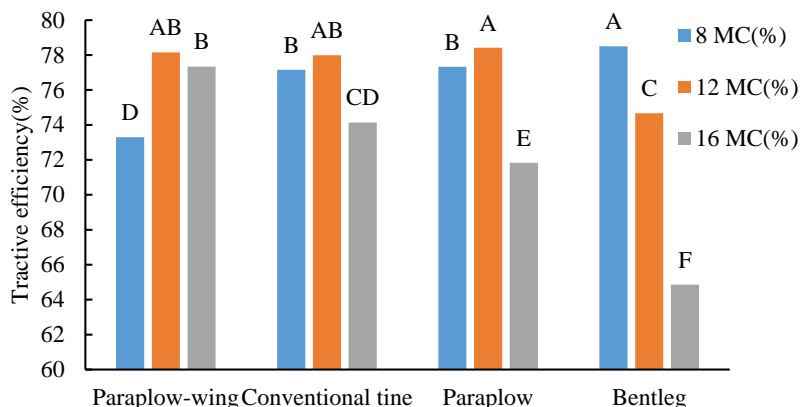


Fig 5. Mutual binary effects of moisture content and type of blade on Tractive efficiency

شکل ۵- اثر متقابل محتوای رطوبت-نوع تیغه بر بازده کششی

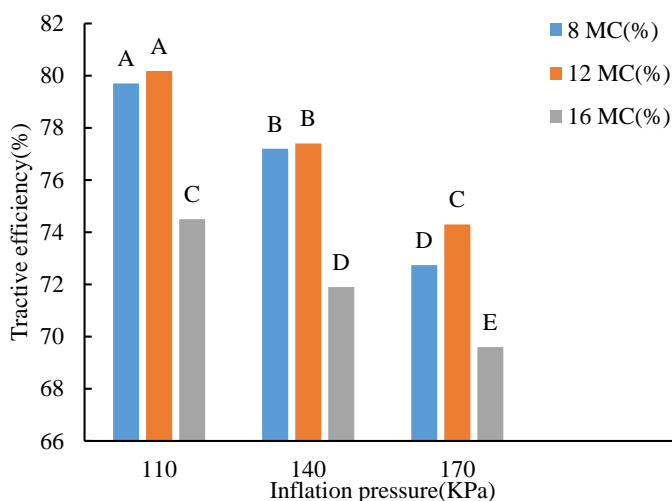


Fig 6. Mutual binary effects of moisture content and Inflation pressure on Tractive efficiency

شکل ۶- اثر متقابل محتوای رطوبت-فشار تورم بر بازده کششی

۴- نتیجه گیری

مقاومت کششی تیغه پارابلو-پره دار به علت دارا بودن پره و بهم زدن بیشتر سطح خاک از سایر تیغه‌ها بیشتر می باشد. هرچه خاک خشک تر باشد نیروی مورد نیاز برای حرکت تیغه در خاک افزایش می یابد اما مقاومت غلتشی و لغزش چرخ‌ها در خاک‌های خشک کمتر می باشد. با کاهش فشار تورم تایر می توان لغزش و مقاومت غلتشی چرخ‌ها را کاهش داد و در سطح لغزش کمتری به حداکثر نیروی کششی رسید.



- 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. USA.
- Askari, M., Shahgholi, GH., Abbaspour-Gilandeh, Y. (2017). The effect of tine, wing, operating depth and speed
- Battiato, A., & Diserens, E. (2013). Influence of Tyre Inflation Pressure and Wheel Load on the Traction Performance of a 65 kW MFWD Tractor on a Cohesive Soil. *Journal of Agricultural Science*, 5(8), 197-215.
- Battiato, A., Diserens, E., Laloui, L., & Sartori, L. (2013). A Mechanistic Approach to Topsoil Damage due to Slip of Tractor Tyres. *Journal of Agricultural Science and Applications*, 2(3), 160-168.
- Celik A, Raper RL. (2012). Design and evaluation of ground-driven rotary subsoilers. *Soil Till Res.* 124(4):203–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.06.010>.
- Chen H, Yang YL. (2014). Effect of traffic and tillage on agriculture machine traction and fuel consumption in Northern China plain. *Adv J Food Sci Tech*;6(4):484–9. <http://dx.doi.org/10.19026/ajfst.6.58>.
- Damauskas, V., Janulevičius, A., Pupinis, G. (2015). Influence of Extra Weight and Tire Pressure on Fuel Consumption at Normal Tractor Slippage. *Journal of Agricultural Science*, 7(2), 55-67.
- Fenyvesi, L., Jóri, I. and Borsa, B. (2002). Reduction of the Energy Requirement by New Soil Cultivation Tools. ASAE/CIGR Paper No. 021140, Proceeding of ASAE/CIGR Annual International Meeting. Chicago July,
- Glancey J. L., Upadhyaya, S. K., Chancellor, W. J. and Rumsey, J. W. (1996). Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. *Soil. Till. Res.* 37, 47-65.
- Godwin, R. J. (2007). A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil and Tillage Research*, 97(2): 331-340.
- Hamza M, Anderson WK. (2005). Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till Res*;82(2):121–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.
- Ismail, W. I. W. and Burkhardt, T. H. (1993). Draft and fuel requirements measurement using tractor onboard data acquisition system. *Pertanika J. Sci. Tech.* 1(1): 51-64.
- Janulevičius, A., Damauskas, V., Pupinis, G. (2018). Effect of variations in front wheels driving lead on performance of a farm tractor with mechanical front-wheel-drive. *Journal of Terramechanics*, 77, 23-30.
- Loibl, B. (2006). Classification of tillage systems by including soil covering. *Landtechnik*, 61(SH): 302-303.
- Mckeys, E. (1985). *Soil Cutting and Tillage*. Elsevier Science Publisher, Amsterdam.
- Molari, G., Bellentani, L., Guarnieri, A, Walker, M., & Sedoni, E. (2012). Performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks. *Biosystems engineering*, 111, 57-63.
- on the draft requirement of subsoil tillage tines. *Res. Agr. Eng.* 63(4): 160–167.
- Peca, J. O., Serrano, J. M., Pinheiro, A., Carvalho, M., Nunes, M., Ribeiro, L., & Santos, F. (2010). Speed advice for power efficient drawbar work. *Journal of Terramechanics*, 47, 55-61.
- Raper, R.L. (2007). In-row subsoilers that reduce soil compaction and residue disturbance. *Appl. Eng. Agric.* 23:253-258.
- Raper, R.L., and A.K. Sharma. (2004). Soil moisture effects on energy requirements and soil disruption of subsoiling a coastal plain soil. *Trans. ASAE* 47:1899-1905.
- Saengprachatanarug, K., Ueno, M., Taira, E., & Okayasu, T. (2013). Modeling of soil displacement and soil strain distribution under a traveling wheel. *Journal of Terramechanics*, 50, 5-16.
- Sahu, R. K. and Raheman, H. (2006). Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosys. Eng.* 94(2): 275-284.
- Schwab, E.B., Burmester, C.H. and Raper, R.L., (2002). Conservation tillage systems for cotton grown on a silt loam soil in the Tennessee Valley. *Journal of Soil Science*, 66(3), pp. 569-577.
- Simikic, M., Dedovic, N., Savin, L., Tomic, M., Ponjican, O. (2014). Power delivery efficiency of a wheeled tractor at oblique drawbar force. *Soil and Tillage Research*, 141: 32-43.
- Sun, J., Wang, Y., Ma, Y., Tong, J., Zhang, Z., (2018). DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Adv Eng Software*, 119: 30-37.
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2013). Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics*, 50, 99-106.
- Keller, T. (2005). A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, 92(1), 85-96.