

توان و انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات سبک کشاورزی با تراکتور الکتریکی هیبریدی و مقایسه آن با نتایج عملی

حسین موسی زاده*، علیرضا کیهانی، ارژنگ جوادی، حسین مبلی، کارن ابری نیا و احمد شریفی**

* نگارنده مسئول، نشانی: دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تلفن: ۲۸۰۱۰۱۱ (۰۲۶۱)، پیام‌نگار: hmousazade@gmail.com

** به‌ترتیب: دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران؛ استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران؛ دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج، استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران؛ دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران و استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج
تاریخ دریافت: ۸۹/۶/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱۴

چکیده

مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی، منجر به انتشار آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای (GHG) فراوانی شده است. مشکلات ناشی از استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی و پیش‌بینی پایان‌پذیر بودن این سوخت‌ها، یافتن فناوری‌های نوین به‌جای سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی را اجتناب‌ناپذیر نموده است. هم‌زمان با سایر زمینه‌های فناوری، ضروری است صنعت کشاورزی نیز خود را آماده این جایگزینی کند. بر همین اساس، پروژه سافت ($SAPHT$) برای کارهای سبک کشاورزی از قبیل کاشت محصولات ردیفی، بذر پاشی، درو علوفه، سم‌پاشی، جابه‌جایی محصول در مزرعه، کارهای ثابت ایستگاهی، و برخی دیگر از عملیات طراحی و ساخته شد که به توان مصرفی پایین‌تری نیاز دارند. سافت، تراکتور هیبریدی دو چرخ محرک با موتورهای الکتریکی مستقل روی هر چرخ عقب است. بخشی از انرژی سافت از خورشید و بخش دیگر از شبکه برق تأمین می‌شود. در این تحقیق ارزیابی مزرعه‌ای سافت و همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و عملی بررسی می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که سافت قابلیت جایگزین شدن با تراکتورهای گروه "I" را دارد و با طراحی‌های انجام گرفته می‌تواند روزانه بین دو تا چهار ساعت عملیات مختلف کشاورزی را به انجام برساند. با بهبود برخی از سیستم‌های استفاده شده (مثل باتری) محدوده کاری سافت را می‌توان به بیش از سه برابر در روز افزایش داد.

واژه‌های کلیدی

انرژی تجدیدپذیر، آلاینده‌ها، تراکتور هیبریدی، توان کششی، مقاومت لغزشی

فهرست حروف اختصاری و واژه‌های متناظر آنها

a_{lacc}	شتاب خطی، [متر بر مجذور ثانیه]	F_{lacc}	نیروی لازم برای ایجاد شتاب خطی، [نیوتن]	P_{BATT}	توان باتری، [کیلووات]	W	عرض ادوات، [متر یا تعداد ردیف]
A	سطح مساحت جلویی، [متر مربع]	F_{racc}	نیروی لازم برای ایجاد شتاب دورانی، [نیوتن]	P_m	توان موتور محرک، [کیلووات]	α	شیب جاده، [درجه]
C_d	ثابت نیروی مقاوم حرکت	F_{roll}	نیروی مقاوم غلتشی، [نیوتن]	P_{PTO}	توان موتور PTO ، [کیلووات]	$\dot{\theta}$	سرعت زاویه‌ای موتور، [ارادیان بر ثانیه]

شتاب زاویه‌ای موتور، [رادیان بر ثانیه]	$\ddot{\theta}$	توان آرایه PV، [کیلووات]	P_{PV}	نیروی کشش، [نیوتن]	F_t	ضریب مقاومت غلتشی	C_{roll}
بازده بسته باتری	η_{BAT}	شعاع چرخ محرک، [متر]	r	نسبت کاهش دور موتورهای پیش‌ران	g	نیروی لازم برای شتاب‌دهی، [نیوتن]	F_{acc}
بازده سیستم جعبه دنده	η_g	عمق خاک‌ورزی، [سانتی‌متر]	T	نسبت کاهش دور موتور PTO	G_2	نیروی آبرودینامیکی، [نیوتن]	F_{air}
بازده موتور و کنترلر آن	η_m	گشتاور موتور پیش‌ران، [نیوتن متر]	Tm	ممان اینرسی، [کیلوگرم متر مربع]	I	نیروی کشش مالبندی، [نیوتن]	F_{dra} $wbar$
بازده موتور PTO	η_{PTO}	سرعت حرکت، [کیلومتر بر ساعت]	V	وزن SAPHT به همراه وزن راننده، [کیلوگرم]	m	نیروی بالاروی از شیب، [نیوتن]	F_{hill}
چگالی هوا، [کیلوگرم بر متر مکعب]	ρ	سرعت باد، [کیلومتر بر ساعت]	V_w	توان مورد نیاز برای سایر مصرف‌کننده‌ها، [کیلووات]	P_a	متغیری معرف بافت خاک	F_i
بازده آرایه PV	η_{PV}						

مقدمه

می‌دهد که این وسیله نقلیه یکی از نویدبخش‌ترین تکنولوژی‌ها برای تولید وسایل نقلیه با بازدهی بالای سوخت، آلودگی کمتر و سامانه‌های رانش جدید است که از دو یا چند منبع انرژی تشکیل می‌شود و انرژی مورد نیاز را برای موتورهای الکتریکی کششی و محرک چرخ‌ها تأمین می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که یک اتوبوس هیبریدی نمونه در مقایسه با انواع مرسوم، در مسافتی یکسان می‌تواند مصرف سوخت را تا ۴۰ درصد کاهش دهد (Khanipour et al., 2007). طبق مطالعات انجام شده برای سیکل رانشی و محدوده کاری EVs مشخص شده، از جمله عوامل اصلی که چرخه رانشی این وسایل نقلیه را تحت تأثیر قرار می‌دهند یکی زمان دشارژ و دیگری سطح حداکثر جریان یا سطح توانی است که دریافت می‌شود (Felner et al., 2000). با وجود سال‌ها پیشرفت در تکنولوژی ICEV، بازده کلی آنها، (از نفت خام تا چرخ‌ها)، در محدوده بین ۱۵ تا ۱۹ درصد است. همچنین مشخص شده که هزینه طول عمر یک EV کمتر از هزینه طول عمر یک ICEV قابل مقایسه است ضمن اینکه EV بسیار قابل اطمینان است و به نگهداری کمتری نیاز دارد (Husain, 2005). از طرف دیگر، EVs در مقایسه با ICEVs برای یک محدوده کاری مشخص، چگالی انرژی

بشر در پایان قرن ۲۱ و تنها طی ۴۰۰ سال فعالیت صنعتی، بیشتر سوخت‌های فسیلی را که طی ۴۰۰ میلیون سال در پوسته زمین ذخیره شده است تمام خواهد کرد. سوزاندن زغال سنگ، نفت و گاز، مقادیر زیادی دی‌اکسید کربن در جو آزاد می‌کند و آب و هوای کره زمین را تغییر می‌دهد. بنابراین، یافتن منابع انرژی پاک به جای سوخت‌های فسیلی ضروری است با مصرف آنها از تخریب محیط زیست جلوگیری می‌شود.

بخش عظیمی از سوخت‌های فسیلی را وسایل نقلیه جاده‌ای و غیر جاده‌ای مصرف می‌کنند. بنابراین طراحی، ساخت، و بهبود وسایل نقلیه‌ای که قابلیت کار با انرژی‌های نو ظهور را داشته باشند ضروری است. برای تعیین محدودیت‌ها و مزیت‌های وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) و انواع مرسوم^۱ (ICEV) تحقیقات فراوانی شده است. وسایل نقلیه الکتریکی مزایای زیادی نسبت به وسایل نقلیه مرسوم دارند که می‌توان به مواردی همچون نداشتن گازهای آلاینده، بازدهی بالا، نداشتن وابستگی به سوخت‌های فسیلی، و کارکرد آرام و نرم آنها اشاره کرد (Ehsani et al., 2005). مقایسه بین طراحی وسیله نقلیه مرسوم و وسیله نقلیه الکتریکی هیبریدی (HEV) نشان

1-Internal Combustion Engine Vehicle

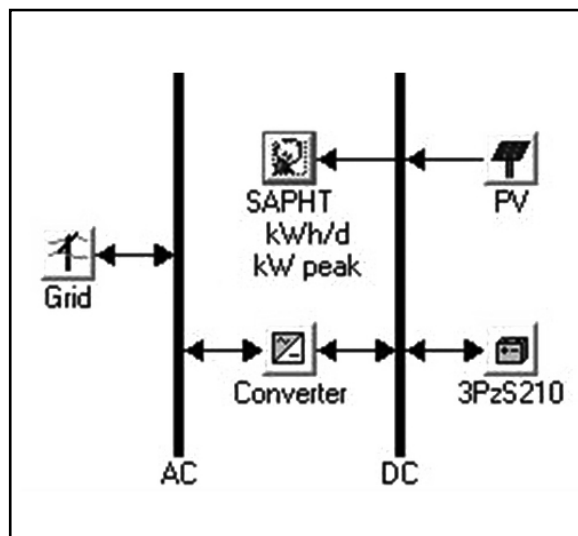
توان و انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات...

از عملیات نیازمند به توان مصرفی پایین‌تر، تراکتوری هیبریدی تحت عنوان "SAPHT" طراحی و ساخته شد. سافت، تراکتوری است دو چرخ محرک با موتورهای الکتریکی مستقل روی هر چرخ عقب. شکل ۱، طرحواره پروژه سافت را نشان می‌دهد. مطابق شکل، این تراکتور، توان الکتریکی را از دو منبع متفاوت دریافت می‌کند. منبع توان اولیه از تعدادی پانل خورشیدی تشکیل شده است که علاوه بر تأمین بخشی از توان مورد نیاز سایه‌بان راننده نیز محسوب می‌شود. منبع دیگر توان، شبکه برق است.

پایین‌تری دارند. همچنین هزینه اولیه *EVs* محدودیتی مهم به شمار می‌رود. در این تحقیق، توان و انرژی بهینه^۱ *SAPHT* با استفاده از روابط ریاضی شبیه‌سازی و نمودارهای آن رسم شده است. همچنین، محدوده کاری آن برای شش عدد از ادوات رایج کشاورزی به صورت نظری و مزرعه‌ای محاسبه و مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

برای کارهای سبک کشاورزی از قبیل کشت محصولات ردیفی، بذر پاشی، درو علوفه، سم‌پاشی، حمل محصول در مزرعه، کارهای ثابت ایستگاهی، و برخی دیگر



شکل ۱- طرحواره پروژه سافت

گشتاور، توان، و محدوده کاری قابل دسترسی از عوامل اساسی برای طراحی هستند. با طراحی بهینه سامانه‌هایی مانند باتری، موتور، جعبه‌دنده و ... می‌توان تمامی ادوات استاندارد را به سافت متصل و تواندهی کرد. در این تحقیق، شش وسیله از ادوات استاندارد به سافت متصل و ارزیابی شدند: گاوآهن برگرداندار تک خیشه، ردیفکار، پی‌نورد (تریلر)، سم‌پاش پشت تراکتوری بوم دار، بذرپاش، و دروگر تیغه‌ای (شکل ۲). در تراکتورهای

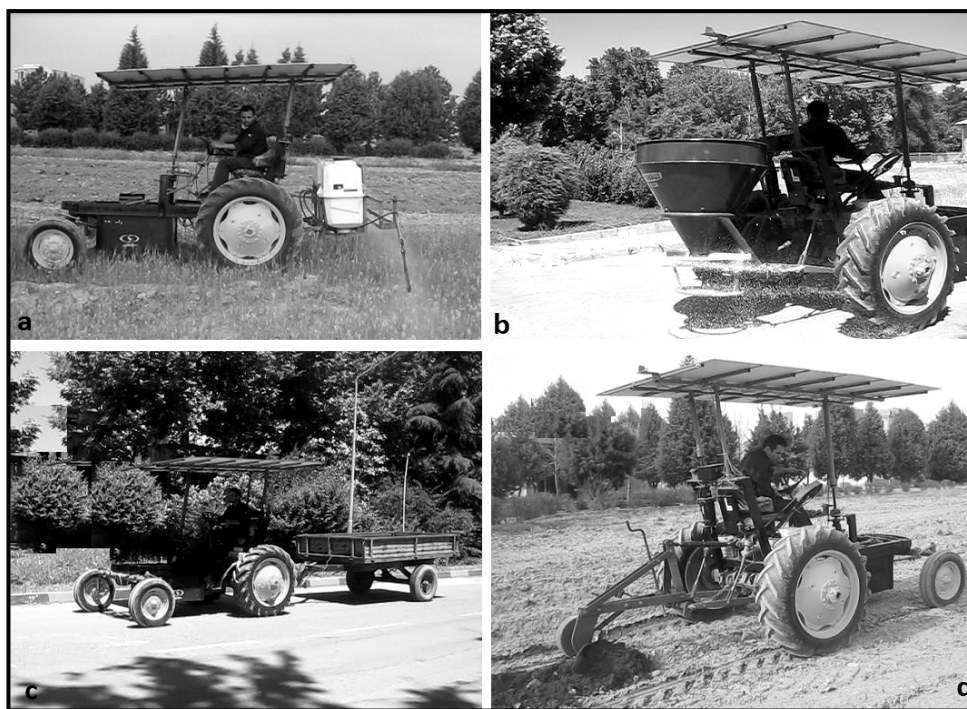
آرایه‌های فتوولتاییک در بالای سافت طوری طراحی و نصب شده‌اند که قابلیت ردیابی خورشید را به صورت اتوماتیک و نیز دستی دارند. اساس ردیابی خورشید برای آرایه‌های بالای سافت، استفاده از چهار حسگر فتورزیستو است. سافت نیز مانند سایر تراکتورها، سامانه اتصال سه نقطه و محور تواندهی (*PTO*) استاندارد (۱۰۰۰-۵۴۰ دور در دقیقه) دارد و از لحاظ توان عملیاتی می‌توان آن را با تراکتورهای گروه I^{12} مقایسه کرد. در تراکتور الکتریکی،

1-Solar Assist Plug-in Hybrid electric Tractor

2- I category :15-35 kWh (ASABE, 2006a)

ظرفیت باتری، و محدوده کاری که سافت با ادوات مختلف عمل خواهد کرد. این متغیرها هم به صورت محاسباتی و هم به صورت کار میدانی ارزیابی شدند.

الکتریکی نیز، مانند تراکتورهای مرسوم، پیش‌بینی عملکرد و تعیین محدوده کاری بسیار با اهمیت و ضروری است. متغیرهایی که باید مدل شوند عبارت‌اند از: سرعت، شتاب، نیروی کششی مالبندی، توان *PTO*،



شکل ۲- عملیات مزرعه‌ای با: (a) سم پاش بوم دار، (b) کود پاش، (c) کشش پی نورد (تریلر)، و (d) گاواهن برگرداندار

و بعضی از ابزارهای خاک‌ورزی در عمق‌های کم، اساساً تابعی است از عرض کار ادوات و سرعت کششی. برای ابزارهای عمیق-کار خاک‌ورزی، نیروی کششی نیز بستگی به بافت خاک، عمق، و هندسه ابزار خاک‌ورز دارد. نیروی کششی لازم را می‌توان به صورت رابطه ۲ نشان داد (ASABE, 2006b):

$$F_{drawbar} = F_i \cdot [A + B(V) + C(V)^2] \cdot W \cdot T \quad (2)$$

که در آن،

F_i (بدون بعد) متغیری است برای تبیین بافت خاک، i

مدل کردن گشتاور، توان، و انرژی

نیروی کششی لازم، F_t برای کشش سافت و ادوات متصل شده را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ نمایش داد:

$$F_t = F_{roll} + F_{air} + F_{acc} + F_{hill} + F_{drawbar} \quad (1)$$

که در آن،

F_{roll} = نیروی مقاومت غلتشی؛ F_{air} = نیروی آیرودینامیکی؛ F_{acc} = نیروی لازم برای اعمال شتاب خطی و شتاب دورانی؛ F_{hill} = نیروی لازم برای غلبه بر شیب تپه؛ و $F_{drawbar}$ = نیروی لازم برای کشش ادوات در زمین است. نیروی کششی لازم برای کشیدن بسیاری از ادوات کاشت

توان و انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات...

عرض ماشین؛ و T بر حسب (سانتی‌متر) عمق خاک‌ورزی برای ادوات عمیق کار و برابر است با یک (بدون واحد) برای برخی ادوات که در عمق کم کار می‌کنند. مقادیر عنوان شده برای رابطه ۲ در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

برای خاک‌های سبک، متوسط و سنگین به ترتیب برابر است با یک، دو و سه؛ A ، B و C (بدون بعد) متغیرهای مخصوص ادوات هستند؛ V بر حسب (کیلومتر بر ساعت) سرعت مزرعه‌ای عملیات است؛ W (بر حسب متر یا تعداد ردیف) عبارت است از

جدول ۱- متغیرهای کششی برای دو نوع ادوات کشاورزی (ASABE, 2006b)

A	B	C	$F1$	$F2$	$F3$	واحد یا ردیف	
۶۵۲	۰	۵/۱	۱	۰/۷	۰/۴۵	متر	گاواهن برگرداندار
۵۰۰	۰	۰	۱	۱	۱	ردیف	ردیف‌کار سوار، در مزرعه آماده شده

با جاگذاری مقادیر مربوط به نیروهای مختلف در رابطه (۱) نیروی کششی لازم برای چرخ‌های سافت F_t (N) را می‌توان به صورت رابطه ۳ نشان داد:

سرعت عملیاتی شش وسیله از ادوات آزمایش شده در جدول (۲) نشان داده شده است، این جدول مقادیر نیروها و توان لازم برای عملیات در مزرعه را از منابع مختلف نشان می‌دهد.

$$F_t = C_{roll} mg + \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d \cdot (V + V_w)^2 + m \cdot a_{lacc} + I \cdot \frac{G^2}{r^2} \cdot a_{lacc} + m \cdot g \cdot \sin \alpha + F_{drawbar} \quad (3)$$

شده است (Larminie & Lowry, 2003). همچنین r بر حسب (متر) شعاع تایلر محرک و α بر حسب رادیان شیب مزرعه یا جاده، و I بر حسب کیلوگرم بر متر مربع ممان اینرسی روتور موتور است. بعضی منابع توصیه کرده‌اند که به جای تعیین I و محاسبه شتاب دورانی بهتر است به جرم وسیله نقلیه در شتاب خطی مقدار ۵ درصد اضافه شود (Larminie & Lowry, 2003).

که در آن، m بر حسب (کیلوگرم) مجموع وزن سافت و اپراتور، g بر حسب (متر بر مجذور ثانیه) شتاب ثقل، C_{roll} ضریب مقاومت غلشی تایلر، ρ بر حسب (کیلوگرم بر متر مکعب) چگالی هوا، A بر حسب (متر مربع) سطح مقطع جلوی سافت، V_w بر حسب (کیلوگرم بر ساعت) سرعت وزش باد و C_d ثابت پسا نامیده می‌شود. برای چگالی هوا مقدار متوسط ۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب توصیه

جدول ۲- توان مورد نیاز و سرعت عملیات مزرعه‌ای ادوات آزمایش شده

مرجع	ادوات نیازمند توان کششی			ادوات نیازمند PTO			سرعت کیلومتر بر ساعت
	گاواهن برگرداندار (خاک با عمق متوسط ۱۵ سانتی‌متر)	ردیف‌کار سوار	انتقال محصول	سمپاش بوم دار	کودپاش/ دانه پاش	دروگر شانه‌ای	
(Hunt, 2001)	۵-۹	۷-۱۰		۷-۱۰	۶-۱۰	۶-۱۰	
(Kepner et al., 1978)	۵/۶-۸/۹	۵/۶-۹/۷	۲-۲۶	۴/۸-۸	۶/۴-۱۰	۵/۶-۸/۹	
(ASABE 2006b)	۵-۱۰	۶/۵-۱۱		۵-۱۱/۵	۸-۱۶	۵-۱۰	
	۷/۲	۸	-	۷/۷	۹/۴	۷/۵	میانگین سرعت کیلومتر بر ساعت
(Hunt, 2001)	۵/۳-۹/۵ کیلونیوتن بر متر	۰/۴۵-۰/۸ کیلونیوتن بر ردیف	-	۰/۲ کیلووات بر متر	۰/۷-۲ کیلووات	۱-۱/۲ کیلووات بر متر	
(Kepner et al., 1978)	۶/۱-۱۱ کیلونیوتن بر متر	۰/۴۵-۰/۸ کیلونیوتن بر ردیف	-	-	-	۱-۲ کیلووات بر متر	نیروی کششی یا توان مورد نیاز
(ASABE, 2006b)	۹/۵ کیلونیوتن بر متر	۰/۵ کیلونیوتن بر ردیف	-	-	-	۱/۲ کیلووات بر متر	
	۶ کیلونیوتن بر متر	۰/۵۸ کیلونیوتن بر ردیف* (۰/۷۷) کیلونیوتن بر (متر)	$f(m, V)^{**}$	۰/۲ کیلووات بر متر	۱/۴ کیلووات	۱/۲۶ کیلووات بر متر	میانگین نیرو یا توان

* تقریباً یک فاصله ۷۵ cm بین ردیف‌ها در نظر گرفته شد.

** نیروی کششی برای حمل محصولات در مزرعه با استفاده از تریلر، اساساً رابطه‌ای است از جرم (m) و سرعت پیشروی (V).

کشیده شد. با استفاده از میکروکنترلر برد الکترونیکی رابطی طراحی و ساخته شد تا داده‌های لودسل را پس از دریافت کردن، آمپلی فایر (با افزایش ۱۰۰) و فیلتر کند، از آنالوگ به دیجیتال تبدیل کند، میانگین‌گیری کند و سرانجام با پورت سریال به کامپیوتری ارسال کند که روی سافت قرار داده شده است. داده‌های جمع‌آوری شده برای رسم نمودار مقاومت غلتشی در هر یک از خاک‌های گفته شده، از داده‌های جمع‌آوری شده استفاده شد.

منابع مختلفی وجود دارند که ضریب مقاومت غلتشی (C_{roll}) را اندازه‌گیری و گزارش کرده‌اند، ولی برای اندازه‌گیری دقیق C_{roll} تحت شرایط مخصوص به خود سافت از جمله اندازه تایر، سرعت عملیات و ... چندین آزمایش مختلف مزرعه‌ای انجام گرفت. بدین منظور با استفاده از یک لودسل S شکل ۲۰۰۰ kg، سافت به تراکتور دیگری متصل و در خاک‌های مختلف: جاده آسفالت، جاده شنی روستایی، مزرعه شخم نخورده، و مزرعه شخم خورده

توان و انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات...

باتری (شرایط شارژ) منفی لحاظ شده است. توان کلی باتری در سافت باید متناسب با: توان مورد نیاز موتورهای رانش (P_m)، توان موتور PTO (P_{PTO}) و توان آرایه PV (P_{PV}) باشد. عبارت P_{PTO} از توان مورد نیاز برای رانش ادوات الحاق شده به سامانه PTO . این توان را می توان برای ادوات مختلف از جدول ۲ استخراج کرد. بنابراین، با در نظر گرفتن توان های ورودی و خروجی به این باتری می توان گفت P_{PV} همیشه منفی است.

$$P_{BATT} = 2P_m + \frac{P_{PTO}}{\eta_{PTO}} + \eta_{PV} \cdot P_{PV} \quad (7)$$

که در آن،

η_{PV} = بازده آرایه های خورشیدی (شامل $MPPT$ ، سیم کشی، و ناچوری)؛ و η_{PTO} = بازده موتور الکتریکی و درایور سامانه PTO است. مجموع انرژی باتری، E_{BATT} ، در سافت را می توان با معادله ای از انتگرال توان مصرفی در طول زمان تأمین توان برای هر یک از مصرف کننده ها محاسبه کرد:

$$E_{BATT} = \eta_{BATT} \cdot \left(\int_0^{t^1} 2P_m dt + \int_0^{t^2} \frac{P_{PTO}}{\eta_{PTO}} dt + \int_0^{t^3} \eta_{PV} \cdot P_{PV} dt \right) \quad (8)$$

که در آن،

E_{BATT} بر حسب (کیلووات ساعت) انرژی کلی پک باتری، η_{BATT} بازده پک باتری، و t^1 ، t^2 و t^3 (بر حسب ساعت) طول زمان شارژ/دشارژ به ترتیب برای موتورهای پیشران، موتور PTO ، و آرایه PV است.

نتایج و بحث

برخی از متغیرهای طراحی سافت در جدول ۳ نشان داده شده اند.

از آنجا که سافت از دو موتور محرک برای سامانه رانش استفاده می کند و با توجه به رابطه گشتاور و نیرو، مقدار گشتاور لازم برای هر یک از موتورها را می توان از این رابطه به دست آورد:

$$T_m = \frac{r}{2G\eta_m\eta_g} \cdot (C_{roll}mg + \frac{1}{2}\rho \cdot AC_d \cdot (V + V_w)^2 + ma_{lacc}) \quad (4)$$

$$+ I \cdot \frac{G^2}{r^2} a_{lacc} + m \cdot g \cdot \sin \alpha + F_{drawbar}$$

بازده سامانه جعبه دنده یا کاهنده، معمولاً مقداری ثابت در نظر گرفته می شود. گرچه η_m به سرعت و گشتاور موتور بستگی دارد مقدار آن را می توان برای مقدار نامی سرعت، ثابت در نظر گرفت.

استانداردهای $ASABE$ نشان می دهند که سرعت تقریباً تمام عملیات کشاورزی بین دو تا ۲۰ کیلومتر بر ساعت است. با در نظر گرفتن سرعت حمل و نقل جاده ای، سرعت نهایی سافت تقریباً ۲۵ کیلومتر بر ساعت طراحی شد. بنابراین سرعت دورانی موتورهای الکتریکی، $\dot{\theta}$ (سرعت زاویه ای) را به عنوان تابعی از سرعت پیشروی می توان به صورت رابطه ۵ نمایش داد (Ehsani et al., 2003):

$$\dot{\theta} = \frac{30}{3.6} \cdot \frac{G \cdot V}{\pi \cdot r} \quad (5)$$

و با استفاده از رابطه های ۴ و ۵ می توان توان موتورهای پیشران، P_m را تعیین کرد:

$$P_m = \frac{T_m \cdot 2\pi \cdot \dot{\theta}}{60} \quad (6)$$

مقدار انرژی و توان مورد نیاز باتری

توان خروجی باتری (P_{BATT}) و جریانی که از باتری خارج می شود (حالت دشارژ) مثبت و جریان ورودی به

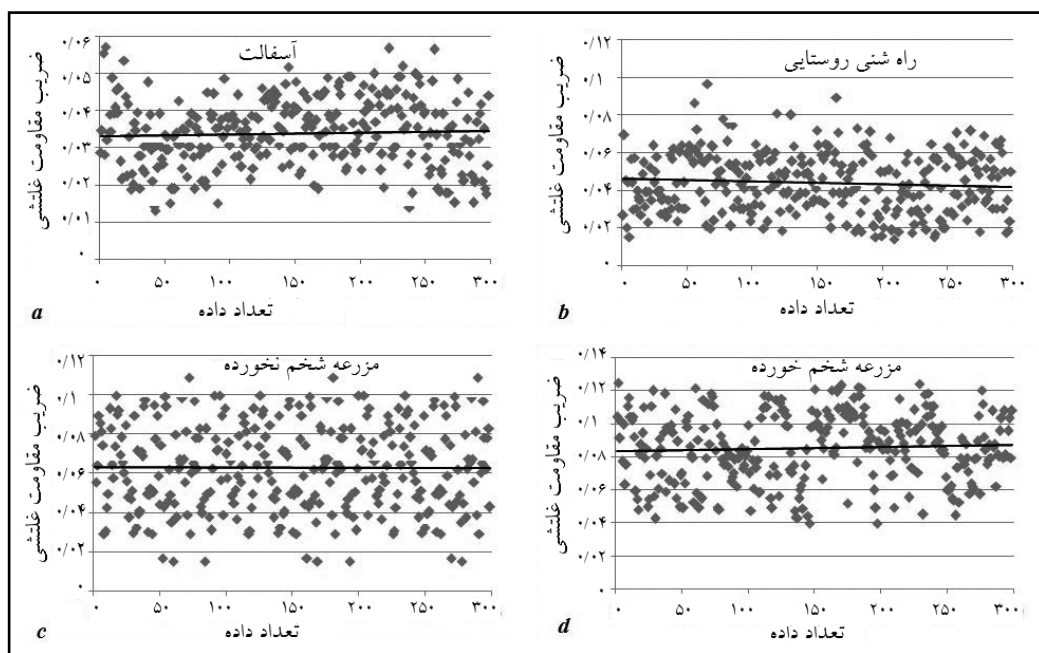
جدول ۳- مقادیر داده‌هایی که در مدل کردن طراحی بهینه سافت مورد استفاده قرار می‌گیرند

متغیر	مقدار	مرجع
بازده نسبت کاهش دور در رانش، η_g	۹۰ درصد	(Wang, 2005)
نسبت کاهش دور رانش، G	۱۸/۶۶	
بازده سیکل باتری، درصد	۸۳ درصد	(Fellner & Newman, 2000)
سطح مساحت جلوی سافت، A	۱/۸ متر مربع	
ثابت پسا آیرودینامیکی، C_d	۰/۲-۰/۴	(Husain, 2005)
آسفالت	۰/۰۲۹	(Avallone et al., 2007)
ضریب راه روستایی	۰/۰۳-۰/۰۵	(Tannant & Regensburg, 2001)
مقاومت زمین شخم نخورده	۰/۰۴-۰/۰۶۵	(Mckyes, 1985)
غلطشی، C_{roll} زمین شخم خورده (دیسک و کولتیواتور)	۰/۰۹-۰/۱۶	(Mckyes, 1985)
شعاع چرخ محرک، r	۰/۵۵ m	
چگالی هوا، ρ	۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب	(Larminie & Lowry, 2003)
شتاب ثقل، g	۹/۸ متر بر مجذور ثانیه	
جرم کلی سافت (با راننده)، m	۲۰۰۰ کیلوگرم	
ممان اینرسی موتور، I	۰/۳ کیلوگرم متر مکعب	
شتاب خطی سافت، a	۰/۷۵ متر بر مجذور ثانیه	
سرعت باد فرضی در خلاف جهت حرکت، V_w	۱۸ کیلومتر بر ساعت	

نشان داده شده و میانگین آنها با خطوط پرازش شده است.

دلیل پراکندگی نقاط در این نمودارها، ناهمواری زمین بوده است که مدام کشش به صورت ضربه به سافت اعمال می‌شد.

برای به دست آوردن دقیق‌تر ضریب مقاومت غلتشی سافت در شرایط متفاوت، آزمایش‌های مزرعه‌ای مختلفی اجرا شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، ضریب مقاومت غلتشی برای زمین شخم خورده، زمین شخم نخورده، راه شنی روستایی، و آسفالت

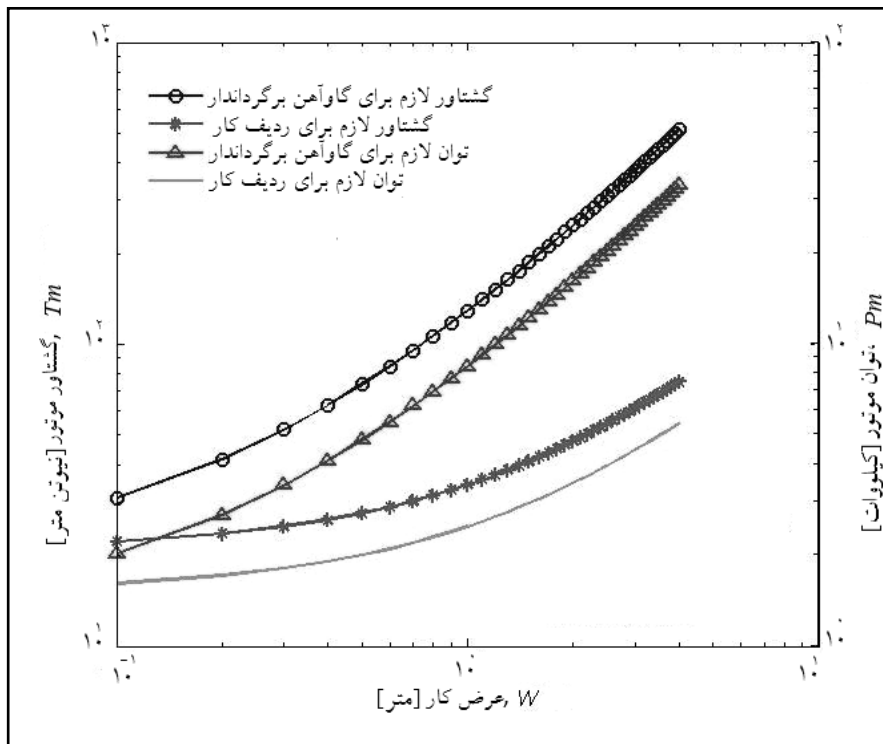


شکل ۳- نتایج مزرعه‌ای ضریب مقاومت غلتشی برای خاک‌های مختلف

توان و انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات...

اعمال کنند، در همه طراحی‌ها موتور بر اساس شتاب صفر ($a_{lacc}=0$) انتخاب می‌شود (حرکت سافت با سرعت ثابت)، و فرض می‌شود موتور می‌تواند گشتاور مورد نیاز شتابدهی را خارج از گشتاور نامی خود تأمین کند.

به هر حال، اگر مقادیر این خطوط پر، با داده‌های موجود در منابع دیگر (جدول ۳) مقایسه شود، در اکثر موارد انطباق خوبی قابل مشاهده است. از آنجا که موتورهای DC سری در مرحله استارت به مدت چند ثانیه محدود، گشتاور زیادی را می‌توانند

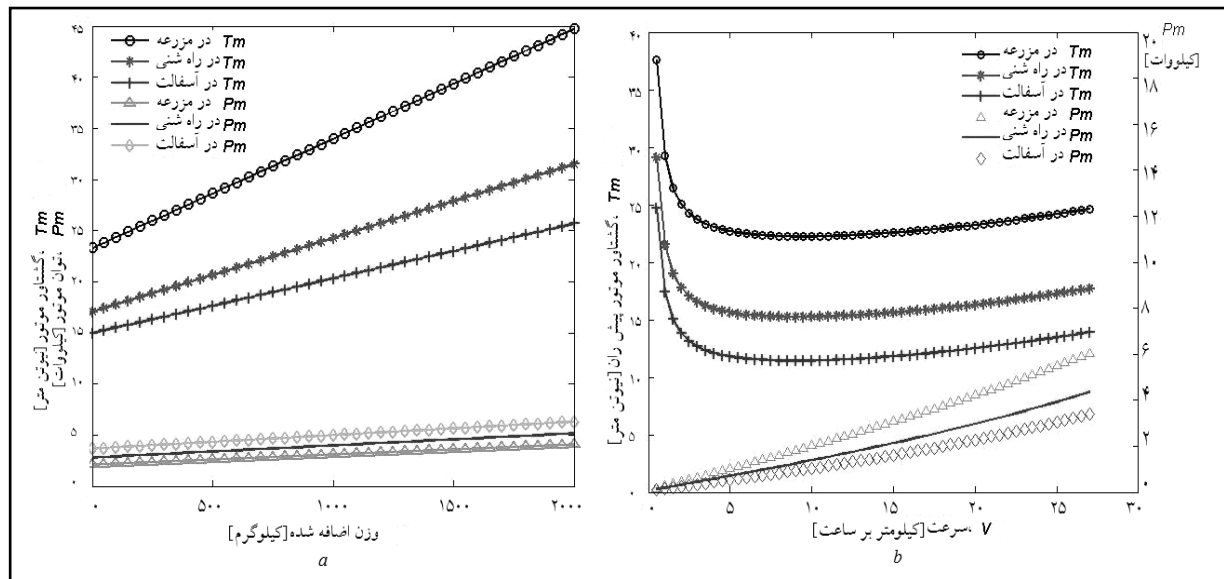


شکل ۴- گشتاور و توان مورد نیاز یکی از موتورهای رانش در گاوآهن برگرداندار و ردیف‌کار

در مورد ردیف‌کار، یک فاصله ۷۵ سانتی‌متر بین ردیف‌ها در نظر گرفته شد.

بنابراین در عرض کاری ۱/۵ متر (کارنده دو ردیفه) گشتاور مورد نیاز برای هر موتور برابر ۴۰ نیوتن متر است. تحت این گشتاور توان مورد نیاز از هر موتور رانش، برای گاوآهن برگرداندار و ردیف‌کار خطی برابر ۳ کیلووات به دست می‌آید.

شکل ۴ گشتاور و توان مورد نیاز برای یکی از موتورهای رانش سافت را در مقابل عرض کار دو نوع از ادوات مرسوم در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. از شکل مشخص است که گاوآهن برگرداندار به گشتاور بسیار بالایی نیاز دارد. به طور مثال، برای کشیدن یک گاوآهن برگرداندار تک خیش با عرض کاری ۲۵ سانتی‌متر و در عمق ۱۵ سانتی‌متر، گشتاور هر یک از موتورها باید حداقل ۴۴ نیوتن متر باشد.



شکل ۵- (a) گشتاور و توان مورد نیاز هر یک از موتورهای الکتریکی برای کشیدن پی‌نورد (تریلر) در خاک‌های مختلف و با وزن‌های متفاوت. (b) گشتاور و توان مورد نیاز برای کشیدن سافت به تنهایی

انتقال دهد. بنابراین، با در نظر گرفتن این گشتاور و توان و همچنین با توجه به سرعت نهایی سافت (۲۵ کیلومتر بر ساعت) که نیازمند موتوری با ۲۲۵۰ دور بر دقیقه می‌باشد، دو دستگاه موتور الکتریکی با مشخصات زیر برای سیستم رانش انتخاب شد: توان نامی = $10/5$ کیلووات، ولتاژ نامی = ۸۰ ولت، سرعت دورانی نامی = ۲۲۶۰ دور بر دقیقه و گشتاور در سرعت نامی = ۴۵ نیوتن متر.

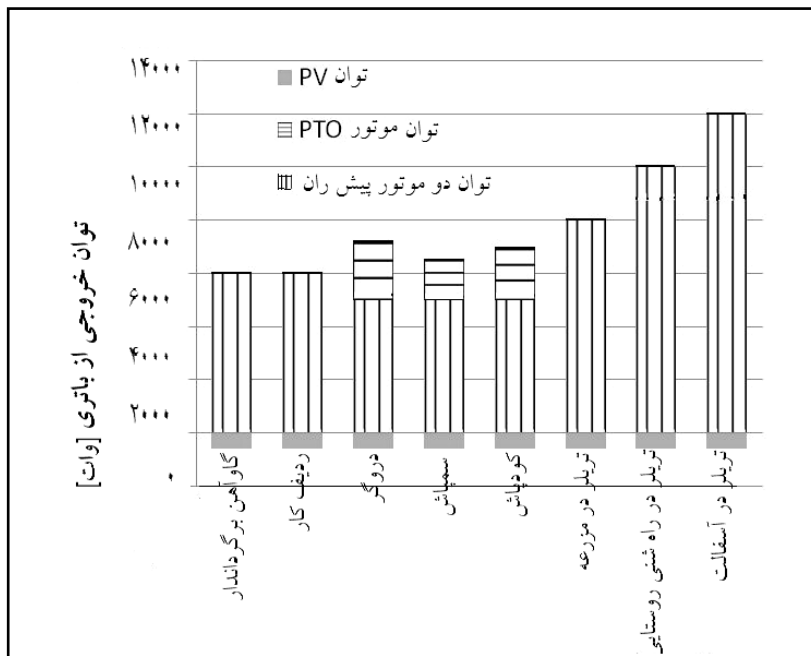
شکل ۵- b گشتاور و توان مورد نیاز هر یک از موتورهای سیستم رانش را برای کشیدن سافت به تنهایی در شرایط مختلف خاک و با سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. در سرعت‌های پایین که بازدهی کم است، به گشتاور بسیار بالایی نیاز است. از این شکل می‌توان دریافت که با استفاده از فقط توان آرایه PV در بالای خود سافت^۱ با توان اسمی ۵۴۰ وات بیشینه می‌توان سافت را حرکت داد ولی با سرعت‌های خیلی کم.

با در نظر گرفتن داده‌های جدول ۲، محاسبه توان مورد نیاز برای راه‌اندازی ادوات استاندارد ذکر شده ممکن خواهد بود. عرض سم پاش بوم‌دار و دروگر آزمایش

شکل ۵- a قابلیت سافت را برای کشش پی‌نورد (تریلر) با وزن‌های مختلف نشان می‌دهد. منظور از وزن‌های مختلف، مجموع وزن خود پی‌نورد (تریلر) و وزن محصولات در مزرعه یا جاده است. برای حمل محصول از مزرعه تا انبار معمولاً سه مرحله را می‌توان متصور شد: حمل در خود مزرعه، حمل در جاده شنی روستایی، و حمل در جاده آسفالت که برای هر یک از این مراحل به ترتیب سرعت حرکت ۱۰، ۱۸، و ۲۵ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. همچنین یک شیب رو به بالای 10° با وزش باد در جهت مخالف با سرعت ۱۸ کیلومتر بر ساعت نیز فرض شده است. از شکل ۵- a می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط یکسان، بیشترین و کمترین گشتاور مورد نیاز به ترتیب برای حمل و نقل در مزرعه و آسفالت است. همچنین به علت متغیر سرعت، توان مورد نیاز در آسفالت بیشترین و در مزرعه کمترین است. و سرانجام حداقل ۴۵ نیوتن متر گشتاور و ۶ کیلووات توان برای هر یک از موتورها لازم است تا سافت بتواند یک پی‌نورد (تریلر) ۲ تنی را از مزرعه تا انبار در شرایط گفته شده

کیلوگرم گشتاور مورد نیاز موتور تقریباً ۵۰ نیوتن متر است. با توجه به استفاده از دو سرعت ۵۴۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، برای محور *PTO*، توان لازم برای این موتور باید حداقل ۶ کیلووات باشد. مشخصات موتور یافت شده در بازار با ولتاژ ۸۰ ولت و نوع *DC* سری عبارت بود از ۱۶/۸ کیلووات، نیوتن متر و ۳۳۰۰ دور بر دقیقه. شکل ۶ توان ورودی/خروجی باتری را برای عملیات با ادوات ذکر شده نشان می‌دهد.

شده با سافت به ترتیب ۷/۸ و ۱/۸ متر بود و بنابراین مطابق جدول (۲) توان دورانی مورد نیاز سم‌پاش و دروگر ذکر شده به ترتیب ۱/۵۶ و ۲/۲۷ کیلووات خواهد بود. همچنین، توان مورد نیاز برای کودپاش حداکثر ۲ کیلووات است. موتور *PTO* همچنین سیستم اتصال سه نقطه را نیز راه‌اندازی می‌کند. مطابق اهرم بندی‌ها، گشتاور لازم برای بلند کردن ادواتی با وزن W_{lm} برابر با $0.124 \times W_{lm}$ است. به طور مثال، برای بلند کردن باری به وزن ۴۰۰



شکل ۶- توان مورد نیاز باتری برای عملیات با ادوات مختلف

درو کردن با دروگری به عرض ۱/۸ متر، توان لازم برای *PTO* و سیستم رانش به ترتیب برابر است با ۲۲۷۰+ و ۵۰۰۰ وات، در حالی که توان تحویلی آرایه *PV* تقریباً ۵۴۰- وات می‌باشد. در نتیجه توان خالص که باتری باید تحویل دهد برابر است با ۶۷۳۰ وات.

شکل ۶ توان مورد نیاز برای ادوات مختلف آزمایش شده را به صورت ترکیبی از محاسبات و اندازه‌گیری‌ها نشان

این شکل نشان می‌دهد که بیشترین توان خالص مورد نیاز از باتری (۱۱۴۶۰+ بر حسب وات) به حمل تریلر حامل ۲ تن بار، با سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت و در سربالایی با شیب 10° و وزش باد در سمت مخالف با سرعت ۱۸ کیلومتر بر ساعت در آسفالت اختصاص دارد. سایر توان‌های نشان داده شده برای هر یک از ادوات در شرایطی است که قبلاً ذکر شده است. برای مثال، برای

یک آمپر متر (کلمپ متر) تا سطح A ۱۰۰۰ استفاده شد. با کلمپ متر میانگین آمپر خروجی از باتری اندازه‌گیری شد. میانگین داده‌های توان اندازه‌گیری شده، برای هر یک از ادوات و در شرایط گفته شده، در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین توان شبیه‌سازی (محاسبه شده) نیز که ترکیبی از روابط نظری و اندازه‌گیری‌ها بود، جهت مقایسه در این جدول آورده شده است.

می‌دهد. علاوه بر این، جهت مطابقت، توان مصرفی هر یک از ادوات عملاً به صورت مستقیم و با اندازه‌گیری جریان و ولتاژ به صورت زمان واقعی ثبت شد. گرچه ولتاژ لحظه به لحظه باتری برای هر یک از ادوات در داشبورد نمایش داده می‌شود، از آنجایی که افت ولتاژ تحت بار آن چنان قابل توجه نبود، برای محاسبه توان از ولتاژ اسمی بسته باتری، V ۸۰ استفاده شد. برای قرائت جریان نیز از

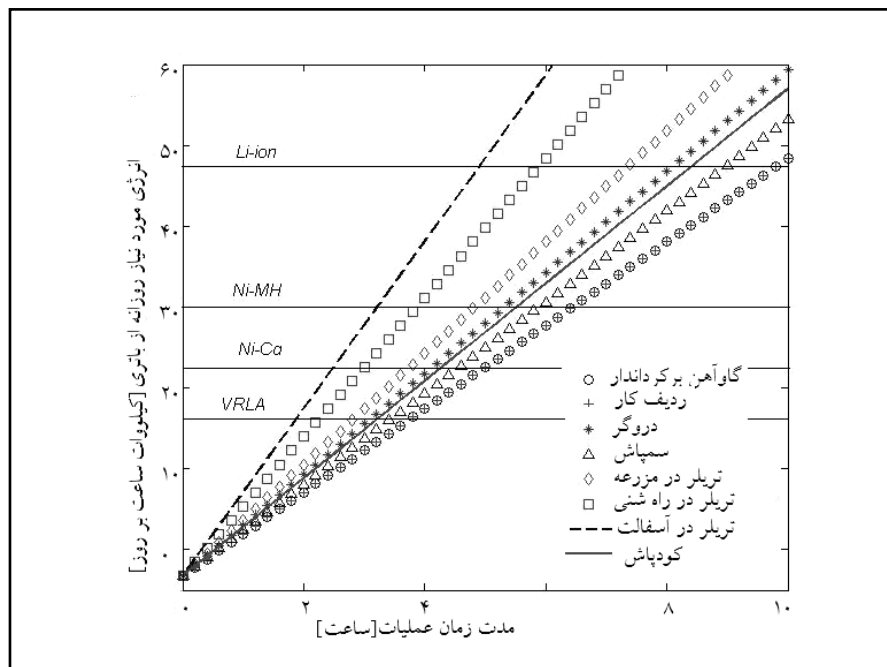
جدول ۴- نتایج آزمون t مقایسه میانگین‌های تک نمونه

ادوات	میانگین توان اندازه‌گیری شده (وات)	توان محاسبه شده (وات)	انحراف معیار (std)	سطح احتمال
گاواهن برگرداندار	۸۳۲۰	۶۰۰۰	۱۲۰۴	۰۰۰/۰*
ردیف‌کار	۶۴۸۰	۶۰۰۰	۷۹۵	۰۸۹/۰
دروگر شانه ای	۷۱۶۵	۷۲۷۰	۶۳۱	۵۸۹/۰
سم پاش	۶۳۳۰	۶۵۰۰	۶۶۴	۴۰۹/۰
کودپاش	۵۷۶۷	۷۰۰۰	۶۶۵	۰۰۰/۰*
تریلر در مزرعه	۸۵۸۰	۸۰۰۰	۱۸۳۰	۳۱۶/۰

*سطح احتمال ۵ درصد

از ۱۰ کیلوگرم، اما گنجایش آن بیش از ۲۰۰ کیلوگرم بود. با استفاده از رابطه ۸ می‌توان ظرفیت مناسب باتری و محدوده کاری هر یک از ادوات را برای آن ظرفیت تعیین کرد. برای سادگی کار فرض می‌شود که میزان مصرف انرژی در هر عملیات ثابت است. باتری اسید سرب $(VRLA)$ به خاطر هزینه اولیه پایین و در دسترس بودن، برای استفاده در سافت انتخاب شده است. بازده این باتری‌ها تقریباً برابر با ۸۳ درصد است (Matheys, 2006). با توجه به این بازده، مقدار انرژی باتری در شرایط مختلف کاری برای هر یک از ادوات بررسی و در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، در این شکل محدوده کاری با باتری‌های دیگر نیز نشان داده شده است.

داده‌های توان اندازه‌گیری شده، در نرم افزار SPSS وارد و با مقادیر شبیه‌سازی شده مقایسه شد. مطابق جدول ۴، مقادیر محاسبه شده که در واقع تلفیقی از برخی متغیرهای اندازه‌گیری شده و برخی روابط نظری بودند، انطباق خوبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند. در مورد گاواهن و کودپاش اختلاف در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. برای گاواهن، توان مورد نیاز برای شخم به موارد خیلی زیادی بستگی دارد که همه آنها شاید در کل عملیات یکسان و قابل کنترل نباشند مانند: کیفیت خاک، فشردگی خاک، رطوبت خاک، و شکل ابزار خاکورز. در مورد کودپاش نیز تفاوت از آن رو معنی‌دار است که مقدار کود استفاده شده در مخزن کمتر



شکل ۷- مقدار انرژی مورد نیاز باتری‌های متفاوت در محدوده کاری برخی از ادوات

صورت استفاده از باتری‌هایی با چگالی انرژی بالاتر و گران‌تر ولی برابر با وزن باتری *VRLA* استفاده شده (۷۱۲ کیلوگرم) در طول روز، ساعات کاری بیشتری را می‌توان انتظار داشت، بدون اینکه نیاز به شارژ مجدد باشد. سرانجام اینکه با توجه به ظرفیت باتری و توانی که از آرایه‌های *PV* حاصل می‌شود، می‌توان گفت در مجموع در هر روز ۱۸ درصد از کل انرژی مصرفی را آرایه‌های *PV* تأمین می‌کنند. اگر قرار باشد همه انرژی مورد نیاز با استفاده از *PV* با مشخصات داده شده در این تحقیق تأمین شود (یعنی ۲۰ کیلووات ساعت بر روز)، باید سطح آرایه‌های *PV* تقریباً ۳۲ مترمربع شود.

نتیجه گیری

برای کارهای سبک کشاورزی، تراکتوری الکتریکی هیبریدی به نام سافت طراحی و ساخته شد. در این تحقیق عملیات سبک کشاورزی بوسیله سافت با شش عدد از ادوات رایج به صورت عملی ارزیابی و نتایج با مقادیر

بیشتر تمایل وجود دارد که از یک باتری با سطح انرژی (کیلووات ساعت) زیاد استفاده می‌شود، ولی وزن و حجم باتری‌های *VRLA* عواملی محدود کننده هستند. به همین دلیل برای سافت از باتری *VRLA* به ظرفیت ۱۶/۸ کیلووات ساعت و دارای وزن تقریبی ۷۱۲ کیلوگرم استفاده شد. شکل ۷ انرژی مورد نیاز برای برخی عملیات را در زمان اجرای آنها نشان می‌دهد. مطابق این شکل باتری استفاده شده، *VRLA* در سافت، می‌تواند گاوآهن برگرداند و ردیف کار ذکر شده را به مدت ۴ ساعت راه‌اندازی کند و با استفاده از دروگر، سمپاش بوم دار و کودپاش گفته شده می‌تواند به ترتیب ۳/۲، ۳/۶ و ۳/۴ ساعت تحت شرایط خاصی در هر روز کار کند. همچنین با استفاده از این پک باتری می‌توان یک پی‌نورد دو تنی را در شیب بالاسوی ۱۰° به مدت ۲ ساعت در آسفالت، با سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت، به مدت ۲/۵ ساعت در جاده شنی روستایی با ۱۸ کیلومتر بر ساعت و به مدت ۳ ساعت در مزرعه با سرعت ۹ کیلومتر بر ساعت کشید. در

می‌یابد. در هر صورت، این محدوده کاری فقط برای یک‌بار شارژ/دشارژ در روز است. در صورت استفاده از شارژرهای سریع^۱ که در چند دقیقه قادر به شارژ باتری هستند، می‌توان عملیات کشاورزی را ادامه داد.

قدردانی

نویسندگان از دبیرخانه بند دال ماده ۴۵ و همچنین از موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج، که اجرای این پروژه با حمایت‌های مالی آنها ممکن شده است، سپاسگزاری می‌کنند.

خروجی حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که سافت بدون نیاز به سوخت‌های فسیلی، قابلیت جایگزینی را با تراکتورهای گروه "I" دارد. با طراحی‌های انجام گرفته سافت می‌تواند یک گاوآهن برگرداندار تک خیشه و یک ردیف‌کار دو ردیفه را روزانه به مدت ۴ ساعت راه‌اندازی کند و با استفاده از دروگر، سمپاش بوم‌دار و کودپاش گفته شده می‌تواند به ترتیب ۳/۲، ۳/۶ و ۳/۴ ساعت تحت شرایط خاصی در هر روز کار کند.

اگر به جای باتری‌های VRLA استفاده شده از تکنولوژی‌های برتر باتری استفاده شود (مثل باتری‌های Li-ion)، محدوده کاری روزانه تقریباً سه برابر افزایش

مراجع

- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 2006a. Drawbars -agricultural wheel tractors, ASAE S482 FEB04. 53rd Ed. St. Joseph, MI, USA.
- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 2006b. Agricultural machinery management data, ASAE D497.5 FEB2006. 53rd Ed. St. Joseph, MI, USA.
- Avallone, E.A., Baumeister, T.III and Sadegh A.M. 2007. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 11th Ed. McGraw-Hill Inc., 130.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S.E. and Emadi A. 2005. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. 1st Ed. CRC Press, 99-100.
- Fellner, C. and Newman, J. 2000. High-power batteries for use in hybrid vehicles. J. Power Sources. 85, 229-236.
- Hunt, D. 2001. Farm Power and Machinery Management, 10th Ed.; Waveland Press: Long Grove, IL, USA, 10-50.
- Husain, I. 2005. Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals. 1st Ed. CRC Press, 11-44.
- Kepner, R.A., Bainer, R. and Barger E.L. 1978. Principles of Farm Machinery. 3rd Ed. Westport, Conn; AVI Publishing Co.
- Khanipour, A., Ebrahimi, K.M. and Seale, W.J. 2007. Conventional design and simulation of an urban hybrid bus. World Academy of Science, Engineering and Technology(WASET). 28, 26-32.
- Larminie, J. and Lowry, J. 2003. Electric Vehicle Technology Explained. 1st Ed. John Wiley & Sons Ltd., 185-187.
- Matheys, J., Timmermans, J.M., Autenboer, W.V., Mierlo, J.V., Maggetto, G., Meyer, S., Groof, A.D., Hecq, W. and Bossche, P.V. 2006. Comparison of the environmental impact of 5 electric vehicle

توان و انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات...

battery technologies using LCA. 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Available at: <http://www.mech.kuleuven.be>.

Mckyes, E. 1985. Soil Cutting and Tillage. 1st Ed. Elsevier, 141.

Szadkowski, B., Chrzan, P.J. and Roye, D. 2003. A study of energy requirements for electric and hybrid vehicles in cities. CESURA'03, Gdansk, Poland. June 4–6. Available at: <http://www.pg.gda.pl/~jarguz/erower/cesura3.pdf>.

Tannant, D.D. and Regensburg, B. 2001. Guidelines for mine haul road design. www.web.ubc.ca/okanagan/engineering.

Wang, L. 2005. Hybrid electric vehicle design based on a multi-objective optimization evolutionary algorithm. Walter J. Karplus Summer Research Grant Report. Texas A&M University.



Power and Energy Requirements for a Hybrid Electric Tractor Employing Light-Duty Implements

H. Mousazadeh^{*}, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia and A. Sharifi

** Corresponding Author: Ph.D. Candidate in Department of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran, Telefax: +98 261 2808138 and +98 261 2801011 Mobile: 09143517477, Email: hmousazade@ut.ac.ir
Received: 22 September 2010, Accepted: 4 March 2011*

Developing alternative technologies for the use of fossil fuels is necessary and inevitable. To meet this need, the SAPHT project developed an energy-efficient electric hybrid tractor for agricultural light operations. The energy source for SAPHT was in part solar and the rest was supplied from a grid. This research compared simulated and experimental field results for SAPHT. The results show that SAPHT is capable of substituting for I category tractors. Using the designated parameters, SAPHT can operate standard implements for 2-4 h daily; however, improved use of batteries would make it possible to increase the daily range more than three fold.

Keywords: Emissions, hybrid tractor, renewable energy, rolling resistance, traction power