ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران (کرج)
۲۴ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹

استفاده از انرژی لازم سست کردن پروفایل خاک برای مقایسه عملکرد وسایل خاکورزی

غلامحسین شاهقلی[۱]، یوسف عباسپور گیلانده[۱] و رحمان فرخی تیمورلو[۲]

۱ و ۲- به ترتیب استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران و استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
gshahgoli@yahoo.com

چکیده

مقدار انرژی مصرفی در عملیات خاک ورزی کاملا بیشتر از سایر عملیات کشاورزی است بنابراین ذخیره حتی ۱ درصد از این انرژی با طراحی کارآمد ابزار خاک ورزی می تواند باعث ذخیره میلیونها دلار گردد. تحقیقات گذشته نشان داده اند که اغلب محققین دنیا از مقاومت یا توان ویژه (مقدرار کشش یا توان لازمه در واحد سطح مقطع خاک سست شده) برای ارزیابی عملکرد ادوات خاکورزی مانند انواع گاوآهن ها، زیرشکنها و مقایسه عملکرد آنها استفاده می نمایند. تحقیقات اخیر نشان داده اند با توجه به اینکه در اندازه گیری مقاومت و توان ویژه مقدار سختی خاک در نظر گرفته نمی شود. بنابراین وسیله ای که در خاک نرم سطح مقطع زیادی با نیروی کشش یا توان کم سست نموده بهتر از وسیله با همان نیرو یا توان سطح مقطع کمی را در خاک سخت سست می نماید خواهد بود که صحیح نمی باشد. بنابراین این تحقیق نظریه مقدار انرژی مصرف شده که هم سطح مقطع خاک سست شده و سختی آن را تواماً در نظر گرفته را توسعه داده و آن در یک آزمایش مزرعه ای با استفاده از زیرشکن ارتعاشی ارزیابی نموده و با توان ویژه مقایسه نموده است. بنابراین جهت ارزیابی ترکیبات مختلف آزمایشات مزرعه ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوکهای کا ملا تصادفی بوده و در تمام این آزمایشها نیروی کشش، گشتاور و سرعت پی تی او، سرش تراکتور، مقاومت خاک قبل از خاکورزی وسطح مقطع پروفایلهای خاک بعد از خاکورزی اندازه گیری شد. تا بتوان تیمارها را از نظر مقاومت و توان ویژه و انرژی مصرفی در پروفایل خاک مقایسه کرد.

کلید واژه: انرژی مصرفی، پروفایل خاک، توان ویژه، مقاومت خاک

مقدمه

سست کردن لایه های متراکم خاک و تهیه بستر بذر به طور مداوم محققین و سازنده ها و کشاورزان را به تلاش مداوم وا داشته است. سست کردن خاک بایستی به طور موثری مدیریت شود تا انرژی لازم برای این کار کاهش داده شده و این عمل به بهترین وجه انجا م گیرد. شرایط اقتصادی و محیطی کشاورزان را مجبور می کند تا عملیات خاک ورزی را با بهترین ترکیب از ادوات انجام داده تا به هدف مورد نظر از نظر شرایط خاک دست یابند. عملیات

خاک ورزی تقریبا نصف انرژی مورد نیاز برای تولید محصول را مصرف می کند (کو شواها، ۱۱۹۹۸). بهینه کردن طراحی ادوات خاکورزی سبب افزایش راندمان انرژی مصرفی خواهد شد. یک درک صحیح از رابطه متقابل خاک و وسیله خاکورز کلید پایه و اساسی در جهت بهینه کردن طراحی ادوات خاکورزی بوده و می تواند ازآزمایشات متعدد که براساس طراحی با آزمایش و خطا بوده و درنتیجه وقت زیادی نیز در این رابطه صرف می شود جلوگیری کند.

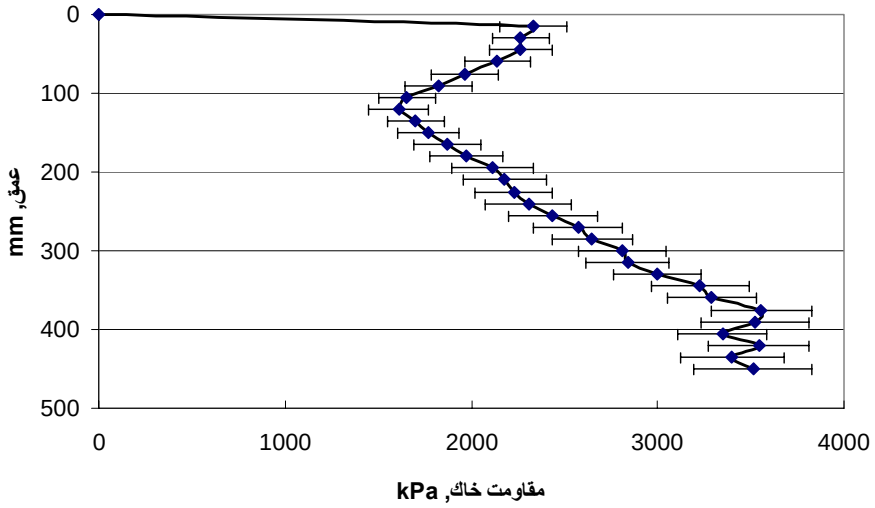
یک روش جدید و بهتر برای مقایسه تیمارهای خاکورزی استفاده از مقدار انرژی لازم برای سست کردن می باشد. این روش علاوه بر مساحت خاک سست شده مقاومت خاک را هم در نظر می گیرد. مهمترین موضوع در خاک ورزی عمیق برآوردی از انرژی مصرف شده برای سست کردن خاک می باشد. یا به عبارت دیگر برای سست کردن آن مقدار خاک چه مقدار انرژی مصرف شده است. اغلب محققین از مقاومت ویژه (نیروی کشش لازمه بر مساحت مقطع خاک سست شده) یا از توان موتوری ویژه (توان موتور لازمه بر مساحت مقطع خاک سست شده) استفاده می کنند. اما یک ارزیابی ساده نشان میدهد که روش های فوق در خاکهای با مقاومت غیر یکنواخت دارای اشکال اساسی میباشد.

تراکم خاک عبارتست از کاهش حجم خاک غیر اشباع و در نتیجه افزایش جرم مخصوص خاک تحت تاثیر نیروی خارجی بوده و با مکانیزه شدن عملیات کشاورزی و افزایش وزن ماشینها تراکم خاک افزایش یافته است. تراکم خاک باعث افزایش مقاومت خاک در برابر نفوذ ریشه گیاه می شود. در نتیجه رشد گیاه و محصول کاهش پیدا می کند. موقعی که مقاومت نفوذ سنج به طور کلی از حد بحرانی ۲ مگا پاسکال تجاوز می کند آن خاک متراکم در نظر گرفته می شود یعنی در بیشتر از آن ریشه نمی تواند نفوذ کند. هر چند مقاومت برای گیاهان مختلف متفاوت می باشد.

همچنین با افزایش تراکم خاک مقاومت آن در برابر سست کردن افزایش خواهد یافت. مصطلح است که مقاومت خاک بسته به مقدار رطوبت و اکثراً با افزایش عمق خاک تغییر میکند. شکل ۱ یک مثال از مقاومت خاک تا عمق ٤٥٠ میلیمتر را نشان می دهد. این شکل گویای آن است که سست کردن این خاک در عمق های زیاد (بیشتر از ۳۰۰ میلیمتر) مشکلتر از عمق های کم بوده و انرژی زیادی را برای اینکار لازم دارند. مقدار افزایش انرژی مربوط به افزایش مقاومت خاک می باشد. بنابراین مقایسه تیمارها فقط بر اساس مقدار خاک سست شده گمراه کننده می باشد.

[1] Kushwaha

زیرا در این صورت وسیله که در عمق کم خاک زیادی را با مصرف انرژی کمتر در مقایسه با وسیله که در عمق زیاد مساحت مقطع کمی از خاک را با انرژی زیاد سست می کند بهتر به نظر می رسد.



شکل ۱. یک مثال از تغییرات مقاومت خاک با افزایش عمق خاک (انحراف استاندارد ۱±)

شکل ۲ تفاوت بین وسایل خاکورز وقتی در عمق کم و زیاد کار می کنند را نشان میدهد. فرض می کنیم که وسیله خاکورز A , ۵ واحد از خاک سطحی را سست می کند. با فرض اینکه از نظر مقاومت تفاوت چندانی بین آنها وجود ندارد. توان ویژه لازم برای سست کردن آنها P_0 خواهد بود. اگر فرض کنیم وسیله خاکورز B همین اندازه را ۵ برابر عمیقتر و یک پنجم عرض کار تیغه A سست نماید. با فرض اینکه مقاومت خاک با افزایش عمق خاک افزایش نماید. بنا براین انرژی زیادی جهت سست کردن خاک در عمق زیاد مصرف خواهد شد. یعنی توان ویژه با افزایش عمق افزایش می نماید.

$P4 > P3 > P2 > P1 > P0$

قدرت ویژه کل خاکورز B بیشتر از وسیله A خواهد شد. بنابراین مقایسه وسایل خاکورزی بر اساس توان ویژه به طور اشتباه نشان خواهد داد که وسیله خاکورز که در خاک سطحی کار می کند بهتر از وسیله که در عمق زیاد کار کرده و خاک سختی را سست نموده است.

P0	P0	P0	P0	P0

P0
P1
P2
P3
P4

شکل ۲. یک مثال از تغییرات انرژی لازم برای سست کردن خاک با توجه به تغییرات مقاومت خاک با افزایش عمق خاک

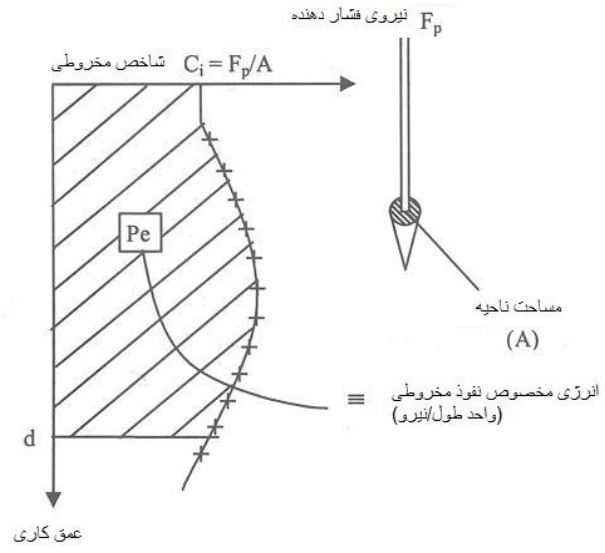
در این تحقیق از روش انرژی لازم برای سست کردن خاک استفاده شد که علاوه بر مقدار مساحت خاک سست شده مقاومت خاک یعنی سختی کار را هم در نظر میگیرد. بر اساس دیبیل[۱] (۱۹۹۹) مقاومت خاک (C_i) یاشاخص مخروطی به عنوان شاخصی جهت محاسبه انرژی نفوذ (P_e) استفاده می گردد (شکل ۳). انرژی نفوذ برابر است با مساحت ناحیه بین منحنی C_i و عمق و از فرمول زیر محاسبه میگردد.

$$P_e = \int_0^d C_i dd \qquad (۱)$$

که دران:

d = عمق کار، (m)

بنابراین انرژی سست کردن پروفایل خاک برابر سطح ناحیه است که بین منحنی شاخص مخروطی و محور عمق تا عمق کاری محدود شده اشت.



[۱] Desbiolles

شکل ۳. انرژی مخصوص نفوذ مخروطی

اهداف اصلی این طرح عبارتند از:

۱- شفاف کردن این موضوع که توان ویژه یک مقیاس مناسب برای ارزیابی خاکورزی نمی باشد

۲- انرژی مصرفی ویژه پروفایل خاک سست شده یک پارامتر جدید و مناسب برای مقایسه کارهای خاکورزی است

۳-تاثیر سختی خاک در مقدار انرژی مصرف شده

٤- تعیین چگونگی محاسبه انرژی مصرفی پروفایل خاک سست شده

مواد و روش‌ها

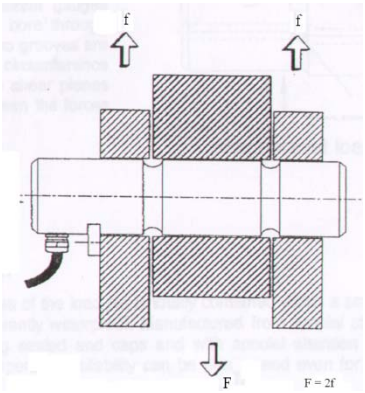
ازمایش های مزرعه ای جهت ارزیابی اثر زاویه ارتعاش بر روی نیروی کشش، گشتاور و قدرت لازمه برای زیر شکن ارتعاشی در خاک لومی شنی انجام گرفت و بعدا انرژی لازم برای سست کردن محاسبه گردید. ازمایشها در قالب بلوکهای کامل تصادفی با ۵ تکرار انجام گرفت و در هر بلوک ۷ تیمار زوایای ارتعاش مختلف (۲۲/۵-، ۱٤/۵- ، ۱/۵، ۸، ۱٦ و ۲۷ درجه) و شاهد که زیرشکن غیر ارتعاشی بود به طور تصادفی مرتب شدند. البته با توجه به ماهیت این مقاله نیازی به توضیح دستگاه زیرشکن ارتعاشی و زاویه ارتعاش نمی باشد.

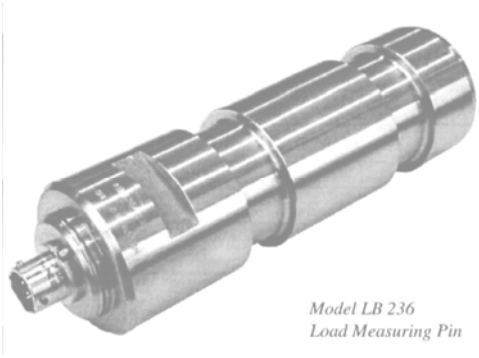
قبل از اجرای ازمایشها پارامترهای زیر اندازه گیری شد:

۱. رطوبت و دانسیته ظاهری در طول عمق تا ۵۰ سانتیمتر با استفاده از روش استوانه ها انداره گیری شد.
۲. برای هر کرت ۹ نفوذ با استفاده از نفوذ سنج Rimik CP40II در فواصل تقریبا مساوی تا عمق ٤۵ سانتیمتر انجام گرفته و میانگین این ۹ نفوذ بیانگر چگونگی تغییرات مقاومت خاک برای ان کرت می باشد(شکل ۱).

در حین انجام ازمایشها پارامترهای زیر اندازه گیری شد:

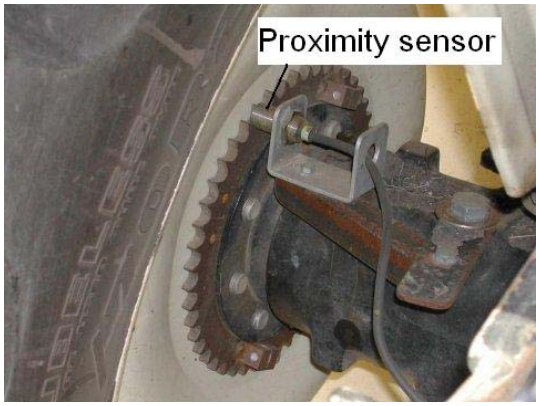
۱. - نیروی کششی توسط کشش سنج از نوع پین برشی با ظرفیت ۱۰ تن اندازه گیری شد (شکل ٤).





شکل ٤. کشش سنج از نوع پینی (سمت چپ) و طرز قرار گرفتن و اندازه گیری کشش (سمت راست)

۲- جهت اندازه گیری سرش و استفاده صحیح از تراکتور بایستی سرعت پیشروی تراکتور و سرعت چرخ تراکتور را اندازه گرفت. برای اندازه گیری سرعت پیشروی تراکتور از یک نوع رادار داپلر که در جلو تراکتور نصب شد استفاده گردید (شکل ۵ سمت چپ). و برای اندازه گیری سرعت چرخ محرک (معمولاً چرخ عقب) از سنسور پراکسیمیتی که در داخل چرخ عقب قرار.داده شده بود و سرعت چرخش در واحد زمان را اندازه گیری شد.



شکل ۵. پراکسیمیتی سنسور برا اندزه گیری سرعت چرخ (سمت راست) و رادار در جلو تراکتور برای اندازه گیری سرعت پیشروی تراکتور (سمت چپ)

٤- سرعت و گشتاور پی تی او توسط گشتاور سنج (Staiger Mohilo 016 DM, 5000 N.m) اندازه گیری شد

تمامی داده ها حاصل از دستگاههای اندازه گیری فوق از طریق دیتا لاگر به یک لپ تاب در کابین تراکتور منتقل گردید. در برنامه اماده شده در محیط Labview اندازه گیریها به صورت انلاین در حین اندازه گیری قابل مشاهده بود.

۵- جهت ارزیابی تیمارها خاک سست شده را در ۳ محل از کرت کنده و تمیز کرده و سپس با استفاده از پروفایل متر مقدار مساحت مقطع خاک سست شده اندازه گرفته شد.

در سیستم خاکورزی ارتعاشی با توجه به اینکه قدرت به طریق کشش و PTO به وسیله خاکورز انتقال می یابد. قدرت موتوری لازمه از طریق فرمول زیر محاسبه گردید (ASABE EP496.3, 2006) .

$$P_E = \frac{P_{db}}{TE \times E_m} + \frac{P_{PTO}}{\eta} \qquad (۲)$$

که در این رابطه:

P_{db}= قدرت لازم برای کشش (کیلو وات)

P_{PTO} = قدرت لازمه برای چرخش پی تی او در دور مورد نظر (کیلو وات)

TE = راندمان کششی، -

E_m = راندمان انتقال قدرت از موتور به چرخها،-

η= راندمان انتقال قدرت از موتور به PTO ،-

P_E = قدرت موتوری لازم (کیلو وات)

با توجه به استاندارد ماشینهای کشاورزی می توانیم راندمانهای ذکر شده را از جدول در آورده و استفاده نماییم (ASABE D497.5, 2006).

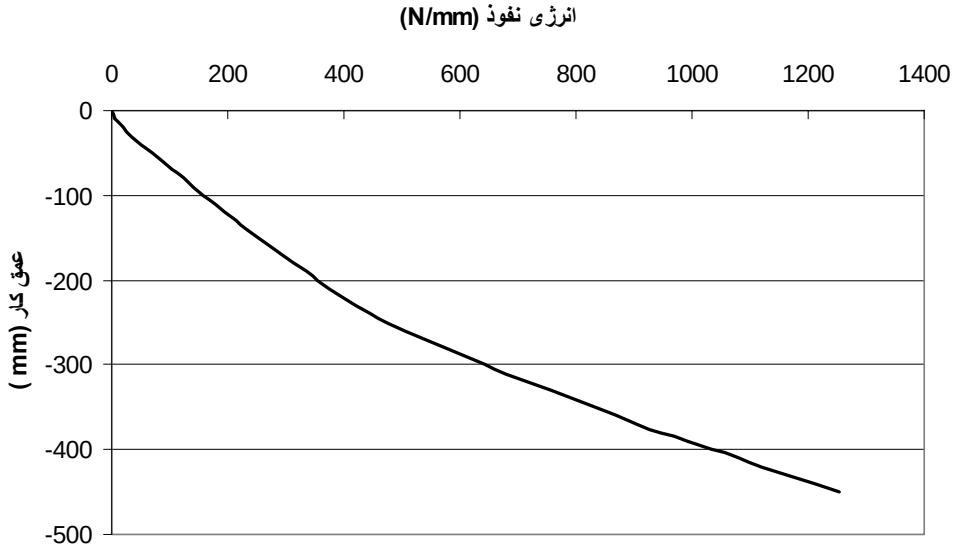
انرژی نفوذ، انرژی در واحد سطح بوده و واحد ان($kPa \times m = kJ/m^2$ یا N/mm) می باشد که انرژی مخصوص نامیده می شود. در شرایط مزرعه ای می توان انرژی نفوذ را از حاصلضرب شاخص مخروطی (Cone Index) متوسط در عمق کار بدست اورد. برای بدست اوردن انرژی نفوذ بایستی Cone Index (CI) را برای ان کرت در خاک دست نخورده اندازه گرفت. برای هر کرت چندین نفوذ را در فواصل تقریبا مساوی انجام داده و میانگین انها بیانگر CI برای ان کرت خواهد بود. برای این تحقیق از نفوذ سنج Rimik CP40 II استفاده گردید و عمق نفوذ

درcm ٤٥ تنظیم گردید. همچنین می توان توالی عمقهای متفاوت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۰ میلیمتر) را برای دستگاه تنظیم کرد که در ان فواصل داده های مقاومت را در اختیار کاربر قرار دهد. در این ازمایشها دستگاه برای ۱۵ میلیمتر تنظیم گردید.

برای محاسبه انرژی نفوذ می توان بر اساس توالی عمقهای متفاوتی مانند ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ میلیمتر را به طور اختیاری درنظر گرفت. در هر توالی عمق که برای محاسبه اختیار گردد در محاسبات هر عمق متوسط که مورد استفاده قرار گیرد مقاومت در ان عمق بایستی در دسترس بوده، بنابراین اگر در ان عمق، داده مقاومتی از دستگاه گرفته نشده بایستی مقاومت را در ان عمق بر اورد کرد.

نتایج محاسبات نشان داد که با کاهش توالی عمق از ۳۰ به ۱۵ میلیمتر انرژی بدست امده ٦٪ افزایش یافته و با کاهش بیشتر از ۱۵ به ۵ میلیمتر دوباره انرژی ٦٪ افزایش یافت. در کل نتیجه گرفته شد که توالی عمق۱۰ میلیمتر در محاسبات بهترین نتیجه را بدست می دهد. بنابراین بهتر بود که دستگاه نفوذ سنج برای توالی عمق ۱۰ میلیمتر تنظیم می کردیم در حالیکه قبل از ازمایشات مزرعه ای دستگاه روی ۱۵ میلیمتر تنظیم شده بود بنابراین براوردهای زیادی از مقاومت خاک انجام گرفت.

بنابراین انرژی نفوذ برای قطعاتی که ارتفاعشان ۱۰ میلیمتر و عرضشان ۲۵ میلیمتر (با توجه به اینکه فاصله بین پینهای پروفایل متر ۲۵ میلیمتر بود) محاسبه گردید. البته کاهش عرض قطعات تاثیری در انرژی نهایی بدست امده نداشت. بعد از بدست اوردن انرژی نفوذ برای هر یک از قطعات، انرژی نفوذ در طول عمق به صورت تجمعی محاسبه گردید یعنی انرژی نفوذ برای هر عمقی مجموع تمامی انرژی قطعات بالا تا ان عمق می باشد. برای قطعه نهایی مجموع انرژی تمام قطعات می باشد(شکل ٦).



شکل ٦. تغییرات انرژی نفوذ در طول عمق کاری

برای محاسبه انرژی لازم سست کردن برای کل پروفایل خاک، ان را مطابق شکل ۷ که توسط پروفایل متر اندازه گرفته شده بود در نظر گرفت. هر ستون را به طور جدا گانه در نظر گرفته و انرژی را برای هر ردیف مانند AB از طرق فرمول زیر محاسبه می گردد.

$$P_R = \text{Frequency} \times Pe \times w \times d \qquad (۳)$$

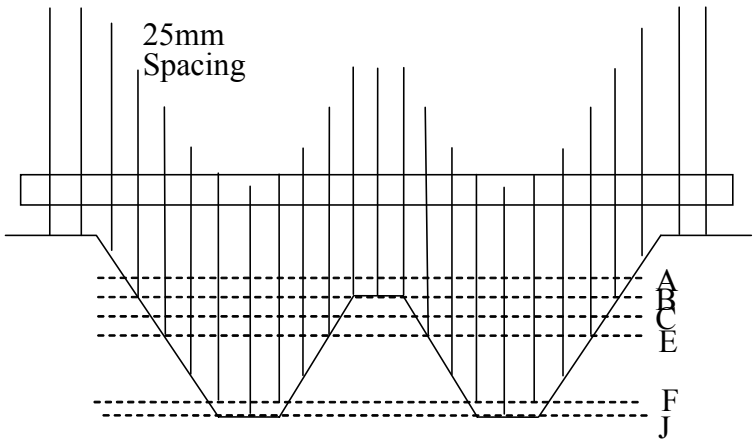
که در ان:

Frequency = تعداد ستونهای که شامل ردیف مورد نظر بوده، یعنی یک یا تقریبا نصف قطعه ای از ان ستونها در این ردیف موجود است. برای مثال در ردیف AB فرکانس ۱۹ ستون بوده و برای ردیف CE فرکانس ١٤ می باشد.

Pe = انرژی نفوذ مربوط به ان ردیف که برای کل ستونها در ان ردیف یکسان می باشد

w = عرض هر کدام از ستونها که ۲۵ میلیمتر بود

D = ارتفاع هر کدام از قطعات ستونها در ان ردیف که کلا برای همه ستونها در همه ردیفها ۱۰ میلیمتر بود



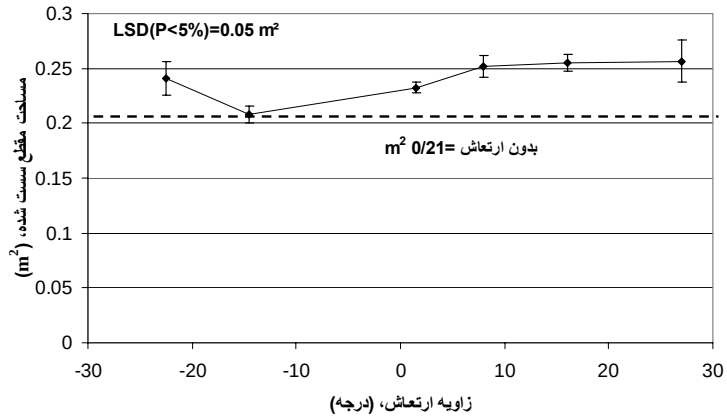
شکل ۷. اندازه گیری پروفایل خاک ششت شده برای زیرشکن ۲ ساقه

انرژی کل پروفایل خاک (P_T) از مجموع انرژی کل ردیفها بدست می اید اگر فرض شود n ردیف وجود داشته باشد.

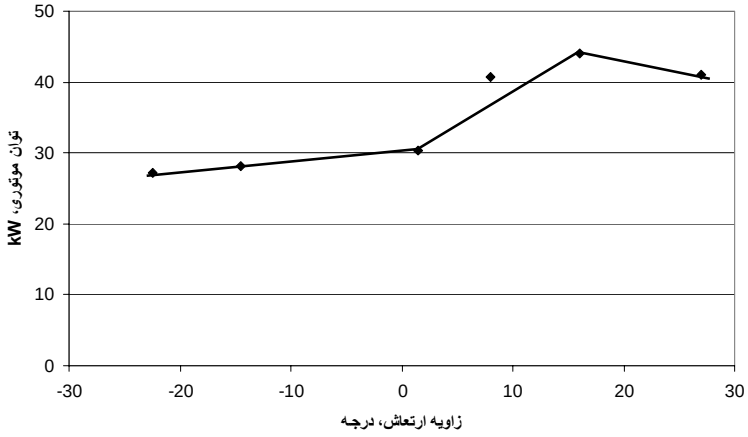
$$P_T = \sum_{i=1}^{n} P_R \qquad ۴$$

نتایج و بحث

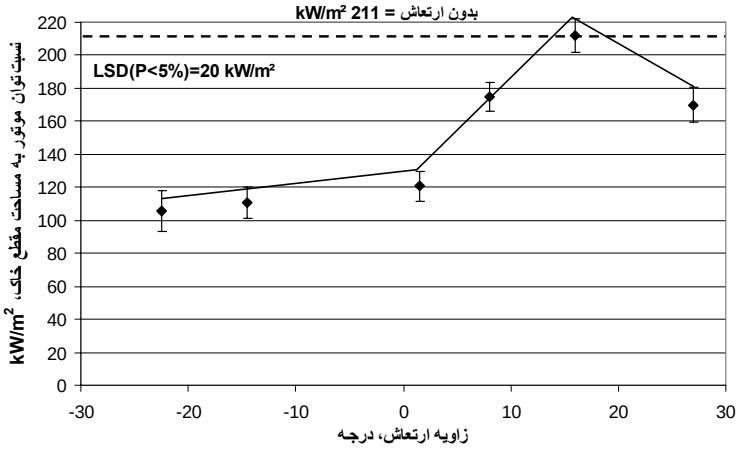
شکل ۸ متوسط سطح مقطع پروفایلهای سست شده در ۵ تکرار را برای زوایای ارتعاش مختلف و شاهد که خاکورزی بدون ارتعاش می باشد نشان می دهد. تجزیه و تحلیل اماری نشان داد که اختلاف معنی داری بین تیمارها از نظر سطح مقطح سست شده وجود نداشت. توان موتوری که با استفاده از فرمول ۲ با اندازه گیری نیروی کشش و گشتاور پی تی او بدست امده در شکل ۹ نشان داده شده است در کل با تغییر از زوایای منفی به مثبت توان موتوری افزایش یافته و ۳ زاویه ۸، ۱۶ و ۲۷ درجه بیشترین توان مصرفی را داشتند. توان مصرفی ویژه که از تقسیم توان موتوری به سطح مقطع پروفایل خاک بدست امد(شکل ۱۰). تمایل تغییرات ان همانند توان موتوری بوده و زوایای مثبت بزرگتر مخصوصا ۱۶ درجه دارای توان مصرفی ویژه بالاتری نسبت به زوایای منفی می باشند. از همین ۳ شکل ارجعیت زوایای ارتعاش منفی کاملا اشکار است چونکه دارای توان مصرفی ویژه پایینتری نسبت به زوایای مثبت می باشند.



شکل ۸ . سطح مقطع پروفایل خاک سست شده برای تیمارهای مختلف



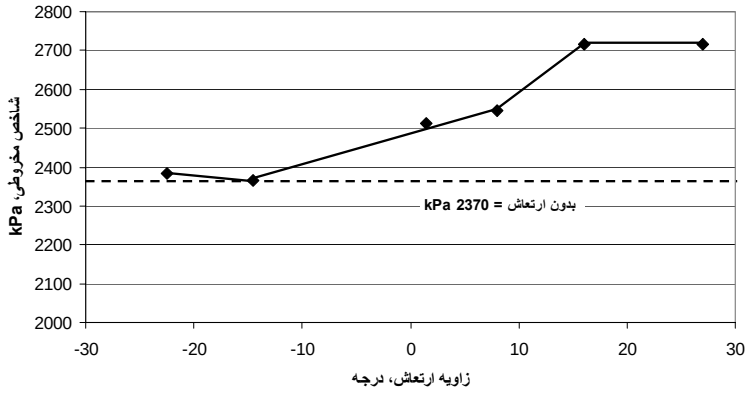
شکل ۹ . توان موتوری محاسبه شده برای تیمارهای مختلف



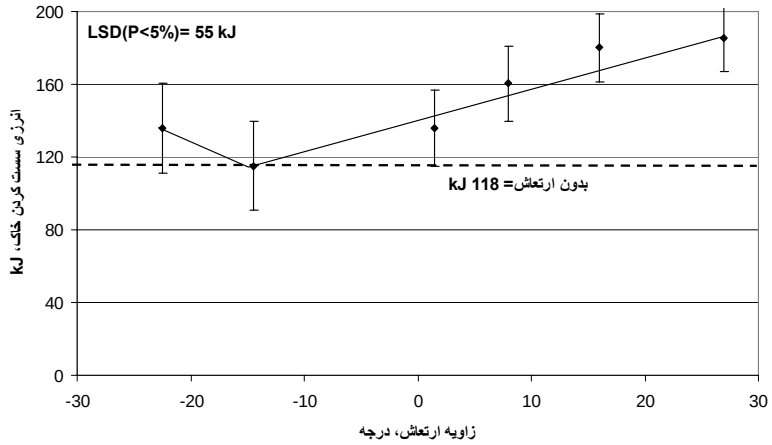
شکل ۱۰. نسبت توان موتوری به سطح مقطع پروفایل برای تیمارهای مختلف

شکل ۱۱ چگونگی تغییرات مقدار متوسط شاخص مخروطی را برای تیمارهای مختلف در ۵ تکرار نشان می دهد.شاخص مخروطی در تیمارهای مختلف متفاوت بوده کمترین ان در ۱٤/۵- درجه (۲۳٦۵ کیلوپاسکال) بوده و

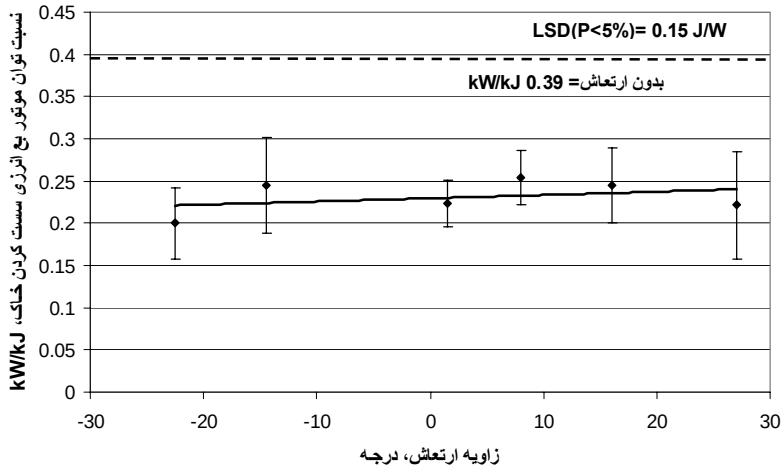
مقدار ماکزیمم ان برای زاویه های ۱۶ و ۲۷ درجه (۲۷۱۵ کیلوپاسکال) می باشد. به تبع از شاخص مخروطی انرژی لازم برای سست کردن پروفایل خاک برای زوایای مثبت افزایش یافته است. انرژی لازم برای ۱۴/۵- درجه (۱۱۵ کیلو ژول) و برای زوایه ۲۷ درجه ۱۸۵ کیلوژول می باشد(شکل ۱۲). نسبت توان موتوری به انرژی لازمه جهت سست کردن پروفایل تغییرات زیادی برای تیمارهای مختلف نشان نداد و انالیز اماری نشان داد که بین زاویه های مختلف اختلاف معنی دار وجود نداشت (شکل ۱۳)، پس بر خلاف توان ویژه که نشان داد زوایای منفی بهتر از زوایای مثبت بودند در حالیکه نسبت بدست امده با استفاده از انرژی سست کردن نشان داد که بین زوایای مثبت و منفی اختلاف معنی دار وجود نداشت. اگر برای زوایای مثبت توان موتور بالا بوده و سطح مقطع سست شده با زوایای منفی متفاوت نبوده، در زوایای مثبت زیرشکن در خاک سخت تری نسبت به زوایایی منفی کار می کرده است. پس با در نظر گرفتن فقط اندازه خاک سست شده بدون در نظر گیری سختی ان نمی توان بین تیمارهای مختلف از نظر مقدار واقعی کار انجام گرفته قضاوت کرد.



شکل ۱۱. تغییرات شاخص مخروطی برای تیمارهای مختلف



شکل ۱۲. مقدار انرژی لازم برای سست کردن پروفایل خاک در تیمارهای مختلف



شکل ۱۳. نسبت توان موتوری به انرژی لازم برای سست کردن پروفایل در تیمارهای مختلف

نتایج کلی

۱. بر اساس توان ویژه که توان موتوری و سطح مقطع خاک سست شده را در نظر می گیرد نمی توان به درستی در مورد اختلاف عملکرد ادوات مختلف خاکورزی قضاوت کرد.

۲. بجای استفاده از توان ویژه می توان از نسبت توان موتوری به انرژی لازم برای سست کردن خاک استفاده نمود که علاوه بر مقدار خاک سست شده، سختی خاک را نیز در نظر می گیرد.

منابع

1. ASABE Standards D497.5 Feb 2006, Agricultural machinery management, pp.391-398,ASAE Standards: Adapted and published by American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI 49685-9659, USA.

2. ASABE Standards EP496.3 Feb 2006. Agricultural machinery management. pp.391-398, ASABE Standards: Adapted and published by American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI 49685-9659, USA.
3. Desbiolles, J., Godwin, R.J., Kilgour, J., Blackmore, B.S. 1999. Prediction of tillage implemen draught using cone penetrometer data. Journal of Agricultural Engineering Research, 73: 65-76.
4. Kushwaha, R. L. and Z. X., Zhang. 1998. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review. Journal of Terramechanics, 35:69-86

Abstract
The important issue in deep tillage is the amount of energy is spent on subsoiling, in other words how much energy is required to loosen the soil until given depth. Conventional methods have been based on draft force or drawbar power required to conduct a tillage operation. Most of researchers predominantly have used specific soil resistance and specific power to represent subsoiling efficiency and compare different tillage tools performance. Specific draft or power can be defined as draft or power force required loosening a cross-sectional area of soil. As the soil strength increases with depth, loosening the same soil area at shallow depth requires considerably less effort than the equivalent area loosened to greater depth. On this basis, comparing soil-loosening capacity based on specific resistance and specific power can be misleading. Tillage tool which loosen large shallow area may appear to have a greater loosening capacity and better efficiencies than those that loosen to greater depths. Hence, loosened profile energy theory was developed which considers both loosened area and soil strength. Experimental runs were arranged in a randomised block design. To compare different treatments in terms of specific resistance, specific power and loosened profile energy, draft, PTO torque and speed and tractor slippage were measured during tillage operation Also soil strength was measured before tilling plots and loosened soil profile was determined after tilling.

Keyword: subsoiling, specific draft, loosened area, energy