

بهینه‌سازی عملکرد تیغه قلمی مورد استفاده در خاک ورز مرکب

مجید دهقانی^۱، سید حسین کارپورفرد^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده

کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. دانشیار، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۷/۲۸)

چکیده

با استفاده از یک واحد خاک‌ورز قلمی با قابلیت تغییر زاویه حمله، بهینه‌سازی عملکرد تیغه قلمی بررسی شد. عوامل موثر عبارت بودند از رطوبت خاک با سطوح ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ حد پلاستیک (PL)، زوایای حمله ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه و سرعت پیشروی ۳، ۵ و ۷ کیلومتر بر ساعت. نیروی مقاومت کششی، سطح مقطع بهم خوردگی خاک، سطح مقطع بالا آمده خاک، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ای (MWD)، مقاومت ویژه خاک‌ورز قلمی و شاخص مخروطی خاک مزرعه صفات اندازه‌گیری شده بودند. از طرح آماری کورت خرد شده نواری در قالب آزمایش فاکتوریل استفاده شد. برای بهینه‌سازی عملکرد خاک‌ورز قلمی سه معادله رگرسیون خطی چند متغیره به ازای رطوبت خاک مزرعه، زاویه حمله تیغه و سرعت پیشروی به عنوان پارامترهای وابسته بر حسب شش پارامتر مستقل اندازه‌گیری شده تعیین گردید. از تحلیل رگرسیونی، بهترین رطوبت برای خاک‌ورز قلمی ۰/۷۱ حد پلاستیک، بهترین زاویه حمله ۳۴ درجه و بهترین سرعت پیشروی ۵/۵ کیلومتر بر ساعت حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: خاک‌ورز، زاویه حمله، رطوبت خاک، مقاومت ویژه

مقدمه

خاک‌ورز مرکب از دو قسمت تیغه قلمی در جلو برای خاک‌ورزی اولیه و قسمت دیسک و غلتک برای خاک‌ورزی ثانویه تشکیل شده است. تیغه قلمی از مهم‌ترین قسمت هر خاک‌ورز مرکب محسوب می‌شود و آگاهی از میزان مقاومت کششی و دیگر عوامل موثر بر کارکرد بهینه آن ضروری است. تعیین عوامل موثر بر عملکرد ادوات خاک‌ورز با توجه به خواص فیزیکی خاک، می‌تواند کمک موثری بر به هم خوردگی خاک در جلوی ابزار به حساب آید. زاویه حمله ابزار خاک‌ورز یکی از عوامل موثر بر مقاومت کششی ادوات خاک‌ورز به حساب می‌آید. تحقیقات نشان داده است که هر چه زاویه حمله یا نفوذ تیغه ادوات خاک‌ورزی بزرگتر باشد نفوذ وسیله به داخل خاک راحت‌تر صورت گرفته و با افزایش مولفه عمودی نیروی واکنش خاک به تیغه و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد (Godwin, 2007). سرعت به عنوان یک عامل مهم موثر بر نیروی مقاومت کششی محسوب می‌گردد. ظرفیت مزرعه‌ای نیز که حداکثر بودن آن مطلوب می‌باشد به سرعت

پیشروی در حین کار وابسته است. از این جهت آگاهی از نوع رابطه سرعت و نیروی وارد بر خاک اهمیت پیدا می‌کند. درصد رطوبت خاک، رفتار مکانیکی و مقاومت خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. محتوای رطوبتی خاک تأثیر زیادی روی خاک‌ورزی و خصوصیات خاک در طی انجام عملیات خاک‌ورزی دارد. انجام به موقع خاک‌ورزی باعث ایجاد بهترین ساختار خاک می‌شود.

در تحقیقی تأثیر پارامترهای هندسی ابزار خاک‌ورز بر مقاومت کششی، خرد شدگی و برش خاک را مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سه پارامتر زاویه حمله، عرض تیغه و عمق کار بر مقاومت کششی تأثیر معنی داری دارد. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش زاویه حمله از ۳۰ به ۹۰ درجه مقاومت کششی افزایش یافته و با افزایش دو برابری عرض کار، مقاومت کششی ۳۵ درصد اضافه می‌شد. (McKyes and Maswaur, 1997).

Arvidsson et al. (2004)، مقاومت ویژه و انرژی مورد نیاز برای گسیختگی و شکست خاک را برای سه نوع ابزار خاک‌ورز قلمی و در سه محتوای رطوبتی خاک (خیس، مرطوب و خشک) اندازه‌گیری نمودند. نتایج نشان داد خاک‌ورزی در محتوای رطوبتی متوسط (نزدیک به حد پلاستیک)، بزرگترین نسبت خاکدانه‌های کوچک را ایجاد نموده که نتیجه آن،

* نویسنده مسئول: karparvr@shirazu.ac.ir

در تحقیق‌های گذشته اثر هر کدام از تیمارهای سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت مزرعه بر روی صفات اندازه‌گیری شده به تنهایی بررسی شده است، اما یافتن نقطه بهینه تیمارهای سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت مزرعه در حین شخم با لحاظ نمودن صفات اندازه‌گیری شده و ارائه یک معادله کلی برای پیش بینی نقطه بهینه کارکرد دستگاه در هر کدام از تیمارهای فوق تاکنون انجام نشده بود. لذا هدف از این تحقیق بدست آوردن سه معادله رگرسیونی برای تیمارهای سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت مزرعه در حین شخم بر حسب شش صفت اندازه‌گیری شده به منظور مشخص شدن نقطه بهینه کارکرد دستگاه در هر کدام از تیمارهای مذکور تعیین گردید.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در قطعه شماره ۱۰ از مزارع دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز اجرا گردید. بافت خاک لوم رسی بود و چگالی ظاهری خاک مزرعه $1/75 \text{ g cm}^{-3}$ بود. برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری از استوانه نمونه برداری با مشخصات قطر و ارتفاع استوانه به ترتیب $5/2$ و 5 سانتی‌متر استفاده شد. بدین منظور به طور تصادفی از چند نقطه مزرعه با استفاده از چکش مخصوص جهت جلوگیری از تراکم نمونه خاک، نمونه برداری صورت گرفت. سپس نمونه خاک در دمای 105 درجه سانتی-گراد داخل آون به مدت 24 ساعت قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. با استفاده از رابطه (۱) جرم مخصوص ظاهری خاک محاسبه گردید (Salar et al., 2013).

$$\text{B.D.} = \frac{M}{V} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن:

B.D.: جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر

مکعب)

M: جرم خاک خشک (گرم)

V: حجم داخلی استوانه (سانتی متر مکعب).

در این تحقیق تیمارهای مورد نظر عبارت بودند از رطوبت خاک مزرعه با سطوح $0/5$ ، $0/7$ و $0/9$ حد پلاستیک خاک (PL)، زاویه حمله تیغه با زوایای 30 ، 40 و 50 درجه و سه سرعت پیشروی 3 ، 5 و 7 کیلومتر بر ساعت. مزرعه آزمایشی بر اساس آزمایش کرت‌های خرد شده نواری در قالب آزمایش فاکتوریل در سه سطح رطوبتی، به سه بلوک و هر بلوک به سه قطعه مساوی و هر قطعه به دوازده کرت تقسیم گردید. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک مزرعه ابتدا نمونه خاک از

کمترین انرژی استفاده شده برای تکه تکه کردن خاک می‌باشد. همچنین با افزایش رطوبت، مقاومت ویژه کاهش یافت.

(Raoufat & Mashhadi, 1999) از روش رگرسیون چند متغیره جهت بیان ارتباط بین پارامترهای اندازه‌گیری شده و فواصل بهینه بین دو ردیف متوالی مورد نظر برای دو واحد گاوآهن کج ساق استفاده کردند. معادلات حاصل، فواصل بهینه بین دو تیغه مجاور و بین دو ردیف متوالی را بترتیب برابر 122 و $47/5$ سانتی متر پیش بینی کرد.

تحقیق‌های جامعی بر روی تیغه‌های باریک تخت با عرض 40 میلی متر و دو زاویه حمله 45 و 90 درجه و عمق کاری 15 سانتی متر انجام گردید. در خاکی با بافت لومی شنی رسی، سطح مقطع بهم خوردگی خاک با افزایش سرعت از 0 تا 5 متر بر ثانیه به صورت تقریباً خطی 60 درصد افزایش یافت. اما در خاک رسی، در محدوده پلاستیک برش رخ داد. همچنین تحت شرایط رطوبت‌های پایین، با افزایش سرعت لز صفر تا 5 متر بر ثانیه رابطه بین مقاومت کششی و سرعت پیشروی به صورت چند جمله‌ای و در سرعت‌های بالا (5 متر بر ثانیه) بهترین نوع معادله برای توصیف رابطه بین سرعت و نیرو یک معادله نمایی بود. (Stafford, 1979; Stafford, 1981).

(Keller et al., 2007) اثر چهار حد رطوبتی بر روی مقدار قطر متوسط کلوخه‌های وزنی را مورد بررسی قرار دادند. خاک-ورز مورد استفاده آن‌ها گاوآهن برگردان‌دار بود. آن‌ها حد بهینه رطوبت خاک را، یعنی رطوبتی که در آن رطوبت، سطح مقطع ویژه ذرات خاک حداکثر گردد را تعریف کردند. در این نقطه درصد ذرات ریز بیش‌ترین حد خود را دارا بوده و کلوخه‌ها کم-ترین حد خود را خواهند داشت. در این تحقیق نقطه بهینه رطوبتی برای حالت‌های مختلف در محدوده PL $0/8$ رخ داد. در رطوبت‌های بیشتر یا کمتر از این رطوبت MWD بیش‌تر شد.

(Grant & Lafond, 1993) اثر سه روش خاک‌ورزی را بر روی چگالی ظاهری و شاخص مخروطی خاک بررسی کردند. سه روش خاک‌ورزی عبارت بودند از: خاک‌ورزی مرسوم، کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی. آزمایش‌ها در طول چهار سال تکرار گردید. در این مدت رطوبت خاک در مزارع تحقیقاتی ثابت بود. نتایج نشان داد که چگالی ظاهری خاک از سطح خاک تا عمق ده سانتی متری به طور معنی داری در سیستم بی خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بیشتر بود. اما در عمق‌های بیشتر تفاوت چندانی دیده نشد. در عمق‌های 30 الی 45 سانتی‌متری، در سیستم بی خاک‌ورزی، چگالی ظاهری کم‌تری نسبت به دو سیستم کم خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. در عمق‌های بیشتر تفاوت چندانی بین روش‌های مذکور وجود نداشت.

تراکتور ITM-۲۸۵ پشت تراکتور کشنده قرار گرفت (شکل‌های ۱ الف و ۱ ب). بارسنج استفاده شده در این پژوهش از نوع S شکل و کششی- فشاری با ظرفیت ۵ تن و ساخت شرکت کلی^۱ چین بود درحالی که دستگاه بارسنج نیروهای اعمالی را همواره ثبت می‌کرد، داده برداری در دو حالت انجام شد. در حالت اول داده برداری، وسیله خاک‌ورز به عمق مورد نظر در داخل خاک می‌رسید. در نتیجه نیرویی که در این وضعیت توسط بارسنج اندازه‌گیری گردید همان نیروی کشش ناخالص تراکتور ۳۹۹-ITM بود. در مرحله بعد با بیرون آوردن گاوآهن قلمی از خاک، آزمایش مشابه حالت قبل تکرار گردید. در این حالت نیرویی که توسط بارسنج اندازه‌گیری گردید مقاومت غلتشی مربوط به چرخ‌های جلو و عقب تراکتور ITM-۲۸۵ می‌باشد. قابل ذکر است که تفاضل دو نیروی بدست آمده مبین مقاومت کششی خاک‌ورز قلمی است.

خاک‌ورز قلمی مورد استفاده، از نوع تک ساقه سوار شونده از تپراک^۲ ساخت ترکیه بود (شکل ۲).



شکل ۱. الف نصب بارسنج بین دو تراکتور



شکل ۱. ب. آزمون دو تراکتوری



شکل ۲. خاک‌ورز قلمی مورد استفاده در این پژوهش

عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر مزرعه آزمایشی تهیه گردید و جهت حفظ رطوبت، در کیسه پلاستیکی قرار داده شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و پس از توزین، داخل آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. به کمک رابطه (۲) درصد رطوبت خاک بر مبنای وزن خشک تعیین گردید. بمنظور دستیابی به رطوبت مورد نظر در کرت‌های آزمایشی، خاک به شیوه غرق‌آبی آبیاری گردید و بطور روزانه رطوبت خاک تا رسیدن به حد مطلوب اندازه‌گیری شد.

(رابطه ۲)

$$M.C.\% = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

که در آن:

M.C.: رطوبت خاک بر مبنای وزن خشک (درصد)

W_w: وزن نمونه خاک مرطوب (گرم)

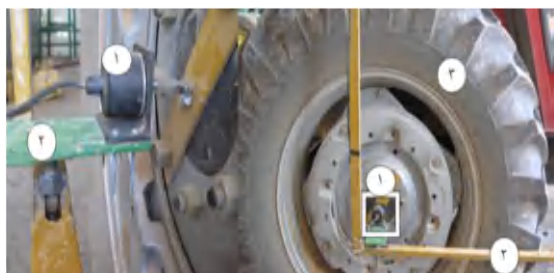
W_d: وزن نمونه خاک خشک شده (گرم)

حد خمیری خاک حداقل رطوبتی است که خاک در آن به حالت خمیری شکل پذیر در می‌آید. حد خمیری، حد فاصل حالت خمیری و نیمه جامد خاک می‌باشد. ابتدا ۵۰ گرم نمونه خاک از الک ۰/۴۲۵ میلی‌متری عبور داده شد و سپس با مقدار کافی آب مقطر برای بدست آوردن حد خمیری مخلوط گردید و جهت حفظ رطوبت در کیسه پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت در اتاق نگه داشته شد. سپس مقداری از نمونه را برداشته، بین انگشتان دست و سینی فلزی ورز داده و غلتانده شد تا فتیله ای به قطر ۳ میلی‌متر به دست آید. این فتیله به قطعات کوچکی خرد شده و مجدداً به یکدیگر فشرده گردیدند. توده خاک حاصل یک بار دیگر بین انگشتان و سینی غلتانده و فتیله شد. این روند تا آنجا تکرار گردید که فتیله خاک خرد شده و دیگر نتوان خاک را غلتانده و فتیله نمود. در این مرحله مقداری از نمونه را در آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده و وزن خشک نمونه‌ها یادداشت شد. درصد رطوبت بر مبنای وزن خشک نمونه، بیانگر مقدار حد خمیری خاک بود (ASTM Standards, D-4318).

برای اندازه‌گیری مقاومت کششی خاک‌ورز قلمی از روش آزمون دو تراکتوری (روش RNAM) استفاده گردید. تراکتورهای م-ورد استفاده در این پژوهش، تراکتورهای ITM-۲۸۵ و ITM-۳۹۹ بود. بدین منظور دستگاه بارسنج توسط اتصالات، بین دو تراکتور نصب شد. به منظور واسنجی بارسنج از دستگاه اینستران (دستگاه تست یونیورسال) مدل STM-20 ساخت شرکت سنتام استفاده شد. در این وضعیت تراکتور کشنده ITM-۳۹۹ وظیفه کشش را بر عهده داشت و



شکل ۵-الف- چرخ پنجم مورد استفاده در این تحقیق و محل قرارگیری آن
۱. چرخ پنجم، ۲. شفت انکودر و ۳. شاسی و اتصالات چرخ پنجم



شکل ۵-ب- چرخ محرک عقب و شفت انکودر متصل به آن: ۱. شفت انکودر،
۲. شاسی و اتصالات آن و ۳. چرخ محرک عقب

با داشتن شعاع چرخ پنجم و تعداد دوران این چرخ می‌توان میزان مسافت پیشروی چرخ پنجم که در واقع میزان پیشروی تراکتور نیز می‌باشد را اندازه گیری کرد. در نهایت با تقسیم مسافت پیشروی به مدت زمان پیشروی تراکتور، سرعت پیشروی تراکتور به دست آمد.

مقاومت ویژه عبارت است از نسبت نیروی مقاومت کششی به سطح مقطع بهم خوردگی خاک، لذا در این تحقیق با تقسیم مقادیر میانگین مقاومت کششی بر مقادیر میانگین سطح مقطع بهم خورده خاک در هر تیمار مقادیر مقاومت ویژه ابزار بدست آمد.

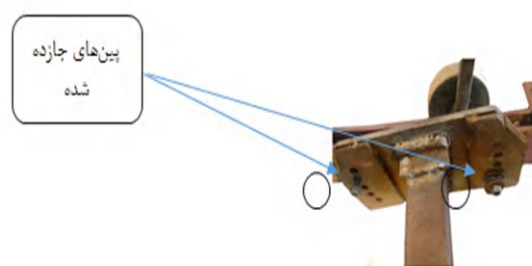
برای تعیین مساحت مقطع گسیختگی خاک در هر تیمار، پس از عبور خاک‌ورز، یک برش عرضی به عمق خاک به هم خورده توسط خاک‌ورز در خاک ایجاد شد. پس از تخلیه خاک نرم شده، پروفیل متر را بر روی سطح خاک قرار داده و میله های آن تا برخورد با سطح خاک و در فاصله ۲ سانتی متر از یکدیگر پائین آورده شد (شکل ۶). بدین ترتیب مختصات تعدادی از نقاط سطح گسیختگی به دست می‌آمد. همچنین به کمک میله‌های پروفیل متر ارتفاع بالا آمدگی خاک نیز اندازه گیری شد. نمودار مقطع گسیختگی و بالا آمدگی خاک در نرم‌افزار اکسل رسم شده و با استفاده از رابطه (۳) مساحت سطح بهم-خوردگی و میزان بالا آمدگی خاک تعیین گردید (Salar et al., 2013).

$$A = (2 \sum_{i=1}^n d_i) - (d_1 + d_n) \quad (\text{رابطه ۳})$$

زاویه حمله تیغه این واحد خاک‌ورز در حالت اولیه ۴۰ درجه بود. این واحد خاک‌ورز بر روی یک شاسی با قابلیت تنظیم زاویه حمله تیغه، سوار گردید. گاوآهن دارای دو عدد چرخ تثبیت عمق بود که توسط بازوهای عمودی قابل تنظیم، در طرفین شاسی قرار گرفته که برای دستیابی به عمق شخم مورد نظر، محل تثبیت بازوها به شاسی به طور عمودی تغییر داده می‌شد. عملیات خاک‌ورزی در عمق ۳۰ سانتی متر انجام شد. در شکل (۳) ساقه و تیغه مورد استفاده نمایش داده شده است. جهت دستیابی به سه زاویه حمله ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه مکانیزمی طراحی گردید که زاویه ساقه و واحد تیغه به طور یکجا توسط آن مکانیزم تغییر می‌کرد. در این مکانیزم پس از قرار دادن واحد تیغه و ساقه در زاویه مطلوب، پین مورد نظر جازده می‌شد و واحد تیغه در زاویه مورد نظر قفل می‌گردید (شکل ۴). شایان ذکر است که قبل از شروع آزمون‌های مزرعه ای اقدام به تنظیم گاوآهن و تراز طولی و عرضی گردید.



شکل ۳. ساقه و تیغه مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۴. مکانیزم تغییر زاویه حمله

برای اندازه‌گیری سرعت پیش روی تراکتور از چرخ پنجم^۱ نصب شده بر تراکتور استفاده گردید. بدین صورت که تعداد دورهای این چرخ به وسیله شفت انکودر شماره ۱ که به محور مرکزی این چرخ متصل شده بود. اندازه گیری گردید. قابل توجه است که شفت انکودر به وسیله اتصالات قابل انعطاف به محور مرکزی چرخ متصل شده بود. (شکل‌های ۵-الف و ۵-ب).

1. Fifth wheel

جهت تعیین خصوصیات برشی خاک (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، دگرچسبی و زاویه اصطکاک خارجی) برای هر رطوبت با سه تکرار آزمایش برش مستقیم انجام شد. به منظور اندازه‌گیری چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در سه سطح رطوبتی (PL ۰/۵ و PL ۰/۷ و PL ۰/۹) از دستگاه دیجیتالی برش مستقیم خاک شرکت آزمون با جعبه برش مکعبی متعلق به آزمایشگاه مکانیک خاک بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز استفاده شد. در هر مرحله از آزمون به وسیله دستگاه ابتدا خاک تهیه شده به آرامی در قالب دستگاه قرار می‌گرفت. پس از آن وزنه‌های لازم برای اعمال بار عمودی در جای خود قرار داده می‌شد. پس از طی این مراحل دستگاه شروع به کار می‌کرد و همزمان بارسنج میزان نیروی افقی وارد شده به خاک برای برش نمونه را قرائت می‌کرد. پس از برش نمونه سطح مقطعی که در آن برش رخ داده بود حساب می‌شد تا از تقسیم نیروی برشی حداکثر قرائت شده توسط بارسنج و نیروی عمودی بر این سطح به ترتیب تنش‌های برشی حداکثر و تنش‌های عمودی حداکثر بدست آید. همچنین برای تعیین دگرچسبی و زاویه اصطکاک خارجی خاک در سه سطح رطوبتی بر سطح فولاد، صفحه فولادی صیقلی شده مشابه سطح تیغه در نیمه پائینی ظرف دستگاه برش مستقیم گذاشته شد و نیمه بالایی با خاک پر گردید. با استفاده از تنش برشی بیشینه و تنش عمودی متناظر با آن در هر آزمون، نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب^۲ با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید. چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی خاک، دگرچسبی و زاویه اصطکاک خارجی خاک تعیین شد (Salar et al., 2013). شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از روش تعیین مقادیر ویژگی‌های مکانیکی خاک مزرعه می‌باشد.

سپس به ازای هر رطوبت سه نمودار رسم گردید به نحوی که بیانگر نیروی برشی در برابر جابه‌جایی افقی بود. پس از رسم این نمودارها سطح مقطع کاهش یافته محاسبه شده و تنش‌های قائم و برشی واقعی بدست آمد. سپس در هر یک از رطوبت‌ها، با استفاده از رسم نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش قائم، مقادیر جدول (۱) به دست آمد.

رطوبت به عنوان عامل اصلی در بلوک‌ها به صورت نواری تکرار گردید و پس از آن در هر بلوک عامل‌های زاویه حمله تیغه خاک‌ورز و سرعت پیشروی به صورت تصادفی پخش شدند. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ استفاده شد. در صورت معنی‌دار بودن اثر هر عامل آزمایش، میانگین‌ها

که در آن:

A: مساحت سطح بهم خورده خاک یا مساحت خاک بالا آمده،
 d_i : عدد خوانده شده از میله‌های پروفیل متر
 d_n و d_1 : اعداد خوانده شده از اولین و آخرین میله پروفیل متر.



شکل ۶- اندازه‌گیری مساحت سطح بالا آمدگی خاک توسط پروفیل متر

پس از انجام عملیات خاک‌ورزی، نمونه برداری خاک به عمق ۳۰-۰ سانتی متر از نیم‌رخ عرضی خاک به وزن تقریبی ۴ کیلوگرم، با استفاده از بیلچه و بدون ضربه زدن به کلوخه‌ها، از هر کرت و در سه تکرار انجام و به آزمایشگاه منتقل گردید. نمونه‌های خاک به مدت ۲۴ ساعت در هوا خشک گردید. خاک خشک شده از ۱۳ الک مطابق با سوراخ‌هایی به قطر ۸۸/۹، ۷۶/۲، ۵۰/۸، ۳۸/۱، ۳۲، ۲۵/۴، ۱۹، ۱۶، ۱۳/۵، ۶/۳۵، ۴/۷۶، ۳/۳۵ و ۲ میلی‌متر بدون ارتعاش و لرزاندن الک‌ها عبور داده شد. قطر الک‌ها بر مبنای قطر کلوخه‌های خاک انتخاب شده و میانگین قطر وزنی کلوخه‌ای (MWD) از رابطه (۴) بدست آمد.

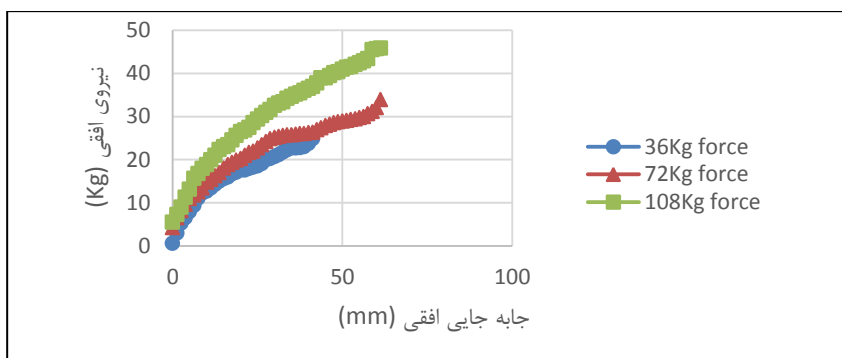
$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{MWD} = \sum_{i=1}^n (X_i \times W_i)$$

در این رابطه X_i ، میانگین قطر سوراخ الک i ام و الک بالایی و W_i ، نسبت وزنی کلوخه‌های باقی‌مانده روی الک i ام به وزن کل نمونه خاک می‌باشد. برای کلوخه‌هایی که از الک اول عبور نکردند، میانگین قطر هندسی و جرم هر یک از کلوخه‌ها در رابطه (۴) قرار داده شد. همچنین برای مقدار خاکی که از همه الک‌ها عبور کرد و در ظرف زیرین جمع شد، نصف قطر الک بالایی به جای X_i قرار گرفت (Salar et al., 2013).

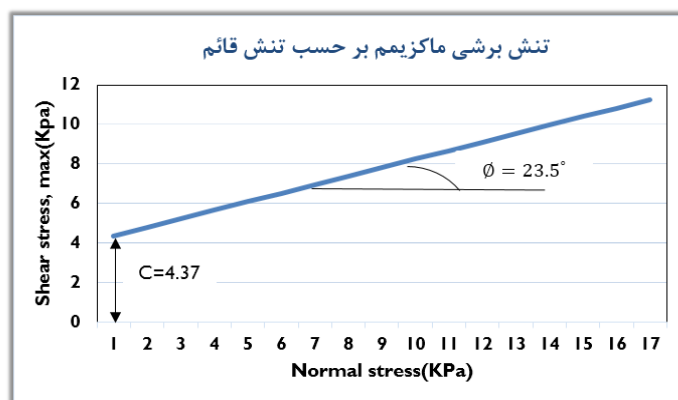
برای اندازه‌گیری شاخص مخروطی خاک به عنوان یکی از معیارهای سنجش فشردگی خاک از دستگاه نفوذسنج^۱ مخروطی Eijkelkamp 06.15 ساخت کشور هلند استفاده گردید.

در سطح احتمال ۵ درصد و با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) مقایسه شدند. همچنین مقادیر ضریب تبیین R^2 و F فاکتورهای آزمایشی در متغیرهای اندازه‌گیری شده مقایسه شدند.

در سطح احتمال ۵ درصد و با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) مقایسه شدند. همچنین مقادیر ضریب تبیین



شکل ۷- نمودار نیروی افقی بر حسب جابه جایی افقی در آزمایش برش مستقیم



شکل ۸- نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش قائم در رطوبت ۰/۹ حد پلاستیک

جدول ۱- ویژگی های مکانیکی خاک مزرعه آزمایشی (عمق ۳۰-۰ سانتی متر)

زاویه اصطکاک خارجی (Degree)	دگرچسبی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Degree)	چسبندگی (kPa)	رطوبت خاک (%)
۲۰/۴	۲/۱۴±۰/۰۴	۲۳/۵	۴/۳۷±۰/۰۳	(۱۶/۷٪)۰/۹ PL
۲۲/۹	۱/۴۰±۰/۰۱	۳۰/۲	۳/۲۶±۰/۰۲	(۱۳/۰٪)۰/۷ PL
۲۴/۲	۱/۰۱±۰/۰۲	۳۶/۶	۲/۲۳±۰/۰۱	(۹/۳٪)۰/۵ PL

نظر گرفته شده است. معادله رگرسیون مورد استفاده در این تحقیق به شکل معادله زیر بود.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (\text{رابطه ۵})$$

برای تعیین ضرایب رگرسیون b_0, b_1, \dots, b_n باید مجموع مربعات انحرافات حداقل باشد. به عبارت دیگر مقدار تابع $Q = \sum (Y_i - b_0 - b_1 X_{1i} - \dots - b_n X_{ni})^2$ می‌نیمم قرار داده شود. در این تحقیق رطوبت خاک مزرعه (Y_1)، زاویه حمله تیغه (Y_2) و سرعت پیشروی (Y_3) به عنوان متغیر وابسته و مقاومت کششی خاک‌ورز قلمی (X_1)، سطح مقطع بهم خوردگی خاک (X_2)، سطح مقطع خاک بالآمده (X_3)، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ای (MWD) (X_4)، مقاومت ویژه خاک‌ورز (X_5) و شاخص

از نتایج آزمون‌هایی که به طور جداگانه در تیمارها و سطوح تیماری مختلف انجام گرفت، مشخص گردید که از نظر نیروی مقاومت کششی رطوبت ۰/۹ حد پلاستیک رطوبت بهینه است. این در حالی بود که از نظر سطح مقطع بهم خوردگی و بالا آمدگی خاک و همچنین از نظر مقاومت ویژه خاک‌ورز قلمی و شاخص مخروطی خاک رطوبت بهینه ۰/۷ حد پلاستیک، اما از نظر MWD رطوبت بهینه ۰/۹ حد پلاستیک بود. لذا لازم بود تا برای معرفی نقطه بهینه کارکرد این دستگاه از نظر رطوبت مزرعه، زاویه حمله تیغه و سرعت پیشروی سه معادله رگرسیون ارائه گردد.

معادله‌های رگرسیون داده شده در این تحقیق از نوع رگرسیون چند متغیره است. در این تحقیق معادلات خطی در

سه سطح رطوبت خاک مزرعه، E کم‌ترین مقدار میانگین نیروی مقاومت ویژه بازاا سه سطح رطوبت خاک مزرعه و F کم‌ترین مقدار میانگین شاخص مخروطی خاک مزرعه بازاا سه سطح رطوبت خاک مزرعه است. در جدول ۲ مقادیر بهینه پارامترهای A تا F ارایه شده است. با جایگزینی مقادیر بهینه هر پارامتر بازای سه سطح رطوبت خاک مزرعه در رابطه ۶، رطوبت بهینه نهایی ۰/۷۱ حد پلاستیک با ضریب همبستگی ۰/۶۲ برای این خاک‌ورز بدست آمد. برای این خاک‌ورز به دست آمد.

به دست آوردن نقطه بهینه زاویه حمله تیغه خاک ورز قلمی با انجام رگرسیون چند متغیره بین نتایج پارامترهای مربوط به زاویه حمله تیغه خاک‌ورز قلمی، رابطه ۷ حاصل شد.

(رابطه ۷)

$$R.A_{opt} = 37.01783 + 0.0037 A - 0.07645 B + 0.06971 C - 0.00566 D - 0.48972 E - 0.00524 F$$

که در این رابطه: $R.A_{opt}$ معرف زاویه حمله بهینه تیغه خاک‌ورز قلمی می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر بهینه پارامترهای A تا F ارایه شده است. با جایگزینی مقادیر بهینه هر پارامتر بازای سه سطح زاویه حمله خاک‌ورز قلمی در رابطه ۷، زاویه حمله بهینه ۳۴ درجه با ضریب همبستگی ۰/۶۹ برای این خاک‌ورز به دست آمد.

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای اندازه‌گیری شده بر اساس رطوبت خاک مزرعه

رطوبت خاک	مقاومت کششی (N)	سطح مقطع بهم خوردگی خاک (cm ²)	سطح مقطع بالا آمده خاک (cm ²)	قطر متوسط وزنی کلوخه‌ای (mm)	مقاومت ویژه (N cm ⁻²)	شاخص مخروطی خاک (kPa)
۰/۵ PL	۸۶۵۲/۵	۶۱۴/۰۰	۳۹۲/۳۳	۴۶/۳۵	۱۴/۴۹	۲۰۶/۵۸
۰/۷ PL	۸۰۳۳/۰	۶۷۵/۹۳*	۴۷۱/۲۲*	۲۱/۸۸	۱۱/۸۹*	۱۸۸/۰۸*
۰/۹ PL	۷۳۱۸/۷*	۵۳۹/۴۱	۳۴۲/۸۱	۲۱/۷۷*	۱۳/۷۸	۳۶۱/۰۶

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای اندازه‌گیری شده بر اساس زاویه حمله خاک ورز قلمی

زاویه حمله (Degree)	مقاومت کششی (N)	سطح مقطع بهم خوردگی خاک (cm ²)	سطح مقطع بالا آمده خاک (cm ²)	قطر متوسط وزنی کلوخه‌ای (mm)	مقاومت ویژه (N cm ⁻²)	شاخص مخروطی خاک (kPa)
۳۰	۶۰۰۸/۶*	۵۱۴/۴۴	۳۰۶/۵۲	۲۶/۸۲	۱۲/۰۰*	۴۱۰/۱۰
۴۰	۸۰۲۳/۹	۶۲۷/۵۹	۴۱۴/۴۸	۳۱/۰۹*	۱۳/۰۴	۱۸۰/۹۲
۵۰	۹۹۷۱/۷	۶۸۷/۳۰*	۳۸۵/۳۷*	۳۲/۱۶	۱۵/۱۳	۱۶۴/۷۹*

که در این رابطه: $V_{s,opt}$ سرعت پیشروی بهینه خاک‌ورز قلمی می‌باشد. در جدول ۴ مقادیر بهینه پارامترهای A تا F ارایه شده است. با جایگزینی مقادیر بهینه هر پارامتر بازای سه سطح سرعت پیشروی خاک‌ورز قلمی در رابطه ۸، سرعت پیشروی بهینه ۵/۵ کیلومتر بر ساعت با ضریب همبستگی ۰/۵۹ برای این خاک‌ورز به دست آمد.

مخروطی خاک مزرعه (X_6) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. در نتیجه با جایگذاری نقطه بهینه متغیرهای مستقل در این سه معادله، نقطه بهینه کاری دستگاه مذکور بدست می‌آید.

نتایج و بحث

بدست آوردن نقطه بهینه رطوبت خاک مزرعه جهت انجام خاک ورزی

با انجام رگرسیون چند متغیره بین نتایج پارامترهای مربوط به رطوبت خاک مزرعه، رابطه ۶ حاصل گردید.

$$PL_{opt} = 1.71432 + 0.00001854A - 0.00339 B + 0.00298 C - 0.00589 D - 0.00993 E + 0.00007167 F$$

در این رابطه: PL_{opt} رطوبت بهینه کاری خاک‌ورز قلمی بر حسب درصدی از حد پلاستیک خاک، A کم‌ترین مقدار میانگین نیروی مقاومت کششی بازاا سه سطح رطوبت خاک مزرعه، B بیش‌ترین مقدار میانگین سطح مقطع بهم خوردگی خاک بازای سه سطح رطوبت خاک مزرعه، C بیش‌ترین مقدار میانگین سطح مقطع بالا آمده خاک بازاا سه سطح رطوبت خاک مزرعه، D کم‌ترین مقدار میانگین وزنی قطر کلوخه‌ها بازاا

به دست آوردن نقطه بهینه سرعت پیشروی خاک ورز قلمی

با انجام رگرسیون چند متغیره بین نتایج پارامترهای مربوط به سرعت پیشروی خاک‌ورز قلمی رابطه ۸ حاصل شد که با قرار دادن مقدار بهینه مربوط به هر پارامتر در رابطه فوق مقدار بهینه نهایی سرعت پیشروی به دست می‌آید.

(رابطه ۸)

$$V_{s,opt} = -6.70148 - 0.00051451 A + 0.02581 B - 0.01336 C - 0.03615 D + 0.46554 E + 0.0012 F$$

جدول ۴- مقادیر بهینه پارامترهای اندازه گیری شده بر اساس سرعت پیشروی خاک ورز قلمی

سرعت پیشروی (km h^{-1})	مقاومت کششی (N)	سطح مقطع بهم خوردگی خاک (cm^2)	سطح مقطع بالا آمده خاک (cm^2)	قطر متوسط وزنی کلوخه‌های (mm)	مقاومت ویژه (Ncm^{-2})	شاخص مخروطی خاک (kPa)
۳	۷۲۶۷/۹*	۵۶۰/۱	۳۵۴/۵	۳۴/۷	۱۳/۰	۴۱۰/۱۰
۵	۷۷۲۴/۲	۶۱۴/۲	۴۰۵/۴	۲۸/۲	۱۲/۳*	۱۸۰/۹
۷	۹۰۱۲/۴	۶۵۵/۸*	۴۴۶/۶*	۲۷/۱*	۱۴/۳	۱۶۴/۷۹*

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحلیل رگرسیونی، رطوبت بهینه برای کارکرد مطلوب خاک‌ورز قلمی ۰/۷۱ حد پلاستیک خاک است. چنان‌چه هدف اصلی از عملیات شخم زنی، بالا بردن راندمان به هم خوردگی و تغییرات ساختار و چگالی خاک باشد (McKyes & Ali, 1977)، زاویه حمله بهینه برای عملکرد مطلوب خاک‌ورز قلمی با توجه به ۶ صفت اندازه‌گیری شده، ۳۴ درجه پیشنهاد می‌گردد. سرعت پیشروی بهینه برای عملکرد مطلوب خاک‌ورز

قلمی از نظر ۶ صفت اندازه‌گیری شده، ۵/۵ کیلومتر بر ساعت پیشنهاد می‌شود. استفاده از این معادلات می‌تواند نقطه‌ی کارکرد بهینه دستگاه در سه تیمار، رطوبت خاک مزرعه، سرعت پیشروی و زاویه حمله تیغه را مشخص نماید. انتظار می‌رود کارکرد دستگاه در نقاط بهینه علاوه بر کاهش مقاومت کششی و توان مصرفی، افزایش راندمان مزرعه‌ای و بالا بردن بازده خاک‌ورزی از نقطه نظر به هم خوردگی خاک و به حداقل رساندن توان کششی را در پی داشته باشد.

REFERENCES

- Arvidsson, J., Keller, T., & Gustafsson, K.. (2004). Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 221-231.
- Godwin, R. (2007). A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 331-340
- Grant, C., & Lafond, G. (1993). The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 73(2), 223-232.
- Keller, T., Arvidsson, J., & Dexter, A.R. (2007). Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil and Tillage Research*, 92(1), 45-52.
- McKyes, E., & Maswaure, J. (1997). Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 43(3), 195-204.
- McKyes, E., & Ali, O. S. (1977). The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics*, 14(2), 43-58.
- Raoufat, M., & Mashhadi, H. (1999). Determine the optimal distance between the para plow blades to achieve desired tillage. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 2(30), 319-330. (In Farsi with English abstract).
- Regional Network for Agricultural Machinery. (1983). RNAM test codes and procedures of farm machinery. Technical Series No. 12 (p. 129). Bangkok: Thailand.
- Salar, M., Esehaghbeygi, A., & Hemmat, A. (2013). Soil loosening characteristics of a dual bent blade subsurface tillage implement. *Soil and Tillage Research*, 134, 17-24.
- Stafford, J. V. (1979). The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24(1), 41-56.
- Stafford, J. V. (1981). An application of critical state soil mechanics: The performance of rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 26(5), 387-401.