

## مدلسازی و بهینه‌سازی اثر هندسه بال بر نیروی کششی و عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار

محمودرضا سالار<sup>۱</sup> - سید حسین کار پرورفرد<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵

### چکیده

در این پژوهش، با استفاده از روش سطح پاسخ، نقاط بهینه هندسه بال خاک‌ورز قلمی بالدار، جهت دستیابی به کمینه مقدار نیروهای کششی و عمودی ابزار خاک‌ورز تعیین شد. عمق قرارگیری (۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر)، زاویه تمایل (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه) و زاویه‌ی حمله (۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ درجه) بال، هر یک در سه سطح به‌عنوان عواملی بودند که تأثیر آن‌ها بر نیروهای کششی و عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش‌ها براساس طرح مرکب مرکزی برای هر یک از عوامل یاد شده در انباره خاک واقع در موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج، انجام شد. برای هر پاسخ (نیروهای کششی و عمودی) با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی چندگانه، مدل‌های چندجمله‌ای درجه دوم به‌دست آمد. در شرایط مقادیر بهینه حاصله از نرم‌افزار (عمق قرارگیری ۵ سانتی‌متر، زاویه تمایل ۱۱/۱۰ درجه و زاویه حمله ۱۹/۴۶ درجه برای بال‌ها)، مقادیر نیروهای کششی و عمودی به‌ترتیب ۳/۴۳ و ۱/۳۱ کیلو نیوتن برای خاک‌ورز مشخص شد. مدل ارائه شده برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته نتایج بسیار نزدیکی با یافته‌های تجربی به‌دست آمده داشت.

**واژه‌های کلیدی:** خاک‌ورز قلمی بالدار، روش سطح پاسخ، زاویه حمله، نیروی عمودی، نیروی کششی

### مقدمه

مقایسه نتایج حاصله با نتایج مطالعات آزمایشگاهی برای دو تیغه صاف و منحنی شکل، بیان شد که نیروی کشش مورد نیاز برای عامل خاک‌ورز با زاویه حمله ۵۰-۳۰ درجه، به آرامی افزایش یافته و زاویه حمله بهینه ادوات خاک‌ورز باریک حدود ۳۰ درجه به‌دست آمد. نتایج حاصل از مقایسه بین دو تیغه صاف و منحنی شکل نشان داد که حداقل نیروی کشش، مربوط به تیغه‌های صاف است (Osman, 1964). سایر محققان نیز گزارش نمودند که کمترین نیروی کششی برای ابزار باریک در زاویه حمله ۳۰ درجه حاصل می‌شود (McKyes and Maswaure, 1997). در تحقیقی دیگر، شکست خاک در شرایط مختلف کاری ادوات خاک‌ورز بررسی و با استفاده از تیغه‌های مسطح با پنج زاویه حمله مختلف و در سه نوع خاک متفاوت مشخص شد که با افزایش زاویه حمله، نیروی کشش مورد نیاز تیغه خاک‌ورز افزایش می‌یابد (Aluko and Seig, 2000). در تحقیق دیگری به‌منظور تعیین معادلات پیش‌بینی نیروهای کششی و عمودی وارد بر گاوآهن قلمی، آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شد و معادلات به روش تحلیل ابعادی توسعه یافت. نتایج حاصل نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود ندارد (Hosseini and Karparvarfard, 2012). تحقیقات انجام شده در راستای کاهش مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز منجر به طراحی و

عکس‌العمل دینامیکی خاک به ابزار خاک‌ورزی، فاکتور مهمی در تعیین عملکردشان می‌باشد (Shen and Kushwaha, 1998). از آن‌جا که مصرف سوخت و توان کششی تراکتور برای کشیدن ابزار خاک‌ورز در خاک، از عوامل محدودکننده محسوب می‌شود، لذا برای یک تراکتور با اندازه مشخص، با کاهش مقاومت کششی، می‌توان عرض کار ابزار و سرعت کار را افزایش داد که نتیجه آن افزایش نرخ انجام کار و کاهش هزینه‌ها می‌باشد (Arvidsson and Hillerström, 2010). زاویه حمله یا نفوذ تیغه ادوات خاک‌ورز، عامل نفوذ وسیله خاک‌ورز به داخل خاک می‌باشد. تعیین زوایای حمله و تمایل بهینه با توجه به تأثیر آن‌ها بر مقاومت کششی و نفوذ بهتر در خاک در هر ماشین خاک‌ورزی ضروری به نظر می‌رسد (Esehaghbeygi et al., 2005). با انجام یکسری آزمایش‌ها و

۱- دانش‌آموخته دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز  
\* - نویسنده مسئول: (Email: karparvr@shirazu.ac.ir)

با خاک، افزایش یافته است (Al-Janobim, et al., 2002). به‌طور کلی پژوهش‌های انجام شده نشان داد که می‌توان از یک سطح-خاک‌ورز تیغه مورب دوپل و خاک‌ورز قلمی به‌صورت ترکیبی به‌منظور کاهش نیروی کشش، نرم کردن بستر بذر توسط خاک‌ورز قلمی و بال‌های سطح-خاک‌ورز به همراه افزایش سطح به‌هم خوردگی خاک توسط بال‌ها و ایجاد فضای مناسب برای رشد ریشه توسط خاک‌ورز قلمی، در دستگاه خاک‌ورز مرکب استفاده نمود. در چنین مواقعی تعیین حالت بهینه ابزار خاک‌ورز به‌منظور کاهش نیروی کششی و عمودی، حائز اهمیت خواهد بود. در این میان روش سطح پاسخ بیشترین کاربرد را دارد (Horuz et al., 2012). روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه و بهینه کردن فرآیندهایی به‌کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد و هدف، توصیه رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل توسط مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی این پاسخ می‌باشد (Bas et al., 2007).

هدف از این پژوهش، تعیین حالت بهینه زاویه تمایل، زاویه حمله و عمق قرارگیری بال در خاک‌ورز قلمی بالدار جهت استفاده در خاک‌ورز مرکب به‌منظور دستیابی به کمترین مقدار نیروهای کششی و عمودی ابزار با استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### ساخت خاک‌ورز قلمی بالدار

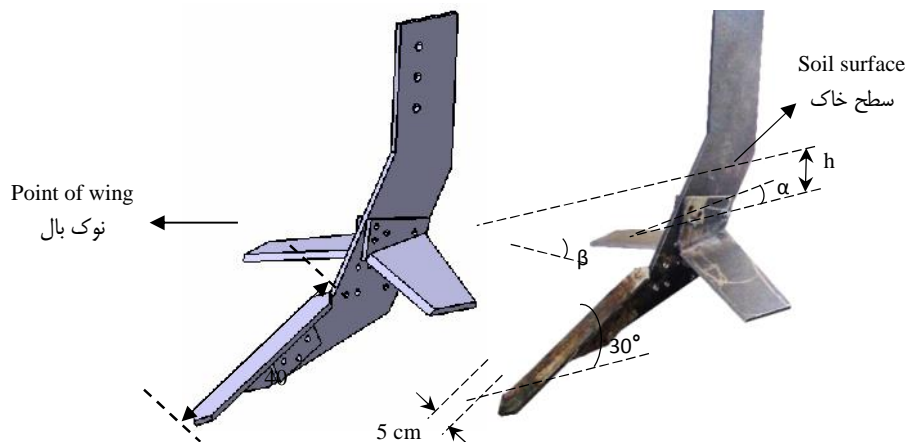
با استفاده از خصوصیات سطح-خاک‌ورز تیغه مورب دوپل (Salar et al., 2013) و خاک‌ورز قلمی، ابزار خاک‌ورز قلمی بالدار با استفاده از نرم‌افزار Catia V5R20 طراحی و در کارگاه گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز ساخته شد. مطابق نتایج محققین میزان خردشدگی و همچنین سطح به‌هم خوردگی خاک در سطح-خاک‌ورز با بال رو به جلو نسبت به نوع رو به عقب در سطح-خاک‌ورز تیغه مورب دوپل بیشتر می‌باشد (Salar et al., 2013) و از طرفی پژوهش‌های پیشین نشان داد که کمترین مقاومت کششی برای خاک‌ورز قلمی در زاویه حمله ۳۰ درجه حاصل شده است (Osman, 1964; McKyes and Maswaure, 1997). از این رو، خاک‌ورز قلمی بالدار با زاویه حمله تیغه ۳۰ درجه و بال‌های رو به جلو ساخته شد. در این تحقیق تلاش شد که هندسه بهینه بال تعیین شود. سطوح زوایای تمایل و حمله بر مبنای حالت بهینه تحقیقات قبلی انتخاب شد. از آنجا که تاکنون تحقیقی در تغییر عمق قرارگیری بال صورت نگرفته است به همین دلیل انتخاب سطوح عمق قرارگیری بال بر مبنای افزایشی بودن عمق قرارگیری بال نسبت به سطح خاک، جهت بررسی میزان نفوذ و همچنین نیروی کششی ابزار خاک‌ورز بوده است. به همین منظور عمق قرارگیری (۵،

ساخت ادوات جدیدی به نام‌های گاوآهن پارا و کج ساق شد. این ادوات با ساختار ویژه خود در حالی که خاک را زیر و رو نمی‌نمایند، ساختمان خاک را در هم شکسته و از طرفی نیاز به نیروی کششی کمتری دارند (Harrison, 1988). اثر زاویه حمله در دو سطح صفر و ۱۵ درجه بر واکنش خاک در گاوآهن کج ساق در دو زاویه تمایل ۳۰ و ۴۵ درجه مورد مقایسه قرار گرفت. در زاویه حمله صفر درجه، اصطکاک به‌وجود آمده در دو سطح بالایی و زیرین تیغه موجب افزایش نیروهای وارد بر تیغه شد. بنابراین، در زاویه حمله صفر درجه نسبت به ۱۵ درجه، نفوذ گاوآهن به داخل خاک کمتر بود (Harrison and Licsko, 1989). با استفاده از یک گاوآهن کج ساق منفرد راست‌گرد با زاویه تمایل ۳۰ درجه، گزارش شد که مقاومت کششی در زاویه حمله ۷/۵ درجه حداقل بود و با افزایش عمق کار، مقاومت کششی گاوآهن کج ساق در مقایسه با گاوآهن برگرداندار بیشتر شد، اما مقاومت ویژه آن به‌طور محسوسی کمتر بود. سطح مقطع به‌هم خورده خاک در زاویه حمله ۱۵ درجه حداکثر و در هنگام کار با زاویه حمله ۷/۵ درجه، مقاومت کششی حداقل بود (Majidi Iraj and Raoufat, 1997). گاوآهن کج ساق در زوایای حمله ۹ و ۱۵ درجه، حداقل مقاومت کششی و نیز حداکثر نفوذ را به داخل خاک داشت. حداکثر شکست خاک در کمترین زاویه خمش و بیشترین زاویه حمله به‌دست آمد که منجر به افزایش مقاومت کششی شد (Durairaj and Balasubramanian, 1997). نتایج حاصل از رو به عقب و جلو بودن بال "سطح-خاک‌ورز تیغه مورب دوپل" به‌منظور استفاده در خاک‌ورزی حفاظتی با استفاده از یک واحد خاک‌ورز از خاک‌ورز مرکب ساخت شرکت دلتا سوئد نشان داد که با افزایش زاویه حمله (از ۷/۵ به ۱۵ درجه) و زاویه تمایل (از ۱۰ به ۲۰ درجه) تیغه، سطح به‌هم خوردگی و میزان خردشدگی خاک افزایش یافته که نشان از افزایش نیروی کششی می‌باشد. همچنین سطح به‌هم خوردگی خاک در استفاده از سطح-خاک‌ورز رو به جلو نسبت به نوع رو به عقب به‌طور معنی‌داری بیشتر شد (Salar et al., 2013).

استفاده از سطح-خاک‌ورز تیغه مورب در عمق ۱۵ سانتی‌متر باعث شد چرخ تثبیت عمق به‌کار رفته اصطکاک ناچیزی با خاک داشته باشد. این امر ناشی از زیاد بودن نیروی عمودی به‌خاطر وجود بال می‌باشد. برای رفع این نقص پیشنهاد شد از خاک‌ورز قلمی استفاده شود تا علاوه بر کاهش نیروی عمودی، بتوان شخم در عمق خاک‌ورزی اولیه را نیز انجام داد (Salar, 2011). در تحقیقی دیگر، تأثیر هندسه ابزار خاک‌ورز پنجه‌غازی استاندارد (Sweep) بر نیروهای خاک‌ورزی مطالعه شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع لبه برش، نیروی کششی و عمودی به‌طور معناداری افزایش یافتند (Fielke, 1996). همچنین اثر نوع ساقه گاوآهن قلمی بر نیروی کششی و عمودی ابزار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که مقدار نیروی کششی و عمودی در ساقه منحنی به دلیل سطح تماس بیشتر

این ابزار از ورق فولادی CK45 استفاده شد. ساق، بال و تیغه قلمی با استفاده از برش لیزری تهیه و توسط پیچ و مهره مونتاژ شد. به منظور افزایش مقاومت تیغه و با توجه به جنس و خصوصیات فیزیکی آن، تیغه به وسیله شعله پخش کن تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت کافی حرارت داده شده تا فولاد به شکل استنیت (آهن گاما) درآمده و سپس سریع سرد شد (شکل ۱).

۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر) از سطح خاک، زاویه تمایل (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه) و زاویه حمله (۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ درجه) بال به عنوان متغیرهای مستقل برای بال در نظر گرفته شد (Harrison and Licsko, 1989; Durairaj and Balasubramanian, 1997; Majidi Iraj and Raoufat, 1997; Salar *et al.*, 2013). برای تغییر عمق قرارگیری و زاویه حمله بال، سوراخ‌هایی بر روی ساقه و بال تعبیه شد. همچنین به‌ازای هر زاویه تمایل، بال‌های جداگانه‌ای ساخته شد. برای ساخت



شکل ۱- طرحواره و تصویر واقعی ابزار خاک‌ورز قلمی بالدار (h: عمق قرارگیری بال، : زاویه حمله بال و : زاویه تمایل بال)

**Fig. 1.** The schematic and actual figure of winged chisel plow (h: Depth of wing, : rake angle of wing, : bend angle of wing)

شد. دینامومتر بر روی حامل ادوات سوار شده و حامل ادوات نیز توسط اتصال سه نقطه به منظور تأمین نیروی لازم برای حرکت طولی بر روی ریل انباره خاک به یک تراکتور مسی فرگوسن متصل بود (شکل ۲). با نصب خاک‌ورز بر روی حامل ادوات و با تنظیم عمق قرارگیری، زوایای تمایل و حمله بال، خاک‌ورز در عمق خاک تعیین شده (۳۰ سانتی‌متر) فرو برده شد. در نهایت تراکتور از طریق حامل ادوات عمل کشش خاک‌ورز در خاک را انجام می‌داد. به منظور جمع‌آوری و ثبت داده‌های خروجی دینامومتر از یک دستگاه میکرو لاگر ساخت شرکت CAMPBELL انگلیس، مدل CR23X استفاده شد که قابل برنامه‌ریزی با نرم افزار PC208 (EDLOG) بود. با اتصال دستگاه به کامپیوتر درگاه RS-232 و برقراری ارتباط، امکان انتقال برنامه مورد نظر به میکرو لاگر و همچنین انتقال داده‌های جمع‌آوری شده به رایانه برای انجام تجزیه و تحلیل، فراهم شد. لازم به ذکر است نرخ داده‌برداری از قرار ۲۵ داده در ثانیه میسر بود.

### محل و چگونگی انجام آزمایش‌ها

به منظور انجام آزمایش با خاک‌ورز قلمی بالدار از انباره خاک مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج استفاده شد. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. انباره خاک مورد استفاده دارای طول ۲۴ متر، عرض ۱/۷ متر و عمق ۱ متر بود. انباره مذکور شامل بخش‌های مخزن خاک، سامانه تأمین و انتقال توان، دستگاه پردازش خاک و واحد حامل ادوات<sup>۱</sup> بود. عملیات آماده‌سازی خاک با شرایط مطلوب مورد نیاز توسط حامل پردازش خاک شامل بیله‌های مکانیکی جهت جابه‌جایی خاک، تیغه تسطیح‌کننده خاک و دو غلتک صاف و دندانه میخی جهت فشردن خاک اجرا شد. مشخصات خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور اندازه‌گیری نیروهای کششی و عمودی خاک‌ورز از دینامومتر هشت وجهی کشیده<sup>۲</sup> (Godwin, 1975) که به همراه سخت‌افزار و نرم‌افزار مربوطه عمل واحدی را انجام می‌دادند استفاده

1- Tool carriage

2- Extended octagonal ring transducer

### طرح آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

مهم‌ترین مسئله این تحقیق، بررسی آثار اصلی و متقابل عوامل مؤثر و همچنین ارائه مدل و بهینه‌سازی آن‌ها بود. از این‌رو روش طرح آماری سطح پاسخ، انتخاب شد. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و تمامی ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل عوامل، قابل برآورد می‌شوند. در این مطالعه اثر متغیرهای مستقل شامل: عمق قرارگیری بال ( $X_1$ )، زاویه تمایل بال ( $X_2$ ) و زاویه حمله بال ( $X_3$ ) در سه سطح ارزیابی شد. متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه اتصال ابزار خاک‌ورز به دینامومتر

Fig. 2. The method of connecting the tillage tool to the dynamometer

### جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد بررسی

Table 1- Some physical properties of the studied soil

بافت خاک Soil texture	رس Clay (%)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رطوبت (بر مبنای خشک) Moisture (dry base) (%)	چگالی ظاهری Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )
لومی Loam	33.3	45.8	20.9	10.4	1.45

### جدول ۲- سطوح انتخاب شده برای فاکتورها

Table 2- The selected levels for the factors

متغیر Variable	نماد Symbol	سطوح متغیر Levels of variable		
		(-1)	(0)	(+1)
عمق قرارگیری بال (سانتی‌متر) Depth of wing (cm)	$X_1$	5	10	15
زاویه تمایل بال (درجه) Bend angle (degree)	$X_2$	10	20	30
زاویه حمله بال (درجه) Rake angle (degree)	$X_3$	7.5	15	22.5

در این رابطه  $Y$  پاسخ پیش‌بینی شده،  $a_0$  ضریب ثابت،  $a_1$ ،  $a_2$ ،  $a_3$  ضرایب خطی به ترتیب پارامترهای عمق قرارگیری بال، زاویه تمایل بال و زاویه حمله بال می‌باشد. همچنین ضرایب  $a_{11}$ ،  $a_{22}$ ،  $a_{33}$  ضرایب تأثیرات درجه دوم و  $a_{12}$ ،  $a_{13}$  و  $a_{23}$  ضرایب تأثیرات متقابل هستند. در این تحقیق از طرح مرکب مرکزی با سه متغیر مستقل ذکر شده در سه سطح بر اساس تیمارهای خواسته شده از نرم افزار به منظور بررسی تأثیر نیروهای کششی و عمودی ابزار و بهینه‌سازی فرآیند مذکور استفاده شد (Kargozari et al., 2010).

برای محاسبه آماری، مدل‌سازی و بهینه‌سازی از نرم افزار 7.0.0 Design Expert استفاده شد. مدل مورد استفاده در روش سطح پاسخ عموماً رابطه‌ی درجه دوم می‌باشد. در روش سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را برای هر متغیر جداگانه بیان می‌کند، مدل چند متغیره به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{33} X_3^2 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3 \quad (1)$$

## نتایج و بحث

## نیروی کششی خاک‌ورز قلمی بالداری

در جدول ۳ نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها در تیمارهای خواسته شده از نرم‌افزار آمده است. همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، نتایج حاصل نشان داد که مدل درجه دوم برازش شده با ضریب اطمینان بیش از ۹۴ درصد ( $R^2 > 0.94$ ) با داده‌های آزمایش مطابقت دارد. عدم برازش برای پاسخ‌های مورد نظر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین بالا بودن ضریب تبیین ( $R^2$ ) و معنی‌دار نبودن عدم برازش برای آن، صحت مدل را برای برازش اطلاعات تأیید می‌کند. بالا بودن ضریب رگرسیون نشان می‌دهد که مدل به خوبی توانسته نتایج به دست آمده را پیش‌بینی کند. روابط بین نیروی کششی با پارامترهای هندسه بال خاک‌ورز قلمی بالداری در رابطه (۲) آورده شده است. طبق جدول ۴ اثرات  $X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_2^2, X_3^2$  بر نیروی کششی معنی‌دار نبودند لذا از رابطه (۲) خارج شدند. لازم به ذکر است که اثر زاویه حمله بر نیروی کششی معنی‌دار نشد. اما از آنجایی که به‌عنوان یکی از عوامل اصلی محسوب می‌شود، در رابطه مذکور آورده شده است. به‌علاوه میزان اثر آن نیز در رابطه نسبت به دو عامل دیگر کمتر می‌باشد.

نتایج نشان داد که اثر عمق قرارگیری بال بر مقدار نیروی کششی مثبت بود. با افزایش عمق قرارگیری بال نسبت به سطح خاک، تماس با خاک سست شده حاصل از حرکت تیغه قلمی کمتر می‌شود و لذا

باعث شکست خاک دست نخورده اطراف تیغه قلمی گردیده و این امر باعث افزایش فشار به تیغه شده است. در تحقیقات مشابه گزارش شد که با افزایش عمق کار، نیروی کششی خاک‌ورز افزایش یافت (Wolf *et al.*, 1981; Summers *et al.*, 1986; Khalilian *et al.*, 1988; Glancey *et al.*, 1996).

نتایج حاکی از آن بود که اثر زاویه تمایل بال بر نیروی کششی معنی‌دار بوده و با افزایش زاویه تمایل، مقدار نیروی کششی افزایش می‌یافت که با نتایج تحقیقات گذشته مطابقت دارد (Harrison and Licsko, 1989; Salar, 2011). با افزایش زاویه تمایل بال، نوک بال در عمق پایین‌تری قرار می‌گرفت که باعث افزایش نیروی کششی می‌شد. همان‌طور که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود اثر تغییر زاویه تمایل نسبت به تغییر عمق قرارگیری باله بر مقدار نیروی کششی بیشتر می‌باشد که دلیل آن می‌تواند نیاز به نیروی بیشتر برای بالا آوردن خاک در تحت زوایای تمایل بیشتر باشد.

بر طبق نتایج، اثر زاویه حمله بر نیروی کششی معنی‌دار نمی‌باشد. ولی در تحقیقات پیشین اثر زاویه حمله بر مقاومت کششی را مثبت و معنی‌دار گزارش نمودند (Payne and Tanner, 1959; McKyes and Maswaure, 1997; Majidi Iraj and Raoufat, 1997; Salar, 2011). دلیل این تفاوت، برخورد بخش زیادی از بال خاک‌ورز قلمی بالداری با خاک دست‌خورده می‌باشد.

در شکل ۳ اثر متقابل زاویه تمایل و زاویه حمله در سه عمق قرارگیری بال بر نیروی کششی خاک‌ورز نشان داده شده است.

## جدول ۳- نتایج آزمون نیروی کششی و عمودی در نقاط مشخص شده با طرح مرکب مرکزی

Table 3- The results of draft and vertical forces in selected points with central composite design

تیمار Treatment	متغیرهای تحت بررسی Studied variables			پاسخ‌ها Responses	
	عمق قرارگیری بال Depth of wing	زاویه تمایل Bend angle	زاویه حمله Rake angle	نیروی کششی Draft force	نیروی عمودی Vertical force
	(cm)	(degree)	(degree)	(kN)	(kN)
1	5	10	7.5	4.576	2.001
2	15	10	7.5	4.719	2.150
3	5	30	7.5	4.279	1.633
4	15	30	7.5	5.635	3.037
5	5	10	22.5	3.666	1.288
6	15	10	22.5	4.658	1.931
7	5	30	22.5	5.740	2.457
8	15	30	22.5	7.525	3.472
9	5	20	15	3.346	1.259
10	15	20	15	5.162	2.396
11	10	10	15	3.914	1.723
12	10	30	15	6.213	3.211
13	10	20	7.5	5.014	2.207
14	10	20	22.5	5.068	2.447
15	10	20	15	4.946	2.393
16	10	20	15	4.555	2.116
17	10	20	15	4.609	2.099

$$Draft\ force = 4.67 + 0.61X_1 + 0.79X_2 + 0.24X_3 + 0.54X_2X_3 \quad (2)$$

جدول ۴- تجزیه واریانس نیروی عمودی و کششی خاک‌ورز قلمی بالدار

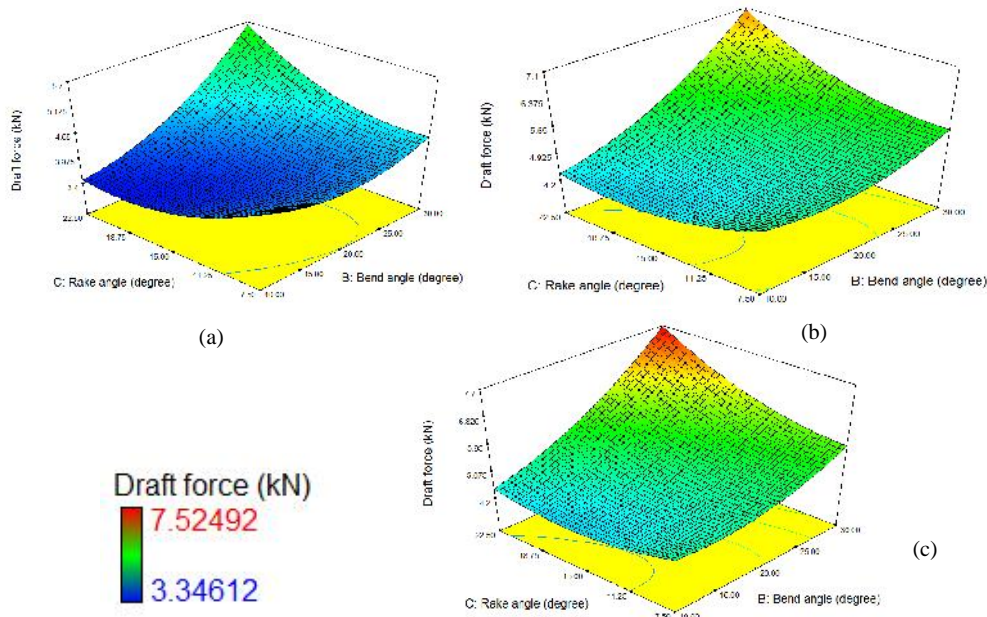
Table 3- Analysis of variance (ANOVA) of draft and vertical forces of winged chisel plow

	نیروی کششی (کیلو نیوتن) Draft force (kN)				نیروی عمودی (کیلو نیوتن) Vertical force (kN)		
	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	ضریب رگرسیون Regression coefficient	عدد p p- value Prob> F	میانگین مربعات Mean square	ضریب رگرسیون Regression coefficient	عدد p p- value Prob> F
مدل Model	9	1.65	4.67	0.0009	0.62	2.20	0.0023
X <sub>1</sub>	1	3.71	0.61	0.0007	1.89	0.43	0.0007
X <sub>2</sub>	1	6.18	0.79	0.0001	2.22	0.47	0.0004
X <sub>3</sub>	1	0.59	0.24	0.0559	0.032	0.057	0.4746
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	1	0.50	0.25	0.0728	0.33	0.20	0.0455
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	1	0.20	0.16	0.2205	1.39E-3	0.013	0.8793
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	1	2.34	0.54	0.0026	0.60	0.027	0.0137
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	0.41	-0.39	0.0987	0.35	-0.36	0.0402
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	0.41	0.42	0.0810	0.20	0.28	0.0980
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	0.42	0.40	0.0949	0.050	0.14	0.3779
مانده ها Residual	7	0.11			0.056		
عدم برازش Lack of fit	5	0.14		0.2600	0.068		0.3119
خطای خالص Pure error	2	0.045			0.027		
کل Cor total	16						
میانگین Mean			4.92			2.22	
انحراف معیار Std. Dev.			0.34			0.24	
ضریب تغییرات C.V. %			6.83			10.64	
R <sup>2</sup>			0.9495			0.9338	
Adj- R <sup>2</sup>			0.8847			0.8487	
Pred R <sup>2</sup>			0.6069			0.2661	

### نیروی عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار

طبق داده‌های جدول ۴، مدل درجه دوم برازش شده با ضریب اطمینان بیش از ۹۳ درصد ( $R^2 > 0.93$ ) با داده‌های آزمایش مطابقت دارد و عدم برازش برای پاسخ‌های مورد نظر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد. در این صفت اندازه‌گیری شده نیز، بالا بودن ضریب رگرسیون نشان می‌دهد که مدل به خوبی توانسته نتایج به‌دست آمده را پیش‌بینی کند. روابط بین نیروی عمودی با پارامترهای هندسه بال خاک‌ورز قلمی بالدار در رابطه (۳) آورده شده است.

همان‌طور که از بررسی شکل ۳ بر می‌آید اثر تغییر زاویه حمله بر نیروی کششی در زاویه تمایل ۲۲/۵ درجه نسبت به زوایای ۷/۵ و ۱۵ درجه بیشتر می‌باشد. البته در عمق قرارگیری بیشتر (شکل ۳-b و ۳-c)، تأثیر این عامل نمایان‌تر می‌باشد. به نظر می‌رسد عرض و عمق به هم خوردگی خاک در لحظه برخورد تیغه قلمی به خاک نسبت به عرض بال و عمق کار کم می‌باشد که با افزایش عمق قرارگیری بال، سطح برخورد بال با خاک دست نخورده افزایش یافته که باعث افزایش مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز می‌شود. با افزایش زاویه حمله در زاویه تمایل و عمق قرارگیری بیشتر، سطح افزایش یافته تیغه با خاک دست نخورده بیشتری برخورد می‌کند. آهنگ تغییرات نیروی کششی نسبت به عوامل متغیر در شکل ۳ به تفکیک رنگ نیز نشان داده شده است.



**شکل ۳-** اثرات متقابل زاویه تمایل و حمله بر نیروی کششی (عمق قرارگیری بال، a: ۵ سانتی‌متر، b: ۱۰ سانتی‌متر و c: ۱۵ سانتی‌متر)  
**Fig. 3.** The effects of interaction between bend and rake angles on draft force (depth of wing, a: 5 cm, b: 10 cm, and c: 15 cm)

بالتر، مخصوصاً در عمق قرارگیری بیشتر بال، نیروی عمودی با افزایش زاویه حمله افزایش یافته است. به نظر می‌رسد همان دلیلی که باعث افزایش نیروی کششی در زوایای تمایل زیاد گردید منجر به افزایش نیروی عمودی نیز شد.

#### تعیین شرایط بهینه

کمیته نمودن نیروی کششی و نیروی عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار به‌عنوان اهداف مورد نظر این تحقیق در تجزیه و تحلیل‌های آماری مورد نظر قرار گرفته و بدین گونه شرایط برای انجام فرآیند بهینه با توجه به شکل ۶ که از روش سطح پاسخ حاصل شده است، به‌دست آمد. در شرایط بهینه به‌دست آمده (عمق قرارگیری ۵ سانتی‌متر، زاویه تمایل ۱۱/۱۰ درجه و زاویه حمله ۱۹/۴۶ درجه برای بال‌ها)، مقدار نیروهای کششی و عمودی به‌ترتیب ۳/۴۳ و ۱/۳۱ کیلو نیوتن مشخص شد.

#### نتیجه‌گیری

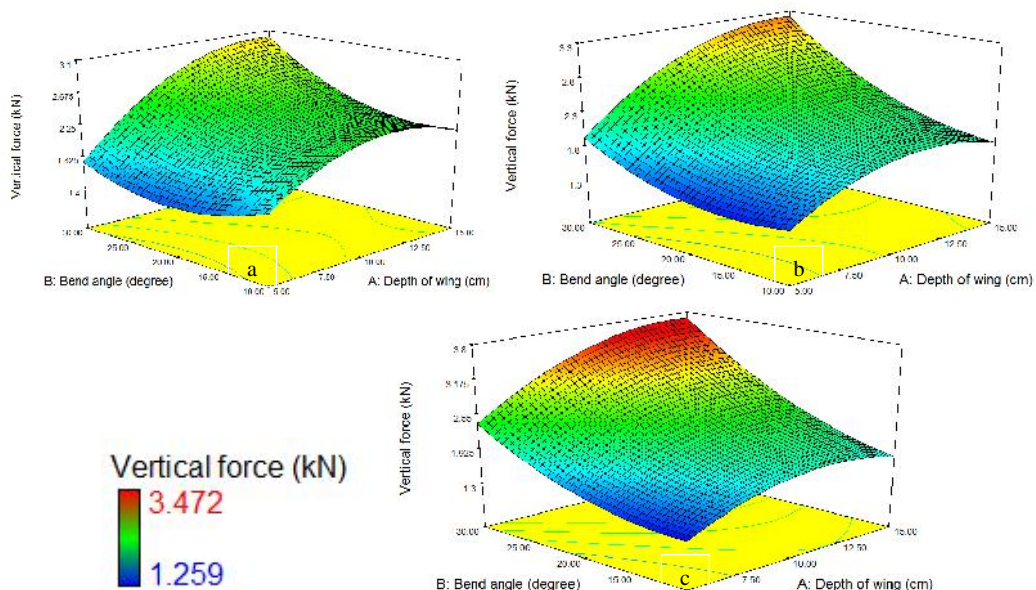
در این تحقیق، روش سطح پاسخ به‌منظور تعیین حالت بهینه هندسه بال با هدف دستیابی به حداقل نیروهای کششی و عمودی به‌کار گرفته شد. در شرایط بهینه به‌دست آمده (عمق قرارگیری ۵ سانتی‌متر، زاویه تمایل ۱۱/۱۰ درجه و زاویه حمله ۱۹/۴۶ درجه برای بال‌ها)، مقدار نیروهای کششی و عمودی به‌ترتیب ۳/۴۳ و ۱/۳۱

$$\text{Verticalforce} = 2.2 + 0.43X_1 + 0.47X_2 + 0.057X_3 + 0.2X_1X_2 + \quad (3)$$

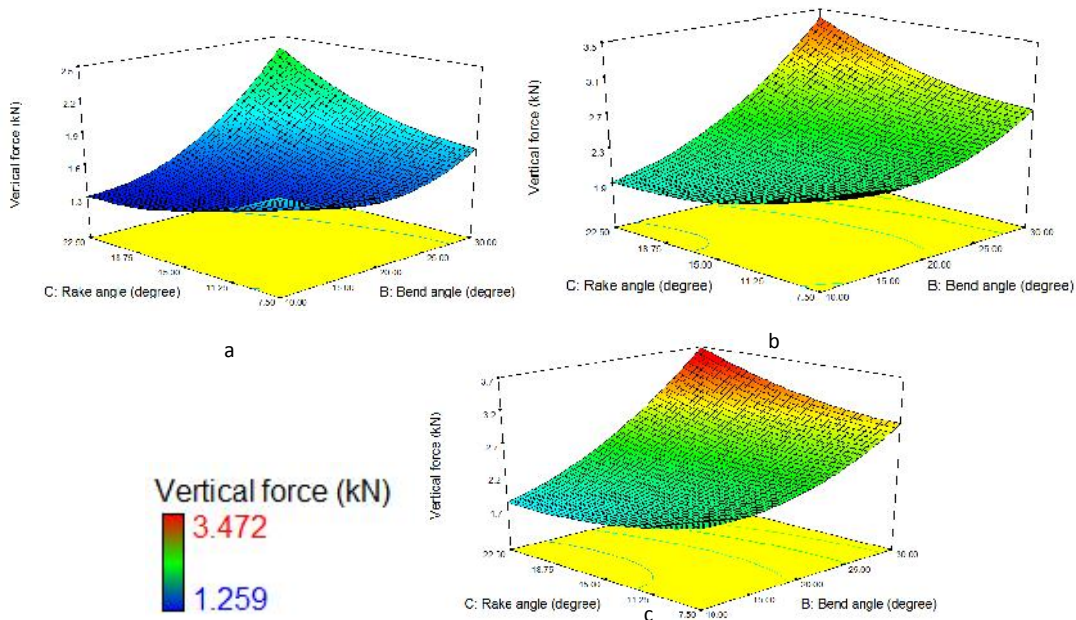
$0.27X_2X_3 - 0.36X_1^2$   
 رابطه (۳) نشان می‌دهد که اثر عمق قرارگیری بال و زاویه تمایل بر نیروی عمودی مثبت و قابل توجه می‌باشد و اثر زاویه حمله مثبت و ناچیز است که مطابق با جدول ۴، معناداری اثر عمق قرارگیری و زاویه تمایل بال و عدم معنی‌داری زاویه حمله بال را نشان می‌دهد. شکل ۴ و ۵ اثرات متقابل عمق قرارگیری بال و زاویه تمایل و همچنین زاویه تمایل و زاویه حمله را بر نیروی عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار نشان می‌دهد. از آن‌جایی‌که با تغییر زاویه تمایل بال نسبت به سطح افق (افزایش یا کاهش) شاهد تغییر فاصله عمودی نوک بال تا نوک تیغه قلمی در عمق موردنظر (کاهش یا افزایش) خواهیم بود، با توجه به افزایش زاویه مذکور، نیروی عمودی رو به بالا از طرف خاک به بال افزایش یافت. لازم به ذکر است این مقدار افزایش نیروی عمودی، در موقعیت‌های پایین‌تر قرارگیری بال، بیشتر شد. همچنین اثر زاویه حمله در تغییر نیروی عمودی نیز دیده شد به‌طوری‌که در زوایای حمله ۷/۵ و ۱۵ درجه، اثر زاویه تمایل بر نیروی عمودی خاک‌ورز معنی‌دار نشد ولی در زاویه حمله ۲۲/۵ درجه، اختلاف معنی‌دار مشاهده شد.

شکل ۵ نشان می‌دهد که نیروی عمودی در زوایای تمایل کم، با تغییر زاویه حمله تغییر معنی‌داری نداشته ولی در زوایای تمایل

کیلونپوتن مشخص شد.



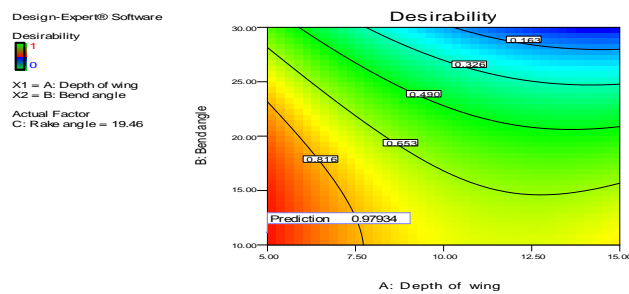
شکل ۴- اثرات متقابل عمق قرارگیری و زاویه تمایل بال بر نیروی عمودی (زاویه حمله، a: ۷/۵ درجه، b: ۱۵ درجه و c: ۲۲/۵ درجه)  
**Fig. 4.** The effects of interaction between depth of wing and bend angles on vertical force (rake angle, a: 7.5°, b: 10°, and c: 15°)



شکل ۵- اثرات متقابل زاویه تمایل و حمله بر نیروی عمودی (a: عمق قرارگیری بال = ۵ سانتی متر، b: عمق قرارگیری بال = ۱۰ سانتی متر، c: عمق قرارگیری بال = ۱۵ سانتی متر)

**Fig. 5.** The effects of interaction between bend and rake angles on vertical force (depth of wing, a: 5 cm, b: 10 cm, and c: 15 cm)





شکل ۶- شرایط بهینه آزمایش

Fig.6. Optimum condition of experiment

بر نیروی کششی و عمودی خاک‌ورز تاثیرگذار بود در حالی که اثر زاویه حمله برای هر دو صفت اندازه‌گیری شده مثبت و ناچیز بود. نتایج مدل‌سازی نیروهای کششی و عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار با استفاده از روش سطح پاسخ نشان داد که مدل با ضریب اطمینان بالا ( $R^2 > 0.93$ ) توانسته نتایج به‌دست آمده را پیش‌بینی کند.

داده‌های تجربی به‌دست آمده در نزدیک‌ترین هندسه بال به حالت بهینه (عمق قرارگیری ۵ سانتی‌متر، زاویه تمایل ۱۰ درجه و زاویه حمله ۲۲/۵ درجه برای بال)، مقادیر نیروهای کششی و عمودی به ترتیب ۳/۶۶۶ و ۱/۲۸۸ کیلو نیوتن حاصل شد (جدول ۲) که اختلاف ناچیزی با داده‌های حاصل از نتایج بهینه‌سازی در روش سطح پاسخ داشت. عمق قرارگیری و زاویه تمایل بال به‌طور مثبت و معنی‌داری

## References

1. Al-Janobim, A. A., M. F. Wahby, A. M. Aboukarima, and S. A. Al-Hamed. 2002. Influence of chisel plow shank shape on horizontal and vertical force requirements. *Agricultural Sciences* 7 (1): 13-19.
2. Aluko, O. B., and D. A. Seig. 2000. An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Soil and Tillage Research* 57: 143-157.
3. Arvidsson, J., and O. Hillerström. 2010. Specific draught, soil fragmentation and straw incorporation for different tine and share types. *Soil and Tillage Research* 110 (1): 154-160.
4. Bas, D., H. Boyaci, and H. Smail. 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 78 (3): 836-845.
5. Durairaj, C. D., and M. Balasubramanian. 1997. Influence of tool angles and speed on the soil reactions of a bent leg plough in two soils. *Soil and Tillage Research* 44: 137-150.
6. Esehaghbeygi, A., A. Tabatabaefar, A. R. Keyhani, and M. H. Raoufat. 2005. Depth and rake angle's influence on the draft force of an oblique blade subsoiler. *Iran Agricultural Science* 36 (4) 1045-1052. (In Farsi).
7. Fielke, J. M. 1996. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63 (1): 61-72.
8. Glancey, J. L., S. K. Upadhyaya, W. J. Chancellor, and J. W. Rumsey. 1996. Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. *Soil and Tillage Research* 37: 47-65.
9. Godwin, R. J. 1975. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. *Journal of Agricultural Engineering Research* 20 (4): 347-352.
10. Harrison, H. P. 1988. Soil reacting forces for a bent leg plow. *Transactions of the ASAE* 31 (1): 47-51.
11. Harrison, H. P., and Z. J. Licsko. 1989. Soil reacting forces for models of three bent leg plows. *Soil and Tillage Research* 15 (1-2): 125-135.
12. Horuz, E., A. Altan, and M. Maskan. 2012. Spray drying and process optimization of unclarified pomegranate (*Punica granatum*) juice. *Drying Technology* 30 (7): 787-798.
13. Hosseini, S. A., and S. H. Karparvarfar. 2012. A prediction of forces acting on chisel plow tine through dimensional analysis method. *Iranian Journal of Biosystems Engineering* 43 (1): 93-103. (In Farsi).
14. Kargozari, M., S. Moini, and Z. Emam Djomeh. 2010. Prediction of some physical properties of osmodehydrated carrot cubes using response surface methodology. *Journal of food processing and preservation* 34: 1041-1063.

15. Khalilian, A., T. H. Garner, H. L. Musen, R. B. Dodd, and S. A. Hale. 1988. Energy for conservation tillage in coastal plain soils. *Transactions of the ASAE* 31 (5): 1333-1337.
16. Majidi Iraj, H., and M. H. Raoufat. 1997. Power requirement of a bent leg plow and its effects on soil physical conditions. *Iran Agricultural Research* 16 (1): 1-16.
17. McKyes, E., and J. Maswaure. 1997. Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of clay soil. *Soil and Tillage Research* 43 (3): 195-204.
18. Osman, M. S. 1964. The mechanics of soil cutting blades. *Journal of Agricultural Engineering Research* 9: 313-328.
19. Payne, P. C. J., and D. W. Tanner. 1959. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. *Journal of Agricultural Engineering Research* 4 (4): 312-325.
20. Salar, M. R. 2011. Design, Development and Evaluation of Double Bent-Blade Sub-Surface Tillage Tool for Conservation Tillage. Faculty of Agriculture. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Farsi).
21. Salar, M. R., A. Esehaghbeygi, and A. Hemmat. 2013. Soil loosening characteristics of a dual bent blade subsurface tillage implement. *Soil and Tillage Research* 134: 17-24.
22. Shen, J., and L. R. Kushwaha. 1998. Soil-machine interaction: a finite element perspective. Marcel Dekker.
23. Summers, J. D., A. Khalilian, and D. G. Batchelder. 1986. Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils. *Transactions of the ASAE* 29 (1): 37-39.
24. Wolf, D., T. H. Garner, and J. W. Davis. 1981. Tillage mechanical energy input and soil crop response. *Transactions of the ASAE* 24 (6): 1412-1419.

## Modeling and Optimization of Wing Geometry Effect on Draft and Vertical Forces of Winged Chisel Plow

M. R. Salar<sup>1</sup>- S. H. Karparverfar<sup>4\*</sup>

Received: 30-11-2015

Accepted: 04-04-2016

### Introduction

The dynamic response of soil on tillage tools, is an important factor in determining their performance. For a tractor with a certain size, a reduction in draft force, the working width and speed of tools can rise and result in increasing performance and reduce costs. Researches carried out in order to reduce the draft force led to design and build new tillage tools called Bent Leg and Parra plows. The dual bent blade sub-surface tillage tool was built and examined inspired by the shape of a bent leg. The researches indicated that the combination of a dual bent blade sub-surface tillage tool and chisel plow could be used in order to reduce draft force, loosen the seed bed by the chisel plow and wings, increase in soil disturbance area by the wings, and create a suitable space for root growth by chisel plow. Since the fuel consumption and traction power of tractor are the limiting factors for pulling tools in the soil. The rake angle of tillage tools is the penetration factor of the tools to the soil. It is necessary to determine the optimized rake and bend angles according to their effect on draft force and better penetration in soil. In this research, the Response Surface Methodology (RSM) was utilized to determine the optimized points of wing geometry of winged chisel plow in order to minimize the draft and vertical forces of tillage tool.

### Materials and Methods

Using the properties of dual bent blade subsurface tillage implement and chisel plow, the winged chisel plow was designed by Catia V5R20 software and was built in the workshop of mechanics of biosystems engineering department at Shiraz University. The effect of three factors of working depth of wing (5, 10, and 15 cm), bend angle (10, 20, and 30 degree), and rake angle (7.5, 15, and 22.5 degree) were analyzed on draft and vertical forces of winged chisel plow in soil bin of Karaj Agricultural Engineering Research Institute. The length, width, and depth of the soil bin were 24 m, 1.7 m, and 1 m, respectively. The most important issue was to study the main effects and interactions of factors. So, the Response Surface Methodology was selected. With the help of this statistical design, the numbers of experiments were reduced and all coefficients of quadratic regression and interaction factors were estimated. The experiments were conducted based on the central composite design considering three main surface including central and axial points for each factor. For each response the quadratic polynomial models were obtained using the multiple linear regression.

### Results and Discussion

The results indicated that fitted quadratic model for draft force corresponded with the experimental data by determination coefficient of up to 94% ( $R^2 > 0.94$ ). Increasing the depth of wing, the contact with loosened soil decreased that led to failure in unloosened soil around the chisel blade and increase in pressure to the blade. The results showed that the effect of bend angle was significant on draft force and increasing the bend angle, the tip of wing located in deeper place so, the draft force was increased that was in line with previous researches. The effect of rake angle was not significant on the draft force and its effect on the model was positive and negligible which was reported positive and significant in previous works. The fitted quadratic model for vertical force corresponded with the test data by determination coefficient of up to 93% ( $R^2 > 0.93$ ). The effects of wing depth and bend angle were positively significant on the vertical force of the tool but the effect of rake angle was negligible. The increase in vertical force with increasing bend angle was further in deeper wing position.

1- PhD Graduated student of Agricultural Machinery, Biosystem Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shiraz University

4- Associated Professor, Biosystem Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shiraz University

(\* - Corresponding Author Email: karparvr@shirazu.ac.ir)

However, the impact of rake angle was seen in vertical force and the effect of bend angle was not significant in vertical force in rake angles of  $7.5^\circ$  and  $15^\circ$ , but it was significant in rake angle of  $22.5^\circ$ .

### Conclusions

The draft and vertical forces were determined 3.43 and 1.31 kN, respectively, at optimum condition (wing depth of 5cm, bend angle of  $11.1^\circ$ , and rake angle of  $19.46^\circ$ ). The proposed model to predict the dependent variables were very close to the results of obtained experimental findings. The wing depth and bend angle had positive and significant effects on draft and vertical forces but the effect of rake angle was positive and insignificant on both measured traits.

**Keywords:** Draft force, Rake angle, Response surface methodology, Vertical force, Wing chisel plow