شبیه سازی و بهینه سازی عملکرد گاوآهن برگردان‌دار استوانه‌ای با بهره‌گیری از روش‌های اجزاء محدود و رگرسیون چند متغیره

محمد رحمتیان [۱]، سید حسین کارپرور فرد[۲*]، محمد امین نعمت اللهی[۳]، مجتبی محمدی[۴]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ m.rahmatian@shirazu.ac.ir
[۲] دانشیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز؛ karparvr@shirazu.ac.ir
[۳] استادیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز؛ manema@shirazu.ac.ir
[۴] دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ mojtaba_58@yahoo.com

چکیده

در پژوهش‌های مربوط به خاک‌ورزی که هزینه‌های زیادی در برداشته و انجام پژوهش‌ها در این حوزه زمان‌بر می‌باشد، بیشتر از پیش از روش‌های عددی استفاده می‌گردد. در این پژوهش که به منظور بهینه سازی گاوآهن برگردان‌دار استوانه‌ای انجام شد، از روش اجزاء محدود برای شبیه سازی عملکرد گاوآهن در خاک و از روش رگرسیون چند متغیره برای بهینه سازی آن استفاده گردید. تیمارهای مورد نظر شامل عمق خاک‌ورزی (۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) و سرعت پیشروی (۳، ۵ و ۷ کیلومتر بر ساعت) بود. همچنین صفت‌های اندازه گیری نیز مقاومت کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی و سطح مقطع بهم خوردگی خاک بودند. نتایج بهینه سازی نشان داد که بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی برای گاوآهن مورد نظر در این پژوهش به ترتیب ۲۳ سانتی‌متر و ۵/۱ کیلومتر بر ساعت می‌باشد.

کلمات کلیدی: گاوآهن برگردان‌دار، مقاومت کششی، سطح مقطع به هم خوردگی خاک، روش اجزاء محدود، رگرسیون چند متغیره

Simulation and optimization of the cylindrical moldboard plow performance by using finite element method and multiple regression method

Mohammad Rahmatian[1], Seyyed Hossein Karparvar Fard[2], MohammadAmin Nematollahi[3], Mojtaba Mohammadi[4]

[1] Postgraduate, Biosystems Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, m.rahmatian@shirazu.ac.ir
[2] Associate Professor, Biosystems Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, karparvr@shirazu.ac.ir
[3] Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, manema@shirazu.ac.ir
[4] MSc Student, Biosystems Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, mojtaba_58@yahoo.com

ABSTRACT

In the field of tillage research, which costs a lot and it takes time to carry out research in this area, numerical methods are used more than ever. In this research, an attempt was done to optimize cylindrical moldboard plow, a finite element method was used to simulate the performance of the plow in the soil and a multiple regression method was used to optimize. The treatments included tillage depth (15, 20 and 25 cm) and forward speed (3, 5 and 7 $km.h^{-1}$). Also, the other factors such as draft force, vertical force, lateral force and Soil disturbance area, were measured. By optimizing the results of this study, the optimum depth of tillage and the forward speed of advance for the plow were 23 cm and 5.1 $km.h^{-1}$, respectively.

Keywords: Draft force, Finite element method, Moldboard plow, Multiple regression, Soil disturbance area

---

[۱]- سید حسین کارپرور فرد، شیراز، کیلومتر ۱۲ جاده شیراز – اصفهان، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، بخش مهندسی بیوسیستم، ۰۹۱۷۳۱۶۰۴۵۷

۱- مقدمه

در علوم امروزی، شبیه سازی و مدل سازی عددی برای به دست آوردن نتایجی دقیق و همچنین کاستن از هزینه‌ی آزمایش‌های تجربی، از اهمیت فراوانی برخوردار است. با توجه به اهمیت کشاورزی در زندگی روزمره‌ی انسان‌ها و بالا بودن هزینه‌ها در این حوزه، صرفه جویی در تمام بخش‌های کشاورزی بسیار مهم و پُر فایده هست. بسیاری از منابع در حوزه‌ی کشاورزی در عملیات‌های خاک‌ورزی صرف می‌گردد (Gill & Berg, 1967) که می‌توان با کاستن از این هزینه‌ها، بخش‌های دیگر در کشاورزی و حتی صنعت را تقویت نمود.

برخی از پژوهشگران در حوزه‌ی مکانیزاسیون کشاورزی در تلاش هستند تا ادواتی که در عملیات خاک‌ورزی به کار برده می‌شوند به بهترین نحو و در بهینه‌ترین حالت ممکن، کار خاک‌ورزی را انجام دهند (Rahmatian et al., 2018). بهینه سازی شرایط کاری ادوات خاک‌ورز در هنگام انجام عملیات خاک‌ورزی موجب بستر سازی مناسب‌تری برای رشد محصولات کشاورزی می‌گردد و همچنین از نظر مصرف انرژی برای کشاورز، صرفه‌ی اقتصادی زیادی دارد.

با توجه به مطالبی که در بالا ذکر گردید، کاربرد روش‌های عددی و همچنین بهینه سازی ادوات در کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در این راستا برخی از پژوهشگران در این زمینه‌ها، تحقیق و پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. در تحقیقی روش اجزاء محدود را برای حل معادله دینامیکی عکس‌العمل بین خاک و ابزار بکار بردند. با استفاده از اجزاء محدود دو بعدی، پیش بینی کشش لازم تیغه عمودی صورت گرفت. با مقایسه‌ی میان داده‌های انباره خاک و مدل مشخص شد که کشش پیش بینی شده توسط مدل بسیار به داده‌های آزمایش نزدیک بوده است (Kushwaha & Shen, 1995). در پژوهشی عکس العمل بین خاک و تیغه با استفاده از نرم‌افزار Abaqus شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که ابعاد جعبه خاک و تعداد شبکه‌ها (المان‌ها)، در نیروهای خروجی از نرم‌افزار بسیار مؤثر می‌باشد (Abo-Elnor et al., 2004).

در تحقیقی دیگر اثر زوایای مختلف حمله بر نیروهای وارده به یک تیغه باریک بررسی گردید. نتایج نشان دادند که با افزایش زاویه حمله تیغه، سطح مقطع به هم خوردگی خاک افزایش یافته و لایه‌های عمیق خاک سست می‌گردند ولی نیروی اعمالی به تیغه بیشتر خواهد شد و در نتیجه مقاومت کششی افزایش می‌یابد. در انتها بهینه‌ترین زاویه حمله برای تیغه مورد نظر ۳۵ درجه اعلام گردید (Solhjou et al., 2012).

در تحقیق دیگری تأثیر زوایای مختلف گاوآهن برگردان‌دار بر افزایش یا کاهش مقاومت کششی به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از روش اجزاء محدود با نتایج روش تجربی با درصد خطای کمی برابری می‌کردند. بنابراین گزارش شد که روش اجزاء محدود به خوبی توانسته است مقاومت کششی گاوآهن برگردان‌دار را پیش بینی کند (Bentaher et al., 2013).

در پژوهشی، تأثیر شرایط عملیاتی و همچنین اثر هندسه ابزار، بر نیروهای وارد به گاوآهن برگردان‌دار در انباره خاک و نیز با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM[1]) بررسی گردید. با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه نتایج انباره خاک و روش اجزاء محدود، مشخص گردید که با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، مقاومت کششی و نیروی عمودی وارد بر گاوآهن برگردان‌دار افزایش یافت (Ibrahmi et al., 2015).

در تحقیق دیگری که به منظور بهینه سازی گاوآهن قلمی با تیغه‌ی فولادی با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره انجام گردید، نتایج نشان داد که بهینه‌ی سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت خاک به ترتیب ۵/۵ کیلومتر بر ساعت، ۳۴ درجه و ۰/۷۱ حد پلاستیک[2] می‌باشد (Dehghani & Karparvar Fard, 2017). در تحقیقی، به مطالعه‌ی گاوآهن برگردان‌دار سه خیش در انباره خاک و همچنین با استفاده از روش المان گسسته (DEM[3]) پرداخته شد. نتایج ارزیابی این گاوآهن در انباره خاک و روش المان گسسته نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی در هنگام عملیات خاک‌ورزی، مقدار مقاومت کششی نیز افزایش یافت (Ucgal et al., 2017).

در پژوهش دیگری بهینه سازی گاوآهن قلمی با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره انجام شد نتایج این بهینه سازی نشان داد که بهینه ترین سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت خاک به ترتیب ۵ کیلومتر بر ساعت، ۳۶ درجه و ۰/۸۱ حد پلاستیک می‌باشد و نتایج ارزیابی نیز نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی و زاویه حمله، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد (Rahmatian et al., 2017).

با توجه به پژوهش‌های پیشین، اهمیت روش‌های عددی و همچنین بهینه سازی ادوات خاک‌ورز در عملیات خاک‌ورزی بیان و نشان داده شد. با توجه به اهمیت عملیات خاک‌ورزی و همچنین اهمیت ادواتی مانند گاوآهن برگردان‌دار که در خاک‌ورزی اولیه به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نظر گرفته شد تا با استفاده از روش اجزاء محدود که یک روش عددی به حساب می‌آید، گاوآهن برگردان‌دار استوانه‌ای مورد نظر شبیه سازی شده و با کمک روش رگرسیون چند متغیره، شرایط عملیاتی گاوآهن مورد نظر بهینه سازی گردد.

---

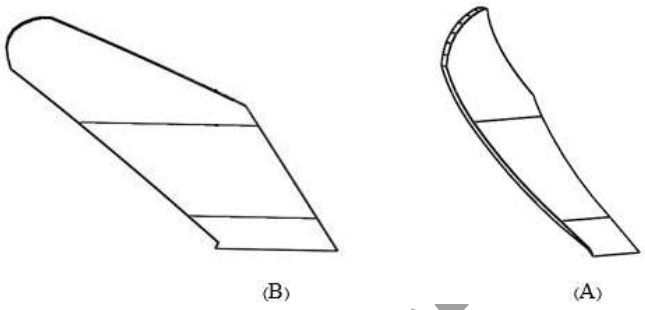
1 Finite Element Method
2 Plastic Limit
3 Discrete Element Method

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش اجزاء محدود

در این پژوهش، تیمارهای مورد نظر عبارت از سه سطح عمق خاک‌ورزی (۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) و سه سطح سرعت پیشروی (۳، ۵ و ۷ کیلومتر بر ساعت) بودند. همچنین صفت‌های اندازه‌گیری شده شامل مقاومت کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی و سطح مقطع به هم خوردگی خاک در نظر گرفته شدند.

در این تحقیق از گاوآهن برگردان‌دار استوانه‌ای با نسبت L به H معادل ۰/۸ استفاده گردید (شکل ۱، B). همچنین زاویه استقرار و عرض کار این گاوآهن به ترتیب ۴۵ درجه و ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. سپس برای انجام شبیه سازی به کمک روش اجزاء محدود، گاوآهن برگردان‌دار مورد نظر در نرم افزار Solidworks نسخه‌ی ۲۰۱۵ طراحی گردید (شکل ۱، A). برای بدست آوردن واکنش بین تیغه و خاک به کمک روش اجزاء محدود از نرم افزار Abaqus نسخه ۲۰۱۶ استفاده شد.



شکل ۱- (A) نمای سه بعدی و (B) نمای جانبی گاوآهن برگردان‌دار استوانه‌ای مورد استفاده در این پژوهش

Figure 1- (A) 3D view and (B) side view of cylindrical moldboard plow used in this research

خاک مورد نظر در نرم افزار Abaqus با استفاده از المان‌های کوچک و بزرگ شبیه سازی گردید. برای این شبیه سازی از پارامترهای استخراج شده از پژوهش Ibrahmi et al., 2015 استفاده شد (جدول ۱). جعبه خاک نیز در نرم افزار Abaqus به ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳، ۲ و ۱ متر در نظر گرفته شد.

جدول ۱- ویژگی‌های به کار برده شده در شبیه سازی خاک

Table 1- Parameters was using in simulation soil

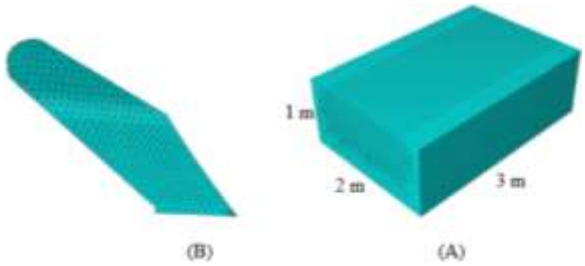
Parameter	Unit	Amount
Elastic modulus	MPa	7.5
precompression stress	MPa	0.145
Poisson's ratio	-	0.3
Density	$Kg.m^{-3}$	1.6
Input friction angle	Degree	44
Cohesion	KPa	4.082
Input friction angle Drucker - Prager	Degree	30.25
Flow stress ratio	-	1
Dilatation angle	Degree	0

بعد از طراحی و شبیه سازی خاک در نرم‌افزار، تیغه‌ی گاوآهن برگردان‌دار مورد نظر در نرم‌افزار Abaqus فراخوانده شد. سپس مشخصات فولاد مورد نظر برای اعمال به گاوآهن برگردان‌دار، در نرم‌افزار ثبت گردید (جدول ۲). بعد از فراخوانی خاک و تیغه، هر دو آن‌ها با استفاده از شبکه بندی سه بُعدی موجود در کتابخانه شبکه بندی نرم‌افزار، شبکه بندی شدند. برای انجام این کار از المان‌های C3D8R و C3D10 به ترتیب برای شبکه بندی خاک و تیغه گاوآهن برگردان‌دار، استفاده گردید (شکل ۲). برای قسمت‌هایی از خاک که انتظار می‌رفت در تماس با تیغه، گسیخته گردند، از شبکه بندی ریزتری استفاده شد.

جدول ۲- ویژگی‌های به کار برده شده در شبیه سازی گاوآهن برگردان‌دار در این پژوهش

Table 2- Parameters was using in simulation moldboard plow in this research

Type of material	Density ($g.cm^{-3}$)	Elastic modulus (MPa)	Poisson ratio
CK 30	7.2	$2*10^5$	0.3

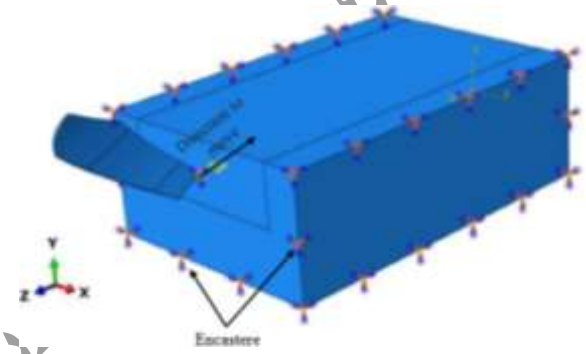


شکل ۲- شبکه بندی (A) خاک شبیه سازی شده و (B) گاوآهن برگردان‌دار مورد استفاده در این پژوهش

Figure 2- Elementation of the (A) simulated soil and (B) moldboard plow used in this research

پس از اتمام شبکه بندی، تیغه و خاک بر روی هم مونتاژ گردید. تیغه بر روی خاک به نحوی مونتاژ شد که در هر سه سطح عمق ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر قرار گیرد (شکل ۳). اصطکاک بین خاک و تیغه نیز با رفتار مماسی و نوع تماسی عمومی با ضریب اصطکاک ۰/۳۸ تعریف گردید.

شرایط مرزی در این مسئله به صورتی اعمال شد که وجوه جانبی و وجه پایینی جعبه خاک ثابت شده و همچنین نقطه مرجع[1] در تمام جهات به جز در جهت محور Z که جهت حرکت ابزار در خاک می‌باشد، ثابت گردید (شکل ۳).



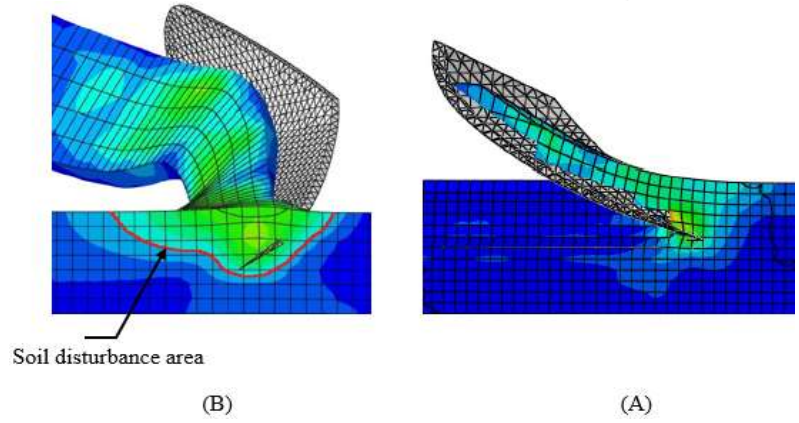
شکل ۳- مونتاژ خاک و گاوآهن برگردان‌دار و قیدهای مورد استفاده

Figure 3- Assemble of the soil and moldboard plow and used constraints

پس از انجام امور اولیه و مهیا سازی شرایط برای نتیجه گیری از شبیه سازی خاک و گاوآهن برگردان‌دار، حلگر دینامیکی[2] بر روی ۳/۵ ثانیه تنظیم گردید. بعد از اجرا کردن شبیه سازی و استخراج نتایج و داده‌های نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار (شکل ۴، A)، با استفاده از برش زدن خاک به کمک نرم‌افزار Abaqus و تهیه عکس از آن، سطح مقطع به هم خوردگی خاک که توسط گاوآهن برگردان‌دار به وجود آمده بود، نمایش داده شد (شکل ۴، B). سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۵، مراحل برنامه نویسی پردازش تصویر[3] انجام گردید (رابطه ۱) و مقدار سطح مقطع به هم خوردگی خاک در هر مرحله از آزمایش‌ها بدست آمد (Bulanon et al., 2004).

$$Y = 0.5R + 0.6A + 0.1B$$
$$Da = R - Y \quad (1)$$

1 Reference Point
2 Dynamic Explicit
3 Image Processing



شکل ۴- (A) داده برداری و همچنین شبیه سازی خاک و گاوآهن برگردان‌دار در عمق خاک‌ورزی ۲۰ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت (B) سطح مقطع به هم خوردگی خاک در عمق خاک‌ورزی ۱۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۳ کیلومتر بر ساعت

Figure 4- (A) Data Acquisition and simulation of moldboard plow and soil at the tillage depth of 20 cm and forward speed of 5 km.h^{-1} (B) Soil disturbance area at the tillage depth 15 cm and forward speed of 3 km.h^{-1}

۲-۲- روش رگرسیون چند متغیره

الگوی رگرسیون چند متغیره تعمیم یافته‌ی رگرسیون چندگانه‌ی تک متغیره است. در رگرسیون چندگانه‌ی تک متغیره، تعدادی متغیر مستقل در دسترس می‌باشد که می‌توان با استفاده از آن‌ها میزان اثر متغیرهای مستقل را بر یک متغیر وابسته (متغیر پاسخ) بررسی نمود. در رگرسیون چند متغیره، چندین متغیر مستقل و چندین متغیر وابسته وجود دارد و هدف استفاده از آن، تحلیل اثرات متغیرهای مستقل بر چند متغیر وابسته (پاسخ) می‌باشد.

در این پژوهش، متغیرهای وابسته در مدل همان تیمارهای مورد نظر شامل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بودند. همچنین متغیرهای مستقل در مدل نیز شامل مقاومت کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی و سطح مقطع بهم خوردگی خاک مد نظر بودند. در مدل رگرسیون چند متغیره (رابطه ۲)، سمت چپ مدل (Y) متغیرهای وابسته در مدل و سمت راست مدل (X) متغیرهای مستقل در مدل است.

$$Y = A + BX_1 + CX_2 + DX_3 + EX_4 \qquad (۲)$$

در این رگرسیون چند متغیره، حرف A عددی ثابت است و همچنین حروف B، C، D و E، ضرایب متغیرهای مستقل می‌باشند. برای اطمینان از دقیق بودن این مدل باید تمام ضرایب متغیرهای مستقل، معنی‌دار باشند و همچنین ضریب همبستگی بدست آمده برای مدل نیز باید از درصد بالایی برخوردار باشد.

۳- نتایج و بحث

با استفاده از آزمایش فاکتوریل، نتایجی از روش اجزاء محدود حاصل شد و مقایسه میانگین آن‌ها با استفاده از روش حداقل تفاوت معنی‌داری (LSD[۱]) بدست آمد. برای تعیین مقدار بهینه‌ی سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی گاوآهن برگردان‌دار مورد نظر در این پژوهش، از روش رگرسیون چند متغیره استفاده گردید.

۳-۱- بدست آوردن مقدار بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی

برای بدست آوردن مقدار بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی بر اساس سه سطح ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، از رگرسیون چند متغیره استفاده گردید. در این مدل، با استفاده از جدول (۳)، مقادیر قابل قبول چهار صفت اندازه‌گیری شده که شامل مقاومت کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی و سطح مقطع بهم خوردگی خاک بودند، مشخص گردید و در مدل بدست آمده از رگرسیون چند متغیره قرار داده شدند.

[۱] Least Significant Difference

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

جدول ۳- مقایسه میانگین عوامل اندازه‌گیری شده و مقدار بهینه آن‌ها بر اساس تیمار عمق خاک‌ورزی

Table 3- Average comparison of measured factors and their optimum value based on treatment of tillage depth

Tillage depth (cm)	Draft force (kN)	Vertical force (kN)	Lateral force (kN)	Soil disturbance area (cm^2)
15	8.21*	-5.87*	3.86*	430.18
20	10.18	-7.51	5.01	828.47
25	14.59	-10.67	5.98	1025.87*

* = Optimum values for each of the levels of tillage depth treatment

رابطه‌ی (۳) مربوط به مدل بدست آمده از رگرسیون چند متغیره برای بدست آوردن مقدار بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی می‌باشد. در این رابطه DT معرف مقدار بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی می‌باشد. در سمت دیگر مدل نیز عبارت‌های DF، VF، LF و SDA به ترتیب بیانگر مقاومت کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی و سطح مقطع به هم خوردگی خاک می‌باشند. مقادیری که از این صفات در رابطه‌ی (۳) به کار برده شدند، قابل قبول‌ترین مقدار در صفات نامبرده می‌باشند. طبق رابطه‌ی (۳)، با ضریب همبستگی ۰/۹۳۰۸، مقدار بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی برای گاوآهن برگردان‌دار مورد نظر در این پژوهش، ۲۳ سانتی‌متر بدست آمد.

$$DT = 6.76116 + 0.096565DF - 0.28723VF + 0.184605LF + 0.012714SDA \quad (۳)$$

جدول (۴)، آنالیز واریانس ضرایب معادله‌ی رگرسیون بدست آمده در رابطه‌ی (۳) را نشان می‌دهد. طبق این جدول تمام ضرایب بدست آمده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۴- آنالیز واریانس ضرایب معادله‌ی رگرسیون چند متغیره برای بدست آوردن مقدار بهینه عمق خاک‌ورزی

Table 4- ANOVA of coefficients of multiple regression equation to obtain optimum tillage depth

	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F
Regression	4	139.6298	34.90744	13.46447**
Residual	4	10.37024	2.592559	
Total	8	150		

** = 1 percent significant

۲-۳- بدست آوردن مقدار بهینه‌ی سرعت پیشروی

برای بدست آوردن مقدار بهینه‌ی سرعت پیشروی گاوآهن برگردان‌دار مورد نظر در این پژوهش نیز از روش رگرسیون چند متغیره استفاده گردید. مقادیر در نظر گرفته شده‌ی بهینه‌ی سرعت پیشروی به ترتیب ۳، ۵ و ۷ کیلومتر بر ساعت بود. در مدل بدست آمده از روش رگرسیون چند متغیره برای بهینه‌ی سرعت پیشروی، مقادیر قابل قبول چهار صفت اندازه گیری برای سه سطح سرعت در این پژوهش (جدول ۵)، به کار برده شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین عوامل اندازه‌گیری شده و مقدار بهینه آن‌ها بر اساس تیمار سرعت پیشروی

Table 5- Average comparison of measured factors and their optimum value based on treatment of forward speed

Forward speed ($km.h^{-1}$)	Draft force (kN)	Vertical force (kN)	Lateral force (kN)	Soil disturbance area (cm^2)
3	10.74*	-7.91*	4.85*	702.40
5	11.23	-8.13	5.02	750.58
7	11.00	-8.01	4.97	831.53*

* = Optimum values for each of the levels of forward speed treatment

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

رابطه‌ی (۴) مدلی است که از روش رگرسیون چند متغیره برای تعیین مقدار بهینه‌ی سرعت پیشروی، بدست آمده است. در این رابطه FS بیانگر مقدار بهینه‌ی سرعت پیشروی برای گاوآهن برگردان‌دار مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد. همچنین عبارت‌های DF، VF، LF و SDA در این مدل نیز به ترتیب معرف مقاومت کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی و سطح مقطع به هم خوردگی خاک می‌باشند. مقادیری که از صفات فوق الذکر در رابطه‌ی (۴) به کار برده شد، قابل قبول‌ترین مقادیر برای صفات اندازه‌گیری شده بودند (جدول ۵). مطابق رابطه‌ی (۴)، با ضریب همبستگی ۰/۸۴۵۷، مقدار بهینه‌ی سرعت پیشروی برای گاوآهن برگردان‌دار مورد نظر در این پژوهش، ۵/۱ کیلومتر بر ساعت بدست آمد.

$$FS = -0.54277 + 0.253502DF + 0.22611VF + 0.573LF - 0.002SDA \quad (۴)$$

جدول (۶)، آنالیز واریانس ضرایب معادله‌ی رگرسیون بدست آمده در رابطه‌ی (۴) را نشان می‌دهد. طبق این جدول تمام ضرایب بدست آمده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۶- آنالیز واریانس ضرایب معادله‌ی رگرسیون چند متغیره برای بدست آوردن مقدار بهینه سرعت پیشروی

Table 6- ANOVA of coefficients of multiple regression equation to obtain optimum forward speed

	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	F
Regression	4	0.994356	0.248589	0.198647**
Residual	4	5.005644	1.251411	
Total	8	6		

** = 1 percent significant

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتیجه شد که با کمک روش اجزاء محدود که یک روش عددی می‌باشد، می‌توان شرایطی همانند شرایط مزرعه ایجاد نمود و همچنین بهینه سازی و مطالعه‌ی اساسی بر روی ادوات مختص کار در مزرعه انجام داد. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش، مقادیر بهینه‌ی تیمارهای مورد نظر در حالتی حاصل شدند که کمترین نیرو از نظر کششی، عمودی و جانبی، به گاوآهن برگردان‌دار مورد مطالعه در این پژوهش در حین عملیات خاک‌ورزی، وارد گردید. همچنین مقادیر بهینه در حالتی به وجود آمدند که بیشترین سطح مقطع بهم خوردگی در حین خاک‌ورزی حاصل شد.

۵- مراجع

Abo-Elnor, M., Hamilton, R., & Boyle, J. (2003). 3D Dynamic analysis of soil–tool interaction using the finite element method. *Journal of terramechanics*, *40*(1), 51-62.

Bentaher, H., Ibrahmi, A., Hamza, E., Hbaieb, M., Kantchev, G., Maalej, A., & Arnold, W. (2013). Finite element simulation of moldboard–soil interaction. *Soil and Tillage Research*, *134*, 11-16.

Bulanon, D., Kataoka, T., Okamoto, H., & Hata, S. (2004). *Development of a real-time machine vision system for the apple harvesting robot.* Paper presented at the SICE 2004 Annual Conference.

Dehghani, M., & Karparvar Fard, S.H. (2017).Optimization of Chisel Tine Operation Used in Combined Tillage Machine. *Iranian journal of biosystem engineering*, *47*(4): 651-658 (In Persian).

Gill, W. R., & Berg, G. E. V. (1967). *Soil dynamics in tillage and traction*: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A., & Mouazen, A. (2015). Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. *Computers and Electronics in Agriculture*, *117*, 268-275.

Kushwaha, R., & Shen, J. (1995). Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. *Transactions of the ASAE*, *38*(5), 1315-1319.

Rahmatian, M., Karparvar Fard, S. H., & Nematollahi, M. A. (2017). Prediction for optimizing performance of chisel blade used in combined tillage to obtain suitable effectiveness. *Iranian journal of biosystem engineering*, *49*(1): 73-82 (In Persian).

Rahmatian, M., Karparvar Fard, S. H., & Moradi, M. (2018). *Principles of farm machineries*: Mardavij publishing, Esfahan, Isfahan, Iran. (In Persian)

Solhjou, A., Fielke, J.M. and Desbiolles, J.M. (2012). Soil translocation by narrow openers with various rake angles. *Biosystems engineering*, *112*(1): 65-73.

Ucgul, M., Saunders, Ch., & Fielke, J. (2017). Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystem Engineering*, *155*, 44-54.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران