

مدل‌سازی و بهینه‌سازی کیفیت برداشت و انرژی مصرفی دروگر استوانه‌ای در برداشت یونجه

یاسر کریمی^۱، جلال خدائی^۱ و سمیرا زارعی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۲/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۴

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

*مسئول مکاتبه E-mail: s.zareei@uok.ac.ir

چکیده

یونجه یکی از گیاهان علوفه‌ای و از اصلی‌ترین مواد غذایی جهت تغذیه دام است و طبق آمارهای موجود، سطحی معادل چهار درصد از کل سطح زیر کشت کشور به کشت این محصول اختصاص دارد. با توجه به اینکه یونجه در طول دوره رشد خود دارای چندین برداشت است، لذا دروگرها دارای اهمیت ویژه‌ای برای کشاورزان هستند. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد دروگر استوانه‌ای است که با طراحی دو نوع تیغه جدید و بررسی تاثیر نوع تیغه، سرعت پیشروی تراکتور و سرعت دورانی تیغه‌ها بر روی پارامترهایی از جمله میزان سوخت مصرفی، ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب انجام می‌گیرد. تیغه‌های مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار Solid Works طراحی و در نرم‌افزار Ansys تحلیل تنش شدند. تجزیه داده‌های آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Design Expert انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سرعت پیشروی، سرعت دورانی تیغه و اثر متقابل سرعت پیشروی × سرعت دورانی تاثیر معنی‌دار بر مصرف سوخت تراکتور داشتند، اما نوع تیغه و دیگر اثرات متقابل پارامترها اثر معنی‌داری بر مصرف سوخت تراکتور نداشت. همچنین هیچ‌یک از پارامترهای مستقل تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب نداشتند. ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته به شکل معادلات رگرسیونی مدل‌سازی شد و مقادیر بهینه برای سرعت پیشروی برابر با ۱۵ کیلومتر بر ساعت، برای سرعت دورانی ۱۵۹۶ دور در دقیقه و برای طول لبه برنده تیغه مقدار ۶/۱۵ سانتیمتر برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: برداشت، روش سطح پاسخ، سرعت پیشروی، سرعت دورانی، سوخت مصرفی

Modeling and Optimizing Harvested Product Quality and Energy Consumption of Cylindrical Mower in Alfalfa Harvesting

Yaser Karimi¹, Jalal Khodaei¹ and Samira Zareei¹

Received: 21 Feb 2021

Accepted: 25 May 2021

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

*Corresponding author: s.zareei@uok.ac.ir

Abstract

Alfalfa is one of the main forage plants used for animal feed. Four percent of the total cultivated area in Iran is dedicated to this crop. Due to the fact that alfalfa has several harvests during its growth period, mowers have a special role for farmers. The purpose of this study was to evaluate and optimize the performance of cylindrical mower by designing two new blade types, and investigating the effect of blade type, forward speed and blade rotational speed on parameters such as fuel consumption, cutting height, harvest loss and damage index. The modeled blades were designed in Solidworks software environment and the force stresses were analyzed in Ansys software. Data analysis was performed using response surface method and Design Expert 12 software. The results of analysis of variance showed that the forward speed, blade rotational speed and the interaction between forward speed and rotational speed had a significant effect on tractor fuel consumption. But blade length and other mutual effects of this factor had no significant effect on tractor fuel consumption. Also, none of the independent parameters had any significant effect on cutting height, harvest loss and damage index. The relationship between independent and dependent variables was modeled in the form of regression equations. The optimal value for forward speed was 15 km/h, for rotational speed was 1596 rpm and for the blade length was 6.15 cm.

Keywords: Forward speed, Fuel consumption, Mower Harvester, Response surface method, Rotational speed

How to cite:

Karimi, Y., Khodaei, J., and Zareei, S. 2021. *Modeling and Optimizing Harvested Product Quality and Energy Consumption of Cylindrical Mower in Alfalfa Harvesting*. Journal of Agricultural Mechanization 6 (1): 39-47.

۱- مقدمه

برداشت به‌عنوان آخرین مرحله تولید محصول از اهمیت فراوانی برخوردار است و برش صحیح و مطلوب همواره مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. ضمن اینکه مدت زمان برداشت نیز دارای اهمیت است و این مسئله نیز نقش دروگرها را برای کشاورزان پر رنگ‌تر می‌کند (Maharlooei et al. 2014). یونجه یکی از مهم‌ترین گیاهان علوفه‌ای و از مواد غذایی اصلی تغذیه دام است که سطح زیر کشت بالایی نیز دارد و با توجه به اینکه در طول دوره رشد خود دارای چندین برداشت است، لذا دروگرهای علوفه از اهمیت ویژه‌ای برای کشاورزان برخوردار هستند (Massomi et al. 2010). دروگرهای استوانه‌ای از مرسوم‌ترین دروگرهای علوفه در ایران هستند. این دروگرها شامل دو یا سه استوانه عمودی هستند که با سرعت حدود ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه می‌چرخند. تیغه‌ها در دروگرهای استوانه‌ای نقش مهمی در برداشت محصول دارند و کوچک‌ترین تغییر در آن‌ها از جمله تغییر شکل یا کند شدن، علاوه بر فشار بیش‌ازحد بر روی استوانه‌ها و برهم زدن تعادل آن‌ها موجب از دست رفتن و آسیب شدید به محصولات می‌شود (Arianpour et al. 2018). شاید در نگاه اول کیفیت برش علوفه خیلی مهم و حائز اهمیت نباشد، زیرا قرار است که این علوفه به مصرف دام برسد. در توضیح این مسئله می‌توان گفت که کارکرد بهینه هر دستگاه به‌صورت مستقیم با صرفه‌جویی در مصرف انرژی ارتباط دارد که جزء مهم‌ترین مسائل دنیای امروز است (Hosseini Dastjani et al. 2012). از سوی دیگر، تنوع ماشین‌های کشاورزی و شرایط آب و هوایی، الگوهای مختلف کشت و اندازه‌های مزارع مطالعات جدی در مورد چگونگی استفاده از نهاده‌های کشاورزی و انتخاب انواع آن‌ها را می‌طلبد (Ball et al. 2001). مدیریت مزرعه یونجه و چگونگی استفاده از ماشین‌های برداشت در سرعت زمان برداشت مؤثر است و هر چه این مدت زمان کمتر شود امکان تلفات محصول کمتر می‌شود و در شرایطی منجر به افزایش تعداد چین در سال می‌گردد (Tabatabaei et al. 2017).

در رابطه با بهینه‌سازی عملکرد دروگرها مطالعاتی در زمینه تنظیمات مختلف این دستگاه‌ها صورت گرفته که در ادامه به برخی از این مطالعات با تاکید بر مشخصات و تنظیمات تیغه دروگر پرداخته می‌شود. (Jafari Naeimi 1996) با انتخاب سه زاویه تیزی تیغه با مقادیر ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه برای برش ساقه گندم دریافت که با زیاد شدن زاویه تیزی تیغه، به دلیل کم شدن نفوذ تیغه در ساقه، نیروی مصرفی افزایش پیدا می‌کند. وی همچنین با انتخاب دو نوع تیغه لبه صاف و لبه مضرس برای برش ساقه گندم و یونجه، بیان نمود که تیغه با لبه مضرس حدود ۱۱٪ بیشتر نسبت به تیغه لبه صاف نیروی برشی مصرف می‌کند.

(Tabatabaei Kolor et al. 2005) با انتخاب سه سطح ۲۵، ۳۰ و

۳۵ درجه برای زاویه تیزی تیغه دریافتند که اثر تیزی تیغه روی نیروی مقاومت برشی ساقه برنج در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده است. Khazaei

(2003) *et al.* اثرات زاویه تیزی تیغه را در چهار سطح ۱۵، ۱۹، ۲۳ و ۲۷ درجه بر مقاومت برشی ساقه گل پیرتروم بررسی نمودند و بیان کردند که اثر زاویه تیزی تیغه بر مقاومت برشی ساقه در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده و با افزایش زاویه تیزی تیغه، مقاومت برشی افزایش پیدا می‌کند. شعاع کم لبه تیغه و یا ضخامت کوچک لبه، به‌طورمعمول، هر دو نیروی برشی و انرژی برشی را کاهش می‌دهد. (Khazaei et al. 2002) با بررسی اثر دوتیغه لبه صاف و لبه مضرس در برش ساقه گل پیرتروم، بیان نمودند که مقدار دو پارامتر مقاومت برشی و انرژی مصرفی در واحد سطح ساقه در تیغه لبه مضرس بیشتر از مقدار آن برای تیغه‌های لبه صاف است. تیغه‌های لبه صاف با جلوگیری از برش مجدد ساقه، باعث کاهش مصرف انرژی به میزان حدود ۱۰٪ شدند.

(Mohammadi Alasti et al. 2007) به طراحی و ارزیابی تیغه دروگر بشقابی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مقدار نیرویی که تیغه با سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور دقیقه می‌تواند تحمل کند تقریباً ۲ تا ۲/۵ برابر مقدار نیروی مقاومت برشی لایه علوفه (یونجه پرپشت) می‌باشد. آن‌ها همچنین بیان کردند که هر چقدر سرعت پیشروی دروگر کمتر و سرعت دورانی تیغه بیشتر باشد برش بهتری صورت خواهد گرفت.

(Stanisavljević et al. 2019) در تحقیقی گزارش کردند که افت یونجه در مرحله برداشت ناشی از خرد شدن یونجه توسط تیغه دروگر است که معمولاً در اثر برداشت محصول در رطوبت نامناسب ایجاد می‌گردد. در تحقیق دیگری (Momin et al. 2017) گزارش کردند که با افزایش سرعت دورانی تیغه و سرعت پیشروی مقدار افت برداشت محصول کاهش پیدا کرد. البته در تحقیق مذکور، افت برداشت تحت تأثیر متقابل سرعت پیشروی و سرعت دورانی بود به‌طوری‌که با بالا رفتن سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی، تعداد دفعات خرد شدن محصول توسط تیغه افزایش و در نتیجه افت برداشت نیز افزایش یافت. (Chattopadhyay & Pandey 1999) اثرات نوع تیغه و سرعت آن را بر افت برداشت محصولات علوفه‌ای بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که نوع تیغه و انحنا آن تأثیر معنی‌داری بر تلفات برداشت و کیفیت برداشت دارد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت، میزان تلفات برداشت افزایش یافت.

با توجه به‌وسعت کشت یونجه در کشور که طبق آمارنامه مرکز آمار ایران در سال زراعی ۹۸-۹۷ برابر با ۵۱۰۰۵۸ هکتار بوده است و معادل ۴ درصد کل سطح زیر کشت کشور می‌باشد (Anonymous, 2018) و اهمیت این گیاه علوفه‌ای و همچنین تنوع ماشین‌های برداشت یونجه، در تحقیق حاضر ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد دروگر استوانه‌ای بررسی می‌شود که با اندازه‌گیری پارامترهایی از جمله میزان سوخت مصرفی، ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب انجام می‌گیرد.

۲- مواد و روش ها

دارای دو استوانه علف چین و هر استوانه مجهز به سه تیغه است و نیز جهت حرکت تیغه های دروگر در دو استوانه در خلاف یکدیگر است و تیغه های مورد نظر از یک طرف دارای لبه تیز هستند، بنابراین از هر مدل تیغه سه عدد با لبه برنده ساعت گرد و سه عدد تیغه دیگر با لبه برنده پادساعت گرد ساخته شد.



شکل ۱- تیغه های ساخته شده بر اساس مدل های طراحی شده
Fig 1. Blades made based on designed models

۲-۲- طرح آزمایش

آزمایش ها با استفاده از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی (CCD)^۱ با در نظر گرفتن سه نوع تیغه، سه سطح سرعت پیشروی تراکتور (۹، ۱۲ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت) و سه سطح سرعت دورانی تیغه ها (۱۵۰۰، ۱۷۵۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه) انجام گردید. بعد از انجام تنظیمات اولیه برای سرعت پیشروی و سرعت دورانی، یک مدل تیغه بر روی دروگر نصب شد و عملیات برداشت انجام شد. در طی آزمون مزرعه ای پارامترهای میزان سوخت مصرفی، ارتفاع برش ساقه، دسته بندی ساقه های برداشت شده و تعداد ساقه های برداشت شده محصول اندازه گیری شدند.

روش سطح پاسخ مجموعه ای از روش های ریاضی و آماری است که در بهینه سازی مسائل چند پارامتری استفاده می شود. با استفاده از این روش، تعداد آزمایش ها کم شده و علاوه بر اثرات اصلی و متقابل، مقادیر بهینه پارامترها و همه ضرایب مدل رگرسیونی به دست خواهد آمد. در این روش با تعیین تعداد متغیرها و حدود حداکثر و حداقل برای متغیرها، ماتریس آزمایش طراحی شده و تعداد آزمایش ها و سطوح هر متغیر در هر آزمایش مشخص می شود. نرم افزار Design Expert 12 برای تجزیه و تحلیل داده های آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

در روش سطح پاسخ دامنه انتخاب شده هر پارامتر از اهمیت زیادی برخوردار است و دامنه هر پارامتر باید به صورت کد بندی شده و در محدوده ۱- تا ۱ تعریف شود. جدول ۱ سطوح کد بندی شده هر یک از پارامترهای مستقل را همراه با اعداد واقعی آن نشان می دهد.

در تحقیق حاضر از دروگر استوانه ای ساخت شرکت پرچین کار مدل MC-165 با عرض کار ۱۴۰ سانتیمتر شامل دو استوانه بردارنده که هر استوانه به سه تیغه مجهز می باشد، استفاده شد. طول و ارتفاع دروگر مذکور به ترتیب ۲۸۵ و ۱۱۰ سانتیمتر و وزن آن ۳۹۰ کیلوگرم می باشد. ارتفاع دروگر از سطح زمین ثابت و مقدار آن ۳ سانتی متر تنظیم شد. به منظور انجام آزمایش ها و بررسی پارامترهای مختلف عملیاتی و طراحی تیغه در کیفیت علوفه برداشت شده، زمینی به مساحت نیم هکتار واقع در روستای جعفرآباد، بخش مرکزی شهرستان دیواندره به کشت یونجه اختصاص داده شد. چین دوم برداشت یونجه برای انجام آزمایش ها انتخاب گردید.

۲-۱- مدل سازی و ساخت تیغه های دروگر

در تحقیق حاضر برای مدل سازی اولیه تیغه های دروگر از نرم افزار SolidWorks 2018 استفاده شد. طول، عرض و ضخامت تیغه های طراحی شده (برابر اندازه تیغه اصلی) به ترتیب ۱۲ cm، ۵ cm و ۳mm بود. اما طول لبه برنده برای تیغه های نوع اول، نوع دوم و تیغه اصلی به ترتیب برابر با ۶/۳، ۶ و ۶/۱۵ سانتی متر بود.

سپس برای تحلیل تنش وارد بر تیغه های دروگر از نرم افزار Ansys 2014 استفاده شد. برای این منظور در نرم افزار مذکور از قسمت Static Structural استفاده شد. مدل طراحی شده در SolidWorks از طریق دستور Import به برنامه Ansys وارد شد. تیغه های مدل سازی شده در محیط Ansys مش بندی شدند که در این تحقیق از مش بندی Hybrid استفاده شد. با توجه به اینکه تیغه های مورد نظر برای برش ساقه یونجه طراحی شدند و میزان نیرو و تنش اعمالی به تیغه، حداکثر نیرو و تنش برای برش ساقه یونجه است، لذا برای مدل سازی رفتار تیغه ها در طی فرآیند برش ساقه، بیشینه تنش برشی لازم برای بریدن ساقه بر تیغه ها اعمال شد. به منظور اعمال تنش برشی به تیغه ها از نتایج تحقیق Galedar et al. (2008) استفاده شد. قسمت متصل به تکیه گاه نیز توسط قید fix support در تمامی جهات محدود شد. پس از اعمال قیود و نیروهای وارد شده از طرف ساقه، در نهایت تحلیل تنش بر اساس معیار ون میسز و میزان تغییر شکل حاصل از نیروها به دست آمد. برای تیغه نوع اول بیشترین تنش در لبه تیغه و در محل نزدیک به تکیه گاه ایجاد می شود. برای تیغه نوع دوم از لحاظ محل رخداد بیشترین تغییر شکل و بیشینه تنش فن میسز مشابه تیغه نوع اول بود. بیشینه تغییر شکل در تیغه نوع دوم در نوک تیغه و بیشینه تنش ون میسز در لبه تکیه گاه مشاهده شد.

بعد از مدل سازی و تحلیل تنش در تیغه ها، مدل های طراحی شده از جنس فولاد (CK15) ساخته شدند. نمونه های مختلف تیغه های ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. از آنجا که دروگر مورد نظر

¹Cental Composite Design

در اینجا C_{kij} و C_{kii} ، C_{ki} ، C_{k0} به ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند. X_j و X_i متغیرهای مستقل کدشده هستند. نمادسازی ماتریس در معادله زیر آمده است:

$$y = XC + \varepsilon \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

دستگاه معادلات بالا با استفاده از روش حداقل مربعات حل شده و ضرایب معادله به دست می‌آیند. بعد از اینکه ضرایب معادله به دست آمدند با حل معادله بالا، پاسخ پیش‌بینی می‌شود. سپس باید مطابقت مدل با داده‌های آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار روش‌های متعددی نظیر تحلیل باقیمانده، ریشه میانگین مربعات خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق وجود دارد. برای تعیین نقاط بهینه متغیرهای مورد آزمایش، شروط بهینه‌سازی مطابق با جدول ۲ تعیین گردید.

جدول ۲- شروط بهینه‌سازی عملکرد دروگر استوانه‌ای

Table 2. Optimizing conditions for the cylindrical mower performance

شروط بهینه‌سازی	محدوده	پارامتر
Optimizing conditions	Range	Parameter
-	15	سرعت پیشروی (km/h) Forward speed
-	2000	سرعت دورانی (rpm) Rotational speed
-	6.3	طول لبه برنده تیغه (cm) Blade edge length
minimize	169	سوخت مصرفی (ml) Fuel consumption
In range	8	ارتفاع برش (cm) Cutting height
minimize	63	افت برداشت محصول (kg) Harvest loss
minimize	0.56	درصد آسیب Damage percentage

۲-۳- روش اندازه‌گیری متغیرهای مورد بررسی

۲-۳-۱- اندازه‌گیری سوخت مصرفی تراکتور

برای اندازه‌گیری سوخت مصرفی از یک استوانه مدرج استفاده شد که به‌عنوان باک جدید به تراکتور اضافه شد و به‌عنوان مخزن اصلی تراکتور از آن استفاده گردید. بعد از نصب استوانه مدرج، شیلنگ پمپ سوخت تراکتور از باک تراکتور جدا و به استوانه مدرج وصل شد که از این طریق پمپ مقدار سوخت موردنیاز را از استوانه مدرج مصرف کند. همچنین سوخت برگشتی از پمپ انژکتور نیز به داخل استوانه مدرج انتقال یافت تا اثر سوخت برگشتی از موتور در هر آزمایش روی اندازه‌گیری‌ها صفر باشد.

جدول ۱- سطوح کدبندی شده متغیرهای مورد آزمایش همراه با

اعداد واقعی آن‌ها

Table 1. The coded levels of the variables with their real numbers

سطح	سطح	سطح	متغیرها
Level +1	Level 0	Level -1	Variables
15	12	9	سرعت پیشروی (km/h) Forward speed
6.30	6.15	6	طول لبه برنده تیغه (mm) Blade Edge length
2000	1750	1500	سرعت دورانی تیغه‌ها (rpm) Blade rotational speed

پس از وارد کردن متغیرهای سرعت پیشروی، طول لبه برنده تیغه و سرعت دورانی تیغه‌ها و تعیین سطوح متغیرها و انتخاب تعداد تکرار آزمایش‌ها، نقشه آزمایش توسط نرم‌افزار پیشنهاد می‌شود (شکل ۲) که در آن، ستون‌ها متغیرهای موردنظر و سطرها نشان‌دهنده تعداد آزمایش‌های لازم می‌باشند.

Run	Factor 1 A: Speed km/h	Factor 2 B: Blade cm	Factor 3 C: Rotational rpm	Response 1 Fuel Consu...	Response 2 time s	Response 3 Cutting Height cm	Response 4 Damage Index	Response 5 Harvest Loss
1	12.00	6.15	1750.00					
2	12.00	6.15	2000.00					
3	9.00	6.30	2000.00					
4	12.00	6.15	1750.00					
5	9.00	6.15	1750.00					
6	12.00	6.00	1750.00					
7	15.00	6.15	1750.00					
8	12.00	6.15	1750.00					
9	9.00	6.30	1900.00					
10	12.00	6.30	1750.00					
11	12.00	6.15	1750.00					
12	15.00	6.30	2000.00					
13	12.00	6.15	1750.00					
14	12.00	6.15	1750.00					
15	9.00	6.00	1500.00					
16	15.00	6.00	1500.00					
17	15.00	6.30	1500.00					
18	9.00	6.00	2000.00					
19	15.00	6.00	2000.00					
20	12.00	6.15	1500.00					

شکل ۲- نقشه پیشنهادی انجام آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار

Fig 2. Suggested plan for performing experiments by software

پس از انتخاب طرح، معادله مدل تعیین شده و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شوند. مدل استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً، معادله مدل درجه دوم کامل یا فرم کاهیده آن است. مدل درجه دوم می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود (Giri and Prasad, 2007).

$$Y = C_{k0} + \sum_{i=1}^4 C_{ki}x_i + \sum_{i=1}^4 C_{kii}x_i^2 + \sum_{i < j=2}^4 C_{kij}x_ix_j \quad (1)$$

ارزیابی قرار داده شدند. این ساقه‌ها ابتدا به صورت بازرسی چشمی در سه گروه ساقه‌های آسیب‌ندیده، ساقه‌های تا حدودی آسیب‌دیده و ساقه‌های به شدت آسیب‌دیده دسته‌بندی شدند. سپس ساقه‌های یونجه در هر سه گروه فوق شمارش شدند. شاخص آسیب یا DI با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Momin et al., 2017).

$$DI = \frac{(U_W U_N) + (P_W P_N) + (S_W S_N)}{N} \quad (4)$$

که در آن U_W : وزن ساقه‌های آسیب‌ندیده، U_N : تعداد ساقه‌های آسیب‌ندیده، P_W : وزن ساقه‌های تا حدودی آسیب‌دیده، P_N : تعداد ساقه‌های تا حدودی آسیب‌دیده، S_W : وزن ساقه‌های به شدت آسیب‌دیده، S_N : تعداد ساقه‌های به شدت آسیب‌دیده و N : تعداد کل ساقه‌های مشاهده شده می‌باشند.

۲-۳-۴- اندازه‌گیری تلفات برداشت

رابطه (۵) میزان تلفات برداشت برحسب کیلوگرم بر هکتار را بیان می‌کند. در این رابطه W وزن برگ و ساقه‌های خردشده در طی فرآیند برداشت در داخل قاب چوبی برحسب کیلوگرم است (Momin et al., 2017).

$$LH = \frac{W}{0.4 \times 0.4} \times 10^4 \quad (5)$$

به منظور اندازه‌گیری وزن دقیق علوفه باقی‌مانده در قاب از یک ترازوی دیجیتال مدل SCA-301 استفاده شد. میزان تلفات برداشت برای هر تیمار در سه تکرار محاسبه شده و میانگین این سه تکرار به عنوان تلفات برداشت هر تیمار گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر پارامترهای مختلف بر روی متغیرهای مورد مطالعه

نتایج تجزیه واریانس اثرات سرعت پیشروی (A)، سرعت دورانی (C) و نوع تیغه (B) بر میزان سوخت مصرفی تراکتور، ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب در جدول ۴ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد که سرعت پیشروی و سرعت دورانی تیغه به ترتیب در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ دارای تأثیر معنی‌داری بر مصرف سوخت تراکتور بودند اما نوع تیغه اثر معنی‌دار بر مصرف سوخت تراکتور نداشت. همچنین بررسی اثرات متقابل سه پارامتر فوق بر مصرف سوخت تراکتور نشان داد که فقط اثر متقابل سرعت پیشروی × سرعت دورانی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب نشان داد که پارامترهای سرعت پیشروی، نوع تیغه و سرعت دورانی و نیز اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر متغیرهای وابسته نداشتند.

۲-۳-۲- اندازه‌گیری ارتفاع برش

بعد از برداشت محصول، ارتفاع ساقه برش خورده یونجه توسط کولیس اندازه‌گیری شد. برای این کار ابتدا قاب چوبی به طور تصادفی در سطح مزرعه انداخته شد و در هر بار تکرار، ارتفاع برش سه ساقه به طور تصادفی اندازه‌گیری شد و میانگین سه تکرار به عنوان ارتفاع برش در هر تیمار ارائه شد.




۲-۳-۳- تعیین شاخص آسیب

میزان آسیب وارده به ساقه در سه سطح آسیب‌ندیده، تا حدودی آسیب‌دیده و به شدت آسیب‌دیده دسته‌بندی می‌شود. نمونه‌هایی از دسته‌بندی آسیب‌های وارد بر ساقه و وزن تخصیص داده شده به این دسته‌ها برای محصول نیشکر در جدول ۳ نشان داده شده است (Momin et al., 2017). میزان شاخص آسیب برای مقادیر نزدیک به ۱ به معنی بالاترین آسیب و شاخص نزدیک به ۰-۱ به معنی کمترین آسیب است (Momin et al., 2017). دسته‌بندی شدت آسیب در ساقه‌های یونجه برداشت شده در تحقیق حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- دسته‌بندی سطوح آسیب وارده بر ساقه‌های برداشت شده

(Momin et al., 2017)

Table 3. Classification of the damage level for the harvested stems (Momin et al., 2017)

تا حدودی آسیب‌ندیده Undamaged	آسیب‌دیده Somewhat damaged	به شدت آسیب‌دیده Severely damaged
		
Weight -1	-0.33	+1



شکل ۳- دسته‌بندی سطوح آسیب وارده بر ساقه یونجه بعد از

برداشت بر اساس معیار (Momin et al., 2017)

Fig 3. Classification of damage levels for alfalfa stem after harvest based on the criteria of Momin et al. (2017)

برای اندازه‌گیری شاخص آسیب، از قالی با ابعاد ۴۰×۴۰ سانتیمتر استفاده شد و یونجه‌های برداشت شده قرار گرفته در داخل قاب مورد

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سرعت پیشروی، نوع تیغه و سرعت دورانی تیغه بر سوخت مصرفی، ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب

Table 4. Results of analysis of variance of the effect of forward speed, blade type and blade rotational speed on fuel consumption and cutting height, harvest loss and damage index

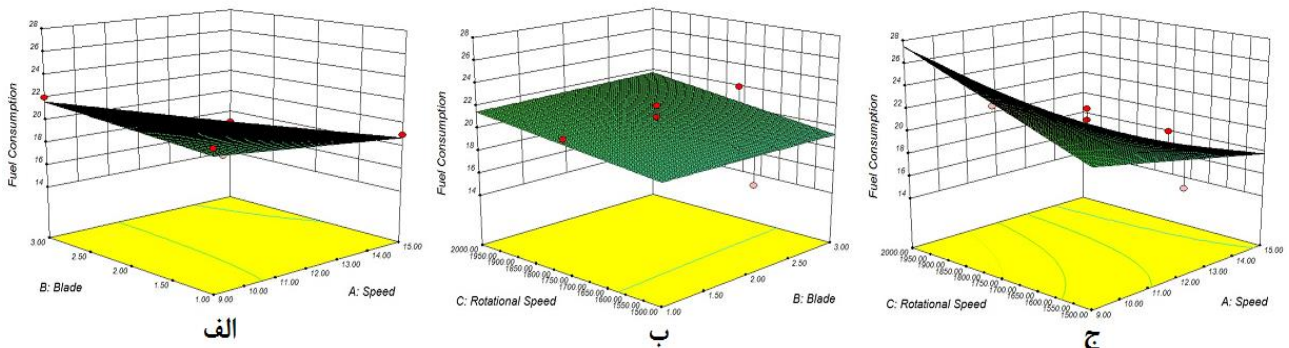
میانگین مربعات (MS)					
شاخص آسیب Damage index	افت برداشت Harvest loss	ارتفاع برش Cutting height	سوخت مصرفی Fuel consumption	درجه آزادی (df)	منابع تغییرات S.V
0.1114 n.s	49.21 n.s	n.s 0.0522	1755.44**	7	مدل Model
0.0027 n.s	23.04 n.s	n.s 0.0260	8683.86**	1	A
0.0691 n.s	133.51 n.s	n.s 0.2033	1.55 n.s	1	B
0.0089 n.s	2.42 n.s	0.421 n.s	973.22*	1	C
8.62e-6 n.s	18.44 n.s	n.s 0.0158	187.46 n.s	1	A*B
0.0068 n.s	166.89 n.s	n.s 0.0309	2426.04*	1	A*C
0.0068 n.s	4.547e-13 n.s	n.s 0.0162	10.24 n.s	1	B*C
0.17 n.s	0.1408 n.s	n.s 0.0308	5.70	1	A*B*C
0.0288	314.88	0.4708	81.57	12	خطا Error
-	-	-	-	19	کل Total

**به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد، n.s عدم معنی داری

مصرفی تأثیر معنی دار ندارد و تنها اثر متقابل سرعت پیشروی × سرعت دورانی بر میزان سوخت مصرفی معنی دار است. تأثیر همزمان سرعت پیشروی و سرعت دورانی باعث تشدید کاهش و یا افزایش شدت عملیات می شود و از این رو مصرف سوخت را به طور معنی داری تحت تأثیر قرار می دهد. برای مثال، هنگامی که سرعت پیشروی کاهش و همزمان سرعت دورانی تیغه افزایش یابد، دفعات برخورد تیغه و ضربات آن به گیاه در یک مسافت مشخص بیشتر می شود و توان مورد نیاز و سوخت مصرفی افزایش می یابد.

۲-۳- بررسی تأثیر پارامترها بر روی میزان سوخت مصرفی

در شکل ۴ اثرات مقادیر سرعت پیشروی، سرعت دورانی تیغه و طول لبه تیغه یا همان نوع تیغه بر میزان سوخت مصرفی نشان داده شده است. نتایج نشان داد با افزایش سرعت پیشروی مصرف سوخت کاهش پیدا می کند. همچنین با افزایش سرعت دورانی تیغه مقدار مصرف سوخت تراکتور افزایش می یابد، اما همان طور که در شکل قابل مشاهده است، نوع تیغه و اثر متقابل آن با سایر عوامل مورد بررسی بر میزان سوخت



شکل ۴- اثرات متقابل الف: سرعت پیشروی و طول لبه برنده تیغه، ب: طول لبه برنده تیغه و سرعت دورانی و ج: سرعت پیشروی و سرعت دورانی تیغه بر روی سوخت مصرفی

Fig 4. Interactions a: Forward speed and blade edge length, b: Blade edge length and rotational speed, and c: Advance velocity and blade rotational speed on fuel consumption

در مورد افت برداشت، با توجه به نتایج ارائه شده در تحقیقات دیگران، به نظر می رسد سرعت پیشروی تراکتور در تحقیق حاضر نسبت به سایر تحقیقات بیشتر بوده و به همین دلیل اثر سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر میزان افت برداشت تأثیرگذار نبوده است. از طرفی عدم تأثیر معنی دار سرعت دورانی تیغه بر تلفات برداشت هم می تواند ناشی از طراحی مناسب تیغه ها باشد.

در مورد شاخص آسیب نیز محققینی مانند Momin *et al.* (2017) و Chowdhury and Buchele (1976) گزارش کردند که سرعت پیشروی پایین سبب افزایش آسیب به محصول برداشت شده می گردد. اما دلیل اینکه در تحقیق حاضر اثر سرعت پیشروی بر شاخص آسیب معنی دار نبود این است که مقادیر سرعت انتخاب شده نسبت به سایر تحقیقات بالاتر بوده است.

۳-۴- تعیین مقادیر بهینه پارامترها

برای تعیین مقادیر بهینه سرعت پیشروی، سرعت دورانی و طول لبه برنده تیغه، حدود و شروط بهینه سازی مطابق با جدول ۲ مشخص گردید. مقادیر پارامترهای مذکور برای بهینه کردن سوخت مصرفی، ارتفاع برش، افت برداشت محصول و شاخص آسیب تعیین شد. مقدار بهینه برای سرعت پیشروی برابر با ۱۵ کیلومتر بر ساعت، سرعت دورانی تیغه ها برابر با ۱۵۹۶ دور بر دقیقه و طول لبه برنده تیغه ها به مقدار ۶/۱۵ سانتی متر با مطلوبیت ۹۵٪ تعیین شد. مقادیر سوخت مصرفی، ارتفاع برش، افت برداشت و درصد آسیب به ازای مقادیر بهینه تعیین شده برای پارامترهای مستقل به ترتیب برابر با ۱۷/۳۴ لیتر در هکتار، ۵/۲ سانتی متر، ۱۵۶/۳ و ۰/۱۶ درصد محاسبه شد.

۴- نتیجه گیری

مطالعه حاضر باهدف ارزیابی و بهینه سازی عملکرد دروگر استوانه ای در برداشت یونجه انجام شد که برای این منظور دو نوع تیغه جدید طراحی و مدل سازی شدند. سپس آزمایش های مزرعه ای برای بررسی تأثیر نوع تیغه (طول لبه برنده تیغه)، سرعت پیشروی تراکتور و سرعت دورانی تیغه ها بر روی پارامترهایی از جمله میزان سوخت مصرفی، ارتفاع برش، افت ناشی از درو و شاخص آسیب انجام شد. نتایج به دست آمده از تحقیق را می توان به صورت زیر ارائه نمود:

- با افزایش سرعت پیشروی، مقدار سوخت مصرفی کاهش می یابد و با افزایش سرعت دورانی تیغه ها سوخت مصرفی افزایش می یابد و بدین ترتیب با انتخاب سرعت پیشروی بیشتر و سرعت دورانی کمتر می توان مصرف سوخت را کاهش داد. طول لبه برنده تیغه ها تأثیری بر مصرف سوخت ندارد.
- با افزایش سرعت دورانی تیغه ها در سرعت پیشروی ثابت، افت برداشت افزایش می یابد و با افزایش سرعت پیشروی در سرعت دورانی ثابت تیغه، مقدار افت برداشت کاهش می یابد.

Kakahy *et al.* (2014b) در تحقیقی بر روی یک دروگر دوار گزارش کردند که کمترین مصرف سوخت در کمترین سرعت دورانی مشاهده شد. در تحقیق دیگری Čedík *et al.* (2017) گزارش کردند که با افزایش سرعت پیشروی مصرف سوخت تراکتور به ازای سطح برداشت شده کاهش پیدا کرد. دلیل کاهش سوخت مصرفی استفاده حداکثری از ظرفیت دروگر استوانه ای عنوان شده است که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. (Mohammadi Alasti *et al.* (2007) و Kakahy (2014a) *et al.* اثر سرعت دورانی تیغه بر سوخت مصرفی را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش سرعت دورانی تیغه، مصرف سوخت تراکتور افزایش می یابد که با نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر هم خوانی دارد. دلیل افزایش مصرف سوخت این است که در سرعت های بالاتر گردش تیغه ها، توان بیشتری باید از محور تواندهی تراکتور گرفته شود که این موضوع سبب افزایش مصرف سوخت خواهد شد.

با استفاده از داده های اندازه گیری شده، مدل رگرسیونی برای تخمین مقدار سوخت مصرفی با ضریب تبیین ۹۲/۵٪ به صورت رابطه (۶) ارائه می شود.

$$F=20.55-3.70 \times A+1.10 \times C-0.62 \times A \times B-2.12 \times A \times C+0.13 \times B \times C+0.12 \times A \times B \times C \quad (6)$$

که در آن: F مصرف سوخت (mL)، A سرعت پیشروی تراکتور (m/s)، B طول لبه برنده تیغه (Cm) و C سرعت دورانی تیغه ها (rpm) می باشد.

۳-۳- بررسی تأثیر پارامترها بر روی ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب

مطابق با نتایج ارائه شده در جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، تأثیر پارامترهای مورد آزمایش و نیز اثرات متقابل آن ها بر ارتفاع برش، افت برداشت و شاخص آسیب معنی دار نبود. بررسی و مقایسه میانگین اثرات متقابل پارامترهای مورد مطالعه نیز روند خاصی را برای متغیرهای مذکور نشان نمی دهد و با توجه به عدم معنی داری پارامترها، مدلی برای این متغیرها ارائه نمی شود.

در مورد ارتفاع برش، Kakahy *et al.* (2014a) تأثیر مدل های مختلف تیغه بر ارتفاع برش محصول را بررسی و گزارش کردند که تأثیر نوع تیغه بر ارتفاع برش معنی دار بود به طوری که با افزایش انحنای تیغه، ارتفاع برش محصول کاهش یافت. اما در تحقیق حاضر چون انحنای تیغه ها تقریباً یکسان بود و فقط طول مقطع برشی تیغه تفاوت داشت لذا اختلاف معنی داری در ارتفاع برش محصول به واسطه انواع تیغه ها مشاهده نشد. Kakahy *et al.* (2013) در تحقیق دیگری گزارش کردند که سرعت دورانی تیغه ها بر روی ارتفاع برش محصول هیچ گونه تأثیر معنی داری ندارد و تأثیر سرعت دورانی فقط بر کیفیت برش و توان مصرفی معنی دار است که با نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر هم خوانی دارد.

۱۵۹۶ دور بر دقیقه و طول لبه برنده تیغه‌ها به مقدار ۶/۱۵ سانتی‌متر تعیین شد.

- مقادیر سوخت مصرفی، ارتفاع برش، افت برداشت و درصد آسیب به ازای مقادیر بهینه تعیین شده برای پارامترهای مستقل به ترتیب برابر با ۱۷/۳۴ لیتر در هکتار، ۵/۲ سانتی‌متر، ۱۵۶/۳ و ۰/۱۶ درصد محاسبه شد.

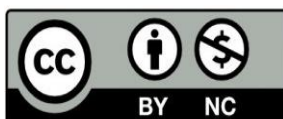
۵- منابع

- Anonymous. (2018). *Abstract of the agricultural statistics results*. Statistics Center of Iran, Program and Budget Organization. (In Persian)
- Arianpour, A., Abdali, A.R., Rashno, M.H., Roozbahani, A., Shekari, Sh. And Ghafari Parvaresh, M. (2018). *Production of forage plants*. Iran Textbook Publishing Company Press, First edition, 224 pages. (In Persian)
- Ball, D. M., Collins, M., Lacefield, G. D., Martin, N.P., Mertens, D.A., Olson, K.E., Putnam, D.H., Undersander, D.J., and Wolf, M.W. (2001). *Understanding forage quality*. American Farm Bureau Federation Publication, 1(01): 1-15.
- Čedík, J., Pražan, R. and Pexa, M., (2017). *Effect of rake angle and cutting speed on energy demands of mulcher with vertical axis of rotation*. Agronomy Research 15(4), 1530–1539.
- Chattopadhyay, P.S., and Pandey, K.P. (1999). *Effect of knife and operational parameters on energy requirement in flail forage harvesting*. Journal of Agricultural Engineering Research, 73(1): 3-12.
- Chowdhury, M.H., and Buchele, W.F. (1976). *Development of a numerical damage index for critical evaluation of mechanical damage of corn*. Transactions of the ASAE, 19(3):428-432.
- Galedar, M.N., Jafari, A., Mohtasebi, S.S., Tabatabaefar, A., Sharifi, A., O'Dogherty, M.J., Rafiee, S., and Richard, G. (2008). *Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems*. Biosystems Engineering, 101(2):199-208.
- Giri, S.K., and Prasad, S. (2007). *Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms*. Journal of Food Engineering, 78(2): 512-521.
- Hosseini Dastjani, S.S., Shamsi, M., and Yusefi, Z. (2012). *Determining the cutting quality of forage harvesters using image processing by principal component analysis*. 7th National Conference on Agricultural Machinery and Mechanization, 14-16 September, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Persian)
- Jafari Naeimi, K. (1996). *Construction of a machine for measuring the cutting force in plants and designing a cutting system for the Aterplex harvester*. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University. (In Persian)
- Kakahy, A. N. N., Ahmad, D., Akhir, M.D., Sulaiman, S., and Ishak, A. (2014a). *Effects of rotary mower blade cutting angles on the pulverization of sweet potato vine*. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2: 95-101.
- Kakahy, A.N., Ahmad, D., Akhir, M.D., Sulaiman, S., and Ishak, A. (2014b). *Effects of rotary mower blade cutting angles on the pulverization of sweet potato vine*. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2:95-101.
- Kakahy, A.N., Ahmad, D., Akhir, M.D., Sulaiman, S., and Ishak, A. (2013). *Effects of cutting speeds and moisture content on grass chopping (Pulverizing)*. Advanced Science Letters, 19(9):2533-2535.
- Khazaei, J., Rabani, H., Ebadi, A., and Golbabaei, F. (2002). *Determining the shear strength and picking force of pyrethrum flower*. AIC 2002 Meeting CSAE/SCGR, Saskatoon, Saskatchewan, July 14 - 17, 2002, 1-11.
- Khazaei, J., Rabani, H., and Golbabaei, F. (2003). *Determination of shear strength and force of Pirtrum flower*. Iranian Journal of Agricultural Sciences, 33(3):433- 444. (In Persian)
- Maharlooei, M.M., Loghavi, M., and Nassiri, S.M. (2014). *Developing an in-Field Yield Monitoring System and Predicting Some Nutritional Quality Properties of Alfalfa Using Shear and Compressive Energy*. Journal of Agricultural Machinery, 4(2): 184-193. (In Persian)
- Massomi, A., Hemmat, A., and Shahrian, A. (2010). *Design, Construction and Evaluation of a Recompression Machine for Reducing Hay Bale Volume*. Iranian Journal of Biosystem Engineering, 40(2): 111-118. (In Persian)
- Mohammadi Alasti, B., Sheikhi, A., and Komarizadeh, M.H. (2007). *Evaluation of disc mower and analysis of its blades*. Third Agricultural Machinery Engineering Student Conference, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Persian)
- Momin, M. A., Wempe, P. A., Grift, T. E., and Hansen, A. C. (2017). *Effect of four base cutter blade designs on sugarcane stem cut quality*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 60(5): 1551-1560.

Stanisavljević, R., Vuković, A., Barać, S., Radojević, R., Đokić, D., and Dragan, P.V. (2019). *Influence of harvesting on quality of Alfalfa forage used for haylage and hay*. Journal of Agricultural Sciences, 25(3): 384-390.

Tabatabaei Koloor, R., Borghaei, A.M., Alimardani, R., Mobli, H., and Rajabipoor, A. (2005). *Investigation of the parameters affected the cutting force and strength of paddy stem*. Journal of Agricultural Sciences, 11(2): 261-277. (In Persian)

Tabatabaei, S.A., Shakeri, E., and Alinia, M. (2017). *Evaluation of quantitative and qualitative traits of alfalfa cultivars forage in different cuts in yazd region*. Journal of Plant Ecophysiology, 9 (29): 146-155. (In Persian)



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)