

Design, Manufacture, and Evaluation of Blades for a Rotary Trencher Machine

A. Khooshabari¹, S.R. Mousavi Seyedi² and S. Kiani³

1. MSc student, Biosystems Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2. Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3. Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 15 August 2024 Accepted: 15 November 2024 *Corresponding Author: s.kiani@sanaru.ac.ir - Mousavi22@sanru.ac.ir

Abstract

Introduction: Two-wheeled tractors are used to disturb the topsoil in greenhouses and small gardens. A transmission system transfers the necessary and generated force from the tractor engine to the blades of rotary trencher machines for soil cutting. These machines consist of a rotating shaft connected to a gearbox, on which a set of flanges is mounted. Blades are attached to each flange in a specific arrangement. When the flanges rotate, they come into contact with the soil, lifting and throwing it backward, thus breaking up the soil and creating a suitable seedbed for planting agricultural products. Notable features of these machines include reasonable prices, high operational speed, easy mobility due to lightness, and simple maintenance and repair. Rotary trenchers are also used to prepare the soil bed and control weeds in fruit orchards. In this research, the most suitable blade for producing a double-purpose rotary trencher machine equipped with a V-shaped gearbox was designed and produced.

Materials and Methods: Catia software (V5-6R2018) was used for the design and Abaqus software (6.14-4) was used for mechanical analysis of the designed blades. First, the blades were designed with three different surfaces 42.75, 38.53, and 35.39 cm². The goal was to achieve a blade design that not only creates a suitable tilled soil surface but also maximizes soil displacement to ensure the device performs acceptably during furrow creation. The blade stress analysis was performed based on the Von Mises criterion and finite element analysis (FEA). After the design of the blades, to ensure their strength against the forces exerted from the soil surface, FEA and examination of the mechanical strength of the selected alloy (ST52) were performed in Abaqus software. Then, the blade spread design was cut using a CNC machine, forged using a blacksmithing mold, and bent with a 38-millimeter radius. After this stage, the surface of the blades was hardened. The evaluation of the device in the disturbing of the topsoil with three blade models at three blade shaft speeds (200, 300, and 400 rpm) was performed in three repetitions in the form of a factorial experiment in a completely randomized design using SPSS software. The disturbing of the topsoil and the depth of the created trench were considered as criteria for evaluating the rotation speed and dimensions of the blades.

Results and Discussion: The maximum force applied to blades showed that the maximum stress obtained with surfaces of 42.75 cm², 38.53 cm², and 35.39 cm², based on the Von Mises criterion, was



0.74, 0.7, and 0.188 MPa, respectively. Also, the maximum principal stress in these three blade models was 0.27, 0.24, and 0.122 MPa, respectively. The results illustrated that the maximum stresses obtained are much lower than the yield stress or ultimate strength of the alloy used for the blade. To do the topsoil tillage operation 6 flanges of blades (18 blades) and to do trenching two flanges of blades (6 blades) were installed on the axis of the gearbox. The results from comparing Mean Weight Diameter (MWD) values of the disturbed topsoil showed that by increasing rotation of the blade shaft, the soil disturbing significantly increases. On the other hand, results showed that the increase in the surface of the blade had not significant effect on disturbing the topsoil particles. Also, the blades were evaluated by creating a trench. Two flanges of the blades (6 blades, Fig 1. b) are performed when the machine moves backward (Fig 9-a and Fig 11). The machine's reverse speed was kept constant at 2 km/h. The results clearly showed that the surface of the blades has had a significant effect on the performance of creating a trench, and with the increase of the blade's surface, the amount of soil transferred out of the trench has increased. However, increasing the blade surface increased the trench depth, but increasing the blade's axis rotation was not as significant as the blade surface because the backward speed of the machine is constant and slow.

Conclusion: In this research, a new type of blade for a dual-purpose rotary-trencher machine was designed, analyzed, produced, and evaluated. The results of the statistical analysis showed that the blade's surface has no effect on the tillage quality, but the rotation speed of the blades was significantly effective. On the other hand, in the operation of creating a trench, the surface of the blade was significantly effective, and with the increase of the surface, the depth of the created trench increased due to the movement of more soil particles. Finally, a blade with a surface of 42.75 cm², made of ST52 alloy steel, with a forged and hardened edge, and a bending radius of 38 mm was proposed for this type of dual-purpose soil rotary-trencher machine. Therefore, this machine, equipped with the designed blade model, is suitable for both topsoil disturbance and trenching.

Keywords: *Impact loading, Computational analysis, Garden rotavator, Soil disturbing*

طراحی، ساخت و ارزیابی تیغه‌های ماشین دوکاره خاک‌همزن-جوی‌پشته‌ساز

آرش خوشابری^۱، سید رضا موسوی سیدی^۲ و سجاد کیانی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
 ۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
 ۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

کلمات کلیدی:

بارگذاری ضربه‌ای،

تحلیل رایانه‌ای،

روتیواتور باغی،

شخم‌زنی

چکیده

در این پژوهش مناسب‌ترین سطح مقطع تیغه برای تولید یک ماشین دوکاره خاک‌همزن-جوی‌پشته‌ساز مجهز به یک جعبه‌دنده V شکل طراحی، تولید و ارزیابی شد. ابتدا طراحی سه‌بعدی تیغه‌های C شکل با سه سطح مقطع ۳۵/۳۹، ۳۸/۵۳ و ۴۲/۷۵ سانتی‌متر مربع انجام و سپس به روش تحلیل تنش استحکام مکانیکی آنها بر اساس معیار فون میسز در بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل رایانه‌ای نشان داد حداکثر تنش وارد بر تیغه‌ها به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۷ و ۰/۱۸ مگاپاسکال و کمتر از مقدار تنش تسلیم آلیاژ مورد استفاده (ST52، ۳۱۰ مگاپاسکال) بدست آمد. قالب آهنگری تیغه‌ها تولید و تیغه‌ها به روش آهنگری تولید شدند. به منظور افزایش مقاومت در برابر سایش، عملیات سخت‌کاری بر روی سطوح تیغه‌ها نیز انجام شد. برای انتخاب مناسب‌ترین سطح مقطع تیغه، آزمایش خاک‌همزنی و سله‌شکنی با شش فلانچ تیغه‌ها (۱۸ تیغه، حرکت به جلو) و ایجاد جوی با دو فلانچ از تیغه‌ها (۶ تیغه، حرکت به عقب) با سه دور محور تیغه‌ها (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه) در قالب آزمایش فاکتوریل در طرح کاملاً تصادفی در سرعت ثابت پیشروی ۲ کیلومتر بر ساعت انجام شد. میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) و همچنین بررسی عمق نهر ایجاد شده به عنوان معیار ارزیابی سطح مقطع تیغه‌ها و دور محور تیغه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد سطح مقطع تیغه‌ها در انجام عملیات خاک‌همزنی معنی‌دار نبوده است ولی با افزایش دور محور تیغه‌ها MWD کاهش یافته است. در صورتیکه با افزایش سطح مقطع تیغه‌ها در عملیات ایجاد جوی عمق جوی ایجاد شده به طور چشمگیری افزایش یافت.

* عهده دار مکاتبات

Email: s.kiani@sanaru.ac.ir

Mousavi22@sanaru.ac.ir

مقدمه

در هنگام دوران با خاک برخورد کرده و با برداشتن مقداری از خاک و پرتاب به سمت عقب باعث خرد شدن خاک می‌شود که این کار بستر بذر مناسبی را برای کاشت محصولات کشاورزی ایجاد می‌کند (۱ و ۵). مکانیزم فوق با کمک یک منبع توان و با استفاده از جعبه دنده و سیستم انتقال نیرو، نیروی لازم جهت برش خاک به تیغه را انتقال می‌دهد.

این خاک‌همزن‌ها به گونه‌ای ساخته می‌شوند که بدون چرخ و به صورت سوار و خودگردان هستند. درگیری تیغه-ها با خاک ضمن همزدن خاک، موجب پیشروی ماشین نیز می‌گردد. این ماشین‌ها در مزارع کوچک و یا متوسط که استفاده از تراکتورهای چهار چرخ مشکل است، کاربرد فراوانی دارند (۳). از آنجا که مساحت کاشت سبزی و صیفی در کشور و همچنین زمین‌های باغی شمال کشور کم می‌باشد و عموماً به صورت خرده مالکی است، استفاده از تراکتورهای کشاورزی با ادوات خاک‌ورزی پشت تراکتوری هم از نظر ابعاد و عرض کار و هم از نظر صرفه اقتصادی مناسب نیستند. انجام بسیاری دیگر از عملیات‌های غیر زراعی نیز با ادوات خاک‌ورزی پشت تراکتوری مانند بهمزدن و برگرداندن خاک زیر و بین درختان در باغات، آماده‌سازی بستر خاک برای چمن‌کاری، گلکاری، فضای-سبز، باغچه‌ها و همچنین برای از بین بردن علف‌هرز امکان-پذیر نیست. بنابراین اکثر کشاورزان و باغداران از خاک-همزن‌های دوار دستی استفاده می‌کنند.

از ده‌های گذشته تحقیقات بر روی تولید و بهبود عملکرد تیغه‌های خاک‌همزن در حال انجام است تا بهترین نوع تیغه از نظر عملکرد و طول عمر بر اساس شکل و جنس آن در هنگام شخم زنی در مزرعه معرفی شود (۱۳). قسمت‌هایی از تیغه که برای آماده‌سازی زمین با خاک درگیر عمل برش می‌شود در معرض بار ضربه‌ای و اصطکاک زیاد است. نیروی اصطکاک باعث ایجاد نیروهای نامتعادل و غیریکنواخت و ساییدگی شدید تیغه‌ها می‌شود. بنابراین لازم است طراحی تیغه به گونه‌ای بهینه شود که سایش به میزان حداقل خود رسیده و در نتیجه عمر تیغه‌ها

خاک‌ورزی موجب بهبود ساختمان خاک، افزایش خلل و فرج، توزیع بهتر خاک دانه‌ها و در نهایت اصلاح خصوصیات فیزیکی خاک می‌شود. خواص فیزیکی خاک عامل تعیین کننده اصلی رشد گیاهچه تا زمان جوانه‌زنی و سر در آوردن از خاک می‌باشد (۸). خاک‌همزن دوار کاربر پیاده یا روتیواتور^۱ یکی از ابزارهای سبک کشاورزی است که انجام عملیات خاک‌ورزی و سله‌شکنی در باغ‌های کوچک و گلخانه‌ها را تسهیل می‌کند و همچنین باعث کاهش زمان و کار صرف شده در آماده‌سازی خاک می‌شود (۵). این خاک‌همزن‌ها قادر هستند در مدت زمان کوتاهی مساحت‌های زیادی از خاک زمین را نرم کرده یا شخم بزنند و تا ۳۵ درصد در زمان و تا ۲۵ درصد در هزینه-های آماده‌سازی بستر بذر صرفه‌جویی کنند (۱۶). از ویژگی‌های بارز آنها قیمت مناسب، سرعت بالای عملیات، جابجایی راحت به دلیل سبک بودن و تعمیر و نگهداری آسان است. از این دستگاه‌ها در آماده‌سازی بستر خاک و کنترل علف‌های هرز در باغ‌های میوه نیز استفاده می‌شود. همچنین توانایی زیادی برای برش خاک، مخلوط کردن سطح خاک و بستر بذر را دارند (۱۲). همچنین برای ایجاد بستر مناسب برای رشد گیاه در گلخانه‌های سنتی معمولاً از خاک‌همزن استفاده می‌شود. در عملیات سبزی‌کاری و صیفی‌کاری، آماده‌سازی خاک شرایط متفاوتی نسبت به دیگر محصولات زراعی می‌طلبد. عمق آماده‌سازی بستر بذر برای این محصولات معمولاً ۲ الی ۳ سانتی‌متر است و دانه-بندی ریز خاک مورد نیاز می‌باشد. استفاده از خاک‌همزن-های باغی برای بسترسازی در این مزارع بسیار کاربرد دارد (۸ و ۱۲).

خاک‌همزن دوار شامل یک محور دوار متصل به جعبه-دنده است که بر روی این محور مجموعه‌ای از فلانچ‌ها سوار شده است. بر روی هر فلنچ تیغه‌هایی قرار دارد که با آرایش خاصی نصب شده‌اند. مکانیزم کاری خاک‌همزن دوار به این شکل است که تیغه‌های نصب شده روی فلنچ‌ها

در طول عمر و تغییر شکل تیغه تاثیر چشم گیری دارد. همچنین آلیاژ فولاد بور با شعاع انحنای R38 تنش معادل (فون میسر)^۳ و تغییر شکل کمتر و در نتیجه عمر خستگی بیشتری را نسبت به سایر زوایا دارد. در پژوهشی دیگر کارکرد یک نوع تیغه جدید (لبه مضرسی)، را با سرعت شخم زنی مختلف و رطوبت های متفاوت زمین از طریق خواص فیزیکی مهم خاک مورد بررسی قرار دادند. عملکرد و تحلیل برخی از پارامترهای ماشین مورد آزمون قرار گرفت و در آن خاک همزن دوار نسبت به گاوآهن دیسکی برای عملیات تهیه بستر بذر مناسب تر تشخیص داده شد. همچنین عملکرد محصول در هکتار مقدار بیشتری به دست آمد (۴).

علاوه بر عملیات خاکورزی و بهمزدن خاک ایجاد جوی و پشته در گلخانه ها و باغ ها نیز مورد نیاز می باشد. ایجاد جوی پای درختان برای دفن کودهای حیوانی یا محل ذخیره آب کاربرد دارد. در باغ های کوچک امکان استفاده از تراکتورهای باغی برای ایجاد جوی آب وجود ندارد. اگر هم امکان استفاده از تراکتور در این مزارع یا باغ ها وجود داشته باشد به دلیل خرده مالکی آنها در سراسر کشور بهره گیری از تراکتور شخصی مقرون به صرفه نمی باشد. بنابراین برای کاهش سرمایه گذاری ثابت کشاورزان خرده مالک، یک ماشین دو کاره سبک وزن با مانورپذیری بالا و قیمت مناسب برای شخم زنی یا خاک همزنی و برای ایجاد جوی و پشته مورد نیاز می باشد. بنابراین هدف اصلی از انجام این پژوهش طراحی، ساخت و ارزیابی مناسب ترین تیغه برای یک ماشین دوکاره خاک همزن-جوی پشته ساز به شرح مراحل الف) طراحی رایانه ای و سه بعدی تیغه با سه سطح مقطع متفاوت، ب) تحلیل رایانه ای تیغه در بارگذاری های دینامیکی و تعیین بیشینه تنش های وارده به آن، پ) قالب سازی و تولید تیغه و ت) ارزیابی و آزمون مزرعه ای تیغه های تولید و نصب شده بر روی یک خاک همزن-جوی و پشته ساز. نوع تیغه ایجاد شده که هم عملیات خاکورزی (با عملکرد مناسب در خرد کردن خاکدانه ها) و هم عملیات

افزایش یابد (۱۱ و ۱۷). خاک همزن ها معمولاً با تیغه های L یا C شکل عرضه می شوند. تیغه L شکل ساقه بلندتری نسبت به تیغه C شکل دارد و عمق کار بیشتری قابل دستیابی است. تیغه C شکل به علت نوع خاص زاویه انحنای لقمه کمتری از خاک را بر می دارد و انرژی کمتری مصرف می کند عملکرد خود تمیز کنندگی کارآمدتری دارد و برای کار در خاک های رسی سنگین و وجود بقایای گیاهی زیاد استفاده می شود (۹). در پژوهشی دیگر به وسیله تحلیل رایانه ای بیشینه تنش وارده به تیغه های یک خاک همزن که از چند آلیاژ فولاد سازه، چدن، فولاد ضد زنگ، فولاد نرم و فولاد آبدیده ساخته شده بودند مورد بررسی قرار گرفت (۱۰). طرح سه بعدی تیغه ها در نرم افزار سالدورکس^۱ ایجاد و در نرم افزار انسیس^۲ تحلیل تنش انجام شد. متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش شامل نیروی های شبیه سازی شده وارده از طرف زمین، سرعت چرخش محور تیغه ها و آلیاژ آنها بودند. نتایج نشان داد فولاد ضد زنگ در مقایسه با سایر مواد تنش های داخلی کمتری داشته است. همچنین آنها بیان کردند در هنگام برخورد تیغه با خاک بیشترین مقدار بار توسط خاک لومی (ترکیب ماسه و خاک رس) ایجاد می شود. در مطالعه ای دیگر تیغه های خاک همزن با آلیاژهای فولاد H13، فولاد با کروم بالا، فولاد با کربن بالا، چدن و فولاد نرم در نرم افزار انسیس تحت آزمون با بارهای دینامیکی و استاتیکی قرار گرفت (۱۴). نتایج نشان داد تیغه با آلیاژ H13 با شعاع انحنای ۳۴ میلیمتر تحت کمترین سایش، تغییر شکل و خستگی قرار دارد و مناسب ترین عملکرد در مقایسه به سایر آلیاژها را دارد. در پژوهشی دیگر طراحی تیغه برای خاک همزن پشت تراکتوری با پنج شعاع های انحنای R24, R28, R34, R38, R40 در نرم افزار سالدورکس انجام شد (۲). آنها برای انجام تحلیل های استاتیکی از نرم افزار انسیس استفاده شد. با فرض اینکه حدود یک چهارم از طول تیغه در هنگام برش خاک با سطح خاک بر خورد نماید، میزان تغییر شکل تیغه و طول عمر تیغه را بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییر انحنای تیغه

1- Solid Works

2- Ansys

مستقیم در جلوی موتور با نسبت انتقال کاهنده ۵/۵، یک محور انتقال توان و یک جعبه دنده کاهنده نهایی V شکل ۹۰ درجه با نسبت کاهش دور ۲/۵ و زاویه دوران محورهای خروجی ۱۰ درجه نسبت به افق استفاده می‌شود. توان موتور از دو سمت جعبه دنده کاهنده بعد از کاهش دور هشت برابری و افزایش گشتاور به محور تیغه‌ها می‌رسد. شکل (۱) ماشین دو کاره خاک‌همزن-جوی و پشته‌ساز را نشان می‌دهد.

وجود عنصر گوگرد نیز به افزایش خاصیت ماشین‌کاری کمک می‌کند. سیلیسیم عنصر اصلی افزایش‌دهنده استحکام تسلیم و خاصیت ارتجاعی آن است. منگنز نیز عنصری است که با حضور خود سختی، سختی‌پذیری، نقطه تسلیم و استحکام نهایی فولاد را افزایش می‌دهد. اولین گام در تحلیل استحکام مکانیکی تیغه خاک‌همزن-جوی پشته‌ساز محاسبه حداکثر نیروی وارده به هر تیغه از سمت خاک در شرایط خاکورزی می‌باشد. برای محاسبه گشتاور بیشینه ایجاد شده در محور تیغه‌ها از رابطه (۱) در دور کمینه محور تیغه‌ها (۲۰۰ دور بر دقیقه) استفاده شد.

که در فرمول فوق T گشتاور (N.m)، P توان موتور (W) و N تعداد دور در دقیقه محور تیغه‌ها (rpm) می‌باشد. بیشینه نیروی وارد بر هر تیغه از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$F = \frac{\text{Torque}}{R} = \frac{118.63N.m}{0.1882m} = 947 N \quad (2)$$

که R شعاع هر تیغه از مرکز محور چرخنده تا نوک تیغه است (شکل ۲). در سختگیرانه‌ترین حالت این نیرو به صورت یک نیروی خطی گسترده به یک تیغه اعمال و نتایج تنش بیشینه در تحلیل تنش رایانه‌ای بررسی شد.

$$T = \frac{60 P}{2\pi N} = \frac{60 \times 3.73 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 200} = 178.2 N.m \quad (1)$$

جدول (۱) خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ فولاد ST52

Table (1) Physical and mechanical properties of ST52 steel alloy

استحکام کششی	تنش تسلیم	مدول یانگ	نسبت پواسن	چگالی
Ultimate tensile strength	Yield stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio (μ)	Density (g/cm^3)

ایجاد جوی (با عمق مناسب) را انجام دهد جنبه جدید بودن این پژوهش است. از این ماشین می‌توان برای انجام عملیات خاک‌همزنی یا سلشکنی در گلخانه‌ها و مزارع (زعفران، سیب‌زمینی و چغندرقد) و برای ایجاد جوی و پشته پای درختان استفاده نمود.

مواد و روش‌ها

طراحی به کمک رایانه

برای طراحی سه بعدی تیغه از محیط‌های Mechanical design (شامل محیط‌های طراحی قطعه، ورق کاری، سطح سازی، طراحی قالب و طراحی سازه) و Shape design (ابزارهای پیشرفته برای ایجاد و اصلاح سطوح مورد استفاده در طراحی اشکال پیچیده) نرم افزار کتیا^۱ استفاده شد.

سه طرح تیغه با ضخامت ۶ میلیمتر و شعاع خم ۳۸ میلیمتر ولی با سطوح مختلف ۳۵/۳۹، ۳۸/۵۳ و ۴۲/۷۵ سانتی‌مترمربع در محیط طراحی سطوح^۲ (GSD) نرم‌افزار کتیا طراحی شدند. تیغه با سطح مقطع ۳۵/۳۹ سانتی‌متر مربع یک تیغه مرسوم خاک‌همزن دوار کاربر پیاده می‌باشد. شعاع خم ۳۸ میلیمتر بر اساس پیشینه پژوهش (۲، ۹ و ۱۰) و تیغه‌های مرسوم در نظر گرفته شد. هدف رسیدن به طرحی از تیغه است که علاوه بر اینکه سطح خاک خاکورزی شده مناسبی ایجاد می‌کند جابجایی خاک حداکثری داشته باشد تا ماشین در زمان ایجاد جوی عملکرد قابل قبولی داشته باشد. در طراحی تیغه‌ها از فولاد آلیاژی ST52 استفاده شد. ویژگی‌های مکانیکی این آلیاژ در جدول (۱) آورده شده است. وجود عنصر فسفر در این آلیاژ به ایجاد خاصیت ماشین‌کاری، براده‌برداری و استحکام در دمای بالا می‌شود.

محاسبه نیروی وارد بر تیغه

با توجه به عرض و عمق کار واحد خاکورز (به ترتیب ۶۰ و ۱۰ سانتیمتر) از یک موتور ۳/۷۳ کیلووات دیزل به عنوان قوای محرک بهره گرفته شده است. برای انتقال توان تولیدی موتور به تیغه از یک جعبه دنده سیاره‌ای^۳ اتصال

- 1- CATIA
- 2- Generative Shape Design (GSD)
- 3- Planetary Gearbox

در هنگام خاک ورزی، حداکثر نیروی وارد بر لبه تیغه را به صورت یک بار گسترده و در شرایط اعمال ضربه‌ای یا بارگذاری دینامیکی شبیه‌سازی و تنش‌های ایجاد شده در تیغه محاسبه شد (شکل ۳-ب).

فرآیند ساخت و تولید تیغه

قطعه گستره ورق فولاد ST52 یا طرح دو بعدی آن با کمک برش با ماشین CNC تهیه شد. برای فرم‌دهی ورق تیغه شعاع انحنای ۳۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد و سپس قالب سنبه و ماتریس طراحی و تولید شد. طراحی قالب سنبه و ماتریس در محیط Core & Cavity Design نرم‌افزار کنیا انجام شد. آلیاژ فولاد SPK به دلیل استحکام بالا در ضربه‌ها برای تولید قالب مورد استفاده قرار گرفت. برای افزایش سختی سطح تیغه تولید شده و افزایش مقاومت در برابر سایش در هنگام خاک‌ورزی به طوری که استحکام کشتی تیغه تغییر نکند، عملیات آبکاری یا سخت‌کاری^۶ انجام شد. در اولین مرحله قطعه به آرامی تا ۶۰۰ الی ۷۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. سپس حرارت را سریع تا دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد بالا برده می‌شود تا ساختار آلیاژ و فولاد دانه ریز (تشکیل محلول جامد و شروع تغییر ساختار میکروسکوپی) شود. در مرحله دوم قطعه را بسته به ضخامت آن در این حرارت نگه می‌دارند که به اصطلاح خیساندن^۷ می‌گویند. مرحله آخر و مهم‌ترین بخش که سردسازی سریع نام دارد به جای اینکه قطعه در محیط هوای محیط و به آرامی خنک شود با غوطه‌ور سازی قطعه در آب به سرعت خنک شد. به جای آب می‌توان از نیتروژن مایع، حمام نمک، یا آب نمک استفاده کرد.

(MPa)				
630	310	210	0.27	7.85

تحلیل رایانه‌ای به روش FEM

تحلیل نرم افزاری به روش المان محدود^۱ (FEM) به عنوان یک روش عددی برای محاسبه تنش‌ها، انحرافات و جابجایی‌ها که حل آنها با استفاده از روش‌های تحلیلی دشوار است، کاربرد دارد. در این روش ساختار قطعه به بخش‌هایی به نام عناصر محدود به منظور مدیریت بهتر و آسانتر تقسیم می‌شود. این عناصر کوچک به طور مستقیم یا غیرمستقیم به همدیگر از طریق گره‌ها مرتبط می‌شوند. سپس از خواص مکانیکی ماده برای تعیین رفتار یک گره معین استفاده می‌شود. تحلیل استحکام مکانیکی تیغه در نرم‌افزار آباکوس^۲ (نسخه ۶،۱۰، ۲۰۲۲) انجام شد.

این نرم‌افزار برای استخراج ویژگی‌های از جمله بیشینه تنش و کرنش‌های مکانیکی تحت بارهای وارده از قدرتمندترین ابزارهای تحلیل اجزای محدود است و به منظور تحلیل خطی و غیر خطی قطعات مکانیکی تحت شرایط استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از وارد کردن طرح سه‌بعدی تیغه در محیط تحلیل نرم‌افزار، ابتدا از قیدگذاری ایزواستاتیک^۳ به منظور جلوگیری از انتقال و چرخش قطعه بدون محدود کردن بیش از حد استفاده شد (شکل ۳-الف). قیدگذاری Clamp برای اتصال دائم تکیه‌گاه تیغه بکار گرفته شد. برای مش‌بندی روش خودکار مش‌بندی یا شبکه‌بندی Octree Mesh برای ایجاد مش‌های سه بعدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳-ب). در این روش ابعاد مش-بندی بر اساس محل و شرایط نقاط مختلف قطعه به صورت خودکار تعیین می‌شود. مش‌های چهار وجهی دارای ۴ رأس^۴ و ۶ یال^۵ و متناسب با محل قرارگیری نقاط ایجاد می‌شود. این روش توسط پژوهشگران متعددی بکار گرفته و تایید شده است (۶، ۷ و ۱۵). با توجه به شرایط کاری تیغه

1- Finite Element Analysis

2- Abaqus

3- Isostatic Restraint

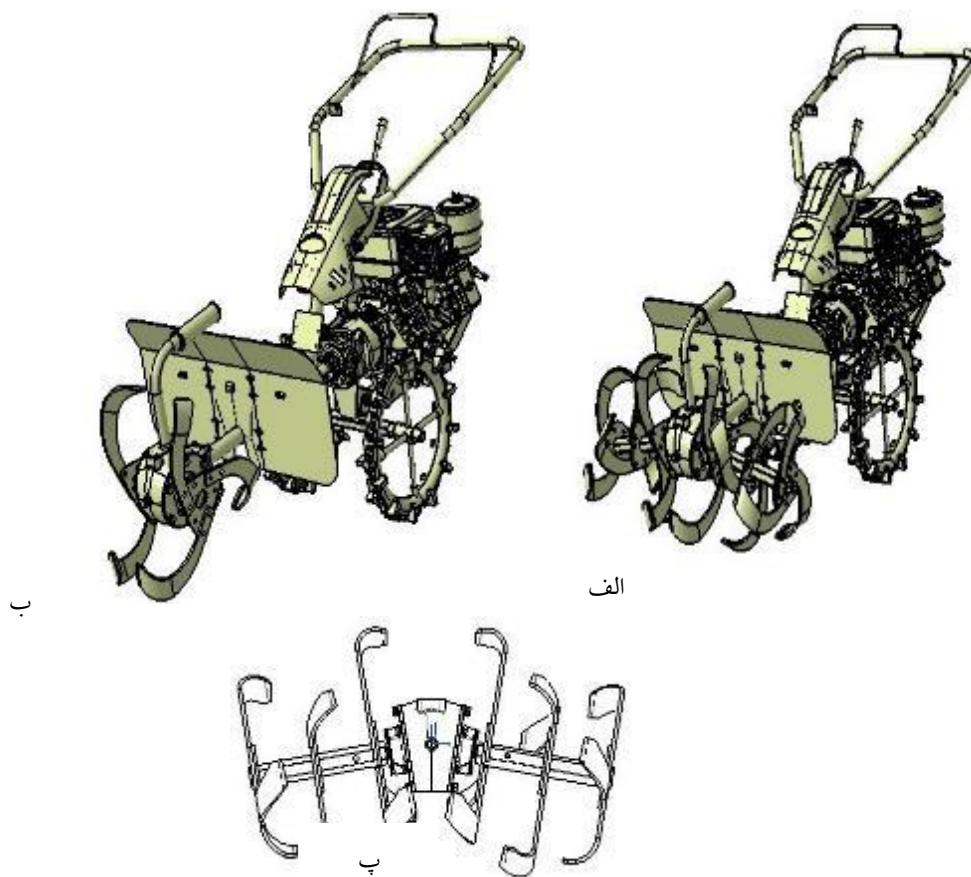
4- Vertices

5- Edges

6- Hardening

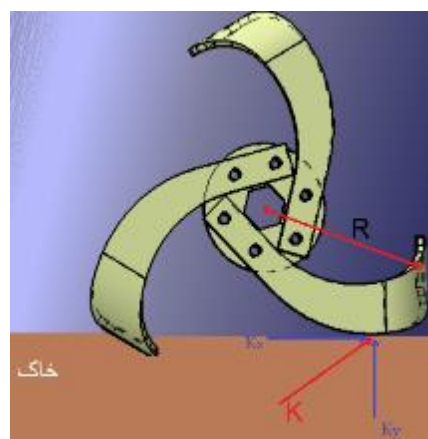
7- Soaking

خوشابری و همکاران: طراحی، ساخت و ارزیابی تیغه‌های...



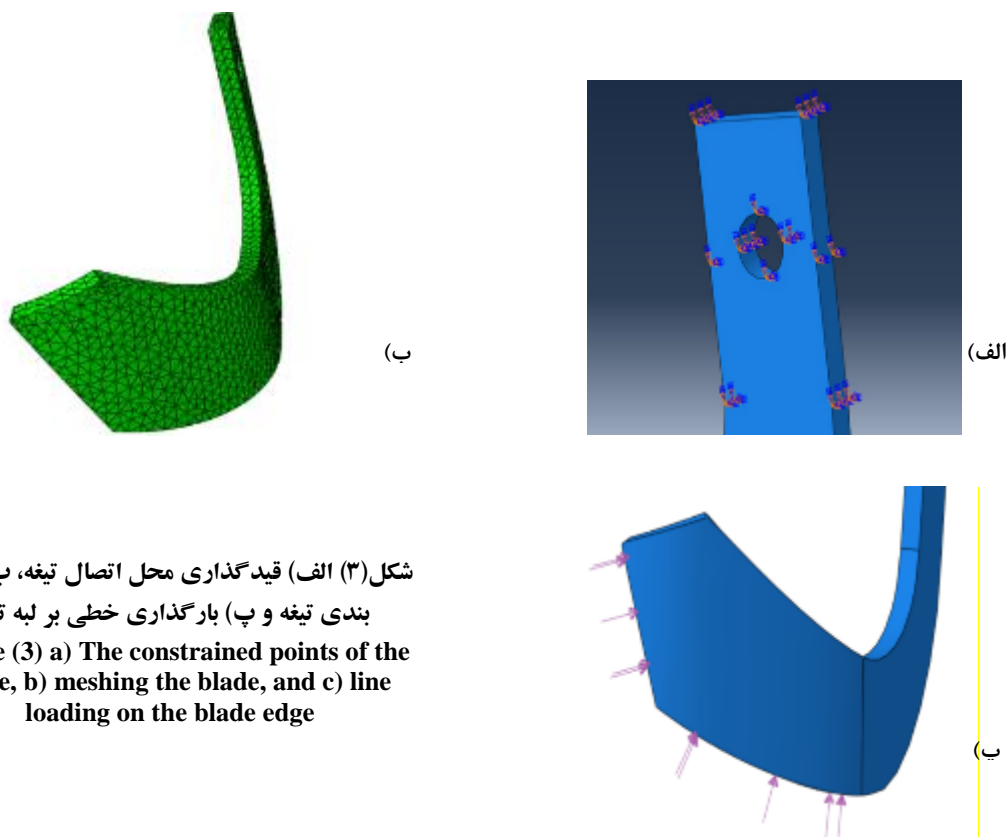
شکل (۱) ماشین دو کاره خاک‌همزن - جوی پشته‌ساز، الف) در حالت ایجاد نهر یا جوی با حرکت به سمت عقب، ب) در حالت خاک‌همزنی با حرکت به سمت جلو پ) محورهای تیغه‌ها در دو طرف جعبه دنده V شکل با زاویه ۱۰ درجه نسبت به افق (عمق کار همه تیغه‌ها یکسان است)

Figure (1) The dual-purpose rotary-trencher machine, a) in the state of creating a trench by moving backward, b) in the state of the topsoil disturbing by moving forward, c) the axis of the blades in two sides of the V-shaped gearbox with an angle of 10 degrees to the horizon (the working depth of all blades is constant)



شکل (۲) نیروهای وارد به تیغه در لحظه ورود به خاک

Figure (2) The blade forces at the moment of entering the soil



شکل (۳) الف) قیدگذاری محل اتصال تیغه، ب) مش- بندی تیغه و پ) بارگذاری خطی بر لبه تیغه
Figure (3) a) The constrained points of the blade, b) meshing the blade, and c) line loading on the blade edge

میانگین قطر ذرات و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها^۱ در هر کرت اندازه‌گیری شد.

الک‌ها به صورت عمودی به ترتیب با اندازه قطر سوراخ ۸، ۶/۳، ۴، ۲/۸، ۲، ۱/۴، ۱، ۰/۸۵، ۰/۶ و ۰/۵ میلیمتر روی هم قرار گرفتند. الک کردن در مدت زمان ۱۲۰ ثانیه با جهت چرخش متفاوت در هر ۳۰ ثانیه انجام شد. پس از آن خاک باقی مانده رو هر الک به وسیله ترازو با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ g وزن شد. میانگین وزنی قطر هر کلوخه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n \frac{W_i \times D_i}{W_t} \quad (1)$$

که MWD میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (mm)، W_i وزن خاک روی هر الک (gr)، W_t وزن نمونه در هر نمونه مورد آزمایش (gr) و D_i قطر میانگین خاک دانه‌ها روی هر الک برحسب (mm) (که برای الک دوم به بعد برابر با میانگین قطر الک مورد نظر و قطر الک بالایی آن است).

ارزیابی مزروعای و بررسی عملکرد تیغه

پس از تولید و مونتاژ تیغه‌ها بر روی فلائج‌های دوار ماشین، آزمون‌های مزروعای انجام شد. آزمایش‌ها در یک باغ در شهرستان ساری استان مازندران انجام گرفت. قبل از شروع آزمایش خصوصیات مربوط به نوع بافت خاک از جمله پوشش گیاهی، چگالی ظاهری خاک و رطوبت بدست آمد (جدول ۲). برای ارزیابی تیغه‌های طراحی شده در حالت خاک‌همزنی ماشین ۹ تیمار، ۳ نوع تیغه و ۳ سرعت دورانی محور تیغه‌ها (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه) در ۳ تکرار، زمین مورد آزمون به ۲۷ کرت تقسیم شد. نمونه‌برداری از خاک خاک‌ورزی شده سه روز بعد از انجام عملیات برای سخت و خشک شدن ذرات خاک انجام شد تا در هنگام استفاده در الک‌های آزمایشگاه دچار شکستگی و کاهش اندازه کمتری شوند (۱۳). از هر کرت سه نقطه به طور کاملاً تصادفی انتخاب و توسط قاب چوبی با ابعاد عرض، طول و عمق (۲۰×۲۰×۱۰ cm) نمونه برداری انجام شد. سپس با استفاده از الک‌های لرزان قطر خاکدانه‌ها به عنوان مقدار

1- Mean Weight Diameter (MWD)

جدول (۲) خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد آزمون
Table (2) Physical properties of the tested soil

بافت خاک Soil texture			رطوبت خاک Soil moisture content (MC %).	چگالی ظاهری خاک Soil bulk density (g/cm ³)	میانگین ارتفاع علف هرز Average height of weeds (mm)	نوع زمین Type of land
شن Sand	سیلت Silt	رس Clay				
5%	43%	54%	18	1.06	122	باغی/Garden

بیشینه تنش‌های حاصله بسیار پایین‌تر از تنش تسلیم یا استحکام نهایی آلیاژ بکار رفته در تیغه است و استفاده از این آلیاژ با ضریب اطمینان بسیار بالا پیشنهاد می‌شود. همچنین بارگذاریهای گذرا به شکل مثلی در مدت زمان ۱۲۰ ثانیه، اندازه نمو^۱ به صورت خودکار و برابر با ۰/۰۲ و بیشینه تعداد نموها^۲ برابر با ۱۰۰۰ اعمال شد. نتایج این تحلیل در شکل (۶) آورده شده است.

نتایج نشان داد که بیشینه تنش ون میسر ایجاد شده تحت بارگذاری دینامیک برابر ۷ مگاپاسکال و بیشینه تنش اصلی ۲۴ مگاپاسکال بدست آمد که به مراتب کوچکتر از تنش تسلیم قطعه هستند. تنش حاصل بر اساس سطح مقطع کل لبه تیغه درگیر با خاک محاسبه شده است. در سایر تحقیقات مشابه حداکثر تنش حاصله نیز بسیار پایین‌تر از استحکام نهایی آلیاژ استفاده شده بدست آمده است (۲، ۱۴ و ۱۷).

بعد از اطمینان از استحکام آلیاژ و سطح مقاطع انتخابی برای تیغه‌ها، قالب فورج و آهنگری تیغه به روش ریخته‌گری فولاد و ماشینکاری تولید شد. سپس طرح گستره تیغه‌ها با استفاده از دستگاه CNC برش داده، با استفاده از قالب آهنگری کوبیده و با شعاع ۳۸ میلیمتر خمکاری شد (شکل ۷).

آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در نرم‌افزار SPSS پیاده‌سازی و انجام شد. در نهایت بهترین سطح مقطع تیغه و دور محور تیغه‌ها تعیین شد. در قسمت دوم آزمایش‌ها ماشین به منظور ایجاد جوی و پشته با دو فلانچ تیغه‌ها در سه دور محور تیغه‌ها (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه) ارزیابی شد. دور محور تیغه‌ها با تغییر دور موتور دستگاه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری دور با یک دورسنج لیزری انجام و تثبیت می‌شود. در این حالت ایجاد عمق جوی بیشینه در یک سرعت پیشروی ثابت به عنوان معیار اصلی برای ارزیابی سه نوع تیغه در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

طراحی سه بعدی و تحلیل رایانه‌ای استحکام تیغه

تیغه‌های طراحی شده با سه سطح مقطع مختلف با مساحت ۴۲/۷۵، ۳۸/۵۳، ۳۵/۳۹ سانتی‌متر مربع در محیط GSD نرم‌افزار کتیا در شکل (۴) آورده شده‌اند.

بعد از طراحی رایانه‌ای تیغه‌ها، به منظور اطمینان از استحکام آنها در برابر نیروهای ضربه‌ای وارده از سطح خاک تحلیل رایانه‌ای و بررسی استحکام مکانیکی آلیاژ انتخاب شده (ST52) در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. شکل (۵) نتایج تحلیل رایانه‌ای تیغه‌ها در بیشینه نیروی وارده به آنها را نشان می‌دهد. بیشینه تنش حاصل در تیغه‌ها با سه مساحت ۴۲/۷۵، ۳۸/۵۳ و ۳۵/۳۹ سانتی-مترمربع بر اساس معیار ون میسر به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷ و ۰/۱۸۸ مگاپاسکال بدست آمد. همچنین بیشینه تنش اصلی در این سه مدل تیغه به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۲۴ و ۰/۱۲۲ مگاپاسکال بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که

1- Increment Size

2- Maximum Number of Increments



(ب)



(الف)

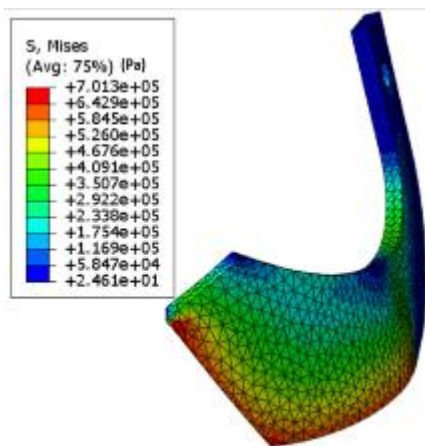


(پ)

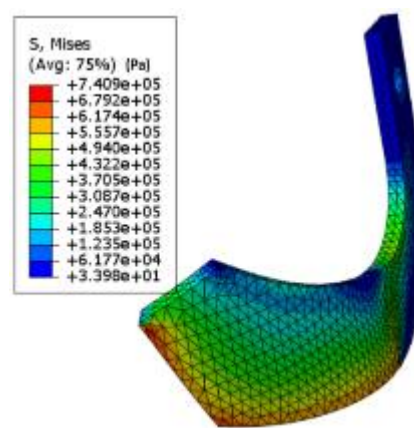
شکل (۴) تصاویر اولیه و سه بعدی تیغه با سه سطح مقطع مختلف، الف) تیغه با مساحت 38.53 cm^2 ، ب) تیغه با مساحت 35.39 cm^2 ، ج) تیغه با پهنای 42.75 cm^2

Figure (4) Initial and three-dimensional images of the blade with three different surfaces, a) 35.39 cm^2 , b) 38.53 cm^2 , and c) 42.75 cm^2

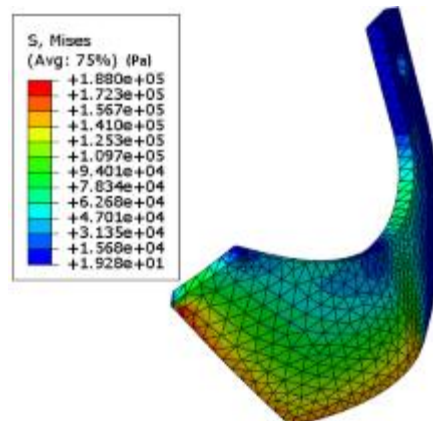
(ت)



(ب)



(الف)

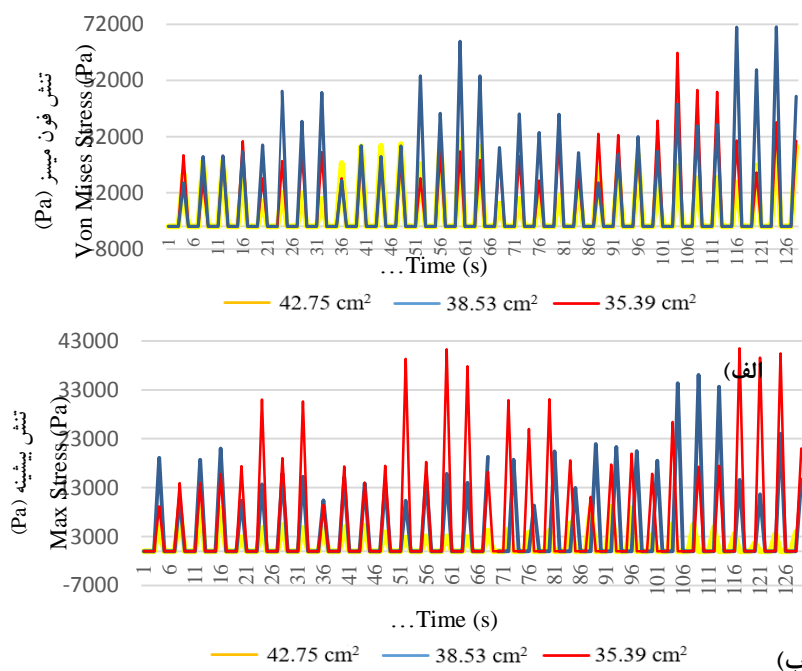


(پ)

شکل (۵) بیشینه تنش ایجاد شده در تیغه‌ها در بیشینه بار ضربه-ای وارده به هر تیغه الف) تیغه با سطح مقطع 35.39 cm^2 ، ب) تیغه با سطح مقطع 38.53 cm^2 و پ) تیغه با سطح مقطع 42.75 cm^2

Figure (5) The maximum stress created in the blades at the maximum impact load applied to each blade a) blade with a surface of 35.39 cm^2 , b) 38.53 cm^2 and c) 42.75 cm^2

خوشابری و همکاران: طراحی، ساخت و ارزیابی تیغه‌های...



شکل (۶) تنش بیشینه ایجاد شده در تیغه‌ها در ۱۳۰ ثانیه بارگذاری گذرا (الف) نمودار تنش ون میسر (ب) نمودار تنش بیشینه اصلی
Figure (6) Maximum stress created in the blades in 130 seconds of transient loading a) Van Mises stress) Main maximum stress



(ب)



(الف)



(پ)

شکل (۷- الف) تصویر ورق برش خورده تیغه (ب) تصویر قالب فورج لبه تیغه و (پ) تیغه‌های تولید شده
Figure (7- a) Metal sheet of the blade, b) forging mold of the blade, and c) produced blades

انجام خاکورزی ۱۸ تیغه روی ۶ فلانچ در دو طرف جعبه دنده ماشین نصب شد. تصویر ۸-پ) جوی ایجاد شده و ۸-ت) سطح خاکورزی انجام توسط ماشین شده را نشان می‌دهد.

بعد از این مرحله تیغه‌ها به صورت سطحی آبکاری شدند. شکل (۸) تیغه‌های نصب شده بر روی ماشین در حالت شخم‌زنی و در حالت ایجاد جوی و پشته‌سازی را نشان می‌دهد. در حالت ۸-الف) ۶ تیغه بر روی ۲ فلانچ برای حالت ایجاد جوی و پشته نصب شده است و در حالت شکل ۸-ب) برای



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل (۸) آرایش قرارگیری تیغه‌ها در حالت الف) ایجاد جوی و ب) سله‌شکنی و پ) جوی ایجاد شده با یک مرحله حرکت ماشین به سمت عقب و پ) زمین خاک‌ورزی یا سله‌شکنی شده

Figure (8) The arrangement of the blades in the state of a) setting as trencher and b) rotary c) a trench created by one step of moving the device backward and c) the topsoil operated using rotary

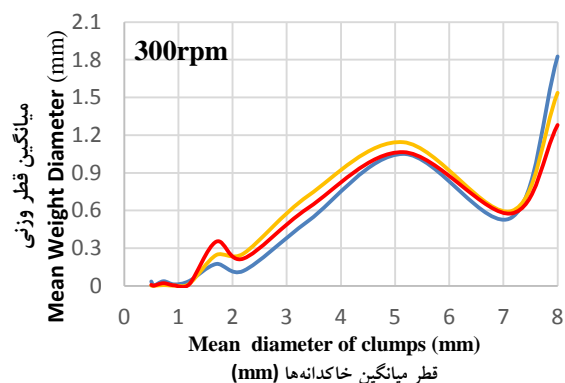
مجموع باعث خرد شدن بیشتر خاک و کاهش میانگین وزنی قطر کلوخه می‌شود. در سرعت چرخش ۲۰۰ rpm درصد بیشتری از ذرات دارای شاخص MWD بزرگتر در قطر ذرات بین ۶ تا ۸ میلیمتر و MWD کمتر در قطر ذرات ۴ تا ۶ میلیمتر هستند. در صورتیکه شاخص MWD در دور ۴۰۰ rpm دارای مقدار کمتر در قطر ذرات بین ۶ تا ۸ میلیمتر و مقدار بیشتر در قطر ذرات ۴ تا ۶ میلیمتر است. تحلیل اثر سطح مقطع تیغه و برهمکنش آن با تغییر دور محور تیغه‌ها در آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد.

آزمون‌های مزرعه‌ای و ارزیابی عملکرد تیغه‌های تولید شد

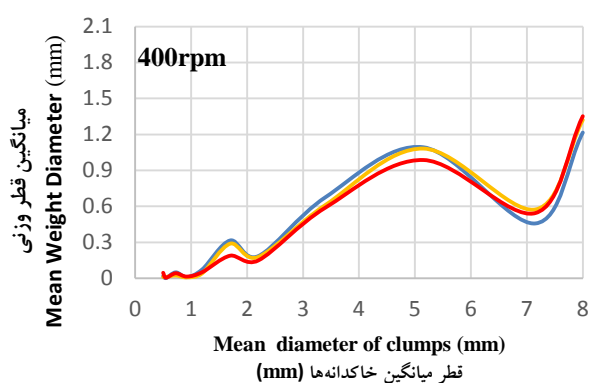
نتایج ارزیابی ماشین در حالت سله‌شکنی یا خاک‌همزنی با سه مدل تیغه در سه دور محور تیغه‌ها در سه تکرار در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر MWD نشان داد که با توجه به ثابت بودن سرعت پیشروی ماشین هنگام خاک‌ورزی و افزایش دور موتور و بالا بردن چرخش محور تیغه‌ها میزان خرد شدن خاک به صورت قابل مشاهده‌ای افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت چرخش محور تیغه‌ها و با ثابت بودن سرعت پیشروی تعداد برخورد تیغه‌ها با خاک در واحد زمان افزایش یافته که در

خوشابری و همکاران: طراحی، ساخت و ارزیابی تیغه‌های...

مختلف تیغه‌ها انجام شد. همانطور که در جدول آورده شده است تاثیر پهنای تیغه بر روی مقدار میانگین MWD بی‌معنی بوده است در صورتیکه تاثیر افزایش سرعت چرخش محور تیغه‌ها در سطح ۵٪ معنی دار است.



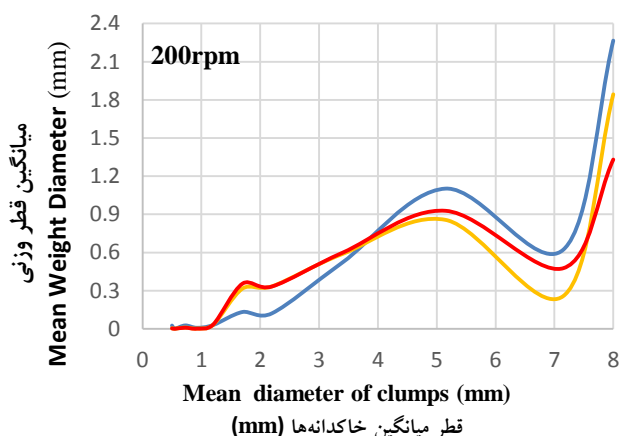
برای ارزیابی دقیق‌تر ترکیب نوع تیغه و دور محور تیغه‌ها میانگین MWD به عنوان شاخص هر تیمار در طرح فاکتوریل ۳×۳ به صورت کاملاً تصادفی پیاده‌سازی و اجرا شد. نتایج در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به اینکه با افزایش دور محور تیغه‌ها میزان خرد شدن خاکدانه‌ها بیشتر است این تحلیل با هدف ارزیابی دقیق‌تر سطح مقاطع



— 42.75 cm² — 38.53 cm² — 35.39 cm²

شکل (۹) نمودار و مقایسه تیغه‌ها با سطوح مختلف ۴۲/۷۵، ۳۸/۵۳ و ۳۵/۳۹ سانتی‌متر مربع در سرعت‌های مختلف دورانی محور تیغه‌ها

Figure (9) Diagram and comparison of blades with different surface areas 42.75, 38.53, and 35.39 cm² at several rotational speeds of the blade axis

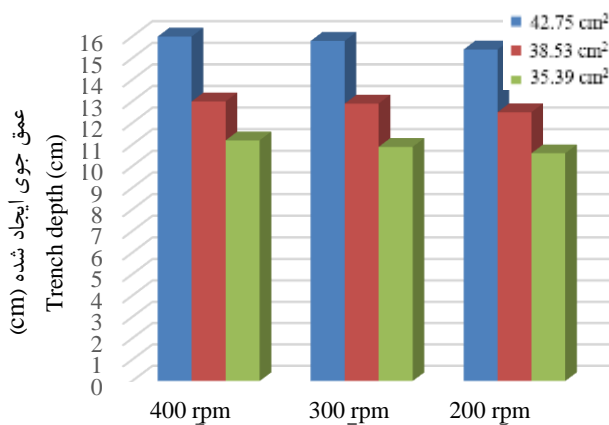


جدول (۳) نتیجه مقایسه میانگین MWD اندازه‌گیری شده تحت تاثیر عوامل آزمایش

Table (3) Result of comparing the average measured MWD under the effect of test factors

منابع (Source)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	F
دور موتور (RPM)	2	0.014	3.938*
سطح مقطع تیغه (Blade)	2	0.003	1.000 ^{ns}
سطح × دور موتور (Blade × RPM)	4	0.009	3.01*
خطا (Error)	18	0.003	
مجموع (Total)	26		

* و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری و عدم معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪.



شکل (۱۰) عمق جوی ایجاد شده توسط ماشین در وضعیت حرکت به سمت عقب با سه سطح مقطع تیغه در سه دور دورانی محور تیغه‌ها

Figure (10) Trench depth created by the machine in the state of moving backward using blades with 3 different surfaces at 3 rotational speeds

نتیجه گیری

در این پژوهش تیغه با سه سطح مقطع برای یک ماشین دو کاره خاک‌همزن-جوی‌پشته‌ساز جلوسوار طراحی، تحلیل، تولید و ارزیابی شد. نتایج تحلیل رایانه‌ای نشان داد بیشینه تنش وارده به تیغه‌ها در عملیات خاکورزی با سه سطح مقطع تیغه (۴۲/۷۵، ۳۸/۵۳ و ۳۵/۳۹ سانتی‌متر مربع) بسیار پایین‌تر از تنش تسلیم آلیاژ مصرفی (ST52) می‌باشد. سه مدل تیغه در سه سرعت دورانی محور تیغه‌ها (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه) عملیات خاکورزی و ایجاد جوی مورد ارزیابی قرار گرفت. MWD به عنوان معیار عملیات خاکورزی و عمق جوی ایجاد شده به عنوان معیار ایجاد جوی در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل آماری نشان داد سطح مقطع تیغه در کیفیت خاکورزی تأثیری ندارد ولی دور محور تیغه‌ها به طور چشمگیری موثر بوده است. از سوی دیگر در عملیات ایجاد جوی سطح مقطع تیغه به طور چشمگیری موثر بوده و با افزایش سطح مقطع به دلیل جابجایی خاک بیشتر عمق جوی ایجاد شده بیشتر شد. در نهایت تیغه با سطح مقطع ۴۲/۷۵ سانتی‌متر مربع با جنس فولاد آلیاژی ST52 با لبه آهنگری شده و سخت کاری شده با شعاع خم ۳۸ میلی‌متر برای این نوع ماشین دو کاره خاک‌همزن و جوی پشته ساز پیشنهاد شد. بنابراین این ماشین با یک مدل تیغه هم برای خاک‌همزنی و هم برای ایجاد جوی مناسب می‌باشد.

اثر متقابل دو تیمار بررسی شده در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است. نتایج بیان می‌کند که اثر عامل سطح مقطع تیغه در این نوع خاک‌همزنی و این ماشین معنی‌دار نبوده است و می‌توان سطح مقطع بیشینه یا کمینه را انتخاب کرد ولی به دلیل نیاز به اینکه هدف کاربرد تیغه‌ها برای هم خاک‌همزنی و هم ایجاد جوی است سطح مقطعه بیشینه ممکن است خاک بیشتری را به بیرون جوی انتقال دهد. بنابراین سه سطح مقطع تیغه برای ایجاد جوی توسط ماشین نیز ارزیابی شدند. در این حالت ۲ فلانج از ۶ فلانج واحد خاکورز با ۶ تیغه عملیات ایجاد جوی را زمانی که ماشین به سمت عقب حرکت می‌کند انجام می‌دهد. در این حالت صفحه پشت واحد خاکورز در وضعیت عقب قرار گرفته و به عنوان هدایت کننده خاک به بیرون از جوی عمل می‌کند (شکل ۹-الف). شکل (۱۰) نشان دهنده نتایج ارزیابی ماشین در ایجاد جوی در یک مرحله حرکت ماشین به سمت عقب می‌باشد. سرعت حرکت ماشین به سمت عقب توسط کاربر کنترل می‌شود و دور محور تیغه‌ها ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شده است. نتایج به‌طور بدیهی نشان می‌دهد سطح مقطع تیغه‌ها در عملکرد ایجاد جوی تأثیر چشمگیری داشته است و با افزایش سطح مقطع تیغه‌ها مقدار خاک منتقل شده به بیرون از جوی افزایش و در نتیجه عمق میانگین جوی ایجاد شده بیشتر شده است. همچنین افزایش دور محور تیغه‌ها باعث افزایش عمق جوی شده است ولی تأثیر افزایش دور محور تیغه‌ها به اندازه افزایش سطح مقطع تیغه نبوده است زیرا سرعت عقب‌روی ماشین ثابت و کم است و افزایش دور محور تیغه‌ها هرزگردی محور خاکورز را به دنبال دارد.

References

1. Baldev, E., Mubarakali, D., Saravanakumar, K., Arutselvan, A., Albahri, S.A., Sivasubramanian, V., Thajuddin, N. 2018. Unveiling algal cultivation using raceway ponds for biodiesel production and its quality assessment. *Renewable Energy*, 123, 486-498. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.032>
2. Bhargavi, A., & Madhava, V. 2021. Design and Analysis of a Rotavator. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 8, 730-742. <https://www.irjet.net/archives/V8/i12/IRJET-V8I12127.pdf>
3. Gholami, H., Kalantari, D., Rajabi-Vandchali, M. 2016. Test and evaluation of a type of rotary soil mixer with triangular blades. *agricultural machinery magazine*, 7(1), 29-57. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.49810>
4. Gholami, H., Kalantari, D., Rajabi-Vandchali, M. 2017. Designing, building, and testing a new type of rototiller suitable for gardens and small farms. (*Agronomical Engineering*) *Scientific Journal of Agriculture*, 41(1), 26-36. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/agen.2018.16706.1242>
5. Jakasania, R., Vadher, A., Kathiria, A. 2017. Performance evaluation of vertical rotary plough. *Journal of Scientific Research and Report*, 13, 1-7. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2017/31757>
6. Khorsandi, F., Ayers, P., & Truster, T.J. 2017. Developing and evaluating a finite element model for predicting the two-posts rollover protective structure nonlinear behavior using SAE J2194 static test. *Biosystems Engineering*, 156, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.010>
7. Khot, S.S., & Navthar R.R. 2019. Design and optimization of the front axle of a heavy truck. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(4), 2455-2143. <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2019.v04i04.031>
8. Malhi, S. S., R. Lemke, Wang, Z. H., Baldev., & Chhabra, S. 2006. Tillage, nitrogen, and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil and Tillage Research*, 90, 171-183. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.09.001>
9. Mandal, S.M., Bhattacharyya, B. 2016. Design Optimization of Rotary Tiller Blade using Specific Energy Requirement. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 516, 1-7. <http://Dx.Doi.Org/10.14741/Ijcet/22774106/6.4.2015.31>
10. Patil, A., Desai, A. 2017. Analysis of Rotavator Blade Performance through Material Selection and Fatigue Analysis through ANSYS Simulations. *National Conference on Progresses and Research in Mechanical Engineering*, Dharwad, India. <https://www.jetir.org/papers/JETIR2302484.pdf>
11. Rajat, A., Kumar, A., & Pateriya, R. 2020. Comparative Study of Wear Characteristics and Material Composition Analysis of Different Types of Rotavator Blade. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9, 390-401. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.044>
12. Ramesh Kumar, D., Mohanraj, P. 2017. Design and Analysis of Rotavator Blades for its Enhanced Performance in Tractors. *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, 1, 160-185. <https://ssrn.com/abstract=2928882>
13. Sedghi R., Abbaspur, Gilande, M. 2013. Investigating the factors affecting soil fragmentation during tillage operations and determining the optimal points of the influencing factors using fuzzy logic. *Agricultural Engineering*, 37(1): 47-35. (In Persian). https://agrieng.scu.ac.ir/article_10734
14. Sontakke, K.R., Ubarhande, P.R. 2020. Design and Analysis of Rotavator Blades by Using Ansys Software. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 4, 847-852. <https://ssrn.com/abstract=2928882>
15. Supardjo, A.D.A., Tri Widodo B.R. 2018. Finite element analysis of truck frame by using CATIA V5. In: *AIP Conference Proceedings*, 24-26 Jun., University of Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia, 1-7. <https://doi.org/10.1063/1.5042949>

16. Tabatabai Kalor, R., Kiani, Gh. 2011. Investigating the working factors of rototiller blades in tillage operations of gardens and paddy fields. *Agricultural Machinery Journal*, 1(1), 34-40. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v1i1.10076>
17. Vivek, B., Deepraj, E. 2018. Fabrication and Performance Analysis of Rotovator Blades for Its Enhancement. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 6:1-5. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV6IS04034>