Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

Vol. 4, No. 2, pp 27–45, Year 2026

Journal Homepage: https://stmechanics.bmtc.ac.ir/?lang=en

DOI: 10.22034/stme.2025.524280.1131

Design and construction of a multi-purpose agricultural rotator with movable arms

Mohammad Reza Ebrahimian*[1], Farzad Rahmani[2], Amirreza Barzegar Shokri[3]

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran
2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

3.M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

Abstract

Tillage operations are very important in various aspects, including improving the physical quality of the soil, maintaining moisture, increasing organic matter, and reducing erosion, and play a fundamental role in providing a suitable substrate for optimal plant growth... In this regard, the design and construction of a multi-purpose rotivator with the aim of simultaneously performing tillage and planting operations creates a revolution in increasing productivity, reducing fuel consumption, time, and total cost of production. This device, with its combined mechanisms, is capable of performing operations such as breaking up clods, aerating the soil, preparing the seedbed, and digging adjustable furrows simultaneously. The double-sided folding structure and design compatible with road transport conditions are other important features of this advanced tiller. In addition to the technical advantages, using this device with modern technologies will help automate agricultural operations, reduce resource losses (such as water, energy, and fertilizer), and adapt to the principles of sustainable agriculture. Due to the lack of a similar domestic model and its affordable price compared to foreign models, this device can play an effective role in the development of agricultural mechanization in the country. Thus, the multipurpose tiller, as an efficient, smart, and economical tool, will pave the way for increasing productivity, conserving resources, and achieving sustainable development goals in modern agriculture.

Keywords

Rotivator

Optimum tillage operations

Productivity

Product growth

Mechanization

Received: 17.05.2025
Revised: 11.07.2025
Accepted: 07.08.2025

***Corresponding Author**
Mohammad Reza Ebrahimian
Email
m.ebrahimian@kar.ac.ir

1- Introduction

As one of the most important tillage equipment with the ability to adjust working depth and high crushing power, the rotavator plays an important role in preparing the seedbed and mixing plant residues. L and C type blades are suitable for use at different depths and, with their special design, increase soil quality and reduce soil compaction [1]. Figure 1 shows a view of a rotivator and L and C blades [2]. Control systems such as depth adjustment skids, a spring-loaded tailgate to adjust the amount of soil crushing, and front shock absorbers to correct the tractor wheel path help improve the machine's performance in various operations [3]. The introduced rotavator, considering features such as optimal fuel consumption, diversity in working width, and applicability in different conditions, is known as a versatile, efficient tool that is compatible with modern agriculture [4].

How to Cite this Article:
[1] M. R. Ebrahimian, F. Rahmani, and A. Barzegar Shokri, "Design and construction of a multi-purpose agricultural rotator with movable arms," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 27–45, 2026, https://doi.org/10.22034/stme.2025.524280.1131. (in Persian)

©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2981-2232

Figure 1: View of a rotivator and L and C blades

Arthur Clifford Howard invented the first electric rotary tiller in 1912 [5]. He used a steam tractor engine and rotating discs to create a new method of tillage that broke up the soil without compacting it. This innovation resulted in a more uniform soil breakup, making it ready for farming [6]. Howard designed various models including rotary shovels for the Fordson tractor and hand-operated machines, and he introduced a machine with an internal combustion engine and five rotary cultivators [7]. Howard's first rotavator was designed for a Fordson tractor and was powered by the tractor's pulley .In 1949, the lighter D-type model was introduced with smaller blades and a 20-inch rotor for Ferguson and Ford "Dearborn" tractors, which were connected to the tractor by four-point linkage arms [8]. The F-type model was introduced with a direct connection to the rear transmission and a 23-inch rotor, which was suitable for a variety of tractors. These machines enrich the soil for planting, remove unwanted roots and improve soil structure . Rotavators also contribute to sustainable agriculture with features such as cover crop planting and fertilizer mixing, improving crop yield and soil quality [9] .Early rotavators were prone to mechanical failure due to their heavy weight and high energy consumption. Repeated tillage with these machines can damage soil structure, causing compaction, erosion, and loss of organic matter [10] .These disadvantages, especially in wet soils, pose serious challenges for farmers, increasing energy and labor costs. Nordic research shows that soil compaction caused by heavy machinery can reduce crop yields by 5 to 15 percent [11] .Studies using CT scans show that structural damage to the soil remains even after 14 years. Climate change and increased rainfall make dry soils more vulnerable to compaction. Heavy machinery with a weight of up to 60 tons has intensified this problem, and in deeper soil layers, the reduction in performance can be permanent. A rotavator consists of components such as a propeller shaft, slip clutch, gearbox, side drive, blades, soil guard, and gauge wheels. L-shaped blades made of high-carbon steel are ideal for shallow soil tillage, while C-shaped blades are more suitable for heavy soils. The device body is made of ST37 steel, offering high strength but low resistance to vibration. The gearbox housing is produced from gray cast iron or cast steel to withstand stresses. Universal joints are made of low-carbon steel, and wear strips are made of ST37 steel, which are flexible but susceptible to corrosion. These materials ensure the durability and performance of the equipment.

2- Research Methods

Unlike traditional plows that cause soil imbalance and compaction, the rotavator with its rotating blades prepares the soil uniformly. The physical, mechanical, and dynamic properties of the soil, such as strength and moisture content, directly influence the energy required for tillage. Understanding these properties is essential for designing blades and operational settings to improve efficiency and soil quality.

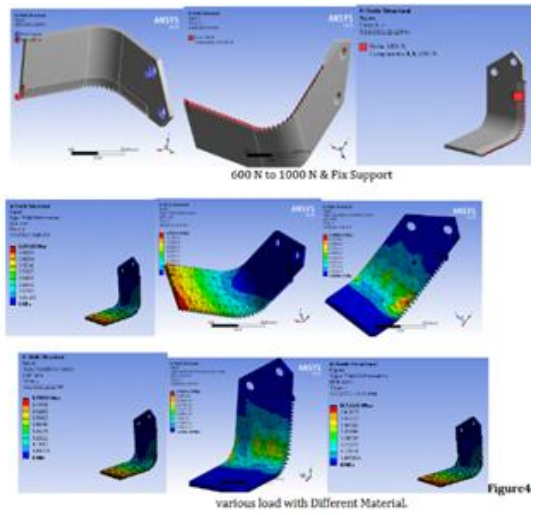


Figure 2: Blade analysis in ANSYS software

Gray cast iron versus structural steel were examined for blade material selection. Gray cast iron, with a permissible stress of 105 MPa, and structural steel, with 140 MPa, were analyzed. Under applied loads

of 600 and 1000 Newtons, the resulting stresses in both materials (42.832 and 74.283 MPa for gray cast iron; 42.505 and 73.234 MPa for structural steel) remained within safe limits, indicating design safety (Figure 2).

The deformation analysis of the blades showed that gray cast iron experienced a deformation of 1.4324 mm under a 1000 Newton load, while structural steel had a deformation of 0.79592 mm. Although gray cast iron is cheaper, it exhibits greater deformation, whereas structural steel, with higher efficiency, is a more suitable material for heavy-duty applications. Static analysis was conducted by varying the blade angles (85°, 90°, 95°, 100°, and 105°).

3- Results

The results indicated that the blade angle influences both stress and deformation. The optimal angle (95°, in the current design) provided a suitable balance between cutting efficiency and structural resistance. The results are presented in Figure 3.

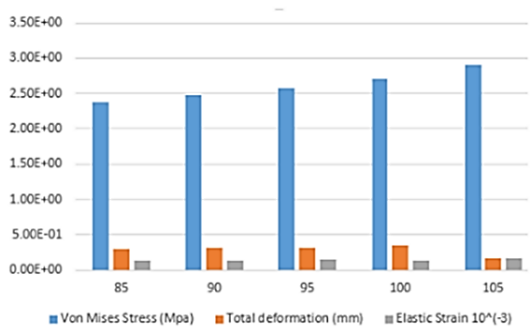


Figure 3: Static analysis diagram of blade angles

Soil Cutting Dynamics Simulation Soil cutting simulation was performed in Abaqus software (Figure 4) to investigate the behavior of the blades in interaction with the soil. The simulation showed that C-shaped blades with the appropriate cutting angle create less friction and introduce less reverse torque to the tractor.

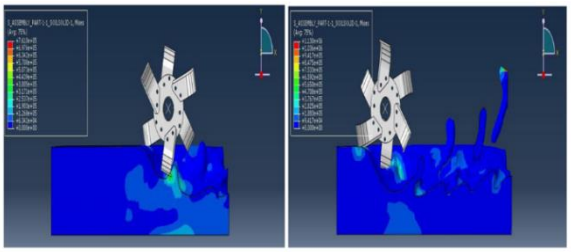


Figure 4: Soil shear dynamics simulator in Abaqus software

The three-point hitch system transfers tractor power from the PTO shaft to the rotor. The components of this system are made with a laser cutting machine, which offers high precision in cutting metals such as steel and aluminum. The system is precision-machined using laser cutting machines to produce high-quality flanges and covers. Rotavator performance is affected by factors such as blade configuration, direction of rotation, depth of tillage, ratio of peripheral speed to forward speed, and soil conditions. The rotavator is equipped with double-row ball bearings made of chrome steel (AISI 52100). The high resistance of these bearings to wear and corrosion ensures flexibility against impacts and long-term durability, which is essential for stable operation of the machine. The use of common parts not only reduced costs but also shortened production time. To reduce waste, sheets of similar thickness and dimensions were used as in other machines. The sheet cutting layout was designed to maximize material utilization and minimize waste. To increase durability, parts under static and bending stresses, such as the center hubs, were doubled. Increasing the diameter of the central gearbox shaft from 35 to 45 mm improved the rotavator's weight-bearing capacity and speed, and reduced maintenance costs. Material selection affects the performance, aesthetics, durability, and cost of the device. Materials such as ductile iron for the gearbox, chrome steel for the bearings, and ST57 steel for the chassis were selected. These materials have high resistance to abrasion, corrosion and impact. This study provides solutions for improving design and production, considering climatic conditions, crop type and tractor power. Needs assessment, a key process in rotavator design, involves identifying the needs of customers and the target market. Rotavator design involves

three main steps: 1) preliminary design to determine initial features, 2) supplementary design to address technical issues and improve specifications, and 3) product analysis to examine strengths and performance. These steps ensure that the final product meets quality and performance standards. The supplementary design focused on resolving technical and engineering issues. The material of the parts, construction, assembly, aesthetics, and compliance with environmental standards were also evaluated. This phase ensured that the rotavator met market requirements in terms of performance and durability. Materials such as ductile iron, chrome steel and ST57 steel were chosen for their strength and durability. Criteria such as strength, corrosion resistance, weight and environmental sustainability were considered. Materials that require less energy to produce or recycle were given priority. These choices not only improved the efficiency of the machine, but also reduced production and maintenance costs. For precise cutting of parts, the drawings were converted to DXF format for use in CNC laser cutting machines.

4- Conclusion

This study aimed to design and manufacture an advanced rotavator to improve agricultural productivity, reduce production costs, and increase the durability of the machine. Using experimental methods, software simulations (such as SolidWorks, ANSYS, and Abaqus), and mechanical analyses, the performance of the blades, power transmission systems, and structural components was investigated. Market need assessment and climate conditions helped in designing a product tailored to farmers' needs. The design process included preliminary, detailed, and analytical stages, ensuring device safety and efficiency. Analyses showed that selecting materials—such as unbreakable cast iron for gearboxes and chromium steel for bearings significantly impacted durability and performance. The C-shaped blades with optimal angles and serrated designs reduced friction and improved soil working. Folding mechanisms, hydraulic locks, and gearboxes enabled simultaneous soil cultivation and tillage. Simulations and final testing confirmed the machine's satisfactory performance across different soil types and tractor capacities. The designed rotavator, equipped with features like a four-plate PTO, slip hubs, and multi-row bearings, reduced maintenance costs. Using CNC laser cutting and optimized component layout minimized manufacturing waste and increased precision. With a working width of 3.50 meters and foldable design, transportation became easier, and operator safety was ensured through safety guards. These innovations boosted agricultural productivity and made the product competitive in the global market.

This research not only contributed to developing an efficient rotavator but also provided a framework for designing agricultural machinery focusing on sustainability and cost-effectiveness. The findings can be used to improve other soil cultivation tools and advance smart agricultural technologies. Future research should focus on optimizing energy consumption, reducing environmental impacts, and integrating smart sensors for soil monitoring. This study represents a significant step toward sustainable agriculture and increasing productivity in areas with diverse climate conditions.

5-References

[1] C. Manivelprabhu, N. Sangeetha, and T. Ramganesh, "Design modification and structural analysis of rotavator blade by using HyperWorks 12.0," *Altair Technology Conference*, 2015.

[2] S. K. Mandal, B. Basudev, and S. Mukherjee, "Optimization of design parameters for rotary tiller's blade," *Power*, Vol. 4, No. 5, 2013.

[3] D. Prasad, P. Tupkari, P. Sharma, and A. Singh, "Computer aided design and analysis of rotavator blade," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 312–317, 2014.

[4] G. U. Shinde, J. M. Potekar, R. V. Shinde, and S. R. Kajale, "Design analysis of rotary tillage tool components by CAD-tool: rotavator," in *2011 International Conference on Environmental and Agriculture Engineering (IPCBEE)*, Vol. 15, 2011.

[5] G. U. Shinde and S. R. Kajale, "Computer aided engineering analysis and design optimization of

rotary tillage tool components," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 1–6, 2011. doi: 10.3965/j.issn.1934-6344.2011.03.001-006.

[6] P. V. Labhsetwar, R. S. Lonkar, R. S. Rajurkar, and S. S. Arsod, "Design and failure analysis of rotavator blade by means of CAD and FEA tool," *International Journal of Advances in Engineering and Management*, Vol. 4, No. 5, pp. 1341–1347, 2022, doi: 10.35629/5252-040513411347.

[7] G. M. Vegad and R. Yagva, "Design analysis and optimization of rotary tiller blades using computer software," *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, Vol. 49, No. 1, pp. 43–49, 2018.

[8] K. C. Selvi, "A new blade design of rotary tiller and static analysis using computer-aided tool," *Inmateh-Agricultural Engineering*, Vol. 53, No. 3, 2017.

[9] D. Kumar and P. Mohanraj, "Design and analysis of rotavator blades for its enhanced performance in tractors," *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, Vol. 1, No. 1, pp. 160–185, 2017.

[10] G. S. Reddy, J. Narsaiah, and G. Shashikala, "Dynamic analysis on tillage equipment used in agriculture using ANSYS software," *Science and Technology*, Vol. 3, No. 7, 2017.

[11] S. K. Mandal, B. Bhattacharyya, S. Mukherjee, and A. K. Prasad, "Design optimization of rotary tiller blade using specific energy requirement," *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 1257–1263, 2016. .doi: 10.14741/ijcet/22774106/6.4.2015.31.

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

سال ۱۴۰۴، دوره ۴ شماره ۲، صفحه ۲۷-۴۵

آدرس نشریه: https://stmechanics.bmtc.ac.ir

DOI: 10.22034/stme.2025.524280.1131

طراحی و ساخت رتیواتور چندمنظوره زراعی با بازوهای متحرک

محمدرضا ابراهیمیان[1*]، فرزاد رحمنی[2]، امیررضا برزگر شکری[3]

۱- استادیار، دانشکده مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

۳- کارشناسی‌ارشد، دانشکده مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

چکیده

عملیات خاک‌ورزی از جنبه‌های مختلفی چون بهبود کیفیت فیزیکی خاک، حفظ رطوبت، افزایش مواد آلی و کاهش فرسایش اهمیت زیادی دارد و نقشی اساسی در آماده‌سازی بستر مناسب برای رشد بهینه گیاه ایفا می‌کند. در این راستا، طراحی و ساخت روتیواتور چندمنظوره با هدف انجام همزمان عملیات خاک‌ورزی و کاشت، تحولی در افزایش بهره‌وری، کاهش مصرف سوخت، زمان و هزینه تمام‌شده محصول ایجاد می‌کند. این دستگاه با داشتن مکانیزم‌های ترکیبی، قابلیت انجام عملیاتی نظیر خردکردن کلوخ‌ها، تهویه خاک، آماده‌سازی بستر بذر و حفر جوی‌های قابل‌تنظیم را به‌صورت همزمان دارد. ساختار تاشوی دوطرفه و طراحی سازگار با شرایط حمل‌ونقل جاده‌ای نیز از دیگر ویژگی‌های مهم این رتیواتور پیشرفته است. علاوه بر مزایای فنی، استفاده از این دستگاه با فناوری‌های روز، در جهت خودکارسازی عملیات کشاورزی، کاهش تلفات منابع (مانند آب، انرژی و کود) و سازگاری با اصول کشاورزی پایدار گام برمی‌دارد. به‌واسطهٔ نداشتن نمونه مشابه داخلی و قیمت مقرون‌به‌صرفه در مقایسه با نمونه‌های خارجی، این دستگاه می‌تواند سهم مؤثری در توسعه مکانیزاسیون کشاورزی کشور ایفا کند. بدین ترتیب، رتیواتور چندمنظوره به‌عنوان ابزاری کارآمد، هوشمند و اقتصادی، زمینه‌ساز افزایش بهره‌وری، حفظ منابع و دستیابی به اهداف توسعه پایدار در کشاورزی مدرن خواهد بود.

کلمات کلیدی

رتیواتور

عملیات خاک‌ورزی بهینه

بهره‌وری

رشد محصول

مکانیزاسیون

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

[*]نویسنده مسئول

محمدرضا ابراهیمیان

ایمیل

m.ebrahimian@kar.ac.ir

۱- مقدمه

روتیواتور به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تجهیزات خاک‌ورزی با قابلیت تنظیم عمق کار و قدرت خردسازی بالا، نقش مهمی در آماده‌سازی بستر بذر و اختلاط بقایای گیاهی ایفا می‌کند. تیغه‌های مارپیچی نصب‌شده روی روتور، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که به‌صورت تدریجی وارد خاک شوند و ضمن کاهش مصرف انرژی، خاک را به‌صورت یکنواخت خرد کنند. تیغه‌های نوع L و C برای کاربرد در عمق‌های مختلف مناسب‌اند و با طراحی خاص خود، باعث افزایش کیفیت خاک و کاهش فشردگی آن می‌شوند [۱]. در شکل ۱ نمای یک روتیواتور و تیغه‌های L و C آورده شده‌است. در بخش انتقال قدرت، گیربکس‌های چندسرعته، کلاچ‌های اصطکاکی، و سیستم دنده‌ای مهر و موم‌شده برای عملکرد مطمئن در شرایط سخت مزرعه به کار رفته‌اند. این سامانه‌ها ضمن افزایش طول عمر مفید دستگاه، نیاز به تعمیرات مکرر را کاهش می‌دهند و امکان تنظیم سرعت چرخش تیغه‌ها را متناسب با نوع خاک و شرایط مزرعه فراهم می‌کنند [۲]. سیستم‌های کنترلی مانند اسکی‌های تنظیم عمق، درب عقب فنردار برای تنظیم میزان خرد شدن خاک، و سوک‌های جلو جهت اصلاح مسیر چرخ تراکتور، به بهبود عملکرد دستگاه در عملیات مختلف کمک می‌کنند. همچنین، طراحی بدنه دوتکه مقاوم، اتصال سه نقطه‌ای استاندارد، و وجود محافظ‌های ایمنی، باعث افزایش دوام و ایمنی در حین کار شده است [۳]. روتیواتور معرفی‌شده، با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی چون مصرف بهینه سوخت، تنوع در عرض کار، و قابلیت کاربرد در شرایط مختلف، به‌عنوان ابزاری همه‌کاره، کارآمد و سازگار با کشاورزی مدرن شناخته می‌شود. این

How to Cite this Article:

[1] M. R. Ebrahimian, F. Rahmani, and A. Barzegar Shokri, "Design and construction of a multi-purpose agricultural rotator with movable arms," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 27–45, 2026, https://doi.org/10.22034/stme.2025.524280.1131. (in Persian)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

ویژگی‌ها موجب شده تا دستگاه مذکور، ضمن پاسخگویی به نیازهای حرفه‌ای کشاورزان، در راستای اهداف پایداری و بهینه‌سازی عملیات مزرعه، نقش مؤثری ایفا کند [۴].

شکل ۱: نمای یک روتیواتور و تیغه‌های L و C

آرتور کلیفورد هاوارد، در سال ۱۹۱۲، اولین بیل زن دوار برقی را اختراع کرد [۵]. او با استفاده از موتور تراکتور بخار و دیسک‌های چرخشی، روشی نوین برای خاک‌ورزی ابداع کرد که خاک را بدون انباشت و فشردگی شخم می‌زد. این روش نسبت به گاوآهن‌های سنتی، خاکی مناسب‌تر برای کاشت محصولات زراعی تولید می‌کرد. هاوارد دریافت که خاک‌ورزی چرخشی می‌تواند علف‌های هرز و ریشه‌ها را به‌طور مؤثر با خاک مخلوط کند. طرح اولیه او مشکل پرتاب خاک به طرفین را داشت، اما او با طراحی تیغه‌های L شکل که روی فلنچ‌های روتور نصب می‌شدند، این مشکل را برطرف کرد. این نوآوری باعث شد خاک به‌صورت یکنواخت‌تر خرد شود و برای کشاورزی آماده گردد [۶].

در سال ۱۹۲۷، هاوارد مدل‌های متنوعی از جمله بیل‌های چرخشی برای تراکتور فوردسون و ماشین‌های کنترل دستی طراحی کرد و ۱۹۲۷ ماشینی با موتور احتراق داخلی و پنج کولتیواتور چرخشی معرفی کرد که نقطه عطفی در تولید تراکتور در استرالیا بود. هاوارد یک جعبه دنده اسپلیتر را به سیستم افزود و این سیستم قدرت را از موتور به محور عقب و کولتیواتورها منتقل می‌کرد، هر کدام با کلاچ جداگانه. او همچنین تراکتورهای تک‌محوره با موتورهای هوا خنک تولید کرد [۷]. اولین روتاواتور هاوارد برای تراکتور فوردسون طراحی شد و از قرقره تراکتور نیرو می‌گرفت. در سال ۱۹۴۹، مدل سبک‌تر نوع D با تیغه‌های کوچک‌تر و روتور ۲۰ اینچی برای تراکتورهای فرگوسن و فورد "دیربورن" معرفی شد که با بازوهای پیوندی چهار نقطه‌ای به تراکتور متصل می‌شد [۸]. در سال ۱۹۵۰، مدل نوع F با اتصال مستقیم به گیربکس عقب و روتور ۲۳ اینچی عرضه شد که برای تراکتورهای مختلف مناسب بود. در سال ۱۹۵۲، روتاواتورهای دنباله‌دار برای تراکتورهای تا ۴۵ اسب بخار و در سال ۱۹۵۳ مدل‌های قوی‌تر تا ۸۰ اسب بخار معرفی شدند. در سال ۱۹۵۸، سری جدیدی برای تراکتورهای ۱۵ تا ۲۵ اسب بخار با گیربکس تک‌سرعته تولید شد که جایگزین چرخ زنجیر شد. روتاواتورهای مدرن با آماده‌سازی سریع و مؤثر خاک، نقش کلیدی در افزایش بهره‌وری کشاورزی ایفا می‌کنند. این ماشین‌ها خاک را برای کاشت غنی‌تر کرده، ریشه‌های ناخواسته را حذف می‌کنند و ساختار خاک را بهبود می‌بخشند. استفاده از روتاواتور زمان و نیروی کار مورد نیاز برای خاک‌ورزی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و امکان کشت مناطق وسیع را با دقت بالا فراهم می‌کند. تجهیزات مدرن با کاهش هزینه‌های نگهداری و مصرف سوخت، سودآوری را افزایش می‌دهند. همچنین، روتاواتورها با امکاناتی مانند کاشت گیاهان پوششی و مخلوط کردن کود، به کشاورزی پایدار کمک می‌کنند و عملکرد محصول و کیفیت خاک را بهبود می‌بخشند [۹]. روتاواتورهای اولیه به دلیل وزن زیاد و مصرف انرژی بالا، اغلب دچار خرابی‌های مکانیکی می‌شدند. خاک‌ورزی مکرر با این دستگاه‌ها ساختار خاک را تخریب کرده، باعث فشردگی، فرسایش و کاهش مواد آلی می‌شود. این مشکلات می‌توانند به کاهش حاصلخیزی خاک و افزایش رواناب منجر شوند که کیفیت آب‌های سطحی را تهدید می‌کند. خاک‌ورزی بیش‌ازحد همچنین فعالیت میکروبی خاک را مختل کرده و منافذ خاک را مسدود می‌کند، که نفوذ آب را کاهش می‌دهد [۱۰]. این معایب، به‌ویژه در خاک‌های مرطوب، با افزایش هزینه‌های انرژی و نیروی کار، چالش‌های جدی برای کشاورزان ایجاد می‌کنند. تحقیقات نوردیک نشان می‌دهد که فشردگی خاک ناشی از ماشین‌آلات سنگین می‌تواند عملکرد محصول را ۵ تا ۱۵ درصد کاهش دهد. این فشردگی، حجم هوای خاک را کم کرده و نفوذ آب را مختل می‌کند، که به فرسایش و از دست رفتن مواد مغذی منجر می‌شود [۱۱]. بررسی‌ها با استفاده از سی‌تی اسکن نشان داده که آسیب‌های ساختاری خاک حتی پس از ۱۴ سال باقی می‌مانند. تغییرات اقلیمی و افزایش بارندگی، خاک‌های مرطوب را در برابر فشردگی آسیب‌پذیرتر می‌کنند. ماشین‌آلات سنگین با وزن تا ۶۰ تن، این مشکل را تشدید کرده و در لایه‌های عمیق‌تر خاک، کاهش عملکرد می‌تواند دائمی باشد. روتاواتور از اجزایی مانند شفت پروانه، کلاچ لغزشی، گیربکس، درایو جانبی، تیغه‌ها، سپر خاک و چرخ گیج تشکیل شده است. تیغه‌های L شکل از فولاد پر کربن ساخته می‌شوند و برای خاک‌ورزی کم‌عمق ایده‌آل‌اند، در حالی که تیغه‌های C شکل برای خاک‌های سنگین مناسب‌ترند. بدنه دستگاه از فولاد ST37 با استحکام بالا اما مقاومت کم در برابر لرزش ساخته می‌شود. پوسته گیربکس از چدن خاکستری یا فولاد ریخته‌گری برای تحمل تنش‌ها تولید می‌شود. گاردان‌ها از فولاد کم کربن و اسکی‌های سایشی از آهن ST37 ساخته می‌شوند که انعطاف‌پذیر اما مستعد خوردگی هستند [۱۲]. این متریال‌ها دوام و

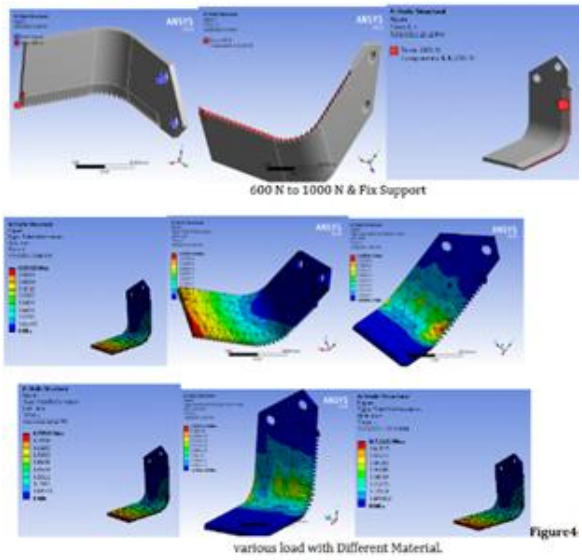
عملکرد دستگاه را تضمین می‌کنند. این مطالعه با هدف شناسایی فرصت‌های جدید در بازار جهانی روتاواتور، ارائه بینش‌هایی در مورد نیازهای مشتری و تحلیل چشم‌انداز رقابتی انجام شده است. این تحقیق به شرکت‌ها کمک می‌کند تا استراتژی‌های مؤثری برای افزایش فروش و سودآوری تدوین کنند. با درک پویایی صنعت و فناوری‌های نوظهور، امکان شناسایی مشتریان هدف و طراحی خدمات مناسب فراهم می‌شود. روتاواتور یک ابزار چندمنظوره برای آماده‌سازی بستر بذر است که با خرد کردن، برش، مخلوط کردن و تسطیح خاک در یک مرحله، بهره‌وری کشاورزی را افزایش می‌دهد. این دستگاه با جلوگیری از بیماری‌های محصول و کنترل آفات، شرایط بهینه خاک را فراهم می‌کند.

از اهداف اصلی طراحی و ساخت دستگاه روتیواتور چندمنظوره خاک‌ورزی بهینه بوده که از ضروریات انجام طراحی و ساخت آن می‌توان به قیمت مقرون‌به‌صرفه آن در داخل کشور و کاربرد آن در تمامی مزارع کشاورزی، کشت و صنعت‌های کشور اشاره نمود. طراحی و ساخت این دستگاه به دلیل دوکاره بودن آن موجب صرفه‌جویی ۵۰ درصدی در مصرف سوخت و زمان همچنین قیمت تمام شده محصول می‌گردد. مطابق نیاز مزارع و کشاورزان اقدام به طراحی و ساخت دستگاهی شده است که علاوه برداشتن عرض کاری بالا دارای مکانیزم‌های مختلف جهت رفع مشکلات حمل‌ونقل در جاده‌ها، ترکیب‌کردن دو دستگاه با درنظرگرفتن توان موردنیاز ورودی و نبود نمونه مشابه در ایران است. بدین ترتیب افزایش بهره‌وری و انجام عملیات خاک‌ورزی بر روی زمین جهت کاشت نشاء در کوتاه‌ترین زمان، ممکن میسر بوده و علاوه بر این هم‌زمان می‌تواند عملیات حفر جوی که اندازه و سایز آن هم نسبت به نوع محصول قابل‌تنظیم است را ممکن می‌نماید. رتیواتورهای دوطرفه تاشو ماشین‌های خاک‌ورزی هستند که خاک را از سطح زیرین به کمک فلنچ چرخان افقی جهت تهیه بستر بذر، تهویه خاک، خردکردن و مخلوط‌کردن ضایعات گیاهی برای کاشت آماده می‌کنند. این دستگاه از مجموعه‌ها و مکانیزم‌هایی طراحی و ساخته شده که به پیشرفت در زمینهٔ بهینه‌سازی، طول عمر، ایمنی اپراتور و هزینه تعمیر و نگهداری کمک شایانی می‌کند. این دستگاه ابزار قدرتمندی است که می‌تواند کارایی و بهره‌وری عملیات کشاورزی را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد. با استفاده از روتیواتور، خاک غنی‌تری خواهیم داشت که منجر به موفقیت بیشتر در رشد محصول می‌گردد.

۲- روش تجربی

این بخش، شامل تحلیل‌های مکانیکی، شبیه‌سازی‌ها و بررسی متریال‌ها برای بهبود عملکرد دستگاه است. برخلاف گاوآهن‌های سنتی که باعث عدم تعادل و فشردگی خاک می‌شوند، روتاواتور با تیغه‌های دوار خود خاک را به‌صورت یکنواخت آماده می‌کند. طراحی تیغه‌ها نقش حیاتی در عملکرد و دوام دستگاه دارد، زیرا این اجزا مستقیماً با خاک درگیر هستند و تحت‌فشار و اصطکاک شدیدی قرار می‌گیرند. خواص فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی خاک، مانند استحکام و محتوای آب، تأثیر مستقیمی بر انرژی موردنیاز برای خاک‌ورزی دارند. این خواص مقاومت خاک را تعیین می‌کنند که روتاواتور باید بر آن غلبه کند. برای مثال، خاک‌های مرطوب یا سنگین نیاز به انرژی بیشتری دارند، درحالی‌که خاک‌های خشک و سبک ممکن است به عملیات کم‌فشارتر نیاز داشته باشند. درک این خواص برای طراحی تیغه‌ها و تنظیمات عملیاتی دستگاه ضروری است تا کارایی و کیفیت خاک‌ورزی بهبود یابد. تیغه‌ها، مهم‌ترین بخش روتاواتور هستند که با خاک تعامل دارند. تیغه‌های L شکل با ضربه به خاک، آن را پودر کرده و به سمت بالا پرتاب می‌کنند که منجر به تسطیح یکنواخت زمین می‌شود. فاصله بین تیغه‌ها و سپر قابل‌تنظیم است و این امکان را فراهم می‌کند که درجه پودر شدن خاک کنترل شود. کاهش این فاصله باعث افزایش پودر شدن می‌شود. روتور معمولاً هم‌جهت با چرخ‌های تراکتور می‌چرخد و هر تیغه بخشی از خاک را برش می‌دهد که به کاهش اوج گشتاور و بهبود تعادل دستگاه کمک می‌کند. نیروهای وارد بر تیغه‌های رتیواتور شامل انواع بارهای ۱) بار عملیاتی: نیروی وارد بر تیغه در اثر برخورد با خاک است که بسته به نوع خاک، میزان سختی، زاویه شیب، و سرعت حرکت متفاوت است. ۲) نیروهای جانبی و خمشی: در اثر فشار خاک و مقاومت آن، ممکن است نیروهای برشی و خمشی بر تیغه وارد شوند. ۳) نیروهای دینامیک: حرکت سریع و ضربه‌های ناگهانی ممکن است بار دینامیکی ایجاد کند. شرایط مرزی و نحوه اعمال نیروها بر اساس نوع خاک و انتهای تیغه است. سطح تماس تیغه با خاک که دارای شرایط اصطکاکی است، در تحلیل دینامیکی خاک به‌صورت رفتار غیرخطی و مقاومتی عمل می‌کند که باید به‌صورت تابعی از نیروهای برشی و فشاری تعریف شود درصورتی‌که انتهای تیغه آزاد است که در توزیع نیروها و تغییر شکل‌ها تأثیر می‌گذارند. اعمال نیروهای برشی و فشاری بر اساس تماس تیغه با خاک و مقاومت خاک هستند و بر اساس آزمایش‌های خاک تعیین می‌شوند.

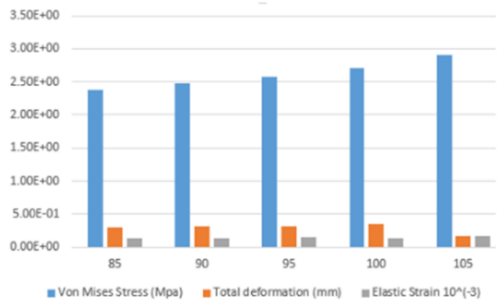
شکل ۲ نشان دهنده تغییرات تنش فون میزس، تغییر شکل کل و کرنش الاستیک با زاویای تیغه می باشد که مشخص می نماید، افزایش زاویه تیغه منجر به افزایش مقادیر تنش فون-میسز، تغییر شکل و کرنش می‌گردد. شکل ۲ به مقایسه انالیز های شبیه سازی سه نقطه دستگاه میباشد و طبق انالیز انجام شده، نتایج نشان می دهد، مقادیر تغییرشکل کرنش درنقاطی که با استراکچرها پوشش داده شده اند مقاومت بیشتری دربرابر تنش و کرنش دارند. به دلیل اتصال تراکتور به سه نقطه جهت کشیدن دستگاه و انجام عملیات کشاورزی این نقاط تحت تنش قرار می گیرند که در نرم افزارانسیس سه نقطه اتصال بدون استفاده از استراکچر ها و با استراکچر ها تحلیل شده و نیروی کششی اعمال شده و تغییر شکل کرنش در قسمت بازوهای بغل و پایین نمایش داده می شود.



شکل ۲: آنالیز تیغه در نرم افزار انسیس

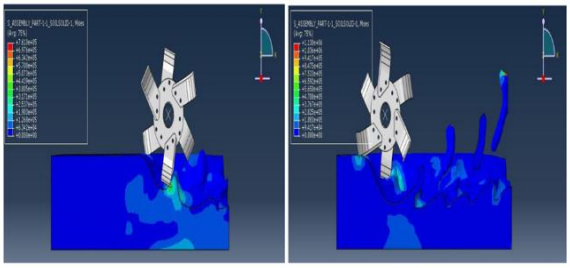
چدن خاکستری در مقابل فولاد سازه‌ای برای انتخاب ماده مناسب تیغه‌ها، چدن خاکستری و فولاد سازه‌ای موردبررسی قرار گرفتند. چدن خاکستری با تنش مجاز ۱۰۵ مگاپاسکال و فولاد سازه‌ای با ۱۴۰ مگاپاسکال تحلیل شدند. با اعمال بارهای ۶۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن، تنش‌های تولیدی در هر دو ماده (به ترتیب ۴۲/۸۳۲ و ۷۴/۲۸۳ مگاپاسکال برای چدن خاکستری؛ ۴۲/۵۰۵ و ۷۳/۲۳۴ مگاپاسکال برای فولاد سازه‌ای) در محدوده مجاز بودند که نشان‌دهنده ایمنی طراحی است. این تحلیل در نرم‌افزار انسیس انجام شد و نتایج نشان داد که هر دو ماده برای شرایط کاری مناسب هستند.

تحلیل تغییر شکل تیغه‌ها نشان داد که چدن خاکستری با بار ۱۰۰۰ نیوتن تغییر شکل ۱/۴۳۲۴ میلی‌متری و فولاد سازه‌ای تغییر شکل ۰/۷۹۵۹۲ میلی‌متری دارد. این تفاوت به دلیل سفتی بالاتر فولاد سازه‌ای است. چدن خاکستری، اگرچه ارزان‌تر است، تغییر شکل بیشتری نشان می‌دهد، درحالی‌که فولاد سازه‌ای با کارایی بالاتر، ماده‌ای مناسب‌تر برای کاربردهای سنگین است. این نتایج بر اهمیت انتخاب ماده بر اساس نیازهای عملیاتی تأکید دارد. برای بهبود عملکرد، تیغه‌های L شکل با دندانه‌های اره‌ای اصلاح شدند. تحلیل المان محدود (FEA) نشان داد که این طراحی جدید ایمن است و تنش‌ها در محدوده مجاز باقی می‌مانند. تغییر در هندسه تیغه، مانند افزودن دندانه‌ها، بر سفتی و تغییر شکل تأثیر گذاشت. این اصلاح به افزایش کارایی برش و کاهش انرژی موردنیاز کمک کرد که برای بهینه‌سازی عملکرد روتاواتور حیاتی است. تحلیل استاتیکی با تغییر زاویه تیغه‌ها (۸۵، ۹۰، ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درجه) انجام شد. نتایج نشان داد که زاویه تیغه بر تنش و تغییر شکل تأثیر دارد. زاویه بهینه (۹۵ درجه در طراحی موجود) تعادل مناسبی بین کارایی برش و مقاومت ساختاری فراهم کرد. این تحلیل‌ها در نرم‌افزار انسیس انجام شد که نتایج در شکل ۳ آورده شده است.



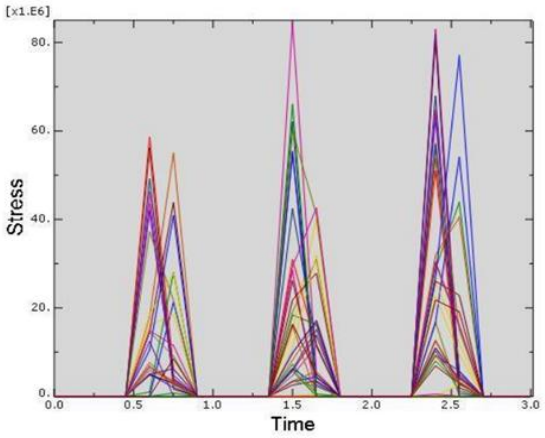
شکل ۳: نمودار تحلیل استاتیکی زوایای تیغه

شکل ۴ شبیه‌سازی تیغه دوار در حال برش از میان یک مدل خاک تکمیل شده است. شبیه‌سازی دینامیک برش خاک شبیه‌سازی برش خاک در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۴ انجام شد تا رفتار تیغه‌ها در تعامل با خاک بررسی شود. این شبیه‌سازی نشان داد که تیغه‌های C شکل با زاویه برش مناسب، اصطکاک کمتری ایجاد کرده و گشتاور معکوس کمتری به تراکتور وارد می‌کنند. این تحلیل به بهینه‌سازی طراحی تیغه‌ها و کاهش مصرف انرژی کمک کرد، که برای افزایش عمر مفید دستگاه ضروری است.



شکل ۴: شبیه‌ساز دینامیک برش خاک در نرم افزار اباکوس

یک نمودار XY روی سطح تیغه ایجاد شد. این امر امکان استخراج نمودار تاریخچه زمانی تنش تماسی در لبه تیغه را با تمرکز تحلیل بر روی سطح برش فراهم می آورد. این رویکرد به درک رفتار تنش در جایی که تیغه با خاک در تعامل است کمک می‌کند. نمودارهای شکل ۵ کانتور توزیع یک متغیر واحد (مانند تغییر شکل) را در یک سطح یا حجم نشان می‌دهند، نمودار XY برای نمایش رابطه بین دو متغیر استفاده شده است و در این شکل ۵ از آنها برای رسم نمودار تنش تماسی در برابر زمان روی لبه برش تیغه استفاده گردیده است.



شکل ۵: تنش تماسی ایجادشده دریک صفحه نوک‌تیز

سیستم سه‌نقطه اتصال، نیروی تراکتور را از شفت PTO به روتور منتقل می‌کند. این سیستم مانند پلی بین تراکتور و روتاواتور عمل می‌کند و امکان استفاده از نیروی تراکتور یا موتور مستقل را فراهم می‌کند. اجزای این سیستم با دستگاه برش لیزری ساخته می‌شوند که دقت بالایی در برش فلزات مانند فولاد و آلومینیوم ارائه می‌دهد. این روش تولید، کیفیت و دوام اجزا را تضمین می‌کند. انتقال قدرت در روتاواتور از طریق سیستم زنجیری یا چرخدنده‌ای انجام می‌شود. چرخدنده‌ها در حمام روغن‌کاری می‌کنند و با آب‌بندی فلزی، مقاومت بالایی در برابر نشت و آلودگی دارند. طراحی دندانه‌های چرخدنده‌ها گرما و سایش را کاهش می‌دهد و نیاز به سیستم خنک‌کننده را حذف می‌کند. این سیستم با دقت توسط دستگاه‌های برش لیزری تولید می‌شود تا فلنج‌ها و پوشش‌ها باکیفیت بالا ساخته شوند. عملکرد روتاواتور تحت‌تأثیر عواملی مانند پیکربندی تیغه، جهت چرخش، عمق خاک‌ورزی، نسبت سرعت محیطی به‌سرعت جلو و وضعیت خاک قرار دارد. افزایش عمق خاک‌ورزی معمولاً انرژی بیشتری نیاز دارد، اما رابطه خطی بین این دو عامل در شرایط خاک مشابه مشاهده شد. جهت چرخش روتور نیز بر تقاضای توان و کیفیت کار تأثیر می‌گذارد که برای طراحی بهینه دستگاه حیاتی است. روتاواتور مجهز به بلبرینگ‌های دوردیف ساچمه‌ای با جنس فولاد کروم‌دار (AISI 52100) است. این بلبرینگ‌ها بارهای شعاعی و محوری را تحمل کرده و از انحراف شفت جلوگیری می‌کنند. مقاومت بالای این بلبرینگ‌ها در برابر سایش و خوردگی، انعطاف‌پذیری در برابر ضربات و دوام طولانی‌مدت را تضمین می‌کند که برای عملکرد پایدار دستگاه ضروری است. برای کاهش هزینه‌های تولید، از قطعات استاندارد مانند توپی‌های چدنی و بدنه‌های مشابه دستگاه‌های دیگر استفاده شد. این رویکرد نیاز به طراحی قالب‌های جدید برای ریخته‌گری، خم‌کاری ورق‌ها و فیکسچرهای جوشکاری را به حداقل رساند. استفاده از قطعات مشترک نه‌تنها هزینه‌ها را کاهش داد، بلکه زمان تولید را نیز کوتاه کرد. برای کاهش ضایعات، از ورق‌هایی باضخامت و ابعاد مشابه دستگاه‌های دیگر استفاده شد. چیدمان برش ورق‌ها به‌گونه‌ای طراحی شد که حداکثر استفاده از مواد انجام شود و ضایعات به حداقل برسد. این روش، بهره‌وری مواد را افزایش داد و هزینه‌های تولید را کاهش داد که برای رقابت در بازار جهانی حیاتی است. برای افزایش دوام، بخش‌های تحت تنش‌های استاتیکی و خمشی، مانند توپی‌های وسط، دوبله شدند. استفاده از توپی‌های واسکازینی به‌جای گریس، روغن‌کاری دقیق‌تری فراهم کرد. همچنین، پکینگ‌های دوطرفه ترک به‌جای پکینگ‌های پلی‌یورتان در جک‌های هیدرولیک استفاده شدند تا عملکرد آب‌بندی و روغن‌کاری بهبود یابد. این تغییرات کیفیت و قابلیت اطمینان دستگاه را افزایش داد. افزایش قطر شفت گیربکس مرکزی از ۳۵ به ۴۵ میلی‌متر، توانایی تحمل وزن و دور روتاواتور را بهبود بخشید و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش داد. استفاده از مواد بادوام و طراحی‌های بهینه‌شده، مانند بلبرینگ‌های مقاوم و پکینگ‌های پیشرفته، نیاز به تعمیرات مکرر را به حداقل رساند و عمر مفید دستگاه را افزایش داد. شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای CAD مانند SolidWorks و تحلیل در انسیس و آباکوس انجام شد. این ابزارها امکان آزمایش مجازی مدل‌ها در شرایط واقعی را فراهم کردند. در تحلیل مکانیکی تیغه‌ها و اجزای انتقال قدرت بارهای ضربه‌ای و غیرمستمر مانند بارهای ناگهانی و شدید که ممکن

است در اثر برخورد، ضربه یا شروع و توقف ناگهانی سیستم رخ دهند و بارهای سینوسی یا سیکلی مانند بارهای تکراری و نوسانی که بیشتر بر اثر چرخش یا فعالیت‌های تکراری دیگر ایجاد می‌شوند و همچنین بارهای دینامیکی ناشی از نیروهای قابل‌حذف مانند بارهای ناشی از ارتعاش یا امواج صوتی که بر اثر فعالیت دستگاه‌ها ایجاد می‌گردد و در نهایت بارهای اصطکاکی و احتمالی اثرات حرارتی زیرا تغییر دما می‌تواند باعث تغییر در خواص مواد و در نتیجه تأثیر بر حالت استاتیکی و دینامیکی قطعات شود، در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های استاتیکی، خستگی و دینامیکی نشان داد که طراحی تیغه‌ها و شفت‌ها ایمن است. شبیه‌سازی‌ها با کاهش نیاز به نمونه‌های اولیه فیزیکی، هزینه‌ها و زمان توسعه را کاهش دادند. تحلیل خستگی بر اساس حوادث یا شکاف‌های اولیه برای پیش‌بینی احتمال شکست ناشی از ترک‌خوردگی‌های اولیه یا خلل‌های موجود صورت پذیرفته است. در مورد تطابق نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار Ansys با داده‌های تجربی تا حد قابل‌قبولی تطابق وجود دارد؛ اما هر چه مدل‌های المان، مواد، و بارگذاری‌ها دقیق‌تر باشد، تطابق بهتری حاصل می‌شود همچنین پارامترهای مواد و شرایط محیطی مانند خواص مواد در دماهای بالا، اثرات ساییدگی و دیگر عوامل واقعی و احتمال خطاهای مدل‌سازی در مورد تماس، لقی‌ها، و مرزهای اتصال وجود دارد. انتخاب متریال بر عملکرد، زیبایی، دوام و هزینه دستگاه تأثیر دارد. موادی مانند چدن نشکن برای گیربکس، فولاد کروم‌دار برای بلبرینگ‌ها و فولاد ST57 برای شاسی انتخاب شدند. این مواد مقاومت بالایی در برابر سایش، خوردگی و ضربات دارند. تحلیل خواص مکانیکی و شیمیایی، همراه با بررسی فرایندهای تولید و هزینه‌ها، به انتخاب موادی منجر شد که تعادل بهینه‌ای بین کیفیت و مقرون‌به‌صرفه بودن ارائه می‌دهند.

در انتخاب مواد از معیارهای مکانیکی زیر استفاده گردید:

۱. استحکام کششی و خمشی: زیرا مواد باید بتوانند بارهای وارد شده را تحمل کنند و بدون شکست یا تغییر شکل دائمی باشند.

۲. مقاومت به ضربه و خمش: به این دلیل که در چدن نشکن، مقاومت بالا به ضربه اهمیت دارد تا در برابر فشارهای ناگهانی مقاومت کند.

۳. مقاومت سایشی: چون در بلبرینگ‌ها نیاز است که ماده مقاومت خوبی در برابر سایش داشته باشد تا از کاهش عمر قطعه جلوگیری کند.

همچنین شرایط محیطی مانند دما و رطوبت و قرارگرفتن در معرض منابع خارجی در نظر گرفته شده است.

۳- فرایند طراحی و تولید

این بخش به تشریح فرایند طراحی، ساخت و نتیجه‌گیری مرتبط با روتاواتور، یک ماشین خاک‌ورزی پیشرفته، می‌پردازد و با تمرکز بر نیازسنجی بازار، شبیه‌سازی، تولید و مشخصات فنی محصول، چگونگی تبدیل ایده به یک محصول نهایی را بررسی می‌کند. هدف اصلی، ارائه دستگاهی با عملکرد بهینه، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کشاورزی است. این مطالعه باتوجه‌به شرایط اقلیمی، نوع محصول و توان تراکتور، راهکارهایی برای بهبود طراحی و تولید ارائه می‌دهد. نیازسنجی، فرایند کلیدی در طراحی روتاواتور، شامل شناسایی نیازهای مشتریان و بازار هدف است. با انجام مطالعات آماری در مناطق مختلف، عواملی مانند اقلیم، نوع خاک، آب‌وهوا و محصولات زراعی بررسی شدند. این تحقیقات به انتخاب طرحی متناسب با نیازهای کشاورزان و شرایط محلی کمک کرد. شناخت دقیق مشتری نهایی، نقش اساسی در موفقیت محصول دارد و طراحی روتاواتور را به سمتی هدایت کرد که بهره‌وری و سهولت استفاده را به حداکثر برساند. در شبیه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه سوخت مطابق نیاز مزارع و کشاورزان رفتار شده است و در مقایسه با نمونه داخلی دو عملیات را به طور هم‌زمان انجام داده می‌شود: ۱) خاک را از سطح زیرین به کمک فلنچ چرخان افقی جهت تهیه بستر بذر، تهویه خاک، خردکردن و مخلوط‌کردن ضایعات گیاهی برای کاشت آماده می‌کنند ۲) عملیات حفر جوی که اندازه و سایز آن هم نسبت به نوع محصول قابل‌تنظیم است را هم‌زمان با عملیات خاک‌ورزی انجام می‌دهد. به دلیل عرض کاری بالا موجب می‌شود که در هر پاس، سطح بیشتری از خاک زمین به خاک‌ورزی اختصاص یابد که در نتیجه فرایند کاشت، شخم‌زنی و سایر عملیات زراعی را با بهره‌وری بیشتر و زمان‌بندی مناسب‌تر انجام می‌دهد. این قابلیت نه‌تنها به کاهش تعداد پاس‌ها و صرفه‌جویی در زمان و هزینه کمک می‌کند، بلکه منجر به اصلاح و بهبود کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری زراعی می‌گردد. طراحی محصول یک فرایند پیوسته است که از ایده‌پردازی تا تولید نهایی را شامل می‌شود. این فرایند با شناسایی مشکلات و نیازهای بازار آغاز شده و با اصلاح و ارتقای ویژگی‌های محصول ادامه می‌یابد. طراحی روتاواتور شامل سه مرحله اصلی است: ۱) طراحی مقدماتی برای تعیین ویژگی‌های اولیه، ۲) طراحی تکمیلی برای رفع مسائل فنی و بهبود مشخصات، و ۳) آنالیز

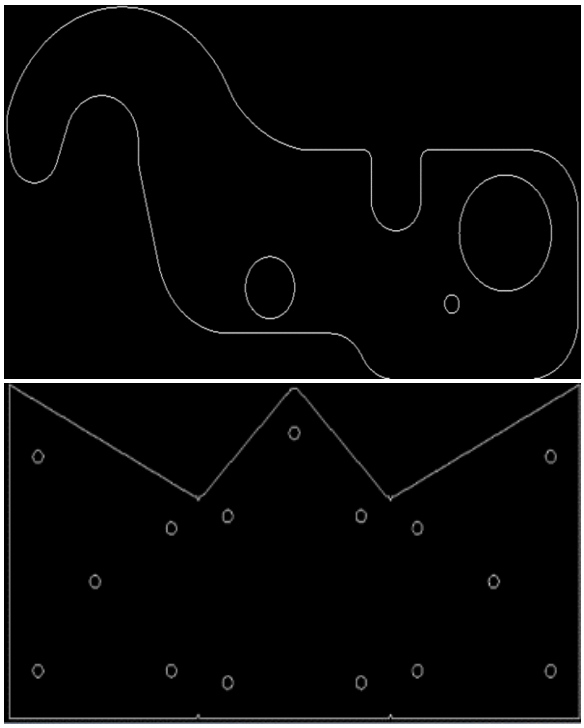
محصول برای بررسی مقاومت‌ها و عملکرد. این مراحل تضمین می‌کنند که محصول نهایی با استانداردهای کیفی و عملکردی مطابقت داشته باشد. در مرحله طراحی مقدماتی، باتوجه‌به نیازهای شناسایی‌شده، محاسبات اولیه برای عملکرد دستگاه انجام شد. یک مدل ساده طراحی شد که با شرایط واقعی، مانند توان تراکتور و نوع خاک، سازگار باشد. هدف این مرحله، بررسی نقاط قوت و ضعف طرح و ارزیابی عملکرد اولیه بود. این فرایند به شناسایی چالش‌های احتمالی و ارائه راهکارهای اولیه برای بهبود طراحی کمک کرد. طراحی تکمیلی بر رفع مسائل فنی و مهندسی تمرکز داشت. در این مرحله، مشخصات فنی مانند سرعت، دقت، بازده و مکانیزم‌های دستگاه بررسی و بهینه شدند. جنس قطعات، نحوه ساخت، مونتاژ، زیبایی ظاهری و تطابق با استانداردهای زیست‌محیطی نیز ارزیابی شدند. این مرحله تضمین کرد که روتاواتور از نظر عملکرد و دوام با نیازهای بازار همخوانی داشته باشد. آنالیز محصول با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند انسیس انجام شد تا مقاومت‌های کششی، استاتیکی، خمشی و کرنش بررسی شوند. این تحلیل‌ها نقاط ضعف ساختاری را شناسایی کرده و ایمنی و ضریب اطمینان دستگاه را تأیید کردند. نتایج این مرحله به اصلاح طراحی و تولید نمونه اولیه بدون نقص کمک کرد. در نرم‌افزار شبیه‌سازی اولیه در نرم‌افزارهای CAD مانند SolidWorks و Catia انجام شد. قطعات به‌صورت جداگانه طراحی و سپس در محیط مونتاژ ترکیب شدند. عملکرد مکانیزم‌ها، مانند گیربکس و دنده‌ها، بررسی شد تا از مشکلات احتمالی جلوگیری شود. تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی در نرم‌افزار انسیس، ایمنی و کارایی دستگاه را تأیید کرد و نمونه اولیه با حداقل خطا تولید شد. تهیه نقشه‌های فنی با تلرانس‌های دقیق و مشخصات متریال، مرحله‌ای حیاتی در تولید بود. نقشه‌های انفجاری برای مونتاژ و شناسایی قطعات استفاده شدند. انتخاب متریال بر اساس خواص مکانیکی، هزینه، دردسترس‌بودن و پایداری انجام شد. موادی مانند چدن نشکن، فولاد کروم‌دار و فولاد ST57 به دلیل مقاومت و دوام انتخاب شدند تا عملکرد و طول عمر دستگاه تضمین شود. معیارهایی مانند استحکام، مقاومت در برابر خوردگی، وزن و پایداری زیست‌محیطی در نظر گرفته شدند. موادی که انرژی کمتری برای تولید یا بازیافت نیاز دارند، اولویت داشتند. این انتخاب‌ها نه‌تنها کارایی دستگاه را بهبود بخشیدند، بلکه هزینه‌های تولید و نگهداری را کاهش دادند. برای برش دقیق قطعات، نقشه‌ها به فرمت DXF تبدیل شدند تا در دستگاه‌های برش لیزری CNC استفاده شوند. این فناوری دقت و کیفیت برش را افزایش داده و زمان تولید را کاهش داد. دستگاه‌های CNC توانایی برش انواع فلزات، از جمله فولاد و آلومینیوم، را با تلرانس‌های دقیق فراهم کردند که برای ساخت اجزای پیچیده روتاواتور ضروری بود.

برش لیزری CNC با دقت بالا (۰/۰۲ میلی‌متر) می‌تواند دقت ابعادی قطعات را بسیار بهبود بخشد. دقت در فرایند ساخت منجر به کاهش ساییدگی و استرس‌های مکانیکی اضافی می‌شود و بهبود کیفیت نهایی و کاهش ضایعات قطعاتی با دقت بالا، کارایی بیشتری دارند و نیاز به اصلاحات و دوباره‌کاری کم‌تر است. داده‌های کمی عبارت‌اند از:

۱. دقت ابعادی: در برش لیزری CNC، دقت ابعادی معمولاً در حدود ۰.۰۲ میلی‌متر است.

۲. کاهش ضایعات: استفاده از این روش‌ها منجر به کاهش ضایعات تولیدی تا ۲۰-۳۰ درصد می‌شود.

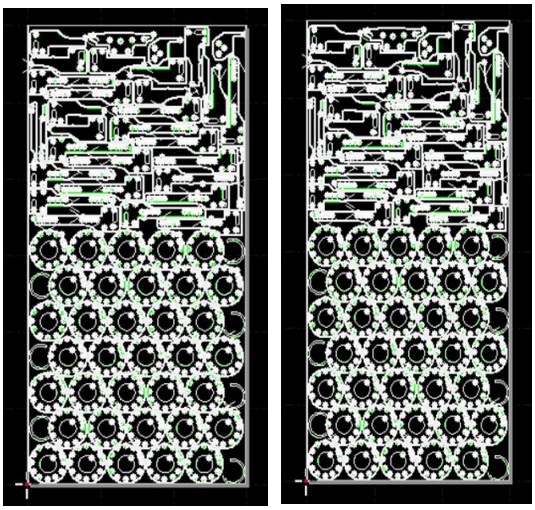
۳. زمان‌برش: افزایش سرعت عملیات به‌عنوان یکی دیگر از مزایای قابل‌اندازه‌گیری، با کاهش زمان تولید قطعات نسبت به روش‌های دستی یا سنتی است.



شکل ۶: قطعه طراحی‌شده و تبدیل‌شده به فرمت

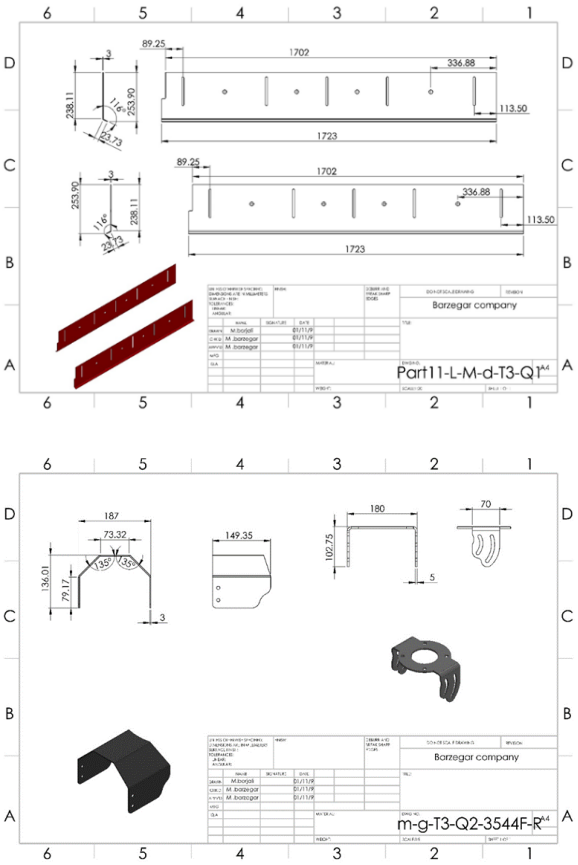
چیدمان بهینه قطعات در نرم‌افزارهایی مانند سیپکات انجام شد تا مصرف ورق به حداقل برسد و ضایعات کاهش یابد. فاصله مناسب بین قطعات از کاهش کیفیت برش ناشی از حرارت جلوگیری کرد. این نرم‌افزار با افزایش سرعت و دقت برش، بهره‌وری تولید را بهبود بخشید

و هزینه‌ها را کاهش داد. خم‌کاری با دستگاه‌های پرس برک CNC انجام شد که امکان خم‌کردن ورق‌های فلزی با زوایای دقیق را فراهم کرد. تنظیم فشار پانچ و سمبه بر اساس ضخامت و نوع فلز، کیفیت خم‌کاری را تضمین کرد. این فرایند برای تولید اجزای ساختاری مانند شاسی و پلیت‌ها حیاتی بود.



شکل ۷: قطعات چیدمان‌شده در نرم‌افزار برش لیزر

جوش‌کاری با دستگاه CO_2 برای اتصال دائمی قطعاتی که نیاز به جداسازی نداشتند استفاده شد. این روش با نفوذ بالا و سطح جوش تمیز، اتصالات قوی و مقرون‌به‌صرفه‌ای ایجاد کرد. جوش‌کاری به‌عنوان روشی اقتصادی، دوام و استحکام اجزای دستگاه را تضمین کرد. ماشین‌کاری، شامل تراش‌کاری، فرزکاری و سوراخ‌کاری، برای شکل‌دهی دقیق قطعات انجام شد. این فرایند، اگرچه پرهزینه، برای تولید قطعاتی با هندسه پیچیده ضروری بود. نقشه‌های تراش‌کاری دقت بالایی در تولید اجزا فراهم کردند و کیفیت نهایی را بهبود بخشیدند. رنگ‌آمیزی با روش الکترواستاتیک (رنگ کوره‌ای) انجام شد تا از زنگ‌زدگی جلوگیری کرده و ظاهر دستگاه بهبود یابد. این روش با پاشش پودر رنگ و پیوند شیمیایی، پوشش مقاومی ایجاد کرد که دوام دستگاه را در شرایط محیطی سخت افزایش داد. مونتاژ شامل نصب قطعات، جای‌گذاری بلبرینگ‌ها، کاسه‌نمدها و آب‌بندی اجزا بود. این فرایند با دقت بالا انجام شد تا عملکرد مکانیکی و هیدرولیکی دستگاه تضمین شود. مونتاژ صنعتی با افزایش بهره‌وری و کاهش خطاها، محصول نهایی را آماده تست کرد.



شکل ۸: نمونه نقشه خم‌کاری اجزای دستگاه

تست نهایی شامل بررسی بخش‌های هیدرولیک، برقی و مکانیکی و عملکرد دستگاه روی تراکتور بود. کنترل کیفیت با نمونه‌گیری و تحلیل آماری، صحت و دقت محصول را تأیید کرد. این مرحله ایمنی، کارایی و انطباق با استانداردها را تضمین کرد و هزینه‌های احتمالی ناشی از نقص را کاهش داد. روتاواتور با عرض کاری ۳/۵۰ متر، ابعاد ۳۹۲۲×۱۸۲۰×۱۳۷۰ میلی‌متر و عرض حمل‌ونقل ۲۳۷۰ میلی‌متر طراحی شد. این دستگاه با سه‌نقطه اتصال استاندارد، گیربکس مرکزی (۱۴۵۰ نیوتن) و دو گیربکس کناری (۲۱۵۰ نیوتن) مجهز شده است. تیغه‌های ۶تایی با پلیت‌های ۱۲ میلی‌متری، جک‌های هیدرولیک و مکانیزم دنده‌ای، عملکرد و دوام دستگاه را بهبود بخشیدند. تاشو بودن و ایمنی روتاواتور تاشو با جک‌های هیدرولیک و قفل‌کن‌های ایمنی طراحی شد تا عرض آن از ۴ به ۲ متر کاهش یابد که حمل‌ونقل را آسان‌تر کرد.

در زمینه سازگاری اقلیمی در شرایط متفاوت اصلاحاتی مانند سخت‌کاری دنده‌ها با عملیات حرارتی که برای گرم‌کردن و خنک‌کردن یک ماده فلزی در دمای مناسب برای ایجاد ریزساختار و خواص مکانیکی مانند سختی و چقرمگی صورت می‌گیرد بررسی دنده‌ها از

جنس سمانته با سختی hrc۵۴ صورت‌گرفته و همچنین استفاده از کاسه‌نمد سه لبه برای پایداری در برابر آب‌بندی روغن در دمای بالا و ضدآب بودن آن استفاده شده است.

شکل ۹: بازوهای قفل‌کن هیدرولیک

مکانیزم تاشو بال‌ها به کمک جک‌های هیدرولیک که توان و قدرت آنها محاسبه شده و نقشه فنی برای ساخت آن تهیه شده انجام می‌گیرد تا عملیات تاشو و باز کردن مجدد، ساده و سریع انجام شود و در حمل‌ونقل شاسی‌های طرفین را به سمت بالا تا کند و به دلیل عرض کار بالا دستگاه ترافیکی نباشد.

قفل‌کن‌های سر جک امکان شناور بودن بال‌های جانبی را فراهم کردند که در زمین‌های ناهموار فشار روی اجزا را کاهش داد و عمر دستگاه را افزایش داد. قفل‌کن‌های هیدرولیک در بالای سه‌نقطه به کمک بازوها جهت ایمنی در حمل‌ونقل عمل می‌کنند که بازهم جک موردنیاز با قدرت و توان لازم محاسبه می‌شود که بتواند وزن شاسی را تحمل کرده و هم در صورت پارگی شلنگ هیدرولیک از باز شدن کنترل نشده شاسی جلوگیری نماید. ویژگی‌های پیشرفته و مجموعه فاروئراین دستگاه با مجموعه فاروئر (عمق شیار ۱۷۰ میلی‌متر، عرض ۴۰۰ میلی‌متر) امکان خاک‌ورزی و جوی‌سازی هم‌زمان را فراهم می‌کند. تیغه‌های C شکل با زاویه بهینه، فنرهای خردکن و دیسک‌های جانبی کارایی و دقت را افزایش دادند. در طراحی تیغه‌های رتیواتور، اغلب از استانداردهای مهندسی کشاورزی و مکانیک خاک بهره گرفته شد و داده‌های تجربی (آزمایشگاهی یا میدانی) یا نتایج شبیه‌سازی‌ها بر اساس مدل‌های خاک و مقاومت برشی خاک استفاده گردید و همچنین فرضیات بر اساس تجربیات سابق و مقالات معتبر در طراحی تیغه‌های رتیواتور بنا نهاده شد.

تیغه‌های C شکل یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مهندسی در تجهیزات خاک‌ورزی است که تأثیر قابل‌توجهی بر فرایند کارکرد و بازدهی دستگاه دارد. جزئیات مربوط به زاویه برش، عمق نفوذ، و هندسه دندانه‌های این تیغه‌ها و همچنین تأثیرات آن‌ها بر کاهش اصطکاک و افزایش بهره‌وری خاک‌ورزی در نظر گرفته شده است.

زاویه برش در تیغه‌های C شکل معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ درجه تنظیم می‌شود. این زاویه نقش مهمی در کاهش مقاومت برشی و اصطکاک دارد. زاویه‌های کوچک‌تر منجر به کاهش اصطکاک سطح تماس و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شوند، درحالی‌که زاویه‌های بزرگ‌تر می‌توانند برش مؤثرتر و راحت‌تری در خاک ایجاد کنند. عمق نفوذ تیغه با تنظیم ارتفاع و مقاومت خاک تعیین می‌شود، و معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر است. عمق مناسب باعث می‌شود خاک به‌اندازه کافی درگیر برش شود و فرایند خاک‌ورزی بهینه انجام گیرد. نفوذ عمیق‌تر ممکن است مقاومت بیشتری ایجاد کند تا عملیات مؤثرتر انجام شود. هندسه دندانه‌ها به‌صورت لبه برش تیز است تا برش خاک آسان‌تر صورت گیرد، سطح داخلی دندانه‌ها کم اصطکاک است و از جمع‌شدن خاک جلوگیری می‌نماید. زاویه برش مناسب و هندسه دندانه‌ها، کاهش اصطکاک اولیه و سطح تماس با خاک را به همراه دارد که منجر به کاهش مصرف انرژی و استهلاک تجهیزات می‌شود. عمق نفوذ بهینه و هندسه مناسب باعث می‌شود که خاک به‌راحتی برش بخورد و مقاومت کلی کاهش یابد که این امر بهره‌وری را افزایش می‌دهد. تیغه‌های C شکل موجب می‌شوند عملیات به طور یکنواخت‌تر و با کمترین نیروی لازم انجام گردد و در نتیجه بهره‌وری افزایش یافته و زمان عملیات کوتاه‌تر می‌شود. هندسه دندانه‌ها و زاویه برش از تجمع خاک و انسداد در تیغه جلوگیری می‌کند و این امر عمر مفید تیغه‌ها را افزایش داده و نگهداری را آسان‌تر خواهد کرد.

گاردان ۴ لنت، توپی‌های واسکازینی و بلبرینگ‌های دوردیف هزینه‌های نگهداری را کاهش داده و ایمنی اپراتور را با گاردهای محافظ تضمین کردند.

در خصوص ارزیابی عملکرد روتیواتور، یک نمونه از تیغه دستگاه جهت آنالیز مواد و تعیین سختی به آزمایشگاه متالورژی ارسال و میزان فرسایش تیغه‌ها پس از ۸۰ هکتار کارکرد تست و درصد وزنی آن اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ بیان گردیده است. هر قطعه زمین یک نمونه خاک در عمق خاک‌ورزی برداشته شده و جهت تعیین رطوبت و بافت به آزمایشگاه خاک‌شناسی ارسال گردید.

جدول ۱: میزان فرسایش تیغه های روتیواتور پس از ۸۰ هکتار کارکرد در مزرعه

شماره قطعه	وزن اولیه (gr)	وزن ثانویه (gr)	مقدار کاهش وزن (gr)	کاهش وزن (٪)
۱	۶۸۴	۶۷۳	۱۱	۱/۶۱
۲	۶۷۳	۶۶۴	۹	۱/۳۴
۳	۶۷۲	۶۶۳	۹	۱/۳۴
۴	۶۸۱	۶۷۴	۷	۱/۰۳
۵	۶۸۶	۶۷۶	۱۰	۱/۴۶
۶	۶۷۰	۶۶۰	۱۰	۱/۴۹
۷	۶۷۸	۶۶۹	۹	۱/۳۳
۸	۶۷۱	۶۶۲	۹	۱/۳۴
درصد میانگین کاهش وزن				۱/۳۷

میزان خردشدن خاک در ارزیابی کیفیت کار و عملکرد این ادوات یکی از مهم‌ترین عواملی که موردبررسی قرار می‌گیرد، جهت کاهش میانگین قطر دانه‌بندی خاک از هشت الک با چشمه‌های مربع‌شکل به اضلاع ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر استفاده شد. قبل و بعد از اجرای عملیات ماشینی بر روی خاک مزرعه با قاب‌های مخصوص ۱۰۰×۱۰۰ سانتی‌متر مربع نمونه‌برداری انجام گرفت. خاک برداشت شده از مجموعه الک‌های ذکر شده عبور داده شد. با استفاده از رابطه زیر میانگین قطر دانه‌بندی خاک محاسبه گردید و اجزاء سه‌نقطه اتصال اندازه‌گیری و با اندازه‌های توصیه شده در استاندارد ملی ۹۱۹۲ مقایسه شد که در جدول ۲ آورده شده است.

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} \overline{x_i}\, w \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱) داریم:

$$w = \frac{w_i}{w_t} \qquad (۲)$$

که در روابط فوق $\overline{x_i}$ میانگین قطر خاکدانه‌های باقیمانده بر روی هر الک، n تعداد الک‌ها و w نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاک به کار برده شده در ابتدای آزمایش می‌باشد. نتایج دانه‌بندی خاک در سه وضعیت قرارگیری درپوش عقب روتیواتور در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات سه نقطه اتصال تیپ ۲ دستگاه روتیواتور ۷۲ تیغه هیدرولیک جک دار دوطرفه و تطبیق آن با استاندارد شماره ۹۱۹۲

ویژگی‌های ابعادی	کمینه (mm)	بیشینه (mm)	اندازه‌گیری‌شده (mm)
قطر سوراخ اتصال پین	۲۵/۳۷	۲۵/۵	۲۵/۴
عرض بین وجوه داخلی یوغ بالا	۵۲	-	۵۴
قطر پین اتصال پایین	۲۷/۸	۲۸	۲۷/۹
عرض قلاب	۶۵	۶۷	۶۶
فاصله نقاط اتصال پایینی نسبت به هم	۸۲۳/۵	۸۲۶/۵	۸۲۴
قطر برای سوراخ پین اتصال بالا	۱۲	-	۱۳
قطر برای سوراخ پین اتصال پایین	۱۲	-	۱۳
ارتفاع دیرک	۶۰۸/۵	۶۱۱/۵	۶۱۱

عمق خاک‌ورزی تعیین‌کننده میزان تخریب و نرم‌سازی خاک است که پارامتر اصلی در ارزیابی کارایی روتیواتور است که به‌وسیله عمود بر سطح خاک، از نوک تیغه یا پیکربندی ابزارهای سنجش عمق، خط‌کش‌های دقیق یا حسگرهای فاصله‌سنج لیزری اندازه‌گیری می‌شود و با اندازه‌گیری‌های مکرر در نقاط مختلف عملیات برای میانگین‌گیری ثبت می‌گردد. نرخ خردایش کلوخ‌ها نشان‌دهنده میزان خردشدن سنگ‌ها و کلوخ‌ها در فرایند خاک‌ورزی است که با روش نمونه‌گیری از خاک قبل و بعد از عملیات و روش آزمایشگاهی شمارش و اندازه‌گیری اندازه کلوخ‌ها در نمونه‌ها و ثبت تعداد و حجم یا وزن کلوخ‌های خرد شده با معیارهای استاندارد حداقل خردایش موردنیاز مقایسه می‌گردد. نتایج اندازه‌گیری‌ها در قالب جداول و نمودارها جمع‌آوری شده و با استانداردهای ملی یا بین‌المللی مانند ASTM، ISO یا استانداردهای داخلی کشور مقایسه خواهد شد. این مقایسه شامل بررسی حداقل و حداکثر محدوده‌های مجاز، توزیع یکنواختی و میزان انطباق کلی است و هرگونه انحراف از استانداردها در گزارش‌ها مستندسازی و تحلیل می‌گردد تا نقاط قوت و ضعف تجهیزات مورد ارزیابی مشخص شود.

برنامه‌های آزمایشی برای بررسی دوام قطعات کلیدی در مرکز مکانیزاسیون کشاورزی صورت پذیرفت که هدف از آزمون موارد زیر بوده است:

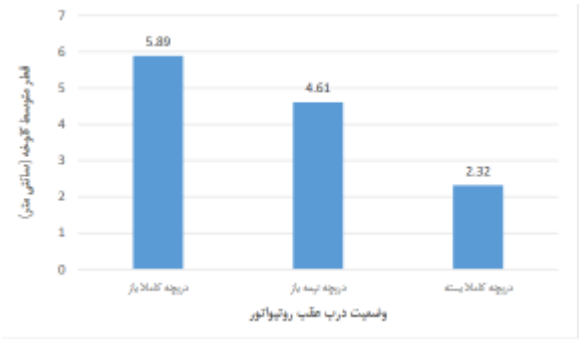
- بررسی میزان خردشدن کلوخه‌ها.

- تعیین میزان ازبین‌بردن، زیر خاک‌کردن و درصد جاماندگی علف هرز.
- بررسی میزان فرسایش تیغه‌های خاک‌ورز دستگاه
- بررسی استحکام و دوام دستگاه
- بررسی ایمنی در قسمت‌های مختلف دستگاه
- بررسی سهولت تنظیمات و کار با دستگاه
- تطبیق اتصال سه‌نقطه دستگاه با استاندارد ملی شماره ۹۱۹۲

جدول ۳: قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها پس از تردد روتیواتور در سه وضعیت قرارگیری درپوش عقب

قطر کلوخه Cm^2 ((درب عقب))	میانگین قطر کلوخه‌ها (میلیمتر)								
	سینی	۷/۱	۱۴/۵	۲۵/۹	۳۸/۸	۴۷/۳	۵۶/۴	۶۸/۳	۸۳/۷
	وزن کلوخه‌ها بر روی هر الک (گرم)								
۵/۸۹ ((کاملاً باز))	۶۰۷	۱۰۳۵	۱۱۴۳	۲۷۱۳	۲۲۴۹	۴۱۷۷	۵۵۶۹	۷۲۴۷	۱۰۹۶۰
۴/۶۱ ((نیمه‌باز))	۸۲۱	۴۴۹۸	۴۷۸۴	۳۵۳۴	۲۲۴۹	۳۰۷۰	۳۶۰۶	۵۲۴۸	۷۸۹۰
۲/۳۲ ((کاملاً بسته))	۲۱۰۶	۸۸۱۸	۷۶۰۴	۵۵۶۹	۳۸۹۱	۲۴۲۸	۲۶۰۶	۱۹۶۳	.

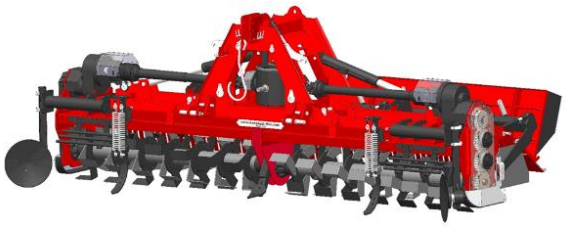
شکل ۱۰ نتیجه جدول ۳ را در قالب نمودار نمایش می دهد.



شکل ۱۰: قطرمتوسط وزنی کلوخه ها پس از تردد روتیواتور در سه وضعیت قرارگیری درپوش عقب

نتایج آزمون اعلام شده به شرح زیر بود:

- کارایی دستگاه در اراضی زراعی مناسب بوده است. متوسط ظرفیت عملی دستگاه با سرعت پیشروی ۳/۳۲ کیلومتر در ساعت و عرض کار عملی ۲۰۸/۴ سانتی‌متر، حدود ۰/۶۰ هکتار در ساعت با بازده ۸۲/۷۹ درصد اندازه‌گیری و محاسبه گردید.
- میانگین بکسواتروتیواتور ۱۲/۶ درصد در سرعت متوسط ۳/۳۲ کیلومتر در ساعت به دست آمد.
- میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) پس از عملیات ۲۲/۶۸ میلی‌متر به دست آمد.
- میانگین سطح پوشیده از بقایا قبل از عملیات ۱۵۲ و بعد از عملیات ۵۱/۸ و میانگین درصد زیر خاک‌شدن بقایا ۶/۹۱ درصد به دست آمد.
- میزان فرسایش تیغه هاپس از ۸۰ هکتار کارکرد ۱/۰۸ درصد وزنی اندازه‌گیری و قابل‌قبول است.
- دستگاه از استحکام و دوام کافی برخوردار بوده و پس از حدود ۲۰ ساعت آزمون، هیچ‌گونه شکستگی، پیچیدگی، خمیدگی، لرزش و یا فرسایش غیرعادی در قسمت‌های مختلف دستگاه مشاهده نگردید.
- کاربری، تنظیمات، سرویس و نگهداری و تعویض تیغه‌ها به‌آسانی انجام می‌گیرد.
- اتصال سه‌نقطه دستگاه با استاندارد ملی ۹۱۹۲ مطابقت دارد.



شکل ۱۱: شکل نهایی روتاواتور با عرض کاری ۳/۵۰ متری

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف طراحی و ساخت یک روتاواتور پیشرفته برای بهبود بهره‌وری کشاورزی، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش دوام دستگاه انجام شد. با استفاده از روش‌های تجربی، شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری (مانند SolidWorks، انسیس و آباکوس) و تحلیل‌های مکانیکی، عملکرد تیغه‌ها، سیستم‌های انتقال قدرت و اجزای ساختاری بررسی شد. نیازسنجی بازار و شرایط اقلیمی به طراحی محصولی متناسب با نیازهای کشاورزان کمک کرد. فرایند طراحی شامل مراحل مقدماتی، تکمیلی و آنالیز بود که ایمنی و کارایی دستگاه را تضمین کرد. تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که انتخاب متریال، مانند چدن نشکن برای گیربکس‌ها و فولاد کروم‌دار برای بلبرینگ‌ها، تأثیر قابل‌توجهی بر دوام و عملکرد دستگاه دارد. تیغه‌های C شکل با زاویه بهینه و طراحی دندانه‌دار، اصطکاک را کاهش داده و خاک‌ورزی را بهبود بخشیدند. مکانیزم‌های تاشو، قفل‌کن‌های هیدرولیک و مجموعه فاروئر، امکان خاک‌ورزی و جوی‌سازی هم‌زمان را فراهم کردند. شبیه‌سازی‌ها و تست‌های نهایی تأیید کردند که دستگاه در شرایط مختلف خاک و تراکتورهای با توان متفاوت عملکرد مطلوبی دارد. روتاواتور طراحی‌شده با ویژگی‌هایی مانند گاردان ۴ لنت، توپی‌های واسکازینی و بلبرینگ‌های دوردیف، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش داد. استفاده از فناوری‌های برش لیزری CNC و چیدمان بهینه قطعات، ضایعات تولید را به حداقل رساند و دقت ساخت را افزایش داد. این دستگاه با عرض کاری ۳/۵۰ متر و قابلیت تاشو، حمل‌ونقل را آسان‌تر کرده و ایمنی اپراتور را با گاردهای محافظ تضمین نمود. این نوآوری‌ها بهره‌وری کشاورزی را افزایش داده و محصول را در بازار جهانی رقابتی کردند. این تحقیق نه‌تنها به توسعه یک روتاواتور کارآمد منجر شد، بلکه چارچوبی برای طراحی ماشین‌آلات کشاورزی با تأکید بر پایداری و مقرون‌به‌صرفه بودن ارائه داد. یافته‌ها می‌توانند در بهبود سایر ابزارهای خاک‌ورزی و توسعه فناوری‌های کشاورزی هوشمند به کار روند. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و ادغام حسگرهای هوشمند برای پایش خاک تمرکز کنند. این مطالعه گامی مهم در جهت کشاورزی پایدار و افزایش بهره‌وری در مناطق با شرایط اقلیمی متنوع است.

۵- پیشنهادهای توسعه‌ای

مطابق مطالعات انجام شده برای توسعه محصول می‌توان یک سنسور بر روی اسکی‌های طرفین نصب نمود که مقدار فشردگی خاک را تشخیص داده و متناسب با آن به کمک جک‌های هیدرولیک عمق را تنظیم نماید. همچنین با نصب سیستم GPS می‌توان سطح خاک‌ورزی شده را از سطحی که خاک‌ورزی نشده تشخیص داد که موجب افزایش دقت در عملیات کشاورزی، مدیریت بهینه منابع را به همراه دارد. این فناوری امکان ردیابی و نظارت بر عملکرد را فراهم می‌سازد و از پوشش کامل زمین در عملیات خاک‌ورزی اطمینان حاصل می‌شود و مسیرهای بهینه حرکت روتیواتور را مشخص و از تکرار بی‌مورد عملیات جلوگیری می‌نماید که این امر باعث کاهش مصرف سوخت، زمان و فرسودگی ماشین‌آلات می‌گردد.

۶- منابع

[1] C. Manivelprabhu, N. Sangeetha, and T. Ramganesh, “Design modification and structural analysis of rotavator blade by using HyperWorks 12.0,” *Altair Technology Conference*, 2015.

[2] S. K. Mandal, B. Basudev, and S. Mukherjee, “Optimization of design parameters for rotary tiller’s blade,” *Power*, Vol. 4, No. 5, 2013.

[3] D. Prasad, P. Tupkari, P. Sharma, and A. Singh, “Computer aided design and analysis of rotavator blade,” *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 312–317, 2014.

[4] G. U. Shinde, J. M. Potekar, R. V. Shinde, and S. R. Kajale, “Design analysis of rotary tillage tool components by CAD-tool: rotavator,” in *2011 International Conference on Environmental and Agriculture Engineering (IPCBEE)*, Vol. 15, 2011.

[5] G. U. Shinde and S. R. Kajale, “Computer aided engineering analysis and design optimization of rotary tillage tool components,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 1–6, 2011. doi: 10.3965/j.issn.1934-6344.2011.03.001-006.

[6] P. V. Labhsetwar, R. S. Lonkar, R. S. Rajurkar, and S. S. Arsod, “Design and failure analysis of rotavator blade by means of CAD and FEA tool,” *International Journal of Advances in Engineering and Management*, Vol. 4, No. 5, pp. 1341–1347, 2022, doi: 10.35629/5252-040513411347.

[7] G. M. Vegad and R. Yagva, “Design analysis and optimization of rotary tiller blades using

computer software," *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, Vol. 49, No. 1, pp. 43–49, 2018.

[8] K. C. Selvi, "A new blade design of rotary tiller and static analysis using computer-aided tool," *Inmateh-Agricultural Engineering*, Vol. 53, No. 3, 2017.

[9] D. Kumar and P. Mohanraj, "Design and analysis of rotavator blades for its enhanced performance in tractors," *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, Vol. 1, No. 1, pp. 160–185, 2017.

[10] G. S. Reddy, J. Narsaiah, and G. Shashikala, "Dynamic analysis on tillage equipment used in agriculture using ANSYS software," *Science and Technology*, Vol. 3, No. 7, 2017.

[11] S. K. Mandal, B. Bhattacharyya, S. Mukherjee, and A. K. Prasad, "Design optimization of rotary tiller blade using specific energy requirement," *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 1257–1263, 2016.doi: 10.14741/ijcet/22774106/6.4.2015.31.

[12] J. S. Mahal, G. S. Manes, A. Prakash, M. Singh, and A. Dixit, "Study on blade characteristics of commercially available rotavators in Punjab," *Agricultural Engineering Today*, Vol. 36, No. 3, pp. 8–11, 2012.