J. Agric. Mech , 11 (3):1-15(2026)

Journal of
Agricultural Mechanization

Online ISSN: 2717-4107
Journal homepage: https://jam.tabrizu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Design, Fabrication, and Evaluation of a Gravity Separator Machine for Cleaning the Seeds of Medicinal Plants

Alireza Abdollahiyan[1], Sadegh Seyedlou[1]*, Habibeh Nalbandi[1], Farid Bejaei[1]

1. Department of Biosystems Engineering , Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

***Keywords*:**
Design,
Gravity Separator,
Lallemantia,
Medicinal Plant Seeds,
Seed Cleaning Machine

Received:
2026-04-20

Revised:
2026-10-03

Accepted:
2026-10-04

***Corresponding Author:**
ss.seiedlo@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

During the harvesting of grain crops such as cereals, legumes, and particularly medicinal plants, impurities are present that significantly reduce the quality and economic value of the product, necessitating the use of efficient mechanical separation methods in the post-harvest stage. Among various cleaning and grading equipment, gravity separators hold particular importance due to their ability to separate particles based on differences in density and aerodynamic characteristics. The efficiency of these machines depends on parameters such as vibration frequency and amplitude, longitudinal and lateral slopes of the separation deck, airflow velocity and volume flow rate, number of blowers, and feed rate. Previous studies have also confirmed this performance sensitivity; notably, Bagheri et al. (2017) demonstrated that proper adjustment of parameters, including a frequency of 400 cycles per minute, an amplitude of 5 mm, an air velocity of 5.7 m/s, and longitudinal and lateral slopes of 2° and 1°, respectively, increases the separation efficiency of impurities in lentils up to 90.2%. Furthermore, the findings of Shekari Shishvan (2019) indicate a significant difference in bulk density and terminal velocity between Lallemantia seeds and their associated impurities, recommending the use of a gravity separator for the removal of gravel, straw, and weed seeds. Despite the positive outcomes of these studies, most domestic research has been conducted on simpler gravity separator models equipped with only a single blower, a configuration that lacks sufficient capacity for the complete separation of the various materials present within the product bulk. Moreover, in many cases, particularly for medicinal plant seeds, separation is still carried out manually, a method that is costly, time-consuming, and inefficient. Accordingly, this research aims to design, fabricate, and evaluate an advanced gravity separator that can mechanically and efficiently remove impurities—particularly small stones—from granular medicinal plants and legumes by exploiting the physical and aerodynamic differences among the constituent materials.

Materials and Methods

To design a gravity separator machine for cleaning and grading legumes and medicinal plant seeds, the separation mechanism was first designed considering locally available technologies in Iran. Subsequently, the necessary engineering calculations were performed in accordance with relevant standards. Based on the design drawings, and taking into account the required dimensions and material specifications, the gravity separator machine was then constructed. The performance of the developed machine was evaluated using Lallemantia seeds. Through experimental evaluation, the optimal values of the machine's operational parameters as well as the separation efficiency for this seed type were determined.

How to cite:
Abdollahiyan, A., Seyedlou, S., Nalbandi, H., and Bejaei, F. (2026). *Design, Fabrication, and Evaluation of a Gravity Separator Machine for Cleaning the Seeds of Medicinal Plant.* Journal of Agricultural Mechanization, 11 (3):1-15.
https://doi.org/10.22034/jam.2026.71969.1358

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Results and Discussion

The fabricated gravity separator features three velocity zones and three centrifugal blowers mounted on the main chassis. The airflow rate and velocity can be adjusted using inverters. A crank and slider mechanism, driven by a 3 HP electromotor, vibrates the upper screen of the machine. The vibration frequency is adjustable via an inverter, and its amplitude is 10 mm. The upper section of the machine utilizes a steel wire mesh screen with both a wire diameter and an aperture size of 1 mm. Given the varying densities of different materials within the Lallemantia seed bulk and the distinct output airflow rates of each blower, the combination of the machine's vibration and its longitudinal and transverse slopes (set at 2.24° and 4.79°, respectively) causes the various components, such as gravel, straw, chaff, and seeds of high and low density, to follow different trajectories. Consequently, they are discharged through separate outlets based on their densities. Additionally, the material feed rate onto the screen surface is adjustable. The machine was evaluated using a 10 kg sample of Lallemantia seeds containing 186 g of gravel. The highest separation efficiency was achieved at longitudinal and transverse slopes of 2.24° and 4.79°, respectively, with an output air velocity of 3.9 m/s in the first velocity zone above the wire screen, and 3 m/s and 2.3 m/s in the subsequent two velocity zones, respectively. Under these settings, the amount of gravel discharged from the machine's first outlet, which is dedicated to high-density materials, was approximately 182 g, and the separation efficiency of the machine was calculated to be 97.8%. This level of efficiency demonstrates the machine's high performance in removing impurities and improving product quality.

Conclusion

In this research, a standalone, cost-effective gravity separator was successfully designed, fabricated, and evaluated with the aim of achieving maximum efficiency in cleaning fine seeds. The results demonstrated that this machine, equipped with 5 distinct outlets and a processing capacity of 450 kg/h, is capable of separating fine impurities, such as gravel, from Lallemantia seeds in a single stage with a remarkably high efficiency of 97.8%. Beyond its successful performance in cleaning Lallemantia seeds, the high adjustability of all operational parameters, coupled with the quick and easy replaceability of the wire mesh screen, grants the machine exceptional versatility. Consequently, by applying the appropriate settings, users can effectively and rapidly employ this machine for the cleaning and grading of a wide variety of other seed products.

نشریه
مکانیزاسیون کشاورزی
شاپا الکترونیکی: 2717-4107
درگاه نشریه: https://jam.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

طراحی، ساخت و ارزیابی ماشین جداکننده ثقلی برای بوجاری دانه‌های گیاهان دارویی

علیرضا عبدالهیان[۱]، صادق سیدلو[۱*]، حبیبه نعلبندی[۱]، فرید بجایی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۱ تاریخ بازنگری:۱۴۰۵/۰۷/۱۱ تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۰۷/۱۲

۱- گروه مهندسی بیوسیستم - دانشکده کشاورزی- دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

* نویسنده مسئول: E-mail: ss_seiedlo@yahoo.com; ss.seiedlo@tabrizu.ac.ir

چکیده

کیفیت حبوبات، غلات و گیاهان دارویی و کیفیت محصولات تولیدی از آن‌ها وابسته به درجهٔ خلوص دانه‌ها است. کلیه ناخالصی‌ها، طی عملیات بوجاری از تودهٔ محصول اصلی جدا می‌شوند. هم‌چنین جداسازی محصول اصلی به بخش‌هایی با کیفیت متفاوت نیازمند ماشین‌های درجه‌بندی دیگری است. درجه‌بندی و اندازه‌بندی هم‌زمان دانه‌ها دشوار بوده و نیازمند ماشین‌های متعددی است به‌طوری‌که جداکردن ناخالصی‌های هم اندازه دانه اصلی به ویژه در ریزدانه‌هایی مانند خاکشیر، بالنگو و یا در دانه‌های بزرگتر مانند نخود و لوبیا و عدس بسیار مشکل است و کاربرد الک‌ها در این موارد کارساز نیستند و بایستی از ماشین‌های تخصصی‌تر که بر اساس ترکیبی از خواص فیزیکی و مکانیکی عمل می‌کنند استفاده شود. بنابراین هدف از این تحقیق طراحی، ساخت و ارزیابی اولیه یک واحد ماشین جداکننده ثقلی برای بوجاری و جداسازی سنگ‌ریزه و سایر مواد از توده دانه بالنگو بود. ماشین طراحی شده از قسمت‌های مختلفی مانند مخزن تغذیه، واحد هوادهی، واحد ارتعاشی الک‌ها، واحد جداسازی، تخلیه و کیسه‌گیری تشکیل شده است. سیستم الک بوجار ماشین از یک شاسی فرعی، توری با مش یک میلی‌متری با سوراخ‌های مدور، مکانیسم ارتعاشی لنگ و لغزنده خارج از مرکز ساخته شد. توان کل مصرفی سیستم ارتعاشی ۳ اسب بخار، سه واحد دمنده سانتریفیوژ هر کدام با توان ۱/۵ اسب‌بخار و سیستم کنترل سرعت هر کدام از دمنده‌ها به همراه تنظیم دبی ورودی محصول و شیب قابل تغییر طولی و عرضی ماشین از اجزای دیگر ماشین بود. بازده جداسازی سنگ‌ریزه از بالنگو حدود ۹۷/۸ درصد به دست آمد. هم‌چنین جداسازی محصول به درجه‌های متفاوت و نیز جداسازی ناخالصی‌های سبک میسر شد.

کلمات کلیدی: بالنگو، جداکننده ثقلی، دانه‌های گیاهان دارویی، طراحی، ماشین بوجاری

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

در هنگام برداشت محصولات دانه‌ای مانند غلات، حبوبات و خصوصاً دانه‌های گیاهان دارویی، ناخالصی‌هایی مانند سنگ‌ریزه، کاه و کلش، کلوخ، گرد و خاک، حشرات موجود روی گیاه، بذر علف‌های هرز و نیم‌دانه‌های شکسته شده در کوبنده‌ها، امکان اختلاط با دانه‌های توده محصول اصلی را دارند که بسته به نوع محصول، این ناخالصی‌ها حدود ۵ الی ۱۵ درصد محصول اصلی را تشکیل می‌دهند. وجود ناخالصی‌ها کیفیت و قیمت نهایی محصول را شدیداً کاهش داده و حتی در بعضی مواقع استفاده از محصول را غیرممکن می‌کند (Shekari Shishvan, 2019). بنابراین حذف مواد خارجی و نامطلوب از دانه‌ها ضروری است که این فرآیند تحت عناوین تمیزکردن، الک کردن و یا بوجاری شناخته می‌شود و یک عملیات واحد در مرحله پس از برداشت محصولات دانه‌ای است و به‌صورت دستی و ماشینی انجام می‌گیرد. به این ترتیب محصول برای ذخیره‌سازی، کاشت یا عملیات فرآوری دیگر آماده می‌گردد. بوجاری دانه‌ها به منظور کاهش هزینه‌های نگهداری نیز انجام می‌شود. این عملیات با هدف حذف کامل موادی که به ماشین‌های فرآوری آسیب می‌رسانند و نیز حذف موادی که ارزش دانه‌ای محصول نهایی را کاهش می‌دهند، انجام می‌گیرد (Yayock et al., 2020).

استفاده از انواع الک، استفاده از نیروی بادبردگی، گردگیرها، سیاه‌دانه‌گیر، شن‌گیرها، جداکننده ثقلی، گردگیرها و سیکلون‌ها از روش‌های جداسازی و بوجاری دانه‌ها هستند. جداکننده‌ها و تمیزکننده‌های دانه‌ها از لحاظ عملکرد متفاوت هستند و این تفاوت به عوامل زیادی مانند خواص فیزیکی، مکانیکی، آیرودینامیکی، میزان دقت عملیات جداسازی و میزان کیفیت و بهره‌وری خط بوجاری بستگی دارد (Panasiewicz et al., 2012). عامل مهم و کلیدی در جداسازی و تمیزکردن مواد دانه‌ای اطلاع از خواص فیزیکی مواد موجود در توده دانه است. این مشخصه‌ها عبارت از سرعت حد، کرویت، ابعاد، زوایای اصطکاک استاتیکی و دینامیکی و خصوصیات سطحی و مغناطیسی دانه‌ها است که بدون اندازه‌گیری آن‌ها نمی‌توان نسبت به طراحی و تنظیم صحیح ماشین‌های بوجاری اقدام نمود. ماشین جداکننده ثقلی یکی از ماشین‌های مهم و پرکاربرد در بوجاری بوده که اصول جداسازی آن بر مبنای اختلاف دانسیته و نیروی بادبردگی یا شناوری ذرات مختلف تشکیل‌دهنده توده دانه استوار است. هرگاه ذرات موجود در یک مخلوط از لحاظ دانسیته و نیز سرعت حد یا سرعت شناوری با یکدیگر دارای اختلاف باشند ولی دارای ابعاد یکسان باشند که امکان جداسازی با استفاده از اندازه و الک فراهم نباشد، در این صورت می‌توان آن‌ها را در معرض حرکت رفت و برگشتی یک صفحه شیب‌دار یا یک الک به همراه جریان رو به بالای هوا قرار داد. به این ترتیب، بر حسب دانسیته و نیروی بادبردگی ایجاد شده توسط جریان هوا، اجزای مخلوط به بخش‌های مختلف تفکیک می‌شوند(Pourazarang & Ziaolhagh, 2008). عوامل طراحی مهم در ماشین جداکننده ثقلی شامل عوامل ماشینی و عوامل مرتبط با ماده مورد نظر برای بوجاری است. تمامی عوامل ماشینی و انتخاب مقادیر بهینهٔ آن‌ها تابع خواص کیفی و خواص فیزیکی و مکانیکی دانه مورد نظر و نیز ناخالصی‌های آن می‌باشد. از عوامل ماشینی می‌توان به ابعاد الک، فرکانس ارتعاش، دامنه ارتعاش، شیب الک در جهت طولی و عرضی، تعداد دمنده‌ها، توان و دبی دمنده‌ها، تفاوت دبی دمنده‌ها، میزان تغذیه محصول یا نسبت مقدار ماده ورودی به سطح الک در واحد زمان اشاره کرد که تنظیم هم‌زمان و ترکیب آن‌ها نسبت به نوع ماده حائز اهمیت است، چرا که کوچکترین انحراف از مقادیر بهینه به عملکرد ضعیف ماشین در جداسازی ناخالصی‌ها و نیز درجه‌بندی منجر می‌شود (Chakraverty & Poul, 2001). شاید بتوان چنین اظهار داشت که در بین کلیه ماشین‌های بوجاری، طراحی، ساخت و نیز کاربرد ماشین جداکننده ثقلی سخت‌ترین و حساس‌ترین مورد است چرا که هم‌زمان عملیات تمیزکاری و درجه‌بندی محصول اصلی آنهم به چندین درجه را انجام می‌دهد و از ترکیبی از خواص فیزیکی و مکانیکی استفاده می‌کند.

Wu et al. (1999) تاثیر فرکانس، دامنه ارتعاش و سرعت هوا را روی جداسازی ناخالصی‌های دانه گندم با استفاده از ماشین جداکننده ثقلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در بین متغیرهای مورد مطالعه، سرعت جریان هوا، بیش‌ترین تاثیر را در رسیدن به حداکثر بازده جداسازی دارد. Aghaazizi et al. (2020) نیز جداسازی ناخالصی‌های موجود در توده گندم را با استفاده از جداکننده ثقلی مدل LA-K ساخت شرکت وستراپ[1] بررسی کردند. آنان بیشترین بازده جداسازی را با مقدار ۸۱ درصد، در شیب طولی و عرضی به ترتیب ۲/۵ و ۱/۵ درجه، فرکانس نوسان ۳۹۵ سیکل در دقیقه، دامنه نوسان ۵ میلی‌متر و سرعت هوای ۶/۷۵ متر بر ثانیه به دست آوردند. Umarani & Vanangamudi (2002) نیز با استفاده از ماشین جداکننده ثقلی، بذرهای کازوارینا را از لحاظ وزنی تفکیک نمودند. بذرهای سنگین جداشده توسط جداکننده ثقلی دارای محتوای پروتئین، روغن و کربوهیدرات بالاتری بوده و قدرت جوانه‌زنی بالاتری را نسبت به بذرهای سبک داشتند. Patil & Bansod (2014) نیز با استفاده از جداکننده ثقلی بذور گندم را از لحاظ وزنی جدا کردند. آن‌ها اظهار نمودند ماشین جداکننده ثقلی نقش مهمی را در درجه‌بندی بذور براساس وزن در صنعت فرآوری بذر ایفا می‌کند. آن‌ها سرعت جریان هوا را موثرترین مشخصه عملکردی ماشین برای جداسازی مطلوب بذور عنوان نمودند. Bagheri et al. (2017) مشخصه‌های موثر بر جداسازی ناخالصی‌ها از توده عدس را با استفاده از جداکننده ثقلی و با روش تحلیل ابعادی مورد بررسی قرار دادند. آنان بیشترین درصد جداسازی را با مقدار ۹۰/۲ درصد، در فرکانس نوسان ماشین

[1] Westrup

معادل ۴۰۰ سیکل در دقیقه، دامنه نوسان ۵ میلی‌متر، سرعت هوای ۵/۷ متر بر ثانیه، شیب عرضی ۱ درجه و شیب طولی ۲ درجه به‌دست آوردند. Shekari Shishvan (2019) مکانیزم مناسب جداسازی دانه بالنگو شهری از ناخالصی‌های موجود در توده دانه را با استفاده از خواص فیزیکی و آیرودینامیکی بررسی کرد. نتایج نشان داد که دانه‌های بالنگو و ناخالصی‌ها از لحاظ دانسیته و سرعت حد، تفاوت معنی‌داری دارند. بنابراین جداکننده ثقلی را برای جداسازی سنگ‌ریزه، کاه و کلش و بذور علف‌های هرز پیشنهاد کرد.

استفاده از جداکننده ثقلی برای جداسازی سنگ‌ریزه از توده گندم، در کارخانه‌های آردسازی نیز رایج است که در این کارخانه‌ها جداکننده ثقلی، محصول را فقط به دو بخش شامل گندم و سنگ‌ریزه جدا می‌کند.

براساس آنچه تحقیقات قبلی نشان می‌دهد اغلب آن‌ها به جداسازی مواد درشت دانه‌ای مانند گندم، ذرت و غیره معطوف بوده است. بر اساس تحقیقات میدانی و بازدیدهای انجام شده در اکثر کارخانه‌ها و کارگاه‌های فرآوری گیاهان دارویی و نیز سایر غلات و حبوبات مانند کارگاه‌های فرآوری نخود، جداسازی برخی ناخالصی‌ها مانند سنگ‌ریزه از دانه‌های دارویی، حبوبات و دیگر محصولات پرکاربرد در داخل کشور، هنوز به صورت دستی انجام می‌شود که علت آن ناسازگاری جداکننده‌های ثقلی موجود در بازار برای این نوع محصولات و دشواری تنظیم هم‌زمان چند مشخصه عملکردی ماشین است. بنابراین بوجاری آن‌ها به‌صورت دستی انجام می‌شود و روش‌های دستی و سنتی نه تنها پرهزینه هستند، بلکه کارایی لازم را برای جداسازی کامل ناخالصی‌ها ندارند. سختی و هزینه‌های بالای روش‌های سنتی و دستی، به چالش بزرگی در حوزه تولید و فرآوری این محصولات تبدیل شده است. بنابراین، نیاز مبرم به توسعه روش‌هایی است که بتوانند به‌صورت مکانیکی و با هزینه کمتر، ناخالصی‌های موجود در دانه‌های دارویی و سایر مواد دانه‌ای را به طور کارآمد جداسازی کنند. هم‌چنین بررسی‌ها و بازدیدهای انجام شده توسط تیم تحقیقاتی حاضر در داخل کشور عمدتاً با جداکننده‌های ثقلی حاوی یک دمنده و جداسازی محصول فقط به دو بخش انجام شده‌اند، در حالی که برای جداسازی مواد مختلف موجود در توده دانه نیاز به ماشین جداکننده ثقلی با تعداد دمنده ها و بخش‌های جداسازی بیشتر می‌باشد.

هدف اصلی این تحقیق طراحی، ساخت و ارزیابی ماشین جداکننده ثقلی است که بتواند به صورت مکانیکی، ناخالصی‌های موجود در توده دانه مانند سنگ‌ریزه را که با روش‌های متعارف و براساس شکل و اندازه قابل جداسازی نیستند جدا کرده و نیز هم‌زمان درجه‌بندی دانه‌ها را انجام دهد. این ماشین باید بتواند براساس تفاوت فیزیکی مواد موجود در توده دانه و نیز کیفیت دانه‌های اصلی محصول، به بهبود کیفیت محصولات و افزایش بهره‌وری کمک شایانی کند.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور طراحی ماشین جداکننده ثقلی برای بوجاری دانه‌های گیاهان دارویی، حبوبات و غلات، ابتدا مکانیزم آن با در نظر گرفتن تکنولوژی‌های موجود، طراحی و سپس محاسبات لازم مطابق با استانداردهای موجود انجام شد. درنهایت با توجه به نقشه‌های به دست آمده و با در نظر گرفتن ابعاد و جنس مواد، نسبت به ساخت ماشین جداکننده ثقلی اقدام شد. ارزیابی ماشین با استفاده از دانه‌های بالنگو شهری صورت گرفت و مقادیر مناسب مشخصه‌های عملکردی ماشین و نیز راندمان جداسازی برای آن دانه به‌دست آمد.

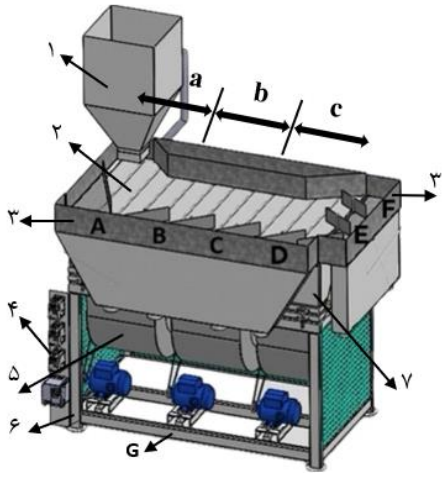
۲-۱- مکانیزم جداسازی

اجزای ماشین جداکننده ثقلی شامل مخزن تغذیه، واحد ارتعاشی، واحد هوادهی، واحد جداسازی، واحد تخلیه و کیسه‌گیری، سیستم تنظیم شیب‌ها، واحد کنترل، شاسی و ضمایم آن است. طرح کلی ماشین در شکل ۱ نشان داده شده است.

در جداکننده ثقلی مورد نظر، محصول از مخزن روی سطح الک تخلیه شده و هوا توسط دمنده‌های سانتریفیوژ موجود در داخل ماشین و زیر صفحه مشبک به سمت بالا دمیده می‌شود و از بین دانه‌ها عبور می‌کند. سیستم هوادهی به‌گونه‌ای طراحی شده است که سطح الک را به سه ناحیه مجزا تقسیم می‌کند، به‌طوری‌که سرعت هوادهی در ناحیه اول بیشترین مقدار بوده، در ناحیه دوم کمتر و در ناحیه سوم حداقل است. این اختلاف شدت هوادهی برای دستیابی به شناوری و جداسازی دقیق‌تر دانه‌ها با کیفیت متفاوت و نیز ناخالصی‌ها، به کمک مبدل (اینورتر)های متصل به دمنده‌ها قابل تنظیم است. تودهٔ دانه و ناخالصی‌های آن براساس اختلاف دانسیته و نیروی بادبردگی طبقه‌بندی می‌شوند. سرعت هوا به اندازه‌ای افزایش داده می‌شود که فقط ناخالصی‌ها و یا دانه‌های با دانسیته کم و نیروی بادبردگی زیاد، روی سطح الک شناور باشند. پس از اینکه دانه‌ها و ناخالصی‌های مختلف مورد نظر در نقاط مختلف سطح الک جداکننده ثقلی شناور شدند، سایر دانه‌ها و یا ناخالصی‌های موجود در سطح الک بایستی با تبعیت از ارتعاش الک، به سمت خروجی‌های تعبیه شده در اطراف و محیط ماشین حرکت کنند. در هر کدام از نواحی سه‌گانه الک (a، b و c در شکل ۱) مواد و ناخالصی‌های متفاوتی روی الک باقی می‌مانند و موادی نیز شناور می‌شوند. برای حرکت مواد به بیرون ماشین، سیستم الک ماشین باید دارای شیب طولی و عرضی به همراه حرکت ارتعاشی رفت‌وبرگشتی باشد. واحد ارتعاشی ماشین، از یک مکانیزم لنگ و لغزنده خارج از مرکز تشکیل شده است که حرکت رفت‌وبرگشتی لازم را در الک بالایی ایجاد می‌کند. فرکانس ارتعاش واحد ارتعاشی، توسط یک اینورتر تنظیم می‌شود تا شرایط جداسازی بهینه فراهم شود. حرکت ارتعاشی رفت‌وبرگشتی و شیب‌های مذکور به صورت توامان مواد سنگین را به قسمت بالایی در سطح الک (A و B در شکل ۱) و خروجی‌های تعبیه‌شده در محیط ماشین انتقال می‌دهد. در مقابل،

دانه‌ها و مواد ناخالصی سبک‌تر و با دانسیته کمتر، تحت تاثیر حرکت ارتعاشی قرار نگرفته و به‌صورت شناور باقی می‌مانند و به دلیل شیب طولی اعمال‌شده و فشار ماده جدید ورودی از مخزن به روی الک به سمت پایین ماشین و خروجی های تعبیه‌شده دیگر (C، D، E و F در شکل ۱) حرکت می‌کنند. بدین‌وسیله هم ناخالصی‌ها جدا می‌شوند و هم دانه‌ها بر حسب دانسیته آن‌ها درجه‌بندی می‌شوند.

ابعاد ماشین با توجه به ابعاد دمنده‌ها و محل قرارگیری الکتروموتورها، ۹۰ × ۱۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱۴۶ سانتی‌متر تعیین شد. در ادامه، طراحی و انتخاب هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده ماشین همراه با مشخصات فنی اجزا، به تفضیل بیان می‌شود.



شکل ۱- طرح کلی ماشین جداکننده ثقلی
(شامل: ۱- واحد تغذیه ۲- سیستم الک ۳- واحد تخلیه و خروجی‌ها (A، B، C، D، E و F خروجی‌های ماشین به ترتیب برای مواد با دانسیته زیاد تا بسیار کم) ۴- مبدل کنترل ۵- دمنده‌های گریز از مرکز ۶- شاسی اصلی ۷- قسمت ارتعاشی ۸- a، b و c نواحی با سرعت جریان باد متفاوت ۹- G تیر تحلیل شده)

Fig 1. Schematic diagram of the gravity separator machine (including: 1. Feeding unit 2. Sieve system 3. Discharge and outlet section (A, B, C, D, E, and F are the machine outlets arranged sequentially for materials with high to very low density) 4. Inverter 5. Centrifugal blowers 6. Main chassis 7. Vibratory section 8. a, b, and c indicate regions with different air–flow velocities 9. G indicates the analyzed beam)

۲-۲- شاسی اصلی

شاسی ماشین از دو قسمت شامل شاسی اصلی و شاسی ارتعاشی تشکیل شده است. شاسی اصلی ماشین از پروفیل‌های فولادی ۸۰ ×۴۰ و ۲۰× ۲۰ میلی‌متری و ورق‌های فولادی ۲ میلی‌متری ساخته شد که انتخاب ابعاد براساس آنالیز نیرویی بارهای استایکی موجود در ماشین به‌دست آمد (۶ در شکل ۱). براساس تجهیزات مورد نظر و ابعاد و اندازه آن‌ها و نیز ابعاد شاسی اصلی، جرم آن پس از طراحی در نرم‌افزار سالیدورک ۱۴۰ کیلوگرم به‌دست آمد. با توجه به این‌که شیب یکی از مشخصه‌های مهم در عملیات جداسازی این ماشین می‌باشد، لذا بین شاسی اصلی و شاسی ارتعاشی (۷ در شکل ۱) که در ادامه بیان خواهد شد، از مکانیزم پیچ تنظیم‌شونده برای تنظیم شیب استفاده شد. به منظور تحلیل نیرویی شاسی یکی از پروفیل‌های مستطیلی شکل که تحت بالاترین بارگذاری قرار داشت انتخاب و آنالیز نیروهای وارده بر آن انجام شد و در نرم‌افزار Mitcalc مقدار تنش تسلیم تعیین و مقدار حداکثر خیز آن تحلیل گردید (G در شکل ۱). برای این منظور، پس از واردکردن نیروهای اعمالی به پروفیل، مشخصات هندسی مورد نظر آن عضو در نرم‌افزار وارد شد. سپس نرم‌افزار محاسبات مربوطه را انجام داده که حداکثر تنش و حداکثر خیز برای عضو مورد نظر به ترتیب، ۴۰ مگاپاسکال و ۰/۶۱ میلی‌متر محاسبه شد. با توجه به اینکه حداکثر تنش تسلیم مجاز تعیین شده توسط نرم‌افزار برای فولاد مورد نظر، ۱۴۱ مگاپاسکال می‌باشد، حداکثر تنش محاسبه شده به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از حد مجاز بوده و خیز محاسبه شده نیز مقدار ناچیزی بود. لذا، این پروفیل برای استفاده در ساخت ماشین مناسب تشخیص داده شد.

۳-۲- مخزن تغذیه

براساس تجربیات موجود در ساخت مخازن در بازار و در ماشین‌های فرآوری دانه‌ها، مخزن تغذیه به ابعاد ۸۰۰×۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر از ورق فولادی ۱ میلی‌متری ساخته شد که حداثر ظرفیت آن برای دانه بالنگو با دانسیته ظاهری ۵۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب، معادل ۱۱۶ کیلوگرم به‌دست آمد (۱ در شکل ۱). جهت تنظیم مقدار مواد دانه‌ای خروجی از مخزن و برای کنترل مقدار بهینه ماده روی الک ماشین، که عملکرد و راندمان ماشین را تحت تاثیر قرار می‌دهد، از یک دریچه قابل تنظیم در انتهای خروجی مخزن استفاده شد (شکل ۲). در هنگام کار ماشین بایستی سیستم بالابری وجود داشته باشد تا با انتقال دانه از سطح زمین به داخل مخزن، سطح دانه در داخل مخزن را در یک مقدار مشخص حفظ کند تا عملکرد جداسازی ماشین در طول زمان ثابت باشد.

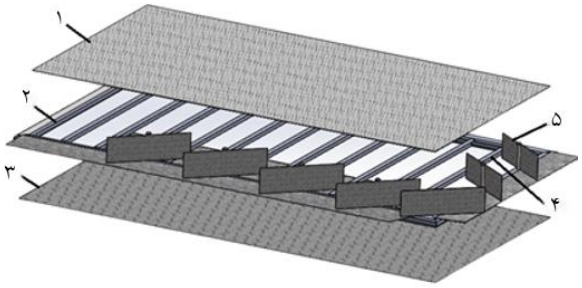


شکل ۲- دریچه قابل تنظیم در خروجی مخزن

Fig 2. Adjustable gate at the hopper outlet

۴-۲- سیستم الک

برای نگهداری محصول و توزیع یکنواخت هوا در هر کدام از مناطق سرعتی (a، b و c در شکل ۱) از یک سیستم الک با مش سیمی استفاده شد (۲ در شکل ۱). اجزای تشکیل‌دهنده این سیستم شامل شاسی فرعی (۲ در شکل ۳)، مش سیمی فوقانی (۱ در شکل ۳)، صفحه مشبک یا اسکالپر تحتانی (۳ در شکل ۳) نبشی‌های L شکل نگهدارنده الک با مش سیمی (۴ در شکل ۳) و صفحات هدایت‌کننده محصول به خروجی‌ها (۵ در شکل ۳) بود. انتخاب الک با مش سیمی فوقانی و مشخصات آن متناسب با ابعاد محصول بالنگو بود که از مش با قطر سیم و نیز چشمه آن به اندازه ۱ میلی‌متر در ابعاد ۹۰۰×۱۸۰۰ میلی‌متر استفاده شد که محصول خروجی از مخزن، روی این مش سیمی تخلیه می‌شود و سپس به دلیل ارتعاش آن محصول در کل صفحه بالایی (الک) توزیع می‌گردد. برای ساخت شاسی نگهدارنده سیستم الک (شاسی فرعی) از پروفیل فولادی با مقطع مستطیلی شکل به ابعاد ۲۰×۳۰ میلی‌متر استفاده شد که تعیین ابعاد آن‌ها براساس مقدار بار موجود روی سیستم الک و نیز وزن اجزای سیستم الک بود. برای جلوگیری از خیز الک بالایی به دلیل بار وارده از طرف محصول و نیز وزن الک، از نبشی‌های L شکل به ابعاد ۲۰×۳۰ میلی‌متر به تعداد ۱۱ عدد و با فاصله ۱۴۰ میلی‌متر از هم‌دیگر در زیر الک به عنوان نگهدارنده استفاده شد. هم‌چنین یک صفحه مشبک یا اسکالپر با منافذ دایره‌ای شکل به قطر ۵ میلی‌متر در زیر الک بالایی و نگهدارنده‌های الک، در فاصله ۱۰ میلی‌متری از آن قرار داده شد تا به یکنواختی جریان هوای عبوری از تمام مناطق سرعتی الک بالایی کمک کند. در قسمت محیطی الک، برای کنترل محصول خارج شده از آن به طرف مخازن جمع‌آوری، صفحاتی نصب شدند که زاویه قرارگیری آن‌ها از صفر تا ۹۰ درجه قابل تغییر بود، به‌طوری‌که در زاویه صفر درجه جریان محصول از الک به طرف خروجی‌ها مسدود می‌شد و در زاویه ۹۰ درجه خروجی محیطی الک به طرف مخازن به طور کامل باز می‌شد. متناسب با نوع محصول و وضعیت جداسازی و عملکرد ماشین، صفحات در زاویه صفر تا ۹۰ درجه باز و بسته می‌شدند تا محصول به خروجی مورد نظر حرکت کند (۵ در شکل ۳). اگر همه صفحات در وضعیت باز قرار بگیرند در این صورت ۵ خروجی و ۵ نوع محصول با درجات مختلف و یا ناخالصی خواهیم داشت. بنابراین بسته به وضعیت صفحات تعداد خروجی‌ها متفاوت خواهد بود.

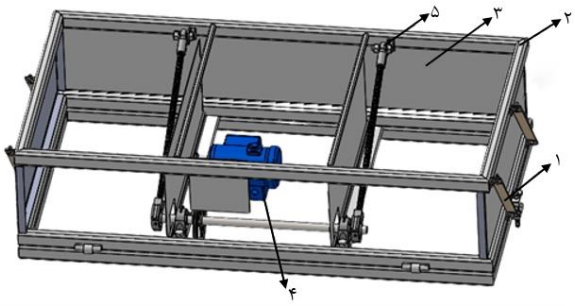


شکل ۳- اجزای سیستم الک جداکننده ثقلی (شامل: ۱- الک سیمی فوقانی ۲- شاسی فرعی ۳- صفحه مشبک یا اسکالپر تحتانی ۴- نبشی‌های L شکل نگهدارنده ۵- صفحات هدایت‌کننده محصول به خروجی‌ها)

Fig 3. Components of the gravity separator's screen system (1. Upper wire screen 2. Sub-frame 3. Lower perforated plate (scalper) 4. L-shaped support angles 5. Product guide plates to the outlets)

۵-۲- قسمت ارتعاشی

سامانه ارتعاشی مجموعه الک از پنج قسمت شامل شاسی، ورقه‌های فولادی، فنرهای ورقی، الکتروموتور و یاتاقان‌هایی از نوع مفصلی مطابق شکل ۴ ساخته شد. شاسی ارتعاشی از پروفیل‌های مستطیلی فولادی شکل به ابعاد ۳۰×۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر (۲ در شکل ۴) ساخته شد و روی شاسی اصلی قرار داده شد. قسمت کناره‌های مجموعه ارتعاشی به منظور ایجاد یک کانال برای هدایت هوای تحت فشار از دمنده‌ها تا زیر مش سیمی و جلوگیری از نشت هوا، توسط ورق فولادی به ضخامت یک میلی‌متری پوشانده شد (۳ در شکل ۴). هم‌چنین به منظور ایزوله‌سازی و جلوگیری از خروج هوا در ناحیه بین شاسی و شاسی ارتعاشی از پارچه برزنتی استفاده شد که ضمن حفظ ارتعاش سامانه ارتعاشی، نوسانات آن به شاسی اصلی منتقل نشود (شکل ۵). چهار عدد فنر ورقی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر به ابعاد ۵۲۰ ×۶۰ میلی‌متر برای تسهیل ایجاد حرکت‌های ارتعاشی و رفت و برگشت شاسی ارتعاشی نسبت به شاسی اصلی در جوانب شاسی اصلی نصب شدند که یک طرف آن‌ها به شاسی اصلی و طرف دیگر به شاسی ارتعاشی متصل شد (۱ در شکل ۴). انتخاب ابعاد و ضخامت فنرهای ورقی براساس تجربه در ماشین‌های مشابه صورت گرفت.



شکل ۴- واحد ارتعاشی الک
(۱- فنرهای ورقی ۲- شاسی ۳- ورق‌های فولادی ۴- الکتروموتور ۵- یاتاقان‌های مفصلی)

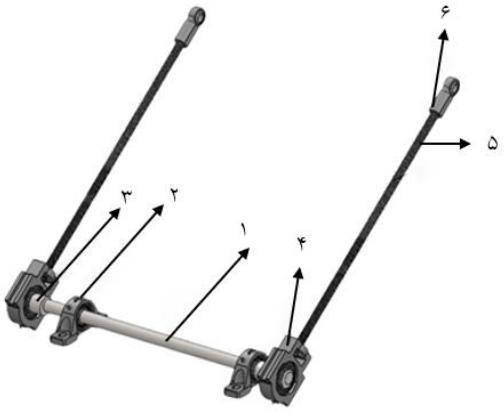
Fig 4. Screen vibration system
(1. Leaf springs 2. Chassis 3. Steel sheets 4. Electric motor 5. Rod-end bearings)



شکل ۵- پارچه برزنتی برای اتصال شاسی اصلی به شاسی فرعی

Fig 5. Canvas (tarpaulin) used to connect the main frame to the vibrating frame

برای ارتعاش الک از مکانیزم لنگ و لغزنده خارج از مرکز استفاده شد. برای طراحی مکانیزم لنگ و لغزنده قسمت ارتعاشی، قطر شفت اصلی مورد نیاز براساس جنس منتخب محاسبه و طراحی شد (۱ در شکل ۶). سپس این شفت به‌وسیله دو عدد یاتاقان مدل UCP ۲۰۶ به شاسی فرعی متصل شد (۲ در شکل ۶). برای ایجاد مکانیزم لنگ و لغزنده خارج از مرکز، از دو عدد شفت به طول ۸۰ میلی‌متر و با قطر ۴۵ میلی‌متر که به‌صورت خارج از مرکز به میزان ۵ میلی‌متر ماشین‌کاری شده بودند استفاده شد (۳ در شکل ۶) که یک طرف آن در داخل یاتاقان نوع UCT ۲۰۹ با قطر ۴۵ میلی‌متر قرار داده شد (۴ در شکل ۶) و طرف دیگر آن به شفت اصلی متصل شد به‌طوری‌که دور دورانی هر دو شفت (۱ و ۳ در شکل ۶) هماهنگ شد. یاتاقان‌های نوع UCT ۲۰۹ از سمت دیگر با استفاده از میله‌های رابط فولادی (۵ در شکل ۶) و یاتاقان‌های نوع مفصلی (۶ در شکل ۶) به ضلع روبه‌رویی و بالایی شاسی ارتعاشی متصل شدند. عملیات انتقال توان توسط یک الکتروموتور با توان ۳ اسب بخار انجام شد (۴ در شکل ۴) که این انتقال توسط مکانیزم تسمه و پولی صورت گرفت که محاسبات مربوط به این قسمت در ادامه تشریح شده است.



شکل ۶- مکانیزم لنگ و لغزنده سامانه ارتعاشی
(شامل: ۱- شفت ارتعاش ۲- یاتاقان ۳- شفت خارج از مرکز ۴- یاتاقان UCT ۵- میله رابط ۶- یاتاقان مفصلی)

Fig 6. Crank and slider mechanism of the vibration system (1. Vibration shaft 2. Bearing 3. Eccentric shaft 4. UCT bearing 5. Connecting rod 6. Rod-end bearing)

از آنجایی که دامنه ارتعاش یا طول نوسان یکی از مهم‌ترین موارد تاثیرگذار در کارایی سیستم الک و حرکت آزاد محصول روی سطح الک می‌باشد، این دامنه برای محصول بالنگو (محصول نمونه جهت ارزیابی ماشین در این پژوهش) ۱۰ میلی‌متر و فرکانس ارتعاش اولیه نیز با توجه به منابع اطلاعاتی موجود برای عملیات جداسازی سنگ‌ریزه از محصولی مانند بالنگو، مقدار ۱۰۰۰ rpm انتخاب گردید که این فرکانس به دلیل استفاده از یک واحد مبدل قابل تنظیم می‌باشد. گشتاور و توان ارتعاشی لازم با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (Vahedian, 2000; Valinejad, 2009). برای این منظور، جرم واحد ارتعاشی پس از طراحی در نرم‌افزار سالیدورک محاسبه شد و پس از اضافه کردن وزن مواد دانه‌ای به آن جرمی حدود ۱۵۰ کیلوگرم معادل ۱۵۰۰ نیوتن به دست آمد. سپس گشتاور مورد نیاز با استفاده از رابطه ۱ مقدار ۱۴/۷ نیوتن‌متر محاسبه شد.

$$T = mg \times d = 150 \times 9.8 \times 0.01 = 14.7\ N.m \qquad (۱)$$

که در این رابطه:

T : گشتاور واحد ارتعاشی (N.m)

m : جرم قسمت ارتعاشی (kg)

g : شتاب جاذبه (m/s^2)

d : طول نوسان الک (mm)

باتوجه به محاسبه گشتاور طبق رابطه ۱ و با در نظر گرفتن سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm با توجه به تحقیقات قبلی، توان مورد نیاز قسمت ارتعاشی با استفاده از رابطه ۲ مقدار ۲/۰۵ اسب بخار معادل ۱/۵۳ کیلووات محاسبه گردید.

$$P = \frac{T \times n}{9550} = \frac{14.7 \times 1000}{9550} = 1.53\ (kW) = 2.05\ (hp) \qquad (۲)$$

که در این رابطه:

P : توان مورد نیاز قسمت ارتعاشی (kW)

T : گشتاور واحد ارتعاشی (N.m)
n : سرعت دورانی شفت ارتعاش (rpm)

سپس با در نظر گرفتن ضریب اطمینان و توان‌های متداول الکتروموتورهای موجود در بازار، الکتروموتوری با توان ۳ اسب‌بخار معادل ۲/۲ کیلووات انتخاب شد.

برای طراحی شفت ارتعاش بایستی گشتاور پیچشی وارده از طرف الکتروموتور، دور دورانی انتقالی توسط شفت و جنس شفت معلوم باشد. چنانچه بیان شد بر اساس اطلاعات موجود در منابع دور مورد نیاز برای شفت ارتعاش ۱۰۰۰ rpm در نظر گرفته شد و توان الکتروموتور نیز مقدار ۳ اسب بخار معادل ۲/۲ کیلووات به‌دست آمد. با تبدیل دور موتور به فرکانس، مقدار فرکانس ارتعاش برابر با ۱۶/۶۶ هرتز به‌دست آمد. سپس با در نظر گرفتن توان موردنیاز الکتروموتور برابر با ۲/۲ کیلووات، گشتاور پیچشی وارد بر شفت با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد که مقدار آن برابر با ۲۱/۰۲ نیوتن‌متر به‌دست آمد (Vahedian, 2000).

$$T = \frac{P}{2\pi f} = \frac{2.2}{2\pi(16.66)} = 21.02\ N.m \quad (۳)$$

که در این رابطه:
T : گشتاور پیچشی شفت ارتعاش (N.m)
p : توان الکتروموتور (kW)
f : بسامد (Hz)

برای انتخاب جنس شفت، فولاد ST37 در نظر گرفته شد که دارای تنش تسلیم ۲۱۰ الی ۲۳۵ مگاپاسکال است. از آنجایی که حداکثر تنش برشی مجاز برابر با نصف تنش تسلیم باشد، مقدار تنش برشی مجاز با استفاده از رابطه ۴ برابر با ۱۱۷/۵ مگاپاسکال محاسبه گردید (Vahedian, 2000).

$$\tau_{max} = \frac{s_y}{2} = \frac{235}{2} = 117.5\ Mpa \quad (۴)$$

که در این رابطه:
τ_{max} :حداکثر تنش برشی (Mpa)
s_y : تنش تسلیم (Mpa)

سپس با جایگذاری گشتاور پیچشی و تنش برشی مجاز در رابطه ۵، مقدار $\frac{J}{C}$ برابر با $۱۷۸/۸۹\times۱۰^{-۹}\ m^۳$ به‌دست آمد (Vahedian, 2000).

$$\frac{J}{C} = \frac{T}{\tau_{max}} = \frac{21.2}{117.5} = 178.89 \times 10^{-9}\ m^3 \quad (۵)$$

که در این رابطه:
τ_{max} :حداکثر تنش برشی (Mpa)
T : گشتاور پیچشی شفت ارتعاش (N.m)
J : گشتاور دوم قطبی سطح (m^4)
c : شعاع شفت (mm)

با توجه به روابط هندسی مقطع دایره‌ای توپر (روابط ۶ و ۷) و مقدار $\frac{J}{C}$ به‌دست آمده از رابطه ۵، شعاع شفت برابر با ۴/۸۴ میلی‌متر محاسبه شد (Vahedian, 2000).

$$J = \frac{\pi c^4}{2} \quad (۶)$$

$$\frac{J}{C} = \frac{\pi c^3}{2} = 178.89 \times 10^{-9}\ m^3 \quad (۷)$$

$$c^3 = 113.94 \times 10^{-9}\ m^3$$

$$c = 4.84\ mm$$

که در این رابطه:
J : گشتاور دوم قطبی سطح (m^4)
c : شعاع شفت (mm)

در نتیجه قطر شفت طبق رابطه ۸ برابر با ۹/۶۸ میلی‌متر به‌دست آمد.

$$d = 2c = 9.68\ mm \quad (۸)$$

که در این رابطه:
c : شعاع شفت (mm)
d : قطر شفت (mm)

در نهایت با در نظر گرفتن ضریب اطمینان به مقدار ۳، قطر شفت برابر با ۳۰ میلی‌متر انتخاب گردید.

هم‌چنین طبق محاسبات انجام یافته (روابط ۹ تا ۱۱)، براساس آنچه در شکل ۷ آورده شده است، تسمه و پولی سامانه انتقال توان قسمت ارتعاشی نیز طراحی شد. از آنجایی که دور دورانی موتور (پولی محرک) ۱۴۱۰ rpm بوده و سرعت دورانی مورد نیاز ما در قسمت ارتعاشی (پولی متحرک) حدود ۱۰۰۰ rpm در نظر گرفته شده است، لذا با در نظرگرفتن پولی موتور به اندازه ۱۲۰ میلی‌متر، طبق رابطه ۹ قطر پولی شفت ارتعاش مقدار ۱۶۹/۲ میلی‌متر به‌دست آمد. لذا در ساخت ماشین از پولی با قطر ۱۸۰ میلی‌متر استفاده شد (Zarepour, Valinejad, 2009; 2013).

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = 1410 \times 120 = 1000 \times d_2 \quad (۹)$$

$$d_2 = 169.2\ mm$$

که در این رابطه:
$n_۱$: سرعت دورانی پولی محرک (mm)
$d_۱$: قطر پولی محرک (mm)
$n_۲$: سرعت دورانی پولی متحرک (mm)
$d_۲$: قطر پولی متحرک (mm)

طول تسمه نیز با توجه به فاصله مرکز به مرکز دو پولی از هم که بر اساس طراحی مکانیزم ۲۸۷ میلی‌متر و قطر پولی‌های محرک و متحرک به ترتیب ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌متر می‌باشد، با استفاده از رابطه ۱۰ مقدار ۱۰۴۸/۱ میلی‌متر معادل ۴۱/۲۶ اینچ به‌دست آمد (Valinejad, 2009 ; Zarepour, 2013).

$$L_P = 2C + \frac{\pi(d_2+d_1)}{2} + \frac{(d_2-d_1)^2}{4} = 2 \times 287 + \frac{\pi(180+120)}{2} + \frac{(180-120)^2}{4\times287} = 1048.1 \text{ mm} = 41.26 \text{ in} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه:

L_P : طول گام (mm)

C : فاصله مرکز به مرکز دو پولی (mm)

d_1 : قطر پولی محرک (mm)

d_2 : قطر پولی متحرک (mm)

با توجه به اینکه توان موتور الکتریکی مورد استفاده در سامانه تسمه‌پولی برابر با ۳ اسب بخار است و محدوده توان قابل انتقال توسط تسمه‌های نوع A در بازه ۰/۳۵ تا ۱۰ اسب بخار قرار دارد، تسمه نوع A برای این مجموعه انتخاب شد. برای تعیین طول تسمه، ابتدا طول گام تسمه محاسبه گردید. از آنجا که در تسمه‌های نوع A مقدار ۱/۳ اینچ به طول گام افزوده می‌شود، محیط داخلی تسمه با استفاده از رابطه ۱۱ مقدار ۳۹/۹۶ اینچ به‌دست آمد و در نتیجه تسمه استاندارد A40 برای این سامانه انتخاب گردید.

$$P_i = L_p - \gamma = 41.26 - 1.3 = 39.96 \text{ in} \quad (۱۱)$$

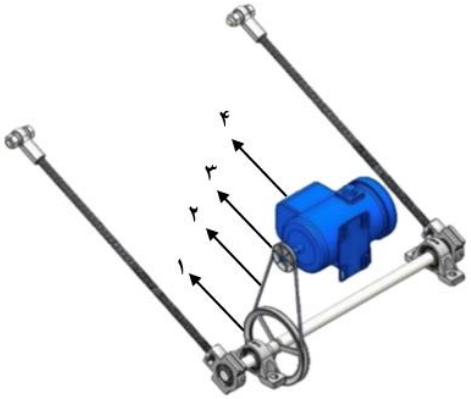
که در این رابطه:

P_i : محیط داخلی تسمه (in)

L_P : طول گام تسمه (in)

γ : مقدار اضافه شده (in)

مطابق شکل ۷، یک عدد الکتروموتور سه فاز با توان ۳ اسب‌بخار (۴ در شکل ۷) و دو عدد پولی به قطرهای ۱۸۰ و ۱۲۰ میلی‌متر (۱ و ۳ در شکل ۷) توسط تسمه انتقال توان از نوع A (۲ در شکل ۷) وظیفه انتقال توان لازم برای ارتعاش مجموعه الک به جرم کلی ۱۵۰ کیلوگرم را برعهده داشتند. برای تعیین بهترین تواتر ارتعاشی متناسب با نوع ماده جداشونده و ناخالصی‌های آن از یک واحد مبدل فرکانسی با توان ۳ اسب بخار و مدل iMaster U1 استفاده شد که این امکان را به وجود می‌آورد تا با تغییر فرکانس جریان ورودی بتوان به دورهای متفاوت شفت خروجی الکتروموتور و متناسب با آن به تواترهای متفاوتی از سیستم ارتعاشی دسترسی پیدا کرد. بنابراین از یک واحد مبدل تک فاز به سه فاز استفاده شد.



شکل ۷- سیستم انتقال توان از الکتروموتور به شاسی ارتعاشی (شامل: ۱- پولی متحرک ۲- تسمه ۳- پولی محرک ۴- الکتروموتور)

Fig 7. Power transmission system from the electric motor to the vibrating frame (1. Driven pulley 2. Belt 3. Driving pulley 4. Electric motor)

۶-۲- سامانه دمنده‌ها

مهم‌ترین عامل در راندمان جداسازی محصول دانه‌ای در میز ثقلی، تنظیم جریان هوای مناسب و متناسب با نوع ناخالصی‌ها و نیز کیفیت متفاوت دانه‌های موجود در توده دانه اصلی است. از طرف دیگر جداسازی ناخالصی‌های متعدد و نیز جداسازی دانه‌های متفاوت از نظر کیفی زمانی اتفاق می‌افتد که امکان تنظیم سرعت هوای دمیده شده در نقاط مختلف میز فراهم شود و جریان هوا در نقاط مختلف پایدار باشد (مناطق a، b و c در شکل ۱). در طراحی مکانیزم مورد نظر سه واحد دمنده در نظر گرفته شد.

برای محاسبه دبی دمنده‌ها ابتدا مساحت سطح غربال به مقدار ۱/۶۲ متر مربع محاسبه شد. سپس بر اساس اندازه‌گیری سرعت حد دانه‌های بالنگو و ناخالصی‌های همراه آن، حداکثر سرعت مورد نیاز در روی الک که بتواند محصول را به‌صورت معلق نگه دارد معادل ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. هم‌چنین در انتخاب دمنده‌ها، افت فشارهای ناشی از عبور هوا از میان محصول با توجه به کارهای تحقیقاتی قبلی مقدار ۲۰ پاسکال لحاظ شد تا دمنده‌ها قادر به تأمین دبی هوای یکنواخت و کافی پس از عبور از اجزای مختلف سامانه الک و نیز از داخل توده دانه باشند. طبق رابطه ۱۲ دبی کل با جایگذاری مساحت سطح غربال به مقدار ۱/۶۲ متر مربع و سرعت مورد نیاز به مقدار ۴ متر بر ثانیه، مقدار ۲۳۳۲۸ متر مکعب بر ساعت به‌دست آمد. از آنجایی که سطح الک به سه ناحیه مجزا با دبی‌های متفاوت نیازمند است، سطح کلی الک به سه بخش مساوی تقسیم شد و ظرفیت هر دمنده (براساس رابطه ۱۲)، معادل یک‌سوم دبی کل مورد نیاز یعنی مقدار ۷۷۷۶ متر مکعب بر ساعت محاسبه شد (Malekzadeh & Kashani Hesar, 2013).

$$Q = A \times V = 1.62 \times 4 = 6.48\ {}^{m^3}/_{s} = 23328\ {}^{m^3}/_{h} = \frac{23328}{3} = 7776\ {}^{m^3}/_{h} \quad (۱۲)$$

که در این رابطه:

A : مساحت سطح (m^2)

V : سرعت نهایی مورد نظر (${}^{m}/_{s}$)

Q : دبی (${}^{m^3}/_{hr}$)

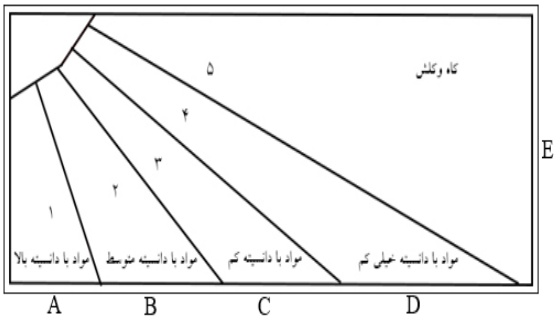
با توجه به افت فشار، محاسبات انجام شده و دمنده‌های موجود در بازار، برای تامین هوای مورد نیاز از سه عدد دمنده سانتریفیوژ دوطرفه با تیغه‌های رو به عقب با ظرفیت ۸۳۵۰ متر مکعب بر ساعت همراه با الکتروموتور ۱/۵ اسب بخار برای هر کدام از آن‌ها و در هر کدام از نواحی سه‌گانه (a، b و c در شکل ۱) استفاده شد (۵ در شکل ۱). از آنجایی که برای انجام صحیح جداسازی دانه‌ها از ناخالصی‌ها در ماشین جداکننده ثقلی، دبی دمنده‌ها در قسمت‌های ورودی، مرکزی و انتهایی صفحه مشبک باید متفاوت باشد، هر کدام از دمنده‌ها مستقلاً به یک واحد مبدل تک فاز به سه فاز مدل iMaster U1 با توان ۲ اسب بخار متصل شد تا بتوان سرعت دورانی محور دمنده و متناسب با آن دبی و سرعت جریان هوا برای هر دمنده را جداگانه تنظیم کرد.

۲-۷- واحد تخلیه

غالباً در جداکننده‌های ثقلی مسیر حرکت دانه‌ها و ناخالصی‌ها روی سیستم الک مطابق شکل ۸ می‌باشد. مطابق تجربیات موجود برای ساخت کانال‌های سیستم تخلیه از ورق فولادی ۱ میلی‌متری استفاده شد. به طوری که پس از خم‌کاری و جوش‌کاری، کانال‌های مورد نظر به شاسی مربوطه متصل شدند (۳ در شکل ۱). در بالای کانال‌ها از صفحات فولادی به ابعاد ۱۰۰ × ۳۲۰ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر به تعداد هفت عدد (۵ در شکل ۳) استفاده شد. نقش اصلی این صفحات در باز و بسته‌کردن مسیرهای عبور دانه و ناخالصی‌ها از روی الک به طرف خروجی‌های متعدد بود که میزان بازشدگی آن‌ها عملکرد جداسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که سیستم تخلیه دارای ۵ عدد کانال بود و هر کدام از آن‌ها محصول یا ناخالصی‌هایی با خصوصیات متفاوت جمع‌آوری می‌کند. به عنوان نمونه با تنظیم ماشین و پارامترهایی مانند سرعت باد، تواتر و شیب طولی و عرضی سعی می‌شود فقط در منطقه A سنگ‌ریزه جمع‌آوری شود و در منطقه B دانه‌های توپر و با دانسیته بالا که ارزش تغذیه‌ای و کیفی بالایی دارد جمع‌آوری شود و نهایتا در منطقه E صرفاً کاه و کلش و ناخالصی‌های بسیار سبک جمع‌آوری شود.

۲-۸- آزمون و ارزیابی ماشین

ماشین جداکننده ثقلی پس از طراحی و تکمیل فرآیند ساخت، تحت آزمون و ارزیابی قرار گرفت. تنظیمات اولیه برای این کار عبارت از تنظیم سرعت جریان باد توسط هر یک از دمنده‌ها به صورت مستقل از هم، تنظیم شیب عرضی و طولی براساس تجربه و داده‌های اولیه، تنظیم فرکانس ارتعاش سیستم الک با مبدل، تنظیم دبی خروجی دانه از مخزن و تنظیم زاویه قرارگیری ورق‌های کنترل‌کننده ماده خروجی به کانال‌های تخلیه بودند. بنابراین تنظیم بهینه این شش مشخصه به طور هم‌زمان بسیار سخت بوده و نیازمند تجربه بالایی بود.



شکل ۸- مسیر حرکت دانه‌ها روی الک

Fig 8. Seed trajectory on the screen

برای انجام آزمون و ارزیابی ماشین، حدود ۱۰ کیلوگرم بالنگوی ناخالص استفاده شد. بالنگو یک گیاه یکساله از گیاهان بومی ایران می‌باشد که امروزه مصرف دانه آن گسترش یافته است. در مناطق ایران از گذشته‌های دور برای تولید روغن از دانه‌های روغنی آن، استفاده می‌شود. این گیاه عمدتا برای استحصال روغن از دانه و مواد موثر موجود در دانه که از نوع اسانس و موسیلاژ است، کشت می‌شود. آنالیز کامل دانه‌های بالنگو شامل مقدار بالنگو خالص، درصد ناخالصی‌هایی مانند سنگ‌ریزه و کاه و کلش صورت گرفت. دانه‌های بالنگو در مخزن ماشین ریخته شدند و تنظیمات ماشین به‌صورت تجربی و براساس مشاهدات عینی، تاجایی تغییر داده شد که جداسازی مواد با دانسیته بالا مثل سنگ‌ریزه، مواد با دانسیته متوسط، کم و خیلی کم و کاه و کلش مطابق شکل ۸ به ترتیب از مناطق ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ صورت پذیرد. برای رسیدن به این هدف آزمایش‌ها چندین بار تکرار شد. با توجه به اینکه هدف اصلی در طراحی ماشین، جداسازی سنگ‌ریزه‌های موجود در توده دانه بود، بنابراین پس از اتمام عملیات جداسازی، مقدار سنگ‌ریزه‌های موجود در تمامی خروجی‌های ماشین اندازه‌گیری شد. تنظیمات تا حدی ادامه پیدا کرد که مقدار سنگ‌ریزه‌ها که دارای بالاترین دانسیته نسبت به بقیه مواد در توده دانه بود صرفاً در خروجی شماره ۱ رویت شود و در خروجی‌های ۲ تا ۵ مشاهده نشود. با این حال چون مقدار کل سنگ‌ریزه‌ها در توده دانه ۱۰ کیلوگرمی بالنگو از قبل مشخص بود، بنابراین راندمان عملکرد ماشین با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه شد (Valinejad, 2009). بدین‌صورت برای مقادیر مختلف شش مشخصه اصلی مذکور در بالا، ماشین آزمون شد و مقدار

راندمان برای هر کدام از حالت‌ها با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه و مناسب‌ترین تنظیم به دست آمد.

$$\eta = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \qquad (۱۳)$$

η: بازده ماشین (٪)

m_1: جرم سنگ‌ریزه جداشده از خروجی شماره ۱ (گرم)

m_2: جرم سنگ‌ریزه موجود در توده دانه در مخزن (گرم)

برای سایر ناخالصی‌ها هم همانند سنگ‌ریزه عمل شد.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۹ نمای کلی ماشین جداکننده ثقلی ساخته شده همراه با کیسه‌های جمع‌آوری محصولات تفکیک‌شده نشان داده شده است. مشخصات و ابعاد ماشین در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۹- ماشین جداکننده ثقلی ساخته شده (خروجی‌های ۱ الی ۵ ترتیب خروج مواد بر اساس بیشترین دانسیته تا کم‌ترین دانسیته می‌باشد)

Fig 9. Fabricated gravity separator machine (Outlets 1 to 5 discharge the seeds in order from highest to lowest density)

ماشین جداکننده ثقلی ساخته‌شده دارای سه منطقه سرعتی و سه عدد دمنده گریز از مرکز می‌باشد که روی شاسی اصلی نصب شده که دور دورانی موتور محرک دمنده و در نتیجه دبی و سرعت جریان هوا توسط سه عدد مبدل قابل تنظیم می‌باشد. مکانیزم لنگ و لغزنده، عمل ارتعاش الک بالایی ماشین را توسط یک الکتروموتور با توان ۳ اسب بخار انجام می‌دهد که میزان تواتر ارتعاش به‌وسیله مبدل قابل تنظیم بوده و دامنه ارتعاش آن ۱۰ میلی‌متر است. قسمت بالایی ماشین از یک الک با مش سیمی به قطر سیم و نیز چشمه ۱ میلی‌متر تشکیل شده است. با توجه به اینکه دانسیته مواد مختلف در توده دانه بالنگو متفاوت بوده و میزان دبی خروجی هوا در هر دمنده متفاوت می‌باشد، لذا همراه با ارتعاش ماشین و شیب‌های طولی و عرضی آن به ترتیب روی ۲/۲۴ و ۴/۷۹ درجه، مواد مختلف موجود در توده دانه شامل سنگ‌ریزه، کاه و کلش و دانه‌ها با دانسیته زیاد و کم، مسیرهای مختلفی را طی کرده و بر اساس دانسیته آن‌ها، از خروجی‌های مختلف شامل ۱ تا ۵ (شکل ۹) تخلیه شدند. هم‌چنین میزان دبی ورودی مواد به سطح الک قابل تنظیم می‌باشد.

الکتروموتورهای استفاده‌شده در این ماشین همگی از نوع سه‌فاز بودند که به منظور استفاده از برق شهری، از مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز استفاده شد. استفاده از مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز، علاوه بر حل مشکل عدم دسترسی به برق سه‌فاز در برخی از مناطق روستایی، مزیت دیگری نیز دارد که آن، امکان تنظیم دقیق دور موتور دمنده‌ها و فرکانس سامانه ارتعاشی بود. با استفاده از این مبدل‌ها، می‌توان دور موتورها را به راحتی و با دقت بالا تنظیم کرد که این امر برای بهبود عملکرد و کارایی ماشین ضروری است.

جدول ۱- مشخصات فنی ماشین ثقلی جداکننده ثقلی ساخته شده

Table 1. Technical specifications of the fabricated gravity separator machine

مقادیر Values	مشخصات Specifications
220	ولتاژ مورد استفاده در ماشین(ولت) Operating Voltage of the Machine (V)
3	تعداد دمنده‌ها Number of blowers
1.5	قدرت الکتروموتور دمنده (اسب بخار) Blower electric motor power (hp)
3	قدرت الکتروموتور سامانه ارتعاشی (اسب بخار) Vibration system electric motor power (hp)
4	تعداد مبدل تک‌فاز به سه‌فاز Number of single-phase to three-phase inverters
450	ظرفیت ماشین برای بالنگو (کیلوگرم در ساعت) Machine capacity for Lallemantia Iberica seeds (kg/h)
590	جرم کلی ماشین (کیلوگرم) Total machine mass (kg)
146×90×180	طول، عرض و ارتفاع (سانتی‌متر) Length, width, and height (cm)
8350	دبی هر دمنده (متر مکعب در ساعت) Airflow rate of each blower (m^3/h)
20	فشار (پاسکال) Pressure (Pa)
5	تعداد خروجی محصول Number of Product Outlets

مخزن تغذیه دارای ابعاد ۸۰۰×۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر بود که جنس آن از ورق فولادی به ضخامت یک میلی‌متر انتخاب شد. به منظور تسهیل جریان‌پذیری دانه از خروجی مخزن، قسمت انتهایی آن به صورت شیب‌دار با زاویه شیب ۶۰ درجه ساخته شد. با توجه به اینکه به دلیل وجود مکانیزم ارتعاشی احتمال پرتاب دانه موجود روی الک به خارج از ماشین وجود داشت، برای جلوگیری از این پدیده، فاصله انتهای خروجی مخزن تا الک، ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. Safarzadeh (1993) نیز یک واحد ماشین بوجاری ترکیبی شامل الک بوجاری و ماشین تسمه نقاله جاذبه‌ای برای جداسازی ناخالصی‌های دانه گشنیز ساخت. برای قسمت ورودی محصول یک مخزن از نبشی و ورق‌های فولادی یک میلی‌متری به ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر طراحی کرد. او برای حذف گرد و خاک ایجاد شده، از یک واحد هواکش در بالای مخزن استفاده کرد تا حین ورود مواد به مخزن گرد و خاک موجود در آن‌ها توسط مکنده جمع‌آوری شود.

سیستم الک از مش سیمی از جنس فولاد با اندازه چشمه و قطر یک میلی‌متر ساخته شد که انتخاب آن با توجه به سه بعد بالنگو صورت گرفت. این صفحه طوری نصب شده است که قابل تعویض می‌باشد که بر اساس اندازه دانه‌های تحت جداسازی، بتوان نوع الک از نظر اندازه منافذ و شکل منافذ را تغییر داد. اما ورق مشبک تحتانی به عنوان اسکالپر، ثابت می‌باشد. هم‌چنین برای کنترل خروج مواد و کنترل عملکرد سامانه در جداسازی مواد مختلف، چندین صفحه قابل تنظیم در محیط الک و ورودی به کانال‌های خروجی تعبیه شد که زاویه استقرار آن‌ها قابل تغییر در نظر گرفته شده تا بتوان به عملکرد بهتر ماشین و راندمان بالای جداسازی دست یافت.

ارتعاش مورد نیاز برای جداسازی دانه‌ها از ناخالصی‌ها، توسط مکانیزم لنگ و لغزنده ایجاد شد که سیستم نسبتاً ارزان قیمت و ساده‌ای است. از آنجایی که برای جداسازی محصولات دانه‌ای در ماشین‌های جداکننده ثقلی، قسمت ارتعاشی باید در دو جهت طولی و عرضی دارای شیب مناسب باشد، این ماشین نیز به صورت شیب‌دار قابل تنظیم ساخته شد که بر اساس نوع دانه تحت بوجاری می‌توان مقادیر آن را تغییر داد. مشخصات قسمت ارتعاشی ماشین در جدول ۲ آورده شده است. Safarzadeh (1993) نیز در ساخت ماشین بوجاری ترکیبی شامل الک بوجاری و ماشین تسمه نقاله جاذبه‌ای برای گشنیز از مکانیزم لنگ و لغزنده خارج از مرکز برای ایجاد ارتعاش استفاده کرد و شعاع لنگی را ۵/۴۵ میلی‌متر در نظر گرفت.

جدول ۲- مشخصات سامانه ارتعاشی الک ماشین جداکننده ثقلی
Table 2. Specifications of the sieve vibration system of the gravity separator machine

مقادیر Values	مشخصات Specifications
3	توان الکتروموتور (اسب بخار) Electric motor power (hp)
3	توان مبدل (اسب بخار) Inverter power (hp)
5	شعاع لنگی (میلی‌متر) Eccentric radius (mm)
30	قطر شفت (میلی‌متر) Shaft diameter (mm)
A40	نوع تسمه انتقال توان Type of power transmission belt
120	قطر پولی متصل به الکتروموتور(میلی‌متر) Diameter of the pulley attached to the electric motor (mm)
180	قطر پولی متصل به شفت ارتعاش (میلی‌متر) Diameter of the pulley attached to the vibration shaft (mm)

۱-۳- نتایج مربوط به آزمون و ارزیابی ماشین

ارزیابی ماشین با مقدار ۱۰ کیلوگرم بالنگو که بر اساس آزمون‌های قبلی دارای ۱۸۶ گرم سنگ‌ریزه بود صورت گرفت. بالاترین راندمان جداسازی در شیب‌های طولی و عرضی به ترتیب ۲/۲۴ و ۴/۷۹ درجه و در سرعت هوای خروجی از منطقه اول سرعتی روی الک سیمی برابر ۳/۹ متر بر ثانیه و در دو منطقه سرعتی بعدی به ترتیب ۳ و ۲/۳ متر بر ثانیه حاصل شد. در تنظیمات مذکور، مقدار سنگ‌ریزه خارج شده از خروجی اول ماشین که مختص مواد با دانسیته بالا مانند سنگ‌ریزه می‌باشد، حدود ۱۸۲ گرم بود و بازده جداسازی ماشین ۹۷/۸ درصد محاسبه شد. این میزان بازده نشان‌دهنده کارایی بالای ماشین در جداسازی ناخالصی‌ها و بهبود کیفیت محصولات است. بدیهی است در صورت دسترسی به ماده اولیه در تناژ بالا و تداوم کار ماشین و تنظیم دقیق‌تر آن، امکان حصول راندمان‌های بالا هم وجود دارد.

این عملکرد بالا در جداسازی ناخالصی مانند سنگ‌ریزه می‌تواند در قیمت فروش بالنگو و نیز محصولات بعدی تولیدی از آرد بالنگو تاثیر زیادی داشته باشد و کیفیت محصولات تولیدی را بالا ببرد که در حال حاضر به دلیل دستی بودن جداسازی سنگ‌ریزه، این عملیات هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و قیمت نهایی محصول بالنگو را بالا می‌برد. در صورت استفاده از این ماشین در بوجاری سایر محصولات دانه‌ای، بهبود کیفیت محصولات کشاورزی، کاهش سختی کار و افزایش سودآوری تولیدکنندگان را به همراه خواهد داشت. این امر به ویژه در مواردی که درصد خلوص دانه‌های کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد، بسیار تاثیرگذار است که می‌توان به صنایع غذایی وابسته به دانه‌های خوراکی مختلف،

حبوبات، دانه‌های بذری و غیره اشاره کرد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، این ماشین یک گزینه مناسب و کارآمد برای بوجاری دانه‌های مختلف مانند انواع بذور، حبوبات و دانه‌های دارویی از جمله بالنگو می‌باشد.

Aghaazizi et al. (2020) با استفاده از جداکننده ثقلی شرکت وستراپ، یولاف وحشی را از گندم با بازده ۷۰/۴۷ درصد جدا کردند. که در مقایسه با عملکرد ماشین حاضر که سنگ‌ریزه را از بالنگو با ۹۷/۸ درصد جدا می‌کند رقم پائینی می‌باشد. Rasekh et al. (2005) جداسازی گندم سن‌زده و گندم سالم که دارای اختلاف در دانسیته هستند را با استفاده از یک ماشین جداکننده ثقلی انجام دادند و بازده عملکرد ماشین را حدود ۹۵ درصد اعلام کردند. عملیات جداسازی یولاف وحشی از گندم در مقایسه با جداسازی سنگ‌ریزه از دانه‌های بالنگو که بسیار ریزتر و سبک‌تر از گندم هستند آسان‌تر می‌باشد. Kashi (2010) جداسازی یولاف وحشی از گندم را به وسیله یک ماشین جداکننده ثقلی مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که در شیب عرضی ۱ درجه، شیب طولی ۴ درجه، سرعت هوای ۵/۷ متر بر ثانیه، فرکانس نوسان ۴۵۰ سیکل بر دقیقه و دامنه نوسان ۷ میلی‌متر، بیشترین راندمان جداسازی به مقدار ۵۶/۲۴ درصد حاصل شد که عدد بسیار پایینی است. Rojati Nojehdeh (2021) نیز از یک دستگاه جداکننده ثقلی برای جداسازی ضایعات از توده تخمه کدوی آجیلی استفاده کرد که در شیب عرضی ۲/۵ درجه، شیب طولی ۰/۵ درجه، تواتر نوسان ۶۰۰ سیکل بر دقیقه و سرعت باد ۰/۵ متر بر ثانیه بیشترین درصد جداسازی به مقدار ۹۹/۸۷ درصد به‌دست آمد. Abdzadeh (2022) جداسازی ناخالصی‌های ذرت را با دستگاه جداکننده ثقلی مورد بررسی قرار داد. او به این نتیجه رسید که بیشترین درصد جداسازی ناخالصی‌ها با مقدار ۷۶/۲۷ درصد، در شیب طولی ۲/۵ درجه، شیب عرضی ۴/۲۵ درجه، سرعت باد ۲/۷۵ متر بر ثانیه و تواتر نوسان ۶۰۰ سیکل بر دقیقه حاصل شد.

ماشین جداکننده ثقلی مورد استفاده در تحقیقات ذکر شده، برخلاف ماشین موجود در پژوهش حاضر که از سه دمنده بهره می‌برد، تنها مجهز به یک دمنده می‌باشد. این تفاوت در تعداد دمنده‌ها منجر به محدودیت عملکردی قابل توجهی در ماشین‌های تحقیقات قبلی شده است؛ به‌طوری‌که آن‌ها قادر به جداسازی کامل تمام اجزای موجود در توده دانه‌ها نبوده و تنها می‌توانند توده محصول را به دو بخش مجزا تقسیم کنند. در مقابل، ماشین حاضر با داشتن پنج خروجی مجزا، امکان تفکیک و جداسازی مواد مختلفی از قبیل دانه‌های بالنگوی توخالی و توپر، سنگ‌ریزه، کاه و کلش و سایر دانه‌ها را فراهم می‌آورد که این امر، توانایی و دقت جداسازی را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

ناخالصی‌های موجود در هر توده دانه، پس از انجام عملیات بوجاری اولیه با استفاده از الک منفرد و صرفاً براساس اندازه ذرات، به طور کامل حذف نشده و باعث کاهش ارزش توده محصول می‌شوند. جداسازی این ناخالصی‌ها با روش دستی و توسط کارگر هزینه‌بر و دشوار بوده و در گاهی موارد امکان‌پذیر نمی‌باشد که می‌توان به انواع بذور ریز مانند خاک‌شیر، بالنگو اشاره کرد. بنابراین هدف از این تحقیق، طراحی و ساخت ماشینی بود که بتواند عملیات جداسازی ناخالصی از محصول دانه‌ای را در بالاترین بازده ممکن و در یک مرحله و با استفاده از یک ماشین منفرد انجام دهد و در عین حال از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیز باشد. برای این منظور، یک ماشین جداکننده ثقلی با پنج خروجی متفاوت و با ظرفیت ۴۵۰ کیلوگرم در ساعت، با ابعاد ۱۴۶×۹۰×۱۸۰ سانتی‌متر و جرم حدود ۵۹۰ کیلوگرم طراحی و ساخته شد. ارزیابی اولیه عملکرد ماشین در جداسازی دانه‌های بالنگو از سنگ‌ریزه نشان داد که ماشین مذکور، می‌تواند با راندمان بالایی به مقدار ۹۷/۸ درصد ناخالصی ریز مانند سنگ‌ریزه را از دانه‌های بالنگو جدا کند. این ماشین قابلیت بوجاری و تفکیک انواع محصولات دانه‌ای را دارد، به شرطی که تنظیمات متناسب با هر نوع دانه و ناخالصی‌های مرتبط آن تنظیم شود. تنظیم کلیه مشخصات عملکرد ماشین و نیز امکان قابلیت تعویض آسان الک با مش سیمی آن این امکان را به کاربران می‌دهد که با تغییر آن‌ها، ماشین را برای جداسازی انواع دانه‌ها به طور سریع و موثر آماده کنند.

منابع

Abdzadeh, A. (2022). *Investigation on the separation of corn grain bulk impurities with gravity table separator apparatus* .Master's thesis. Mohaghegh Ardabili University. (In Persian).

Aghaazizi, S., Rasekh, M., Abbaspour Gilandeh, Y., & Kianmehr, M. H. (2020). *Investigation on the separation of wheat bulk impurities with a gravity separator table.* Iranian Journal of Biosystems Engineering (Iranian Journal of Agricultural Sciences), 51(1), 161–170. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.272069.665138.

Bagheri, H., Rasekh, M., & Kianmehr, M. H. (2017). *Using of dimensional analysis to determine the parameters of a gravity separator table device to minimize impurities in bulk lentils.* Journal of Agricultural Machinery, 7(1), 247–259. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.47484.

Chakraverty, A., & Poul, S. R. (2001). *Postharvest Technology: Cereals, Pulses and Vegetables*. India: Science Publishers. Inc, 183–188.

Kashi, M. (2010). *Investigation of the Possibility of wild oat (Avena sativa) separation from wheat by gravity separator apparatus*. Master's thesis. Mohaghegh Ardabili University. (In Persian).

Malekzadeh, G. R., Kashani Hesar, M. H. (2013). *Fluid Mechanics*. 9th edition, Nama & Jahan-Farda, Mashhad. 696 pp. (In Persian).

Panasiewicz, M., Sobczak, P., Mazur, J., Zawiślak, K., & Andrejko, D. (2012). *The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials.* Journal of Food Engineering, 109(3), 603-608. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.010.

Patil, S. K., & Bansod, S. V. (2014). *Study the effects of some parameters on seed grading in gravity separator.* International Journal of Engineering Research and Technology, 3(01).

Pourazarang, H. & Ziaolhagh, H. (2008). Unit operations of agricultural processing. Iran, Ferdowsi University Press, Publicatuon No. 50.

Rasekh, M., Tavakoli, T., Firouzabadi, B., & Kianmehr, M. H. (2005). *Experimental studying of performance of gravity separator apparatus in separation of sunn pest-damaged wheat.* Iranian Journal of Food Science and Technology, 2(3), 33–47. (In Persian).

Rojati Nojehdeh, N. (2021). *Study of the parameters affecting the separation of foreign matters from lentils by gravity table separator.* Master's thesis. Mohaghegh Ardabili University. (In Persian).

Shekari Shishvan, A. (2019). *Feasibility of mechanized sorting for Lallenmantia Iberica seeds in industrial scale and introducing the suitable mechanism of separating*. Master's thesis. University of Tabriz. (In Persian).

Safarzadeh, D. (1993). *Design and construction method of a coriander seed cleaning machine*. Master's thesis. University of Tehran. (In Persian).

Umarani, R., & Vanangamudi, K. (2002). *The effect of specific gravity separation on germination and biochemical potential of Casuarina equisetifolia seeds.* Journal of Tropical Forest Science, 14(2), 207-212. https://doi.org/10.29321/MAJ.10.A00100.

Vahedian, A. (2000). *Mechanics of materials*. 2nd edition, Nashr-e Oloum-e Daneshgahi, Tehran. 532 pp. (In Persian).

Valinejad, A. (2009). *Tabellenbuch Metall*. Tarrah, Tehran. 430 pp. (In Persian).

Wu, S., Sokhansanj, S., Fang, R., & Opoku, A. (1999). *Influence of physical properties and operating conditions on particle segregation on gravity table.* Applied Engineering in Agriculture, 15(5), 495. https://doi.org/10.13031/2013.5809.

Yayock, E. S., Shebayan, J., & Bature, B. J. (2020). Development of a grain cleaning machine for sorghum and millet. *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 9(7), 35–42. https://doi.org/10.35629/6734.

Zarepour, G. R. (2013). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 9th edition, Danesh Negar, Tehran. 888 pp. (In Persian).