J. Agric. Mech., 11 (2):73-81 (2026)

Journal of
Agricultural Mechanization

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

Original Article

Design and Development of a Black Tea Rolling Machine Using the Orthodox Method

Mostafa Mahdavi[1], Mohsen Azadbakht[1]*, Ahmad Abbaszadeh Mayvan[1]

1.Department of Biosystems Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

ARTICLE INFO

Keywords:
Black Tea,
Design,
Household Processing,
Orthodox Method,
Rolling Machine.

Received:
2025-12-04

Revised:
2026-09-21

Accepted:
2026-09-22

***Corresponding Author**
azadbakht@gau.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objectives

The Iranian tea industry, historically a significant agricultural sector, has faced progressive decline due to structural challenges, including technological obsolescence, monopolistic marketing systems, and limited accessibility of modern processing equipment for smallholder farmers. A critical bottleneck lies in the rolling stage, a decisive phase in Orthodox black tea production that directly influences leaf morphology, enzymatic oxidation, and final sensory quality. Existing industrial rolling machines predominantly require three-phase electricity, operate at large batch capacities (typically >100 kg), and are economically and technically inaccessible to rural households. Consequently, most small-scale growers are forced to sell raw green leaves at low prices, foregoing value addition and fair profit margins. This study was undertaken to design, simulate, fabricate, and evaluate a low-cost, single-phase, household-scale black tea rolling machine based on the Orthodox method, specifically tailored for rural tea farmers in northern Iran. The primary objectives were: (1) to enable on-farm processing using only 220 V single-phase grid power; (2) to replicate the leaf curling and minimal fragmentation characteristic of hand-rolled Orthodox tea; (3) to ensure structural integrity through finite element analysis; and (4) to quantify improvements in processing time, product quality, and economic feasibility compared to conventional methods.

Materials and Methods

The development process integrated field observation, mechanical design, computational simulation, and empirical validation. Initial design requirements were established through field visits to tea processing factories in Gilan Province and consultations with industry technicians and farmers. A prototype with a 10 kg batch capacity was conceptualized and modeled in SolidWorks 2022, incorporating key components: a rotating perforated cylinder (31 cm internal diameter, 45 cm height), a crank–rocker mechanism for variable rotational motion, a removable perforated pressure plate, and a modular steel frame. The drive system consisted of a 0.75 kW (1 HP) single-phase induction motor, a B-type industrial belt, and a worm gearbox (VF-N 62, ratio 1:19) to deliver sufficient torque at low speed. To calibrate processing parameters, three pressure levels (7.4 kg, 20.2 kg, and 45.9 kg) were applied via calibrated weights, corresponding to surface pressures of 100, 270, and 600 kg/m²—aligned with literature-reported optimal ranges

How to cite:
Mahdavi, M., Azadbakht, M. and Abbaszadeh Mayvan, A. (2026). *Design and Development of a Black Tea Rolling Machine Using the Orthodox Method.* Journal of Agricultural Mechanization, 11(2): 73-81. https://doi.org/10.22034/jam.2026.70539.1348

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

for Orthodox rolling. Structural validation was performed using finite element analysis (FEA) in Abaqus 2021. Critical load-bearing components—gusset plates, the triangular crank-mounted plate, the cylinder support belt, and the pressure cylinder—were subjected to simulated operational loads (up to 51.3 kg force). Material properties of ST37 mild steel were assigned (density: 7850 kg/m³, Young's modulus: 210 GPa, Poisson's ratio: 0.3). Additionally, torque requirements were determined experimentally: the minimum force needed to initiate rotation of a 10 kg fresh tea load was measured using a pulley–weight system, yielding a baseline for motor selection. The final prototype was fabricated in the university workshop using standardized industrial practices, with safety features including an emergency stop and a protective crank guard.

Results

FEA results demonstrated exceptional structural robustness: the maximum von Mises stress was 9.233 MPa, maximum strain was 3.051 με, and maximum displacement was 0.062 mm—all significantly below the yield strength of ST37 steel (235 MPa), ensuring a safety factor exceeding 25. Torque analysis confirmed that the selected motor and transmission system (delivering ~0.55 kgf·m at the crank) comfortably met the experimental requirement of 9.8 N per kg of fresh tea. Performance evaluation revealed that the machine successfully produced Orthodox-style rolled tea with uniform leaf curling, minimal fragmentation (<5%), and preserved leaf integrity, closely matching hand-rolled reference samples in appearance. Sensory assessments by trained panelists indicated that tea processed at 20.2 kg pressure (270 kg/m²) yielded the most desirable aroma and flavor profile—rich, floral, and less astringent than factory-processed CTC tea—aligning with findings from Heping et al. (2015). Crucially, the device reduced processing time from 40 minutes (manual rolling) to 25 minutes, while operating solely on 220 V single-phase electricity. Material optimization indicated that 4 mm steel sheets were optimal for gusset plates and the crank plate, 3 mm for the cylinder belt, and 2 mm for the pressure cylinder, with a 21 mm hole diameter ensuring secure fastening.

Conclusion

This study successfully developed and validated a practical, affordable, and technically sound household-scale Orthodox black tea rolling machine. By enabling smallholder farmers to process their own tea using accessible single-phase power, the device directly addresses core challenges of value retention, technological exclusion, and economic marginalization in Iran's tea sector. The machine not only replicates traditional hand-rolling quality but also enhances efficiency and consistency. It represents a scalable model for decentralized, sustainable agro-processing that empowers rural producers, reduces post-harvest losses, and revitalizes local craftsmanship. Future work should focus on full automation, integration with withering and drying units, and quantitative chemical analysis (e.g., theaflavin content) to further validate quality enhancements. This innovation holds significant potential for replication in other tea-producing regions facing similar constraints.

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



مقاله پژوهشی

طراحی و ساخت دستگاه مالش چای سیاه به روش ارتدکس

مصطفی مهدوی[۱]، محسن آزادبخت[*۱]، احمد عباس زاده مایوان[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

* نویسنده مسئول: E-mail: azadbakht@gau.ac.ir

چکیده

صنعت چای ایران در سال‌های اخیر با چالش‌های متعددی از جمله انحصار تولید، فرسودگی ماشین‌آلات و عدم دسترسی کشاورزان به فناوری‌های مناسب مواجه است. یکی از مهم‌ترین مراحل فرآوری چای سیاه، مرحله مالش‌به روش ارتدکس است که در دستگاه‌های موجود عمدتاً با برق سه‌فاز و در مقیاس صنعتی انجام می‌شود و برای کاربری خانگی مناسب نیست. در این پژوهش، یک دستگاه مالش چای سیاه با ظرفیت ۱۰ کیلوگرم، مبتنی بر روش ارتدکس و قابل استفاده در شرایط خانگی (با برق تک‌فاز ۲۲۰ ولت) طراحی و ساخته شد. طراحی مفهومی دستگاه با الهام از ماشین‌آلات صنعتی و با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز ۲۰۲۲ انجام گرفت. برای اطمینان از استحکام سازه، تحلیل تنش با روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس ۲۰۲۱ انجام و ضخامت بهینه ورق‌های فولادی (۲ تا ۴ میلی‌متر) تعیین شد. سیستم محرکه شامل موتور القایی ۰/۷۵ کیلوواتی، گیربکس حلزونی با نسبت ۱:۱۹ و سیستم لنگی-شفت برای ایجاد حرکت دورانی متغیر طراحی گردید. همچنین، سه سطح فشار (۷/۴، ۲۰/۲ و ۴۵/۹ کیلوگرم) بر اساس استانداردهای علمی اعمال شد تا شرایط بهینه مالش شبیه‌سازی گردد. نتایج نشان داد که دستگاه قادر به تولید چایی با کیفیت حسی و فیزیکی قابل‌مقایسه با روش دستی است، در حالی که هزینه و زمان فرآوری را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. این دستگاه می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد برای توانمندسازی کشاورزان و ایجاد کارگاه‌های کوچک خانگی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: ارتدکس، چای سیاه، دستگاه مالش، طراحی، فرآوری خانگی.

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

۱- مقدمه

گیاه چای با نام علمی کاملیا ساینسیس (*Camellia sinesis*) یکی از پرمصرف‌ترین نوشیدنی‌های مورد استفاده در کشورهای مختلف است (Schroth et al., 2004). تاریخچه چای بر اساس شواهد تاریخی به پنج هزار سال پیش مربوط است (Pan et al., 2022). تاریخ دقیق مصرف چای در ایران مشخص نیست؛ اما آن را می‌توان به حدود دو هزار سال پیش نسبت داد (Safarinejad, 2007). بر اساس آمار منتشر شده در وبسایت سازمان فائو، تا حدود سال‌های ۱۳۸۰ شمسی، ایران جزو پنج تولیدکننده برتر چای در جهان بوده است؛ اما متاسفانه به دلیل مشکلات بسیار صنعت چای، در سال‌های اخیر نیز رتبه ایران جزو ۱۰ کشور برتر تولیدکننده چای در جهان وجود ندارد. بر اساس تحقیقات، برخی از مشکلات صنعت چای ایران ناشی از انباشت چای‌های سنواتی، عدم اتخاذ راهبرد پایدار و بلند مدت، نبود مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح در تولید و بی‌توجهی در امر به‌زراعی و به‌نژادی باغات چای و رهاسازی باغات چای به دلیل سیاست‌گذاری‌های نادرست است (Abdolmohammadi et al., 2020). همچنین بررسی‌ها نشان داده که گیلان نسبت بـه کـشورهای هند و امارات متحده عربی به عنوان صادرکننده‌های چای بـه ایران، دارای مزیت نسبی و از نظر صادرات نسبت به کشورهای انگلـستان، تاجیکـستان، ترکمنستان، ازبکستان، افغانستان و اوگاندا دارای برتری نسبی است (Amanat et al., 2018). همچنین پیشنهاد شده است که با یک برنامه چند ساله در مورد افزایش کیفیت چـای و به‌سازی و نوسـازی باغ‌هـای چـای، هزینه‌های تولید تا حد امکان کاهش پیدا کند تا از یک سو قیمـت فـروش چـای داخلـی افزایش یافته و از سوی دیگر با کاهش هزینه‌های واقعی تولید، سبب افـزایش مزیـت نـسبی و قدرت رقابتی آن در مقابل چای خارجی شود (De Wolf, 2013). بخش اصلی بوته چای از نظر اقتصادی و بهره‌برداری را برگ سبز آن تشکیل می‌دهد (Mano Raj, 2021). یک شاخه از چای دارای ۲۳ درصد ماده خشک و ۷۷ درصد آب است. نیمی از این مواد به صورت محلول در آب و نیم دیگر آن غیرمحلول در آب هستند (Senica et al., 2019). نحوه چیده شدن برگ چای بر کیفیت آن تاثیرگذار است (Zhang et al., 2023). بهترین نحوه چیدن برگ چای به کمک دست کشاورز است. سرعت برداشت برگ چای با استفاده از دست پایین و زمان برداشت آن زیاد است. در این روش به برگ چای آسیبی وارد نخواهد شد. پس از چیده شدن، برگ‌های چای می‌بایست به سرعت به کارخانه انتقال داده شود. به همین سبب، عموم کارخانه‌های چای نزدیک باغ‌های چای ساخته شده است (Babu et al., 2018). مراحل تولید چای سیاه شامل برداشت، پلاس[۱]، مالش[۲]، اکسیداسیون (تخمیر) و خشک‌کردن است. هر مرحله می‌تواند به دو روش دستی و مکانیزه انجام می‌شود (Pou et al., 2019). پس از برداشت چای، عمل پژمرده ساختن (مرحله پلاس) برگ‌های چای به منظور خروج آب و رطوبت انجام خواهد شد. مرحله پلاس سبب جلوگیری از شکسته شدن برگ چای در مرحله مالش و فعال‌سازی آنزیم‌های برگ و افزایش کافئین آن خواهد شد (Battle, 2017).

به منظور انجام مرحله پلاس برگ، چندین روش وجود دارد. یکی از روش‌های سنتی پلاس، پهن‌کردن برگ چای بر روی حصیر بامبو و قرارگیری در هوای آزاد و طبیعی است. روش دیگر، انتقال برگ چای به کارخانه و نوار نقاله و محفظه‌های بزرگ (تراف) است. محفظه تراف به یک مکعب مستطیل و توری مشابه است. برگ چای بر روی این توری به طور یکنواخت قرار گرفته خواهد شد. در این روش، جریان هوا از زیر این محفظه جریان پیدا خواهد کرد. به طور معمول این مرحله بین ۱۲ تا ۲۴ ساعت زمان لازم خواهد داشت و ۶۰ تا ۷۰ درصد از رطوبت برگ کم خواهد شد (Kumar et al., 2013). در مرحله مالش چای به منظور ایجاد تغییرات شیمیایی ناشی از اکسیدشدن می‌بایست دیواره‌های سلول برگ‌های متلاشی شود. به منظور این کار لازم است برگ چای از حالت عادی خارج و له شود (Dietz et al., 2017). عمل له‌کردن برگ به وسیله مالش انجام خواهد شد. وابسته به شرایط، برگ‌های چای بین ۲۰ تا ۴۰ دقیقه مالش داده خواهند شد. برگ‌های لطیف ۱ بار مالش داده خواهد شد و به مرحله بعد خواهد رفت؛ اما برگ ضخیم و بزرگ، ممکن است تا ۳ مرتبه مالش داده شود. در این بین بعضی از قطعات شکسته شده صاف و برخی دیگر به دلیل لطافت و جوان بودن پیچ خورده خواهند شد (Zee et al., 2003). در ادامه نیز به منظور ثابت شدن خصوصیات چای و جلوگیری از اکسیداسیون بیش از حد، برگ چای باید حرارت دیده و خشک شود. حرارت سبب تخریب آنزیم‌های مسئول در اکسیداسیون چای خواهد شد. رطوبت چای می‌بایست تا ۳ درصد کاهش یابد (Ahmed et al., 2013). در مرحله مالش ترکیبات پلی فنلی از سلول‌های برگ خارج شده و در مجاورت آنزیم پلی فنل اکسیداز و اکسیژن هوا، اکسید می‌شوند و ترکیبات شیمیایی مورد نیاز جهت تولید عطر و طعم را به وجود می‌آورند (Frenkel et al., 2018). روش مرسوم مالش چای در ایران، روش ارتدکس[۳] است که در آن برگ‌های چای به صورت کامل‌تر حفظ شده و چای تولیدی دارای عطر و طعم پیچیده‌تری است. در مقابل، روش سی‌تی‌سی[۴] برگ‌ها را خرد، پاره و پیچ می‌دهد که منجر به تولید چای دانه‌ریز با رنگ تیره و دم‌آوری سریع‌تر می‌شود. در مرحله اکسیداسیون، چای مالش داده شده به روش ارتدکس، به مدت ۱۵۰ دقیقه تخمیر می‌شود و در مرحله بعد برگ‌ها با جریان هوای گرم خشک خواهد شد (Battle, 2017). امروزه صنعت چای کشور با مشکلات بسیاری دست و پنجه نرم می‌کند. مشکلاتی نظیر انحصار در تولید چای و همچنین نبود ماشین‌آلات به‌روز مانند دستگاه‌های خشک و مالش، نبود برنامه ریزی صحیح در تولید و همچنین عدم توجه دولت به مسائلی مانند به‌زراعی و به‌نژادی باغات چای، تنها بخشی از مشکلات

---

[۱] Wilting
[۲] Tea Rolling
[۳] Orthodox
[۴] Curl Tear Crush

صنعت چای ایران است (Liu, 2020). دستگاه‌های مالش چای به روش ارتدکس در ایران معایب بسیاری دارند که با بررسی‌های میدانی انجام شده مشخص شده است که بزرگ‌ترین معایب آن‌ها نبود معیاری به منظور دور گردش استوانه چای، فاصله استوانه از سطح آجها، فشار وارده بر روی چای و طراحی نامناسب آجها بوده است (Purkait et al., 2023). در تحقیقی توسط هپینگ و همکاران، (۲۰۱۵) به بررسی تنظیم بهینه دستگاه غلطکی چای بشکه‌ای بر اساس مدل سازی غلطکی چای پرداخته شد. در این تحقیق سنتز منحنی غلطکی مشترک فشار و دور دیسک غلطکی به عنوان یک حالت بهینه‌سازی محدب فرموله شده بود که می‌تواند به طور موثر با روش‌های عددی موجود حل شود. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که دستگاه غلطکی چای بشکه‌ای که دارای محدودیت دور قابل تنظیم ۶۰ رادیان بر دقیقه، حد فشار قابل تنظیم ۸۰۰ نیوتن و قطر بشکه ۵۵۰ میلی‌متر است. همچنین زمانی که وزن چای نورد بین ۵۰۰ گرم تا ۴۰۰۰ گرم باشد، میزان شکستن چای کمتر از ۱۰ درصد است.

هدف از انجام این تحقیق، طراحی و ساخت دستگاه مالش چای به عنوان یکی از اصلی‌ترین بخش‌ها در روند فرآوری چای سیاه است. استفاده از دستگاه مالش چای برای کشاورزان بسیار پر سود بوده و می‌توانند محصول خود را فرآوری و بدون واسطه به فروش برسانند. همچنین سعی می‌شود محصول نهایی بدست آمده از این دستگاه، کیفیتی مطلوب‌تر از چای کارخانه‌ای داشته باشد و عطر و طعمی مشابه با چای مالش داده شده با دست را دارا باشد. برای رسیدن به این فاکتورها، در طراحی و ساخت این دستگاه به مواردی همچون قیمت تمام شده، امکان استفاده در منازل مسکونی و با برق شهری مورد توجه قرار خواهد گرفت و کیفیت محصول نهایی نیز از نظر خواص شیمیایی و کیفیت حسی با چای کارخانه‌ای مقایسه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، با هدف طراحی و ساخت یک دستگاه خانگی مالش چای سیاه به روش ارتدکس، ابتدا پس از بررسی میدانی کارخانه‌های فرآوری چای در منطقه گیلان و مصاحبه با کارشناسان صنعت چای، نیازمندی‌های فنی و عملیاتی یک دستگاه مالش کوچک‌مقیاس شناسایی شد. معیارهای کلیدی شامل کارکرد با برق تک‌فاز (۲۲۰ ولت)، ظرفیت مناسب برای کاربری خانگی (۱۰ کیلوگرم)، و توانایی تولید محصولی با کیفیت حسی و شیمیایی مشابه روش دستی یا صنعتی ارتدکس در نظر گرفته شد.

۲-۱- طراحی مفهومی و مدل‌سازی سه‌بعدی

طراحی اولیه دستگاه با الهام از دستگاه‌های صنعتی مالش چای مدل ارتدکس انجام گرفت. مدل سه‌بعدی دستگاه در نرم‌افزار سالیدورکز ۲۰۲۲ توسعه یافت. این مدل شامل اجزای اصلی زیر بود (شکل ۱ و ۲ و ۳):

استوانه بارگیری چای (قطر داخلی ۳۱ سانتی‌متر، ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر)

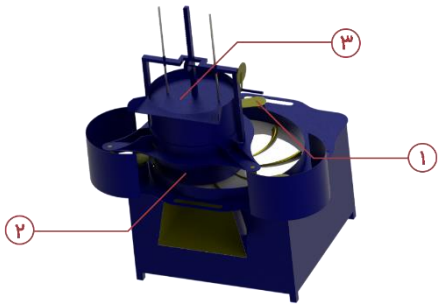
سیستم لنگی-شفت برای ایجاد حرکت دورانی متغیر

صفحه فشار قابل تنظیم با وزنه‌های استاندارد

شاسی فلزی و سازه نگهدارنده



شکل ۱- دستگاه مالش صنعتی مدل ارتدکس
Fig 1. Orthodox industrial grinding machine



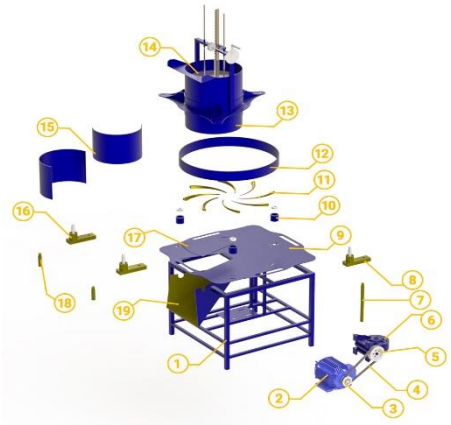
شکل ۲- دستگاه مالش ده کیلویی طراحی شده با سالیدورک
(۱.لنگی ۲.استوانه بارگیری چای ۳.صفحه فشار روی چای)

Fig 2. Ten-kilogram rubbing machine designed with SolidWorks
(1. Crank, 2. Tea loading cylinder, 3. Pressure plate on tea)



شکل ۳- دستگاه ساخته شده نهایی
Fig 3. Final built device

همچنین طراحی انفجاری دستگاه به صورت شکل ۴ است.



شکل ۴- طراحی انفجاری دستگاه مالش چای

(۱. پایه دستگاه، ۲. الکتروموتور سه فاز ۱ اسب، ۳. فولی متصل به موتور، ۴. تسمه سری B، ۵. فولی متصل به گیربکس، ۶. گیربکس حلزونی vf-n 62، ۷. شفت خروجی از گیربکس و متصل به لنگی محرک، ۸. لنگی محرک، ۹. صفحه کف متصل روی پایه، ۱۰. بوش نگهدارنده بلبرینگ، ۱۱. آج‌های برنجی، ۱۲. حلقه کف(جلوگیری از خروج چای)، ۱۳. استوانه بارگیری چای، ۱۴. صفحه فشار روی چای، ۱۵. محافظ لنگی (جلوگیری از برخورد لنگی به بدن)، ۱۶. لنگی‌های متحرک، ۱۷. دریچه خروج چای، ۱۸. شفت لنگی‌های محرک، ۱۹. پاکت خروج چای)

Fig 4. Exploded view of the tea rubbing machine

(1. Machine base, 2. Three-phase electric motor, 1 HP, 3. Pulley connected to the motor, 4. B-series belt, 5. Pulley connected to the gearbox, 6.Worm gearbox VF-N 62, 7. Output shaft from the gearbox, connected to the driving crank, 8. Driving crank, 9. Base plate mounted on the base, 10. Bearing retaining bushing, 11. Brass jaws, 12. Bottom ring (to prevent tea from escaping), 13. Tea loading cylinder, 14. Pressure plate on the tea, 15. Crank guard (to prevent the crank from hitting the body), 16. Moving cranks, 17. Tea outlet valve, 18. Shaft of the driving cranks, 20. Tea outlet pocket)

۲-۲- تحلیل تنش و انتخاب ضخامت ورق‌ها

به‌منظور اطمینان از استحکام سازه تحت بارهای عملیاتی، مدل سه‌بعدی دستگاه (به‌ویژه اجزای تحت تنش شامل لچکی‌ها، صفحه مثلثی لنگی‌ها، کمربند استوانه و استوانه فشار) در نرم‌افزار آباکوس ۲۰۲۱ مورد تحلیل المان محدود[1] قرار گرفت. خواص مکانیکی فولاد سیاه (چگالی: ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته: ۲۱۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون: ۰/۳) به مدل اختصاص یافت. بارگذاری بر اساس حداکثر نیروی عملیاتی (معادل ۵۱/۳ کیلوگرم نیرو بر روی صفحه فشار) و گشتاور اعمالی از سوی موتور شبیه‌سازی شد.

بر اساس نتایج تحلیل، ضخامت بهینه ورق‌های فولادی به‌شرح زیر انتخاب گردید:

۴ میلی‌متر برای لچکی‌ها و صفحه مثلثی لنگی‌ها

۳ میلی‌متر برای کمربند استوانه

۲ میلی‌متر برای استوانه فشار

قطر سوراخ‌های اتصال: ۲۱ میلی‌متر (با در نظر گرفتن ضریب ایمنی مناسب)

۲-۳- انتخاب سیستم محرکه و محاسبات گشتاور

سیستم محرکه دستگاه شامل یک الکتروموتور القایی تک‌فاز با توان ۰/۷۵ کیلووات (۱ اسب بخار) و سرعت خروجی ۱۴۰۰–۱۵۰۰ دور بر دقیقه است. این توان بر اساس گشتاور مورد نیاز برای چرخش استوانه حاوی ۱۰ کیلوگرم چای تازه انتخاب شد. موتور از طریق یک تسمه صنعتی نوع B به یک گیربکس حلزونی (مدل VF-N 62) با نسبت انتقال ۱:۱۹ متصل شده است. این نسبت گیربکس سرعت خروجی مناسب را برای فرآیند مالش چای تأمین می‌کند. محور خروجی گیربکس به لنگی محرک دستگاه جفت گردید.

گشتاور مورد نیاز برای چرخش استوانه حاوی ۱۰ کیلوگرم چای تازه، از طریق آزمایش عملی تعیین شد: استوانه با چای پر شد و با استفاده از سیستم وزنه‌ای و قرقره، حداقل نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک و شروع حرکت اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که نیروی مورد نیاز حدود ۹/۸ نیوتن به ازای هر کیلوگرم چای است. با در نظر گرفتن طول بازوی لنگی (۱۰/۵ سانتی‌متر)، گشتاور مورد نیاز محاسبه و با احتساب نسبت گیربکس و فولی‌ها (فولی موتور: ۶ اینچ، فولی گیربکس: ۱۴ اینچ)، موتور مناسب انتخاب شد.

۲-۴- سیستم اعمال فشار و تنظیم پارامترهای فرآوری

جهت شبیه‌سازی فشار بهینه گزارش‌شده در ادبیات (۳۴۰ کیلوگرم بر متر مربع؛ هپینگ و همکاران، ۲۰۱۵)، سه سطح فشار با استفاده از وزنه‌های استاندارد اعمال گردید. با توجه به سطح مقطع استوانه (۷۶۰ سانتی‌متر مربع)، وزنه‌های معادل ۷/۴، ۲۰/۲ و ۴۵/۹ کیلوگرم (با در نظر گرفتن وزن ذاتی صفحه فشار: ۵/۴ کیلوگرم) طراحی و مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۵- ساخت و مونتاژ نمونه عملیاتی

پس از تأیید طراحی با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار Solidworks، نمونه اولیه دستگاه در کارگاه‌های دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ساخته و مونتاژ شد. تمامی اتصالات با پیچ و مهره‌های استاندارد صنعتی انجام گرفت و سیستم ایمنی (شامل محافظ لنگی و کلید قطع اضطراری) نیز در نظر گرفته شد.

---

[1] FEM

۲-۶- آزمون حسی

آزمون حسی به روش چشایی شامل تعیین امتیاز رویت آیا از روش هدونیک استفاده شده اگر بله مقیاس چند تایی است؟، رنگ، تفاله، عطر و طعم توسط ده نفر متخصص در زمینه مالش و تولید چای انجام گرفت. در تعیین امتیاز رویت، میزان پیچیدگی، یکدستی و مشکی بودن ذرات چای خشک و عدم وجود ضایعات دارای اهمیت بوده است. منظور از رنگ، میزان شفافیت و پررنگ بودن نوشابه حاصل از دم کردن چای است. هر کدام از موارد میزان پیچیدگی، یکدستی و مشکی بودن ذرات چای خشک، عدم وجود ضایعات، شفافیت و پررنگ بودن نوشابه دارای امتیازی معادل با عدد ۱ تا ۵ قرار داده شد. به طوریکه بهترین میزان هر فاکتور در نمونه توانست نمره ۵ را به خود اختصاص دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبات گشتاور و انتخاب سیستم محرکه

نتایج آزمایش‌های عملی نشان داد که برای چرخش استوانه حاوی ۱۰ کیلوگرم چای تازه، نیرویی معادل ۹/۸ نیوتن به ازای هر کیلوگرم چای مورد نیاز است. با در نظر گرفتن طول بازوی لنگی (۱۰/۵ سانتی‌متر)، گشتاور مورد نیاز به‌صورت زیر محاسبه شد:

با احتساب نسبت گیربکس حلزونی (۱:۱۹) و نسبت فولی‌ها (۱۴:۶)، گشتاور مورد نیاز در خروجی موتور به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. این مقدار با گشتاور خروجی یک الکتروموتور القایی تک‌فاز ۰/۷۵ کیلوواتی معادل۰/۵۵ kgf·m سازگار بود. این انتخاب نه‌تنها از نظر فنی کافی است، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر از موتورهای سه‌فاز است و امکان استفاده در منازل روستایی را فراهم می‌کند.

۳-۲- سیستم اعمال فشار و تطبیق با استانداردهای بین‌المللی

با توجه به سطح مقطع استوانه (760 cm^2)، برای اعمال فشارهای معادل ۱۰۰، ۲۷۰ و ۶۰۰ kg/m^2 (بر اساس محدوده گزارش‌شده در ادبیات)، وزنه‌هایی معادل ۷/۴، ۲۰/۲ و ۴۵/۹ کیلوگرم (با احتساب وزن ذاتی صفحه فشار: ۵/۴ کیلوگرم) طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد، امکان بررسی تأثیر فشار بر کیفیت نهایی چای را فراهم کرد. نتایج حسی نشان داد که فشار ۲۷۰ kg/m^2 (معادل ۲۰.۲ کیلوگرم وزنه) نزدیک‌ترین نتیجه را به روش دستی ارائه می‌دهد، که با یافته‌های Heping et al. (2015) در مورد فشار بهینه 340~ (kg/m^2)همخوانی دارد (تفاوت جزئی ناشی از تفاوت در رطوبت برگ و سرعت مالش است).

۳-۳- تحلیل استحکام سازه و اعتبارسنجی نرم‌افزاری

تحلیل المان محدود در نرم‌افزار Abaqus نشان داد که حداکثر تنش معادل ۹/۲۳۳ مگاپاسکال، حداکثر کرنش ۳/۰۵۱ μεو حداکثر جابجایی ۰/۰۶۲ میلی متر است. این مقادیر به‌مراتب پایین‌تر از حد تسلیم فولاد کربنی (235 MPa) ST37هستند و ضریب ایمنی بیش از ۲۵ را تضمین می‌کنند. این یافته، اعتبار طراحی مکانیکی دستگاه را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که دستگاه قادر به تحمل بارهای عملیاتی با حاشیه ایمنی مناسب است.

۳-۴- مقایسه کیفیت محصول نهایی

نمونه‌های تولیدی با چای حاصل از روش دستی و چای کارخانه‌ای از نظر ظاهر، عطر، طعم و رنگ مقایسه شدند. نتایج نشان داد که چای تولیدی توسط دستگاه ساخته‌شده:

- از نظر ظاهر، برگ‌هایی با خمیدگی یکنواخت و حداقل خردشدگی دارد،
- از نظر عطر و طعم، غنی‌تر از چای کارخانه‌ای و نزدیک به روش دستی است،
- از نظر اقتصادی، زمان فرآوری را از ۴۰ دقیقه (دستی) به ۲۵ دقیقه کاهش می‌دهد.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که دستگاه نه‌تنها از نظر فنی موفق عمل کرده، بلکه ارزش افزوده اقتصادی و کیفی قابل‌توجهی برای کشاورزان ایجاد می‌کند.

۳-۵- آزمون نرم افزاری

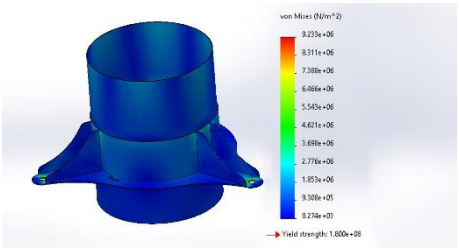
پس از اعمال پارامترها و شرایط مناسب، مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شد. با در نظر گرفتن شرایط تجربی نتیجه شد که اطلاعات حاصل از نرم‌افزار آباکوس، انطباق زیادی با نتایج تجربی داشته است. خروجی‌های نرم‌افزار به صورت جدول ۱ و شکل ۵ بیان شده است.

بر طبق نتایج، استفاده از ورق سیاه آهن با ضخامت ۴ میلی‌متر برای لچکی‌ها و صفحه مثلثی قرارگرفته بر روی لنگی‌ها مناسب بوده است. همچنین استفاده از ورق ۳ میلی‌متری برای کمربند و ورق ۲ میلی‌متری برای استوانه فشار دستگاه مناسب ارائه شده است. از طرفی قطر سوراخ‌ها به اندازه ۲۱ میلی‌متر مورد تایید بوده است. همچنین به منظور پیش‌بینی تسلیم مواد تحت بارگذاری پیچیده از نتایج آزمایش‌های کششی تک محوری استفاده شد.

جدول ۱- نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری دستگاه

Table 1. Results from the device software analysis

حداکثر تنش von Mises (نیوتن بر مترمربع) Maximum von Mises stress (Newtons per square meter)	حداکثر کرنش Maximum strain	حداکثر جابجایی (میلی متر) Maximum displacement (mm)
$9.233\times10^{+6}$	3.051×10^{-6}	6.215×10^{-2}



شکل ۵- تحلیل میزان تنش تسلیم به کمک نرم افزار آباکوس

Fig 5. Yield stress analysis using Abaqus software

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک دستگاه مالش چای سیاه به روش ارتدکس با ظرفیت خانگی (۱۰ کیلوگرم)، قابلیت کار با برق تک‌فاز، و قابلیت تنظیم پارامترهای فرآوری (فشار، زمان، سرعت) طراحی و ساخته شد. نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری و آزمایش‌های عملی تأیید کرد که دستگاه از استحکام کافی برخوردار بوده و قادر به تولید چایی با کیفیت حسی مطلوب است. این فناوری می‌تواند به‌عنوان یک راهکار اقتصادی و فنی برای توانمندسازی کشاورزان چای‌کار، کاهش وابستگی به واسطه‌ها و افزایش سودآوری در سطح خانوار مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، امکان اتوماسیون کامل دستگاه و ارزیابی کیفیت چای با روش‌های شیمیایی (مانند آنالیز کاتشین‌ها و تئافلاوین‌ها) مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

Abdolmohammadi, P., Cama, G., Abdolmohammadi, P., & Cama, G. (2020). *The Main Institutional and Social Players in Iran.* Contemporary Domestic and Foreign Policies of Iran, 89–127. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45336-7_4.

Ahmed, S., & Stepp, J. R. (2013). *Green tea: The plants, processing, manufacturing and production.* Tea in Health and Disease Prevention. 2, 19–31. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384937-3.00002-1.

Amanat, A., & Ashraf, A. (2018). *The Persianate world: Rethinking a shared sphere.* 18, Brill. https://doi.org/10.1163/9789004387287.

Babu, A. K., Kumaresan, G., Raj, V. A. A., & Velraj, R. (2018). *Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, 536–556. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.002.

Battle, W. (2017). *The World Tea Encyclopaedia: The world of tea explored and explained from bush to brew.* Troubador Publishing Ltd.

De wolf, C. (2013). *Lessons learned and opportunities for scaling-up of successful models of value chain development for smallholder coffee, cocoa and tea. World Bank.* May, 30.

Dietz, C., & Dekker, M. (2017). *Effect of green tea phytochemicals on mood and cognition.* Current Pharmaceutical Design, 23(19). https://doi.org/2876–2905. 10.2174/1381612823666170105151800.

Frenkel, C., Ranadive, A. S., Vázquez, J. T., & Havkin-Frenkel, D. (2018). *Curing of vanilla. Handbook of Vanilla Science and Technology*, 191–221. https://doi.org/10.1002/97811193773 20.ch13.

Kumar, R. S. S., Murugesan, S., Kottur, G., & Gyamfi, D. (2013). *Black tea: The plants, processing/manufacturing and production.* Tea in Health and Disease Prevention, 5, 41–57. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384937-3.00004-5.

Liu, A. B. (2020). Tea War: *A History of Capitalism in China and India.* Yale University Press. https://doi.org/10.12987/yale/9780300243734.001.0001.

Mano Raj, S. J. (2021). *Branding of green tea leaf: a disruptive innovation for building market competitiveness of small tea growers in North East India.* Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies, 11(2), 88–104. https://doi.org/10.1108/JADEE-09-2019-0145.

Pan, S.-Y., Nie, Q., Tai, H.-C., Song, X.-L., Tong, Y.-F., Zhang, L.-J.-F., Wu, X.-W., Lin, Z.-H., Zhang, Y.-Y., & Ye, D.-Y. (2022). *Tea and tea drinking: China's outstanding contributions to the mankind.* Chinese Medicine, 17(1), 1–40. https://doi.org/10.1186/s13020-022-00571-1.

Pou, K. R. J., Paul, S. K., & Malakar, S. (2019). *Industrial processing of CTC black tea. In Caffeinated and cocoa based beverages.* Woodhead Publishing. 131–162. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815864-7.00004-0.

Purkait, M. K., Haldar, D., & Debnath, B. (2023). *Technological Advancements in Product Valorization of Tea Waste. Elsevier.*

Safarinejad, M. R. (2007). *Adult urolithiasis in a population-based study in Iran: prevalence, incidence, and associated risk factors.* Urological Research, 35(2), 73–82. https://doi.org/10.1007/s00240-007-0084-6.

Schroth, G., Harvey, C. A., & Vincent, G. (2004). *Complex agroforests: their structure, diversity, and potential role in landscape conservation.* Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Island Press, Washington, DC, 227–260.

Senica, M., Mlinsek, G., Veberic, R., & Mikulic-Petkovsek, M. (2019). *Which plant part of purple coneflower (Echinacea purpurea (L.) Moench) should be used for tea and which for tincture?* Journal of Medicinal Food, 22(1), 102–108. https://doi.org/10.1089/jmf.2018.0026.

Zee, F., Sato, D., Keith, L., Follett, P., & Hamasaki, R. T. (2003). *Small-scale tea growing and processing in Hawaii.*

Zhang, X., Wu, Z., Cao, C., Luo, K., Qin, K., Huang, Y., & Cao, J. (2023). *Design and operation of a deep-learning-based fresh tea-leaf sorting robot.* Computers and Electronics in Agriculture, 206, 107664. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107664.