

## Design, Manufacture, and Optimization of a Micro-Gasifier Biomass Cook Stove

MOHAMMADREZA RASOULKHANI<sup>1</sup>, MOHAMMADALI EBRAHIMI-NIK<sup>2\*</sup>, MOHAMMAD HOSSEIN ABBASPOUR-FARD<sup>3</sup>, ABBAS ROHANI<sup>4</sup>

1. MSc. of Recycling and Resources Management, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

4. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

(Received: Feb. 4, 2018- Revised: May. 8, 2018- Accepted: May. 20, 2018)

### ABSTRACT

In international development programs on improvement of energy supply for cooking in remote regions, where people are dependent on wood as the sole fuel resource, biomass cook stoves have a remarkable place. The thermal efficiency of such stoves are up to 3 times of those of traditional open fire stoves. In this research, a biomass cook stove was manufactured and evaluated according to the emission and performance test protocol. The fire power of the stove was 1.4 kW, and flaming duration by feeding 400 g of pistachio shell was recorded to be 26 minutes. In order to improve the pyrolysis vapor combustion process, a damper was embedded in the stove, and also the outer wall of the stove was isolated by using a ceramic layer. Results showed that the control index was improved by three folds. Also, burning duration increased up to 57% and the emission of carbon monoxide was found to be in the permissible range.

**Keywords:** Biomass cook stove, Thermal efficiency, Optimization, Carbon monoxide, Microgasifier

---

\* Corresponding Author's Email: ebrahimi-nik@um.ac.ir

## طراحی، ساخت و بهینه‌سازی یک اجاق زیست توده سوز میکروگازیفایر جریان طبیعی

محمدرضا رسول‌خانی<sup>۱</sup>، محمدعلی ابراهیمی نیک<sup>۲\*</sup>، محمدحسین عباسپور فرد<sup>۳</sup>، عباس روحانی<sup>۴</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
  ۲. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
  ۳. استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
  ۴. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۲/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۲/۳۰)

### چکیده

در برنامه‌های توسعه‌ای بین‌المللی در زمینه بهبود تأمین انرژی پخت‌وپز مناطق دور که وابسته به هیزم هستند، اجاق‌های زیست‌توده‌سوز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. اینگونه اجاق‌ها بازده حرارتی حدوداً سه برابری نسبت به اجاق‌های سنتی دارند. در این پژوهش، یک اجاق زیست‌توده سوز میکروگازیفایر ساخته شد و ارزیابی اجاق ساخته شده با استفاده از پروتکل آزمون آلاینده‌گی و عملکرد انجام گرفت. طی این ارزیابی‌ها توان حرارتی اجاق ساخته شده ۱/۴ کیلووات و زمان شعله‌دهی با ۴۰۰ گرم پوست پسته ۲۶ دقیقه بود. در ادامه، یک دریچه کنترل جریان‌های اولیه در راستای بهبود فرآیند احتراق بخارات پیرولیزی تعبیه شد و همچنین با استفاده از یک لایه سرامیکی، دیواره بیرونی میکروگازیفایر عایق‌بندی شد. نتایج نشان‌داد که بهینه‌سازی انجام شده باعث افزایش شاخص نسبت کنترل تا میزان سه برابر شده است. همچنین مدت زمان بهره‌دهی نیز به‌طور متوسط تا ۵۷ درصد افزایش یافت و میزان انتشار مونواکسیدکربن نیز در محدوده‌ی مجاز ارزیابی شد.

**واژه‌های کلیدی:** اجاق زیست‌توده سوز، بازده حرارتی، بهینه‌سازی، مونواکسیدکربن، میکروگازیفایر

### مقدمه

در کشورهای حوزه خلیج‌فارس به خاطر غنی بودن این مناطق از منابع نفت و گاز، استفاده از انرژی زیست توده به‌صورت کم‌رنگ دنبال می‌شود. بنابراین، برای استفاده از این‌گونه انرژی‌ها، هزینه پایین پروژه یکی از شروط اصلی اجرا و دوام آن خواهد بود. اگرچه در دهه‌های اخیر، فناوری گازیفیکاسیون و پیرولیز زیست توده از توجه بیشتری برخوردار شده‌اند اما، کماکان استحصال انرژی از زیست توده به روش سوزاندن به دلایلی از قبیل هزینه پایین و در دسترس بودن همیشگی، از جمله رایج‌ترین روش‌ها است (Mallaki & Fatehi, 2014). الگوهای استفاده جاری و اینچینی، مسبب تأثیرات منفی غیرقابل‌چشم‌پوشی زیادی نظیر صدمات و مرگ‌ومیر انسان‌ها، آلودگی‌های زیست‌محیطی، تغییرات آب‌وهوایی و از بین رفتن جنگل‌ها شده است (Champier et al., 2010; Lertsatitthanakorn et al., 2014). از طرفی استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث افزایش خطرناک‌ترین تهدید زیست محیطی یعنی انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است، به‌طوری‌که بررسی‌ها نشان می‌دهد که مجموع انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از به کارگیری سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۱۰ با افزایش ۳۳ درصدی نسبت به سال ۲۰۰۰، به ۳۳/۱ گیگا تن رسیده است (Nejat et al., 2013). بنا به این دلایل، با افزایش

اجاق‌های دودیواره و روش‌های سنتی سه‌سنگی<sup>۱</sup> که با اشتعال ضعیف از بدوی‌ترین روش‌های استفاده از زیست‌توده هستند، آلاینده‌گی بالا و بازدهی پایینی را به دنبال دارند (Edwards et al., 2003). از جالب‌ترین روش‌ها برای جایگزینی با این روش‌های قدیمی و کم‌بازده اجاق‌های زیست‌توده‌سوز هستند (Lertsatitthanakorn et al., 2014). به گازیفایرهایی که هم از نظر ارتفاع و هم از نظر اندازه به‌میزان کافی کوچک هستند تا یک ظرف معمول پخت‌وپز را بر روی خود جای دهند میکروگازیفایر گفته می‌شود (Roth, 2011). میکروگازیفایرها یکی از طرح‌های مورد استفاده برای ساخت اجاق‌های زیست‌توده‌سوز بوده و با به‌کارگیری اصول گازیفیکاسیون، نسبت به روش‌های سنتی، بازدهی بالا و آلاینده‌گی پایینی را به دنبال دارند (Sutar et al., 2015). بهینه‌سازی صورت گرفته در این اجاق‌ها همچنین تمرکز شعله را به دنبال دارد که همین امر سبب بالا رفتن بیشتر بازده حرارتی اجاق‌های میکروگازیفایر، نسبت به روش‌های سنتی می‌شود (Raman et al., 2013).

\* نویسنده مسئول: ebrahimi-nik@um.ac.ir

1. Three Stone Fire

این اجاق‌ها که با ارتفاع‌های مختلف ساخته شده بودند براساس ارتفاع دودکش، اجاق ۲۵، اجاق ۳۰ و ۳۵ نام‌گذاری شده و بیان‌کننده اثر ارتفاع دودکش بوده و بر اساس استاندارد آزمون جوشاندن آب<sup>۲</sup> مورد ارزیابی قرار گرفتند. هوای اولیه در این مطالعه از طریق یک مکانیزم کشویی متغیر از قسمت تحتانی اجاق و چند حفره جانبی تأمین می‌شد. طی این ارزیابی، بیشترین زمان بهره‌دهی برای اجاق ۲۵ در حالتی که دهانه تأمین هوا در وضعیت ۵۰ و ۷۵ درصد بود به مدت ۲۸ دقیقه گزارش شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که باز بودن دهانه تأمین هوا باعث افزایش نرخ مصرف سوخت و همچنین زیاد بودن نرخ هوای ورودی به محفظه احتراق باعث افزایش واکنش‌های احتراق می‌شود.

(Sornek *et al.*, 2016) با طراحی و به کارگیری یک سیستم کنترل هوای اتوماتیک، میزان ورود هوا به محفظه‌ی احتراق را براساس آنالیز گاز خروجی و درصد اکسیژن و مونواکسیدکربن موجود در آن تحت کنترل گرفتند. تمرکز این پژوهش بر تاثیر کنترل هوا در میزان کاهش مونواکسیدکربن بود. ایشان طی نتایج خود گزارش کردند که تغییرات کوچک دریچه‌ی هوا که در پایین، مرکز و قسمت فوقانی اجاق قرار داشته است، به طور حتم نقش کلیدی در تأمین هوای لازم برای تأمین یک احتراق کامل را دارد به طوری که تأمین مناسب هوای مورد نیاز فرایند احتراق میزان انتشار مونواکسیدکربن در فاز احتراق را تا ۷۶ درصد کاهش داده است.

(Carvalho *et al.*, 2018) از یک اجاق زیست‌توده سوز مجهز به یک دریچه مکانیکی که امکان کنترل هوای اولیه ورودی به سیستم را از محل پایین اجاق میسر می‌کند استفاده کردند. این تحقیق نشان داد با کنترل جریان هوای ورودی به سیستم، مصرف سوخت را می‌توان تا ۳۸ درصد کاهش داد. همچنین استفاده از سیستم کنترل جریان به دلیل پیش‌گرم کردن نسبی هوای ورودی می‌تواند باعث افزایش ۲۱ درصدی بازدهی حرارتی اجاق شود. ایشان همچنین اذعان داشتند که در کنار جنبه‌های عملکردی و اقتصادی، از لحاظ آلاینده‌ی نیز تاثیرات کنترل جریان هوا را مشاهده کردند. طی گزارش ایشان کنترل جریان هوای ورودی توانست تا ۳۹ درصد میزان انتشار CO را کاهش دهد.

هدف از مطالعه حاضر ساخت یک اجاق میکروگازیفایر بدون دود، مناسب برای کار با پوست پسته بود. چنین اجاقی برای مناطق پسته‌خیز کشور می‌تواند بخشی از نیاز به

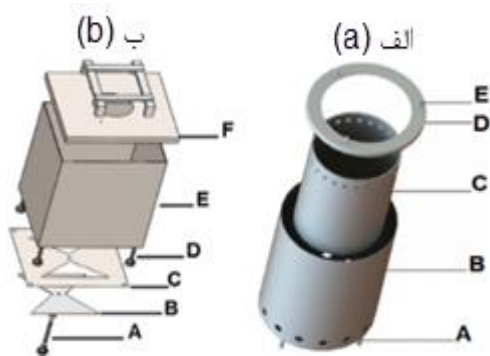
تقاضا برای تبدیل پسماندها به انرژی، محققین زیادی به‌طورجدی درگیر تحقیق در روش‌های استفاده از پسماندهای کشاورزی به‌عنوان سوخت هستند (Lertsatitthanakorn *et al.*, 2014). باوجود غنای ایران در منابع سوخت‌های فسیلی همواره مشکل دسترسی همگانی به سوخت و تأمین دائمی آن یکی از چالش‌های مهم پیش‌رو به‌خصوص در روستاها و مناطق دورافتاده و یا برای عشایر کوچ‌نشین بوده است. در کنار این موضوع، بارها دیده شده که به‌دلایلی از جمله بارش برف و باران و یا سیل و یا زلزله، با قطع شدن محورهای مواصلاتی، دسترسی به برخی مناطق دورافتاده کاملاً محدود می‌شود. براساس بررسی‌های انجام‌شده در کشور ایران نیز با توجه به تأمین زیست‌توده در برخی نقاط، این امکان وجود دارد تا استفاده از اجاق‌های زیست‌توده‌سوز میکروگازیفایر که وسیله‌ای مناسب برای به‌کارگیری فناوری گازیفیکاسیون در مقیاس خانگی هستند، با توجه به بازدهی بالا و هزینه و آلاینده‌ی پایین در مقابل روش‌های سنتی، گزینه مناسبی برای جایگزینی با روش‌های متداول و یا استفاده به‌عنوان مکمل در کنار آن‌ها باشند (Rasoulkhani *et al.*, 2016).

طراحی و توسعه اجاق‌هایی با بازدهی بهتر و آلودگی کمتر تاریخی‌چندی بلند مدتی دارد (Mukunda *et al.*, 2010). اولین برنامه‌های انجام‌گرفته در جهت بهبود اجاق‌های زیست‌توده‌سوز در هند گزارش شده است که پس از آن در سال ۱۹۸۲ یک برنامه ملی برای توسعه اجاق‌های زیست‌توده‌سوز کلید خورد. همچنین برنامه‌هایی از این قبیل در کشورهای جنوب آسیا و شرق آفریقا نیز گزارش شده است (Sutar *et al.*, 2015). (Parmigiani *et al.*, 2014) اجاقی طراحی کردند که از پوست برنج که یکی از پسماندهای رایج منطقه بود تغذیه می‌شد. نتایج آزمون جوشش آب نشان داد که اجاق ساخته شده توانسته است با مصرف متوسط یک کیلوگرم پوست برنج سه کیلوگرم آب را در مدت ۲۷ دقیقه به‌جوش برساند، همچنین بازده حرارتی محاسبه شده برای اجاق زیست‌توده‌سوز ساخته شده ۱۸٪ برآورد شد. این پژوهشگران مدت زمان بهره‌دهی اجاق را به طور متوسط ۵۷ دقیقه گزارش کردند. مقایسه غلظت مونواکسیدکربن در این پژوهش با استاندارد سازمان بهداشت جهانی<sup>۱</sup> برای ۶۰ دقیقه ( $CO \geq 30 \text{ ppm}$ ) و ۱۵ دقیقه ( $CO \geq 100 \text{ ppm}$ ) وضعیت آلاینده‌ی اجاق را قابل قبول نشان داد.

(Febriansyah *et al.*, 2014) با به کار بردن پوست میوه گیاه پالم به‌عنوان سوخت، سه اجاق را مورد بررسی قرار دادند.

### ارزیابی عملکرد

همه آزمون‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر بر اساس پروتکل آزمون آلاینده‌گی و عملکرد (Emissions & Performance Test Protocol -EPTP) انجام‌شده که توسط محققان پیشنهاد و استفاده‌شده است (DeFoort et al., 2010; Tryner et al., 2016). در این آزمون حد نهایی هر فاز آزمون به‌جای نقطه‌جوش محلی، دمای  $90^{\circ}\text{C}$  محسوب می‌شود (Sutar et al., 2015). فاصله‌ی زمانی که طی آن آب از دمای محیط به جوش رسیده و مجدداً تا دمای  $90^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌یابد مدت زمان بهره‌دهی اجاق گفته می‌شود. در هر تکرار از آزمون‌های انجام‌شده مقدار سه کیلوگرم آب در یک ظرف ۵ لیتری، با استفاده از  $400$  گرم سوخت از دمای محیط ( $23^{\circ}\text{C} \pm 2$ ) به دمای  $90^{\circ}\text{C}$  رسانده شده است.



شکل ۱. طرح شماتیک از الف) اجاق میکروگازیفایر ب) سیستم کنترل هوا

الف - A: پایه‌های استوانه بیرونی. B: استوانه بیرونی. C: استوانه داخلی. D: طوقه کوپلینگ. E: پیچ اتصال طوقه به در محفظه خارجی. ب - A: آهرم گرداننده. B: صفحه پوشاننده. C: صفحه پروانه‌ای. D: پایه. E: باکس مکعب شکل. F: در محفظه خارجی

در پایان هر فاز شروع سرد با رسیدن دمای آب به دمای  $90^{\circ}\text{C}$  مقدار آب تبخیر شده اندازه‌گیری شد و سپس بلافاصله تا پایان یافتن سوخت اجاق، فاز نیم جوش دنبال شد. همچنین به‌منظور بررسی تغییرات ناشی از محدودیت هوای اولیه ورودی به‌وسیله سامانه کنترل هوا، از طریق مدرج کردن کورس طولی تغییرات درجه ورودی هوا، آزمون‌های ارزیابی اجاق در سه وضعیت ۷۵، ۵۰ و صفر درصد محدودیت مساحت فضای عبور هوای ورودی تکرار شد. همه آزمایش‌ها در حالت عایق‌بندی کوره اصلی اجاق تکرار شده است. محل انجام آزمایشات دریکی از آزمایشگاه‌های گروه مهندسی بیوسیستم در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با متوسط ارتفاع  $1050$  متر از سطح دریا و دمای جوش منطقه‌ای  $96/6^{\circ}\text{C}$  بوده است. بر اساس استانداردهای موجود برای اندازه‌گیری میزان آلاینده‌گی از

کپسول‌های گاز مایع را مرتفع سازد. همچنین در جهت بهبود بازدهی و کاهش مصرف سوخت این اجاق، اثر کنترل جریان هوای اولیه ورودی و عایق‌بندی حرارتی بر عملکرد اجاق میکروگازیفایر نیز بررسی گردید

### مواد و روش‌ها

#### ساخت اجاق گازیفایر (مواد، قطعات و اندازه‌ها)

در پژوهش حاضر برای ساخت اجاق، با الهام از طرح Everything Nice Stove و اجاق‌های TLUD از اصول کلی حاکم بر اجاق‌های میکروگازیفایر ارائه شده در Anderson (2009) استفاده شد (شکل ۱. الف). این اجاق شامل دو استوانه از جنس ورق فلزی است، به صورتی که درون هم قرار گرفته‌اند. برای ساخت استوانه‌ها پس از نورد ورق‌های فلزی، اتصال لبه‌ها به وسیله جوش هوا-گاز (با نشت‌بندی کامل) انجام شد. استوانه داخلی، با چهار لیتر حجم (حجم واقعی)، محفظه اصلی احتراق بوده و ایجاد بستر مناسب برای قرارگیری سوخت و محفظه مناسب برای فرایند گازیفیکاسیون را بر عهده دارد. سه سری حفره در پایین استوانه بیرونی، پایین استوانه داخلی و در بالای استوانه داخلی ایجاد می‌شود که هوا از طریق آن‌ها به درون محفظه بین استوانه‌ها جریان می‌یابد و در بالای محفظه احتراق با گاز ترکیب‌شده و شعله حاصل می‌شود. همچنین در قسمت تحتانی استوانه‌ی بیرونی به منظور ایجاد پایه از چهار پیچ و مهره‌ی  $8 \times 30$  استفاده شده است.

#### بهینه‌سازی:

برای کنترل و تغییر جریان هوای ورودی، محفظه خارجی مکعب شکلی در ابعاد  $275 \times 275$  میلی‌متر و ارتفاع  $340$  میلی‌متر ساخته شد (شکل ۱. ب) تا میکروگازیفایر در آن قرار داده شود و در قسمت تحتانی آن یک دریچه قابل تنظیم برای کنترل ورود هوا به صورت جداگانه ایجاد شد (شکل ۱. ب- C) و شکل ۱. ب- B). به‌منظور درزبندی فضای اطراف، قسمت اتصال فوقانی اجاق به محفظه کنترل، با توجه به اینکه این فضا در قرابت با محل تشکیل شعله است، از واشر آزیستی (به دلیل مقاومت حرارتی بالا) استفاده شد. در معدود نقاط دیگر که امکان نشت گاز وجود داشت، از گِل بتونه آماده و متداول در رنگ‌آمیزی ساختمان استفاده شد. در فاز دوم بهینه‌سازی، پس از انجام سری اول آزمایش‌ها، دیواره‌ی بیرونی استوانه‌ی خارجی میکروگازیفایر با استفاده از عایق حرارتی لایه‌ی سرامیکی عایق‌بندی شده و مجدداً با قرارگیری در محفظه کنترل‌هوا و نشت‌بندی‌های لازم، سری دوم آزمایش‌ها انجام شد.

$$\eta = \frac{(m \cdot c \cdot \Delta\theta)_{H_2O} + (m \cdot h_v)_{H_2O (evap)}}{dryfuel_{equ} \cdot LHV_f - E_{moist} - char\ mass \cdot LHV_{char}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در آن  $m.c.\Delta\theta$  نشان‌دهنده گرمای مبادله شده با آب بوده که در آن  $m$  جرم برحسب گرم،  $C$  ظرفیت گرمایی ویژه آب معادل  $4186 J.g^{-1}.K^{-1}$  و  $\Delta\theta$  اختلاف دمای ایجادشده در آب برحسب  $^{\circ}K$  هستند و  $h_v$  نشان‌دهنده گرمای نهان تبخیر آب برابر با  $2260 J.g^{-1}$  است.  $m.h_v$  بیانگر مقدار انرژی صرف شده برای آب تبخیر شده است و عبارت  $dryfuel_{equ}$  نشان‌دهنده جرم سوخت مصرف‌شده مؤثر بدون در نظر گرفتن جرم رطوبت سوخت است. همچنین  $E_{moist}$  مقدار انرژی موردنیاز برای تبخیر رطوبت موجود در سوخت و  $char\ mass$  جرم زغال باقی‌مانده در پایان فرایند ارزیابی می‌باشند.  $LHV_f$  و  $LHV_{char}$  به ترتیب نشان‌دهنده ارزش حرارتی خالص سوخت و زغال را نشان می‌دهند. هر یک از بخش‌های مخرج رابطه‌ی کسری محاسبه بازدهی از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود ( WBT Technical Committee, 2014).

(رابطه ۱)

$$dryfuel_{equ} = fuel\ mass_{wet} \cdot (1 - MC) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$E_{moist} = fuel\ mass_{wet} \cdot MC (4.186 (T_b - T_a) + 2260)$$

و در پایان نیز برای اندازه‌گیری کل  $CO$  منتشر شده در طی آزمون از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$Total\ CO = \sum_{i=1}^t (CO_i \times Q) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن،  $t$  مدت زمان انجام هرآزمون،  $CO_i$  غلظت مونواکسیدکربن ثبت شده در هرلحظه برحسب  $mg.m^{-3}$  و  $Q$  نشان‌دهنده دبی‌متوسط لوله خروجی هود در محل نمونه‌برداری برحسب  $m^3.s^{-1}$  است.

#### ماده خام مورد استفاده:

برای انجام آزمون‌ها ارزیابی از پوست پسته به‌عنوان سوخت استفاده شد. به‌منظور دستیابی به خصوصیات توصیفی، سوخت مورداستفاده تحت آنالیز تقریبی<sup>۱</sup> قرار گرفت و خصوصیات توصیفی موردنظر اعم از محتوی رطوبت، درصد خاکستر، مواد

روش هود و تونل اختلاط گاز خروجی برای نمونه‌برداری استفاده شد (WBT Technical Committee, 2014). به این منظور یک هود فلزی با ابعاد یک‌متر در یک متر و ارتفاع ۱/۶ متر، مجهز به مجرای خروجی با قطر ۱۰ سانتی‌متر (۴ اینچ) ساخته شد. قطر لوله و زانوهای اختلاط گاز خروجی نیز ۱۰ سانتی‌متر بود. از یک فن دمنده در انتهای لوله به‌منظور ایجاد مکش استفاده شد. براساس WBT، محل نمونه‌گیری در فاصله طولی ۱/۲ متری لوله اختلاط و ارتفاع ۱/۵ متری از سطح اجاق اتخاذ شد. سرعت جریان گاز خروجی در محل نمونه‌گیری با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سرعت جریان گاز ( testo425-Hot wire anemometer, USA) در شش تکرار اندازه‌گیری شد و از حاصل ضرب میانگین سرعت‌جریان‌های محاسبه شده در مساحت سطح لوله خروجی (به قطر ۱۰ سانتی‌متر) دبی جریان گاز در لوله اختلاط  $26/5 L.s^{-1}$  محاسبه شد (معادل  $m^3.h^{-1}$  ۹۵/۷ که براساس WBT بین ۸۰ تا  $150 m^3.h^{-1}$  قابل قبول است). غلظت آلاینده  $CO$  در کل مدت انجام هر آزمون در بازه‌های زمانی پنج ثانیه توسط کاربر و به صورت دستی و بر اساس واحد ppm به ثبت رسید. به منظور بررسی آماری نتایج حاصل آزمایشات ارزیابی از طریق آزمون فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور اجاق در دو سطح عایق‌بندی شده و بدون عایق‌بندی حرارتی و دریچه کنترل هوا (فاکتور دوم) در سطوح صفر، ۵۰ و ۷۵ درصد محدودیت جریان هوا، و هر آزمایش در سه تکرار مورد آنالیز قرار گرفت. به دلیل سهولت در تبیین نتایج در آنالیزهای آماری، هریک از حالت‌های مختلف اجاق (حالت اول میکروگازیفایر بدون محدودکننده هوا، حالت دوم استفاده از کنترل هوا و حالت سوم استفاده از کنترل هوا به همراه عایق‌بندی) به‌عنوان یک اجاق مجزا در نظر گرفته شده و به‌عنوان پارامتر نوع اجاق مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد و آنالیز آماری حالت‌های استفاده شده از سیستم کنترل‌هوا نیز (دو حالت بهینه سازی شده) به صورت مجزا تجزیه‌وتحلیل و گزارش شده است. انجام آنالیزهای آماری به‌وسیله نرم‌افزار آماری Minitab17 انجام شده و طی آن مقایسات زوجی با استفاده از آزمون LSD انجام گرفت.

#### محاسبه‌ی بازده

بازده حرارتی که عبارت است از نسبت مقدار انرژی منتقل شده به آب در طی آزمون بر تفاضل مقدار انرژی قابل استحصال از سوخت و مقدار انرژی باقی‌مانده در زغال در پایان فرایند آزمون از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (WBT Technical Committee, 2014).

هوا در ابتدا و انتهای آزمون به صورت جداگانه انجام شد. همچنین به منظور نمونه‌گیری از غلظت گاز مونواکسیدکربن ناشی از فعالیت‌های اجاق، از دستگاه اندازه‌گیری CO-110 ساخت کشور چین استفاده شد.

### نتایج و بحث

شکل ۲ عملکرد ظاهری این اجاق با پوست پسته بدون عایق و دریچه کنترل نشان می‌دهد. آنچنان که پیداست، شعله بدون دود و به رنگ نارنجی است. البته لازم به ذکر است که در زمانی که سوخت به اتمام می‌رسد، اندکی دود مشاهده می‌شود. همچنین در حین کار، امکان تغذیه با سوخت برای شعله‌دهی به مدت بیشتر بدون ایجاد خللی در عملکرد اجاق امکان‌پذیر است. براساس نتایج حاصل از ارزیابی انجام شده مشخص شد که میکروگازیفایر ساخته شده در حالت معمولی دارای توان حرارتی مفیدی<sup>۳</sup> معادل ۱٫۴ کیلووات بوده و این میزان توان با بکارگیری سیستم کنترل جریان، دستخوش تغییر شده است. براساس محاسبات انجام شده در این ارزیابی، توان حرارتی مفید اندازه‌گیری شده در حالت سیستم کنترل جریان بدون عایق-بندی، به طور متوسط ۰٫۹ کیلووات و در حالت تلفیق سیستم کنترل جریان و عایق بندی به میزان ۱٫۰۸ کیلووات بوده است. این در حالی است که توان حرارتی مفید اندازه‌گیری شده برای یک اجاق سنتی سه سنگی (آتش معمولی) با مساحت قاعده ۴۹۴٫۵ سانتی متر مربع (دهانه ابتدایی ۲۶ سانتی متر) و ارتفاع ۱۵ سانتی متر تقریباً ۱٫۵۴ کیلووات اندازه‌گیری به دست آمد.



شکل ۲. عملکرد ظاهری اجاق در کار با پوست پسته

این نتایج نشان می‌دهد که همان‌طور که انتظار می‌رود محدود کردن جریان هوای ورودی با کاهش سطح فرایندهای

فرار و چگالی حجمی اندازه‌گیری شد. مواد فرار بیانگر آن درصد جرمی ماده است که بر اثر تجزیه حرارتی با اکسیژن ترکیب شده و با تشکیل گازهای قابل اشتعال ساختار ماده سوختی را ترک می‌کند. همچنین تجزیه‌نهایی (آنالیزعنصری یا CHNSO) نیز برای دستیابی به مقدار عناصر تشکیل‌دهنده سوخت‌های مورد استفاده با استفاده از دستگاه CHNS Elemental Analyzer مدل "FlashEA 1112 series" انجام شد. برای اندازه‌گیری ارزش حرارتی براساس کمترین مقدار شاخص RMSE، از بین مدل‌های ارائه شده در پژوهش Peduzzi *et al.* (2016)، مدل ارائه‌شده توسط Friedl *et al.* (2005) اتخاذ شده و با استفاده از نتایج آنالیز عنصری، ارزش حرارتی ناخالص<sup>۱</sup> تخمین زده شد. ارزش حرارتی خالص<sup>۲</sup> نیز با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد (Peduzzi *et al.*, 2016).

$$LHV = HHV - MR_{H_2O,H} \cdot \frac{H}{100} \cdot \Delta H_{evap} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در معادله ۱۰ رابطه بین HHV و LHV براساس وزن خشک بیان شده است. در این رابطه  $MR_{H_2O,H}$  نسبت جرم مولی آب به جرم مولی هیدروژن، H درصد جرمی هیدروژن موجود در ماده و  $\Delta H_{evap}$  آنتالپی تبخیر آب برحسب ( $kJ \cdot kg^{-1}$ ) است. خصوصیات توصیفی پوست پسته مورد استفاده، همچنین استانداردهای مورد استفاده برای انجام آزمایشات اندازه‌گیری در جدول ۱ ارائه شده است.

### تجهیزات ارزیابی:

برای اندازه‌گیری دمای آب و دمای شعله، به ترتیب از ترموکوپل ساده مدل K و ترموکوپل مناسب برای اندازه‌گیری دماهای بالا با مدل HP-502A-M21 ساخت کشور چین استفاده شد. از یک ترمومتر چهار کانال دیتالاگر مدل TM-947SD ساخت شرکت لوترون تایوان و یک ترازوی دقیق دیجیتال مدل GF-6100 (A&D، ژاپن) برای پایش لحظه‌ای دمای شعله، دمای آب و تغییرات وزن در بازه‌های زمانی دو ثانیه در طی آزمون‌ها استفاده شد. در طول آزمون دستگاه بر روی ترازوی دیجیتال قرار داشت و داده‌های تغییرات وزنی ذخیره می‌شد. به این صورت که ترازوی دیجیتال به سیستم کامپیوتری (لپتاپ) که نرم‌افزار رابط کاربری ترازو بر روی آن نصب بود متصل بوده و ذخیره کردن داده‌ها به وسیله لپتاپ انجام شد. البته با توجه به بالاتر بودن وزن اجاق به همراه سیستم کنترل هوا، اندازه‌گیری مقدار سوخت به هنگام آزمون‌های تلفیق اجاق و سامانه کنترل

1. Higher Heating Value -HHV  
2. Lower Heating Value-LHV



نیازمند است تا بررسی شود که این افزایش آلاینده‌گی در محدوده قابل قبول خواهد بود یا میزان انتشار آلاینده از حدود مشخص شده در استانداردها بیشتر است، که در ادامه نتایج بررسی آن ارائه شده است.

احتراق، توان حرارتی کمتری را به دنبال دارد که این مقدار در حالت کنترل جریان به همراه عایق بندی به دلیل بالاتر بودن بازده حرارتی بیشتر بوده است، اما انتظار می رود که این محدود کردن جریان هوا، اگرچه باعث کنترل مصرف سوخت می‌شود اما احتمالاً افزایش انتشار آلاینده CO را به دنبال دارد. با این فرضیه

جدول ۱. خصوصیات توصیفی پوست پسته مورد استفاده به عنوان سوخت در آزمایشات ارزیابی اجاق میکروگازیفایر

ماده	چگالی (g.L <sup>-1</sup> )	رطوبت (%)	مواد فرار (%)	خاکستر (%)	عناصر تشکیل دهنده (%)					HHV (MJ/kg)	LHV (MJ/kg)
					C	H	O*	N	S		
پوست پسته	۲۹۵	۷	۸۳	۲٫۴	۶۸٫۶	۵٫۹	۲۴٫۸	۰٫۵	-	۲۸٫۷۴	۲۶٫۱۶
روش	EN 15103:2009	EN 14774- 3:2009	EN 15148:2009	EN 14775:2009	CHNSO Elemental Analysis					a	b

به روش تفاضل (Friedl et al., 2005).

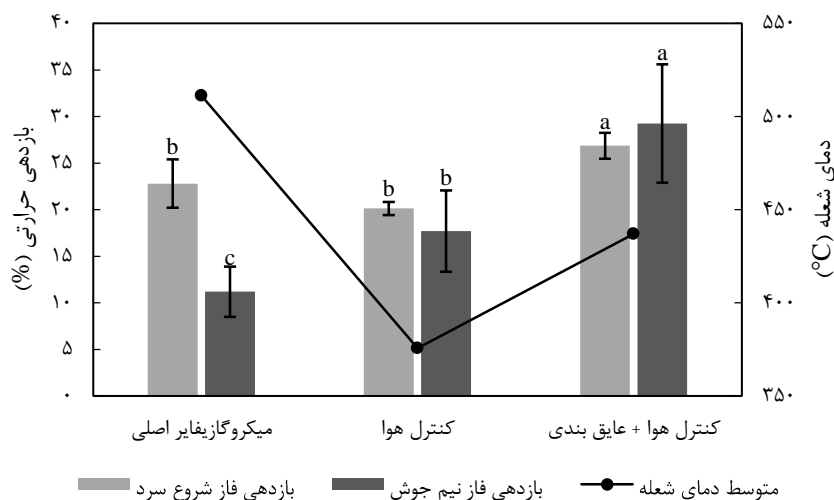
معادله ۵: b

موجب کاهش بازده حرارتی در فاز شروع سرد می‌شود. اما در فاز نیم‌جوش از آنجا که اجاق در فاز قبل گرم شده، مقدار انرژی کمتری صرف گرم شدن بدنه‌ی اضافه شده و انرژی بیشتری به آب منتقل می‌شود و جرم آب تبخیر شده افزایش می‌یابد که افزایش بازده را نشان خواهد داد. (در هر آزمایش مقدار مشخصی آب در داخل ظرفی با وزن مشخص بر روی دستگاه میکروگازیفایر استفاده می‌شود و بلافاصله با رسیدن به نقطه‌ی دمایی ارائه شده در استاندارد ارزیابی، ظرف آب در حال جوش بر روی ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۰ مجدداً وزن می‌شود که از تفاضل وزن ابتدایی و انتهای مقدار آب تبخیر شده مشخص می‌گردد.)

یکی دیگر از دلایلی که برای این پدیده می‌توان ارائه کرد جلوگیری از تلاطم هوا و کمک به یکنواختی جریان هوای وارد شده به سیستم با بکارگیری سیستم کنترل هوا است. به احتمال زیاد کاسته شدن از شدت جریان هوای وارد شده به سیستم، موجب آرام‌تر شدن شدت انجام واکنش‌های ترموشیمیایی اکسایش و احتراق شده و سرعت پیشروی جبهه پیرولیز را کاهش می‌دهد. فروکش کردن شدت نسبی شعله بدنبال کاهش شدت جریان هوای وارد شده به سیستم، در انتهای فرایند خود را در مقدار سوخت و زغال باقی مانده نشان می‌دهد و مدت باقی ماندن دمای موثر را افزایش داده و باعث افزایش تبخیر آب می‌شود. با توجه به رابطه اندازه‌گیری بازده حرارتی (رابطه ۱)، جرم سوخت و زغال باقی مانده با مقدار بازده در هر فاز اندازه‌گیری رابطه معکوس و جرم آب تبخیر شده با بازده رابطه مستقیم دارد. بنابراین افزایش جرم زغال و سوخت باقی مانده و همچنین افزایش جرم آب تبخیر شده افزایش بازده را بدنبال دارد.

نتایج نشان داد که عایق بندی (حالت سوم اجاق) با متوسط بازده حرارتی ۲۷ درصد در فاز شروع سرد و متوسط بازده حرارتی ۲۹ درصد در فاز نیم‌جوش دارای بهترین بازده در بین سه وضعیت میکروگازیفایر مورد بررسی بوده است (شکل ۳). نکته قابل ذکر و مهم این است که اضافه کردن سیستم کنترل جریان هوا، باعث کاهش دو درصدی متوسط بازده حرارتی اجاق در فاز شروع سرد شده است. بنظر می‌رسد که افزوده شدن یک بخش جداگانه به کوره اصلی با تأثیر گذاشتن بر اتلاف گرمایی ناشی از تبادل حرارت با بدنه فلزی، با کاهش میزان انتقال حرارت به ظرف آب، کاهش بازده حرارتی را به دنبال داشته است. توضیح مشخص اینکه، بدیهی است که بخشی از گرمای تولید شده از سوختن، صرف گرم شدن بدنه خود اجاق می‌شود، که به احتمال زیاد، دو درصد افت بازده، ناشی از تبادل حرارت با بدنه سیستم کنترل جریان هوا است. کما اینکه با اضافه شدن عایق حرارتی، مشهود است که این افت بازده جبران شده و بازده به ۲۷ درصد ارتقا یافته است. اما در تناقض با فاز شروع سرد، کنترل جریان هوا باعث افزایش متوسط بازده نسبت به کوره اصلی شده و با ثبت بازده ۱۷ درصد در جایگاه دوم قرار گرفته است. مشاهدات نشان می‌دهد که بکارگیری سیستم کنترل هوا از شدت شعله‌ی حاصل از احتراق کاسته شده است. Febriansyah et al. (2014) نیز طی ارزیابی یک اجاق زیست توده سوز مجهز به دریچه کنترل هوا، کمترین دمای شعله را برای حالت‌های محدودیت هوای بیشتر گزارش کردند.

به نظر می‌رسد که کاهش دمای شعله با ترکیب شدن با اتلاف گرمای ناشی از بدنه‌ی اضافه شده (سیستم کنترل جریان)،



شکل ۳. اثر اصلاحات انجام شده بر بازده و دمای شعله دو فاز شروع سرد و نیم جوش

زیست توده سوز مجهز به دریچه کنترل هوا گزارش کردند که با افزایش محدودیت جریان هوای ورودی افزایش بازده اجاق مشاهده شده است.

#### آلاینده مونوکسیدکربن:

شکل ۶ نشان دهنده تغییرات CO در یکی از آزمایشها است. به منظور بررسی وضعیت آلاینده‌گی نتایج بهینه‌سازی با استانداردهای بین‌المللی کیفیت هوا مورد مقایسه قرار گرفت. براساس استاندارد OSHA<sup>۲</sup> حد مجاز مواجهه با مونوکسیدکربن در یک روز کاری ۸ ساعته به صورت مداوم ۳۵ppm در نظر گرفته شده است (Monona, 1998). یکی دیگر از استانداردهای در نظر گرفته شده برای محیط‌های کاری استاندارد ACGIH<sup>۳</sup> است. براساس این استاندارد حد مجاز برای مواجهه به مونوکسیدکربن در مدت ۸ ساعت کار روزانه و ۴۰ ساعت کار هفتگی ۲۵ppm در نظر گرفته شده است (Monona, 1998). با توجه به شاخص متوسط انتشار مونوکسیدکربن و الگوی سیستم کنترل هوا اصلی ۱۴ppm (شکل ۸)، هر سه حالت مورد ارزیابی براساس دو استاندارد مورد بررسی در محدوده ایمن قرار می‌گیرند. یکی دیگر از استانداردهای متداول برای ارزیابی کیفیت هوا استاندارد سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا EPA<sup>۴</sup> است. حد ایمنی در این استاندارد براساس جدول ۲ در نظر گرفته می‌شود (Monona, 1998).

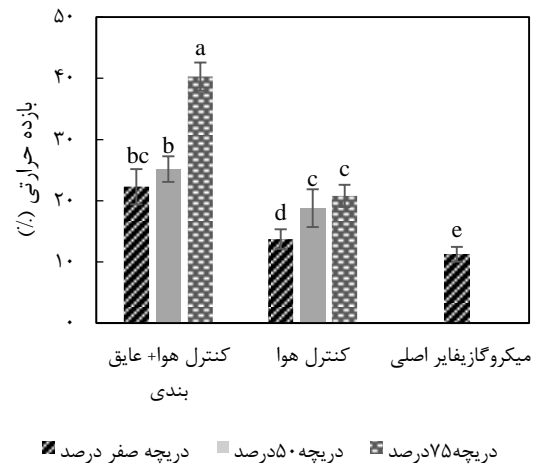
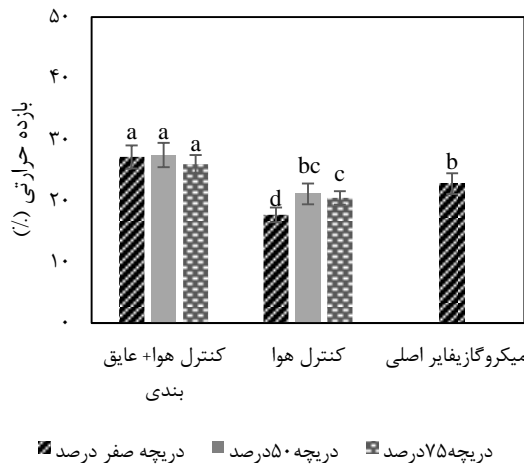
عایق بندی دیواره‌ی بیرونی اجاق زیست توده سوز ضمن جلوگیری از تبادل حرارت با محیط اطراف و کاهش مصرف سوخت، باعث افزایش بازده حرارتی می‌شود (Sedighi and Salarian (2017). Panwar (2009) با استفاده از سیمان مقاوم به حرارت<sup>۱</sup> به عنوان عایق حرارتی در محفظه قرارگیری سوخت، علاوه بر افزایش میزان بازده حرارتی اجاق ساخته شده، بهبود سایر شاخص‌های عملکردی از جمله زمان بهره‌دهی را نیز گزارش کرد.

اثرات متقابل فاکتورها بر بازده حرارتی در دو فاز شروع سرد و نیم‌جوش به همراه نتایج گروه بندی در هر فاز در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. براساس این نتایج در فاز شروع سرد بهترین وضعیت در حالت استفاده از عایق بندی با محدودیت هوای ۵۰ درصد با متوسط بازده ۲۷ درصد به ثبت رسید. البته لازم به ذکر است که در بین حالت‌های مختلف اجاق عایق بندی شده، تفاوت معنی‌داری وجود نداشته و حالت محدودیت هوای ۵۰ درصد با حالت‌های محدودیت صفر و ۷۵ درصد در یک گروه قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، مقدار بازده اجاق با به کارگیری عایق حرارتی و محدود کردن جریان هوای ورودی از ۱۱/۲ درصد (میکروگازیفایر اصلی بدون محدودکننده هوا) به بیش از ۴۰ درصد در حالت استفاده از عایق بندی و محدودیت هوای ۷۵ رسیده است. نکته قابل ذکر دیگر که در این شکل مشهود است، افزایش بازده حرارتی با محدودیت جریان هوای وارد شده به اجاق است. Febriansyah et al. (2014) نیز طی ارزیابی یک اجاق

2. Occupational Safety and Health Administration  
3. American Conference of Governmental Industrial Hygienists  
4. Environmental Protection Agency - EPA

1. Heat Resistant Cement





شکل ۴. اثرات متقابل اصلاحات انجام شده بر بازده حرارتی در فاز نیم‌جوش

شکل ۵. اثرات متقابل اصلاحات انجام شده بر بازده حرارتی در فاز شروع سرد

و وضعیت‌های مختلف دریچه کنترل جریان هوا است. در پژوهش‌های انجام شده

براساس استاندارد EPA دو حالت عایق‌بندی و میکروگازیفایر اصلی در محدوده‌ی "ناسالم" و حالت استفاده از سیستم کنترل بدون عایق‌بندی در محدوده‌ی "ناسالم شدید" قرار می‌گیرد. اما بر اساس جدول NAAQS<sup>1</sup> که توسط EPA ارائه شده است، قرار گرفتن در معرض حداکثر ۳۵ppm در یک فعالیت با متوسط زمان یک ساعت به عنوان استاندارد اولیه در نظر گرفته شده است (EPA, 1990). با توجه به زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت‌های پخت‌وپز می‌توان اجاق‌های مورد ارزیابی را به عنوان گزینه‌های مناسب، حداقل برای محیط‌های دارای تبادل هوای مناسب دانست. همچنین بررسی شاخص نسبت کنترل نشان می‌دهد که طی بهینه‌سازی انجام شده، نسبت کنترل (Turn-down Ratio) از ۰/۹ در میکروگازیفایر معمولی به ۲/۸۵ در میکروگازیفایر بهینه‌سازی شده ارتقا یافته است. (Still et al. (2011) با مورد ارزیابی قرارداد ۱۴ نوع اجاق زیست‌توده‌سوز، تغییرات نسبت کنترل را برای اجاق‌های مورد ارزیابی، در بازه تغییرات ۲ تا ۴ گزارش کردند. علاوه بر این زمان بهره‌دهی اجاق با استفاده از مقدار سوخت یکسان (۴۰۰ گرم) از ۲۶ دقیقه به ۴۱ دقیقه افزایش یافته است. MacCarty et al. (2010) پنجاه نوع از اجاق‌های زیست‌توده‌سوز، از ابتدایی‌ترین مدل‌ها تا انواع پیشرفته را مورد ارزیابی قرار دادند. طی این تحقیق یکی از پارامترهای مورد ارزیابی قرار گرفته، فاکتور زمان به جوش رسیدن بود. در این تحقیق تغییرات این فاکتور ارزیابی در بازه‌ی ۱۲/۲ تا ۴۳ دقیقه گزارش شد. شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات نسبت کنترل و مدت زمان بهره‌دهی براساس نوع اجاق

جدول ۲. شاخص کیفیت هوا براساس استانداردهای EPA

وضعیت هوا	حد ppm در مدت ۸ ساعت
خوب	۰-۴/۴
متوسط	۴/۵-۹/۴
ناسالم برای گروه‌های حساس	۹/۵-۱۲/۴
ناسالم	۱۲/۵-۱۵/۴
ناسالم شدید	۱۵/۵-۳۰/۴
پرخطر	۳۰/۴-۵۰/۴

### نتیجه‌گیری کلی

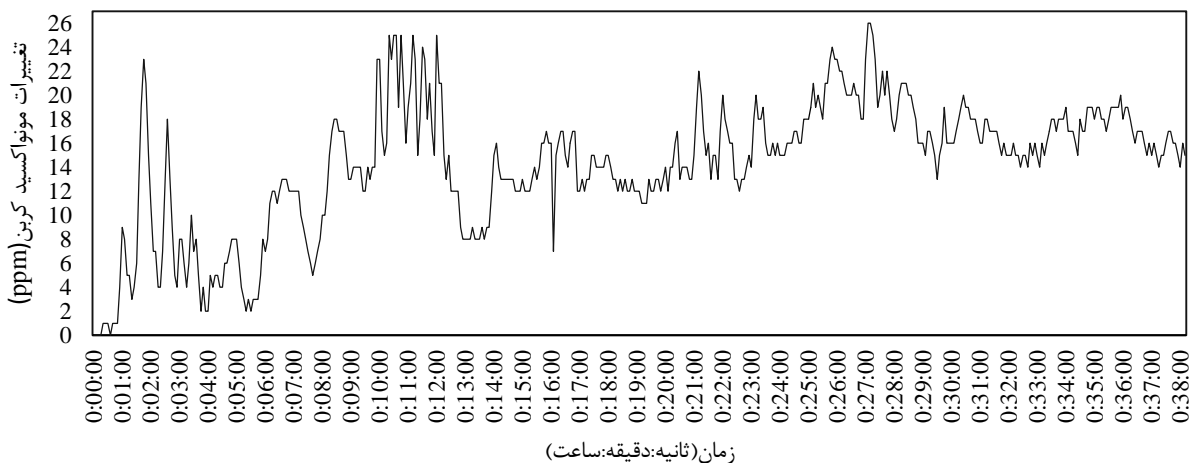
پس از ساخت یک دستگاه اجاق زیست‌توده‌سوز میکروگازیفایر، به منظور بهینه‌سازی ساختار میکروگازیفایر ساخته شده یک سیستم کنترل جریان هوا ساخته شد و با استفاده از لایه‌ی سرامیکی عایق‌بندی دیواره بیرونی اجاق انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سیستم کنترل هوا در ترکیب با عایق حرارتی اگرچه توان حرارتی کمتری را به دنبال داشته اما به طور متوسط باعث افزایش چهار درصدی بازده در فاز شروع سرد و بیش از ۱۸ درصد در فاز نیم‌جوش شده است. همچنین بهینه‌سازی انجام شده باعث بهبود شاخص نسبت کنترل تا میزان سه برابر شد و مدت زمان بهره‌دهی با مصرف سوخت یکسان (۴۰۰ گرم) نیز به طور متوسط تا ۵۷ درصد افزایش یافت. همچنین بررسی شاخص‌های کیفیت هوا میزان انتشار آلاینده مونواکسیدکربن را در محدوده مجاز نشان داد. در

1. National Ambient Air Quality Standards

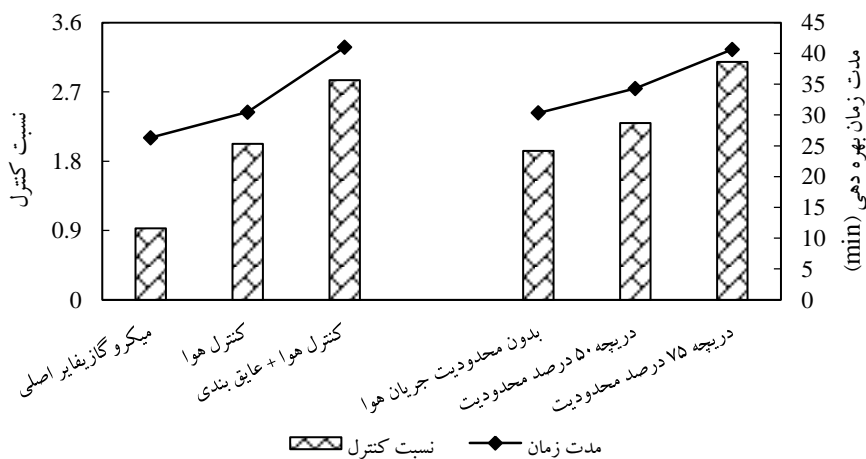
### سپاسگزاری

این طرح بخشی از پایان نامه کاشناسی ارشد بود که با حمایت مالی دانشگاه فردوسی تحت شماره ۳۹۷۶۱ انجام شد.

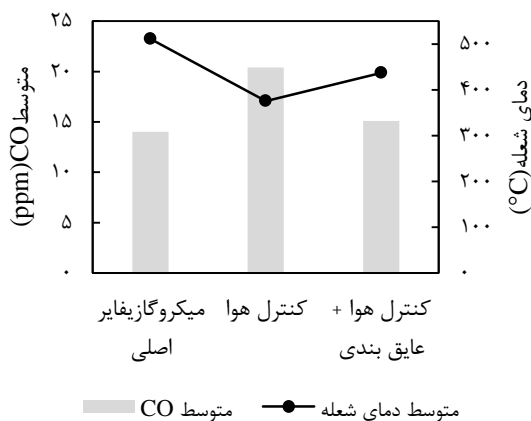
مجموع می توان نتیجه گرفت که این اجاق برای استفاده در مناطقی که دسترسی به زیست توده آسان است، به ویژه مناطق پسته خیز کشور، می تواند مناسب باشد.



شکل ۶. تغییرات مونواکسید کربن در طول انجام یکی از تکرارهای آزمایش حالت کنترل هوا + عایق بندی



شکل ۷. تغییرات نسبت کنترل براساس وضعیت های مختلف دریچه کنترل جریان هوا و نوع اجاق و تغییرات مدت زمان بهره دهی



شکل ۸. تغییرات شاخص متوسط انتشار CO در طی آزمون هریک از حالت های اجاق میکرو گاز بیفایر در تقابل با دمای شعله

## REFERENCES

- Anderson, P. (2009). Construction Plans for the "Champion-2008" TLUD Gasifier Cookstove (including operational instructions). United States of America. <http://www.bioenergylists.org/files/Construction%20Plans:202009-202003>.
- Carvalho, R. L., Vicente, E. D., Tarelho, L. A. C., & Jensen, O. M. (2018). Wood stove combustion air retrofits: A low cost way to increase energy savings in dwellings. *Energy and Buildings*, 164, 140-152.
- Champier, D., Bedecarrats, J., Rivaletto, M., & Strub, F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35(2), 935-942
- DeFoort, M., C. L'Orange, C. Kreutzer, N. Lorenz, W. Kamping and J. Alders. (2010). Stove Manufacturers Emissions and Performance Test Protocol (EPTP); Engines and Energy Conversion Laboratory, Colorado State University: Fort Collins, CO.
- Edwards, R. D., K. R. Smith, J. Zhang and Y. Ma. (2003). Models to predict emissions of health-damaging pollutants and global warming contributions of residential fuel/stove combinations in China. *Chemosphere*, 50, 201-215.
- EPA. 1990. NAAQS Table : National Ambient Air Quality Standards for six principal pollutants, which are called "criteria" air pollutants. Available at: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Accessed
- Febriansyah, H., A. A. Setiawan, K. Suryoprato and A. Setiawan. 2014. Gama Stove: Biomass Stove for Palm Kernel Shells in Indonesia. *Energy Procedia*, 47, 123-132.
- Friedl, A., E. Padouvas, H. Rotter and K. Varmuza. 2005. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, 544, 191-198.
- Lertsatitthanakorn, C., J. Jamradloedluk and M. Rungsiyopas. (2014). Study of Combined Rice Husk Gasifier Thermoelectric Generator. *Energy Procedia* 52: 159-166.
- Mallaki, M., & Fatehi, R. (2014). Design of a biomass power plant for burning date palm waste to cogenerate electricity and distilled water. *Renewable Energy*, 63, 286 – 291.
- Monona, R. (1998). CARBON MONOXIDE & CO DETECTORS DATA SHEET. Available at: <https://www.usa829.org/Portals/0/Documents/Health-and-Safety/Safety-Library/Carbon-Monoxide-and-CO-Detectors.pdf>.
- Mukunda, H., S. Dasappa, P. Paul, N. Rajan, M. Yagnaraman, D. R. Kumar and M. Deogaonkar. (2010). Gasifier stoves-science, technology and field outreach. *Current Science (Bangalore)* 98: 627-638.
- Panwar, N. L. (2009). Design and performance evaluation of energy efficient biomass gasifier based cookstove on multi fuels. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14, 627-633.
- Parmigiani, S. P., F. Vitali, A. M. Lezzi and M. Vaccari. (2014). Design and performance assessment of a rice husk fueled stove for household cooking in a typical sub-Saharan setting. *Energy for Sustainable Development* 23, 15-24.
- Peduzzi, E., G. Boissonnet and F. Maréchal. (2016). Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition. *Fuel* 181, 207-217.
- Nejat, P., Morsoni, A. K., Jomehzadeh, F., Behzad, H., Saeed Vesali, M., & Majid, M. Z. A. (2013). Iran's achievements in renewable energy during fourth development program in comparison with global trend. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 561-570.
- Raman, P., J. Murali, D. Sakthivadivel and V. S. Vigneswaran. (2013). Performance evaluation of three types of forced draft cook stoves using fuel wood and coconut shell. *Biomass and Bioenergy* 49: 333-340.
- Rasoulkhani, M. R., M. A. Ebrahimi-nik, M. H. Abbaspour-Fard and R. Abbas. (2016). Microgasification introduction and its utilization on household cooking energy supply. in 10th National Congress on Agr. Machinery Eng. (Biosystem) & Mechanization of Iran. Mashhad.
- Roth, C. (2011). Micro-Gasification: Cooking with Gas From Biomass: An Introduction to the Concept and the Applications of Wood-Gas Burning Technologies for Cooking. GIZ HERA—Poverty-Oriented Basic Energy Service.
- Sedighi, M. and H. Salarian. (2017). A comprehensive review of technical aspects of biomass cookstoves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70: 656-665.
- Sornek, K., Filipowicz, M., & Rzepka, K. (2016). Study of clean combustion of wood in a stove-fireplace with accumulation. *Journal of the Energy Institute*.
- Still, D., MacCarty, N., Ogle, D., Bond, T., & Bryden, M. (2011). Test results of cook stove performance. Partnership for Clean Indoor Air, Portland, OR. Available at: <http://www.ebusa.org/files/2015/05/TestResultsCookstovePerformance.pdf>.
- Sutar, K. B., S. Kohli, M. R. Ravi and A. Ray. (2015). Biomass cookstoves: A review of technical aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 1128-1166.
- Tryner, J., J. W. Tillotson, M. E. Baumgardner, J. T. Mohr, M. W. DeFoort and A. J. Marchese. (2016). The effects of air flow rates, secondary air inlet geometry, fuel type, and operating mode on the performance of gasifier cookstoves. *Environmental Science & Technology* 50, 9754-9763.
- WBT Technical Committee. (2014). The Water Boiling Test: Version 4.2. 3. Available at: [cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf](http://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf).