www.journals.rifst.ac.ir
نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی
سال ۱۳۹۵، جلد ۵، شماره ۳، صفحات ۳۰۲-۲۹۱
Doi: 10.22101/JRIFST.2016.12.19.536

JRIFST

پژوهشکده علوم و صنایع غذایی

بهینه‌یابی آزمایشگاهی زاویهٔ آیینه‌های جانبی یک خوراک‌پز خورشیدی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

حسین زمانی[1*]، مصطفی شهیدی نوقابی[2]، مجتبی مأموریان[3]

۱- استادیار، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد
* نویسندهٔ مسئول (h.zamani@rifst.ac.ir)
۲- استادیار، گروه شیمی مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۰۸

واژه‌های کلیدی
انرژی خورشیدی
خوراک‌پز خورشیدی
روش سطح پاسخ
سطوح انعکاسی

چکیده

باتوجه‌به اهمیت گسترش استفاده از انرژی‌های پاک و بخصوص انرژی خورشید، در این پژوهش یک خوراک‌پز خورشیدی طراحی، ساخته و عملکرد آن به روش آزمایشگاهی از لحاظ تأثیر هم‌زمان زاویهٔ آیینه‌های جانبی و زمان کاری بر مقدار انرژی جذب‌شده، براساس مدل سطح پاسخ بررسی شد. مقدار کل تابش خورشید به‌عنوان معیاری از انرژی ورودی و افزایش دمای آب داخل ظرف به‌عنوان شاخص مقدار انرژی جذب‌شده درنظر گرفته شد. مدل به‌دست‌آمده براساس آزمون اعتبارسنجی روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت و از اعتبار مناسبی برخوردار بود (R^2=۰/۸۹، R^2adjusted=۰/۷۴ و عدم برازش بی‌معنی). از تحلیل نتایج به‌دست‌آمده مدل ریاضی تأثیر زاویهٔ آیینه‌های جانبی و زمان آزمایش بر عملکرد سیستم به‌دست آمد. مقدار انرژی جذب‌شده تئوری و آزمایشگاهی نیز باهم مقایسه شده‌اند که متوسط خطای آن در همهٔ نقاط آزمایشی ۲/۷۵ درصد می‌باشد. براساس این مدل درصورت تنظیم سیستم در حالت بهینه، انرژی جذب‌شده به میزان ۲۲/۵۶ درصد افزایش خواهد یافت. آزمایش‌های این پژوهش در پژوهشکده علوم و صنایع غذایی واقع در مشهد با طول و عرض جغرافیایی ۵۴ و ۳۶ درجه و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا طراحی و انجام شده است.

مقدمه

استفادهٔ بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی صدمات جبران‌ناپذیری به محیط زندگی انسان‌ها وارد کرده است، آلودگی فضای اتمسفر، آب وخاک و گرمایش زمین که درنتیجهٔ ایجاد پدیدهٔ گلخانه‌ای صورت گرفته است، اولین لایه‌ها از این آسیب‌ها هستند. جبران این آسیب‌های جهانی نیازمند اقدامات و اصلاحات جدی در رویکردهای اصلی زندگی است. در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یک رویکرد سازنده شکل گرفته و روند رشد مناسبی نیز پیدا کرده است (Suhail Zaki Farooqui, 2015). خوراک‌پزهای خورشیدی سیستم‌هایی هستند که از انرژی پاک در دسترس و ارزان خورشید، برای پخت‌وپز استفاده می‌کنند. یک خوراک‌پز خورشیدی، گرمای تابش را ازطریق تمرکز پرتوهای آن روی یک سطح یا حبس آنها در یک فضای گلخانه‌ای مهار می‌کند تا از آن برای پخت‌وپز استفاده شود (Schwarzera *et al*., 2003). ازاین‌جهت خوراک‌پزهای خورشیدی نقش مفیدی در جلوگیری از سوختن منابع فسیلی، جنگلی و حفظ محیط‌زیست ایفا می‌کنند و به‌عنوان یک رویکرد

جدید درزمینهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه محققان قرار گرفته است (Panwara *et al*., 2011). افزایش قابلیت‌ها و توسعهٔ دامنهٔ کاربرد خوراک‌پزهای خورشیدی دو محور اصلی پژوهش دراین‌زمینه می‌باشند که برای تحقق آنها مطالعه‌های تجربی و تئوری متعددی انجام شده است و روش‌های گوناگونی نیز مورد استفاده قرار گرفته است تا عملکرد حرارتی آنها افزایش یابد (Valmik *et al*., 2011). استفاده از مکانیزم‌های گوناگون تعقیب‌کنندهٔ خورشید برای افزایش میزان جذب تابش در طول روز (Al-Soud *et al*., 2010)، به‌کارگیری هندسهٔ مناسب (هرم ناقص) برای جذب بیشتر انرژی خورشید بدون نیاز به سیستم تعقیب خورشید (Kumar *et al*., 2002)، بهینه‌سازی عملکرد سطوح جذب‌کنندهٔ تابش(Al-Soud *et al*., 2010)، استفاده از هندسهٔ مناسب ظرف غذا برای افزایش میزان انتقال حرارت دریافت‌شده (Sharaf, 2002) و استفاده از پوشش‌های کدرکننده برای کاهش اتلافات تشعشعی از سطوح (Khosrawialhoseini & Maarefat, 2009)، ازجمله راهکارهایی هستند که دررابطه‌با بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و تابشی خوراک‌پزهای خورشیدی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته‌اند. اندازه، شکل و نوع یک خوراک‌پز خورشیدی عواملی هستند که می‌توانند عملکرد آن را بهبود بخشیده و زمان پخت غذا را کوتاه‌تر نمایند؛ برای نمونه، در یک خوراک‌پز خورشیدی معین، این امکان وجود دارد که حتی با انجام اصلاحات جزئی در شکل ظرف غذا، دمای آن افزایش یابد و زمان پخت به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کند. در همین رابطه نصب فین‌های حرارتی در بدنهٔ ظرف غذا منجر به کاهش ۹ تا ۱۱ درصدی زمان جوشیدن آب در یک خوراک‌پز خورشیدی دو جهته گردید این آثار درنتیجهٔ افزایش نرخ انتقال حرارت در داخل خوراک‌پز خورشیدی صورت گرفته است (Harmim *et al*., 2008). همچنین نصب تعدادی فین حرارتی روی صفحهٔ جاذب یک خوراک‌پز خورشیدی جعبه‌ای، دمای آن را به میزان ۷ درصد افزایش داد و زمان جوشیدن آب را در آن به میزان ۱۲ درصد کاهش داد، این پژوهش روی یک خوراک‌پز خورشیدی جعبه‌ای صورت گرفت ولی نتایج آن درمورد خوراک‌پزهای خورشیدی دو جهته هم قابل استفاده است (Harmim *et al*., 2010). پژوهش درزمینهٔ خوراک‌پز خورشیدی دو جهته اولین بار در سال ۲۰۰۲ انجام شد، در این سیستم تابش هم‌زمان انرژی خورشید از سمت بالا و پایین به صفحهٔ جاذب موجب شد تا دمای آن از ۱۴۰ به ۱۶۵ درجهٔ سانتی‌گراد افزایش یابد و زمان جوشیدن آب در آن نسبت به نمونهٔ جعبه‌ای ۳۰ تا ۶۰ دقیقه کاهش پیدا کند (Emad & Amer, 2003). همچنین استفاده از یک طرح ابتکاری از سطوح انعکاسی موجب گردید تا حداکثر دمای صفحهٔ جاذب، از ۱۲۷/۷به ۱۶۵درجهٔ سانتی‌گراد افزایش یابد، این بهبود عملکرد نتیجهٔ استفاده از دو سطح انعکاس سهمی در یک خوراک‌پز خورشیدی جعبه‌ای بود؛ در این سیستم صفحهٔ جاذب، از دو طرف انرژی تابشی را دریافت می‌کرد؛ این سیستم در بدنهٔ دیوار آشپزخانه نصب گردید و بدون تعقیب خورشید کار می‌کرد (Harmim *et al*., 2013). ارائه‌دهندگان طرح یادشده گرچه روش بهینه‌سازی هندسهٔ سطح انعکاسی را گزارش نکرده‌اند، ولی عملکرد آن را به روش تحلیلی (Harmim *et al*., 2012a) و مدل‌سازی فرایند انتقال حرارت در آن را به روش عددی و تجربی (Harmim *et al*., 2012b) بررسی کردند. در ادامهٔ پژوهش‌های صورت گرفته، این پژوهش باهدف طراحی و استفادهٔ بهینه از هندسهٔ سطوح انعکاسی خوراک‌پزهای خورشیدی دو جهته طراحی شده است. به این منظور اثر هم‌زمان زاویهٔ آیینه‌های جانبی و زمان استفاده از آن بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است و برای اولین بار تعیین موقعیت بهینه برای این آیینه‌ها در زمان استفاده به‌صورت تجربی ارائه شده است. به این منظور یک خوراک‌پز خورشیدی طراحی، ساخته و تحت آزمایش‌های هدفمند قرار گرفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند دانش فنی طراحی و ساخت و بهره‌برداری از خوراک‌پزهای خورشیدی را بهبود بخشیده و امکان تحلیل، طراحی و تعیین کاربردهای مناسبت‌تر برای آنها را فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش اثر زاویهٔ آیینه‌های جانبی و زمان آزمایش بر عملکرد حرارتی دستگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای یک روز معین، منطقهٔ جغرافیایی و شرایط جوی مشخص می‌توان نشان داد که انرژی جذب‌شده در سیستم‌های خورشیدی تابع دو پارامتر موقعیت سطوح انعکاسی و زمان کار سیستم است (Paul & Funk, 2000). باتوجه‌به هندسهٔ سیستم محاسبهٔ هم‌زمان اثر زاویهٔ سطوح انعکاسی در هر ساعت از طول روز به‌صورت تحلیلی مشکل می‌باشد به همین دلیل با طراحی تعدادی آزمایش تلاش خواهد شد تا برای یک اجاق خورشیدی دو جهته در شرایط فرضی، اثر تنظیم زاویهٔ آیینه‌های جانبی در حین کار بر عملکرد سیستم بررسی و ضمن تعیین رابطهٔ اثر آنها بر عملکرد سیستم، شرایط بهینهٔ استفاده از آنها نیز تعیین گردد؛ بنابراین مبنای نظری آزمایش‌های این بخش رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) خواهند بود.

رابطهٔ (۱)

$$G = h(\omega, \emptyset, \delta, \gamma, \beta)$$

رابطهٔ (۲)

$$q = f(G, F, \alpha, \eta)$$

رابطهٔ (۳)

$$F = g(\alpha, A)$$

در رابطه‌های بالا، G شدت تابش لحظه‌ای خورشید بر واحد سطح، ω زاویهٔ ساعت خورشیدی، ϕ عرض جغرافیایی، δ زاویهٔ انحراف خورشید، γ زاویهٔ سمت خورشید، β زاویهٔ شیب آیینه‌ها نسبت به افق، F ضریب کلی دید آیینه‌های جانبی نسبت به صفحهٔ شفاف ورودی، A مساحت کلی سطح آیینه‌های جانبی، α زاویهٔ نصب آیینه‌های جانبی نسبت به محور عمود بر افق و η بازده حرارتی سیستم می‌باشد. باتوجه‌به ثابت بودن پارامترهای A، ϕ، δ، γ و β در شرایط آزمایشی و مشخص بودن هندسهٔ سیستم، مقدار انرژی جذب‌شده q فقط تابعی از پارامترهای ω و α می‌باشد باتوجه‌به اینکه ω یک تابع خطی از زمان می‌باشد ازاین‌جهت تابع اصلی عملکرد سیستم در بررسی تجربی حاضر که به هدف تنظیم بهینهٔ زاویهٔ آیینه‌های جانبی در زمان عملکرد دستگاه طراحی شده است با رابطهٔ (۴) بیان می‌شود:

رابطهٔ (۴)

$$q = h(t, \alpha)$$

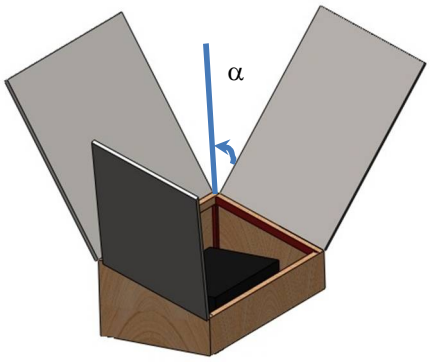
t: زمان (sec)

نرخ انرژی جذب‌شده یکی از اصلی‌ترین معیارهای سنجش عملکرد سیستم‌های مصرف‌کنندهٔ انرژی است که به‌صورت رابطهٔ (۵) تعریف می‌شود:

رابطهٔ (۵)

$$q = \frac{mc_p[(T_{fw} - T_{iw})]}{\Delta t}$$

در رابطهٔ بالا m مقدار جرم آب موجود در ظرف برحسب kg، C_p گرمای ویژهٔ آب که معادل ۴/۲ $^{kj}/_{kg.K}$ می‌باشد، T_{iw} و T_{fw} دماهای اولیه و نهایی آب در طول زمان آزمایش برحسب K و Δt کل طول زمان تابش برحسب ثانیه می‌باشد. مقدار انرژی جذب‌شده با استفاده از اندازه‌گیری دماهای اولیه و ثانویه و براساس آزمایش‌های طراحی‌شده به‌دست می‌آید. در شکل (۱) هندسهٔ بخش جعبه‌ای اجاق خورشیدی و زاویهٔ تنظیم آیینه‌های جانبی نشان α داده شده است.



شکل ۱ - مدل سه‌بُعدی بخش جعبه‌ای اجاق خورشیدی و زاویهٔ تنظیم آیینه‌های جانبی

شرح دستگاه

خوراک‌پز خورشیدی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته از نوع دو جهته می‌باشد که از دو بخش سهمی و جعبه‌ای تشکیل شده است. در این نوع اجاق‌های خورشیدی امکان جذب انرژی خورشید از دو طرف وجود دارد. انرژی دریافتی از آیینه‌های سهمی (از سمت پایین) به همراه انرژی دریافتی از بخش جعبه‌ای (از سمت بالا) موجب افزایش دمای صفحهٔ جاذب و درنتیجه پخت غذا می‌گردد. نمونهٔ مشابه این سیستم برای اولین بار باهدف بررسی اثر فین‌دار کردن ظرف غذا بر عملکرد خوراک‌پز خورشیدی مورد استفاده قرار گرفت (Harmim *et al*., 2008). در شکل (۲) تصویر خوراک‌پز خورشیدی آماده‌شده برای آزمایش‌های این قسمت نشان داده شده است.

شکل۲ - تصویر خوراک‌پزهای خورشیدی در هنگام آزمایش

بخش سهمی خوراک‌پز خورشیدی از ۹ آیینهٔ تخت (به ابعاد ۱۰ در ۵۰ سانتی‌متر) تشکیل شده است که بر یک منحنی سهمی نصب شده‌اند و در طول زمان آزمایش هر ۱۵ دقیقه یک بار به‌صورت دستی نسبت به جهت تابش خورشید تنظیم می‌شوند. این آیینه‌ها از جنس شیشهٔ معمولی هستند که با استفاده از جیوه پوشش داده شده‌اند. معمولاً ضریب بازتاب این آیینه‌ها بین ۹۰ تا ۹۵ درصد می‌باشد که مقدار آن تابعی از کیفیت و تمیزی سطح می‌باشد. آیینه‌های نصب‌شده بر قسمت سهمی و ظرفی با قطر ۲۰ و عمق ۱۰ سانتی‌متر برای آزمایش‌ها درنظر گرفته شده است و در مرکز صفحهٔ جاذب قرار داده می‌شود. این ظرف از ورق آلومینیوم و به ضخامت ۰/۲ سانتی‌متر می‌باشد که دیوارهٔ بیرونی آن به‌طور کامل با رنگ سیاه پوشش داده شده است. صفحهٔ جاذب یک ورق فولادی تیره (به ابعاد ۴۶ × ۲۷ و ضخامت ۰/۲ سانتی‌متر) می‌باشد که به‌صورت افقی نصب شده است و از دو جهت تابش‌های خورشید را دریافت می‌نماید. بخش جعبه‌ای خوراک‌پز خورشیدی گرمای دریافتی از سمت بالا را به صفحهٔ جاذب و ظرف منتقل می‌کند. یک شیشهٔ شفاف بر وجه بالایی آن قرار گرفته است تا ضمن عبور دادن پرتوهای خورشید یک فضای گلخانه‌ای را ایجاد نماید. در قسمت زیرین آن هم یک صفحهٔ شیشه‌ای دوجداره قرار دارد که پرتوهای منعکس شده از آیینه‌های سهمی را جذب می‌کند. جدارهای خوراک‌پز خورشیدی از یک لایهٔ چوبی (به ضخامت ۲ سانتی‌متر) ساخته شده‌اند و یک ورق نازک آلومینیومی (به ضخامت ۰/۰۱ سانتی‌متر) در قسمت داخلی آن نصب شده است تا تابش خورشید را به سمت صفحهٔ جاذب و ظرف غذا هدایت نماید. تمامی درزها و محل‌های اتصال قطعات به‌خوبی درزبندی شده‌اند تا مانع خروج گازهای داغ از سیستم شود. ارتفاع خوراک‌پز در سمت جلو و عقب به ترتیب ۱۷ و ۳۲ سانتی‌متر است، در قسمت بالایی آن یک شیشهٔ شفاف به ابعاد ۴۸ × ۳۳ و ضخامت ۰/۴ سانتی‌متر) نصب شده است.

دقت وسائل اندازه‌گیری

تابش کل خورشید I در تمامی آزمایش‌ها به‌وسیلهٔ یک تابش‌سنج مدل TES/1333، با دقت w/m^2 ۱۰ ± و بیشترین عدم قطعیت w/m^2 ۵/۸ اندازه‌گیری شد. مقدار شدت تابش کل بر سطح افق اندازه‌گیری شده است (Roux *et al.*, 1998). دمای هوای محیط T_a به‌وسیلهٔ سیستم اندازه‌گیری هم‌زمان دما و رطوبت، مدل تستو ۶۰۵ با دقت °C ۰/۵± و دمای آب داخل ظرف T_w به‌وسیلهٔ یک سیستم دوکاناله اندازه‌گیری دما، مدل تستو ۹۲۲ با ترموکوپل نوع k (NiCr-Ni) و با دقت (mv ۰/۳٪ + °C ۰/۵±) اندازه‌گیری شده است. براساس استاندارد بین‌المللی آزمایش عملکرد خوراک‌پزهای خورشیدی، سنسور ترموکوپل بایستی به اندازهٔ ۵ سانتی‌متر بالاتر از کف ظرف در عمق آب فرورفته باشد (Funk, 2000). برای انطباق روش آزمایش با استاندارد مزبور مؤلفه‌های اثرگذار محیطی نظیر دمای محیط، سرعت باد در زمان آزمایش و رطوبت هوا نیز اندازه‌گیری شدند. در طول همهٔ آزمایش‌ها، دمای آب، تابش کل خورشید و سایر متغیرها هر ۵ دقیقه یک بار اندازه‌گیری و ثبت‌شده است.

روش طراحی و اجرای آزمایش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در شرایط آب‌وهوایی مشهد انجام گردید. مشهد در موقعیتی با عرض جغرافیایی ۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ غربی واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۹۸۵ متر می‌باشد. در تمام آزمایش‌ها اثر هم‌زمان زاویهٔ آیینه‌های جانبی و زمان آزمایش بر مقدار انرژی جذب‌شده توسط خوراک‌پز خورشیدی دو جهته بررسی شد. به‌منظور افزایش دقت در تعیین اثر آیینه‌های جانبی بر عملکرد سیستم آیینه‌های بخش سهمی سیستم معکوس شدند تا در فرایند جذب انرژی تأثیر نگذارند. بنابراین انرژی خورشید تنها ازطریق صفحهٔ بالایی قسمت جعبه‌ای آن داخل سیستم می‌گردد.

جدول ۱ - طرح آزمایشی براساس مدل سطح پاسخ به همراه نتایج نهایی مقدار کل انرژی جذب‌شده (آزمایش‌ها در تاریخ ۱۰ تا ۱۳ شهریور ۱۳۹۳ انجام شده‌اند)

شمارهٔ آزمایش	متغیرهای مستقل		متغیر وابسته (پاسخ)
	زاویهٔ آیینه جانبی (*rad*)	زمان آزمایش (*houre*)	انرژی جذب‌شده (w/m_2)
	α	t	q
۱	۳/۵۲	۱۰	۲۲/۵
۲	۲	۱۱	۲۴/۷
۳	۲	۱۱	۲۴/۶
۴	۱/۶۵	۱۲	۲۱/۶
۵	۱/۶۵	۱۰	۱۹/۸
۶	۲/۴۹	۱۱	۲۱/۱
۷	۲	۱۱	۲۲/۶
۸	۲/۳۵	۱۲	۲۴/۲
۹	۲	۱۲/۴۱	۲۴
۱۰	۲	۹/۵۹	۱۸/۹
۱۱	۲	۱۱	۲۴/۴
۱۲	۲	۱۱	۲۳/۷
۱۳	۱/۵۱	۱۱	۲۹/۸

در این پژوهش از طرح مرکب مرکزی[1] یا روش سطح پاسخ[2]، جهت بهینه‌یابی شرایط متغیرهای مستقل (زمان و زاویهٔ آیینه‌های جانبی) بر متغیر وابسته (مقدار انرژی جذب‌شده) استفاده شد. روش

[1] Central Composite Design(CCD)

[2] Response surface methodology(RSM)

سطح پاسخ مجموعه‌ای از ابزارهای آماری و ریاضی مؤثر برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرایندها را در اختیار می‌گذارد (Roux *et al.*, 1998). هدف این روش ارائهٔ یک تقریب کلی برای تبیین رفتار سیستم براساس داده‌هایی است که از عملکرد سیستم در نقاط بخصوصی به‌دست آمده‌اند. برای این منظور از نرم‌افزار Design expert 7.0.0 استفاده شد. با وارد کردن متغیرهای مستقل به همراه دامنهٔ تغییرات آنها، ۱۳ آزمایش با نقاط تعیین‌شده برای اجراء توسط نرم‌افزار پیشنهاد گردید که ۵ نقطهٔ آنها مربوط به تکرار در نقطهٔ مرکزی بود. نقاط مرکزی روشی برای تخمین و ارزیابی خطای آزمایش‌ها و اندازه‌گیری ضعف برازش است. جدول (۱) فهرست آزمایش‌ها و مختصات نقاط هر آزمایش به همراه مقدار انرژی جذب‌شده یا پاسخ محاسبه‌شده براساس رابطهٔ (۵)، (بعد از انجام آزمایش‌ها) را در آن نقاط نشان می‌دهد.

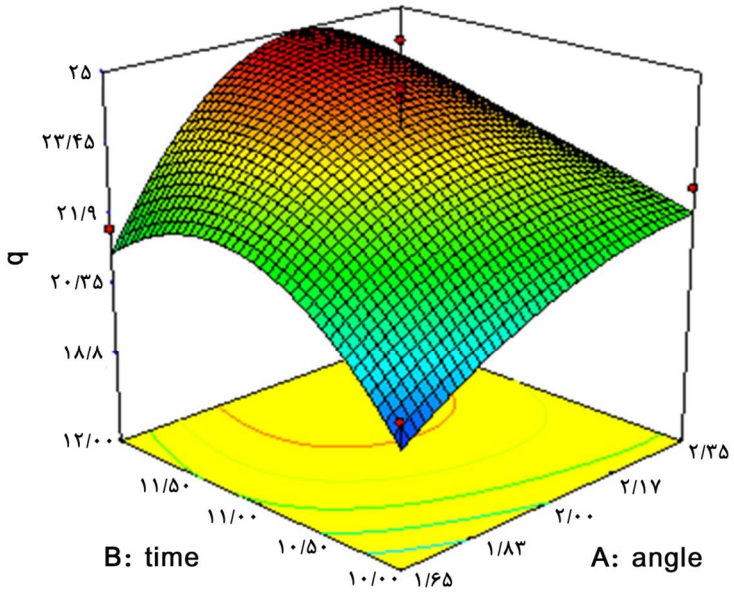
بحث و بررسی نتایج

در همهٔ آزمایش‌ها، یک ظرف معین با مقدار یک لیتر آب پر شد و مطابق تیمارهای طرح آزمایشی (جدول ۱) انجام شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در نرم‌افزار اکسل[1] وارد شد و مقدار کل انرژی جذب‌شده برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه گردید. مقدار انرژی جذب‌شده در مدل سطح پاسخ وارد گردید و نتیجهٔ آن توسط نرم‌افزار تحلیل شد. از تحلیل‌های آماری و ریاضی صورت‌گرفته توسط روش سطح پاسخ مناسب‌ترین مدل ریاضی برای پیش‌بینی مقدار انرژی جذب‌شده به‌دست آمد. این مدل ریاضی رابطهٔ تجربی میان انرژی جذب‌شده و متغیرهای زمان و زاویهٔ آیینه‌های جانبی را نشان می‌دهد (رابطهٔ ۶):

رابطهٔ (۶)

$$q = 24 + 0.46\theta + 1.8\omega - 0.025\theta\omega - 1.51\theta^2 - 1.01\omega^2 - 0.93\omega\theta^2 + 0.87\theta\omega^2$$

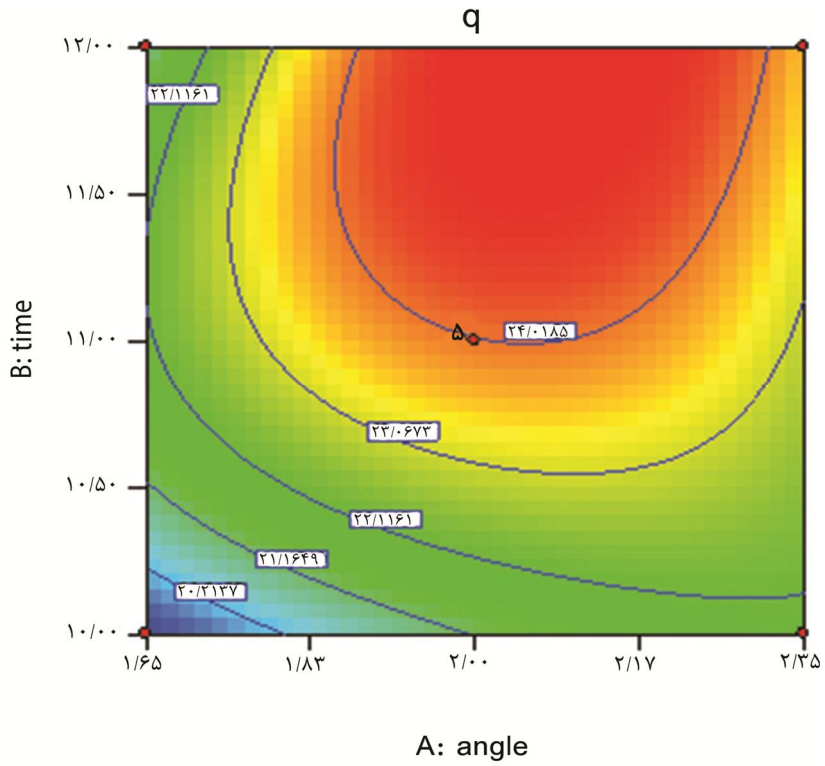
در رابطهٔ بالا حاصل استفاده از تابع درجهٔ ۲ اصلاح‌شده برای توصیف سطح پاسخ می‌باشد. براساس مدل به‌دست‌آمده، اثر همزمان زاویهٔ آیینه‌های جانبی و زمان آزمایش در خوراک‌پز خورشیدی ترسیم گردید که در شکل (۳) نشان داده شده است:



شکل ۳ - رویهٔ پاسخ مقدار انرژی جذب‌شده براساس متغیرهای زمان و زاویهٔ آیینه‌های جانبی

[1] Excel

در مدل پیشنهادشده برای اثر زاویهٔ آیینه‌های جانبی و زمان انجام آزمایش، موقعیت بهترین عملکرد سیستم که در آن بیشترین انرژی جذب سیستم شده، نشان داده شده است (ناحیهٔ مشخص‌شده با رنگ قرمز). همچنین مشخص شده است که در برخی از نواحی عملکرد سیستم بسیار ضعیف است. برای ارائهٔ دید مناسب‌تر کانتورهای انرژی جذب‌شده در صفحهٔ افقی در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل نیز موقعیت عملکرد بهینهٔ سیستم به‌خوبی نمایش داده شده‌اند و نواحی با عملکرد ضعیف نیز مشخص شده است. با استفاده از معادلهٔ ریاضی به‌دست‌آمده (رابطهٔ ۶) می‌توان دستورالعملی برای تنظیم بهینهٔ سیستم براساس مقداری انرژی جذب‌شده تهیه نمود که امکان تنظیم آیینه‌ها را در فاصله‌های زمانی مشخص تعیین نماید.



شکل ۴ – کانتورهای تعیین‌کنندهٔ مقدار انرژی جذب‌شده براساس متغیرهای زمان و زاویهٔ آیینه‌های جانبی

اعتبارسنجی روش و نتایج

تحلیل عدم قطعیت آزمایش‌ها

عدم قطعیت هر پارامتر در آزمایش‌ها ناشی از خطاهای ابزار اندازه‌گیری و تکرار آزمایش می‌باشد که از رابطهٔ (۷) به‌دست می‌آید:

رابطهٔ (۷)

$$\upsilon\delta = \sqrt{\left(\delta v_{eqp}\right)^2 + \left(\delta v_{rep}\right)^2}$$

eqp: ابزار

rep: تکرار

در بسیاری از حالت‌ها لازم است عدم قطعیت برای یک تابع چندمتغیره محاسبه گردد. برای این کار درصورتی که k تابعی از n متغیر مستقل و خطی باشد به‌طوری‌که $k = k(\upsilon_1, \upsilon_2, \ldots \upsilon_n)$، عدم قطعیت ترکیبی تابع k به‌صورت رابطهٔ (۸) محاسبه خواهد شد (Kline & McClintock, 1953):

رابطهٔ (۸)

$$\delta k = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial \upsilon_1}\delta\upsilon_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \upsilon_2}\delta\upsilon_2\right)^2 + \cdots \left(\frac{\partial R}{\partial \upsilon_n}\delta\upsilon_n\right)^2}$$

k: تابع چند منظوره

υ: متغیر مستقل

δ: نماد عدم قطعیت

که δk عدم قطعیت تابع k، $\delta \upsilon_n$ عدم قطعیت متغیر υ_n و $\frac{\partial R}{\partial \upsilon_n}$ مشتق جزئی تابع k نسبت به متغیر υ_n می‌باشد. برای حالتی که پارامترهای υ_1، υ_2، υ_n و υ_m با عدم قطعیت‌های $\delta\upsilon_1$، $\delta\upsilon_2$، $\delta\upsilon_n$ و $\delta\upsilon_m$ اندازه‌گیری شده باشند و تابع R به‌صورت رابطهٔ (۹) تعریف شده باشد:

رابطهٔ (۹)

$$k = \frac{\upsilon_1 \times \upsilon_2 \times \cdots \upsilon_m}{\upsilon_{m+1} \times \cdots \upsilon_n}$$

و همچنین عدم قطعیت پارامترهای υ_1، υ_2، $\delta\upsilon_n$ و υ_m مستقل از هم باشند، عدم قطعیت ترکیبی تابع از رابطهٔ (۱۰) محاسبه خواهد شد (Taylor, 1997):

رابطهٔ (۱۰)

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\delta \upsilon_1}{\upsilon_1}\right)^2 + \cdots \left(\frac{\delta \upsilon_m}{\upsilon_m}\right)^2 + \cdots \left(-\frac{\delta \upsilon_{m+1}}{\upsilon_{m+1}}\right)^2 \cdots \left(-\frac{\delta \upsilon_n}{\upsilon_n}\right)^2}$$

در آزمایش‌های این قسمت، اثر متغیرهای ساعت خورشیدی و زاویهٔ آیینه‌های جانبی بر مقدار انرژی جذب‌شده توسط سیستم بررسی شد که با رابطهٔ (۱۱) بیان می‌شود:

رابطهٔ (۱۱)

$$q = \frac{mc_p[(T_{fw} - T_{iw})]}{\Delta t}$$

برای این حالت عدم قطعیت انرژی جذب‌شده از رابطهٔ (۱۲) محاسبه خواهد شد:

رابطهٔ (۱۲)

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(-\frac{\delta t}{t}\right)^2}$$

عدم قطعیت ابزارهای اندازه‌گیری استفاده‌شده در آزمایش‌های این قسمت در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ - مشخصات ابزار اندازه‌گیری و عدم قطعیت آنها

متغیر آزمایشی	مدل ابزار	دقت	عدم قطعیت
توان تابش خورشید	تس ۱۳۳۳، ساخت تایوان	$\pm ۱۰\ {}^{w}/_{m^2}$	±۵/۸
دمای آب	تستو ۹۲۲، ساخت آلمان	٪ ±۰/۳ mv	±۰/۵
حجم آب	بشر مخروطی	±۰/۰۱ $m^۳$	±۰/۰۱
طول	متر	±۰/۰۰۱ m	±۰/۰۰۱
زمان	ساعت معمولی	±۱ sec	±۱

با استفاده از داده‌های جدول (۲) و براساس رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) عدم قطعیت آزمایش‌ها برای انرژی جذب شده به‌صورت رابطهٔ (۱۳) محاسبه خواهد شد:

رابطهٔ (۱۳)

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{(0.01)^2 + (0.01)^2 + (-0.0005)^2} = \pm 0.014$$

مقدار عدم قطعیت به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که روند انجام آزمایش و ابزار استفاده‌شده در اندازه‌گیری متغیرها از اطمینان لازم برخوردار است.

استفاده از روش تجزیهٔ واریانس

مدل‌هایی که توسط روش سطح پاسخ ارائه می‌شوند بایستی آزمون‌های آماری بخصوصی را با مؤفقیت پشت‌سر بگذرانند. آزمون تجزیهٔ واریانس[1] مهمترین شاخص‌های اعتبارسنجی این روش را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مطابق نتایج تجزیهٔ واریانس برای انرژی جذب‌شده، کم بودن مقدار P (P<۰/۰۵) نشان‌دهندهٔ معنی‌دار بودن دو متغیر مستقل به‌کاررفته در تعیین میزان پاسخ حاصل (انرژی جذب‌شده) است. براساس معیار اعتبارسنجی آنوا[2] این مقدار بایستی کمتر از

[1] ANOVA
[2] Analysis of variance (ANOVA)

۰/۰۵ باشد. همچنین کارایی مدل توسط ضرایب تبیین R^2 و $R^2_{adjusted}$ نیز بررسی شد که مقادیر آن به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۷۴ به‌دست آمد. ضریب تبیین R^2 به‌عنوان نسبت تغییرات توصیف‌شده توسط مدل به تغییرات کل بیان می‌شود که معیاری از درجهٔ تناسب برازش می‌باشد. بنابراین هرچه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر باشد، قدرت مدل برازش‌یافته در توصیف تغییرات پاسخ به‌عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیشتر است. یکی دیگر از معیارهای سنجش مدل به‌دست‌آمده در روش پاسخ سطح، بررسی عدم برازش آن است. عدم برازش باید از لحاظ آماری بی‌معنی باشد که در این پژوهش نیز عدم برازش بی‌معنی بود (جدول ۳).

جدول ۳ - نتایج جدول آنالیز واریانس (ANOVA) مدل برازش‌یافته بر داده‌های پاسخ

منبع	درجهٔ آزادی	مجموع مربعات	اندیس p
مدل	۷	۴۴/۳۶	۰/۰۳۴۱
زاویه (A)	۱	۰/۸۴	۰/۴۱۵۷
زمان (B)	۱	۱۳	۰/۰۱۷۷
AB	۱	$۲/۵\times۱۰^{-۳}$	۰/۹۶۳۴
A^2	۱	۱۵/۷۸	۰/۰۲۱۲۲
B^2	۱	۷/۰۴	۰/۰۵۰۶
A^2B	۱	۱/۷۲	۰/۲۶۱۲
AB^2	۱	۱/۵۰	۰/۲۹۰۸
Residual	۵	۵/۳۷	-
Lack of fit	۱	۲/۳۱	۰/۱۵۷۲
Pure Error	۴	۳/۰۶	-
Total	۱۲	۴۹/۷۳	-

مقایسهٔ نتایج با داده‌های آزمایشی

ارزیابی مدل ریاضی به‌دست‌آمده توسط روش سطح پاسخ با مقایسهٔ نتایج آن با داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش نیز انجام شد. در شکل (۵) مقادیر انرژی جذب‌شده که با استفاده از مدل ریاضی محاسبه شده است با نتایج حاصل از آزمایش‌ها باهم مقایسه شده‌اند. براساس نمودار فوق بیشترین خطای ایجادشده مربوط به نقطهٔ شماره (۷) می‌باشد که مقدار آن در حدود ۵/۴ درصد می‌باشد، درحالی‌که متوسط خطای ایجادشده برای همهٔ نقاط آزمایش‌شده در حدود ۲/۷۵ درصد می‌باشد که نشان‌دهندهٔ دقت مدل ریاضی در پیش‌بینی مقدار انرژی جذب‌شده می‌باشد. با استفاده از مدل ریاضی به‌دست‌آمده اختلاف بیشترین مقدار انرژی جذب‌شده و کمترین مقدار آن را به‌دست می‌آید که مقدار آن ۲۲/۵۶ درصد می‌باشد. مقایسهٔ این مقدار با نتایج پژوهشی سایر محققان دراین‌رابطه بیان‌کنندهٔ درجهٔ اثر و اهمیت مطالعهٔ انجام‌شده در بهینه‌سازی خوراک‌پزهای خورشیدی خواهد بود (Harmim *et al.*, 2008; Harmim *et al.*, 2010).

شکل ۵ - مقایسهٔ مقدار انرژی جذب‌شده با استفاده از مدل ریاضی (معادلهٔ ریاضی سطح پاسخ) و نتایج آزمایش‌های تجربی

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که زاویهٔ آینه‌های جانبی و زمان تابش، در خوراک‌پزهای خورشیدی نقش قابل ملاحظه‌ای بر میزان انرژی جذب‌شده در دستگاه ایفا می‌کند. همچنین مدل‌سازی صورت‌گرفته به روش سطح پاسخ نشان داد که تأثیر متغیرهای مستقل شامل زاویهٔ آینه‌های جانبی و زمان تابش بر میزان انرژی جذب‌شده در دستگاه به‌خوبی با استفاده از یک تابع چندجمله‌ای درجهٔ دوم قابل توصیف است. تحلیل عدم قطعیت آزمایش‌های انجام‌شده نیز نشان می‌دهد که آزمایش‌های انجام‌شده از عدم قطعیت مناسبی برخوردار است. بررسی مدل بهینه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بهترین زمان برای استفاده از سیستم، بین ساعت‌های ۱۱ صبح تا ۱۴ بعدازظهر (باتوجه‌به قرینه بودن شرایط تابش خورشید نسبت به ظهر) می‌باشد در این فاصلهٔ زمانی تنظیم آیینه‌ها در موقعیت ۱/۸۳ تا ۲/۳ رادیان (معادل ۱۰۵ تا ۱۳۲ درجه) بهترین عملکرد حرارتی را موجب می‌شود. نتایج حاصله این واقعیت را نیز بیان می‌کند که عملکرد حرارتی سیستم در ساعت‌های ۱۰ تا ۱۰:۳۰ صبح، درحالی‌که آیینه-های جانبی در زاویهٔ کمتر از ۱۱۰ درجه تنظیم شده باشند در کمترین سطح می‌باشد. درصورتی‌که لازم باشد سیستم در ساعت‌های مزبور و حتی قبل از آن مورد استفاده قرار گیرد، بهتر است زاویهٔ آیینه‌های جانبی در موقعیت بیش از ۱۱۰ درجه تنظیم شوند؛ در این صورت عملکرد حرارتی سیستم حدود ۵ درصد بهبود پیدا خواهد کرد.

منابع

1- Al-Soud, M.S., Abdallah, E., Akayleh, A., Abdallah, S., & Hrayshat, E.S. 2010. A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system. Applied Energy, 87:463-470.

2- Amer, H.E. 2003. Theoretical and experimental assessment of a double exposure solar cooker. Energy onversion and Management, 44:2651-2663.

3- Farooqui, Z.S. 2015. Impact of load variation on the energy and exergy efficiencies of a single vacuum tube based solar cooker. Renewable Energy, 77:152-158.

4- Funk, P.A. 2000. Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. Solar Energy, 68:1-7.

5- Harmim, M, Boukar, M., & Amar, M. 2008. Experimental study of a double exposure solar cooker with finned cooking vessel. Solar Energy, 82:287-289.

6- Harmim, M., Belhamel, M., Boukar, M., & Amar, M. 2010. Experimental investigation of a box-type solar cooker with a finned absorber plate. Energy, 35:3799-3802.

7- Harmim, M., Merzouk, M., Boukar, M., & Amar, M. 2013. Design and experimental testing of an innovative building-integrated box type solar cooker. Solar Energy, 98:422-433.

8- Harmim, M., Merzouk, M., Boukar, M., & Amar, M. 2012. Mathematical modeling of a box-type solar cooker employing an asymmetric compound parabolic concentrator. Solar Energy, 86:1673-1682.

9- Harmim, M., Merzouk, M., Boukar, M., & Amar, M. 2012. Performance study of a box-type solar cooker employing an asymmetric compound parabolic concentrator. Energy, 47:471-480.

10- Khosrawialhoseini, M., & Maarefat, M. 2009. Evaluation of radiation energy loss in display case refrigerators. Journal of Modares Mechanical Engineering, 37:1-414. (in Persian).

11- Kline, S.J., & McClintock, F.A. 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. Mechanical Engineering, 75:3-8.

12- Kumar, N., Chavda, T., & Mistr, H.N. 2010. A truncated pyramid non-tracking type multipurpose domestic solar cooker/hot water system. Applied Energy, 87:471-477.

13- Nahar Jagdish, N.M., & Gupta, P. 1991. Energy conservation potential for solar cookers in arid zones of India. Energy, 16:965-969.

14- Oztourk, H.H. 2004. Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker. Solar Energy, 77(1):67-71.

15- Panwara, N.L., Kaushikb, S.C., & Kotharia, S. 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15:1513-1524.

16- Roux, W.J., Stander, N., & Haftka, R.T. 1998. Response surface approximations for structural optimization. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 42(3):517-534.

17- Schwarzera, K., Eugenia, M., & daSilvab, V. 2003. Solar cooking system with or without heat storage for families and institutions. Solar Energy, 75:35-41.

18- Sharaf, E. 2002. A new design for an economical, highly, efficient, conical solar cooker. Renewable Energy, 27:599-619.

19- Taylor, J.R. 1997. An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements, Sausalito: University Science Books

20- Valmiki, M.M., Heyer, J., Li, P., Morgan, M., Albinali, A., Alhamidi, K., & Wagoner, J. 2011. A novel application of a Fresnel lens for a solar stove and solar heating. Renewable Energy, 36:1614-1620.

Optimization of the Side Mirrors Angle of a Solar Cooker Using Response Surface Methodology (RSM)

Hosein Zamani[1]*, Mostafa Shahidi Noghabi[2], Mojtaba Mamourian[3]

1- Assistant professor, Department of Food Industry Machineries, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran
* Corresponding author (h.zamani@rifst.ac.ir)
2- Assistant professor, Department of Food Chemistry, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran
3- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract

According to the importance of expanding the use of clean energy, especially solar energy, in this study a solar cooker was designed, built and its performance in terms of the angle of the side mirrors at the same time and working time on the amount of energy absorbed was investigated by response surface methodology (RSM). The total amount of solar radiation as a measure of energy intake and increased water temperature inside the container was taken as an indicator of the amount of energy absorbed. The model on the basis of response surface methodology was used to validate the test and had a good validation (R^2=0.89, $R^2_{adjusted}$=0.74 and lack of fit: no significant). Analyzing the results of a mathematical model was obtained for investigation of the effect of the side mirrors angle and time on the performance of the system. The amount of absorbed energy by theory and laboratory has been also compared and the average of error at all tests was 2.75%. Based on this model in the optimal condition, energy absorption was increased by 22.56%. This study was done at Institute of Food Science and Technology located in Mashhad with latitude 54 and 36 degrees and a height of 985 meters above sea level.

Keywords: Reflective surfaces, Response surface methodology (RSM), Solar cooker, Solar energy