

## مقاله پژوهشی

## تعیین مشخصه‌های عملکردی خشک‌کن‌های مادون قرمز به منظور افزایش راندمان خشک‌کردن و یکنواختی توزیع حرارتی

سید صادق سیدلو هریس<sup>۱</sup>، حبیبه نعلبندی<sup>۲\*</sup>، امیر بداغی<sup>۳</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی بیو سیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲. استادیار، گروه مهندسی بیو سیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی بیو سیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۲۲، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۸/۸/۱، تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۱۸

## چکیده

خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از امواج مادون قرمز یکی از روش‌های کم هزینه و جذاب می‌باشد که با رعایت الزامات مهندسی در طراحی و عملکرد این خشک‌کن‌ها، کیفیت محصول نهایی مانند عدم چروکیدگی، جذب مجدد آب بالا بوده و تغییرات رنگ کمینه خواهد بود. از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در این خشک‌کن‌ها، طول موج امواج تابشی و فاصله منابع مادون قرمز از محصول می‌باشد که متضمن یکنواختی عملیات و حصول دماهای مختلف در خشک‌کن‌های سینی‌دار و تسمه نقاله‌ای است. به دلیل فقدان مدل‌ها و روابطی که قابل کاربرد در طراحی این نوع خشک‌کن‌ها باشد، در این تحقیق در خشک‌کن کابینی با منبع توان الکتریکی ضمن تثبیت طول موج تابشی امواج مادون قرمز ساطع شده از رادیاتورها در محدوده‌ای که جذب حداکثری امواج توسط محتوی آب ماده غذایی صورت می‌گیرد، مشخصه‌های طراحی منبع توان مادون قرمز مانند تاثیر موقعیت مکانی رادیاتورها روی یکنواختی تابش و به تبع آن یکنواختی خشک‌کردن ماده غذایی و نیز حداکثر دمای قابل حصول در سطح ماده مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه‌های فواصل افقی و عمودی رادیاتورها از محصول، تاثیر معنی‌داری روی حداکثر دمای قابل حصول و نیز یکنواختی توزیع گرما در سطح محصول داشت. هم‌چنین مدل ریاضی تغییرات حداکثر دمای قابل حصول روی محصول به صورت تابعی از متغیرهای رادیاتور توسعه یافت. نتایج نشان داد که مدل حداکثر دمای قابل حصول به وسیله مدل رگرسیونی دو متغیره غیرخطی با مقادیر  $r$  و RMSE به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۲/۷۵ قابل بیان و تبیین است. ضمن حفظ فواصل افقی و عمودی رادیاتورها در مقادیر توصیه شده و نیز حفظ دما و طول موج تابشی رادیاتورها در طول موج‌های جذب حداکثری، برای اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده، سینتیک خشک‌شدن نمونه‌های سیب‌زمینی و نیز پروفیل دمایی در داخل محصول اندازه‌گیری شد که نتایج بیانگر اعتبار بالای مدل بود.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن مادون قرمز، یکنواختی شدت تابش، طراحی، مدل حداکثر دما.

## ۱. مقدمه

نهایتاً تغییر رنگ کلی محصول می‌باشد [۶]. خامپاکول و همکاران ضریب نفوذ موثر رطوبت ورقه‌های موز با ضخامت ۵ mm را در خشک کردن به روش انجمادی و روش ترکیبی انجمادی-مادون قرمز با توان  $2/7 \frac{KW}{m^2}$  را به ترتیب برابر  $10^{-8} \times 1/22$  و  $\frac{m^2}{min}$  [۷]. تحقیقات مشابهی نیز توسط سایر محققین انجام شده است [۱۷-۸]. با توجه به تاثیر محسوس خشک کن‌های مادون قرمز در کاهش زمان خشک کردن محصول لایه نازک، در طراحی سیستم‌های مادون قرمز برای این نوع خشک کن‌ها، الزامات مهندسی از قبیل تعیین نوع رادیاتور، دمای منبع تابش، طول موج مادون قرمز، نوع و فرم رفلکتور، توجه به زاویه فضایی یا جامد و فاصله بین منبع تابش و هدف (ماده خشک شونده) باید رعایت شود که رعایت این موارد روی حفظ کیفیت ماده خشک شده و میزان مصرف انرژی تاثیر به سزایی دارد.

هر منبع مادون قرمز در یک طیف گسترده طول موج تابش می‌کند. ولی بیشینه توان انتشاری هر منبع مادون قرمز در یک محدوده‌ای از طول موج به صورت  $\lambda + d\lambda$  قرار دارد که به این طول موج، طول موج توان ماکزیمم می‌گویند ( $\lambda_{max}$ ) که طبق قانون وین (رابطه ۱) تابع دمای منبع (T) می‌باشد.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (1)$$

بنابراین دمای منبع از لحاظ تاثیر آن بر طول موج غالب منتشر شده، توان کل انتشاری و در نهایت حداکثر دمای سطح محصول بسیار حائز اهمیت است. از طرف دیگر هر یک از اجزای مختلف موجود در مواد مانند آب، پروتئین، چربی، خاکستر و کربوهیدرات‌ها بر حسب ماهیت خود، حداکثر جذب از توان انتشاری امواج مادون قرمز را در طول موج‌های بخصوصی دریافت می‌کنند (شکل ۱). بنابراین در عملیات خشک کردن که هدف اصلی آن کاهش فعالیت آبی از طریق تبخیر آب می‌باشد، بایستی بین  $\lambda_{max}$  منبع تابش کننده و طول موجی که آب بالاترین جذب را در آن دارا می‌باشد تطابق وجود داشته باشد تا تبخیر آب با راندمان بالایی صورت پذیرد [۱۸، ۱۹]. آب موجود در مواد غذایی در طول موج‌های ۳/۱ و  $6/1 \mu m$  منبع، حداکثر جذب را دارا می‌باشد که برای حصول این طول موج‌ها دمای منبع تابش باید

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های افزایش عمر انباری محصولات کشاورزی می‌باشد. روش‌های مختلفی مانند خشک کردن با هوای گرم، خشک کردن تحت خلاء، خشک کردن انجمادی، خشک کردن با امواج ماکروویو برای خشک کردن محصولات کشاورزی ابداع شده است. خشک کردن لایه نازک محصول با استفاده از خشک کن‌های مادون قرمز یا خشک کن‌های ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم یکی از روش‌های جذاب برای خشک کردن محصول می‌باشد که در آن محصولات نهایی تولید شده از کیفیت بالایی مانند کمترین چروکیدگی و تغییرات رنگ برخوردار بوده و هزینه فرایند نیز نسبتاً پایین می‌باشد [۱]. به همین دلیل این نوع خشک کن‌ها مورد توجه زیادی قرار گرفته و کاربرد وسیعی دارند. نواک و لویسکی با استفاده از امواج مادون قرمز اقدام به خشک کردن برش‌های سیب کردند. بر اساس نتایج به دست آمده افزایش سرعت هوای عبوری از سطح محصول و نیز افزایش فاصله عمودی منبع مادون قرمز از محصول، موجب افزایش زمان خشک شدن گردید [۲]. ناسونگ و همکاران فرایند خشک کردن یک نوع میوه محلی به نام لنگان را مطالعه نمودند. آنان گزارش کردند که دمای محصول و آهنگ خشک شدن وابسته به توان رادیاتورهای مادون قرمز است و با افزایش توان منبع مادون قرمز، آهنگ تبخیر افزایش می‌یابد [۳]. آداک و همکاران نشان دادند که افزایش توان منبع مادون قرمز، دما و سرعت هوای گرم موجب کاهش زمان خشک شدن توت‌فرنگی و افت کیفی محصول گردید [۴]. سواسدیسو و همکاران طی خشک کردن ورقه‌های موز به روش ترکیبی مادون قرمز-خلایی تاثیر ضخامت ورقه‌های موز از ۲ به ۴ mm در دمای  $50^\circ C$  بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت تاثیر معنی داری روی زمان خشک شدن دارد [۵]. پکه و همکاران نیز با مقایسه خشک کردن ورقه‌های موز به دو روش هوای گرم و مادون قرمز نشان دادند که خشک کردن نمونه‌ها به روش مادون قرمز سریع‌تر از هوای گرم انجام می‌شود زیرا در این روش نمونه‌ها سریع‌تر گرم شده و دمای آن‌ها در زمان کمتری به دمای مورد نظر می‌رسد. همچنین تغییر رنگ نمونه‌های موز در خشک کردن به روش مادون قرمز بیشتر از خشک کردن با هوای گرم بود که دلیلی اصلی آن افزایش جذب امواج مادون قرمز در لایه سطحی محصول و به تبع آن افزایش دمای سطحی محصول و بروز تغییر در ساختار رنگ دانه‌ها و

سایر منابع مادون قرمز نیز قابل تنظیم ساخته شود. در خشک-کن های مادون قرمز کابینی با تغییر فاصله سینی حاوی محصول از منابع مادون قرمز و در خشک کن های تسمه نقاله ای با تغییر فاصله منابع مادون قرمز از تسمه حاوی محصول می توان به این مهم دست یافت.

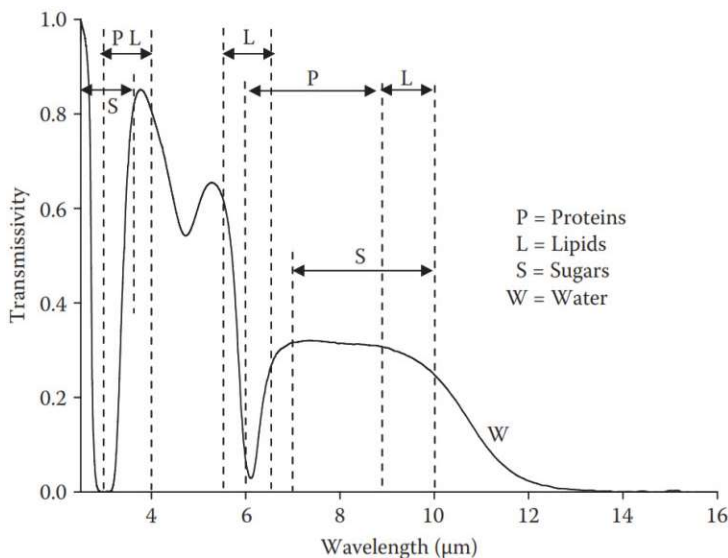
علی رغم اهمیت و تاثیر زیاد فواصل افقی و عمودی رادیاتورها روی حداکثر دمای قابل حصول در سطح محصول، مطالعه ای در خصوص تعیین تغییرات حداکثر دما به صورت تابعی از فاکتورهای مذکور و مدل سازی ریاضی آن توسط محققین انجام نشده است و اغلب آنان بر اساس مشاهدات تجربی اقدام به تعیین فواصل مورد نظر کرده اند.

نکته دیگری که در طراحی سیستم های مادون قرمز حائز اهمیت است و کیفیت ماده خشک شده را تحت تاثیر قرار می دهد یکنواختی دمای محصول در نقاط مختلف توده است که تحت تاثیر یکنواختی تابش امواج مادون قرمز قرار دارد. یکنواختی تابش خود تابعی از متغیرهای طراحی مانند فاصله عمودی رادیاتورها از محصول، فاصله افقی آن ها از یکدیگر و نیز الگوی قرارگیری آن ها می باشد. هم پوشانی مناسب محدوده تابش بهینه رادیاتورها (شکل ۲) بر روی سینی خشک کن می تواند متضمن یکنواختی تابش و یکنواختی دما در نقاط مختلف روی محصول باشد. تا به حال در تحقیقات مربوط به کاربرد مادون قرمز و تنظیم دما و یکنواختی دما در نقاط مختلف سینی محصول یا ماده غذایی به این موضوع یعنی تنظیم دما از طریق تغییر فواصل رادیاتورها از محصول پرداخته نشده است.

هدف این تحقیق تعیین حداکثر دمای قابل حصول در خشک-کردن محصول طی فرایند خشک کردن مادون قرمز کابینی و بررسی مقدار یکنواختی دما در سطح محصول به صورت تابعی از فاصله عمودی رادیاتورهای کوارتز- تنگستن از سطح محصول و نیز فواصل افقی رادیاتورها نسبت به هم و مدل سازی ریاضی آن بود که همه این اهداف با رعایت اصول جذب حداکثری آب در طول موج های مشخص مدنظر قرار گرفت. همچنین اندازه گیری پروفیل های دمایی در محصول خاصی مانند سیب زمینی و نیز حصول سینتیک خشک شدن آن در شرایط مذکور در بالا و بررسی اعتبار مدل پیشنهادی در سیب زمینی از اهداف دیگر طرح تحقیقاتی بود.

به ترتیب در ۶۲۵ و یا ۱۹۷ °C تنظیم گردد تا عملیات خشک-کردن و تبخیر رطوبت با راندمان بالایی صورت گیرد. البته این بدن معنا نیست که با تابش امواج مادون قرمز با طول موج های خارج از این محدوده، عملیات خشک کردن صورت نمی گیرد بلکه بیانگر آن است که در طول موج های بزرگتر از ۳/۵ μm و کوچکتر از ۵/۵ μm، عملیات خشک کردن جذب کمتر امواج توسط آب با بازدهی کمتری انجام می شود. پن و آتونگولو نیز بیان کردند که با خشک کردن مواد غذایی با طول موج های بین ۳/۵ تا ۵/۵ μm بیشتر امواج توسط سایر ترکیبات مواد غذایی جذب می شود که این امر با افزایش دما و تغییر در ساختار ترکیبات مواد غذایی موجب تشکیل لایه سخت در سطح مواد می شود. ولی در طول موج های ۳/۱ و ۶ μm امواج مادون قرمز توسط آب جذب شده و سخت شدگی سطحی در ماده ایجاد نمی شود [۲۰].

در مقیاس کاربردی و صنعتی حصول دمای ۶۲۵ °C منبع، در بعضی شرایط مقدور نمی باشد ولی دستیابی به دمای مرتبط با طول موج ۶/۱ μm (۱۹۷ °C) امکان پذیر است. غالباً در طراحی سیستم های مادون قرمز به این نکته توجه نمی شود و برای حصول دمای مورد نظر در سطح محصول، صرفاً از طریق تغییر دمای منبع به وسیله دایمر عمل می شود که با تغییر دمای منبع،  $\lambda_{max}$  مورد نظر بر اساس قانون وین تغییر کرده و حداکثر جذب توسط آب صورت نمی گیرد و از بازده فرایند کاسته می شود. بنابراین در طراحی این سیستم ها باید سعی شود برای حصول دماهای مختلف خشک کردن در سطح محصول، از روش های دیگری به غیر از تغییر دمای منبع تابشی استفاده شود [۲۰]. حداکثر دمای خشک کردن همچنین تابعی از شدت تابش ( $\frac{W}{m^2}$ ) در سطح محصول است که به تعداد رادیاتورها و سطح آن ها و نیز فاصله رادیاتورها از محصول وابسته می باشد. مقدار شدت تابش در سطح محصول با مجذور فاصله منبع مادون قرمز با محصول نسبت عکس دارد. از طرف دیگر پن و آتونگولو بیان داشتند که به دلیل شکل و اندازه متفاوت مواد غذایی، جذب امواج مادون قرمز در نقاط مختلف ماده و نقاط مختلف خشک کن متفاوت خواهد بود که این امر از معایب خشک کن های مادون قرمز محسوب می شود [۲۰]. بنابراین نه تنها فاصله مناسب بین منابع مادون قرمز و فاصله بین منبع مادون قرمز و محصول بایستی قابل تنظیم باشد بلکه فاصله هر منبع مادون قرمز باید به صورت منفرد و مستقل از



شکل (۱) طول موج مربوط به حداکثر جذب از توان انتشاری امواج مادون قرمز مواد مختلف موجود در ترکیب ماده غذایی [۲۰]

Fig. 1. Wavelength associated to absorb maximum infrared energy of the main food components [20]

## ۱. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. طرح کلی سیستم خشک‌کن مادون قرمز

دستگاه خشک‌کن به ابعاد  $76 \times 60 \times 55$  cm (طول - عرض - ارتفاع) با عایق‌بندی مناسب و به ضخامت ۱۵ mm ساخته شد که دیواره‌های داخلی آن توسط ورق آلومینیومی شفاف که دارای بیشترین ضریب انعکاس در طول موج‌های بیش از  $1/5 \mu\text{m}$  می‌باشد، پوشانده شد (شکل ۳). در دیواره کناری خشک‌کن دریچه‌ای

برای ورود هوای محیط به داخل خشک‌کن و در دیوار مقابل آن، یک دستگاه مکنده با توان ۱۲۰ W نصب گردید تا با مکش هوا از داخل خشک‌کن، از افزایش رطوبت نسبی در محیط اطراف محصول جلوگیری شود. برای تولید امواج مادون قرمز از رادیاتورهای نوع لوله کوارتز با المنت داخلی تنگستن استفاده شد و مجموعه روی شاسی مخصوص آن در بالا و پایین سینی محصول سوار شد که توان مصرفی هر یک از این رادیاتورها  $500 \text{ W}$  و طول و قطر آن‌ها به ترتیب برابر ۲۵۰ و ۱۲ بود. ارتفاع عمودی رادیاتورها از محصول و نیز فاصله افقی آن‌ها از یکدیگر قابل تنظیم بود. برای اندازه‌گیری دمای رادیاتورهای مادون قرمز از یک ترموکوپل نوع K روی بدنه رادیاتورها استفاده شد و با استفاده از یک دستگاه دیمر صنعتی، ولتاژ ورودی به رادیاتورها جهت حصول دمای مورد نظر ( $197^\circ\text{C}$ ) کنترل شد.

محصول روی سینی آن توزیع شد و برای ثبت تغییرات رطوبت محصول (تغییرات جرم محصول)، سینی مذکور به ترازوی دقیق نوع A&D مدل EK-3000i با دقت  $\pm 0.1 \text{ g}$  که قابل اتصال به کامپیوتر بود متصل شد که امکان توزین و محاسبه کاهش جرم به صورت تابعی از زمان خشک‌شدن فراهم می‌ساخت. پس از ساخت مجموعه، آزمایش‌های مختلفی برای بررسی یکنواختی دما در نقاط مختلف سینی و توده محصول، حداکثر دمای قابل حصول روی محصول، تعیین پروفیل دمای سطح و مرکز محصول و نیز بررسی سینتیک خشک‌شدن نمونه‌ای از محصولات کشاورزی (ورقه‌های سیب‌زمینی) انجام شد.

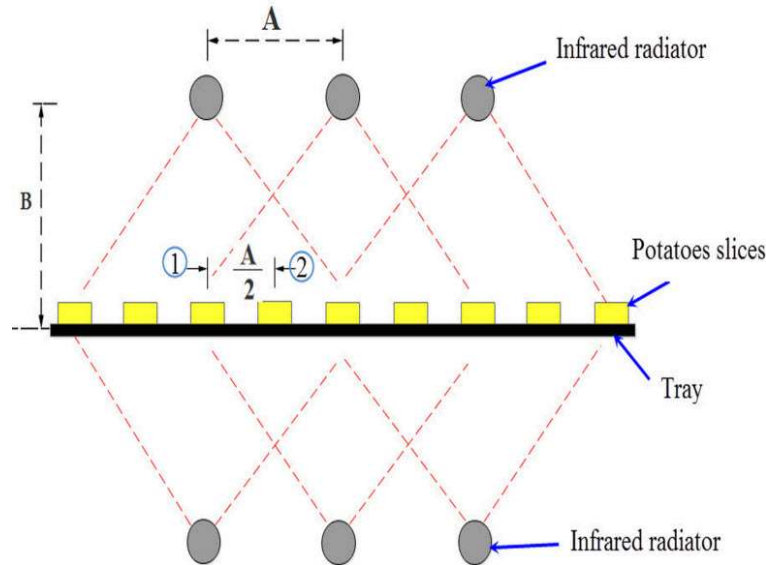
### ۲.۲. مطالعه یکنواختی تابش امواج مادون قرمز روی سطح

#### سینی

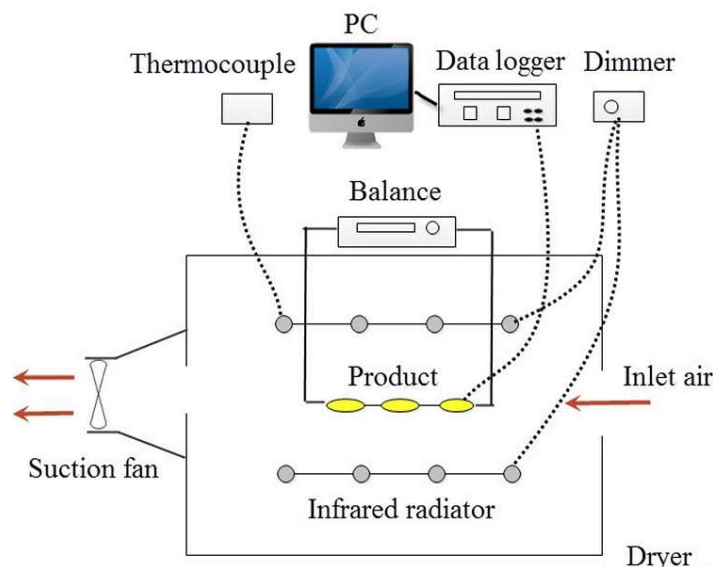
یکی از موارد بسیار مهم در عملیات خشک‌کردن مواد غذایی حصول رطوبت یکسان در تمامی نقاط توده محصول و سینی است که این موضوع از فساد محصول خشک در طول دوره نگهداری می‌کاهد. برای حصول یکنواختی دما در نقاط مختلف توده محصول، باید شدت تابش امواج مادون قرمز در نقاط مختلف سینی و محصول یکنواخت باشد. با توجه به قوانین کسینوس‌ها و زاویه فضایی (جامد) در موضوع گسیلندگی و دریافت تشعشعات مادون قرمز، مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار روی یکنواختی تابش،

شدند. در این شکل A فاصله افقی رادیاتورهای مجاور در سه سطح شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ cm (به ترتیب  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$ ) تنظیم شد. فاصله عمودی رادیاتورها از سینی محصول نیز در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ cm (به ترتیب  $B_1$ ،  $B_2$  و  $B_3$ ) تنظیم گردید. متغیر وابسته در آزمایشها، حداکثر دمای قابل قرائت و یکنواختی تابش در سطح سینی محصول بود. بنابراین آزمونها به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با دو فاکتور A و B اجرا شدند.

فاصله افقی منابع تابش (رادیاتورها) از یکدیگر (A) و نیز فاصله عمودی رادیاتورها از سطح محصول (منبع تابش تا هدف مورد نظر) (شکل ۲) می باشد. همچنین فاصله رادیاتورها از سطح محصول در نقاط مختلف سینی، روی حداکثر دمای قابل حصول روی محصول و نیز دمای خشک کردن نیز موثر می باشد. بنابراین برای مطالعه تاثیر عوامل مذکور و حصول بهترین فاصله قرارگیری رادیاتورها از یکدیگر و از محصول، رادیاتورهای مادون قرمز مطابق شکل (۲) در دو ردیف روی شاسی نگاه دارنده رادیاتورها نصب



شکل (۲) هم پوشانی رادیاتورهای مادون قرمز روی سینی حاوی محصول و فواصل قرارگیری لامپ های مادون قرمز از یکدیگر و از محصول  
**Fig. 2** Overlapping of the infrared radiator on the product tray and their distance from each other and product



شکل (۳) مجموعه خشک کن مادون قرمز به همراه ابزار اندازه گیری  
**Fig. 3** Infrared dryer and its associated measuring system

رگرسیون دو متغیره غیرخطی و تحت شرایط دمایی ثابت °C ۱۹۷ رادیاتورها و طول موج حداکثری ثابت ۶/۱ μm اقدام شد.

### ۲.۲.۲. اندازه‌گیری دمای سطح و مرکز محصول

پس از حصول مقادیر بهینه فواصل عمودی و افقی رادیاتورها و تثبیت آن‌ها و حصول یکنواختی شدت تابش در نقاط مختلف سینی خشک‌کن، عملیات خشک‌کردن ورقه‌های سیب‌زمینی به منظور بررسی عملکرد سیستم و مطالعه دمای محصول و پروفیل آن اجرا شد و نمونه‌هایی به ضخامت ۶ mm تهیه و تغییرات دمایی لایه‌های سطحی و میانی آن‌ها ثبت شد چرا که تفاوت روش‌های مختلف خشک‌کردن و رسیدن به خواص کیفی مختلف، در پروفیل دمایی محصول و گرادیان دمای مرکز و سطح نهفته است. به طوری که تغییرات دمای این دو نقطه بیانگر مقاومت داخلی محصول در انتقال گرما و نیز نوع و نحوه انتقال جرم به سطح محصول می‌باشد. برای این منظور ورقه‌های سیب‌زمینی در داخل خشک‌کن تا دمای °C ۷۵ گرم شدند. تغییرات دمای سطح و مرکز ورقه‌های سیب‌زمینی به وسیله ۲ عدد ترموکوپل اندازه‌گیری و توسط دیتالاگر DL2 در طول زمان آزمون ثبت شد. آزمایش‌ها نیز در سه تکرار انجام شدند.

### ۳.۲. مطالعه سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های سیب‌زمینی

#### در خشک‌کن مادون‌قرمز

برای امکان مقایسه عملکرد خشک‌کن مادون‌قرمز طراحی شده در خشک‌شدن محصولات کشاورزی با روش خشک‌کردن همرفتی، نسبت به خشک‌کردن قطعات سیب‌زمینی و حصول سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های سیب‌زمینی اقدام شد. دمای رادیاتورهای مادون‌قرمز خشک‌کن روی °C ۱۹۷ (معادل μm ۶/۱) تنظیم و ۱۱۰ g محصول بر روی سینی چیده و خشک شدند. تغییرات جرم محصول تا رسیدن محتوی رطوبت آن‌ها به  $\frac{g_{water}}{g_{dry\ matter}} = 0.39$  توسط ترازوی متصل به سینی در فواصل زمانی ۱۸۰ S ثبت گردید و در نهایت منحنی‌های سینتیک خشک‌شدن به صورت تغییرات محتوی رطوبت در برابر زمان ترسیم شد. رطوبت اولیه سیب‌زمینی نیز بر اساس استاندارد AOAC اندازه‌گیری شد [۲۱].

بر اساس آنچه که در خصوص باندهای جذبی حداکثر توسط آب موجود در مواد غذایی بیان شد، در همه آزمون‌ها، دمای رادیاتورها روی °C ۱۹۷ که معادل طول موج ۶/۱ μm است تنظیم شد. این دما به وسیله ترموکوپل نصب شده روی رادیاتورها اندازه‌گیری و دمای رادیاتورها با استفاده از یک واحد دیمر صنعتی تنظیم گردید. سرعت هوای عبوری از سطح محصول  $\frac{m}{s} 0.5$  تنظیم شد به این صورت که از محل سوراخی به قطر ۲۰ mm، سنسور اندازه‌گیر سرعت هوا از نوع تلسکوپ پره‌ای به داخل خشک‌کن فرستاده می‌شد که قادر بود سرعت جریان هوا را در نقاط مختلف اندازه‌گیری نماید. اضافه می‌نماید از سرعت‌های بیشتر به دلیل تاثیر آن در خنک شدن محصول و افزایش زمان خشک‌کردن استفاده نشد. ورقه‌های سیب‌زمینی به تعداد زیادی به ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر و ضخامت ۶ mm تهیه و در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل (۲) روی سینی در داخل خشک‌کن قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری دمای نمونه‌ها روی سطح هر یک از آن‌ها در موقعیت‌های ۱ و ۲ (شکل ۲) یک عدد ترموکوپل نوع K نصب گردید و تغییرات دمایی آن‌ها به وسیله دیتالاگر و در فواصل زمانی مناسب (۱۰S) ثبت گردید. از اختلاف دمای ثبت شده در دو نقطه متفاوت از سینی (۱ و ۲) به عنوان شاخصی برای مطالعه تاثیر فاصله‌های افقی و عمودی رادیاتورها روی یکنواختی تابش و از متوسط دمای دو نقطه مذکور برای مطالعه تاثیر فاصله‌ها بر روی حداکثر دمای سطح نمونه خشک‌شده استفاده شد.

### ۱.۲.۲. مدل‌سازی ریاضی حداکثر دمای قابل حصول روی

#### محصول

ضمن حفظ یکنواختی تابش در نقاط مختلف سینی، با تغییر فاصله عمودی رادیاتورها از سطح سینی، حداکثر دمای قابل حصول در سطح محصول اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است با توجه به تغییرات دمای سطح نمونه‌های کشاورزی در زمان خشک‌شدن و نوع نمودار که بصورت نمودار توابع لگاریتمی می‌باشد، حداکثر دما در زمان‌های طولانی خشک‌شدن و پس از تثبیت دما صورت گرفت تا بتوان اثر گرمای نهان تبخیر رطوبت ماده و نفوذ گرما به داخل ماده در دمای ثبت شده را بی‌اثر کرد. در نهایت نسبت به مدل‌سازی حداکثر دمای سطح به صورت تابعی از فواصل افقی و عمودی رادیاتورها به صورت مدل

### ۳. نتایج و بحث

در جدول (۱) مشخصات کلی خشک کن ساخته شده آورده شده است. با توجه به ضریب انعکاس بالای آلومینیوم سطوح داخلی خشک کن به وسیله صفحات آلومینیومی عایق بندی شد. محققین مختلفی نیز برای عایق کاری خشک کن های مادون قرمز از آلومینیوم استفاده کرده اند [۱۰، ۲۲]. سرعت هوای عبوری از خشک کن نیز روی  $\frac{m}{s}$  ۰/۵ تنظیم شد چرا که با توجه به نوع مکانیزم انتقال گرما در خشک کن های مادون قرمز، افزایش بیشتر سرعت هوای عبوری از روی محصول، موجب کاهش دمای سطح محصول شده و زمان خشک شدن را افزایش می دهد [۳-۱، ۱۰، ۱۵، ۲۳].

#### ۱۰.۳. مناسب ترین فواصل افقی و عمودی رادیاتورها روی

##### یکنواختی شدت تابش امواج مادون قرمز

فاصله قرارگیری رادیاتورها از یکدیگر و نیز فاصله عمودی آن ها از محصول به دلیل ایجاد و یا عدم ایجاد هم پوشانی امواج مادون-قرمز، یکنواختی تابش را تحت تاثیر قرار می داد. بنابراین یکنواختی شدت تابش به وسیله اختلاف دمای نقاط مشخص در روی سینی محصول محاسبه شد (شکل ۲). نتایج تجزیه واریانس اثر این دو فاکتور A و B روی یکنواختی شدت تابش امواج روی سینی محصول در جدول (۲) آورده شده است. اثرات اصلی شامل فواصل افقی و فاصله عمودی رادیاتورهای تابشی و نیز اثرات متقابل آن ها روی یکنواختی شدت تابش در سطح محصول در سطح احتمال ۱٪ معنی دار بود.

آنچه مسلم است این است که علی رغم وجود اختلافات معنی دار بین یکنواختی تابش در فواصل مختلف افقی و عمودی رادیاتورها؛ یکنواختی تابش به دست آمده در گستره فواصل مورد مطالعه رادیاتورها مناسب می باشد به طوری که حداقل و حداکثر غیریکنواختی به ترتیب برابر  $0.267\%$  و  $1.6867\%$  به دست آمد که در محدوده دمای کاری انواع خشک کن ها در خشک کردن محصولات غذایی قابل چشم پوشی است و می توان ادعا نمود که در همه فواصل مورد مطالعه، تابش امواج مادون قرمز و به دنبال آن خشک کردن محصولات یکنواخت صورت خواهد گرفت با این حال نتایج مقایسه میانگین اعداد مربوط به یکنواختی تابش در سطوح مختلف هر دو فاکتور نشان داد که بیشترین یکنواختی یا به عبارت دیگر حداقل اختلاف دمای دو

نقطه متفاوت روی سینی محصول، در فاصله افقی رادیاتورها به مقدار ۵ cm و فاصله عمودی ۲۰ cm رادیاتورها از سینی حادث می شود (شکل ۴). با این حال انتخاب تیمارهای  $A_1B_2$ ،  $A_1B_3$ ،  $A_2B_2$  و  $A_2B_3$  نسبت به بقیه ارجح تر می باشد.

#### ۲.۳. تاثیر فاصله افقی و عمودی رادیاتورها روی حداکثر دمای قابل حصول روی سطح محصول

حداکثر دمای قابل حصول روی محصول یکی از مهم ترین فاکتورهایی است که ضمن تاثیر بر سینتیک خشک شدن و زمان فرایند، کیفیت نهایی محصول خشک را تحت تاثیر قرار می دهد. محدوده دمایی خشک کردن محصولات غذایی بین  $30^\circ\text{C}$  تا  $80^\circ\text{C}$  متغیر می باشد. مقدار حداکثر دمای قابل حصول تحت تاثیر فواصل افقی و عمودی رادیاتورها و مقدار و یکنواختی شدت تابش می باشد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که حداکثر دمای قابل حصول روی سطح محصول بسته به فواصل افقی و عمودی رادیاتورها در محدوده  $33/19^\circ\text{C}$  تا  $70/82^\circ\text{C}$  قرار داشت که این محدوده دمایی می تواند نیازهای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی را برآورده نماید. نتایج ارایه شده در جدول (۲) نشان می دهد که اثرات اصلی و اثر متقابل فواصل افقی و عمودی رادیاتورها روی حداکثر دمای محصول در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود. نتایج مقایسه میانگین اعداد مربوط به حداکثر دمای قابل حصول روی محصول در سطوح مختلف هر دو فاکتور (شکل ۵) نشان می دهد که حداکثر دما در فاصله افقی ۵ cm رادیاتورها و فاصله عمودی ۱۰ cm، معادل  $70/8^\circ\text{C}$  به دست آمد. کمترین دمای خشک کردن در فاصله افقی ۱۰ cm و فاصله عمودی ۳۰ cm به مقدار  $33/19^\circ\text{C}$  حادث شد. چنانکه بیان شد مقدار شدت تابش تابعی از عکس مجذور فاصله منبع تابش تا هدف تغییر می کند و کاهش حداکثر دمای قابل حصول در فاصله عمودی ۳۰ cm دور از انتظار نبود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در تمامی تنظیمات فواصل و حصول حداکثر دما در شرایط مختلف، هم چنان یکنواختی توزیع دمایی روی سینی محصول وجود داشت و تفاوتها قابل اغماض بود. تغییر شدت تابش منبع مادون قرمز جهت به دست آوردن دماهای مختلف خشک کردن توسط اغلب محققین گزارش شده است [۳-۱، ۱۵، ۲۳، ۲۲]. با این وجود در هیچ کدام از گزارشات و تحقیقات اشاره شده، نوع تابع و روند تغییرات دمای روی سطح محصول به صورت

فاکتورهایی است که ضمن تاثیر بر سینتیک خشک شدن و زمان فرایند، کیفیت نهایی محصول خشک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. محدوده دمایی خشک کردن محصولات غذایی بین ۳۰ تا ۸۰ °C متغیر می‌باشد. مقدار حداکثر دمای قابل حصول تحت تاثیر فواصل افقی و عمودی رادیاتورها و مقدار و یکنواختی شدت تابش می‌باشد.

تابعی از فواصل افقی و عمودی بیان نشده است تا برای اهداف عملی و تنظیم دمای مورد درخواست و مطلوب، مورد استفاده قرار گیرد که نوع تابع در ادامه بیان خواهد شد.

### ۲.۳. تاثیر فاصله افقی و عمودی رادیاتورها روی حداکثر دمای قابل حصول روی سطح محصول حداکثر دمای قابل حصول روی محصول یکی از مهم‌ترین

جدول (۱) مشخصات فنی خشک کن مادون قرمز.

Table 1 Technical properties of infrared dryer.

مشخصات فنی Technical properties	توضیحات Description
ابعاد Dimension	۷۳×۶۰×۵۵ cm (طول - عرض - ارتفاع) 55×60×73 cm
جنس بدنه Metal	چوب MDF به ضخامت ۱/۵ cm Wood (MDF) with thickness of 1.5 cm
عایق بندی داخلی Internal isolator	ورق آلومینیوم براق Aluminum sheet
نوع رادیاتور Type of radiator	لوله کوارتز - تنگستن با توان ۵۰۰ W Quartz-Tungsten (power: 500 w)
دمای کاری رادیاتور و طول موج انتشاری Temperature of radiator and Wavelength of emitters	۱۹۷ °C، ۶/۱۳ μm 197°C, 6.13 μm
حداکثر تعداد رادیاتور Number of radiators	۶ عدد در هر ردیف 6 radiators at each row
ابعاد سینی Dimension of tray	۱۵×۱۵cm 15×15 cm
مکنده Fan	محوری مدل VIF-25 V2S با توان ۱۲۰ W Axial fan (model: VIF-25 V2S), power: 120 W
سرعت هوای عبوری Air velocity	۰/۵ m/s روی محصول 0.5 m/s

جدول (۲) تجزیه واریانس اثر فاصله افقی و عمودی رادیاتورها روی یکنواختی تابش امواج مادون قرمز و حداکثر دما.

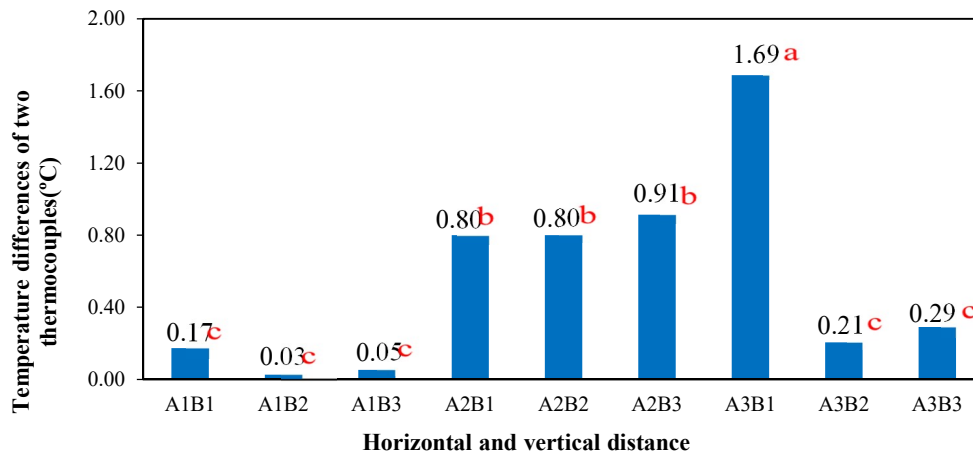
Table 2 ANOVA analysis of the effect of horizontal and vertical distance of infrared radiators on the radiation uniformity and maximum temperature.

میانگین مربعات Mean square		درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Variation source
یکنواختی تابش Radiation uniformity	حداکثر دما Maximum temperature		
1.49023333**	1132.102144**	2	فاصله افقی (A) Horizontal distance (A)
0.77754444**	469.918078**	2	فاصله عمودی (B) Vertical distance (B)
0.66381111**	50.410072**	4	فاصله افقی × فاصله عمودی (A×B) Horizontal × Vertical distance (A×B)
0.06361944	0.618004	16	خطای آزمایش Error

\*\* به معنی وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

\*\* Significant differences at 1% probability level.





شکل (۴) مقایسه میانگین یکنواختی تابش در فواصل افقی و عمودی رادیاتورها (حروف متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱٪ می باشد)

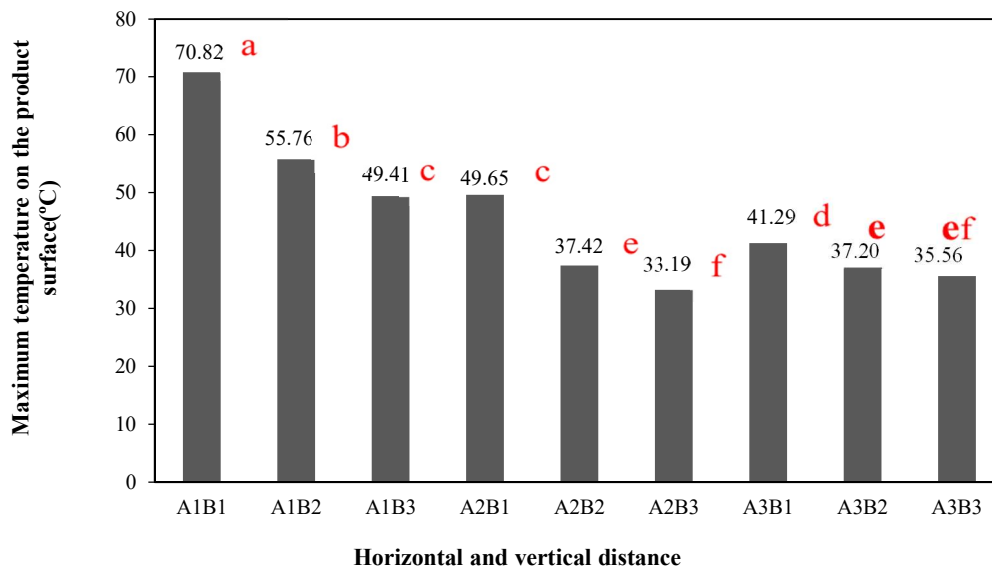
Fig. 4 Mean comparison of the radiation uniformity at the studied horizontal and vertical distance of radiators (different letters indicates the significant differences at 1% probability level)

و عمودی بیان نشده است تا برای اهداف عملی و تنظیم دمای مورد درخواست و مطلوب، مورد استفاده قرار گیرد که نوع تابع در ادامه بیان خواهد شد.

### ۳.۳. انتخاب بهترین فاصله افقی و عمودی لامپها

همان طوری که ملاحظه شد فواصل افقی و عمودی به طور هم-زمان روی یکنواختی شدت تابش و نیز حداکثر دمای قابل حصول در سطح محصول در خشک کن های کابینی یا سینی دار تاثیرگذار هستند. به طوری که با تغییر فواصل مذکور دما می تواند بین ۳۳ تا ۷۰ °C درجه تغییر یابد. به منظور استفاده موثر و مفید از نتایج حاصله به ویژه در تنظیم سیستم گرمایش خشک کن مادون قرمز برای حصول درجه حرارت های دلخواه روی محصول و جهت صرفه جویی در وقت و هزینه، مدل استقرایی تغییرات دمای حداکثر روی محصول به صورت تابعی از فواصل عمودی و افقی رادیاتورها توسعه یافته و معتبرسازی شد. رابطه (۲) مدل رگرسیونی غیرخطی دو متغیره توسعه یافته را برای پیش بینی حداکثر دمای محصول نشان می دهد. در این رابطه  $T_m$  حداکثر دمای محصول بر حسب °C، A فاصله افقی رادیاتورهای مادون قرمز از یکدیگر و B فاصله عمودی رادیاتورها از محصول بر حسب cm می باشد.  $R^2$  و RMSE مدل مذکور به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۲/۷۵ محاسبه شد که نشان دهنده دقت بالای مدل توسعه یافته در پیش بینی حداکثر دما می باشد.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که حداکثر دمای قابل حصول روی سطح محصول بسته به فواصل افقی و عمودی رادیاتورها در محدوده ۳۳/۱۹ تا ۷۰/۸۲ °C قرار داشت که این محدوده دمایی می تواند نیازهای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی را برآورده نماید. نتایج ارایه شده در جدول (۲) نشان می دهد که اثرات اصلی و اثر متقابل فواصل افقی و عمودی رادیاتورها روی حداکثر دمای محصول در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود. نتایج مقایسه میانگین اعداد مربوط به حداکثر دمای قابل حصول روی محصول در سطوح مختلف هر دو فاکتور (شکل ۵) نشان می دهد که حداکثر دما در فاصله افقی ۵ cm رادیاتورها و فاصله عمودی ۱۰ cm، معادل ۷۰/۸ °C به دست آمد. کمترین دمای خشک کردن در فاصله افقی ۱۰ cm و فاصله عمودی ۳۰ cm به مقدار ۳۳/۱۹ °C حادث شد. چنانکه بیان شد مقدار شدت تابش تابعی از عکس مجذور فاصله منبع تابش تا هدف تغییر می کند و کاهش حداکثر دمای قابل حصول در فاصله عمودی ۳۰ cm دور از انتظار نبود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در تمامی تنظیمات فواصل و حصول حداکثر دما در شرایط مختلف، هم-چنان یکنواختی توزیع دمایی روی سینی محصول وجود داشت و تفاوتها قابل اغماض بود. تغییر شدت تابش منبع مادون قرمز جهت به دست آوردن دماهای مختلف خشک کردن توسط اغلب محققین گزارش شده است [۳-۱، ۱۵، ۲۲، ۲۳]. با این وجود در هیچ کدام از گزارشات و تحقیقات اشاره شده، نوع تابع و روند تغییرات دمای روی سطح محصول به صورت تابعی از فواصل افقی



شکل (۵) مقایسه میانگین حداکثر دما در فواصل افقی و عمودی رادیاتورها (حروف متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ می‌باشند)  
**Fig. 5** Mean comparison of the maximum temperature at the studied horizontal and vertical distance of radiators (different letters indicates the significant differences at 1% probability level)

قرار دهد. بنابراین طراحی خشک‌کن‌های مادون قرمز با قابلیت تغییر فاصله عمودی سینی‌ها از محصول از ارجحیت برخوردار بوده و از نظر عملی امکان‌پذیر است.

#### ۴.۳. پروفیل دمایی مرکز و سطح ورقه‌های سیب‌زمینی

تغییرات دمایی مرکز و سطح ورقه‌های سیب‌زمینی در شکل (۶) نشان داده شده است. دمای ورقه‌های سیب‌زمینی در خشک‌کردن با حداکثر دمای مادون قرمز معادل  $70/8^{\circ}\text{C}$  به تدریج با پیشرفت خشک‌کردن افزایش یافته و در مدت ۱۶۰ min از دمای  $27^{\circ}\text{C}$  به  $70/8^{\circ}\text{C}$  رسید. افزایش تدریجی دمای محصول به دلیل تاثیر گرمای نهان تبخیر می‌باشد. زیرا انرژی امواج مادون قرمز بیش از آنکه موجب گرم شدن محصول شود، صرف تامین گرمای لازم برای تبخیر رطوبت ماده می‌شود. با گذشت زمان و کاهش محتوی رطوبت محصول، دمای آن به تدریج افزایش می‌یابد. به همین دلیل منحنی تغییرات دمای محصول از روند صعودی برخوردار است.

هم‌چنین دمای لایه سطحی ورقه‌های سیب‌زمینی بیشتر از دمای لایه مرکزی آن است که به دلیل طبیعت امواج مادون قرمز و جذب در لایه سطحی ماده است. انرژی امواج جذب شده در این لایه از طریق هدایت به مرکز ماده منتقل می‌شود. بنابراین همواره دمای

$$T_m = 118.9263 - 8.667 \times A + 0.33 \times A^2 - 2.004 \times B + 0.03194 \times B^2 \quad (2)$$

همان‌طوری که اشاره شد با تغییر توام یا منفرد فواصل افقی و عمودی رادیاتورها حداکثر دمای قابل حصول در سطح محصول تغییر می‌کند و این موضوع یک نکته مهم طراحی در خشک‌کن‌های مواد غذایی می‌باشد. تغییر دمای خشک‌کردن تابعی از فواصل منابع انرژی تا سطح محصول امکان‌پذیر است و نسبت به تغییر فواصل افقی رادیاتورها، از دیدگاه کاربردی راحت‌تر است. این موضوع هم در خشک‌کن‌های قفسه‌ای یا سینی‌دار و هم در خشک‌کن‌های تسمه نقاله‌ای با منبع مادون قرمز صادق است. البته راهکار دیگری برای تغییر دمای خشک‌کردن وجود دارد و آنهم استفاده از دیمر یا تغییردهنده مقدار جریان عبوری به رادیاتورها می‌باشد که به نظر می‌رسد نسبت به تغییر فواصل محصول - رادیاتور راحت‌تر و مقرون به صرفه‌تر باشد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که تغییر دما در سطح محصول با استفاده از دیمر موجب می‌شود که به دلیل تغییر دمای رادیاتورها، طول موج ماکزیم منبع مادون قرمز از طول موج مربوط به حداکثر جذب آب خارج می‌شود که خود این امر موجب عدم جذب حداکثر توسط آب، کاهش بازدهی عملیات، افزایش سخت‌شدن سطح محصول شده و آهنگ خشک‌شدن محصول را تحت تاثیر

در خصوص محصولی مانند قارچ، امپرنجات نیز مدت زمان خشک شدن برگه های قارچ به ضخامت ۳ mm را در خشک کن هوای گرم با دمای  $60^{\circ}\text{C}$  و سرعت هوای  $0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  و نیز با استفاده از خشک کن مادون قرمز با دمای هوای ورودی  $25^{\circ}\text{C}$  و حداکثر دمای روی سطح محصول  $60^{\circ}\text{C}$  و خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم با حداکثر دمای روی سطح نمونه  $60^{\circ}\text{C}$  را به ترتیب برابر ۲۱۶، ۷۶/۷ و ۵۴ min به دست آوردند. به عبارت دیگر استفاده از روش مادون قرمز نسبت به کنوکسیون در خشک کن قارچ نیز زمان خشک کردن را حدود ۷۵٪ کاهش داده است [۲۲].

نکته دیگر این که در تحقیق حاضر با توجه به یکنواختی شدت تابش در نقاط مختلف سینی، مقادیر نسبت رطوبت یا محتوی رطوبت ورقه های سیب زمینی در همه نقاط سینی تقریباً یکسان و تغییرات رطوبت قابل اغماض بود.

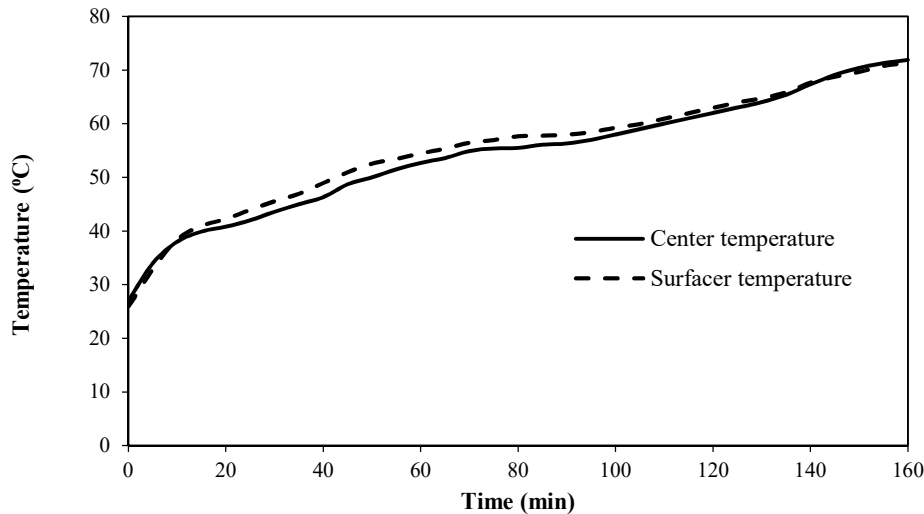
#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق پارامترهای طراحی خشک کن های مادون قرمز کابینی شامل تاثیر موقعیت مکانی رادیاتورها روی یکنواختی تابش و حداکثر دمای قابل حصول در سطح ماده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا طول موج تابشی امواج مادون-قرمز ساطع شده از رادیاتورها در محدوده ای که جذب حداکثری امواج توسط ماده غذایی صورت می گیرد تنظیم شد و سپس فواصل افقی رادیاتورها از یکدیگر و فواصل عمودی آن ها از سینی حاوی محصول هر کدام در سه سطح مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در همه فواصل افقی مورد مطالعه تابش امواج مادون قرمز با یکنواختی خوبی انجام می گیرد. هم چنین در محدوده فواصل افقی و عمودی مورد مطالعه رادیاتورها حداکثر دمای قابل حصول روی سطح محصول در محدوده  $33/19^{\circ}\text{C}$  تا  $70/82^{\circ}\text{C}$  به صورت تابعی از فواصل عمودی و افقی رادیاتورها و به صورت مدل رگرسیونی غیرخطی دو متغیره توسعه یافت.

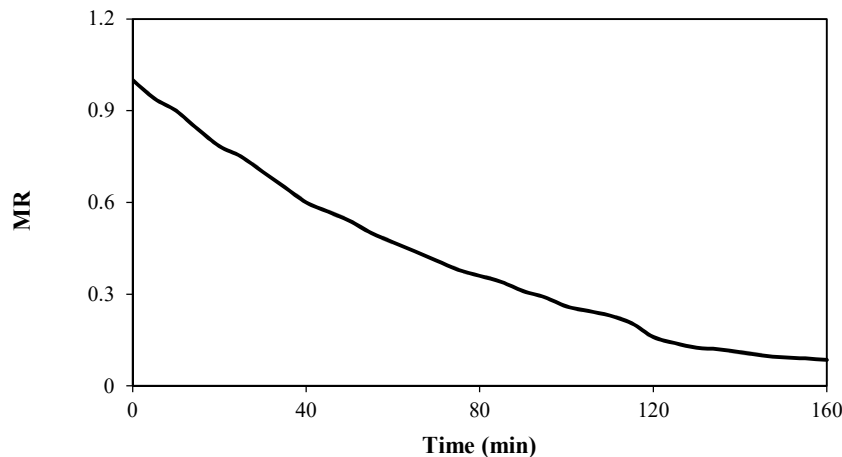
مرکز کمتر از دمای سطح ماده است. با این وجود تفاوت دمایی قابل توجهی در دمای سطح و مرکز ورقه های سیب زمینی ملاحظه نشد به طوری که اختلاف دمای سطح و مرکز ورقه های سیب زمینی در ابتدا و انتهای فرایند خشک کردن به ترتیب ۱ و  $0.5^{\circ}\text{C}$  بود که می تواند به دلیل ضخامت کم ورقه های سیب زمینی و بالا بودن ضریب نفوذ حرارتی آن باشد. می توان ادعا نمود تفاوت-های دمایی در مرکز و سطح ماده قابل اغماض است. بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که در خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی همانند سیب، سیب زمینی و هویج، دمای مادون قرمز مورد استفاده تقریباً همه نقاط حجم محصول به یک اندازه تحت تاثیر قرار می دهد و تغییرات کیفی در همه نقاط (شامل مرکز و سطح) به صورت یکسان مشاهده خواهد شد.

#### ۵.۳. نرخ کاهش رطوبت سیب زمینی

سینتیک کاهش رطوبت سیب زمینی در دمای  $197^{\circ}\text{C}$  رادیاتورها و فواصل افقی و عمودی رادیاتورها به ترتیب برابر ۵ و ۲۰ cm در شکل (۷) نشان داده شده است. در این تیمار دمای هوای محیط و عبوری از سطح محصول برابر  $20^{\circ}\text{C}$  و سرعت آن برابر  $0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  بود. زمان لازم برای کاهش نسبت رطوبت محصول به  $0.1$  که معادل کاهش رطوبت از  $3/9$  (بر مبنای خشک) به  $0.39$  می باشد، حدود ۱۶۰ min به طول انجامید که در این شرایط حداکثر دمای مادون قرمز  $70/82^{\circ}\text{C}$  حادث شد. این نتیجه نشانی دهد مدت زمان خشک شدن سیب زمینی در خشک کن مادون قرمز به مراتب کمتر از خشک کن هوای گرم است. به طوریکه یومش هبار و همکاران مدت زمان خشک شدن ورقه های سیب زمینی به ابعاد  $5 \times 17 \times 17 \text{ mm}$  را با هوای گرم با دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، ۳۴۵ min، با مادون قرمز منفرد و ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز به ترتیب ۲۸۵ و ۱۸۰ min گزارش کردند [۱۰]. این نتایج حاکی از آن است که علی رغم ضخامت بیشتر ورقه های سیب زمینی (۶ mm) و دمای پایین خشک کردن ( $70/82^{\circ}\text{C}$ ) نسبت به تحقیق انجام شده توسط یومش هبار و همکاران، در خشک کن توسعه یافته در این تحقیق زمان خشک کردن (۱۶۰ min) کمتر از زمان گزارش شده توسط یومش هبار و همکاران (۲۸۵ min) می باشد که دلیل آن استفاده از طول موج انتشار در جذب حداکثر آب در طول فرایند می باشد. بدیهی است که در شرایط مشابه فرایند خشک کردن سریع تر انجام خواهد شد.



شکل (۶) پروفیل دمایی مرکز و سطح ورقه‌های سیب‌زمینی  
 Fig. 6 Profile of central and surface temperature of potato slice



شکل (۷) منحنی خشک‌شدن سیب‌زمینی در حداکثر دمای  $70.8^{\circ}\text{C}$  مادون‌قرمز و سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه هوا  
 Fig. 7 drying kinetic of potato slice at the infrared temperature of  $70.8^{\circ}\text{C}$  and the air velocity of  $0.5$  m/s

## منابع

- [5] Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P., Soponronnarit, S. (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *J. Food Eng.*, 92, 100–106.
- [6] Pekke, M.A., Pan, Z., Atungulu, G.G., Gary Smith, G., Thompson, J.F. (2013). Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. *Int. J. Agri. Biology Eng.*, 6 (3), 58-70.
- [7] Khampakool, A., Soisungwan, S., Park, S.H. (2019). Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy
- [1] Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P.B. (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *J. Food Eng.*, 67, 361-366.
- [2] Nowak, D., Lewicki, P.P. (2005). Quality of Infrared dried apple slices. *Drying Technol.*, 23, 831-846.
- [3] Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K., Achariyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole langan with combined infrared and hot air. *J. Food Eng.*, 102, 233-239.
- [4] Adak, N., Heybeli, N., Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chem.*, 219, 109-116.

- [23] Nowak, D., Lewicki, P.P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 5, 353-360.
- consumption, and texture. *LWT - Food Sci. Technol.*, 99, 355-363.
- [8] Sandu, V. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnol. Progr.*, 2(3), 109-119.
- [9] Afzal, T.M., Abe, T. (1998). Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *J. Food Eng.*, 37(4), 353-365.
- [10] Umesh Hebbar, H., Vishwanatham, K.H., Ramesh, M.N. (2004). Development combined infrared and hot air dryer for vegetables. *J. Food Eng.*, 65, 557-563.
- [11] Togrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *J. Food Eng.*, 77, 610- 619.
- [12] Timoumi, S., Mihoubi, D., Zagrouba, F. (2007). Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. *J. LWT*, 40, 1648-1654.
- [13] Celma, A.R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I., Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behavior of sludge of alive oil extraction. *J. Food Eng.*, 80, 1261-1271.
- [14] Rzca, M., Rajchert, D.W. (2009). Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apple. *Drying Technol.*, 27, 903- 909.
- [15] Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., Siriamornpun, S. (2012). Modeling of combine far-infrared radiation and air drying of a ring shaped pineapple with/ without shrinkage. *Food Bioprod. Process.*, 90, 155-164.
- [16] Aktas, M., Sevik, S., Amini, A., Khanlari, A. (2016). Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. *Sol. Energy*, 137, 500-515.
- [۱۷] احمدی قویدلان، م؛ امیری چایچان، ر. (۱۳۹۵). استفاده از روش سطح پاسخ جهت بهینه سازی خشک کردن فندق در بستر سیال مادون قرمز. نشریه پژوهش های صنایع غذایی، جلد ۲۶ (۴)، ص ۶۳۹-۶۵۷.
- [18] Sakai, N., Hanzawa, T. (1994). Application and advances in far infrared heating in Japan. *Trend Food Sci. Technol.*, 5(11), 357- 362.
- [19] Ratti, C., Mujumdar, A.S. (2006). Infrared drying, handbook of industrial drying. Taylor & Francis. Vol: 3.
- [20] Pan, Z., Atungulu, G.G. (2011). Infrared heating for food agriculture processing. Taylor & Francis Group. Dublin.
- [21] AOAC (1980). Official methods of analysis (13<sup>th</sup> ed.). Washington, DC Association of Official Analytical Chemists.
- [۲۲] امیرنجات، ح. (۱۳۸۹). خشک کن مادون قرمز آزمایشگاهی برای خشک کردن قارچ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

*Research Article***Determination of performance parameters of infrared dryer to increase drying performance and uniformity of heat distribution**

Sadegh Seiedlou<sup>1</sup>, Habibeh Nalbandi<sup>2\*</sup>, Amir Bidaghi<sup>3</sup>

1. Associate professor, Biosystems Engineering, Agricultural faculty, University of Tabriz, Iran.

2. Assistant professor, Biosystems Engineering, Agricultural faculty, University of Tabriz, Iran.

3. M.s. Graduated student, Agricultural Mechanization Engineering, Agricultural faculty, University of Tabriz, Iran.

**Abstract**

Thin layer drying of agriculture products using an infrared dryer (IR) is one of the interesting and low costs methods. Quality of dried products such as shrinkage, minimum color changes and rehydration ability could be increased if the engineering aspects will be considered in designing of dryer and selection of proper performance parameters. Wavelength of emitters and the distance of infrared radiator from the product are the important designing parameters in IR dryers. These parameters could guaranty the drying uniformity and the maximum temperature on the product surface in continues and batch IR dryer. Due to the lack of the mathematical models and equations usable in IR dryer designing, in this research the designing characteristic of infrared radiators was studied such as the effect of radiators location on the radiation uniformity, drying uniformity and the maximum temperature on the product surface. The study was performed by stabling the infrared wavelength at the range that absorbed by the water content of the radiated foodstuffs. Studied parameters, the horizontal and vertical distance had significant effect on the maximum temperature on the product surface and uniformity of heat distribution. A mathematical model was developed to describe the maximum temperature on the product surface as a function of radiator parameters. RMSE and r values of the model were 2.75 and 0.97, respectively. In order to validate the developed model, the drying kinetic of potatoes and its internal temperature profile was studied by keeping the horizontal and vertical distance of infrared radiators at the recommended value and stabling the infrared wavelength at the range that absorbed by the water content of the radiated foodstuffs. The results showed the good fitness between the experimental and predicted data.

**Keywords:** Infrared dryer, Uniformity of radiation, Designing, Model of maximum temperature.

\* Corresponding author: h.nalbandi@tabrizu.ac.ir