

تاثیر ویژگی‌های نمونه و توان لامپ مادون قرمز بر عمق نفوذ تابش مادون قرمز درون زیره سیاه

مهديه حسنی^{۱*}، مهدی کاشانی‌نژاد^۲، مرتضی خمیری^۳، علیرضا صادقی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۴- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۴)

چکیده

در سال‌های اخیر تابش مادون قرمز به عنوان یکی از روش‌های مناسب جهت خشک کردن و آلودگی زدایی ادویه‌جات مورد توجه قرار گرفته است. اما عمق نفوذ پایین مادون قرمز استفاده از آن را جهت فرآوری مواد غذایی در صنعت محدود کرده است. به علت اهمیت زیره سیاه به عنوان ادویه‌ای با ویژگی‌های دارویی، این تحقیق با هدف تعیین اثر ویژگی‌های ساختاری (پودر و دانه)، فعالیت آبی نمونه (۲۴/۰، ۵۶/۰ و ۸۹/۰) و توان منبع پرتو دهی (۲۲۲ تا ۹۶۰ وات) بر عمق نفوذ مادون قرمز درون زیره سیاه انجام گرفت. به این منظور شار حرارتی دریافتی توسط صفحه سیاه مسی که در زیر نمونه‌های زیره با ضخامت‌های مختلف قرار داشت، اندازه گیری شد. سپس عمق نفوذ مادون قرمز با استفاده از مدل ریاضی محاسبه گردید. نتایج نشان داد فعالیت آبی، توان مادون قرمز و برهمکنش آنها اثر معنی داری بر عمق نفوذ مادون قرمز درون زیره سیاه دارند اما اثر ساختار نمونه بر عمق نفوذ مادون قرمز بی معنی بود. در همه نمونه‌ها، افزایش توان مادون قرمز تا سطح ۶۰۱ وات باعث افزایش عمق نفوذ گردید. بیشترین عمق نفوذ مادون قرمز برای پودر و دانه‌های زیره سیاه با فعالیت آبی ۲۴/۰ به ترتیب $۰.۷/۴ \pm ۲۷/۰$ و $۸۵/۳ \pm ۲۳/۰$ میلی متر در پرتو دهی با توان ۶۰۱ وات بدست آمد در حالیکه بیشترین عمق نفوذ مادون قرمز در نمونه‌ها با فعالیت آبی ۸۹/۰ زمانی مشاهده شد که آنها با توان ۸۴۵ وات مادون قرمز پرتو دهی شدند ($۱۲/۴ \pm ۱۸/۰$ و $۰.۹/۴ \pm ۱۳/۰$ میلی متر، به ترتیب). با توجه به نتایج بدست آمده تعیین عمق نفوذ پرتو مادون قرمز درون ادویه‌ها می‌تواند جهت تعیین ضخامت بهینه آنها طی فرآیند با مادون قرمز مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژگان: تابش مادون قرمز، زیره سیاه، عمق نفوذ، فعالیت آبی

۱- مقدمه

زیره سیاه گیاهی چندساله از خانواده چتریان است که به صورت خودرو در افغانستان، ایران و هند رشد می‌کند. از جمله خواص دارویی آن می‌توان به درمان زخم معده، برطرف کردن نفخ شکم، کاهش چربی و کلسترول، کاهش قند خون و بسیاری فواید دیگر اشاره نمود. اسانس و دانه زیره سیاه خاصیت ضد اکسایشی داشته و در طعم‌دهنده‌های غذا، نوشابه، شکلات و پنیر استفاده می‌شود [۱]. این محصول یکی از مهمترین و با ارزش‌ترین گیاهان دارویی و صادراتی ایران است که به علت کاربردهای متعدد در طب سنتی و تهیه غذا، کشت آن در سال‌های اخیر افزایش یافته است [۲ و ۳] از آنجایی که زیره سیاه حاوی بسیاری از ترکیبات موثره و معطره است، انتخاب روش مناسب و بهینه‌سازی فرآیند در آلودگی‌زدایی، عصاره‌گیری و خشک کردن آن همانند سایر ادویه‌جات اهمیت زیادی دارد. در این راستا، طی سال‌های اخیر استفاده از تابش مادون‌قرمز به منظور خشک کردن یا آلودگی‌زدایی گیاهان دارویی و ادویه‌جات به شکل قابل‌توجهی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۴ و ۵]. مادون‌قرمز از قدیمی‌ترین روش‌های فرآوری مواد غذایی است که امروزه به شکل موفقیت‌آمیزی در فرآیندهایی مثل پخت، خشک کردن، رفع انجماد و غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها به کار می‌رود [۶]. تابش مادون‌قرمز بخشی از طیف الکترومغناطیسی با طول موج بین فرابنفش و مایکروویو است که به سه ناحیه مادون‌قرمز نزدیک (۲-۷۶/۱۰۰۰ میکرومتر)، متوسط (۴-۲۰ میکرومتر) و دور (۱۰۰۰-۴ میکرومتر) تقسیم می‌شود [۴]. اگرچه حرارت‌دهی به این روش در مقایسه با روش‌های معمول گرمایش دارای مزایایی از جمله ضریب انتقال حرارت بالا، هزینه انرژی پایین و زمان فرآیند کوتاه است، به دلیل عمق نفوذ پایین مادون‌قرمز این روش بیشتر به عنوان یک روش فرآوری سطحی مطرح می‌شود [۷]. از این رو در بسیاری از فرآیندهای مربوط به آلودگی‌زدایی، خشک کردن، رفع انجماد و پخت، انتخاب ضخامت مناسب نمونه به عنوان یک فاکتور کلیدی در بهینه‌سازی فرآیند مادون‌قرمز مطرح گردیده است [۸]. اگرچه مشخص گردیده کارایی مادون‌قرمز با کاهش ضخامت نمونه افزایش می‌یابد اما لازم است ضخامت بهینه با هدف کاهش مصرف انرژی و حفظ ویژگی‌های کیفی ماده غذایی در سطحی

تعیین شود که از حداکثر انرژی تولیدی توسط پرتو مادون‌قرمز بهره‌گیری شود. تعیین ضخامت بهینه نمونه برای فرآوری با مادون‌قرمز به ویژه در فرآیندهایی مانند آلودگی‌زدایی مواد غذایی با هدف نابودی میکروارگانیسم‌ها در کل نمونه و یا خشک کردن گیاهان دارویی و ادویه‌جات با هدف حفظ بیشتر ترکیبات موثره در نمونه، اهمیت بیشتری می‌یابد [۹]. از آنجایی که انرژی پرتو مادون‌قرمز تابیده شده در حین عبور از ماده غذایی به شکل نمایی کاهش می‌یابد تعیین عمق نفوذ پرتو مادون‌قرمز می‌تواند روشی موثر در تعیین ضخامت بهینه باشد [۱۰].

زمانی که تابش الکترومغناطیس مانند پرتو مادون‌قرمز به یک جسم برخورد می‌کند، بخشی از آن منعکس می‌شود، بخشی جذب و مابقی از جسم عبور می‌کند. در این میان انرژی جذب شده توسط جسم باعث افزایش حرکت مولکولی و در نتیجه گرمایش جسم می‌شود [۴]. عمق اثر پرتو مادون‌قرمز تابیده شده به ماده غذایی به علت جذب و پراکنش درون آن محدود است [۱۱]. گیزنبرگ^۱ برای محاسبه عمق اثر مادون‌قرمز درون مواد غذایی به شکل زیر از قانون بیر-لامبرت^۲ کمک گرفت:

$$dq(x) = -S \cdot q \cdot dx \quad (۱)$$

$$q_x = q_0 \cdot e^{-Sx} \quad (۲)$$

که در آن q_0 و q_x به ترتیب مقادیر شار حرارتی در فاصله (x) و صفر از سطح ماده (W/cm^2) و S ضریب اتلاف تابش (cm^{-1}) است. در این معادله معکوس ضریب میرایی تابش به عنوان عمق نفوذ مادون‌قرمز تعریف می‌شود ($\delta = \frac{1}{S}$) که نشان‌دهنده فاصله‌ای از سطح ماده غذایی است که انرژی پرتو ورودی تا ۳۷٪ کاهش می‌یابد (مقدار آن به $\frac{1}{e}$ مقدار انرژی سطحی می‌رسد). مقدار اتلاف تابش درون ماده غذایی به پراکندگی و جذب پرتو تابیده شده وابسته است بنابراین معادله می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$q_x = q_0 \cdot e^{-(s+k)x} \quad (۳)$$

که در آن k مقدار ضریب جذب واقعی (cm^{-1}) و s ضریب پراکندگی پرتو مادون‌قرمز درون ماده غذایی (cm^{-1}) است.

1. Ginzburg
2. Beer-Lamber

مطابق با تحقیقات انجام شده، عمق نفوذ پرتو مادون قرمز درون مواد غذایی تابعی از ویژگی‌های منبع تابشی مادون قرمز و ویژگی‌های ماده غذایی از جمله مقدار رطوبت نمونه، ترکیب شیمیایی، ویژگی‌های سطحی ماده، حالت فیزیکوشیمیایی (جامد، پودر، منجمد، دسپرسیون و...) و ویژگی‌های فیزیکی ماده غذایی (دانسیته، تخلخل و رنگ) است [۱۲]. تعیین عمق نفوذ مادون قرمز به عنوان تابعی از طول موج پرتو مادون قرمز نتایج متفاوتی را نشان داده است. به طور مثال اسکولدرند و همکاران (۱۹۸۸) بیان کردند عمق نفوذ پرتوهای مادون قرمز درون مواد غذایی در طول موج‌های کوتاه در مقایسه با طول موج‌های بلند، بیشتر است [۱۳]، در حالیکه سالگناک و همکاران (۲۰۰۴) بیان کردند عمق نفوذ مادون قرمز به ویژه در مواد متخلخل چندان تابع طول موج نیست [۱۴]. همچنین نتایج تحقیقات اردغدو و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد افزایش فعالیت آبی پودر فلفل قرمز و دانه فلفل سیاه باعث افزایش عمق نفوذ پرتو مادون قرمز تابیده شده از منبعی با لامپ ۲۰۰۰W شد [۹].

از آنجایی که مطالعه‌ای به منظور تعیین اثر تغییرات همزمان منبع تابشی و ویژگی‌های ماده غذایی بر عمق نفوذ مادون قرمز درون مواد غذایی صورت نگرفته است و به دلیل اهمیت زیره سیاه به عنوان ادویه و داروی گیاهی که از مهمترین مناطق جغرافیایی تولید و صادرات آن ایران است. این تحقیق با هدف بررسی اثر تغییرات همزمان سطح توان لامپ مادون قرمز (۲۲۲، ۳۰۲، ۳۹۰، ۴۹۱، ۶۰۱، ۷۱۵، ۸۴۵ و ۹۶۰W)، فعالیت آبی نمونه (۲۴/۰، ۵۶/۰ و ۸۹/۰) و شکل ظاهری نمونه (پودر و دانه) بر عمق نفوذ مادون قرمز درون زیره سیاه انجام گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده سازی نمونه‌های زیره

زیره سیاه از بازار محلی به شکل دانه خریداری و تا قبل از آزمایش در بسته‌های پلی‌آمید و پلی‌اتیلن نگهداری شد. به منظور تهیه نمونه‌هایی با سه سطح فعالیت آبی متفاوت، ابتدا مقدار فعالیت آبی زیره سیاه به وسیله دستگاه اندازه‌گیری فعالیت آبی (Novasina، ساخت کشور سوئیس) مشخص گردید (۲۴/۰).

سپس به کمک نمودارهای هم‌دمای جذب و دفع زیره سیاه، مقدار رطوبت مورد نیاز برای افزایش فعالیت آبی ۱۰۰g زیره تا سطوح مورد نظر مشخص گردید. مقدار آب تعیین شده به هر ۱۰۰g دانه زیره اسپری گردید. نمونه‌ها در بسته‌های پلی‌اتیلنی غیر قابل نفوذ به رطوبت به مدت ۳ روز در یخچالی با دمای ۵°C نگهداری شدند تا اطمینان حاصل شود رطوبت به میزان یکسان در آن‌ها توزیع گشته است [۱۵]. بخشی از نمونه زیره سیاه به کمک آسیاب آزمایشگاهی (مدل PXL، شرکت پالمن ساخت کشور آمریکا) به شکل پودری در آمد و از الک با مش ۶۰ عبور داده شد تا ذراتی یکنواخت حاصل شود. در نهایت فعالیت آبی نمونه‌ها به وسیله دستگاه اندازه‌گیری فعالیت آبی اندازه‌گیری شد. فعالیت آبی نهایی برای نمونه‌های زیره در سه سطح ۲۴/۰، ۵۶/۰ و ۸۹/۰ تعیین گردید. آماده‌سازی ضخامت‌های مختلف زیره درون پلیت شیشه‌ای براساس دانسیته توده در هر فعالیت آبی صورت گرفت. به این منظور ابتدا دانسیته توده دانه زیره مطابق با روش محسین [۱۶] و دانسیته توده غیر فشرده پودر زیره به روش استاندارد ملی ایران شماره ۳۳۴۵ محاسبه شد [۱۷]. در نهایت به کمک داده‌های دانسیته توده، مقدار جرم مورد نیاز برای ایجاد ضخامت‌های ۱ تا ۱۳mm نمونه در پلیت شیشه‌ای با قطر ۸ و ارتفاع ۱۵cm محاسبه گردید.

۲-۲- پرتودهی نمونه‌های زیره

آزمون‌های تعیین عمق نفوذ مادون قرمز درون زیره سیاه در هشت سطح توان ۲۲۲، ۳۰۲، ۳۹۰، ۴۹۱، ۶۰۱، ۷۱۵، ۸۴۵ و ۹۶۰W، برای نمونه‌های زیره سیاه پودری و دانه‌ای با فعالیت‌های آبی ۲۴/۰، ۵۶/۰ و ۸۹/۰ درون یک آون مادون قرمز مجهز به لامپ رشته‌ای ۱۰۰۰W انجام شد. در این آون نمونه فقط از بالا تحت پرتودهی قرار می‌گرفت و فاصله لامپ تا نمونه ۲۰cm بود (شکل ۱). منبع پرتودهی به یک دستگاه تنظیم کننده ولتاژ متصل بود که امکان استفاده از توان لامپ در سطوح مختلف را فراهم می‌کرد. در همه تیمارهای آزمایشی، حدود ۳۰ دقیقه پیش از شروع فرآیند پرتودهی، لامپ مادون قرمز با توان مورد نیاز روشن گردید تا شرایط دمایی درون محفظه و دمای لامپ به حالت پایدار برسد.

آلومینیومی قرار گرفته بود، یک بار بدون پلیت شیشه‌ای، بار دیگر زمانی که پلیت شیشه‌ای خالی روی آن قرار گرفته بود و در نهایت در شرایطی که پلیت حاوی ضخامت‌های مختلف زیره سیاه (ضخامت‌های ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳mm) روی آن قرار گرفته بود، به کمک داده بردار^۱ ثبت گردید. به منظور تعیین شار حرارتی دریافت شده توسط صفحه مسی، نمودار تغییرات دما-زمان برای هر ضخامت از نمونه رسم گردید و از بخش خطی نمودار رگرسیون خطی گرفته شد. به کمک شیب نمودار، شار حرارتی عبوری از نمونه به شکل زیر محاسبه گردید:

$$q = \frac{1}{A} \cdot (m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt}) \quad (۴)$$

که در آن q : شار حرارتی (W/m^2)، m : جرم، c_p و A به ترتیب جرم (kg)، گرمای ویژه ($J/kg.K$) و سطح (m^2) صفحه سیاه مسی، و $\frac{dT}{dt}$ شیب نمودار دما-زمان (K/s) است. سپس نمودارهای شار حرارتی در مقابل ضخامت برای هر نمونه ترسیم گردید.

از آنجایی که شار حرارتی دریافتی و عبوری درون ماده غذایی ممکن است به هر دو شکل هدایت و تابشی باشد و امکان تفکیک این دو از یکدیگر وجود ندارد. قانون بیر-لامبرت به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{dq(x)}{dx} = -k \cdot (q - q_\infty) \quad (۵)$$

که k : ضریب میرایی ویژه، $q(x)$: شارحرارتی عبوری از نمونه‌ای با ضخامت x ، q : شار حرارتی ناشی از مادون‌قرمز و q_∞ : شار حرارتی است که مستقیماً به تابش مادون‌قرمز وابسته نیست. با حل معادله بالا در شرایط مرزی ($q = q_0$ و $x=0$) معادلات زیر بدست می‌آید:

$$\frac{dq}{(q - q_0)} = -k \cdot dx \quad (۶)$$

$$\ln \frac{(q - q_\infty)}{(q_0 - q_\infty)} = -k \cdot x \quad (۷)$$

$$q(x) = q_\infty + (q_0 - q_\infty) \cdot \exp(-k \cdot x) \quad (۸)$$

داده‌های حاصل از شار حرارتی عبوری از هر نمونه در مقابل ضخامت نمونه توسط نرم افزار curve expert (ویرایش ۱/۶) با معادله (۸) برازش داده شدند و عکس ضریب میرایی به عنوان عمق نفوذ مادون‌قرمز درون نمونه‌های زیره سیاه محاسبه گردید.

۲-۴- تجزیه و تحلیل آماری

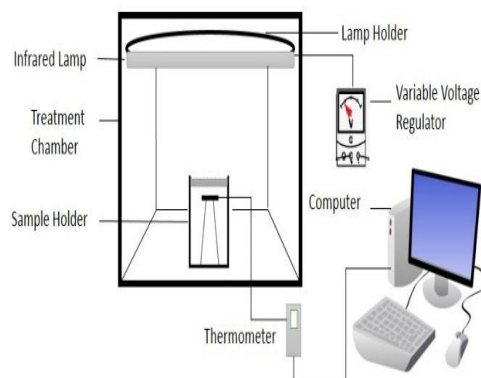


Fig 1 The schematic diagram of infrared heating system used for determination of penetration depth of infrared radiation on *Carum carvi*.

جهت اندازه‌گیری شار حرارتی عبوری از توده زیره سیاه از دو ورقه سیاه مسی ($3/0 \times 5 \times 5$ cm) که در بین آنها یک ترموکوپل قرار گرفته بود استفاده شد. کل وزن صفحه مسی $0.361/0$ kg و گرمای ویژه آن 385 J/kg.K بود. ترموکوپل به یک دیتالاگر (Lutron, TM-947SD) متصل بود و داده‌های زمان دما به طور مداوم در کامپیوتر ثبت می‌گردید. از آنجایی که انعکاس پرتومادون‌قرمز از بدنه آون و جذب آن به وسیله ورقه سیاه مسی یک عامل خطا در اندازه‌گیری عمق نفوذ مادون‌قرمز بود؛ به منظور کاهش این اثر، ورقه سیاه مسی در یک ظرف استوانه‌ای با بدنه آلومینیوم که درون و کف آن سیاه شده بود قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری عمق نفوذ، پلیت حاوی زیره در بالای این پایه استوانه‌ای شکل قرار گرفت (شکل ۲).

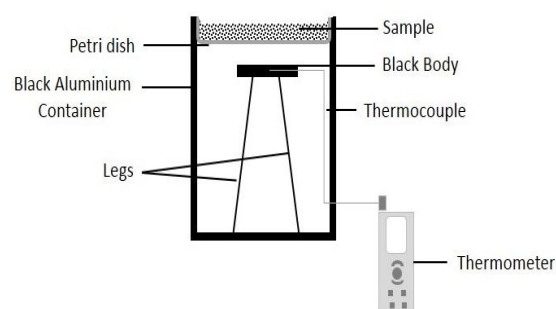


Fig 2 The scheme representing the *Carum carvi*'s sample and the device used to measure the heat flux that crosses the *Carum carvi* seeds and arrives on the black body.

۲-۳- اندازه‌گیری شار حرارتی و محاسبه عمق نفوذ

جهت اندازه‌گیری عمق نفوذ مادون‌قرمز درون زیره سیاه، ابتدا تغییرات دما-زمان برای صفحه سیاه مسی که درون ظرف

¹ Data Logger

سیاه مسی در هر دو حالت (بدون حضور پلیت شیشه‌ای و با حضور پلیت شیشه‌ای) به شکل معنی‌داری افزایش یافت. همچنین با توجه به جدول ۱، حضور پلیت شیشه‌ای به شکل معنی‌داری ($P < 0.05$) شار حرارتی دریافتی توسط صفحه سیاه مسی را کاهش داد. علت این امر جذب یا انعکاس بخشی از انرژی پرتو ساطع شده توسط پلیت شیشه‌ای است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، شفافیت شیشه نسبت به عبور مادون‌قرمز با افزایش توان افزایش یافته است به طوری که بیشترین و کمترین میزان شفافیت شیشه نسبت به عبور مادون‌قرمز به ترتیب در توان لامپ ۹۶۰ و ۲۲۲W بدست آمد. علت این امر احتمالاً تغییر ناحیه طول موج پرتوهای ساطع شده از لامپ در توان‌های بسیار پایین به سمت ناحیه مادون‌قرمز دور و تمایل شیشه به جذب بیشتر طول موج‌های بلند مادون‌قرمز نسبت به طول موج‌های کوتاه است [۱۸].

تجزیه و تحلیل آماری اثر نوع نمونه، فعالیت آبی و سطح توان مادون‌قرمز بر عمق نفوذ پرتو مادون‌قرمز درون زیره سیاه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با نرم افزار SPSS (نسخه ۲۲) انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن با سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام گرفت. رسم نمودارها به کمک نرم افزار اکسل (Office 2010) انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شار حرارتی جذب شده به وسیله پلیت

شیشه‌ای

جدول ۱ شار حرارتی دریافت شده توسط صفحه سیاه مسی را در حضور پلیت شیشه‌ای و بدون حضور آن نشان می‌دهد. با افزایش توان لامپ مادون‌قرمز مقدار شار حرارتی دریافتی توسط صفحه

Table 1 Infrared transparency of glass petri dish

Infrared Power (W)	Heat flux received by Black body (kW/m^2)		Infrared absorbed by the petri dish (kW/m^2)	IR transparency factor (%)
	Without Petri dish	With Petri dish		
222	0.92 ± 0.03^{Ah}	0.54 ± 0.01^{Bh}	0.38 ± 0.05^c	58.70 ± 6.37^d
302	1.64 ± 0.01^{Ag}	1.07 ± 0.03^{Bg}	0.58 ± 0.03^d	65.24 ± 2.08^c
390	2.85 ± 0.02^{Af}	2.16 ± 0.01^{Bf}	0.59 ± 0.08^d	75.79 ± 2.53^b
491	3.23 ± 0.03^{Ae}	2.51 ± 0.02^{Be}	0.72 ± 0.05^d	77.70 ± 1.51^b
601	4.67 ± 0.02^{Ad}	3.64 ± 0.01^{Bd}	1.03 ± 0.05^c	77.94 ± 0.89^b
715	6.15 ± 0.02^{Ac}	5.13 ± 0.02^{Bc}	1.02 ± 0.06^c	83.41 ± 0.91^a
845	7.74 ± 0.02^{Ab}	6.51 ± 0.02^{Bb}	1.23 ± 0.12^b	84.10 ± 1.39^a
960	9.71 ± 0.02^{Aa}	8.31 ± 0.03^{Ba}	1.4 ± 0.17^a	85.58 ± 1.53^a

The different capital letters in the same row indicate significant differences between heat flux received by black body with petri dish and without petri dish and the different lowercase letters in the same column indicate significant differences among the treatments with different infrared power ($p < 0.05$).

ضخامت نمونه در همه فعالیت آبی‌های مورد آزمون، مقدار شار حرارتی دریافتی توسط صفحه سیاه مسی به شکل نمایی کاهش یافت. علت این امر احتمالاً جذب و پراکنش بیشتر پرتو مادون‌قرمز درون نمونه‌هایی با ضخامت بیشتر نسبت به نمونه‌هایی با ضخامت کمتر است که در نهایت موجب می‌شود شار حرارتی دریافتی توسط صفحه سیاه مسی به شکل قابل توجهی کاهش یابد [۱۹]. همچنین عمق نفوذ پایین مادون‌قرمز می‌تواند به عنوان عامل موثر در کاهش شار حرارتی عبوری بررسی شود. در همین راستا کریشنمورتی و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند عمق نفوذ مادون‌قرمز در مواد غذایی پایین بوده و بیشتر انرژی مادون‌قرمز در مواد غذایی در لایه‌های سطحی جذب می‌گردد [۸].

۳-۲- تغییرات شار حرارتی مادون‌قرمز در حین

عبور از زیره سیاه

تغییرات شار حرارتی در ضخامت‌های مختلف برای دانه و پودر زیره سیاه در شرایط متفاوت آزمون در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها با افزایش توان لامپ مادون‌قرمز شار حرارتی دریافت شده توسط صفحه سیاه مسی افزایش یافت. برای دانه‌های زیره شار دریافتی توسط صفحه سیاه مسی وقتی ضخامت نمونه‌ها $1/5 \pm 0/5 \text{ mm}$ بود به طور میانگین از $89/0 \pm 0/2 \text{ kW/m}^2$ در توان ۲۲۲W لامپ به $6/85 \pm 0/6 \text{ kW/m}^2$ در توان ۹۶۰W افزایش یافت. همچنین با افزایش

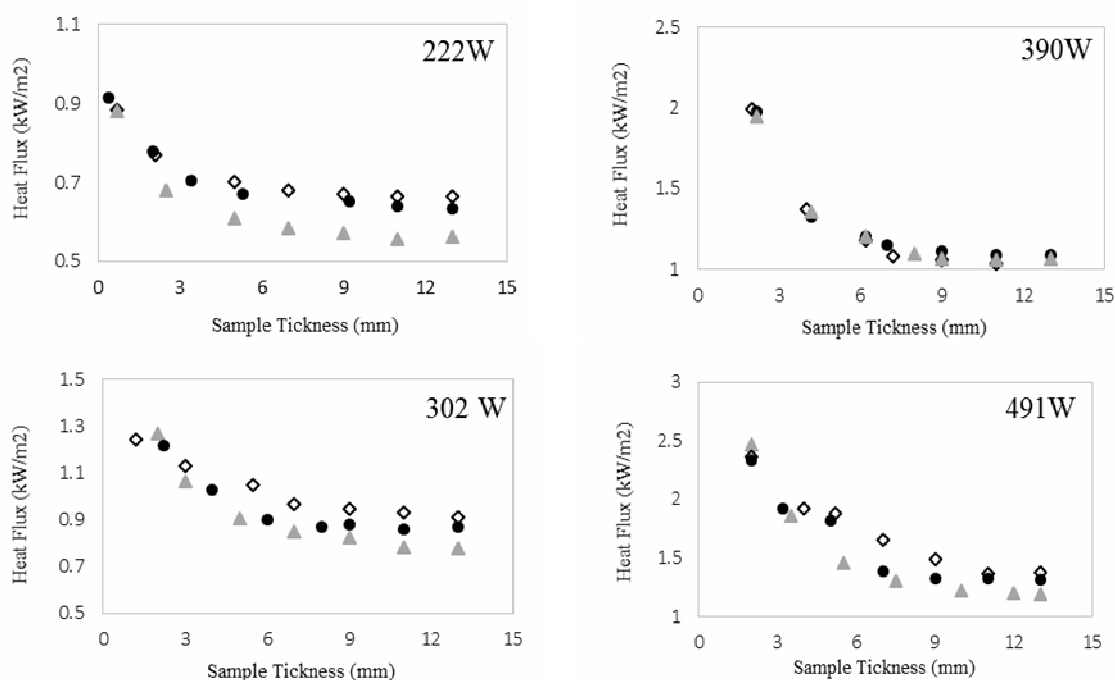


Fig 3 Heat flux changes with respect to sample thickness of *Carum carvi* seeds with water activity values 0.24 (◇), 0.56 (●) and 0.89 (Δ) at different IR powers.

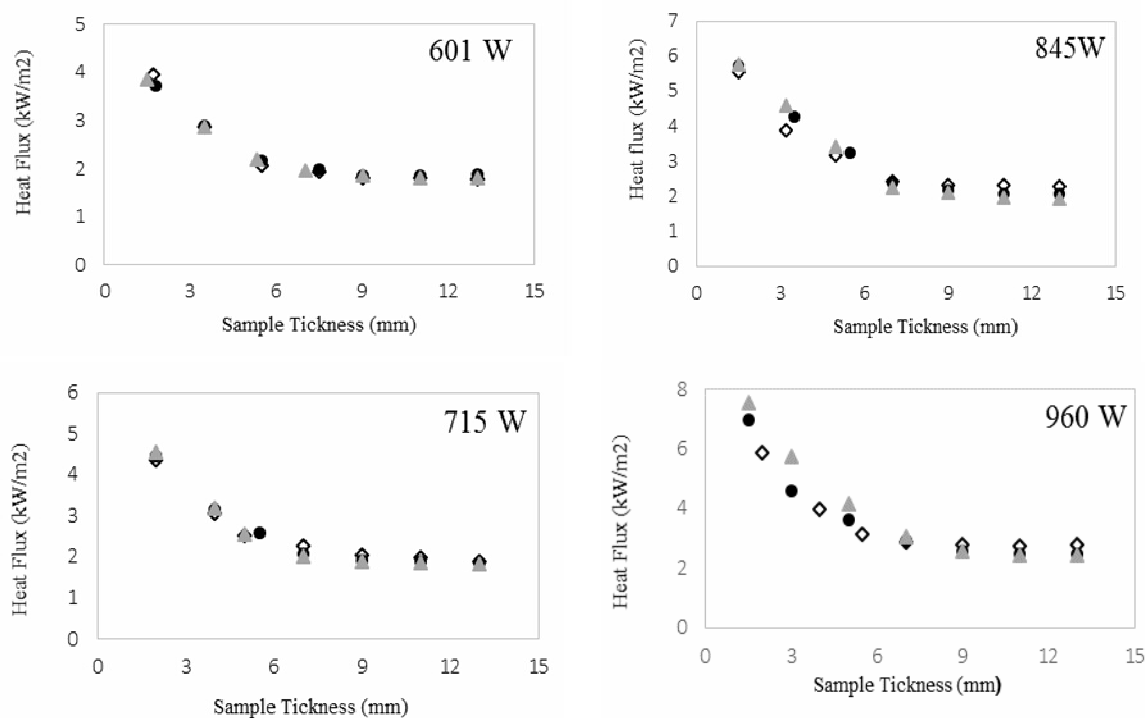


Fig 4 Heat flux changes with respect to sample thickness of *Carum carvi* seeds with water activity values 0.24 (◇), 0.56 (●) and 0.89 (Δ) at different IR powers.

۵۶٪ بیشتر بود. این امر نشان می‌دهد انرژی تابش مادون قرمز در حین عبور از نمونه‌ها با فعالیت آبی بالاتر به شکل یکنواخت‌تری در حین عبور از نمونه جذب می‌گردد. اردوگدو و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند شار حرارتی جذب شده توسط فلفل قرمز در نمونه‌هایی با فعالیت آبی بالاتر، بیشتر از نمونه‌هایی با فعالیت آبی پایین بود [۹]. پن و همکاران (۲۰۱۱) مقدار آب موجود در مواد غذایی را عامل موثری در فرآیند مواد غذایی با مادون قرمز دانسته و بیان کردند جذب انرژی مادون قرمز توسط مواد غذایی تابعی از مقدار آب موجود در آنها است [۱۹].

مطابق با شکل ۳ و ۵ تغییرات شار حرارتی در ضخامت‌های مختلف نمونه‌های زیره در توان‌های ۲۲۲ تا ۳۹۰ W چندان تحت تاثیر تغییرات فعالیت آبی نمونه‌ها قرار نگرفته است و حداکثر تغییرات شار حرارتی در حین عبور از نمونه حدود 1 kW.m^{-2} بود. با افزایش توان به سطوح ۸۴۵ و ۹۶۰ W مقدار شار حرارتی دریافتی توسط صفحه سیاه مسی به ویژه در ضخامت‌های کمتر از ۶ تا ۷ mm تحت تاثیر فعالیت آبی قرار گرفته است. به طوری که شار حرارتی دریافتی توسط صفحه سیاه مسی در این توان‌ها برای نمونه‌ها با فعالیت آبی ۸۹٪ از نمونه‌ها با فعالیت آبی ۲۴٪ و

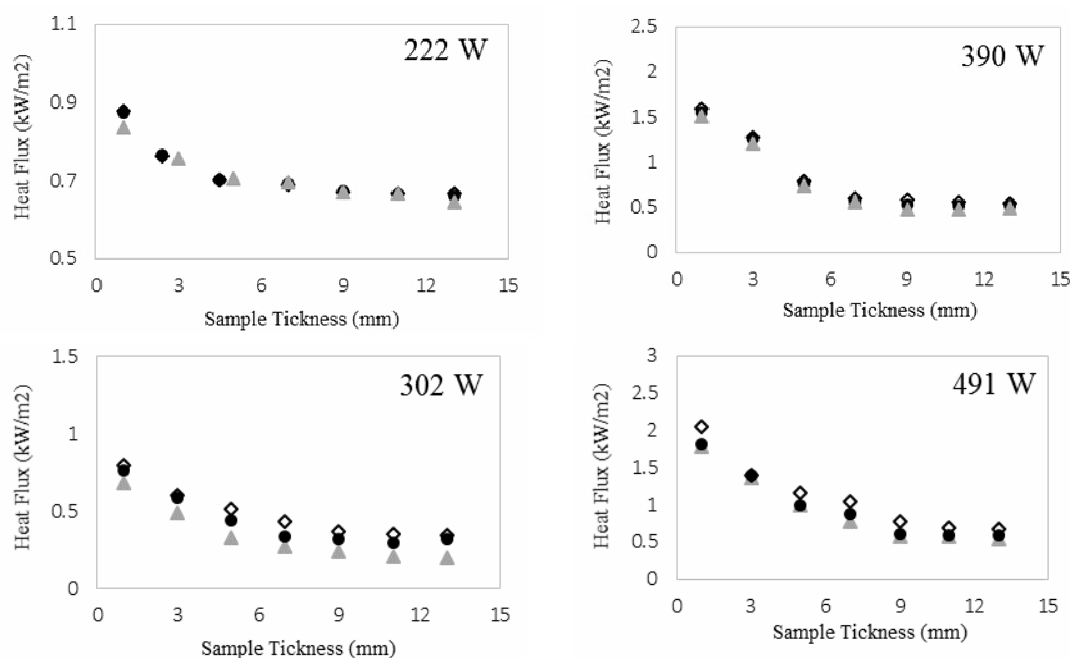


Fig 5 Heat flux changes with respect to sample thickness of *Carum carvi* powder with water activity values 0.24 (◇), 0.56 (●) and 0.89 (Δ) at different IR powers.

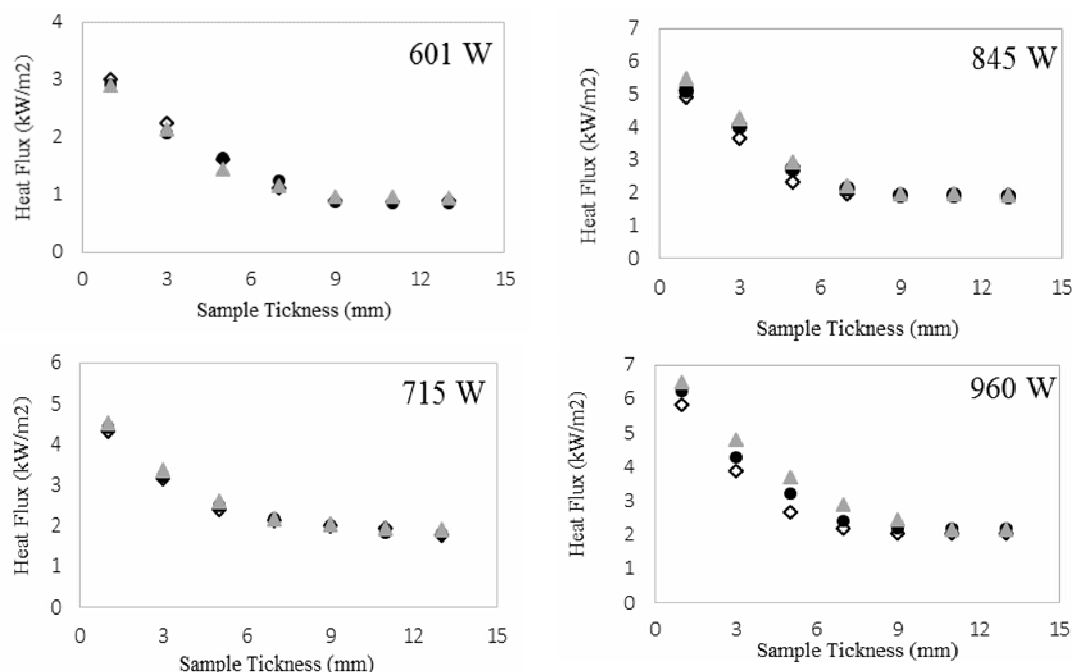


Fig 6 Heat flux changes with respect to sample thickness of *Carum carvi* powder with water activity values 0.24 (◇), 0.56 (●) and 0.89 (Δ) at different IR powers.

۳-۳- تعیین عمق نفوذ مادون‌قرمز

متفاوت و تحت تاثیر توان‌های متفاوت لامپ مادون‌قرمز به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ و ۳ مشاهده می‌شود در نمونه‌های زیره با افزایش سطح توان لامپ مادون‌قرمز میزان گرمایش ناشی از تابش مادون‌قرمز نسبت به کل انرژی گرمایی افزایش یافته است، به عبارت دیگر نسبت q_m به q_0 با افزایش توان کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد در نمونه‌های پرتودهی شده با لامپ‌هایی با توان بالاتر بخش بیشتر گرمایش ایجاد شده درون نمونه مستقیماً مربوط به پرتو مادون‌قرمز اما در نمونه‌های پرتو دیده با توان‌های پایین‌تر تقریباً ۵۰٪ از کل انرژی دریافتی مستقیماً از مادون‌قرمز منشأ نگرفته است.

به منظور حذف تاثیر حضور پلیت شیشه‌ای بر محاسبات عمق نفوذ مادون‌قرمز درون نمونه‌های زیره سیاه، شار حرارتی دریافت شده توسط صفحه سیاه مسی در هر ضخامت از نمونه با استفاده از معادله ۹ به شکل زیر محاسبه گردید:

$$q(x) = q(x)_{plate+sample} + q_{plate} \quad (9)$$

که در آن $q(x)_{plate+sample}$ مقدار شار حرارتی دریافت شده توسط صفحه سیاه مسی بود وقتی نمونه‌ای با ضخامت x بر بالای آن قرار داشت و q_{plate} مقدار شار حرارتی جذب شده توسط پلیت شیشه‌ای (مطابق با جدول ۱) است. نتایج برازش معادله ۸ با شار حرارتی دریافت شده توسط صفحه سیاه مسی در ضخامت‌های مختلف نمونه با فعالیت‌های آبی

Table 2 Parameters estimated and statistical results obtained from fitting the heat flux data to modified Beer-Lambert model (*Carum carvi* seeds)

Infrared Power (W)	a_w	Equation Parameters			Adj. R^2	RMSE
		$q_{sc}(\text{kW.m}^{-2})$	$q_0(\text{kW.m}^{-2})$	$K(\text{mm}^{-1})$		
222	0.24	$0.66 \pm 0.00^{\text{Ca}}$	$0.99 \pm 0.01^{\text{Ha}}$	$0.38 \pm 0.02^{\text{Da}}$	0.99	0.01
	0.56	$0.63 \pm 0.00^{\text{Gb}}$	$0.94 \pm 0.02^{\text{Ha}}$	$0.39 \pm 0.05^{\text{Da}}$	0.99	0.01
	0.89	$0.56 \pm 0.01^{\text{Gc}}$	$0.94 \pm 0.02^{\text{Ha}}$	$0.39 \pm 0.06^{\text{Db}}$	0.99	0.02
302	0.24	$0.92 \pm 0.02^{\text{Fa}}$	$1.66 \pm 0.03^{\text{Ga}}$	$0.36 \pm 0.04^{\text{CDa}}$	0.99	0.03
	0.56	$0.85 \pm 0.01^{\text{Fb}}$	$1.64 \pm 0.01^{\text{Ga}}$	$0.39 \pm 0.02^{\text{CDB}}$	0.99	0.02
	0.89	$0.80 \pm 0.02^{\text{Fc}}$	$1.65 \pm 0.03^{\text{Ga}}$	$0.36 \pm 0.04^{\text{CDB}}$	0.99	0.03
390	0.24	$0.98 \pm 0.04^{\text{Ea}}$	$2.87 \pm 0.05^{\text{Fa}}$	$0.35 \pm 0.03^{\text{Ca}}$	0.99	0.05
	0.56	$1.06 \pm 0.04^{\text{Eb}}$	$2.87 \pm 0.06^{\text{Fa}}$	$0.36 \pm 0.04^{\text{Cb}}$	0.99	0.06
	0.89	$1.00 \pm 0.03^{\text{Ec}}$	$2.87 \pm 0.06^{\text{Fa}}$	$0.35 \pm 0.03^{\text{Cb}}$	0.99	0.06
491	0.24	$1.32 \pm 0.06^{\text{Da}}$	$3.20 \pm 0.05^{\text{Ea}}$	$0.27 \pm 0.03^{\text{ABa}}$	0.99	0.06
	0.56	$1.24 \pm 0.07^{\text{Db}}$	$3.22 \pm 0.08^{\text{Ea}}$	$0.30 \pm 0.04^{\text{ABb}}$	0.98	0.09
	0.89	$1.10 \pm 0.07^{\text{Dc}}$	$3.28 \pm 0.07^{\text{Ea}}$	$0.29 \pm 0.03^{\text{ABb}}$	0.99	0.08
601	0.24	$1.54 \pm 0.11^{\text{Ca}}$	$4.81 \pm 0.12^{\text{Da}}$	$0.26 \pm 0.05^{\text{Aa}}$	0.97	0.07
	0.56	$1.67 \pm 0.12^{\text{Cb}}$	$4.74 \pm 0.13^{\text{Da}}$	$0.27 \pm 0.04^{\text{Ab}}$	0.98	0.12
	0.89	$1.63 \pm 0.12^{\text{Cc}}$	$4.75 \pm 0.10^{\text{Da}}$	$0.28 \pm 0.04^{\text{Ab}}$	0.98	0.13
715	0.24	$1.75 \pm 0.10^{\text{Ca}}$	$6.21 \pm 0.12^{\text{Ca}}$	$0.30 \pm 0.03^{\text{Aa}}$	1.00	0.12
	0.56	$1.58 \pm 0.12^{\text{Cb}}$	$6.22 \pm 0.11^{\text{Ca}}$	$0.27 \pm 0.03^{\text{Ab}}$	0.99	0.13
	0.89	$1.52 \pm 0.17^{\text{Cc}}$	$6.24 \pm 0.16^{\text{Ca}}$	$0.26 \pm 0.03^{\text{Ab}}$	0.99	0.18
845	0.24	$2.15 \pm 0.08^{\text{Ba}}$	$7.78 \pm 0.11^{\text{Ba}}$	$0.36 \pm 0.02^{\text{ABa}}$	0.99	0.12
	0.56	$1.71 \pm 0.16^{\text{Bb}}$	$7.76 \pm 0.16^{\text{Ba}}$	$0.26 \pm 0.02^{\text{ABb}}$	0.99	0.16
	0.89	$1.52 \pm 0.14^{\text{Bc}}$	$7.74 \pm 0.13^{\text{Ba}}$	$0.24 \pm 0.02^{\text{ABb}}$	0.99	0.14
960	0.24	$2.62 \pm 0.08^{\text{Aa}}$	$9.82 \pm 0.13^{\text{Aa}}$	$0.42 \pm 0.02^{\text{Ba}}$	0.99	0.13
	0.56	$2.01 \pm 0.12^{\text{Ab}}$	$9.93 \pm 0.15^{\text{Aa}}$	$0.27 \pm 0.03^{\text{Bb}}$	0.99	0.12
	0.89	$1.92 \pm 0.13^{\text{Ac}}$	$9.90 \pm 0.17^{\text{Aa}}$	$0.25 \pm 0.02^{\text{Bb}}$	0.98	0.11

The capital letters indicate the comparison between different powers and the lowercase letters indicate the comparison between different a_w . The same letters indicate no significant difference ($P > 0.05$).

تجزیه واریانس نشان داد توان مادون قرمز، فعالیت آبی زیره و برهمکنش این دو عامل اثر معنی داری بر عمق نفوذ مادون قرمز درون زیره سیاه در سطح احتمال ۱٪ دارند. درحالی که پودری یا دانه ای بودن نمونه تاثیر معنی داری بر عمق نفوذ آن نداشت (جدول ۴).

گینزبرگ (۱۹۶۹) بیان کرد اینکه چه مقدار از شار حرارتی دریافتی توسط نمونه ناشی از تابش مادون قرمز و چه مقدار ناشی از سایر روش های انتقال حرارت نظیر هدایت است به دمای لامپ مادون قرمز وابسته است [۱۱].

به کمک جدول ۲ و ۳، عمق نفوذ مادون قرمز در هر تیمار آزمایشی به عنوان عکس ضریب میرایی (k) محاسبه گردید. نتایج

Table 3 Parameters estimated and statistical results obtained from fitting the heat flux data to modified Beer-Lambert model (*Carum carvi* powder)

Infrared Power (W)	a_w	Equation Parameters			Adj.R ²	RMSE
		$q_{\infty}(\text{kW.m}^{-2})$	$q_0(\text{kW.m}^{-2})$	$K(\text{mm}^{-1})$		
222	0.24	0.66±0.01 ^{Ha}	0.93±0.01 ^{Ha}	0.36±0.06 ^{Da}	0.98	0.02
	0.56	0.66±0.01 ^{Ha}	0.93±0.01 ^{Ha}	0.35±0.05 ^{Da}	0.98	0.01
	0.89	0.66±0.01 ^{Ha}	0.92±0.01 ^{Ha}	0.37±0.05 ^{Da}	0.98	0.01
302	0.24	0.92±0.02 ^{Ga}	1.61±0.03 ^{Ga}	0.36±0.04 ^{Da}	0.98	0.03
	0.56	0.91±0.01 ^{Ga}	1.64±0.01 ^{Ga}	0.38±0.01 ^{Da}	0.99	0.01
	0.89	0.87±0.02 ^{Ga}	1.62±0.03 ^{Ga}	0.35±0.05 ^{Da}	0.99	0.03
390	0.24	1.08±0.08 ^{Fa}	2.80±0.09 ^{Fa}	0.33±0.06 ^{CDa}	0.98	0.09
	0.56	1.05±0.08 ^{Fa}	2.79±0.10 ^{Fa}	0.33±0.06 ^{CDa}	0.98	0.10
	0.89	1.02±0.08 ^{Fa}	2.78±0.10 ^{Fa}	0.35±0.06 ^{CDa}	0.98	0.09
491	0.24	1.34±0.07 ^{Ea}	3.21±0.06 ^{Ea}	0.26±0.03 ^{ABa}	0.99	0.06
	0.56	1.25±0.06 ^{Ea}	3.18±0.06 ^{Ea}	0.28±0.04 ^{ABa}	0.99	0.07
	0.89	1.22±0.08 ^{Ea}	3.15±0.08 ^{Ea}	0.29±0.04 ^{ABa}	0.98	0.09
601	0.24	1.66±0.12 ^{Da}	4.68±0.09 ^{Da}	0.25±0.03 ^{Aa}	0.99	0.10
	0.56	1.69±0.10 ^{Da}	4.63±0.08 ^{Da}	0.25±0.02 ^{Aa}	0.98	0.08
	0.89	1.84±0.07 ^{Da}	4.66±0.07 ^{Da}	0.28±0.02 ^{Aa}	0.99	0.07
715	0.24	2.78±0.05 ^{Ca}	6.18±0.06 ^{Ca}	0.31±0.02 ^{BCa}	0.99	0.06
	0.56	2.72±0.05 ^{Ca}	6.20±0.05 ^{Ca}	0.28±0.01 ^{BCa}	0.99	0.05
	0.89	2.75±0.08 ^{Ca}	6.23±0.08 ^{Ca}	0.26±0.02 ^{BCa}	0.99	0.09
845	0.24	3.02±0.13 ^{Ba}	7.70±0.14 ^{Ba}	0.37±0.04 ^{Aa}	0.99	0.15
	0.56	2.88±0.14 ^{Ba}	7.70±0.09 ^{Ba}	0.29±0.04 ^{Aa}	0.98	0.17
	0.89	2.78±0.13 ^{Ba}	7.81±0.16 ^{Ba}	0.24±0.03 ^{Aa}	0.98	0.11
960	0.24	3.61±0.08 ^{Aa}	9.71±0.12 ^{Aa}	0.43±0.03 ^{CDa}	0.99	0.13
	0.56	3.60±0.09 ^{Aa}	9.73±0.12 ^{Aa}	0.35±0.02 ^{CDa}	0.99	0.13
	0.89	3.46±0.12 ^{Aa}	9.68±0.11 ^{Aa}	0.26±0.03 ^{CDa}	0.99	0.11

The capital letters indicate the comparison between different powers and the lowercase letters indicate the comparison between a_w . The same letters indicate no significant difference ($P > 0.05$).

Table 4 The results of analysis of variance for penetration depth values

Source of variation	Sum of square	Degrees of freedom	Mean square
Sample	0.040	1	0.040 ^{ns}
Power	24.043	7	3.435 ^{**}
a_w	2.426	2	1.213 ^{**}
Sample × Power	1.249	7	0.178 ^{ns}
Sample × a_w	0.050	2	0.025 ^{ns}
Power × a_w	11.818	14	0.844 ^{**}
Sample × Power × a_w	0.758	14	0.054 ^{ns}
Total error	12.975	96	0.135
Total	1595.673	144	

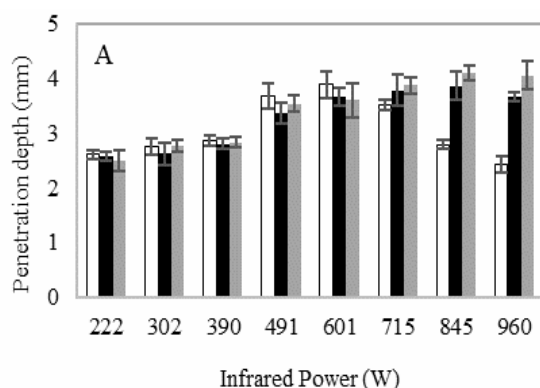
^{**} Correspond to significant at the 0.1% level

^{ns} Correspond to none significant

تغییرات عمق نفوذ مادون قرمز درون زیر سیاه در فعالیت‌های آبی مختلف با جنبه تغییر توان لامپ مادون قرمز در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. با توجه به هر دو شکل دو ناحیه تغییرات عمق نفوذ مادون قرمز درون زیره سیاه قابل مشاهده است. در ناحیه اول که مابین توان‌های ۲۲۲ تا ۶۰۱W قرار گرفته است اگرچه عمق نفوذ مادون قرمز با افزایش توان لامپ مادون قرمز بسیار کم افزایش یافته است اما تغییر فعالیت آبی زیره سیاه اثر قابل توجهی بر تغییر عمق نفوذ نداشت. در این ناحیه، در توان مادون قرمز ۶۰۱W بیشترین عمق نفوذ در دانه‌های زیره با فعالیت آبی ۲۴/۰ بدست آمد ($85/3 \pm 23/0 \text{ mm}$). همچنین بیشترین عمق نفوذ در پودر زیره سیاه با فعالیت آبی ۲۴/۰ و ۵۶/۰ زمانی بدست آمد که نمونه‌ها با توان ۶۰۱W پرتودهی شدند. این مقادیر به ترتیب $27/0 \pm 07/4$ و $23/0 \pm 03/4$ بود. با افزایش بیشتر توان مادون قرمز در توان‌های ۷۱۵W و بالاتر، بیشترین تاثیر فعالیت آبی بر عمق نفوذ مادون قرمز مشاهده گردید، به طوری که در این توان‌ها بیشترین عمق نفوذ مادون قرمز در پودر و دانه‌های زیره با فعالیت آبی ۸۹/۰ و در توان لامپ مادون قرمز ۸۴۵W مشاهده گردید. بیشترین عمق نفوذ محاسبه شده برای دانه و پودر زیره سیاه در فعالیت آبی ۸۹/۰ به ترتیب برابر با $09/4 \pm 13/0$ و $12/4 \pm 18/0 \text{ mm}$ بود. در مورد دانه‌های زیره با فعالیت آبی ۲۴/۰ و پودر زیره با فعالیت آبی ۲۴/۰ و ۵۶/۰ افزایش توان تا ۹۶۰W نتیجه‌ای عکس نشان داد به طوریکه افزایش توان باعث کاهش معنی‌دار عمق نفوذ مادون قرمز در این نمونه‌ها گردید. تاثیر تغییرات توان بر عمق نفوذ مادون قرمز را می‌توان به تغییرات طول موج پرتو منتشر شده از لامپ مادون قرمز در سطوح توان بسیار پایین نسبت داد. همان‌طور که بیان گردید لامپ مادون قرمز به کار رفته جهت تعیین عمق نفوذ مادون قرمز درون زیره سیاه، ۱۰۰۰W در ناحیه مادون قرمز نزدیک بود اما برای بررسی اثر توان‌های متفاوت بر میزان نفوذ پرتو مادون قرمز درون زیره سیاه از سطوح پایین‌تر توان لامپ استفاده گردید. کاهش سطح توان مورد استفاده با کاهش دمای سطحی لامپ و شار حرارتی منتشر شده از لامپ همراه بود. مدست (۲۰۱۳) بیان کرد دمای سطحی لامپ اثر معنی‌داری بر طول موج انتشار یافته توسط لامپ دارد و با کاهش دمای سطحی لامپ، طول موج ساطع شده افزایش می‌یابد [۲۰]. بنابراین، این احتمال وجود دارد که در تحقیق حاضر با به کار

گرفتن لامپ در سطوح توان خیلی پایین‌تر از ۱۰۰٪ ناحیه طول موج عملکردی لامپ از ناحیه مادون قرمز نزدیک به مادون قرمز دور منتقل شده باشد. از آنجایی که بیشترین جذب پرتو مادون قرمز توسط آب در ناحیه مادون قرمز نزدیک صورت می‌گیرد بنابراین می‌توان حساس نبودن عمق نفوذ مادون قرمز به فعالیت آبی نمونه‌ها را در توان‌های ۲۲۲ تا ۳۹۰W ناشی از تغییر موقعیت طول موج به ناحیه دور در این توان‌ها دانست. در همین راستا دسو و همکاران (۲۰۱۱) و ویلیام و نوریس (۱۹۸۷) بیان کردند تاثیر ویژگی‌های ماده غذایی بر عمق نفوذ بیشتر در نواحی مادون قرمز نزدیک و متوسط قابل بررسی است نسبت به مادون قرمز دور [۲۲] و [۲۱]. با افزایش دمای سطحی لامپ در سطوح توان بالاتر، طول موج منتشر شده به ناحیه مادون قرمز نزدیک و در نتیجه به ناحیه تابش میکروویو نزدیکتر می‌شود. رفتار تابش مادون قرمز در این ناحیه بیشتر شبیه میکروویو شده و عمق نفوذ پرتو می‌تواند تابعی از مقدار رطوبت، دمای ماده و ویژگی‌های فیزیکی ماده غذایی باشد [۱۱]. این اثر به ویژه در لامپ‌های هالوژنی قابل مشاهده است [۲۳]. بنابراین، افزایش بیشتر عمق نفوذ مادون قرمز درون نمونه‌های زیره سیاه با فعالیت آبی بالاتر در توان‌های ۷۱۵ تا ۹۶۰W احتمالاً به علت افزایش بیشتر جذب انرژی مادون قرمز به وسیله آب است. همچنین کاهش عمق نفوذ در دانه‌های زیره با فعالیت آبی ۲۴/۰ از توان ۷۱۵ تا ۹۶۰W را می‌توان به تبخیر بیش از حد آب در این نمونه‌ها در توان‌های بالاتر و جایگزین شدن آب با هوا نسبت داد. دسو و همکاران (۲۰۱۱) و هوآنگ (۲۰۱۶) بیان کردند تغییرات مقدار انرژی جذب شده مادون قرمز درون نمونه خمیر نان با رطوبت‌های متفاوت در طول موج‌های مختلف احتمالاً ناشی از حالت آب آزاد درون ماده غذایی طی حرارت-دهی است و طول موج حداکثر جذب مادون قرمز به وسیله آب در حالت مایع با بخار متفاوت است [۲۱ و ۲۲]. همچنین کولین (۱۹۲۵) تغییرات پیک جذب مادون قرمز به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر را ناشی از تغییرات دمای آب دانست [۲۴]. با توجه به مطالب بیان شده این احتمال وجود دارد که تفاوت میزان عمق نفوذ مادون قرمز در محدوده توان ۴۹۱ تا ۶۰۱W مربوط به تغییرات دما و حالت آب درون نمونه‌های زیره سیاه با فعالیت آبی پایین باشد. به طوری که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تغییرات عمق نفوذ با فعالیت آبی در پودر زیره نسبت به دانه زیره به ویژه

می‌گردد، به هرحال این مشکل در پودر زیره با فعالیت آبی بالاتر به علت انتشار بیشتر رطوبت به سمت لایه‌های خارجی مشاهده نشد. افضل و همکاران (۱۹۹۹) بیان کردند در صورت استفاده بهینه از مادون‌قرمز امکان تشکیل لایه‌های سخت در طی پرتودهی به علت جذب مادون‌قرمز در نقاطی با رطوبت بالاتر و انتشار رطوبت از آن نقاط به نقاط سطحی کاهش می‌یابد [۲۵].



در فعالیت‌های آبی کمتر محسوس‌تر است. علت تغییرات سریع‌تر عمق نفوذ در پودر زیره در مقایسه با دانه زیره در توان‌های تابشی پایین‌تر از ۶۰۱W ممکن است به علت دانسیته پایین‌تر و انتقال حرارت سریع‌تر پودر نسبت به دانه و در توان‌های بالاتر از ۶۰۱W به علت خشک شدن و سفت شدن بیشتر و سریع‌تر لایه سطحی پودر زیره نسبت به دانه زیره باشد. احتمالاً تشکیل این لایه سخت تاحدی مانع از نفوذ پرتو مادون‌قرمز درون نمونه‌ها

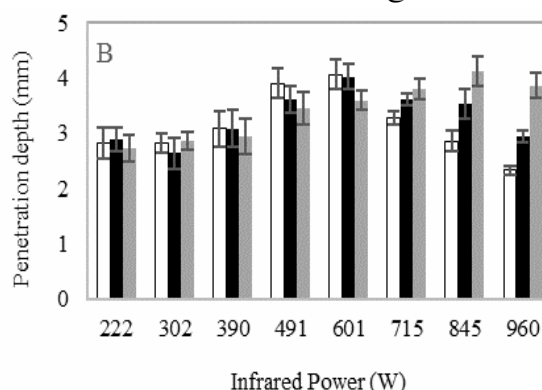


Fig 5 The penetration depth of infrared into seeds (A) and powder (B) of *Carum carvi* with water activity values 0.24 (□), 0.56 (■) and 0.89 (▒) at different IR powers.

استفاده کرد و لزوماً بالاترین توان مادون‌قرمز بیشترین عمق نفوذ را موجب نمی‌گردد. این نتایج می‌تواند جهت استفاده کارا از مادون‌قرمز در فرآیند خشک کردن، تهیه اسانس و آلودگی‌زدایی از زیره سیاه با هدف حفظ بیشتر ترکیبات موثره و کاهش مصرف انرژی استفاده گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر فعالیت آبی نمونه‌های پودری و دانه‌ای زیره سیاه و توان لامپ مادون‌قرمز بر عمق نفوذ مادون‌قرمز درون زیره سیاه بررسی گردید. نتایج نشان داد تغییرات همزمان فعالیت آبی و توان لامپ مادون‌قرمز در سطح توان کمتر از ۳۹۰W اثر معنی‌داری بر عمق نفوذ نداشت. اما با افزایش توان و تغییرات فعالیت آبی اثرات متفاوتی بر عمق نفوذ پرتو مادون‌قرمز درون نمونه‌های زیره داشت. به طوریکه بیشترین میزان عمق نفوذ برای نمونه‌های پودری و دانه‌ای با کمترین فعالیت آبی (۲۴/۰) در توان ۶۰۱W مشاهده گردید اما با افزایش توان، عمق نفوذ در این نمونه‌ها کاهش یافت. در مقابل برای پودر و دانه زیره با فعالیت آبی ۸۹/۰ عمق نفوذ با افزایش توان لامپ مادون‌قرمز تا توان ۸۴۵W افزایش یافت. در نهایت بیشترین میزان عمق نفوذ برای نمونه‌های پودری و دانه‌ای زیره با فعالیت آبی ۸۹/۰ در توان ۸۴۵W به دست آمد (۱۲/۴±۱۸/۰ mm و ۰/۹±۱۳/۰). نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد با توجه به فعالیت آبی زیره، می‌توان برای رسیدن به حداکثر عمق نفوذ مادون‌قرمز از توان‌های متفاوتی

۵- منابع

- [1] Keshavarz, A., Minaiyan, M., Ghannadi, A., and Mahzouni, P. (2013). Effects of *Carum carvi* L.(Caraway) extract and essential oil on TNBS-induced colitis in rats. *Research in pharmaceutical sciences*, 8(1): 1-8.
- [2] Zare, D., Bakhshipour, A., and Chen, G. (2013). Physical properties of cumin and caraway seeds. *International Agrophysics*, 27(4): 491-494.
- [3] Pour-seyedi, S. (1994). Assessment of germination and cytology of three Iranian caraway genus: *Bunium*, *Carum* and *Cuminum*. Tehran, Iran, University of Tehran, 89p.
- [4] Staack, N., Ahrné, L., Borch, E., and Knorr, D. (2008). Effect of infrared heating on quality and

- microwaves drying. *International Journal of heat and mass transfer*, 47(19): 4479-4489.
- [15] Staack, N., Ahrné, L., Borch, E., and Knorr, D. (2008). Effects of temperature, pH, and controlled water activity on inactivation of spores of *Bacillus cereus* in paprika powder by near-IR radiation. *Journal of food engineering*, 89(3): 319-324.
- [16] Mohsenin, N.N. (1980). *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York, USA, Gordon and Breach Science Publishers, 407.
- [17] ISIRI Number 3345, Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2004). Instant coffee— Determination of free- flow and compacted bulk densities.
- [18] Florence, J. M., Allshouse, C. C., Glaze, F. W., and Hahner, C. H. (1950). Absorption of near-infrared energy by certain glasses. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 45(2): 121-128.
- [19] Pan, Z., & Atungulu, G. G. (2011). *Infrared heating for food and agricultural processing*. United States, Taylor and Francis Group, 300.
- [20] Modest, M.F. (2013). *Radiative heat transfer*. United States, Academic Press, 904p.
- [21] Dessev, T., Jury, V., and Le-Bail, A. (2011). The effect of moisture content on short infrared absorptivity of bread dough. *Journal of food engineering*, 104(4): 571-576.
- [22] Huang, M., Kim, M.S., Chao, K., Qin, J., Mo, C., Esquerre, C., Delwiche, S. and Zhu, Q. (2016). Penetration depth measurement of near-infrared hyperspectral imaging light for milk powder. *Sensors*, 16(4): 441.
- [23] Almeida, M., Torrance, K. E., and Datta, A. K. (2006). Measurement of optical properties of foods in near-and mid-infrared radiation. *International Journal of Food Properties*, 9(4): 651-664.
- [24] Collins, J., Change in the infra-red absorption spectrum of water with temperature. *Physical Review*, 1925. 26(6): 771p.
- [25] Afzal, T., Abe, T., and Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of food engineering*, 42(4): 177-182.
- microbial decontamination in paprika powder. *Journal of Food Engineering*, 86(1): 17-24.
- [5] Jihène, L., Amira, T., Saber, C., and Fethi, Z. (2013). Impact of Infra-red drying temperature on total phenolic and flavonoid contents ,on antioxidant and antibacterial activities of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology*, 6(5): 38-46.
- [6] Rastogi, N.K. (2012). Recent trends and developments in infrared heating in food processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52(9): 737-760.
- [7] Eliasson, L., Isaksson, S., Lövenklev, M., and Ahrné, L. (2015). A comparative study of infrared and microwave heating for microbial decontamination of paprika powder. *Frontiers in microbiology*, 6: 1-8.
- [8] Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Soojin, J., Irudayaraj, J., and Demirci, A. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 7(1): 2-13.
- [9] Erdogdu, S. B., Eliasson, L., Erdogdu, F., Isaksson, S., and Ahrné, L. (2015). Experimental determination of penetration depths of various spice commodities (black pepper seeds, paprika powder and oregano leaves) under infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, 161: 75-81.
- [10] Almeida, M., Torrance, K., and Datta, A. (2006). Measurement of optical properties of foods in near-and mid-infrared radiation. *International Journal of Food Properties*, 9(4): 651-664.
- [11] Ginzburg, A.S. (1969). *Application of infra-red radiation in food processing (Chemistry & Process Engineering)*. United Kingdom, London, Leonard Hill books, 412p.
- [12] Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnology progress*, 2(3): 109-119.
- [13] Skjöldebrand, C., Ellbjär, C., Andersson, C. G., and Eriksson, T. S. (1988). Optical properties of bread in the near-infrared range. *Journal of food engineering*, 8(2), 129-139.
- [14] Salagnac, P., Glouannec, P., and Lecharpentier, D. (2004). Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and

Effect of sample properties and infrared power on the penetration depth of infrared radiation into the *Carum carvi* L.

Hasani, M.^{1*}, Kashaninejad, M.², Khomeiri, M.³, Sadeghi, A.⁴

1. P.h.d. Student, Faculty of Food Processing Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Iran.
2. Professor, Faculty of Food Processing Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran.
4. Assistant Professor, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran.

(Received: 2018/08/27 Accepted:2019/02/13)

In recent years, infrared radiation (IR) has been considered as one of the suitable methods for drying and decontamination of different spices. However, the low penetration depth of the IR limits its use for food processing in the industry. Due to the importance of *Carum carvi* as a spice with medical properties, this research aimed to determine the effect of the sample's structure (powder and seeds), water activity (0.24, 0.56 and 0.89) and the power of IR emitter (222 to 960W) on the penetration depth of the IR into *Carum carvi*. For this propose, the heat fluxes received by copper black body that placed under samples with different thickness was measured. Afterward, the penetration depth was calculated through a mathematical model. The results indicated while aw of the sample, the IR power, and their interaction had a significant effect on the penetration depth of the IR, the structural properties of the sample had no significant effect on it. Increasing the infrared power to 601W enhanced the penetration depth in all of the samples. The highest penetration depth into the powder and the seeds of *Carum carvi* with aw 0.24 was achieved at the IR power of 601W, and was recorded 4.07 ± 0.27 and 3.85 ± 0.23 mm while the samples with aw 0.89 were shown the highest penetration depth when they were irradiated by IR power of 845W (4.12 ± 0.18 and 4.09 ± 0.13 mm). According to the results, determining of IR penetration depth in the spice can be used to determine of their optimal thickness during the infrared food process.

Keywords: *Carum carvi*, Infrared radiation, Penetration depth, Water activity

* Corresponding Author E-Mail Address: mahdiyehasani@gmail.com