

ارزیابی تابش انتخابی مادون قرمز بر غیر فعال سازی باسیلوس سرئوس به روش سطح

پاسخ

مهدی شوندی^{۱*}، مهدی کاشانی نژاد^۱، علیرضا صادقی^۱، سید مهدی جعفری^۱ و مهدیه حسنی^۱

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استاد، دانشیار و دانش‌آموخته دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده صنایع غذایی، گروه آموزشی مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، استان گلستان، ایران.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۱۴

چکیده

اثر ضد میکروبی تابش مادون قرمز روشی نوین در فراوری مواد غذایی است. در این مطالعه، پس از تعیین بیشینه جذب باسیلوس سرئوس (به عنوان یک شاخص غذازاد) با طیف سنجی مادون قرمز (FTIR)، تأثیر طول موج انتخابی مادون قرمز (۶/۲۶، ۶/۰۱ و ۵/۷۶ میکرومتر به ترتیب معادل با ۱۵۹۷/۴۴، ۱۶۶۳/۸۹ و ۱۷۳۶/۱۱ سانتی متر^{-۱})، فاصله از منبع تابش (۳، ۵ و ۷ سانتی متر)، مدت زمان تابش (۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ دقیقه)، و ضخامت نمونه (۲، ۴ و ۶ میلی متر) بر جمعیت باسیلوس سرئوس در محیط کشت مایع به روش سطح پاسخ ارزیابی گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، معنی داری تأثیر تمام متغیرهای مورد مطالعه (به جز ضخامت نمونه) بر کاهش جمعیت باسیلوس سرئوس در سطح $p < 0.01$ محرز شد. اثر متقابل طول موج تابش مادون قرمز با فاصله از منبع تابش و اثر متقابل فاصله از منبع تابش با مدت زمان تابش بر کاهش جمعیت باکتری مذکور نیز معنی دار ($p < 0.01$) بود. علاوه بر این، بیشترین کاهش جمعیت باسیلوس سرئوس (معادل ۴/۳۴ سیکل لگاریتمی) در تیمار حاصل از طول موج تابش ۵/۷۶ میکرومتر (معادل با ۱۷۳۶/۱۱ سانتی متر^{-۱})، فاصله از منبع تابش ۳ سانتی متر، مدت زمان تابش ۳۰ دقیقه، و ضخامت نمونه ۲ میلی متر مشاهده شده است. از نتایج این پژوهش می توان برای بهینه یابی فرایندهای صنعتی با هدف حذف باسیلوس سرئوس با تابش مادون قرمز استفاده کرد.

واژه های کلیدی

شاخص غذازاد، طول موج مادون قرمز انتخابی، غیر فعال کردن میکروبی

مقدمه

اتحادیه ایمنی غذا اروپا (EFSA, 2005) تعدادی که موجب مسمومیت غذایی می شود 10^3 تا 10^4 CFU/g گزارش کرده است. تابش مادون قرمز با محدوده طول موج ۰/۷۶ میکرومتر تا ۱ میلی متر، بخشی از طیف الکترومغناطیس بین فرابنفش و مایکروویو محسوب می شود. مادون قرمز به سه ناحیه مادون قرمز نزدیک (۰/۷۶-۲ میکرومتر)، مادون قرمز متوسط (۲-۴ میکرومتر)، و مادون قرمز دور (۴-۱۰۰۰ میکرومتر) تقسیم می شود. تأثیر ضد میکروبی تابش

باسیلوس سرئوس یک باکتری گرم مثبت، دارای اندوسپور، و بی هوازی اختیاری است. مقاومت بالای این باکتری به شرایط نامساعد محیطی، به گستردگی حضور این باکتری در فراورده های لبنی، غله ای، گوشتی، و چاشنی ها انجامیده است. منشأ این باکتری آب، خاک، هوا، و منابع جانوری و گیاهی است (Griffiths & Schraft, 2017; Schoeni & Wong, 2005). معمولاً برای ایجاد بیماری با این باکتری جمعیت 10^5 Colony-forming unit/g نیاز است، اما

که میزان جذب مادون قرمز در پیوندهای شیمیایی مختلف متفاوت است. این خاصیت باعث می‌شود مواد شیمیایی مختلف نواحی متفاوتی از طیف مادون قرمز را جذب کنند (Dostert *et al.*, 2016). از طیف مادون قرمز برای شناسایی میکروارگانیسم‌ها استفاده کرده‌اند که هر میکروارگانیسم طیف جذبی خاص و متفاوت خود را داشت که بیان‌گر متفاوت بودن میزان جذب میکروارگانیسم‌هاست (Helm *et al.*, 1991). به طور مثال، محدوده جذب مادون قرمز توسط پیوندهای شیمیایی و ترکیبات غذایی مختلف در جدول (۱) تعیین شده است (Rosenthal, 2012).

مادون قرمز، بسته به اثر اشعه (انعکاس، جذب، عبور، تفرق اشعه، عمق نفوذ، و طول موج مادون قرمز) و نوع ماده غذایی (ترکیب ماده غذایی، فعالیت آبی، و ضخامت محصول) بستگی دارد (Staack *et al.*, 2008a). تابش مادون قرمز ممکن است با مکانیسمی شبیه به تابش فرابنفش با تأثیر بر اسیدهای نوکلئیک یا مشابه امواج مایکروویو با ایجاد حرارت القایی باعث آلودگی زدایی شود (Hamanaka *et al.*, 2000). البته عموماً به علت عمق نفوذ پایین اشعه مادون قرمز (حدود ۰/۳۱ تا ۴/۷۶ میلی-متر) این روش به‌عنوان روش فرآوری سطحی استفاده می‌شود (Eliasson *et al.*, 2015). تحقیقات نشان می‌دهد

جدول ۱- محدوده جذب مادون قرمز توسط ترکیبات غذایی

پیوند شیمیایی	محدوده جذب (میکرومتر)	ترکیب غذایی جاذب
O-H	۲/۷-۳/۳	آب و شکر
الیفاتیک O-H	۳/۲۵-۳/۷	شکر، لیپید و پروتئین
استر C=O	۵/۷۱-۵/۷۶	لیپید
آمید C=O	۵/۹۲	پروتئین
-HN-	۲/۸۳-۳/۳۳	پروتئین
C=C	۴/۴۴-۴/۷۶	لیپیدهای اشباع نشده

میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ و طیف سنجی مادون قرمز^۵، به‌وضوح مشاهده شد که تأثیر مادون قرمز، آسیب به دیواره سلولی، غشای سیتوپلاسمی و متعاقباً نشت مواد درون سلولی و فروپاشی مزوزوم است (Krishnamurthy, 2006). در مطالعه اردغدو و ایکیز (Erdogdu & Ekiz, 2013)، از تابش ترکیبی مادون قرمز دور و فرابنفش برای میکروزدایی سطحی دانه‌های فلفل سیاه استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داده‌است که تابش مادون قرمز دور باعث افزایش سریع دمای دانه‌های فلفل سیاه حتی بیشتر از میزان مورد نیاز برای از بین بردن میکروارگانیسم‌هاست. این امر باعث حفظ کیفیت محصول در سطحی بالا از نظر رنگ و ترکیبات فرار روغنی و همچنین از بین رفتن میکروارگانیسم‌ها در زمان کوتاه

به طور کلی، تابش مادون قرمز دور^۱ با ایجاد حالت ارتعاش در مولکول‌های مواد غذایی منجر به ایجاد حرارت تابشی در آنها می‌شود. آب و ترکیبات آلی مانند پروتئین و نشاسته که از اجزای اصلی مواد غذایی محسوب می‌شوند دارای جذب در محدوده مادون قرمز دور در طول موج‌های بالاتر از ۲/۵ میکرومتر هستند (Sakai & Hanzawa, 1994). مکانیسم غیرفعال‌سازی باکتری/شیریشیا گلای^۲ با اشعه مادون قرمز در بافر نمک فسفات بررسی و مشخص شده است که سلول‌های آسیب دیده نسبت به عوامل مهارکننده حساسیت بالایی دارند. میزان آسیب تابش مادون قرمز بر پروتئین، RNA، دیواره سلولی، و DNA به ترتیب بیشتر است (Sawai *et al.*, 1995). با بررسی استافیلوکوکوس/اورئوس^۳ تحت تیمار تابش مادون قرمز با

1- Far-Infrared
3- *Staphylococcus aureus*
5- FTIR

استفاده از طول موج انتخابی تابش مادون قرمز در حذف شاخص‌های میکروبی غذازاد در حوزه میکروبیولوژی غذایی ارائه نشده است. روش‌شناسی سطح پاسخ^۴، یک روش مدل‌سازی تجربی است که از محبوب‌ترین روش‌های بهینه‌سازی فرآیند شناخته می‌شود. این روش در زمینه صنایع غذایی به صورت گسترده استفاده شده و بر اساس عوامل تأثیرگذار بر فرآیند و نتایج مشاهده شده به منظور مدل‌سازی تعیین شرایط بهینه و اثر متقابل تیمارها مورد استفاده قرار گرفته است (Gao *et al.*, 2006; Jaouachi *et al.*, 2007; Kim & Rhee, 2015; Lee *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2002) در این پژوهش، به منظور بررسی میزان حذف باسیلوس سرئوس، تأثیر تیمارهای طول موج انتخابی تابش مادون قرمز، مدت زمان تابش، فاصله از منبع تابش، و ضخامت نمونه به روش سطح پاسخ بررسی شده است.

مواد و روش

باکتری باسیلوس سرئوس (PTCC 1015) به صورت لیوفیلیزه از کلکسیون میکروبی ایران خریداری شد. محیط کشت‌های مصرفی شامل BHI Agar و BHI Broth و سرم فیزیولوژی ۰/۸۵ درصد کلرید سدیم - وزنی حجمی به منظور تهیه رقت‌ها از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. از لامپ حرارتی کوارتز مادون قرمز (با طول ۳۵۰ میلی‌متر) دارای قدرت بیشینه ۱۰۰۰ وات در ۲۳۰ ولت ورودی به منظور پرتودهی استفاده گردید.

فعال‌سازی باکتری

باسیلوس سرئوس با دو روز متوالی کشت در محیط BHI Broth (۲۴ ساعت گرمخانه‌گذاری در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد) فعال‌سازی شد. برای تنظیم جمعیت میکروبی، از اسپکتروفتومتر (پی جی اینسترومنتز^۵، T80+، انگلیس) و استاندارد مک فارلند استفاده و جمعیت باسیلوس سرئوس معادل 10^8 CFU/ml تنظیم شد.

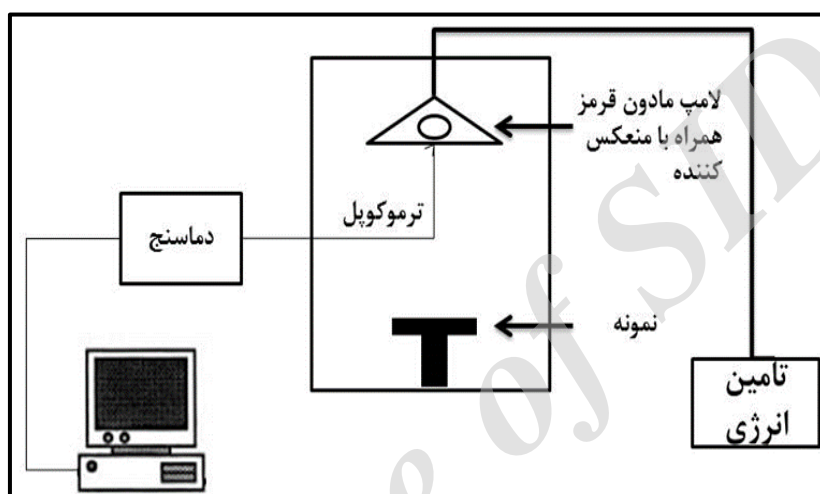
می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که تیمار فرابنفش (UVC) هم به صورت منفرد و هم به صورت ترکیبی با مادون قرمز دور، تأثیر قابل توجهی در کاهش جمعیت میکروبی دانه‌های فلفل سیاه ندارد اما تابش مادون قرمز دور روشی مناسب در کاهش جمعیت میکروبی معرفی شده است. برای نابودی اسپورهای باسیلوس سرئوس در پودر پاپریکا از تابش مادون قرمز نزدیک در شرایط مختلف pH، دما، میزان فعالیت آبی، و شار حرارتی استفاده و مشخص گردید که در دما و فعالیت آبی بالاتر، تعداد اسپورهای باسیلوس سرئوس به شکل معنی‌داری کاهش می‌یابد. بر این اساس، طی ۶ دقیقه جمعیت اسپورهای باسیلوس سرئوس در شرایط دمای حدود ۹۵-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فعالیت آبی حدود ۰/۸۸ به میزان $4/5 \log \text{CFU/g}$ کاهش یافته است (Staack *et al.*, 2008b). میزان تأثیر طول موج‌های مختلف مادون قرمز در فعالیت‌های آبی متفاوت بر اسپور باسیلوس سوبتیلیس^۱ نیز نشان داده است که در فعالیت‌های آبی بهینه این باکتری (۰/۶۰، ۰/۷۰) زمان فرایند افزایش و با کاهش طول موج، میزان نابودی آنها افزایش یافته است (Hamanaka *et al.*, 2006). از تابش مادون قرمز برای شناسایی میکروارگانیسم‌ها نیز استفاده شده است و بر این اساس هر میکروارگانیسم، طیف جذبی خاص و متفاوت خود را داراست (Helm *et al.*, 1991). جان و ایرودایاج (Jun & Irudayaraj, 2003) به منظور آلودگی‌زدایی آرد ذرت از آسپرژیلوس نایجر^۲ و فوزاریوم پرولیفرا^۳ با تابش مادون قرمز انتخابی، ابتدا طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه‌های آرد ذرت تلقیح شده با قارچ‌های مذکور را بررسی کردند و در محدوده طول موج بیشینه جذب این قارچ‌ها (بین ۵/۸۸ تا ۶/۶۶ میکرومتر) با فیلتر طول موج عبوری مشخص و بدون فیلتر پرتودهی شد. نتایج نشان داده که در صورت وجود فیلتر، پرتودهی کارآمدتر و میزان آلودگی‌زدایی نیز بیشتر است. گفتنی است که تاکنون گزارشی مبنی بر

1- *Bacillus subtilis*
3- *Fusarium proliferatum*
5- PG instruments

سیستم پرتودهی

سرئوس، دمای متناسب با بیشینه طول موج تابشی از لامپ مادون قرمز محاسبه شد. بر اساس قانون مذکور، در دماهای مختلف سطح لامپ مادون قرمز یک بیشینه طول موج متناسب با دمای سطح ساطع می شود (Modest, 2013). پس از آن، دمای سطح لامپ مادون قرمز با استفاده از

لامپ مادون قرمز در یک محفظه به ابعاد $60 \times 50 \times 30$ سانتی متر در یک هدایت کننده امواج نصب گردید شکل (۱). اندازه گیری دمای سطح لامپ ابتدا با استفاده از معادله قانون جابه جایی Wien's^۱ رابطه (۱) و طول موج بیشینه جذب با سیلیوس



شکل ۱- سیستم پرتودهی مورد استفاده در این پژوهش

انرژی مصرفی کل انرژی مصرفی کل، به انرژی مورد نیاز دستگاه به هنگام آلودگی زدایی گفته می شود و واحد آن بر حسب کیلووات بر ساعت مطابق رابطه ۲ است (Koyuncu et al., 2007).

$$E_{IR} = IR \times t \quad (2)$$

IR توان مصرف شده مادون قرمز (کیلووات) و t زمان فرآیند است.

تجزیه و تحلیل داده ها

در این مطالعه، بیشینه طول موج انتخابی (۶/۲۶، ۶/۰۱ و ۵/۷۶ میکرومتر به ترتیب معادل با ۱۵۹۷/۴۴، ۱۶۶۳/۸۹ و ۱۷۳۶/۱۱ سانتی متر^{-۱})، زمان پرتودهی (۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ دقیقه)، فاصله لامپ از نمونه (۳، ۵ و ۷ سانتی متر)، و ضخامت نمونه (۲، ۴ و ۶ میلی متر) هر یک در سه سطح

دماسنج (لوترون^۲، TM-947SD، ژاپن) با ترموکوپل مدل k اندازه گیری شد و با تغییر ولتاژ ورودی به لامپ، دمای مورد نظر تنظیم گردید.

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

در این معادله، λ_{max} = طول موج بیشینه ساطع شده از لامپ مادون قرمز (میکرومتر) و T = دمای سطح O لامپ مادون قرمز (کلوین) است.

طیف سنجی مادون قرمز باکتری

برای تعیین طول موج بیشینه جذب با سیلیوس سرئوس، از دستگاه FTIR (بروکر^۳، Vertex 70، آلمان) بر اساس روش روزنتال (Rosenthal, 2012) استفاده شد.

1- Wien's displacement law
3- Bruker

$$(3) \quad Y = k_0 + k_1X_1 + k_2X_2 + k_3X_3 + k_4X_4 + k_5X_1^2 + k_6X_2^2 + k_7X_3^2 + k_8X_4^2 + k_9X_1X_2 + k_{10}X_2X_3 + k_{11}X_3X_1 + k_{12}X_4X_1 + k_{13}X_2X_4 + k_{14}X_3X_4$$

X_1, X_2, X_3, X_4 متغیرهای ورودی، k نشان دهنده ضرایب رگرسیونی برآورد شده، $k_0 =$ ضریب ثابت، k_1, k_2, k_3, k_4 اثرهای خطی، k_5, k_6, k_7, k_8 اثرهای درجه دوم، و $k_9, k_{10}, k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}$ اثرهای متقابل هستند (Kim & Rhee, 2015).

اِعمال شد (جدول ۲). تیمارها به صورت طرح RSM با نرم افزار Design Expert نسخه ۹ در سه تکرار نقطه مرکزی در نظر گرفته شد. پاسخ مورد نظر در این پژوهش، میزان کاهش جمعیت باسیلوس سرئوس تحت تیمارهای مذکور بود. داده‌ها با تجزیه و تحلیل آماری آنالیز واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم افزار Design Expert نسخه ۹ تجزیه و تحلیل شدند. مدل چند متغیره درجه دوم رابطه (۳) به منظور پیش بینی میزان کاهش باسیلوس سرئوس استفاده شد:

جدول ۲- تیمارهای اعمال شده در این پژوهش

تیمار	طول موج (میکرومتر)	زمان (دقیقه)	فاصله (سانتی متر)	ضخامت (میلی متر)	تیمار	طول موج (میکرومتر)	زمان (دقیقه)	فاصله (سانتی متر)	ضخامت (میلی متر)
۱	۵/۷۶	۱۵	۷	۲	۱۵	۶/۲۶	۱۵	۷	۲
۲	۶/۲۶	۳۰	۷	۲	۱۶	۵/۷۶	۳۰	۷	۲
۳	۵/۷۶	۳۰	۳	۶	۱۷	۵/۷۶	۳۰	۷	۶
۴	۵/۷۶	۳۰	۵	۴	۱۸	۶/۰۱	۳۰	۳	۴
۵	۵/۷۶	۱۵	۷	۶	۱۹	۵/۷۶	۱۵	۷	۶
۶	۶/۰۱	۳۰	۳	۶	۲۰	۶/۲۶	۳۰	۳	۶
۷	۶/۲۶	۳۰	۵	۴	۲۱	۵/۷۶	۳۰	۵	۴
۸	۶/۰۱	۲۲/۵	۷	۴	۲۲	۶/۰۱	۲۲/۵	۷	۴
۹	۶/۲۶	۱۵	۵	۲	۲۳	۶/۰۱	۱۵	۵	۲
۱۰	۶/۰۱	۲۲/۵	۵	۴	۲۴	۶/۰۱	۲۲/۵	۵	۴
۱۱	۶/۲۶	۳۰	۳	۲	۲۵	۶/۲۶	۳۰	۳	۲
۱۲	۶/۲۶	۳۰	۳	۲	۲۶	۵/۷۶	۳۰	۳	۲
۱۳	۶/۲۶	۲۲/۵	۵	۴	۲۷	۶/۰۱	۲۲/۵	۵	۴
۱۴	۶/۰۱	۲۲/۵	۵	۴					

نتایج و بحث

و بررسی تعیین عدم برازش مدل با آزمون F مورد تأیید قرار گرفت. در بخش آنالیز واریانس، آزمون عدم برازش نشان دهنده مناسب یا نامناسب بودن مدل است. میزان معنی داری مدل با افزایش مقدار F و کاهش مقدار P نیز افزایش خواهد یافت (GM & DM, Myers et al., 2016; 2003). بر این اساس، مدل درجه دوم به منظور پیش بینی مقدار پاسخ، مدل مناسبی تعیین گردید. مقادیر ضریب تبیین نیز

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، مدلی به منظور پیش بینی روند تغییرات متغیرهای وابسته تعریف گردید. پس از آن، به منظور ارزیابی صحت مدل برازش یافته، آزمون عدم برازش اجرا شد و مقادیر ضریب تغییرات، ضریب تبیین R^2 (adj)، R^2 و P value تعیین شدند. واریانس به دست آمده از این مدل با ارزیابی معنی داری آن نسبت به واریانس باقی مانده

نشانه‌گر تغییرات توصیف شده توسط مدل به تغییرات کل و معیاری است از درجه تناسب مدل برازش یافته (Gharibzahedi *et al.*, 2012). ارزیابی تناسب مدل حاصل از پاسخ به دست آمده، تحت تأثیر متغیرهای طول موج انتخابی تابش مادون قرمز، زمان تابش، فاصله از منبع تابش، و ضخامت نمونه در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- آنالیز واریانس و تحلیل آزمون ضعف برازش مدل چند متغیره برای پاسخ

Source	DF	میزان حذف باکتری		
		Coefficient	Sum of squares	p-Value
Model	۱۴	۲/۲۱	۲۵/۲۸	<۰/۰۰۰۱**
Linear				
X ₁	۱	-۰/۶۰	۶/۳۷	<۰/۰۰۰۱**
X ₂	۱	-۰/۷۴	۹/۷۷	<۰/۰۰۰۱**
X ₃	۱	۰/۶۵	۷/۵۵	<۰/۰۰۰۱**
X ₄	۱	-۰/۰۷۳	۰/۰۹۷	۰/۱۰۴۱ ^{ns}
Quadratic				
X ₁₁	۱	-۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۰۰۴۳**
X ₂₂	۱	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۰۵۲۵ ^{ns}
X ₃₃	۱	-۰/۰۸۳	۰/۰۱۸	۰/۴۶۸۵ ^{ns}
X ₄₄	۱	-۰/۰۲۳	۰/۰۰۱۳	۰/۸۴۱۲ ^{ns}
Interaction				
X ₁₂	۱	۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۰۰۵۸**
X ₁₃	۱	-۰/۰۳۹	۰/۰۲۵	۰/۳۹۰۹ ^{ns}
X ₁₄	۱	-۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۱۶	۰/۹۴۴۸ ^{ns}
X ₂₃	۱	-۰/۰۱۶	۰/۴۲	۰/۰۰۳۳**
X ₂₄	۱	-۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۱۰۵	۰/۸۵۷۳ ^{ns}
X ₃₄	۱	-۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۱۰۵	۰/۸۵۷۳ ^{ns}
Residual	۱۲		۰/۳۸	
Lack of fit	۱۰		۰/۱۸	
Pure error	۲		۰/۲۰	
Total	۲۶		۲۵/۶۵	
R ²		۰/۹۸۵۴		
Adj- R ²		۰/۹۶۸۳		
CV		۸/۷۰		

معنی‌دار نباشد و دارای بالاترین مقدار R^2 adjusted و R^2 predicted باشد.

آزمون FTIR برای تعیین جذب بیشینه باسیلوس سرئوس

با توجه به شکل (۲)، پیک جذبی مناسبی با میزان بیشینه جذب برای باسیلوس سرئوس به منظور پرتوتابی انتخاب شد. با استفاده از رابطه ۱ و طول موج جذب بیشینه که

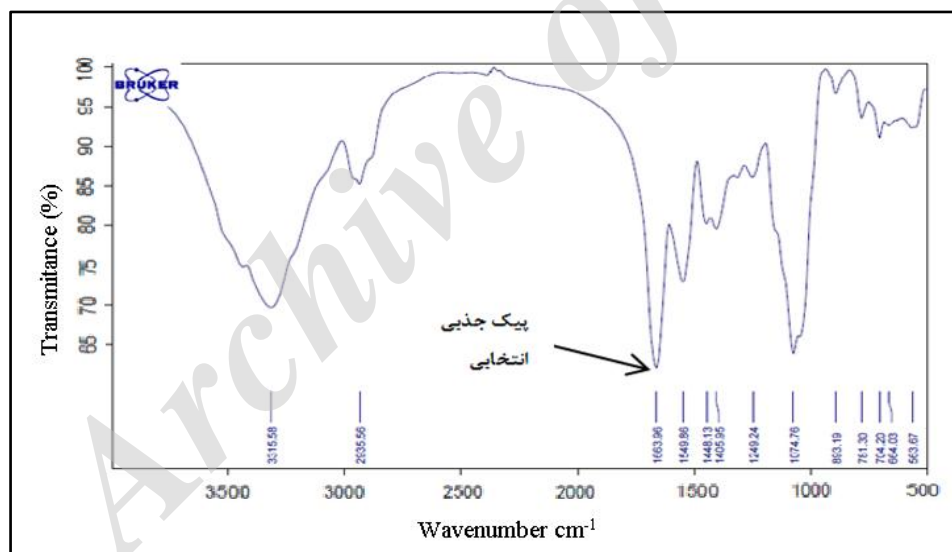
تجزیه و تحلیل جدول واریانس نشان می‌دهد که تأثیر متغیر طول موج انتخابی تابش مادون قرمز، زمان تابش، و فاصله از منبع تابش در پاسخ مورد مطالعه در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و تیمارهای مذکور به عنوان تیمار مستقل تأثیرگذار در فرآیند تعیین شدند. متغیر ضخامت نمونه نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیست. برای مناسب بودن یک مدل از نظر آماری باید آزمون ضعف برازش آن

فاصله نمونه از منبع تابش، مدت زمان تابش، و ضخامت نمونه در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به داده‌های به دست آمده در این پژوهش، تأثیر متغیرهای مستقل طول موج انتخابی تابش مادون قرمز و فاصله از منبع تابش، هر دو به تنهایی، بر میزان کاهش باسیلوس سرئوس در سطح ۱ درصد معنی دارند. در شکل (۳) میزان تأثیر تیمارهای مورد استفاده در نابودی باسیلوس سرئوس نشان داده شده است. بیشترین کاهش جمعیت باسیلوس سرئوس (معادل ۴/۳۴ سیکل لگاریتمی) در تیمار حاصل از طول موج تابش ۵/۷۶ میکرومتر (معادل با ۱۷۳۶/۱۱ سانتی متر^{-۱})، فاصله از منبع تابش ۳ سانتی متر، مدت زمان تابش ۳۰ دقیقه، و ضخامت نمونه ۲ میلی متر مشاهده شده است.

معادل ۶/۰۱ میکرومتر (معادل با ۱۶۶۳/۸۹ سانتی متر^{-۱}) است، دمای سطح لامپ برای ساطع کردن بیشترین طول موج در دمای خاص، معادل ۲۰۹/۲ درجه سانتی گراد تعیین گردید. در محدوده ذکر شده طول موج بیشینه جذب باسیلوس سرئوس، سه طول موج انتخاب شد (۶/۲۶، ۶/۰۱ و ۵/۷۶ میکرومتر به ترتیب معادل با ۱۵۹۷/۴۴، ۱۶۶۳/۸۹ و ۱۷۳۶/۱۱ سانتی متر^{-۱}). یادآوری می شود این طول موج مربوط به پیوندهای شیمیایی پروتئین ها (۵/۹۲ میکرومتر معادل با ۱۶۸۹/۱۹ سانتی متر^{-۱}) است (Rosenthal, 2012).

میزان حذف باسیلوس سرئوس

نتایج حاصل از میزان حذف باسیلوس سرئوس تحت تیمارهای طول موج انتخابی تابش مادون قرمز،



شکل ۲- طیف سنجی مادون قرمز باسیلوس سرئوس با استفاده از FTIR

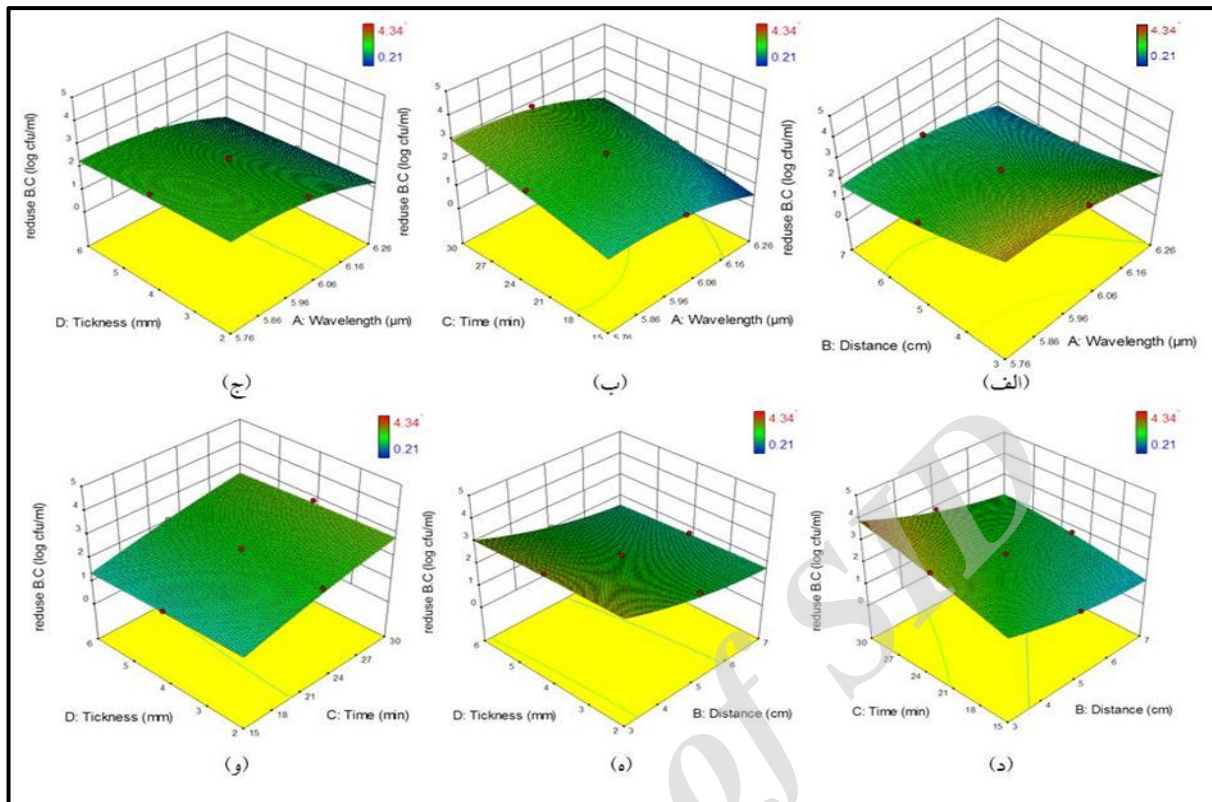
میزان کمی افزایش می یابد اما این تفاوت معنی دار نیست (شکل ۳).

تأثیر طول موج انتخابی تابش مادون قرمز

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که با کاهش طول موج، میزان حذف باسیلوس سرئوس به شکل درجه دوم و در سطح معنی داری $p < 0.01$ افزایش می یابد در حالی که میزان حذف باسیلوس سرئوس در نقطه مرکزی

تأثیر متغیرهای مستقل بر میزان حذف باسیلوس سرئوس

با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، معنی داری تأثیر طول موج انتخابی تابش مادون قرمز، فاصله از منبع تابش، و مدت زمان تابش بر میزان حذف باسیلوس سرئوس در سطح ۱ درصد تأیید و مشخص شد که با کاهش میزان ضخامت نمونه نیز حذف باکتری مذکور به



شکل ۳- حذف باسیلوس سرئوس تحت تأثیر تیمارهای طول موج انتخابی تابش مادون قرمز، فاصله نمونه از منبع تابش، زمان تابش و ضخامت نمونه

استفاده شد. مشاهده شد که فرایند در حالت وجود فیلترها نسبت به فقدان فیلترها باعث آلودگی زدایی بیشتر آرد ذرت از اسپورهای مذکور شده است (Jun & Irudayaraj, 2003).

تأثیر فاصله نمونه از منبع تابش مادون قرمز

میزان تأثیر متغیر مستقل فاصله نمونه از منبع تابش بر میزان حذف باسیلوس سرئوس با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش در سطح $P < 0.01$ تأیید شده است. بنا بر نتایج پژوهش حاضر و مطابق با گزارش-های محققان دیگر، با کاهش میزان فاصله نمونه از لامپ، میزان حذف باسیلوس سرئوس افزایش می یابد. این اثر احتمالاً به دلیل افزایش میزان جذب باسیلوس سرئوس و افزایش دمای نمونه به دلیل کاهش میزان فاصله است. در مطالعه‌ای برای حذف اسپور قارچ کلادوسپوریوم^۱ و اسپور

تیمار طول موج انتخابی (۶/۰۱ میکرومتر معادل با ۱۶۶۳/۸۹ سانتی متر^{-۱}) دارای افزایش محسوسی است و با نتایج پژوهش های زیر نیز مطابقت دارد. قاعدتاً این کاهش جمعیت به واسطه افزایش انرژی امواج با کاهش طول موج آنها رخ می دهد. پژوهش هاماناکا و همکاران (Hamanaka *et al.*, 2006) به منظور بررسی تأثیر طول موج های مختلف مادون قرمز در سه سطح ۹۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ نانومتر در میزان حذف اسپور باسیلوس سوبتلیس نشان می دهد که با کاهش طول موج، میزان نابودی اسپور باسیلوس سوبتلیس افزایش می یابد. برای آلودگی زدایی با طول موج انتخابی تابش مادون قرمز دور برای اسپورهای آسپرژیلوس نایجر و فوزاریوم پرولیفرا/توم از آرد ذرت در محدوده جذب پروتئین ها (۵/۸۸ تا ۶/۶۶ میکرومتر) از فیلترهای مادون قرمز در مقایسه با حالت مادون قرمز بدون فیلتر

مبنی بر کاهش جمعیت میکروبی با افزایش مدت زمان فرایند پرتودهی وجود دارد (Eliasson *et al.*, 2015; Eliasson *et al.*, 2014; Erdoğan & Ekiz, 2011; Staack *et al.*, 2008a; Staack *et al.*, 2008b).

تأثیر ضخامت نمونه

نتایج پژوهش‌های زیر نشان می‌دهد با کاهش ضخامت نمونه، میزان حذف میکروارگانیزم‌ها بر اثر تابش مادون قرمز افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش با کاهش ضخامت نمونه، میزان حذف باسیلوس سرئوس به شکل خطی افزایش می‌یابد اما تغییر سطوح، تأثیر معنی‌داری در میزان حذف باسیلوس سرئوس ندارد. افزایش ضخامت (در صورت ثابت بودن سایر متغیرها) به علت کاهش میزان نفوذ تابش مادون قرمز به عمق نمونه باعث کاهش میزان آلودگی زدایی می‌شود. عمق نفوذ تابش مادون قرمز بسیار کم است (از ۰/۳۱ تا ۴/۷۶ میکرومتر) از این رو تأثیر تابش مادون قرمز بر غیر فعال سازی میکروارگانیزم‌ها با افزایش ضخامت نمونه قاعدتاً کاهش می‌یابد. نشان داده شده است که کاهش ضخامت نمونه باعث افزایش غیر فعال سازی اسپور باسیلوس سوبتلیس می‌شود (Sawai *et al.*, 1997). بررسی تأثیر تابش مادون قرمز در حذف استافیلوکوکوس اورئوس و اشیریشیا گلائی نیز نشان می‌دهد که با کاهش ضخامت نمونه، میزان حذف باکتری‌های مذکور افزایش می‌یابد به طوری که میزان حذف استافیلوکوکوس اورئوس در ضخامت‌های ۲/۹ و ۰/۹ میلی‌متر به ترتیب به حدود ۲ و ۵ سیکل لگاریتمی رسیده است و میزان حذف اشیریشیا گلائی در ضخامت‌های ۲/۲ و ۱/۳ میلی‌متر به ترتیب در حدود ۱/۶۶ و ۱/۳۳ سیکل لگاریتمی به دست آمده است (Hashimoto *et al.*, 1992).

قارچ پنسیلیوم^۱ جداسازی شده از هلو، از تابش مادون قرمز در فاصله‌های مختلف لامپ از نمونه (۹۰، ۱۱۰، ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ میلی‌متر) در محیط کشت استفاده و نشان داده شد که با کاهش میزان فاصله نمونه از لامپ به واسطه گرمایش سریع، میزان حذف اسپورهای قارچی افزایش می‌یابد (Trivittayasil *et al.*, 2013). همچنین نتایج مطالعه آلودگی زدایی استافیلوکوکوس اورئوس و باسیلوس سوبتلیس از شیر و آب با استفاده از تابش ماورا بنفش و تابش مادون قرمز مشخص ساخت که کاهش میزان فاصله لامپ از نمونه باعث افزایش میزان آلودگی زدایی می‌شود (Krishnamurthy, 2006).

تأثیر مدت زمان تابش مادون قرمز

در نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر مشاهده شد که با افزایش مدت زمان تابش مادون قرمز، میزان حذف باسیلوس سرئوس به شکل خطی و در سطح معنی‌داری $P < 0/01$ افزایش می‌یابد که با نتایج پژوهش‌های زیر مطابقت دارد. با افزایش مدت زمان پرتودهی نمونه (در صورت ثابت بودن سایر متغیرها)، میزان انرژی دریافتی نمونه مسلماً افزایش می‌یابد و خود باعث افزایش میزان آلودگی زدایی می‌شود. در پژوهشی به منظور آلودگی زدایی سطحی فلفل سیاه با تیمار ترکیبی تابش مادون قرمز دور و تابش فرابنفش مشاهده شد که با افزایش مدت زمان فرایند، جمعیت میکروبی کاهش می‌یابد (Erdoğan & Ekiz, 2013). تأثیر طول موج‌های مختلف مادون قرمز به هنگام فرایند پرتودهی در حذف اسپور باسیلوس سوبتلیس نیز مشخص کرد که با افزایش مدت زمان فرایند، میزان حذف اسپور باسیلوس سوبتلیس افزایش می‌یابد (Hamanaka *et al.*, 2006). انتخابی مادون قرمز دور برای اسپورهای آسپیریلوس نایجر و فوزاریوم پرولیفراتوم نشان داده است که با افزایش مدت زمان فرایند، میزان آلودگی زدایی نیز افزایش می‌یابد (Jun & Irudayaraj, 2003). علاوه بر این، گزارش‌های متعددی

اثر متقابل متغیرهای مستقل بر میزان حذف باسیلوس سرئوس

اثر متقابل طول موج انتخابی تابش مادون قرمز بافاصله از منبع تابش و اثر متقابل فاصله از منبع تابش با مدت زمان تابش بر میزان حذف باسیلوس سرئوس به شکل درجه دوم و در سطح ۱ درصد معنی دار است. علاوه بر این، مدل چند متغیره درجه دوم برای پیش بینی اثر متغیرهای مستقل، اثرهای متقابل و اثرهای درجه دوم آنها بر میزان حذف باسیلوس سرئوس با ضریب همبستگی مناسبی به دست آمده است. با استناد بر نتایج پژوهش حاضر، میزان حذف باسیلوس سرئوس در نقطه مرکزی تیمار طول موج انتخابی (۶/۰۱ میکرومتر معادل با ۱۶۶۳/۸۹ سانتی متر^{-۱}) افزایش محسوسی دارد. با کاهش طول موج در محدوده بهینه جذب باسیلوس سرئوس و کاهش فاصله نمونه از سطح لامپ، میزان حذف باسیلوس سرئوس افزایش یافته است. همچنین اثر متقابل تیمارهای مذکور بر میزان کاهش باسیلوس سرئوس در سطح ۱ درصد معنی دار است (شکل ۳-الف). همچنین مشخص شد که متغیر مدت زمان تابش به صورت مستقل در سطح ۱ درصد معنی دار است و با افزایش مدت زمان پرتو دهی، میزان حذف باسیلوس سرئوس افزایش می یابد. در حالی که اثر متقابل تیمارهای طول موج انتخابی تابش مادون قرمز و مدت زمان تابش در سطح ۵ درصد معنی دار نیست (شکل ۳-ب). علاوه بر این، با کاهش ضخامت نمونه، میزان حذف باسیلوس سرئوس افزایش می یابد اما این متغیر در سطح ۵ درصد معنی دار نیست. همچنین مشخص شده که اثر متقابل طول موج انتخابی تابش مادون قرمز با ضخامت نمونه نیز در سطح ۵ درصد معنی دار نیست (شکل ۳-ج). با بررسی اثر متقابل تیمارهای فاصله نمونه از سطح لامپ با مدت زمان تابش نیز مشاهده می شود که تأثیر متقابل تیمارهای مذکور در میزان حذف باسیلوس سرئوس در سطح ۱ درصد معنی دار است (شکل ۳-د). اثر متقابل تیمارهای فاصله نمونه از

منبع تابش با ضخامت نمونه در سطح ۵ درصد معنی دار نیست (شکل ۳-ه). اثر متقابل تیمارهای مدت زمان تابش با ضخامت نمونه نیز در سطح ۵ درصد معنی دار نیست (شکل ۳-و). بر اساس نتایج به دست آمده از جدول (۳)، معنی داری تأثیر کاهش طول موج انتخابی تابش مادون قرمز در محدوده انتخابی، افزایش مدت زمان تابش، و کاهش فاصله نمونه از منبع تابش بر میزان حذف باسیلوس سرئوس در سطح $P < 0.01$ تأیید شده است. مدل چند متغیره درجه دوم رابطه (۴) برای پیش بینی اثر متغیرهای مستقل طول موج انتخابی تابش مادون قرمز (X_1)، فاصله نمونه از منبع تابش (X_2)، مدت زمان تابش (X_3)، ضخامت نمونه (X_4)، و اثر متقابل طول موج انتخابی تابش مادون قرمز با فاصله نمونه از منبع تابش (X_1X_2)، مدت زمان تابش (X_1X_3)، ضخامت نمونه (X_1X_4)، اثر متقابل فاصله نمونه از منبع تابش با مدت زمان تابش (X_2X_3)، ضخامت نمونه (X_2X_4)، اثر مدت زمان تابش با ضخامت نمونه (X_3X_4)، و همچنین اثر درجه دوم طول موج انتخابی تابش مادون قرمز (X_1^2)، فاصله نمونه از منبع تابش (X_2^2)، مدت زمان تابش (X_3^2)، و ضخامت نمونه (X_4^2) بر میزان حذف باسیلوس سرئوس با ضریب همبستگی $R^2 = 0.98$ و ضریب تغییرات $CV = 1/70$ به دست آمد که با ارزیابی ضعف برازش، تناسب مدل مذکور نیز تأیید می شود.

$$202.185 + \text{لگاریتم کاهش باسیلوس سرئوس} \\ + 71.178 X_1 - 2.491 X_2 + 0.335 X_3 + 0.068 X_4 + \\ + 0.296 X_1X_2 - 0.021 X_1X_3 - 0.006 X_1X_4 - 0.011 X_2X_3 - 0.002 X_2X_4 - 0.0005 X_3X_4 - 6.201 X_1^2 \\ + 0.059 X_2^2 - 0.001 X_3^2 - 0.006 X_4^2 \quad (4)$$

تأثیر متغیرهای مستقل بر مقدار انرژی مصرفی

جدول (۴) نشان می دهد که با کاهش طول موج و با افزایش مدت زمان، میزان انرژی مصرفی افزایش می یابد. کمترین میزان مصرف انرژی در طول موج ۶/۲۶ میکرومتر (معادل با ۱۵۹۷/۴۴ سانتی متر^{-۱}) و مدت زمان فرآیند ۱۵

مادون قرمز به میزان قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها کمتر است. نتایج مشابهی در میزان انرژی مصرفی کل فرآیند مادون قرمز گزارش شده است (Puente-Díaz *et al.*, 2013; Orikasa *et al.*, 2018).

دقیقه و بیشترین انرژی مصرفی در طول موج ۵/۷۶ میکرومتر (معادل با ۱۷۳۶/۱۱ سانتی‌متر^{-۱}) و مدت زمان فرآیند ۳۰ دقیقه دیده می‌شود. طبق نتایج به دست آمده، میزان انرژی مصرفی کل در فرآیند آلودگی زدایی با تابش

جدول ۴- انرژی مصرفی در طول موج‌های مختلف

طول موج (میکرومتر)	مدت زمان (ساعت)	انرژی مصرفی (کیلووات بر ساعت)
	۰/۲۵	۰/۰۱۷
۶/۲۶	۰/۳۷۵	۰/۰۲۵
	۰/۵	۰/۰۳۴
	۰/۲۵	۰/۰۲۲
۶/۰۱	۰/۳۷۵	۰/۰۳۴
	۰/۵	۰/۰۴۵
	۰/۲۵	۰/۰۲۸
۵/۷۶	۰/۳۷۵	۰/۰۴۲
	۰/۵	۰/۰۵۵

نتیجه‌گیری

پاستوریزاسیون تشعشعی است. حضور باسیلوس سرئوس در محیط کشت مایع، ایده آل ترین حالت ممکن برای رشد این میکروارگانیسم است و از این رو باسیلوس سرئوس در شرایط بهینه رشد خود قرار دارد که این امر موجب می‌شود این میکروارگانیسم در مقاوم‌ترین حالت قرار داشته باشد. در نتیجه، با توجه به اینکه باسیلوس سرئوس در محیط کشت مایع در شرایط بهینه رشد خود قرار دارد، در ماده غذایی به دلیل کمتر بودن شرایط مساعد رشد (فعالیت آبی و مواد مغذی کمتر) نسبت به محیط کشت می‌توان داده‌های به دست آمده از پژوهش حاضر را به مواد غذایی مایع تعمیم داد. بر این اساس، در تیمارهای مورد مطالعه در این پژوهش و میزان انرژی مصرفی کم فرآیند پرتودهی با تابش مادون قرمز، می‌توان برای حذف باسیلوس سرئوس در مواد غذایی به صورت فرآوری صنعتی نیز استفاده کرد.

باسیلوس سرئوس میکروارگانیسمی بسیار مقاوم و اسپورزا است و در آلودگی مواد غذایی با اهمیت است، از این رو فرآیندهایی به منظور حذف باکتری مذکور در نظر گرفته شده است. تابش مادون قرمز فرآیندی مناسب از نظر حفظ کیفیت مواد غذایی پیشنهاد شده و به همین منظور برای حذف باسیلوس سرئوس در پژوهش حاضر انتخاب گردیده است. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، میزان حذف باسیلوس سرئوس تحت تأثیر متغیرهای فرآوری نظیر طول موج انتخابی تابش مادون قرمز، فاصله از منبع تابش، مدت زمان تابش، و ضخامت نمونه قرار می‌گیرد که راهکار مناسب ارزیابی اثر متقابل این متغیرها استفاده از روش‌هایی همچون سطح پاسخ است. علاوه بر این، میزان حذف باسیلوس سرئوس با فرآیند در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر در سطح قابل قبولی (در سطح رادوریزاسیون یا

قدردانی

هزینه و امکانات مورد استفاده در این طرح از محل اعتبارات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تأمین شده است. نگارندگان بدین وسیله مراتب قدردانی خود را ابراز می‌دارند.

مراجع

- Dostert, K. H., O'Brien, C. P., Liu, W., Riedel, W., Savara, A., Tkatchenko, A., Schauer mann, S., and Freund, H. J. 2016. Adsorption of isophorone and trimethyl-cyclohexanone on Pd(111): A combination of infrared reflection absorption spectroscopy and density functional theory studies. *Surface Science*. 650, 149-160.
- 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, 1071.
- Eliasson, L., Libander, P., Lövenklev, M., Isaksson, S., and Ahrné, L. 2014. Infrared Decontamination of Oregano: Effects on *Bacillus cereus* Spores, Water Activity, Color, and Volatile Compounds. *Journal of Food Science*. 79(12): E2447-E2455.
- Erdogdu, B.S. and Ekiz, H. I. 2011. Effect of ultraviolet and far infrared radiation on microbial decontamination and quality of Cumin seeds. *Journal of Food Science*. 76(5): M284-M292.
- Erdogdu, B.S. and Ekiz, H. I. 2013. Far infrared and ultraviolet radiation as a combined method for surface pasteurization of black pepper seeds. *Journal of Food Engineering*. 116(2): 310-314.
- European Food Safety Authority. 2005. Opinion of the scientific panel on biological hazards on *Bacillus cereus* and other *Bacillus spp* in foodstuffs. *EFSA Journal*. 3(4):175.
- Gao, Y.L., Ju, X.R. and Jiang, H.H. 2006. Use of response surface methodology to investigate the effect of food constituents on *Staphylococcus aureus* inactivation by high pressure and mild heat. *Process Biochemistry*. 41(2):362-9.
- Gharibzahedi, S.M.T., Razavi, SH. and Mousavi, SM. 2012. Developing an emulsion model system containing canthaxanthin biosynthesized by *Dietzia natronolimnaea* HS-1. *International Journal of Biological Macromolecules*. 51(4):618-26.
- GM, A. and DM, B. 2003. Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 93(4):1703-29.
- Griffiths. M.W. and Schraft, H. 2017. Chapter 20 - *Bacillus cereus* Food Poisoning. *Foodborne Diseases* (Third edition): Academic Press. 395-405.
- Hamanaka, D., Dokan, S., Yasunaga, E., Kuroki, S., Uchino, T. and Akimoto, K. 2000. The sterilization effects of infrared ray on the agricultural products spoilage microorganisms. *St Joseph: American Society of Agricultural Engineers*. 1-9.
- Hamanaka, D., Uchino, T., Furuse, N., Han, W., and Tanaka, S. I. 2006. Effect of the wavelength of infrared heaters on the inactivation of bacterial spores at various water activities. *International Journal of Food Microbiology*. 108(2): 281-285.
- Hashimoto, A., Sawai, J., Igarashi, H. and Shimizu, M. 1992. Effect of Far-Infrared Irradiation on Pasteurization of Bacteria Suspended in Liquid Medium Below Lethal Temperature. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 25(3):275-81.
- Helm, D., Labischinski, H., and Naumann, D. 1991. Elaboration of a procedure for identification of bacteria using Fourier-Transform IR spectral libraries: a stepwise correlation approach. *Journal of Microbiological Methods*. 14(2): 127-142.

- Jaouachi, B., Hassen, M.B. and Sakli, F. 2007. Strength of wet spliced denim yarns after sizing using a central composite design. *AUTEX Research Journal*. 7(3):159-65.
- Jun, S., and Irudayaraj, J. 2003. A Dynamic fungal inactivation approach using selective infrared heating. *Transactions of the ASAE*. 46(5):1407.
- Kim, S.A. and Rhee, M.S. 2015. Predictive model and optimization of a combined treatment of caprylic acid and citric acid for the reduction of *Escherichia coli* O157:H7 using the response surface methodology. *International Journal of Food Microbiology*. 197,9-14.
- Koyuncu, T., Pinar, Y. and Lule, F. 2007. Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna Jacq.*) and yellow (*Crataegus aronia Bosc.*) fruits. *Journal of Food Engineering*. 78(4): 1471-1475.
- Krishnamurthy, K. 2006. Decontamination of milk and water by pulsed UV-light and infrared heating.
- Lee, H., Song, M. and Hwang, S. 2003. Optimizing bioconversion of deproteinated cheese whey to mycelia of *Ganoderma lucidum*. *Process Biochemistry*. 38(12):1685-93.
- Li, C., Bai, J., Cai, Z. and Ouyang, F. 2002. Optimization of a cultural medium for bacteriocin production by *Lactococcus lactis* using response surface methodology. *Journal of Biotechnology*. 93(1):27-34.
- Modest, M. F. 2013. Radiative Heat Transfer. New York: McGraw-Hill International Editions.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M. 2016. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments: John Wiley & Sons.
- Orikasa, T., Ono, N., Watanabe, T., Ando, Y., Shiina, T. and Koide, S. 2018. Impact of blanching pretreatment on the drying rate and energy consumption during far-infrared drying of Paprika (*Capsicum annum L.*). *Food Quality and Safety*. 2(2):97-103.
- Puente-Diaz, L., Ah-hen, K., Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R. and Scala, K. D. 2013. Combined Infrared-Convective Drying of Murta (*Ugni molinae Turcz*) Berries: Kinetic Modeling and Quality Assessment. *Drying Technology*. 31(3): 329-338.
- Rosenthal, I. 2012. Electromagnetic radiations in food science: Springer Science & Business Media.
- Sakai, N., Hanzawa, T. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Science & Technology*. 5(11):357-62.
- Sawai, J., Fujisawa, M., Kokugan, T., Shimizu, M., Igarashi, H., Hashimoto, A., et al. 1997. Pasteurization of Bacterial Spores in Liquid Medium by Far-Infrared Irradiation. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 30(1):170-2.
- Sawai, J., Sagara, K., Igarashi, H., Hashimoto, A., Kokugan, T. and Shimizu, M. 1995. Injury of *Escherichia coli* in physiological phosphate-buffered saline induced by far-infrared irradiation. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 28(3):294-9.
- Schoeni, J.L., Wong, A.C.L. 2005. *Bacillus cereus* Food Poisoning and Its Toxins. *Journal of Food Protection*. 68(3):636-48.
- Staack, N., Ahrné, L., Borch, E., and Knorr, D. 2008a. Effect of infrared heating on quality and microbial decontamination in paprika powder. *Journal of Food Engineering*. 86(1):17-24.
- Staack, N., Ahrné, L., Borch, E., and Knorr, D. 2008b. 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.
- Trivittayasil, V., Tanaka, F., Hamanaka, D. and Uchino, T. 2013. Inactivation Model of Mold Spores by Infrared Heating under Non-Isothermal Conditions. *Food Science and Technology Research*. 19(6):979-82.



Evaluation of Selective Infrared Radiation on Inactivation of *Bacillus Cereus* by Response Surface Methodology

M. Shavandi*, M. Kashani nejad, A. Sadeghi, S. M. Jafari and M. Hasani

*Corresponding author: Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Email: shavandimahdi097@gmail.com

Received:10 May 2018, Accepted: 5 August 2018

The antimicrobial effects of infrared radiation as a novel food processing method have been approved. In present study, after determination of the maximum absorbents for *Bacillus cereus* (as a foodborne indicator) by FTIR, the effects of selective infrared wavelength (5.76, 6.01 and 6.26 μm), distance from radiation source (3, 5 and 7 cm), radiation time (15, 22.5 and 30 min) and sample thickness (2, 4 and 6 mm) on survival of *B. cereus* in broth medium were evaluated by response surface methodology. Based on the results, the significant effect ($p < 0.01$) of all variables (except thickness) on reduction of *B. cereus* was clarified. Interaction of infrared wavelength with distance from radiation source and interaction of distance from radiation source with radiation time were also significant ($p < 0.01$). Furthermore, the maximum reduction of *B. cereus* (equal to 4.34 log CFU/ml) was observed in treatment containing 5.76 μm infrared wavelength, 3 cm distance from radiation source, 30 min radiation time and 2 mm sample thickness. The results of present study can be used for optimization of industrial process for elimination of *B. cereus* by infrared radiation.

Keywords: Foodborne indicator, Microbial inactivation, Selective infrared wavelength