

## بررسی تأثیر پیش تیمار پلاسمای سرد بر سینتیک خشک کردن برگ بو

اسماعیل مریدار<sup>۱</sup>، محمد رضا بیاتی<sup>۲</sup>، جلال برادران مطیع<sup>۳\*</sup> و مهدی خجسته‌پور<sup>۴</sup>

### چکیده

پلاسمای سرد محیطی مملو از یون‌های فعال و گونه‌های پراثری است که با برخورد به سطح، موجب ایجاد روزنه‌های ریزی در آن شده و می‌تواند در فرایند خروج رطوبت و خشک کردن مواد حساس مفید باشد. برگ بو با نام علمی *nobilis Laurus* گیاهی همیشه سبز است که دارای خواص دارویی متنوعی بوده و در صنعت غذایی نیز استفاده می‌شود. در این مقاله اثر استفاده از پیش تیمار پلاسمای سرد DBD بر سینتیک خشک شدن برگ بو در خشک‌کن کابینتی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات به روش سطح پاسخ بر پایه طرح باکس بنکن با متغیرهای مستقل دما (۳۰، ۴۰، ۵۰ درجه سلسیوس)، سرعت باد (۱، ۲، ۳ متر بر ثانیه)، زمان پلاسمادهی (صفر، ۱۰، ۲۰ ثانیه) و شدت پلاسمادهی (۲۳، ۲۹ و ۳۵ کیلوولت) انجام شد. متغیرهای وابسته شامل زمان خشک شدن، حداقل رطوبت قابل دست‌یافت و تغییرات رنگ بود. نتایج، اثر معنی‌دار دما، سرعت باد و زمان پلاسمادهی را بر زمان خشک شدن نشان داد. افزایش دما موجب کاهش زمان خشک شدن و همچنین کاهش حداقل رطوبت قابل دستیابی شد. شدت پلاسمادهی اثر معنی‌داری بر حداقل رطوبت قابل دست‌یافت و زمان خشک شدن نداشت. نتایج، اثر معنی‌دار زمان پلاسمادهی را بیان کرد به طوری که ۲۰ ثانیه پلاسمادهی موجب کاهش ۲۰ درصد در زمان خشک شدن نسبت به تیمار بدون پلاسمادهی گردید. لذا دمای ۵۰°C، زمان پلاسمادهی ۲۰s، شدت پلاسمادهی ۲۳ کیلوولت و سرعت باد ۱m/s تنظیمات بهینه خشک‌کن بود. این امر می‌تواند موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در توان مصرفی دستگاه خشک‌کن شود. دو متغیر دما و شدت پلاسمادهی بر تغییرات روشنی و تیرگی برگ‌ها پس از خشک شدن اثر معنی‌داری داشتند، به طوری که استفاده از پیش تیمار پلاسمادهی موجب کاهش تغییر رنگ نمونه‌ها شد.

**واژه‌های کلیدی:** برگ بو، پلاسمای سرد، خشک‌کن کابینتی، سطح پاسخ، سینتیک خشک شدن.

ارجاع: مریدار ا. بیاتی م. ر. برادران مطیع ج. و خجسته‌پور م. ۱۴۰۲. بررسی تأثیر پیش تیمار پلاسمای سرد بر سینتیک خشک کردن برگ بو. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۹: ۴۴-۴۴. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14334.661>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.  
۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.  
۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.  
۴- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\* نویسنده مسئول: [j.baradaran@um.ac.ir](mailto:j.baradaran@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸

داده‌اند (Liao et al., 2017; Schlüter et al., 2013).

به منظور خشک کردن، با دمیدن هوای گرم بر روی سطح یک ماده مرطوب، حرارت به سطح ماده منتقل شده و رطوبت آن پس از دریافت گرمای نهان تبخیر و به صورت بخار در می‌آید. بخار آب از میان لایه مرزی به خارج منتقل شده و توسط هوای متحرک دور می‌شود. این پدیده سبب ایجاد ناحیه‌ای از بخار آب با فشار کم در سطح ماده می‌شود و در نتیجه یک گرادیان منفی فشار بخار از داخل ماده مرطوب تا هوای خشک به وجود می‌آید. این گرادیان، نیروی محرک لازم را جهت دفع آب از ماده تأمین می‌کند (Saifullah et al., 2019).

هرچه اختلاف درجه حرارت بین محیط گرم‌کننده و ماده غذایی بیشتر باشد، شدت انتقال گرما به داخل ماده غذایی زیادتر شده و تبخیر رطوبت به خارج از آن افزایش می‌یابد. هنگامی که آب از ماده غذایی به شکل بخار به محیط اطراف انتقال یابد باید ترتیبی اتخاذ گردد که بخار آب به خارج محیط خشک‌کننده رانده شود؛ در غیر این صورت، هوای اطراف سطح ماده غذایی به حالت اشباع در آمده و سرعت خشک شدن کند می‌شود. در فرایند خشک کردن گیاهان دارویی باید توجه داشت که افزایش بیش از حد دما می‌تواند موجب از بین رفتن ترکیبات مفید در آنها شود و در نتیجه کیفیت محصول افت کند (Ghafari, 2022). علاوه بر این، جریان هوا نیز در انتقال رطوبت نقش مهمی را به عهده دارد. جریان هوا، رطوبت را از محیط اطراف ماده غذایی دور و به خارج دستگاه منتقل کرده و از به وجود آمدن هوای اشباع جلوگیری می‌کند (Velić et al., 2004).

برگ بو با نام علمی *nobilis Laurus* و نام‌های عمومی انگلیسی bay sweet و tree Bay یا laurel گیاهی از تیره Lauraceae است (شکل ۱) (Zargari, 1996). برای خشک کردن لازم است برگ‌ها روی هم انباشته نشود و در لایه های نازک و در سایه پهن و خشک شوند. خشک کردن در آفتاب موجب می‌شود که رنگ سبز آن قهوه‌ای شود و مقدار زیادی روغن معطر و اسانس آن از بین برود (Zargari, 1996).

برگ‌های این گیاه اغلب به صورت خشک شده در بازار به فروش می‌رسد. عمده‌ترین روش خشک کردن برگ‌ها به روش سنتی و در زیر نور آفتاب است که منجر به کاهش

پیش تیمار کردن محصولات به منظور بهبود محصول نهایی یکی از مراحل مهم فرآیند خشک کردن است. پیش تیمار کردن باعث بهبود کیفیت و کاهش تغییرات نامطلوب در رنگ و بافت محصولات خشک شده می‌گردد. انواع پیش تیمار استفاده شده برای محصولات کشاورزی در صنایع غذایی شامل پیش تیمارهای شیمیایی، بلیچینگ<sup>۱</sup>، فراصوتی، میدان الکتریکی پالسی، مادون قرمز، پلاسما سرد، فشار بالای هیدرواستاتیک، اهمی، امواج مایکرو و ترکیبی از آنها است (Llavata et al., 2020).

واژه پلاسما به حالت چهارم ماده اطلاق می‌شود که یک گاز با دریافت انرژی مضاعف، به حالت جدیدی وارد می‌شود که در آن اتم‌ها، ذرات باردار، الکترون‌ها و یون‌های مثبت آزادانه در آن حرکت می‌کنند. پلاسما شامل ذرات باردار، گونه‌های واکنش‌گر (برای مثال گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن و گونه‌های واکنش‌گر نیتروژن)، مولکول‌های برانگیخته و پرتو ماورا بنفش است که منجر به غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و یا موجب ایجاد میکروروزنه‌هایی بر روی سطح نمونه می‌شود (Liao et al., 2017). این میکروروزنه‌ها می‌توانند مسیرهای خروج رطوبت در حین خشک شدن را تسهیل کرده و سرعت خشک شدن را افزایش دهند. از انواع پلاسما غیر حرارتی می‌توان به پلاسما تخلیه سد دی - الکتریک اشاره کرد (Schlüter, et al., 2013). در صورت ایجاد تعداد کافی از میکرو-روزنه‌ها در سطح نمونه فرایند خشک کردن می‌تواند در دمای پایین، زمان کوتاه‌تر، حفظ رنگ و مواد مؤثره مفید نسبت به سایر روش‌ها اشاره نمود (Min et al., 2017). یکی از پیش تیمارهای فیزیکی که استفاده از آن امروزه در صنعت صنایع غذایی رو به گسترش است، پیش تیمار پلاسما سرد است. پلاسما سرد سد دی - الکتریک (DBD<sup>۲</sup>) با ایجاد محیطی مملو از یون‌های فعال و پراثری ضمن ایجاد ریزروزنه در سطح محصول، شرایط را محیا می‌کند که رطوبت با سرعت بیشتری از سطح خارج شود (Rezaei et al., 2021). تحقیقات مختلفی اثر بخشی استفاده از پیش تیمار پلاسما سرد را در بهبود فرایند خشک کردن شامل کاهش زمان خشک شدن، بهبود شکل و تغییرات رنگ محصولات را نشان

1- Bleaching

2- Dielectric barrier plasma

دارویی به‌لیمو دارند (Moradi et al., 2019). بررسی اثر دمای هوا بر سینتیک خشک شدن برگ مریم گلی در دماهای ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درجه سلسیوس نشان داد زمان خشک شدن به طور قابل توجهی تحت تأثیر دما قرار دارد. همچنین دمای خشک شدن به طور قابل توجهی بر محتوای فنلی کل (TPC) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (AA) تأثیرگذار بود (Doymaz & Karasu, 2018).

در تحقیقی برخی عوامل جهت بهینه‌سازی خشک کردن برگ بو استفاده شد. این مطالعه بر مقادیر مختلف برای عوامل دما، رطوبت نسبی و سرعت هوای خشک شدن متمرکز شد. شرایط بهینه برای دما، رطوبت نسبی و سرعت به ترتیب ۵۹/۸۷ درجه سلسیوس، ۱۵ درصد و ۱/۵ متر بر ثانیه به دست آمد. (Soltani et al., 2021). از تفاوت‌های تحقیق حاضر با این مقاله بررسی نقش پیش تیمار پلاسمای سرد و همچنین بررسی سینتیک خشک کردن است.

در تحقیقی از پلاسمای سرد سد دی - الکترونیک (DBD) برای تیمار سطحی دانه‌های رازیانه (*Foeniculum vulgare Mill*) و برگ‌های نعناع (*Mentha spicata L*) استفاده شده است. آزمایش‌ها با دو متغیر مستقل طراحی شدند: زمان‌های پلاسمای دهی (۵-۱۵ دقیقه) و مقدار ولتاژ (۱۷ الی ۲۳ کیلوولت). عملکرد اسانس‌گیری با اعمال پیش تیمار پلاسمای افزایش یافت (Rezaei et al., 2021).

در پژوهشی اثر فرکانس‌های مختلف تحریک پلاسمای سرد (۲۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ هرتز) به عنوان پیش تیمار برای خشک کردن توکوما (*tucumã*) بررسی شد. تنوع رنگ حاشیه‌ای و کاهش زمان خشک شدن در نمونه‌های تیمار شده با فرکانس‌های ۲۰۰ و ۸۰۰ هرتز مشاهده شد (Loureiro et al., 2021).

نتایج بررسی تأثیر سرعت جریان هوا و شدت تابش مادون قرمز بر زمان خشک کردن، درصد و اجزای اسانس گیاه دارویی به لیمو (*Lippia citriodora Kunth*)، نشان داد با کاهش سرعت هوا و افزایش میزان شدت تابش مادون قرمز، زمان خشک شدن نمونه‌ها کاهش یافت به طوری که کم‌ترین مدت زمان خشک کردن (۳۵ دقیقه) مربوط به تیمار سرعت جریان هوای ۰/۵ (m/s) و شدت تابش ۰/۵ (W/cm<sup>2</sup>) بود (Ebadi et al., 2016).

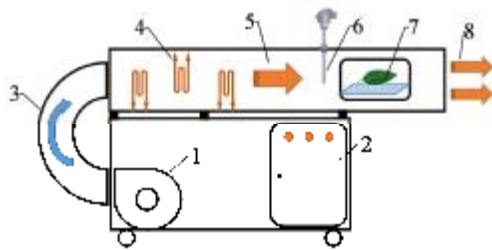
مواد مؤثر، کاهش کیفیت ظاهری و رنگ برگ‌ها و آلوده شدن آن‌ها با گرد و خاک می‌شود (Naderi Hajibagher, 2011). یکی از انواع خشک‌کن‌های صنعتی، خشک‌کن کابینتی هوای داغ است. سینی‌های حاوی محصول در داخل یک کابینت یا محیط مشابه و در معرض هوای گرم قرار داده می‌شوند تا فرآیند خشک شدن انجام شود. حرکت هوا بر سطح محصول با سرعت نسبتاً ملایمی صورت می‌گیرد، تا اطمینان حاصل شود که انتقال جرم و حرارت با بازده بالایی انجام می‌شود (Mortazavi et al., 2012). خشک کردن در شرایط نامناسب از نظر دما، زمان نگهداری و درصد رطوبت نهایی می‌تواند کیفیت ظاهری و اسانس و مواد مؤثر گیاه دارویی را تحت تأثیر قرار دهد. لذا دستیابی به شرایط بهینه خشک کردن گیاه برگ بو، یکی از اهداف این طرح است.



شکل ۱- نمونه تازه و خشک شده برگ بو به روش سنتی در سایه (تغییرات رنگ و چروکیدگی مشاهده می‌شود).

تحقیقات گسترده‌ای در خصوص بررسی شرایط خشک کردن و سینتیک خشک شدن محصولات کشاورزی و غذایی انجام شده است که در ادامه تعدادی از آنها که با هدف این تحقیق بیشترین ارتباط را دارند بیان می‌شود.

در تحقیقی، از یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی برای خشک کردن لایه نازک برگ‌های به‌لیمو استفاده شد. صفات مستقل عبارت بودند از: سرعت هوا (۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه)، دمای هوا (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس) و قطر سوراخ‌های سینی محصول (۳، ۶ و ۱۰ میلی‌متر). کمیت اندازه‌گیری شده در این تحقیق زمان خشک شدن برگ‌های به لیمو به منظور رسیدن رطوبت از ۲۴۰٪ (بر مبنای خشک) به رطوبت ۱۰٪ (بر مبنای خشک) بود. نتایج نشان داد که سرعت و دمای هوا و اندازه‌مش سینی محصول اثر معنی‌داری بر زمان خشک شدن برگ گیاه



شکل ۲- نمای خشک‌کن کابینتی مورد استفاده. ۱- دمنده ۲- تابلو برق فرمان ۳- مجرای هوای سرد ۴- المنت‌های گرم کن ۵- جریان هوای گرم ۶- حسگر دما سنج ۷- محفظه نمونه ۸- خروجی هوا

دمنده دستگاه یک دمنده برقی سه حالتی دارای توان ۰/۷۵ کیلووات و دبی حجمی ۲۰۰۰ مترمکعب بر ساعت و ساخت شرکت موتوژن تبریز است. با توجه به سه حالتی بودن موتور دمنده، قابلیت تنظیم دور آن توسط یک اینورتر تک حالت به سه حالت به وجود می‌آید. برای پایش میزان دور دمنده از اینورتر مدل Hyundai N50 با توان ۱/۵ کیلووات استفاده گردید. از بادسج توربینی ساخت شرکت PROVA مدل AVM07 (تایوان) با دقت ۰/۰۱ متر بر ثانیه برای تنظیم و به دست آوردن رابطه بین فرکانس اینورتر و سرعت هوای ورودی به کابین خشک‌کن استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات فنی دستگاه خشک‌کن مورد استفاده

تجهیز	نوع	محدوده کاری	سازنده
موتور فن	0.75kW	۵۰ تا ۱۵۰۰rpm	موتوژن
کنتور برق	PR220	۱۸۰ تا ۲۴۰۷	پاد رعد
ترموستات	TRB125	۵- تا ۱۲۵°C	شیوا امواج
اینورتر	N50	۰ تا ۶۰ Hz	Hyundai
گرم‌کن	میله‌ای	۴۰۰۰ W	تکنودیزاین

جدول ۲- مشخصات ابعادی خشک‌کن مورد استفاده

ابعاد دستگاه	طول (cm)	عرض (cm)	ارتفاع (cm)
ابعاد دستگاه	۲۴۰	۸۵	۲۰۰
محفظه نمونه	۵۵	۴۵	۳۰

در این خشک‌کن از ۳ المنت حرارتی با توان ۴۰۰۰ وات استفاده شد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری جریان مصرفی و توان دستگاه خشک‌کن علاوه بر کنتور برق اختصاصی دستگاه، از جریان سنج کلمپی (مدل DT3266L، چین) استفاده شد. پس از خشک شدن برگ‌ها در خشک‌کن کابینتی و انجام فرایند تصویربرداری،

در پژوهش دیگری، برگ‌های بو با استفاده از خشک‌کن همرفتی در مقیاس پایلوت-کابینتی، خشک شدند. آزمایشات خشک کردن با استفاده از سرعت هوای ثابت ۲ متر بر ثانیه و دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام شد. سرعت خشک شدن با افزایش دمای هوا افزایش می‌یافت و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش یافت (Doymaz, 2014). با توجه به بررسی‌های انجام شده در منابع و مقالات، تحقیقی در خصوص بررسی سینتیک خشک کردن برگ‌های گیاه برگ بو و تأثیر شرایط بهینه دما، زمان و اثر شدت پیش تیمار پلاسمای سرد، یافت نشد. لذا این پژوهش با فرض اثر پیش تیمار پلاسمای سرد سد دی - الکترونیک بر افزایش سرعت خشک کردن برگ‌ها و در پی آن، کاهش دما و زمان خشک شدن با هدف بررسی سینتیک خشک شدن و اثر زمان پلاسمای دهی، توان پلاسمادهی، دمای خشک‌کن و سرعت جریان هوا بر روی کیفیت محصول خشک شده (تغییرات رنگ، رطوبت نهایی و زمان خشک شدن) انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### تهیه نمونه

به منظور تهیه نمونه‌های تازه برگ و در دسترس بودن نمونه‌ها، تعدادی درختچه برگ بو از نهالستان‌های اطراف مشهد تهیه و در گلخانه تحقیقاتی نگهداری شد. یک روز قبل از هر نمونه برداری، آبیاری انجام شد، سپس برگ‌های سالم از درخت جدا گردیده و دم‌برگ آنها جدا شد. نمونه‌های تهیه شده در داخل محفظه‌های زیپ‌دار بدون هوا قرار داده و سپس نمونه‌ها در یخچال آزمایشگاه در دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری گردیدند (Aghkhani *et al.*, 2012).

### خشک‌کن

برای انجام آزمایش از یک دستگاه خشک‌کن کابینتی (جدول ۱ و ۲)، استفاده گردید. خشک‌کن شامل یک دمنده سانتریفوژ سه حالتی، مجرای عبور جریان هوا، المنت‌های حرارتی و سینی محصول است. تابلو برق پایش و دمنده دستگاه در طبقه پایین و مجرای عبور هوا که شامل المنت‌های حرارتی الکتریکی، بدنه عایق و محفظه قرارگیری نمونه بود در طبقه بالایی دستگاه قرار گرفته است (شکل ۲).

نمونه‌های برگ در طول خشک شدن نیز به منظور بررسی رفتار سینتیک خشک شدن بررسی شد. داده‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار Design Expert 7 تحلیل شد. نمودارهای سینتیک توسط نرم‌افزار Excel تهیه گردید.



شکل ۳- دستگاه پلاسمای سرد

جدول ۳- متغیرهای مستقل آزمایش و محدوده مقادیر آنها

عامل	حداقل	حداکثر	میان
دما (°C)	۳۰	۵۰	۴۰
سرعت باد (m/s)	۱	۳	۲
زمان پلاسمادهی (s)	۰	۲۰	۱۰
ولتاژ پلاسمادهی (kV)	۲۳	۳۵	۲۹

### سطوح دما و سرعت باد

دمای ۳۰ درجه به عنوان سطحی معادل با شرایط دمایی خشک کردن برگ‌ها در سایه در یک روز تابستانی شبیه‌سازی شد. دمای ۵۰ درجه سلسیوس به عنوان یک مقدار بیشینه در جهت حفظ خواص دارویی برگ‌ها انتخاب شد. سرعت جریان هوا با توجه به معادل سازی با شرایط جریان هوای طبیعی در روش خشک کردن سنتی و حداکثر جریان باد تولیدی توسط خشک‌کن انتخاب شد. سطوح ولتاژ پلاسمادهی، با توجه به توانایی دستگاه پلاسمای سرد در اختیار انتخاب گردید.

### سطوح زمان و ولتاژ پلاسمادهی

از آنجا که هدف، مقایسه شرایط اعمال پیش تیمار پلاسمای با وضعیت شاهد بود، سطح زمانی صفر ثانیه (بدون پلاسمادهی) انتخاب شد. همچنین به دلیل نازک بودن برگ‌ها حداکثر زمان اعمال پلاسمای بر اساس پیش تست های انجام شده، ۲۰ ثانیه انتخاب شد تا فرایند پلاسمادهی موجب سوزاندن برگ‌ها نشود (Li et al., 2019).

به منظور به دست آوردن رطوبت نهایی نمونه‌های برگ بو و همچنین خشک کردن نهایی نمونه‌ها از اجاق الکتریکی بهداشت (ساخت ایران) استفاده شد.

### پیش تیمار پلاسمای

به منظور اعمال پیش تیمار پلاسمای سرد، نمونه‌های برگ بو در دستگاه پلاسمای سرد (مدل A18 شرکت کاوش یاران فن پویا، ساخت ایران) در معرض پلاسمای قرار گرفتند (شکل ۳). پلاسمای سرد به روش تخلیه سد دی - الکتریک با ایجاد اختلاف پتانسیل و جریان گاز هوا ایجاد شد. به دلیل دسترسی مستمر به هوا و همچنین با هدف عدم افزایش هزینه فرایند خشک کردن از گاز هوا استفاده شد. متغیرهای فرایند در این پژوهش شامل ۳ سطح ولتاژ ورودی ۲۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ ولت و مدت زمان پلاسمادهی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ثانیه بود. سطوح ولتاژ ورودی دستگاه معادل با ایجاد میدان الکتریکی به ترتیب برابر با ۲۳، ۲۹ و ۳۵ کیلوولت در محل الکترودها است.

### طرح و روش آزمایش

آزمایشات برپایه طرح باکس بنکن به روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> طراحی شد. طرح باکس-بنکن (Box-Behnken design)، با نام اختصاری BBD، از روش‌های طراحی سطح پاسخ است. یکی از مزایای استفاده از این روش و نرم‌افزار Design Expert علاوه بر کاهش تعداد آزمایش‌ها امکان ارائه یک رابطه ریاضی بین متغیر مستقل و متغیرهای وابسته است. به دلیل اینکه آزمایشات تحلیل سینتیک خشک کردن زمان بر است، کاهش تعداد آزمایشات در طرح باکس بنکن به ۲۷ مورد (در مقایسه با طرح فاکتوریل ۸۱ آزمایش) حائز اهمیت بود. در این پژوهش متغیرهای مستقل شامل زمان پلاسمادهی (در ۳ سطح به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ثانیه)، شدت پلاسمای (سه سطح ۲۳، ۲۹ و ۳۵ کیلوولت) معادل با ولتاژ ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ ولت ورودی تغذیه دستگاه، دمای خشک کردن (۳ سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس) و سرعت جریان هوا (۳ سطح ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه)، انتخاب شد (جدول ۳). متغیرهای وابسته شامل زمان خشک شدن تا رطوبت ۱۰ درصد (برپایه تر) (Doymaz, 2006)، درصد رطوبت نهایی و تغییرات رنگ بود. همچنین تغییرات روند کاهش رطوبت

رقمی با دقت ۰/۰۱ گرم (AND GF-6100، ساخت ژاپن) اندازه‌گیری شد. تیمارها درون خشک‌کن کابینتی قرار داده شد و به منظور تعیین روند تغییرات محتوای رطوبتی و به دست آوردن سینتیک خشک شدن نمونه‌های برگ بو در بازه‌های زمانی ۵، ۱۰، ۱۵ دقیقه و در ادامه هر ۲۰ دقیقه توزین شد تا زمانی که در سه اندازه‌گیری متوالی تغییر وزن مشاهده نگرددید ( $w_t$ )، وزن آنها ثبت شد. این در حالی بود که ترازو از طریق یک پایه رابط با توری مشبک نمونه‌ها درون خشک‌کن در ارتباط بود. پس از پایان مرحله خشک شدن در خشک‌کن کابینتی نمونه‌ها به اجاق الکتریکی منتقل گردید و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا وزن خشک ( $w_d$ ) آنها به منظور محاسبات درصد رطوبت تعیین شود (Doymaz, 2006; Ebadi *et al.*, 2016). درصد رطوبت نمونه‌ها برپایه خشک از معادله (۱) محاسبه شد.

$$M_{db}(\%) = \frac{w_t - w_d}{w_d} \times 100 \quad (1)$$

در این معادله  $w_t$  وزن تر،  $w_d$  وزن خشک و  $M_{db}$  درصد رطوبت برپایه خشک است. رطوبت اولیه نمونه‌های برگ بو ۹۵ تا ۱۰۲ درصد بر پایه خشک بود که در حین فرایند خشک شدن تا محدوده ۳ الی ۱۰ درصد (با توجه به نوع تیمار) کاهش پیدا کرد. با توجه به داده‌های زمانی از وزن نمونه‌ها، درصدهای رطوبت، محاسبه و نمودار روند تغییرات نسبت رطوبت رسم شد. به منظور یکنواخت سازی داده‌ها و مقایسه بهتر نتایج تیمارهای مختلف خشک کردن، سینتیک خشک کردن بر اساس شاخص نسبت رطوبت (MR) بیان شد. برای محاسبه نسبت رطوبت برگ‌های برگ بو در طی فرایند خشک کردن از معادله (۲) استفاده شد (Rouzegar *et al.*, 2022).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که در آن  $M_t$  مقدار رطوبت در زمان  $t$  بر پایه خشک،  $M_0$  مقدار رطوبت اولیه و  $M_e$  مقدار رطوبت حالت تعادل است. از آنجا که مقدار  $M_e$  در مقایسه با  $M_0$  و برای زمان خشک کردن بسیار کوچک است بنابراین نسبت رطوبت MR را می‌توان از معادله ساده شده (۳) نیز محاسبه کرد (Jahanbakhshi *et al.*, 2020).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

حدود ۳۰ دقیقه قبل از شروع فرآیند، دستگاه خشک‌کن روشن و دمای آن تنظیم شد. این کار به دلیل رسیدن دمای هوای داخل خشک‌کن به حالت پایدار انجام شد. نمونه‌ها بر روی توری مشبک فلزی با مش مربعی با ابعاد ۱۰ میلیمتر گذاشته شدند و سپس داخل دستگاه خشک‌کن قرار گرفتند. فرآیند خشک کردن تا زمان رسیدن وزن نمونه‌ها به پایین‌تر از ۱۰ درصد بر پایه وزن مرطوب و ثابت شدن تغییرات وزن ادامه داشت (Moradi *et al.*, 2019).

به منظور مشخص کردن تیمارها از روش کد گذاری ۴ عدد استفاده شد (جدول ۴). به ترتیب از سمت چپ اعداد ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مربوط به درجه حرارت خشک‌کن و بر حسب درجه سلسیوس، دسته دوم اعداد ۱، ۲ و ۳ سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، دسته سوم اعداد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بر حسب ثانیه و مدت زمان پیش‌تیمار پلاسما است و دسته چهارم اعداد ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ ولتاژ ورودی دستگاه پلاسما و بر حسب ولت است.

جدول ۴- شماره کد نمونه‌ها، اعداد از سمت راست به ترتیب ولتاژ تغذیه پلاسما (V) - زمان پلاسما (s) - سرعت باد (ms-1) و دما (C°) است.

شماره	کد تیمارها	شماره	کد تیمارها
۱	۲۵-۱۰-۱-۳۰	۱۵	۲۵-۱۰-۲-۴۰
۲	۲۵-۰۰-۲-۳۰	۱۶	۲۰-۲۰-۲-۴۰
۳	۲۰-۱۰-۲-۳۰	۱۷	۳۰-۲۰-۲-۴۰
۴	۳۰-۱۰-۲-۳۰	۱۸	۲۵-۰۰-۳-۴۰
۵	۲۵-۲۰-۲-۳۰	۱۹	۲۰-۱۰-۳-۴۰
۶	۲۵-۱۰-۳-۳۰	۲۰	۳۰-۱۰-۳-۴۰
۷	۲۵-۰۰-۱-۴۰	۲۱	۲۵-۲۰-۳-۴۰
۸	۲۰-۱۰-۱-۴۰	۲۲	۲۵-۱۰-۱-۵۰
۹	۳۰-۱۰-۱-۴۰	۲۳	۲۵-۰۰-۲-۵۰
۱۰	۲۵-۲۰-۱-۴۰	۲۴	۲۰-۱۰-۲-۵۰
۱۱	۲۰-۰۰-۲-۴۰	۲۵	۳۰-۱۰-۲-۵۰
۱۲	۳۰-۰۰-۲-۴۰	۲۶	۲۵-۲۰-۲-۵۰
۱۳	۲۵-۱۰-۲-۴۰	۲۷	۲۵-۱۰-۳-۵۰
۱۴	۲۵-۱۰-۲-۴۰		

برای هر تیمار تعداد ۲۵ عدد برگ تازه و سالم با شکل ظاهری یکسان انتخاب شد و پس از اعمال پیش تیمار پلاسما توزین گردید. وزن اولیه برگ‌ها به کمک ترازوی

## بررسی تغییرات رنگ

تغییرات رنگ محصول خشک‌شده نسبت به نمونه تازه به عنوان یکی از مشخصه‌های کیفی نیز بررسی شد. بررسی تغییرات رنگ به کمک پردازش تصویر و بررسی ویژگی‌های رنگی یکی از روش‌های سریع و ارزان و در عین حال دقیق است (Baradaran Motie *et al.*, 2023). بدین منظور از نمونه‌های برگ قبل و پس از خشک شدن، عکس‌برداری شد و عوامل مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار Matlab 2017 و در فضای رنگی Lab مقادیر  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  آنها استخراج گردید. عامل  $a^*$  شاخصی از قرمزی محصول است. پارامتر  $b^*$  شاخصی از میزان زردی نمونه است و مقادیر  $L^*$  بیانگر تیرگی یا روشنی محصول است. به منظور تهیه تصاویر مشخص از نمونه‌های یکسان در هر تیمار ۵ عدد برگ انتخاب شده و در قسمت دمبرگ علامت‌گذاری و شماره‌گذاری شدند. تهیه تصاویر از نمونه‌های تازه قبل از اعمال پیش تیمار پلازما انجام شد. عکس‌برداری درون اتاقک مخصوص و با کمک دوربین دیجیتال (سونی مدل DSC-W35-ژاپن) تحت اعمال نور مصنوعی انجام شد. اینکار به یکسان بودن شرایط در تمام تصاویر کمک می‌کند و امکان مقایسه تغییرات رنگ را فراهم می‌آورد.



شکل ۴- نمونه ای تصویر برگ‌ها پس از خشک شدن

تمامی داده‌ها به صورت خروجی Excel تهیه گردید. در ادامه مقدار کلی تغییرات رنگ به وسیله معادله زیر محاسبه گردید.

$$\Delta E = \sqrt{((L_0 - L_e)^2 + (a_0 - a_e)^2 + (b_0 - b_e)^2)} \quad (3)$$

$\Delta E$  تغییرات کلی رنگ نمونه خشک شده را نسبت به نمونه تازه بیان می‌کند. مقادیر  $(L_e, a_e, b_e)$  مربوط به مقادیر شاخصه‌های رنگی نمونه‌های خشک‌شده در دماهای مختلف است، درحالی‌که مقادیر  $(L_0, a_0, b_0)$  مربوط به مشخصه‌های رنگی نمونه‌های تازه است (Mardani & Nadi, 2018).

## نتایج و بحث

براساس نتایج به دست آمده (جدول ۵)، کمترین زمان خشک شدن نهایی (زمانی که با توجه به تنظیمات خشک‌کن، درصد رطوبت ثابت ماند) برابر با ۳۶۰ دقیقه مربوط به تیمار ۲۵۰-۱۰-۱-۵۰ و بیشترین آن ۱۸۶۰ دقیقه مربوط به تیمار ۲۰۰-۱۰-۲-۳۰ بود. همچنین براساس نتایج حاضر کمترین و بیشترین زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت ۱۰ درصد وزنی به ترتیب برابر ۱۸۰ دقیقه (تیمار ۲۶) و ۱۷۴۰ دقیقه (تیمار ۴) بود.

منحنی‌های سینتیک، کاهش نسبت رطوبت نمونه‌ها را به صورت محتوای رطوبت بر پایه تر (گرم آب بر گرم ماده مرطوب) در طول زمان خشک شدن، در سطوح مختلف زمان و توان پلاسمادهی و دمای هوای خشک و سرعت باد مختلف را نشان می‌دهند (شکل‌های ۵ تا ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش دما موجب افزایش شیب نمودار-ها شده است و در نتیجه زمان خشک شدن را کاهش داده است. در مقایسه بین تیمارهای مختلف مشاهده می‌شود تیمارهایی که از پیش تیمار پلازما (۲۰ ثانیه) در آنها استفاده شده زمان خشک شدن به مراتب کوتاه‌تری داشته‌اند. به عنوان مثال در شکل ۵، مقایسه تیمار ۲۵۰-۲۰-۲-۳۰ (بدون پلازما) و ۲۵۰-۲۰-۲-۳۰ نشان می‌دهد اعمال ۲۰ ثانیه پلازما علاوه بر کاهش رطوبت نهایی از ۹/۵ به ۳/۴ درصد موجب کاهش ۲۲۰ دقیقه (حدود ۴ ساعت) در زمان خشک شدن تا رطوبت ۱۰ درصد شده است. این عدد از منظر کاهش مصرف انرژی بسیار حائز اهمیت است. لازم به ذکر است توان مصرفی دستگاه پلازما (۲۰۰ وات) در مقایسه با توان مصرفی خشک‌کن بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

در مقایسه‌ای دیگر در شکل ۷ مربوط به فرایند خشک کردن در دمای ۵۰ درجه مقایسه تیمار شاهد ۲۵۰-۲۰-۲-۳۰ با تیمار ۲۵۰-۲۰-۲-۳۰-۵۰ نشان می‌دهد استفاده از پیش تیمار پلازما به مدت ۲۰ ثانیه توانسته است ۸۰ دقیقه زمان خشک شدن را برای رسیدن به رطوبت ۱۰ درصد کاهش دهد. نتایج بین سطوح زمان پلاسمادهی نیز نشان داد تأثیر معنی‌داری بین سطح اعمال پلازما ۱۰ ثانیه و صفر ثانیه وجود ندارد اما زمان ۲۰ ثانیه پلاسمادهی اختلاف معنی‌داری دارد که نمودارها نیز تأیید کننده این موضوع است.

جدول ۵- متغیرهای اندازه‌گیری شده در طرح آزمایشی به همراه بهترین مدل انطباق داده شده با آن

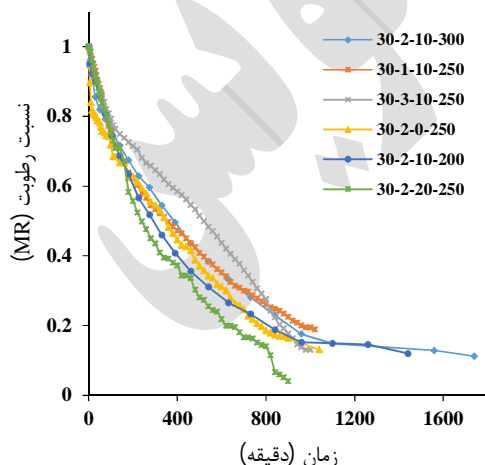
صفت	واحد	نوع معادله	مینیمم	ماکزیمم	میانگین
زمان نهایی خشک شدن	دقیقه	چند جمله‌ای	۳۶۰	۱۸۶۰	۷۴۶/۶
زمان لازم برای رسیدن به رطوبت ۱۰٪	دقیقه	چند جمله‌ای	۱۸۰	۱۷۴۰	۶۱۱/۱
رطوبت نهایی	%	چند جمله‌ای	۰/۸۸	۱۲/۲۱	۵/۵۲
ΔE	-	چند جمله‌ای	۲/۰۳	۲۵/۹۷	۹/۸۴

نتیجه را از نظر ضریب تبیین  $R^2$  و حداقل خطا در اختیار گذاشت. همچنین بررسی مدل های خطی، اثرات متقابل مرتبه اول 2FI، درجه ۲ و درجه ۳ نشان داد، مدل درجه ۲ بهترین همبستگی را با داده‌های آزمایشی دارد. فرم کلی مدل درجه دوم می‌تواند به صورت زیر (۴) بیان شود (Montgomery, 2017).

$$Y = b_0 + \sum_1^i b_i x_i + \sum_1^i b_{ii} x_i^2 + \sum_1^i \sum_2^j b_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

که در آن،  $Y$ ، متغیر پاسخ پیش‌بینی شده،  $b_0$  ضریب ثابت،  $b_i$  اثر خطی،  $b_{ii}$  اثرات درجه دوم،  $b_{ij}$  اثرات متقابل و  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای مستقل است.

نتایج تجزیه واریانس متغیرهای مستقل و تأثیر آن‌ها بر زمان خشک شدن نمونه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است، براساس نتایج حاضر اثر زمان پلاسما دهی، دما و سرعت جریان هوا بر زمان خشک شدن نمونه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. اما ولتاژ پلاسمادهی تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت.



شکل ۵- نمودار تغییرات نسبت رطوبت نمونه های برگ بو در تیمارهای مختلف در حین خشک شدن در دمای ۳۰ درجه سلسیوس

شدت کاهش نسبت رطوبت (MR) در ساعات ابتدایی خشک شدن بیشترین مقدار را داشته و سپس با گذشت زمان از نرخ کاهشی کاسته می‌شود. منحنی‌های نسبت رطوبت برگ بو در فرایند خشک شدن از تابع نمایی پیروی می‌کنند و مدل هندرسون و پابیس<sup>۱</sup> ( $MR = a \cdot \exp(-kt)$ ) بر آن منطبق است (Chhinnan, 1984).

مطابق با نمودارها مشاهده می‌شود که خطوط مربوط به تیمارهای دارای پیش تیمار پلاسما هم دارای نرخ کاهشی بیشتر و هم در زیر خطوط تیمارهای بدون پلاسما قرار گرفته‌اند. این بدان معنی است که سرعت کاهش رطوبت در آنها بیشتر بوده است و دلیل آن مرتبط با وجود تغییرات سطحی، ریز روزنه‌هایی است که توسط پلاسما در سطح برگ ایجاد شده (Ashtiani et al., 2023) و خروج رطوبت سرعت بیشتری پیدا کرده است. محققین دیگری نیز نتایج مشابهی را ارائه کرده‌اند (Li et al., 2019).

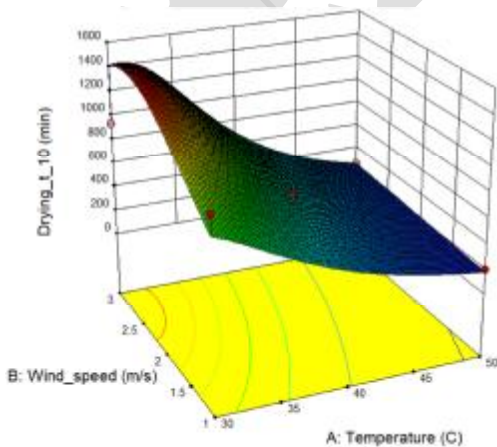
از طرف دیگر نتایج بررسی نشان می‌دهد با افزایش دمای خشک‌کن، روند کاهش رطوبت یکنواخت تر شده (اغتشاشات نمودار کاسته شده است) و خطوط نمودارها انحنای یکنواخت‌تری دارند (شکل ۷). این مشاهده به این دلیل است که در دمای پایین سرعت خروج رطوبت کم‌تر است و ورود هوای تازه که همراه خود مقداری رطوبت دارد می‌تواند تا حدودی باعث ایجاد اختلال در سرعت خشک شدن باشد.

### زمان خشک شدن تا رطوبت ۱۰ درصد

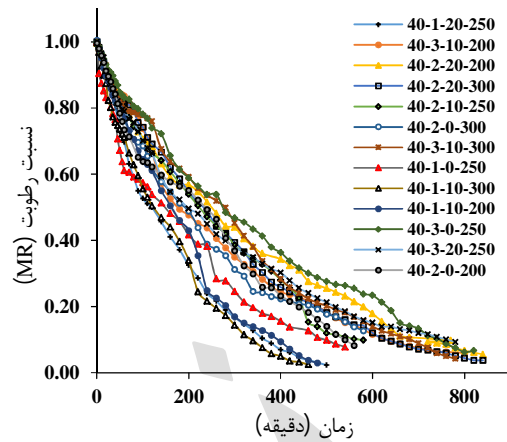
از آنجا که رطوبت نهایی قابل دسترس در هر یک از تیمارها متفاوت بود لذا زمان‌های مربوطه قابل مقایسه با یکدیگر نیست. لذا رطوبت ۱۰ درصد بر پایه‌تر به عنوان یک معیار مشخص برای بررسی زمان خشک شدن در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج بررسی مدل‌ها و تبدیلات مختلف بر روی داده‌ها تبدیل معکوس  $y = 1/x$  بهترین



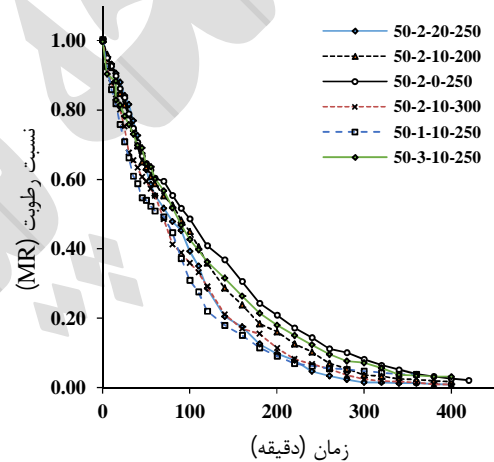
اثر تغییرات دما و سرعت هوا بر زمان خشک‌شدن در شکل نشان داده شده است، همان‌گونه که مشخص است، افزایش دما موجب می‌شود که سرعت خروج رطوبت از برگ بو افزایش یافته، نرخ خشک شدن افزایش یابد و تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روند کاهشی قابل توجهی باشد. علت این امر این است که با افزایش دمای هوای خشک‌کننده، اختلاف فشار جزئی بخار آب بین محصول و هوای خشک‌کننده، در نتیجه سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوا و سرعت خشک شدن محصول افزایش یافته است. محققین دیگری نیز نتایج مشابهی را ارائه کرده‌اند (Gazor & Minaei, 2005). با افزایش سرعت هوای ورودی زمان خشک شدن نمونه‌ها روند افزایشی نشان می‌دهد، شدت این پدیده در دمای ۳۰ درجه زیاد و در دمای ۵۰ درجه تقریباً ناچیز است. علت می‌تواند وابسته به رطوبت بالای هوای ورودی (با میانگین رطوبت نسبی ۶۰ درصد) به دستگاه باشد که به دلیل تغذیه دستگاه از هوای آزاد با افزایش سرعت باد حجم هوای مرطوب بیشتری وارد محفظه شده است (Gunhan *et al.*, 2005). این مشاهده می‌تواند در خشک شدن برگ‌ها در روش سنتی فضای باز نیز اتفاق بیافتد. اثر پیش تیمار پلازما در زمان خشک شدن معنی‌دار شد، در شرایط یکسان وجود پیش تیمار موجب افزایش شیب منحنی‌ها و همچنین کاهش زمان خشک شدن شده است. به طوری که ۲۰ ثانیه پلاسمادهی موجب کاهش در حدود ۲۰ درصد در زمان خشک شدن نسبت به تیمار بدون پلازما گردید. این امر می‌تواند موجب صرفه جویی قابل توجهی در توان مصرفی دستگاه خشک‌کن شود.



شکل ۸- اثر دما و سرعت جریان هوا بر زمان خشک شدن برگ بو



شکل ۶- نمودار تغییرات نسبت رطوبت نمونه های برگ بو در تیمارهای مختلف در حین خشک شدن در دمای ۴۰ درجه سلسیوس



شکل ۷- نمودار تغییرات نسبت رطوبت MR نمونه های برگ بو در تیمارهای مختلف در حین خشک شدن در دمای ۵۰ درجه سلسیوس

در مدل درجه ۲ به دست آمده، اثرات متقابل عوامل معنی‌دار نشد، همچنین از جملات درجه دوم مدل تنها توان دوم دما در سطح احتمال یک درصد معنادار شد. اما به منظور پایداری و افزایش دقت در مدل استفاده شده‌اند. مقدار ضریب تبیین  $R^2$  برابر با ۰/۹۵۸ و ضریب تبیین تصحیح شده  $R^2$ -Adj برابر با ۰/۹۰۹ محاسبه شد. همچنین با توجه به معنی‌دار نشدن عدم برازش<sup>۱</sup> و نزدیک بودن ضریب تبیین پیش بینی  $R^2$ -pred (۰/۷۶) با ضریب تبیین تصحیح شده، مدل به دست آمده توانایی خوبی در پیش بینی شرایط آزمایشی دارد.

1- Lack of fit

معنی‌داری بین شدت پلاسمادهی ۴۰۰ و ۵۰۰ وات وجود ندارد (Li et al., 2019).

### رطوبت نهایی

از آنجا که شرایط خشک شدن نمونه‌ها شامل دما، سرعت باد و پیش تیمار پلاسما متفاوت است، حداقل رطوبت قابل دست یافت با دستگاه خشک‌کن کابینتی متفاوت بود. لذا رطوبت نهایی (بر پایه خشک) که پس از آن به مدت یک ساعت (سه وزن گیری به فاصله ۲۰ دقیقه) تغییری در وزن نمونه ثبت نمی‌شد به عنوان یکی از متغیرهای وابسته بررسی می‌شود.

جدول ۶ نتایج تحلیل واریانس متغیرهای مستقل و تأثیر آنها بر رطوبت نهایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، دما در سطح یک درصد و زمان پلاسمادهی در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر رطوبت نهایی محصول داشتند و اثر سایر عوامل معنی‌دار نبود.

این در حالی است که به طور مثال استفاده از خشک کن کابینتی و پیش تیمار پلاسما در دمای ۳۰ درجه در مقایسه با خشک کردن سنتی برگ‌ها در سایه، ۴ ساعت سریع‌تر برگ‌ها را به رطوبت ۱۰ درصد می‌رساند. این درحالی است که تنها زمان پلاسمادهی صفر و ۱۰ ثانیه تفاوت معنی‌داری با هم نداشته ولی ۲۰ ثانیه پلاسمادهی موجب افزایش سرعت خشک شدن نمونه‌های برگ بو شده است. همچنین بررسی سطوح عامل ولتاژ پلاسمادهی نشان داد، اختلاف معنی‌داری بین سطوح ولتاژ پلاسما وجود ندارد. دلیل آن می‌تواند وابسته به کیفیت سطح برگ داشته باشد، به طوری که ولتاژ ۲۳ کیلوولت نیز به اندازه کافی ریز-روزنه در سطح برگ ایجاد می‌کند تا موجب تسهیل خروج رطوبت شود و با افزایش ولتاژ، تغییر بیشتری در کیفیت سطح رخ نداده است. در بررسی اثر سه سطح ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات توان پلاسمادهی بر سرعت خشک شدن دانه‌های ذرت گزارش شده است که تفاوت

جدول ۶- مدل سازی نتایج برای درصد رطوبت نهایی

منابع تغییر	رطوبت نهایی		زمان خشک شدن		شاخص ΔE		شاخص L*	
	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات
مدل	۴	۴۳/۷۷ <sup>**</sup>	۱۴	۳/۵۰×۱۰ <sup>**</sup>	۱۴	۰/۱۲ <sup>ns</sup>	۱۴	۹/۳ <sup>*</sup>
دما (T)	۱	۱۲۲/۸۲ <sup>**</sup>	۱	۳/۹۴×۱۰ <sup>**</sup>	۱	۴/۵۷×۱۰ <sup>ns</sup>	۱	۲۴/۹۱ <sup>**</sup>
سرعت باد (W)	۱	۵/۷۳ <sup>ns</sup>	۱	۳/۱۸×۱۰ <sup>**</sup>	۱	۶/۵۲×۱۰ <sup>ns</sup>	۱	۲/۱۴ <sup>ns</sup>
زمان پلاسما (PT)	۱	۴۴/۵ <sup>*</sup>	۱	۴/۰۷×۱۰ <sup>**</sup>	۱	۳/۲۸×۱۰ <sup>ns</sup>	۱	۴/۵ <sup>ns</sup>
ولتاژ پلاسما (PV)	۱	۲/۰۲ <sup>ns</sup>	۱	۲/۲۱×۱۰ <sup>ns</sup>	۱	۲/۰۳×۱۰ <sup>ns</sup>	۱	۱۸/۲۸ <sup>*</sup>
دما×زمان پلاسما	-	-	-	-	۱	۰/۱۱ <sup>**</sup>	-	-
T <sup>2</sup>	-	-	۱	۳/۵×۱۰ <sup>**</sup>	-	-	-	-
باقی مانده	۲۲	۷/۰۷	۱۲	۱/۷۸×۱۰	۱۲	۶/۸۱×۱۰	۱۲	۳/۲۹
عدم برازش	۲۰	۷/۶۵	۱۰	۲/۱۱×۱۰ <sup>ns</sup>	۱۰	۷/۷۵×۱۰ <sup>ns</sup>	۱۰	۳/۹۴ <sup>ns</sup>
خطا	۲	۱/۳۲	۲	۱/۸۱×۱۰	۲	۲/۴۴×۱۰	۲	۰/۰۵۴
کل	۲۶		۲۶		۲۶		۲۶	

<sup>\*</sup>، <sup>\*\*</sup> و <sup>ns</sup> به ترتیب بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

امر در خصوص زمان خشک شدن نیز مشاهده شد، لذا در صورتی که رطوبت پایین‌تر و یا زمان کوتاه‌تر خشک شدن مد نظر باشد، دمای بالاتر عملکرد بهتری دارد (Gunhan et al., 2005). اما در خصوص حفظ ترکیبات مؤثر برگ بو به عنوان یک گیاه دارویی، انجام فرایند خشک کردن در دمای پایین مفیدتر است (mohtashami et al., 2012). این امر با اعمال پیش تیمار پلاسما به دست آمده است.

بهترین مدل سطح پاسخ که بتواند مقدار رطوبت نهایی را براساس عوامل مستقل ورودی پیش‌بینی کند از نوع خطی با ضریب همبستگی ۰/۵۳ به دست آمد. نمودار شکل تغییرات رطوبت نهایی را در مقابل تغییرات دما و تغییرات زمان پلاسما دهی نشان می‌دهد. افزایش دما ضمن افزایش فشار بخار رطوبت موجود در نمونه موجب کاهش حداقل رطوبت خشک شدن شده است، این

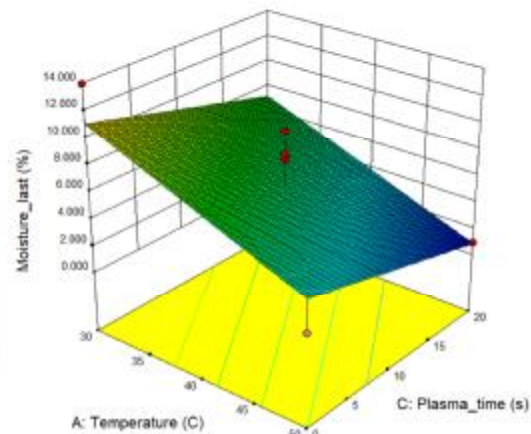
محصولات ناشی از تخریب قندها نیز شکستن آنتوسیانین‌ها را سرعت می‌بخشند و قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی طی فرآیندهای گرمایی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر کاهش در مقادیر  $L^*$  وابسته به افزایش قهوه‌ای شدن مواد غذایی و تخریب رنگ دانه‌ها است (Zandi et al., 2020). برآیند این عوامل علت تغییرات رنگی در نمونه‌ها طی فرآیند خشک کردن است.

تجزیه و تحلیل جداگانه تغییرات  $L^*$  به روش سطح پاسخ نشان داد (به طور کلی ولتاژ ۲۹ کیلوولت (تیمار ۲۵۰ ولت ورودی دستگاه) پلاسما دهی کمترین تغییرات رنگی را ایجاد می‌کند.

متغیرهای دمای خشک شدن و ولتاژ پلاسما دهی بر میزان روشن شدن رنگ برگ‌ها اثر معنی‌دار دارد. همچنین مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ با وجود اینکه افزایش دما موجب تغییرات رنگی برگ‌ها به سمت روشنی می‌شود، اما استفاده از پیش تیمار پلاسما شامل متغیر ولتاژ پلاسما دهی ضمن داشتن اثر معنی‌دار، موجب کاهش تغییرات  $L^*$  می‌شوند. لذا از نظر ثبات رنگی نمونه در فرآیند خشک شدن، استفاده از پیش تیمار پلاسما عملکرد مثبتی را نشان می‌دهد. پیش تیمار پلاسما ضمن افزایش سرعت خروج رطوبت به دلیل کاهش زمان خشک شدن و همچنین امکان خشک کردن در دمای پایین‌تر، تغییرات رنگی کمتری در نمونه بروز می‌کند. مقایسه میانگین توسط آزمون دانکن بین سطوح متغیر ولتاژ پلاسما دهی نیز نشان داد بین ولتاژ ۲۳ کیلو ولت و سطوح ۲۹ و ۳۵ کیلوولت اختلاف معنی‌داری بر میزان روشنی برگ‌ها وجود دارد. به طور کلی ولتاژ ۲۹ کیلوولت (تیمار ۲۵۰ ولت ورودی دستگاه) پلاسما دهی کمترین تغییرات رنگی را ایجاد می‌کند.

شکل ۱۱ میانگین میزان تغییرات روشنی و تیرگی برگ‌های خشک شده را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. افزایش دمای خشک‌کن موجب روشن‌تر شدن رنگ برگ‌های خشک، شده است و این می‌تواند یک نتیجه منفی محسوب شود. مقایسه میانگین سطوح این عامل نشان داد بین دمای ۳۰ درجه سلسیوس و دو سطح ۴۰ و ۵۰ درجه اختلاف معنی‌داری بر میزان روشنی برگ‌ها وجود دارد، اما سطوح ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری نداشتند.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود افزایش زمان پیش تیمار پلاسما موجب کاهش رطوبت نهایی شده است. قرار گرفتن برگ‌ها در محیط پلاسما، آنها را در معرض برخورد ذرات پراثری قرار داده و بر روی سطح آنها ریز روزنه‌هایی بوجود می‌آید، این ریز روزنه‌ها مسیرهای جدیدی برای خروج رطوبت از سطح هستند (Ashtiani et al., 2023). به عنوان نمونه رطوبت نهایی ۴ درصد که در دمای خشک شدن ۵۰ درجه و بدون پلاسما به دست آمده است، در صورت پلاسما دهی به مدت ۲۰ ثانیه، می‌تواند طی فرآیند خشک شدن در دمای ۴۰ درجه حاصل شود. لذا مقدار بیشتری از ترکیبات مؤثر گیاه حفظ می‌شود.



شکل ۹- نمودار سطح پاسخ تغییرات رطوبت نهایی در مقابل دما و زمان پلاسما دهی

### تغییرات شاخص رنگ ( $\Delta E$ )

نتایج محاسبه شاخص‌های رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  و میانگین آن برای کل سطح برگ و مقدار  $\Delta E$  برای هر تیمار نشان داد بهترین مدل با تغییر فرم تابع معکوس بر روی متغیر وابسته ( $1/\Delta E$ ) به فرم تابع درجه اول  $2FI^1$  بدست می‌آید. براساس نتایج تجزیه واریانس صورت گرفته (جدول ۶) هیچ‌کدام از متغیرهای مستقل تأثیر معنی‌داری بر روی شاخص تغییرات رنگ نداشت. با این وجود بیشترین تغییرات رنگی نمونه‌های برگ بو طی فرآیند خشک شدن در سرعت باد ۱ m/s نسبت به تغییرات دما اتفاق می‌افتد و کمترین آن در سرعت باد ۳ m/s است.

در طی فرآیند خشک کردن با افزایش مقدار مواد جامد محلول وسعت تخریب رنگ دانه افزایش می‌یابد. قندها و

مشاهده می‌شود تیمارهایی که از پیش تیمار پلاسما (۲۰ ثانیه) در آنها استفاده شده زمان خشک شدن به مراتب کوتاه‌تری داشته‌اند. این امر می‌تواند موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در توان مصرفی دستگاه خشک‌کن شود. به طور کلی استفاده از خشک‌کن کابینتی و پیش تیمار پلاسما در دمای ۳۰ درجه در مقایسه با خشک کردن سنتی برگ‌ها در سایه، ۴ ساعت سریعتر برگ‌ها را به رطوبت ۱۰ درصد می‌رساند. این مطلب از نظر صرفه‌جویی در زمان، تولید محصول با آلودگی کم و کیفیت بالاتر حائز اهمیت است. در دمای ۳۰ درجه مصرف برق دستگاه خشک‌کن در یک دوره بارگیری تنها حدود ۳/۵ کیلو وات ساعت است.

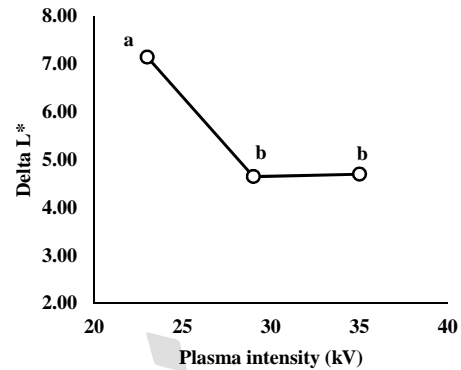
براساس نتایج هیچ کدام از متغیرهای مستقل از نظر آماری تأثیر معنی‌داری بر روی شاخص تغییرات رنگ نداشتند. اما بررسی و تجزیه و تحلیل جداگانه تغییرات  $L^*$  نشان داد متغیرهای دمای خشک شدن (نسبت مستقیم) و ولتاژ پلاسمادهی (نسبت معکوس) بر میزان روشن شدن رنگ برگ‌ها اثر معنی‌داری دارد. لذا از نظر ثبات رنگی نمونه در فرایند خشک شدن، استفاده پیش تیمار پلاسما عملکرد مثبتی را نشان می‌دهد.

#### سپاسگزاری

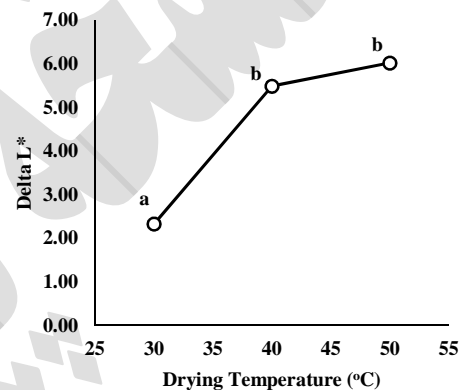
از معاونت پژوهش و فناوری دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد بابت حمایت از این تحقیق تشکر می‌شود.

#### منابع

- Aghkhani, M., Ashtiani, S. H. M., Motie, J. B., & Abbaspour-Fard, M. H. (2012). Physical properties of Christmas Lima bean at different moisture content. *International Agrophysics*, 26(4): 341–346.
- Ashtiani, S.-H. M., Aghkhani, M. H., Feizy, J., & Martynenko, A. (2023). Effect of Cold Plasma Pre-treatment Coupled with Osmotic Dehydration on Drying Kinetics and Quality of Mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*.
- Baradaran Motie, J., Saeidirad, M. H., & Jafarian, M. (2023). Identification of Sunn-pestaffected (*Eurygaster Integriceps* put.) wheat plants and their distribution in wheat fields using aerial imaging. *Ecological Informatics*, 102146.
- Chhinnan, M. S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin-



شکل ۱۰- میانگین تغییرات میزان روشنی و تیرگی برگ‌ها (شاخص  $L^*$ ) نسبت به تغییر شدت پلاسما



شکل ۱۱- میانگین تغییرات میزان روشنی و تیرگی برگ‌ها (شاخص  $L^*$ ) نسبت به تغییر دمای خشک شدن

#### نتیجه‌گیری

روش سنتی خشک کردن گیاهان دارویی شامل پهن کردن در آفتاب و یا سایه از دیرباز مورد استفاده قرار می‌گرفته است. اما به منظور افزایش کیفیت محصول نهایی تحقیقات بر روی روش‌ها و پیش تیمارها در حال انجام است. نتایج این تحقیق نشان داد، افزایش دما، سرعت باد و زمان پیش تیمار پلاسما از لحاظ آماری تأثیر معنی‌داری روی خروج مؤثر رطوبت و زمان خشک شدن داشت. در حالی که شدت پلاسمادهی تأثیری در زمان و سرعت خشک کردن نداشت. کمترین زمان خشک کردن ۳۶۰ دقیقه مربوط به تیمار ۵۰-۱۰-۲۵۰ برای رسیدن رطوبت نمونه‌ها به مقدار ثابت نهایی بود. شدت کاهش نسبت رطوبت (MR) در ساعات ابتدایی خشک شدن بیشترین مقدار را داشته و سپس با گذشت زمان از نرخ کاهشی کاسته می‌شود. در مقایسه بین تیمارهای مختلف

- Campelo, P. H. (2021). Cold plasma technique as a pre-treatment for drying fruits: Evaluation of the excitation frequency on drying process and bioactive compounds. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 147: 110462.
- Mardani, O., & Nadi, F. (2018). Comparison of effect of convection drying and osmo-convection drying on drying behaviour and colour indexes of peppermint leaves. In *Journal of food science and technology (Iran)*, 15(82): 405–420.
- Min, S. C., Roh, S. H., Niemira, B. A., Boyd, G., Sites, J. E., Uknalis, J., & Fan, X. (2017). In-package inhibition of E. coli O157:H7 on bulk Romaine lettuce using cold plasma. *Food Microbiology*, 65: 1–6.
- mohtashami, saeede, babablar, mesbah, ebrahim zade moosavi, seyed mohammad, mir jalili, mohammad hossein, & adib, jomane. (2012). The Effect of Growing Conditions and Different Drying Methods on Drying Time, Essential Oil Content, Color Characteristics and Microbial Load of *Dracocephalum Moldavica L.* *Iranian Journal of Horticultural Science*, 43(2): 243–254.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Moradi, M., Ghasemi, J., & Karparvarfard, S. H. (2019). Investigating of drying kinetics of lemon verbena leaves in a solar cabinet dryer. *2nd International & 6th National Confrence on Organic va. Conventional Agriculture*.
- Mortazavi, S., Arzani, K., & Mansouri, Y. (2012). The effects of different temperature and duration of hydration on the quality of dried date fruits, cv. Barhee. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1(4): 79–92.
- Naderi Hajibagher kandi, M., Sefidkon, F., Azizi, A., & Pourheravi, M. R. (2011). The influence of different distillation times on essential oil content and composition of *Laurus nobilis L.* *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 27(2): 249–260.
- Rezaei, S., Ebadi, M.-T., Ghobadian, B., & Ghomi, H. (2021). Optimization of DBD-Plasma assisted hydro-distillation for essential oil extraction of fennel (*Foeniculum vulgare Mill.*) seed and spearmint (*Mentha spicata L.*) leaf. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 24: 100300.
- Rouzegar, M. R., Abbaspour-Fard, M. H., Hedayatizadeh, M., & Mohamadinezhad, H. (2022). Comparison of drying kinetics of layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27(2): 610–615.
- Doymaz, İ. (2006). Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74(3), 370–375.
- Doymaz, İ. (2014). Thin-Layer Drying of Bay Laurel Leaves (*Laurus nobilis L.*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1): 449–456.
- Doymaz, İ., & Karasu, S. (2018). Effect of air temperature on drying kinetics, colour changes and total phenolic content of sage leaves (*Salvia officinalis*). *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 10(3): 269-276.
- Ebadi, M. T., Sefidkon, F., Azizi, M., & Ahmadi, N. (2016). Effects of air velocity and infrared radiation intensity on drying factors of lemon verbena (*Lippia citriodora Kunth.*). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 32(1): 161–173.
- Gazor, H. R., & Minaei, S. (2005). Influence of temperature and air velocity on drying time and quality parameters of pistachio (*Pistacia vera L.*). *Drying Technology*, 23(12): 2463-2475.
- Ghafouri, H. (2022). Simulation of heat transfer in hot water dryer of agricultural products. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 11(2): 9–18.
- Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., & Hepbasli, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11–12): 1667–1679.
- Jahanbakhshi, A., Yeganeh, R., & Momeny, M. (2020). Influence of ultrasound pre-treatment and temperature on the quality and thermodynamic properties in the drying process of nectarine slices in a hot air dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10): e14818.
- Li, S., Chen, S., Liang, Q., Ma, Z., Han, F., Xu, Y., Jin, Y., & Wu, W. (2019). Low temperature plasma pre-treatment enhances hot-air drying kinetics of corn kernels. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6).
- Liao, X., Liu, D., Xiang, Q., Ahn, J., Chen, S., Ye, X., & Ding, T. (2017). Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review. *Food Control*, 75: 83–91.
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35: 20–26.
- Loureiro, A. da C., Souza, F. das C. do A., Sanches, E. A., Bezerra, J. de A., Lamarão, C. V., Rodrigues, S., Fernandes, F. A. N., &

- mint leaves by photovoltaic / thermal solar dryer and natural drying. *Food Science and Technology*, 18(119): 193–204.
- Saifullah, M., McCullum, R., McCluskey, A., & Vuong, Q. (2019). Effects of different drying methods on extractable phenolic compounds and antioxidant properties from lemon myrtle dried leaves. *Heliyon*, 5(12): e03044.
- Schlüter, O., Ehlbeck, J., Hertel, C., Habermeyer, M., Roth, A., Engel, K., Holzhauser, T., Knorr, D., & Eisenbrand, G. (2013). Opinion on the use of plasma processes for treatment of foods. *Molecular Nutrition & Food Research*, 57(5): 920–927.
- Soltani, A., Azzouz, S., Romdhana, H., & Goujot, D. (2021). Multi-response optimization of drying process parameters for *Laurus Nobilis*. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 22: 100302.
- Velić, D. al, Planinić, M., Tomas, S., & Bilić, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64(1): 97–102.
- Zandi, M., Ganjloo, A., & Bimakr, M. (2020). Evaluation of physicochemical characterization of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) during various storage conditions and modeling of changes using kinetic models. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 16(5): 507–523.
- Zargari, A. (1996). *Medicinal Plants* (5th ed.). University of Tehran Press (in Persian).

## Research paper

# Investigation of the effect of cold plasma pre-treatment on Bay leaf (*Laurus nobilis*) drying kinetics

E. Moridar<sup>1</sup>, M. R. Byati<sup>2</sup>, J. Baradaran Motie<sup>3\*</sup> and M. Khojastepour<sup>4</sup>

## Abstract

Cold plasma is an environment full of active ions and energetic particles applied to the sample's surface to disinfect materials, make their surface hydrophilic, and improve their color. These particles create micropores on the sample's surface and can be useful in removing moisture and drying sensitive materials. The laurel tree, with the scientific name *Nobilis Laurus*, is an evergreen plant with various medicinal properties and is also used in the food industry. This study investigated the effect of DBD cold plasma pre-treatment on the drying kinetics of bay leaves in a cabinet dryer. The experiments were conducted using the response surface method based on the Box-Behnken design. The independent variables were temperature (30, 40, and 50 °C), air velocity (1, 2, 3 m/s), plasma treatment time (0, 10, 20 s), and plasma intensity (23, 29, and 35 kV). Dependent variables included drying time to a moisture content of 10% and minimum achievable moisture content. The results showed the significant influence of temperature, air velocity, and plasma treatment time on the dependent variables. Increasing the temperature decreased the drying time and the minimum achievable moisture content. Plasma intensity had no significant effect on minimum accessible moisture and drying time. The results showed a significant effect of plasma treatment time, such that 20 seconds reduced drying time by about 20% compared to treatment without plasma. Therefore, 50 °C temperature, 20 s plasma time, 23 kV plasma intensity, and 1 m/s wind speed were optimal dryer settings. This can save a considerable amount of energy in the drying process. The two variables, temperature and plasma intensity, significantly affected the brightness and darkness changes of the leaves after drying. Hence, the use of plasma pre-treatment reduced the color change of the samples.

**Keywords:** Bay leaf, Cold plasma, Cabinet dryer, Drying kinetics, Response surface methodology.

**Citation:** Moridar E. Byati M. R. Baradaran Motie J. and Khojastepour M. 2023. Investigation of the effect of cold plasma pre-treatment on Bay leaf (*Laurus nobilis*) drying kinetics. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery. 29: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14334.661>

1- M.Sc. of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

4- Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

\*Corresponding Author: [j.baradaran@um.ac.ir](mailto:j.baradaran@um.ac.ir)

Received: 2023/06/14

Accepted: 2023/06/29

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14334.661>