



تأثیر پیش تیمارهای پلاسمای سرد بر رفتار خشک شدن و ویژگی‌های سینتیکی زرشک تحت دو روش خشک کردن (خشک کن هوای گرم در مقابل مایکروویو)

حمید خفاجه^۱، محسن دلوی-اصفهان^۲

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

زرشک (*Berberis vulgaris* L.) به دلیل رطوبت بالای خود، میوه‌ای بسیار فسادپذیر است. در این پژوهش، اثر پیش تیمارهای پلاسما سرد شامل تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD)؛ به مدت ۳ و ۶ دقیقه) و پلاسما گلاید (به مدت ۱ و ۲ دقیقه) در ترکیب با روش‌های خشک کردن مایکروویو و هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که زمان خشک کردن نمونه‌های شاهد در روش هوای گرم حدود ۱۲۸۰ دقیقه و در روش مایکروویو حدود ۱۵ دقیقه بود. پیش تیمار پلاسما به طور معنی داری زمان خشک کردن را کاهش داد. در تیمار DBD، زمان خشک کردن در هوای گرم به حدود ۹۳۰ دقیقه و در مایکروویو به حدود ۱۰/۵ تا ۱۱/۵ دقیقه کاهش یافت، در حالی که پلاسما گلاید زمان خشک کردن را به ترتیب به حدود ۱۲۰۰ تا ۱۲۳۰ دقیقه در هوای گرم و ۱۰/۵ تا ۱۲ دقیقه در مایکروویو کاهش داد. به طور میانگین، نمونه‌های تیمار شده با پلاسما در مقایسه با شاهد، ۴۵٪ کاهش در زمان خشک کردن و ۲۰ تا ۳۰٪ افزایش در نرخ خشک کردن نشان دادند. در میان مدل‌های مورد بررسی، مدل میدیلی و همکاران بهترین انطباق را با داده‌های تجربی داشت و مقادیر ضریب تعیین (R^2) بین ۰/۹۹ تا ۰/۹۹۹ به دست آمد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (Deff) در بازه 10^{-8} تا 10^{-6} متر مربع بر ثانیه قرار داشت که بیشترین مقدار مربوط به تیمار DBD مایکروویو و کمترین مقدار مربوط به ترکیب گلاید-هوای گرم بود. به طور کلی، نتایج نشان داد که پیش تیمار پلاسما سرد، به ویژه در ترکیب با خشک کردن مایکروویو، می‌تواند به طور قابل توجهی کارایی خشک کردن و انتقال جرم در زرشک را بهبود دهد.

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

کلمات کلیدی:

گرمایش مایکروویو؛

خشک کردن با هوای گرم؛

پلاسمای سرد؛

مدل سازی لایه نازک؛

نسبت رطوبت؛

سرعت خشک شدن

DOI: 10.48311/fsct.2026.119207.83053

* مسئول مکاتبات:

khafajeh@jahromu.ac.ir

Dalvi@jahromu.ac.ir,
mohsen.Dalvi@gmail.com

۱-مقدمه

زرشک (*Berberis vulgaris* L.) یک محصول باغی با ارزش دارویی و اقتصادی است که از دیرباز در طب سنتی مورد استفاده قرار گرفته و امروزه به صورت گسترده در ایران کشت می‌شود. تولید جهانی زرشک عمدتاً در ایران متمرکز است و استان خراسان جنوبی حدود ۹۵٪ این تولید را به خود اختصاص می‌دهد. زرشک تازه در زمان برداشت دارای رطوبت بالایی است که پایداری نگهداری آن را محدود می‌کند؛ از این رو، خشک کردن نقش مهمی در کاهش ضایعات پس از برداشت و افزایش قابلیت نگهداری محصول در طول سال دارد [1]. خشک کردن با هوای گرم یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای خشک کردن محصولات کشاورزی است؛ این روش به دلیل سادگی و هزینه اولیه پایین، کاربرد وسیعی دارد. با این حال، زمان خشک کردن طولانی، مصرف انرژی بالا و افت کیفیت ناشی از قرارگیری طولانی ماده در معرض حرارت، از مهم‌ترین محدودیت‌های این روش است. این چالش‌ها موجب شده است تا پژوهشگران به بررسی فناوری‌های جایگزین با کارایی بالاتر و حفظ کیفیت محصول روی آورند [2]. در سال‌های اخیر، خشک کردن با مایکروویو به عنوان روشی کارآمد و سریع مورد توجه قرار گرفته است. در این سیستم‌ها، انرژی الکترومغناطیسی مستقیماً توسط مولکول‌های آب جذب و به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود؛ این فرآیند به ایجاد گرمایش حجمی در سراسر ماده منجر شده، موجب تسریع خروج رطوبت، کاهش زمان خشک کردن و بهبود بازده انرژی در مقایسه با خشک کردن با هوای گرم می‌شود. نتایج مطالعات متعدد نشان داده است که استفاده از مایکروویو، چه به تنهایی و چه در ترکیب با سایر روش‌ها، می‌تواند سینتیک خشک کردن میوه‌ها و

سبزی‌ها را بدون ایجاد افت شدید کیفیت بهبود بخشد [3-4]. فناوری‌های پلاسمای غیرحرارتی نیز در سال‌های اخیر به عنوان پیش‌تیمارهای نوین و مؤثر برای بهبود عملکرد خشک کردن مطرح شده‌اند. پیش‌تیمار با پلاسمای سرد قادر است تغییرات ساختاری و فیزیکی قابل توجهی در سطح مواد زیستی ایجاد کند؛ از جمله زبرشدگی سطح، تشکیل میکروکانال‌ها و افزایش تخلخل [5]. این تغییرات به تسهیل خروج رطوبت و انتقال جرم در طی خشک کردن منجر شده و در نهایت موجب کاهش زمان خشک کردن و افزایش بازده آن می‌شود. مطالعات انجام شده بر روی برش‌های عناب و چغندر نشان داده‌اند که پیش‌تیمار با پلاسمای سرد با افزایش نرخ انتقال رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر، می‌تواند سینتیک خشک کردن را به طور قابل توجهی بهبود دهد. در مورد عناب، این پیش‌تیمار افزون بر افزایش نرخ خشک کردن، موجب افزایش محتوای ترکیبات زیست فعال از جمله فلاونوئیدها و فنول‌ها نیز شده است [6]. در چغندر نیز پیش‌تیمار ۵ دقیقه‌ای با پلاسمای سرد باعث افزایش ۱۰۰ درصدی نرخ خشک کردن، کاهش ۲۴ درصدی مصرف ویژه انرژی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی از جمله کاهش جمع‌شدگی و افزایش نسبت بازآبگیری گردیده است [7]. در میان انواع روش‌های تولید پلاسمای سرد، روش تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) با زمان‌های تیمار طولانی‌تر و مصرف انرژی کمتر، و روش قوس گلاید (Glide Arc) با انرژی بالاتر و زمان تیمار کوتاه‌تر شناخته می‌شوند [7]. این پژوهش با هدف مقایسه کارایی این دو روش پیش‌تیمار، یعنی تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) و قوس گلاید (Glide Arc)، در بهبود رفتار خشک کردن زرشک و ارزیابی اثرات آن‌ها بر سینتیک خشک کردن، مصرف انرژی و حفظ ترکیبات زیست فعال انجام شد. با وجود افزایش

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

میوه‌های تازه زرشک (*Berberis vulgaris* L.) از مزارع کشاورزی واقع در شهرستان بیرجند، ایران برداشت شدند. پس از برداشت، نمونه‌ها به‌دقت مرتب‌سازی و به‌صورت دستی پاک‌سازی شدند تا میوه‌های معیوب، شامل میوه‌های آسیب‌دیده، تغییررنگ‌داده، فاسد یا چروکیده، حذف شوند (شکل ۱). سپس زرشک‌های انتخاب‌شده به‌منظور محدود کردن تغییرات فیزیوشیمیایی پیش از انجام آزمایش‌ها، در شرایط سردخانه‌ای و در دمای $5 \pm 4^\circ\text{C}$ نگهداری شدند.

رطوبت اولیه نمونه‌های تازه با استفاده از روش خشک‌کردن در آون، در دمای 105°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، و با بهره‌گیری از خشک‌کن جریان هوای گرم اندازه‌گیری شد. میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها $87.0 \pm 1\%$ بر پایه تر تعیین گردید.



Figure 1. Barberry fruit (*Berberis vulgaris* L.).

آزمایشی مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌هایی که هیچ‌گونه پیش تیمار پلاسمایی دریافت نکردند به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شدند. بلافاصله پس از انجام پیش تیمار پلاسما، نمونه‌ها به واحد خشک‌کن منتقل شدند تا اثرات احتمالی پس از تیمار به حداقل برسد.

توجه به خشک‌کردن با مایکروویو و پیش تیمارهای پلاسمای سرد، اغلب پژوهش‌های پیشین این فناوری‌ها را به‌صورت مجزا بررسی کرده‌اند و اطلاعات محدودی درباره اثرات ترکیبی آن‌ها بر رفتار خشک‌کردن زرشک وجود دارد. علاوه بر این، مقایسه روش‌های مختلف پیش تیمار پلاسمای سرد، مانند پلاسمای DBD و Glide Arc، در ترکیب با خشک‌کردن به روش‌های مایکروویو و هوای گرم، بسیار اندک گزارش شده است. همچنین، رفتار خشک‌کردن زرشک پیش تیمارشده با پلاسما تاکنون با استفاده از مدل‌های لایه‌نازک به‌طور جامع توصیف نشده است. از این رو، هدف این مطالعه بررسی اثرات دو تکنیک پیش تیمار پلاسما (DBD و Glide Arc) در مدت‌زمان‌های مختلف تیمار بر رفتار خشک‌کردن و سینتیک خشک‌شدن زرشک تحت شرایط خشک‌کردن با هوای گرم و مایکروویو و نیز ارزیابی چندین مدل رایج خشک‌کردن لایه‌نازک به‌منظور تعیین مناسب‌ترین مدل برای توصیف و پیش‌بینی ویژگی‌های خشک‌کردن زرشک در شرایط مختلف خشک‌کردن بود.

۲-۲- تجهیزات و شرایط پیش تیمار پلاسما

در هر مرحله از آزمایش، مقدار 100°C گرم از نمونه‌های زرشک پیش از انجام فرآیند خشک‌کردن تحت پیش تیمار پلاسما قرار گرفتند. در این مطالعه، دو سامانه پلاسمای سرد شامل پلاسمای DBD و پلاسمای قوس‌گلاید در زمان‌های مختلف تیمار، مطابق با طرح

۲-۲-۱- پیش تیمار پلاسمای تخلیه سرد

دی الکتریک (DBD)

برای پیش تیمار پلاسمای سرد از دستگاه تخلیه سرد دی الکتریک (Enhancedtech 15I, Kavoshyaran Co. LTD., Iran) استفاده شد که در آن هوای محیط به عنوان گاز تشکیل دهنده پلازما به کار رفت. این سیستم توسط دو منبع تغذیه الکتریکی مستقل نیرودهی می شد: یک منبع فرکانس پایین با عملکرد ۵۰ هرتز و محدوده ولتاژ قابل تنظیم ۰ تا ۲۵ کیلوولت و یک منبع متناوب فرکانس بالا با عملکرد ۶ کیلوهرتز و حداکثر ولتاژ خروجی ۱۰ کیلوولت. تولید پلازما در داخل یک راکتور متشکل از دو الکترود موازی به ابعاد ۲۲ سانتی متر در ۱۵ سانتی متر صورت گرفت. الکترود پایینی که از فولاد ضدزنگ ساخته شده بود، در زیر یک لایه شیشه‌ای دی الکتریک قرار گرفت تا عایق بندی الکتریکی و تشکیل تخلیه یکنواخت تضمین شود؛ در حالی که الکترود بالایی به منبع تغذیه فرکانس بالا متصل بود. الکترود پایین نیز توسط منبع فرکانس پایین تغذیه می شد که امکان تشکیل پلاسمای پایدار و از نظر فضایی یکنواخت را بر روی سطح نمونه‌ها فراهم می کرد [8]. نمونه‌های زرشک (۱۰۰ گرم) به طور یکنواخت بین الکترودها پخش شده و مطابق با طرح آزمایش، به مدت ۳ و ۶ دقیقه تحت پیش تیمار پلازما قرار گرفتند. این زمان‌های پرتودهی بر اساس آزمون‌های اولیه و مطالعات پیشین انتخاب شدند تا ضمن دستیابی به اصلاح سطحی مؤثر، از ایجاد آسیب ظاهری بر سطح محصول جلوگیری شود. پس از انجام پیش تیمار پلازما، نمونه‌ها بلافاصله به واحد خشک کن منتقل شدند تا اثرات احتمالی پس از تیمار به حداقل برسد [9].

۲-۲-۲- پیش تیمار پلاسمای سرد قوس گلاید

پیش تیمار پلاسمای قوس گلاید با استفاده از یک سامانه تخلیه قوس گلاید با توان ورودی ۴۰۰ وات و جریان الکتریکی ۲ آمپر انجام شد. راکتور پلازما از دو الکترود واگرا با فاصله بین الکترودی ۲ سانتی متر تشکیل شده بود که یک تخلیه پلاسمای پایدار و غیرحرارتی ایجاد می کرد. فاصله بین نوک الکترودها و سطح نمونه‌های زرشک حدود ۳۰ میلی متر تنظیم شد تا توزیع یکنواخت پلازما بر روی نمونه‌ها تضمین گردد. نمونه‌های زرشک (۱۰۰ گرم) مطابق با طرح آزمایشی به مدت ۱ و ۲ دقیقه در معرض پلاسمای قوس گلاید قرار گرفتند. در طول فرآیند تیمار، نمونه‌ها در نیمه زمان تیمار برگردانده شدند تا تماس پلازما با هر دو طرف نمونه‌ها برقرار شود. این زمان‌های تیمار بر اساس آزمایش‌های مقدماتی و مطالعات پیشین انتخاب شدند تا تیمار مؤثر پلازما بدون ایجاد آسیب قابل مشاهده در سطح محصول یا افزایش بیش از حد دما حاصل شود. نمونه‌هایی که هیچ پیش تیمار پلاسمایی دریافت نکردند به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شدند. بلافاصله پس از پیش تیمار با پلاسمای قوس گلاید، نمونه‌ها به تجهیزات خشک کن منتقل شدند تا فاصله زمانی بین پیش تیمار و فرآیند خشک کردن به حداقل برسد [10].

۲-۳- تجهیزات خشک کردن و شرایط فرآیند

۲-۳-۱- خشک کردن با مایکروویو

خشک کردن نمونه‌های زرشک با استفاده از یک مایکروویو خانگی (Model M945, Samsung, Korea) با فرکانس کاری ۲۴۵۰ مگاهرتز و حداکثر توان اسمی ۱۰۰۰ وات انجام شد. آزمایش‌ها در توان ثابت ۴۰۰ وات انجام گرفت. این مقدار بر اساس مطالعات پیشین انتخاب شد و به عنوان سطح توان ایمن جهت جلوگیری از افت کیفیت یا سوختگی موضعی در طی فرآیند خشک کردن با مایکروویو در نظر گرفته شد [11].

می‌کند [1]. سرعت جریان هوا در طول آزمایش‌ها m/s ۰/۵ تنظیم شد. در طول فرآیند خشک‌کردن، جرم نمونه‌ها هر ۳۰ دقیقه یکبار با استفاده از ترازوی دیجیتال (GF 600, A&D, Japan; ± 0.01 g accuracy) با دقت ± 0.01 گرم اندازه‌گیری شد. فرآیند خشک‌کردن زمانی متوقف گردید که میزان رطوبت نمونه‌ها به کمتر از ۲۰٪ بر پایه تر کاهش یافت [2].

۲-۴- پیش تیمارها قبل از خشک‌کردن

در هر مرحله از آزمایش، مقدار ۱۰۰ گرم از نمونه‌های زرشک تحت پیش تیمار پلاسما قرار گرفتند. پیش تیمارهای اعمال شده شامل پلاسمای قوس گلاید به مدت ۱ و ۲ دقیقه و پلاسمای DBD به مدت ۳ و ۶ دقیقه بودند. نمونه‌هایی که هیچ‌گونه پیش تیمار پلاسمایی دریافت نکردند به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شدند. پس از انجام پیش تیمار پلاسما، نمونه‌ها بلافاصله تحت آزمایش‌های خشک‌کردن قرار گرفتند. تیمارهای مورد بررسی در این مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

Table 1: Treatments studied

Code	Pretreatment	Drying Method
T1	Control	Hot air dryer
T2	Control	Microwave
T3	Glide 1 min	Hot air dryer
T4	Glide 1 min	Microwave
T5	Glide 2 min	Hot air dryer
T6	Glide 2 min	Microwave
T7	DBD 3 min	Hot air dryer
T8	DBD 3 min	Microwave
T9	DBD 6 min	Hot air dryer
T10	DBD 6 min	Microwave

سه تکرار اندازه‌گیری شد تا زمانی که تغییر محسوسی در وزن مشاهده نشد؛ سپس میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. میزان رطوبت اولیه هر تیمار با استفاده از روش استاندارد وزنی تعیین شد و مقدار رطوبت (MC) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

تغییرات جرم نمونه‌ها هر ۳۰ ثانیه یکبار با استفاده از ترازوی دقیق (GF 600, A&D, Japan; ± 0.01 g accuracy) با دقت ± 0.01 گرم اندازه‌گیری شد. فرآیند خشک‌کردن تا زمانی ادامه یافت که رطوبت نهایی هر نمونه به کمتر از ۲۰٪ بر پایه تر کاهش یافت [12].

۲-۳- خشک‌کن هوای گرم

آزمایش‌های خشک‌کردن با هوای گرم با استفاده از یک خشک‌کن هوای گرم آزمایشگاهی با حجم داخلی ۵۵ لیتر و حداکثر توان ۸۰۰ وات انجام شد. ابعاد خارجی دستگاه ۵۲ × ۴۱ × ۷۰ سانتی‌متر (عرض × عمق × ارتفاع) و ابعاد محفظه خشک‌کردن ۴۰ × ۳۳ × ۴۲ سانتی‌متر بود. این دستگاه به یک سامانه کنترل مبتنی بر PID مجهز بود تا شرایط عملیاتی پایدار در طول فرآیند خشک‌کردن حفظ شود. فرآیند خشک‌کردن در دمای کنترل شده 50 ± 70 °C انجام گرفت. این دما به عنوان یکی از دماهای متداول و غیرمخرب در خشک‌کردن زرشک شناخته می‌شود که ضمن حفظ کیفیت محصول، از تخریب آنتوسیانین‌ها نیز جلوگیری

۲-۵- سینتیک خشک‌کردن و مدل‌سازی ریاضی

نمونه‌های زرشک (۱۰۰ گرم) تحت فرآیند خشک‌کردن با استفاده از خشک‌کن مایکروویو با توان ۴۰۰ وات و خشک‌کن هوای گرم با دمای ثابت ۷۰ °C قرار گرفتند. جرم نمونه‌ها در فواصل زمانی منظم و در

نرخ خشک شدن (DR) با استفاده از رابطه (۳) و بر اساس تغییرات محتوای رطوبت در فواصل زمانی متوالی فرآیند خشک کردن تعیین گردید.

$$\text{Drying Rate DR} = \frac{M(t+dt) - M_t}{dt} \quad (3)$$

در این رابطه، M_t نشان دهنده محتوای رطوبت در زمان t (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)، M_{t+dt} بیانگر محتوای رطوبت اندازه گیری شده در زمان $t + dt$ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) و dt نشان دهنده زمان سپری شده بین دو اندازه گیری متوالی (دقیقه) است.

۲-۶- مدل سازی ریاضی (Mathematical Modeling)

به منظور شناسایی مناسب ترین مدل جهت توصیف رفتار خشک شدن زرشک، هفت مدل رایج خشک کردن لایه نازک مورد بررسی قرار گرفتند. عملکرد مدل ها از طریق مقایسه مقادیر تجربی و پیش بینی شده نسبت رطوبت و با استفاده از شاخص های آماری از جمله ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و کای اسکور کاهش یافته (χ^2) ارزیابی شد. تعاریف ریاضی این شاخص های آماری ارائه شده است [14].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum (MR_i - MR_{pre,i}) \times (MR_i - MR_{exp,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [MR_i - MR_{pre,i}]^2 \times [\sum_{i=1}^N [MR_i - MR_{exp,i}]^2]}}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}} \quad (6)$$

در این روابط، N نشان دهنده تعداد کل نقاط داده های تجربی، z بیانگر تعداد پارامترهای مدل، و MR_{exp} و MR_{pre} به ترتیب معرف مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده نسبت رطوبت هستند.

$$\text{Moisture Content (MC, \%wb)} = \frac{W_w - W_d \times 100}{W_w}$$

(1)

پارامترهای (W_w) و (W_d) به ترتیب نشان دهنده وزن

نمونه ها قبل از خشک کردن و بعد از خشک کردن

هستند، در حالی که (w_b) بیانگر کسر رطوبت بر پایه تر

است. رطوبت تعادلی (EMC) با ادامه فرآیند

خشک کردن تا زمانی که در اندازه گیری های متوالی

وزن نمونه ها مقدار ثابتی حاصل شد، تعیین گردید.

۲-۵-۱- نسبت رطوبت

نسبت رطوبت (MR) با استفاده از مقادیر محتوای

رطوبت اندازه گیری شده در زمان های متوالی فرآیند

خشک کردن تحت شرایط دمایی مختلف تعیین گردید.

داده های تجربی به دست آمده از فرآیند خشک شدن،

سپس برای محاسبه نسبت رطوبت (MR) و نرخ

خشک شدن (DR) با استفاده از روابط ارائه شده در زیر

مورد استفاده قرار گرفتند.

$$\text{Moisture Ratio MR} = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

در این روابط، (M_t) نشان دهنده محتوای رطوبت در

زمان مشخصی از فرآیند خشک کردن، (M_o) بیانگر

محتوای رطوبت اولیه و (M_e) رطوبت تعادلی (kg

water/kg dm) است. نرخ خشک شدن (DR) بر (4)

کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک در دقیقه

می شود؛ همچنین ($M_t + dt$) محتوای رطوبت در زمان

($t + dt$) و (t) نشان دهنده زمان خشک کردن (دقیقه) است.

از آنجا که مقدار رطوبت تعادلی (M_e) در مقایسه با

مقادیر (M_t) و (M_o) بسیار ناچیز بود، معادله (۲) به

صورت ساده شده (M_t / M_o) در نظر گرفته شد. نسبت

رطوبت حاصل در مراحل بعدی برای تحلیل سینتیک

خشک شدن زرشک با استفاده از مدل های ریاضی

مناسب مورد استفاده قرار گرفت [13].

۲-۵-۲- نرخ خشک شدن

Table 2- Thin-layer drying models

Model name*	Model	References
Newton	$MR = \exp(-kt)$	[15]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[16]
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[17]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	[18]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[19], [20]
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[21], [22]
Wang and Singh	$MR = 1 + bt + at^2$	[23]

ضرایب ثابت معادله هستند n و b ، a ثابت خشک شدن بوده و k در این رابطه، *

۷-۲- تعیین ضریب نفوذ مؤثر

با صرف نظر کردن از جملات مرتبه بالاتر در معادله (۸) و در نظر گرفتن تنها جمله اول سری، رابطه ضریب نفوذ رطوبت زرشک ساده سازی شده و مطابق معادله (۹) بیان گردید .

در این چارچوب، ضریب نفوذ مؤثر (D_{eff}) از شیب (K) نمودار خطی حاصل از ترسیم $\ln(MR)$ بر حسب زمان خشک کردن (t) تعیین شد. رابطه $\ln(MR)$ در برابر زمان، خط مستقیمی با شیب منفی به دست داد که در آن، K از نظر ریاضی از طریق معادله (۱۰) با D_{eff} مرتبط است.

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (10)$$

حجم (V) هر دانه زرشک با استفاده از روش جابه جایی تولوئن و بر روی نمونه ای شامل ۱۰۰ دانه زرشک اندازه گیری شد. سپس با برابر در نظر گرفتن حجم اندازه گیری شده با حجم یک کره، شعاع معادل هر دانه زرشک محاسبه گردید که در نتیجه شعاع مؤثر (r_e) برابر با $3/57 \times 10^{-4}$ متر به دست آمد.

$$V = \frac{4}{3} \pi r_e^3 \quad (11)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان

خشک کردن

محتوای رطوبت اولیه نمونه های تازه زرشک حدود ۷۴/۵۵٪ (بر مبنای تر) بود که نشان دهنده میزان بالای آب و تأثیر قابل توجه آن بر رفتار خشک شدن است.

در طی فرآیند خشک کردن، فرض شد که انتقال رطوبت به سمت سطح ماده عمدتاً از طریق پدیده نفوذ انجام می شود که می توان آن را به صورت ریاضی با استفاده از قانون دوم فیک برای هندسه صفحه ای توصیف کرد [12].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (7)$$

با اعمال شرایط اولیه و مرزی مناسب، کرانک راه حل های تحلیلی برای نفوذ رطوبت در مواد با اشکال هندسی مختلف ارائه کرد. برای هندسه کروی و با فرض ثابت بودن ضریب نفوذ، رابطه مربوطه به صورت زیر بیان می شود:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (8)$$

در این رابطه D_{eff} بیانگر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2/s) و L نشان دهنده نصف ضخامت لایه (m) است. در زمان های طولانی تر خشک کردن، سهم جملات مرتبه بالاتر در حل سری ناچیز می شود؛ بنابراین با در نظر گرفتن تنها جمله اول ($n=0$)، می توان تقریب دقیقی از رابطه به دست آورد که به صورت لگاریتمی، همان گونه که در ادامه نشان داده شده است، بیان می شود.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right) t \quad (9)$$

کرد، به طوری که زمان خشک شدن در روش هوای گرم به ۱۲۰۰ تا ۱۲۳۰ دقیقه و در روش مایکروویو به ۱۲ تا ۱۰/۵ دقیقه کاهش یافت. در مقابل، پیش تیمار پلاسمای DBD اثر قوی تری نشان داد و زمان خشک شدن را در روش هوای گرم به ۹۳۰ دقیقه و در روش مایکروویو به ۱۱/۵ تا ۱۰/۵ دقیقه کاهش داد. نمونه های تیمار شده با پلاسما در یک زمان خشک کردن مشخص، همواره نسبت رطوبت پایین تری نسبت به نمونه های بدون تیمار نشان دادند که بیانگر افزایش کارایی فرآیند خشک کردن است. این بهبود را می توان به تغییرات ایجاد شده در سطح ماده بر اثر پلاسما، از جمله حکاکی میکرونی و افزایش تخلخل سطحی، نسبت داد که موجب تسهیل نفوذ رطوبت و کاهش مقاومت انتقال جرم در طی خشک کردن می شود [24]. در مجموع، خشک کردن مایکروویو سریع ترین حذف رطوبت را نشان داد و ترکیب پیش تیمار پلاسمای DBD با خشک کردن مایکروویو کوتاه ترین زمان خشک شدن را به همراه داشت که بیانگر اثر هم افزایی بین اصلاح سطحی ناشی از پلاسما و سازوکار گرمایش حجمی انرژی مایکروویو است.

شکل های ۲ و ۳ تغییرات نسبت رطوبت (MR) و نرخ خشک شدن (DR) را بر حسب زمان خشک کردن برای نمونه های تیمار شده با پلاسما و نمونه های شاهد، تحت شرایط خشک کردن با مایکروویو و هوای گرم نشان می دهند. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، منحنی های خشک شدن در تمامی تیمارها الگوی دو مرحله ای را نشان دادند که شامل یک مرحله اولیه با حذف سریع رطوبت و به دنبال آن یک دوره با نرخ کاهشی بود. این رفتار برای محصولات کشاورزی با رطوبت بالا متداول است و بیانگر غالب بودن تبخیر سطحی در مرحله ابتدایی و مهاجرت رطوبت از داخل به سطح در مراحل بعدی خشک کردن است [12]. نتایج همچنین نشان داد که زمان خشک شدن زرشک به طور معنی داری تحت تأثیر پیش تیمار پلاسما و نیز روش خشک کردن قرار گرفت. نمونه شاهد در خشک کن هوای گرم به طولانی ترین زمان خشک شدن (۱۲۸۰ دقیقه) نیاز داشت، در حالی که همان نمونه با استفاده از خشک کردن مایکروویو تنها طی ۱۵ دقیقه خشک شد که بیانگر نقش مؤثر گرمایش حجمی در تسریع حذف رطوبت است. پیش تیمار پلاسما از نوع قوس گلاید (Glide Arc) کاهش محدودی در زمان خشک شدن ایجاد

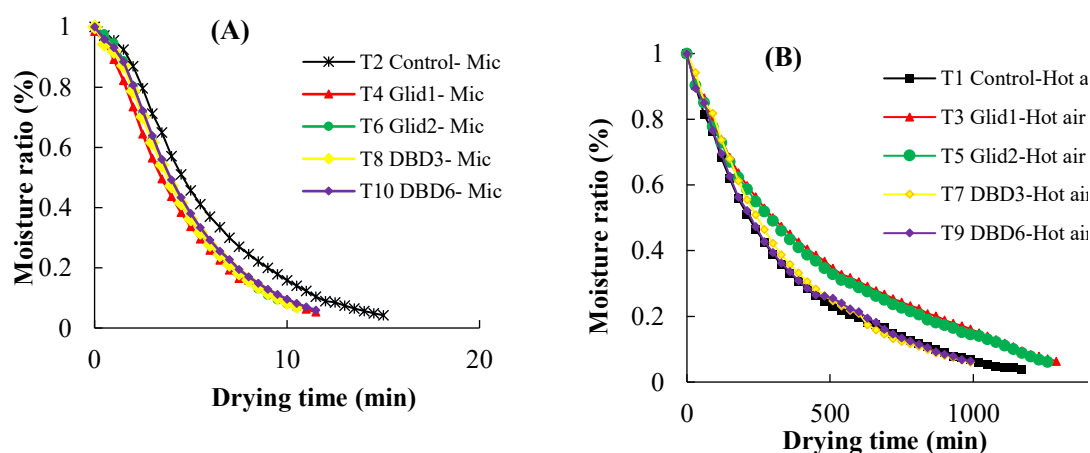


Fig. 2: Variation of moisture ratio with drying time for the barberry (A: Microwave drying, B: hot air drying)

۳-۲- مشخصات نرخ خشک شدن

شکل ۳ تغییرات نرخ خشک شدن را بر حسب زمان خشک کردن برای نمونه‌های زرشک نشان می‌دهد. در هر دو روش خشک کردن، نرخ خشک شدن در ابتدای فرآیند به دلیل محتوای رطوبت اولیه بالا در بیشترین میزان خود بود و با پیشرفت فرآیند خشک شدن، به تدریج کاهش یافت. در خشک کردن میکروویو، نرخ خشک شدن اولیه به طور قابل توجهی بالاتر از روش هوای گرم بود که نشان دهنده جذب سریع انرژی توسط مولکول‌های آب آزاد است. با کاهش محتوای رطوبت، نرخ خشک شدن به دلیل کاهش جذب میکروویو و افزایش مقاومت در برابر حرکت رطوبت، کاهش یافت. پیش تیمار پلاسما منجر به نرخ‌های خشک شدن بالاتر در مراحل اولیه و میانی فرآیند، به ویژه در شرایط خشک کردن میکروویو شد. این اثر در نمونه‌های

تیمار شده با پلاسما DBD مشهودتر بود که نشان دهنده یک تعامل هم افزا (سینرژیک) بین پیش تیمار پلاسما و گرمایش میکروویو است. افزایش نرخ خشک شدن را می‌توان با تخریب لایه مومی سطحی و ساختارهای دیواره سلولی ناشی از پلاسما توجیه کرد که باعث کاهش مقاومت در برابر انتقال رطوبت می‌شود [25].

در خشک کردن با هوای گرم، اگرچه نرخ خشک شدن کلی کمتر از روش میکروویو بود، اما نمونه‌های پیش تیمار شده با پلاسما همچنان عملکرد خشک کردن بهتری را نسبت به نمونه شاهد نشان دادند. این امر تأیید می‌کند که پیش تیمار پلاسما صرف نظر از روش خشک کردن مؤثر است، هرچند تأثیر آن در روش میکروویو بارزتر می‌باشد.

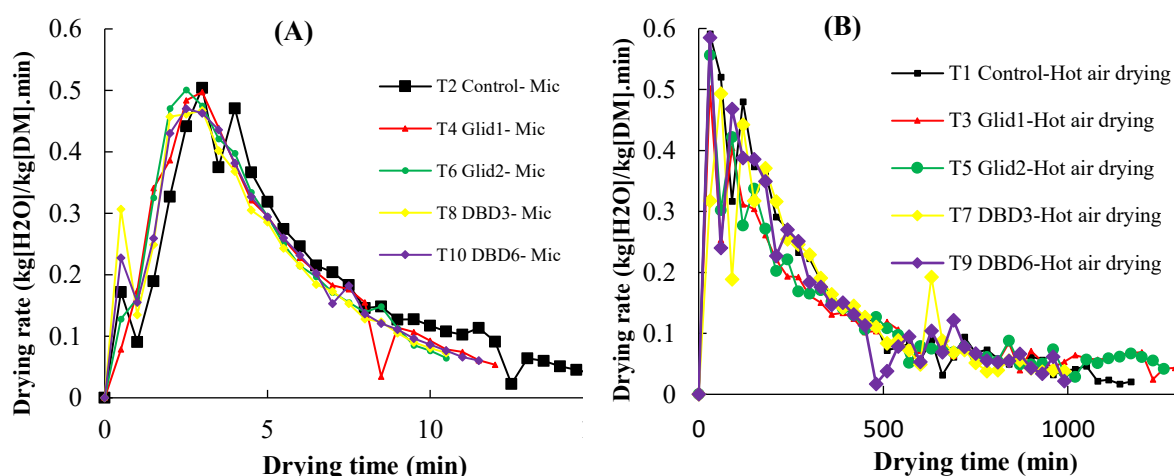


Fig. 3: Variation of drying rate with drying time for barberry (A: Microwave Drying, B: hot air drying)

روش‌های خشک کردن، مدل میدیلی و همکاران (Midilli *et al.*) به طور مستمر بهترین برازش را بر داده‌های تجربی نشان داد؛ به طوری که مقادیر R^2 آن در محدوده ۰/۹۹ تا ۰/۹۹۹۹ قرار داشت و کمترین مقادیر χ^2 و RMSE را به خود اختصاص داد. این سطح بالا از همبستگی نشان می‌دهد که مدل میدیلی قادر است رفتار پیچیده خشک شدن زرشک، از جمله اثرات

۳-۳- ارزیابی مدل‌های خشک کردن لایه نازک

به منظور توصیف سینتیک خشک شدن زرشک تحت شرایط مختلف پیش تیمار و خشک کردن، هفت مدل خشک کردن لایه نازک مورد ارزیابی قرار گرفتند. پارامترهای آماری R^2 ، χ^2 و RMSE برای تمامی مدل‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است. در تمامی تیمارها و

شکل ۴ نشان داده شده است)، که این امر مناسب بودن مدل میدیلی و همکاران را برای شبیه‌سازی فرآیند، بهینه‌سازی و طراحی عملیات خشک‌کردن زرشک تأیید می‌کند [25]. رفتار خطی مشاهده‌شده در نمودارهای $\ln(MR)$ بر حسب زمان (شکل ۴)، اعتبار رویکرد مبتنی بر نفوذ را برای توصیف انتقال رطوبت در دوره نرخ کاهشی خشک‌شدن تأیید می‌کند. شیب‌های تندتر مشاهده‌شده برای نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با پلاسما، به‌ویژه در خشک‌کردن مایکروویوی، نشان‌دهنده ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بالاتر است که با مقادیر $Deff$ گزارش‌شده در جدول ۴ مطابقت دارد.

هم‌زمان پیش‌ تیمار پلاسما و روش خشک‌کردن را به‌دقت پیش‌بینی کند. عملکرد برتر مدل میدیلی را می‌توان به ساختار انعطاف‌پذیر آن نسبت داد که شامل هر دو جمله نمایی و خطی است؛ این ویژگی به مدل اجازه می‌دهد تا هر دو مرحله اولیه حذف سریع رطوبت و دوره کاهشی بعدی را به‌خوبی توصیف کند. در مقابل، مدل‌های ساده‌تری مانند نیوتن (Newton) و هندرسون-پایس (Henderson-Pabis) دقت پیش‌بینی کمتری نشان دادند، به‌ویژه برای نمونه‌های تیمار شده با پلاسما که رفتار خشک‌شدن آن‌ها از یک زوال نمایی ساده انحراف داشت. پیش‌بینی‌های مدل انطباق بسیار نزدیکی با داده‌های تجربی نسبت رطوبت داشتند (همان‌طور که در

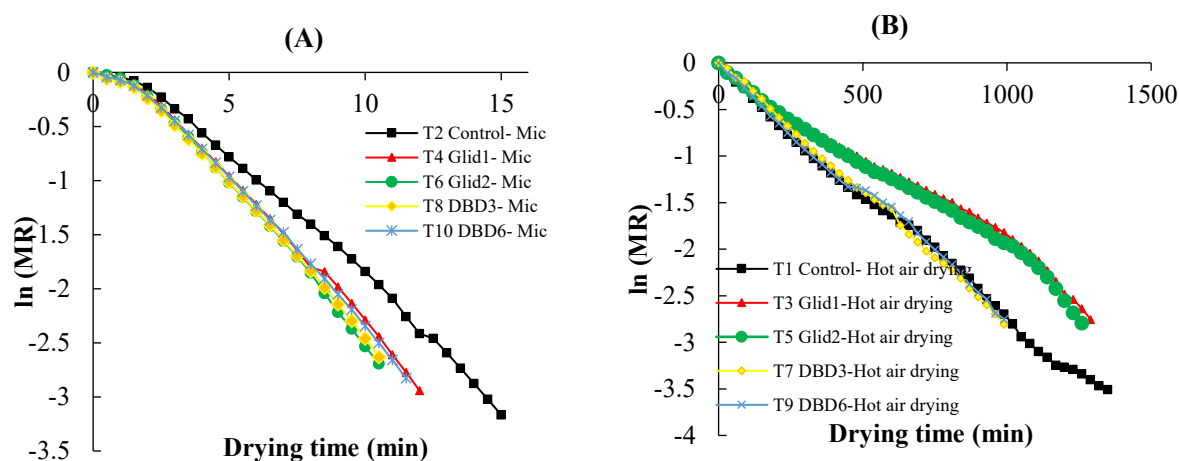


Figure 4. $\ln(MR)$ versus time (min) for barberries at different treatment (A: Microwave Drying, B: hot air drying)

Table3: Results of statistical analysis on the modeling of moisture content and drying time for barberry

Variable	Model	R^2	χ^2	RMSE	k	n	a	b	c
T1 Control-hot air drying	Newton	0.994	0.0154	0.0199	0.002932	0	0	0	0
	Page	0.9985	0.0039	0.0102	0.005396	0.08987	0	0	0
	Modified Page	0.9985	0.0039	0.01	0.003	0.8981	0	0	0
	Logarithmic	0.9976	0.0062	0.013	0.003143	0	0.9501	0	0.03249

	Henderson and Pabis	0.9958	0.0109	0.017	0.002816	0	.9629	0	0
	Midilli	0.9986	0.0037	0.0101	0.0060	0.8809	1.013	1.73×10^{-6}	0
	Wang and Singh	0.948	0.1349	0.596	0	0	0.00211	1.77×10^{-6}	
T2 Control-Mic	Newton	0.961	0.1206	0.0634	0.1622	0	0	0	0
	Page	0.9961	.012	.0203	.0734	1.419	0	0	0
	Modified Page	0.9961	0.012	0.0203	0.1588	1.419	0	0	0
	Logarithmic	0.9889	.0343	0.035	0.1405	0	1.231	0	-0.1338
	Henderson and Pabis	0.9812	0.0582	0.0448	0.1841	0	1.135	0	0
	Midilli	0.9977	0.0072	0.163	0.07475	1.457	1.02	0.0023	0
	Wang and Singh	0.986	0.0434	0.0387	0	0	-0.1236	0.0039	0
T3 Glide1-hot air drying	Newton	0.9866	0.0348	0.0284	0.00205	0	0	0	0
	Page	0.9972	0.0074	0.0132	0.005031	0.858	0	0	0
	Modified Page	0.9971	0.0074	0.0131	0.0021	0.8573	0	0	0
	Logarithmic	0.9943	0.0148	0.019	0.002159	0	0.9151	0	0.04166
	Henderson and Pabis	0.9927	0.019	0.021	0.001951	0	0.9474	0	0
	Midilli	0.9983	0.004	0.0105	0.000845	0.07643	1.018	4.49×10^{-5}	0
	Wang and Singh	0.9551	0.1162	0.0526	0	0	-0.0016	7.63×10^{-7}	0
	Newton	0.9569	0.1094	0.9569	0.1898	0	0	0	0

T4 Glide1- Mic	Page	0.99 64	0.00 92	0.02	0.087 41	1.453	0	0	0
	Modified Page	0.99 64	0.00 92	0.02	0.186 9	1.543	0	0	0
	Logarithmic	0.98 81	0.03	0.03 7	0.158 5	0	1.26 3	0	- 0.1646
	Henderson and Pabis	0.97 91	0.05 29	0.97 82	0.216 3	0	1.13 8	0	0
	Midilli	0.99 85	0.00 37	0.01 32	0.088 59	1.511	1.02 1	0.0038	0
	Wang and Singh	0.98 39	.041	0.04 22	0	0	- 0.1448	0.0054	0
T5 Glide2- hot air drying	Newton	0.98 66	0.03 38	0.02 84	0.002 15	0	0	0	0
	Page	0.99 82	0.00 44	0.01 04	0.005 494	0.851 3	0	0	
	Modified Page	0.98 69	0.03 31	0.02 81	0.002	0.875 4	0	0	0
	Logarithmic	0.99 37	0.01 6	0.01 95	0.002	0	0.93 44	0	0
	Henderson and Pabis	0.99 89	0.00 28					- 2.95×10^{-5}	0
				0.00 83	0.007 5	0.002 8	1.00 9		
	Midilli	0.95 42	0.11 53	0.05 3	0	0	- 0.0017×10^{-7}	8.33×10^{-7}	0
T6 Glide2- Mic	Newton	0.95 32	0.10 28	0.06 99	0.196 8	0	0	0	0
	Page	0.99 73	0.00 6	0.01 73	0.089 55	1.48	0	0	0
	Modified Page	0.99 73	0.00 6	0.01 73	0.165 8	1.48	0	0	0
	Logarithmic	0.98 88	0.02 46	0.03 6	0.146 8	0	1.33 9	0	- 0.2519
	Henders on and Pabis	0.97 61	0.52 5	0.05 12	0.224 3	0	1.13 3	0	0

	Midilli	0.99 87	0.00 28	0.01 25	0.090 64	1.535	1.01 6	0.0041	0
	Wang and Singh	0.98 39	0.03 52	0.04 2	0	0	- 0.1481	0.0054	0
T7 DBD3- hot air drying	Newton	0.99 83	0.00 43	0.01 14	0.002 72	0	0	0	0
	Page	0.99 85	0.00 37	0.01 08	0.002 39	10.02 4	0	0	
	Modified Page	0.99 83	0.00 42	0.01 13	0.002 72	1.029	0	0	0
	Logarithmi c	0.99 87	0.00 30	0.01 02	0.002 8	0	1.01 6	0	- 0.0004 9
	Henderson and Pabis	0.99 87	0.00 33	0.01 01	0.002 814	0	1.01 7	0	
	Midilli	0.99 88	0.00 31	0.01 01	0.002 4	1.029	1.01 2	1.3×10^{-5}	0
	Wang and Singh	0.98 87	0.02 82	0.02 97	0	0	- 0.0021 6	1.28×10^{-6}	0
T8 DBD3- Mic	Newton	0.96 32	0.07 6	0.06 02	0.197 8	0	0	0	0
	Page	0.99 80	0.00 42	0.01 45	0.101 2	1.408	0	0	0
	Modified Page	0.99 8	.004 2	0.01 45	0.196 5	1.408	0	0	0
	Logarithmi c	0.99 05	0.01 97	0.03 22	0.147 5	0	1.29 8	0	- 0.2324
	Henderson and Pabis	0.97 93	0.04 27	0.04 62	0.220 5	0	1.10 8	0	0
	Midilli	0.99 88	0.00 26	0.01 19	0.094 3	1.5	0.99 84	0.0041	0
	Wang and Singh	0.98 92	0.02 24	0.03 34	0	0	- 0.1511	0.0058	0
T9 DBD6- hot air drying	Newton	0.99 83	0.00 43	0.01 14	0.002 764	0	0	0	0
	Page	0.99 85	0.00 37	0.01 08	0.002 39	1.024	0	0	0
	Modified Page	0.99 85	0.00 37	0.01 08	0.002 756	1.024	0	0	0

T10 DBD6	Logarithmic	0.99 87	0.00 32	0.01 02	0.002 586	0	1.01 4	0	0.00 607
	Henderson and Pabis	0.99 87	0.00 33	0.01 01	0.002 814	0	1.01 7	0	0
	Midilli	0.99 88	0.00 31	0.01 01	0.002 406	1.029	1.01 2	1.32× 10 ⁻⁵	
	Wang and Singh	0.98 87	0.02 82	0.02 97	0	0	- 0.0021 6	1.289 ×10 ⁻⁶	
	Newton	0.96 08	0.09 18	0.06 32	0.191 5	0	0	0	0
	Page	0.99 78	0.00 52	0.01 54					0
					0.092 41	1.43	0	0	
T10 DBD6	Modified Page	0.99 78	0.00 52	0.01 54	0.189 1	1.43	0	0	0
	Logarithmic	0.98 97	0.02 42	0.03 39	0.150 7	0	1.27 5	0	- 0.1963
	Henderson and Pabis	0.97 92	0.04 87	0.04 71	0.215 5	0	1.12 1	0	0
	Midilli	0.99 89	0.00 26	0.01 15	0.088 54	1.506	1.00 6	0.0036	0
	Wang and Singh	0.98 76	0.02 9	0.03 63	0	0	- .0146	0.0054	0

۳-۴- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (D_{eff})

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (D_{eff}) از طریق به کارگیری قانون دوم فیک برای هندسه کروی و بر اساس نتایج تجربی خشک کردن برآورد گردید. در این تحلیل، ثابت بودن ضریب نفوذ، توزیع یکنواخت رطوبت اولیه و ناچیز بودن میزان چروکیدگی نمونه‌ها فرض شد. در زمان‌های طولانی فرآیند خشک کردن، حل تحلیلی معادله فیک به شکلی خطی ساده می‌شود که امکان تعیین D_{eff} را از طریق شیب نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان خشک کردن فراهم می‌سازد. مقادیر محاسبه شده D_{eff} برای تیمارهای مختلف در جدول ۳ خلاصه شده

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش تیمار پلاسما در هر دو روش خشک کردن، به‌طور قابل توجهی مقدار D_{eff} را در مقایسه با نمونه‌های شاهد افزایش داد. این بهبود نشان‌دهنده تسهیل انتقال رطوبت درونی در اثر اصلاحات فیزیکی سطح و ساختار زیرسطحی زرشک توسط پلاسما است. در میان تیمارهای پلاسمایی، پلاسمای DBD در شرایط خشک کردن مشابه، مقادیر D_{eff} بالاتری نسبت به پلاسمای قوس گلاید نشان داد. بیشترین مقدار ضریب نفوذ ثبت شده، برابر با $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ برای نمونه‌های پیش تیمار شده با پلاسمای DBD در شرایط خشک کردن میکروویو بود، در حالی

که کمترین مقدار، یعنی $6/88 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ برای تیمار قوس گلاید در خشک‌کن هوای گرم مشاهده شد. این رفتار را می‌توان به تخلیه یکنواخت‌تر و حاکاکی میکرونی قوی‌تر در پلاسمای DBD نسبت داد که موجب تشکیل ریزکانال‌ها و افزایش تخلخل مؤثر شده و در نتیجه مقاومت داخلی در برابر نفوذ رطوبت را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، خشک‌کردن مایکروویو در تمامی تیمارها منجر به مقادیر D_{eff} به مراتب بالاتری نسبت به خشک‌کردن با هوای گرم شد. برای نمونه، در نمونه‌های شاهد، مقدار D_{eff} در خشک‌کردن مایکروویو برابر با $7/90 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ بود که به‌طور معنی‌داری بیشتر از مقدار $9/78 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ مشاهده‌شده در خشک‌کن هوای گرم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌تیمار پلازما در هر دو روش خشک‌کردن، به‌طور قابل توجهی مقدار D_{eff} را در مقایسه با نمونه‌های شاهد افزایش داد. این بهبود نشان‌دهنده تسهیل انتقال رطوبت درونی در اثر اصلاحات فیزیکی سطح و ساختار زیر-سطحی زرشک توسط پلازما است. در میان تیمارهای پلاسمایی، پلاسمای DBD در شرایط خشک‌کردن مشابه، مقادیر D_{eff} بالاتری نسبت به پلاسمای قوس گلاید نشان داد. بیشترین مقدار ضریب نفوذ ثبت‌شده، برابر با $9.73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ برای نمونه‌های پیش‌تیمارشده با پلاسمای DBD در شرایط خشک‌کردن مایکروویو بود، در حالی که کمترین مقدار، یعنی $6/88 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ برای تیمار قوس گلاید در

خشک‌کن هوای گرم مشاهده شد. این رفتار را می‌توان به تخلیه یکنواخت‌تر و حکاکی میکرونی قوی‌تر در پلاسمای DBD نسبت داد که موجب تشکیل ریزکانال‌ها و افزایش تخلخل مؤثر شده و در نتیجه مقاومت داخلی در برابر نفوذ رطوبت را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، خشک‌کردن مایکروویو در تمامی تیمارها منجر به مقادیر D_{eff} به مراتب بالاتری نسبت به خشک‌کردن با هوای گرم شد. برای نمونه، در نمونه‌های بدون پیش‌تیمار، مقدار D_{eff} در خشک‌کردن مایکروویو برابر با $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ بود که به‌طور معنی‌داری بیشتر از مقدار $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ $\times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ مشاهده‌شده در خشک‌کن هوای گرم است. سازوکار گرمایش حجمی در خشک‌کردن مایکروویو، از طریق ایجاد گرادیان فشار بخار درونی، حرکت رطوبت داخلی را تسریع می‌کند که این امر با اصلاحات سطحی ناشی از پلاسما، اثر هم‌افزایی ایجاد می‌نماید. در نتیجه، بالاترین مقادیر D_{eff} برای نمونه‌های پیش‌تیمارشده با پلاسمای DBD که تحت خشک‌کن مایکروویو قرار داشتند، مشاهده شد. مقادیر گزارش‌شده برای D_{eff} در محدوده معمول گزارش‌شده برای محصولات کشاورزی با رطوبت بالا قرار دارند که این امر صحت فیزیکی رویکرد مبتنی بر نفوذ به‌کاررفته در این مطالعه را تأیید می‌کند. این نتایج نشان می‌دهند که پیش‌تیمار پلاسما، به‌ویژه پلاسمای DBD در ترکیب با خشک‌کردن مایکروویو، به‌طور مؤثری باعث تقویت نفوذ رطوبت درونی و بهبود عملکرد کلی فرآیند خشک‌کردن می‌شود.

Table 4. Effective moisture diffusivity and correlation for the performed treatment.

Treatment	D _{eff}	R ²
T1 Control-Hot air dryer	9.77626×10 ⁻⁸	0.9958
T2 Control- Microwave	7.90067×10 ⁻⁶	0.9958
T3 Glide1-Hot air dryer	6.87959×10 ⁻⁸	0.987
T4 Glide1- Microwave	9.22227×10 ⁻⁶	0.992
T5 Glide2-Hot air dryer	7.24167×10 ⁻⁸	0.9894
T6 Glide2- Microwave	9.24762×10 ⁻⁶	0.9885
T7 DBD3-Hot air dryer	1.01383×10 ⁻⁷	0.9987

T8 DBD3- Microwave	9.38883×10^{-6}	0.9903
T9 DBD6-Hot air dryer	9.41418×10^{-8}	0.9939
T10 DBD6- Microwave	9.72919×10^{-6}	0.9911

پلاسمای قوس گلاید اثر قوی‌تری از خود نشان داد. ترکیب پیش‌ تیمار پلاسما به‌ویژه پلاسمای DBD با خشک‌کردن مایکروویو منجر به کوتاه‌ترین زمان خشک‌کردن و بالاترین نرخ خشک‌کردن شد که این امر بیانگر وجود اثر هم‌افزایی بین گرمایش حجمی مایکروویو و اصلاحات سطحی ایجادشده توسط پلاسما است. مدل‌سازی داده‌های تجربی خشک‌کردن نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده‌های آزمایشگاهی دارد؛ به‌طوری‌که این مدل با ضرایب تعیین بالا ($R^2 = 0.9900-0.999$) و کمترین شاخص‌های خطا در میان مدل‌های مورد بررسی، توانایی برتری در توصیف سینتیک خشک‌کردن در شرایط مختلف تیمار از خود نشان داد. علاوه بر این، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (D_{eff}) نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع پیش‌ تیمار پلاسما و روش خشک‌کردن قرار گرفت. بیشترین مقدار D_{eff} برابر با $9/73 \times 10^{-6}$ متر مربع بر ثانیه در نمونه‌های تیمار شده با پلاسمای DBD که تحت خشک‌کردن مایکروویو قرار داشتند، مشاهده شد؛ در حالی که کمترین مقدار آن، یعنی $6/88 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه، مربوط به نمونه‌های تیمار شده با پلاسمای قوس گلاید در خشک‌کن هوای گرم بود. این نتایج نشان‌دهنده بهبود قابل توجه انتقال جرم داخلی در اثر پیش‌ تیمار پلاسما، به‌ویژه در ترکیب با خشک‌کردن مایکروویو است. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پیش‌ تیمار پلاسما می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای بهبود فرآیندهای خشک‌کردن مورد استفاده قرار گیرد و در عین حال با کاهش مصرف انرژی و زمان

۳-۵- اثر برهم‌کنش پیش‌ تیمار پلاسما و روش

خشک‌کردن

نتایج به‌روشنی نشان داد که برهم‌کنش بین پیش‌ تیمار پلاسما و روش خشک‌کردن نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد فرآیند خشک‌کردن دارد. اگرچه هر دو نوع پلاسما، شامل قوس گلاید و DBD، موجب بهبود رفتار خشک‌کردن شدند، اما پلاسمای DBD اثر قوی‌تری نشان داد، به‌ویژه زمانی که با خشک‌کردن مایکروویو ترکیب شد. خشک‌کردن مایکروویو نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با پلاسما منجر به کوتاه‌ترین زمان خشک‌کردن و بالاترین نرخ خشک‌کردن گردید که بیانگر ظرفیت بالای این رویکرد ترکیبی برای کاربردهای صنعتی است؛ به‌ویژه در شرایطی که بهره‌وری زمانی و انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهبودهای مشاهده‌شده تأیید می‌کند که پیش‌ تیمار پلاسما به‌عنوان یک روش اصلاح فیزیکی مؤثر عمل می‌کند که بدون نیاز به افزودنی‌های شیمیایی، فرآیند حذف رطوبت را تسهیل می‌نماید [۲۶-۲۷].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر دو نوع پیش‌ تیمار پلاسمای سرد شامل پلاسمای DBD و قوس گلاید بر رفتار خشک‌کردن زرشک (*Berberis vulgaris* L.) در ترکیب با دو روش خشک‌کردن مایکروویو و هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیش‌ تیمار پلاسما به‌طور قابل توجهی کارایی فرآیند خشک‌کردن را افزایش می‌دهد و در این میان، پلاسمای DBD نسبت به

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض (تضاد) منافع مالی یا شخصی در رابطه با این پژوهش وجود ندارد.

بیانیه تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

بدین‌وسیله تأیید می‌گردد که تمامی نویسندگان در مراحل طراحی، تحلیل، نگارش و تأیید نسخه نهایی این مقاله مشارکت فعال داشته‌اند.

۵-منابع

- [1] S. Gorjian, T. Tavakkoli Hashjin, M. H. Khoshtaghaza, and A. Nikbakht, "Drying kinetics and quality of barberry in a thin layer dryer," *J. Agric. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 303–314, 2011.
- [2] S. L. Talebzadeh et al., "Interaction of different drying methods and storage on appearance, surface structure, energy, and quality of *Berberis vulgaris* var. *asperma*," *Foods*, vol. 11, no. 19, p. 3003, 2022.
- [3] H. Khafajeh, M. Zarien, and M. Younesi Alamouti, "Predicting the Kinetics and energy efficiency of drying the medicinal plant Lemon verbena (*Lippia citriodora* Kunth) using artificial neural networks," *Technol. Med. Aromat. Plants Iran*, vol. 7, no. 1, pp. 138–151, 2025.
- [4] H. Khafajeh, A. Banakar, M. Zarein, and M. Khoshtaghaza, "Investigation of mulberry drying kinetics and moisture Diffusivity under microwave Hot air dryer," *Food Sci. Technol.*, vol. 11, no. 45, pp. 143–150, 2014.
- [5] L. A. Yanclo, G. Sigge, Z. A. Belay, A. B. Oyenih, F. October, and O. J. Caleb, "Effects of Cold Plasma Pretreatment and Cultivar on the Drying Characteristics, Biochemical, and Bioactive Compounds of 'Tropica' and 'Keitt' Mangoes," *J. Biosyst. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 135–155, 2024.
- [6] T. Bao, X. Hao, M. R. I. Shishir, N. Karim, and W. Chen, "Cold plasma: An emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices," *Food Chem.*, vol. 337, p. 127783, 2021.
- [7] A. Kamkari, S. Dadashi, M. K. Heshmati, J. Dehghannya, and Y. Ramezan, "The effect of cold plasma pretreatment on drying efficiency of beetroot by intermittent microwave-hot air (IMHA) hybrid dryer method: Assessing drying kinetic, physical properties, and microstructure of the product," *LWT*, vol. 212, p. 117010, 2024.

فرآیند، به حفظ ویژگی‌های تغذیه‌ای و دارویی زرشک در کاربردهای تجاری و صنعتی کمک نماید.

قدردانی: این پژوهش با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران (INSF) تحت شماره گرنت ۴۰۴۰۱۱۱۲ انجام شده است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش در متن آورده شده است و خارج از قوانین این نشریه به اشتراک گذاشته نمی‌شوند.

تعارض منافع

- [8] H. R. G. Marzdashty, N. N. Safa, and M. R. Golghand, "Generation of dielectric barrier discharge plasma using a modulated voltage." Google Patents, 04-May-2017.
- [9] M. Ahmadnia, M. Sadeghi, R. Abbaszadeh, and H. R. Ghomi Marzdashti, "Decontamination of whole strawberry via dielectric barrier discharge cold plasma and effects on quality attributes," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 45, no. 1, p. e15019, 2021.
- [10] S. Akaber, Y. Ramezan, and M. R. Khani, "Effect of post-harvest cold plasma treatment on physicochemical properties and inactivation of *Penicillium digitatum* in Persian lime fruit," *Food Chem.*, vol. 437, p. 137616, 2024.
- [11] İ. Doymaz and O. İsmail, "Drying characteristics of sweet cherry," *Food Bioprod. Process.*, vol. 89, no. 1, pp. 31–38, 2011.
- [12] Y. Xie et al., "Peanut drying: Effects of various drying methods on drying kinetic models, physicochemical properties, germination characteristics, and microstructure," *Inf. Process. Agric.*, vol. 10, no. 4, pp. 447–458, 2023.
- [13] A. Midilli and H. Kucuk, "Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 7, pp. 1111–1122, 2003.
- [14] A. Ayensu, "Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow," *Sol. energy*, vol. 59, no. 4–6, pp. 121–126, 1997.
- [15] G. E. Page, *Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers*. Purdue University, 1949.
- [16] G. M. White, I. J. Ross, and C. G. Poneleit, "Fully-exposed drying of popcorn," *Trans. ASAE*, vol. 24, no. 2, pp. 466–468, 1981.
- [17] P. K. Chandra and R. P. Singh, *Applied numerical methods for food and agricultural engineers*. CRC Press, 2017.

- [18] E. K. Akpınar, "Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits," *J. Food Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 75–84, 2006.
- [19] S. M. Henderson and S. J. Pabis, "Grain drying theory. 1. Temperature effect on drying coefficient," 1961.
- [20] H. O. Menges and C. Ertekin, "Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples," *J. Food Eng.*, vol. 77, no. 1, pp. 119–125, 2006.
- [21] A. Midilli, H. Kucuk, and Z. Yapar, "A new model for single-layer drying," *Dry. Technol.*, vol. 20, no. 7, pp. 1503–1513, 2002.
- [22] C. Y. Wang and R. P. Singh, "Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying," *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, vol. 11, no. 6, pp. 668–672, 1978.
- [23] R. Thirumdas, C. Sarangapani, and U. S. Annapure, "Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing," *Food Biophys.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, 2015.
- [24] Z. Maleki-Bohlooli, M. Dalvi-Isfahan, A. Elmizadeh, L. Taghipour, and S. Mohtashami, "Comparative effects of cold plasma and high-voltage electric field on physicochemical changes in persimmon during storage," *Appl. Food Res.*, p. 101171, 2025.
- [25] R. Sasikumar et al., "A comprehensive review on cold plasma applications in the food industry," *Sustain. Food Technol.*, 2025.
- [26] S. Farooq et al., "Cold plasma treatment advancements in food processing and impact on the physicochemical characteristics of food products," *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 32, no. 5, pp. 621–638, 2023.



Scientific Research

Impact of Cold Plasma Pretreatments on Drying Behavior and Kinetic Characteristics of Barberry under two Drying Methods (Hot air dryer Vs. Microwave)

Hamid Khafajeh¹, Mohsen Dalvi-Isfahan²

1-Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, P.O. Box 74135-111, Jahrom, Iran

2-Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, P.O. Box 74135-111, Jahrom, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2026/04/11

Review: 2026/05/20

Accepted: 2026/05/23

Keywords:

Microwave heating;

Hot-air drying;

Cold plasma;

Thin-layer modeling;

Moisture ratio;

Drying rate.

DOI: 10.48311/fsct.2026.119207.83053

*Corresponding Author E-

khafajeh@jahromu.ac.ir

Dalvi@jahromu.ac.ir,
mohsen.Dalvi@gmail.com

Barberry (*Berberis vulgaris* L.) is a highly perishable fruit due to its high moisture content. This study investigated the effect of cold plasma pretreatments, including dielectric barrier discharge (DBD; 3 and 6 min) and Glide plasma (1 and 2 min), combined with microwave and hot-air drying methods. The results showed that the drying time of the control samples was about 1280 min under hot-air drying and 15 min under microwave drying. Plasma pretreatment significantly shortened the drying time. In the DBD treatment, the drying time decreased to about 930 min in hot-air drying and 10.5–11.5 min in microwave drying, while Glide plasma reduced the drying time to approximately 1200–1230 min and 10.5–12 min under hot-air and microwave drying, respectively. On average, plasma-treated samples exhibited a 45% reduction in drying time and a 20–30% increase in drying rate compared with the control. Among the evaluated models, the Midilli et al. model provided the best fit to the experimental data with R^2 values ranging from 0.9900 to 0.999. The effective moisture diffusivity ($Deff$) ranged from 6.88×10^{-8} to 9.73×10^{-6} m²/s, with the highest value observed in the DBD–microwave treatment and the lowest in the Glide–hot-air combination. Overall, the findings indicate that cold plasma pretreatment, particularly when combined with microwave drying, can significantly enhance drying efficiency and mass transfer in barberry.