

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



جمهوری اسلامی ایران
وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

موسسه آموزش و ترویج کشاورزی

گزارش علمی - فنی

عنوان:

مدل سازی ریاضی، پیش بینی سینتیک و بازده انرژی
مصرفی خشک کردن گیاه دارویی به لیمو (*Lippia citriodora* Kunth) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

شماره ثبت:

تاریخ:



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

موسسه آموزش و ترویج کشاورزی

گزارش علمی - فنی

عنوان:

مدل سازی ریاضی، پیش بینی سینتیک و بازده انرژی مصرفی خشک-
کردن گیاه دارویی به لیمو (*Lippia citriodora* Kunth) با استفاده از شبکه
عصبی مصنوعی

سیدمرتضی صداقت حسینی

شماره ثبت:

تاریخ:

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

موسسه آموزش و ترویج کشاورزی

عنوان گزارش: مدل سازی ریاضی، پیش بینی سینتیک و بازده انرژی مصرفی خشک کردن گیاه دارویی به لیمو (Lippia

citriodora Kunth) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

شماره مصوب:

نگارنده (گان):

مجری مسئول: -

مجری: سید مرتضی صداقت حسینی

ویراستار: -

همکاران: حمید خفاجه و محمد زارعین

مشاوران: -

محل اجرا: کرج، مرکز آموزش امام خمینی (ره)

تاریخ شروع: خردادماه ۱۴۰۳

مدت اجرا: ۹ ماه

ناشر: موسسه آموزش و ترویج کشاورزی

شمارگان: محدود

سال انتشار:

فهرست مطالب:

صفحه	عنوان
و	فهرست مطالب:
ز	فهرست شکل ها:
۱	مقدمه
۳	اهداف تحقیق
۴	پیشینه ی پژوهش
۹	مواد و روش ها
۹	دستگاه مایکروویو
۱۰	ترازو
۱۰	تعیین رطوبت اولیه محصول
۱۴	انرژی فعال سازی
۱۸	بحث و نتایج
۲۱	ضریب انتشار حرارتی
۲۳	آهنگ تبخیر رطوبت
۲۴	مدلسازی ریاضی منحنیهای خشک شدن
۲۷	شبکه عصبی مصنوعی MLP
۳۳	انرژی مصرفی مورد نیاز و آهنگ خشک شدن
۳۳	انرژی مخصوص مایکروویو
۳۴	محاسبه انرژی فعال سازی
۳۶	نتیجه گیری
۳۸	تقدیر و تشکر

شکل ۱: مایکروویو مورد استفاده در آزمایشات.....	۹
شکل ۲: ترازوی دیجیتالی AND GF- Japan.....	۱۰
شکل ۳: منحنی نسبت رطوبت- زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان‌های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر.....	۱۹
شکل ۴: منحنی درصد رطوبت- زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان‌های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر.....	۲۰
شکل ۵: نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان‌های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر.....	۲۲
شکل ۶: نمودار آهنگ تبخیر رطوبت برای خشک کردن به لیمو در درصد توان‌های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر.....	۲۴
شکل ۷: نمودار سبب بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با شبکه عصبی MLP ۳-۱۵-۳.....	۲۹
شکل ۸: نمودار سبب بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده آهنگ خشک شدن با شبکه عصبی MLP ۳-۱۵-۳.....	۳۰
شکل ۹: نمودار سبب بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده بازده انرژی مصرفی مایکروویو با شبکه عصبی MLP ۳-۱۵-۳.....	۳۱
شکل ۱۰: ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده (الف) نسبت رطوبت، (ب) آهنگ خشک شدن و (ج) بازده انرژی مصرفی مایکروویو، توسط شبکه عصبی MLP ۳-۱۵-۳.....	۳۳
شکل ۱۱: انرژی مخصوص طی خشک کردن به لیمو در درصد توان‌های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر.....	۳۴
شکل ۱۲: تغییرات نفوذ رطوبتی مؤثر بر حسب m/p	۳۵

جدول ۱: مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی فرآیند خشک شدن.....	۱۲
جدول ۲: مقادیر ضریب نفوذ موثر (m^2/s) و ضریب تعیین در درصد توان‌های مختلف میکروویو با ضخامت لایه های ۳ و ۶ میلیمتر.....	۲۳
جدول ۳: مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE حاصل از برازش مدل‌های ریاضی در درصد توان‌های مختلف میکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلیمتر.....	۲۵
جدول ۴: ضرایب و شاخص آماری مربوط به مدل میدیلی برای برای خشک‌کردن بهلیمو در درصد توان‌های مختلف میکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلیمتر.....	۲۷
جدول ۵: نتایج مربوط به پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک‌کردن و بازده انرژی مصرفی میکروویو با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی MLP.....	۲۸

چکیده

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های محافظت گیاهان دارویی می‌باشد. در این گزارش به مدل سازی ریاضی، پیش‌بینی سینتیک و بازده انرژی مصرفی خشک کردن گیاه دارویی به لیمو (*Lippia citriodora* Kunth) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در خشک-کن میکروویو پرداخته شده است. در روش خشک کردن با میکروویو از چهار سطح توانی (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ توان) و دو ضخامت ۳ و ۶ میلیمتر برای خشک کردن به لیمو استفاده شد. نتایج نشان داد کمترین ضریب نفوذ موثر m^2/s $10^{-6} \times 1/329$ در ضخامت ۳ میلی‌متر و ۲۵٪ توان و بیشترین مقدار آن m^2/s $10^{-5} \times 2/486$ در ضخامت ۶ میلیمتر و ۱۰۰٪ توان، می‌باشد. همچنین در این گزارش پارامترهای مختلف خشک کردن و توپولوژی‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی MLP، جهت تعیین بهترین شبکه برای گیاه به لیمو با خشک‌کن میکروویو بررسی و ارزیابی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی MLP یک ابزار بسیار قدرتمند در پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی گیاه دارویی به لیمو بر اساس مقادیر توان مصرفی میکروویو است.

واژه‌های کلیدی: به لیمو، خشک‌کن، سینتیک، میکروویو، شبکه عصبی

مقدمه

گیاهان دارویی از مهمترین منابع اولیه مورد استفاده در صنعت غذا و دارو می‌باشند (bakkali, et al., 2008). توجه روز افزون و تمایل به مصرف داروهایی با مبدا گیاهی و تنوع فراوان گیاهان دارویی در مناطق اقلیمی مختلف کشور، امروزه این بخش از منابع طبیعی ایران از نظر اقتصادی و درمانی اهمیت فراوانی پیدا کرده است که ضرورت تحقیق در زمینه فرآوری گیاهان دارویی را دوچندان نموده است. امروزه اکثر کشورهای پیشرفته دنیا به علت بروز عوارض جانبی ناشی از مصرف داروهای سنتزی، مقرون به صرفه نبودن ساخت برخی از داروهای سنتزی، انحصاری بودن درمان برخی بیماری‌ها با گیاهان دارویی مانند جذام، سالک و ... به سمت گیاهان دارویی سوق پیدا کرده‌اند (AhmadiChenarbon et al. 2011). در دوره‌های مختلف تاریخ، سرزمین ایران یکی از مراکز مهم علوم مختلف، به ویژه داروسازی و کشت گیاهان دارویی بوده است. تاریخ پزشکی و گیاهان دارویی در ایران به حدود ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد و به تمدن آریایی مربوط می‌شود. گیاهان دارویی بسیار بومی کشور ایران هستند و تعدادی از آنها نیز از کشورهای دیگر وارد شده‌اند. یکی از گیاهانی که در سال‌های اخیر وارد ایران شده است، به لیمو از واریته *Verbena* است. به لیمو با نام علمی *lippia citriodora kunth* و از خانواده شاه پسندیان و راسته نعناسانان، درخچه‌ای با ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متر و بومی آمریکای جنوبی است. این گیاه دارویی دارای خواص بسیاری از جمله ضد تشنج، آرام بخش و ضد سرماخوردگی، ضد قارچ و ضد سرطان است. همچنین برای درمان آسم، اسپاسم، سردرد و بی‌خوابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برگ‌های به لیمو برای ایجاد طعم لیمو در غذاهای مختلف مانند مرغ، ماهی، سالاد و نوشیدنی به کار می‌رود. اسانس به لیمو دارای مزایای متعددی مانند ضد میکروبی، خواص آنتی اکسیدانی، مهارکنندگی رادیکال آزاد و آرام بخشی به کار می‌رود. اسانس‌ها ترکیبات شیمیایی معطری هستند که در گیاهان دارویی وجود دارند. اسانس به لیمو دارای ترکیب‌های مختلف ژرانیال، میرسنون، لیمونن، لیپفولنون، ژرانیول و

سیترونلول می‌باشد. یکی از متداول ترین روش‌های نگهداری گیاهان دارویی خشک کردن است که از فساد آنها جلوگیری می‌کند. در گذشته، انرژی خورشید برای خشک کردن استفاده می‌شد اما مشکلات زیادی در استفاده از این روش وجود دارد از جمله: تغییرات نامناسب در کیفیت غذا، عدم کنترل کافی در فرآیند خشک کردن، طولانی بودن زمان خشک شدن و غیر بهداشتی بودن محصول. مشکلاتی از این قبیل استفاده از تکنولوژی جدید در فرآیند خشک کردن را لازم می‌سازد. خشک‌کن‌های صنعتی مزایایی نسبت به روش سنتی دارند از جمله: برداشت به موقع محصول، کاهش تلفات در مزرعه، برنامه ریزی برای برداشت در شرایط نامطلوب آب و هوایی، افزایش مدت انبارداری مواد غذایی (Sahin and Dincer., 2002).

فرآیند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای 300MHz و 300GHz نشان‌گر امواج مایکروویو است. در خشک‌کن مایکروویو انرژی الکترومغناطیسی مستقیماً به انرژی جنبشی مولکول‌های آب تبدیل می‌شود. بنابراین، حرارت در داخل محصول تولید می‌شود و انتقال انرژی بوسیله موانع انتقال بویژه در مواد ویسکوز تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. نظر به اینکه امواج مایکروویو قادر به نفوذ به داخل ماده بوده و بدین ترتیب انرژی را ذخیره می‌کند لذا در این روش حرارت می‌تواند در سراسر حجم ماده تولید شود و ماده سریع‌تر خشک می‌شود (Pozar., 2002).

توجه برای رفع این مشکل و جلوگیری از افت قابل توجه کیفیت محصول و انتقال سریع حرارت و کاهش زمان خشک شدن نگاه‌ها را به سمت استفاده از خشک‌کن مایکروویو کرده است. خشک کردن با مایکروویو سریع‌تر، یکنواختی بهتر فرآیند خشک شدن و بازده انرژی بیشتر در مقایسه با خشک کردن با جریان هوا گرم می‌باشد. همچنین به دلیل انرژی متمرکز شده توسط امواج مایکروویو به فقط به ۲۵-۲۰ درصد فضا برای خشک کردن نسبت به روش‌های معمول احتیاج دارد (Yongsawatdigul and Gunasekaran., 1996). سامانه‌های خشک‌کن مایکروویو، زمان خشک کردن را به‌طور قابل توجهی کاهش داده‌اند بدون این‌که اثر منفی بر روی کیفیت محصول داشته باشند. در خشک‌کن

مایکروویو، گرما حاصل از تبدیل انرژی مایکروویو به انرژی حرارتی در درون مواد مرطوب بوجود می‌آید و فشار و دمای مطلوب را برای خشک کردن سریع مواد فراهم می‌کند. گرمایش حجمی ناشی از نفوذ مایکروویو و کاهش هزینه‌های فرآیند، مایکروویو را به منبع جذاب انرژی حرارتی تبدیل کرده است. زمان‌های کوتاه‌تر فرآوری، به میزان قابل توجهی هزینه‌های تولید برخی محصولات را کاهش می‌دهد (Zarein et al., 2013). یکی از مهم‌ترین مسائل در خشک کردن آن رسیدن به یک محتوای رطوبت نهایی مطلوب است. خشک کردن بیش از حد به لیمو، باعث مصرف زیاد انرژی شده و کیفیت محصول خشک‌شده را نیز کاهش می‌دهد و با توجه به محدودیت‌های تکنولوژیکی در اندازه‌گیری پیوسته محتوای رطوبتی و نارضایتی از دقت آن و همچنین نبودن دقت مناسب مدل‌های فیزیکی بر اساس پارامترهای هوای خشک در اندازه‌گیری محتوای رطوبت در فرآیندهای غیرخطی و زمان‌بر، باعث شده از روش‌های هوش مصنوعی بخصوص از شبکه‌های عصبی مصنوعی در کنترل فرآیند خشک کردن استفاده شود. استفاده از شبکه‌های عصبی در طراحی و انتخاب شرایط کاری بهینه و کنترل خشک‌کن می‌تواند به کار رود. بنابراین هدف از این پژوهش، مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی MLP برای پیش‌بینی ارتباط بین پارامترهای سینتیک خشک‌کردن (نسبت رطوبت و آهنگ خشک‌شدن) و بازده انرژی مصرفی با تغییرات توان مصرفی مایکروویو می‌باشد.

اهداف تحقیق

به طور کلی اهداف این تحقیق عبارت‌اند از:

- ۱- تعیین پارامترهای خشک شدن به لیمو.
- ۲- پیش‌بینی سینتیک خشک شدن به لیمو با استفاده از شبکه عصبی
- ۳- بررسی میزان انرژی مصرفی در خشک کردن به لیمو و تاثیرات توان مایکروویو بر میزان انرژی مصرفی و انرژی مخصوص مورد نیاز.

پیشینه‌ی پژوهش

مطالعات زیادی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از مایکروویو مانند خشک کردن آویشن (خفاجه و همکاران ۱۳۹۳)، خشک کردن دانه‌ها (ادو و اوتن ۱۹۹۶، والد و همکاران ۲۰۰۲)، خشک کردن سبزیجات (لین و همکاران ۱۹۹۸، آلیاس ۲۰۰۶، لیتوین و همکاران ۱۹۹۸)، خشک کردن اسفناج (Ozkan, et al. 2007)، خشک کردن نعنا (Özbek and Dadali 2007)، و خشک کردن میوه‌جات، (تولاسیداس و همکاران ۱۹۹۷، فانیو و اوهلسون ۱۹۹۸)، خشک کردن کیوی (Maskan 2001)، خشک کردن ورقه‌های سیب (Li et al. 2011) و ... انجام شده است. روش‌های متداول تحلیل پارامترهای کیفی و منحنی خشک کردن محصولات کشاورزی و غذایی در چرخه فرآوری بر مبنای روش‌های آماری یا معادلات رگرسیونی است. از آنجا که پیش‌بینی شاخص‌های کیفی شامل چند متغیر ورودی و خروجی است، تحلیل آماری یا ریاضی آن مشکل و تفسیر آن دشوار است، از این رو باعث پیچیده شدن مسئله می‌شود. لذا سیستمی در پیش‌بینی دقیق‌تر عمل می‌کند که از الگوهای ورودی آموزش ببیند که این امر با بکارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی امکان‌پذیر خواهد بود (Poonnoy et al., 2007). پژوهش‌های مختلفی برای پیش‌بینی پارامترهای خشک کردن محصولات غذایی با خشک‌کن مایکروویو با بکارگیری شبکه عصبی مصنوعی انجام شده است. نانوکناری و همکاران عملکرد برنج سالم را در شلتوک‌های خشک شده به روش خشک کردن بستر سیال به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که شبکه پس انتشار پیشرو با توپولوژی ۷-۱۳-۷ و الگوریتم آموزش لوبنبرگ-مارکوارت و تابع آستانه تانژانت سیگموئید، قادر است راندمان تبدیل شلتوک را به برنج سفید با ضریب تبیین ۹۵/۴۸ و خطای متوسط مطلق ۰/۰۱۹ در شرایط مختلف خشک کردن شلتوک در گستره بستر سیال پیش‌بینی نماید (Nanvakenaria et al., 2021). در تحقیق

دیگری برای پیش‌بینی منحنی تغییرات رطوبتی و دما با زمان در خشک‌کردن انبه و کاساوار از شبکه عصبی MLP با الگوریتم آموزش لوبزگ مارکوارت استفاده شد. متغیرهای تأثیرگذار بکار رفته به عنوان ورودی عبارت بودند از: دمای هوا، سرعت هوا، رطوبت نسبی هوا، زمان و کاهش حجم و متغیر خروجی عبارت بود از: تغییرات رطوبت و دما در طول خشک‌شدن. در بررسی برای افزایش توانایی شبکه عصبی در پیش‌بینی از روش بی‌بعد کردن پارامترهای ورودی و خروجی شبکه استفاده شد (Hernandez et al., 2004). همچنین از شبکه عصبی مصنوعی MLP برای پیش‌بینی قابلیت هدایت حرارتی مواد غذایی به عنوان تابعی از محتوای رطوبتی، دما و تخلخل ظاهری استفاده شد. بهترین شبکه با دو لایه پنهان که در هر کدام ۴ نورون بود، بدست آمد. شبکه بدست آمده قادر بود قابلیت هدایت حرارتی را با دقت میانگین خطای نسبی ۱۲/۶٪ و میانگین خطای مطلق ۰/۰۸۱ پیش‌بینی کند (Erenturk et al., 2007). ایلکنور و همکارانش نیز برش های کدو تنبل را با سه روش خشک کن مایکروویو، جابجایی و ترکیب مایکروویو-جابجایی خشک کرده و بهترین دوره خشک کردن، رنگ و مصرف انرژی را بدست آوردند (Ilknur, 2007). وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن لایه نازک سیب را مورد بررسی قرار دادند. فرآیند خشک شدن با جابجایی هوا در یک خشک‌کن آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها در چهار سطح دمایی ۷۵، ۸۵، ۹۵ و ۱۰۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای $2/03 \pm 1/0$ متر در ثانیه انجام شد. مدل‌های ریاضی مختلفی بر داده‌های آزمایشی برازش داده شدند. نتایج نشان داد که مدل لگاریتمی بهتر از سایر مدل‌ها فرآیند خشک‌شدن را پیش‌بینی می‌کند. نمودارهای خشک‌شدن دو مرحله نزولی را نشان داد. مقدار ضریب پخش موثر در مرحله دوم تقریباً ۶ برابر بزرگتر از ضریب پخش موثر در مرحله اول بود. همچنین رابطه نسبت رطوبت با زمان خشک‌شدن در خشک‌کن لایه نازک، که در طراحی و کنترل خشک کردن به روش جابجایی هوا کاربرد

دارد، استخراج شد. مقادیر ضریب تعیین و کی دو به ترتیب ۰/۹۹۲۳ و ۰/۰۰۰۰۱ بدست آمد (Wang et

al., 2007). اکپینار (۲۰۰۴) انرژی و اکسرژی برای خشک شدن ورقه‌های فلفل قرمز را در یک خشک

کن آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد. او گزارش کرد که با افزایش دما مصرف انرژی و نسبت مصرف

انرژی افزایش پیدا می‌کند، در حالیکه با گذشت زمان مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی کاهش پیدا

می‌کند. تلفات اکسرژی با افزایش دما افزایش پیدا می‌کرد و بازده اکسرژی روند خاصی نداشت

(Akpınar, 2004).

مدل دینامیکی فرآیند خشک شدن شامل انتقال همزمان جرم و گرما است که رطوبت به وسیله

عمل نفوذ از درون محصول به سطح مشترک محصول و هوا منتقل شده و از سطح مشترک به کمک

روش جابه جایی به بخار تبدیل می‌شود. گرما نیز به روش جابه جایی از هوا به سطح مشترک با محصول

منتقل شده و به روش هدایتی به لایه‌های درون نفوذ می‌کند که مدل‌سازی چنین فرآیندهایی برای تعیین

تغییرات میزان رطوبتی پس از مدت زمان مشخص، زمان بر است (توکلی هاشجین، ۱۳۸۲).

فرآیند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب

نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای 300MHz و 300GHz نشان گر امواج مایکروویو است.

مدل‌های مختلف ریاضی برای خشک کردن وجود دارد، به عنوان مثال مدل پیچ که برای مدل‌سازی داده‌های به

دست آمده در طول فرآیند خشک شدن مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر فرآیند مدل کردن را انجام می‌دهد.

یک مدلی که می‌تواند با موفقیت سینتیک خشک کردن مواد بیولوژیکی را پیشگویی کند مدل پیچ است. مدل

پیچ در سال ۱۹۴۹ به منظور مدل کردن سینتیک خشک کردن ذرت پیشنهاد شد و تاکنون توسط پژوهشگران زیادی

برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن استفاده شده است. معادله زیر شکل ریاضی مدل پیچ می‌باشد.

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \frac{M_e}{M_e} = \exp(-kx^n) \quad (7)$$

که در آن MR نسبت رطوبت (بی بعد)، M_t میزان رطوبتی در هر لحظه (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده جامد)، M_0 میزان رطوبتی اولیه (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده جامد)، M_e میزان رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده جامد)، k آهنگ تبخیر (min^{-1}) و n توان (بی بعد) می باشد. در این جا برخی از مدل های دیگر که برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده شد معرفی می گردد.

برای خشک کردن لوبیای سویا (Overhults et al., 1973) و ذرت پفکی (White et al., 1981) اصلاح شد. این مدل نیز یک مدل نیمه تجربی جهت مدل سازی خشک کردن لایه نازک بوده و به نام مدل پیچ اصلاح شده خوانده می شود.

مدل های ریاضی زیادی در طول چندین سال توسط محققان مختلف ارائه شده است که اولین و معروف ترین مدل پیشنهاد شده، مدل نیوتن^۱ (لوئیس) می باشد. در سال ۱۹۲۱ لوئیس دریافت که انتقال رطوبت از غذاها و محصولات کشاورزی قابل مقایسه با جریان گرما از یک جسم غوطه ور در مایع سرد است. در این مدل فرض بر آن است که هیچ مقاومتی در مقابل حرکت رطوبت از درون ماده به سطح آن وجود ندارد. با مقایسه این پدیده با قانون سرد شدن نیوتن می توان گفت که سرعت خشک شدن متناسب است با اختلاف میزان رطوبت بین ماده در حال خشک شدن و میزان رطوبت تعادلی در هوای خشک کن. عبارت اول حل سری حاصل از قانون دوم فیک^۲ می باشد. مدل هندرسون و پاییس نیز اولین بار برای مدل کردن فرآیند خشک شدن ذرت استفاده شد. مدل هندرسون- پاییس نیز در سال ۱۹۹۹ جهت

^۱Newton

^۲Lewis

خشک کردن میوه‌های تازه و نیمه‌خشک توسط کارانتانوس^۳ و بلسیوتیس^۴ اصلاح شد و به شکل یک مدل سه‌جمله‌ای در آمد. در سال ۱۹۹۸ کاسم^۵ جهت خشک کردن لایه نازک گندم مدل تقریب پخش^۶ را ابداع کرد. این مدل نیز یک مدل دوجمله‌ای بوده و از این مدل نیز در سال ۲۰۰۴ در خشک کردن هوانجان استفاده شد. مدل لگاریتمی در سال ۱۹۹۹ برای مدلسازی فرآیند خشک کردن برگ بو توسط یاگشیاگلو^۷ و همکاران استفاده شد. یکی از مدل‌های دیگر در خشک کردن لایه نازک مدل دوجمله‌ای (Two-Term model) می‌باشد که در سال ۱۹۸۰ برای خشک کردن ذرت توسط شرف‌الدین^۸ و همکاران ارائه شد. این مدل در سال ۱۹۹۱ در خشک کردن برش‌های سیب‌زمینی شیرین استفاده شد. در تحقیقی که در زمینه خشک کردن برنج در سال ۱۹۸۵ انجام شد، ورما^۹ و همکاران مدل دوجمله‌ای جدیدی را پیشنهاد کردند. این مدل بعداً به نام مدل ورما مشهور شد. در سال ۲۰۰۲ مدل دیگری جهت خشک کردن لایه نازک توسط میدیلی^{۱۰} و همکاران پیشنهاد شد که به نام آن‌ها به ثبت رسید.

^۳ Karathanos

^۴ Belessiotis

^۵ Kassem

^۶ Approximation of diffusion

^۷ yagshiaglo

^۸ sharaf- eldeen

^{۱۰}Midilli

مواد و روش‌ها

برای بررسی و تعیین سنیتیک خشک‌شدن به‌لیمو و همچنین محاسبه میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک‌کردن، دستگاه‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری مختلف آزمایشگاهی به کار برده شد که ساختمان و طرز کار آنها در زیر شرح داده می‌شود.

دستگاه مایکروویو

در این آزمایشات برای انجام عملیات از مایکروویو برند میدیا (Midea) (MW-F2820-ELKW) استفاده شد. توان خروجی این مایکروویو ۹۰۰ وات به صورت درصد از کل توان قابل تنظیم است.



شکل ۱: مایکروویو مورد استفاده در آزمایشات

ترازو

برای اندازه گیری وزن نمونه ها در طول مرحله خشک شدن از ترازوی دیجیتال (AND GF-600, Japan) با

دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد.



شکل ۲: ترازوی دیجیتال AND GF- Japan

تعیین رطوبت اولیه محصول

به لیمو مورد آزمایش از مزرعه گیاهان دارویی مرکز امام خمینی (ره) تهیه خواهد شد. و برای انجام آزمایش

در یخچال در دمای 4°C + نگهداری می شود. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون در دمای 1°C

± 105 بدست آمد. این کار در ۳ تکرار انجام خواهد شد. رابطه (۱) برای میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک استفاده

می شود (Mohsenin 1986).

$$M(\% d. b.) = \frac{m_0 - m_f}{m_f} \times 100 \quad (1)$$

برای انجام فرآیند توزین به لیمو در حال خشک شدن از ترازوی دیجیتال مدل AND GF-600،

(Japan) با دقت $\pm 0.1g$ استفاده خواهد شد. فرآیند خشک کردن به لیمو با استفاده از خشک‌کن مایکروویو

(SAMSUNG, model:ME3410W,korea) انجام می‌شود. در این پژوهش از چهار سطح توان مایکروویو

(۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) و دو ضخامت لایه گیاه برای خشک کردن استفاده می‌شود.

استخراج بهترین مدل ریاضی

توزین نمونه‌ها تا زمانی که درصد رطوبت بر پایه تر به ۱۵٪ برسد ادامه می‌یابد. کسر به لیمو در طول

خشک کردن با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده

جامد)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) و محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده جامد

/کیلوگرم آب) می‌باشد. مقدار M_e در مقایسه با M_0 و M_t بسیار کوچک می‌باشد از این رو می‌توان از آن

صرفه نظر کرد و معادله به صورت زیر ساده می‌شود. (Doymaz 2007)

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{رابطه (۳)}$$

مدل هایی که برای برازش داده های حاصل از خشک کردن تحت شرایط یاد شده استفاده گردید در

جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: مدل های مورد استفاده برای پیش بینی فرآیند خشک شدن

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل
۱	مدل نیوتن (Liu, et al. 1997) و (O'Callaghan, et al. 1971)	$MR = \exp(-kt)$
۲	مدل پیچ (Singh, et al. 1999) و (Zhang and Litchfield 1991)	$MR = \exp(-kt^n)$
۳	مدل اصلاح شده پیچ (Overhults, et al. 1973) و (White, et al. 1981)	$MR = \exp(-(kt)^n)$
۴	مدل وانگ و سینگ (Wang and Singh 1978)	$MR = 1 + a.t + b.t^2$
۵	مدل هندرسون و پاپیس (Chhinnman 1984) و (Westerman, et al. 1973)	$MR = a.\exp(-kt)$
۶	مدل لگاریتمی (Yagcioglu, et al. 1991)	$MR = a.\exp(-kt) + c$
۷	مدل تقریبی انتشار (Kassem 1998)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$
۸	مدل اصلاح شده پیچ ۲ (Diamante and Munro 1991)	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$
۹	مدل میدیلی (Midilli, et al. 2002)	$MR = a.\exp(-kt^n) + b.t$

سه معیار برای تعیین بهترین برازش استفاده شد، ضریب همبستگی R^2 ، مربع کای χ^2 و مربع میانگین خطای

نسبی. RMSE.

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre})^2}{n - z} \quad \text{رابطه (۵)}$$

رابطه (۶)

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

$MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی i م، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیشینی شده i م، n تعداد مشاهدات، z

تعداد ثابت های خشک شدن می باشند بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن به لیمو را

توصیف کند مدل دارای بیشترین ضریب همبستگی R^2 و کمترین مقدار مربع میانگین خطای نسبی $RMSE$ و

مربع کای χ^2 باشد.

ضریب نفوذ موثر رطوبت

برای بدست آوردن ضریب نفوذ از رابطه (۷) استفاده شد (Aghbashlo, et al. 2008).

رابطه: (۷)

$$R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2 D_{eff} t}{4a^2}\right]$$

a ضخامت نمونه به cm t زمان خشک شدن به s ، n تعداد مشاهدات و D_{eff} ضریب نفوذ حرارتی به

m^2/s می باشد. رابطه (۸) در مدت زمان های طولانی خشک شدن به صورت زیر خلاصه می شود.

رابطه (۸)

$$R = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4a^2}\right]$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه ۸ و رسم نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان از شیب نمودار می توان

D_{eff} را بدست آورد.

$$\text{شیب نمودار} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2}$$

رابطه (۹)

انرژی فعال سازی

از آنجایی که دما در خشک کن میکروویو در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه گیری نیست، برای دست آوردن انرژی فعال سازی باید از شکل اصلاح شده رابطه آرنوس استفاده کرد. در روش اول می توان از ارتباط بین آهنگ ثابت سینتیک خشک شدن (K) و نسبت توان خروجی میکروویو به وزن نمونه (m/p) به جای دمای هوا استفاده کرد. در این حالت پس از ارزیابی داده ها، با به کار بردن رابطه (۱۰) و رسم مقادیر نرخ ثابت خشک شدن (K) در مقابل وزن نمونه به توان میکروویو (m/p) در نرم افزار MATLAB می توان مقدار انرژی فعال سازی را بدست آورد (Özbek and Dadali 2007).

$$K = K_0 \exp\left(\frac{-E_a \cdot m}{p}\right) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن (K) آهنگ ثابت خشک شدن (min^{-1}) که از رابطه میدلی (بهترین مدل ریاضی بدست آمده در این پژوهش) بدست می آید. (K_0) عرض از مبدا رابطه (min^{-1})، E_a انرژی فعال سازی (W g^{-1})، (p) توان خروجی میکروویو (W) و (m) وزن نمونه ها (g) می باشد.

در روش دوم، برای بدست آوردن انرژی فعال سازی در میکروویو وابستگی بین ضریب نفوذ رطوبت موثر و نسبت توان خروجی میکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه بر اساس مدل آرنوس می تواند بدست آید (Özbek and Dadali 2007).

رابطه (۱۱)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right)$$

با رسم نمودار در دو حالت بالا و با استفاده از مدل دادالی و همکاران و تحلیل رگرسیونی چند متغیره

در محیط نرم افزار MATLAB می توان انرژی فعال سازی و ضریب (D_0 و K_0) را بدست آورد (Ozbek and

Dadali 2007).

انرژی مصرفی مایکروویو

انرژی مصرفی در خشک کن های مایکروویو با استفاده از رابطه (۱۲) بدست می آید.

$$E_t = P \times t$$

رابطه (۱۲)

که در آن E_t کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن (kW.h) ، P توان خروجی از مایکروویو (kW)

و t مدت زمان خشک شدن) ساعت می باشد (Ozkan, et al. 2007).

انرژی مخصوص خشک کردن به روش مایکروویو

میزان انرژی مخصوص به لیمو برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم به

لیمو که با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می شود (Aghbashlo, et al. 2008).

$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0}$$

رابطه (۱۳)

که E_{kg} انرژی مخصوص مورد نیاز (kW.h/kg) و W_0 وزن اولیه نمونه آزمایشی (kg) است.

شبکه عصبی مصنوعی MLP

برای حل مسائل غیرخطی از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP) استفاده شد. ترکیب تعداد نورون‌های لایه مخفی با سه خروجی (نسبت رطوبت، نرخ خشک شدن و بازده انرژی مصرفی مایکروویو) و سه لایه ورودی (توان مصرفی مایکروویو، ضخامت نمونه ها و زمان خشک شدن) مورد ارزیابی قرار گرفت؛ بطوری که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه و ۱۵ درصد برای ارزیابی و ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی شبکه در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی توپولوژی‌های مختلف با استفاده از نرم افزار استاتستیکا (STATISTICA 12.0, USA) توسط شبکه عصبی MLP از تابع انتقال لایه مخفی Tanh و تابع انتقال لایه خروجی Identity استفاده شد. دو معیار ضریب تبیین R^2 و ریشه میانگین مربعات خطا RMSE، برای تعیین بهترین توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی بکار گرفته شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR_{exp,i}})^2} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right)} \quad (15)$$

در روابط فوق $MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی ام، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده ام، n

تعداد مشاهدات و z تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی که

می‌تواند پارامترهای خشک‌کردن به لیمو را توصیف کند، مدل دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین R^2 و

کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا RMSE می‌باشد.

بحث و نتایج

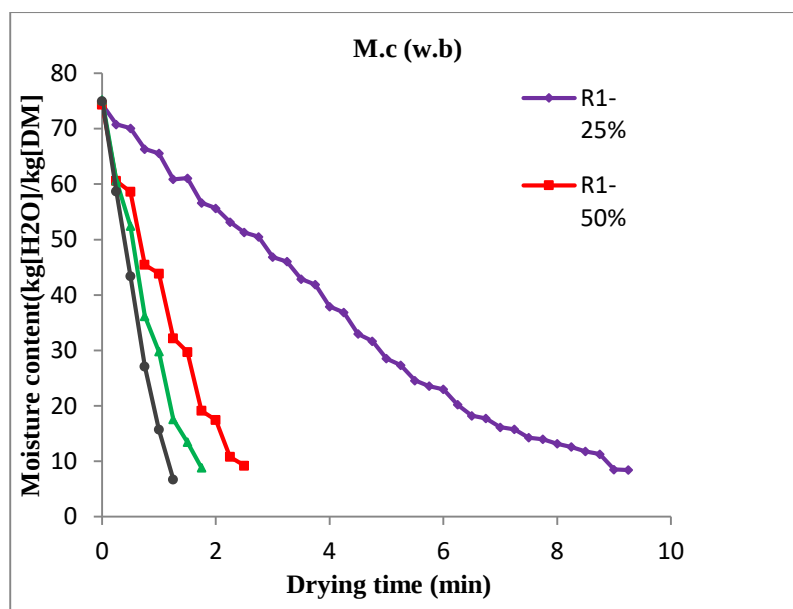
تغییرات نسبت رطوبت در ازای زمان برای خشک کردن به لیمو در ضخامت لایه ۳ و ۶ میلی متر و درصد توان‌های (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) مختلف مایکروویو در شکل (۳) ارائه گردید. رطوبت اولیه در نمونه به لیمو ۷۵٪ گزارش شد که در انتها رطوبت نهایی به ۱۰ درصد رسیدند. در این بررسی متغیرهای توان و ضخامت لایه را به صورت زیر نشان داده شده است.

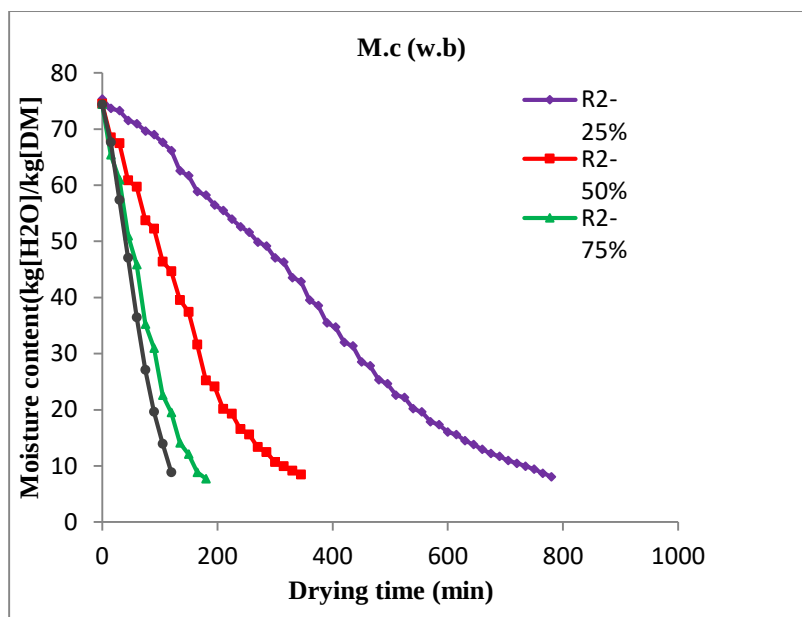
R1-30% : ضخامت لایه ۳ میلی متر و ۳۰ درصد توان؛ R1-50% : ضخامت لایه ۳ میلی متر و ۵۰ درصد توان؛ R1-

75% : ضخامت لایه ۳ میلی متر و ۷۵ درصد توان؛ R1-100% : ضخامت لایه ۳ میلی متر و ۱۰۰ درصد توان؛ R2-30%

: ضخامت لایه ۶ میلی متر و ۳۰ درصد توان؛ R2-50% : ضخامت لایه ۶ میلی متر و ۵۰ درصد توان؛ R2-75% :

ضخامت لایه ۶ میلی متر و ۷۵ درصد توان؛ R2-100% : ضخامت لایه ۶ میلی متر و ۱۰۰ درصد توان؛



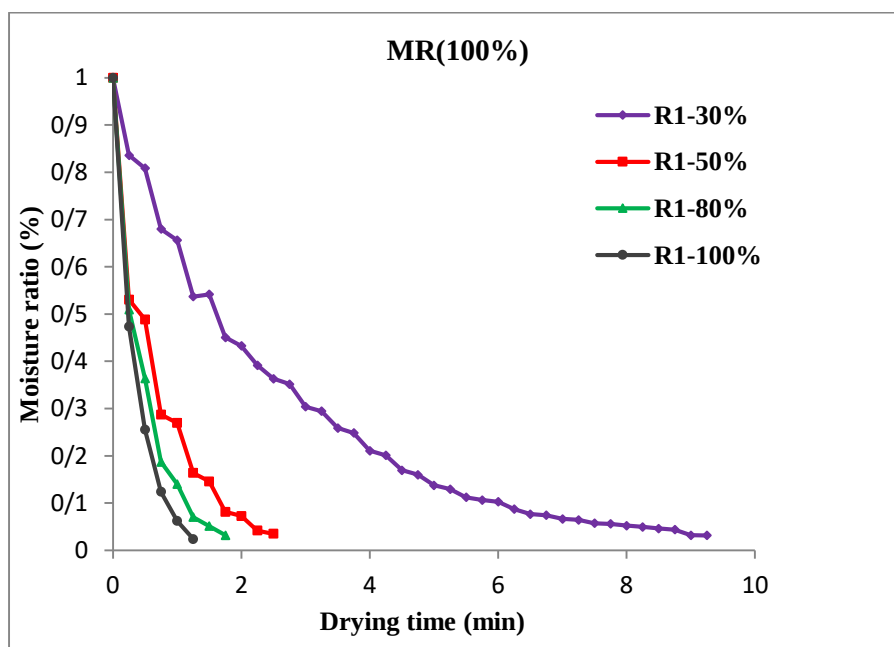


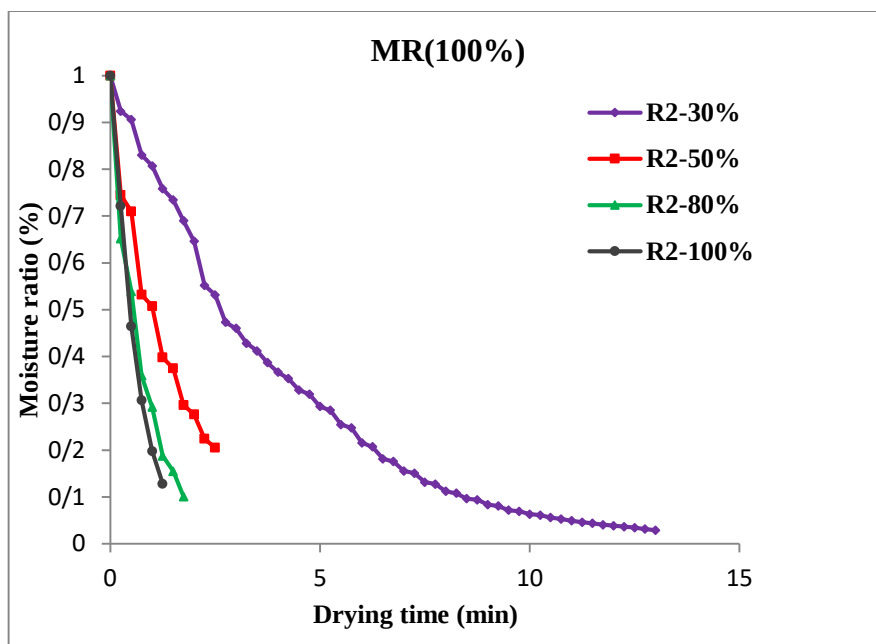
شکل ۳: منحنی نسبت رطوبت- زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو با

ضخامت لایه های ۳ و ۶ میلی متر

تغییرات نسبت رطوبت بر پایه خشک در ازای زمان برای خشک کردن به لیمو در ضخامت لایه ۳ و ۶ میلی متر و

درصد توان های (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) مختلف مایکروویو در شکل (۱۱) ارائه گردید.





شکل ۴: منحنی درصد رطوبت- زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو با

ضخامت لایه های ۳ و ۶ میلی متر

شکل (۴) تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه های ۳

و ۶ میلی متر نسبت به زمان را نشان می دهد. بر اساس این شکل زمان خشک شدن به لیمو با توجه به توان های مختلف

مایکروویو متفاوت می باشد. با افزایش توان خروجی مایکروویو، کاهش بیشتری در رطوبت نسبی محصول اتفاق می-

افتد، زیرا این گونه به نظر می رسد که افزایش توان خروجی مایکروویو باعث افزایش شدت پرتوهای مایکروویو و

دمای درون محفظه و کاهش بیشتر میزان رطوبت به لیمو می شود. به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و

حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. از طرفی نمودارهای شکل (۴)، بیانگر این نکته می باشند که با گذشت

زمان در طی فرآیند خشک کردن، سرعت خشک شدن و از دست دادن رطوبت کاهش می یابد. نتایج مشابهی را سایر

پژوهشگران در خشک کردن اسطوخودوس با استفاده از مایکروویو به دست آورده اند (Khafajeh et al., 2022). در

توان پایین تر مدت زمان خشک شدن زیاد می باشد به طوری که زمان خشک شدن برای ۱۰۰ درصد توان و ضخامت ۶

میلیمتر ۱۳ دقیقه و برای ۲۵ درصد و ضخامت ۳ میلیمتر توان ۱ دقیقه و ۱۵ ثانیه به دست آمد.

ضریب انتشار حرارتی

شکل (۵) نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان را برای حالت‌های مختلف خشک کردن را نشان می‌دهد.

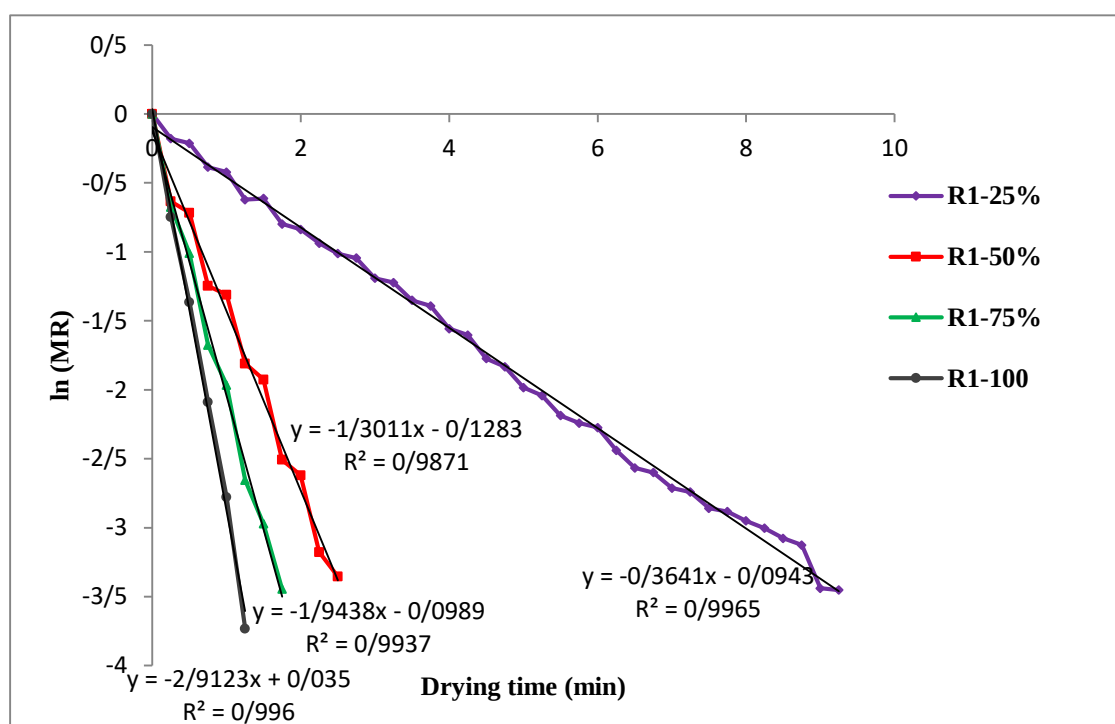
در این بررسی متغیرهای توان و ضخامت لایه را به صورت زیر نشان داده شده است.

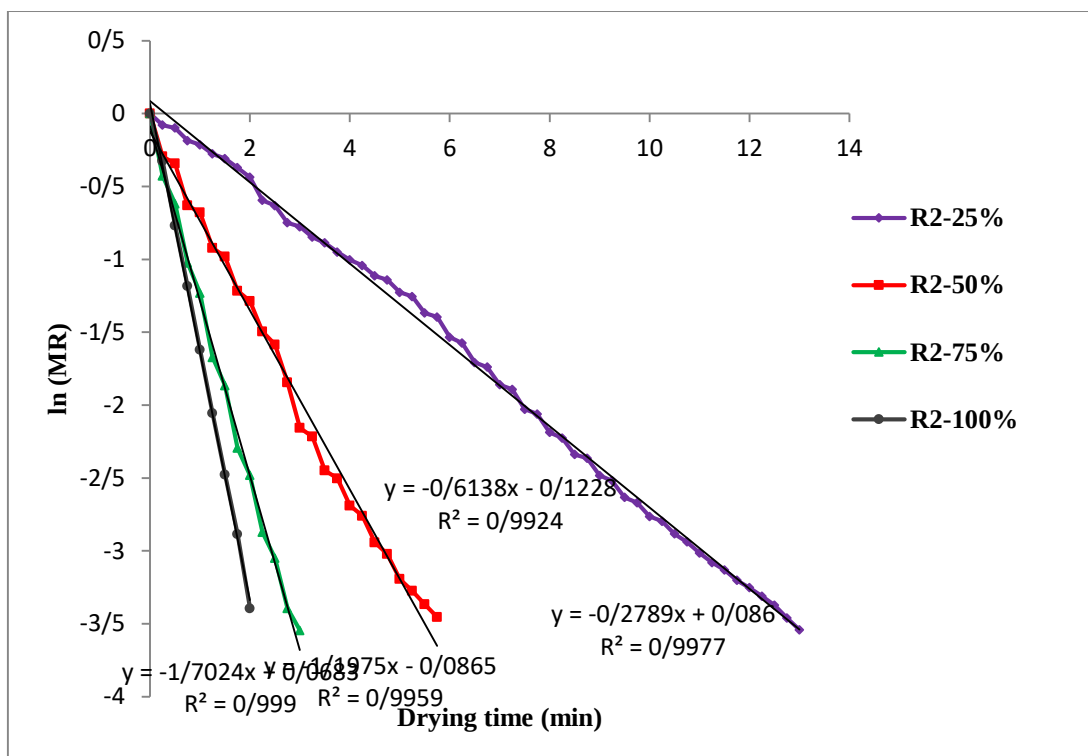
R1-30% : ضخامت لایه ۳ میلی‌متر و ۳۰ درصد توان؛ R1-50% : ضخامت لایه ۳ میلی‌متر و ۵۰ درصد توان؛ R1-

75% : ضخامت لایه ۳ میلی‌متر و ۷۵ درصد توان؛ R1-100% : ضخامت لایه ۳ میلی‌متر و ۱۰۰ درصد توان؛ R2-30%

: ضخامت لایه ۶ میلی‌متر و ۳۰ درصد توان؛ R2-50% : ضخامت لایه ۶ میلی‌متر و ۵۰ درصد توان؛ R2-75% :

ضخامت لایه ۶ میلی‌متر و ۷۵ درصد توان؛ R2-100% : ضخامت لایه ۶ میلی‌متر و ۱۰۰ درصد توان؛





شکل ۵: نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه های ۳ و ۶ میلی متر

با توجه به شکل کمترین ضریب نفوذ موثر m^2/s $1/329 \times 10^{-6}$ و بیشترین مقدار آن m^2/s $2/486 \times 10^{-5}$

به ترتیب در T1-25% و T2-100% می باشد. همانطوری که مشاهده می شود با افزایش توان در خشک کن ها ضریب

نفوذ موثر افزایش می یابد، دلیل وقوع این مسئله ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر می باشد. جدول (۲)

مقادیر ضریب انتشار را نشان می دهد.

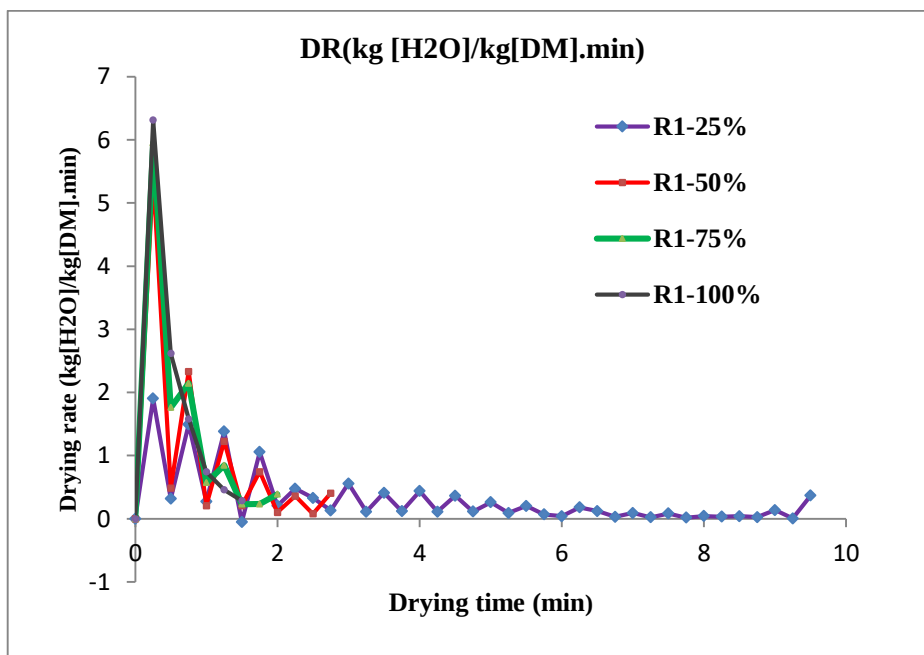
جدول ۲: مقادیر ضریب نفوذ موثر (m^2/s) و ضریب تعیین در درصد توان‌های مختلف مایکروویو با ضخامت

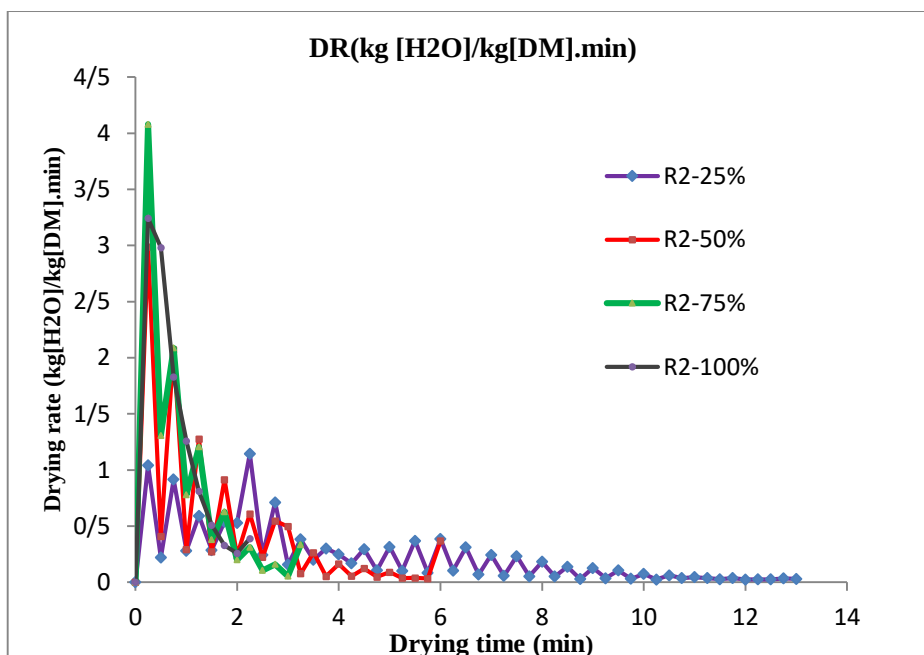
لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر

متغیرها	$D_{eff} (m^2/s)$	R^2
T1-25%	$1/329 \times 10^{-6}$	۰/۹۹۶۵
T1-50%	$4/75 \times 10^{-6}$	۰/۹۸۷۱
T1-75%	$7/097 \times 10^{-6}$	۰/۹۹۳۷
T1-100%	$1/093 \times 10^{-5}$	۰/۹۹۹۶
T2-25%	$4/073 \times 10^{-6}$	۰/۹۹۷۷
T2-50%	$8/964 \times 10^{-6}$	۰/۹۹۲۴
T2-75%	$1/748 \times 10^{-5}$	۰/۹۹۵۹
T2-100%	$2/486 \times 10^{-5}$	۰/۹۹۹۹

آهنگ تبخیر رطوبت

شکل (۶) آهنگ تبخیر رطوبت را نشان می‌دهد.





شکل ۶: نمودار آهنگ تبخیر رطوبت برای خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو با ضخامت

لایه های ۳ و ۶ میلی متر

در شروع فرایند خشک شدن رطوبت اولیه محصول زیاد بوده (۷۵٪) و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است، با پیشرفت زمان محتوی رطوبت محصول به طور طبیعی کاهش می یابد. محصول عمده رطوبت خود در ابتدای پروسه خشک شدن از دست می دهد و زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی مانده مورد نیاز است. در خشک کردن با افزایش محتوای رطوبت محصول در طی فرایند خشک شدن، آهنگ رطوبت کاهش می یابد و آهنگ کاهش رطوبت با افزایش توان افزایش می یابد. علت آن افزایش گرادیان حرارتی و در نتیجه افزایش تبخیر می باشد.

مدل سازی ریاضی منحنی های خشک شدن

در مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن به لیمو بصورت تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار متلب انجام شد. بهترین مدلی که می تواند سینتیک خشک شدن به لیمو را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 ، RMSE و انتخاب شد. در جدول (۳) مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE حاصل از برازش مدل-

های ریاضی در توان‌های مختلف مایکروویو آمده است. با مقایسه این مقادیر، مشخص شد که مدل میدیلی بهترین مدل برای $R1-30\%$ ؛ $R1-50\%$ ؛ $R1-75\%$ ؛ $R1-100\%$ ؛ $R2-30\%$ ؛ $R2-50\%$ ؛ $R2-75\%$ ؛ $R2-100\%$ ؛ بود که می‌توانست رفتار خشک‌شدن به‌لیمو را پیش‌بینی کند.

جدول ۳: مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE حاصل از برازش مدل‌های ریاضی در درصد توان‌های مختلف مایکروویو با

ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر

متغیرها	مدل	R ²	χ^2	RMSE
R1-30%	نیوتون	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۲۸۹	۰/۰۲۳
	بیج	۰/۹۹۶۴	۰/۰۰۰۲۳۷	۰/۰۱۵۴
	هندرسون و پاییس	۰/۹۹۵۳	۰/۰۰۰۱۶۸	۰/۰۱۷۸
	لگاریتمی	۰/۹۹۵۷	۰/۰۰۰۲۸۶	۰/۰۱۷۳
	میدیلی	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۱۰۳۰
R1-50%	نیوتون	۰/۹۶۴۲	۰/۰۰۰۲۹۳	۰/۰۵۵۴
	بیج	۰/۹۸۴۷	۰/۰۰۰۲۴۱	۰/۰۳۸۲
	هندرسون و پاییس	۰/۹۷۰۲	۰/۰۰۰۱۷۳	۰/۰۵۳۲
	لگاریتمی	۰/۹۷۳۶	۰/۰۰۰۲۹۲	۰/۰۵۳۱
	میدیلی	۰/۹۸۸۷	۰/۰۰۰۱۵۹	۰/۰۳۷۱
R1-75%	نیوتون	۰/۹۹۱۱	۰/۰۰۰۲۹۵	۰/۰۳۱۱
	بیج	۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۰۲۴۶	۰/۰۲۲۱
	هندرسون و پاییس	۰/۹۹۱۸	۰/۰۰۰۱۷۷	۰/۰۳۲۲
	لگاریتمی	۰/۹۹۳۳	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۳۱۹
	میدیلی	۰/۹۹۶۷	۰/۰۰۰۱۶۳	۰/۰۲۴۹
R1-100%	نیوتون	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۰۲۸۱	۰/۰۱۰۷
	بیج	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۰۲۳۸	۰/۰۰۹
	هندرسون و پاییس	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۰۱۶۵	۰/۰۱۱۸
	لگاریتمی	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۰۲۸۴	۰/۰۱۳۴

میدیلی	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۱۵۱	۰/۰۰۰۶۴	R2-30%
نیوتون	۰/۹۹۵۸	۰/۰۰۰۲۸۹	۰/۰۱۸۰	
پیج	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۰۲۳۷	۰/۰۱۳۶	
هندرسون و پابیس	۰/۹۹۶۶	۰/۰۰۰۱۶۸	۰/۰۱۶۳	
لگاریتمی	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۰۲۸۶	۰/۰۱۴۵	
میدیلی	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۱۳۷	R2-50%
نیوتون	۰/۹۸۹۶	۰/۰۰۰۲۹۳	۰/۰۲۷۲	
پیج	۰/۹۹۳۷	۰/۰۰۰۲۴۱	۰/۰۲۱۶	
هندرسون و پابیس	۰/۹۹۲۷	۰/۰۰۰۱۷۳	۰/۰۲۳۳	
لگاریتمی	۰/۹۹۳	۰/۰۰۰۲۹۲	۰/۰۲۳۴	
میدیلی	۰/۹۹۴۲	۰/۰۰۰۱۵۹	۰/۰۲۱۸	R2-75%
نیوتون	۰/۹۹۳۸	۰/۰۰۰۲۹۵	۰/۰۲۳۲	
پیج	۰/۹۹۵۲	۰/۰۰۰۲۴۶	۰/۰۱۵۵۷	
هندرسون و پابیس	۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۰۱۷۷	۰/۰۱۳۳	
لگاریتمی	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۱۷۲۹	
میدیلی	۰/۹۹۷۰	۰/۰۰۰۱۶۳	۰/۰۱۲۷۷	R2-100%
نیوتون	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۲۸۱	۰/۰۱۸۴	
پیج	۰/۹۹۶۱	۰/۰۰۰۲۳۸	۰/۰۰۰۷۲	
هندرسون و پابیس	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۰۱۶۵	۰/۰۱۷۶	
لگاریتمی	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۰۲۸۴	۰/۰۱۵۵	
میدیلی	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۱۵۱	۰/۰۰۰۶۶	

با توجه به اینکه مدل میدیلی برای متغیرها به عنوان بهترین مدل ریاضی برازش شده انتخاب شد، ضرایب آن در جدول

(۴) آمده است.

جدول ۴: ضرایب و شاخص آماری مربوط به مدل میدیلی برای خشک کردن به لیمو در درصد توان‌های

مختلف مایکروویو با ضخامت لایه‌های ۳ و ۶ میلی‌متر

R ²	n	k	b	a	توان مایکروویو (وات)
۰/۹۹۸	۰/۹۵۳	۰/۴۱۹۸	$۲/۴۴۱ \times ۱۰^{-۴}$	۱	R1-25%
۰/۹۸۸۷	۰/۵۹۸	۱/۲۵۲	-۰/۰۳۹۰۲	۰/۹۹۷۶	R1-50%
۰/۹۹۶۷	۰/۷۷۹۲	۱/۸۷	-۰/۴۰۱۸۱۶	۰/۹۹۸۸	R1-75%
۰/۹۹۹۹	۰/۸۸۰۷	۲/۴۸	-۰/۰۲۱۳۲	۰/۹۹۹۸	R1-100%
۰/۹۹۷۷	۱/۰۷۹	۰/۲۲۲۱	$۲/۲۰۷ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۹۴۷	R2-25%
۰/۹۹۴۲	۰/۸۸۴۲	۰/۷۱۴۶	-۰/۰۰۲۴۶۹	۰/۹۸۴۱	R2-50%
۰/۹۹۶۴	۰/۸۸۶۳	۱/۲۷۱	-۰/۰۰۴۷۱۳	۰/۹۹۴۵	R2-75%
۰/۹۹۹۸	۱/۴۱۲	۱/۶۶۷	۰/۰۰۶۶۸۴	۱/۰۰۲	R2-100%

شبکه عصبی مصنوعی MLP

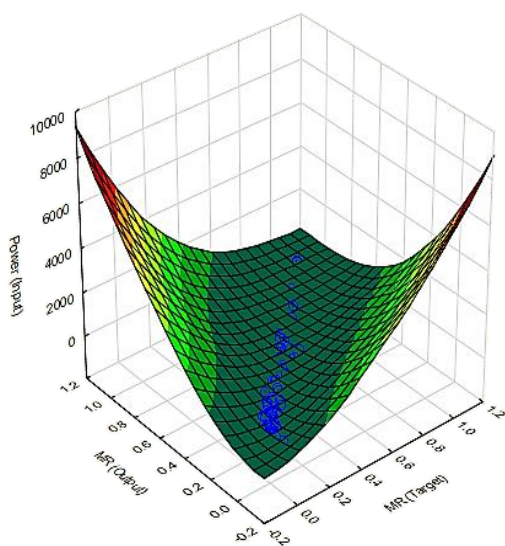
شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (MLP)، مدل معماری شبکه محبوب است که در بسیاری از برنامه‌های کاربردی تحقیقاتی در پزشکی، مهندسی، مدل‌سازی ریاضی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در MLP، مجموع وزنی ورودی‌ها و ترم بایاس از طریق یک تابع انتقال برای تولید خروجی و واحدهای در یک توپولوژی لایه‌ای Feed-forward به نام Neural Feed Forward Network تا سطح فعال‌سازی، عبور داده می‌شود (Venkatesan and Anitha., 2006). طبق نتایج به دست آمده در جدول ۵، بهترین مدل آموزش با شبکه ۳-۱۵-۳ MLP با ۱۵ نورون در لایه پنهان با بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۵۲) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۱۵۴) حاصل شد.

جدول ۵: نتایج مربوط به پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی میکروویو با

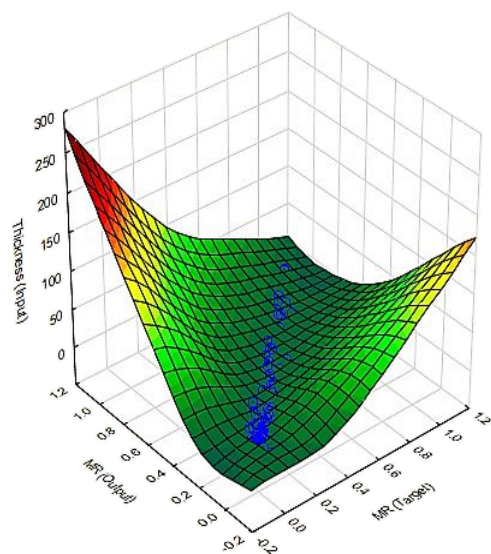
بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی MLP

شماره شبکه	توپولوژی شبکه	R^2	RMSE
۱	۳-۱۵-۳	۰/۹۵۲	۰/۱۵۴
۲	۳-۲۰-۳	۰/۹۳۹	۰/۱۷۴
۳	۳-۵-۳	۰/۹۲۲	۰/۱۹۲
۴	۳-۷-۳	۰/۷۶۱	۰/۳۳۲
۵	۳-۱۰-۳	۰/۷۴۵	۰/۳۴۶
۶	۳-۶-۳	۰/۷۴۰	۰/۳۴۸
۷	۳-۴-۳	۰/۷۳۸	۰/۳۵۱
۸	۳-۱۸-۳	۰/۷۲۹	۰/۳۵۳
۹	۳-۱۱-۳	۰/۷۱۵	۰/۳۵۶
۱۰	۳-۱۴-۳	۰/۷۰۶	۰/۳۵۹

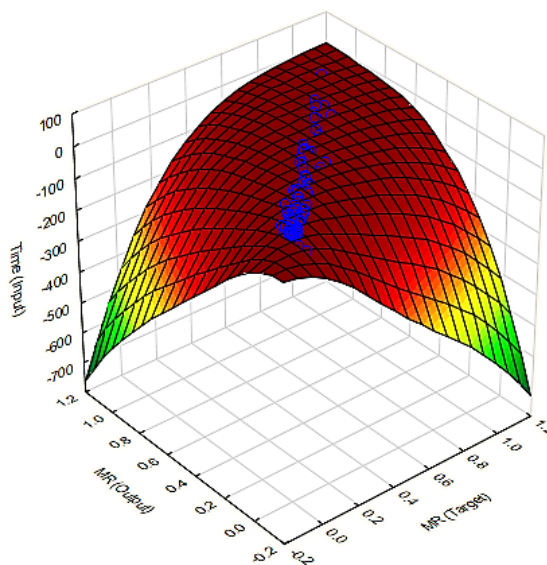
در شکل‌های (۷، ۸ و ۹) ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده پارامترهای سینتیک خشک کردن (نسبت رطوبت و آهنگ خشک شدن) و بازده انرژی مصرفی میکروویو نمونه‌های به‌لیمو توسط شبکه ۳-۱۵-۳ MLP نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی مقادیر تغییرات توان مصرفی میکروویو، ضخامت نمونه‌ها و زمان فرآیند خشک شدن می‌باشد. نتایج به دست آمده در تائید تحقیقات انجام شده، نشان داد که با توجه به مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از شبکه عصبی مصنوعی بهتر با مقادیر اندازه‌گیری شده، شبکه‌های عصبی مصنوعی از دقت و عملکرد بالایی برخوردارند. شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد در جهت پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی میکروویو مؤثر واقع شوند (Yilmaz and Kaynar., 2011).



(الف) توان مصرفی مایکروویو



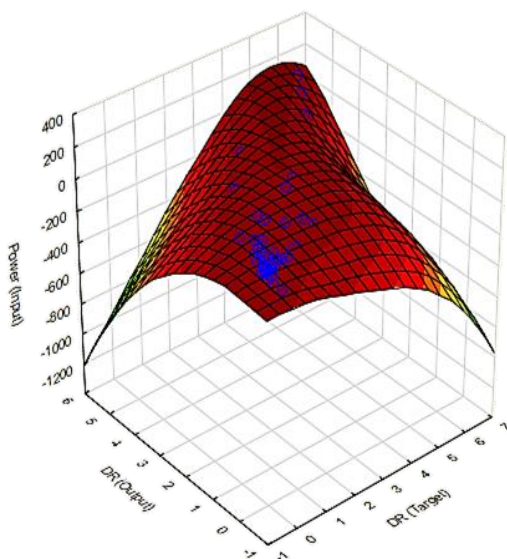
(ب) ضخامت نمونه‌ها



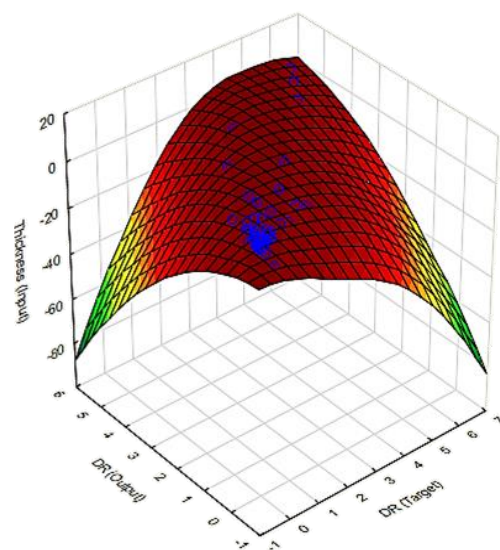
(ج) زمان فرآیند خشک شدن

شکل ۷: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با شبکه عصبی ۳-۱۵-۳

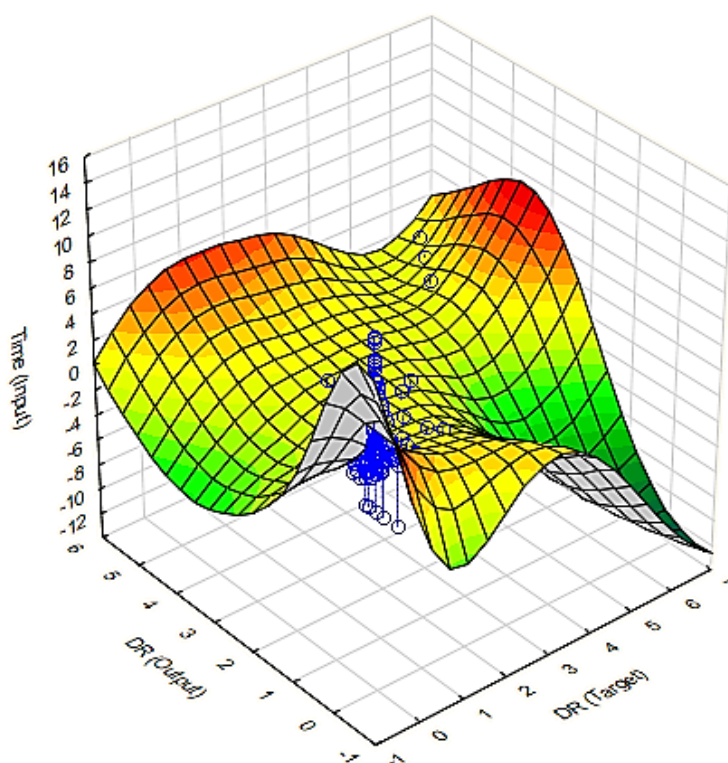
MLP، (الف) توان مصرفی مایکروویو، (ب) ضخامت نمونه‌ها و (ج) زمان فرآیند خشک شدن



(الف) توان مصرفی مایکروویو



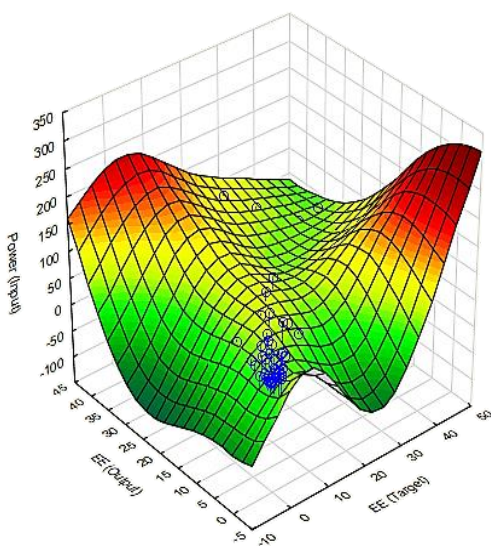
(ب) ضخامت نمونه‌ها



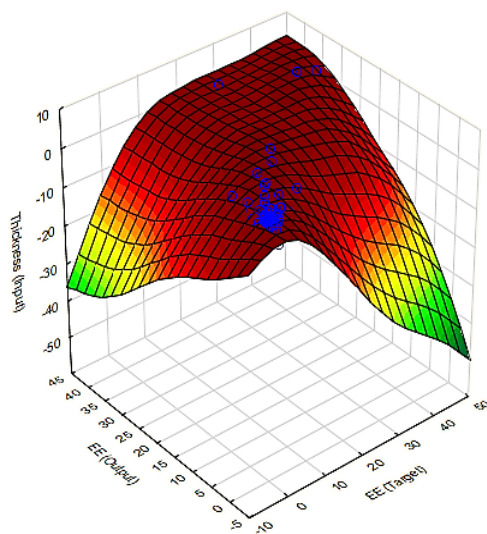
(ج) زمان فرآیند خشک شدن

شکل ۸: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده آهنگ خشک شدن با شبکه عصبی ۳-۱۵ MLP

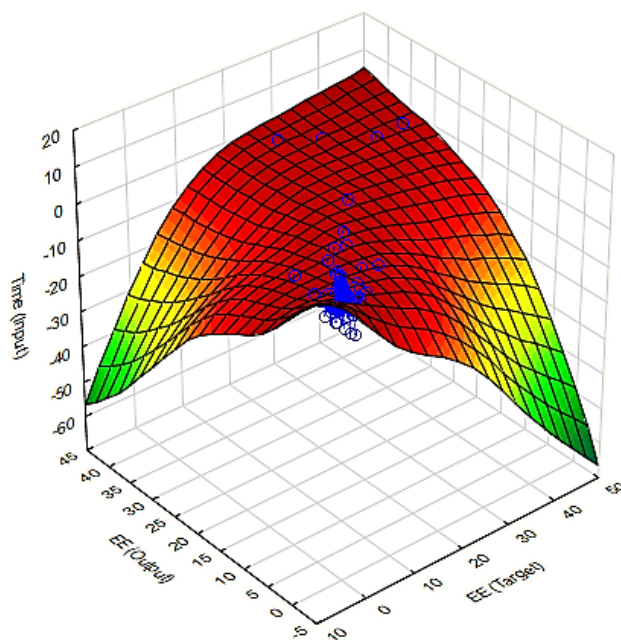
(الف) توان مصرفی مایکروویو، (ب) ضخامت نمونه‌ها و (ج) زمان فرآیند خشک شدن



(الف) توان مصرفی مایکروویو



(ب) ضخامت نمونه‌ها

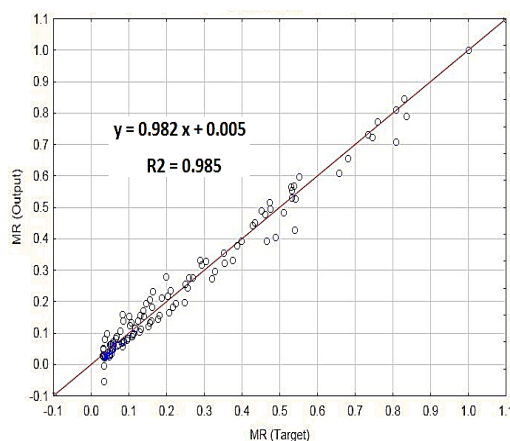


(ج) زمان فرآیند خشک شدن

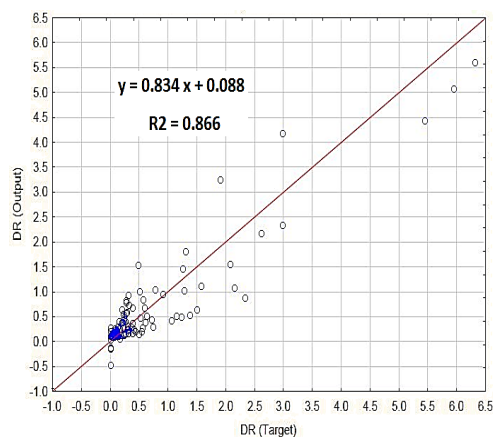
شکل ۹: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده بازده انرژی مصرفی مایکروویو با شبکه

عصبی ۳-۱۵-۳ MLP، (الف) توان مصرفی مایکروویو، (ب) ضخامت نمونه‌ها و (ج) زمان فرآیند خشک شدن

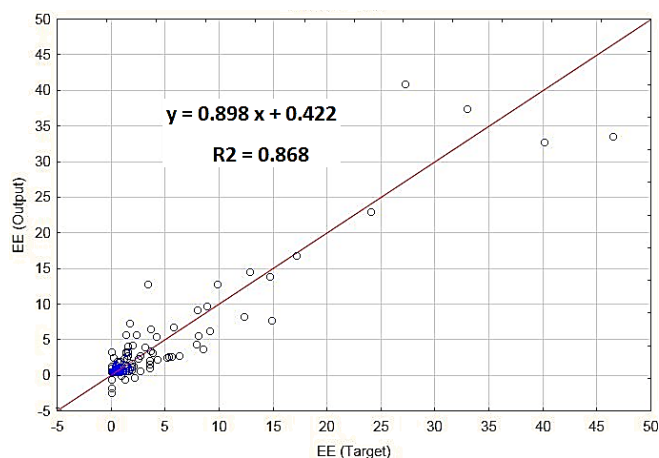
شکل (۱۰) نتیجه کلی حاصل از شبکه MLP برای ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توان مصرفی میکروویو، ضخامت نمونه‌ها و زمان فرآیند خشک شدن را در با مقایسه با پارامترهای سینتیک خشک-کردن و بازده انرژی مصرفی میکروویو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارتباط بالایی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این شبکه برآش شده است؛ لذا با اطمینان بالایی می‌توان از این شبکه، جهت پیش‌بینی پارامترهای ذکر شده با کمترین زمان و با دقت بالا استفاده نمود.



(الف) نسبت رطوبت



(ب) آهنگ خشک شدن



(ج) بازده انرژی مصرفی میکروویو

شکل ۱۰: ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده (الف) نسبت رطوبت، (ب) آهنگ خشک

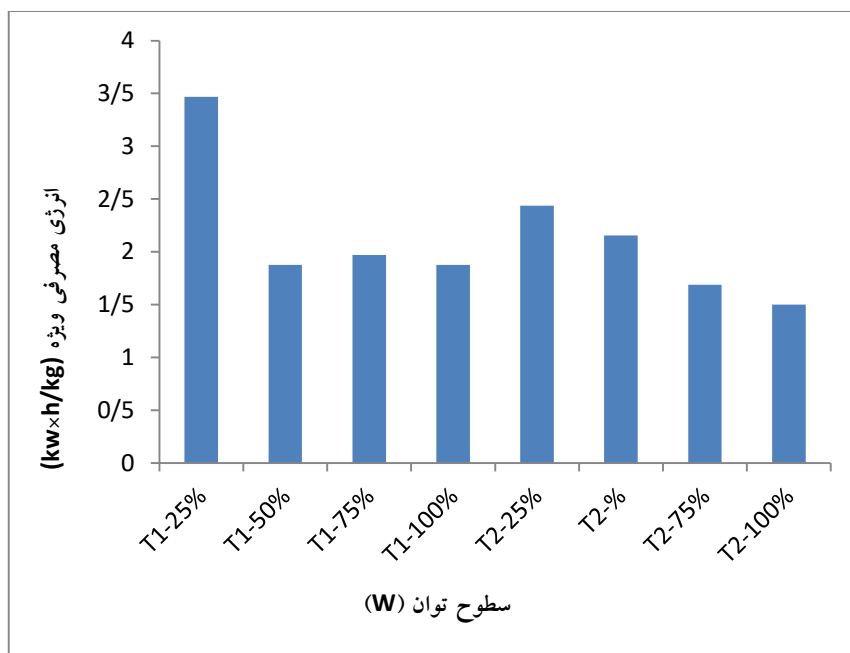
شدن و (ج) بازده انرژی مصرفی میکروویو، توسط شبکه عصبی ۳-۱۵-۳ MLP

انرژی مصرفی مورد نیاز و آهنگ خشک شدن

ماکزیمم کاهش آهنگ رطوبت در خشک‌کن میکروویو در ۲۵٪ توان می‌باشد. در شروع فرایند خشک شدن رطوبت اولیه محصول زیاد بوده (۷۵٪) و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است، با پیشرفت زمان محتوی رطوبت محصول به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد. محصول عمده رطوبت خود در ابتدای پروسه خشک شدن از دست می‌دهد و زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی مانده مورد نیاز است. در خشک کردن میکروویو با افزایش محتوای رطوبت محصول در طی فرایند خشک شدن، آهنگ رطوبت کاهش می‌یابد و آهنگ کاهش رطوبت با افزایش دما افزایش می‌یابد. علت آن افزایش گرادیان حرارتی و در نتیجه افزایش تبخیر می‌باشد.

انرژی مخصوص میکروویو

انرژی مخصوص، عبارت است از میزان انرژی مورد نیاز برای خشک کردن یک کیلوگرم محصول تازه. شکل (۱۱) میزان انرژی مخصوص مورد نیاز برای به‌لیمو را در توان‌های مختلف نشان می‌دهد. انرژی مخصوص مورد نیاز نیز با افزایش توان کاهش می‌یابد.



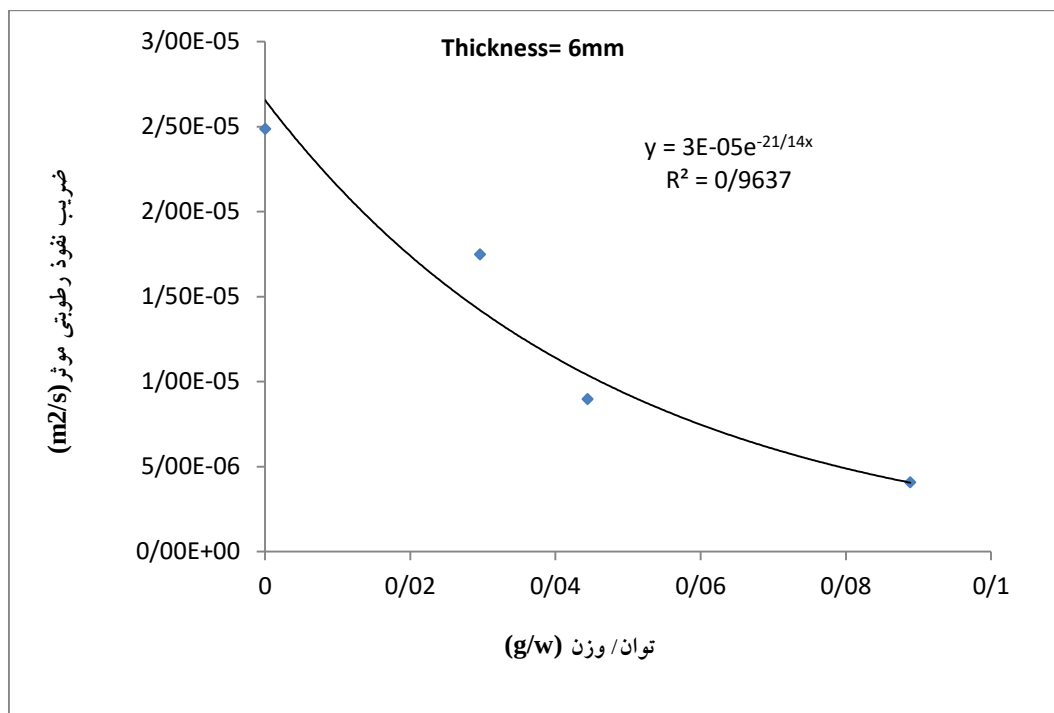
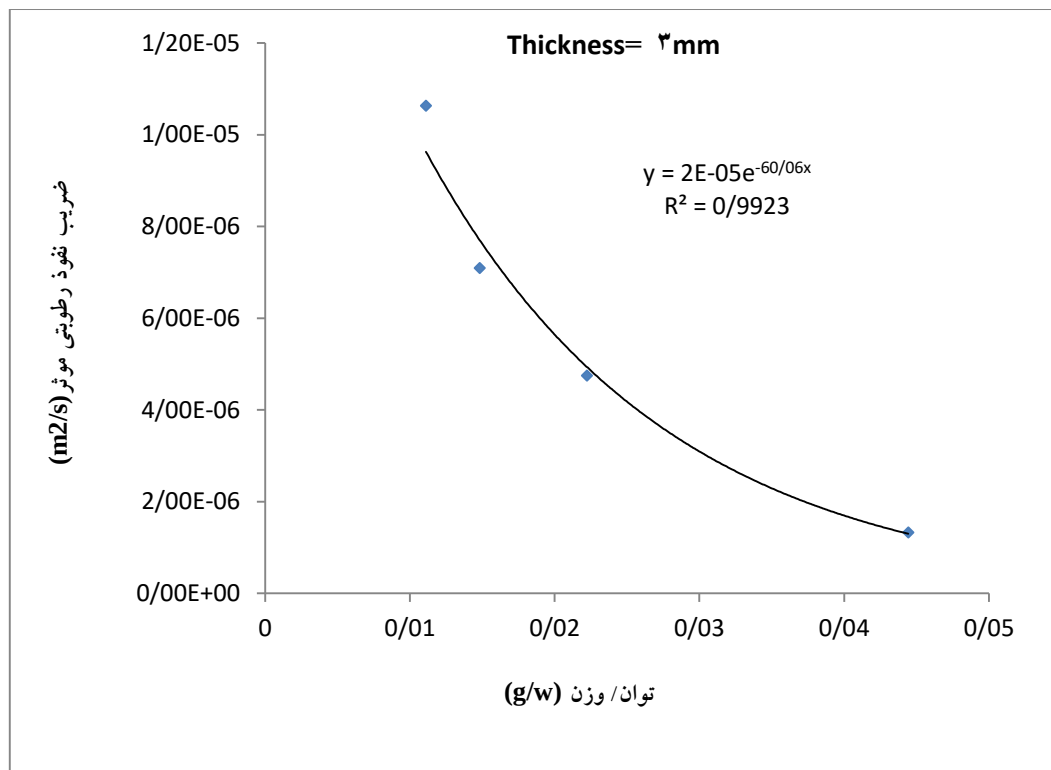
شکل ۱۱: انرژی مخصوص طی خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه های ۳ و ۶ میلی متر

محاسبه انرژی فعال سازی

تغییرات نفوذ رطوبتی در مقابل مقدار (m/P) در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مطابق با نمودار به دست آمده مقدار

انرژی فعال سازی و ثابت نفوذ رطوبتی برای به لیمو ۶۰/۰۶ و ۲E-۵ برای ضخامت ۳ میلی متر و ۲۱/۱۴ و ۳E-۵ برای

ضخامت ۶ میلی متر به دست آمد.



شکل ۱۲: تغییرات نفوذ رطوبتی مؤثر بر حسب m/p

نتیجه گیری

سامانه های خشک کن مایکروویو، زمان خشک کردن به لیمو را به طور قابل توجهی کاهش داده اند. همچنین، فرآیند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. بنابراین خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از مایکروویو می تواند جانشین مناسبی برای خشک کن های هوای گرم محسوب شود. خشک کردن بیش از حد به لیمو، باعث مصرف زیاد انرژی شده و کیفیت محصول خشک شده نیز کاهش می یابد و با توجه به محدودیتهای تکنولوژیکی در اندازه گیری پیوسته محتوای رطوبتی و نارضایتی از دقت آن و همچنین نبودن دقت مناسب مدل های فیزیکی بر اساس پارامترهای هوای خشک در اندازه گیری محتوای رطوبت در فرآیندهای غیرخطی و زمان بر، باعث شده از شبکه های عصبی مصنوعی در کنترل فرآیند خشک کردن استفاده شود. استفاده از شبکه های عصبی در طراحی و انتخاب شرایط کاری بهینه و کنترل خشک کن می تواند به کار رود. در این مطالعه به بررسی پارامترهای مختلف خشک کردن، ارزیابی توپولوژی های مختلف شبکه عصبی مصنوعی MLP جهت تعیین بهترین شبکه برای گیاه به لیمو با خشک کن مایکروویو با محدوده توان ۹۰۰-۱۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز در چهار سطح ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ توان خروجی پرداخته شده است. از شبکه عصبی مصنوعی MLP برای پیش بینی ارتباط بین پارامترهای سینتیک خشک کردن (نسبت رطوبت و آهنگ خشک شدن) و بازده انرژی مصرفی با تغییرات توان مصرفی مایکروویو با به کارگیری نرم افزار استاتستیکا استفاده شد. به منظور پیش بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی، شبکه MLP دارای یک ورودی و سه خروجی به طور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل کردن آهنگ تبخیر به لیمو ارائه شده است. نتایج بررسی و تحقیق نشان داد که:

۱- شبکه عصبی مصنوعی MLP یک ابزار بسیار قدرتمند در پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و

بازده انرژی مصرفی گیاه دارویی به‌لیمو بر اساس مقادیر توان مصرفی مایکروویو است.

۲- بین شبکه‌های مختلف مورد ارزیابی، شبکه عصبی بهترین مدل آموزش با شبکه ۳-۱۵-۳ MLP با ۱۵

نورون در لایه پنهان با بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۵۲) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۱۵۴)

حاصل شد.

۳- ارتباط بالایی بین توان مصرفی مایکروویو و پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی

مایکروویو طی فرآیند خشک‌شدن به‌لیمو در یک خشک‌کن مایکروویو وجود دارد.

۴- آهنگ تبخیر برحسب تابعی از زمان و توان برای خشک‌شدن به‌لیمو بیان شده است. نتایج به دست آمده

نشان داد که از بین مدل‌های برازش شده، مدل میدیلی به عنوان بهترین مدل با توجه به بیشترین مقدار R^2

و کمترین مقادیر، مربع کای χ^2 و RMSE برای توصیف فرآیند خشک‌شدن است.

۵- توان مایکروویو برای خشک‌کردن به‌لیمو بر مدت زمان خشک‌شدن در یک خشک‌کن مایکروویو

تأثیر دارد. با افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که

زمان خشک‌شدن برای ۱۰۰٪ توان و ضخامت ۳ میلی‌متر ۱/۲۵ دقیقه و برای ۲۵٪ توان و ضخامت ۶

میلی‌متر ۱۳ دقیقه بود.

۶- با توجه به نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد که خشک‌کردن با مایکروویو به دلیل کاهش زمان خشک-

شدن، روش مناسبی برای خشک‌کردن بیشتر گیاهان از جمله گیاهان دارویی برای حفظ کیفیت آن‌ها

می‌باشد.

۷- سطح توان بیشتر، نقش مهمی در زمان خشک کردن گیاه دارد. کمترین ضریب نفوذ موثر m^2/s 10^{-6}

$\times 10^{-6}$ و بیشترین مقدار آن m^2/s $10^{-5} \times 486/2$ به ترتیب در T1-25% و T2-100% می باشد.

۸- آهنگ تبخیر رطوبت در ابتدای زمان خشک شدن زیاد و سپس با گذشت زمان کاهش می یابد.

خشک کردن مایکروویو نسبت به خشک کن هوای گرم زمان کمتری لازم دارند.

۹- بیشترین میزان انرژی مصرفی ویژه در خشک کن مایکروویو در ۲۵٪ توان و ضخامت ۳ میلی متر و مقدار

۳/۴۶ کیلو وات ساعت بر کیلو گرم و کمترین میزان انرژی مصرفی در ۱۰۰ توان و ضخامت ۶ میلی متر

به میزان ۱/۵ کیلو وات ساعت بر کیلو گرم محاسبه شد.

۱۰- با افزایش توان مایکروویو طبق زمان خشک شدن کاهش یافت و سرعت خشک شدن بالاتر در توان

بالاتر مایکروویو به دست آمد. با افزایش توان، زمان خشک کردن به علت افزایش گرادیان حرارتی در

داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول، کاهش می یابد. انرژی فعال سازی و ثابت

نفوذ رطوبتی برای به لیمو ۶۰/۰۶ و ۵-۲E برای ضخامت ۳ میلی متر و ۲۱/۱۴ و ۵-۳E برای ضخامت ۶ میلی متر به

دست آمد.

تقدیر و تشکر

از موسسه محترم آموزش و ترویج کشاورزی و مرکز آموزش عالی امام خمینی (ره) بویژه ریاست محترم مرکز،

جناب آقای دکتر سید داوود حاجی میررحیمی، برای پشتیبانی و فراهم کردن شرایط انجام این تحقیق تشکر و قدردانی

می گردد.

فهرست منابع:

۱. بی نام (۱۳۷۲). خشک کردن محصولات کشاورزی راهی به سوی استقلال اقتصادی. انتشارات عطایی، ۱۳۲ صفحه.
۲. توکلی، ت. (۱۳۸۲). مکانیک محصولات کشاورزی. تالیف گریگوری سیتیکی. خدمات فرهنگی سالکان، تهران.
۳. توکلی هاشجین، ت. (۱۳۸۲). مکانیک محصولات کشاورزی. تالیف گریگوری سیتیکی. خدمات فرهنگی سالکان، تهران.
۴. خفاجه، ح.، و بناکار، ا.، و مینایی، س.، و تقی زاده، ا.، و متولی، ع.، و رضایی آدریانی، م. (۱۳۹۳). بررسی انرژی مصرفی و سینتیک خشک کردن گیاه دارویی آویشن در خشک کن میکروویو. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۱(۴۵)، ۴۵-۵۴.
۵. خفاجه، ح. (۱۳۹۸). اصول گرمایش دی الکتریک میکروویو، انتشارات رشنو.
۶. زمریدیان، ع. (۱۳۸۳). خشک کردن دانه ها (اصول نظری و عملی). تالیف: . پاییس، ا. انتشارات نشر علوم کشاورزی. تهران. ص ۴۴۴.
۷. فرجی، ر. (۱۳۷۱). اصول نگهداری مواد غذایی.. ص ۲۸۰.
۸. فلاحی، م. (۱۳۷۰). علم مواد غذایی. تالیف: ان پاتر، ن. کشت و صنعت چین چین. جلد ۱. ۲۸۸ صفحه
9. Aghbashlo, M., Kianmehr. M., Samimi-Akhijahani. H., (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). Energy Conversion and Management. 49, 2865-2871.
10. AhmadiChenarbon, H., Minaei, S., Bassiri, A. R., Almassi, M., & Arabhosseini, A. (2011). Effective parameters on drying of Hypericum perforatum L. leaves. Journal of Medicinal Plants Research, 5(18), 4530-4536.
11. Anonymous 2011a. Typical elements of a magnetron, Available on the <http://www.britannica.com/EBchecked/media/137/Typical-elements-of-a-magnetron>.

12. Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4–6), 121–126.
13. Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils—a review. *Food and chemical toxicology*, 46(2), 446–475.
14. Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of foods*. Springer Science & Business Media.
15. Buffler, C. R. (1993). *Microwave cooking and processing*. Van Nostrand Reinhold.
16. Carvalho, G. R., Monteiro, R. L., Laurindo, J. B., & Augusto, P. E. D. (2021). Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102770.
17. Chinnan, M. S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27, 610–615.
18. Dandamrongrak, R., Young, G., and Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 95, 139–146.
19. Darvishi, H., Banakar, A., & Zarein, M. (2012). Mathematical modeling and thin layer drying kinetics of carrot slices. *Global Journal of Science Frontier Research Mathematics and Decision Sciences*, 12(7), 56–64.
20. Doymaz, I. (2007). Air drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food engineering*. 78, 1291–1297.
21. Ertekin C, Yaldız O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Food Engineering*, 63(23): 349–359, 2004.
22. Ertekin, C., & Yaldiz, O. S. M. A. N. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of food engineering*, 63(3), 349–359.
23. Jin, G., Zhang, M., Fang, Z., Cui, Z., & Song, C. (2015). Numerical investigation on effect of food particle mass on spout elevation of a gas–particle spout fluidized bed in a microwave–vacuum dryer. *Drying technology*, 33(5), 591–604.
24. Krulis, M., Kühnert, S., Leiker, M., & Rohm, H. (2005). Influence of energy input and initial moisture on physical properties of microwave-vacuum dried strawberries. *European Food Research and Technology*, 221, 803–808.
25. Marshall, M. G., & Metaxas, A. C. (1999). Radio frequency assisted heat pump drying of crushed brick. *Applied thermal engineering*, 19(4), 375–388.

26. Menges, H. O., & Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of food engineering*, 77(1), 119-125.
27. Mohsenin, N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials* Gordon Breach Science. New York.
28. Ohlsson, T., and Bengtsson, N. (2002). *Minimal processing technologies in the food industry*. 1st ed. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, LLC.
29. Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., & Ross, I. J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 112.
30. Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 541-549.
31. Park, J., Cho, J. H., & Braatz, R. D. (2021). Mathematical modeling and analysis of microwave-assisted freeze-drying in biopharmaceutical applications. *Computers & Chemical Engineering*, 153, 107412.
32. Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering*. John Wiley & sons.
33. Sahin, A. Z., & Dincer, I. (2002). Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(16), 3267-3273.
34. Schubert, H., and Regier, M. (2005). *The microwave processing of foods*. 1st ed Woodhead Publishing Limited, pp. 1–110.
35. Sharma G. P., Verma, R. C. and Pankaj, P. (2005) .Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*. 171, 282-286.
36. Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C., Rossello, C., (2005). Use of Exponential, Page's and Diffusional models to simulate the drying Kinetics of Kiwi Fruit. *Journal of Food Engineering*. 66: 323–328.
37. Venkatesan, P., & Anitha, S. (2006). Application of a radial basis function neural network for diagnosis of diabetes mellitus. *current science*, 91(9), 1195-1199.
38. Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems engineering*, 88(1), 1-18.
39. Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., & Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28(1), 296-0301.
40. White, G. M., Ross, I. J., & Poneleit, C. G. (1981). Fully-exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*, 24(2), 466-0468.

41. Yilmaz, I., & Kaynar, O. (2011). Multiple regression, ANN (RBF, MLP) and ANFIS models for prediction of swell potential of clayey soils. *Expert systems with applications*, 38(5), 5958-5966.
42. Yongsawatdigul, J., & Gunasekaran, S. (1996). Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(2), 145-156.
43. Zarein M, Khoshtaghaza M.H, Ghobadian B, Ameri Mahabadi H. (2019). Prediction and optimization of fish biodiesel characteristics using permittivity properties. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21 (2), 309–322.
44. Zarein, M., Banakar, A., & Khafajeh, H. (2013). Mathematical modeling, energy consumption and thin layer drying kinetics of carrot slices under microwave oven. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(18), 2057.

Abstract

Drying is one of the oldest methods of preserving medicinal plants. In this report, mathematical modeling, kinetic prediction and energy efficiency of drying the medicinal plant lemongrass (*Lippia citriodora* Kunth) using an artificial neural network in a microwave dryer have been discussed. In the microwave drying method, four power levels (25%, 50%, 75% and 100% power) and two thicknesses of 3 and 6 mm were used for lemongrass drying. The results showed that the lowest effective diffusion coefficient was 1.329×10^{-6} m²/s at a thickness of 3 mm and 25% power and the highest value was 2.486×10^{-5} m²/s at a thickness of 6 mm and 100 power. Also, in this report, different drying parameters and different topologies of the MLP artificial neural network were investigated and evaluated to determine the best network for lemongrass with a microwave dryer. The results showed that the MLP artificial neural network is a very powerful tool in predicting the drying kinetic parameters and energy efficiency of medicinal plants based on microwave power consumption values.

Keywords: *Lippia citriodora* Kunth, dryer, effective diffusion coefficient, microwave, neural network

MINISTRY OF JEHAD-E-AGRICULTURE
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Agricultural Education and Extension Institute

PROJECT TITLE: Mathematical modeling and prediction of kinetics and efficiency of energy consumption of medicinal plant drying to *Lippia citriodora* Kunth using artificial neural network.

PROJECT NO.:

RESEARCHERS: M. Sedaghat Hosseini

COWORKERS: H. Khafajeh and M. Zarien

LOCATION: Karaj

START DATE: 2024

DURATION: 9 month

PUBLISHER: Agricultural institute of education and extension

TIRAGE:

DATE OF ISSUE: 2025



ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN
MINISTRY OF JEHAD-E-AGRICULTURE
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Agricultural Education and Extension Institute

TECHNICAL REPORT

**Mathematical modeling and prediction of kinetics and efficiency of energy
consumption of medicinal plant drying to Lippia citriodora Kunth using artificial
neural network.**

M. Sedaghat Hosseini

Register No:
Date:



ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN
MINISTRY OF JEHAD-E-AGRICULTURE
Agricultural Research, Education and Extension
Organization
Agricultural Education and Extension Institute

TECHNICAL REPORT

**Mathematical modeling and prediction of kinetics and
efficiency of energy consumption of medicinal plant drying to
Lippia citriodora Kunth using artificial neural network.**

M. Sedaghat Hosseini

Register No:....

Date: