



کاربرد ترکیب کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی و ایربورن التراسوند در بهبود سینتیک خشک شدن جلبک دونالیلا سالینا

احسان قجرجزی^۱، عادل حسین‌پور^{*}، علی محمد نیکبخت^۱ و ناصر آق^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۴

^۱ به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و استاد مکانیک بیوسیستم، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

^۲ استاد گروه بیولوژی و تکثیر و پرورش، پژوهشکده آرتمیا و آبی پروری، دانشگاه ارومیه

*مسئول مکاتبه: Email: a.hosainpour@urmia.ac.ir

چکیده

زمینه مطالعاتی: بازیابی و فراوری جلبک از محیط کشت یکی از مراحل ضروری تولید جلبک است. اگر جلبک به طور مناسب خشک شود، قابلیت این را دارد که تا سال‌ها و بدون کاهش کیفیت ذخیره شود. هدف: هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای خشک کردن جلبک دونالیلا سالینا (*Dunaliella salina*) با شیوه نوین کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی در ترکیب با توان ایربورن التراسوند (Super critical CO₂+ Power airborne ultrasonic) بر نرخ کاهش رطوبت، مدل سازی ریاضی خشک کردن، مدل سازی خشک کردن با روش سطح پاسخ و نرخ خشک شدن می‌باشد. روش کار: در این تحقیق به منظور بررسی فرآیند خشک کردن جلبک دونالیلا سالینای (*Dunaliella salina*) سبز، با استفاده از روش نوین و ترکیبی اعمال همزمان کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی و امواج ایربورن التراسوند، آزمایشی در سه فشار ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ بار، سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد و سه سطح توان ایربورن التراسوند، شامل بدون اعمال امواج و با اعمال امواج در دو سطح ۲۰ وات و ۴۰ وات انجام شد. برای تعیین اثرات سه متغیر مستقل فشار، دما و توان التراسوند در سه سطح آلفا ۱-، ۰- و ۱+ از یک طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design) که شامل ۲۰ آزمایش با شش تکرار در نقطه مرکزی بود، استفاده گردید. نتایج: نتایج نشان داد، با افزایش فشار، دما و توان التراسوند نرخ کاهش رطوبت افزایش می‌یابد. بررسی مدل‌های ریاضی، مدل میدیلی و همکاران بهترین برازش را نشان داد به نحوی که بالاترین مقدار میانگین R² ۰/۹۹۹۲۵ و کمترین مقادیر میانگین SSE، RMSE به ترتیب ۰/۰۰۰۲۳ و ۰/۰۰۰۴ برای این مدل به دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد، اثر تغییرات فشار، تغییرات دما و تغییرات توان التراسوند بر نسبت رطوبت در زمان‌های اندازه‌گیری شده، معنی‌دار می‌باشد. با افزایش فشار، دما و توان التراسوند، نسبت رطوبت در هر یک از زمان‌های اندازه‌گیری شده، کم شده‌است. با توجه به بررسی ضریب تبیین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مدل ارائه شده توسط روش RSM که همگی بیشتر از ۰/۹۹۹ بودند، مشاهده شد مدل ارائه شده از اعتبار بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین مشاهده شد، افزایش دما و افزایش توان التراسوند باعث افزایش نرخ خشک کردن می‌گردد. و در بررسی اثر تغییرات فشار بر نرخ خشک کردن، مشاهده شد که با افزایش فشار، نرخ خشک کردن با طور معنی‌داری افزایش پیدا می‌کند. نتیجه‌گیری نهایی: با افزایش فشار، دمای فوق بحرانی و افزایش توان التراسوند، نرخ کاهش رطوبت و نرخ خشک کردن افزایش یافت.

واژگان کلیدی: کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی، ایربورن التراسوند، جلبک دونالیلا سالینا، خشک کردن

مقدمه

مشخصه ای باشد که بر محتوای فیتوشیمیایی نمونه تاثیر گذار است (لینگ و همکاران ۲۰۱۵). بررسی‌ها نشان داده‌است که افزایش دمای خشک کردن سبب کاهش ترکیبات فرار و فنولی جلبک شده و کاهش دمای خشک کردن، مقدار این ترکیبات را در جلبک افزایش خواهد داد (لینگ و همکاران ۲۰۱۵). همچنین مشاهده شد که با افزایش دمای خشک کردن، میزان کارتنوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به طور معنی داری کاهش می‌یابد (توین و همکاران ۲۰۱۰). ماده بتاکاروتن بسیار ناپایدار است و در برابر حرارت و نور به راحتی تجزیه می‌شود (اینز و همکاران ۲۰۱۱). با توجه به تحقیقات انجام شده در روش‌های خشک کردن مرسوم، میزان بتاکاروتن پس از خشک کردن، تا چندین برابر کاهش یافته است (اینز و همکاران ۲۰۱۱ و کارابولوت و همکاران ۲۰۰۷). همچنین میزان بازیابی بتاکاروتن از دونالیلا سالینا در خشک‌کن‌های مرسوم با افزایش دما، کاهش یافته است (لیچ و همکاران ۱۹۹۸).

در تحقیقی که اثر خشک کردن دونالیلا سالینا با روش بستر سیال در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، جریان هوای ۳/۵ متر بر ثانیه و مدت ۱۰ دقیقه، بر مقدار بتاکاروتن باقی‌مانده بررسی گردید مشاهده شد که ۱۷/۳ تا ۲۰/۷ درصد از بتاکاروتن موجود در جلبک از بین می‌رود (لیچ و همکاران ۱۹۹۸ (الف)). محققین اثر مشخصه‌های مختلف روش خشک کردن اسپری جلبک دونالیلا سالینا شامل دمای ورودی، دمای خروجی و مقدار ماده جامد را بر بتاکاروتن بررسی کرده و مشاهده کردند که مقدار بتاکاروتن باقی‌مانده بین ۵۷ تا ۹۱ درصد متغیر می‌باشد (لیچ و همکاران ۱۹۹۸). در تحقیقی خشک کردن و مدل سازی خشک کردن سندسموس اوبلیکیوس (*Scenedesmus obliquus*) تحت دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوا ۱ و ۲ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، کاهش نرخ خشک شدن، در دوره نزولی (Falling rate) اتفاق افتاد (چوی و همکاران ۱۹۸۷). محققین تاثیر روش‌های خشک کردن

جلبک تک سلولی دونالیلا سالینا *Dunaliella salina* متعلق به خانواده *Chlorophyceae* دارای دو تاژک هم طول، کلروپلاست فنجانی و بدون دیواره سخت سلولیلی ساکاریدی است که در محیط‌های شور به خصوص دریاچه‌های نمکی فوق اشباع یافت می‌گردد (زنوزی و همکاران ۲۰۱۳). این جلبک حاوی رنگدانه‌ی بتاکاروتن، اسیدهای حلال، مواد محرک ایمنی مانند فیکوسیائین، پلیساکاریدها، آهن و روی است. همچنین حاوی مقادیری ویتامین C و ویتامین E نیز می‌باشد (علیشاهی و کرمی-فر ۱۳۹۴). این جلبک به عنوان منبع وسیع کارتنوئید معرفی شده است (مندویلا و همکاران ۲۰۰۸). کارتنوئیدها آنتی‌اکسیدان‌های قوی و رنگدانه‌های روشنی هستند و به همین دلیل به عنوان غذای انسان و رنگدانه‌های رژیم غذایی آبریزان استفاده می‌شود (دبری و همکاران ۲۰۰۴). باتوجه به نقش کارتنوئیدها در رشد، تحریک ایمنی، رنگ، خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد سرطانی، استفاده از منابع کارتنوئیدها مانند رنگدانه‌های سنتتیک (آستاگزانتین، کانتزانترین) و طبیعی در آبریزان پرورشی و زینتی رواج زیادی یافته است (علیشاهی و کرمی-فر ۱۳۹۴).

بازیابی و فرآوری جلبک از محیط کشت یکی از مراحل ضروری تولید جلبک است. جلبک چالش برانگیز بوده و برای تولید اقتصادی آن بایستی هزینه‌ها به طور قابل قبولی کاهش پیدا کنند. آخرین مرحله فرآوری جلبک، خشک کردن جلبک آبرگیری شده تا ۱۲-۱۵ درصد محتوای رطوبتی است (شو و همکاران ۲۰۱۵). خشک کردن جلبک، تا ۳۰ درصد هزینه تولید را در بر می‌گیرد (قائنی ۱۳۸۹). خشک کردن، فعالیت آبی محصول را کاهش می‌دهد که این امر در ضمن کاهش رشد میکروبی باعث حفظ و پایداری کیفیت محصول شده و حجم را برای انبارداری کاهش می‌دهد. خشک کردن جلبک همچنین، پایداری ماده را برای استخراج چربی افزایش می‌دهد (گلد و همکاران ۲۰۱۴). اگر جلبک به طور مناسب خشک شود، قابلیت این را دارد که تا سال‌ها بدون کاهش کیفیت ذخیره شود. تکنیک‌های خشک کردن می‌تواند

کردن فوق بحرانی، یک فرآیند استخراج است، که سیال فوق بحرانی حلال استخراج و آب ماده حل شونده است (برون ۲۰۱۰). مزیت دیگر استفاده از این روش خشک کردن، این است که می‌توان از ارتباط بخار-مایع در فاز هموزن، جلوگیری کرد. به همین دلیل، تنش کششی ناشی از مویبندی که در طول فرآیند خشک کردن با هوا پیش می‌آید، در خشک کردن فوق بحرانی وجود ندارد و این باعث حفظ ساختار ماده می‌شود. شکستن و گسیختگی محصول که در طول خشک کردن‌های مرسوم اتفاق می‌افتد، با استفاده از سیال فوق بحرانی پیشگیری می‌شود (ناماتسو و همکاران ۱۹۹۹). به علاوه، کربن دی‌اکسید دمای بحرانی پایینی دارد (۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد)، از این رو بهره‌برداری در دمای نسبی پایین (به طور قابل توجهی پایین تر از خشک کن‌های رایج) از آسیب‌های گرمایی جلوگیری می‌کند (برون ۲۰۱۰). تحقیقات اخیر نشان داده است که، $\text{Super critical CO}_2$ علاوه بر خشک کردن، توانایی پاستوریزه کردن و غیر فعال سازی میکرواورگانیزم‌های طبیعی و پاتوژن‌های تلقیح شده را دارد (موریاتو و همکاران ۲۰۱۹). برای بهبود شرایط و افزایش آهنگ خشک شدن، کربن دی‌اکسید فوق بحرانی را می‌توان با التراسوند قوی ترکیب کرد. التراسوند در فرکانس پایین (۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز) را می‌توان برای بهبود سرعت فرآیند انتقال جرم و خروج آب و غیر فعال سازی باکتریایی، مورد استفاده قرار داد در واقع به این دلیل که پدیده کاویتاسیون در این ترکیب به وجود می‌آید و سبب افزایش اختلاط میکرواورگانیزم‌ها و ارتباط بین حلال و میکرواورگانیزم‌ها می‌شود، خروج آب و غیرفعال سازی باکتریایی بهبود می‌یابد (موریاتو و همکاران ۲۰۱۹). التراسوند غیر تماسی ایربورن التراسوند که در آن هیچ سطح تماس یا مایعی برای اتصال هورن و سطح نمونه مورد نظر وجود ندارد، می‌تواند در کاربردهای مختلف از جمله خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. این سیستم می‌تواند در ترکیب

جلبک اسپیرولینا شامل خشک کردن در سایه، خشک کردن در آفتاب، خشک کردن در گرمخانه، خشک کردن در ماکروویو، خشک کردن در گرمخانه تحت خلا، خشک کردن انجمادی، خشک کردن پاششی و انجماد را بر میزان موادمعدنی، ترکیب اسیدهای چرب، میزان کل ترکیبات فنولیک و فعالیت ضد اکسایشی نمونه‌ها بررسی و مشاهده کردند که خشک کردن پاششی و خشک کردن انجمادی، بهترین روش‌های فرآوری برای حفظ اسیدهای چرب غیر اشباع بودند و از نظر حفظ ترکیبات فنولیک کل و ویژگیهای ضد اکسایشی اسپیرولینا پلاتنسیس، روش خشک کردن در گرمخانه تحت خلا ارجح بود (نوری و عباسی ۱۳۹۷).

سیال فوق بحرانی (Super Critical Fluid)

سیال فوق بحرانی، سیالی است که دما و فشار آن از دما و فشار بحرانی فراتر رود و تفاوت بین دوفاز مایع و گاز آن در حالی که در کنار هم وجود دارند، از بین برود. در چنین حالتی، تراکم پذیری ماده در دمای ثابت بی‌نهایت است. در ناحیه فوق بحرانی به حالت‌های میانی می‌توان دست یافت، که در دما و فشار غیر بحرانی قابل دسترس نیستند (امیدوار اوغانی ۱۳۹۵).

خشک کردن فوق بحرانی

عمدتاً کربن دی‌اکسید به عنوان یک سیال فوق بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل این امر ارزانی، بی‌خطر بودن برای محیط زیست، غیر قابل اشتعال بودن، دارای پایداری شیمیایی و پایداری در محیط‌های رادیواکتیو و دارای نشان GRAS (generally regarded as safe) می‌باشد. علاوه بر مزایای فوق، شرایط فوق بحرانی آن به راحتی در دمای ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷/۳۸ مگاپاسکال، قابل دسترسی است. بنابراین کربن دی‌اکسید فوق بحرانی ممکن است در تیمارهای مواد حساس به دما استفاده شود و همچنین یک مزیت دارد که در فشار محیط به صورت گاز است، بنابراین تمام اثرات حلال، زمانی که در شرایط محیط (اتمسفِر) قرار می‌گیرد، می‌تواند از بین برود. در واقع می‌توان گفت که خشک

با روش‌های خشک کردن بر محدودیت‌ها غلبه کند. برای مثال، دمای بالا در زمان خشک کردن می‌تواند به ترکیبات ماده مورد نظر (رنگ، بافت، ترکیبات فرار و غیره) آسیب برساند، این در حالی است که در ترکیب با ایربورن التراسوند می‌توان دمای خشک کردن را پایین آورد. در نتیجه در شرایط دمایی مشابه، زمان خشک کردن کاهش می‌یابد و کیفیت محصول و ترکیبات غذایی آن حفظ خواهد شود. در این سیستم از ترنسدیوسرها و هورن‌های غیر تماسی استفاده می‌شود، که می‌توانند امواج التراسوند را با استفاده از هوا، به عنوان محیط انتقال، به نمونه مورد نظر انتقال دهند (چاروکس و همکاران ۲۰۱۷). کاربرد امواج التراسوند هوایی یک تکنیک امیدوارکننده را نمایان می‌سازد، به این دلیل که بدون اثر گذاری بر مشخصات و کیفیت محصول، عمل را انجام می‌دهد. ایربورن التراسوند موج صوتی چرخان است و می‌تواند در تمام محیط هوا انتقال پیدا کند. فرکانس التراسوند برای مواد غذایی بین ۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز است. ایربورن التراسوند نه تنها تغییرات فشار، سرعت‌های نوسان و میکروجریان‌های موجود در سطح گاز- جامد را توضیح می‌دهد، بلکه سیکل‌های فشرده-سازی (اثر اسفنجی) بر ساختار داخلی که سبب افزایش نرخ تبخیر، کاهش لایه مرزی انتشار، افزایش انتقال جرم و شتاب انتشار می‌شود را توجیه می‌کند (فن و همکاران ۲۰۱۶). از التراسوند برای خشک کردن قطعات قارچ، سوسن یک روزه (daylilies)، توت (mulberry)، بذرها و سدر استفاده گردید و نتایج نشان داد استفاده از التراسوند سینتیک خشک کردن را بهبود می‌بخشد و مجموع مصرف انرژی را کاهش می‌دهد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۶؛ ژانگ و همکاران ۲۰۱۷؛ تائو و همکاران ۲۰۱۶؛ ژائو و همکاران ۲۰۱۷؛ کاکمک و همکاران ۲۰۱۶). در تحقیقی از ترکیب کربن‌دی‌اکسید کربن فوق بحرانی و امواج التراسوند برای خشک کردن سینه مرغ استفاده شد. استفاده از این روش ترکیبی باعث می‌شود خروج آب با سرعت انجام بگیرد و ظرفیت آبیگری مجدد افزایش

یابد. در این تحقیق قطعات مرغ درون محفظه ۴۰ میلی-لیتری قرار داده شدند و آزمایش در دمای ۴۰ درجه و فشار ۱۰۰ بار انجام شد. در تحقیقی دیگر، اثر خشک کردن ترکیبی کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی و التراسوند در بهبود بازده خشک کردن و غیرفعال سازی میکروبی بر برگ‌های گشنیز بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از التراسوند از دست دادن آب و کاهش فعالیت آبی و غیر فعال سازی میکروبی را بهبود می‌بخشد (میچلینو و همکاران ۲۰۱۸). در مطالعاتی که از کربن دی اکسید فوق بحرانی برای خشک کردن قطعات سیب در دمای ۵۰ درجه و فشار ۱۲۵ بار، گیاه ریحان در فشار ۸۰ تا ۱۰۰ بار و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، قطعات استوانه‌ای هویج با فشار ۲۰ مگاپاسکال استفاده شد و مشاهده گردید که این روش خشک کردن، کیفیت خواص ساختاری را حفظ کرده و شکلی بهتر و چروکیدگی کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. محققین نتیجه گرفتند که این روش قابلیت جایگزین شدن به جای روش پرهزینه خشک کن انجمادی را دارد (آیینه ۱۳۹۷؛ ژکیچ و همکاران ۲۰۱۸؛ بوسیچ و همکاران ۲۰۱۴؛ برون و همکاران ۲۰۰۸). از طریق کربن-دی‌اکسید فوق بحرانی در فشار ۸۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ بار و دمای ۴۰ و ۶۰ درجه و زمان ۶۰ تا ۱۲۰ اقدام به خشک کردن انجیر گردید. نتایج نشان داد بیشترین عملکرد در ۲۰۰ بار، ۶۰ درجه سانتی‌گراد در ۱۲۰ دقیقه بود (آیینه ۱۳۹۷). در تحقیقی اثر سه روش خشک کردن کربن دی اکسید فوق بحرانی، هوای داغ و انجمادی بر خواص بافتی و حساس سیب بررسی شد. در این تحقیق خشک کردن در هوای داغ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در ۸ ساعت انجام شد. خشک کن انجمادی در دمای ۲۵- درجه و فشار ۰/۲ میلی بار در زمان تصعید و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۰۵ میلی بار در زمان دفع در ۲۴ ساعت انجام شد. در روش فوق بحرانی در ۱۶ ساعت انجام شد. نتایج نشان داد سیب در زمان خشک کردن با سیال فوق بحرانی، بهترین کیفیت را داشت و در سیب خشک شده‌ای که به مدت ۶ ماه ذخیره شده، نتایج خشک

شده در گشاینز با خشک کردن از روش انجمادی و کربن دی اکسید فوق بحرانی بررسی شد. خشک کردن کربن دی اکسید فوق بحرانی در سه تیمار ۸۰ بار در ۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۰ بار در ۳۵ درجه با نسبت افزایش فشار ۵ بار بر دقیقه و ۸۰ بار در ۳۵ درجه برای ۱۵۰ دقیقه با نسبت افزایش فشار ۵ بار بر دقیقه انجام شد. در روش انجمادی نمونه‌ها پس از تلقیح در دمای ۸۰- درجه قرار گرفتند. سپس به مدت ۲۳/۵ ساعت در فشار ۰/۰۱۲ بار و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در فشار ۰/۰۰۷ بار قرار گرفتند. دمای کندانسور روی ۵۵- درجه سانتی‌گراد بود. نتایج نشان داد کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی جایگزین مناسبی برای روش انجمادی است. اگرچه هر دو روش محصول را خشک می‌کنند، اما روش انجمادی میکرواورگانیزم‌ها را تا سطح مورد قبول کاهش نداد و از طرف دیگر روش فوق بحرانی توانست پاتوژن‌های مشابه را کاهش دهد (بوردوکس و همکاران ۲۰۱۸).

با توجه به این که افزایش دمای خشک کردن سبب کاهش ترکیبات فرار و فنولی جلبک دونالیلا سالینا می‌شود، ترکیبات حساس و با ارزش این جلبک ممکن است در روش‌های مرسوم خشک کردن تخریب شده و یا کیفیت آنها کاهش یابد. از این رو نویسندگان این تحقیق بر خشک کردن جلبک دونالیلا سالینا با سیستم خشک کن کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی در ترکیب هم زمان با ایربورن التراسوند، که انتظار می‌رود این روش خشک کردن رطوبت محصول را در دمای بسیار پایین تری نسبت به روش‌های مرسوم کاهش دهد، تمرکز کرده‌اند که تا به حال این سیستم به صورت هم زمان در کشور استفاده نشده است. هدف از این تحقیق، بررسی سینتیک و نرخ خشک شدن جلبک با ارزش دونالیلا سالینا با روش کربن دی‌اکسید فوق بحرانی در ترکیب با ایربورن التراسوند و همچنین مدل سازی خشک کردن با روش ریاضی و با روش سطح پاسخ است.

مواد و روش

کربن فوق بحرانی و انجمادی مشابه بود (ژکیچ و همکاران ۲۰۱۸). محققین روش خشک کردن با کربن دی-اکسید فوق بحرانی را در خشک کردن ریحان با خشک کن هوای داغ و انجمادی مقایسه کردند. در این تحقیق پلی فنول‌ها، کلروفیل‌ها، آسکوربیک اسید و ظرفیت آنتی-اکسیدانی بررسی شدند. نتایج نشان داد، خشک کردن کربن دی اکسید فوق بحرانی به مدت ۴ ساعت، اثرات منفی را بر محتویات پلی فنولیک داشته است. مزه و مشخصات ظاهری ریحان خشک شده توسط کربن‌دی-اکسید فوق بحرانی بهتر از خشک کردن توسط هوای گرم بود، اما برای بهینه سازی بیشتر کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی نیاز به بهبود خواص آروماتیک است. طبق نتایج به‌دست آمده، استفاده از کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی در زمان کوتاه (۲ و ۳ ساعت) و فشار ۸۰ تا ۱۰۰ بار و ۴۰ درجه سانتی‌گراد یک روش مناسب جایگزین برای خشک کن انجمادی است (بوسیچ و همکاران ۲۰۱۴). در بررسی تاثیر دما و حلال اصلاح گر (اتانول) بر خشک کردن قطعات استوانه‌ای هویج توسط کربن دی‌اکسید فوق بحرانی تحت فشار ۲۰ مگاپاسکال، نتایج نشان داد، هویج خشک شده با کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی خواص ساختاری و شکلی بهتر و چروکیدگی کمتری نسبت به خشک کردن با هوای داغ داشت. نمونه‌هایی که با اتانول به عنوان حلال اصلاح گر خشک شده بودند دارای ساختارهای متراکم تری بودند و در نتیجه خواص بافتی خشک شده قابل قبول تری داشتند (برون و همکاران ۲۰۰۸). در مطالعات بررسی بهبود انتقال جرم در استخراج از طریق کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی ترکیب شده با التراسوند، روغن بادام زمینی تحت فشار ۲۸۰ بار و دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و همچنین تحت امواج فراصوتی ۲۰ kHz قرار گرفت. نتایج نشان داد هنگامی که استخراج تحت توان ۵۰ وات قرار گرفت، بازده سینتیک و استخراج روغن به ترتیب ۳۰ و ۲۰ درصد بهبود می‌یابد (ریرا و همکاران ۲۰۰۴). در تحقیقی غیر فعال سازی سالمونا، لیستریا مونوسیژن و اسپریچیا کولی تلقیح

دقیقه کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی ادامه پیدا می‌کرد (نایینی و همکاران ۲۰۱۱). در حالت دینامیک، جریان سیال فوق بحرانی با دبی مشخص از داخل سل عبور می‌کند (کرمی، ۱۳۹۲). یک رستریکتور جریان متغیر (Suprex)، که شرایط فشار فوق بحرانی را در سیستم حفظ می‌کند و نرخ جریان CO₂ را تنظیم می‌کند، در سیستم کربن-دی‌اکسید فوق بحرانی برای جمع آوری آنالیت‌های استخراج شده استفاده می‌شد (قاسمی و همکاران ۲۰۰۷). به منظور جلوگیری از مسدود شدن رستریکتور، دمای بدنه و نوک رستریکتور به ترتیب بر روی ۹۰ و ۹۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌گردید. از زمانی که حالت دینامیک شروع می‌شد، امواج التراسوند توسط هورن میله ای طراحی شده به جلبک وارد می‌شد (آسیابی و همکاران ۲۰۱۳).

در این تحقیق ۲/۸ گرم کیک جلبک با ضخامت ۳ میلی‌متر درون محفظه خشک کردن قرار داده‌شد و متانول به عنوان اصلاح‌گر به صورت مستقیم به نمونه اضافه - گردید. به این دلیل از متانول استفاده شد که طبق تحقیقات، مقدار بتاکاروتن کمتری را در خود حل خواهد کرد (تیرادو و کالوو ۲۰۱۹). کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی در سه فشار ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ بار، سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد اعمال شد. در زمان خشک کردن دینامیک، نمونه‌ها تحت سه تیمار بدون اعمال توان التراسوند و با اعمال امواج در دو سطح ۲۰ وات و ۴۰ وات قرار گرفت. نمونه‌ها در بازه‌های ۳۰ دقیقه‌ای در حالت دینامیک توزین شدند. دمای ۴۰ درجه برای اطمینان از شرایط فوق بحرانی انتخاب شد. برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد نمونه‌های جلبک، امواج به صورت دوره ای ۱۰ ثانیه اعمال شد، یعنی ۱۰ ثانیه امواج اعمال شدند و ۱۰ ثانیه در حالت استراحت قرار داشت (میچلینو و همکاران ۲۰۱۸).

جلبک مورد مطالعه در این پژوهش *Dunaliella salina* بود که این ریز جلبک از پژوهشکده آرتمیا و آبزیان دانشگاه ارومیه تهیه شد. آب مورد استفاده برای پرورش این ریز جلبک با استفاده از نمک دریا و با شوری ۲/۵ ± ppt آماده شد (آلونسو و همکاران ۱۹۹۲). محیط کشت مورد استفاده در این تحقیق محیط کشت والنه بود.

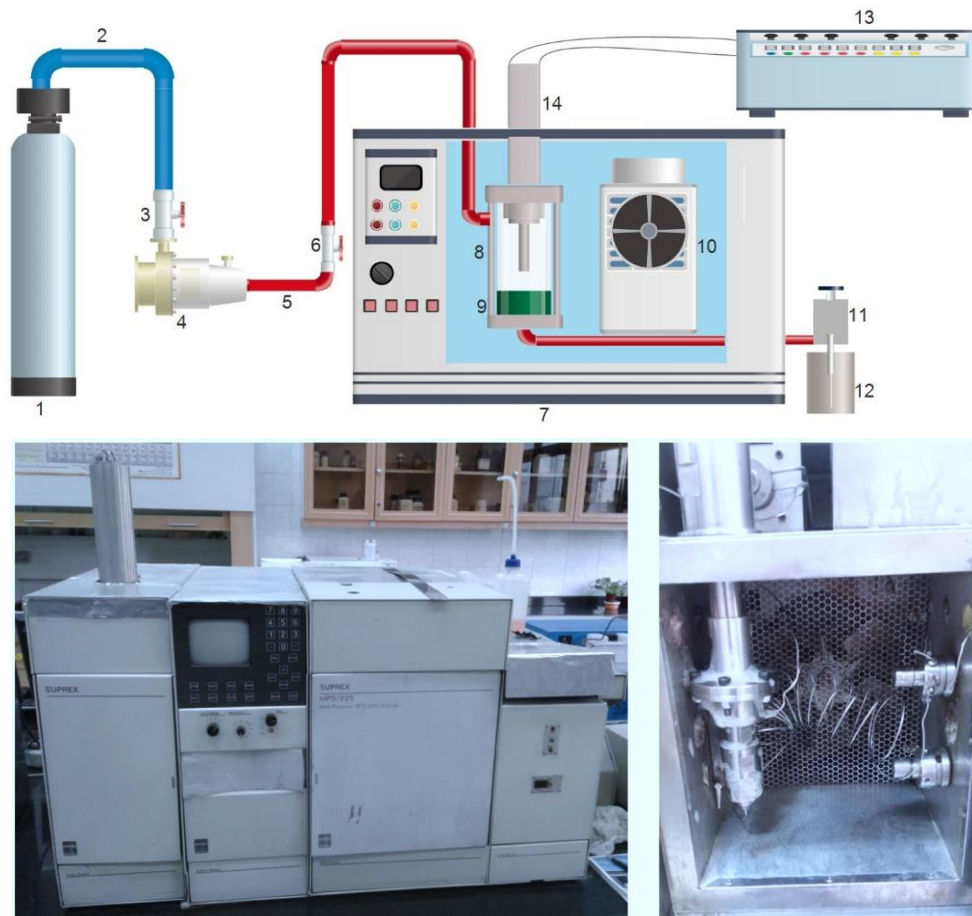
اندازه‌گیری محتوی رطوبت اولیه

برای تعیین رطوبت اولیه، جلبک در فشار اتمسفر به مدت ۲۴ ساعت درون آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و رطوبت اولیه جلبک به میزان ۵۰/۸ درصد بر پایه تر محاسبه گردید (کوبا و همکاران ۲۰۱۸).

دستگاه کربن دی‌اکسید فوق بحرانی الحاقی با

التراسوند

همان‌طور که در تصویر ۱ مشاهده می‌شود، دستگاه کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی (Suprex, Pittsburgh, MPS/225)، از یک پمپ سرنگی، اتصالات، محفظه قرارگیری نمونه از جنس استیل ۳۱۶، محفظه آدیاباتیک، رستریکتور تشکیل شده است و با یک ژنراتور التراسوند، شامل ترنسدیوسر پیزوالکتریک و هورن ادغام شده است. پمپ، محفظه قرارگیری نمونه را با دبی ۲۵ میلی‌لیتر بر دقیقه با کربن‌دی‌اکسید پر می‌کند تا کربن‌دی‌اکسید به فشار مورد نظر برسد و به طور همزمان کربن‌دی‌اکسید درون محفظه آدیاباتیک به دمای فوق بحرانی می‌رسد. پس از آن که فشار و دمای محفظه به مقدار فوق بحرانی می‌رسید، جلبک ۱۰ دقیقه در حالت استاتیک قرار می‌گرفت. در حالت استاتیک سیال در مدت زمان مشخصی در تماس با نمونه قرار می‌گیرد و درحالی که سیال جریان ندارد، بافت نمونه و سیال به تعادل می‌رسند (کرمی ۱۳۹۲). سپس عملیات خشک کردن جلبک توسط کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی به صورت دینامیک تا ۱۸۰ دقیقه با دبی ۰/۵ میلی‌لیتر بر



شکل ۱- دستگاه کربن دی اکسید فوق بحرانی در ترکیب با ایربورن التراسوند

Figure 1- Super critical CO₂ system assisted by Airborne Ultrasonic

۱-کپسول CO₂، ۲-لوله با فشار کم، ۳-شیر قبل از پمپ، ۴-پمپ سرنگی، ۵-لوله‌های انتقال پر فشار، ۶-شیر بعد از پمپ، ۷- قسمت اصلی دستگاه سوپرکس و کنترلرها، ۸-محفظه قرار گیری نمونه، ۹-نمونه، ۱۰-هیتر آون، ۱۱-رستریکتور، ۱۲- محفظه جمع آوری آنالیت‌های خروجی، ۱۳- ژنراتور التراسوند، ۱۴-ترنسدیوسر

1-CO₂ tank, 2-Low pressure pipe, 3-Primary valve, 4-Syringe pump, 5-High pressure pipe, 6-second valve, 7- Main part of suprex and controllers, 8-Sampel vessel, 9-Sampel, 10-Oven's heater, 11-Restrictor, 12- Extracted analytes gathering container, 13-Ultrasonic power generator, 14- transducer

مقادیر M_e در مقایسه با M_t و M_0 قابل چشم پوشی است، بنابراین رابطه ۱ به شکل رابطه ۲ ساده سازی شد:

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

آهنگ خشک شدن از رابطه ۴ محاسبه شد (آکپینار و همکاران ۲۰۰۳):

$$DR = \frac{M_t - M_{t+dt}}{d_t} \quad (3)$$

اندازه‌گیری و محاسبه مشخصه‌های خشک شدن

نسبت رطوبت بی بعد (Moisture Ratio) برای جلبک با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (آکپینار و همکاران ۲۰۰۳):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در این رابطه، MR نسبت رطوبت، M_t رطوبت در هر لحظه (گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک)، M_e محتوای رطوبت تعادلی و M_0 محتوای رطوبت اولیه است.

$Mt+dt$ رطوبت نمونه در زمان $(t+dt)$ ، Mt رطوبت نمونه در زمان (t) و dt زمان بین دو توزین متوالی است.

مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک شدن

برای برآزش مدل‌های استاندارد خشک شدن از نرم افزار متلب ویرایش ۲۰۱۶ استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، مجموع مربعات خطا

(SSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. مدل‌های تجربی ذکر شده در جدول ۱، با داده‌های به دست آمده در تیمارهای مختلف و دماهای مختلف برآزش گردید. سپس بهترین مدل انتخاب شده و ضرایب و ثابت‌های آن‌ها به دست آمد. بهترین مدل، مدلی انتخاب شد که دارای R^2 بالا و کمترین مقادیر SSE و RMSE باشد.

جدول ۱- مدل‌های سینتیک خشک شدن استفاده شده در مدل سازی ریاضی فرآیند

Table 1- Drying models used in mathematic modeling

Ref.	Equation	Models
Minaei <i>et al.</i> , 2012	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
Minaei <i>et al.</i> , 2012	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic
Minaei <i>et al.</i> , 2012	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Two-term
Puente-Díaz <i>et al.</i> , 2013	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Tow term exponential
Minaei <i>et al.</i> , 2012	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion
Puente-Díaz <i>et al.</i> , 2013	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midili <i>et al.</i>
Puente-Díaz <i>et al.</i> , 2013	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Modified Page
Puente-Díaz <i>et al.</i> , 2013	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Verma

روش سطح پاسخ

این روش شامل سه مرحله اصلی است: انجام آزمایش‌های آماری طراحی شده، برآورد ضرایب در یک مدل ریاضی و در نهایت پیش‌بینی پاسخ و بررسی کفایت مدل ارائه شده توسط نرم افزار. با استفاده از مدل ریاضی، سطوح متغیرهای مستقلی که بیشترین تاثیر را بر متغیرهای وابسته دارند، می‌تواند محاسبه شود (آسیابی و همکاران ۲۰۱۳).

در این پژوهش، برای تعیین اثرات سه متغیر مستقل فشار (P) در سه سطح شامل ۸۰، (P₁)، ۱۱۰، (P₂) و ۱۴۰، (P₃) بار، دما (T) در سه سطح ۴۰، (T₁)، ۵۰، (T₂) و ۶۰، (T₃) درجه سانتی گراد و توان ایربورن التراسوند در سه سطح بدون اعمال توان التراسوند (U₁) و با اعمال توان در دو سطح ۲۰ (U₂) و ۴۰ (U₃) وات التراسوند در سه

سطح آلفا -۱، ۰، و +۱ به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح مرکب مرکزی شامل ۲۰ آزمایش با شش تکرار در نقطه مرکزی از بین حداقل ۲۷ آزمایش اولیه، استفاده شد (جدول ۱). در حالی که پاسخ عبارت بود از نسبت رطوبت جلبک دونالیلا سالینا در زمان‌های مختلف به فاصله ۳۰ دقیقه. جهت انجام طراحی آزمایش‌ها، آنالیز داده‌ها و دست‌یابی به نمودارهای سطح پاسخ از نرم افزار دیزاین اکسپرت (Stat-Ease,) 13.0.5 Design-Expert (Minneapolis, MN, USA) استفاده گردید.

مدل‌های مختلف خطی و غیر خطی برای داده‌های نسبت رطوبت در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه ای توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت بررسی شدند. برای تعیین اختلاف معنی دار بین داده‌ها از آنالیز ANOVA استفاده شد و بهترین

نتیجه و بحث

نرخ رطوبت

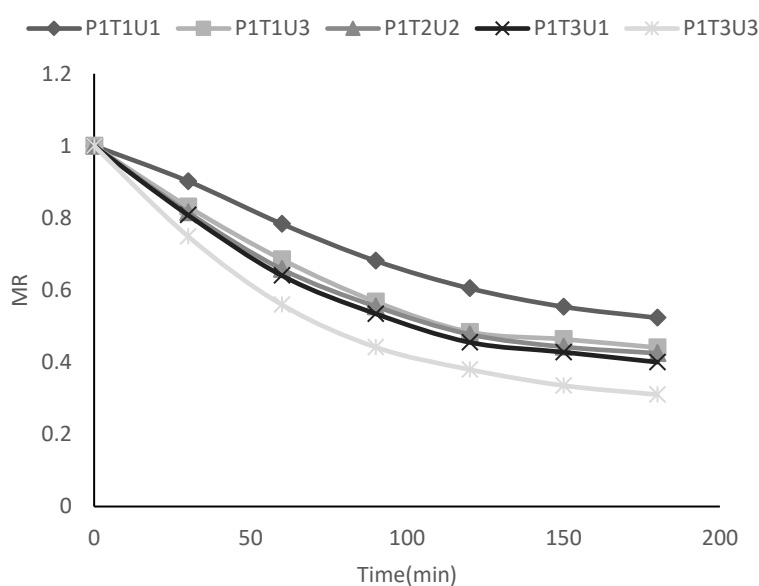
نمودارهای ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نرخ کاهش رطوبت نسبت به زمان، در فشار ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ بار را در دما و سطوح مختلف از توان التراسوند را نشان می دهد. همانطوری که در شکل ۲ مشاهده می شود، با افزایش دما و توان در فشار ۸۰ بار نرخ کاهش رطوبت افزایش یافته است. کمترین مقدار کاهش رطوبت در فشار ۸۰ بار با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و بدون اعمال التراسوند بوده است. و بیشترین مقدار کاهش رطوبت در این فشار در دمای ۶۰ درجه و توان ۴۰ وات بوده است. در نمودار فشار ۸۰ بار مشخص است، نرخ کاهش رطوبت در دمای ۴۰ و بدون اعمال التراسوند تا دقیقه ۱۵۰ با نرخ ثابت ادامه داشت و بعد آن نرخ کاهش رطوبت کم شده است. این در حالی است که در سایر موارد این کاهش با نرخ ثابت تا دقیقه ۱۲۰ ادامه داشته است. بعد از گذشت ۱۸۰ دقیقه محتوای رطوبتی در فشار ۸۰ بار، دمای ۴۰ درجه به ۵۲ درصد رسید و در فشار ۸۰ بار، دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و اعمال ۴۰ وات التراسوند به ۳۱ درصد رسید.

مدل با شاخص های معنی داری آماری اثرات متغیرها، کفایت مدل ارائه شده و ضریب تبیین آن انتخاب شد.

جدول ۲- ترکیب و ترتیب FCD

Table 2- FCD composition and sequence

Run		Pressure (bar)	Tempraure (°C)	US (w)
1	P1T2U2	80	50	20
2	P2T2U2	110	50	20
3	P2T2U2	110	50	20
4	P2T2U2	110	50	20
5	P3T1U1	140	40	0
6	P1T1U3	80	40	40
7	P1T1U1	80	40	0
8	P3T1U3	140	40	40
9	P2T2U2	110	50	20
10	P2T1U2	110	0	20
11	P3T2U2	140	50	20
12	P2T2U1	110	50	0
13	P3T3U1	140	60	0
14	P3T3U3	140	60	40
15	P2T2U3	110	50	40
16	P1T3U1	80	60	0
17	P2T3U2	110	60	20
18	P1T3U3	80	60	40
19	P2T2U2	110	50	20
20	P2T2U2	110	50	20

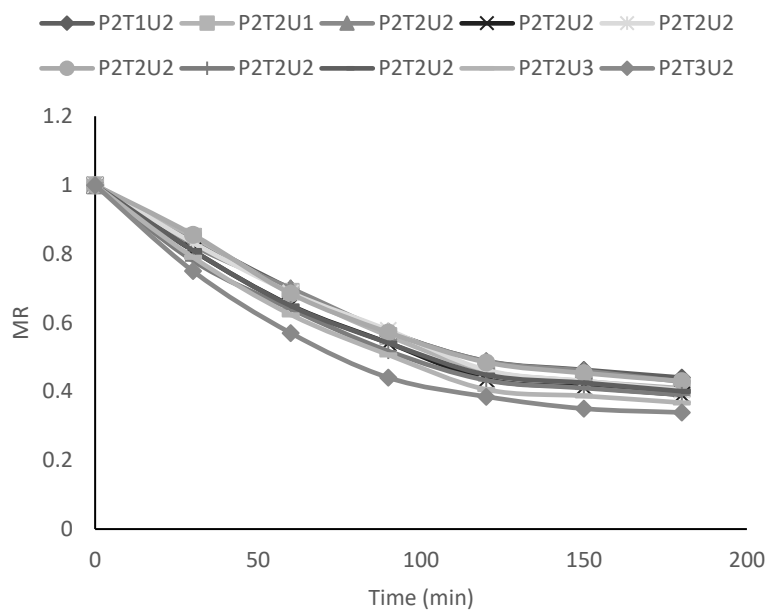


شکل ۲- تغییرات نسبت رطوبت تابعی از زمان خشک شدن در فشار ۸۰ بار

Figure 2- Variations of moisture ratio as a function of drying time at 80 bar of pressure

تر از محتوای رطوبت بحرانی باشد، پروسه خشک کردن به شکل نرخ کاهشی اتفاق خواهد افتاد (دینسر و زمفیرسکو ۲۰۱۶). در فشار ۱۱۰ بار، خشک کردن در دمای ۴۰ درجه و تحت التراسوند ۲۰ وات، کمترین مقدار کاهش رطوبت و به مقدار ۴۴ درصد بدست آمد. بیشترین کاهش رطوبت در دمای ۶۰ درجه و التراسوند ۲۰ وات و به مقدار ۳۳ درصد مشاهده شد. در دمای ۴۰ درجه و تحت التراسوند ۲۰ وات کاهش نرخ رطوبت تا زمان ۱۲۰ دقیقه ثابت بود، در حالی که نرخ رطوبت دمای ۶۰ درجه و ۲۰ وات تا دقیقه ۹۰ به صورت ثابت کاهش یافت و پس از آن نرخ کاهشی داشت. در نقطه مرکزی که فشار ۱۱۰ بار، دما ۵۰ درجه سانتی گراد و امواج التراسوند ۲۰ وات بود، تغییرات محتوای رطوبتی در ۶ تکرار بین ۳۹ تا ۴۳ درصد بود که میانگین آن‌ها ۴۰ درصد است.

در زمان نرخ ثابت کاهش رطوبت، سطح ماده توسط آب مایع (یا بخار) در حالت اشباع باقی می ماند، زیرا حرکت آب درون ماده به طرف سطح با سرعتی به اندازه سرعت تبخیر از سطح انجام می شود. این مرحله توسط ضریب انتقال حرارت یا رطوبت، مساحت در معرض خشک شدن و تفاوت دما و رطوبت نسبی بین هوای خشک کردن و سطح ماده کنترل می شود. هنگامی که رطوبت اشباع در سطح به طور کامل حذف شد، نرخ رطوبت کاهش می یابد و دیگر هیچ تبخیر در سطح وجود ندارد، بلکه فرآیند انتشار رطوبت در ماده به دنبال انتقال جرم همرفتی در سطح ماده شکل می گیرد. بعد از نقطه نرخ ثابت، دمای سطح ماده شروع به افزایش می کند و خشک شدن ادامه پیدا می کند. بنابراین هنگامی که محتوای رطوبت اولیه بالاتر از محتوای رطوبت بحرانی شود، کل فرآیند خشک کردن تحت شرایط سرعت ثابت انجام می شود. اگر پایین

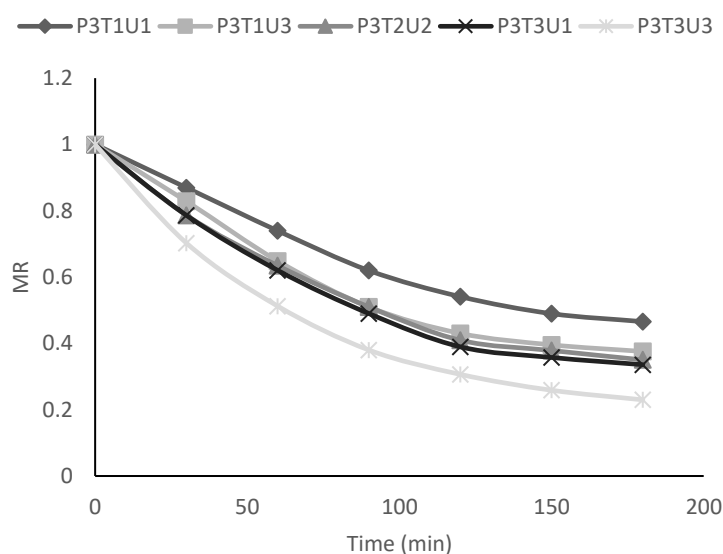


شکل ۳- تغییرات نسبت رطوبت تابعی از زمان خشک شدن در فشار ۱۱۰ بار

Figure 3- Variations of moisture ratio as a function of drying time at 110 bar of pressure

بیشترین نرخ خشک کردن برای دمای ۶۰ درجه و امواج ۴۰ وات به مقدار ۲۲ درصد بود.

در فشار ۱۴۰ بار، کمترین نرخ خشک شدن در دمای ۴۰ درجه و بدون اعمال التراسوند به مقدار ۶ درصد بود و



شکل ۴- تغییرات نسبت رطوبت تابعی از زمان خشک شدن در فشار ۱۴۰ بار

Figure 4- Variations of moisture ratio as a function of drying time at 140 bar of pressure

افزایش نرخ خشک شدن با نتایج محقق (موریاتو و همکاران ۲۰۱۹ و میچلینو و همکاران ۲۰۱۹) مطابقت دارد. هم چنین نتایج به دست آمده از این تحقیق، با نتایج خشک کردن جلبک دونالیلا سالیئا، گشنیز، هویج، تکه‌های سیب، ریحان، تیکه گوشت مرغ مشابه بوده است (مواهید و همکاران ۲۰۱۶؛ میچلینو و همکاران ۲۰۱۹؛ برون ۲۰۱۰؛ ژکیچ و همکاران ۲۰۱۸؛ بوسیچ و همکاران ۲۰۱۴؛ موریاتو و همکاران ۲۰۱۹).

مدلسازی ریاضی خشک کردن

تعداد ۱۴ مدل ذکر شده در جدول ۱ با نرم افزار MATLAB 2016 با منحنی سینتیک خشک شدن جلبک دونالیلا در فشار، دما و توان التراسوند مختلف برآزش شد. میانگین نتایج SSE ، $RMSE$ و R^2 برآزش منحنی‌ها با مدل‌ها در جدول ۳ ذکر شده است. نتایج نشان می‌دهد، بهترین مدل که بالاترین مقدار میانگین R^2 به مقدار ۰/۹۹۹۲۵ و کمترین مقدار میانگین SSE ، $RMSE$ به ترتیب با مقادیر ۰/۰۰۰۲۳ و ۰/۰۰۰۰۴ را داشت، مدل میدیلی و همکاران بود و کسر محتوای رطوبت جلبک دونالیلا سالیئا در حال خشک شدن در هر زمان در طی فرآیند آزمایش با استفاده از رابطه یاد شده می‌تواند

این مشاهدات به دلیل ویسکوزیته کم، سرعت نفوذ بالای سیال فوق بحرانی و کشش سطحی بسیار ناچیز آن است. این خواص به سیال فوق بحرانی اجازه می‌دهد تا به راحتی به داخل منافذ ریز و سلول‌های سطحی و داخلی نفوذ کند. همچنین منافذ یا کانال‌های جدید ممکن است، توسط سیال فوق بحرانی ایجاد شود. بنابراین، پس از افزایش کانال‌ها، سطوح بیشتری در معرض سیال فوق بحرانی قرار گرفتند و منجر به کم‌آبی سریع‌تر می‌شود، پس از آن، سرعت کم‌آبی با حرکت موئینگی و انتشار مولکولی آب کنترل می‌شود (لی و همکاران ۲۰۱۱). هم چنین وجود امواج التراسوند سبب شد، فرآیند خشک کردن در زمان کمتری انجام شود. دلیل این امر را می‌توان با تاثیر امواج اولتراسونیک در انقباضات و انبساط‌ها و ایجاد کانال‌های میکرو در ماده توجیح کرد. در واقع امواج صوتی با شدت بالا، باعث ایجاد کائوتاسیون مولکول‌های آب در جلبک می‌شوند که برای حذف رطوبت پیوندخورده مفید هستند. هرچه ماده هندسه ضخیم‌تر باشد و یا نسبت سطح به حجم ماده بالاتر باشد، اثر قوی‌تر امواج از نظر سرعت بخشیدن به سینتیک کاهش رطوبت مشاهده می‌شود اثر امواج التراسوند در

تخمین زده شود. کادام و همکاران ۲۰۱۵ در بررسی اثر پیش تیمار امواج التراسوند بر خشک کردن جلبک دریایی قهوه ای *Ascophyllum nodosum* مشاهده کردند مدل وانگ و سینگ بهترین مدل برای مدل سازی خشک کردن بود.

جدول ۳- نتایج برازش خشک شدن نمونه‌ها، با مدل‌های ارائه شده

Table 3- Curve fitting results of samples drying with the introduced models

Models	SSE	R ²	RMSE
Henderson and Pabis	0.00785	0.9751	0.08397
Logarithmic	0.00133	0.99556	0.01743
Two-term	0.0014	0.99541	0.02048
Tow term exponential	0.00345	0.98888	0.0259
Approximation of diffusion	0.00207	0.99194	0.01929
Midili et al.	0.00023	0.99925	0.00799
Modified Page	0.00355	0.98843	0.02942
Verma	0.0013	0.99571	0.01438

جدول ۴- ضرایب مدل میدیلی و همکاران در پیش بینی سینتیک خشک کردن

Table 4- Coefficients of Midilli et al. model for prediction of drying kinetic

Experiment	a	b	k	n
P1T2U2	1	0.04593	0.2628	1.104
P2T2U2	0.9983	0.04244	0.2326	1.125
P2T2U2	0.999	0.04261	0.2592	1.145
P2T2U2	0.9981	0.0405	0.2227	1.179
P3T1U1	0.9992	0.04772	0.191	1.228
P1T1U3	0.9993	0.05118	0.243	1.175
P1T1U1	1	0.05014	0.1605	1.248
P3T1U3	1	0.04786	0.2483	1.263
P2T2U2	1.001	0.05221	0.225	1.251
P2T1U2	0.9992	0.05235	0.226	1.232
P3T2U2	0.9986	0.03421	0.2734	1.094
P2T2U1	0.9989	0.04975	0.2173	1.292
P3T3U1	0.9986	0.03648	0.2783	1.145
P3T3U3	1	0.02106	0.3825	0.9912
P2T2U3	0.999	0.04248	0.2836	1.141
P1T3U1	1.001	0.04419	0.2735	1.103
P2T3U2	1	0.04152	0.3439	1.082
P1T3U3	1	0.03079	0.344	1
P2T2U2	0.9985	0.04101	0.2897	1.063
P2T2U2	0.9997	0.04431	0.265	1.127

رسم نمودار با مقادیر به دست آمده از آزمایش بررسی گردید. همانطوری که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در

پس از آن با مشخص شدن ضرایب ثابت رابطه میدیلی برای هر تیمار، مقادیر پیش بینی شده به دست آمد و با

بررسی ضرایب مدل میدیلی و همکاران مشاهده شد که ضریب a به طور معنی داری تحت تاثیر فشار، دما و توان التراسوند نبوده است. ضریب b با افزایش فشار و دمای سیال فوق بحرانی و افزایش توان التراسوند از ۰/۰۵۲۳۵ به ۰/۰۲۱۰۶ کاهش یافته است. در ضریب K مشاهده شد، تغییرات فشار اثر معنی داری بر مقدار ضریب ثابت K نداشت، اما با افزایش دما و توان التراسوند افزایش یافته است. همچنین در ضریب ثابت n مشاهده گردید، اثر فشار بر تغییرات ثابت n معنی دار نبوده است، اما با افزایش دما و توان التراسوند، مقدار آن کاهش یافته است.

با بررسی مقادیر a ، b ، k و n در هر کدام از تیمارها، روابط رگرسیونی بین مقادیر ثابت‌های معادله میدیلی و مقادیر P ، T و U به صورت معادلات ۴، ۵، ۶ و ۷ ارائه شد که می‌توان در هر فشار، دما و توان التراسوند ضرایب را به دست آورد و در معادله میدیلی و همکاران قرار داد.

$$a = 0.99984 - 0.000013 \times P + 0.000019 \times T + 3 \times 10^{-6} \times U \quad (4)$$

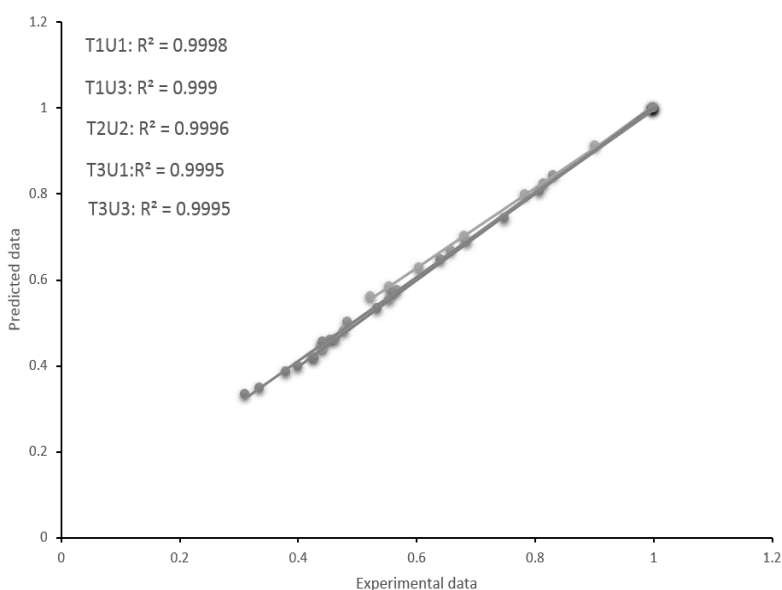
$$b = 0.09683 - 0.000116 \times P - 0.000752 \times T - 0.000175 \times U \quad (5)$$

$$K = -0.086555 + 0.000299 \times P + 0.005534 \times T + 0.001904 \times U \quad (6)$$

$$n = 1.57295 + 0.000304 \times P - 0.008248 \times T - 0.002229 \times U \quad (7)$$

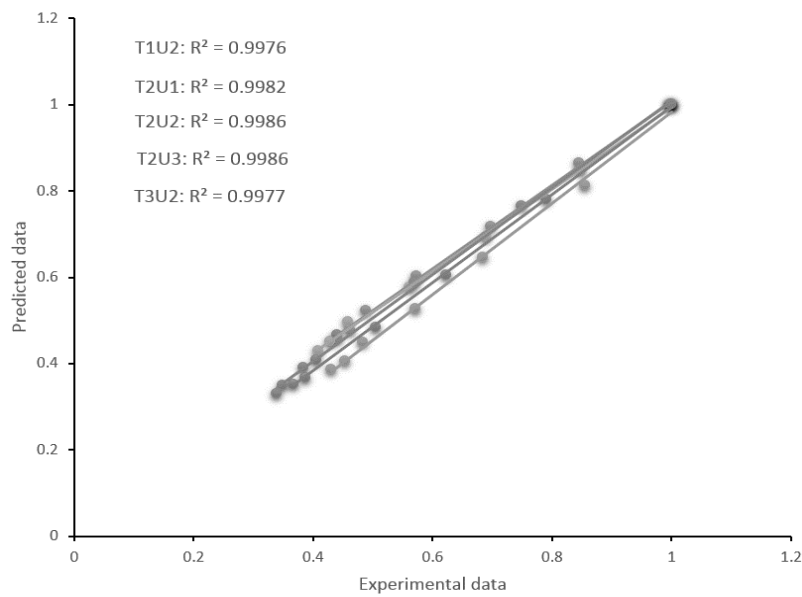
در نمودارهای شماره ۵، ۶ و ۷ برازش داده‌های آزمایشگاهی نسبت رطوبت را در مقابل داده‌های پیش-بینی شده نسبت رطوبت در فشار، دما و توان‌های

تولید شده در هر فشار، دما و توان التراسوند مختلف بررسی شدند و با توجه به اینکه ضریب تبیین در همه داده‌ها بیشتر از ۰/۹۹ بوده، مدل میدیلی، مدل مناسبی گزارش شد.



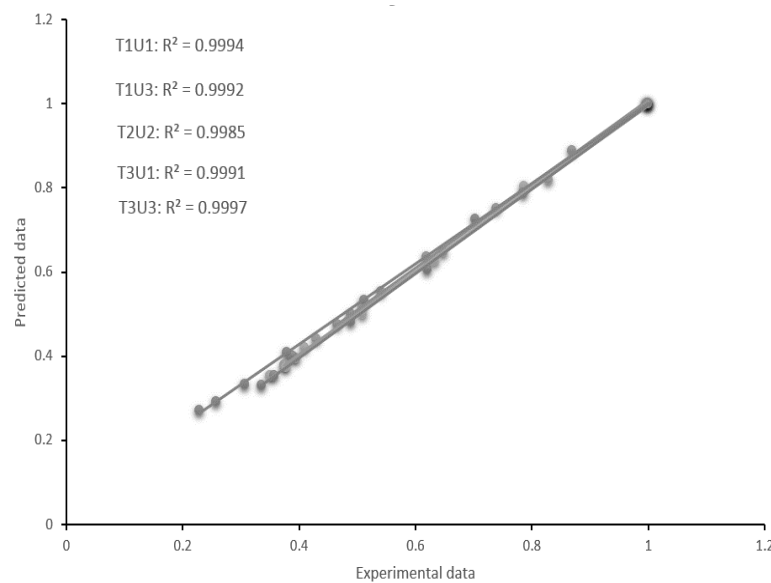
شکل ۵- بررسی همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با مدل میدیلی و همکاران در فشار ۸۰ بار

Figure 5- Correlation between experimental data and predicted data by Midilli et al. model in 80 bar pressure



شکل ۶- بررسی همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش بینی شده نسبت رطوبت با مدل میدلی در فشار ۱۱۰ بار و نقطه مرکزی

Figure 6- Correlation between experimental data and predicted data by Midilli *et al.* model in 110 bar pressure and central points



شکل ۷- بررسی همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش بینی شده نسبت رطوبت با مدل میدلی در فشار ۱۴۰ بار

Figure 7- Correlation between experimental data and predicted data by Midilli *et al.* model in 140 bar pressure

فشار، تغییرات دما و تغییرات توان التراسوند بر نرخ رطوبت در زمان‌های اندازه‌گیری شده، معنی دار بوده است. اما هیچکدام از اثرات متقابل فاکتورها بر نرخ رطوبت اثر معنی‌داری نداشته است. در واقع مدل به صورت خطی بررسی شده است. همچنین در بررسی

پیش بینی سینتیک خشک شدن با روش RSM نتایج آنالیز واریانس اثر تغییرات فشار، دما و توان ایربورن التراسوند بر نرخ رطوبت جلبک دونالیلا سالیانا در زمان‌های بررسی در جدول ۵ آمده است. همان‌طوری که در جدول ANOVA مشاهده می‌شود، اثر تغییرات

مدل ایجاد شده، با توجه به ضریب تبیین R^2 و $Adj R^2$

مدل و روابط ارائه شده، مدل قابل اطمینانی است.

جدول ۵- آنالیز واریانس نسبت رطوبت و ضرایب تبیین مدل خشک کردن جلبک دونالیلا سالینا با RSM در زمان‌های مختلف

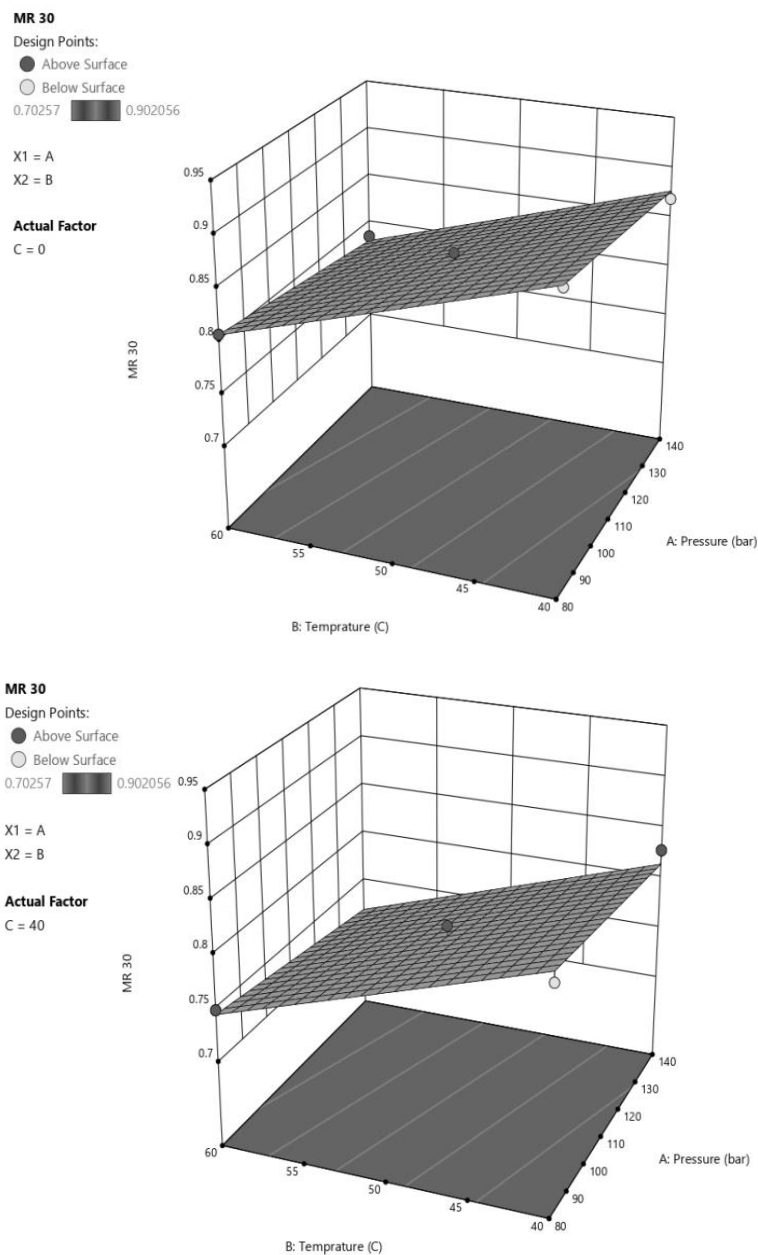
Table 5- Analysis of variance of moisture ratio and Correlation coefficient of dunaliella salina drying model by RSM in different time

SOV	df	MR (30 min)	MR (60 min)	MR (90 min)	MR (120 min)	MR (150 min)	MR (180 min)
A-Pressure	1	0.0018*	0.0029*	0.0073**	0.0105**	0.0118**	0.0117**
B- Temperature	1	0.0231**	0.0427**	0.0443**	0.04**	0.0405**	0.0398**
C-Ultrasonic	1	0.0098**	0.0198**	0.0232**	0.0198**	0.0175**	0.0168**
AB	1	0.0001 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.000000001 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
AC	1	0.0000032 ^{ns}	0.1 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	0.000000081 ^{ns}	0.000000001 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
BC	1	0.0001 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	0.000000068 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
Residual	16	0.0003	0.0004	0.0005	0.004	0.0003	0.0003
Lack of fit	11	0.0002	0.0003	0.0005	0.0003	0.0003	0.0003
Pure error	5	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0004	0.0003
R^2		0.87	0.91	0.90	0.92	0.92	0.93
Adj R^2		0.85	0.87	0.85	0.89	0.89	0.90
Predicted R^2		0.83	0.82	0.78	0.87	0.83	0.79

** And * represent significant difference within probability level of 1% and 5%, and ns represents the lack of significant difference

رطوبت در زمان ۳۰ دقیقه برابرست با ۰/۹ که در فشار ۸۰ بار، دمای ۴۰ درجه و بدون اعمال توان التراسوند بوده است و کمترین مقدار نرخ رطوبت برابر با ۰/۷۰ بوده است که در فشار ۱۴۰، دمای ۶۰ و توان التراسوند ۴۰ وات رخ داده است.

شکل ۸ اثر تغییرات فشار، دما و توان التراسوند بر نسبت رطوبت جلبک دونالیلا سالینا پس از گذشت ۳۰ دقیقه خشک کردن می باشد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش فشار و دما و توان التراسوند، نرخ رطوبت در زمان ۳۰ دقیقه، کاهش یافته است. بیشترین مقدار نرخ

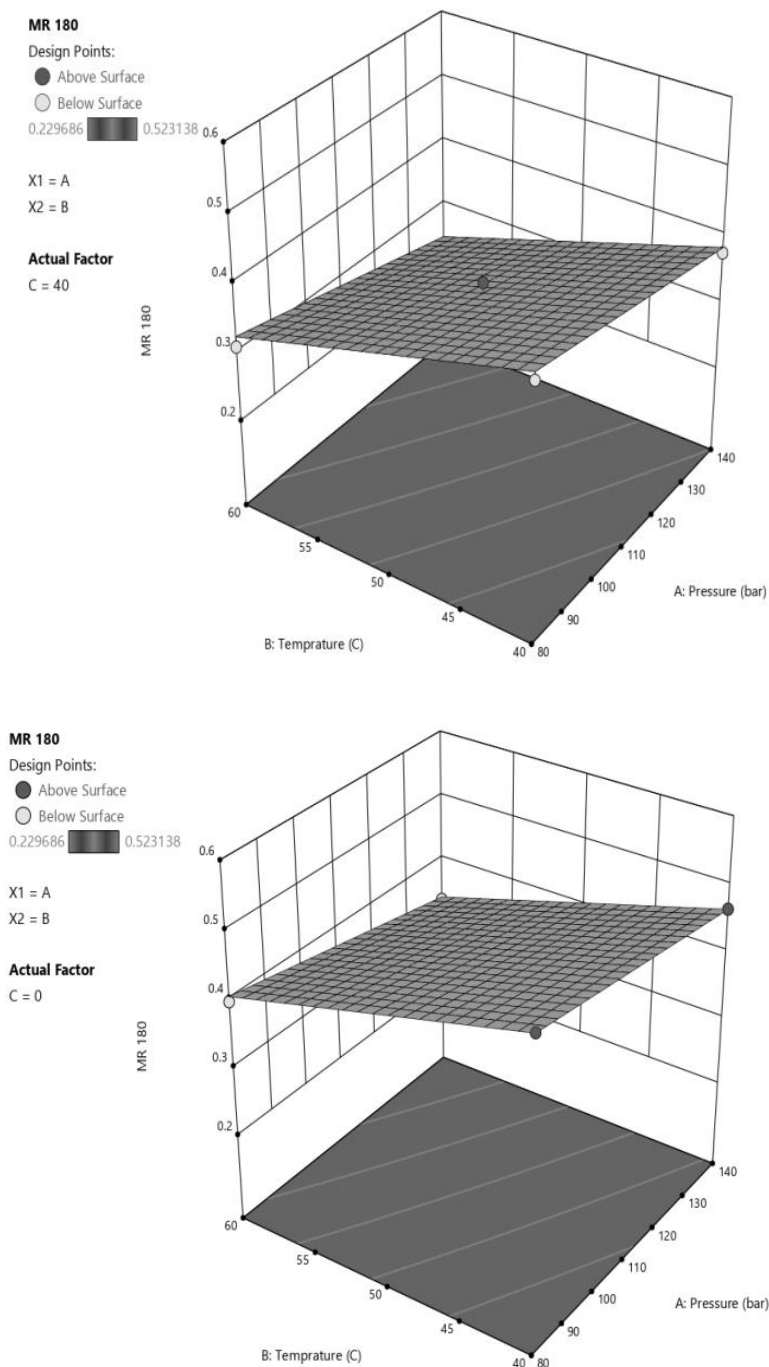


شکل ۸ - اثر فشار، دما و توان التراسوند بر نسبت رطوبت در زمان ۳۰ دقیقه

Figure8- Effect of pressure, temperature and ultrasonic power on 30 min moisture ratio

فشار ۸۰ بار، دمای ۴۰ درجه و بدون اعمال توان التراسوند بوده است و کمترین مقدار نرخ رطوبت برابر با ۰/۲۲ بوده است که در فشار ۱۴۰، دمای ۶۰ و توان التراسوند ۴۰ وات رخ داده است.

نتایج به دست آمده برای سایر زمان‌ها نیز مانند زمان ۳۰ دقیقه بوده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در زمان ۱۸۰ درجه نیز با افزایش فشار، دما و توان التراسوند نرخ رطوبت کم شده است. بیشترین مقدار نرخ رطوبت در زمان ۱۸۰ دقیقه برابریست با ۰/۵۲ که در



شکل ۹ - اثر فشار، دما و توان التراسوند بر نسبت رطوبت در زمان ۱۸۰ دقیقه

Figure9- Effect of pressure, temperature and ultrasonic power on 180 min moisture ratio

بر اساس نتایج تجربی و داده‌ها، مدل‌های ریاضی ۸ تا ۱۳ برای نسبت رطوبت در زمان‌های اندازه گیری ارائه گردید.

$$MR(30 \text{ min}) = 1.13182 + (-0.000441 P) + (-0.004811 T) + (-0.001568 U) \quad (8)$$

$$MR(60 \text{ min}) = 1.08759 + (-0.000571 P) + (-0.006531 T) + (-0.002223 U) \quad (9)$$

$$MR(90 \text{ min}) = 1.01484 + (-0.000903 P) + (-0.006655 T) + (-0.002406 U) \quad (10)$$

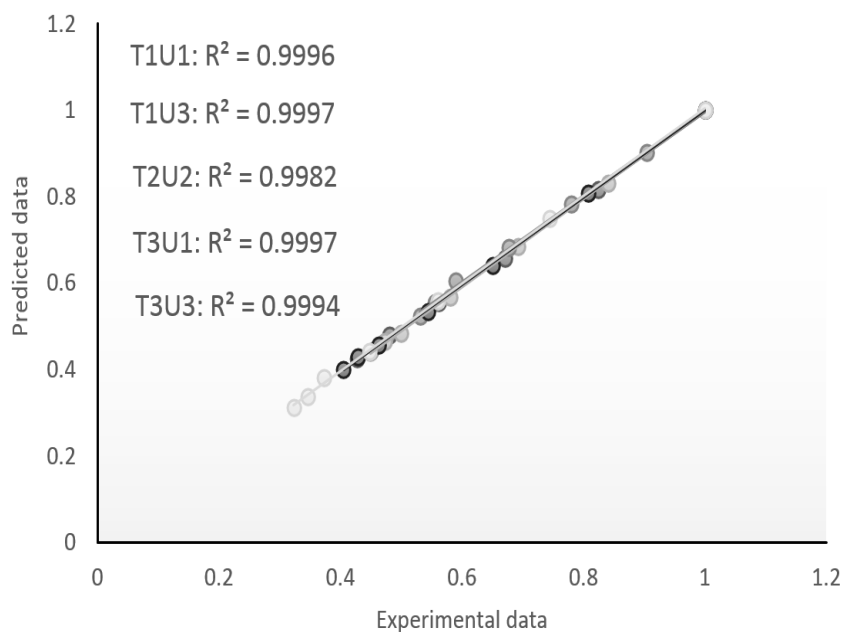
$$MR(120 \text{ min}) = 0.927903 + (-0.001082 P) + (-0.006321 T) + (-0.002223 U) \quad (11)$$

$$MR(150 \text{ min}) = 0.902108 + (-0.001146 P) + (-0.00636 T) + (-0.002092 U) \quad (12)$$

$$MR(180 \text{ min}) = 0.874697 + (-0.001142 P) + (-0.006306 T) + (-0.00205 U) \quad (13)$$

۱۰ داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشی نرخ رطوبت در فشار ۸۰ بار را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده، در فشار ۸۰ بار بیشتر از ۰/۹۹ بوده است.

پس از به دست آوردن داده‌های پیش‌بینی شده با رابطه-های ذکر شده، اعداد به دست آمده تحت عنوان پیش‌بینی مقدار نرخ رطوبت در هر دقیقه با داده‌های آزمایشی برآزش شدند. نتایج برآزش داده‌های پیش‌بینی شده با روش RSM در نمودارهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آمده است. شکل

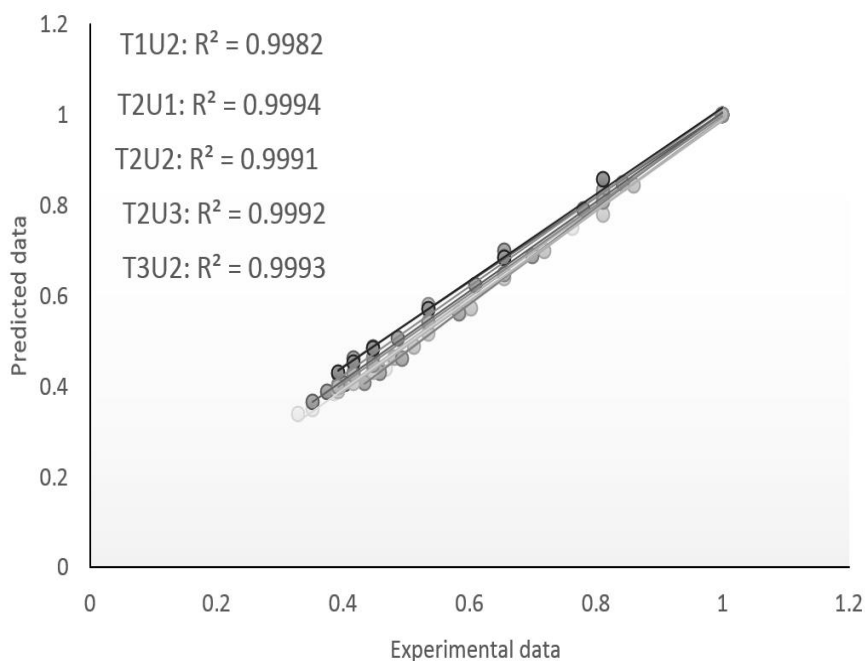


شکل ۱۰- بررسی ضریب تبیین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با مدل سازی روش سطح پاسخ در فشار ۸۰ بار

Figure 10- Correlation between experimental data and predicted data by RSM model in 80 bar pressure

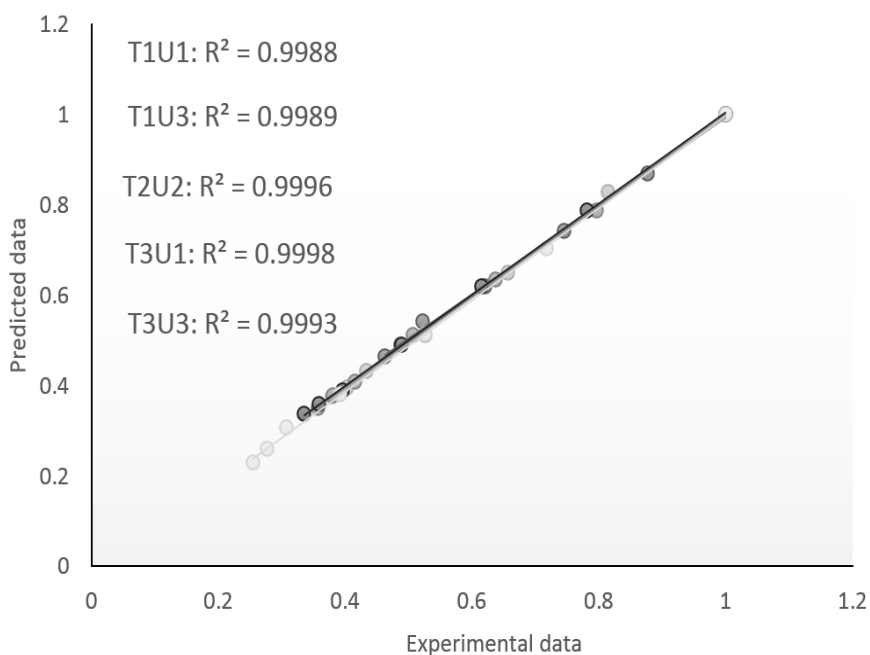
بودند، مشاهده شد مدل ارائه شده با روش RSM از اعتبار بالایی برخوردار بود.

همچنین در بررسی داده‌های پیش‌بینی شده در فشار ۱۱۰ و ۱۴۰ بارو بررسی ضریب همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده که همگی بیشتر از ۰/۹۹۹



شکل ۱۱ - بررسی ضریب تبیین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با مدل سازی روش سطح پاسخ در فشار ۱۱۰ بار

Figure 11- Correlation between experimental data and predicted data by RSM model in 110 bar pressure



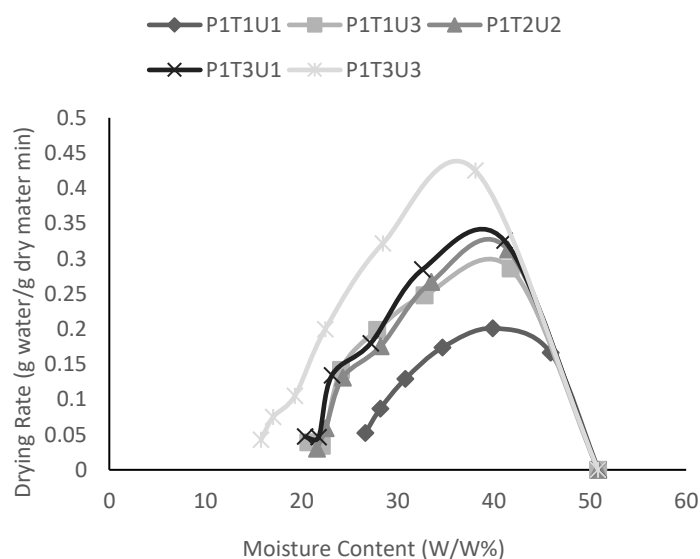
شکل ۱۲ - بررسی ضریب تبیین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با مدل سازی روش سطح پاسخ در فشار ۱۴۰ بار

Figure 12- Correlation between experimental data and predicted data by RSM model in 1400 bar pressure

نرخ خشک شدن

نمودارهای ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نرخ خشک شدن جلبک دونالیلا سالینا بر حسب محتوای رطوبت محصول بر پایه تر را تحت فشارهای ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ بار رانشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش دما و توان التراسوند نرخ خشک کردن افزایش می یابد. در واقع منحنی در ابتدای خشک شدن تندتر و با شیب بیشتر در

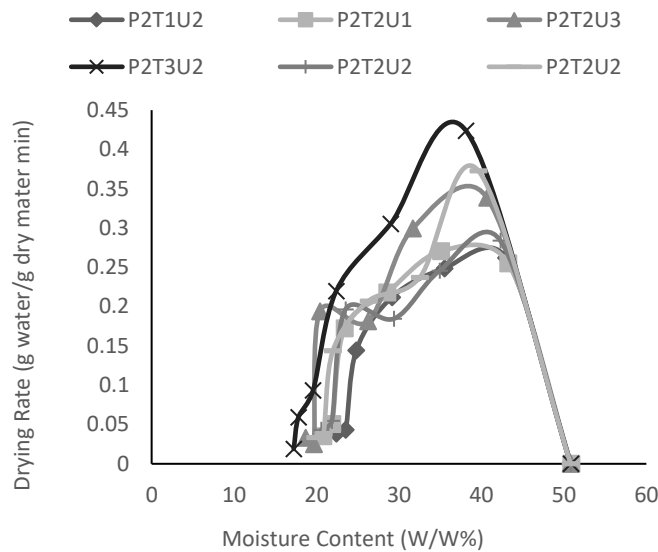
حال افزایش است و با کاهش نرخ خشک شدن، منحنی با شیب کمتر کاهش می یابد. کمترین نرخ خشک کردن در فشار ۸۰ بار در دمای ۴۰ درجه و بدن اعمال التراسوند رخ داد. در فشار ۸۰ بار، در دمای ۶۰ درجه و توان ۴۰ وات بیشترین نرخ خشک کردن مشاهده شد. در دمای مشابه افزایش توان التراسوند و در توان مشابه، افزایش دما، نرخ خشک کردن را تا حدود ۱/۵ برابر افزایش دادند.



شکل ۱۳- نمودار آهنگ خشک شدن در مقابل محتوای رطوبت در فشار ۸۰ بار
Figure 13- Drying rate variation versus moisture content in 80 bar pressure

کردن در فشار ۱۱۰ بار در دمای ۴۰ درجه و با توان ۲۰ وات رخ داد. و در دمای ۶۰ درجه و توان ۴۰ وات بیشترین نرخ خشک کردن مشاهده شد.

همانطور که در نمودار پایین مشاهده می شود، در فشار ۱۱۰ بار، افزایش دما و افزایش توان التراسوند باعث افزایش نرخ خشک کردن شده است. کمترین نرخ خشک

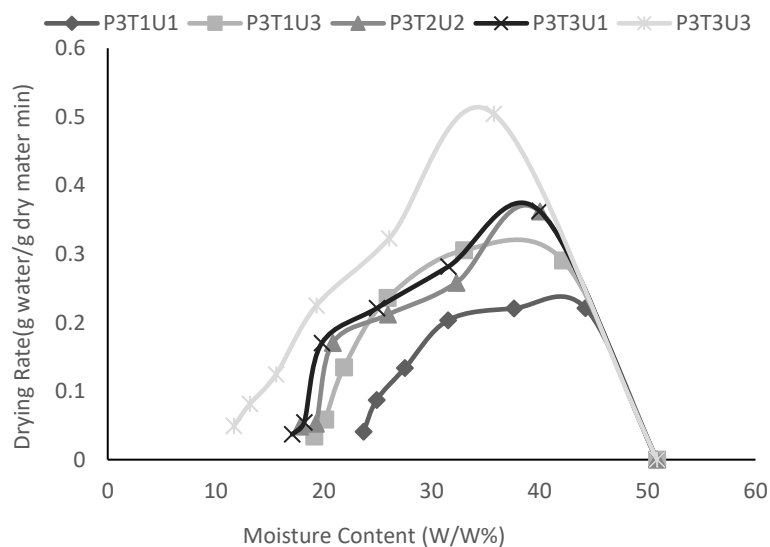


شکل ۱۴- نمودار آهنگ خشک شدن در مقابل محتوای رطوبت در فشار ۱۱۰ بار

Figure 14- Drying rate variation versus moisture content in 110 bar pressure

معنی داری افزایش پیدا کرد. در بررسی نمودارها مشاهده شد، بیشترین نرخ خشک کردن در فشار ۸۰ بار، دمای ۶۰ درجه و توان ۴۰ وات برابر ۰/۴۲، در فشار ۱۱۰ بار، دمای ۶۰ درجه و توان ۲۰ وات برابر ۰/۴۲ و در فشار ۱۴۰ بار، دمای ۶۰ درجه و توان ۴۰ وات برابر ۰/۵ بود.

مطابق با نمودار زیر، در فشار ۱۴۰ بار، افزایش دما و افزایش توان التراسوند باعث افزایش نرخ خشک کردن شده است. کمترین نرخ خشک کردن در فشار ۱۴۰ بار در دمای ۴۰ درجه و بدون توان التراسوند رخ داد. بیشترین نرخ خشک کردن در دمای ۶۰ درجه و توان ۴۰ وات بیشترین نرخ خشک کردن مشاهده شد. در بررسی اثر تغییرات فشار بر نرخ خشک کردن، مشاهده شد که با افزایش فشار نرخ خشک کردن با طور



شکل ۱۵- نمودار آهنگ خشک شدن در مقابل محتوای رطوبت در فشار ۱۴۰ بار

Figure 15- Drying rate variation versus moisture content in 140 bar pressure

نتیجه گیری

این تحقیق یک مطالعه امکان‌سنجی در مورد استفاده از کرین‌دی‌اکسید فوق بحرانی به همراه التراسوند Air borne را در خشک کردن جلبک دونالیلا سالینا گزارش کرد. در بررسی اثر تغییرات فشار، دما و توان التراسوند بر پارامترهای خشک کردن مشخص گردید، با افزایش فشار، دما و توان التراسوند نرخ کاهش رطوبت افزایش یافته است. کمترین مقدار کاهش رطوبت در فشار ۸۰ بار با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و بدون اعمال التراسوند بوده است. التراسوند التراسوند التراسوند و بیشترین نرخ خشک کردن در فشار ۱۴۰ بار، دمای ۶۰ درجه و توان التراسوند ۴۰ وات بود. در بررسی مدل سازی ریاضی نتایج نشان داد، بهترین مدل، مدل میدیلی و همکاران بود. در بررسی اثر تغییرات فشار، تغییرات دما و تغییرات توان التراسوند بر نرخ رطوبت مشاهده شد که با افزایش فشار و دما و توان التراسوند، نرخ رطوبت در هر یک از زمان‌های اندازه‌گیری، کم شده است. با توجه به داده‌های پیش‌بینی شده در فشار ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ بار و بررسی ضریب همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده که همگی بیشتر از ۰/۹۹۹ بودند، مشاهده شد مدل ارائه شده با روش RSM از اعتبار بالایی برخوردار بود. در بررسی اثر تغییرات بر نرخ خشک کردن مشاهده شد، افزایش فشار، دما و توان التراسوند باعث افزایش نرخ خشک کردن شده است.

در فاز اول خشک کردن نمونه، سرعت خشک شدن به حد بالای خود می‌رسد و متعاقباً محصول در دوره نزولی خشک می‌شود. فرآیند تبخیر آب در ابتدا در سطح نمونه انجام می‌شود. سطح نمونه فقط برای مدت بسیار کوتاهی با آب اشباع می‌شود و در نتیجه دیگر نرخ ثابت خشک شدن مشاهده نمی‌شود. در این صورت فرآیند انتشار رطوبت به تدریج به مهمترین عامل تبدیل می‌شود. در طول دوره نرخ ثابت کاهش رطوبت، سرعت حذف رطوبت، به دلیل وجود رطوبت روی سطح، سریع بود (کاکمک و همکاران ۲۰۱۶ و کاوه و همکاران ۲۰۱۷). محققین در بررسی خشک کردن جلبک اسپیرولینا مشاهده کردند که افزایش دما و افزایش رطوبت اولیه، نرخ خشک کردن را افزایش داد (غنیمی و همکاران ۲۰۱۹). در تحقیقی در بررسی خشک کردن قارچ، با افزایش دما و استفاده از پیش‌تیمار التراسوند، نرخ خشک کردن افزایش یافت (کاکمک و همکاران ۲۰۱۶). نتایج مشاهده شده در این تحقیق با مشاهده سایرین در خشک کردن قارچ، زردآلو، انار، بادمجان و پودر میوه تمشک مشابه بود (کاکمک و همکاران ۲۰۱۶؛ اینز و همکاران ۲۰۱۱؛ کاوه و همکاران ۲۰۱۷؛ مینایی و همکاران ۲۰۱۲؛ داداشی و همکاران ۱۴۰۰).

منابع مورد استفاده

- امیدوار اوغانی ش، ۱۳۹۵. انتقال حرارت جابجایی سیال فوق بحرانی در استوانه داغ عمودی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- آیینی س، ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی خشک کردن انجیر به کمک سیال فوق بحرانی بی‌کسید کرین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- داداشی س، ارشادفرکار م، دهقان نیا ج، خاکباز حشمتی م، ۱۴۰۰. تاثیر سرعت هوای داغ بر سینتیک خشک شدن و ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی پودر میوه تمشک تولید شده به روش فوم مت. نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۳۱(۲)، ۱۵۵-۱۷۱.

- کرمی، م، ۱۳۹۲. استخراج اسیدهای چرب و روغن‌های ضروری از دانه گیاه گیلاس کاپاریس اسپینوزا و دم گیلاس با استفاده از سیال فوق بحرانی و امواج فراصوت و بهینه سازی شرایط استخراج با استفاده از طراحی آزمایش، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- علیشاهی م و کرمی فر م، ۱۳۹۴. مقایسه‌ی تجویز خوراکی غلظت‌های مختلف جلبک دونالیلا سالینا *Dunaliella salina* بر میزان کاروتنوئید پوست و رنگ ماهی سورم (*Heros server*). مجله دامپزشکی ایران، ۴ (۱۱)، ۵۲-۶۱.
- قائنی م، ۱۳۸۹. تاثیر توده زنده اسپیرولینا (*Spirulina*) و فراورده خشک آن بر شاخص‌های زیستی (*Penaeus semisulcatus*) لارو میگوی بیری سبز. پایان نامه دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی.
- نوری الف و عباسی ه، ۱۳۹۷. تاثیر روش‌های مختلف فرآوری بر ترکیبات شیمیایی و فعالیت ضداکسایشی ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس. بیوتکنولوژی غذایی کاربردی، ۵ (۴)، ۲۲۱-۲۳۲.
- Akpinar E, Midilli A, and Bicer Y, 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy conversion and management* 44(10): 1689-1705.
- Alonso DL, Grima EM, Pérez JS, Sánchez JG and Camacho FG, 1992. Isolation of clones of *Isochrysis galbana* rich in eicosapentaenoic acid. *Aquaculture* 102(4): 363-371.
- Asiabi H, Yamini Y, Moradi M, 2013. Determination of sulfonylurea herbicides in soil samples via supercritical fluid extraction followed by nanostructured supramolecular solvent microextraction. *The Journal of Supercritical Fluids* 84: 20-28.
- Bourdoux S, Rajkovic A, De Sutter S, Vermeulen A, Spilimbergo S, Zambon A, Hofland G, Uyttendaele M, and Devlieghere F, 2018. Inactivation of *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 inoculated on coriander by freeze-drying and supercritical CO₂ drying. *Innovative food science & emerging technologies* 47: 180-186.
- Brown ZK, 2010. The drying of foods using supercritical carbon dioxide. Thesis for the degree of doctor of engineering, University of Birmingham.
- Brown ZK, Fryer PJ, Norton, IT, Bakalis S, and Bridson RH, 2008. Drying of foods using supercritical carbon dioxide Investigations with carrot. *Innovative food science & emerging technologies* 9(3): 280-289.
- Bušić A, Vojvodić A, Komes D, Akkermans C, Belščak-Cvitanović A, Stolk M, and Hofland G, 2014. Comparative evaluation of CO₂ drying as an alternative drying technique of basil (*Ocimum basilicum* L.) The effect on bioactive and sensory properties. *Food research international* 64: 34-42.
- Çakmak RŞ, Tekeoğlu O, Bozkır H, Ergün AR, and Baysal T, 2016. Effects of electrical and sonication pretreatments on the drying rate and quality of mushrooms. *LWT-Food Science and Technology*: 69, 197-202.
- Charoux CM, Ojha KS, O'Donnell CP, Cardoni A, and Tiwari BK, 2017. Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry. *Journal of Food Engineering* 208: 28-36.
- Choi KJ, Nakhost Z, Krukoni VJ, and Karel M, 1987. Supercritical fluid extraction and characterization of lipids from algae *Scenedesmus obliquus*. *Food Biotechnology* 1(2): 263-281.
- Denery JR, Dragull K, Tang CS, and Li QX, 2004. Pressurized fluid extraction of carotenoids from *Haematococcus pluvialis* and *Dunaliella salina* and kavalactones from *Piper methysticum*. *Analytica chimica acta* 501(2): 175-181.
- Diñçer İ, and Zamfirescu , 2016. Drying phenomena: theory and applications. John Wiley & Sons.
- Djekic I, Tomic N, Bourdoux S, Spilimbergo S, Smigic N, Udovicki B, and Rajkovic A, 2018. Comparison of three types of drying (supercritical CO₂, air and freeze) on the quality of dried apple—Quality index approach *Lwt* 94: 64-72.
- Ghasemi E, Yamini Y, Bahramifar N, Sefidkon F, 2007. Comparative analysis of the oil and supercritical CO₂ extract of *Artemisia sieberi*. *Journal of Food Engineering* 79(1): 306-311.
- Ghnimi T, Hassini L, and Bagane M, 2019. Convective and infrared drying assisted by capillary drainage of spirulina: a real possibility to reduce the energy consumption. *Heat and Mass Transfer* 55(3): 867-876.

- Guldhe A, Singh B, Rawat I, Ramluckan, K, and Bux F, 2014. Efficacy of drying and cell disruption techniques on lipid recovery from microalgae for biodiesel production. *Fuel* 128: 46-52.
- Ihns R, Diamante LM, Savage GP, and Vanhanen L, 2011. Effect of temperature on the drying characteristics, colour, antioxidant and beta-carotene contents of two apricot varieties. *International journal of food science & technology* 46(2): 275-283.
- Kadam SU, Tiwari BK, and O'Donnell CP, 2015. Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*. *Ultrasonics sonochemistry* 23: 302-307.
- Karabulut I, Topcu A, Duran A, Turan S, and Ozturk B, 2007. Effect of hot air drying and sun drying on color values and β -carotene content of apricot (*Prunus armenica* L.). *LWT-Food Science and Technology* 40(5): 753-758.
- Kaveh M, Amiri Chayjan R, and Nikbakht AM, 2017. Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. *Heat and Mass Transfer* 53(6): 2045-2059.
- Koubaa M, Mhemdi H, and Fages J, 2018. Recovery of valuable components and inactivating microorganisms in the agro-food industry with ultrasound-assisted supercritical fluid technology. *The Journal of Supercritical Fluids* 134: 71-79.
- Leach G, Oliveira G, and Morais R, 1998. Production of a carotenoid-rich product by alginate entrapment and fluid-bed drying of *Dunaliella salina*. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 76(2): 298-302.
- Leach G, Oliveira G, and Morais, R, 1998. Spray-drying of *Dunaliella salina* to produce a β -carotene rich powder. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 20(2): 82-85.
- Lee BS, Choi YH and Lee WY, 2011. Drying characteristics of apple slabs after pretreatment with supercritical CO₂. *Preventive Nutrition and Food Science* 16(3): 261-266.
- Ling ALM, Yasir S, Matanjun P, and Bakar MFA, 2015. Effect of different drying techniques on the phytochemical content and antioxidant activity of *Kappaphycus alvarezii*. *Journal of applied phycology* 27(4): 1717-1723.
- Mendiola JA, Santoyo S, Cifuentes A, Reglero G, Ibanez E, and Señoráns FJ, 2008. Antimicrobial activity of sub-and supercritical CO₂ extracts of the green alga *Dunaliella salina*. *Journal of food protection* 71(10): 2138-2143.
- Michelino F, Zambon A, Vizzotto MT, Cozzi S, and Spilimbergo S, 2018. High power ultrasound combined with supercritical carbon dioxide for the drying and microbial inactivation of coriander. *Journal of CO₂ Utilization* 24: 516-521.
- Minaei S, Motevali A, Ahmadi E, and Azizi H, 2012. Mathematical models of drying pomegranate arils in vacuum and microwave dryers. *Journal Of Agricultural Science And Technology* 14:311-325.
- Morbiato G, Zambon A, Toffoletto M, Poloniato G, Dall'Acqua S, de Bernard M, and Spilimbergo S, 2019. Supercritical carbon dioxide combined with high power ultrasound as innovate drying process for chicken breast. *The Journal of Supercritical Fluids* 147: 24-32.
- Mouahid A, Crampon C, Toudji SAA, and Badens E, 2016. Effects of high water content and drying pre-treatment on supercritical CO₂ extraction from *Dunaliella salina* microalgae: Experiments and modelling. *The Journal of Supercritical Fluids* 116: 271-280.
- Naeni MH, Yamini Y, Rezaee M, 2011. Combination of supercritical fluid extraction with dispersive liquid-liquid microextraction for extraction of organophosphorus pesticides from soil and marine sediment samples. *The journal of supercritical fluids* 57(3): 219-226.
- Namatsu H, Yamazaki K, and Kurihara K, 1999. Supercritical drying for nanostructure fabrication without pattern collapse. *Microelectronic Engineering* 46(1-4): 129-132.
- Puente-Díaz L, Ah-Hen K, Vega-Gálvez A, Lemus-Mondaca R, and Scala KD, 2013. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: kinetic modeling and quality assessment. *Drying Technology* 31(3): 329-338.
- Riera E, Golas Y, Blanco A, Gallego JA, Blasco M, and Mulet A, 2004. Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry* 11(3-4): 241-244.

- Show KY, Lee DJ, and Mujumdar AS, 2015. Advances and challenges on algae harvesting and drying. *Drying technology* 33(4): 386-394.
- Tao Y, Wang P, Wang Y, Kadam SU, Han Y, Wang J, and Zhou J, 2016. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrasonics sonochemistry* 31: 310-318.
- Tirado DF and Calvo L, 2019. The Hansen theory to choose the best cosolvent for supercritical CO₂ extraction of β -carotene from *Dunaliella salina*. *The Journal of Supercritical Fluids* 145: 211-218.
- Tuyen CK, Nguyen MH, and Roach PD, 2010. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of food engineering* 98(3): 385-392.
- Zenouzi A, Ghobadian B, Hejazi MA, and Rahnemoon P, 2013. Harvesting of microalgae *Dunaliella salina* using electroflocculation. *Journal of Agricultural Science and Technology* 15(5): 879-887
- Zhang Z, Liu Z, Liu C, Li D, Jiang N, and Liu C, 2016. Effects of ultrasound pretreatment on drying kinetics and quality parameters of button mushroom slices. *Drying technology* 34(15): 1791-1800.
- Zhang Z, Niu L, Li D, Liu C, Ma R, Song J, and Zhao J, 2017. Low intensity ultrasound as a pretreatment to drying of daylilies: Impact on enzyme inactivation, color changes and nutrition quality parameters. *Ultrasonics sonochemistry* 36: 50-58.
- Zhao Y, Wang W, Zheng B, Miao S, and Tian Y, 2017. Mathematical modeling and influence of ultrasonic pretreatment on microwave vacuum drying kinetics of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds. *Drying Technology* 35(5): 553-563.



Journal of Food Research, 2023,33(3):83-109
<https://foodresearch.tabrizu.ac.ir>

OPEN ACCESS



© 2009 Copyright by Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)
DOI: 0.22034/FR.2023.54625.1859

Application of hybrid drying of super critical CO₂ and airborne ultrasonic in drying kinetic improvement of *dunaliella salina*

E Ghajarjazi¹, A Hosainpour^{1*}, AM Nikbakht¹ and N Agh²

Received: December 25, 2022

Accepted: May 13, 2023

¹PhD Student, Associate Professor, Professor, respectively, Department of Mechanical Engineering of Urmia university, Urmia, Iran

²Professor, Department of Biology and Aquaculture Group, Artemia and Aquaculture Research Institute, Urmia university, Urmia, Iran

*Corresponding author: E mail: a.hosainpour@urmia.ac.ir

Introduction: *Dunaliella salina* unicellular alga belonging to the *Chlorophyceae* family has been introduced as an extensive source of carotenoids (Zenouzi *et al.*, 2013; Mendiola *et al.*, 2008). The Carotenoids are strong antioxidants and bright pigments, and for this reason are used as human food and aquatics diets pigments (Denery *et al.*, 2004). Investigations have shown that increasing the drying temperature will decrease the volatile and phenolic compounds of algae, and by decreasing the drying temperature, the amount of these compounds in the algae will be increased (Ling *et al.*, 2015). According to the other research, the amount of beta-carotene after drying has been greatly decreased in conventional drying methods. (Ihns *et al.*, 2011; Karabulut *et al.*, 2007). The supercritical drying is an extraction process, that the supercritical fluid is the extraction solvent and water is the soluble substance (Brown 2010). The advantage of this drying method is that it is possible to prevent vapor-liquid contact in the homogeneous phase. For this reason, the tensile stress caused by the capillary that occurs during the air drying process does not exist in supercritical drying, and protects the structure of the material (Namatsu *et al.*, 1999). In addition, carbon dioxide easily reached to critical temperature (31.1°C), so operating at low temperature (significantly lower than common dryers) prevents thermal damage (Brown 2010). Also Ultrasonic power at low frequency (20 to 100 kHz) is used for bacterial inactivation, improving process speed, heat and mass transfer, and water removal. In addition, the phenomenon of cavitation occurs in this composition and it causes an increase in the micro-mixing and communication between the solvent and microorganisms, and as a result, water exit and bacterial inactivation are improved (Morbiato *et al.*, 2019). Non-contact ultrasonic, such as airborne processes, in which there is no contact surface or liquid to connect the transducer and the desired surface, can be used in various applications, including food drying. This system in combination with the other methods can overcome the limitations. For example, high temperature drying can damage the components of the material (color, texture, volatile compounds, etc.), while the combination with airborne can decrease the temperature and thus reduce the drying time, and the quality of the product and its nutritional ingredients should be maintained. The present work focused on investigation of the kinetics and drying rate of the *Dunaliella salina* algae by the

supercritical carbon dioxide method in combination with airborne ultrasonic power, as well as the modeling of drying using mathematical and response surface methods.

Materials and methods: The studied algae in this research was *Dunaliella salina*, which was obtained from the Artemia & Aquaculture Research Institute of Urmia University. In this research, 2.8 grams of algae paste with a thickness of 3 mm was placed in the drying vessel and methanol was added directly to the sample as a co-solvent. And the Suprex (MPS/225) in combination by airborne ultrasonic was used. The vessel that used in devise was made by stainless steel 316. Face center design consisting of 20 experimental runs with six replications at the central point was utilized to determine the effects of three independent variables in three levels: -1, 0, +1. The independent variables were Pressure at three levels (80, 110, 140 bar), temperature at three levels (40, 50, 60 °C) and airborne ultrasonic power at three levels (0, 20, 40 w) and the samples were weighed in dynamic mode in 30 minute intervals. The software of Design-Expert 13.0.5 (Stat-Ease, Minneapolis, MN, USA) was used for design experiment, data analysis and surface responsible diagram.

Results and discussion: In 80 bar of pressure, the reduction of moisture content was constant for 150 min in temperature of 40 °C and without ultrasonic power and then was reduced. In other treatment the reduction of moisture content was continued for 120 min. In this pressure, after 180 min the moisture content in 40°C reached to 52% and in 60 °C and 40 w ultrasonic power reached to 31%. In 110 bar of pressure, the lowest moisture reduction was reached to 44% at 40 °C and 20 w. and the highest moisture reduction was 33% at 60°C and 20 w. The moisture reduction was constant for 120 min in temperature of 40°C and 20 w, while in temperature of 60°C and 20 w, the moisture content was constant for 90 min. in pressure of 140 bar, the maximum of moisture content was in 40 °C and without ultrasonic power and the minimum moisture content was 22% in 60 °C and 40 w. These results are due to the low viscosity, high diffusion rate and the near-absence of surface tension of the supercritical fluid. These properties allow the supercritical fluid to easily penetrate into the micro pores and surface and internal cells. Furthermore, new pores or channels could have been made by the supercritical fluid (Lee et al., 2011). The *Midilli et al.* model was the best fitting model. The highest values of R^2 , and the lowest values of SSE and RMSE obtained for the *Midilli et al.* model were 0.99925, 0.00023 and 0.0004, respectively. In RSM modeling, the results show that the changes of pressure, temperature and ultrasonic power had significant effect on moisture ratio in weighting time. While the interaction effect of independent variables had no significant effect on the factors. and the model has been investigated linearly. In the drying rate curve, at the beginning, drying was increased with a great slope, and then the curve decreases with a lower slope. The lowest drying rate at a pressure of 80 bar was occurred, in temperature of 40°C and the without ultrasonic power. And the highest drying rate was observed, in 60 °C and 40 w. the lowest drying rate in pressure of 110 bar was occurred in 40°C and 20w.

Conclusion: According to the results, the supercritical carbon dioxide method in combination with airborne ultrasonic power was suitable for *dunaliella salina* drying at low pressure and temperature. But in order to reduce the drying time and final moisture content, the pressure, temperature and ultrasonic power can be increased.

Keywords: Supercritical CO₂, Airborne ultrasonic, *dunaliella salina* algae, Drying