

# مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک انگور پیش تیمار شده با اولتراسوند و کربوکسی متیل سلولز

منور طهماسبی پور<sup>۱</sup>، جلال دهقان نیا<sup>۱\*</sup>، سید صادق سیدلو هریس<sup>۲</sup> و بابک قنبرزاده<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۳

۱- گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۲- گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه E-mail: J\_dehghannya@tabrizu.ac.ir

## چکیده

خشک شدن لایه نازک انگور پیش تیمار شده با اولتراسوند و پوشش خوراکی کربوکسی متیل سلولز (CMC) در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد و سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه در یک خشک کن تونلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش زمان پیش تیمار اولتراسوند از ۱۰ به ۳۰ دقیقه، زمان خشک شدن کاهش و ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش می یابد. همچنین، افزایش غلظت کربوکسی متیل سلولز از ۰/۱ تا ۰/۲ درصد باعث افزایش زمان خشک شدن شد. علاوه بر این، داده های حاصل از آزمایش به منظور پیش بینی روند صحیح خشک شدن، توسط مدل های نیوتن، پیچ، هندرسون و پاییس، لگاریتمی، میدیلی، ونگ و سینگ، سیدلو و آغباشلو و چند مدل پیشنهادی جدید در این پژوهش برآزش شدند. پس از انجام آنالیز رگرسیونی چند متغیره برای پیدا نمودن روابط بین ضرایب مدل ها با متغیرهای به کار رفته، یکی از مدل های پیشنهادی به عنوان بهترین مدل توصیف کننده فرآیند خشک شدن انگور تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد.

واژه های کلیدی: اولتراسوند، خشک شدن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کربوکسی متیل سلولز، مدل سازی

## ۱- مقدمه

و به منظور تولید میوه های خشک شده که به طور مستقیم مصرف می شوند، مورد استفاده قرار می گیرد. در طی فرآیند خشک کردن، قسمت عمده رطوبت موجود در غذا به وسیله تبخیر توسط روش های مختلف جدا می شود. دفع رطوبت ماده غذایی در سطحی که فساد میکروبی کاهش یابد، با هدف افزایش مدت زمان انبارداری و کاهش هزینه های بسته بندی و حمل و نقل انجام می شود. متداول ترین روش خشک کردن مواد غذایی استفاده از جریان هوای داغ است که شامل انتقال جرم و حرارت هم زمان می باشد. خشک کردن با جریان هوای داغ، علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما، صرف نظر از اندازه و شکل محصول و عدم نیاز به تماس مستقیم دارای معایبی نیز است. از جمله این معایب، داشتن سرعت انتقال حرارت نسبتاً پایین نسبت به بعضی از روش های دیگر خشک کردن و نیاز به زمان طولانی تر برای خشک شدن محصول است (هاسینی و همکاران، ۲۰۰۷). علاوه بر این، سرعت خشک شدن به ویژه در دوره نزولی آن پایین است و اگر دمای هوا بیش از حد افزایش یابد، باعث آسیب به ترکیبات حساس به حرارت از جمله ویتامین C می شود (هاسینی و همکاران، ۲۰۰۷).

روش های مختلفی برای تولید کشمش وجود دارد که متداول ترین آن ها، قراردادن مستقیم این میوه زیر نور آفتاب است. این روش بسیار آسان و کم سرمایه بر می باشد ولی دارای عیوبی نیز است. از جمله این عیوب می توان به فضا و هزینه زیاد آن اشاره کرد؛ اما عیب عمده این

درخت انگور با نام علمی وینفرا ویتیس (*Vinefera Vitis*) از خانواده انگورسانان (*Vitaceae*) است. امروزه خشک کردن میوه های مختلف مانند موز، سیب، کیوی، پرتقال و انگور مرسوم شده است و این محصولات در بازار با قیمت بالایی به فروش می رسند. بر اساس آمار فائو (FAO)، میزان تولید انگور در سال ۲۰۰۸ در ایران، ۱۷۳۹۵۰۳ تن بوده و ایران از این نظر، رتبه هفتم جهانی را به خود اختصاص داده است. میوه درخت انگور گوشت دار و شیرین است و به دو نوع دانه دار و بی دانه تقسیم می شود. همه ارقام انگور برای تهیه کشمش مناسب نیستند و وجود هسته از مرغوبیت آن می کاهد. به همین دلیل بیشترین ارقامی که امروزه برای تولید کشمش استفاده می شوند، ارقام بی دانه هستند. مهمترین این ارقام که بیشتر در ایران، ترکیه، یونان و آمریکا کشت می شود، رقم کشمش یا سلطانی و یا تامسون بی دانه است. کشمش دارای فوایدی است که از جمله آن ها می توان به خاصیت آنتی اکسیدانی، جلوگیری از تخریب سلولی، فساد دندان ها و کاهش بیماری های قلبی اشاره کرد. علاوه بر این، کشمش کم چرب، کم سدیم، سرشار از انرژی و منبع خوبی از ویتامین B و D، هورمون استروژن، آهن، پتاسیم، کلسیم و فیبر است.

خشک کردن، یکی از روش های قدیمی و مرسوم برای نگهداری محصولات کشاورزی است که به دلیل کاهش افت پس از برداشت آن ها

همکاران، ۲۰۰۹)، ساپتاس (رودریگز و همکاران، ۲۰۰۹) و همچنین اثر اولتراسوند روی سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های موز (آزوبل و همکاران، ۲۰۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهند که پیش‌ تیمار اولتراسوند با افزایش قابلیت انتشار رطوبت طی فرآیند خشک‌کردن، باعث کمترین آسیب بافتی و چروکیدگی در محصول و کاهش زمان مورد نیاز در مرحله خشک‌کردن با هوای داغ می‌شود.

گارسیاپرز و همکاران (۲۰۰۶)، اثر پارامترهای مختلف مانند سرعت هوا، میزان تغذیه دستگاه و توان اولتراسوند را در یک سیستم ترکیبی با خشک‌کن بستر سیال بر روی سینتیک خشک‌شدن هویج و پوست لیمو با دمای هوای ۴۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت هوا و میزان تغذیه سیستم، اثر اولتراسوند بر خشک‌کردن کاهش می‌یابد ولی افزایش توان باعث افزایش انتقال جرم و به دنبال آن کاهش زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده توسط گارسیاپرز و همکاران (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که سرعت هوا و ویژگی‌های مواد خشک‌شدنی نقش مهمی را در هنگام استفاده از سیستم ترکیبی اولتراسوند و خشک‌کن بستر سیال دارد. همچنین، بررسی اثر پیش‌ تیمارهای دهیدراسیون اسمزی و اولتراسوند بر روی ساختار سلولی هندوانه در دوره‌های زمانی مختلف توسط فرناندز و همکاران (۲۰۰۸a) نشان داد که دهیدراسیون اسمزی باعث از دست‌رفتن ساختار سلولی و قطع ارتباط بین سلول‌ها و افزایش میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت در اثر تخریب دیواره سلولی میوه می‌شود. در حالی که اولتراسوند بدون از هم‌پاشیدگی ساختار سلولی و با ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار میوه، میزان خروج رطوبت را افزایش می‌دهد.

علاوه بر اولتراسوند، پوشش‌های خوراکی نیز برای افزایش کیفیت ماده غذایی خشک‌شده به کار می‌روند. پوشش‌خوراکی به عنون پوشش نازکی از مواد خوراکی که روی سطح ماده غذایی، از طریق غوطه‌وری و یا اسپری کردن به کار می‌رود، تعریف می‌شود (دهقان‌نیا و همکاران، ۲۰۰۶). گارسیا و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی تأثیر پوشش چیتوزان بر روی انتقال جرم میوه پاپایا هنگام دهیدراسیون اسمزی پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که مقدار خروج رطوبت در نمونه‌های پوشش‌داده‌شده نسبت به نمونه‌های بدون پوشش بیشتر است. در پژوهش مشابه دیگری، تأثیر پوشش کربوکسی‌متیل سلولز بر روی دهیدراسیون اسمزی قطعات سیب توسط امام‌جمعه و همکاران (۲۰۰۶) مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، استفاده از پوشش-خوراکی کربوکسی‌متیل سلولز باعث افزایش میزان کارایی دهیدراسیون اسمزی از طریق افزایش آب‌گیری و کاهش ورود مواد جامد محلول به سیب شد.

برای پیش‌بینی صحیح روند خشک‌شدن محصولات کشاورزی و درک بهتر پدیده‌های درگیر طی فرآیند و همچنین پیش‌بینی رفتار ماده غذایی تحت شرایط مختلف و طراحی تجهیزات خشک‌کردن، می-

روش، زمان زیاد مورد نیاز برای خشک‌شدن است که معمولاً بین ۱۵ تا ۲۰ روز طول می‌کشد (پهلوان زاده و همکاران، ۲۰۰۲ و ژیاو و همکاران، ۲۰۱۰). علاوه بر این، محصول نهایی ممکن است توسط گرد و خاک و یا حشرات آلوده شده و رنگ آن نیز حالت نامطلوب پیدا کند. بنابراین، برای کاهش عیوب فوق، می‌توان از پیش‌ تیمارهای مختلف شامل استفاده از محلول‌های قلیایی، امواج مایکروویو، مادون قرمز، اولتراسوند و همچنین پوشش‌های خوراکی قبل از خشک‌کردن با جریان هوای داغ بهره برد. محلول‌های قلیایی با حذف لایه مومی موجود در سطح انگور و کاهش مقاومت داخلی، باعث افزایش میزان انتشار رطوبت و افزایش سرعت خشک‌شدن و در نتیجه کاهش زمان مورد نیاز برای فرآیند نسبت به روش خشک‌کردن سنتی می‌شوند (دویماز و پالا، ۲۰۰۲ و کافلار و همکاران، ۲۰۰۹). استفاده از مواد شیمیایی مانند محلول‌های قلیایی اگرچه باعث تسریع فرآیند خشک‌کردن می‌شوند، اما تا حد امکان باید از کاربرد این مواد در خشک‌کردن مواد غذایی اجتناب نمود؛ به این دلیل که مواد شیمیایی مختلف مورد استفاده می‌توانند اثرات نامطلوب روی ویژگی‌های حسی کشمش از جمله شکل ظاهری، بافت و رنگ محصول داشته باشند (پانگاوانه و همکاران، ۱۹۹۹).

از طرف دیگر، امروزه اولتراسوند یا امواج صوتی، قبل از فرآیند خشک‌کردن با جریان هوای داغ برای کاهش زمان مورد نیاز و بهبود ویژگی‌های کیفی محصول خشک‌شده به کار می‌رود (باسکاراچاریا و همکاران، ۲۰۰۹). اولتراسوند شکلی از انرژی است که توسط امواج صوتی در فرکانس‌های بالای محدوده شنوایی انسان (بالای ۱۶ کیلوهرتز) تولید می‌شود (بیلدریم و همکاران، ۲۰۱۱). این امواج، هنگامی که از ماده غذایی عبور می‌کنند، تغییرات مؤثری را در آن ایجاد می‌کنند. شدت‌های بالای این امواج باعث ایجاد و سپس ترکیدن حباب‌های هوای داخل محیط مایع می‌شوند که به این پدیده کاویتاسیون می‌گویند. ترکیدن غیرممتقارن این حباب‌ها در نزدیکی سطح ماده غذایی، باعث انتقال جریان سریع و فورانی از امواج صوتی به سطح شده و با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی‌درپی در آن، باعث تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و سهولت خروج رطوبت از داخل محصول در طی خشک‌شدن می‌شود (کارسل و همکاران، ۲۰۰۷). اولتراسوند، بدون افزایش دما و داشتن اثرات سوء روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌ تیمار در خشک‌کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود، چون باعث افزایش سرعت و کاهش دمای مورد نیاز برای خشک‌کردن می‌شود (سان، ۲۰۰۵).

کارسل و همکاران (۲۰۰۷) اثر شدت‌های مختلف اولتراسوند بر روی انتقال جرم در نمونه‌های سیب غوطه‌ور شده در محلول ساکارز را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این بودند که میزان انتقال جرم با افزایش شدت اولتراسوند افزایش می‌یابد. مشاهدات مشابه در مورد تأثیر تلفیق فرآیندهای اولتراسوند و اسمز در حین دهیدراسیون روی ساختار بافتی آناناس (فرناندز و همکاران، ۲۰۰۸b)، پاپایا (رودریگز و

ویژگی‌های مهم در مدل‌سازی سینتیک خشک شدن مواد غذایی است که تابعی از دما و محتوای رطوبت می‌باشد. حرکت رطوبت که شامل انتشار آب در مواد غذایی جامد است، فرآیند پیچیده‌ای به شمار می‌رود و با توجه به این که ضریب انتشار مؤثر رطوبت، در اکثر فرآیندها تغییر می‌کند، در نظر نگرفتن آن باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود (باتیستا و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین، مطالعه درباره این ضریب، برای بررسی تأثیر پیش تیمارهای به کار رفته بر سینتیک خشک کردن لازم است.

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک انگور بی‌دانه پیش تیمار شده با امواج اولتراسوند و پوشش خوراکی کربوکسی‌متیل سلولز (CMC)، بررسی تأثیر این پیش تیمارها بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی کننده فرآیند خشک شدن بود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد خام و تجهیزات مورد استفاده

انگور بی‌دانه از یک بازار محلی تهیه و تا زمان آزمایش در سردخانه با دمای  $3 \pm 1^\circ\text{C}$  نگهداری شد. حدود یک ساعت قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها از سردخانه خارج شدند تا دمای آن‌ها به دمای محیطی برسد. برای بررسی تأثیر اولتراسوند و پوشش خوراکی، از حمام اولتراسوند (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در ۳ سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه و کربوکسی‌متیل سلولز (ساخت شرکت مرک، آلمان) در ۳ سطح غلظتی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد استفاده شد. قبل از شروع خشک کردن، نمونه‌ها در معرض امواج اولتراسوند با دمای  $25^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. پس از گذشت مدت زمان‌های خاص، نمونه‌ها از حمام اولتراسوند خارج و رطوبت سطحی آن‌ها با کاغذهای جاذب رطوبت گرفته شد. در ادامه نمونه‌ها با محلول کربوکسی‌متیل سلولز  $2 \pm 4^\circ\text{C}$  و به مدت ۱۰ ثانیه پوشش‌دهی شده (قنبرزاده و همکاران، ۲۰۱۰) و به یک خشک‌کن سینی‌دار طراحی شده در مقیاس آزمایشگاهی (مدل UOP 8 Tray dryer, Armfield, UK، مجهز به سیستم ثبت خودکار داده‌ها، واحد کنترل کننده دما، سرعت جریان و رطوبت نسبی هوا) منتقل شدند.

### ۲-۲- آماده سازی محلول پوشش خوراکی

محلول CMC با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد به صورت زیر تهیه شد:

ابتدا بشر حاوی مقدار مشخصی آب مقطر بر روی هیتر (گرم کن) قرار گرفته و تا رسیدن به دمای ۶۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. سپس، مقادیر مشخصی از CMC با توجه به هر آزمایش، در چند نوبت و در فواصل زمانی مشخص به محلول فوق اضافه شد و هم‌زمان عمل هم‌زدن توسط مگنت صورت گرفت. پس از حل شدن تمام CMC

توان سینتیک خشک شدن را مدل‌سازی نمود. مدل‌سازی سینتیک خشک شدن، روابط بین متغیرهای زمان و رطوبت را ارائه می‌دهد و می‌تواند راه مناسبی برای کنترل زمان و شرایط خشک کردن باشد (یان و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین، برای بررسی بهتر تغییرات کمی و کیفی محصول خشک شده، مدل‌سازی سینتیک فرآیند خشک کردن ضروری است.

مدل‌های خشک شدن لایه نازک، رفتار خشک شدن مواد غذایی را توصیف می‌کنند (آکپینار، ۲۰۰۶). این مدل‌ها به سه نوع علمی، نیمه-علمی و تجربی تقسیم می‌شوند. مدل‌های علمی (نظری) هنگامی که مقاومت داخلی نسبت به انتقال رطوبت وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالی که مدل‌های نیمه‌علمی و تجربی، وقتی مقاومت خارجی بین هوای خشک کننده و محصول غذایی وجود دارد، به کار می‌روند (آکپینار، ۲۰۰۶). به عنوان مثال، قانون فیک یک مدل علمی برای انتشار رطوبت است. در حالی که مدل‌هایی مثل نیوتن و هندرسون و پابیس مدل‌های نیمه‌علمی هستند که در واقع حل‌های عمومی ساده شده قانون دوم فیک و یا مدل‌های ساده شده آن می‌باشند. اعتبار این نوع مدل‌ها فقط در شرایط دمایی، رطوبت نسبی و سرعت مشخص به کار رفته می‌باشد. در این نوع مدل‌ها، نیازی به دانستن شکل هندسی ماده غذایی نیست. در مدل‌های تجربی، پایه‌های اساسی فرآیند خشک کردن نادیده گرفته شده‌اند و پارامترهای آن‌ها مفهوم فیزیکی ندارند و فقط می‌توانند منحنی‌های خشک شدن را توصیف کنند. مدل‌های ونگ و سینگ، ویبل (Weibull) و میدیلی از جمله مدل‌های تجربی هستند که در فرآیند خشک کردن لایه نازک مواد غذایی به طور موفقیت آمیزی قادر به توصیف سینتیک این فرآیند بوده‌اند (آکپینار، ۲۰۰۶).

مدل‌سازی خشک شدن انگور سفید ایرانی (گونه سلطانی) با در نظر گرفتن تأثیر دمای هوای مورد استفاده برای خشک کردن و پیش-تیمارهای قلیایی ( $\text{NaOH}$  و  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) با غلظت‌های مختلف روی سرعت خشک شدن توسط پهلوان زاده و همکاران (۲۰۰۲) انجام شد. نتایج حاصل نشان دادند که با افزایش دمای هوا از ۶۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد و غوطه‌وری دانه‌ها در محلول‌های قلیایی، می‌توان سرعت خشک شدن را افزایش داد. بررسی‌های مشابه توسط دویماز و پالا (۲۰۰۲) و دویماز (۲۰۰۶) بر روی سینتیک خشک شدن انگور صورت گرفت و مدل پیچ به عنوان مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی کننده فرآیند خشک شدن انتخاب شد. رابرتز و همکاران (۲۰۰۸) نیز به بررسی سینتیک خشک شدن و مدل‌سازی این فرآیند بر روی دانه‌های انگور پرداختند. داده‌های آزمایشی با مدل‌های نیوتن، پیچ و هندرسون و پابیس برازش شدند و مدل نیوتن به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $D_{\text{eff}}$ )، یکی از ویژگی‌های مهم محصولات کشاورزی است که همه مکانیسم‌های ممکن حرکت رطوبت در ماده غذایی مانند انتشار مایع، انتشار بخار و جریان موئینگی را توصیف می‌کند. علاوه بر این، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، یکی از

در مقایسه بین مدل‌ها، مدلی که دارای  $R^2$  بیشتر و SSE و RMSE کمتر باشد، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طی فرآیند خشک کردن توصیف کند (گویین و فرناندز، ۲۰۰۶ و نونز مانسیلا و همکاران، ۲۰۱۱).

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

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

$$RSME = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

در معادلات (۱)، (۲) و (۳)،  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت لایه میوه در  $i$  امین اندازه‌گیری،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت پیش‌بینی شده لایه میوه در  $i$  امین اندازه‌گیری،  $\overline{MR_{exp,i}}$  میانگین نسبت رطوبت لایه میوه در  $i$  امین اندازه‌گیری و  $\overline{MR_{pre,i}}$  میانگین نسبت رطوبت پیش‌بینی شده لایه میوه در  $i$  امین اندازه‌گیری می‌باشد.

آنالیز رگرسیونی چند متغیره نیز در ادامه برازش داده‌ها و به منظور برآورد ضرایب مدل انتخابی به صورت توابعی از زمان اولتراسوند و غلظت CMC، توسط نرم‌افزار Excel 2010 انجام شد.

## ۲-۶- تعیین ضریب انتشار مؤثر رطوبت

حل تحلیلی قانون دوم فیک که می‌تواند حرکت رطوبت را در طی دوره نزولی خشک شدن برای موادی با شکل هندسی کروی توصیف کند، به صورت معادله (۴) است (کلتوس و کارسون، ۲۰۰۸). در این معادله، فرض می‌شود که انتقال رطوبت از طریق انتشار صورت گرفته و خشک کردن ماده غذایی در زمان نسبتاً طولانی اتفاق می‌افتد (دویماز، ۲۰۰۶).

(۴)

$$MR = \frac{M - M_e}{M - M_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left( \frac{6}{\pi^2} \right) \exp \left( - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right)$$

در این رابطه، MR نسبت رطوبت، M مقدار رطوبت در لحظه t ام پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده غذایی)،  $M_0$  و  $M_e$  به ترتیب رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده غذایی)،  $D_{eff}$  ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $m^2/s$ ) و  $r$  شعاع دانه انگور بر حسب متر است. با ساده‌سازی معادله بالا و به دست آوردن جمله اول سری، رابطه زیر به دست می‌آید (بابالیس و بلسیوتیس، ۲۰۰۴).

$$MR = \left( \frac{6}{\pi^2} \right) \exp \left( - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (5)$$

در آب، محلول شفافی به دست آمد که تا دمای  $40 \pm 2^\circ C$  به وسیله حمام آب و یخ خنک گردید (قنبرزاده و همکاران، ۲۰۱۰).

## ۲-۳- خشک کن آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها، از یک خشک کن همرفتی سینی‌دار آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۱). این خشک کن دارای محفظه ورودی (شامل فن یا دمنده و گرم‌کن‌های الکتریکی)، محفظه میانی (شامل قفسه‌های خشک‌کن و خطی‌سازهای جریان هوا)، محفظه خروجی و تابلو فرمان (محفظه کنترل‌کننده دما و سرعت) بود (سیدلو و همکاران، ۲۰۱۰).

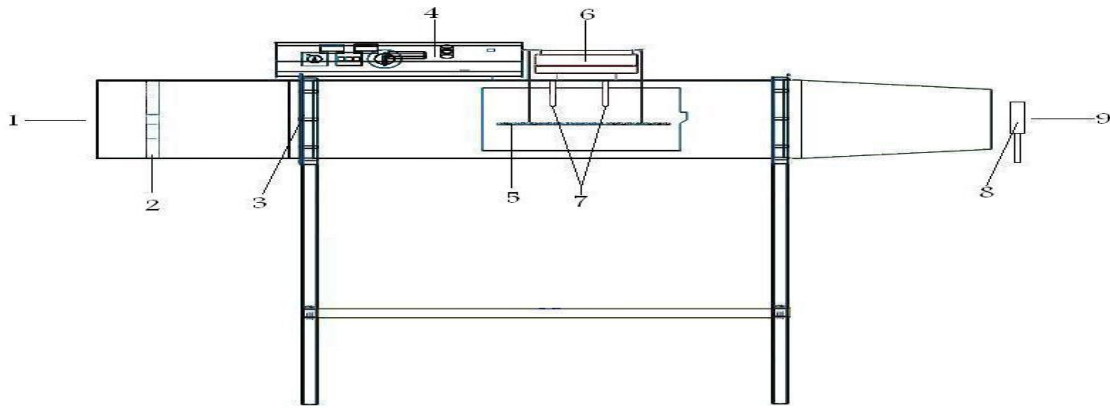
## ۲-۴- طرح کلی آزمایش‌ها

پس از روشن نمودن خشک کن و نیم ساعت کارکرد بدون نمونه-گذاری، سرعت، دما و رطوبت نسبی آن تنظیم شد. سرعت هوای داخل خشک کن بر روی عدد  $1/5$  متر بر ثانیه و دمای آن بر روی  $65$  درجه سانتی‌گراد تثبیت گردید. پس از تثبیت دما و سرعت، نمونه‌ها بر روی دو عدد سینی توری به صورت لایه نازک چیده شده و کاهش وزن آن‌ها هر ۵ دقیقه یکبار ثبت شد. عمل خشک کردن تا رسیدن به میزان رطوبت  $0.33$  گرم آب بر گرم ماده خشک ادامه یافت. آزمایش‌های خشک کردن، در ۲ تکرار و ۱۳ تیمار انجام گرفت. جدول ۱ تیمارهای مختلف و علائم اختصاری آن‌ها را نشان می‌دهد. محتوای رطوبت نمونه‌های انگور قبل و بعد از خشک شدن، از طریق خشک کردن در آون کنوکسیونی در دمای  $105 \pm 1^\circ C$  تا رسیدن به وزن ثابت صورت گرفت (AOAC, ۱۹۹۰) و به صورت محتوای رطوبت بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک گزارش شد. علاوه بر این، آهنگ خشک شدن نیز که تغییرات محتوای رطوبت را طی زمان خشک شدن نشان می‌دهد (مقدار رطوبت تبخیر شده طی زمان خشک شدن)، از طریق مشتق‌گیری از تابع تغییرات محتوای رطوبت نمونه‌ها به زمان خشک شدن به دست آمد و به صورت گرم آب بر گرم ماده خشک در ساعت گزارش گردید (دبسا و همکاران، ۲۰۰۸).

## ۲-۵- برآورد ضرایب ثابت مدل‌های ریاضی و انتخاب

### مناسب‌ترین مدل برای توصیف سینتیک خشک شدن

جدول ۲، مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده را برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن نشان می‌دهد. انواع مدل‌های تجربی و پیشنهادی برای برازش نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک شدن در شرایط مختلف آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. برازش داده‌های فوق با مدل‌های مذکور و تعیین ضرایب آن‌ها ( $a, b, c, K, n$ )، توسط نرم‌افزار MATLAB R 2011a صورت گرفت. به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده سینتیک خشک شدن، معیارهای ضریب تبیین ( $R^2$ )، مجموع خطای مربعات (SSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های تجربی خشک شدن و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفتند.



شکل (۱): شماتیک خشک کن مورد استفاده: (۱) ورودی هوا، (۲) فن، (۳) گرم کن، (۴) تابلو فرمان یا محفظه کنترل کننده دما و سرعت، (۵) سینی سوراخ دار، (۶) ترازوی دیجیتال، (۷) حسگر رطوبت، (۸) سرعت سنج دیجیتالی هوا و (۹) خروجی هوا

جدول (۱): علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	اولتراسوند با زمان ۰ دقیقه و CMC با غلظت صفر درصد	۱
U10	اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه	۲
U20	اولتراسوند با زمان ۲۰ دقیقه	۳
U30	اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه	۴
U10, CMC 0.1 %	اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه و غلظت ۰/۱ درصد CMC	۵
U10, CMC 0.2 %	اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه و غلظت ۰/۲ درصد CMC	۶
U10, CMC 0.3 %	اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه و غلظت ۰/۳ درصد CMC	۷
U20, CMC 0.1 %	اولتراسوند با زمان ۲۰ دقیقه و غلظت ۰/۱ درصد CMC	۸
U20, CMC 0.2 %	اولتراسوند با زمان ۲۰ دقیقه و غلظت ۰/۲ درصد CMC	۹
U20, CMC 0.3 %	اولتراسوند با زمان ۲۰ دقیقه و غلظت ۰/۳ درصد CMC	۱۰
U30, CMC 0.1 %	اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه و غلظت ۰/۱ درصد CMC	۱۱
U30, CMC 0.2 %	اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه و غلظت ۰/۲ درصد CMC	۱۲
U30, CMC 0.3 %	اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه و غلظت ۰/۳ درصد CMC	۱۳

کولیس دیجیتالی اندازه گیری و شعاع آن طبق معادله ۸ محاسبه شد (کلتوس و کارسون، ۲۰۰۸). مقادیر به دست آمده برای طول سه بعد (a, b و c) و شعاع دانه های انگور به ترتیب ۰/۰۱۴، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۱۲۳ متر بود.

$$r = \sqrt[3]{a.b.c} \quad (۸)$$

برآورد ضریب انتشار مؤثر رطوبت به صورت توابعی از اولتراسوند و غلظت CMC نیز توسط آنالیز رگرسیونی چندمتغیره با استفاده از نرم افزار Excel 2010 صورت گرفت.

از لگاریتم معادله بالا، رابطه خطی حاصل شده که شیب آن با  $K_1$  نشان داده شده است:

$$\ln MR = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (۶)$$

$$K_1 = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \quad (۷)$$

بنابراین،  $D_{eff}$  از طریق رسم نمودار  $\ln(MR)$  به صورت تابعی از  $t$  تعیین گردیده و مقدار این ضریب از روی شیب خط به دست می آید. برای محاسبه شعاع دانه انگور نیز طول سه بعد از این دانه ها توسط

جدول (۲): مدل‌های رگرسیونی برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن

شماره	نام مدل	مدل ریاضی	مرجع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	وسترمن و همکاران ۱۹۷۳
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ ۱۹۴۹
۳	هندرسون و پاپیس	$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پاپیس ۱۹۶۹
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + b$	یالدیز و همکاران ۲۰۰۱
۵	میدیلی	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی و همکاران ۲۰۰۲
۶	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at^2 + bt$	ونگ و سینگ ۱۹۷۸
۷	سیدلو و آغاباشلو	$MR = \exp\left(-\frac{k_1 t}{1 - k_2 t}\right)$	رسولی و همکاران ۲۰۱۱
۸	مدل پیشنهادی	$MR = (1 + at) \exp(-bt)$	پژوهش حاضر
۹	مدل پیشنهادی	$MR = a + \exp(-bt)$	پژوهش حاضر
۱۰	مدل پیشنهادی	$MR = \exp(-(a + b)t^b)$	پژوهش حاضر

## ۷-۲- آنالیز آماری

به منظور بررسی اثر اولتراسوند و کربوکسی‌متیل سلولز روی زمان خشک‌شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت، آنالیز داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور A (زمان اولتراسوند) و B (غلظت CMC) و مقایسه میانگین‌ها نیز به روش بونفرونی (Bonferoni) در سطح احتمال ۵٪ ( $P < 0.05$ ) انجام شد (استیل و همکاران، ۱۹۹۷).

## ۳- نتایج و بحث

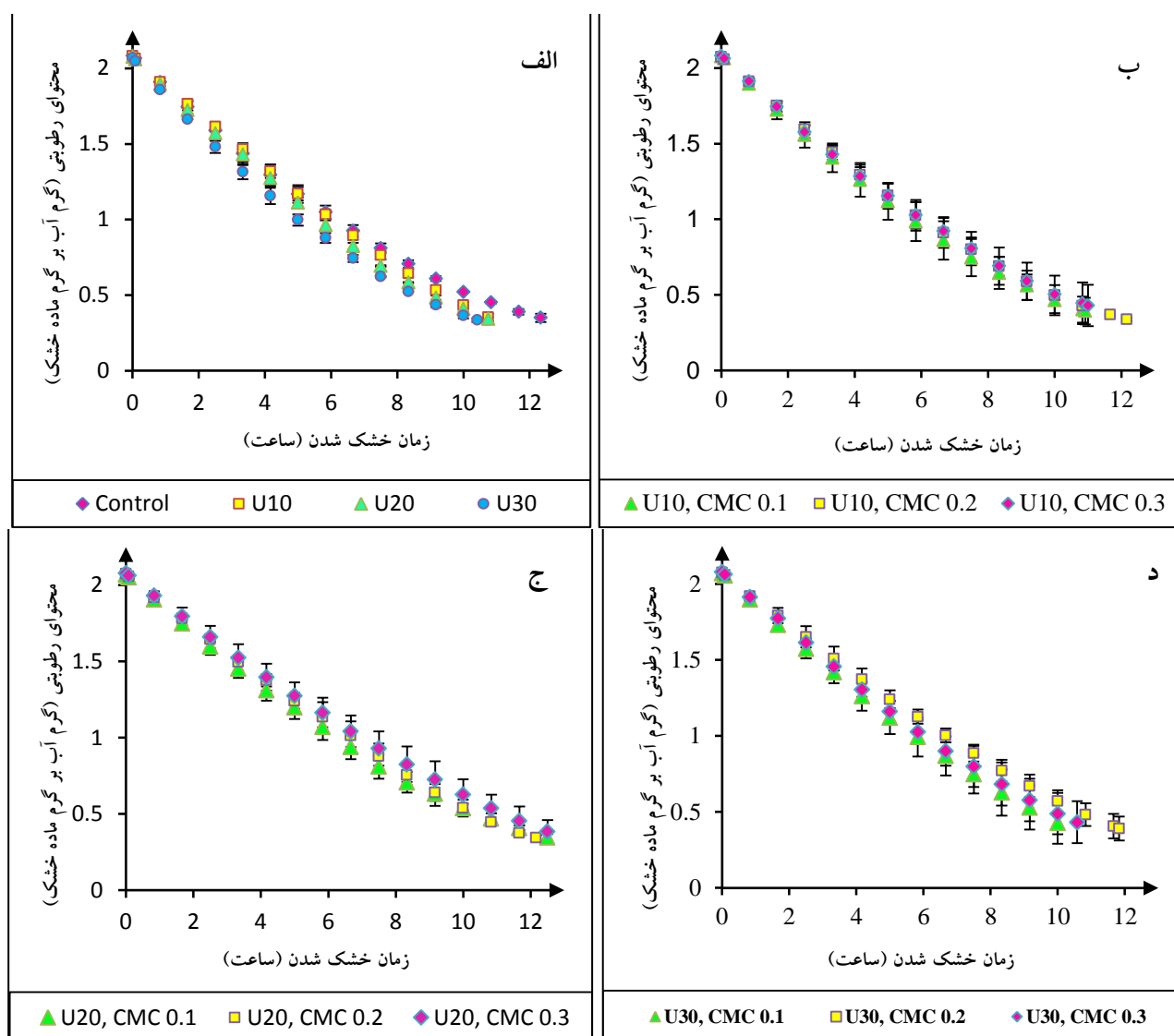
### ۳-۱- منحنی‌های خشک‌شدن

شکل ۲ منحنی‌های سینتیک افت رطوبت نمونه‌ها را بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک طی خشک‌شدن و در زمان‌ها و غلظت‌های مختلف اولتراسوند و CMC بر اساس جدول ۱ نشان می‌دهد.

به‌کارگیری پیش‌تیمار اولتراسوند، زمان خشک‌شدن را در مقایسه با تیمار کنترل کاهش داد (شکل ۲- الف). علت این پدیده را می‌توان به تشکیل کانال‌های میکروسکوپی درون ماده غذایی و سهولت خروج رطوبت از طریق این کانال‌ها نسبت داد. این یافته در تطابق با یافته‌های فرناندز و همکاران (۲۰۰۸a) و رودریگز و همکاران (۲۰۰۹) است. از طرف دیگر، افزایش زمان اولتراسوند از ۱۰ به ۳۰ دقیقه نیز کاهش بیشتر زمان خشک‌شدن نمونه‌ها را در پی داشت. احتمالاً با افزایش زمان در معرض قرارگیری نمونه‌ها با امواج صوتی، تغییر شکل سلول‌ها بیشتر شده و کانال‌های میکروسکوپی طولی‌تر می‌شوند. علاوه بر کانال

های طولی‌شده، کانال‌های میکروسکوپی کوچکی هم تشکیل می‌شوند و در نهایت، انتقال راحت‌تر رطوبت از داخل ماده غذایی به سطح آن طی خشک‌شدن صورت می‌گیرد (رودریگز و همکاران، ۲۰۰۹ و فرناندز و همکاران، ۲۰۰۸a). در شکل ۲ (ب، ج و د) نیز، تأثیر استفاده هم-زمان از پوشش خوراکی و اولتراسوند با توجه به جدول ۱ آمده است. استفاده از پیش‌تیمار CMC، زمان خشک‌شدن را در مقایسه با تیمار کنترل افزایش داد. بیوپلیمرهای هیدروفیلیک از جمله CMC با اتصال به مولکول‌های آب، باعث کاهش خروج رطوبت در نمونه‌های پوشش-داده شده می‌شوند (ملما، ۲۰۰۳). علاوه بر این، آناپور و همکاران (۱۹۹۹)، علت کاهش خروج رطوبت را در استفاده از کربوکسی‌متیل-سلولز و هیدروکسی‌پروپیل‌متیل سلولز به تشکیل فیلم روی ماده غذایی نسبت دادند.

جدول ۳، مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اولتراسوند و CMC را بر زمان خشک‌شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت در بین تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. افزودن CMC و افزایش غلظت آن از ۰/۱ به ۰/۲ درصد، زمان خشک‌شدن را افزایش و به تناسب آن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت را کاهش داد؛ ولی این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. این در حالی است که با ثابت در نظر گرفتن زمان اولتراسوند و افزایش غلظت CMC از ۰/۲ به ۰/۳ درصد، به دلیل افزایش نفوذپذیری به رطوبت، زمان خشک‌شدن کاهش و ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت (امام جمعه و همکاران، ۲۰۰۶؛ خین و همکاران، ۲۰۰۷ و جلائی و همکاران، ۲۰۱۱)؛ ولی این تغییرات نیز از لحاظ آماری معنی‌دار نبودند. در جدول ۳، علاوه بر اثر CMC بر زمان خشک



شکل (۲): (الف، ب، ج و د): محتوای رطوبت طی خشک‌شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

استنباط می‌شود که انتشار، عامل کنترلی انتقال جرم داخلی است (بابالیس و بلسیوتیس، ۲۰۰۴ و سیدلو و همکاران، ۲۰۱۰). شکل ۳ (الف)، تأثیر پیش تیمار اولتراسوند را در سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه بر سرعت خشک‌شدن نشان می‌دهد. با توجه به شیب نمودار تیمارهای موجود در این شکل، ملاحظه می‌شود که سرعت خشک‌شدن با به-کارگیری اولتراسوند و افزایش زمان آن افزایش یافته است. در بررسی اثر تلفیقی CMC با غلظت‌های مختلف و زمان‌های مختلف اولتراسوند بر آهنگ خشک‌شدن، همان‌طور که در شکل ۳ (ب، ج و د) نیز دیده می‌شود، با ثابت در نظر گرفتن زمان اولتراسوند، پیش تیمار CMC و افزایش غلظت آن باعث کاهش سرعت خشک‌شدن و در نتیجه کاهش شیب نمودار تیمارهای موجود شده است. اما همان‌گونه که در جدول ۳ نیز مشاهده شد، افزایش غلظت CMC از ۰/۲ به ۰/۳ درصد به دلیل افزایش میزان نفوذپذیری به رطوبت، توانسته است شیب نمودار تیمار-

شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می‌توان تأثیر اولتراسوند و افزایش زمان آن را نیز بر دو متغیر مذکور مشاهده کرد. بدین ترتیب که افزایش زمان اولتراسوند به دلیل افزایش سهولت خروج رطوبت، زمان خشک-شدن را کاهش داد. کاهش زمان خشک‌شدن در اثر به‌کارگیری اولتراسوند، به دلیل افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت در مقایسه با تیمار کنترل است؛ اما اثر متقابل دو پیش تیمار اولتراسوند و CMC بر زمان خشک‌شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت در بین تیمارهای مختلف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت تیمارهای مختلف در محدوده ضریب انتشار مؤثر رطوبت مواد غذایی ( $10^{-10}$  -  $10^{-9}$  متر مربع بر ثانیه) به‌دست آمد (دویماز و پالا، ۲۰۰۲) و از  $5/86 \times 10^{-10}$  تا  $7/53 \times 10^{-10}$  متر مربع بر ثانیه متغیر بود.

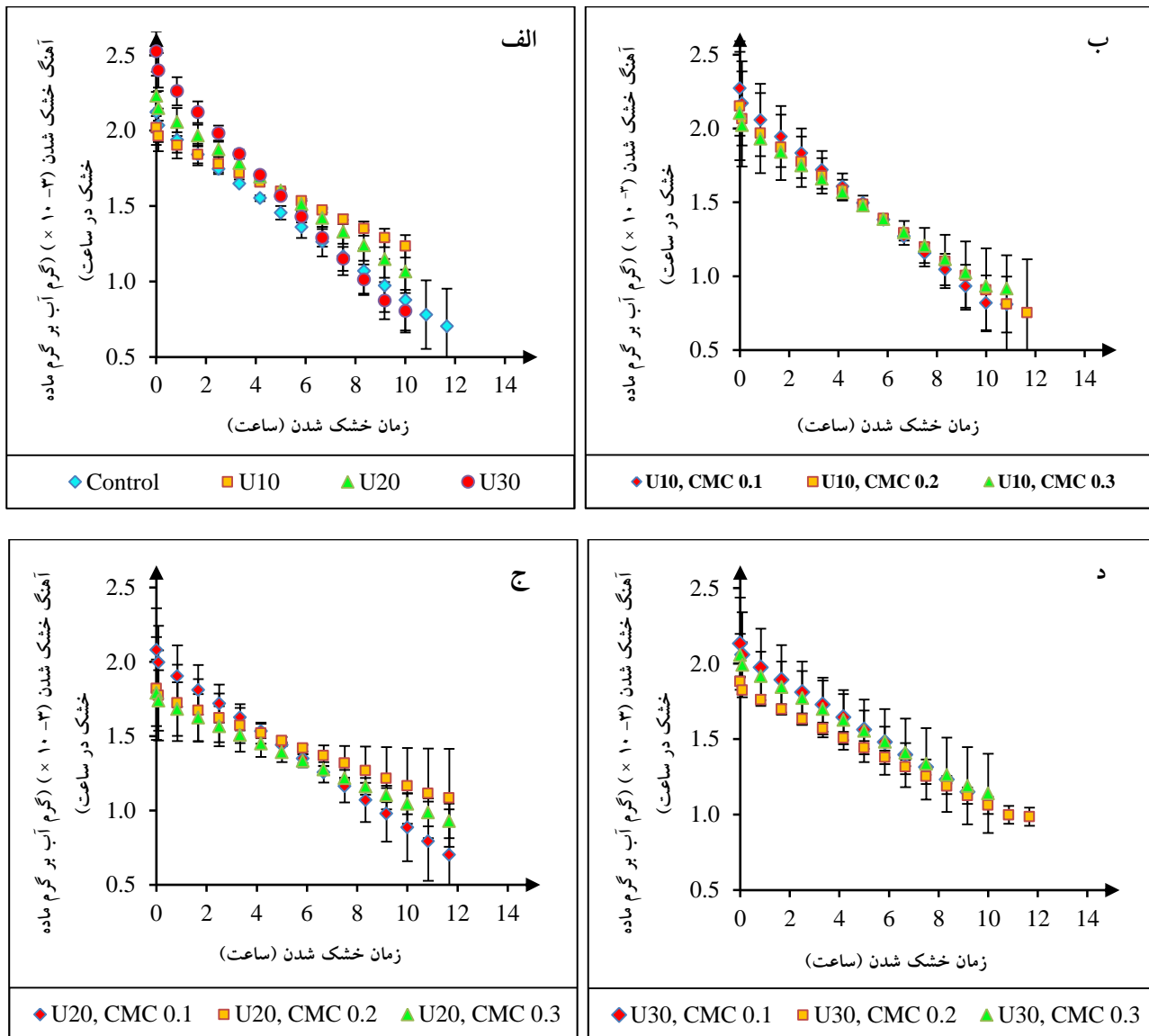
شکل ۳ آهنگ خشک‌شدن تیمارهای مختلف را طی خشک‌شدن نشان می‌دهد. با توجه به این که مرحله سرعت ثابت در حین خشک-شدن انگور دیده نشد و خشک‌شدن در دوره سرعت نزولی اتفاق افتاد،

نمونه‌های انگور به تدریج و به صورت نمایی کاهش یافت. تأثیر به-کارگیری اولتراسوند و CMC بر نسبت رطوبت تیمارهای مختلف طی خشک‌شدن (شکل ۴)، مشابه شکل ۲ (محتوای رطوبت طی خشک-شدن) می‌باشد.

های موجود را تغییر دهد و در نهایت باعث افزایش سرعت خروج رطوبت (کاهش زمان خشک‌کردن) طی فرآیند شود.

### ۳-۲- مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن

شکل ۴ (الف-د)، تغییرات محتوای رطوبت بدون بعد انگور یا نسبت رطوبت آن‌ها را طی خشک‌شدن نشان می‌دهد. محتوای رطوبت



شکل (۳): (الف، ب، ج و د): آهنک خشک‌شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱ طی خشک‌شدن

غلظت CMC از طریق آنالیز رگرسیونی چندمتغیره وجود داشت. به عبارت دیگر، هیچ‌کدام از ضرایب مدل‌های دیگر به جز مدل ۹ به شکل تابع هم‌زمان متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش (زمان اولتراسوند و غلظت کربوکسی‌متیل سلولز) نبودند. بدین ترتیب، این مدل به‌عنوان مدل پیشنهادی برای توصیف فرآیند در نظر گرفته شد. در شکل ۴، برآزش نسبت رطوبت تیمارهای مختلف با مدل پیشنهادی (مدل ۹) طی خشک‌شدن مشاهده می‌شود. میانگین میزان ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و مجموع مربعات

جدول ۴ (الف و ب)، پارامترهای آماری مدل‌های مختلف برای نمونه کنترل و سایر تیمارها را نشان می‌دهد. مدل‌های جدید پیشنهادی به‌همراه سایر مدل‌های جدول ۲، پارامترهای آماری قابل قبولی را به خود اختصاص داده‌اند و این مطلب نشان می‌دهد که تمامی مدل‌های فوق می‌توانند داده‌های آزمایشی را برازش کنند؛ ولی از بین مدل‌های مختلف جدول ۲، تنها، وابستگی ضرایب مدل ۹ به دو پیش‌تیمار مورد مطالعه در این پژوهش معنی‌دار بود. بنابراین، امکان به‌دست‌آوردن ضرایب آن به صورت توابعی از زمان اولتراسوند و



خطای مدل مذکور در بین تیمارهای مختلف به ترتیب ۰/۹۸۶، ۰/۱۶ و ۰/۳۳ بود. در جدول ۵، مقادیر ضرایب a و b مدل پیشنهادی برای زمان ها و غلظت های مختلف اولتراسوند و CMC آمده است. معادلات ۹ و ۱۰ به ترتیب ضرایب a و b را برای مدل ۹ نشان می دهند که از آنالیزهای رگرسیونی چندمتغیره به دست آمده- اند. در معادلات فوق، a و b، ضرایب مدل توسعه یافته پیشنهادی ۹، ULT زمان اولتراسوند بر حسب دقیقه و CMC غلظت کربوکسی- متیل سلولز بر حسب درصد است.

جدول (۳): مقایسه میانگین های اثر متقابل اولتراسوند و CMC بر زمان خشک شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت تیمارها بر اساس جدول ۱

تیمار	زمان خشک شدن (ساعت)	ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $10^{-10} \times$ متر مربع بر ثانیه)
Control	۱۲/۷۹ <sup>a</sup> ±۰/۶۵	۶/۲۷ <sup>a</sup> ±۰/۱۹
U10	۱۰/۹۵ <sup>a</sup> ±۰/۲۹	۶/۹۵ <sup>a</sup> ±۰/۰۹
U20	۱۰/۸۳ <sup>a</sup> ±۰/۱۱	۷/۲۱ <sup>a</sup> ±۰/۰۷
U30	۱۰/۴۱ <sup>a</sup> ±۰/۰۵	۷/۵۳ <sup>a</sup> ±۰/۰۶
U10, CMC 0.1%	۱۱/۷۵ <sup>a</sup> ±۱/۱۷	۶/۷۰ <sup>a</sup> ±۰/۶۵
U10, CMC 0.2%	۱۲/۲۵ <sup>a</sup> ±۰/۱۱	۶/۴۹ <sup>a</sup> ±۰/۱۳
U10, CMC 0.3%	۱۲/۱۶ <sup>a</sup> ±۱/۶۴	۶/۴۴ <sup>a</sup> ±۰/۸۵
U20, CMC 0.1%	۱۲/۸۷ <sup>a</sup> ±۰/۵۳	۶/۱۴ <sup>a</sup> ±۰/۱۵
U20, CMC 0.2%	۱۲/۳۷ <sup>a</sup> ±۰/۲۹	۶/۳۳ <sup>a</sup> ±۰/۱۳
U20, CMC 0.3%	۱۳/۲۰ <sup>a</sup> ±۱/۰۱	۵/۸۶ <sup>a</sup> ±۰/۴۳
U30, CMC 0.1%	۱۰/۹۵ <sup>a</sup> ±۱/۳۵	۶/۹۶ <sup>a</sup> ±۰/۸۹
U30, CMC 0.2%	۱۲/۷۰ <sup>a</sup> ±۱/۲۳	۶/۱۰ <sup>a</sup> ±۰/۳۳
U30, CMC 0.3%	۱۱/۸۷ <sup>a</sup> ±۱/۸۲	۶/۶۳ <sup>a</sup> ±۰/۹۹

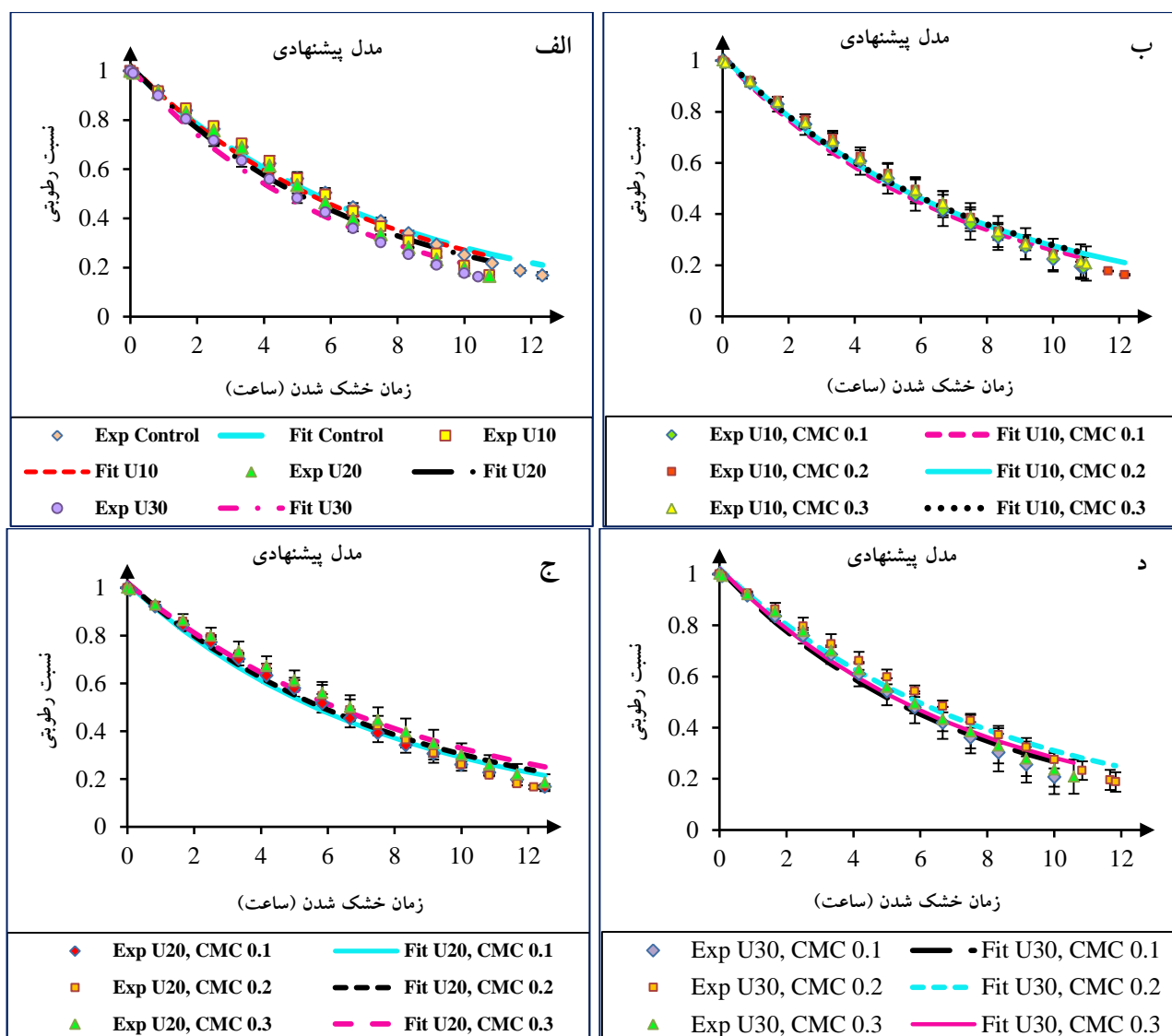
حروف یکسان در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می باشد.

### ۳-۲-۱- آزمون اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

به منظور اعتبارسنجی مدل توسعه یافته پیشنهادی (مدل ۹ به- همراه ضرایب a و b حاصل از آنالیز رگرسیونی چندمتغیره)، آزمایش دیگری در زمان اولتراسوند ۱۵ دقیقه و غلظت ۰/۱۵ درصد CMC انجام شد. شکل ۵، برازش نسبت رطوبت داده های آزمایشی این تیمار را با نسبت رطوبت حاصل از مدل ۹ نشان می دهد. همان گونه که از این شکل بر می آید، انطباق خوبی ( $R^2=0/9992$ ) بین نسبت رطوبت این مدل و تیمار آزمایشی وجود داشت.

### ۳-۳- ضریب انتشار مؤثر رطوبت

معادله ۱۱، نوعی معادله آرنیوسی شکل است که از آنالیز رگرسیونی غیرخطی منتج شده است و وابستگی ضریب انتشار مؤثر رطوبت با غلظت CMC را نشان می دهد. بر اساس جدول ۳، با توجه به این که تیمارهای دارای اولتراسوند با زمان های مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه، تأثیر معنی داری روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت نداشتند، در آنالیز رگرسیونی غیرخطی،  $D_{eff}$  به شکل تابعی از اولتراسوند نبود.



شکل (۴): (الف، ب، ج و د): نسبت رطوبت طی خشک شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱ و برازش آن‌ها با مدل پیشنهادی (مدل ۹). در این شکل، Exp، داده‌های حاصل از آزمایش و Fit داده‌های حاصل از برازش داده‌ها با مدل شماره ۹ را نشان می‌دهد.

جدول (۴-الف): پارامترهای آماری مدل‌های مختلف بر اساس جدول ۲ برای نمونه شاهد

مدل	غلظت CMC %			اولتراسوند
	RSME	SSE	R <sup>2</sup>	
۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۲	۰/۹۹	۰
۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰
۳	۰/۰۲۵	۰/۰۰۹	۰/۹۹	۰
۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹	۰
۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۰
۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰
۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰
۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹	۰
۹	۰/۰۲۷	۰/۰۱۱	۰/۹۹	۰
۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰

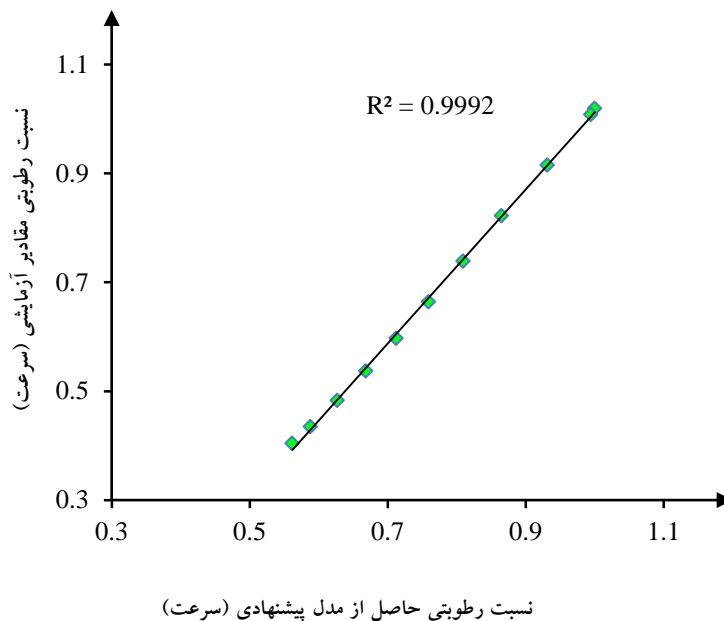
جدول (۴-ب): پارامترهای آماری مدل‌ها بر اساس جدول ۲ برای تیمارهای مختلف

درصد غلظت CMC												اولتراسوند	مدل
۰/۳			۰/۲			۰/۱			صفر				
RSME	SSE	R <sup>2</sup>	RSME	SSE	R <sup>2</sup>	RSME	SSE	R <sup>2</sup>	RSME	SSE	R <sup>2</sup>		
۰/۰۲۶	۰/۰۱۰	۰/۹۹	۰/۰۳۲	۰/۰۱۷	۰/۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۱۱	۰/۹۹	۰/۰۴۳	۰/۰۲۶	۰/۹۷	۱۰	۱
۰/۰۳۵	۰/۰۲۰	۰/۹۸	۰/۰۴۴	۰/۰۳۱	۰/۹۷	۰/۰۳۰	۰/۰۱۴	۰/۹۸	۰/۰۴۰	۰/۰۲۲	۰/۹۸	۲۰	
۰/۰۳۳	۰/۰۱۵	۰/۹۸	۰/۰۳۹	۰/۰۲۴	۰/۹۸	۰/۰۳۲	۰/۰۱۳	۰/۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۱۰	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۱۵	۰/۰۰۳	۰/۹۹	۱۰	۲
۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۱۷	۰/۰۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۲۰	
۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۲۴	۰/۰۰۸	۰/۹۹	۰/۰۲۹	۰/۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸	۰/۹۹	۰/۰۴۰	۰/۰۲۱	۰/۹۸	۱۰	۳
۰/۰۳۲	۰/۰۱۵	۰/۹۸	۰/۰۴۱	۰/۰۲۵	۰/۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۱۱	۰/۹۹	۰/۰۳۷	۰/۰۱۷	۰/۹۸	۲۰	
۰/۰۳۰	۰/۰۱۱	۰/۹۸	۰/۰۳۵	۰/۰۱۹	۰/۹۸	۰/۰۲۹	۰/۰۱۰	۰/۹۸	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۱۰	۴
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۲۰	
۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۱۰	۵
۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹	۲۰	
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۱۰	۶
۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۲۰	
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۹	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹	۱۰	۷
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۵	۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹	۲۰	
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۶	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۱۰	۸
۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۱۶	۰/۰۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۲۰	
۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۲۶	۰/۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	۰/۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۱۰	۰/۹۹	۰/۰۴۳	۰/۰۲۵	۰/۹۷	۱۰	۹
۰/۰۳۵	۰/۰۱۸	۰/۹۸	۰/۰۴۴	۰/۰۳۰	۰/۹۷	۰/۰۳۰	۰/۰۱۳	۰/۹۸	۰/۰۴۰	۰/۰۲۱	۰/۹۸	۲۰	
۰/۰۳۲	۰/۰۱۴	۰/۹۸	۰/۰۳۸	۰/۰۲۲	۰/۹۸	۰/۰۳۱	۰/۰۱۲	۰/۹۸	۰/۰۳۷	۰/۰۱۰	۰/۹۹	۳۰	
۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۱۵	۰/۰۰۳	۰/۹۹	۱۰	۱۰
۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۱۷	۰/۰۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۲۰	
۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۳۰	

جدول (۵): مقادیر ضریب a و b مدل پیشنهادی حاصل از آنالیز رگرسیونی تیمارهای مختلف

b	a	درصد غلظت CMC	زمان اولتراسوند (دقیقه)
۰/۱۳۸۹	-*	-	۱۰
۰/۱۴۱۱	۰/۰۱۶۵۲	۰/۱	۱۰
۰/۱۳۵۹	۰/۰۱۸۶۳	۰/۲	۱۰
۰/۱۳۴	۰/۰۱۶۷	۰/۳	۱۰
۰/۱۴۷۱	-	-	۲۰
۰/۱۳	۰/۰۱۷۵۹	۰/۱	۲۰
۰/۱۲۶۷	۰/۰۲۱۹۱	۰/۲	۲۰
۰/۱۱۸	۰/۰۲۱۶۹	۰/۳	۲۰
۰/۱۵۹۳	-	-	۳۰
۰/۱۳۹۶	۰/۰۱۹۷۲	۰/۱	۳۰
۰/۱۲۴۷	۰/۰۲۲۷۷	۰/۲	۳۰
۰/۱۳۵۱	۰/۰۲۳۱۹	۰/۳	۳۰

\*عدم معنی دار بودن اثر % CMC بر ضریب a



شکل (۵): برازش نسبت رطوبت داده‌های آزمایشی با نسبت رطوبت حاصل از مدل پیشنهادی ۹

$$a = 0.000132 \times (ULT \times CMC)^2 - 0.125107 \times (CMC)^2 + 0.002938 \times (ULT \times CMC) - 0.0001103 \times ULT + 0.028873 \times CMC + 0.013253 \quad R^2 = 0.97 \quad (9)$$

$$b = \exp(0.008117 \times (ULT \times CMC)^2 + 0.000331 \times (ULT)^2 - 1.831785 \times (CMC)^2 - 0.120503 \times (ULT \times CMC) - 0.005926 \times ULT + 1.343345 \times CMC - 1.943399) \quad R^2 = 0.96 \quad (10)$$

سوی دیگر، افزایش یا کاهش زمان خشک شدن با غلظت‌های مختلف CMC نیز در بین تمام تیمارها دیده شد؛ اما با این وجود، اثر آن بر زمان خشک شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. مدل‌سازی داده‌های حاصل از آزمایش با مدل‌های مختلف، نشان داد که مدل توسعه‌یافته پیشنهادی (مدل ۹) تطابق بیشتری (R<sup>2</sup>=۰/۹۹) را با این داده‌ها دارد و به‌عنوان بهترین مدل توصیف‌کننده فرآیند خشک شدن انگور تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد.

$$D_{eff} = 6.129609 \exp\left(-\frac{0.00728}{CMC}\right) \quad (11)$$

در معادله فوق، CMC، غلظت کربوکسی‌متیل سلولز بر حسب درصد و D<sub>eff</sub>، ضریب انتشار مؤثر رطوبت بر حسب متر مربع بر ثانیه است.

#### ۴- نتیجه‌گیری کلی

منحنی‌های سینتیک کاهش محتوای رطوبت در طی زمان خشک-شدن انگور، نشان از خشک شدن آن در مرحله سرعت نزولی داشت. اولتراسوند زمان خشک شدن را در مقایسه با تیمار کنترل کاهش داد. از

#### منابع مورد استفاده

- Akpinar, E.K. 2006. **Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits**, Journal of Food Engineering, Vol. 73, pp. 75-84.
- Annapure, U.S., R.S. Singhal and P.R. Kulkarni. 1999. **Screening of hydrocolloids for reduction in oil uptake of a model deep fat fried product**. Lipid / Fett, Vol. 101, pp. 217-221.

- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis (15th ed.). **Association of Official Analytical Chemists**, Washington, DC.
- Azoubel, P.M., Md.A.M. Baima, Md.R. Amorim and S.S.B. Oliveira. 2010. **Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics**, Journal of Food Engineering, Vol. 97, pp. 194-198.
- Babalís, S.J and V.G. Belessiotis. 2004. **Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs**, Journal of Food Engineering, Vol. 65, pp. 449-458.
- Batista, L.M., C.A.da Rosa and L.A.A. Pinto. 2007. **Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan**, Journal of Food Engineering, Vol. 81, pp. 127-132.
- Bhaskaracharya, R., S. Kentish and M. Ashokkumar. 2009. **Selected Applications of Ultrasonics in Food Processing**, Food Engineering Reviews, Vol. 1, pp. 31-49.
- Cletus, A.B and J.K. Carson. 2008. **Drying curves and apparent diffusivity of New Zealand chestnut variety '1015'**, Journal of Food Engineering, Vol. 85, pp. 381-386.
- Caglar, A., I. Togrul and H. Togrul. 2009. **Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying**, Food and bioproducts processing : transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C, Vol. 87, pp. 292-300.
- Cárcel, J.A., J. Benedito, C. Rosselló and A. Mulet. 2007. **Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution**, Journal of Food Engineering, Vol. 78, pp. 472-479.
- Dehghannya, J., Z. Emam-Djomeh, R. Sotudeh-Gharebagh and M. Ngadi. 2006. **Osmotic Dehydration of Apple Slices with Carboxy-Methyl Cellulose Coating**, Drying Technology, Vol. 24, pp. 45-50.
- Dissa, A.O., H. Desmorieux, J. Bathiebo and J. Kouliadiati. 2008. **Convective drying characteristics of Amelie mango (Mangifera Indica L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage**, Journal of Food Engineering, Vol. 88, pp. 429-437.
- Doymaz, İ and M. Pala 2002. **The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes**, Journal of Food Engineering, Vol. 52, pp. 413-417.
- Doymaz. İ. 2006. **Drying kinetics of black grapes treated with different solutions**, Journal of Food Engineering, Vol. 76, pp. 212-217,
- Emam-Djomeh, Z., J. Dehghannya and R. Sotudeh Gharabagh. 2006. **Assessment of Osmotic Process in Combination with Coating on Effective Diffusivities during Drying of Apple Slices**, Drying Technology, Vol. 24, pp. 1159-1164.
- Fernandes, F.A.N and S. Rodrigues. 2007. **Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana**, Journal of Food Engineering, Vol. 82, pp. 261-267.
- Fernandes, F.A.N., M. I. Gallão and S. Rodrigues. 2008a. **Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration**, LWT - Food Science and Technology, Vol. 41, pp. 604-610.
- Fernandes, F.A.N., Jr.F.E. Linhares and S. Rodrigues. 2008b. **Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple**, Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 15, pp. 1049-1054.
- M. García, R. Díaz, Y. Martínez and A. Casariego. 2010. **Effects of chitosan coating on mass transfer during osmotic dehydration of papaya**, Food Research International, Vol. 43, pp. 1656-1660.
- García-Pérez, J.V., J.A. Cárcel, J. Benedito and A. Mulet. 2007. **Power Ultrasound Mass Transfer Enhancement in Food Drying**. Food and Bioproducts Processing, Vol. 85, pp. 247-254.
- García-Pérez, J.V., J.A. Cárcel, S.D.L. Fuente-Blanco, and E.R.F.D. Sarabia, 2006. **Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study** Ultrasonics 44, Supplement(0): e539-e543.
- Ghanbarzadeh, B., H. Almasi and A.A. Entezami. 2010. **Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films**, Innovative Food Science & Emerging Technologies, Vol. 11, pp. 697-702.

- Guiné, R.P.F and R.M.C. Fernandes. 2006. **Analysis of the drying kinetics of chestnuts**, Journal of Food Engineering, Vol. 76, pp. 460-467.
- Hassini, L., S. Azzouz, R. Peczalski and A. Belghith. 2007. **Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage**, Journal of Food Engineering, Vol. 79, pp. 47-56.
- Jalaei, F., A. Fazeli, H. Fatemian and H. Tavakolipour. 2011. **Mass transfer coefficient and the characteristics of coated apples in osmotic dehydrating**, Food and Bioproducts Processing, Vol. 89, pp. 367-374.
- Khin, M.M., W. Zhou and S.Y. Yeo. 2007. **Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes by using maltodextrin as the coating material and their textural properties**, Journal of Food Engineering, Vol. 81, pp. 514-522.
- Mellema, M. 2003. **Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods**, Trends in Food Science & Technology, Vol. 14, pp. 364-373.
- Núñez-Mancilla, Y., M. Perez-Won, A. Vega-Gálvez, V. Arias, G. Tabilo-Munizaga, V. Briones-V. Labarca, R. Lemus-Mondaca and K.D. Scala. 2011. **Modeling mass transfer during osmotic dehydration of strawberries under high hydrostatic pressure conditions**, Innovative Food Science & Emerging Technologies, Vol. 12, pp. 338-343.
- Pahlavanzade H., A. Basiri and M. Zarrabi. 2002. **Grape drying**, ScientiaIranica, Vol. 9, pp. 66-70.
- Pangavhane, D.R., R.L. Sawhney and P. N. Sarsavadia. 1999. **Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes**, Journal of Food Engineering, Vol. 39, pp. 211-216.
- Roberts, J.S., D.R. Kidd and O. Padilla-Zakour. 2008. **Drying kinetics of grape seeds**, Journal of Food Engineering, Vol. 89, pp. 460-465.
- Rodrigues, S., M.C.F. Gomes, M.I. Gallão and F.A.N. Fernandes. 2009a. **Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on cell structure of sapotas**, Journal of the Science of Food and Agriculture, Vol. 89, pp. 665-670.
- Rodrigues, S., F.I.P. Oliveira, M.I. Gallão, and F.A.N. Fernandes. 2009b. **Effect of Immersion Time in Osmosis and Ultrasound on Papaya Cell Structure during Dehydration**, Drying Technology, Vol. 27, pp.220-225,
- Seiedlou, S., H.R. Ghasemzadeh, N. Hamdami, F. Talati and M. Moghaddam. 2010. **Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters**, International Journal of Agriculture and Biology, Vol. 12, pp. 171-178.
- Steel, R.G.D., J.H. Torrie and D.A. Dickey. 1997. **Principles and procedures of statistics: a biometrical approach**, New York: McGraw-Hill.
- Sun, W.D. 2005. **Emerging technology for food processing**, Chapter 13, 338-339.
- Vásconez, M.B., S.K. Flores, C.A. Campos, J. Alvarado and L.N. Gerschenson. 2009. **Antimicrobial activity and physical properties of chitosan-tapioca starch based edible films and coatings**, Food Research International, Vol. 42, pp. 762-769.
- Xiao, H.W., C.L. Pang, L.H. Wang, J.W. Bai, W.X. Yang and Z.J. Gao. 2010. **Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer**, Biosystems Engineering, Vol. 105, pp. 233-240.
- Yan, Z., M.J. Sousa-Gallagher and F.A.R. Oliveira. 2008. **Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying**, Journal of Food Engineering, Vol. 84, pp. 430-440.
- Yildirim, A., M.D. Öner and M. Bayram. 2011. **Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment**, Journal of Food Engineering, Vol. 104, pp. 134-142.

# Modeling of Thin-Layer Drying Kinetics of Pretreated Grapes with Ultrasound and Carboxymethyl Cellulose

M. Tahmasebi-Pour<sup>1</sup>, J. Dehghannya<sup>1\*</sup>, S.S. Seiedlou-Heris<sup>2</sup> and B. Ghanbarzadeh<sup>1</sup>

Received: 4 Apr 2013

Accepted: 22 Feb 2015

<sup>1</sup>Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

<sup>2</sup>Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz

\*Corresponding author: E-mail: J\_dehghannya@tabrizu.ac.ir

## Abstract

Thin-layer drying of grapes pretreated with ultrasound and carboxymethyl cellulose (CMC) was investigated in a tunnel dryer at 65°C and 1.5 m/s air velocity. The results showed that with increasing ultrasound treatment time from 10 to 30 minutes, drying time is reduced and the effective moisture diffusivity is increased. Also, with increasing carboxymethyl cellulose concentration from 0.1 to 0.2 percent, drying time increased and from 0.2 to 0.3 percent, drying time decreased. Furthermore, in order to preciously predict the drying process, data from experiments were fitted by the models such as Newton, Page, Henderson and Pabis, logarithmic, Midili, Wang and Singh, Seiedlou and Aghbashlou and as well some new proposed models in this study. Multiple regression analysis was used to find the relations between the coefficients of the models with the defined variables. Thereafter, one of the proposed models was selected as the best model to describe the drying process of grapes under the selected experimental conditions.

**Keywords:** Carboxymethyl Cellulose, Drying, Effective Water Diffusivity, Modeling, Ultrasound.