

مدلسازی و شبیه سازی سینتیک خشک کردن گیاه دارویی آویشن شیرازی (Zataria multiflora) در دماهای گوناگون در یک خشک کن پمپ حرارتی

محمدعلی شهبازی^{۱*}، هجیر کریمی^۲، محمودرضا رحیمی^۳

۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج

۲استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج

۳دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج

آدرس ایمیل نویسنده مسئول: mohamadali.shahbazi64@gmail.com

چکیده

پمپ‌های حرارتی دستگاه‌هایی برای بالا بردن درجه حرارت از انرژی حرارتی درجه پایین به یک سطح مفیدتر با استفاده از مقدار نسبتاً کمی از انرژی درجه بالا می‌باشند. در پژوهش حاضر پس از معرفی کامل سیستم پمپ حرارتی، این سیستم به صورت کامل توسط معادلات ریاضی مدلسازی گشته و معادلات حاکم و شرایط مرزی برای محفظه خشک‌کن نیز به دست آمده است. برای شبیه‌سازی سیستم پمپ حرارتی نرم‌افزار Aspen plus و برای شبیه‌سازی محفظه خشک‌کن نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انتخاب گشته و مورد استفاده قرار گرفتند. برای اعتبارسنجی نتایج خشک‌کن از نتایج خشک‌کردن گیاه نعناع به خاطر خواص فیزیکی و ساختار مشابه با آویشن استفاده شد. خشک کردن گیاه آویشن شیرازی با استفاده از مدل به دست آمده در دماهای مختلف بررسی شده و در نهایت مدل‌های نیمه تئوری برای نسبت رطوبت در خشک کردن گیاه دارویی آویشن بر روی نتایج برازش شدند. به طور کلی نتایج عبارتند از: مقدار میانگین ضریب عملکرد سیستم برابر با ۵/۱۲۵ به دست آمده که با توجه به نمودارهای ارائه شده سیستم پمپ حرارتی از نوع تک مرحله‌ای با موتور احتراق می‌باشد که نسبت به سایر سیستم‌ها هزینه پایین‌تری داراست. خشک کردن گیاه آویشن شیرازی در دماهای بالاتر با سرعت بالاتری انجام می‌پذیرد؛ به طوری که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تنها پس از ۲۵ دقیقه غلظت در توده به مقدار ثابتی می‌رسد. مدل لگاریتمی برای بررسی خشک کردن گیاه آویشن شیرازی مناسب می‌باشد. همچنین مدل‌های Page و Newton نیز به طور کلی نتایج قابل قبولی در ارائه سینتیک خشک کردن گیاه آویشن شیرازی دارند.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، گیاهان دارویی، آویشن شیرازی، پمپ حرارتی، مدلسازی، شبیه‌سازی

۱- مقدمه

گیاهان دارویی گیاهانی هستند که یک یا برخی از اندام‌های آنها حاوی ماده مؤثره است. این ماده که کمتر از ۱٪ وزن خشک گیاه را تشکیل می‌دهد، دارای خواص دارویی مؤثر بر موجودات زنده است. کاشت، داشت و برداشت این گیاهان به منظور استفاده از ماده مؤثره آنها انجام می‌گیرد [۱]. در ایران حدود ۸۰۰۰ گونه گیاهی موجود است که از این تعداد ۲۳۰۰ گونه جزء گیاهان معطر و دارویی هستند [۲]. معمولاً گیاه جمع آوری شده باید هر چه سریعتر در معرض خشک شدن قرار گیرد تا از آسیب دیدگی در هنگام پژمردگی جلوگیری شود. در اکثر موارد از روش خشک کردن گیاه زیر نور مستقیم خورشید استفاده نمی‌شود، زیرا نور خورشید باعث از بین رفتن مواد اولیه گردیده و گیاه به سرعت زرد و قهوه‌ای می‌شود. گیاهانی که برای اسانس‌گیری جمع‌آوری می‌شوند، با عمل خشک کردن در نور خورشید یک سوم مواد اولیه خود را از دست می‌دهند [۳]. در حال حاضر به دلیل استفاده از روش سنتی در خشک کردن کیفیت محصول خشک شده برای صنایع پایین دستی چندان مطلوب نیست و از طرفی روشهای صنعتی برای مقادیر زیاد پاسخگو نیستند، لذا برای خشک کردن در مقیاس مورد نیاز برای صنعت نیاز به مطالعات خاص در مورد خشک کردن این گیاهان به روش‌های مدرن می‌باشد. به طور کلی خشک کردن ممکن است باعث تغییرات در مواد مؤثره موجود در گیاه شود [۴]. بحران انرژی از یک طرف و نیاز به محصول با کیفیت بهتر از طرف دیگر، پژوهشگران را به ابداع روش‌های نوین برای خشک کردن علاقمند نموده است. تجهیزات جدید خشک کردن باید در انطباق با سیاست‌های زیست محیطی و انرژی طراحی شود. همچنین، با توجه به جهانی شدن و توسعه بازار، کیفیت محصول به دست آمده باید با اولویت مصرف کننده مطابقت داشته باشد [۵]. اکثر تکنولوژی‌های نوین خشک کردن، که از طریق یک فرآیند تکاملی پیشرفت تدریجی تکامل یافته، در جبران تمام یا بعضی از محدودیت‌های مواجه شده در خشک کن‌های معمولی به وجود آمده است [۶]. به تازگی، علاقه زیادی در استفاده از خشک‌کن پمپ گرمایی (HPD^۱) برای خشک کردن میوه‌جات، سبزیجات و مواد بیولوژیکی وجود دارد [۷]. پمپ‌های حرارتی (HP) دستگاه‌هایی برای بالا بردن درجه حرارت از انرژی حرارتی درجه پایین به یک سطح مفیدتر با استفاده از مقدار نسبتاً کمی از انرژی درجه بالا می‌باشند [۸]. استفاده از پمپ‌های حرارتی در خشک‌کن‌های هوای داغ به عنوان یک محدوده کاربردی ایده‌آل در استفاده از پمپ‌های حرارتی شناخته شده است [۹]. بازده انرژی خشک‌کن‌های معمولی به طور کلی بسیار پایین می‌باشد (در بیشترین حالت تقریباً حدود ۳۵٪) [۱۰]. استرامن^۲ و همکاران نشان دادند که خشک‌کن پمپ حرارتی ۶۰ تا ۸۰٪ کمتر از خشک‌کن‌های معمولی، در همان دما، انرژی مصرف می‌کند [۱۱]؛ این باعث می‌شود چنین خشک‌کنی یک گزینه عملی برای اهداف ذکر شده باشد. به طور کلی می‌توان گفت مزایای اصلی استفاده از تکنولوژی پمپ گرما، پتانسیل ذخیره انرژی و توانایی برای کنترل درجه حرارت خشک کردن و رطوبت است، که این قابلیت‌ها طیف گسترده‌ای از شرایط خشک کردن را ایجاد می‌کند [۱۲]. با این وجود ابعاد مختلف این فرآیند با انجام آزمایشات مختلف و به طور کلی‌تر با مدلسازی ریاضی قابل توصیف و تغییر، جهت هرچه بهتر نمودن آن، خواهد بود. جهت توصیف پدیده خشک کردن و به عبارت دیگر ارائه مدلی که مکانیزم فرآیند خشک کردن را تشریح کند، مطالعات زیادی صورت گرفته است [۱۳-۱۵]. مدل‌های ارائه شده فرآیند خشک کردن را در طیف وسیعی از مواد غذایی، محصولات کشاورزی و فرآورده‌های بیولوژیکی پوشش می‌دهند [۱۳]. از طرفی مطالعه مکانیزم حرارتی در طی فرآیند و به عبارتی مطالعه همزمان انتقال جرم و حرارت کمتر انجام یافته است. بر پایه مطالعات انجام شده مدلسازی تفصیلی حرارتی فرآیند خشک کردن با استفاده از پمپ‌های حرارتی به خصوص برای گیاهان انجام نشده است. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، مدلسازی حرارتی خشک کردن گیاهان درون خشک‌کن پمپ حرارتی مورد اهمیت است. در پژوهش حاضر قصد بر این بوده که پس از توسعه یک مدل کلی برای خشک کردن گیاهان دارویی درون خشک‌کن با پمپ حرارتی، نتایج را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود در مراجع معتبر اعتبارسنجی نموده و سپس نتایج خشک کردن برای گیاه آویشن شیرازی (*Zataria multiflora*)، که یک گیاه دارویی بومی کوهستانی با خواص بسیار است، را به دست آوریم.

1 Heat Pump Dryer

2 Strommen

۲- مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک کردن

۱-۲- معادلات ریاضی خشک کردن

سینتیک خشک کردن به صورت ریاضی را می‌توان بر اساس قانون نفوذ فیک انجام داد. شبیه‌سازی سیستم خشک شدن محصولات مختلف، شامل حل کردن مجموعه‌ای از معادلات انتقال حرارت و جرم می‌باشد. مارولیس^۳ و همکاران [۱۶] پدیده‌های انتقال را به ترتیب زیر شرح داده‌اند:

الف) انتقال حرارت

- انتقال حرارت (انرژی) جابجایی^۴ از سطح ماده غذایی (گیاه) - انتقال حرارت خارجی

- انتقال حرارت هدایتی^۵ درون ماده غذایی (گیاه) و هوا - انتقال حرارت داخلی

ب) انتقال رطوبت از درون ماده غذایی (گیاه) به سمت سطح خارجی آن - انتقال جرم داخلی

اولین فرآیند خشک کردن، انتقال حرارت از منبع حرارتی به محصول و دومین فرآیند انتقال جرم از درون ماده به سطح آن و از سطح به هوای اطراف است. معادلات انتقال جرم و حرارت در زیر آورده شده‌اند و این معادلات به صورت معادلات حاکم PDE^۶ درآمده‌اند.

در این مدل، انتقال رطوبت تنها در یک جهت با نفوذ افزایش می‌یابد؛ از درون محصول به سطح مشترک بین هوا و نمونه، و در سطح مشترک تبخیر صورت می‌گیرد. چروکیدگی محصولات دارویی در طول خشک کردن، پدیده فیزیکی قابل توجه بوده که به صورت هماهنگ با نفوذ صورت می‌پذیرد. این مدل‌ها توسط کریم و هاوالادر^۷ ارائه شده‌اند [۱۷، ۱۸]. آنها به منظور ساده‌سازی مدل، فرضیات زیر را در نظر گرفته‌اند.

الف) انتقال رطوبت و انتقال حرارت تک بعدی هستند. در حین خشک شدن واکنشی صورت نمی‌گیرد و برای سادگی، خواص گرمایی هوا و رطوبت و نیز خواص شیمیایی در محدوده دمایی در نظر گرفته شده ثابت فرض شده‌اند.

ب) ماده پس از فرآیند خشک شدن، چروکیده می‌شود.

ج) توزیع هوا درون خشک‌کن یکنواخت است.

معادله انتقال جرم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (1)$$

و به طور مشابه معادله انتقال حرارت را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

شرایط مرزی و اولیه به صورت معادلات زیر می‌باشند.

- شرایط اولیه: $M|_{x=0} = M_0$ و $T|_{x=0} = T_0$

- شرایط مرزی:

$$(1) \text{ در } x = 0 \text{ داریم: } \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

(۲) در $x = b$ معادله موازنه رطوبت به صورت زیر می‌باشد:

$$-D_{\text{eff}} \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=b} + uM|_{x=b} = h_m(M - M_e)|_{x=b} \quad (3)$$

3 Maroulis
4 Convection
5 Conduction
6 Partial Differential Equations
7 Karim and Hawlader

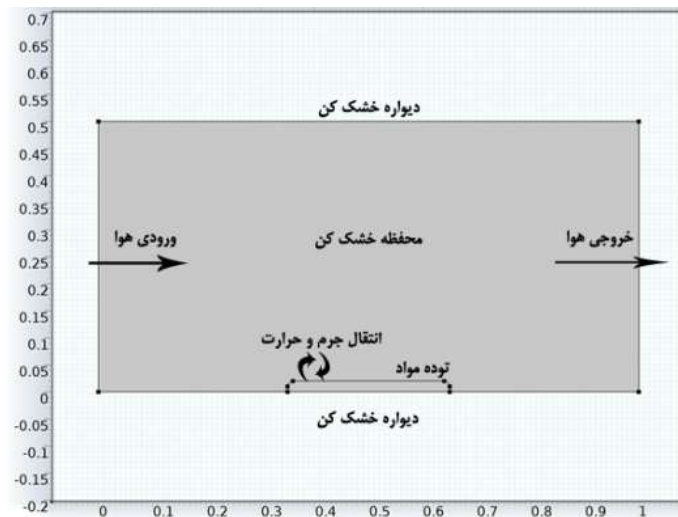
$$(۳) \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{در } x = 0 \text{ داریم:}$$

(۴) در $x = b$ معادله موازنه انرژی به صورت زیر می‌باشد:

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial x} - \rho c_p u T \right) \Big|_{x=b} = h(T_a - T) \Big|_{x=b} - h_m \rho (M - M_e) h_{fg} \Big|_{x=b} \quad (۴)$$

۲-۲- مدلسازی المان محدود- پیاده‌سازی و حل

حل معادلات انتقال حرارت و جرم مدل، پیش‌بینی متغیرهای حالت (مثل دما و غلظت رطوبت) را در زمان و مکان فراهم می‌آورد. برای حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای جفت شده (همزمان) نیاز به یک روش عددی است. یکی از روش‌های مناسب برای چنین معادلاتی روش المان محدود (FEM^۸) می‌باشد. روش حل FEM درکی کمی از انتقال حرارت و جرم ارائه می‌دهد. در سال‌های اخیر رشد کامپیوترهای قدرتمند با قابلیت‌های پیشرفته در محاسبات، فرمولاسیون روش‌های پیچیده عددی را که سیستم‌های فیزیکی واقعی را با حل مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند، تسهیل نموده است [۱۹، ۲۰]. در منابع و نوشته‌های مختلف، روش‌های عددی مختلفی وجود دارد؛ شامل روش‌های دیفرانسیلی (مثل روش تفاضل محدود یا FDM^۹)، روش‌های انتگرالی (مثل روش المان محدود یا FEM) و روش‌های تصادفی (مثل روش مونت-کارلو^{۱۰}) [۲۱]. در کاربردهای مهندسی صنایع غذایی به طور معمول روش‌های FDM و FEM به عنوان روش محاسباتی به کار گرفته می‌شوند [۲۲]. روش FEM در مقایسه با روش FDM پیچیدگی کمتری دارد [۲۳]. همچنین روش FEM در کار با تغییرات فضایی (مکانی) خواص مواد (مثل غلظت‌ها)، شکل‌ها و نواحی نامنظم، مسائل غیر خطی و شرایط مرزی و اولیه همزمان، انعطاف‌پذیری بیشتری دارد [۲۴]. بنابراین روش FEM در قالب رابط گرافیکی نرم‌افزار COMSOL Multiphysics برای حل مدل ریاضی انتقال حرارت و جرم همزمان حین خشک کردن، انتخاب شده است. هندسه مورد استفاده برای مدلسازی حاضر (توده مواد همراه با محفظه) به صورت شکل ۱ در نظر گرفته شده است



شکل (۱) هندسه کلی محفظه خشک کن و توده مواد در حال خشک شدن

- 8 Finite Element Method
- 9 Finite Difference Method
- 10 Monte Carlo

۳- مواد و روش

در بررسی مدل‌ها باید در ابتدا از نتایج تجربی استفاده نمود تا صحت آنها را مورد بررسی قرار داد و سپس از مدل برای بررسی دیگر شرایط و عوامل موثر بر روی فرآیند برای دستیابی به بهترین حالت فرآیندی (چه از نظر کیفیت محصول و چه از نظر شرایط بهینه) استفاده نمود. برای بررسی و اعتبارسنجی مدل از نتایج تجربی کادام^{۱۱} و همکاران در خشک کردن گیاه نعناع [۲۵] استفاده شده است. پس از امتحان صحت مدل، از آن برای مطالعه سینتیک خشک شدن گیاه آویشن شیرازی استفاده شده که بر پایه مطالعات انجام شده سینتیک خشک شدن آن مورد بررسی قرار نگرفته است. دلیل انتخاب گیاه نعناع ساختار مشابه و نزدیک به گیاه آویشن می‌باشد که هر دو گیاه از تیره نعنائیان می‌باشند [۲۶]. در مدل‌سازی چرخه سیستم پمپ حرارتی از گاز CO₂ استفاده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- شبیه‌سازی سیستم پمپ حرارتی در نرم‌افزار Aspen plus

در شبیه‌سازی سیستم پمپ حرارتی با استفاده از نرم‌افزار Aspen plus از رویکرد دقیق^{۱۲} در شبیه‌سازی دستگاه‌ها استفاده شده است. در حل با استفاده از رویکرد دقیق از فرمول‌ها و عملیات میانبر برای محاسبات استفاده نمی‌شود و نرم‌افزار پس از وارد نمودن اطلاعات دقیق دستگاه‌ها از سوی کاربر، شبیه‌سازی را برای به دست آوردن شرایط جریان‌های خروجی از هر دستگاه محاسبه می‌نماید. شبیه‌سازی به صورت مرحله به مرحله و دستگاه به دستگاه انجام شده و خروجی هر دستگاه به عنوان ورودی دستگاه بعدی در نظر گرفته شده است تا جایی که در نهایت فرآیند چرخه‌ای کامل شده است. با توجه به حضور سه ماده آب، هوا و CO₂، از مدل ترمودینامیکی SRK برای شبیه‌سازی سیستم مورد نظر استفاده شده است. سیستم آحاد متریک در شبیه‌سازی برگزیده شده است.

شبیه‌سازی از مبدل کولر گازی شروع شده که مشخصات جریان‌های ورودی به آن به صورت جدول ۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به خواص بحرانی CO₂، شرایط موجود در شبیه‌سازی شرایط فوق بحرانی برای CO₂ می‌باشد. لازم به ذکر است که اطلاعات فیزیکی کلیه دستگاه‌های فرآیندی از مقادیر و استانداردهای مشخص با استفاده از مقالات و کتب مختلف برای یک چرخه گرم‌کن استاندارد گردآوری و محاسبه شده است.

جدول (۱) مشخصات جریان‌های ورودی به کولر گازی

جریان	پارامتر	مقدار
	دما (°C)	۱۲۰
CO ₂ (سیال عامل)	فشار (atm)	۱۰۰
	دبی (kg/s)	۰/۱۵
	ترکیب	CO ₂ خالص
هوا	دما (°C)	۲۰
	فشار (atm)	۱
	دبی (kg/s)	۰/۱۰
	ترکیب	۹۸٪ هوا، ۲٪ رطوبت

پس از انجام فرآیند درون مبدل، دمای هوای خروجی به ۴۵ °C رسیده است. این هوا وارد محفظه خشک‌کن خواهد شد. جریان CO₂ خروجی از مبدل Gas Cooler از شیر فشارشکن ترمواستاتیک عبور کرده و فشار آن تا نقطه‌ای کمتر از فشار بحرانی CO₂ تقلیل می‌یابد. پس از تقلیل فشار جریان سیال عامل دو فازی می‌شود. جریان دوفازی سیال عامل سپس وارد

Evaporator شده و تا تک فازی شدن (گاز) گرم می‌شود. در انتها جریان سیال عامل خروجی از Evaporator وارد کمپرسور شده و فشار آن تا ۱۰۰ atm افزایش می‌یابد.

لازم به ذکر است که دمای هوای ورودی به محفظه با استفاده از نرم‌افزار Aspen plus مقدار ۴۵ درجه سلسیوس به دست آمده است؛ بنابراین با تعریف یک Design Spec در نرم‌افزار برای رسیدن دمای جریان هوای مرطوب اولیه به مقادیر مختلف سطوح دمایی مقدار دبی CO₂ لازم به دست آمده است. همچنین مقدار ضریب عملکرد سیستم HPD (COP) در هر حالت با استفاده از فرمول زیر به دست آمده است.

$$COP = \frac{\Phi_{tot}}{P_c} \quad (5)$$

در رابطه فوق، Φ_{tot} میزان گرمای کلی مبادله شده در مبدل حرارتی (بر حسب cal/sec) و P_c نیروی کمپرسور (بر حسب cal/sec) می‌باشد. نتایج کلی COP در دماهای مختلف در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول (۲) مقدار دبی CO₂ و ضریب عملکرد سیستم به ازای دماهای مختلف هوای

خروجی از سیستم

ضریب عملکرد سیستم HPD	دبی CO ₂ لازم (kg/s)	دما (°C)
۵/۱۲	۰/۱۳۳۸	۴۰
۵/۱۳	۰/۱۴۹۷	۴۵
۵/۱۳	۰/۱۶۴۸	۵۰
۵/۱۲	۰/۱۹۵۸	۶۰

همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در جدول ۲ نیز مشخص است ضریب عملکرد سیستم HPD تقریباً برابر ۵/۱۲۵ شده است. بنابراین با توجه به نمودار ارائه شده توسط پری^{۱۳} [۲۷] می‌توان گفت که سیستم HPD از نوع تک مرحله‌ای با موتور الکتریکی است.

۲-۴- شبیه‌سازی محفظه خشک‌کن در محیط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

در شبیه‌سازی محفظه خشک‌کن در محیط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics از هندسه شکل ۱ استفاده شده است. هوای ورودی با دمای ۴۵ °C، میزان رطوبت ۲٪ بر مبنای تر و سرعت ۱ m/s وارد محفظه خشک‌کن شده و پس از انتقال جرم و حرارت با توده مواد از محفظه خارج می‌گردد. غلظت اولیه رطوبت درون محفظه برابر صفر، غلظت توده برابر ۴۷۰/۷۸٪ بر مبنای خشک (مطابق داده‌های تجربی) و دمای اولیه محفظه برابر ۲۰ °C قرار داده شده است. برای حل در نرم‌افزار از میزان رطوبت بر مبنای تر استفاده می‌شود. با استفاده از فرمول زیر میزان رطوبت بر مبنای تر محصول قابل محاسبه است.

$$M_w = \left(\frac{M_d}{100 + M_d} \right) \times 100 \quad (6)$$

که در رابطه فوق M_w درصد رطوبت بر مبنای تر و M_d درصد رطوبت بر مبنای خشک می‌باشد. بنابراین با استفاده از رابطه فوق درصد رطوبت اولیه توده نعان برابر با ۸۲/۴۸٪ می‌باشد.

از فیزیک Transport of Diluted Species در هر دو دامنه (محفظه و توده) استفاده شده است که نوع انتقال درون محفظه به صورت Convection و درون توده به صورت Diffusion در نظر گرفته شده است. معادلات کلی انتقال جرم در فیزیک انتخابی به صورت زیر می‌باشند.

¹³ Perry

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + u \cdot \nabla c_i = R_i \quad (7)$$

$$N_i = -D_i \nabla c_i + u c_i \quad (8)$$

مقدار ضریب نفوذ موثر توده مواد مطابق نتایج تجربی در دماهای مختلف به صورت جدول ۳ می‌باشد.

جدول (۳) مقدار ضریب نفوذ موثر در دماهای مختلف برای

برگهای نعنای بر اساس پژوهش کادام و همکاران [۲۵]

ضریب نفوذ موثر (m^2/s)	دما ($^{\circ}C$)
1.23256×10^{-10}	۴۵
1.91731×10^{-10}	۵۰
2.2186×10^{-10}	۵۵
2.24599×10^{-10}	۶۰
2.65684×10^{-10}	۶۵

به منظور تعریف انتقال حرارت درون محفظه خشک‌کن در نرم‌افزار، فیزیک Heat Transfer in Fluids انتخاب شده است. معادله کلی انتقال حرارت در این نوع فیزیک به صورت زیر می‌باشد.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p \quad (9)$$

انتقال حرارت روی سطح توده به صورت فلاکس حرارتی (انتقال حرارت جابجایی) می‌باشد که فرمول زیر برای آن تعریف شده است.

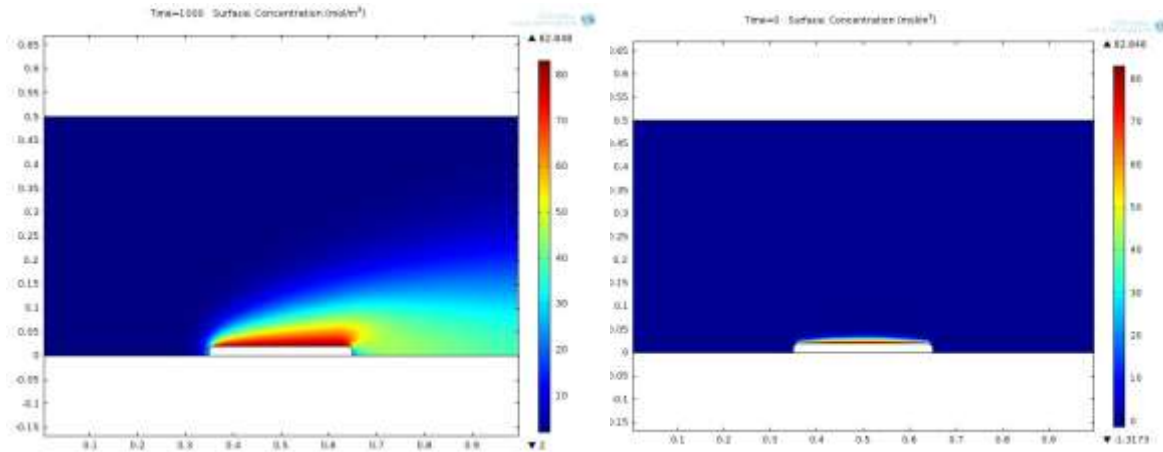
$$-n \cdot (k \nabla T) = q_0 \quad (10)$$

که مقدار q_0 با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (11)$$

۴-۲-۱- مطالعه خشک کردن نمونه‌های نعنای با استفاده از مدل

در ابتدا برای زمان ۱۰۰۰ ثانیه شبیه‌سازی به اجرا درآمده است. شکل ۲ مقایسه تغییرات غلظت درون محفظه در دو زمان مختلف را نشان می‌دهد.

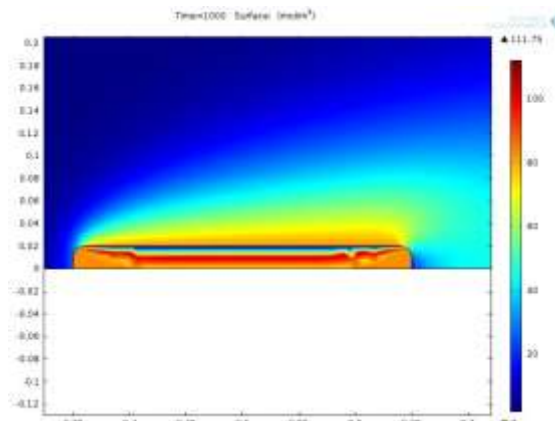


ب) زمان ۱۰۰۰ ثانیه

الف) شروع فرآیند

شکل (۲) تغییرات غلظت (رطوبت) درون محفظه در دو زمان مختلف

با توجه به نتایج به دست آمده تغییرات غلظت رطوبت در محفظه پس از مدت زمان ۳۰۰ ثانیه به مقدار ثابتی رسیده است. شکل ۳ توزیع غلظت درون توده پس از ۱۰۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد.



شکل (۳) توزیع غلظت رطوبت در توده مواد پس از ۱۰۰۰ ثانیه

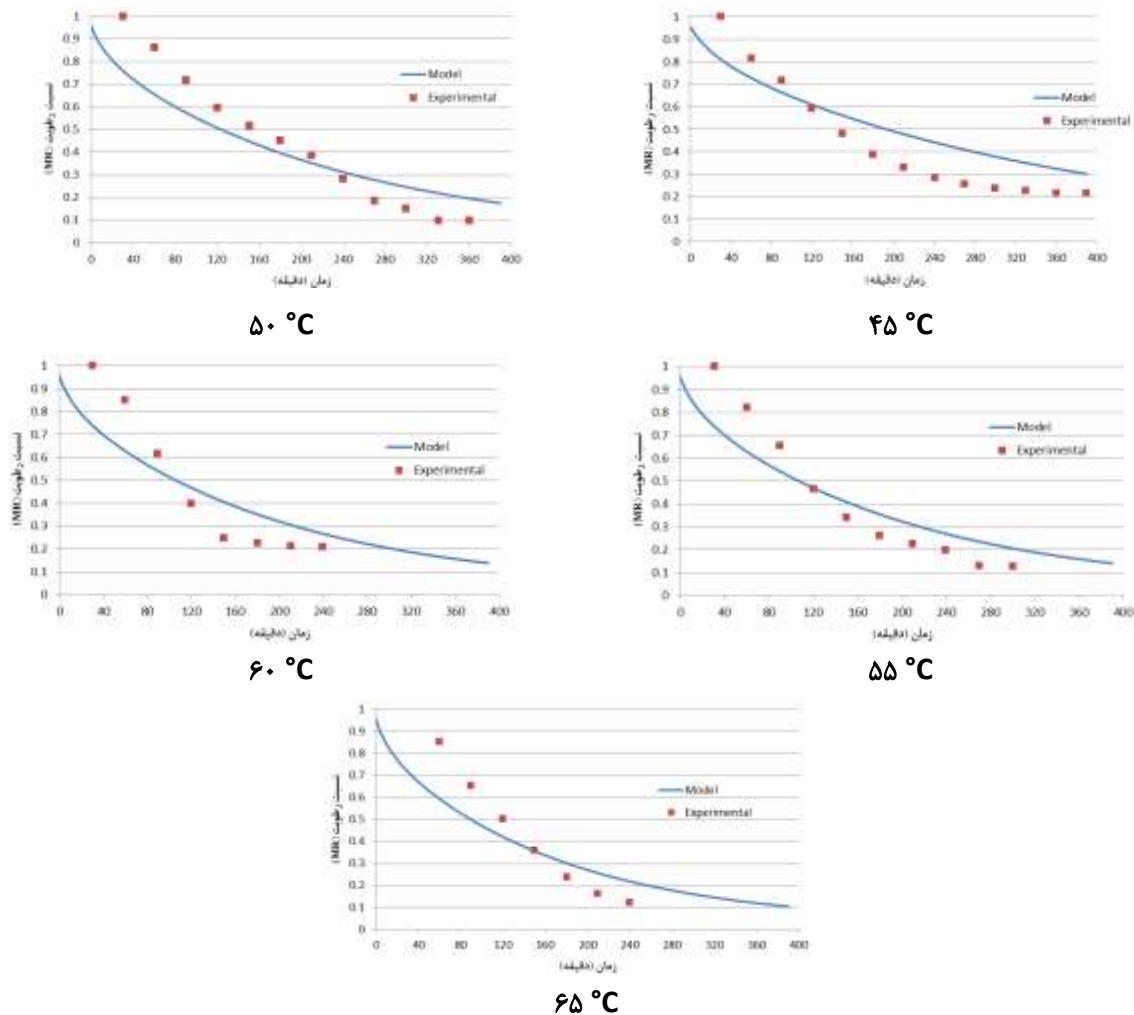
همان‌گونه که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود غلظت درون توده در لایه‌های بالایی کاهش پیدا کرده و غلظت لایه‌های پایینی به سمت لایه‌های میانی حرکت کرده است.

۴-۲-۲- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل از نتایج تجربی خشک کردن برگ‌های نعنای در پژوهش کادام و همکاران [۲۵] استفاده شده است. کادام و همکاران خشک کردن برگ‌های نعنای را در دماهای ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درجه سلسیوس مورد مطالعه قرار دادند. در جدول ۳ نتایج به دست آمده ضریب نفوذ در این پژوهش ارائه شده است. برای اعتبارسنجی مدل حاضر، هر بار ضریب نفوذ و دمای هوا تغییر داده شده و تغییرات غلظت میانگین رطوبت در کل توده بر حسب زمان به دست آمده است. سپس نسبت رطوبت با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده و با نتایج تجربی کادام و همکاران مورد مقایسه قرار گرفته است.

$$MR = \frac{M_w}{M_{w0}} \quad (12)$$

که در رابطه فوق M_{tw} میزان رطوبت در هر لحظه و M_{w0} میزان رطوبت اولیه می‌باشد. نتایج در شکل ۴ به صورت نموداری قابل مشاهده می‌باشد. همچنین نتایج مربوط به دقت نتایج، (در زمان‌های مشترک) محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است.



شکل (۴) مقایسه تغییرات غلظت رطوبت در توده به دست آمده از مدل با نتایج تجربی کادام و همکاران [۱۳۵]

جدول (۴) نتایج آنالیز آماری مربوط به مقایسه نتایج محاسباتی مدل و نتایج تجربی پژوهش کادام و همکاران [۲۵]

SSE	R^2	دما ($^{\circ}C$)
۰/۰۳۶۷	۰/۹۵۲۵	۴۵
۰/۰۱۴۵	۰/۹۹۴۲	۵۰
۰/۰۲۷۰	۰/۹۷۹۲	۵۵
۰/۰۴۱۸	۰/۹۴۴۹	۶۰
۰/۰۰۷۷	۰/۹۹۸۳	۶۵

همان گونه که از نتایج شکل ۴ و جدول ۴ نیز مشخص است، نتایج به دست آمده توسط مدل دقت مطلوبی دارند.

۴-۲-۳- مطالعه خشک کردن نمونه‌های آویشن شیرازی با استفاده از مدل

پس از اطمینان از صحت مدل، سینتیک خشک کردن آویشن شیرازی با استفاده از سیستم خشک کن پمپ حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به داده‌های آزمایشات GC/MS^{14} برای آویشن شیرازی و آویشن مشخص شد که ساختار و بافت این دو گیاه کاملاً مشابه بوده و این دو گیاه به طور عمده در میزان رطوبت و درصد روغن تیمول^{۱۵} با هم تفاوت دارند [۲۸، ۲۹]. بنابراین از مقادیر ضریب نفوذ ارائه شده در پژوهش دویماز^{۱۶} [۳۰] برای شبیه‌سازی استفاده شده است. داده‌های جدول ۵ مقادیر ضریب نفوذ در دماهای مختلف برای گیاه آویشن را نشان می‌دهد.

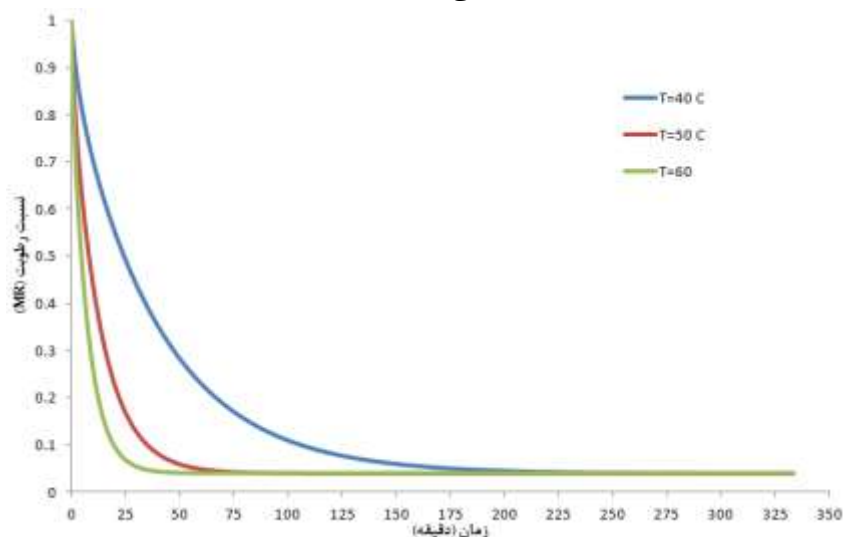
جدول (۵) مقدار ضریب نفوذ موثر در دماهای مختلف برای

برگهای آویشن بر اساس پژوهش دویماز [۳۰]

ضریب نفوذ موثر (m^2/s)	دما ($^{\circ}C$)
1.097×10^{-9}	۴۰
3.342×10^{-9}	۵۰
5.991×10^{-9}	۶۰

بنابراین شبیه‌سازی در نرم‌افزار COMSOL به ازای مقادیر جدید ضریب نفوذ در دماهای گوناگون و نیز میزان رطوبت ۵۵٪ بر مبنای تر [۳۱] برای آویشن شیرازی اجرا شده است. نتایج تغییرات رطوبت کلی توده در طول زمان در شکل ۵ قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۵، شبیه‌سازی تا زمان رسیدن غلظت توده به مقداری ثابت اجرا شده است. همان گونه که از شکل نیز مشخص است، خشک کردن گیاه آویشن شیرازی در دماهای بالاتر با سرعت بالاتری انجام می‌پذیرد؛ به طوریکه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تنها پس از ۲۵ دقیقه غلظت در توده به مقدار ثابتی می‌رسد. شکل ۶ توزیع رطوبت در توده گیاه آویشن شیرازی را پس از مدت زمان ۲۵ دقیقه (۱۵۰۰ ثانیه) نشان می‌دهد.

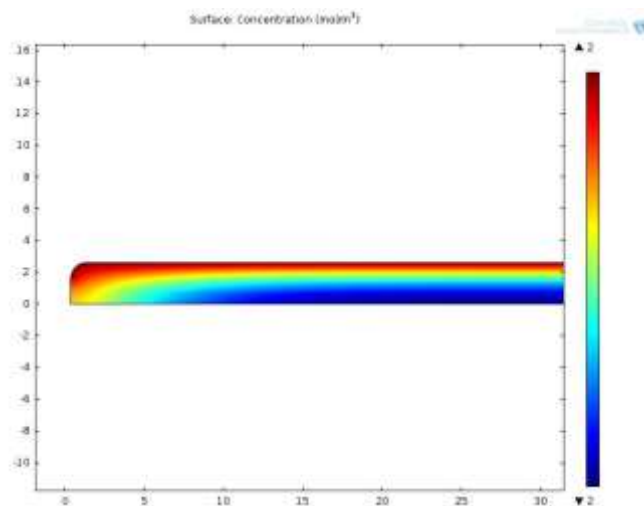


شکل (۵) تغییرات غلظت میانگین رطوبت کل توده آویشن شیرازی با زمان در دماهای مختلف هوای خشک کن

¹⁴ Gas chromatography mass spectrometry

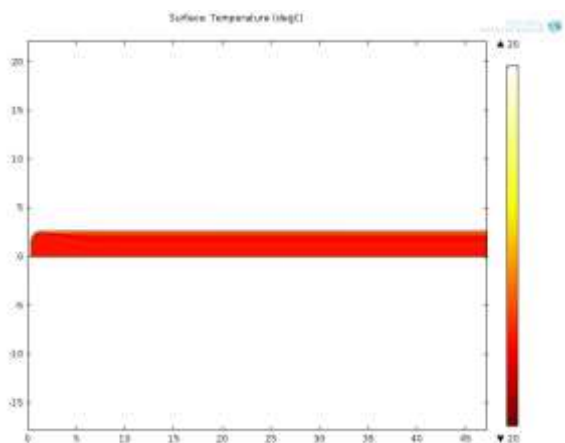
¹⁵ Thymol

¹⁶ Doymaz

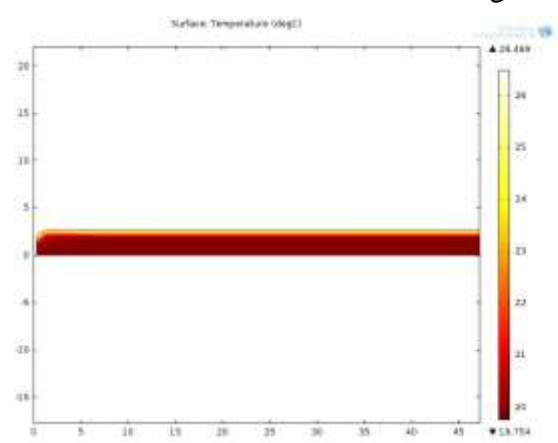


شکل (۶) توزیع رطوبت در توده گیاه آویشن شیرازی پس از مدت زمان ۲۵ دقیقه در هوا با دمای ۶۰ درجه سلسیوس

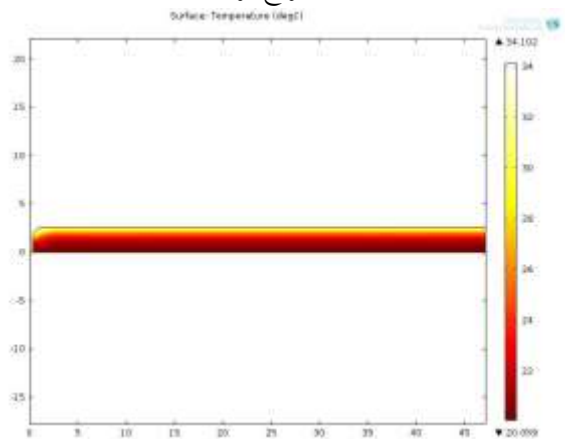
شکل ۷ توزیع دما در توده گیاه آویشن شیرازی را در زمان‌های مختلف و شکل ۸ کانتورهای دما درون توده در زمان ۱۵۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد.



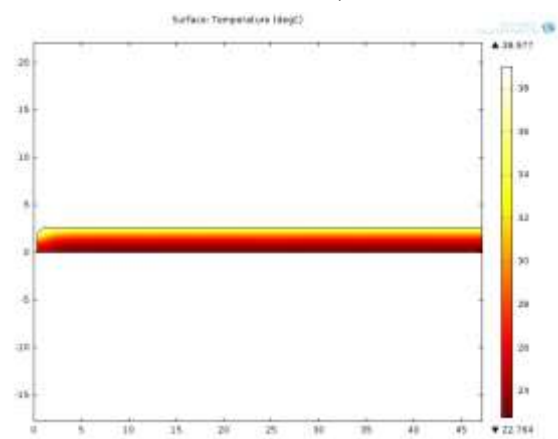
الف) شروع فرآیند



ب) زمان ۱۰۰ ثانیه

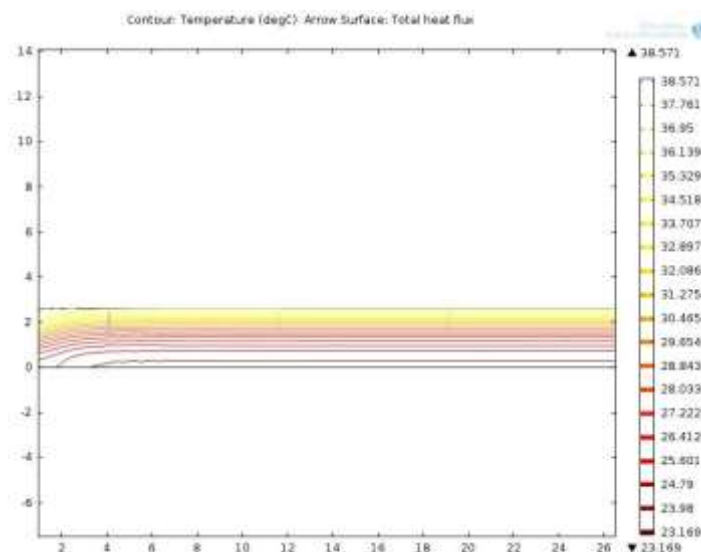


ج) زمان ۶۰۰ ثانیه



د) زمان ۱۵۰۰ ثانیه

شکل (۷) تغییرات دما درون توده در زمانهای مختلف



شکل (۸) کانتورهای دما در توده گیاه آویشن شیرازی پس از مدت زمان ۲۵ دقیقه در هوا با دمای ۶۰ درجه سلسیوس

۳-۴- مطالعه سینتیک خشک شدن آویشن شیرازی با استفاده از مدل‌های گوناگون نسبت رطوبت

برای یافتن مدل ریاضی برای خشک شدن گیاه دارویی آویشن شیرازی چند مدل ارائه شده در پژوهش‌های گوناگون برای خشک شدن گیاهان با شکل نامنظم، روی نتایج به دست آمده برازش شدند و دقت هر کدام به دست آمده است.

مدل‌های ارائه شده با استفاده از ابزار **Curve Fitting** در نرم‌افزار متلب^{۱۷} بر روی داده‌های به دست آمده در بخش ۴-۲-۳ (شکل ۵) برازش شدند که جداول ۶ تا ۸ نتایج این برازش را در دماهای گوناگون نشان می‌دهند.

همان‌گونه که از نتایج جداول ۶ تا ۸ مشخص است، در دمای ۴۰ درجه سلسیوس بهترین مدلی که داده‌های خشک کردن آویشن شیرازی را برازش نموده، مدل **Page** و در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس بهترین مدلی که داده‌های خشک کردن آویشن شیرازی را برازش نموده، مدل لگاریتمی می‌باشد. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت مدل لگاریتمی برای بررسی خشک کردن گیاه آویشن شیرازی مناسب می‌باشد. همچنین مدل‌های **Page** و **Newton** نیز به طور کلی نتایج قابل قبولی در سینتیک خشک کردن گیاه آویشن شیرازی دارند.

جدول (۶) نتایج برازش مدل‌های ریاضی نیمه تئوری خشک کردن گیاهان برای داده‌های به دست آمده خشک کردن آویشن شیرازی در

دمای ۴۰ درجه سلسیوس

نام مدل	رابطه ریاضی	منبع	مقادیر پارامترها	R^2	SSE
Newton	$MR = \exp(-kt)$	[۳۲]	$k = 0.02478$	۰/۹۶۰۰	۵/۴۶۸
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[۳۳]	$k = 0.06931$ $n = 0.7367$	۰/۹۸۹۷	۱/۴۱۱
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[۳۴]	نامشخص	نامشخص	نامشخص
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[۳۵]	نامشخص	نامشخص	نامشخص
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[۳۶]	$a = -0.01029$ $b = 2.43 \times 10^{-5}$	۰/۳۷۰۲	۸۶/۰۴
Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	[۳۷]	$a = 0.6114$ $b = -0.005627$ $c = 1.265 \times 10^{-5}$	۰/۸۶۲۰	۱۸/۸۵
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۳۸]	نامشخص	نامشخص	نامشخص

¹⁷ MATLAB R2010a

جدول (۷) نتایج برازش مدل‌های ریاضی نیمه تئوری خشک کردن گیاهان برای داده‌های به دست آمده خشک کردن
آویشن شیرازی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس

نام مدل	رابطه ریاضی	منبع	مقادیر پارامترها	R^2	SSE
Newton	$MR = \exp(-kt)$	[۳۲]	$k = 0.07481$	۰/۸۹۱۷	۵/۹۶۴
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[۳۳]	$k = 0.1836$ $n = 0.677$	۰/۹۲۰۱	۴/۳۹۹
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[۳۴]	$a = 0.868$ $k = 0.06357$	۰/۹۰۴۰	۵/۲۸۶
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[۳۵]	$a = 0.8785$ $c = 0.03979$ $k = 0.07818$	۰/۹۹۹۳	۰/۰۴۱۱۹
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[۳۶]	نامشخص	-۳/۴۷	۲۴۶
Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	[۳۷]	$a = 0.3013$ $b = -0.002968$ $c = 7.208 \times 10^{-6}$	۰/۴۷۴۲	۲۸/۹۶
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۳۸]	$a = 1.038$ $b = 0.000166$ $k = 0.164$ $n = 0.739$	۰/۹۹۱۹	۰/۴۴۸۷

جدول (۸) نتایج برازش مدل‌های ریاضی نیمه تئوری خشک کردن گیاهان برای داده‌های به دست آمده خشک کردن آویشن
شیرازی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس

نام مدل	رابطه ریاضی	منبع	مقادیر پارامترها	R^2	SSE
Newton	$MR = \exp(-kt)$	[۳۲]	$k = 0.1333$	۰/۸۰۹۶	۶/۱۷۱
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[۳۳]	$k = 0.2697$ $n = 0.6794$	۰/۸۳۵۳	۵/۳۳۵
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[۳۴]	$a = 0.8743$ $k = 0.1142$	۰/۸۲۰۳	۵/۸۲۴
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[۳۵]	$a = 0.8843$ $c = 0.04005$ $k = 0.1403$	۰/۹۹۹۳	۰/۰۲۱۷۴
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[۳۶]	نامشخص	-۸/۵۴	۳۰۹
Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	[۳۷]	$a = 0.1977$ $b = -0.001836$ $c = 4.521 \times 10^{-6}$	۰/۲۹۷۴	۲۲/۷۷
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۳۸]	نامشخص	نامشخص	نامشخص

۵- نتیجه گیری

هدف اصلی در پژوهش حاضر بررسی تفصیلی معادلات انتقال حرارت و انتقال جرم درون سیستم خشک‌کن پمپ حرارتی بوده است. بدین منظور گیاه آویشن شیرازی انتخاب شده و پس از مدل‌سازی سیستم، سینتیک خشک شدن این گیاه مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم و شرایط مرزی برای محفظه خشک‌کن نیز آورده شده است. برای شبیه‌سازی سیستم پمپ حرارتی نرم‌افزار Aspen plus و برای شبیه‌سازی محفظه خشک‌کن نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انتخاب گشته و مورد استفاده قرار گرفتند. برای اعتبارسنجی نتایج خشک‌کن از نتایج خشک کردن گیاه نعنای به خاطر خواص فیزیکی و ساختار مشابه با آویشن استفاده شد. خشک کردن

- گیاه آویشن شیرازی با استفاده از مدل به دست آمده در دماهای مختلف بررسی شدند. به طور کلی نتایج زیر به دست آمده‌اند:
- روش المان محدود، روشی مناسب در حل عددی معادلات مربوط به سینتیک خشک کردن گیاهان دارویی می‌باشد.
 - با شبیه‌سازی سیستم پمپ حرارتی در نرم‌افزار Aspen plus و به دست آوردن مقادیر ضریب عملکرد (COP) در دماهای مختلف، مقدار میانگین این ضریب برابر با ۵/۱۲۵ به دست آمده که با توجه به نمودارهای ارائه شده سیستم پمپ حرارتی از نوع تک مرحله‌ای با موتور احتراق می‌باشد که، با توجه به استفاده از سوختی ارزان مثل گاز طبیعی در کشورمان، نسبت به سایر سیستم‌ها هزینه پایین‌تری داراست.
 - استفاده از CO₂ فوق بحرانی موجب پایین‌تر آمدن هزینه انرژی در استفاده از سیستم پمپ حرارتی گشته به طوری که در عین سادگی سیستم، ضریب عملکرد نسبتاً مناسبی به دست آمده است.
 - از آنجایی که گیاهان دارویی به دما حساس می‌باشند و حفظ خواص آنها بستگی زیادی به شرایط خشک کردن دارد، خشک نمودن آنها در سیستم پمپ حرارتی مقرون به صرفه بوده و با هزینه‌ای نسبتاً کم (نسبت به سایر روش‌ها) می‌توان محصول مناسبی به دست آورد.
 - خشک کردن گیاه آویشن شیرازی در دماهای بالاتر با سرعت بالاتری انجام می‌پذیرد (چون ضریب نفوذ موثر در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد)؛ به طوری که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تنها پس از ۲۵ دقیقه غلظت در توده به مقدار ثابتی می‌رسد.
 - در بررسی مدل‌های نیمه تئوری برای سینتیک خشک کردن گیاه، به طور کلی می‌توان گفت مدل لگاریتمی برای بررسی خشک کردن گیاه آویشن شیرازی مناسب می‌باشد. همچنین مدل‌های Page و Newton نیز به طور کلی نتایج قابل قبولی در سینتیک خشک کردن گیاه آویشن شیرازی دارند.

۶- مراجع

- [۱] امید بیگی - رضا، رهیافت‌های تولید و فرآوری گیاهان دارویی (جلد اول)، انتشارات آستان قدس رضوی (۱۳۷۹).
- [۲] روزنامه ایران ۲۵ آبان ۱۳۹۳ صفحه ۱۶ عنوان «طلای سبز خوراکی دام شده است»
- [3] J. Müller, and A. Heindl, Drying of medicinal plants, *Frontis* 17, 2006, pp. 237-252.
- [4] M. D. Arsalan, and Ozcan, Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemaryleaves, *Energy Conversion and Management Journal*, 49 (5), 2008, pp. 1258-1264.
- [5] A. S. Mujumdar, ed. *Handbook of industrial drying*. CRC Press, 2014.
- [6] T. Kudra, and A. S. Mujumdar, *Advanced drying technologies*. CRC Press, 2009.
- [7] M. N. A. Hawlader, C. O. Perera, M. Tian, Comparison of the retention of 6-gingerol in drying of ginger under modified atmosphere heat pump drying and other drying methods, *Drying Technology* 24, no. 1, 2006, pp. 51-56.
- [8] M. A. R. Eisa, Applications of heat pumps in chemical processing, *Energy conversion and management* 37, no. 3, 1996, pp. 369-377.
- [9] E. L. Schmidt, K. Klöcker, N. Flacke, F. Steimle, Applying the transcritical CO₂ process to a drying heat pump, *International Journal of Refrigeration* 21, no. 3, 1998, pp. 202-211.
- [10] J. Lawton, Drying: the role of heat pumps and electromagnetic fields, *Physics in Technology* 9, no. 5, 1978, p. 214.
- [11] I. Strommen, T. M. Eikevik, O. Alves-Filho, K. Syverud, O. Jonassen, Low temperature drying with heat pumps new generations of high quality dried products, In *13th International drying symposium*, 2002, pp. 27-30.
- [12] I. C. Claussen, T. S. Ustad, I. Strommen, P. M. Walde, Atmospheric freeze drying—A review, *Drying Technology* 25, no. 6, 2007, pp. 947-957.

- [13] A. Midilli, and H. Kucuk, Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy conversion and Management* 44, no. 7, 2003, pp. 1111-1122.
- [14] S. M. Tasirin, S. K. Kamarudin, K. Jaafar, K. F. Lee, The drying kinetics of bird's chillies in a fluidized bed dryer." *Journal of food engineering* 79, no. 2, 2007, pp. 695-705.
- [15] D. Jain, and P. B. Pathare, Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices, *Biosystems Engineering* 89, no. 3, 2004, pp. 289-296.
- [16] Maroulis, Z. B., C. T. Kiranoudis, and D. Marinou-Kouris. "Heat and mass transfer modeling in air drying of foods." *Journal of food engineering* 26, no. 1 (1995): 113-130.
- [17] Karim, M.A. and Hawlader, M.N.A., 2005. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *Journal of food engineering*, 70(1), pp.35-45.
- [18] Karim, M.A. and Hawlader, M.N.A., 2005. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23), pp.4914-4925.
- [19] Moens, D. and Vandepitte, D., 2005. A survey of non-probabilistic uncertainty treatment in finite element analysis. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(12), pp.1527-1555.
- [20] Mohamed, I.O., 2010. Development of a simple and robust inverse method for determination of thermal diffusivity of solid foods. *Journal of food engineering*, 101(1), pp.1-7.
- [21] Sandeep, K.P. and Irudayaraj, J., 2001. Introduction to modeling and numerical simulation. *Food Processing Operations Modeling, Design and Analysis*, pp.25-36.
- [22] Puri, V.M. and Anantheswaran, R.C., 1993. The finite-element method in food processing: a review. *Journal of food engineering*, 19(3), pp.247-274.
- [23] Wang, L. and Sun, D.W., 2003. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 14(10), pp.408-423.
- [24] Erdoğan, F., 2013. Mathematical modeling of transport phenomena for simulation and optimization of food processing operations. In *Advances in Food Process Engineering Research and Applications* (pp. 473-487). Springer US.
- [25] Kadam, D.M., Goyal, R.K., Singh, K.K. and Gupta, M.K., 2011. Thin layer convective drying of mint leaves. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(2), pp.164-170.
- [26] Manikandan, R., Chandrasekar, K. & Srivastava, S.K. (2012). Life form analysis of the family Lamiaceae in Jammu & Kashmir, India. *Phytotaxonomy* 12: 7-19.
- [27] Perry, E. J. "Drying by cascaded heat pumps." *Inst Refrig Mtg* (1981): 1-8.
- [28] Hudaib, M., Speroni, E., Di Pietra, A.M. and Cavrini, V., 2002. GC/MS evaluation of thyme (*Thymus vulgaris* L.) oil composition and variations during the vegetative cycle. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 29(4), pp.691-700.
- [29] Moazeni, M., Larki, S., Saharkhiz, M.J., Oryan, A., Lari, M.A. and Alavi, A.M., 2014. In vivo study of the efficacy of the aromatic water of *Zataria multiflora* on hydatid cysts. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 58(10), pp.6003-6008.
- [30] Doymaz, I., 2011. Drying of thyme (*Thymus Vulgaris* L.) and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(4), pp.458-465.
- [31] Sadeghi, H. and Robati, Z., 2016. Ecotype-correlated variations in germination and seedling growth of *Zataria multiflora*. *Botany*, 94(10), pp.975-982.

- [32] Roberts, J.S., Kidd, D.R. and Padilla-Zakour, O., 2008. Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), pp.460-465.
- [33] Hassan-Beygi, S.R., Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. and Massah, J., 2009. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying. *Int. Agrophysics*, 23(2), pp.129-135.
- [34] Ghodake, H.M., Goswami, T.K. and Chakraverty, A., 2006. Mathematical modeling of withering characteristics of tea leaves. *Drying technology*, 24(2), pp.159-164.
- [35] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. and Hu, X., 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40(1), pp.39-46.
- [36] Demir, V., Gunhan, T. and Yagcioglu, A.K., 2007. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems engineering*, 98(1), pp.47-53.
- [37] Sharma, G.P. and Prasad, S., 2004. Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65(4), pp.609-617.
- [38] Arslan, D. and Özcan, M.M., 2008. Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves. *Energy Conversion and Management*, 49(5), pp.1258-1264.