بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

تحلیل انرژی و اگزرژی خشک کردن ورقه‌های نازک موز توسط یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم همرفت اجباری

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

سعیده حاتمی

اساتید راهنما

دکتر مرتضی صادقی

دکتر سیداحمد میره‌ای

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی خانم سعیده حاتمی

تحت عنوان

تحلیل انرژی و اگزرژی خشک کردن ورقه‌های نازک موز توسط یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم همرفت اجباری

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۲۴ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مرتضی صادقی
۲- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر سید احمد میره‌ای
۳- استاد مشاور پایان نامه	دکتر نسرین اعتصامی
۴- استاد داور	دکتر امین اله معصومی
۵- استاد داور	دکتر ناصر همدمی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد مهدی مجیدی

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش مر خدای را عزّ و جلّ که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. او که ایمان دارم از رگ گردن به من نزدیک‌تر است.

روزهایی از زندگیم با تمام سختی‌ها، شیرینی‌ها و دلواپسی‌ها گذشتند و تنها ثمر تلاش‌های این روزها باقی ماند. تلاش‌هایی که بدون یاری و همراهی هرگز به ثمر نمی‌رسید. یاری پرمهر اساتید بزرگواری که عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند.

از استاد راهنمای خوبم آقای دکتر مرتضی صادقی به خاطر همفکری‌ها و پشتیبانی‌های همه جانبه ایشان در تمام طول انجام پایان نامه سپاسگزارم و همچنین از آقای دکتر سید احمد میره‌ای استاد راهنمای دوم پایان نامه ام تشکر میکنم.

از استاد مشاور گرامیم خانم دکتر نسرین اعتصامی به خاطر مشاوره‌ها، همکاری‌ها و همیاری‌های ارزشمندشان صمیمانه سپاسگزارم.

از آقای دکتر امین اله معصومی و آقای دکتر ناصر همدمی که زحمت بازخوانی پایان نامه ام را قبول کرده اند تشکر می کنم.

از کلیه اساتید خوبم چه در دوره کارشناسی و چه در دوره کارشناسی ارشد که افتخار علم آموزی از محضر ایشان را داشتم صمیمانه سپاسگزاری میکنم و طول عمر باعزت ایشان را از درگاه ایزد منان طلب می نمایم.

همچنین از کلیه دبیران خوبم از دوران ابتدایی تا پایان دبیرستان که الفبای علم را به من آموختند بسیار سپاسگزارم و برای ایشان از درگاه خدای منان طلب عمر باعزت دارم.

از کارکنان محترم دانشگاه صنعتی اصفهان به ویژه آقای مهندس گل محمدی، آقای مهندس صهبا و آقای علیشاهی به خاطر همکاری‌های بی شائبه طی انجام آزمایشات پایان نامه ام بسیار تشکر می کنم.

از کلیه دوستان عزیزم به ویژه خانم ها سعیده تقدمی صابری، فریبا دارایی، سکینه خلج، مژگان نوری، ساناز اصلاح ، الناز قاجار، نیلوفر دستمزد، زهرا ابوالفتح زاده، عطیه صندوقی، شریفه کریمی، مهروز پشم فروش، فرانک امتحانی و سمیه گرامی پور به خاطر همراهی و محبت دوستانه ایشان در طول تحصیلم در دوره کارشناسی ارشد و همچنین هم گروهی های خوبم به ویژه آقایان مهدی ذوالفقاری، مجید فتحی و سید حسن امامی به خاطر لطف و کمک های بی دریغشان طی انجام پایان نامه ام صمیمانه سپاسگزاری می کنم.

از دو برادر مهربانم **سجاد و سینا** که پشتیبان همیشگیم در تمام طول زندگی بودند بسیار تشکر می کنم و سلامتی و موفقیت فراوان را برایشان آرزو دارم.

و اما از همه مهمتر کسانی هستند که وجودم از ایشان است. **مادر** مهربانی که امید بخش زندگیم و **پدر** عزیزی که پشتوانه امیدم بوده است و تنها می توانم به ایشان بگویم که سپاسگزار وجودتان هستم.

الهی جان ما را صفای خود، دل ما را هوای خود، و چشم ما را ضیای خود ده و ما را از فضل و کرم خود آن ده که آن به.

یارب دل ما را تو به رحمت جان ده　　درد همه را به صابری درمان ده

این بنده چه داند که چه می باید جست　　دانندهٔ تویی هر آنچه دانی آن ده

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

مادر مهربانم

که امید بخش زندگانیم

و

پدر عزیزم

که پشتوانه امیدم است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب.....نه

فهرست جدول‌ها..... یازده

فهرست شکل‌ها ..... دوازده

جدول علائم و اختصارات ..... سیزده

چکیده ۱

فصل اول: **مقدمه و هدف**

فصل دوم: **بررسی منابع**

۲-۱- مفاهیم خشک کردن..... ۷

۲-۱-۳- روش‌های خشک کردن محصولات کشاورزی..... ۸

۲-۱-٤- خشک‌کن‌های خورشیدی..... ۹

۲-۱-۵- مروری بر مطالعات انجام گرفته در زمینه سینتیک خشک کردن ۱۱

۲-۲- انرژی و اگزرژی ۱۳

۲-۲-۱- قانون اول ترمودینامیک و راندمان انرژی سیستم ۱۳

۲-۲-۲- مفهوم اگزرژی ۱٤

۲-۲-۳- برگشت‌ناپذیری و قانون دوم ترمودینامیک..... ۱٦

۲-۲-٤- تحلیل اگزرژی ۱۷

۲-۲-۵- تخریب و هدررفت اگزرژی ۱۷

۲-۲-٦- مروری بر مطالعات انجام گرفته در تحلیل انرژی و اگزرژی و کاربرد آن در خشک‌کن‌های خورشیدی ۱۸

۲-۳-کیفیت ۲۲

۲-۳-۱- چروکیدگی..... ۲۲

۲-۳-۲- تغییر رنگ ۲٤

۲-۳-۳- ظرفیت جذب آب ۲٦

فصل سوم: **مواد و روش‌ها**

۳-۱- تهیه نمونه ۲۷

۳-۲- ابزار و روش‌های اندازه‌گیری ۲۸

۳-۳- آزمایش‌های خشک کردن..... ۳۰

۳-٤- سینتیک خشک شدن ۳۰
۳-٥- مطالعه سینتیک چروکیدگی ۳۲
۳-٦- سینتیک شاخص‌های رنگ ۳۳
۳-۷- ظرفیت جذب آب ۳۴
۳-۸- تحلیل انرژی و اگزرژی فرایند خشک‌کردن ۳۵
۳-۸-۱- تحلیل انرژی ۳۵
۳-۸-۲- تحلیل اگزرژی ۳٦
۲-۹- جمع‌بندی فصل ۳۸
فصل چهارم: نتایج و بحث
٤-۱- دما در نقاط مختلف خشک‌کن ۴۰
٤-۲- سینتیک خشک شدن موز ۴۲
٤-۲-۱- نتایج مدل‌سازی تجربی ٤٤
٤-۳- نتایج سینتیک چروکیدگی ۴۷
٤-٤- نتایج سینتیک تغییر رنگ ۵۲
٤-٥- نتایج آزمایش جذب نهایی آب ۵۴
٤-٦- نتایج تحلیل انرژی و اگزرژی ۵۵
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۵-۱- نتیجه‌گیری ۶۵
۵-۲- پیشنهادها ۶۷
منابع ۶۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۳- ۱- مدل‌های تجربی استفاده شده به همراه معادلات آنها.....۳۲
جدول ٤-۱- ضرایب مدل‌های تجربی در دبی جرمی ۰/۰۱٦ کیلوگرم بر ثانیه به همراه ضرایب خوبی برازش آنها. ٤٥
جدول ٤-۲- ضرایب مدل‌های تجربی در دبی جرمی ۰/۰٤۱ کیلوگرم بر ثانیه به همراه ضرایب خوبی برازش آنها.. .....٤٥
جدول ٤-۳- ضرایب مدل‌های تجربی در دبی جرمی ۰/۰۸۲ کیلوگرم بر ثانیه به همراه ضرایب خوبی برازش آنها..... ٤٦
جدول ٤-٤- ضرایب معادله٤-۱ به همراه شاخص‌های آماری خوبی برازش در سه دبی جرمی هوا..... ٤۸
جدول ٤-٥- ضرایب معادله ٤-۲ به همراه شاخص‌های خوبی برازش آنها..... ٥۰
جدول ٤-٦- نتایج تجزیه واریانس ظرفیت جذب آب در مقایسه سه دبی جرمی هوا..... ٥٥

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱- طرحواره انواع خشک‌کنهای خورشیدی [۲۰]. ۱۱
شکل۲- ۲- طرحواره خشک‌کن استفاده شده آکبولوت و دارموس در خشک کردن توت [۱]. ۲۰
شکل ۳- ۱- طرح صفحات جاذب sun strip. ۲۸
شکل ۳- ۲- طرحواره خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم استفاده شده در تحقیق. ۲۹
شکل ۳- ۳- رال‌های رنگی استفاده شده برای کالیبره کردن. ۳٤
شکل ٤- ۱- تغییرات دما بر حسب زمان در سه دبی مختلف جرمی هوا. ٤۱
شکل ٤- ۲- میانگین شدت تابش در طول روز در زمان انجام آزمایشات. ٤۲
شکل ٤- ۳- منحنی افت رطوبت محصول در طول زمان خشک شدن در سه دبی جرمی هوا. ٤۳
شکل ٤- ٤ - نرخ تغییر نسبت رطوبت بر حسب زمان در سه دبی جرمی هوا. ٤۳
شکل ٤- ٥- نرخ تغییرات نسبت رطوبت بر حسب نسبت رطوبت در سه دبی جرمی هوا. ٤٤
شکل ٤- ٦- مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با مدل لگاریتمی بر حسب زمان در دبی‌های جرمی هوای مختلف. ٤٦
شکل ٤- ۷- نسبت سطح محصول بر حسب زمان در سه دبی جرمی هوا. ٤۷
شکل ٤- ۸- نرخ تغییر نسبت سطح مقطع محصول بر حسب زمان در سه دبی جرمی هوا. ٤۷
شکل ٤- ۹- منحنی سطح محصول بر حسب نسبت رطوبت محصول در سه دبی جرمی هوا. ٤۸
شکل ٤- ۱۰- نسبت حجم رطوبت تبخیر شده بر حسب نسبت تغییر حجم محصول. ٤۹
شکل ٤- ۱۱- نسبت تغییر حجم محصول بر حسب نسبت رطوبت آن ٤۹
شکل ٤- ۱۲- چروکیدگی محصول بر حسب نسبت رطوبت آن. ٥۱
شکل ٤- ۱۳- نسبت چگالی محصول بر حسب نسبت رطوبت آن. ٥۱
شکل ٤- ۱٤- نسبت حجم محصول بر حسب محتوای رطوبتی محصول. ٥۲
شکل ٤- ۱٥- اختلاف رنگ کلی بر حسب زمان. ٥۳
شکل ٤- ۱٦- تغییرات ضریب قهوه‌ای شدن برحسب زمان. ٥۳
شکل ٤- ۱۷- اختلاف رنگ کلی بر حسب نسبت رطوبت محصول. ٥٤
شکل ٤- ۱۸- منحنی تغییر ضریب قهوه‌ای شدن بر حسب نسبت رطوبت. ٥٤
شکل ٤- ۱۹- انرژی تابشی دریافتی توسط کلکتور بر حسب زمان. ٥٦
شکل ٤- ۲۰- انرژی دریافتی توسط هوا در عبور از کلکتور از کانال کلکتور بر حسب زمان. ٥٦
شکل ٤- ۲۱- راندمان انرژی خشک شدن محصول بر حسب زمان. ٥۸
شکل ٤- ۲۲- منحنی راندمان انرژی برحسب نسبت رطوبت. ٥۸
شکل ٤- ۲۳- منحنی انرژی برگشت ناپذیر در کلکتور بر حسب زمان. ٦۰
شکل ٤- ۲٤- انرژی برگشت‌ناپذیر در کلکتور بر حسب دمای خروجی کلکتور. ٦۰
شکل ٤- ۲٥- اگزرژی جریان خروجی از کلکتور بر حسب زمان. ٦۱
شکل ٤- ۲٦- اگزرژی رطوبتی محصول بر حسب نسبت رطوبت. ٦۳
شکل ٤- ۲۷- راندمان اگزرژی خشک شدن محصول بر حسب زمان خشک شدن. ٦۳
شکل ٤- ۲۸- منحنی راندمان اگزرژی خشک شدن محصول بر حسب رطوبت محصول. ٦٤

جدول علائم و اختصارات

علائم		
علامت	شرح	واحد
A	سطح مقطع	m
B	نسبت حجم قسمت جامد به حجم اولیه محصول در طول خشک شدن آن	.....
BI	ضریب قهوه‌ای بودن	.....
Cp	گرمای ویژه	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
d	چگالی	$g\ cm^{-3}$
ΔA	تغییرات سطح	m^2
Δl	تغییرات ضخامت	m
ΔV	تغییرات ضخامت	m^3
E	انرژی	J
Eff	راندمان	٪
exp	تجربی	....
g	شتاب گرانش	$m\ s^{-2}$
h	انتالپی	$J\ kg^{-1}$
H	رطوبت	$g_{water}\ g^{-1}_{dry\ air}$
I_t	شدت تابش	$W\ m^{-2}$
Irr	برگشت‌ناپذیری	J
l	ضخامت	m
M	جرم مولی	$g\ mol^{-1}$
m	جرم	g
$\dot{m}$	دبی جرمی	$kg\ s^{-1}$
MC_{db}	محتوای رطوبتی بر مبنای خشک	$g_{water}\ g^{-1}_{dry\ matter}$
MC_{wb}	محتوای رطوبتی بر مبنای تر	$g_{water}\ g^{-1}_{total}$
MR	نسبت رطوبت	.....
P	فشار	Pa
pre	پیش‌بینی شده	....
Q	گرما	J

علامت	شرح	واحد
S	انتروپی	$J\ kg^{-1}$
sh	چروکیدگی	.....
T	دما	K (°C)
t	زمان	s
U	انرژی درونی	$J\ kg^{-1}$
V	حجم	m^3
$\overline{V}$	سرعت	$m\ s^{-1}$
W	کار	J
WAC	ظرفیت جذب آب	.....
X	اگزرژی	J
Z	ارتفاع	m
ΔE	تغییر رنگ کلی	.....
L^*, a^*, b^*	شاخص‌های رنگ CIE	.....
$k, k_1, k_2, a, b, c, d, g$	ثابت‌های معادلات	.....
α_p	ضریب جذب صفحات جاذب	.....
τ_g	ضریب گذر شیشه	.....
β	ضریب چروکیدگی	.....

اندیس‌ها

a	هوا	.....
CH	شیمیایی	.....
ch	محفظه خشک‌کن	.....
$C.V$	حجم کنترل	.....
$coll$	کلکتور	.....
cr	بحرانی	.....
e	خروجی	.....
$energ$	انرژی	.....
$exerg$	اگزرژی	.....
eq	تعادلی	.....

علامت	شرح	واحد
evap	تبخیر	.....
f	مایع اشباع	.....
fg	اختلاف مایع اشباع و بخار اشباع	.....
g	بخار اشباع	.....
gen	تولید	.....
H	منبع گرمایی	.....
i	ورودی	.....
KN	جنبشی	.....
o	حالت اولیه	.....
PH	فیزیکی	.....
rad	تابشی	.....
s	خورشید	.....
v	بخار	.....
w	آب	.....
0	حالت مرده	.....

چکیده

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای استفاده بهینه از منابع انرژی تجدیدناپذیر صورت گرفته است. در بین منابع انرژی تجدیدپذیر، خورشید به عنوان یک منبع انرژی دردسترس و پاکیزه در کشور ما در کلیه علوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از روش‌های نگهداری آن‌ها برای طولانی مدت است. برای خشک کردن محصولات کشاورزی روش‌های متعددی وجود دارد. خشک کردن به روش سنتی خورشیدی از دیرباز مورد استفاده تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان محصولات خشک بوده است. اما امروزه خشک‌کن‌های خورشیدی جهت افزایش کیفیت و بهداشت مواد خشک به جای روش سنتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل ترمودینامیکی روشی است که برای تعیین راندمان دمایی سیستم‌های گرمایی به کار برده می‌شود. بررسی راندمان حرارتی سیستم در کنار تعیین پارامترهای کیفی محصول می‌تواند به بهینه‌سازی یک خشک‌کن خورشیدی کمک کند. بنابراین هدف این تحقیق بررسی تحلیل ترمودینامیکی یک خشک‌کن خورشیدی با جریان همرفت اجباری در کنار تعیین پارامترهای کیفی محصول خشک است. برای تحقق این هدف سه دبی جرمی هوای ۰/۰۱۶، ۰/۰۴۱، ۰/۰۸۲ کیلوگرم برثانیه به عنوان همرفت طبیعی، جریان با سرعت کم و جریان با سرعت بالا مد نظر قرار گرفت و تحلیل انرژی و اگزرژی در خشک کردن ورقه‌های نازک محصول موز مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل انرژی بهره‌وری انرژی در خشک کردن محصول و در تحلیل اگزرژی بهره‌وری اگزرژی سیستم و مقدار برگشت‌ناپذیری اگزرژی مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهره‌روی انرژی از دبی جرمی جریان مستقل و با افت رطوبت یک روند نزولی دارد. در حالیکه بیشترین بهره‌وری اگزرژی در جریان همرفت طبیعی مشاهده شد. همچنین بهترین بهره‌وری از سیستم در نزدیک رطوبت بحرانی محصول مشاهده شد.برای تعیین پارامترهای کیفی محصول خشک دو پارامتر تغییر رنگ و چروکیدگی محصول به صورت سینتیکی در طول خشک شدن با روش آنالیز تصویر مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفت. تحلیل چروکیدگی از دو لحاظ تغییر سطح مقطع محصول و تغییر حجم محصول مورد مطالعه قرار گرفت و برای تعیین تغییر رنگ محصول دو پارامتر تغییر رنگ کلی و شاخص قهوه‌ای شدن محصول در سیستم رنگی CIE $L^* a^* b^*$ اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از پارمترهای کیفی نشان داد که تغییر سطح و حجم موز وابسته به مقدار رطوبت آن است و از دبی جرمی و دمای هوای محفظه مستقل است در حالیکه تغییر رنگ با تغییر دبی جرمی تغییر می‌کند. کمترین قهوه‌ای شدن در دبی جرمی ۰/۰۴۱ کیلوگرم هوای خشک بر ثانیه مشاهده شد. همچنین تغییر حجم محصول در رطوبت‌های بیشتر از رطوبت بحرانی از حجم رطوبت تبخیر شده بیشتر و در رطوبت‌های پایین‌تر از رطوبت بحرانی با حجم آب تبخیر شده از محصول برابر است. مطالعه تغییر رنگ همچنین نشان داد که تأثیر سرعت هوا و دمای محفظه در رطوبت‌های پایین بیشتر است. پارامتر ظرفیت جذب نهایی آب نیز به عنوان پارامتر دیگری در تعیین کیفیت محصول در نظر گرفته شد و بین سه دبی جرمی تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۹۵ مشاهده نشد.

کلمات کلیدی: سینتیک خشک شدن، تغییر رنگ کلی، ضریب قهوه‌ای شدن، چروکیدگی سطحی، چروکیدگی حجمی، انرژی، اگزرژی، برگشت‌ناپذیری

فصل اول
مقدمه و هدف

یکی از روش‌های نگهداری مواد غذایی برای طولانی مدت خشک کردن آن‌هاست. برای خشک کردن محصولات کشاورزی روش‌های متعددی وجود دارد [۵۴]. انرژی لازم برای خشک کردن محصولات می‌تواند از منابع مختلفی تهیه شود. تلاش برای استفاده از انرژی‌های نو مسأله‌ای است که در عصر حاضر بسیاری از علوم را معطوف خود ساخته است. خورشید یکی از منابع انرژی است که از جمله کم هزینه‌ترین، پاک‌ترین و در دسترس‌ترین منابع انرژی موجود می‌باشد. به دلیل بالا بودن پتانسیل استفاده از این انرژی در کشورمان لازم است تلاش بیشتری در استفاده بهینه از آن در کلیه علوم از جمله کشاورزی صورت پذیرد. تحلیل دمایی سیستم‌های خورشیدی به منظور افزایش راندمان امری ضروری برای استفاده بهتر از انرژی خورشید است.

تحلیل ترمودینامیکی، مخصوصاً تحلیل اگزرژی به عنوان یک ابزار مهم برای طراحی سیستم‌های خورشیدی و محاسبه راندمان آن به عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی دمایی این سیستم‌ها می‌باشد [۱]. اگزرژی به مفهوم ماکزیمم کاری است که یک سیستم می‌تواند به صورت برگشت‌پذیر انجام دهد تا به تعادل با محیط اطراف خود برسد [۴۷]. تحلیل اگزرژی در زمینه‌های مختلفی از جمله گرم‌کن‌های خورشیدی[۱] [۵۳؛ ۴۶]، نمک‌زداهای آب خورشیدی[۲] [۲۵؛ ۲۳]، سیستم‌های تهویه مطبوع و خنک‌کن‌های

---

[۱] Solar heater

[۲] Solar water desalination

خورشیدی[۱] [۲۹]، خشک‌کن‌های خورشیدی[۲] [۴۷] و سیستم‌های تولید توان خورشیدی[۳] [۳۳] انجام می‌شود. مطالعات متنوعی در زمینه تحلیل انرژی و اگزرژی اقسام خشک‌کن‌های خورشیدی انجام گرفته است [۴۷]. در این مطالعات پارامترهای عملیاتی و طراحی به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرارگرفته‌اند. تأثیر این پارامترها و مخصوصاً پارامترهای عملیاتی از قبیل دما و زمان خشک کردن، سرعت فن و ضخامت ورقه میوه‌ها بر افزایش راندمان خشک‌کن و همچنین بالا بودن دقت مطالعات تجربی، افزایش مطالعه در این زمینه را امری ضروری می‌نماید.

در زمینه مطالعه انرژی و اگزرژی خشک‌کن‌های خورشیدی مطالعات متنوعی صوت پذیرفته است [۴۷]. به دلیل پیچیدگی‌های موجود در عملیات خشک کردن، تعاریف و روش‌های متنوعی برای تحلیل‌های ترمودینامیکی این سیستم‌ها به کار برده شده است. راندمان انرژی و اگزرژی سیستم طی خشک شدن محصول در طول روز و در طول عملیات رطوبت‌زدایی تغییر می‌کند [۱۱]. همچنین سرعت فن می‌تواند بر این دو راندمان تأثیر بگذارد [۱]. در این تحقیق، علاوه بر ارائه روشی مناسب برای تحلیل ترمودینامیکی عملیات خشک کردن به مطالعه و ارزیابی سینتیک دو پارامتر مهم کیفی تغییر رنگ و چروکیدگی طی خشک کردن ورقه‌های نازک موز در دبی‌های مختلف جرمی هوای خشک کننده پرداخته می‌شود.

آنچه که در تحلیل انرژی یک خشک‌کن خورشیدی بررسی می‌شود، محاسبه مقادیر انرژی دریافتی توسط کلکتور و مقدار مصرف آن در محفظه خشک‌کن طی عملیات خشک کردن برای کاهش رطوبت محصول است. در تحلیل اگزرژی نیز مقادیر اگزرژی دریافتی از خورشید و تغییرات آن در قسمت‌های خشک‌کن محاسبه می‌شود. در نهایت، راندمان انرژی بر اساس نسبت مقدار انرژی مصرفی به دریافتی و راندمان اگزرژی بر اساس نسبت مقدار اگزرژی ورودی به خروجی محاسبه می‌شوند.

موز میوه‌ای استوایی با خواص فراوان است. همچنین این میوه یکی از میوه‌های پرطرفدار مردم کشور ما می‌باشد. محصولات خشک در صورتی که از کیفیت مناسبی برخوردار باشند می‌توانند تا حدی جایگزینی برای محصول تازه شوند. بنابراین دیگر هدف این تحقیق بررسی کیفی محصول خشک است.

به منظور ارزیابی کیفیت مواد غذایی مطالعات متنوعی انجام شده است و پارامترهای مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۳؛ ۴۵]. گرما و اکسیداسیون طی فرایند خشک شدن، خصوصیات سطحی ماده غذایی نظیر قابلیت انعکاس نور و رنگ نمونه‌ها را تغییر می‌دهد و علاوه بر آنچه که در قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی رخ می‌دهد، موجب ایجاد تغییرات شیمیایی در رنگ‌دانه‌های کلروفیل و کاروتنوئید

---

[۱] Solar air conditioning and refrigeration systems

[۲] Solar dryers

[۳] Solar power generation

شده و افت کیفیت محصول را به همراه دارد. قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی در نتیجه واکنش بین آلدوز[۱] و گروه‌های آمینواسید بوجود می‌آید که موجب تشکیل ملانویدین‌ها[۲] را می‌شوند، که در واقع پلیمرها یا کوپلیمرهای نیتروژنی قهوه‌ای هستند [۲۸]. اندازه‌گیری شاخص‌های تغییر رنگ طی خشک شدن مواد غذایی نیز توسط محققان مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۲؛ ۳۶؛ ۵۸].

لیته و همکاران (۲۰۰۷) در ارزیابی کیفیت موز ، شاخص‌های میکروبی آن را به عنوان پارامترکیفی در طی خشک شدن در نظر گرفتند [۳۳]. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش دما باعث کاهش بیشتر پروتئین‌ها و ساکاروز می‌شود. آن‌ها دلیل این مسأله را مشارکت این مواد در واکنش‌های میلارد[۳] در قهوه‌ای شدن دانسته و پیش‌بینی کردند که با کنترل جریان جرمی و دمای هوا می‌توان کیفیت محصول را افزایش داد. تأثیر دما، ضخامت، درجه رسیدگی و شدت جریان بر تغییر رنگ محصول موز توسط افراد متفاوتی مورد تحقیق قرار گرفته است [۱۲؛ ۷]. در این تحقیقات درجه رسیدگی [۷] و دما [۱۸] به عنوان دو پارامتر مهم در تغییر رنگ محصول ارزیابی شدند. چوا و موجومدار (۲۰۰۱) ، ورقه‌های نازک موز را با تغییرات گام به گام در دمای هوا برای تغییرات غیرآنزیمی رنگ بررسی کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که موز به عنوان یک محصول با محتوای قند بالا باید طوری خشک شود که همیشه یک لایه رطوبت سطحی در گام‌های اولیه خشک شدن داشته باشد. کاهش نرخ خشک شدن در ابتدای عملیات باعث می‌شود که رطوبت داخلی زمان لازم برای نفوذ به سطح را داشته باشد و در طول عملیات سطح محصول دارای لایه رطوبتی نازکی باشد [۱۲].

چروکیده شدن محصولات حین عملیات خشک شدن نیز همواره یکی از مباحث مورد توجه در این زمینه بوده است. اغلب سیستم‌های جامد و نیمه‌جامد مواد غذایی از مواد غیر همگنی تشکیل شده‌اند که به صورت یک شبکه سه بعدی مقدار زیادی فاز مایع را در خود نگه داشته‌اند. ساختار خاص مواد غذایی و ویژگی ویسکوالاستیک آن‌ها باعث می‌شود که هنگام خروج آب از ماده غذایی فشار نامتعادلی بین داخل و خارج شبکه‌ها بوجود بیاید که انقباض شبکه، چروکیدگی و گاه ایجاد ترک‌هایی در محصول را به دنبال دارد [۳۷]. کاهش رطوبت در محصولات می‌تواند منجر به بروز چروکیدگی غیرایزوتروپیک در آن‌ها شود [۶۱،۲۲]. چروکیدگی غیرایزوتروپیک در اثر تغییر زیاد رطوبت و سرعت بالای خشک کردن، تحریک شبکه مواد جامد در رطوبت‌های پایین و ایجاد تنش‌های ناگهانی مانند دمای بالا اتفاق می‌افتد

---

[۱] Aldoses

[۲] Melanoidins

[۳] Millard reactions

[۲۸]. چروکیدگی غیرایزوتروپیک به این مفهوم است که فضاهای خالی در محصول دچار انقباض یا انبساط شده‌اند.

پدیده چروکیدگی بر ضریب نفوذ ماده که عامل اصلی در عملیات خشک شدن است، مؤثر است. همچنین این پدیده بر نرخ خشک شدن نیز تأثیر می‌گذارد [۵؛ ۲۴؛ ۵۷]. چروکیدگی را می‌توان به طور مستقیم با روش‌های حجمی و پیکنومتری [۴۸؛ ۶۲؛ ۶۴] و با کولیس اندازه‌گیری کرد. همچنین می‌توان آن را به روش‌های غیرمستقیم از طریق عکس‌برداری از نمونه‌ها و پردازش تصویر با یک نرم‌افزار انجام داد [۱۸؛ ۲۱].

تأثیر پارامترهای عملیاتی دما [۳۸؛ ۴۹؛ ۶۱]، سرعت هوا [۴۹؛ ۶۱]، رطوبت نسبی هوا [۴۹] بر چروکیدگی محصولات مختلف در خشک کردن آن‌ها با هوای داغ توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج متفاوتی بدست آمده است [۳۷].

مطالعه چروکیدگی موز توسط نویسندگان مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸؛ ۵۷؛ ۶۲]. طی تحقیقی تالا (۲۰۰۴) به این نتیجه رسید که تأثیر دما بر چروکیدگی موز قابل صرف نظر است [۵۷]. ابراهیمی (۲۰۱۲) نیز به این نتیجه رسید که از بین سه پارامتر دما، ضخامت و سرعت هوا تأثیر ضخامت بر چروکیدگی از سایر پارامترها بیشتر است [۱۸].

پارامتر ظرفیت جذب آب[۱] نیز پارامتر دیگری برای تعیین کیفیت مواد غذایی است و هر چه مقدار آن پس از خشک شدن محصول بیشتر باشد آسیب‌های وارد شده به بافت محصول کمتر و کیفیت محصول خشک بالاتر است.

در استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی تغییر سرعت هوا علاوه بر ایجاد اغتشاش در جریان موجب تغییر دمای محفظه نیز می‌شود. تغییر همزمان این دو پارامتر می‌تواند بر پارامترهای کیفی محصول خشک شده تأثیر بگذارد. با این وجود تا کنون مطالعات زیادی در زمینه بررسی تغییر رنگ و چروکیدگی محصولات در خشک شدن با این روش انجام نشده است.

به این ترتیب اهداف این تحقیق به ترتیب زیر بیان می‌شوند:

۱. تحلیل انرژی و اگزرژی خشک کردن ورقه‌های موز توسط یک خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری در دبی‌های مختلف جرمی هوا.

۲. مطالعه سینتیک تغییر رنگ و چروکیدگی محصول و اندازه‌گیری ظرفیت جذب نهایی آب در دبی‌های جرمی مختلف هوا

[۱] Water absobtion capacity