



CV و فعالیتهای فرهنگی

Aazar 93

Name : Ali Asghar علی اصغر
Surname : Zomorodian زمردیان
Date and place of Birth : 2 Feb 1952 Shiraz, Iran (۹۰/۲/۱۳۳۱)

Instructor: Oct. 1979 مربی (ابان ۱۳۵۸)
Assistant professor: Sep. 1997 استاد یار (مهر ۱۳۷۶)
Associate professor: Feb. 2008 دانشیار (اسفند ۱۳۸۵)
Full professor: Feb. 2012 استاد تمام (خرداد ۱۳۹۱)
Retirement: August 2013 بازنشسته با ۳۷ خدمت (مرداد ۱۳۹۲)

سرپرست موسسه آموزش ارم شیراز از مرداد ۹۲ تا کنون

آدرس محل سکونت: بلوار فرهنگ شهر - خیابان ش. رحمتی - مجتمع فرزندگان واحد ۴۳۶

Email: zomorod@shirazu.ac.ir
zomorodali@yahoo.com

Tel: +98 713 6388469 , +98 7136465387, +987136466312
Mobil: 09177160930
Fax: +98 7136465387

QUALIFICATIONS:

Academic:

Bsc Ag. Eng. Shiraz University, Iran, 1974

Msc Ag. Eng. Shiraz University, Iran, 1979 (area of thesis: post harvest technology, cereal drying)

Ph.D Ag. Eng. Dept. University of Newcastle upon Tyne, U.K. 1996 (area of thesis: air solar collector , crop drying, heat and mass transfer).

فعالیت های فرهنگی:

- شرکت مستمر در جلسات دینی حاج اقا حاءری شیزازی در سال ۵۲ و نهایتا دستگیری توسط ساواک در شب ۱۳ فروردین ماه سال ۵۳ و گرفتار شدن در کمیته ساواک و سلولهای انفرادی زندان عادل اباد بمدت دو ماه . بعضی از همراهان: مجید روزیطلب - حاجی دهقان - کاظم حکمت اراء - رحیم صفاءى کاظم مروج - غلام شه کلاهی - مجید نظر بلند و.... کلا ۵۳ نفر بودیم
- شرکت در فعالیتهای فرهنگی در دانشگاه زنجان در دوره انقلاب فرهنگی نظیر روستا گردی و همیاری با نیازمندان - مشاوره علمی و فنی در زمینه های مختلف در روستا های استان
- شرکت مستمر در جلسات دینی و فرهنگی در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در هر هفته صبحهای چهارشنبه
- گذراندن دوره فشرده آموزش و توانمندی های دینی و فرهنگی در تاریخ رمضان سال ۱۳۸۹ بمدت ۱۰ روز در دانشکده علوم تربیتی دانشگاه شیراز و برنده شدن یک فقره حج عمره در آخر دوره
- تشریف به مکه مکرمه جهت انجام فریضه حج تمتع در بهمن ساله ۷۹ با کاروان حاج عاطفی نیا
- عضویت افتخاری در خیریه امام علی - علی بن حمزه - درمانگاه ولیعصر - ایتمام مهدی فاطمه و چند خیریه دیگر
- انجام امور مشاوره با دانشجویان نیاز مند به کمک در کل دوره فعالیت کاری بمدت ۳۵ سال

Teaching Experience:

1- Undergraduate courses:

Internal combustion engines
Motor and farm machineries
Harvesting machineries
Animal husbandry machines
Design of food processing plants in a factory
Agricultural processing machineries
Land leveling machineries

2- Graduate courses

Physical properties of agricultural products (Msc course)
Recent topics in agricultural engineering (Msc course)
Post harvest technology (PhD course)

Professional:

- 1- Member, board of director, Iranian society of Agricultural Machinery and Mechanization
- 2- Member, Iranian Solar Energy Society
- 3- Member, Iranian Inventors Association
- 4- Member, Iranian Talented Association

Major research project:

I - طرحهای تحقیقاتی انجام شده و در دست اجرا یا اقدام:

- ۱- طرح تحقیقاتی: طراحی و ساخت خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی. طرح ملی ۵۵۱. تاریخ شروع: مهر ۱۳۷۷ و پایان: شهریور ۱۳۸۰. ارسال گزارش نهایی اسفند ۱۳۸۰.
- ۲- طرح تحقیقاتی: تعیین در صد رطوبت تعادلی برای واریته های مختلف پسته ایرانی. طرح AG۷۸-۱۲۲۹-۶۶۶. تاریخ شروع: مهر ۱۳۷۸ و پایان ۱۳۸۰. ارسال گزارش نهایی: آذر ۱۳۸۱.
- ۳- طرح تحقیقاتی: الحاق یک بار زن اتوماتیک و حس کننده رطوبتی به خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی. طرح ۸۲ AG-۱۶۰۹ C-۲۴۲. تاریخ شروع تیر ۱۳۸۲. گزارش نهایی فروردین ۸۵.
- ۴- طرح تحقیقاتی: طراحی، ساخت و ارزیابی یک خشک کن خورشیدی برای انگور و زردآلو بصورت فعال و غیر فعال. طرح C ۲۹۴- ۱۷۵۴ AG- ۸۳. تاریخ شروع ۸۳/۱۲/۱.

II- Msc by research supervision:

- 1- Designing and fabricating a new solar air collector with slatted plate cover (1999) by: Fardin Ranjbar
- 2- Designing , fabricating and evaluating a natural convection solar dryer for paddy (1999) by: Reza Allamed
- 3- Designing , fabricating and evaluating of two porous absorber air solar collector with slatted and flat glass cover (2000) by: Samad Joukar
- 4- Designing , fabricating a semi-continuous solar dryer for corn (2001) by: Hamid Ghasemkhani
- 5- Determining Equilibrium Moisture Content isotherms for Pistachio using the thin-layer drying method and choosing appropriate mathematical model to predict the EMC of three Iranian Pistachio varieties (2002) by: Rajab Tavakoli
- 6- Evaluation of a semi-continuous solar dryer for cereals(rice) (2002) by: Darush Zare
- 7- Solar drying evaluation for Dill with the aid of a passive and active solar dryer (2003) Yaser Sahebi
- 8- Adding an automatic loading system to the semi-continuous solar dryer (2003) Armin Kohan
- 9- Designing and evaluating a new and simple automatic control system for green house (2003) Mohamad Sarvi
- 10- Designing, fabricating and evaluating a flat plate solar air heater with different perforated aluminum sheet absorber (2003) Mahmood Barati
- 11- Designing, fabricating and evaluating a solar energy low temperature Stirling engine (2005) Ali Tavakolpour
- 12- Designing, fabricating and evaluating an active and passive solar dryer for grape and apricot(2006) M. Dadashzade
- 13- Designing, fabricating and evaluating a small size solar dryer for Safferon(2006). M.Moradi
- 14- راهنمایی پایان نامه کارشناسی ارشد - ۲۰ مورد
- 15- راهنمایی پایان نامه دکترا- ۲ مورد
- 16- مشاورت در پایان نامه کارشناسی ارشد - ۳۷ مورد

Bsc projects

- 1- Designing, fabricating and evaluating a simple solar cooker (2000 and 2002)
- 2- Designing, fabricating and evaluating a simple solar fryer (2001 and 2002)
- 3- Designing and testing a new nut hard skin husker (2001)
- 4- Fabricating a lab size oblique rake (2006)

List of publications

• ثبت اختراعات

- ۱- خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی غلات شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۲۹۳۶۰. تاریخ ۱۳۸۲/۱۱/۲۹.
- ۲- خشک کن خورشیدی بطریقه غیر مستقیم و مختلط برای تهیه میوه جات خشک شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۳۸۰۴۱ تاریخ ۱۳۸۵/۹/۲۸.
- ۳- خشک کن کابینتی برای میوه جات با رویکرد توزیع یکنواخت جریان و درجه حرارت هوای خشک کننده در آن شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۶۱۱۶۹ تاریخ ۱۳۸۸/۷/۴.
- ۴- دستگاه سنجش پیوسته و آنلاین محتوای رطوبتی دانه با قابلیت کنترل عملکرد دستگاه های خشک کن. شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۶۱۵۷۳ تاریخ ۱۳۸۸/۸/۴.
- ۵- خشک کن خورشیدی غیر مستقیم گردو بصورت توده ای. شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۶۷۶۵۳ تاریخ ۱۳۸۹/۹/۸.
- ۶- هوا گرمکن خورشیدی با پوشش و جاذب جدید. شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۶۹۵۷۲ تاریخ ۱۳۹۰/۱/۳۰.
- ۷- خشک کن نیمه هوشمند خورشیدی با توانائی سنجش پیوسته محتوای رطوبتی محصولات غذایی بوسیله تکنیک ماشین بینائی. شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۶۹۶۵۰ تاریخ ۱۳۹۰/۲/۵. (قبول شده در کمیته نخبگان کشور--اردیبهشت ۱۳۹۰)
- ۸- خشک کن نیمه هوشمند خورشیدی میوه ها و سبزیجات مجهز به صفحه خورشیدی. شماره ثبت اختراع در سازمان اسناد ملی کشور ۶۹۶۵۳ تاریخ ۱۳۹۰/۲/۵..

• ترجمه کتاب (علی زمردیان) :

Grain drying , theory and practice (1998) , by: S. Pabis, D. Jayas
and S. Cenkowski

عنوان کتاب : خشک کردن دانه ها، اصول نظری و عملی

موسسه انتشاراتی: نشر علوم کشاورزی. تهران- ایران

ISBN:964-6832-69-5 شماره ذخیره در کتابخانه ملی ۳۶۱۰۲-

۸۲ م . .

سال انتشار: چاپ اول فروردین ۱۳۸۳ چاپ دوم اردیبهشت سال ۱۳۸۷

تعداد صفحات: ۴۴۳ .

• زمردیان و توکل پور برنده جایزه مقام سوم در بخش مکاینک جشنواره بین المللی خوارزمی بخاطر طراحی یک موتور دو سیلندر استرلینگ خورشیدی با دمای محدود (آذر ۱۳۸۵).

- برگزیده مخترع نمونه در دانشکده کشاورزی در سال ۱۳۸۶.
- برگزیده محقق نمونه در دانشکده کشاورزی در سال ۱۳۸۶.
- عضو بنیاد نخبگان کشور از سال ۱۳۸۶
- عضو انجمن انرژی خورشیدی ایران
- عضو انجمن مخترعین کشور
- مجری طرح: خشک کن کابینتی برای میوه جات با رویکرد توزیع یکنواخت جریان و درجه حرارت. طرح کمیته حمایتی ریاست جمهوری. زیر نظر سازمان حمایتی علمی پژوهشی مالی دفتر رییس جمهوری ۱۳۸۹-۱۳۹۱
- مجری ۸ طرح کارافرینی در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز ۱۳۷۹-۱۳۹۰

Refereed Journal

- 1- Zomorodian. A.; J.L. Woods, 2002. Performance characteristics of a transpired solar air heater. Iran Agriculture research volume 20 no. 2.
- 2- Zomorodian A. ; J.L Woods, 2003 . Modeling and testing a new once - through air solar energy collector. JAST (ISI) volume 5
- 3- Zomorodian A.; Rajab Tavakoli 2007. Adsorption-desorption hysteresis effect on pistachio nuts. JAST(ISI), volume 9, 259-265.
- 4- Zomorodian. A. and D Zare 2007. Optimization and evaluation of a semi-continuous solar dryer for cereals. International Journal of Desalination (ISI), 209, 129-135.
- 5- Tavakolpur, A.R. , A. Zomorodian, , A. A. Golneshan. 2008. Simulation, construction and testing a two-cylinder solar Stirling engine powered by flat-plate solar collector without regenerator. Renewable energy. (ISI), 33, 77-87.
- 6- Zomorodian A. , Moradi, M., 2010. Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for Cuminum Cyminum. JAST(ISI), volume 12, 401-408.
- 7- Tavakolpur, A.R. , A. Zomorodian , 2009. Thermodynamic modeling of a low temperature differential stirling engine for solar applications. JAST(ISI) (under review).
- 8-Zomorodian, A.A. and M. Dadashzadeh 2009. Indirect and mixed mode solar drying models for Sultana grape. JAST(ISI), volume 11:391-400.
- 9-Zomorodian, A.A. and M. Mehdizaceh 2009 A study of the effect of solar drying system on rice quality. JAST(ISI), volume 11: 527-534.
- 10-Zomorodian, A.A. and M. Barati 2010. Efficient solar air heater with perforated absorber for crop drying. JAST (ISI) volume 12, 569-577.
- 11- Zomorodian, A.A and Amanlou, Y. 2011· Evaluating Resistance to Air flow across a Green Fig Bed for Selecting an Appropriate Pressure Drop Prediction Equation. Food and bio products processing (ISI) Vol.89, 157-162.

- 12- Zomorodian, A.A and Kavooosi, Z. 2011. Determination of EMC isotherms and appropriate mathematical models for Canola. Food and bio product processing (ISI) Vol:89, 407-413.
- 13- Zomorodian, A.A L. Momenzadeh and D. Mowla. 2011. Experimental and Theoretical Investigation of Shelled Corn Drying in a Microwave Assisted Fluidized Bed Dryer Using Artificial Neural Network. Food and bio product processing (ISI)). Vol: 89, 15-21.
- 14-M. Moradi , **A. Zomorodian**. 2009. Thin later drying of Cuminum Cyminum Grain by means of Solar Cabinet Dryer. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.(ISI) 5(3):409-413.
- 15- Zomorodian, A.A and Amanlou, Y. 2010. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. Journal of Food Engineering (ISI) vol.101, 8-15.
- 16- Zomorodian, A.A L. Momenzadeh and D. Mowla. 2012. Applying Artificial Neural Network for Drying Time Prediction of Green Pea in a Microwave Assisted Fluidized Bed Dryer" JAST (ISI) vol. 14, 513-522.
- 17- Zomorodian, A.A and Amanlou, Y. 2011. Resistance to Air flow across a Green Fig Bed. " JAST (ISI) vol. 13, 677-685.
- 18- Zomorodian, A and L. Momenzade. 2011. Study of shelled corn shrinkage in a microwave-assisted fluidized bed dryer using artificial neural network. International journal of agriculture science (ISI). Vol, 3, Issue 3, 150-155.
- 19- Bakhshipour, A; Jafari, A, and **Zomorodian, A**. 2012. Vision based features in moisture content measurement duding raisin production. World Applied Science Journal 17(7) 860-869.
- 20- Gatre Samani, Sh. Zomorodian, A. 2012. Kenetics of apricot thin layer drying in a mixed and indirect mode solar dryer. International journal of agriculture sciences. Vol. 6. 262-266.
- 21- Gatre Samani, Sh. Zomorodian, A. 2012. Impact of drying air temperature bed depth and air flow rate on walnut drying rate in an

indirect solar dryer. International journal of agriculture sciences. Vol. 4. 252-255.

22 Zomorodian A. ; Zamanian M.. Designing and evaluating an innovative solar air collector with transpired absorber and cover. ISRN Renewable Energy. Vol.1. 1-6.

23 –Darabi, H; Zomorodian, A.: Akbari , M. 2013.Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD. DOI 10 .1007/s13197-013-0983-1

24- Barati, M.; Zomorodian, A. 2014. Designing, fabricating and evaluating JMEAST. Vol. 10 , 268-272.

25- زمردیان علی و فردین رنجبر، ۱۳۷۹. طراحی و ساخت و آزمایش یک جمع کن نده هوایی خورشیدی جدید. مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی شماره ۱۸.

26- زمردیان علی ۱۳۸۰. بررسی خواص خشک شدن بروش لایه های نازک برای برنج های ایرانی و تعیین معادله بهینه ای برای یافتن رطوبت تعادلی. مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی شماره ۷.

27- زمردیان علی و رضا علامه، ۱۳۸۱. بررسی خشک کردن شلتوک به روش لایه های نازک و تعیین ضخامت بهینه با بکار گیری یک خشک کن خورشیدی آزمایشگاهی با جریان جابجائی آزاد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ششم شماره ۴.

28- زمردیان علی و رجب توکلی، ۱۳۸۳. دستیابی به منحنی های هم دمای تعادلی و پیشنهاد مدل ریاضی مناسب برای پیش بینی رطوبت تعادل برای سه رقم پسته ایرانی. مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۵.

29- زارع داریوش و علی زمردیان، ۱۳۸۴. تاثیر دبی جرمی هوای ورودی و زمان تخلیه محصول بر روند کاهش رطوبت شلتوک در یک خشک کن خورشیدی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی جلد نهم شماره اول سال ۱۳۸۴.

30- جوکار (عرفان فر) صمد و علی زمردیان ۱۳۸۴. بررسی تاثیر پوشش های متفاوت شیشه ای (تخت و پله ای) بر بازده حرارتی یک گرمکن خورشیدی با جاذب متخلخل. مجله علمی کشاورزی جلد بیست هشتم شماره ۱

- 31- غلامرضا مصباحی - زمردیان علی و مجتبی داداش زاده ۱۳۸۵ بررسی مقایسه ای تولید کشمش به وسیله خشک کن خورشیدی و سایر روشهای خشک کردن. مجله پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران جلد ۲ شماره ۲ ۷۳-۶۱ مشهد.
- 32- علی زمردیان - مجتبی داداش زاده و غلامرضا مصباحی. ۱۳۸۷. تاثیر دبی هوای خشک کننده و نحوه خشک کردن بر روند کاهش رطوبت انگور در یک خشک کن کابینتی. مجله علوم و صنایع کشاورزی جلد ۲۲ شماره ۱ ۲۳-۳۴.
- 33- زمردیان علی مهدی مرادی. ۱۳۸۸ بررسی سنتیک خشک شدن زیره سبز در یک خشک کن خورشیدی در دو حالت تابش مختلط و غیرمستقیم. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۴۸ سال ۱۳، صفحات ۲۷۳-۲۸۲.
- 34- زمردیان علی و زهرا کاوسی. ۱۳۸۹. بررسی پدیده ی پسماند و ارزیابی رطوبت تک لایه ای جذب برای دانه کلزا. مجله بیوسیستم ایران- دانشگاه تهران. جلد (۴۱) ۱ صفحات ۱۷-۲۵.
- 35- زمردیان علی، لیلی مومن زاده و داریوش مولا. ۱۳۸۹. بکار گیری شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی میزان چروکیدگی نخود سبز در یک خشک کن بستر سیالی با کمک ماکروویو. مجله پژوهشهای علوم و صنایع غذایی. جلد ۶-شماره ۴ ۲۸۰-۲۸۹.
- 36- زمردیان علی و یاسمن امانلو ۱۳۹۰، اثر تغییرات رطوبت بر خواص فیزیکی و افت فشار در بستر انجیر سبز استهبان، مجله بیوسیستم ایران، (۴۱) ۲ صفحات ۱۳۹-۱۴۴.
- 37- زمردیان علی - اکبر جوکار. ۱۳۹۰ تعیین شرائط بهینه خشک کردن دانه انار در خشک کن خورشیدی با استفاده از رویه سطح پاسخ. مجله علمی پژوهشی تحقیقات مهندسی کشاورزی. در حال چاپ.
- 38- حسن صفیاری - زمردیان علی - حسین رحمانیان و فرهاد سلمانی زاده ۱۳۹۱. بررسی روند تغییرات خواص فیزیکی میوه خرمالو. نشریه ای علمی پژوهشی علوم و صنایع غذایی ایران. جلد ۸ شماره ۴.
- 39- حامد دارابی 1- زمردیان علی ۱۳۹۲. بررسی خواص فیزیکی دانه و بستر لیموترش به عنوان تابعی از رطوبت. نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران. جلد ۹، شماره ۳. ۲۲۲-۲۳۰.

Conference Papers

- 1- Zomorodian A. 1997. A novel solar air heater, Agricultural Engineering and Technology Exhibition Dhaka, Bangladesh.
- 2- Zomorodian A. and Samad Joukar, 2002. A novel once – through solar air heater. AG. ENG. Szent Istvan University, Budapest
- 3-Zomorodian A.; D.Zare and H. Ghasemkhni , 2004. Optimization and evaluation of a semi-continuous solar dryer for cereals. The 8th. Arab international solar energy conference . Kingdom of Bahrain.
- 4-Zomorodian A.; Rajab Tavakoli 2005. Adsorption-desorption hysteresis effect on pistachio nuts. 7th Fruit, nut and vegetable production engineering symposium 12-16 Sep. 2005, Montpellier, France
- 5-Sahebi, M.Almasi and A.Zomorodian 2006. Evaluation of Dill drying with the aid of a passive and active solar dryer. 2006 CIGR section VI international symposium on future of food engineering , Warsaw, Poland 26-28 April 2006.
- 6- Zomorodian A. and M. Barati. A single glazed solar air heater with metallic transpired absorber for solar dryers. 2006 CIGR and Ag. Eng.Agricultural Engineering for a Better World. 3-7 Sep. 2006 Bonn, Germany.
- 7- Zomorodian, A.A 2008. Indirect and mixed mode solar drying models for Sultana grapes. 23-25 June.Ag. Eng. 2008, Greece, Certe
- 8- -Zomorodian, A.A. and A.R. Tavakolpour . 2008 . Low Temperature Solar Stirling Engine. International Renewable Energy congress. 27-29 June 2008. U.K.Glasgow
- 9- Zomorodian, A.A. , Moradi, M, D. Zare. Mixed mode thin layer solar drying models for Cuminum Cyminum . Antageng (Turkey), 10th international congress on mechanization and energy in agriculture 17-19 Oct 2008.
- 10- Zomorodian, A., Y. Sahebi and M. Almasi. Efficiency measurement of a passive solar dryer. Antageng (Turkey), 10th international congress on mechanization and energy in agriculture 17-19 Oct 2008.

- 11- Zomorodian, A and. Kavoosi, Z. Investigating Hysteresis effect and monolayer moisture adsorption for Canola. XXXIII CIOSTA CIGR V Conference: Technology and Management to Ensure Sustainability Agriculture, Agro System, Forestry and Safety. 17- 19 June 2009, Reggio, Calabria, Italy.
- 12- Zomorodian, A and. Amanluo, Y. Evaluating resistance to air flow across a Green Fig bed for selecting an appropriate pressure drop prediction equation. . XXXIII CIOSTA CIGR V Conference: Technology and Management to Ensure Sustainability Agriculture, Agro System, Forestry and Safety. 17- 19 June 2009, Reggio, Calabria, Italy
- 13- Zomorodian, A. L. Momenzade, D Mowla. Investigation of shelled corn drying in a microwave assisted fluidized bed dryer using artificial neural network. In XVII World congress of the international commission of ag. And bio. Eng. (CIGR), Quebec city, Canada. June 13-17, 2010.
- 17- Zare. D, A.Zomorodian, A. Bakhshipour. Physical properties of Cumin and Cayway seeds. In XVII World congress of the international commission of ag. And bio. Eng. (CIGR), Quebec city, Canada. June 13-17, 2010.
- 18- Zomorodian, A. L. Momenzade, D Mowla. Applying artificial neural network for shrinkage prediction of shelled corn in a microwave assisted fluidized bed dryer. In International conference of Ag. Eng., Clermont-Ferrand, France Sep. 6-8, 2010.
- 19- Zomorodian, A .,Y. Amanluo, and D Fadaia. Investigating a gaseous assisted solar cabinet dryer using CFD. In XXXIV CIOSTA CIGR V conference Austria, Vienna 29 June-1 July 2011.
- 20- Zomorodian, A. and S. Samani. Iranian walnut moisture dependent physical properties. In XXXIV CIOSTA CIGR V conference Austria, Vienna 29 June-1 July 2011.
- 21- Zomorodian, A. and L. Momenzade. Investigating the drying time of green pea in a microwave assisted fluidized bed dryer using artificial neural network. In XXXIV CIOSTA CIGR V conference Austria, Vienna 29 June-1 July 2011.
- 22- Zomorodian, A. and M. Dadashzade. Kenetics of apricot thin layer drying in a mixed and indirect mode solar dryer. In XXXIV CIOSTA CIGR V conference Austria, Vienna 29 June-1 July 2011.

- 23- Zomorodian, A. and S. Samani. Impacts of drying air temperature and bulk depth on walnut drying rate in an indirect solar dryer. In XXXIV CIOSTA CIGR V conference Austria, Vienna 29 June-1 July 2011.
- 24- Zomorodian, A. and L. Momenzade. Applying artificial neural network for shrinkage of green peaIn 11th International congress on mechanization and energy in agriculture. Turkey, 23-25 sep 2011.
- 25- Zomorodian, A. and H. Darabi. Evaluating resistance to air flow across lemon fruit bed for selecting an appropriate pressure drop prediction. In the First Middle East Drying Conference. Feb 2012. Mahshar, Iran
- 26- Rousapur, O and Zomorodian, A. Development and Evaluation of a Mixed and active solar dryer with variable inclination. Int. conf. on Ag. Eng. March 2013. Masghat.

۲۷-زمردیان علی. طراحی و آزمایش یک کالکتور هوایی خورشیدی با جاذب نفوذ پذیر در اولین کنگره ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون ۱۳۷۷

۲۸- زمردیان علی و حمید قاسم خانی. طراحی، ساخت و آزمایش یک خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی برای غلات. در دومین کنگره ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون ۱۳۸۰

۲۹- زمردیان علی. معرفی یک خشک کن خورشیدی برای انگور و زردآلو بروش همرفتی فعال با بکار گیری پانل فتولتائیک. کنفرانس ملی خشکبار ایران، جهاد کشاورزی آذربایجان شرقی، تبریز ۱۳۸۲.

۳۰- زمردیان علی و رجب توکلی. بررسی خشک کردن پسته به طریقه لایه های نازک برای دستیابی به منحنی های همدمای تعادلی و تعیین مدل ریاضی مناسب برای پیش بینی رطوبت تعادل برای سه رقم پسته ایرانی. در سومین کنفرانس ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه کرمان، شهریور ۱۳۸۳.

۳۱- زمردیان علی و محمود براتی. هوا گرم کن تک پوشش خورشیدی با جاذب فلزی سوراخ دار برای خشک کن های خورشیدی. در چهارمین کنفرانس ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه تبریز، شهریور ۱۳۸۵.

۳۲- زمردیان علی و علیرضا توکل پور. طراحی ساخت یک موتور استرلینگ دو سیلندر با دمای محدود. در چهارمین کنفرانس ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه تبریز، شهریور ۱۳۸۵.

۳۳- زمردیان علی و مهدی مرادی. انتخاب مناسبترین مدل ریاضی برای خشک کردن زیره سبز در حالت تابش غیر مستقیم در خشک کن خورشیدی فعال. پنجمین کنفرانس ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه فردوسی مشهد شهریور ۱۳۸۷.

- ۳۴- زمردیان علی و یاسمن امانلو. بررسی برخی خواص فیزیکی، اصطکاکی و آیرودینامیکی انجیر خشک. پنجمین کنفرانس ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه فردوسی مشهد شهریور ۱۳۸۷
- ۳۵- زمردیان علی و مجتبی داداش زاده. بررسی اثر سرعت هوای خشک کننده و نحوه خشک کردن بر روی مدت زمان لازم برای خشک کردن زردآلو در یک خشک کن خورشیدی کابینتی. پنجمین کنفرانس ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه فردوسی مشهد شهریور ۱۳۸۷.
۳۶. زمردیان علی و مهدی مرادی بررسی تاثیر دبی هوای خشک کننده بر خشک کردن زیره سبز در خشک کن خورشیدی در حالت تابش غیرمستقیم. هجدهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی. ۲۴-۲۶ مهرماه ۱۳۸۷ مشهد.
- ۳۷- زمردیان علی و مهدی مرادی. تاثیر تغییر پارامترهای دما و سرعت هوای خشک کننده انرژی خورشیدی بر نرخ خشک شدن گیاه زیره سبز به منظور ارایه مناسبترین مدل ریاضی خشک نمودن. هجدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک. ۲۹-۳۱ اردیبهشت ۱۳۸۸ دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران.
- ۳۸- زمردیان علی و مهدی مرادی. ارزیابی بازده گرمایی جمع کننده خورشیدی تخت در چهار دبی متفاوت هوای عبوری از آن. هجدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک. ۲۹-۳۱ اردیبهشت ۱۳۸۸ دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران.
- ۳۹- زمردیان علی و زهرا کوسی. ۱۳۸۹ بررسی پدیده پسماند و ارزیابی رطوبت تک لایه ای جذب دانه کلزا. ششمین کنگره ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون. پردیس کرج. ۲۳-۲۵ شهریور.
- ۴۰- زمردیان علی و یاسمن امانلو. ۱۳۸۹. محاسبه افت فشار هوا در عبور از یک بستر انجیر سبز استهبان با بکار گیری مدل اصلاح شده ارگان. ششمین کنگره ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون. پردیس کرج. ۲۳-۲۵ شهریور.
- ۴۱- زمردیان علی، اکبر جوکار و ندا مفتون آزاد. ۱۳۸۹. تعیین شرایط بهینه خشک کردن در دانه انار در یک خشک کن خورشیدی با استفاده از رویه سطح پاسخ. نوزدهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران. ۵-۷ مرداد.
- ۴۲- زمردیان علی و مریم زمانیان ۱۳۹۰- اثر ضخامت صفحه جاذب مشبک المونیومی بر راندمان حرارتی جاذب در یک کالکتور هوایی خورشیدی. نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک. ۲۰-۲۲ اردیبهشت. دانشگاه بیرجند.
- ۴۳- زمردیان علی اکبر جوکار. ۱۳۹۰. مطالعه تاثیر دبی هوا و ضخامت بر روند خشک شدن دانه انار در خشک کن خورشیدی. بیستمین کنگره ملی عتوم و صنایع غذایی ایران- ۱-۳ اذر دانشگاه صنعتی شریف تهران.
- ۴۴- زمردیان علی. ۱۳۹۰. مطالعه تاثیر دبی هوا و ضخامت بر روند خشک شدن دانه انار در خشک کن خورشیدی. بیستمین کنگره ملی عتوم و صنایع غذایی ایران- ۱-۳ اذر دانشگاه صنعتی شریف تهران.
- ۴۵- زمردیان علی و مریم زمانیان ۱۳۹۰ بررسی اثر تخلخل جاذب مشبک بر کارایی هوا گرمکن..... First middle east drying conference. ماهشهر ایران.

- ۴۶- علی غفرانی ، -زمردیان علی. ۱۳۹۱. تعیین خواص ویسکوالاستیک خرما (رقم مضافتی) در رطوبت های مختلف محصول. هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون.
- ۴۷- فرهاد سلمان زاده ، -زمردیان علی ۱۳۹۱. اثر مدت زمان نگه داری بر روی خواص ویسکوالاستیک..... هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون.
- ۴۸- مجتی داداش زاده، -زمردیان علی. ۱۳۹۱. بررسی روند خشک کردن زرد الو یک خشک..... هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون.
- ۴۹- سارا طاهری، -زمردیان علی. ۱۳۹۱. بررسی تاثیر دبی هوای خشک کننده بر خشک کردن گل نسترن. هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون.
- ۵۰- مجتی داداش زاده، -زمردیان علی. ۱۳۹۱. دلسازی ریاضی فرایند خشک کردن..... هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون.
- ۵۱- مهدی تقی پور، -زمردیان علی. ۱۳۹۱. تعیین مقادیر رطوبت تک لایه لیمو تر هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون.
- ۵۲- ماندانا محفلی، -زمردیان علی. ۱۳۹۲. مقایسه دو روش خشک کردن هشتمین کنگره ملی مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی.
- ۵۳- سارا طاهری، -زمردیان علی. ۱۳۹۲. طراحی ساخت و ارزیابی سیستم گرمایش خورشیدی گلخانه ها. هشتمین کنگره ملی مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی.
- ۵۴- فاطمه قنبری، -زمردیان علی. ۱۳۹۲. بررسی اثر تخلخل صفحه جاذب مشبک بر کارایی کلتور هشتمین کنگره ملی مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی.
- ۵۵- مهدی مرادی، -زمردیان علی. ۱۳۹۳. IMPROVEMENT OF DRYING PROCESS OF AGRICULTURE GRAINS USING INERT PARTICLES CASTE STUDY: CORN GRAINS. دومین همایش سراسری کشاورزی و منابع پایدار.

Title page

Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Safflower seed Using Empirical and Neural Network Models

Masoud Barati^{*1}, Dariush Zare², Ali Zomorodian²

- 1- Graduated from Shiraz university
 - 2- associate professor from Shiraz university
 - 3- Full professor from Shiraz university
- *- corresponding author, E-mail address: masoud.barati90@yahoo.com

Abstract

Experimental work was conducted to obtain the adsorption isotherms of safflower seed using a semi static gravimetric method at 25, 40 and 60°C over a water activity ranges from 0.11 to 0.94. Fourteen isotherm equations and multilayer artificial neural network (ANN) approach were employed for analyzing the experimental data. In order to evaluate the goodness of fit of each model Determination Coefficient (R^2), Chi-Square (χ^2) and Root Mean Square Error (RMSE) were used. The Peleg (at 25 and 40°C) and Oswin (at 60°C) models were selected to best describe the sorption isotherms of safflower seed. Respectively, the result showed that the predicted values of ANN model were more accurate than those predicted by nonlinear regression method. The adsorption monolayer moisture content (m_0) was also determined using Brunauer, Emmett and Teller (BET) equation. The monolayer moisture content values were 0.028, 0.024 and 0.022 gH₂O/g solid at 25 °C, 40 °C and 60 °C and the corresponding constant values of the BET equation were found to be -13.029, -10.873 and -17.255, respectively. The safflower seeds heat of sorption values were also found. The heat of sorption values were large at low moisture content and decreased with an increase in moisture content whereas the magnitudes increase with increasing temperature and could be well adjusted by an exponential relationship. The experimental data revealed that enthalpy-entropy compensation theory was satisfactorily applicable to the moisture sorption behavior of safflower seed.

Keywords: Safflower; EMC; Monolayer; ANN; Enthalpy; Entropy

1. Introduction

Oilseeds are considered in second place important sources food energy for human beings. Safflower (*Carthamus tinctorius*), valued mainly for its oil. Most of the plants are dried and stored for future consumption. Moisture sorption characteristics of safflower petals were evaluated because this plant is mostly consumed and stored in dried forms [21]. Moisture sorption isotherms provide significant information of processing steps in thermodynamics and structure investigations. These isotherms are extremely important quantitative measures in food preservation, drying equipment, design of packages, predictions of quality, stability, shelf-life and for calculating moisture changes that may occur during storage [39]. Sorption isotherms based on their shape and processes, classified in five different types, but the two isotherms most frequently found in food products are the types II and IV [9]. Dried food products usually show isotherms of Type II or III [54]. The food sorption isotherm describes the thermodynamic relationship between water activity and the equilibrium moisture content of a food product at constant temperature and pressure. Using an experimental approach, these equilibrium curves are determined by the saturated salt solutions method. The EMC value may be related to air temperature. The effect of air temperature rise was investigated by Zomorodian and Tavakoli [49]. Several mathematical models have been proposed for describing the water sorption of various foods and agriculture materials. Researches on the temperature dependence of isotherms and mathematical models to represent sorption isotherms and determination of heat of sorption have been extensively reported in literatures [47, 46, 25, 20, 7, 33, 52, 6, 34]. The estimation of the pertinent parameters of these mathematical models requires non-linear direct optimization techniques using computer. However, such estimation of the parameters limits the accuracy and the correct shape of the isotherms and the reliability of the predictions over the whole range of the relative humidities as well. In case of many involved variables, it is extremely difficult to accurately articulate precise mathematical models. They also require a lot of computations which might be difficult to perform in real time. Although neural network approach is a numerical method, however, is very different from the conventional numerical methods. Neural network method has high speed of computation. The main advantage of artificial neural network approaches to classical methods (mathematics and statistics) is that artificial neural networks do not require an explicit mechanism to explain the processes [39]. There are few published investigations using the ANN on modeling of drying-associated parameters such as energy consumption [54], temperature [30], drying kinetics [1, 52] and drying time prediction and shrinkage [32]. Several studies have been reported on ANN modeling of EMC. Janjai et al [20], concluded that the neural network model maybe better than models known as Henderson and GAB. Multilayer perceptron model was selected as the best artificial neural network for estimation of onion slices' equilibrium moisture content [13]. Isotherms in the roasted green wheat using least squares regression and the neural-fuzzy modeling studied [4]. The ANN technique was also applied for modeling of water sorption isotherms of black tea [38] and longan [20]. Monolayer moisture is boundary of zones I and II ($RH < 0.2$) of isotherm curve, and is the water which strongly bound to the highly polar groups of dry matter [51]. Lahsasni et al [26] found the BET and Henderson models as the most suitable for describing the sorption curves for prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). They used the BET equation of monolayer moisture content values for the sorption at different temperature for determining the pertinent parameter for the product and optimum overall stability at the monolayer constant values. The knowledge of the effect of temperature on water activity at a constant moisture content provides useful information on the cumulative energy requirement of water sorption process in foods [41]. Thermodynamic functions are readily calculated from moisture sorption isotherms. Isokinetic theory as a promising theory to illustrate water sorption behavior of dehydrated foods is an important tool in recognizing different mechanisms for water sorption under altering conditions whether they are governed primarily either enthalpy or entropy or both [35]. As far as we know, there is no published report on the moisture sorption isotherms and calculated constant values of monolayer moisture content of safflower seed. Therefore in this study a mathematical model and a highly representative ANN model for moisture sorption isotherms of safflower seed at different temperatures (25, 40, 60 °C) were developed. The other objectives were to determine sorption parameters such as monolayer water content values, isosteric heats of sorption, differential entropy and evaluating the application of the enthalpy-entropy compensation theory.

2. Materials and methods

2.1. Sample preparation

Safflower seed (Sina (PI.53.75.98) cultivar) with average moisture content of 6.5 (%d.b) was harvested for this work. The moisture content of Safflower oilseeds was determined directly using the standard ASAE oven method [2]. Based on the method, three samples were dried in a forced convection oven at 103 °C for 24 h. The oilseeds were cleaned and kept in a cool, dry and dark enclosure for preventing spoilage and any changes in the physical and chemical characteristics of the sample.

2.2. Experimental procedure

To perform the tests a controlled environment chamber (in terms of temperature and relative humidity) is required. To achieve this objective, a completely enclosed chamber, fully insulated and controlled in terms of thermodynamic conditions was employed (100cm × 60cm × 60 cm), Fig. 1. In order to reduce the equilibrium time, a fan assisted by 1000 W thermostatic electrical heater was used to change the temperature of the air and circulate atmosphere inside the chamber is being used [23]. To carry out the test, safflower seeds were placed in a thin layer inside baskets. The experiments were performed at three temperatures (25, 40 and 60 °C, ±0.5 °C), and seven air relative humidities (11% to 91%, ±1%), using super saturated salt solutions of LiCl, KC2H3O2, CaCl2, MgCl2, KNO2, MgNO3, NaNO2, NaCl and KNO3. The isotherm tests was started at the lowest air relative humidity (adsorption process). In order to avoid any gain or loss during the sample weighing, the automatic balance was set to weight the samples periodically until the successive weigh records showed no significant changes (± 0.005 g).

Fig. 1 – Experimental test equipment (A: Chamber test, B: Anti shock table, C: Moisture meter display and Thermostat display, D: Digital scale, E: Oven)

2.3. Data analyses

Determination of sorption isotherm model

The sorption isotherm curve represents the capacity of the seed tissue and the bound water to adhere more water molecules due to external relative vapor pressure [46]. The experimental sorption data of all the samples at three different temperatures was fitted to fourteen theoretical and empirical sorption equations (Modified BET, Henderson, GAB, Caurie, Chung and Pfoest, Modified Chung and Pfoest, Halsey, Cohen, Oswin, Peleg, Modified Oswin, Modified Henderson, Modified Smith, Modified Halsey). Experimental data were interpreted by means of nonlinear regression analysis, using the statistical software SPSS 16.0 and the statistical factors (Coefficient of determination (R^2), chi-square (χ^2) and Root of mean square error (RMSE)). The R^2 , χ^2 and RMSE are define as [48]:

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

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (EMC_{exp,i} - EMC_{pre,i})^2}{N - n} \quad (2)$$

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

Where EMC_{exp} is the equilibrium moisture content by experiment, EMC_{pre} is the predicted EMC due to models, N is the number of experimental data on relative humidities and n is the number of constants in each model.

Modeling of sorption isotherm by Artificial Neural Networks (ANN)

The Artificial Neural Network (ANN) for predicting the equilibrium moisture content of safflower (output parameter for ANN modeling) was employed for surrounding air temperature and RH of 25-60°C of 11-91%, respectively. In such a modeling approach, there is no need to formulate analytical description of the process. The model was multi-layer network of number of simple processing elements, called neurons that are connected to each other by weights with a various configuration. To achieve the best network many configuration were trained and compared based on statistical factors (R^2 , χ^2 and RMSE), as presented in Fig. 2.

Fig. 2. A typical structure of a two-hidden-layer neural network

Accuracy of the simulated results depends upon the structure and configuration of the models. Selection of the number of neurons for each hidden layer is optional. Larger number of neurons represents a more precise system but complication arises to attain proper training. Feed-Forward Back Propagation (FFBP) neural networks were utilized for training the experimental data set in some application works related to drying technology [18, 20, 38, 19]. For studying by FFBP, back propagation (BP) learning algorithm is normally used. During training the FFBP, calculations were conducted from input of network toward output and then error values were propagated to previous layers. The two neurons in the input layer are surrounding relative humidity and surrounding air temperature while one neuron of the output layer is an equilibrium moisture content value. Two threshold activation functions were used and mathematical definition of these transfer functions (purelin and tansig) which were utilized to reach the optimized status [19, 20] were expressed in Eqs. (4) to (5) as follows:

$$\text{Purelin } Y_j = X_j \quad (4)$$

$$\text{Tansig } Y_j = 2 / (1 + \exp(-2X_j)) - 1 \quad (5)$$

Where X_j is the sum of weighed inputs for each neuron in the j^{th} layer. For the first and second hidden layer activation function tansig (hyperbolic tangent sigmoid) and the fourth layer (output layer) activation function purelin was used. After the end of training, simulations were performed with the trained model to check the accuracy of the model. Experimental input values were used in the simulation.

Adsorption monolayer

The safflower seed stored at its water activity (a_w) plays a significant in maintaining the physical and chemical stability of dehydrated materials with regard to lipid oxidation, enzyme activity, non-enzymatic browning, flavour components preservation, and structural characteristics. It should be kept in moisture content equal to the monolayer moisture content [22]. To predict the adsorption monolayer moisture content at different ambient temperatures, the experimental values of a_w (ERH/100) and m (EMC) were used to find the best fit regression line of the BET adsorption monolayer moisture content equation which can be a useful tool in predicting the monolayer value [32].

$$\frac{a_w}{m \times (1 - a_w)} = \frac{1}{c \times m_0} + \left(\frac{c-1}{m_0}\right) \times a_w \quad (6)$$

Where a_w is water activity (decimal), m is the moisture content in % (d.b) at a given a_w , m_0 is the monolayer moisture content in % (d.b), and c is a constant showed the dependence between monolayer moisture content and temperature and energy of sorption [36]. If a_w values, as independent variables, are plotted versus the $[a_w/m(1-a_w)]$ values, as dependant variables, a unique linear regression line diagram displayed having $c-1/m_0c$ as its slope and $1/m_0c$ as its intercept [37]. The influence of temperature on monolayer moisture content are required to be studied for moisture sorption characteristic of a food [12].

Isosteric heat of sorption and entropy of safflower

The isosteric (differential) heat of sorption, or differential enthalpy indicates the binding energy of water molecules with the material. Therefore, that is the amount of energy required to change unit mass of a product from liquid to vapour at a particular temperature and water activity [29, 44]. The isosteric heat of sorption values of safflower seeds were determined from the equilibrium moisture content data at three temperature by the method of linearization using the Clausius-Clapeyron equation, as formulated in Eq.(7) [45].

$$\frac{\partial \ln(RH)}{\partial T} = \frac{q_{st}}{RT^2} \quad (7)$$

Where q_{st} is the net isosteric heat of sorption (kJ/mol), R is the universal gas constant (8.315 kJ/mol K), RH is the relative humidity (decimals) and T is the absolute temperature (K). Integrating Eq. (7) and assuming that the net isosteric heat of sorption (q_{st}) is independent of temperature, gives the following Eq (8).

$$\ln(RH) = -\left(\frac{q_{st}}{R}\right) \frac{1}{T} + C \quad (8)$$

Where C is intercept of the Eq. (8).

The net isosteric heat of sorption value is calculated, at a specific moisture content, by plotting the $\ln(RH)$ versus $1/T$ and determining the slope of this plot which is equal to $-q_{st}/R$. From the thermodynamic relationship in Eq. (9) [42]:

$$\Delta G = q_{st} - T \Delta S \quad (9)$$

Where ΔG = Gibbs free energy (KJ/mol) and ΔS = entropy (KJ/mol K). In thermodynamics, the Gibbs free energy is a thermodynamic potential that measures the process-initiating work obtainable from a thermodynamic system at a constant temperature and pressure (isothermal, isobaric). For moisture sorption process, it can be shown in Eq. (10):

$$\Delta G = -R T \ln(RH) \quad (10)$$

Substitute ΔG from Eq. (9) into Eq. (10), the following equation (11) is obtained:

$$-\ln(RH) = \left(\frac{q_{st}}{R}\right) \frac{1}{T} - \frac{\Delta S}{R} \quad (11)$$

Plotting $\ln(RH)$ are plotted against $1/T$, a straight line graph is obtained, with the y-intercept of $\Delta S/R$. The y-intercept maybe used to compute ΔS . The enthalpy-entropy compensation theory was applied to the sorption phenomenon of safflower seed. Physical phenomena, such as sorption reactions, are often evaluated on the basis of the enthalpy-entropy compensation theory. This states that compensation arises due to changes in the solvent-solute interaction and that a linear relation exists between the enthalpy and entropy of the reaction [27]. The theory was found to explain sorption well and gave a linear relationship for safflower seed. A plot of q_{st} versus ΔS from values of equation (11) for the safflower seed can be evaluated for each set of sorption data.

3. Results and Discussion

3.1. Mathematical and Neural Network Model

The experiments were conducted on safflower seed equilibrium moisture content at three air temperatures and relative humidities of 25, 40 and 60 °C, 11% to 91%, respectively. The sorption isotherms curves were plotted at three temperatures, Fig (3). These curves was manifested in the form of sigmoid shaped curves reflecting type II isotherm [51], which are usual to the most of the food materials.

Fig. 3. Sorption isotherm data of safflower seed at three temperatures

At a given relative humidity, the experimental data indicated that the EMC value decreased with increasing temperature while the EMC value increased with an increase in relative humidity at constant temperature. Because of increasing temperature, water activity and thus the amount of free water within the seed increasing and the seed more comfortable loses water and reaches equilibrium in less moisture content with the environment. This trend which is very popular for agricultural products, may be due to a reduction in the total number of active sites for water binding as a result of physical and/or chemical changes in the product induced by temperature [14, 51]. Region I (up to relative humidity of 0.3) can be denoted monolayer moisture content, in which water molecules are bonded to the product by strong H-bonds. Region II (RH: 0.3-0.8) includes multilayer moisture content which is under transition to natural properties of free water. The water in Region III (above 0.8 RH) is in free-states and allow chemical reactions and microbial growth activity. Therefore, water sorption particularly at higher water activity would be markedly influenced by the stability of the microporous structure. The equilibrium moisture content increases with increasing relative humidity (water activity) at a constant temperature. This can be explained in such a way that when relative humidity rises, the water vapor partial pressure reaches closer to saturation vapor pressure and thus the pressure gradient (water potential) between the material and the environment arise, thus more moisture is absorbed. The result of the mathematical modeling are presented in Table 1, 2 and 3.

Table 1. Estimated values of statistical indicators and model parameters for adsorption models (25 °C).

Table 2. Estimated values of statistical indicators and model parameters for adsorption models (40 °C).

Table 3. Estimated values of statistical indicators and model parameters for adsorption models (60 °C).

Models with highest R^2 and lowest χ^2 and RMSE values were selected to predict the EMC for safflower seeds. The results showed a good fitness between the experimental and predicted EMC values (Fig 4, 5 and 6). Similar results have been reported by many investigators for food materials and grains [48, 5, 49, 17].

Fig 4. Experimental and predicted (Peleg model) adsorption isotherms of safflower seed at 25 °C

Fig 5. Experimental and predicted (Peleg model) adsorption isotherms of safflower seed at 40 °C

Fig 6. Experimental and predicted (Oswin model) adsorption isotherms of safflower seed at 60 °C

Numerous ANN models having different internal structure were tried and trained with experimental data. As the training process proceeded, the weights and biases of the nodes were adjusted resulting in reduction of RMSE. The Back Propagation neural network model not only accommodated temperature and water activity parameter, but also is more accurate than other mathematical models. The results of ANN model of EMC for safflower seed was developed by training with experimental sorption data at air temperatures of 25, 40 and 60°C, were illustrated in Table 4.

Table 4. Some of the best training configuration of ANN models for safflower EMC prediction

The analysis of the suitability of the ANN model is obtained by comparison between the predicted and measured equilibrium moisture contents of safflower seed shown in Fig.7. This figure displayed that the agreement between the predicted and observed equilibrium moisture content for safflower seed was excellent ($R^2 = 0.999$). Furthermore, value of RMSE and χ^2 of the ANN model was minimum (0.069, 0.011, respectively). Therefore the predicted EMC was in good agreement with the experimental data.

Fig 7. Predicted and measured sorption isotherms of safflower seed (ANN model)

Thus, either of the ANN or Peleg or Oswin models can be used predicting the EMC of safflower seed but the ANN model prediction is the best as compared with the Peleg or Oswin model results.

3.2. Isosteric heat of sorption and entropy of safflower

The slopes of the plots between $\ln(RH)$ versus $(1/T)$ gave the isosteric heat of sorption and were calculated by linear regression analysis and did not display decisive temperature dependence over the entire temperature range of 25-60 °C at all moisture contents (5–10 kg/100 kg solids, d.b). The net isosteric heats of sorption determined by applying Eq. (7) to the sorption EMC data as obtained from ANN model have been presented as a function of moisture in Fig. 8.

Fig. 8. Sorption isosterics of safflower seed at different moisture content

The sorption heat of safflower seed were found to be large at low moisture content and decreased with an increase in moisture content [16] (Fig. 9). This phenomenon maybe due to approaching characteristics of the water content to free water and forming the highly active polar sites on the surface of the product and strong bonds between water molecules and safflower seeds.

Fig. 9. Sorption isosterics of safflower seed at different moisture content

The ΔS values for sorption at different moisture content were obtained by linear regression Eq. 11. As suggested by Aguerre et al [3], it was assumed that at a given moisture content, q_{st} and ΔS did not vary with temperature (Fig. 10). This figure indicates that the differential entropy also exhibits a strong dependence on moisture content especially at low equilibrium moisture contents with an exponential trend similar to that exhibited by differential enthalpy.

Fig. 10. Sorption isosterics of safflower seed at different moisture content

Enthalpy-entropy compensation theory

An interesting relationship between ΔH and ΔS for sorption isotherms or changes in equilibrium moisture content is displayed in Fig. 11. A correlation between enthalpy and entropy, enthalpy-entropy compensation theory (or isokinetic theory), has been observed for a wide variety of reactions such as sorption reactions [24, 28], (Fig. 11). As can be noted, a linear relation between enthalpy versus entropy using Eq. (11) was obtained (with a regression coefficient, $R^2 = 0.997$). According to the linear relation equation, the values of isokinetic temperature and the free energy of Gibbs obtained from the slope and the intercept, respectively.

Fig. 11. Enthalpy-Entropy relationships for water sorption in safflower seed

Monolayer moisture content determination

The monolayer moisture content obtained using BET model is an important parameter indicating adsorption capacity of the adsorbent. The model parameters, including monolayer moisture content and adsorption constant at 25, 40 and 60 °C environmental chamber temperatures were calculated using optimization technique (Table 5). The BET equation is based on adsorption on a free surface without capillary condensation and therefore can be applicable to adsorption for the mono and multi-layer regions of the isotherm. The monolayer moisture content decreases with increasing temperature and the pertinent parameter c that characterize the interaction adsorb - absorber increases with increasing temperature, thus reduces the amount of absorbed (Fig 12, 13 and 14), This effect can be argued that as the chamber temperature changes, the excitation of molecules and the molecular distance would be changed [11, 49].

Table 5

Values of monolayer moisture content (m_0) and constant c , at three micro-environmental air temperatures of 25, 40, 60°C.

Fig. 12. The BET monolayer moisture content plot at 25 °C.

Fig. 13. The BET monolayer moisture content plot at 40 °C.

Fig. 14. The BET monolayer moisture content plot at 60°C.

Conclusions

Based on the results, the sorption isotherms of safflower seed had sigmoid shape and showed that the equilibrium moisture content at constant equilibrium water activity increased as temperature decreased. While the EMC increased at constant temperature as water activity increased. From the fourteen models used, the Peleg and Oswin models provided the best fit to experimental data. The two-hidden-layer ANN model is capable of predicting the EMC and compared to non-linear least square regression, provided a much better fit for moisture sorption isotherms as indicated by statistical measures. Differential enthalpy and entropy decreased with an increase in equilibrium moisture content and was found to be an exponential function of moisture content. Also, linear relation between enthalpy versus entropy was obtained with a regression coefficient, $R^2 = 0.997$. Isokinetic temperature and Gibbs free energy values 37.601 K and 0.1291 J mol⁻¹ were obtained, respectively.

Abbreviations

aw - water activity (decimal); a, b, c, d, e, , - constants; EMC - equilibrium moisture content (% d.b); qst- heat of sorption (kJ/mol); m - number of output layer neurons; MSE - mean square error; R- universal gas constant (8.315 kJ/kmol/K); R²- determination coefficient; ΔS - entropy (KJ/mol/K); T- environmental absolute temperature (K); X_j -Sum of weighted input for each neuron jth layers; χ^2 - Chi-Square; RMSE - Root Mean Square Error; FFBP - Feed-Forward Back Propagation; BP - back propagation; C - intercept

Reference

- 1) Abbaszadeh, A., Motevali, A., Khoshtaghaza, M.H. and Kazemi, M. Evaluation of thin-layer drying models and neural network for describing drying kinetics of *Lasagnas angustifolia* L. International Food Research Journal 18(4), 1321-1328 (2011)
- 2) St. Joseph, MI. ASAE Standard D245.5-Moisture relationship of plantbased agricultural products. In ASAE Standards (pp. 508-524 (2003)
- 3) Aguerre, R. J., Suarez, C., & Viollaz P.E. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. Journal of Food Science. 51(6), 1547-1549 (1986)
- 4) Al-Mahasneh, M.A., Bani Amer, M.M., Rababah, T.M. Modeling moisture sorption isotherms in roasted green wheat using least square regression and neural-fuzzy techniques". food and bioproducts processing 90, 165-170 (2012)
- 5) Arogba, S.S. Effect of temperature on the moisture sorption isotherm of a biscuit containing processed mango (*Mangifera indica*) kernel flour. J. Food Eng. 48, 121-125 (2001)
- 6) Argyropoulos, D., Alex, R., Kohler, R. and Muler, J. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of leaves and stems of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) Established by dynamic vapor sorption, LWT - Food Science and Technology, 47, 324-331 (2012)
- 7) Al-Muhtaseb A., Muhanned A. Hararah, E.K. Megahey, W.A.M. McMinn, T.R.A. Magee. Moisture adsorption isotherms of microwave-baked Madeira cake. Journal of Food Engineering, 43, 1042-1049 (2010)
- 8) Bala B.K: Drying and Storage of Cereal Grains. Oxford & IBH Publishing, New Delhi. . (1997)
- 9) Blahovec J, Yanniotis S. Modified classification of sorption isotherms. J Food Eng. 91 (1), 72-77 (2009)
- 10) Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. Journal of the American Chemical Society, 60, 309-319 (1938).
- 11) Chung, D.S. and Pfost, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain and their products. Transactions of the ASAE, (10), 549-557. (1967)

	Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana
	Frank Devlieghere Frank.Devlieghere@UGent.be Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn
	Sevim Kaya skaya@gantep.edu.tr Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon

13) Gazor Hamid Reza , EyvaniAfshin. Adsorption Isotherms for Red Onion Slices Using Empirical and Neural Network Models. International Journal of Food Engineering. Vol.7 6, 56-64 (2011)

14) Ghodake, H.M., Goswami, T.K., Chakraverty, A. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. J. Food Eng. 78, 827-835 (2006)

15) Guilan P, Chen X, Wu W , Jiang X. Modeling of water sorption isotherm for corn starch. Journal of Food Engineering 80, 562-567 (2007)

Journal of Food Measurement & Characterization

Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Safflower seed Using Empirical and Neural Network Models

--Manuscript Draft--

17) Hii, C.L. Law C.L., M. Cloke. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa, Journal of Food Engineering 90, 191-198 (2009)

Manuscript Number:

18) Huang, B., & Mujumdar, A. S. Use of neural network to predict industrial drying performance. Drying Safflower seed, Full Title 525-541 (1993) Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Safflower seed Using Empirical and Neural Network Models

19) Hernández-Pérez, J.A., García-Alvarado, M., Frystrom, G. and Heyd, B. Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 5(1), 57-64 (2004)

20) Kariem, P., Tohsing, K., Mahayothee, B., Bala, B.K., Ashraf, M.A. Neural network modeling of sorption isotherms of longan (*Dimocarpus longan* Lour). Computers and Electronics in Agriculture 66, 209-214 (2009)

21) Kaya, Sevim. Kahyaoglu. Talip Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon. Corresponding Author's Secondary Information - J FOOD ENG. 78(2), 413-421 (2007)

22) Karel, M., & Yong, S. Autoxidation-initiated reactions in foods. In L. B. Rockland, & G. F. Stewart, Water Activity: Influences on Food Quality (pp. 511-529). New York: Academic Press (1981)

23) Li, X., Cao Z, Wei Z, Qiyan F, J Wang. Equilibrium moisture content and sorption isosteric heats of five wheat varieties in China. Journal of Stored Products Research 47, 39-47 (2011)

24) Labuza, T., Kaanane, A. and Chen, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherm and water activity of safflower seed. Journal of Food Science. 50, 392-396 (1980)

Order of Authors: masoud barati, master of science

25) Lee, J.H., Lee, M.J. Effect of drying method on the moisture sorption isotherms for *Inonotus obliquus* mushroom. LWT 41, 1478-1484 (2008)

26) Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. and Kechaou, N. Experimental study and modeling of adsorption and desorption of pepper (*Capricornia*). Journal of Food Engineering, 55, 201-207 (2002)

27) Makhadmeh, H. Idlimam A. Mahrouz, M. and Hadrami, M. Kouhila. Sorption isotherms and thermodynamic properties of peppermint tea (*Mentha piperita*) after thermal and biochemical treatm. J. Mater. Environ. Sci. 3 (2) 232-247 (2012)

28) Madamba, P.S.; Driscoll, R.H.; Buckle, K. S. Enthalpy-entropy compensation model for sorption and desorption of garlic. Journal of Food Engineering, v.28, p.109-119 (1994)

29) Mohamed, L.A., Kouhila, M., Lahsasni, S. and Hadrami, M. A. Adsorption and desorption of safflower seed. Journal of Food Engineering, 55, 201-207 (2002)

30) Mousavi, M. and Javan, S., Modeling and Simulation of Apple Drying Using Artificial Neural Network and Taguchi's Method. J. Agr. Sci. Tech. Vol. 11, 559-571 (2009)

31) Mohsenin, Nuri. N. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach publishers, 1996

Experimental work was conducted to obtain the adsorption isotherms of safflower seed from 0.14 to 0.94. Fourteen isotherm equations and multilayer artificial neural network (ANN) approach were employed for analyzing the experimental data. In order to validate the model, the results of the ANN model were compared with the experimental data. The results showed that the ANN model was more accurate than those predicted by nonlinear regression method. The adsorption monolayer moisture content (m0) was also determined using Brunauer, Emmett and Teller (BET) equation. The equilibrium moisture content values were 0.028, 0.024 and 0.022 gH₂O/g solid at 25 °C, 40 °C and 60 °C and the corresponding constant values of the BET equation were found to be -13.029, -10.873 and -17.255, respectively. The safflower seeds heat of sorption values were also found. The heat of sorption values were large at low moisture content and decreased with an increase in moisture content whereas the magnitudes increase with increasing temperature and could be well adjusted by an exponential relationship. The experimental data revealed that enthalpy-entropy compensation theory was satisfactorily applicable to the moisture sorption behavior of safflower seed.

Suggested Reviewers:

Roberta Cruz Silveira Thys
Department of Chemical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul
robertathys@hotmail.com
Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis

Maria J. Sousa-Gallagher
m.desousagallagher@ucc.ie

- 32) Momenzadeh, L. Zomorodian, A. and Mowla, D. Applying Artificial Neural Network for Drying Time Prediction of Green Pea in a Microwave Assisted Fluidized Bed Dryer. *J. Agr. Sci. Tech.* Vol. 14: 513-522 (2012)
- 33) Silveira, G.H.H., Correia, P.C., Araújo, E.F., Valente, D.S.M. & Botelho, F.M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 546-554 (2010)
- 34) Suppakul, P., Chalernsook B., Ratisuthawat B., Prapaisitthi S., Munchukangwan N. Empirical modeling of moisture sorption characteristics and mechanical and barrier properties of cassava flour film and their relation to plasticizing-antiplasticizing effects. *International Journal of Food Science and Technology (LWT)*, 50, 290-297 (2013)
- 35) Sharma P., Singh R.R.B., Singh A.K., Patel A.A., Patil G.R., Sorption isotherms and thermodynamics of water sorption of ready-to-use Basundi mix. *LWT - Food Science and Technology*. 42, 441-445 (2009)
- 36) Menkov, N.D., Paskalev, H.M., Galyazkov, D.I., Kereziova-Rakova, M., Applying the linear equation of correlation of Brunauer-Emmett-Teller (BET)-monolayer moisture content with temperature. *Nahrung/Food* 43, 118-121 (1999)
- 37) Pernille N. Jensen, Jens Risbo., Oxidative stability of snack and cereal products in relation to moisture sorption. *Food Chemistry* 103 717-724 (2007)
- 38) Panchariya, P. C., Popovic, D. and Sharma, A. L. Desorption isotherm modelling of black tea using artificial neural networks. *Drying Technology*, 20(2), 351- 362 (2002)
- 39) Pereira Filho, A.J., and dos Santos, C.C. Modeling a densely urbanized watershed with an artificial neural network, weather radar and telemetric data. *J. Hydrol.* 317:31-48 (2006)
- 40) Raji, A.O., Ojadiran, J.O. Moisture sorption isotherms of two varieties of millet. *Food and bioproducts processing* 89, 178-184 (2011)
- 41) Rizvi, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration, *Engineering Properties of Food*, New York. 223-309 (1986)
- 42) Rizvi, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration, *Engineering Properties of Food*, 2nd end. (1995)
- 43) Smith, D. S., Mannheim, C. H., & Gilbert, S. G. Water sorption isotherms of sucrose and glucose by inverse gas-chromatography. *Journal of Food Science*, 46, 1051-1053 (1981)
- 44) Sawhney, I.K. Sarkar, B.C. Patil, G.R. Moisture sorption characteristics of dried acid casein from buffalo skim milk. *LWT - Food Science and Technology*, 44 502-510 (2011)
- 45) Tsami, E. Net Isosteric Heat of Sorption in Dried Fruits, *Journal of Food Engineering*, 14, 325 - 327 (1991)
- 46) Vega A., Andrés A., and Fito P. "Model of drying kinetic of red pepper" (*Capsicum annum* L. cv. Lamuyo) (in Spanish). *Información Tecnológica*, 16(6), 3-11 (2005)
- 47) Van den Berg, C., & Bruin, S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In L. B. Rockland & G. F. Steward (Eds.), *Water activity: Influences on food quality*. New York: Academic Press. (pp. 1-61). (1981)
- 48) Zomorodian, A. "Thin-and-thick-layer drying characteristics for Iranian rough rice varieties". M. S. Thesis. Shiraz University, Shiraz, Iran (1979)
- 49) Zomorodian, A. and Tavakoli, R. A. The Adsorption-Desorption Hysteresis Effect on Pistachio Nuts, *Journal of Agricultural and Technology*, 9(4), 259-265 (2007)
- 50) Zomorodian, A and L. Momenzade. Study of shelled corn shrinkage in a microwave-assisted fluidized bed dryer using artificial neural network. *International journal of agriculture science*. 4, 172-175 (2012)
- 51) Zomorodian, Ali, Kavooosi, Zahra, Leila Momenzadeh. Determination of EMC isotherms and appropriate mathematical models for canola, food and bioproducts processing 89, 407-413 (2011)

- 1
2
3
4 52) Zare, D. Naderi, H. Jafari, A. A. Experimental and Theoretical Investigation of Rough Rice Drying in Infrared-assisted
5 Hot Air Dryer using Artificial Neural Network, World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:69 2012-09-
6 21 (2012)
7
8 53) Zomorodian, A.A L. Momenzadeh and D. Mowla. Applying Artificial Neural Network for Drying Time Prediction of
9 Green Pea in a Microwave Assisted Fluidized Bed Dryer" JAST (ISI) vol. 14, 513-522 (2012)
10
11 54) Zhang Q, Yang SX, Mittal GS, Yi S. Ae—automation and emerging technologies: prediction of performance indices and
12 optimal parameters of rough rice drying using neural networks. Biosystems Eng 83(3), 281 (2002)
13
14 55) Zhengyong Yan, Maria J. Sousa-Ghllagher, Fernanda A.R. Oliveira. Sorption isotherms and moisture sorption
15 hysreresis of intermediare moisture content banana. Jornal of Food Engineering. 86, 342-348 (2008)
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5

12) Debangana Choudhury, Jatindra K. Sahu, G.D. Sharma, 2011. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and

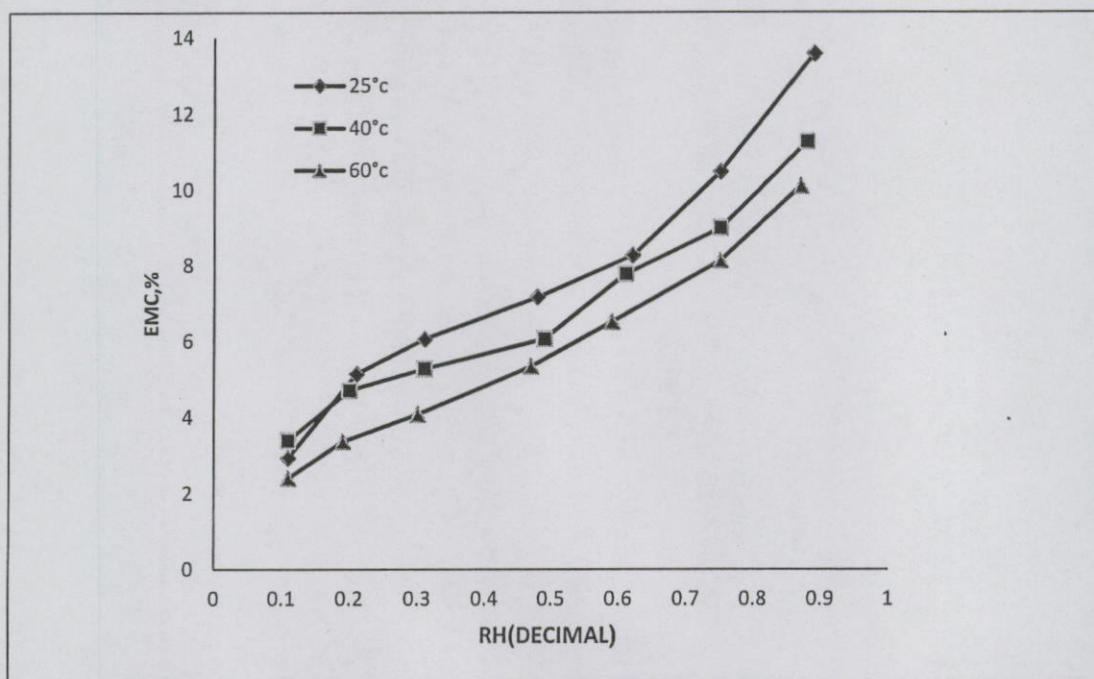


Fig. 3. Sorption isotherm data of safflower seed at three temperatures

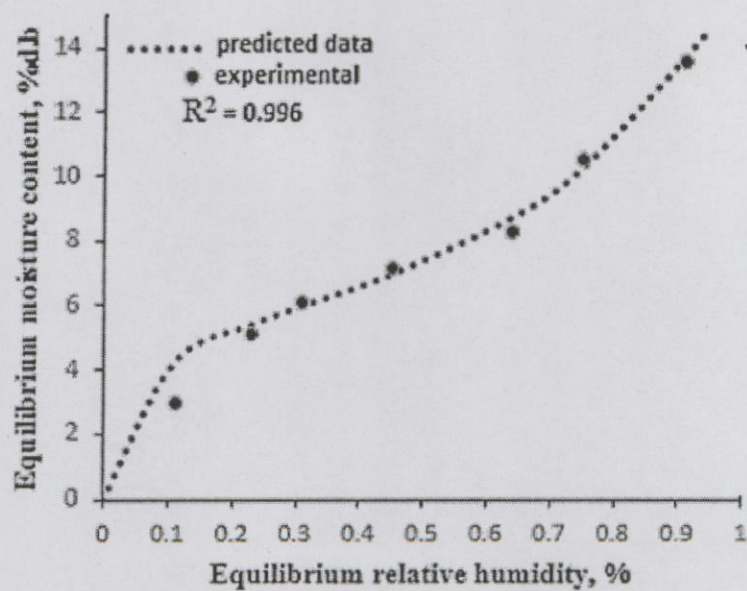


Fig 4. Experimental and predicted (Peleg model) adsorption isotherms of safflower seed at 25 °C

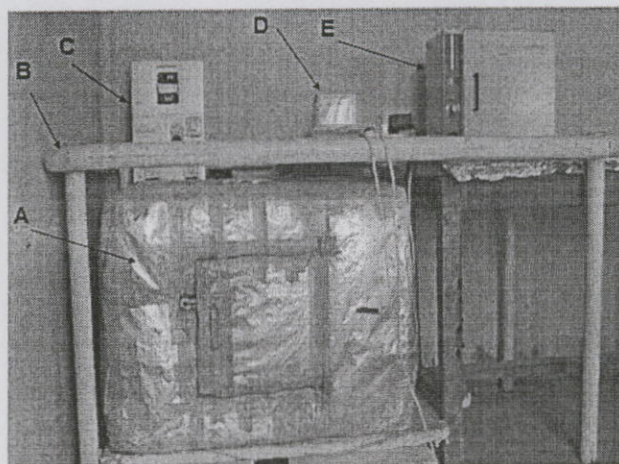


Fig. 1 – Experimental test equipment (A: Chamber test, B: Anti shock table, C: Moisture meter display and Thermostat display, D: Digital scale, E: Oven)

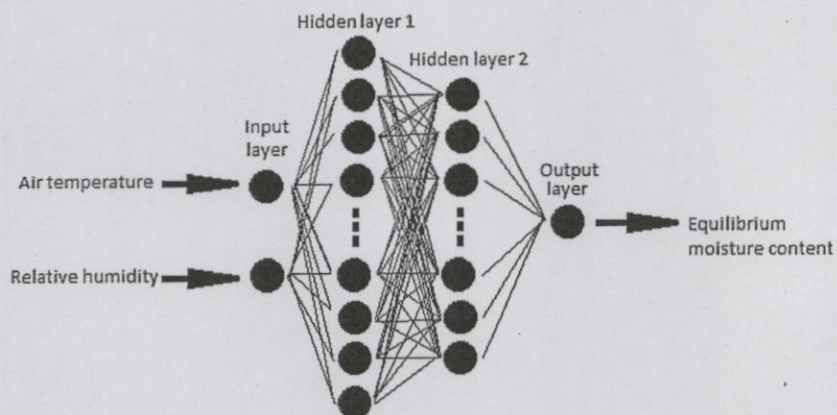


Fig. 2. A typical structure of a two-hidden-layer neural network

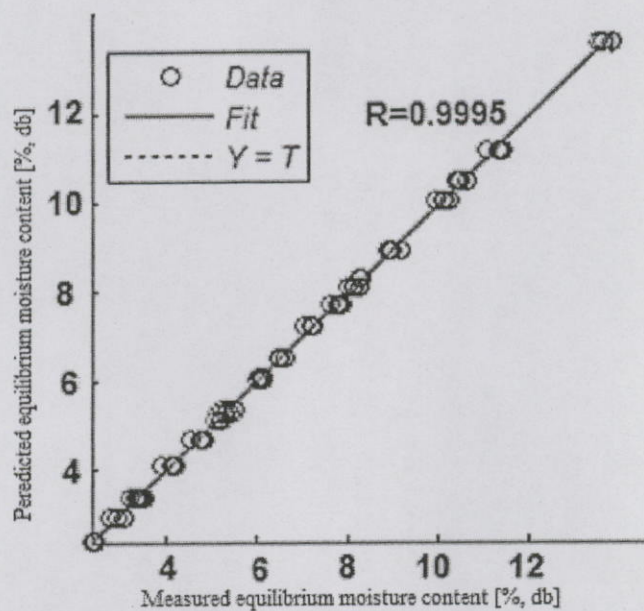
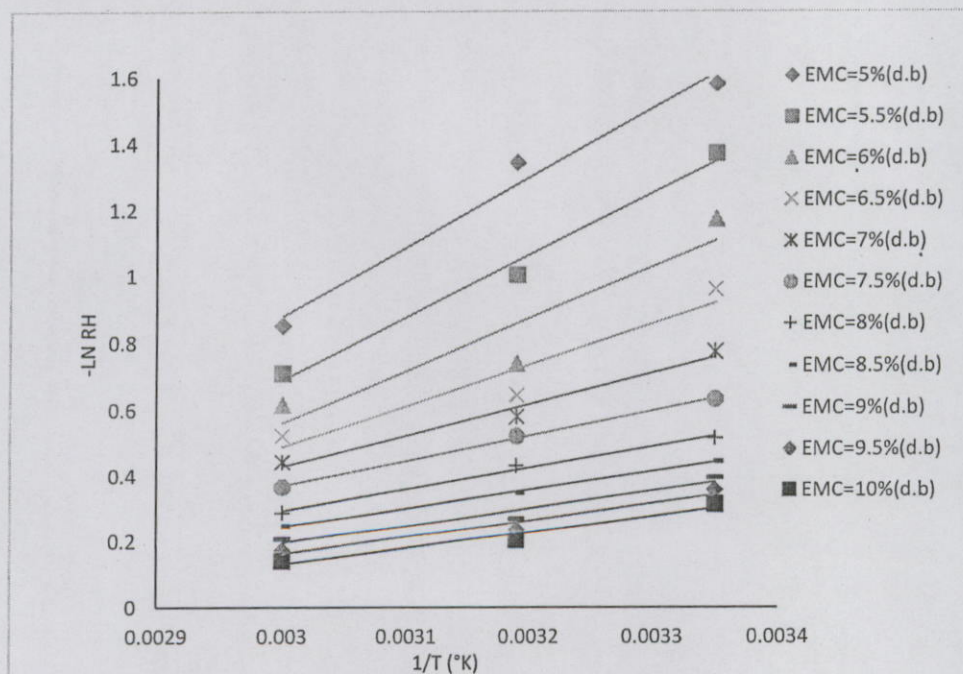


Fig 7. Predicted and measured sorption isotherms of safflower seed (ANN model)



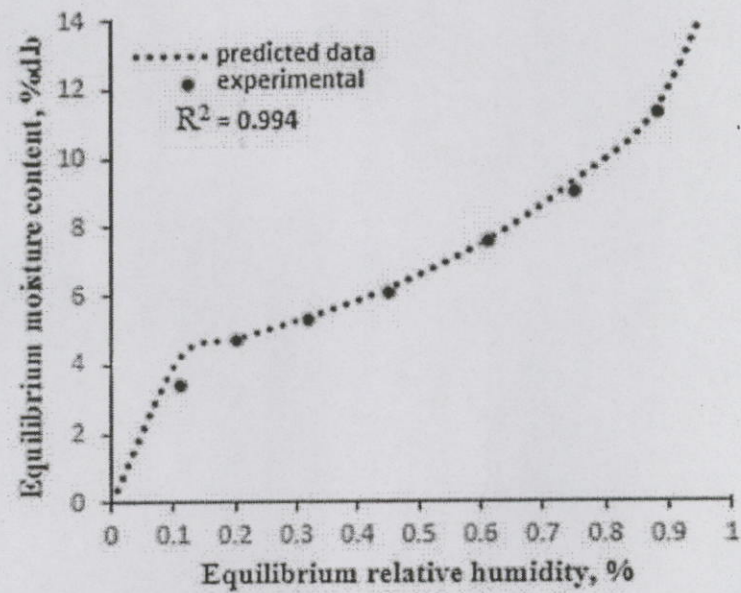


Fig 5. Experimental and predicted (Peleg model) adsorption isotherms of safflower seed at 40 °C

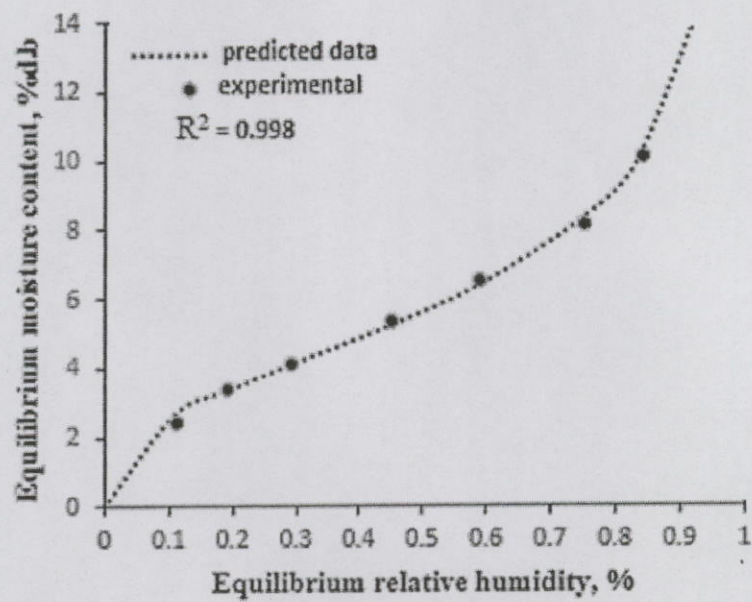


Fig 6. Experimental and predicted (Oswin model) adsorption isotherms of safflower seed at 60 °C

Fig. 8. Sorption isosterics of safflower seed at different equilibrium moisture content

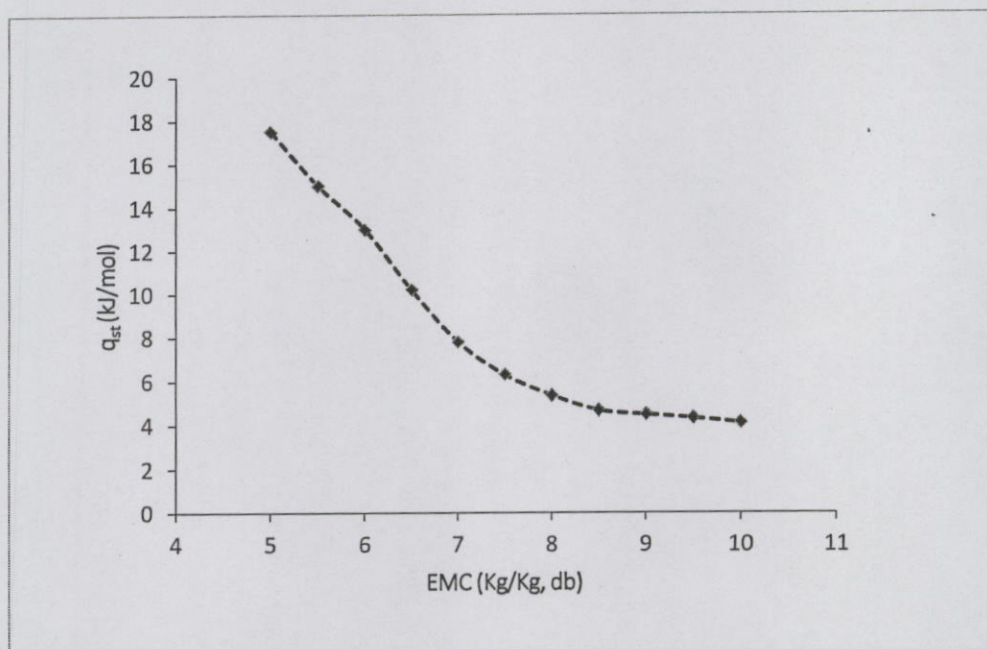


Fig. 9. Sorption isosterics of safflower seed at different moisture content

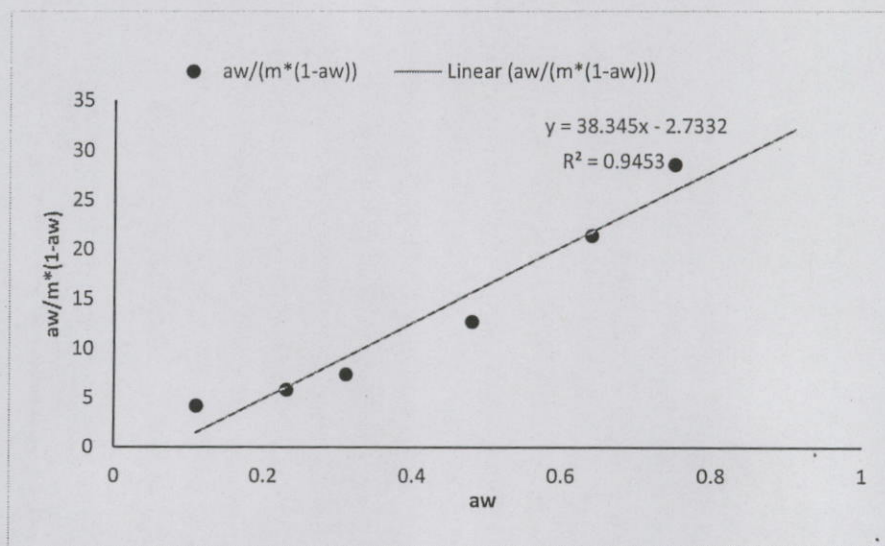


Fig. 12. The BET monolayer moisture content plot at 25 °C

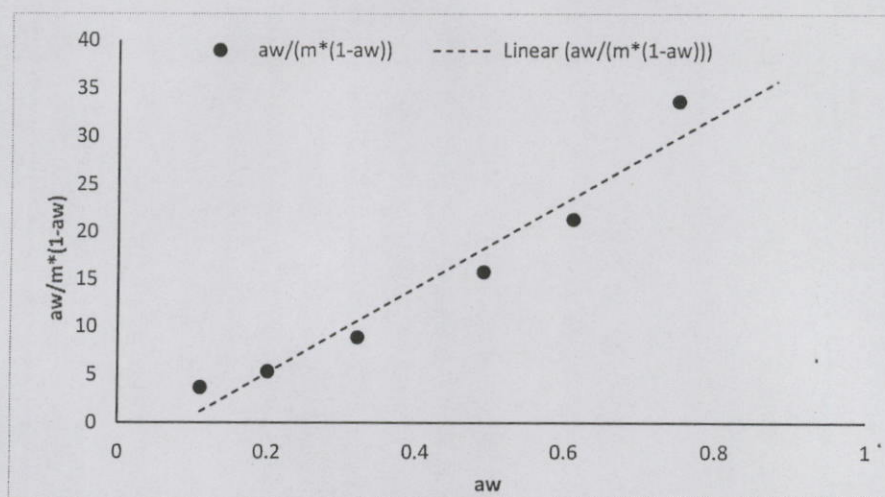


Fig. 13. The BET monolayer moisture content plot at 40 °C.

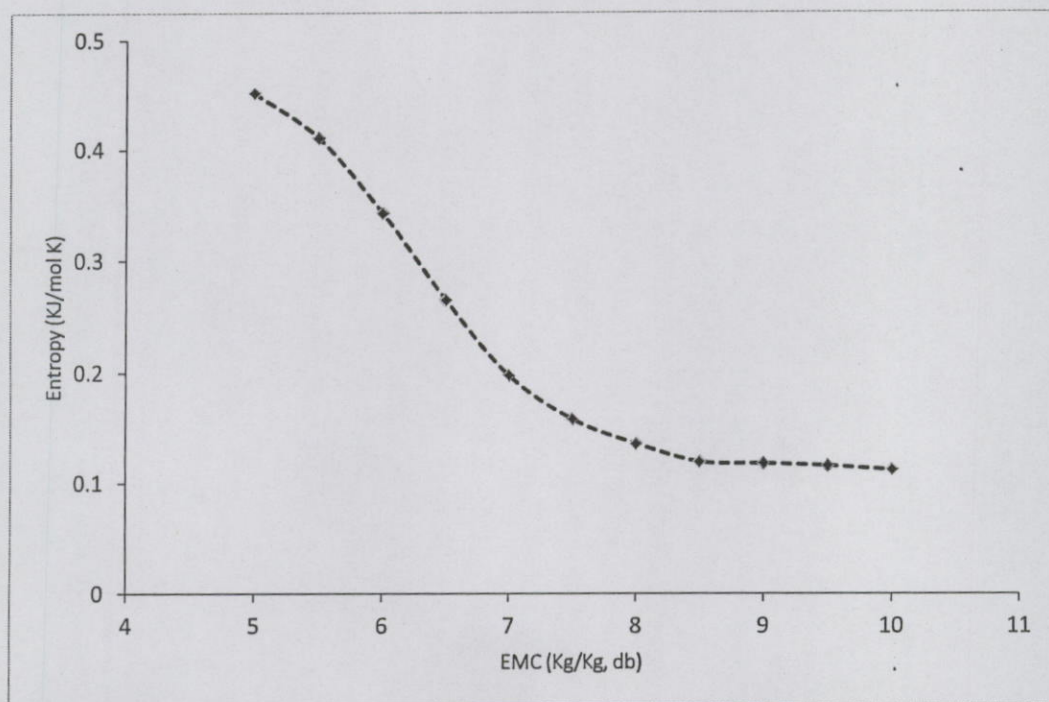


Fig. 10. Sorption isotherms of safflower seed at different moisture content

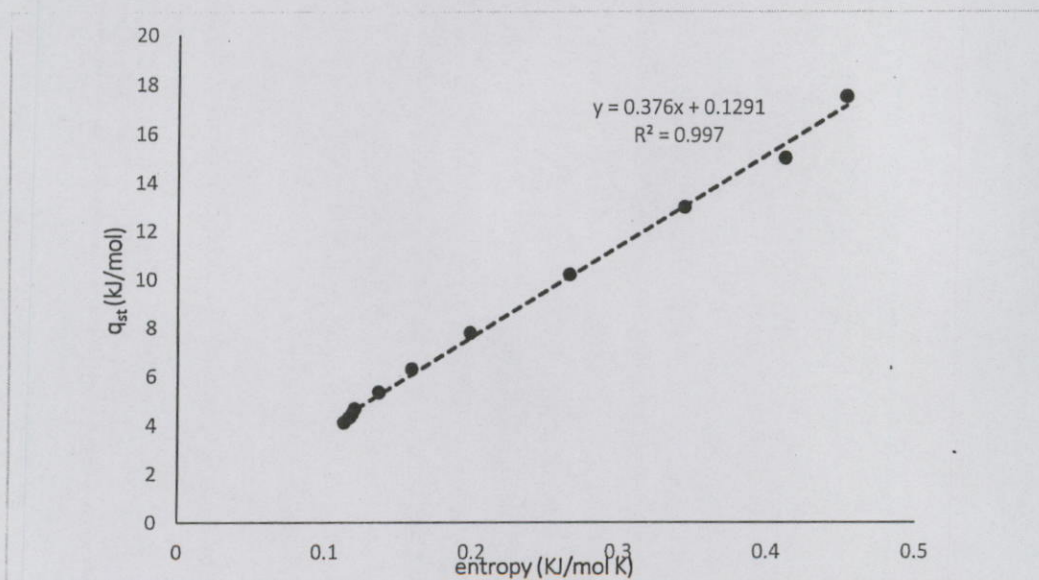


Fig. 11. Enthalpy-entropy relationships for water sorption in safflower seed

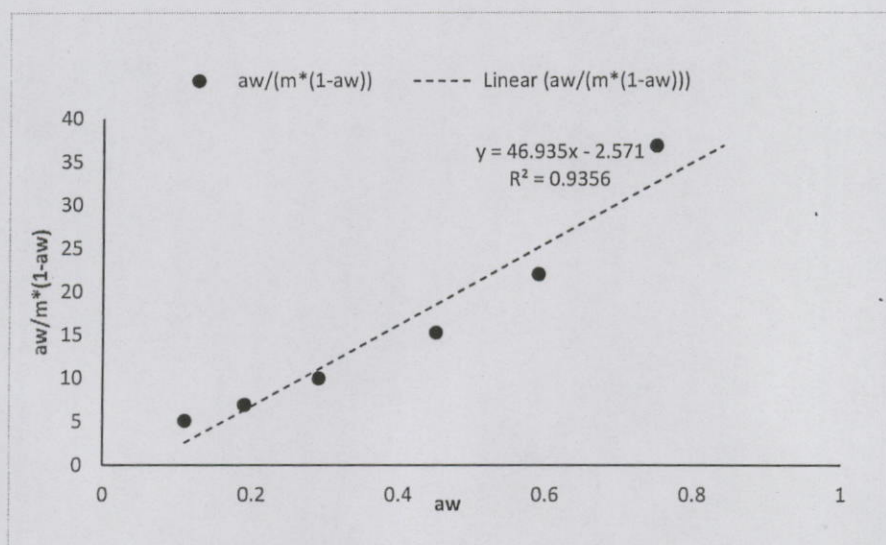


Fig. 14. The BET monolayer moisture content plot at 60°C.

Table 1.

Estimated values of statistical indicators and model parameters for adsorption models (25 °C).

Model	A	B	C		R2	χ^2	RMSE
Caurie	3.701	-1.406	-	-	0.985	0.192	0.370
Chung and Pfo	6.485	-2.994	-	-	0.992	0.096	0.262
GAB	25.237	145.441	0.007	-	0.854	2.334	1.115
Halsey	250.297	2.982	-	-	0.977	0.288	0.454
Henderson	0.005	2.374	-	-	0.977	0.335	0.489
Cohen	-0.835	5.589	-	-	0.850	1.906	1.167
Modified BET	-75278.513	2848.535	-0.004	-	0.771	4.178	1.545
Modified Chung and Pfo	661911.42	33.398	-75849.928	-	0.992	0.120	0.262
Modified Halsey	-170939.048	6837.783	2.982	-	0.977	0.361	0.454
Modified Henderson	0.075	2.374	-10.835	-	0.977	0.358	0.452
Modified Oswin	16.505	-0.361	0.265	-	0.993	0.116	0.258
Modified Smith	-1.17	0.222	5.656	-0.066	0.983	0.263	0.387
Oswin	7.471	0.265	-	-	0.993	0.093	0.257
Peleg	7.897	4.2	8.645	0.32	0.996	0.083	0.189

Table 2.

Estimated values of statistical indicators and model parameters for adsorption models (40 °C).

Model	A	B	C	D	R2	χ^2	RMSE
Caurie	3.495	-1.312	-	-	0.989	0.091	0.254
Chung and Pfo	5.894	-2.569	-	-	0.986	0.112	0.881
GAB	16.831	250.935	0.007	-	0.824	1.889	1.038
Halsey	162.761	2.915	-	-	0.983	0.136	0.311
Henderson	0.005	2.564	-	-	0.965	0.339	0.492
Cohen	-0.932	4.755	-	-	0.883	0.944	0.821
Modified BET	62444.241	-464.077	0.00017	-	0.649	2.967	1.455
Modified Chung and Pfo	22.196	38.930	37.762	-	0.986	0.140	0.283
Modified Halsey	-84776.921	2119.550	2.915	-	0.983	0.172	0.313
Modified Henderson	3.468	2.564	706.491	-	0.965	0.348	0.446
Modified Oswin	6.124	0.016	0.261	-	0.988	0.120	0.262
Modified Smith	2.131	0.056	4.965	-0.024	0.983	1.622	0.833
Oswin	6.755	0.261	-	-	0.988	0.096	0.262
Peleg	6.051	0.168	7.636	2.726	0.994	0.079	0.184

Table 3.

Estimated values of statistical indicators and model parameters for adsorption models (60 °C).

Model	A	B	C	D	R2	χ^2	RMSE
Caurie	2.368	-1.715		-	0.994	0.049	0.187
Chung and Pfo	4.749	-2.945	-	-	0.996	0.035	0.159
GAB	32.124	55.63	0.009	-	0.939	0.729	0.650
Halsey	23.374	2.092	-	-	0.984	0.141	0.317
Henderson	0.024	1.903	-	-	0.992	0.069	0.223
Cohen	-1.358	3.008	-	-	0.919	0.707	0.710
Modified BET	13149.63	219.993	0.0005	-	0.917	1.866	1.032
Modified Chung and Pfo	33347.593	33.957	6587.427	-	0.996	0.044	0.159
Modified Halsey	-84027.707	1400.514	2.092	-	0.984	0.180	0.321
Modified Henderson	0.511	1.903	-38.439	-	0.992	0.084	0.219
Modified Oswin	35.548	-0.499	0.357	-	0.998	0.021	0.110
Modified Smith	2.165	0.005	-3.486	0.129	0.991	0.129	0.236
Oswin	5.624	0.357	-	-	0.998	0.016	0.109
Peleg	6.958	4.423	7.455	0.486	0.998	0.041	0.133

Table 4.

Some of the best training configuration of ANN models for safflower EMC prediction

Training algorithm	Threshold function	No. of layers and neuron	RMSE	R ²	χ^2
BR	tansig- tansig- purelin	2-20-15-1	0.112	0.996	0.101
BR	tansig- tansig- purelin	2-20-10-1	0.093	0.998	0.082
BR	tansig- tansig- purelin	2-15-10-1	0.069	0.999	0.011
BR	tansig- tansig- purelin	2-15-5-1	0.213	0.991	0.124
BR	tansig- tansig- purelin	2-10-10-1	0.102	0.997	0.094
BR	tansig- tansig- purelin	2-10-5-1	0.146	0.994	0.113

Table 5

Values of monolayer moisture content (m_0) and constant c at three micro-environmental air temperatures of 25, 40, 60°C.

	MO (Kg H ₂ O/Kg solid)	Constant c
BET equation at 25 °C	0.028	-13.029
BET equation at 40 °C	0.024	-10.873
BET equation at 60 °C	0.022	-17.255

Determination of equilibrium isotherms and proper mathematical model for lime slices

Mehdi Taghipour¹, Masoud Barati Kakolaki^{1*}, Ali Zomorodian², Mehdi Nasiri³

(1 Graduated in master degree from University of Shiraz;

2 Full professor from University of Shiraz;

3 Associate Professor from University of Shiraz)

Abstract: Equilibrium moisture content (EMC) at different air relative humidity and temperatures is a vital parameter in optimization of drying and storage processes. In the present study amount of moisture content in lime (Local variety) slice at different ambient temperatures of 30°C, 40°C and 50°C were measured using gravimetric method. The obtained E.M.C experimental values were employed to plot the isotherm curve at different environmental air temperatures. These data also were fed to fourteen popular mathematical models. The well-known statistical factors such as Coefficient of determination (R^2), Chi-square (χ^2), Root of mean square error (RMSE) and Mean of relative deviation (MRD) were calculated to validate the goodness of fit. The Peleg Model was selected as the best model for predicting the EMC at each three temperatures level. The result of present research displayed that the amount of EMC decreased with increasing the ambient temperature. The monolayer moisture content (m_0) was also determined using Brunauer, Emmett and Teller (BET) equation. The monolayer moisture content values were 0.023, 0.021 and 0.014 g H₂O/g solid at 30°C, 40°C and 50°C, respectively, and the corresponding constant values of the Brunauer, Emmett and Teller equation were found to be -4.925, -6.543 and -7.035, respectively.

Keywords: lime slice, equilibrium moisture content, modeling, monolayer

Citation: Taghipour, Mehdi, Masoud Barati Kakolaki, Ali Zomorodian, and Mehdi Nasiri. 2016. Determination of equilibrium isotherms and proper mathematical model for lime slices. AgricEngInt: CIGR Journal,

Comment [a1]: Is it right? Please confirm it.

Comment [m2]: According to the BET equation we have moisture content (m) (g H₂O/g solid) and consequently the m_0 dimension obtains g H₂O/g solid)

$$\frac{a_w}{m(1-a_w)} = \frac{1}{m_0 c} + \left(\frac{c-1}{m_0} \right) a_w$$

According to the Mohsenin 1986: pp 68-70

$$\frac{m \text{ (g H}_2\text{O/g solid)}}{m_0 \text{ (g H}_2\text{O/g solid)}} = \frac{c a_w}{(1-a_w)[1+a_w(c-1)]}$$

Received date: Accepted date:

Corresponding author: Masoud Barati Kakolaki, Email: masoud.barati90@yahoo.com

1 Introduction

Lime (*Citrus aurantifolia*) has a lot of pharmaceutical and alimentary properties. In order to control the drying process and storage conditions, besides the knowledge of thin layer drying equations, the data on physical properties including equilibrium moisture content are needed which may be expressed in moisture desorption isotherms. To optimize storage stability, knowledge of the relationship between the equilibrium moisture content (EMC) in the plant material and the relative humidity (RH) of the surrounding air at the given temperature is required to avoid the deterioration by microbial and enzymatic activity (Karel and Yong, 1981). The moisture sorption isotherm of food graphically relates its equilibrium moisture content in either desorption or adsorption to the water activity (a_w) at a definite temperature. This knowledge is required to stop the drying process at the aimed moisture content in order to save energy (Hamer et al., 2000). The EMC value may be related to air temperature. The effect of air temperature rise was investigated by Zomorodian and Tavakoli (2007). Fourteen mathematical models have been proposed for describing the water sorption of various foods and agriculture materials. Some of the mostly applied equations are Caurie, Chung-Pfost, GAB, Halsey, Henderson, Kuhn, Modified BET, Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Oswin, Modified Smith, Oswin and Peleg. Researches on the temperature dependence of isotherms and mathematical models to represent desorption isotherms have been extensively reported in literatures (Zomorodian, 1979; Van den Berg and Bruin, 1981; Lee and Lee, 2008; Janjai et al., 2009; Al-Muhtaseb et al., 2010; Zomorodian et al., 2011; Argyropoulos et al., 2012). Lahsasni et al. (2002) found the BET and Henderson models as the most suitable for describing the sorption curves for prickly pear peel. They used the BET equation of monolayer moisture content values for the sorption at different temperature for determining the pertinent parameter for the product and optimum overall stability at the monolayer constant values. The desorption isotherms data are useful in the drying analysis while the adsorption isotherms data can be used for establishing a storage method (Cordeiro et al., 2006). The moisture sorption isotherm data of walnut kernels were determined at three different temperatures (25°C, 35°C and 45°C) and of the models tested, the Peleg model gave the best fit to experimental data and also the BET equation was applied to the monolayer moisture content (Tog˘rul and Arslan, 2007). Using the static gravimetric method at three temperatures (40, 50 and 60 °C) and in wide range of water activity (0.109 – 0.891) desorption and adsorption data of orange peel and leaves were best fitted by the Peleg model (Bejar et al., 2012). Desorption and absorption isotherms for *Melissa officinalis* L. (Lemon Balm) were determined at four different temperatures (25°C, 40°C, 50°C and 60°C), Experimental data were fitted using the mathematical models. Halsey's model was found to be the most suitable for describing the desorption curves at the temperatures of 25 and 40 and BET's model was most suitable for describing the data at the temperatures of 50°C and 60°C (Cuervo-Andrade and Hensel, 2013). The adsorption and desorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity relationships of sunflower seeds with four different oil contents were obtained and the Modified Halsey model was the best models for predicting equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity relationships (Macielet al, 2015). The monolayer moisture content shows the amount of water that adsorbed by a single layer to binding sites in the material. The water binding properties of active points in roasted seeds were probably reduced; hence, some water sorption active points disappeared (Martinez and Chiralt, 1996). Not much information is available about desorption isotherms of lime slice. As desorption isotherm is one of the basic parameters of the drying process, this work will give

an important contribution to the optimization of the drying of lime slice. The other objective was to determine desorption parameters such as monolayer moisture content values.

2 Materials and methods

2.1 Experimental procedure

The limes with average moisture content of 14.9(%d.b) was harvested from a garden in Jahrom (Fars province, Iran). To perform the test, lime was become in a thin layer to a thickness of 4 mm by a digital caliper (MarCal 16 ER, Germany; maximum Measuring range of 300 mm; ± 0.01 mm). After sterilization, each of lime slices wrapped in paper towels and was kept in a cool, dry enclosure for preventing spoilage and any changes in the moisture content of the product during the trial. A controlled environment chamber (in terms of temperature and relative humidity) is required. To achieve this objective, a completely enclosed chamber, fully insulated and controlled in terms of thermodynamic conditions was employed (100cm $\times$ 60cm $\times$ 60 cm), Figure 1. In order to reduce the equilibrium time, a fan assisted by 1000 W thermostatic electrical heater was used to change the temperature of the air and circulate atmosphere inside the chamber is being used (Labuza, 1984). To carry out the test, the number of 25 lime slices were placed in a thin layer inside baskets. The basket was hung from the under hook of an electronic balance (GF-600, A&D Instruments Ltd., Oxon, UK, maximum capacity of 610 g; ± 0.001 g). The experiments were performed at three temperatures (30°C, 40°C and 50°C, $\pm 0.5^\circ\text{C}$), and seven air relative humidity (11% to 91%, $\pm 1\%$), using super saturated salt solutions of LiCl, $\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, CaCl_2 , MgCl_2 , KNO_2 , MgNO_3 , NaNO_2 , NaCl and KNO_3 . The experiments were conducted in three replications beginning with the highest environmental relative humidity and lime slices initial moisture content of 14.5 % db. Thus desorption process was continued by changing the proper saturated salt solutions at constant chamber air temperature. In order to avoid any gain or loss during the sample weighing, the automatic balance was set to weight the samples periodically until the successive weigh records showed no significant changes (± 0.005 g). When equilibrium was reached (ranging from 3 days to 2 weeks depending on the temperature and relative humidity), the samples were dried using oven method (at 105 °C for 24 h) in order to obtain dry matter contents (Park et al., 2002).

Comment [a3]: Please add detailed information of lime slice and equipments used in your study.

- A: Chamber test
 B: Desk
 C: Digital scale
 D: Electrical circuit boards
 E: Moisture meter display
 F: Thermostat display

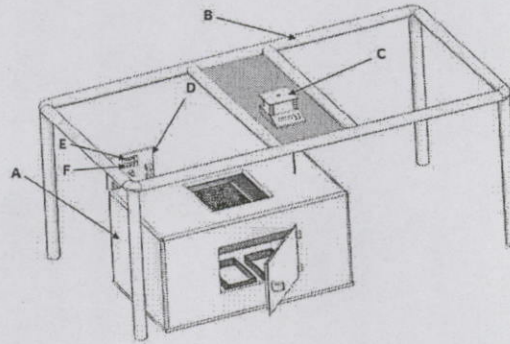


Figure 1 – The equipment for the desorption isotherm measurement

2.2 Data analyses

2.2.1 Determination of desorption isotherm model

The experimental desorption data of all the samples at three different temperatures was fitted to fourteen theoretical and empirical equations (Modified BET, Henderson, GAB, Caurie, Chung and Pfof, Modified Chung and Pfof, Halsey, Cohen, Oswin, Peleg, Modified Oswin, Modified Henderson, Modified Smith, Modified Halsey). Nonlinear regression analysis, using the statistical software SPSS 16.0 and the statistical factors (Coefficient of determination (R^2), chi-square (χ^2), Root of mean square error (RMSE) and Mean of relative deviation (MRD), was used for interpreting the experimental data. The R^2 , χ^2 , RMSE and MRD are defined as (Zomorodian, 1979):

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

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

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

$$MRD = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{MR_{exp,i} - MR_{pre,i}}{MR_{exp,i}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Where EMC_{exp} is the equilibrium moisture content by experiment, EMC_{pre} is the predicted EMC due to models, N is the number of experimental data on relative humidity and n is the number of constants in each model.

2.2.2. Monolayer moisture content

The monolayer moisture content which is of significant importance to the physical and chemical stability of dehydrated materials with regard to lipid oxidation, enzyme activity, non-enzymatic browning, flavour components preservation, and structural characteristics (Labuza et al, 1970; Karel and Yong, 1981), can be determined from the equilibrium desorption isotherms by means of the two parameter of BET (Brunauer-Emmett-Teller) equation (Brunauer, Emmett and Teller, 1938). To predict the desorption monolayer moisture content at different ambient temperatures, the experimental values of a_w (ERH/100) and m (EMC) were used to find the best fit regression line of the BET monolayer moisture content equation which can be a useful tool in predicting the monolayer value (Zomorodian et al, 2011).

$$\frac{a_w}{m(1-a_w)} = \frac{1}{m_0 c} + \left(\frac{c-1}{m_0} \right) a_w \quad (5)$$

Where a_w is water activity (decimal), m is the moisture content (gH₂O/g solid) at a given a_w , m_0 is the monolayer moisture content (gH₂O/g solid), and c is a constant showed the dependence between monolayer moisture content and temperature (Menkov et al. 1999). If a_w values, as independent variables, are plotted versus the $[a_w/m(1-a_w)]$ values, as dependent variables, a unique linear regression line diagram displayed having $c-1/m_0c$ as its slope and $1/m_0c$ as its intercept (Pernille, 2007). The influence of temperature on monolayer moisture content is required to be studied for moisture sorption characteristic of a food (Choudhury et al, 2011).

3 Results and discussion

3.1 Equilibrium isotherms and mathematical

The experiments were conducted on lime slice equilibrium moisture content at three air temperatures and relative humidity of 30°C, 40°C and 50°C and 11% to 91%, respectively. Figure 3 presents the experimental data of desorption of lime slice at three temperatures. These

Comment [a4]: Please add more analysis in according to the figure and table.

curves provide a good representation of Type II (sigmoidal) according to the BET classification, typical of the most biological products (Brunauer, 1945).

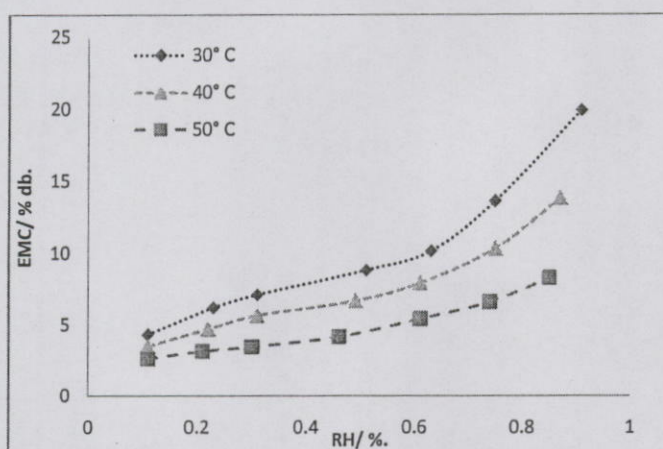


Figure 3 Desorption isotherm data of lime slice at three temperatures

At constant relative humidity, the EMC values decreased with an increase in temperature, while the EMC value increased with an increase in relative humidity at constant temperature. This behavior may be explained by considering excitation states of water molecules. At increased temperatures, molecules are in an increased state of excitation, thus increasing their distance apart and decreasing the attractive forces between them. This leads to a decrease in the degree of the EMC at a given water activity with increasing temperature (Kouhila et al., 2002; Zomorodian et al., 2011). The equilibrium moisture content increases with increasing relative humidity (water activity) at a constant temperature. This can be explained in such a way that when relative humidity rises, the water vapor partial pressure reaches closer to saturation vapor pressure and thus the pressure gradient (water potential) between the material and the environment arises, thus more moisture is absorbed. In a general way, both temperature and water activity have significant effect on experimental equilibrium moisture content values. The typical S-shape curves were found for all three temperatures. Similar trends have been observed in several other studies for agricultural and food products (Zomorodian, 1979; Ait Mohamed et al., 2004; Zanoelo, 2005; Jamali et al., 2006; Zomorodin and Tavakoli, 2007; Hii et al., 2009; Zomorodian et al., 2011). The selected models were fitted to the experimental data of the lime slice. The Coefficient of

determination (R^2), chi-square (χ^2), Root of mean square error (RMSE) and Mean of relative deviation (MRD) of equations are listed in Tables 1, 2 and 3.

Table 1 Estimated values of statistical indicators and model parameters for desorption models (30 °C)

Model	R^2	MRD	χ^2	RMSE
Caurie	0.977	0.084	0.785	0.748
Chung and Pfo	0.980	0.080	0.662	0.687
GAB	0.996	0.043	0.179	0.320
Halsey	0.987	0.086	0.421	0.549
Henderson	0.969	0.115	1.023	0.425
Cohen	0.905	0.177	3.189	1.509
Oswin	0.994	0.038	0.185	0.363
Modified BET	0.340	0.443	27.610	3.972
Modified Chung and Pfo	0.980	0.080	0.828	0.687
Modified Halsey	0.987	0.086	0.527	0.548
Modified Henderson	0.969	0.117	1.666	0.975
Modified Oswin	0.994	0.038	0.231	0.364
Modified Smith	0.993	0.064	0.386	0.406
Peleg	0.998	0.028	0.128	0.235

Comment [a5]: Please revise the table use standard 3-lines table.

According to the table 1, the Peleg model can be used to describe the desorption of lime slices at the 30 °C, based on the levels of RMSE, χ^2 , MRD and R^2 .

Table 2 Estimated values of statistical indicators and model parameters for desorption models (40 °C).

Model	R^2	MRD	χ^2	RMSE
Caurie	0.982	0.062	0.227	0.445
Chung and Pfo	0.981	0.065	0.284	0.450
GAB	0.997	0.034	0.067	0.195
Halsey	0.994	0.059	0.089	0.252
Henderson	0.970	0.093	0.484	0.588
Cohen	0.938	0.165	0.937	0.818
Oswin	0.996	0.034	0.067	0.220
Modified BET	0.558	0.324	8.375	2.187
Modified Chung and Pfo	0.981	0.065	0.355	0.450
Modified Halsey	0.999	0.051	0.156	0.299
Modified Henderson	0.970	0.094	0.578	0.574
Modified Oswin	0.996	0.034	0.084	0.220
Modified Smith	0.994	0.177	2.116	0.952
Peleg	0.999	0.016	0.020	0.093

Comment [a6]: Please revise the table use standard 3-lines table.

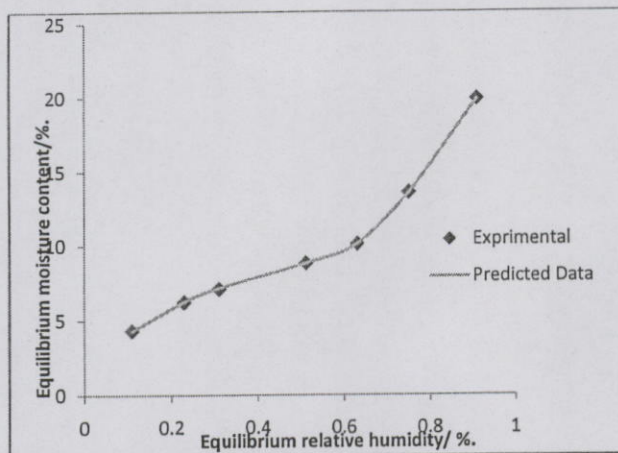
The results of the non-linear regression of desorption isotherms of lime slices, at 40 °C, are shown in Table 2. The table 2 indicates that the Peleg model also showed a good fitting for the lime slices at given temperature.

Table 3 Estimated values of statistical indicators and model parameters for desorption models (50 °C).

Model	R ²	MRD	χ^2	RMSE
Caurie	0.992	0.040	0.046	0.182
Chung and Pfost	0.983	0.065	0.083	0.243
GAB	0.990	0.015	0.008	0.069
Halsey	0.995	0.025	0.023	0.128
Henderson	0.969	0.094	0.156	0.334
Cohen	0.942	0.108	0.293	0.458
Oswin	0.993	0.046	0.033	0.154
Modified BET	0.512	0.308	3.077	1.326
Modified Chung and Pfost	0.983	0.065	0.104	0.243
Modified Halsey	0.999	0.025	0.028	0.128
Modified Henderson	0.969	0.094	0.193	0.332
Modified Oswin	0.993	0.046	0.041	0.154
Modified Smith	0.998	0.019	0.013	0.076
Peleg	0.999	0.012	0.009	0.064

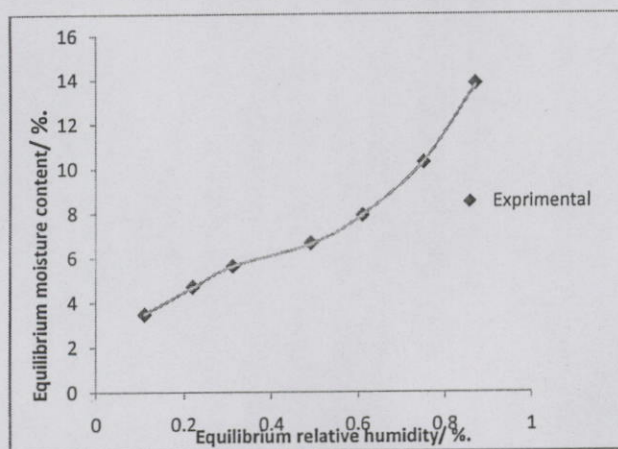
Comment [a7]: Please revise the table use standard 3-lines format.

Models with the highest R² and the lowest χ^2 , MRD and RMSE values were selected to predict the EMC for lime slices. Examination of the results in these Tables indicated that the Peleg model suitably describes the experimental desorption data for lime slices throughout the entire range of water activity. In this way, the parameters of the Peleg model can be recommended for prediction of desorption isotherms of lime slices in the temperature and water activity ranging from 30 to 50 °C and from 11% to 91%, respectively. The comparison between the best fit (Peleg model) and the experimental values is shown in (Figures 4, 5 and 6).



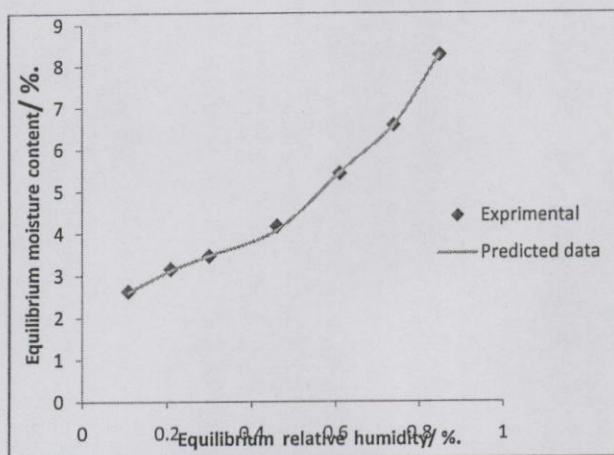
Comment [a8]: Please replace the unit format of ,% with %.

Figure 4 Experimental and predicted (Peleg model) desorption isotherms of lime slice at 30 °C



Comment [a9]: Please replace the unit format of ,% with %.

Figure 5 Experimental and predicted (Peleg model) desorption isotherms of lime slice at 40 °C



Comment [a10]: Please replace the unit format of ,% with /%.

Figure 6 Experimental and predicted (Peleg model) desorption isotherms of lime slice at 50 °C

In Figures 4–6, the adjustment of experimental data with the Peleg model shows a good agreement between experimental and predicted data. Furthermore, this model provides a good representation of Type II (sigmoidal). Comparing the three figures shows that the EMC decreases by increasing in temperature at constant equilibrium relative humidity. Ethmane Kane et al. (2008) reported that the increase of temperature promotes the detachment of water molecules from the water binding sites. Subsequently increasing the temperature lessens the water desorption degree.

3.2 Monolayer moisture content

The values of monolayer moisture content of lime slices estimated with BET model can also be observed in Table 4 and are in the acceptable range for food products. The monolayer moisture content decreases with increasing temperature and the pertinent parameter c increases with increasing temperature (Figures 7, 8 and 9). This effect can be argued that as the chamber temperature changes, the excitation of molecules and the molecular distance would be changed. (Chung and Pfof, 1967; Zomorodian and Tavakoli, 2007).

Table 4 Values of monolayer moisture content (m_o) and constant c at three micro-environmental air temperatures of 30 °C, 40 °C, 50 °C.

	m_o (kg H ₂ O/kg solid)	Constant c
BET equation at 30 °C	0.023	-4.925
BET equation at 40 °C	0.021	-6.543
BET equation at 50 °C	0.014	-7.035

Comment [a11]: Please revise the table use standard 3-lines format.

The highest value of monolayer moisture content i.e. 0.023 kg H₂O/ kg solid was found in the desorption process at 30 °C and the minimum value i.e. 0.014 kg H₂O/ kg solid was found in the desorption process at 50 °C. As temperature increased from 30 to 50 °C, the monolayer value decreased in desorption process. This may be due to higher water vapour pressure inside the lime slices at higher temperature. This behaviour has been ascribed to a reduction in the number of active sites due to physical and chemical changes induced by temperature (Rizvi 1986).

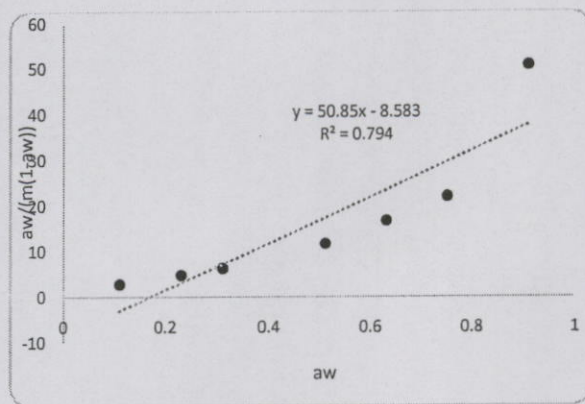


Figure7 The BET monolayer moisture content plot at 30°C

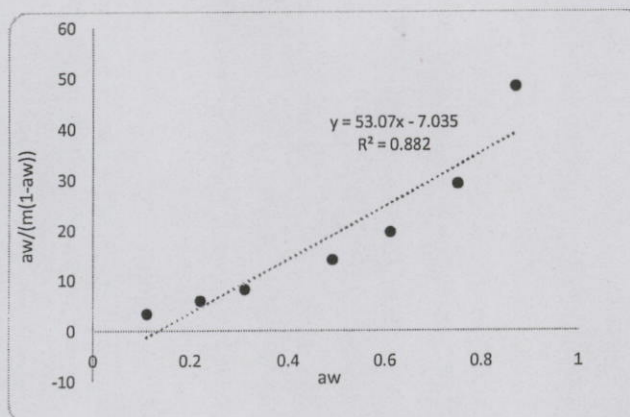


Figure8 The BET monolayer moisture content plot at 40 °C

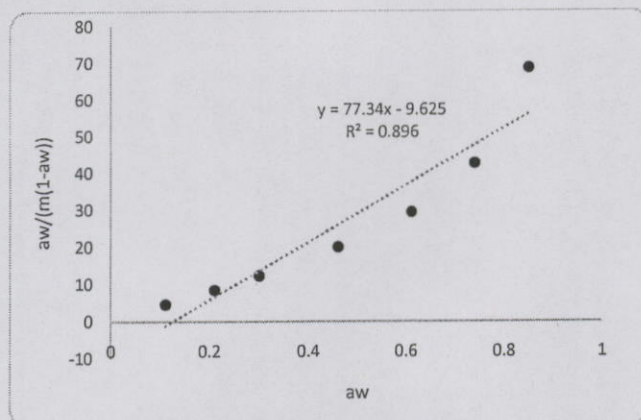


Figure9 The BET monolayer moisture content plot at 50°C

4 Conclusions

Based on the results, the following conclusions can be drawn from the study:

- The EMCs of lime slices increased directly proportionally to water activity and inversely proportionally to temperature.
- The Peleg model provided more accurate predictions about the desorption data.
- The monolayer moisture contents decreased as temperature increases.

Abbreviations

aw _ water activity (decimal); a, b, c, d, e, _ constants, EMC _ equilibrium moisture content (% d.b); MSE _ mean square error; R^2 _ determination coefficient; T _ environmental absolute temperature (K); χ^2 - Chi-Square; RMSE - Root Mean Square Error, MRD- Mean of relative deviation

Reference

- L.Ait Mohamed, M. Kouhila, S. Lahsasni, A. Jamali, A. Idlimam, M. Rhazi, M. Aghfir, M. Mahrouz. 2004. Equilibrium moisture content and heat of sorption of *Gelidiumsaccharum*. *Journal of Stored Products Research*, 41(2): 199-209.
- Argyropoulos, D., Alex, R., Kohler, R., and Muler, J. 2012. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of leaves and stems of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) Established by dynamic vapor sorption. *LWT - Food Science and Technology*, 47(2): 324-331.
- Al-Muhtaseb A., Muhanned A. Hararah, E.K. Megahey, W.A.M. McMinn, and T.R.A. Magee. 2010. Moisture adsorption isotherms of microwave-baked Madeira cake. *LWT - Food Science and Technology*. 43 (7): 1042-1049

Comment [a12]: Conclusions serve as the review of the main results. Please revise it.

Comment [a13]: Please add the issue number

Brunauer, S., P. H. Emmett, and E. Teller. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2): 309-319.

Brunauer, S. 1945. The Adsorption of Gases and Vapors, vol. 1. Princeton University Press, New York.

Bejar, A. K., N. B. Miaoui, and N. Kecaou. 2012. Moisture sorption isotherms - Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry*, 132: 1728-1735.

Cordeiro, D.S., Raghavan, G.S.V., Oliveira, W.P. 2006. Equilibrium moisture content models for maytenusilicifolia leaves. *Journal of Biosystem Engineering*, 94(2): 221-228.

Chung, D.S. and H.B. Pfost, 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain and their products. *Transactions of the ASAE*, 10(4), 549-557.

Comment [a14]: Complete the volumn number

Debangana Choudhury, Jatindra K. Sahu, G.D. Sharma. 2011. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and properties of sorbed water of raw bamboo (*Dendrocalamus longispathus*) shoots. *Industrial Crops and Products*, 33 (1): 211-216

Ethmane Kane, C.S., Kouhila, M., Lamharrar, A., Idlimam, A., Mimet, A., 2008. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of two mints: *Mentha pulegium* and *Mentha roundifolia*. *Rev. Energies Renouv.* 11(2): 181-195.

Maciel G, de la Torre D, Izquierdo N, Cendoya G, Bartosik R. 2015. Effect of oil content of sunflower seeds on the equilibrium moisture relationship and the safe storage condition. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 17(2): 248-254

Comment [a15]: Complete the year

Hamer, P.J.C., Knight, A.C., McGechan, M.B., Cooper, G. 2000. Model for predicting the field drying characteristics of grass conditioned by maceration (severe treatment). *Journal. Agricultural Engineering Research*, 75 (3): 275-289.

Comment [a16]: Full name

Hii, C.L., C.L. Law, and M. Cloke. 2009. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, 90: 191-198

Jamali, A., M. Kouhila, L. Ait Mohamed, A. Idlimam, and A. Lamharrar. 2006. Moisture adsorption-desorption isotherms of *Citrus reticulata* leaves at three temperatures. *Journal of Food Engineering*, 77: 71-78.

Comment [a17]: Full name

Janjai, S., Intawee, P., Tohsing, K., Mahayothee, B., Bala, B.K., Ashraf, M.A. 2009. Neural network modeling of sorption isotherms of longan (*Dimocarpus longan* Lour.). *Computers and Electronics in Agriculture*, 66 (9): 209-214

Karel, M. and S. Yong. 1981. Autoxidation-initiated reactions in foods. In L. B. Rockland, and G. F. Stewart, *Water Activity: Influences on Food Quality* (pp. 511-529). New York: Academic Press.

Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M., Lahsasni, S. 2002. Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan *Eucalyptus globulus*. *Journal of Drying Technology*, 20(10): 2027-2039.

Comment [a18]: Full name

Labuza, T. P., Tannenbaum, S. R., and Karel, M. 1970. Water content and stability of low-moisture and intermediate-moisture foods. *Food Technology*, 24(5):35-42.

Labuza, T.P. 1984. Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. American Association of Cereal Chemists, American, St. Paul, MN.

Lee, J.H. and M.J. Lee. 2008. Effect of drying method on the moisture sorption isotherms for *Inonotus obliquus* mushroom. *LWT- Food Science and Technology*, 41(8): 1478-1484.

Comment [a19]: Full name

Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. and Kechaou, N. 2002. Experimental study and modeling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 55(3): 201-207.

Martinez, N. N., and A. Chiralt. 1996. Influence of roasting on the water sorption isotherms of nuts. *Food Science and Technology International*, 2(6): 399-404.

Menkov, N.D., H.M. Paskalev, D.I. Galyazkov, D.I., and M. Kerezieva-Rakova. 1999. Applying the linear equation of correlation of Brunauer - Emmet - Teller (BET)-monolayer moisture content with temperature. *Nahrung/Food*, 43(2): 118 - 121.

Park, K.J., Vohnikova, Z., Brod, F.P.R., 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*. 51 (3), 193-199.

Pernille N. Jensen, Jens Risbo. 2007. Oxidative stability of snack and cereal products in relation to moisture sorption. *Food Chemistry*, 103 (3): 717-724

Rizvi, S.S.H., 1986. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H. (Eds.), *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker Inc., New York, pp. 133-214.

Cuervo-Andrade, P. and O. Hensel. 2013. Experimental determination and mathematical fitting of sorption isotherms for Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.). *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 15(1): 139-145

Comment [a20]: Complete the year

Comment [a21]: Page number

Tog̃rul, H and N. Arslan. 2005. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels. *Journal of Stored Products Research*, 43 (3): 252 - 264.

Van den Berg, C., and S. Bruin. 1981. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In L. B. Rockland and G. F. Steward (Eds.), *Water activity: Influences on food quality* (pp. 1-61). New York: Academic Press.

Zanoelo, E.F. 2005. Equilibrium moisture isotherms for mate leaves. *Biosystem. Engineering, PH-Postharvest Technol*, 92(4): 445-452.

Zomorodian, A. 1979. Thin-and-thick-layer drying characteristics for Iranian rough rice varieties. M. S. Thesis. *Shiraz University*, Shiraz, Iran.

Zomorodin, A. and R. A. Tavakoli. 2007. The Adsorption-Desorption Hysteresis Effect on Pistachio Nuts. *Journal of Agricultural and Technology*, 9(4): 259-265.

Zomorodian, Ali, Kavooosi, Zahra, Leila Momenzadeh. 2011. Determination of EMC isotherms and appropriate mathematical models for canola. *Food and Bioproduct Processing*, 89(4): 407–413.



بررسی رفتار لزج - کشسان میوه خرمالو در طی نگهداری با استفاده از مدل‌های آسایش تنش

فرهاد سلمانی زاده جوپاری^۱ - علی اصغر زمردیان^{۲*} - حسین رحمانیان^۳ - حسن صفی پاری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۱۰

چکیده

میوه‌های خرمالو از زمان برداشت تا مصرف در معرض شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرند. از آنجاییکه ویژگی‌های رئولوژی میوه‌ها برای هر عملیات فرآوری مهم می‌باشد، رفتار لزج-کشسان میوه‌های خرمالو در طی نگهداری در شرایط محیطی بوسیله‌ی تخمین پارامترهای آسایش آن از طریق داده‌های تجربی آسایش تنش بررسی شد. رفتار رئولوژی میوه‌های خرمالو تحت آزمون فشاری تک محوری برای رهایی تنش به مدت ۴۸۰ ثانیه ارزیابی شد. سه مدل معروف آسایش تنش به نام‌های مدل سه جزئی ماکسول عمومی، ناسینوویچ و پلگ بر داده‌های تجربی برازش شدند و برای ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، خطای استاندارد تخمین (SEE) و درصد خطای نسبی متوسط (ARE%) استفاده گردید. نتایج نشان داد که در طی نگهداری میوه خرمالو در شرایط محیطی مقدار تنش اولیه لازم برای ایجاد یک کرنش ثابت در میوه کامل به طور معنی‌داری به میزان ۸۰٪ کاهش یافت، ولی زمان آسایش تنش در گستره ی ۳۱۲/۱۰ تا ۳۵۳/۹۰ ثانیه افزایش یافت. طبق نتایج بدست آمده در طی نگهداری میوه، رفتار کشسان میوه خرمالو تشدید و سفتی آن کاهش یافت. هر سه مدل رفتار لزج-کشسان میوه‌های خرمالو را تایید کردند، با این وجود مدل‌های سه جزئی ماکسول عمومی (با $R^2=0.999$ ، $SEE=0.017$ و $ARE=0.19\%$) و ناسینوویچ (با $R^2=0.996$ ، $SEE=0.057$ و $ARE=0.36\%$) بهترین مدل‌ها در پیش بینی داده‌های تجربی بودند.

واژه‌های کلیدی: مدل سه جزئی ماکسول، مدل ناسینوویچ، مدل پلگ، آسایش تنش، شاخص‌های لزج-کشسان

مقدمه

لزج-کشسان توصیف می‌شوند، به طوریکه خواص آسایش تنش^۵ و مقاومت آنها وابسته به زمان می‌باشند. دانش رفتار لزج-کشسان مواد غذایی و محصولات کشاورزی در زمان بررسی عملیات‌های پس از برداشت همچون حمل و نقل، انتقال، فرآوری و نگهداری حائز اهمیت می‌باشد. همچنین داده‌های مربوط به خواص لزج-کشسان به عنوان یک ورودی برای مدل‌های ریاضی، که تنش‌های داخلی و ایجاد ترک را در طول عملیات‌های فرآوری و حمل و نقل مختلف توصیف و پیش بینی می‌کنند، مورد نیاز می‌باشند (Waananen & Okos, 1992). خواص مکانیکی پارامترهای مهمی را که بازتاب کیفیت مواد غذایی می‌باشند، توصیف می‌کند (Bourne, 2002). این پارامترها بافت^۶، سفتی^۷ و قابلیت جویدن^۸ را شامل می‌شوند. مواد لزج-کشسان، پدیده آسایش تنش را که یکی از مهمترین فاکتورها در توصیف محصولات کشاورزی می‌باشد، در بر می‌گیرند. زمان آسایش تنش چگونگی سرعت از بین رفتن تنش بعد از دریافت یک تغییر شکل ناگهانی را

خرمالو (*Diospyres kaki*) میوه خوراکی متعلق به شرق آسیا بوده و به طور عمده در چین کشت می‌شود. این میوه در کشورهایی مانند ایتالیا، برزیل، فلسطین، اسپانیا، آمریکا، استرالیا و نیوزیلند نیز کشت می‌شود. حدود ۴۰۰ گونه از این میوه در اندازه و رنگ‌های مختلف وجود دارد. این میوه سرشار از مواد مغذی مانند ویتامین C (۷۰ میلی گرم در ۱۰۰ گرم گوشت میوه)، کلسیم (۹ میلی گرم در ۱۰۰ گرم گوشت میوه) و آهن (۰/۲ گرم در ۱۰۰ گرم گوشت میوه) می‌باشد (Tous & Ferguson, 1996). همچنین این میوه از لحاظ ترکیبات فنولی و اثرات تسانی و آنتی اکسیدانی بسیار غنی می‌باشد (Gorinstein et al., 2000). بیشتر محصولات کشاورزی که مشخصات مایعات و جامدات را باهم دارا می‌باشند، به عنوان مواد

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی.

۲، ۳ و ۴- به ترتیب استاد و دانشجویان دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

* - نویسنده مسئول: (Email: Zomorod@shirazu.ac.ir)

5 - Stress Relaxation

6 - Texture

7 - Firmness

8 - Chewability

در تمامی واریته‌ها به جز واریته ی سوکاری^۷ در مرحله خلال، کوتاهتر از مرحله ی رطب می‌باشد. Rajabipour و همکاران (۲۰۰۴) آزمون آسایش تنش پوست گوجه فرنگی را با استفاده از روش حلقه ای^۸ انجام دادند و با این روش ضرایب مدل ماکسول عمومی^۹ را تعیین نمودند. Khazaei و Mann (۲۰۰۴) اثر دما و سرعت بارگذاری را روی رفتار مکانیکی و آسایش تنش میوه ی خولان دریا^{۱۰} (سنجد تلخ) انجام داده و نشان دادند که میزان تغییر شکل و سرعت بارگذاری یک اثر کاهشی و دما یک اثر افزایشی روی زمان آسایش تنش دارد. Khazaei و Mann (۲۰۰۵) در مطالعه ای اثر رطوبت و دفعات بارگذاری را روی رفتار آسایش تنش دانه ی نخود بررسی نموده و گزارش کردند که میزان رطوبت یک اثر کاهشی و دفعات بارگذاری یک اثر افزایشی روی مقادیر جزء کشسان و زمان آسایش جمله ی اول مدل ماکسول سه جزئی دارد. Del Nobile و همکاران (۲۰۰۷) توانایی مدل ماکسول عمومی برای توضیح رفتار آسایش تنش مواد غذایی شبه جامد را مورد بررسی قرار دادند. آنها از مواد غذایی حجمی و متخلخل استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی با دقت خوبی بر داده‌های آزمایشی منطبق می‌باشد. در صنعت میوه به دلیل شرایط بازارهای داخلی و خارجی و میزان عرضه و تقاضای محصول، بسیاری از میوه‌های فصلی در مرحله کال (نیمه رسیده) برداشت می‌شوند و تا زمان عرضه به بازار در یک شرایط محیطی ثابت نگهداری می‌شوند تا به صورت تازه و رسیده به دست مشتری برسد. اطلاعات کافی در مورد تغییرات لزج-کشسان میوه خرما در طی نگهداری در شرایط محیطی در منابع علمی در دسترس نیست. بنابراین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از: ۱) بدست آوردن داده‌هایی برای توصیف ویژگی‌های آسایش تنش میوه‌های خرما در طی نگهداری در شرایط محیطی ۲) بررسی اثر مدت زمان نگهداری بر رفتار لزج-کشسان میوه خرما و ۳) پیدا کردن بهترین مدل برای توصیف داده‌های آسایش تنش بدست آمده. اطلاعات این پژوهش می‌تواند در طراحی و مدل سازی فرایندهای برداشت، جابجایی و عملیات پس از برداشت میوه خرما به عنوان اطلاعات ورودی قابل استفاده باشد.

ملاحظات تئوری

مدل ماکسول عمومی یکی از مدل‌های رئولوژی مناسب برای توضیح رفتار لزج-کشسان محصولات کشاورزی می‌باشد (1992) این مدل بوسیله معادله زیر بیان می‌شود:

نشان می‌دهد. میوه‌های رسیده خرما در تمامی مراحل پس از برداشت، هدفی برای آسیب‌های مکانیکی حاصل از شکست در اثر یک سری بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌باشند. این چنین نیروهایی کاهش شدید کیفیت و افزایش احتمال خرابی محصول را در طی نگهداری باعث می‌شوند (Baragale et al., 1994). تعداد زیادی از شاخص‌های مکانیکی و رئولوژی^۱ علاوه بر شرایط فیزیکی از خواص لزج-کشسان نیز تاثیر می‌پذیرند که باید مورد بررسی قرار گیرند. در سالهای اخیر چندین پژوهش در زمینه آسایش تنش میوه‌ها و سبزیجات مانند کشمش (Lewicki & Spiess, 1995)، موز (Kajuna et al., 1998) و سیب زمینی (Fincan & Dejmek, 2003) انجام گرفته است. Lewicki و Wolf (۱۹۹۵) رابطه بین آسایش تنش کشمش‌های مختلف را در سطوح محتوای رطوبتی مختلف بررسی کردند. آنها دریافتند که کشمش‌ها می‌توانند به عنوان جسم شکننده در محتوای رطوبتی زیر ۲۵٪ طبقه بندی شوند، یعنی حدی که احتمال شکست در طول فشار محصول بالاست. Saravacos و Kostaropoulos (۱۹۹۵) برای محاسبه خواص لزج-کشسان یک رقم کشمش محلی به نام سالتانا^۲ که به طور طبیعی با نور خورشید خشک شده بود، از دستگاه آنالیزر پروفیل بافت^۳ استفاده کردند. آنها دریافتند که میوه‌های کشمش به صورت توده ای یا انفرادی از یک رفتار لزج-کشسان تبعیت می‌کنند، به طوریکه قسمت داخلی میوه جزء لزج و پوست بیرونی آن جزء کشسان را نشان می‌دهد. Kojima و همکاران (۱۹۹۱) از یک پراب^۴ بارگذاری برای اندازه گیری سفتی میوه‌های گوجه فرنگی به صورتی که مقادیر تنش به عنوان تابعی از زمان نمایش داده می‌شد، استفاده کردند. آنها دریافتند که رسیدگی میوه‌های گوجه فرنگی به یک کاهش تا زمان آسایش تنش کمینه مربوط می‌شود. Lima و Singh (۱۹۹۵) ثابت‌های رابطه بین رفتار لزج-کشسان چیپس‌های سیب زمینی و قابلیت شکست آنها را محاسبه کردند. داده‌ها نشان داد که متوسط مقدار مدول الاستیسیته ۸۱۳۰ پاسکال و ثابت زمانی ۶۲ ثانیه بود. Wu و Abbott (۲۰۰۲) مشاهده کردند که مشخصات لزج-کشسان گوجه فرنگی به طور واضح در طی مدت انبارداری تغییر کرده است. Hassan و همکاران (۲۰۰۴) در عربستان سعودی آزمون آسایش تنش هشت واریته ی خرما را در دو مرحله از مراحل رسیدگی خلال^۵ و رطب^۶ مطالعه نموده و گزارش دادند که زمان آسایش تنش

- 1 - Rheology
- 2 - Sultana
- 3 - Texture Profile Analyser
- 4 - Probe
- 5- Khalal
- 6- Rutab

- 7- Sukkarri
- 8 - loop technique
- 9 - Generalized Maxwell model
- 10- Sea Buckthorn Berries

مدل ماکسول عمومی را بوسیله ی تعریف اعداد ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب برای زمان های آسایش اولین، دومین و سومین جزء کشسان-لزوج ساده کردند. این مدل برای سه جزء کشسان-لزوج به صورت زیر فرمول بندی شده است (Nussinovitch & Peleg, 1990):

$$\sigma_t = \sigma_0 \left(A_1 + A_2 \exp\left(\frac{-t}{10}\right) + A_3 \exp\left(\frac{-t}{100}\right) + A_4 \exp\left(\frac{-t}{1000}\right) \right) \quad (3)$$

مدل دیگری که بر اساس تنش اولیه می باشد به صورت زیر است (Peleg & Pollak, 1982):

$$\sigma_t = \sigma_0 - \sigma_0 \left(\frac{abt}{1+bt} \right) \quad (4)$$

اگر $a=1$ باشد، مدل رفتار کشسان را بیان می کند، در حالیکه اگر $a=0$ باشد، تنش در یک زمان محدود به سمت صفر میل می کند (مانند جوهر مایع). پارامتر b نرخ تاخیر را بیان می کند. اگر $b=0$ باشد، تنش هرگز به آسایش کامل نمی رسد و هرچه میزان b کم باشد، نرخ تاخیر آسایش تنش به آرامی کاهش می یابد.

مواد و روش ها

آماده سازی نمونه ها

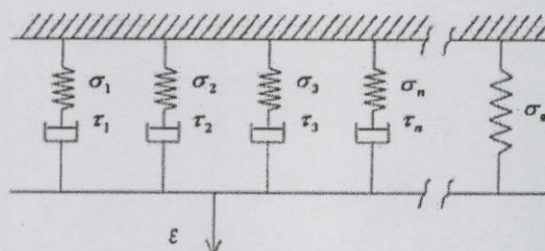
میوه های خرمالو رقم خرمندی در مرحله کال (نیمه رسیده و به رنگ نارنجی با رگ های سبز) به صورت دستی از یکی از باغات خرمالو در شهرستان شیراز واقع در استان فارس برداشت شدند. میوه های سالم و یکتواخت و عاری از هر گونه ضایعات از سایر میوه ها جدا شد و به بخش مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه شیراز منتقل گردیدند و در یک دستگاه ژرمیناتور^۲ (مدل X610، ساخت کشور ایران) به منظور کنترل نور، رطوبت و دما در طول شبانه روز، در دمای ۱۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۵ درصد به مدت ۲۲ روز نگهداری گردیدند. کلیه آزمایش ها در ۱۰ تکرار و در فاصله زمانی ۳ روز انجام شدند. میزان رطوبت اولیه میوه های خرمالو به وسیله آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس پس از رسیدن به وزن ثابت تعیین گردید (با خطای کمتر از ۰/۰۰۱ گرم)، که در نهایت میزان رطوبت اولیه میوه های خرمالو ۴۴/۲۶٪ (بر اساس وزن خشک) بدست آمد.

آزمون آسایش تنش

از یک دستگاه آنالایزر پروفیل بافت (TPA) (مدل TA.XT2، ساخت کشور انگلستان) به همراه یک نرم افزار ضمیمه (ورژن ۴/۰۸) برای عمل فشردن میوه های کامل خرمالو و انتقال داده ها به نرم افزار اکسل استفاده شد. این دستگاه به یک لود سل ۳۰ کیلوگرم نیرو مجهز شد. همچنین از یک پراب دیسکی به قطر ۷۵ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر همراه دستگاه آنالایزر بافت استفاده شد.

$$\sigma_t = \sigma_e + \sum_{i=1}^n \sigma_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (1)$$

در اینجا σ_t تنش وابسته به زمان، σ_e تنش جزء کشسان، σ_i تنش در هر جزء کشسان-لزوج ترکیب شده، t زمان کل آزمایش و τ_i زمان آسایش اجزای کشسان-لزوج ترکیب شده می باشند. اجزای این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- بیان فیزیکی مدل ماکسول

تعداد اجزای کشسان-لزوج بر اساس بیشترین تطابق مدل روی داده های آسایش تنش اندازه گیری شده، انتخاب می شوند. پژوهشگران زیادی حالت سه جزئی مدل ماکسول عمومی را برای توصیف رفتار واقعی محصولات کشاورزی مناسب دانسته اند (et al., Vozary & Meszaros, 2007; Khazaei & Campus 2010) Mann, 2004; هر جزء این مدل شامل یک فنر و یک میراگر^۱ به صورت سری بوده و این سه جزء به همراه یک فنر اضافی موازی، دستگاه مدل سه جزئی ماکسول عمومی را تشکیل می دهند. رابطه ی ریاضی این مدل را می توان با معادله ی ۲ نشان داد:

$$\sigma_t = \sigma_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) + \sigma_2 \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \sigma_3 \exp\left(\frac{-t}{\tau_3}\right) + \sigma_e \quad (2)$$

هر کدام از جملات مدل با اندیس های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. تابع زمانی تنش یا منحنی اصلی حاصل جمع سه جمله ی ۱، ۲ و ۳ و یک عدد ثابت مربوط به فنر اضافی می باشد. به دلیل اینکه جمله ی اول در مدل سه جزئی ماکسول عمومی (معادله ی ۲) بیشترین سهم را در توصیف رفتار مدل دارد، مقادیر جزء کشسان-لزوج و زمان آسایش مربوط به آن جمله (σ_1 و τ_1) در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است (Khazaei & Mann, 2004). Mohsenin (۱۹۸۶) جمله ای را که دارای بیشترین مقدار جزء کشسان-لزوج و زمان آسایش بوده، جمله ی اول مدل معرفی کرده و مقدار زمان آسایش آن را به عنوان زمان آسایش تنش ماده تلقی نموده است. Campus و همکاران (۲۰۱۰) نیز جمله ای را که شامل بزرگترین جزء کشسان-لزوج است جمله ی اول منظور کرده اند. Khazaei و Mann (۲۰۰۴) جمله ی دارای بزرگترین زمان آسایش را به عنوان جمله ی اول در نظر گرفته اند. Nussinovitch و همکاران (۱۹۸۹)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

همه ضرایب و ثابت‌های سه معادله مذکور با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی در نرم افزار SPSS (ورژن ۱۵/۰) بدست آمد. مدل‌های تخمینی بوسیله ی یک مجموعه جدید از داده‌های جمع آوری شده و با استفاده از معیارهایی مانند درصد خطای نسبی متوسط (ARE%) و خطای استاندارد تخمین (SEE) ارزیابی شدند *et al.*, (Zare 2012).

$$ARE = \frac{100}{N} \times \sum \frac{|x-y|}{x} \quad (5)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (x-y)^2}{N}} \quad (6)$$

در اینجا x داده‌های اندازه گیری شده، y داده‌های محاسبه شده در مدل‌ها و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

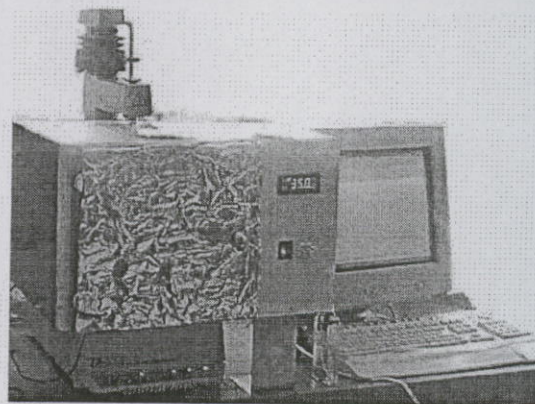
نتایج و بحث

اثر مدت زمان نگهداری

نمودارهای نیرو-زمان بوسیله ی تقسیم مقادیر نیروهای فشاری به مقادیر مساحت تماس متناظر با آنها، به نمودارهای تنش-زمان تبدیل شدند. روند نمودارهای آسایش تنش شبیه رفتار مواد وابسته به زمان مانند موز (Kajuna *et al.*, 1998) و کشمش (Lewicki & Spiess, 1995) بود. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مدت زمان نگهداری اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ بر روی میزان تنش اولیه (تنش لازم برای کرنش ثابت و معین نمونه در زمان صفر) که با مجموع اجزاء تنش برابر است، داشت (شکل ۳). همچنین با توجه به شکل ۳ با افزایش مدت زمان نگهداری میزان تنش اولیه به میزان ۸۰٪ کاهش یافت، بطوریکه کمترین و بیشترین مقادیر آن مربوط به روزهای اول و بیست و دوم نگهداری با مقادیر ۳۰/۱۷ و ۶/۰۶ مگاپاسکال بودند.

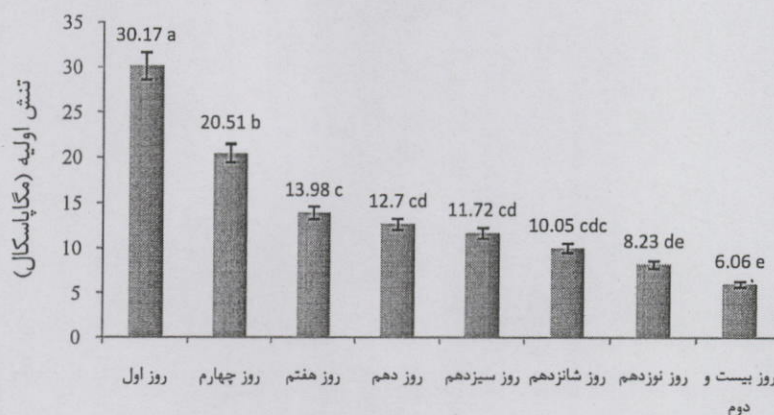
با افزایش مدت زمان نگهداری در یک شرایط محیطی ثابت، بافت میوه خرمالو نرم تر شده که قند بالای میوه خرمالو نیز این پدیده را تصدیق می‌کند که مولکول‌های تشکیل دهنده خرمالو به خاطر چسبندگی شان با افزایش مدت زمان نگهداری کمتر در هم گره خورده پس سفتی کمتری نیز دارند. در مورد مواد بیولوژیک اعتقاد بر این است که با افزایش مدت زمان نگهداری مولکول‌های کمتر در هم گره می‌خورند لذا تنش برشی کمتری برای به حرکت در آوردن مولکول در محلول لازم است (Campbell *et al.*, 2009). شکل ۴ نمودار آسایش تنش میوه کامل خرمالو را در اولین روز و آخرین روز نگهداری در شرایط محیطی نشان می‌دهد. مطابق این شکل سفتی میوه در آخرین روز نگهداری نسبت به اولین روز نگهداری به طور قابل توجهی کاهش یافته است و باعث شده برای کرنش ۳۰٪ در میوه تنش لازم از حدود ۳۰/۱۷ به ۶/۰۶ مگاپاسکال کاهش یابد.

سرعت عرضی حرکت پراب ۱ میلی متر بر ثانیه تنظیم شد و نمونه‌ها تا رسیدن کرنش به ۳۰٪ فشرده شدند. سپس پراب بارگذاری در این مقدار کرنش، به مدت ۴۸۰ ثانیه به منظور رهایی تنش نگه داشته شد. (Hassan *et al.*, 2004). یک محفظه شامل مدار کنترل دما به منظور ایجاد دمای ثابت با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس در طول آزمون‌های آسایش تنش، در اطراف پراب دستگاه آنالایزر بافت تعبیه شد (شکل ۲). همه آزمون‌ها با ۱۰ تکرار انجام شد.



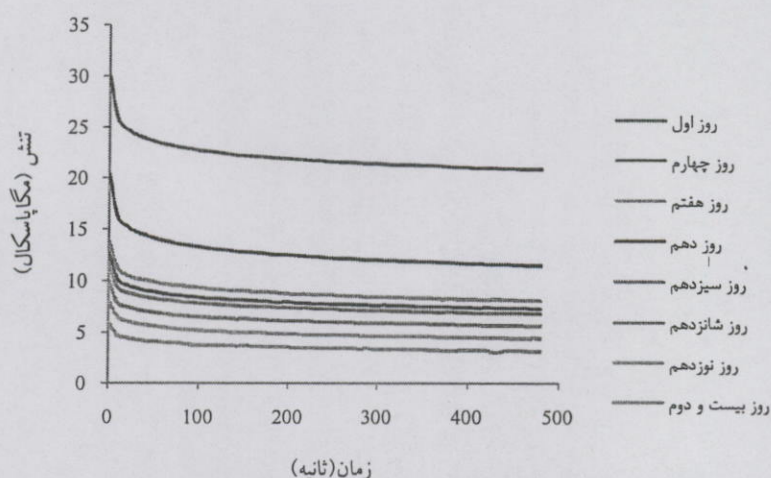
شکل ۲- محفظه کنترل دما اطراف پراب دستگاه TPA

مساحت سطح تماس بین پراب و هر یک از نمونه‌های میوه به صورت تقریبی محاسبه شد (Hassan *et al.*, 2004). سطح پراب دیسکی با یک کاغذ سفید پوشانده شد و سطح بالای نمونه‌ها با جوهر آغشته گردید. در طی آزمون آسایش تنش زمانی که پراب در حال پایین آمدن در راستای عرضی بود سطح تماس بر روی کاغذ سفید ایجاد می‌شد. سپس از کاغذهای شامل سطح رنگی تماس اسکن گرفته شد و به نرم افزار متلب (ورژن ۸/۰) به منظور محاسبه مساحت سطح تماس انتقال داده شد. در این نرم افزار ابتدا سطوح رنگی اسکن شده به تصاویر سطح خاکستری تبدیل شد و سطح تماس با استفاده از مقدار آستانه بهینه از زمینه تصویر جدا شد. در مرحله بعد تصاویر سطح خاکستری به شکل باینری (سیاه و سفید) تبدیل شدند. مساحت سطح تماس بوسیله شمارش پیکسل‌های سفید تصویر بدست آمد. یک تصویر سطح تماس که از قبل مساحت آن توسط کاغذ میلی متری محاسبه شده بود بمنظور بدست آوردن یک ضریب تبدیل مناسب از پیکسل به واحدهای استاندارد SI مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق، بیشترین زمان آسایش تنش مبنای تعیین جمله‌ی اول در مدل سه جزئی ماکسول عمومی بود و در نتیجه زمان آسایش مربوط به جمله‌ی اول به عنوان زمان آسایش نمونه‌های خرمالوی مورد آزمایش در نظر گرفته شد (Khazaei & Mann, 2004).



مدت زمان نگهداری (روز)

شکل ۳- مقایسه میانگین اثر مدت زمان نگهداری بر روی میزان تنش اولیه



شکل ۴- اثر مدت زمان نگهداری در شرایط محیطی بر روند آسایش تنش

جمله اول مدل و زمان آسایش مربوط به آن جمله به عنوان زمان آسایش تنش ماده در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به جدول ۱ در طی دوره نگهداری، میزان تنش جزء اول (σ_1) از مقدار $3/29$ تا $1/51$ مگاپاسکال کاهش یافته و زمان آسایش میوه ی کامل (τ_1) در گستره ی $312/10$ تا $353/90$ ثانیه متغیر بوده و متوسط آن $330/88$ ثانیه محاسبه شد که نشان می دهد بافت میوه ی کامل نرم تر و در عین حال ویژگی کشسان آن تشدید می شود. کاهش تنش در مواد لزج-کشسان به تدریج صورت گرفته و بسته به ساختار مولکولی ماده در یک زمان معین متوقف می شود. این کاهش تنش تا یک تنش تعادلی (σ_e) که بزرگتر از صفر می باشد ادامه می یابد. مقدار

همچنین با توجه به شکل ۴ میزان انحناء منحنی (قوس منحنی) آسایش تنش با گذشت زمان نگهداری کاهش یافته است که می توان گفت ویژگی کشسان میوه ی کامل خرمالو در طی نگهداری نه تنها کاهش نیافته، بلکه با توجه به شکل افزایش محسوسی داشته است (Sakuria & Nevins, 1992).

مدل های آسایش تنش

جدول ۱ مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول عمومی را که با استفاده از رابطه ۲ و روش رگرسیون غیرخطی محاسبه شده، برای میوه کامل خرمالو نشان می دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، جمله ای که دارای بیشترین زمان آسایش است به عنوان

کم زمان آسایش تنش در مقادیر رطوبت بالا عمدتاً ناشی از اثر نرم کنندگی آب است که مقدار زمان آسایش تنش را کاهش می‌دهد (Khazaei & Mann, 2005). با توجه به جدول ۲ مقادیر ثابت a مدل پلگ بین $0/30$ تا $0/47$ بدست آمد که بیشترین مقدار آن مربوط به روز آخر نگهداری می‌باشد. بر طبق مدل پلگ ثابت a ، رابطه ای مستقیم با میزان کشسان بودن میوه دارد (Hassan et al., 2004) که این موضوع افزایش میزان کشسان میوه را در طی نگهداری تصدیق می‌کند. همچنین با توجه به این جدول، مقادیر ثابت b بین $0/04$ تا $0/05$ بدست آمد. مدل ناسینوویچ نیز به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق گردید. ثابت‌های این مدل در جدول ۲ نشان داده شده اند.

این نتایج با نتایج Hassan و همکاران (۲۰۰۴) مشابه بود. همانطوریکه در شکل ۵ مشخص است، مدل سه جزئی ماکسول عمومی و مدل ناسینوویچ به طور کامل بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق شدند. همچنین طبق شاخص‌های آماری محاسبه شده، این مدل‌ها می‌توانند میزان تنش در حال آسایش را با کمترین خطا پیش بینی کنند.

زمان آسایش تنش بسته به سهم ویژگی لزوج یا کشسان ماده متفاوت است به طوریکه این زمان برای جامدات کشسان بسیار طولانی و برای مواد لزوج-کشسان از $0/1$ تا 10^8 ثانیه فرق می‌کند (Van Vliet, 1999). با توجه به جدول ۱ مقدار تنش تعادلی که محدوده تغییرات آن بین $20/14$ تا $2/48$ مگاپاسکال می‌باشد با گذشت زمان نگهداری به طور نسبی کاهش یافته است.

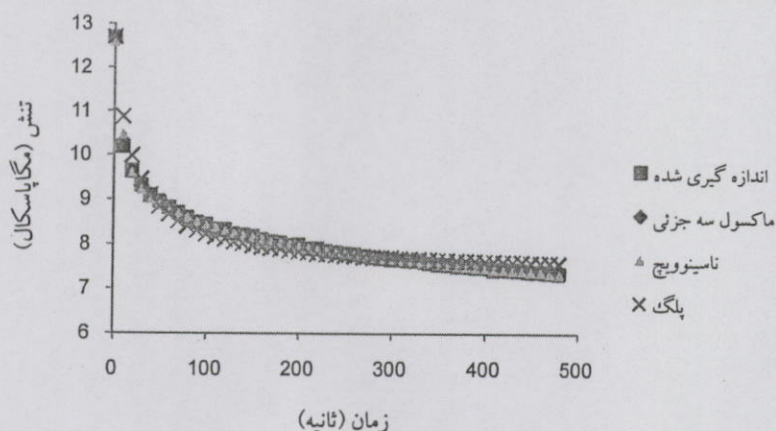
تغییرات خواص لزوج-کشسان یک ماده در حین نگهداری می‌تواند بر زمان آسایش تنش و بر مقدار اجزاء کشسان-لزوج اثرگذار باشد. Kajuna و همکاران (۱۹۹۸) اظهار نموده اند که کاهش مجموع مقادیر σ_1 ، σ_2 و σ_3 به عنوان اجزاء کشسان-لزوج در مدل ماکسول حاکی از کاهش ویژگی کشسان ماده تحت آزمایش است. زمان آسایش تنش نیز به طور غیر مستقیم خواص لزوج دیواره سلولی را نشان می‌دهد. هر چه این زمان بیشتر باشد ماده کشسان تر است (Sakuria & Nevins, 1992). بررسی تغییرات خواص لزوج-کشسان میوه خرمالو در طی نگهداری نشان داد که تغییر در ویژگی کشسان یا لزوج فقط تحت تاثیر تغییرات اجزاء تنش نیست بلکه به شدت تغییرات اجزاء تنش و زمان آسایش آنها نیز بستگی دارد. مقدار

جدول ۱- مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول عمومی در آزمون آسایش تنش میوه خرمالو

روز	σ_e (Mpa)	σ_1 (Mpa)	τ_1 (s)	σ_2 (Mpa)	τ_2 (s)	σ_3 (Mpa)	τ_3 (s)	R^2	SEE	ARE%
۱	۲۰/۱۴	۳/۲۹	۳۱۷/۹۰	۲/۴۹	۳۸/۰۹	۴/۷۰	۴/۷۲	۰/۹۹۹	۰/۰۱۴	۰/۰۵
۴	۱۰/۷۸	۳/۱۶	۳۲۰/۷۰	۲/۳۹	۳۸/۴۶	۴/۷۵	۴/۱۷	۰/۹۹۹	۰/۰۱۴	۰/۰۹
۷	۷/۶۴	۲/۱۸	۳۱۲/۱۰	۱/۲۹	۴۴/۶۰	۲/۸۷	۵/۳۶	۰/۹۹۹	۰/۰۱۷	۰/۱۵
۱۰	۶/۹۱	۱/۹۴	۳۱۹/۷۰	۱/۴۸	۳۶/۰۵	۲/۳۸	۴/۶۶	۰/۹۹۹	۰/۰۱۳	۰/۱۳
۱۳	۶/۵۹	۱/۹۳	۳۲۲/۴۰	۱/۵۴	۴۰/۵۹	۱/۸۶	۴/۵۶	۰/۹۹۹	۰/۰۱۹	۰/۲۱
۱۶	۵/۲۷	۱/۵۸	۳۴۹/۷۰	۱/۲۵	۷۳/۳۴	۱/۹۶	۴/۴۲	۰/۹۹۹	۰/۰۱۴	۰/۱۸
۱۹	۳/۸۴	۱/۵۳	۳۵۳/۹۰	۱/۲۲	۴۴/۷۸	۱/۶۴	۴/۹۵	۰/۹۹۹	۰/۰۱۴	۰/۲۲
۲۲	۲/۴۸	۱/۵۱	۳۵۰/۷۰	۰/۸۶	۴۰/۳۶	۱/۲۱	۴/۵۳	۰/۹۹۵	۰/۰۳۲	۰/۵۳

جدول ۲- مقادیر ضرایب مدل‌های ناسینوویچ و پلگ در آزمون آسایش تنش میوه خرمالو

روز	مدل ناسینوویچ					مدل پلگ				
	A_4	A_3	A_2	A_1	R^2	SEE	ARE%	a	b	R^2
۱	۰/۶۱	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۹۹۶	۰/۰۹۰	۰/۱۶	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۹۶۲
۴	۰/۴۴	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۹۹۶	۰/۰۸۹	۰/۲۸	۰/۴۳	۰/۰۵	۰/۹۶۲
۷	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۹۹۶	۰/۰۵۹	۰/۳۰	۰/۴۱	۰/۰۴	۰/۹۵۶
۱۰	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۱۰	۰/۱۷	۰/۹۹۶	۰/۰۵۰	۰/۲۷	۰/۴۲	۰/۰۵	۰/۹۶۳
۱۳	۰/۴۶	۰/۲۴	۰/۰۸	۰/۲۰	۰/۹۹۶	۰/۰۵۲	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۰۵	۰/۹۵۵
۱۶	۰/۴۵	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۹۹۶	۰/۰۴۶	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۰۵	۰/۹۶۲
۱۹	۰/۴۲	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۹۹۷	۰/۰۳۵	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۰۴	۰/۹۶۶
۲۲	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۱۰	۰/۲۶	۰/۹۹۲	۰/۰۴۲	۰/۷۴	۰/۴۷	۰/۰۴	۰/۹۴۹



شکل ۵- بیان گرافیکی مدل‌های لزج-کشسان (در روز چهارم نگهداری در شرایط محیطی)

نتیجه‌گیری

معنی‌داری به میزان ۸۰٪ کاهش یافت اما میزان الاستیسیته‌ی آن افزایش یافت. همچنین بر طبق شاخص‌های آماری محاسبه شده، از میان سه مدل استفاده شده، مدل سه جزئی ماکسول عمومی و مدل تاسینوویچ می‌توانند به طور مناسبی تنش‌های وابسته به زمان در میوه را با کمترین خطا پیش بینی کنند.

نتایج این تحقیق نشان داد که میوه‌ی خرمالو یک جامد لزج-کشسان محسوب می‌شود که خصوصیات لزج و کشسان آن در اثر تغییرات فیزیکوشیمیایی میوه در طی نگهداری در شرایط محیطی تأثیر می‌پذیرد، به طوریکه سفتی میوه در طی نگهداری به طور

منابع

- Baragale, P. C., Irudayaraj, J. M. & Marquis, B., 1994, Some mechanical properties and stress relaxation characteristics of lentils. *Canadian Agricultural Engineering*, 36(4), 247-254.
- Bourne, M., 2002, Food texture and viscosity. Academic Press, London, 45-230.
- Campbell, L., Gu, L., Dewar, S. & Euston, S., 2009, Effects of heat treatment and glucono-d-lactone-induced acidification on characteristics of soy protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 23, 344-351.
- Campus, M., Addis, M. F., Cappuccinelli, R., Porcu, M. C., Pretti, L., Tedde, V., Secchi, N., Stara, G. & Roggio, T., 2010, Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata* L.) following high pressure treatment. *Journal of Food Engineering*, 96, 192-198.
- Del Nobile, M. A., Chillo, S., Mentana, A. & Baiano, A., 2007, Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods. *Journal of Food Engineering*, 78, 978-983.
- Fincan, M. & Dejmek, P., 2003, Effect of osmotic pretreatment and pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 59, 169-175.
- Gorinstein, S., Kulasek, G. W., Bartnikowska, E., Leontowicz, M., Zemser, M., Morawiec, M. & Trakhtenberg, S., 2000, The effect of diets, supplemented with either whole persimmon or phenol-free persimmon, on rats fed cholesterol. *Food Chemistry*, 70, 303-308.
- Hassan, B. H., Alhamdan, A. M. & Elansari, A. M., 2004, Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *Journal of Food Engineering*, 66, 439-445.
- Kajuna, S., Bilanski, W. K. & Mittal, G. S., 1998, Effect of ripening on the parameters of three stress relaxation models for banana and plantain. *Transactions of the ASAE*, 14 (1), 55-61.
- Khazaei, J. & Mann, D. D., 2004, Effects of Temperature and Loading Characteristics on Mechanical and Stress-Relaxation Behavior of Sea Buckthorn Berries. Part 3. Relaxation Behavior. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 5, 1-12.
- Khazaei, J. & Mann, D. D., 2005, Effects of moisture content and number of loadings on force relaxation behaviour of chickpea kernels. *International Agrophysics*, 19, 305-313.
- Tous, J. & Ferguson, L., 1996, Mediterranean fruits. In: Janick, ed., *Progress in new crops*, ASHS Press, Arlington, 416-430.
- Kojima, K., Sakurai, N., Kuraishi, S., Yamamoto, R. & Nevins, D. J., 1991, Novel technique for measuring tissue



Investigation of viscoelastic behavior of persimmon fruit during storage using stress relaxation models

F. Salmanizadeh^{1*}, A. Zomorodian²- H. Rahmanian³, H. Safiyari⁴

Received: 2013.11.05

Accepted: 2014.04.30

Introduction: Persimmon fruits are subjected to different environmental conditions from harvest to consumption. Foods, those are exhibiting characteristics of both liquid and solid, are described as viscoelastic where stress relaxation and strength properties are time dependant. Knowledge of viscoelastic properties of foods and agricultural materials are important when considering harvesting, handling, transportation, processing, and storage. Also the data on viscoelastic properties are required as an input for mathematical models, which describe and predict internal stress and cracking during different handling and processing procedures. The mechanical properties are considered one of the most important four parameters, which reflect the quality of food material. Those parameters include texture, firmness and chewability. Viscoelastic material exhibit stress relaxation phenomena, which is one of the most important factors in characterizing agricultural materials. The objectives of the current study were: (1) to obtain data to describe the stress relaxation characteristic of Persimmon fruits during Storage, (2) to investigate the effect of storage time on stress relaxation properties, and (3) to find the best model to describe the obtained stress relaxation data.

Materials and Methods: The persimmon fruits were manually picked up at maturity stage from persimmon trees in a garden, in Fars province, Iran. They were handled to Biophysics laboratory in Agricultural Engineering department, at Shiraz University, on the foam sheets in one layer array for minimizing any likely compaction. Initial moisture content was determined by gravimetric method in an oven at 70C till obtaining constant successive weight loss of 0.001 g. The initial moisture content was 44.26% (d.b). Since the rheological characteristics of fruits are important for any processing operation, viscoelastic behavior of persimmon fruits during storage in environmental conditions was investigated using estimating its relaxation parameters from experimental stress relaxation data. The rheological behavior of persimmon fruits was evaluated to uniaxial compression test for relaxing the stress during 480 s. Texture Profile Analyser (TPA) (TA.XT2 plus model, Stable Microsystems, England) with Exponent Lite (Version 4,0,8,0, UK) software was used to compress whole date samples and export data into Excel worksheets. TPA was equipped with a 30 kgf load cell. The cross head speed was adjusted on 1 mm/s, and samples compressed with 30% strain. The cross head then kept at 30% of strain for relaxing the stress in 480 s duration. A chamber with temperature control circuit was fabricated around the TPA cross head to prepare constant temperature identical to sample temperature with an accuracy of $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ during the stress relaxation tests. All tests were performed with ten replications. Three popular stress relaxation models, namely the generalized Maxwell with three elements, Nussinovitch, and Peleg were fitted to experimental data and was used from R-square, standard error of estimation (SEE) and percent of average relative error (ARE%) indexes for evaluation of models.

Results and Discussion: The force-time curves were converted to stress-time curves by dividing the true compression force values to the corresponding true values of contact surface area. Analysis of variance showed that storage time had significant effect on initial stress relaxation. The results showed that the magnitude of initial stress (stress at time zero) required to create a fixed strain on whole fruit was significantly decreased up to 80% during storage in environmental conditions, but the relaxation time was increased at the range of 312.10 to 353.90 s. Based on the results, elastic behavior of persimmon fruit was enhanced and its firmness decreased during fruit storage. Persimmon is sugar rich fruit that its behavior is principally partly controlled by physico-chemical properties of sugar. Changes in sugar type as a result of enzymatic action are taken place during the storage process. However, in the present study all samples were in the time of maturation, and therefore the physical state of sugar was influenced by free water which is resulted in increasing in fruit moisture content. Stress relaxation curves were plotted at different storage time. Some variations were apparently observed among the curves. Sucrose decreased initial stress decay rate and increased proportion of un-relaxed force. Variations in stress decay rate might refer to the amount of initial stress which was affected by physic-chemical properties of the sugar. Recall that nonlinear regression method with non-negative constraint was used to derive the models

1- PhD Student, Department of Agricultural Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran
2,3,4- Professors, Department of Agricultural Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran,
(* - Corresponding Author Email: zomorod@shirazu.ac.ir.)

- firmness within tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. Plant Physiology, 96(2), 545-550.
- Lewicki, P. P. & Spiess, W. E. L., 1995, Rheological properties of raisins: Part I. Compression test. Journal of Food Engineering, 24 (3), 321-338.
- Lewicki, P. & Wolf, W., 1995, Rheological properties of Raisins: Part II: Effect of water activity. Journal of Food Engineering, 26, 29-43.
- Lima, M. I. & Singh, R. P., 1995, Measurement of textural properties of French fries. Poster # 49-4 presented at 1995 IFT annual meeting, Anaheim, CA.
- Mohsenin, N. N. 1986, Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach, Amsterdam.
- Nussinovitch, A., Peleg, M. & Normand, M. D., 1989, A modified Maxwell and a non exponential model for characterization of the stress relaxation of agar and alginate gels. Journal of Food Science, 54 (4), 1013-1016.
- Nussinovitch, A. & Peleg, M., 1990, Strength-time relationships of agar and alginate gels. Journal of Texture Studies, 21(1), 51-60.
- Peleg, M. & Pollak, K., 1982, The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analysis of solid foods. Journal of Texture Studies, 13, 1-11.
- Rajabipour, A., Zarietard, M. R., Dodd, G. T. & Norris, E. R., 2004, Tensile strength and relaxation of tomato skin by a loop technique. International Agrophysics, 18, 1-5.
- Sakuria, N. & Nevins, D. J., 1992, Evaluation of stress relaxation in fruit tissues. Hort Technology, 2(3), 398-402.
- Saravacos, G. D. & Kostaropoulos, A. E., 1995, Engineering properties in processing equipment for fruits and vegetables. Poster #23-9 presented at 1995 IFT annual meeting, Anaheim, CA.
- Steffe, J. F. 1992, Rheological methods in food processing engineering. Freeman Press, East Lansing, MI, USA.
- Van Vliet, T. 1999, Rheological classification of foods and instrumental techniques for their study. In: A.J. Rosenthal, ed., Food Texture Measurement and Perception, Aspen, New York, 65-98.
- Vozary, E. & Meszaros, P., 2007, Effect of mechanical stress on apple impedance parameters. ICEBI, IFMBE Proceedings, 17, 118-121.
- Waananen, K. M. & Okos, M. R., 1992, Stress-relaxation properties of yellow-dent corn kernels under uniaxial loading. Transactions of the ASAE, 35(4), 1249-1258.
- Wu, T. & Abbott, J. A., 2002, Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices. Postharvest Biology and Technology, 24, 59-68.
- Zare, D., Jayas, D. S. & Singh, C. B., 2012, A generalized dimensionless model for deep bed drying of paddy. Drying Technology, 30, 44-51.

constant.

Conclusion: All three models were valid for quantifying the viscoelastic behavior of persimmons; however the generalized Maxwell with three elements (with $R^2=0.999$, $SEE=0.017$ and $ARE=0.19\%$) and Nussinovitch (with $R^2=0.996$, $SEE=0.057$, $ARE=0.36\%$) were the best models in predicting experimental data.

Keywords: Generalized Maxwell model, Nussinovitch model, Peleg model, Stress relaxation, Viscoelastic characteristics.