



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## بررسی سینتیک خشک شدن و مدلسازی سبزی جعفری با استفاده از خشک‌کن ترکیبی

### جریان هوای گرم - مادون قرمز

محمدحسین رسولی نیا<sup>۱\*</sup>، رسول عربپور داهوئی<sup>۱</sup> و حمید مرتضی پور<sup>۲</sup>

۱ و ۲ - به ترتیب دانش آموخته و استادیار بخش مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان

ایمیل مکاتبه کننده: mhrasooli@gmail.com

#### چکیده

در این تحقیق سعی شده است تا بهترین مدل ریاضی برای خشک کردن محصول سبزی جعفری بدست آید. بدین منظور از یک خشک‌کن ترکیبی جریان هوای گرم- مادون قرمز استفاده گردید. آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوای خشک‌کننده (۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس) و در سه سطح توان تابشی مادون قرمز (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ وات) انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش دمای هوای خشک‌کننده از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن محصول ۶۹ درصد کاهش یافت. افزایش توان مادون قرمز تا ۵۰۰ وات نیز کاهش ۶۴ درصدی زمان خشک شدن را در بر داشت. در نهایت با توجه به داده‌های بدست آمده از انجام آزمایش‌ها و تطبیق آن‌ها در مدل‌های ریاضی موجود، مدل پیچ بهترین مدل برای رفتار خشک شدن محصول جعفری شناسایی شد.

واژه‌های کلیدی: سبزی جعفری، مدل سازی، جریان هوای گرم، مادون قرمز.

#### مقدمه

خشک کردن میوه و سبزیجات از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری طولانی مدت انواع گوناگون محصولات کشاورزی می‌باشد. خشک کردن موجب کاهش قابل توجه وزن و حجم محصولات و در نتیجه سهولت حمل و نقل و نگهداری آن‌ها می‌گردد (Doymaz I., 2007 and Ertekin C., and Yaldiz O., 2004).

روش‌های سنتی خشک کردن اعم از خشک کردن در برابر آفتاب و خشک کردن در سایه علیرغم مزایای استفاده از انرژی خورشیدی در فرآیند خشک کردن و رایگان بودن دارای معایبی از قبیل عدم کنترل کافی در فرآیند خشک کردن، طولانی بودن زمان خشک شدن و غیر بهداشتی بودن محصول خشک شده می‌باشد. این معایب نیاز به خشک-



کن‌های صنعتی را آشکار می‌سازد. معمولی‌ترین نوع خشک‌کن‌های صنعتی خشک‌کن نوع جریان‌های هوای گرم می‌باشد. این نوع خشک‌کن نیز دارای معایبی نظیر ایجاد سوختگی سطحی در محصول، بالا بودن مدت زمان خشک شدن و همچنین بالا بودن انرژی مصرفی است (Das et al., 2004).

به علت معایب خشک‌کن‌های جریان هوای گرم در سال‌های اخیر در میان روش‌های خشک کردن با روش مادون قرمز محبوبیت خوبی بدست آورده است. استفاده از تکنولوژی تشعشعات مادون قرمز در خشک کردن محصولات کشاورزی چندین مزیت را به همراه دارد که از جمله آن می‌توان به کاهش زمان فرآیند، کیفیت بالای محصول خشک شده و دمای یکنواخت محصول اشاره کرد (Sharma et al., 2005).

سیستم گرمایی ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم برای خشک کردن سبزی‌ها در حال توسعه می‌باشد. خشک کردن هویج و سیب‌زمینی توسط سیستم هوای گرم و مادون قرمز و همچنین به صورت ترکیبی انجام شده و اجرای مطالعات تخمینی نشان داد در خشک کردن ترکیبی در مقایسه با هوای گرم ۴۸ درصد زمان خشک شدن کاهش یافت. همچنین آنها نشان دادند که خشک‌کن‌های تجاری که با هوای گرم کار می‌کنند می‌توانند به طور مناسب با روش ترکیبی مادون قرمز اصلاح شوند (Hebbar et al., 2004).

مدلسازی سینتیک خشک شدن محصولات کشاورزی به منظور توسعه طرح‌های جدید بهبود سیستم‌های موجود در خشک‌کن پیش‌بینی جریان هوا بر روی محصول و همچنین برای کنترل فرآیند و بهره‌وری بیشتر از انرژی مصرفی می‌تواند مورد توجه و مطالعه قرار گیرد (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۰). بر اساس معادلات بدست آمده از مدل‌سازی با توجه به شرایط اولیه خشک‌کن می‌توان فرآیند را در هر لحظه از خشک شدن پیش‌بینی کرد (Gunhan et al., 2005).

هدف از این پژوهش بررسی سینتیک خشک شدن سبزی جعفری در خشک‌کن آزمایشگاهی جریان هوای گرم- مادون قرمز و ارائه بهترین مدل ریاضی خشک شدن سبزی جعفری می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

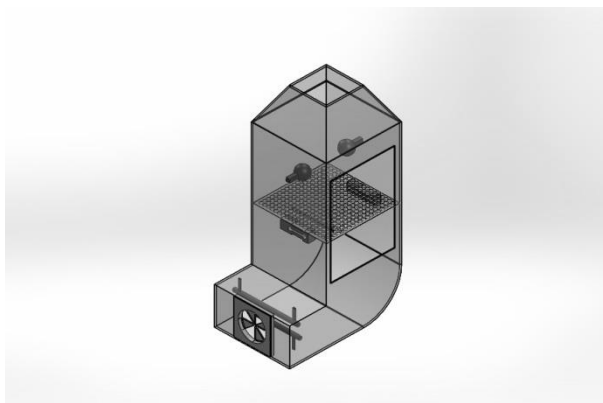
### مشخصات خشک‌کن هوای گرم - مادون قرمز

اجزای اصلی تشکیل دهنده خشک‌کن عبارتند از محفظه خشک‌کن، دمنده، گرم‌کن برقی، ابزار دقیق، سینی مشبک و لامپ مادون قرمز (شکل ۱).

بدنه خشک‌کن از ورق گالوانیزه ساخته شده است. از یک دمنده برای به گردش درآوردن هوا استفاده گردید. توان مورد نیاز دمنده توسط یک باتری ۱۲ ولت تامین شد. از دو گرم‌کن برقی برای گرم کردن جریان هوای خشک‌کننده استفاده شده است. یک سینی با سطح توری برای نگهداری محصول در داخل محفظه خشک‌کن قرار گرفت. در زیر این سینی، یک ترموکوپل جهت اندازه‌گیری دما نصب شد. پس از تنظیم نمودن دما بر روی دستگاه و اتصال ترموکوپل



به آن، سامانه کنترل دما، روشن و خاموش شدن گرم‌کن برقی را کنترل می‌کرد. به این صورت که وقتی دستگاه به دمای مورد نظر رسید، گرم‌کن برقی را از مدار خارج و اگر دما کم شد گرم‌کن برقی روشن می‌شد تا همواره دما ثابت بماند. سینی محتوی محصول بر روی دو پایه که همان لودسل‌های اندازه‌گیری جرم محصول هستند قرار گرفت. لودسل‌ها از طریق ترانس‌میتور لودسل به کامپیوتر متصل است. با اجرای برنامه مربوطه در کامپیوتر و کالیبره نمودن لودسل‌ها می‌توان محصول را روی سینی قرارداد و وزن را در هر لحظه مشاهده نمود. دو عدد جالامپی در بالای سطح سینی وجود داشت و لامپ‌های مادون قرمز به آن‌ها وصل می‌شدند. بدنه خشک‌کن و محل قرارگیری دمنده با نوار درزگیر عایق‌بندی شد.



شکل ۱- طرحواره‌ای از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - مادون فرمز

### روش انجام آزمایش و مدل‌سازی

رطوبت اولیه با قرار دادن یک نمونه از محصول در آن اندازه‌گیری شد که مقدار آن برابر با ۰,۰۵۷۵٪ بر پایه وزن خشک بدست آمد.

آزمایش‌ها در سه سطح دمای ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس و در سه توان مادون قرمز صفر، ۲۵۰ و ۵۰۰ وات انجام گرفت. در هر آزمایش از حدود ۱۵۰ گرم محصول استفاده گردید. سبزی مورد نیاز قبل از انجام آزمایش شسته و آبگیری گردید. وزن اندازه‌گیری شده محصول به صورت هر ۵ دقیقه به عنوان داده‌های آزمایش ثبت شد.

رابطه (۱) نحوه محاسبه رطوبت اولیه را نشان می‌دهد.

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $M_d$  میزان رطوبت برپایه خشک،  $W_w$  جرم محصول (g) و  $W_d$  جرم خشک محصول (g) است.



مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR) که در رابطه (۲) آمده است، بدست می‌آید (Akpinar et al., 2003).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

در این رابطه MR نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$  و  $M_e$  به ترتیب میزان رطوبت در هر لحظه از فرآیند خشک کردن، میزان رطوبت تعادلی و میزان رطوبت اولیه بر حسب اعشار بر پایه خشک (d.b.) می‌باشد. با توجه به اینکه معمولاً مقدار  $M_e$  در مقایسه با  $M_i$  و  $M_t$  عدد کوچکی است لذا اغلب خطای ناشی از در نظر نگرفتن آن نیز بسیار جزئی است (Babalıs et al., 2005). لذا برای محاسبه نسبت رطوبت سبزی در طول فرآیند خشک کردن از رابطه (۳) استفاده شد.

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

در این پژوهش از ده مدل ریاضی برای تعیین بهترین مدل استفاده شد. مدل‌های ریاضی استفاده شده در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

جدول ۱- مدل‌های استفاده شده در آزمایش

رابطه	نام مدل	منبع
$MR = \exp(-kt)$	لویس	(Bruce, 1985)
$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ	(Agrawal and Singh, 1977)
$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پاییس	(Chhinman, 1984)
$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی	(Togrul and Pehlivan, 2002)
$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	دوجمله‌ای	(Henderson, 1974)
$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c(ht)$	اصلاح شده هندرسون و پاییس	(Karathanos, 1999)
$MR = a \exp(-kt) + (1 - \alpha) \exp(-gt)$	ورما و همکاران	(Verma et al., 1985)
$MR = at^n$	Geometric	(Chandra and Singh, 1995)
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی و همکاران	(Midilli et al., 2002)
$MR = 1 + at + bt^2$	وانگ و سینگ	(Wang and Singh, 1978)

h, g, b, k<sub>1</sub>, k<sub>0</sub>, a, n, k و c ثابت‌های روابط هستند.

برای برازش مدل‌های استاندارد خشک شدن با داده‌های آزمایشی از نرم افزار spss استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل از چهار معیار ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار خطای میانگین (MBE) استفاده شد. هر یک از این ده مدل را بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده و در نهایت با توجه به بیشترین



مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار  $\chi^2$ ، RMSE و MBE بهترین مدل انتخاب گردید. رابطه هریک از این چهار معیار در زیر آمده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{exp,i}} - MR_{pre,i})^2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (5)$$

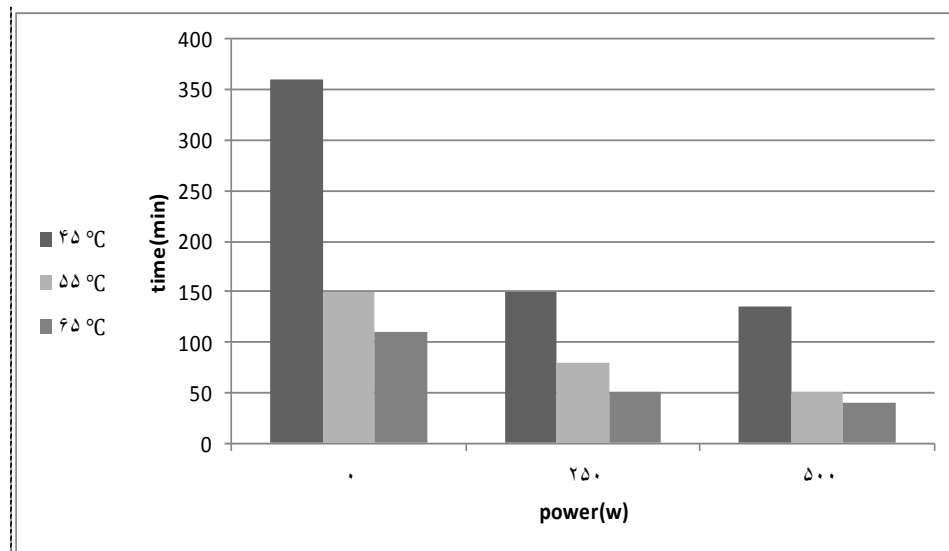
$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i}) \quad (7)$$

که در این رابطه‌ها  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت تجربی  $i$ ام،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت پیشگویی شده  $i$ ام،  $N$  تعداد مشاهدات و  $m$  تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشد.

## نتایج و بحث

زمان لازم برای خشک شدن محصول در دماها و توان‌های مختلف متفاوت است. در شکل ۲ این موضوع واضح می‌باشد. هر چه دما و همچنین توان مادون قرمز افزایش یافته زمان خشک شدن محصول کمتر شده است.

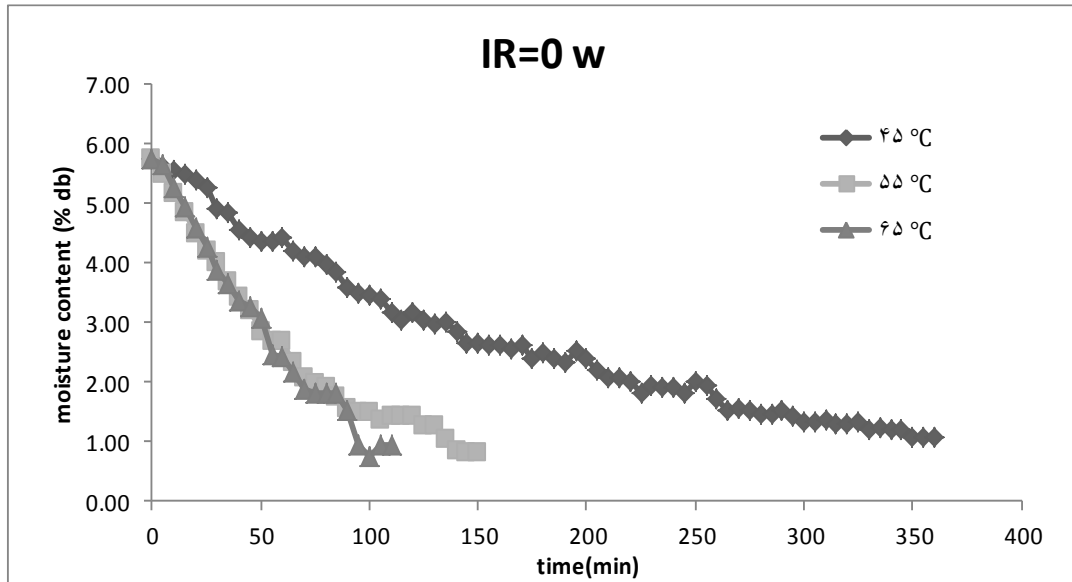


شکل ۲- مقایسه زمان خشک شدن در دماها و توان‌های مختلف

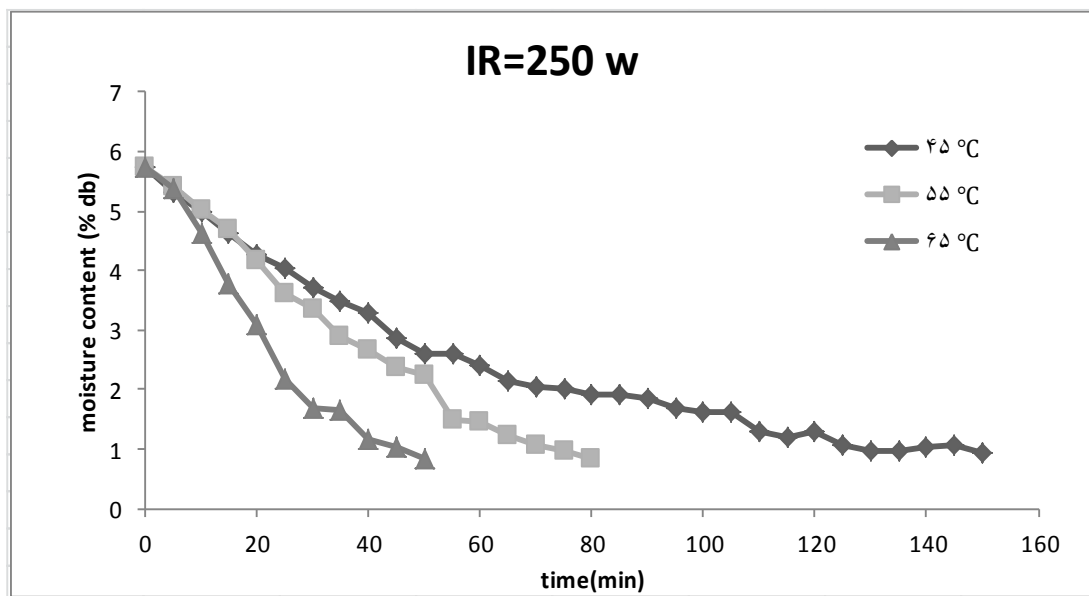
میانگین زمان کاهش رطوبت با تغییر دما از ۴۵ درجه به ۶۵ درجه به میزان ۶۹٪ اندازه گیری شد. این مقدار با تغییر توان از صفر وات به ۵۰۰ وات ۶۴٪ محاسبه گردید.



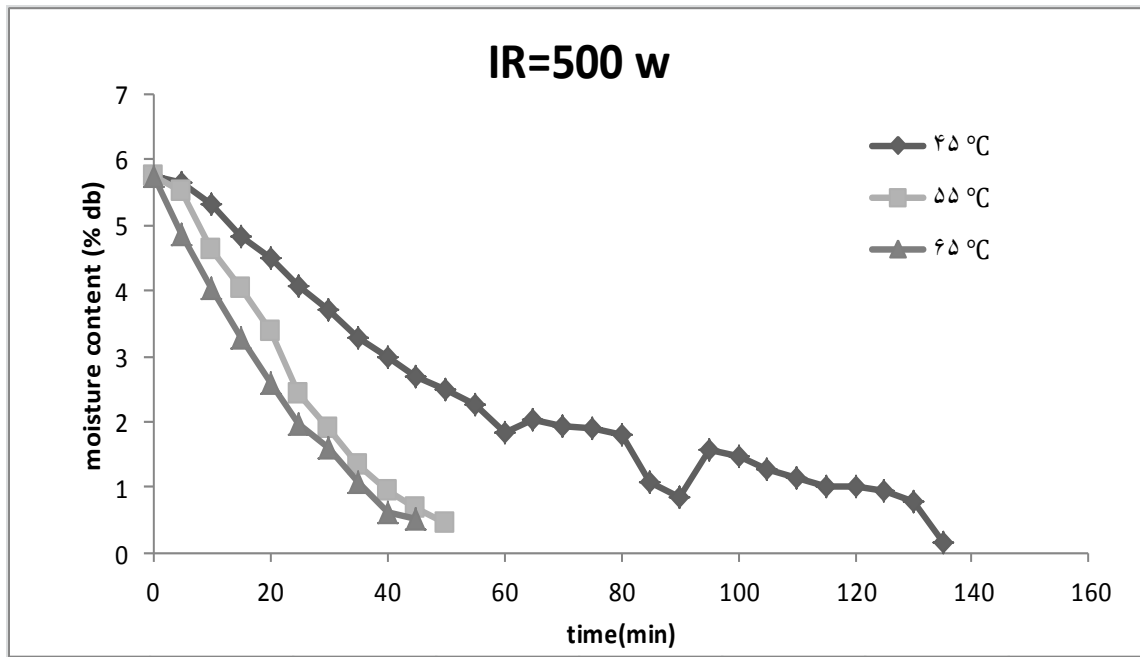
تغییرات محتوی رطوبتی با گذشت زمان در شکل ۳، ۴ و ۵ مشخص گردیده است. در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج با پیشرفت زمان، میزان رطوبت محصول کاهش یافته و در نتیجه سرعت کاهش رطوبت نیز به طور طبیعی کاهش می‌یابد.



شکل ۳- تغییرات محتوی رطوبتی با گذشت زمان در توان ۰



شکل ۴- تغییرات محتوی رطوبتی با گذشت زمان در توان ۲۵۰



شکل ۵- تغییرات محتوی رطوبتی با گذشت زمان در توان ۵۰۰

نتایج حاصل از مدل سازی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از محاسبات

Model	IR power (W)	Air temp. (°C)	model constants		R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	MBE	
Lewis	0	45	k=0.005		0.99391	0.02361	0.01350	0.01331	
		55	k=0.013		0.99271	0.02226	0.00139	0.00135	
		65	k=0.015		0.98519	0.04586	0.01506	0.01441	
	250	45	k=0.014		0.99347	0.02546	0.00760	0.00135	
		55	k=0.021		0.98646	0.04580	0.01349	0.01270	
		65	k=0.035		0.98133	0.05458	0.00959	0.00872	
	500	45	k=0.016		0.97832	0.04449	0.01000	0.00963	
		55	k=0.035		0.96924	0.08149	0.00779	0.00379	
		65	k=0.037		9.99E-01	1.01E-02	3.22E-05	2.97E-05	
					<b>0.98663</b>	<b>0.03929</b>	<b>0.00872</b>	<b>0.00725</b>	
Page	0	45	k=0.006	n=0.956	0.994082	0.018070	0.000002	0.000002	
		55	k=0.012	n=1.016	0.99235	0.02300	0.00509	0.00477	
		65	k=0.005	n=1.282	0.99094	0.03640	0.02666	0.02434	
	250	45	k=0.021	n=0.898	0.99455	0.01795	0.00076	0.00071	
		55	k=0.006	n=1.307	0.99643	0.02475	0.01985	0.01752	
		65	k=0.012	n=1.335	0.99284	0.02859	0.01649	0.01349	
	500	45	k=0.012	n=1.074	0.97828	0.04382	0.01614	0.01494	
		55	k=0.004	n=1.640	0.99823	0.01904	0.01521	0.01245	
		65	k=0.038	n=0.992	0.99867	0.01020	0.00004	0.00004	
						<b>0.99293</b>	<b>0.02465</b>	<b>0.01114</b>	<b>0.00981</b>



ادامه جدول

Model	IR power (W)	Air temp. (°C)	model constants			R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	MBE	
Henderson and Pabis	0	45	k=0.005	a=0.993		0.99391	0.02517	0.01704	0.01657	
		55	k=0.013	a=1.016		0.99271	0.02338	0.00904	0.00845	
		65	k=0.016	a=1.073		0.98285	0.03579	0.00165	0.00150	
	250	45	k=0.013	a=0.970		0.99145	0.02245	0.00096	0.00090	
		55	k=0.022	a=1.069		0.98453	0.03619	0.00772	0.00681	
		65	k=0.038	a=1.078		0.97877	0.04408	0.00479	0.00392	
	500	45	k=0.017	a=1.049		0.97901	0.04124	0.00802	0.00742	
		55	k=0.039	a=1.113		0.96109	0.06726	0.01652	0.01352	
		65	k=0.037	a=1.002		0.99866	0.01011	0.00101	0.00086	
					<b>0.98478</b>	<b>0.03396</b>	<b>0.00742</b>	<b>0.00666</b>		
Logarithmic	0	45	k=0.005	a=0.943	c=0.067	0.99391	0.03329	0.02832	0.02716	
		55	k=0.015	a=0.984	c=0.045	0.99414	0.01961	0.00173	0.00156	
		65	k=0.009	a=1.421	c=-0.390	0.99112	0.02634	0.00735	0.00639	
	250	45	k=0.017	a=0.907	c=0.095	0.99571	0.01590	0.00190	0.00172	
		55	k=0.013	a=1.433	c=-0.405	0.99430	0.02524	0.01581	0.01302	
		65	k=0.027	a=1.256	c=-0.203	0.98415	0.03776	0.00550	0.00400	
	500	45	k=0.018	a=1.030	c=0.029	0.97919	0.04042	0.00274	0.00274	
		55	k=0.015	a=1.953	c=-0.897	0.98925	0.03456	0.01017	0.00739	
		65	k=0.040	a=0.983	c=0.026	0.99889	0.00945	0.00279	0.00215	
					<b>0.99118</b>	<b>0.02695</b>	<b>0.00848</b>	<b>0.00735</b>		
Two-term	0	45	a=8.740	b=-7.748	k1=0.005	k2=0.005	0.99391	0.02543	0.01803	0.01704
		55	a=1.023	b=0.005	k1=0.014	k2=-0.013	0.99426	0.02004	0.00586	0.00510
		65	a=7.998	b=-6.968	k1=0.006	k2=0.005	0.99124	0.02796	0.01236	0.01021
	250	45	a=0.707	b=0.299	k1=0.025	k2=0.006	0.99187	0.04766	0.04864	0.04237
		55	a=10.937	b=-9.909	k1=0.008	k2=0.007	0.99450	0.02260	0.01073	0.00821
		65	a=17.563	b=-16.511	k1=0.018	k2=0.017	0.98477	0.04471	0.03649	0.02322
	500	45	a=1.020	b=0.039	k1=0.018	k2=0.002	0.97919	0.04035	0.00119	0.00102
		55	a=15.547	b=-14.491	k1=0.009	k2=0.008	0.98946	0.10869	0.14222	0.09050
		65	a=1.007	b=0.001	k1=0.038	k2=-0.046	0.99895	0.00902	0.00158	0.00110
					<b>0.99091</b>	<b>0.03850</b>	<b>0.03079</b>	<b>0.02209</b>		
Modified Henderson and Pabis	0	45	a=5.294	k=0.005	b=-2.143	g=0.005	0.99391	0.02543	0.01856	0.01704
		55	c=-2.159	h=0.005	b=-114.158	g=0.005	0.96731	0.05569	0.03454	0.02785
		65	a=63.641	k=0.006	b=-1.039	g=0.004	0.99125	0.03275	0.02472	0.01827
	250	45	a=3.109	h=0.004	b=-0.790	g=-0.010	0.96007	0.10091	0.09353	0.07543
		55	c=-1.069	k=0.007	b=-1.069	g=0.006	0.99439	0.06932	0.09126	0.05905
		65	a=79.232	h=0.004	b=51.994	g=-0.016	0.76362	1.82345	3.19555	1.45252
	500	45	c=-130.194	k=0.011	b=-0.733	g=-0.084	0.97901	0.04103	0.00212	0.00165
		55	a=1.063	h=-0.084	b=-0.733	g=-0.084	0.97901	0.04103	0.00212	0.00165
		65	c=0.733	k=0.012	b=-0.892	g=0.004	0.98941	0.05076	0.07436	0.03380
500	45	a=2.840	h=0.004	b=-0.892	g=0.004	0.98941	0.05076	0.07436	0.03380	
	55	c=-0.892	h=0.004	b=-0.892	g=0.004	0.98941	0.05076	0.07436	0.03380	
	65	a=25.731	k=0.022	b=18.870	g=0.017	0.99677	0.31235	0.53385	0.28746	
					<b>0.95953</b>	<b>0.27908</b>	<b>0.45205</b>	<b>0.21923</b>		





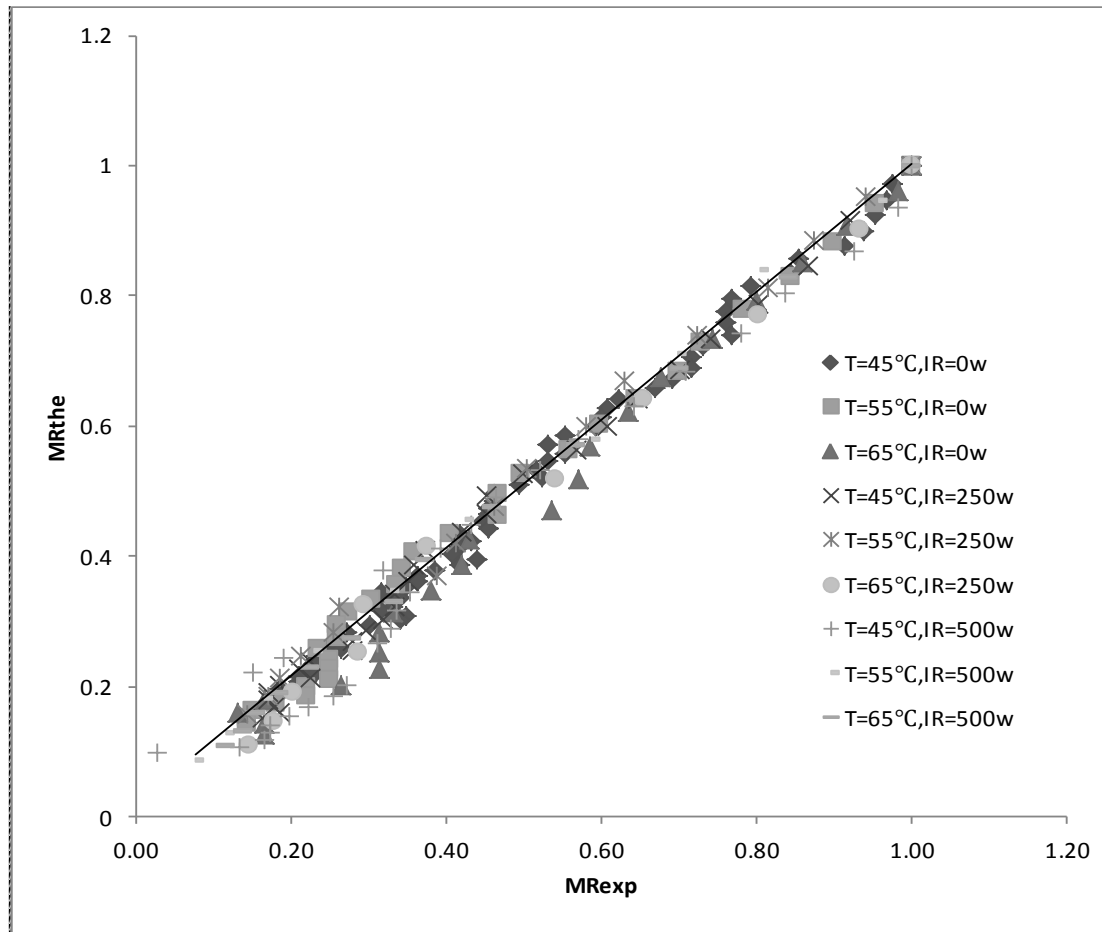
ادامه جدول

Model	IR power (W)	Air temp. (°C)	model constants				R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	MBE
Verma et al.	0	45	a=0.074	k=0.004	g=0.008		0.99437	0.01876	0.01687	0.00693
		55	a=-0.095	k=0.013	g=0.013		0.99271	0.02226	0.00149	0.00135
		65	a=-7.714	k=0.004	g=0.005		0.99069	0.05283	0.05045	0.04387
	250	45	a=0.227	k=0.004	g=0.019		0.99579	0.01611	0.00168	0.00152
		55	a=-8.739	k=0.006	g=0.007		0.99410	0.03301	0.02017	0.01661
		65	a=-13.254	k=0.013	g=0.014		0.98291	0.05278	0.02776	0.02019
	500	45	a=-7.048	k=0.012	g=0.012		0.97018	0.09649	0.08705	0.07738
		55	a=-11.904	k=0.004	g=0.006		0.98797	0.14253	0.17443	0.12685
		65	a=-0.210	k=0.037	g=0.037		0.99866	0.01010	0.00004	0.00003
						<b>0.98971</b>	<b>0.04943</b>	<b>0.04222</b>	<b>0.03275</b>	
Geometric	0	45	a=2.321	n=0.331			0.79488	0.10397	0.00716	0.00696
		55	a=2.391	n=0.436			0.84010	0.09714	0.00881	0.00822
		65	a=2.390	n=0.432			0.80122	0.11540	0.00697	0.00063
	250	45	a=2.251	n=0.429			0.86153	0.08399	0.00746	0.00696
		55	a=2.409	n=0.479			0.81410	0.11226	0.00794	0.00695
		65	a=2.799	n=0.619			0.88666	0.09045	0.01045	0.00836
	500	45	a=12.657	n=0.490			0.84255	0.10564	0.00983	0.00907
		55	a=3.076	n=0.650			0.83637	0.12144	0.01770	0.01416
		65	a=2.498	n=0.616			0.91693	0.06668	0.00758	0.00632
						<b>0.84382</b>	<b>0.09966</b>	<b>0.00932</b>	<b>0.00751</b>	
Midilli et al.	0	45	a=1.023	k=0.007	b=2.144E-5	n=0.927	0.99435	0.02236	0.01425	0.01347
		55	a=1.003	k=0.009	b=0.001	n=-1.136	0.99376	0.03177	0.02156	0.01878
		65	a=1.012	k=0.007	b=0.000	n=1.171	0.99146	0.03029	0.01530	0.01264
	250	45	a=1.004	k=0.017	b=0.000	n=0.972	0.99526	0.03595	0.03175	0.02766
		55	a=0.997	k=0.007	b=0.000	n=1.295	0.99621	0.02175	0.01723	0.01317
		65	a=1.001	k=0.007	b=0.002	n=1.564	0.99631	0.07205	0.09369	0.05962
	500	45	a=1.034	k=0.011	b=0.000	n=1.122	0.97997	0.05445	0.03857	0.03286
		55	a=1.002	k=0.004	b=8.626E-5	n=1.642	0.99827	0.01830	0.00439	0.01197
		65	a=1.002	k=0.034	b=0.001	n=1.048	0.99907	0.02286	0.02702	0.01870
						<b>0.99385</b>	<b>0.03442</b>	<b>0.02931</b>	<b>0.02321</b>	
Wang and singh	0	45	a=-0.004	B=6.036E-6			0.98702	0.07505	0.06567	0.06388
		55	A=-0.012	B=4.043E-5			0.99211	0.04631	0.03701	0.03462
		65	A=-0.011	B=3.102E-5			0.99100	0.03333	0.01538	0.01404
	250	45	A=-0.012	B=4.627E-5			0.98805	0.03487	0.02436	0.02279
		55	A=-0.016	B=6.172E-5			0.99480	0.02200	0.00911	0.00804
		65	A=-0.028	B=0.000			0.94589	0.25549	0.23512	0.19237
	500	45	A=-0.014	B=4.267E-5			0.96170	0.13955	0.11798	0.10924
		55	A=-0.024	B=9.485E-5			0.98849	0.03879	0.00946	0.00774
		65	A=-0.031	B=0.000			0.90657	0.47627	0.40691	0.34431
						<b>0.97285</b>	<b>0.12463</b>	<b>0.10233</b>	<b>0.08856</b>	

با توجه به نتایج بدست آمده که در جدول ۲ آمده است دو مدل پیچ و میدیلی با بیشترین مقدار R<sup>2</sup> انتخاب شد. سایر معیارها شامل χ<sup>2</sup>، RMSE و MBE مقدارشان در مدل پیچ نسبت به مدل میدیلی کمتر است. بنابراین مدل پیچ بهترین مدلی است که رفتار خشک شدن سبزی را می‌تواند پیش‌بینی نماید.



شکل ۴ میزان نزدیکی مقادیر محتوی رطوبتی تجربی و تئوری را نشان می‌دهد. در اینجا مدل پیچ رطوبت تئوری را نشان می‌دهد.



شکل ۶- بررسی نسبت رطوبت تجربی و تئوری

### نتیجه گیری

بهترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک شدن سبزی جعفری، مدل پیچ است. با افزایش دما از ۴۵ به ۶۵ درجه مقدار زمان به طور میانگین ۶۹٪ کاهش یافت. با افزایش توان از صفر به ۵۰۰ وات مقدار زمان به طور میانگین ۶۴٪ کاهش یافت.

### منابع و مآخذ

1. Agrawal, Y. C. and Singh, R. P. 1977. Thin- Layer Drying Studies on Short-grain Rice. ASAE Paper, No. 77-3531.
2. Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y. 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. Energy Convection and Management, 44, 1689-1705.



3. Babalis, S. J., Papaniclaou, E., Kyriakis, N. and Belessiotis, V.G. 2005. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus Carica*). *Journal of Food Engineering*, 75: 205–214.
4. Bruce, D. M. 1985. Exposed-Layer Barley Drying, Three Models Fitted to New Data up to 150°C. *J. Agric. Eng. Res.*, 32: 337- 347.
5. Chandra, P. K. and Singh, R. P. 1995. *Applied Numerical Methods for Food and Agricultural engineers*. CRC Press, Boca Raton, FL, PP. 163–167.
6. Chhinman, M. S. 1984. Evaluation of Selected Mathematical Models for Describing Thin Layer Drying of In-shell Pecans. *Trans. ASAE*, 27: 610-615.
7. Das, I., Das, S. K. and Bal, S., 2004. Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering*, 68: 249-255.
8. Doymaz I., 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1291 – 1297.
9. Ertekin C., and Yaldiz O., 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349 – 359.
10. Gunhan T., Demir V., Hancioglu E., and Hepbasli A., 2005. Mathematical modeling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11–12), 1667–1679.
11. Hebbbar, H., K.H. Vishwanathan, M.N. Ramesh. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables, *Journal of Food Engineering*, 65: 557–563.
12. Henderson, S. M. 1974. Progress in Developing the Thin-Layer Drying Equation. *Trans ASAE*, 17: 1167-1172.
13. Karathanos, V. T. 1999. Determination of Water Content of Dried Fruits by Drying Kinetics. *J. Food Eng.*, 39(4): 337-344.
14. Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. 2002. A New Model for Single-layer Drying. *Drying Technol.*, 20(7): 1503-1513.
15. Mirzaee E., Rafiee S., and Keyhani A., 2010. Evaluation and selection of thin-layer models for drying kinetics of apricot. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 12(2), 111 – 116.
16. Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P.B., (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 67:361 – 366.
17. Togrul, I. T. and Pehlivan, D. 2002. Mathematical Modelling of Solar Drying of Apricots in Thin Layers. *J. Food Eng.*, 55(3): 209-216.
18. Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B. and Wratten, F. T. 1985. Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. *Trans. ASAE*, 28: 296-301.
19. Wang, C. and Singh, R. 1978. A Single Layer Drying Equation for Rough Rice. *ASAE Technical Paper*, No. 78-3001.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## Drying Kinetics of Parsley in an Infrared Hot Air Dryer

### Abstract

The aim of the present study is to select the best model to describe parsley drying behavior in an infrared hot air dryer. The experiments were conducted at three levels of drying air temperature (45, 55 and 65 °C) and three levels of infrared power (0, 250 and 500 W). The results showed that drying time shortened by 69% when the air temperature raised from 45 to 65°C. Increasing the IR power to 500 W caused a 64% reduction in drying time. Finally, the Midili model was selected as the best mathematical model to describe the drying behavior of parsley.

**Key Words:** Parsley; Modeling; Air Flow; Infrared.