

تأثیر تغییرات دما، سرعت جابه‌جایی هوا و ضخامت لایه محصول در فرایند خشک کردن پسته کله قوچی

حمید رضا گازر*، سعید مینائی** و علیرضا بصیری***

چکیده

یکی از مهمترین مراحل فراوری پسته برای انبار مانی مناسب، مرحله خشک کردن می‌باشد. به دست آوردن شرایط بهینه برای کاهش زمان فرایند خشک شدن پسته می‌تواند اثر مهمی در کوتاه کردن زمان فرآوری این محصول داشته باشد. پارامترهای دما، سرعت جابه‌جایی هوای گرم و ضخامت لایه محصول، عوامل اصلی اثرگذار بر فرایند خشک شدن پسته محسوب می‌شوند. در این تحقیق اثرات تغییرات دما در سه سطح ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت جابه‌جایی هوای گرم در سه سطح ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه و ضخامت لایه محصول در دو سطح ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بر روی زمان و آهنگ خشک شدن پسته رقم کله قوچی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که تغییرات دما، سرعت جابه‌جایی هوا و ضخامت محصول اثر بسیار معنی‌داری بر روی دو شاخص زمان و آهنگ خشک شدن پسته دارند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که افزایش دما تا ۹۰ درجه سانتیگراد باعث بیش از ۵۰ درصد کاهش زمان و افزایش آهنگ خشک شدن می‌شود. این افزایش دما موجب برشتگی طعم پسته‌های خشک شده می‌گردد. لیکن از نظر ظاهری، پسته‌های خشک شده در این دما، مشابه پسته‌های خشک شده در دماهای پایین‌تر می‌باشند. افزایش سرعت جابه‌جایی هوای گرم تا ۲/۵ متر بر ثانیه در دماهای بالا، می‌تواند تا حدود ۱۷/۵ درصد از زمان خشک شدن محصول بکاهد. بیشتر شدن ضخامت محصول باعث افزایش زمان و کاهش آهنگ

*- دانشجوی سابق دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

** - استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس. تهران - صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵

*** - استادیار پژوهش، گروه زراعت و باغبانی، پژوهشکده کشاورزی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
تاریخ دریافت مقاله ۸۰/۱۱/۲۴، تاریخ دریافت نسخه نهایی ۸۲/۱/۱۷

خشک شدن پسته می‌گردد، ولی مقدار محصول خشک شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با زمان صرف شده افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: خشک کردن، پسته کله قوچی

مقدمه

پسته یکی از محصولات مهم باغی کشور ایران می‌باشد و اهمیت زیادی در صادرات غیر نفتی دارد. فراوری این محصول در زمانی کوتاه و حدود یک ماه انجام می‌گیرد (درویشیان، ۱۳۷۸). یکی از مهمترین مراحل فراوری پسته رطوبت زدایی یا به اصطلاح خشک کردن می‌باشد. در این مرحله رطوبت دانه از حدود ۵۰ درصد به ۴ تا ۶ درصد بر پایه خشک کاهش داده می‌شود تا محصول برای انبارمانی و حفظ کیفیت مناسب در مدت‌های طولانی (۱۲ ماه در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد) قابل نگهداری و مصرف باشد (Kader et al., 1982). میزان رطوبت دانه در انتهای فرایند خشک شدن پسته در خشک‌کن‌های رایج در استان کرمان بین ۳ تا ۷/۳۳ درصد بر پایه خشک گزارش شده است (رستمی، ۱۳۷۷). قبلاً در آمریکا اغلب کارخانه‌های فراوری، پسته را در دمای ۶۰ تا ۷۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ الی ۱۴ ساعت خشک می‌کردند. لیکن امروزه این عمل در دو مرحله به صورت کاهش رطوبت تا ۱۲ الی ۱۳ درصد در دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت و پس از آن قرارگیری در دمای حداکثر ۴۹ درجه به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت برای خشک شدن محصول تا سطح ۴ تا ۶ درصد انجام می‌شود. در کارگاه‌های کوچک، پسته در یک مرحله در دمای ۶۰ تا ۶۶ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان ۸ ساعت خشک می‌گردد (درویشیان، ۱۳۷۸).

در مواد نمگیر سه نوع رطوبت بصورت سطحی، رطوبت آزاد یا آب درون لوله‌های موئین و رطوبت پیوندی وجود دارد که به ترتیب از ماده خشک شونده جدا می‌شوند. پس از آنکه آب سطح ماده کاملاً خشک شد، فرایند تبخیر مایع درون منافذ شروع می‌شود. در آن هنگام دبی خشک شدن به دلیل کاهش سطح تبخیر شدیداً کاهش می‌یابد. در نتیجه کاهش تبخیر درجه حرارت سطح ماده به تدریج بالا می‌رود تا به درجه حرارت هوا (عامل خشک کننده) برسد (بی نام، ۱۳۶۸ و پهلوانزاده، ۱۳۷۷). آهنگ خشک شدن^۱ برابر است با مقدار رطوبت خارج شده از واحد سطح ماده خشک شونده در واحد زمان. در مرحله اول خشک شدن بدنه ماده و سطح آن از یک لایه مایع پوشیده شده و دارای درجه حرارتی کمتر از درجه حرارت محیط می‌باشد. پس از آن تبخیر آب سطحی بایک سرعت ثابت شروع

1- Drying rate

می‌شود. این مراحل بسیار سریع و گذرا هستند. پس از تبخیر آب سطحی به تدریج مقدار رطوبت داخلی شروع به کاهش می‌کند که این مسأله باعث کاهش دبی خشک شدن جسم می‌شود در این مرحله دبی خشک شدن توسط انتقال رطوبت ماده که به تغییرات غلظت رطوبت بستگی دارد، کنترل می‌شود (پهلوانزاده، ۱۳۷۷ و Canovas and Mercado, 1996). در حالی که اندازه‌گیری سطح جسم خشک شونده مشکل بوده و یا امکان پذیر نباشد، آهنگ خشک شدن بر مبنای ماده خشک قابل ارزیابی می‌باشد (Hansman et al., 1999). محققین توصیه نمودند که پس از برداشت پسته و پوست‌گیری آن، سریعاً رطوبت دانه به کمتر از ۷ درصد کاهش داده شود و بهتر است به منظور جلوگیری از رشد قارچ‌ها و تسریع رطوبت زدایی عملیات خشک کردن به وسیله دستگاه خشک کن انجام شود، زیرا خشک کردن پسته به صورت طبیعی در هوای معمولی با سرعت کافی همراه نبوده و معمولاً در اوایل کار زمینه برای رشد میکروب‌ها و قارچ‌ها مناسب است (بی نام، ۱۳۷۹ و Denizel, 1977). گلشن میزان رطوبت پسته خارج شده از خشک‌کن‌های مختلف مورد آزمایش در استان کرمان را بین ۳ تا ۷/۳۳ درصد گزارش نمود. مطابق نظر این محقق در دامنه رطوبتی اعلام شده امکان فعالیت قارچی وجود ندارد (گلشن، ۱۳۷۷). قادر و همکاران طی یک تحقیق در رابطه با فراوری پسته در کالیفرنیا اعلام کردند که دمای ۹۰ درجه سانتیگراد در فرایند خشک کردن بر روی کیفیت پسته تأثیر منفی ندارد (Kader et al., 1980). نتایج تحقیق توکلی پور نشان داد که تغییرات دما بین ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد و ضخامت محصول از تک لایه تا ۵ سانتیمتر اثرات معنی‌داری بر مدت زمان و سرعت خشک شدن و نیز میزان عدد پراکسید پسته رقم عباسعلی در دماهای ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد دارد. افزایش دما در خشک کردن پسته سبب کاهش زمان خشک شدن و افزایش عدد پراکسید می‌شود. همچنین این تغییرات دما تأثیری بر روی مقادیر پروتئین و چربی نخواهد داشت (توکلی پور، ۱۳۷۹). قادر اعلام کرد که با توجه به میزان رطوبت اولیه پسته و کارایی سیستم تا دمای ۹۳ درجه سانتیگراد نیز می‌توان پسته را خشک کرد که در این دما زمان خشک شدن تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. چنانچه در دمای بین ۷۱ تا ۹۳ درجه سانتیگراد اقدام به خشک کردن شود، ترک خوردگی در مغز پسته‌ها به میزان ۲ تا ۶ درصد افزایش می‌یابد (Kader, 1985).

با توجه به بررسی‌های اولیه انجام شده توسط نگارنده روی کارخانه‌های فرآوری پسته در استان کرمان و مطالعه روی پارامترهای (دما، ضخامت و سرعت جابه‌جایی هوا) موثر در خشک‌کن‌های مورد استفاده در استان کرمان، هدف از انجام این تحقیق بررسی اثرات تغییرات دما در محدوده ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد، سرعت جابه‌جایی هوای گرم از ۱/۵ تا ۲/۵ متر بر ثانیه در دو ضخامت محصول ۵ و ۱۰ سانتیمتر بر روی زمان و نرخ خشک شدن در یک رقم از پسته‌های ایران (کله قوچی) می‌باشد که نتایج به دست آمده در فرایند خشک کردن پسته مفید خواهد بود.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق تغییرات دما در سه سطح ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد، تغییرات سرعت جابه‌جایی هوا در سه سطح ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه و تغییرات ضخامت محصول در دو سطح ۵ و ۱۰ سانتیمتر بر روی زمان و آهنگ خشک شدن در یک رقم از پسته‌های ایران به نام کله قوچی بررسی گردید.

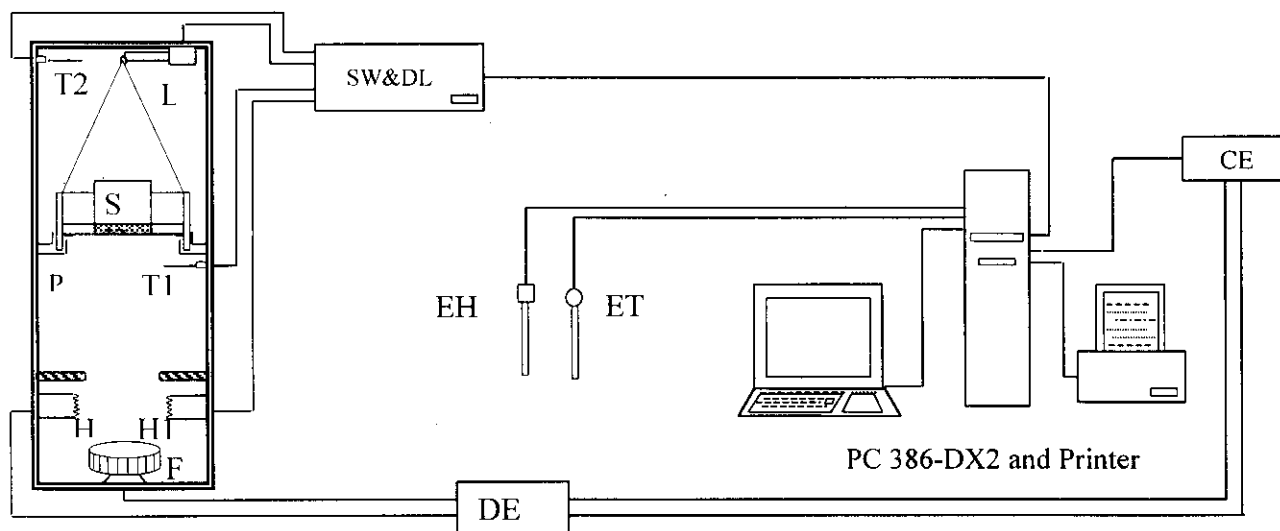
پسته‌های مورد آزمایش از باغات پسته واقع در منطقه زرنند ساوه برداشت شده و قبل از انجام آزمایش پوست اولیه (روی) آنها گرفته شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها با کاربرد نرم افزار MSTATC از طرح آماری کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل و در سه تکرار استفاده شد و مقایسه میانگین‌های به دست آمده به وسیله آزمون دانکن در سطح ۱٪ انجام شد (بصیری، ۱۳۷۳).

برای اندازه‌گیری رطوبت در پسته‌های مورد آزمون از روش وزنی استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ۶ تا ۸ ساعت در یک آون خلأ با فشار ۹۰۰- میلی بار و دمای ۷۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند تا وزن آنها ثابت گردید (توکلی پور، ۱۳۷۳، Maskan and Gogus, 1997 و Maskan and Karatas, 1997). مقدار رطوبت اولیه برای پسته کله قوچی ۵۷ تا ۶۲ درصد بر پایه خشک به دست آمد. ظروف آزمایش عبارت بود از یک ظرف استوانه‌ای شکل دارای صفحه مشبک در پایین دست، با مقطع دارای قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۲ سانتی متر که حداکثر تا ارتفاع ۱۰ سانتی متر در آن پسته قرار داده شد. برای اندازه‌گیری سرعت جابه‌جایی هوای گرم در خشک‌کن‌ها از دستگاه سرعت سنج هوا^۱ با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه، مدل AM-4201 شرکت لوترون^۲ ساخت کشور تایوان استفاده شد. با استفاده از دما سنج-رطوبت سنج مدل HT-3003 شرکت لوترون، در طول مدت آزمایشات تغییرات دمای آزمایشگاه ۲۳ تا ۲۸ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی هوای محیط ۲۰ تا ۳۵٪ اندازه‌گیری شد. برای انجام عملیات خشک کردن از سه عدد خشک‌کن آزمایشگاهی از نوع کیلن^۳ استفاده شده است. این خشک‌کن‌ها ساخت کشور ایران بوده و در مجتمع تحقیقاتی عصر انقلاب (سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران) قرار دارند. قابلیت تنظیم دما در این خشک‌کن از دمای محیط تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد بوده و ابعاد آن ۱×۱×۲ متر مکعب می‌باشد. خشک‌کن‌های کیلن برای خشک کردن میوه جات و سبزی مناسب بوده و دارای صفحه‌ای مشبک می‌باشند که جریان هوای گرم از زیر به محصول در حال خشک شدن برخورد می‌کند (شکل ۱) (Canovas and Mercado, 1996).

1- Anemometer

2- Lutron

3- iln dryer



شکل ۱ - طرح خشک کن آزمایشگاهی

در این شکل:

۱. فن (F) ۲. مولد گرما ۱ (H1) ۳. مولد گرما ۲ (H2) ۴. استوانه حامل نمونه ۵. (T1) دماسنج قبل از استوانه حامل نمونه ۶. (T2) دماسنج بعد از استوانه حامل نمونه ۷. بار سنج (لود سل) ۸. (SW) کلیدهای فرمان (سوئیچر) ۹. (DL) ثبات داده‌ها (دیتا لاگر) ۱۰. (CE) سیستم کنترل الکترونیکی ۱۱. (DE) سیستم راه انداز الکترونیکی خشک کن ۱۲. (EH) حسگر اندازه‌گیری رطوبت محیط ۱۳. (ET) حسگر اندازه‌گیری دمای محیط ۱۴. پارافین این خشک کن‌ها از طریق یک ثبات^۱ به یک کامپیوتر ۳۸۶ متصل بودند. در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای اقدام به داده برداری (وزن کشتی نمونه‌ها) گردید. این وزن کشتی تا زمانی که سه توزین پیاپی مساوی یکدیگر شود ادامه می‌یافت. پس از آن با استفاده از وزن نهایی نمونه‌ها که به وسیله آون خشک شده بود و رابطه زیر تغییرات رطوبت نمونه‌ها در طول آزمایش به دست آمد (پهلوانزاده، ۱۳۷۷).

$$m.c. = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100$$

W_1 = وزن نمونه در هر زمان از آزمایش

W_2 = وزن نهایی نمونه

$m.c$ = درصد رطوبت بر پایه خشک

آهنگ خشک شدن نسبت وزن آب خارج شده از جسم به وزن ماده خشک در واحد زمان بوده و در هر زمان از فرایند خشک شدن قابل محاسبه می‌باشد. در این تحقیق این شاخص از تفاضل وزنی متوالی نمونه در زمانهای ۱۵ دقیقه‌ای (که بیانگر مقدار آب خارج شده از جسم می‌باشد) در کل فرایند و میانگین گیری از مجموع اعداد به دست آمده برای هر تیمار بر حسب (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک در ساعت) به دست آمد. همچنین با در نظر گرفتن زمانهای خشک شدن پسته درصد تأثیر افزایش دما و سرعت هوا در کاهش زمان خشک شدن محاسبه گردید. پسته‌های خشک شده جهت تعیین طعم برشتگی توسط ۱۰ نفر از مصرف کنندگان پسته امتحان شده و از طریق آزمون چشایی و گرفتن درصد، پسته‌های برشته شده مشخص شدند. تغییرات ظاهری پسته‌های خشک شده نیز از طریق چشمی بایکدیگر مقایسه شد. برای تخمین زمان خشک شدن در محدوده دمایی ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد از رگرسیون خطی برای تیمارهای آزمایش استفاده شد. با توجه به تحقیقات انجام شده قبلی مبنای محاسبات زمان و آهنگ خشک شدن تا زمان رسیدن به رطوبت پسته به میزان حدود 1 ± 5 درصد بر پایه خشک می‌باشد (Kader et al. 1982).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایشات در جداول ۱ و ۳ آورده شده است. از تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده نتیجه گیری شد که تغییرات پارامترهای دما، سرعت جابه‌جایی هوا و ضخامت لایه محصول اثرات معنی‌داری روی زمان و متوسط آهنگ خشک شدن در سطح ۱٪ دارند. همچنین اثرات متقابل دما، سرعت هوا و ضخامت محصول نیز معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس زمان خشک شدن

مقدار F	MS	SS	درجه آزادی	منابع تغییر
۴۵۳۴/۴۰ ^{**}	۳۷۷۸۶۶/۶۷	۷۵۵۷۳۳/۳۳	۲	دما
۱۱۹/۱۵ ^{**}	۹۹۲۹/۱۷	۱۹۸۵۸/۳۳	۲	سرعت هوا
۵/۹۸ ^{**}	۴۹۷/۹۱۷	۱۹۹۱/۶۷	۴	دما × سرعت هوا
۷۰۸/۰۵ ^{**}	۵۹۰۰۴/۱۷	۵۹۰۰۴/۱۷	۱	ضخامت محصول
۴۹/۴۰ ^{**}	۴۱۱۶/۶۷	۸۲۳۳/۳۳	۲	دما × ضخامت محصول
۲۴/۰۵ ^{**}	۲۰۰۴/۱۷	۴۰۰۸/۳۳	۲	سرعت هوا × ضخامت محصول
۹/۱۳ ^{**}	۷۶۰/۴۲	۳۰۴۱/۶۷	۴	دما × سرعت هوا × ضخامت محصول
	۸۳/۳۳	۳۰۰۰/۰۰	۳۶	خطا
		۸۵۴۸۷۰/۸۳	۵۳	کل

xx وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

جدول ۲ - مقایسه میانگین‌های زمان خشک شدن (min) به روش آزمون دانکن

دما (°C)			سرعت هوا (m/s)	ضخامت محصول (cm)
۹۰	۷۵	۶۰		
I۲۴۰	FG۳۱۵	C۴۹۰	۱/۵	۵
JK۲۲۰	GH۳۰۰	C۴۷۵	۲	
K۲۱۵	GH۲۹۵	C۴۷۰	۲/۵	
H۲۸۰	D۴۰۰	A ۵۹۵	۱/۵	۱۰
I۲۴۰	E۳۶۰	B۵۶۰	۲	
IJ۲۳۰	F۳۴۵	B۵۵۰	۲/۵	

حروف مشابه نشانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ می‌باشد.

بر اساس نتایج آزمون دانکن (جداول ۲ و ۴) ملاحظه می‌شود که در هر دو ضخامت و در هر سه سرعت جابه‌جایی هوا افزایش دما به‌طور معنی‌داری سبب افزایش آهنگ و کاهش زمان خشک شدن پسته شده است ولی این تأثیر، در افزایش دما از ۶۰ به ۷۵ درجه بیشتر از افزایش دما از ۷۵ به ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که در هر سه دما و در هر دو ضخامت محصول در اغلب موارد افزایش سرعت جابه‌جایی هوا از ۲ به ۲/۵ متر بر ثانیه تأثیر معنی‌داری بر افزایش آهنگ و کاهش زمان خشک شدن پسته ندارد و بیشترین اختلاف پدید آمده در افزایش آهنگ و کاهش زمان خشک شدن مربوط به تغییر سرعت هوا از ۱/۵ به ۲/۵ متر ثانیه می‌باشد. با توجه به داده‌های به دست آمده در دو جدول مذکور دیده می‌شود که افزایش ضخامت محصول در هر سه دما و سرعت هوا موجب کاهش معنی‌داری آهنگ و افزایش زمان خشک شدن پسته می‌گردد. با افزایش دمای خشک کن این روند (کاهش آهنگ و افزایش زمان خشک شدن) سیری نزولی داشته است.

نتایج به دست آمده حاکی از آن می‌باشد که بالا رفتن دما اثر بسیار معنی‌داری بر روی افزایش متوسط آهنگ خشک شدن و کاهش زمان خشک شدن پسته در هر دو ضخامت محصول دارد. همانگونه که در جداول ۲ و ۴ ملاحظه می‌شود، در تمامی موارد افزایش دما از ۶۰ به ۷۵ درجه سانتیگراد دارای تأثیر بیشتری از افزایش ۷۵ به ۹۰ درجه سانتیگراد در تسریع آهنگ و کاهش زمان خشک شدن پسته دارد، زیرا در هنگام افزایش دما از ۷۵ به ۹۰ درجه، سطح پسته به سرعت خشک شده و در آن ایجاد چروکیدگی می‌شود، این مسأله باعث می‌شود منافذ سطحی کوچکتر از قبل شده و رطوبت داخل ماده نتواند به سرعت از سطح خارج شود. علاوه بر آن با تجمع املاح حاصل از رطوبت

تبخیر شده از سطح و سخت تر شدن لایه سطحی عمل خروج رطوبت مشکل می‌گردد. به همین دلیل با افزایش دما از ۷۵ به ۹۰ درجه سانتیگراد، درصد کاهش زمان خشک شدن پسته کمتر از افزایش دمای ۶۰ به ۷۵ درجه می‌باشد. همانگونه که انتظار می‌رفت بیشترین تأثیر در کاهش زمان خشک شدن در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد وجود دارد، این پدیده می‌تواند به دلیل افزایش جنبش ملکولی آب موجود در محصول در اثر گرما و افزایش سرعت تبخیر آن باشد در این حالت، آهنگ خشک شدن سریع‌تر شده و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده مشابه با نتایج تحقیق توکلی پور در دماهای ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد و ضخامت تک لایه تا ۵ سانتی متر روی پسته رقم عباسعلی می‌باشد (توکلی پور، ۱۳۷۹).

به دلیل محدود بودن سرعت نفوذ رطوبت از لایه‌های مرکزی به سطح پسته که تابعی از دما، ضریب نفوذ و شرایط داخلی ماده می‌باشد، ملاحظه می‌شود که افزایش سرعت هوا از ۲ به ۲/۵ متر بر ثانیه در مقایسه با افزایش سرعت از ۱/۵ به ۲ و یا از ۱/۵ به ۲/۵ متر بر ثانیه، دارای کمترین تأثیر بر روی افزایش آهنگ و کاهش زمان خشک شدن پسته می‌باشد.

جدول ۳ - نتایج آنالیز واریانس متوسط آهنگ خشک شدن

مقدار F	MS	SS	درجه آزادی	منابع تغییر
۱۷۸۷/۹۷ ^{**}	۰/۰۲۵	۰/۰۴۹	۲	دما
۱۰۵/۵۶ ^{**}	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۲	سرعت هوا
۷/۸۰ ^{**}	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۴	دما × سرعت هوا
۲۵۸/۵۵ ^{**}	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۱	ضخامت محصول
۷/۶۸ ^{**}	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۲	دما × ضخامت محصول
۳/۵۹ [*]	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۲	سرعت هوا × ضخامت محصول
۶/۶۳ ^{**}	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۴	دما × سرعت هوا × ضخامت محصول
	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۳۶	خطا
		۰/۰۵۷	۵۳	کل

xx وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ × وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪

کم شدن ضخامت محصول اثر بسیار معنی‌داری بر روی کاهش زمان و افزایش متوسط آهنگ خشک شدن دارد. تأثیر این عامل روی دو پارامتر ذکر شده در دماهای پایین‌تر بیشتر می‌باشد. این مسأله به دلیل تأثیر ضخامت توده بر مقدار آب موجود در کل محصول خشک شونده می‌باشد که بایستی تبخیر

شود. در نتیجه با افزایش مقدار ضخامت محصول در یک شرایط ثابت، آهنگ خشک شدن کاهش و زمان آن افزایش می‌یابد. اما این نکته قابل توجه است که افزایش دما دارای انرژی بسیار زیادی برای تبخیر رطوبت از ماده بوده و افزایش ضخامت لایه محصول در مقایسه با آن، دارای تأثیر کمتری بر روی آهنگ و زمان خشک شدن پسته در دماهای بالا می‌باشد. یعنی در دماهای بالاتر از ۷۵ درجه افزایش ضخامت از ۵ به ۱۰ سانتی متر در مقایسه با دماهای کمتر از آن دارای تأثیر کمتری روی افزایش زمان خشک شدن پسته خواهد بود. به عنوان نمونه این اثر در دمای ۹۰ درجه کاملاً مشهود می‌باشد.

جدول ۴ - مقایسه میانگین‌های آهنگ خشک شدن ($\text{kgH}_2\text{O}/\text{kgDM}\cdot\text{h}$) به روش آزمون دانکن

دما (°C)			سرعت هوا (m/s)	ضخامت محصول (cm)
۹۰	۷۵	۶۰		
C۰/۱۳۵	F۰/۱۰۲	HI ۰/۰۶۵	۱/۵	۵ سانتیمتر
B۰/۱۵۳	D۰/۱۱۸	GH۰/۰۷۰	۲	
A۰/۱۶۰	CD۰/۱۲۸	G۰/۰۷۵	۲/۵	
D۰/۱۱۶	G۰/۰۹۰	K ۰/۰۵۶	۱/۵	۱۰ سانتیمتر
C۰/۱۳۵	F۰/۱۰۲	JK۰/۰۶۵	۲	
C۰/۱۳۶	EF۰/۱۰۷	IJ۰/۰۷۰	۲/۵	

حروف مشابه نشانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ می‌باشد.

بهترین نتایج از نظر افزایش آهنگ و کاهش زمان خشک شدن در دمای ۹۰ درجه و سرعت هوای ۲/۵ متر بر ثانیه به دست آمده است. اما با توجه به اینکه اختلاف معنی‌داری با نتایج در سرعت ۲ متر بر ثانیه مشاهده نمی‌شود (جدول ۲ و ۴) و از آنجا که در سرعت کمتر هوا انرژی کمتری مصرف می‌شود، سرعت ۲ متر بر ثانیه برای خشک کردن پسته توصیه می‌گردد.

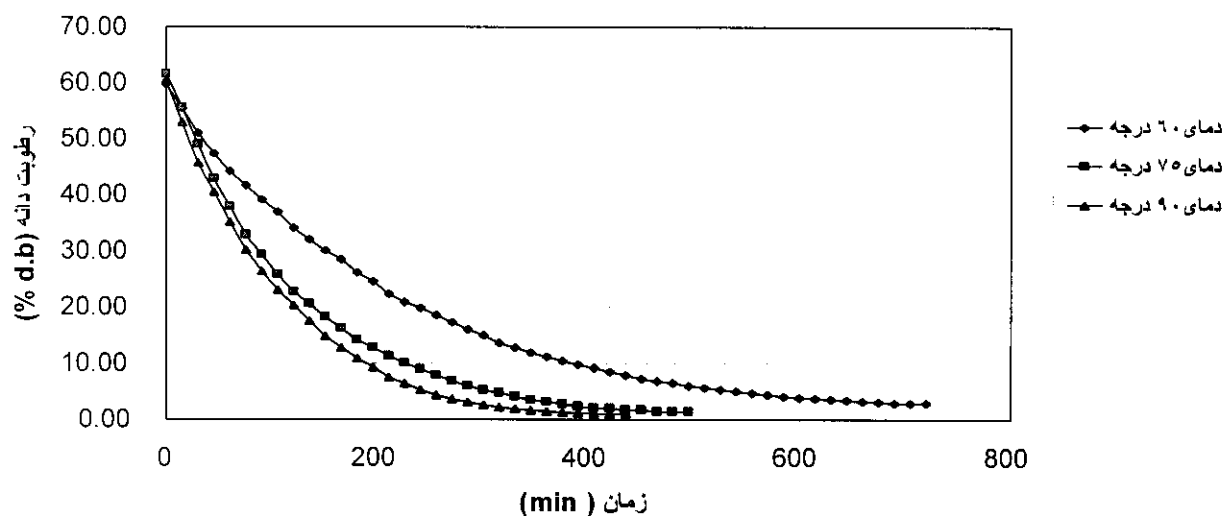
با توجه به نظر سنجی از ۱۰۰ نفر از مصرف کنندگان پسته، ۲۳ درصد موافق با برشتگی ملایم در طعم پسته‌های خشک شده در دمای ۷۵ درجه بودند (جدول ۵). نتیجه به دست آمده حاکی از آن است که با خشک کردن پسته در دمای بیش از ۷۵ درجه، طعم آن رو به برشتگی خواهد رفت و این مسأله در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد کاملاً بارز می‌باشد. درحالی که تغییرات دما و سرعت هوا تأثیری در مقادیر پروتئین و چربی موجود در پسته ندارد و این نتیجه در تحقیقات انجام شده قبلی اعلام شده است. (توکلی پور، ۱۳۷۹ و Kader et al., 1980).

همچنین این نظر سنجی نشان داد تغییرات دما در محدوده ذکر شده تأثیری بر روی وضعیت ظاهری پسته‌ها نداشته و نمونه‌ها قابل تفکیک از یکدیگر نمی‌باشند. طبیعتاً محصول با ضخامت ۵ سانتیمتر سریعتر از محصول با ضخامت ۱۰ سانتیمتر خشک می‌شود. لیکن بررسی زمان‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که اختلاف در حدی نیست که وقت و هزینه اضافی خشک کردن لایه‌های نازک را توجیه نماید. به عنوان مثال در شرایط توصیه شده این تحقیق برای برشته‌گی و خشک شدن معمولی پسته، افزایش زمان خشک شدن در اثر افزایش ضخامت محصول از ۵ به ۱۰ سانتیمتر حدود ۱۱/۷ درصد بوده است. در حالی که مقدار محصول خشک شده ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد که قطعاً مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. از این رو با در نظر گرفتن ضخامت فوق (۱۰ سانتی متر) شرایط بهینه خشک کردن پسته در حالت برشته دمای ۹۰ درجه و سرعت هوا ۲ متر بر ثانیه و در حالت خشک شدن معمولی دمای ۷۵ درجه و سرعت هوا ۲ متر بر ثانیه می‌باشد.

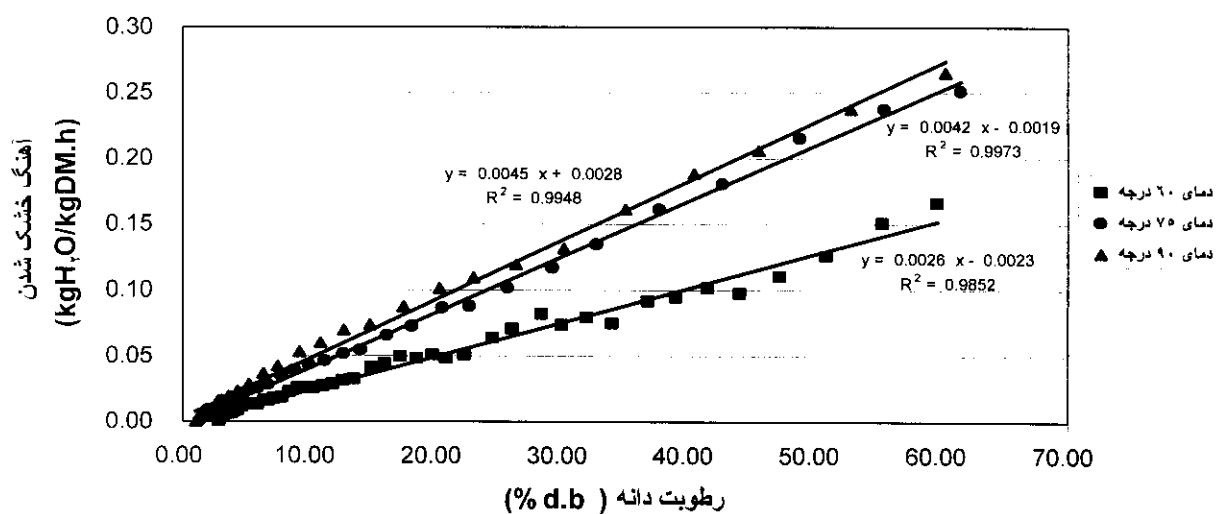
جدول ۵ - نتایج نظر سنجی در رابطه با وضعیت ظاهری پسته و طعم برشته‌گی حاصل از تغییرات دمای خشک کن

موافقین با ایجاد طعم برشته‌گی در دمای ۶۰ °C	موافقین با ایجاد طعم برشته‌گی در دمای ۷۵ °C	موافقین با ایجاد طعم برشته‌گی در دمای ۹۰ °C	موافقین امکان جداسازی ظاهری پسته‌های خشک شده در سه دمای آزمایش
۱۲ (%)	۲۳ (%)	۸۷ (%)	۹ (%)

برای نمونه، تأثیر تغییرات دما بر روی روند خشک شدن و تغییرات آهنگ خشک شدن در شکل‌های ۲ و ۳ نشان شده است. براساس شکل ۲ همان گونه که انتظار می‌رود، در ابتدای فرایند خشک کردن، رطوبت محصول با شیب زیادی کاهش می‌یابد و این شیب با افزایش دما تندتر می‌شود. با گذشت زمان شیب منحنی کاهش یافته و پس از حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ دقیقه به حالت افقی نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر با خشک شدن هرچه بیشتر پسته، استخراج رطوبت از آن مشکل‌تر می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن شیب خطوط به دست آمده در شکل ۳ این نتیجه به دست می‌آید که با افزایش دما شیب خطوط زیاد تر و آهنگ خشک شدن سریعتر می‌گردد. همانگونه که در شکل مشهود است اختلاف شیب خطوط به دست آمده در دماهای ۷۵ و ۹۰ درجه کم می‌باشد و این بیانگر آن است که تأثیر افزایش دما از ۶۰ به ۷۵ درجه در سرعت بخشیدن آهنگ خشک شدن، بیشتر از تأثیر افزایش آن از ۷۵ به ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. منحنی‌های خشک شدن در حالت‌های دیگر با در نظر گرفتن اختلاف در شیب مراحل اولیه فرایند، مشابه این دو منحنی بوده و برای اجتناب از اطاله مطلب آورده نشده‌اند.



شکل ۲- تأثیر دما بر روند خشک شدن پسته کله قوچی با ضخامت ۱۰ cm و سرعت هوا ۲ m/s



شکل ۳- تأثیر دما بر آهنک خشک شدن پسته کله قوچی با ضخامت ۱۰ cm و سرعت هوا ۲ m/s

درصد تأثیر افزایش دما بر کاهش زمان خشک شدن در جداول ۶، ۷ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود افزایش دما دارای تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش زمان خشک شدن می‌باشد، به طوری که با افزایش دما از ۶۰ به ۹۰ درجه سانتی گراد زمان خشک شدن پسته کله قوچی بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۶ - اثر افزایش دما بر درصد کاهش زمان خشک شدن در سرعت‌های مختلف هوا و ضخامت ۵ cm

دما (°C)	سرعت هوا (m/s)	۶۰ - ۷۵	۷۵ - ۹۰	۶۰ - ۹۰
۱/۵	۲۳/۸۱	۳۵/۷۱	۲۳/۸۱	۵۱/۰۲
۲	۲۶/۶۷	۳۶/۸۴	۲۶/۶۷	۵۳/۶۸
۲/۵	۲۵/۸۷	۳۷/۲۳	۲۵/۸۷	۵۲/۹۹

جدول ۷ - اثر افزایش دما بر درصد کاهش زمان خشک شدن در سرعت‌های مختلف هوا و ضخامت ۱۰ cm

دما (°C)	سرعت هوا (m/s)	۶۰ - ۷۵	۷۵ - ۹۰	۶۰ - ۹۰
۱/۵	۳۰/۰۰	۳۲/۷۷	۳۰/۰۰	۵۲/۲۹
۲	۳۳/۳۳	۳۵/۷۱	۳۳/۳۳	۵۷/۱۴
۲/۵	۳۳/۳۱	۳۷/۲۷	۳۳/۳۱	۵۸/۱۸

درصد تأثیر افزایش سرعت هوای گرم بر کاهش زمان خشک شدن در جداول ۸ و ۹ نشان داده شده است. همان گونه که مورد انتظار بود ملاحظه می‌شود که افزایش سرعت هوا بر کاهش زمان خشک شدن موثر می‌باشد و افزایش سرعت از ۱/۵ به ۲/۵ متر بر ثانیه دارای بیشترین تأثیر در دماهای مختلف می‌باشد. این تأثیر در دماهای ۷۵ و ۹۰ درجه سانتیگراد و در ضخامت ۱۰ سانتی‌متر قابل ملاحظه بوده و در بعضی از موارد به بیش از ۱۷/۵ درصد نیز می‌رسد. حداقل تأثیر در اختلاف زمان خشک شدن پسته در سرعت‌های ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود.

جدول ۸ - اثر افزایش سرعت هوا بر درصد کاهش زمان خشک شدن در دماهای مختلف هوا و ضخامت ۵ cm

سرعت هوا (m/s)	دما (°C)	۱/۵ - ۲	۲/۵ - ۲	۱/۵ - ۲/۵
۶۰	۳/۰۶	۱/۰۵	۴/۰۸	۱/۵ - ۲/۵
۷۵	۴/۷۶	۱/۶۷	۶/۳۵	۱/۵ - ۲/۵
۹۰	۸/۳۳	۲/۲۷	۱۰/۴۲	۱/۵ - ۲/۵

جدول ۹- اثر افزایش سرعت هوا بر درصد کاهش زمان خشک شدن در دماهای مختلف هوا و ضخامت ۱۰ cm

سرعت هوا (m/s) دما (°C)	۱/۵ - ۲	۲/۵ - ۲	۱/۵ - ۲
۶۰	۷/۵۶	۱/۷۹	۵/۸۸
۷۵	۱۳/۷۵	۴/۱۷	۱۰/۰۰
۹۰	۱۷/۸۶	۴/۱۷	۱۴/۲۹

با بررسی میانگین‌های به دست آمده زمان خشک کردن پسته کله قوچی در سه دمای آزمون شده و استفاده از روش رگرسیون چند گانه می‌توان یک معادله خطی جهت تخمین زمان خشک شدن در محدوده ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد را برای ضخامت‌های ۵ تا ۱۰ سانتیمتر و سرعت هوای ۱/۵ تا ۲/۵ متر بر ثانیه به صورت زیر به دست آورد

$$t = 3.29T + 361.20V + 142.24D - 4.63T.V - 1.564T.D - 47.58V.D + 0.55T.V.D \quad R=0.98$$

در معادله بالا :

D = ضخامت لایه محصول (cm)

T = دمای خشک کن (°C)

t = زمان خشک شدن پسته (min)

V = سرعت جابه‌جایی هوا (m/s)

با توجه به ضریب رگرسیون (R) به دست آمده، نتیجه‌گیری می‌شود که رابطه خطی به دست آمده دارای برازش مناسبی با داده‌های آزمایش بوده و از آن می‌توان برای تخمین زمان خشک شدن پسته استفاده نمود.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از تحقیق، موارد زیر نتیجه‌گیری و توصیه می‌گردد:

۱. تغییرات دما، سرعت جابه‌جایی هوا و ضخامت لایه محصول تأثیر بسیار معنی‌داری بر زمان و آهنگ خشک شدن پسته دارند.

۲. تأثیر دما در فرایند خشک کردن پسته بسیار زیاد می‌باشد و افزایش آن می‌تواند بیش از ۵۰ درصد زمان خشک شدن را کاهش دهد.
۳. تأثیر افزایش دما از ۶۰ به ۷۵ درجه، در کاهش زمان خشک شدن پسته به مراتب بیشتر از افزایش دما از ۷۵ به ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.
۴. پیشنهاد می‌شود که از دمای ۹۰ درجه سانتیگراد برای برشته‌گی و از دمای ۷۵ درجه برای خشک کردن پسته استفاده شود.
۵. افزایش سرعت جابه‌جایی هوای گرم در برخی موارد تا حدود ۱۷/۵ درصد زمان خشک شدن را کاهش می‌دهد. در اغلب موارد از نظر زمان خشک شدن پسته اختلافی بین کاربرد سرعت هوای ۲ و ۲/۵ متر ثانیه مشاهده نشد. با توجه به ارزش اقتصادی بالای این محصول، برای دستیابی به زمان کمتر، آهنگ سریعتر و جلوگیری از اتلاف انرژی در خشک شدن، بهتراست از سرعت ۲ متر بر ثانیه در فرایند خشک کردن پسته استفاده شود.
۶. با توجه به نتایج به دست آمده از اختلاف بین مدت زمان خشک شدن میان ضخامت‌های ۵ و ۱۰ سانتیمتر بهتراست پسته در ضخامت ۱۰ سانتیمتر خشک شود.
۷. پیشنهاد می‌شود معادله تخمین زمان خشک شدن روی خشک کن‌های پسته ارزیابی شود.

منابع و مأخذ

۱. بصیری، ع. (۱۳۷۳). طرح‌های آماری در علوم کشاورزی. انتشارات دانشگاه شیراز، شیراز.
۲. بی‌نام. (۱۳۶۸). مهندسی صنایع غذایی (تألیف هلدمان و سینگ). انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، تهران.
۳. بی‌نام. (۱۳۷۹). آفلاتوکسین پسته (روش‌های پیشگیری و کنترل آن). نشریه ترویجی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی. تهران.
۴. پهلوانزاده، ح. (۱۳۷۷). خشک کردن، اصول، کاربرد و طراحی (تألیف استرامیلو و کودرا). انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۵. توکلی پور، ح. (۱۳۷۹). بهینه سازی روش‌های خشک کردن و انبارداری پسته. پایان نامه دکتری. واحد علوم و تحقیقات. دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.
۶. درویشیان، م. (۱۳۷۸). کشت و تولید پسته (تألیف لوئیز فرگوسن). نشر فرهنگ آیندگان. تهران.
۷. رستمی، م. (۱۳۷۷). ارزیابی و مقایسه خشک کن‌های رایج پسته در استان کرمان. طرح تحقیقاتی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی، تهران.

۸. گلشن، ا. (۱۳۷۷). بررسی رطوبت پسته خروجی از خشک‌کن‌های متداول در استان کرمان. طرح مطالعاتی مرکز تحقیقات کرمان. انتشارات ترویج کشاورزی استان کرمان. کرمان
9. Canovas, V.G. and H. V. Mercado , (1996). Dehydration of food. Chapman & Hall publishers. New York. U.S.A
 10. Denizel, T. (1977). Suggestion on prevention of Aflatoxin formation in pistachio nuts. Archives de. L. Institute pasture de Tunis. 54(3/4): 433-440
 11. Hansman, F. , E. Joubert and P.C. Fourier, (1999). The constant rate drying period during experimental fruit drying. *Drying Technology*.17: 1459-1470
 12. Kader, A. A. , J. M. Labavitch, F. G. Mitachell and N. F. sommer, (1980). Quality and safty of pistachio nuts as influenced by post harvest handeling procedures, progress report. Section IV. Department of pomology, University of California. Davis. CA., U.S.A.
 13. Kader, A. A. , C. M. Heintz , J. M. Labvitch and H. L. Rae.(1982). Studies related to the description and evaluation of pistachio nut quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 107(S): 812-816
 14. Kader, A. A. (1985). *Postharvest Technology of Crops*. Pistachio commission publisher, pp: 170-174. California. U.S.A.
 15. Maskan, M. and F. Gogus. (1997). The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nut paste. *Journal of Food Eng.* : 227-237
 16. Maskan, M. and S. Karatas. (1997). Sorption characteristics of whole pistachio nuts (*pistacia vera L.*). *Drying Technology*. 15(3/4): 1119-1139