

ارزیابی پایداری فیزیکی پودر سیر خشک شده با روش های خشک کردن انجمادی و جریان هوای گرم

فریبا بیات^{۱*}، فوژان بدیعی^۲، زهرا رفیعی درسنگی^۳

۱. مربی پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

۲، ۳. دانشیار و کارشناس موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۸ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

چکیده

با تعیین همدمای جذب رطوبت و خواص گرمایی پودر سیر می توان پایداری آن را در مدت نگهداری تعیین کرد. نتایج خشک کردن ورقه های ۲ میلی متری سیر با دو روش انجمادی و جریان هوای گرم نشان داد که مقدار پیرووات پودر سیر انجمادی بیشتر و دانسیته و تغییرات رنگ آن به صورت معنی داری کمتر از نمونه دیگر بود. منحنی های همدمای جذب تا فعالیت آبی ۰/۴ تغییرات کمی داشت ولی با افزایش فعالیت آبی محیط، رطوبت جذب شده به وسیله نمونه ها افزایش یافت. دمای انتقال شیشه ای در پودر سیر انجمادی با رطوبت ۷/۰ درصد، ۵۰/۴ درجه سلسیوس و برای پودر سیر با جریان هوای گرم با رطوبت ۷/۷ درصد، ۴۴/۵ درجه سلسیوس بود. در هر دو پودر سیر افزایش رطوبت سبب کاهش دمای انتقال شیشه ای شد. فعالیت آبی بالاتر از ۰/۵۵ و دماهای بیشتر از ۳۵ درجه سلسیوس، احتمال جذب رطوبت و کلوخه شدن پودر را به شدت افزایش داد.

واژه های کلیدی: خشک کردن، دمای انتقال شیشه ای، ظرفیت گرمای ویژه، منحنی های همدمای

مقدمه

در بین حالات مختلف فاز آبی در مواد، حالت شیشه ای و آمورف یا بی شکل در تعادل با فاز جامد قرار دارد. موقعی که دمای ماده غذایی تا دمای انتقال شیشه ای کاهش یابد، رشد بلورهای یخ متوقف می شود و باقی مانده، بالاترین غلظت محلول را دارد که خواص ماده بی شکل (آمورف) را نشان می دهد. در صورت کاهش بیشتر دما، مایع غلیظ شده و سبب افزایش سریع ویسکوزیته می شود و ساختاری شبیه شیشه را به وجود می آورد (Roos, Bhandari & Howes, 1995). دمای انتقال شیشه ای و برخی خواص دیگر مواد مانند دمای ذوب، دمای تبخیر، گرمای واکنش، گرمای انحلال، ظرفیت گرمایی ویژه، تغییر ماهیت پروتئین ها و تعیین آب آزاد و پیوسته به روش گرماسنجی پویشی تفاضلی^۱ اندازه گیری می شود. این روش برای مطالعه و بررسی اثر گرما بر انواع مختلف مواد، از جمله: پلیمرها، آلیاژها، مواد معدنی، غذا و دارو به کار می رود (Nicula, 2002).

با روش گرماسنجی پویشی تفاضلی می توان تغییرات فیزیکی و شیمیایی محصولات غذایی را طی فرآیند خشک کردن کنترل کرد. در مدت خشک کردن با هر یک از روش های

خشک کردن مانند هوای گرم، پاششی یا انجمادی، مقدار قابل ملاحظه ای از محصول خشک به دلیل نبود زمان کافی برای تشکیل بلور، در حالت آمورف یا بی شکل باقی می ماند (Mitchell, 1998). با اندازه گیری دمای انتقال شیشه ای، می توان شرایط نگهداری (دما و رطوبت) مطلوب برای پودر مورد نظر را تعیین کرد، به طوری که با نگهداری پودر در دمایی کمتر از دمای انتقال شیشه ای از تغییر کیفیت آن جلوگیری می شود. قرار گرفتن پودر در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه ای، سرعت واکنش های فیزیکوشیمیایی مانند جذب رطوبت، چسبندگی، افت ترکیب های عطر و طعم دهنده، قهوه ای شدن و کلوخه ای شدن افزایش می یابد (Bhandari & Howes, 1999). دمای انتقال شیشه ای به عنوان دمای مرجع در پایداری پودرها استفاده می شود و روشی مناسب برای کنترل کیفیت پودر عصاره پرتقال (Shrestha et al., 2007)، پودر خرما (Sablani et al., 2008)، پودر پوره سیب (Jakubczyk, et al., 2010) و پودر میوه ها و سبزی های دیگر از جمله پودر سیر است.

سیر خشک یکی از فرآورده های غذایی است که از نظر تجاری اهمیت زیادی دارد و به صورت ورقه یا پودر تهیه می شود و به عنوان افزودنی در مواد غذایی استفاده شده یا به مصارف دارویی می رسد (Sharma & Prasad, 2002). در منابع مختلف، اثر دماهای ۴۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس بر خشک کردن سیر

* نویسنده مسئول: bayat.fariba@gmail.com

1. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

اندازه‌گیری است. در محدوده دمایی که نمونه به حالت شیشه‌ای تغییر حالت پیدا می‌کند، تغییری در شیب منحنی رطوبت نسبی نسبت به ثابت سرعت مشاهده می‌شود (Garcia & Pilosof, 2000).

هدف این مطالعه نیز بررسی و مقایسه همدماهای جذب و خواص حرارتی پودر سیرهای تهیه شده به روش خشک کردن با جریان هوای گرم و خشک کردن انجمادی بود. برای خواص حرارتی، نمونه‌ها در معرض برنامه گرمایی- سرمایی که از قبل تعیین شد، قرار گرفت و تغییراتی را که هنگام حرارت دادن پودر سیر رخ داد را تعیین و دما و رطوبت مناسب برای پایداری آن را تعیین کرد.

مواد و روش‌ها

آماده سازی پودر سیر

سیرچه‌های سوخ‌های سیر سفید همدان پس از برداشت و خشک شدن کامل پوسته‌های بیرونی و درونی سوخ، از یکدیگر جدا و پوست‌گیری شدند و مقدار رطوبت اولیه آنها به روش اصلاح شده (Madamba *et al.*, 1993) با قرار دادن ورقه‌های ۲ تا ۳ میلی‌متری سیر برای مدت ۲۴ ساعت درون آن با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد.

خشک کردن

برای ورقه کردن سیرچه‌ها، دو تیغه برش روی دو صفحه فایبر گلاس به فاصله ۲ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند و ورقه‌ها با عبور سیرچه‌ها از درون تیغه‌ها به ضخامت ۲ میلی‌متر جمع-آوری و به دو روش خشک شدند. در روش خشک کردن انجمادی، ورقه‌ها برای مدت ۴۸ ساعت با دستگاه خشک کن انجمادی (Operon, FDB-5503) ساخت کره در دمای ۵۵- درجه سلسیوس منجمد و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس خشک شدند. در روش خشک کردن با جریان هوای گرم نیز ورقه‌ها درون آون فن‌دار آزمایشگاهی (Carbolit, NR60F) ساخت انگلستان با دمای 1 ± 60 درجه سلسیوس قرار گرفتند (Bayat, 2004). خشک کردن در هر دو روش تا رسیدن محتوای رطوبت نهایی نمونه‌ها به 1 ± 7 درصد انجام شد. ورقه‌های سیر با آسیاب (Molinox) ساخت اسپانیا به طور کامل خرد و به پودر تبدیل شدند و پس از عبور از الک با سوراخ‌هایی به قطر ۰/۵ میلی‌متر (مش ۳۵)، ویژگی‌های زیر روی نمونه‌های پودر سیر اندازه‌گیری شد.

جرم حجمی: جرم حجمی ظاهری پودر با اندازه‌گیری نسبت وزن به حجم به دست آمد. برای این منظور استوانه‌ای با قطر ۱/۵ و ارتفاع ۱۵/۸ سانتی‌متر و وزن ۴۴/۳۴ گرم با پودر

مطالعه شده است (Moriera *et al.*, 1986; Kim *et al.*, 1992; Jebson & Youzhang, 1994; Pezzutti & Crapiste, 1997; Sharma & Prasad, 2002; Bayat, 2004; Abano *et al.*, 2011; Lopez- Ortiz, 2013) ولی پودر سیر در دماهای پایین‌تر خشک کردن از رنگ و ویژگی‌های حسی بهتری برخوردار است و افت ترکیب‌های عطر و طعم دهنده آن نیز کمتر است (Moriera *et al.*, 1986 & Bayat, 2004). افزون بر این موارد، کیفیت محصولات خشک به ویژگی‌های ساختمانی آنها مانند حجم مخصوص، دانسیته و تخلخل، ویژگی‌های حرارتی از جمله حالت‌های شیشه‌ای، بلوری و الاستیکی و خواص جذب رطوبت و ظرفیت جذب آن بستگی دارد (Krokida & Maroulis, 2000) که در این مطالعه برخی از آنها روی پودر سیر بررسی شده است.

تغییرات ساختار ورقه‌های سیر در مدت خشک کردن در سه شرایط دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس نشان داد که در طول مدت ۶ ساعت خشک کردن و همزمان با کاهش رطوبت ورقه‌ها، جرم حجمی ظاهری افزایش و تخلخل کاهش یافت. دمای انتقال شیشه‌ای نیز با افزایش دمای خشک کردن افزایش نشان داد (Lopez-Ortiz *et al.*, 2013).

گرمای ویژه پودر سیر خشک شده به روش انجمادی با روش DSC و در محدوده دمایی ۱۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس با افزایش رطوبت پودر سیر از ۱۷ به ۸۷ درصد به صورت معنی‌دار افزایش یافت ولی با افزایش دما به مقدار جزئی افزایش نشان داد (Kramkowski, *et al.*, 2001b). دمای انتقال شیشه‌ای با همین رطوبت‌ها، در محدوده‌ای از ۲۰- تا ۲۶- درجه سلسیوس قرار داشت. مقدار رطوبت بحرانی خشک کردن ۲۶ درصد بود که شروع مرحله خشک کردن اجباری را نشان داد (Kramkowski *et al.*, 2001a). در مطالعه دیگری برای تعیین دمای انتقال شیشه‌ای پودر سیر خشک شده به روش انجمادی بیشترین غلظت در شرایط انجماد در رطوبت ۸۲ درصد به دست آمد که در این حالت دمای ذوب ۳۸/۶- درجه سلسیوس و دمای انتقال شیشه‌ای ۲۹/۳- درجه سلسیوس گزارش شد (Rahman *et al.*, 2005).

افزون بر ویژگی‌های حرارتی، با مطالعه همدماهای جذب می‌توان تغییرات بالقوه در پایداری محصولات مختلف غذایی را پیش‌بینی کرد. همدمای جذب به طور معمول به روش‌های استاتیکی و دینامیکی اندازه‌گیری می‌شود و روش استاتیکی به دلیل آسان و ارزان بودن و قابلیت کاربرد آن برای بسیاری از مواد، در مطالعات بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rahman & Al-Belushi, 2006). با اندازه‌گیری فعالیت آبی ویژگی‌های بافتی مواد خشک مانند دمای انتقال شیشه‌ای نیز قابل

(± 24 درجه سلسیوس) قرار گرفتند (Nyqvist, 1983). نمونه-های پودر سیر پس از یک هفته روزانه وزن شدند و پس از ۱۰ تا ۱۴ روز و رسیدن به وزن ثابت و نقطه تعادل رطوبتی از ظروف در بسته خارج شدند. بلافاصله پس از خروج وزن آنها با ترازوی Sartorius (A120S) ساخت آلمان با دقت ± 0.001 اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت وزن مشخصی از نمونه‌ها درون آون (Carbolit, NR60F) با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار گرفت و رطوبت نمونه‌های پودر به روش AOAC (1980) تعیین شد. ویژگی‌های حرارتی هر یک از آنها و نیز نمونه‌های پودر سیری که پس از خشک شدن در ظروف شیشه‌ای در بسته در شرایط دمای محیط قرار داشت (پودر شاهد) به روش زیر مورد ارزیابی قرار گرفت.

ویژگی‌های حرارتی پودر سیر با روش گرماسنجی پویشی تفاضلی

دمای انتقال شیشه‌ای و ظرفیت گرمایی ویژه پودر سیر با رطوبت‌های مختلف با استفاده از دستگاه گرماسنجی پویشی تفاضلی یا DSC (Mettler-toledo) ساخت سوییس اندازه‌گیری شد. ظروف مخصوص DSC از جنس آلومینیوم با ۳ تا ۶ میلی‌گرم از هر یک از پودر سیرها به صورت جداگانه پر و درب بندی شدند و در کنار ظرف خالی به عنوان استاندارد در دامنه حرارتی ۳۰- تا ۱۰۰ درجه سلسیوس و با نرخ $10^\circ \text{C}/\text{min}$ حرارت داده شدند. جریان گرمایی نرمال شده به عنوان تابعی از دمای نمونه روی دمانگاشت‌ها به دست آمد. دمای انتقال شیشه‌ای با تغییر پله‌ای در جریان گرمایی نرمال شده روی دمانگاشت‌ها مشخص شد. دمای ابتدایی، میانی و پایانی انتقال شیشه‌ای و تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه در نمونه‌های به دست آمده با نرم افزار STAR[®] محاسبه شد. دمای میانی به عنوان دمای انتقال شیشه‌ای در نظر گرفته شد (Bhandari & Howes, 1999).

تجزیه آماری داده‌ها

داده‌های به دست آمده در هر روش خشک کردن در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار با نرم افزار SPSS 16 تجزیه و تحلیل آماری و میانگین کلیه داده‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر مقایسه شد. رابطه رگرسیونی بین درصد رطوبت نمونه‌ها با خواص حرارتی آنها نیز تعیین شد و برای رسم شکل‌ها از نرم افزار Excel استفاده شد.

سیر به طور کامل پر شد و مازاد پودر با کشیدن خطکش بر دهانه استوانه برداشته شد. وزن پودر درون استوانه به وسیله ترازوی Sartorius مدل E1200S ساخت آلمان با دقت ± 0.001 اندازه‌گیری شد (Rodriguez Ramirez *et al.*, 2012). جرم حجمی با محاسبه نسبت وزن پودر به حجم استوانه (حجم استوانه با فرمول $\pi r^2 h$ ، محاسبه شد که در آن r شعاع و h ارتفاع استوانه است) اندازه‌گیری شد.

رنگ: رنگ پودرها با دستگاه رنگ سنج (Konica Minolta CR-400) ساخت ژاپن و با اندازه‌گیری مولفه‌های a^* ، b^* و L^* اندازه‌گیری و تغییرات رنگ پودرها پس از خشک کردن با شاخص کروما ($C = \sqrt{a^2 + b^2}$) و زاویه هیو ($\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$) از روی مولفه‌های رنگ محاسبه شد. شاخص کروما مقدار اشباع شدگی و شدت رنگ را نشان می‌دهد. زاویه هیو نیز در ارزیابی رنگ میوه‌ها و سبزی‌ها استفاده می‌شود که در آن زاویه ۰ و ۳۶۰ درجه نشان دهنده رنگ قرمز و زاویه‌های ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه به ترتیب بیانگر رنگ زرد، سبز و آبی است (Dadali *et al.*, 2007).

ترکیب‌های عطر و طعم دهنده: مقدار پیرووات کل (Anthon & Barrett, 2003) و غیر آنزیمی (Bacon *et al.*, 1999) به عنوان شاخص ترکیب‌های عطر و طعم دهنده اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری با معرف ۲ و ۴- دی نیترو فنیل هیدرازین 0.25 گرم بر لیتر در اسید کلریدریک ۱ مولار و در حضور محلول‌های استاندارد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ میکرومول بر میلی‌لیتر از پیرووات سدیم در طول موج ۵۱۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر (Pharmacia, Novaspec II) انجام شد. پیرووات آنزیمی از تفاضل پیرووات کل و غیر آنزیمی محاسبه شد.

خواص جذب آب

برای تعیین مقدار رطوبت تعادلی پودر سیر در مقادیر مختلف فعالیت آبی به روش استاتیک، چهار تا پنج گرم از پودر سیرها درون جعبه‌های پلاستیکی غیر قابل نفوذ به رطوبت حاوی پودر کلرید کلسیم و محلول نمک‌های اشباع شامل کلرید لیتیم^۱، استات پتاسیم^۲، کلرید منیزیم^۳، نیترات کلسیم^۴ و نمک طعام با فعالیت آبی به ترتیب صفر، 0.11 ، 0.22 ، 0.33 ، 0.55 و 0.73 درصد و آب با فعالیت آبی 0.95 در دمای اتاق (دمای

1. LiCl
2. CH₃COOK
3. MgCl₂. 6H₂O
4. Ca(NO₃)₂. 4H₂O

نتایج و بحث

مقایسه برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودر سیر با دو روش خشک کردن

مقایسه پودر سیر هر دو روش خشک کردن نشان داد (جدول ۱) که مقدار پیرووات کل، غیرآنزیمی و آنزیمی پودر سیر خشک شده در روش انجمادی به صورت معنی‌داری بیش از نمونه دیگر بود. تشکیل اسید پیروویک در سیر واکنش بین آنزیم آلکیل، سیستئین سولفوکسید لیاز^۱ (آلیناز) و پیش ماده‌های عطر و طعم دهنده را نشان می‌دهد (Whitaker, 1976). در طول مدت خشک کردن هر چه دمای فرآیند بالاتر باشد به دلیل غیرفعال شدن جزیی آنزیم آلیناز واکنش آنزیمی و غیرآنزیمی پیش طعم‌های سیر کاهش و مقدار ترکیب‌های ناشی از تجزیه آن از جمله اسید پیروویک نیز کاهش می‌یابد (Pezzutti & Crapiste, 1997). بیشتر بودن مقدار پیرووات در پودر سیرهای خشک شده به روش انجمادی نشان داد که اثرات تخریبی گرما بر آنزیم آلیناز در این روش کمتر از خشک کردن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس بود.

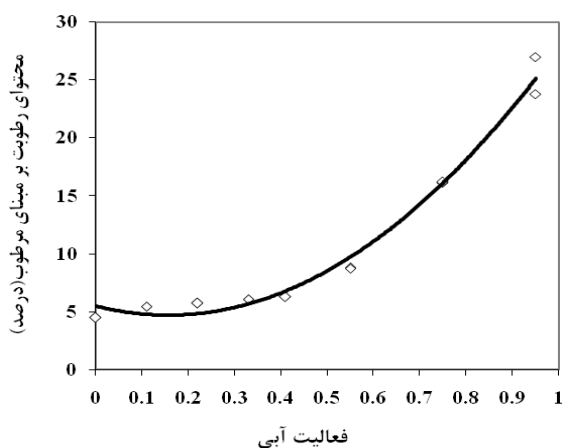
جرم حجمی در پودر سیر خشک شده به روش انجمادی نیز کمتر از روش خشک کردن با جریان هوای گرم بود (جدول ۱)، زیرا در روش انجمادی بافت ماده غذایی کمترین تغییر را از نظر چروکیدگی و سخت شدن سطح ماده غذایی متحمل شد و محصول نیز بافت متخلخلی پیدا کرد (Fellows, 1990)، در نتیجه جرم حجمی آن نیز کمتر شد. افزایش جرم حجمی در پودر سیر، ناشی از کاهش تخلخل در آن بود (Lopez Ortiz et al., 2013).

1. Alkyl cystein sulfoxide lyase

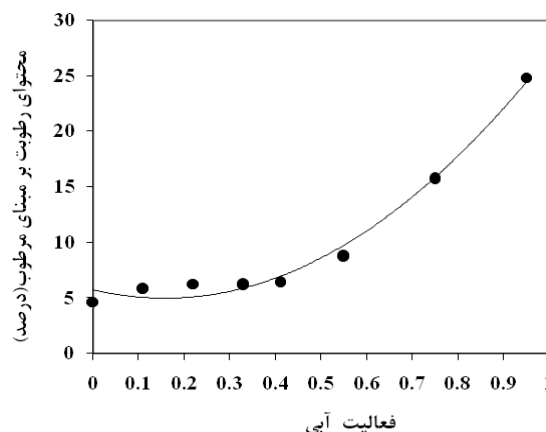
برای بررسی رنگ پودر سیر مشابه مطالعه Abano et al., 2011 افزون بر مولفه‌های رنگ شاخص‌های کروما و زاویه هیو محاسبه شد. در پودر سیر انجمادی مولفه روشنایی ($L=93/3$) به صورت معنی‌داری بیشتر و مولفه زردی ($b=11/32$) و شاخص‌های کروما و زاویه هیو به صورت معنی‌داری کمتر از پودر خشک شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس بود (جدول ۱). علت آن دمای پایین خشک کردن در روش انجمادی بود که تغییرات رنگ ناشی از واکنش‌های آنزیمی و غیرآنزیمی (Fellows, 1990) را کاهش داد.

منحنی‌های جذب همدمای پودر سیرهای خشک شده به روش انجمادی و جریان هوای گرم

منحنی‌های همدمای جذب رطوبت پودر سیر در مقایسه با بسیاری از مواد غذایی که اس شکل هستند، شیب ملایمی داشت (شکل‌های ۱ و ۲). هر دو نمونه پودر سیر منحنی‌های همدمای مشابهی را در محدوده رطوبت نسبی‌های بررسی شده نشان دادند. مقدار رطوبت تعادلی در فعالیتهای آبی پایین (کمتر از ۰/۴)، به آرامی افزایش داشت و شیب منحنی ملایم بود. در فعالیت آبی بالاتر، رطوبت به سرعت به وسیله پودر جذب شد زیرا ۷۵ تا ۷۷ درصد پودر سیر را کربوهیدرات‌ها تشکیل می‌دهد که به طور عمده از قندهای احیاکننده و کل یعنی قندهای آزاد و پلی‌ساکاریدها تشکیل شده‌اند و جذب رطوبت بودن این ترکیب‌ها سبب افزایش شیب منحنی همدمای شد (Pezzutti & Crapiste, 1997; Rahman & Al-Belushi, 2006). بنابراین در شرایط فعالیت آبی کمتر از ۰/۴ درصد جذب رطوبت پودر سیر ناچیز بود.



شکل ۲- منحنی‌های جذب همدمای پودر سیر خشک شده با روش انجمادی



شکل ۱- منحنی‌های جذب همدمای پودر سیر خشک شده با جریان هوای گرم

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پودر سیر سفید خشک شده با دو روش انجمادی و جریان هوای گرم

شاخص‌های رنگ	مولفه‌های رنگ			جرم حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)		پیرووات (میکرومول بر گرم وزن خشک)		محتوای رطوبت بر مبنای مرطوب (درصد)		روش خشک کردن
	زاویه هیو (درجه)	کروما	L	a	b	آنزیمی	غیر آنزیمی	آنزیمی	غیر آنزیمی	
انجمادی	۸۰/۴ b	۱۱/۵b	۹۳/۳±۰/۳ a	-۱/۹±۰/۱ a	۱۱/۳±۰/۰۵ b	۶۴۸/۰±۱ b	۱۵۵/۲±۲/۵ a	۵/۱±۰/۱ a	۷/۰±۰/۱ a	
جریان هوای گرم	۸۶/۸ a	۱۷/۹a	۸۵/۳±۰/۳ b	-۰/۹۹±۰/۱ b	۱۷/۹±۰/۰۱ a	۷۳۵/۳±۰/۶ a	۱۴۶/۰±۳/۳ b	۳/۵±۰/۸ b	۷/۷±۰/۸ a	

کلیه اعداد میانگین سه اندازه‌گیری است. حروف غیر مشابه نشان دهنده اختلاف بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۵٪ است.

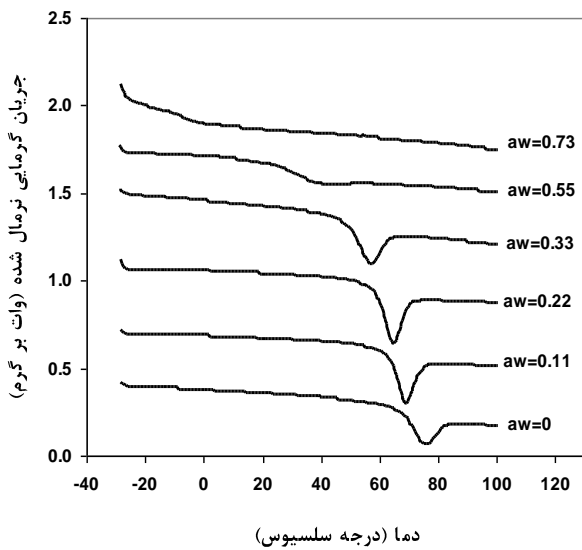
(2002) پودر سیر با محتوای رطوبت کمتر از ۶/۵ درصد بر مبنای مرطوب دمای انتقال شیشه‌ای بالایی داشت به طوری که دمای انتقال شیشه‌ای برای پودر سیر خشک شده با روش انجمادی بین ۴۹ تا ۷۳ درجه سلسیوس و برای پودر سیر خشک شده با جریان هوای گرم بین ۵۱ تا ۷۱ درجه سلسیوس (جدول‌های ۲ و ۳) بود. با افزایش فعالیت آبی محیط به بیش از ۰/۵۵، دمای انتقال شیشه‌ای پودر سیر به کمتر از دمای محیط (۲۵ درجه سلسیوس) کاهش یافت، بنابراین در صورت نگهداری پودر در محیطی با بیش از ۰/۵۵ فعالیت آبی، باید دمای نگهداری را به کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای کاهش داد یا از بسته‌بندی‌های مناسب استفاده نمود. *Kramkowski et al., 2001a* نیز برای بازسازی پودر سیر با افزودن آب به پودر محتوای رطوبت آنها را بین ۱۷ تا ۸۶ درصد بر مبنای مرطوب تنظیم کردند و دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌ها را در محدوده‌ای از ۲۰- تا ۲۶- درجه سلسیوس گزارش دادند که کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای در این گزارش بود ولی در این گزارش محتوای رطوبت هر دو نمونه با جذب رطوبت از محیط بین ۴/۵ تا ۱۶/۲ درصد بر مبنای مرطوب تنظیم شد. *Rahman et al., 2005* نیز دمای انتقال شیشه‌ای پودر سیر خشک شده به روش انجمادی را در محتوای رطوبت ۸۲ درصد، ۳۸/۶- درجه سلسیوس و *Lopez-Ortiz et al., 2013* دمای انتقال شیشه‌ای پودر سیر خشک شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس را ۶۱/۴ درجه سلسیوس گزارش دادند که مشابه دمای انتقال شیشه‌ای پودر خشک شده با جریان هوای گرم و با محتوای رطوبتی ۶/۳ درصد (جدول ۳) این مطالعه بود. رابطه رگرسیونی بین درصد رطوبت پودرها و دمای انتقال شیشه‌ای، نشان دهنده رابطه معکوس بین محتوای رطوبت و دمای انتقال شیشه‌ای آنها است (شکل ۵).

دمای انتقال شیشه‌ای در پودر سیر خشک شده به روش انجمادی با محتوای رطوبت ۷/۰ درصد، ۵۰/۴ درجه سلسیوس بود. دمای انتقال شیشه‌ای در پودر سیر خشک شده با جریان هوای گرم و با رطوبت ۷/۷ درصد، ۴۴/۵ درجه سلسیوس شد که کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای در پودر سیر انجمادی بود. هر

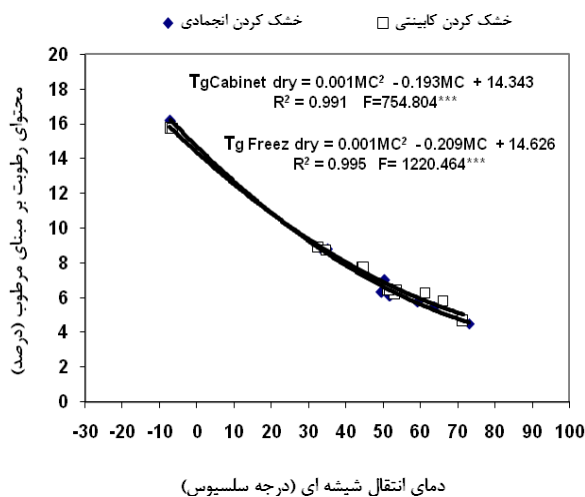
ویژگی‌های حرارتی پودر سیر

دمانگاشت‌های پودر سیر خشک شده با روش‌های انجمادی (شکل ۳) و جریان هوای گرم (شکل ۴) نشان داد که در رطوبت‌های مختلف طی گرمادهی نمونه‌ها، پدیده گرماگیر مشاهده شد. این منحنی‌ها تغییر از حالت شیشه‌ای به حالت لاستیکی را در پودر سیر نشان دادند. بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای، ویسکوزیته پودر به شدت کاهش پیدا می‌کند و حالت روان‌تری دارد و در پایین‌تر از این دما، ماده حالت شیشه‌ای و بی شکل است. وزن ملکولی مواد تشکیل دهنده و پیچیدگی ساختمان آنها در ایجاد این حالت‌ها اثرگذار است (*Overney et al., 2000*)

دمای انتقال شیشه‌ای با افزایش محتوای رطوبت نمونه‌ها کاهش نشان داد، به طوری که در محتوای رطوبتی ۱۶/۲ درصد بر مبنای مرطوب، دمای انتقال شیشه‌ای با ۷/۲- درجه سلسیوس برای پودر سیر انجمادی (جدول ۲) و ۶/۹- درجه سلسیوس برای پودر خشک شده با جریان هوای گرم (جدول ۳)، کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند. در هر دو روش خشک کردن دمای انتقال شیشه‌ای (جدول‌های ۲ و ۳) با افزایش رطوبت پودرها به علت اثر روان‌کنندگی^۱ آب روی قسمت جاذب رطوبت نمونه کاهش یافت زیرا وجود ترکیباتی مانند قندهای کل و احیاکننده سبب کاهش دمای انتقال شیشه‌ای شد (*Telis & Sobral, 2002*). در این مطالعه دمای انتقال شیشه‌ای برای پودرها با محتوای رطوبت ۲۵ درصد بر مبنای مرطوب (فعالیت آبی ۰/۹۵) به دلیل محدودیت دستگاه و پایین بودن دمای انتقال شیشه‌ای در آن قابل اندازه‌گیری نبود. نمونه‌های با محتوای رطوبت بالا دمای انتقال شیشه‌ای پایینی داشتند. برای مثال نمونه‌های گوجه فرنگی خشک که در محیطی با فعالیت آبی ۰/۸ قرار گرفتند، دمای انتقال شیشه‌ای آنها ۵۹- درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد (*Telis & Sobral, 2002*).



شکل ۴- دمانگاشت‌های پودر سیر خشک شده با جریان هوای گرم (برای مشاهده بهتر دمانگاشت‌ها در محور عمودی جابه جا شده‌اند)



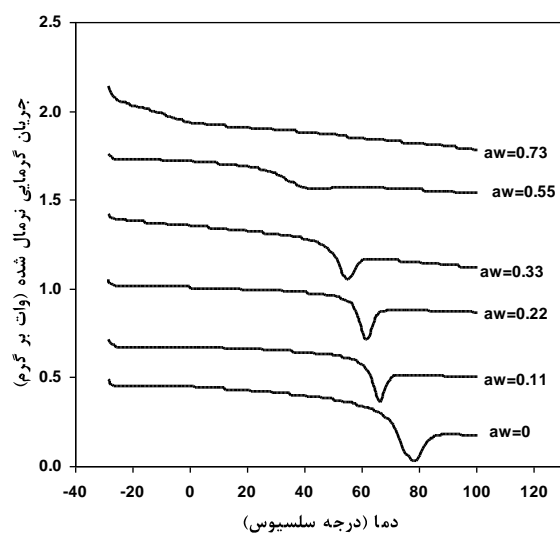
شکل ۵- رابطه رگرسیونی بین محتوای رطوبت و دمای انتقال شیشه‌ای (M: محتوای رطوبت و * *: معنی دار بودن در سطح احتمال ۱٪)

نتیجه گیری

- ۱- پودر سیر انجمادی از نظر ترکیب‌های عطر و طعم دهنده و رنگ از کیفیت مطلوب‌تری نسبت به پودر سیر خشک شده با جریان هوای گرم دارد.
- ۲- رطوبت نسبی‌های بالاتر از ۵۵ درصد به همراه دماهای بیشتر از ۳۵ درجه سلسیوس، شرایطی بحرانی برای نگهداری پودر سیر ایجاد می‌کند که در آن احتمال جذب رطوبت و کلوخه شدن وجود دارد. بدیهی است که با بسته بندی مناسب می‌توان آن را کنترل کرد.

چه دمای خشک کردن سیر بالاتر باشد، دمای انتقال شیشه‌ای آن کمتر است که علت آن تغییر در ساختمان و ترتیب سلولی و حالت ماده غذایی است (Lopez-Ortiz *et al.*, 2011). چنین پدیده‌ای را Telis & Sobral, 2002 در مورد گوجه فرنگی خشک نیز مشاهده کردند.

تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه در محصولات گیاهی پدیده پیچیده‌ای است زیرا به محتوای رطوبت، دما و ترکیب‌های تشکیل دهنده آن بستگی دارد که مهم‌ترین آنها محتوای رطوبت و دمای محصول است (Kramkowski, *et al.*, 2001b). در این مطالعه با افزایش دمای انتقال شیشه‌ای، ظرفیت گرمایی ویژه برای پودر سیر انجمادی ۱/۳ و برای پودر سیر با جریان هوای گرم ۰/۶ ژول بر گرم درجه کلون افزایش یافت. Kramkowski, *et al.*, 2001b نیز برای پودر سیر انجمادی افزایش حدود ۱/۵ ژول بر گرم درجه کلون را با افزایش دما از ۲۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس مشاهده کردند. در این گزارش با افزایش فعالیت آبی محیط نگهداری و افزایش محتوای رطوبت نمونه‌های پودر سیر از ۴/۵ تا ۱۶ درصد بر مبنای مرطوب، ظرفیت گرمایی ویژه کاهش جزئی داشت ولی اختلاف بین فعالیت‌های آبی ۰/۱۱ تا ۰/۴ معنی‌داری نبود. Kramkowski, *et al.*, 2001b تا محتوای رطوبت کمتر از ۳۰ درصد بر مبنای مرطوب تغییری در ظرفیت گرمایی ویژه پودر سیر مشاهده نکردند ولی با افزایش رطوبت به بیش از این مقدار، افزایش تدریجی ظرفیت گرمایی ویژه را نشان دادند.



شکل ۳- دمانگاشت‌های پودر سیر خشک شده در شرایط خشک کردن انجمادی

(برای مشاهده بهتر دمانگاشت‌ها در محور عمودی جابه جا شده‌اند)

جدول ۲- مقایسه میانگین محتوای رطوبت و ویژگی های حرارتی پودر سیر خشک شده به روش انجمادی در محیط با فعالیت آبی مختلف

محتوای رطوبت بر مبنای مرطوب (درصد)	ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر گرم درجه کلوین)	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس)			فعالیت آبی محیط نگهداری
		پایانی	میانی	ابتدایی	
۴/۵ h	۱/۸	۷۶/۴	۷۳/۰	۶۹/۰	۰
۵/۵g	۱/۴b	۶۵/۸	۶۳/۸	۶۱/۶	۰/۱۱
۵/۷f	۱/۵b	۶۱/۲	۵۹/۳	۵۶/۷	۰/۲۲
۶/۱e	۱/۴b	۵۴/۵	۵۱/۷	۴۸/۵	۰/۳۳
۶/۳d	۱/۴b	۵۲/۵	۴۹/۴	۴۵/۶	۰/۴۰
۸/۸b	۰/۸c	۴۰/۶	۳۴/۲	۲۵/۰	۰/۵۵
۱۶/۲a	۰/۵e	-۰/۸	-۷/۲	-۱۶/۹	۰/۷۳
۷/۰c	۰/۷d	۵۴/۹	۵۰/۴	۴۴/۷	شاهد

حروف غیر مشابه نشان دهنده اختلاف بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۵٪ است.

جدول ۳- مقایسه میانگین محتوای رطوبت و ویژگی‌های حرارتی پودر سیر خشک شده با جریان هوای گرم در محیط با فعالیت آبی مختلف

محتوای رطوبت بر مبنای مرطوب (درصد)	ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر گرم درجه کلوین)	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس)			فعالیت آبی محیط نگهداری
		پایانی	میانی	ابتدایی	
۴/۶g	۱/۲d	۷۴/۵	۷۱/۴	۶۸/۰	۰
۵/۸f	۱/۹b	۶۸/۳	۶۵/۹	۶۳/۵	۰/۱۱
۶/۳e	۲/۱a	۶۳/۹	۶۱/۲	۵۸/۷	۰/۲۲
۶/۳e	۱/۶c	۵۶/۶	۵۳/۴	۴۹/۰	۰/۳۳
۶/۴d	۱/۶c	۵۴/۹	۵۱/۵	۴۶/۸	۰/۴۰
۸/۸b	۰/۹f	۴۰/۷	۳۳/۶	۲۵/۱	۰/۵۵
۱۵/۷a	۰/۶g	۳/۵	-۶/۹	-۱۸/۴	۰/۷۳
۷/۷c	۱/۱e	۵۰/۷	۴۴/۵	۳۶/۴	شاهد

حروف غیر مشابه نشان دهنده اختلاف بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۵٪ است.

REFERENCES

- Abano, E.E., Ma, H. & Qu, W. (2011) Modeling pre-treatments effect on drying kinetics of garlic (*Allium sativum* L.) slices in a convective hot air dryer. *African Journal of Food Science*, 5(7), 425-435.
- Anthon, G.E. & Barrett, D.M. (2003) Modified method for determination of pyruvic acid with dinitrophenylhydrazine in the assessment of onion pungency. *Journal of Science Food and Agriculture*, 83, 1210-1213.
- AOAC. (1980) Official methods of analysis (11th ed.). Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.
- Bacon, J.R., Moates, G.K. Ng, A. Rhodes, M.J.C. Smith A.C. & Waldron. K.W. (1999) Quantitative analysis of flavor precursors and pyruvate levels in different tissues and cultivars of onion (*Allium cepa*). *Food Chemistry*, 64, 257-261.
- Bayat, F. (2004) Effect of storage duration and conditions on the weight loss and quality of the garlic populations of Hamadan province. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 5 (19), 49-62. (In Farsi)
- Bhandari, B.R., Howes, T. (1999) Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40, 71-79.
- Dadali, G., Demirhan, E., and Ozbek, B. (2007) Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying. *Drying Technology*, 25, 1713-1723.
- Fellows, P.J. (1990) Food processing technology principles and practice (1st Ed.) England: Ellis Horwood.

- Garcia, L.H.; Pilosof, A.M.R. (2000) Kinetics of water sorption in okara and its relationship to the glass transition temperature. *Drying Technology*, 18 (9), 2105–2116.
- Jakubczyk, E., Ostrowska-Ligeza, E. & Gondek, E. (2010) Moisture sorption characteristics and glass transition temperature of apple puree powder. *International Journal of Food Science & Technology*, 45 (12), 2515-2523.
- Jebson, R.S. & youzhang, R.J. (1994) Studies on the drying behaviour of garlic and a novel technology to produce high quality garlic at a low cost. *Food and Bioproducts processing*, 72(2), 73-8.
- Kim, H.K., Jo, K.S., Kwon, D.Y. & Park, M.H. (1992) Effects of drying temperature and sulfiting on the qualities of dried garlic slices. *Journal of the Korean Agricultural Chemical Society*, 35(1), 6-9.
- Kramkowski, R., Kaminski, E. & Serowik, M. (2001a) Characterisation of garlic freeze drying with the use of differential scanning calorimetry. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 4(2), Retrieved May 9, 2011, from <http://www.ejpau.media.pl/volume4/issue2/engineering/art-05.html>.
- Kramkowski, R., Kaminski, E. and Serowik, M. (2001b). Effect of moisture and temperature of garlic on its specific heat. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*. 4(2), Retrieved May 9, 2011, from <http://www.ejpau.media.pl/volume4/issue2/engineering/art-06.html>.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. & Marinos-Kouris, D. (2000) Drying related properties of apple. *Drying Technology*. 18(6), 1251–67.
- Lopez Ortiz, A., Rodriguez Ramirez, J. & Mendez Lagunas, L. (2013) Effects of drying air temperature on the structural properties of garlic evaluated during drying. *International Journal of Food Properties*, 16, 1516-1529.
- Madamba, P.S., Driscoll, R.H. & Buckle, K.A. (1993). Moisture content determination of garlic by convection oven method. *ASEAN Food Journal*, 8(2), 81-3.
- Mitchell, J.R. (1998) Water and food macromolecules. In S.E. Hill, D.A. Ledward & J.R. Mitchell (Ed.), *Functional properties of food macromolecules*. (pp. 55-76). Aspen publishers, Gaithersburg.
- Moreira, H.T., Villegas, M.I. & Cabrera, R.L. (1986) Effect of drying temperature on the quality of dehydrated garlic, Evaluation of odour and pungency. *Technologia Quimica*, 7(4), 35-42.
- Nicula. R. (2002) Introducing to differential scanning calorimetry. Retrieved September 23, 2014, Rostok University, From <http://wwwswt.informatik.uni-rostock.de/englisch/projekte/Physik2000/ExperimentII/ta2web001.pdf>.
- Nyqvist, H. (1983) Saturated salt solutions for maintaining specified relative humidity. *International Journal of Pharmaceutical Technology and Product Manufacture*, 4(2), 47-48.
- Overney, R. M., Buenviaje, C., Luginbuhl, R. & Dinelli, F. (2000) Glass and structural transitions measured at polymer surfaces on the nanoscale. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 59, 205-225.
- Pezzutti, A. & Crapiste, G.H. (1997) Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic. *Journal of Food Engineering*, 31(1), 113-23.
- Rahman, M. S., Sablani, S. S., Al-Habsi, N., Al-Maskari, S. & Al-Belushi, R. (2005) State Diagram of Freeze-dried Garlic Powder by Differential Scanning Calorimetry and Cooling Curve Methods. *Journal of Food Science*, 70(2), 135–141.
- Rahman, M. S., & Al-Belushi, R. H. (2006) Dynamic isopiestic method (DIM): measuring moisture sorption isotherm of freeze dried garlic powder and other potential uses of DIM. *International Journal of Food Properties*, 9, 421–437.
- Rodriguez Ramirez, J., Mendez Lagunas, L., Lopez Ortiz, A. & Sandoval Torres, s. (2012) True density and apparent density during the drying process for vegetables and fruits: a review. *Journal of Food Science*, 77(12), 145-154.
- Roos, Y. (1995) Characterization of food polymers using state diagrams. *Journal of Food Engineering*, 24, 339-360.
- Sablani, S.S., Shrestha, A.K. & Bhandari, B.R. (2008) A new method of producing date powder granules: Physicochemical characteristics of powder. *Journal of Food Science*, 87 (3), 416-421.
- Sharma, G.P. & Prasad, S. (2002) Comparison of convective and microwave-convective drying of garlic: kinetics and energy consumption. *Journal of Food Science and Technology*, 39(6), 603-608.
- Shrestha, A.K., Ua-Arak, T., Adhikari, B.P., Howes, T. & Bhandari, B.R. (2007) Glass transition behavior of spray dried orange juice powder measured by differential scanning calorimetry (DSC) and thermal mechanical compression test (TMCT). *International Journal of Food Properties*, 10, 661-673.
- Telis. V.R.N. & Sobral, P.J.A. (2002) Glass transitions for freeze-dried and air-dried tomato. *Food Research International*, 35, 435–443.
- Whitaker, J.R. (1976) Development of flavor, odor and pungency in onion and garlic. *Advances in Food Research*, 22, 37.