



بررسی ویژگی‌های کلروفیل استخراج شده از ضایعات سبزیجات و رنگ خوراکی پایدار به دست آمده از آن
هادی مددی باروق^۱، اکرم شریفی^{۱*}

^۱ گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله :	امروزه از رنگدانه‌های طبیعی به صورت گسترده‌ای در صنایع غذایی، آرایشی و بهداشتی استفاده می‌گردد و طی سال‌های اخیر تحقیقات متعددی پیرامون روش‌های استخراج و بررسی خواص رنگدانه‌های طبیعی انجام یافته است. هدف از این تحقیق بهینه‌سازی استخراج کلروفیل از ضایعات سبزیجات و تولید رنگ خوراکی پایدار از آن با استفاده از خشک‌کن پاششی، انجمادی و هوای داغ بود. بعد از استخراج عصاره از ضایعات سبزیجات، مقدار کلروفیل a و b، مقدار ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی اکسیدانی اندازه گیری شد. سپس با سه روش خشک کردن عصاره به پودر تبدیل شد. فعالیت آبی، حلالیت، دانسیته توده، دانسیته ضربه، فعالیت آنتی اکسیدانی، ترکیبات فنولی کل و پارامترهای رنگی برای پودرهای تولید شده بررسی شد. نتایج نشان داد نمونه‌های خشک شده با خشک کن انجمادی مقدار کلروفیل a (۶۰۳ mg/g) و b (۸۵۲ mg/g)، فعالیت آنتی اکسیدانی (% ۸۲/۱۹) و ترکیبات فنولی کل (۳۴۷/۰۲ mgGL/ml) بالاتری داشتند. خشک کردن انجمادی روی خصوصیات فیزیکی پودر نیز تاثیر داشت. فعالیت آبی، حلالیت، دانسیته توده و دانسیته ضربه نمونه‌های خشک شده با خشک کن انجمادی به صورت معنی دار از نمونه های دیگر بالاتر بود. در بررسی پارامترهای رنگی نمونه‌های خشک شده با خشک کن پاششی امتیاز بالاتری کسب کردند. نتایج این تحقیق نشان داد با خشک کردن انجمادی میتوان پودری با خصوصیات فیزیکوشیمیایی مطلوب و مناسب برای کاربرد در مواد غذایی به عنوان رنگدانه تولید کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱	
تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶	
کلمات کلیدی:	
استخراج، کلروفیل، ضایعات سبزیجات، خشک‌کن پاششی، خشک‌کن انجمادی	
DOI: 10.48311/fsct.2026.116513.1001	
* مسئول مکاتبات:	
asharifi@iau.ac.ir	

۱- مقدمه

میوه‌ها و سبزیجات در بین محصولات زراعی بیشترین میزان مصرف را در سبب غذایی دارند. آنها حاوی مواد مغذی متنوعی از جمله ویتامین‌ها، املاح معدنی و مواد آنتی‌اکسیدانی بوده که برای سلامتی مفید هستند، و به صورت خام، حداقل فرآوری یا فرآوری شده مصرف می‌شوند. تولید و فرآوری میوه‌ها و سبزیجات با توجه به افزایش جمعیت و تغییر در عادات غذایی، بسیار افزایش یافته است. ضایعات و تلفات قابل توجه در صنایع فرآوری و مصرف تازه مشکل عمده تغذیه‌ای، اقتصادی و زیست محیطی است. سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد تخمین زده است که ضایعات و تلفات میوه‌ها و سبزیجات حدود ۶۰٪ از کل ضایعات است. فرآوری میوه‌ها و سبزیجات سبب تولید ضایعات قابل توجهی از محصولات جانبی می‌شود که حدود ۲۵٪ تا ۳۰٪ کل گروه مواد غذایی را تشکیل می‌دهند. ضایعات عمدتاً از دانه، پوسته، پوست و تفاله تشکیل شده‌اند و منابع بالقوه از ترکیبات زیست فعال مانند کاروتنوئیدها، کلروفیل، پلی فنل‌ها، فیبرهای رژیمی، ویتامین‌ها، آنزیم‌ها و روغن‌ها هستند [۱].

استفاده از رنگ‌های مصنوعی در صنایع غذایی کاربرد فراوانی دارد. با این حال، تمایل فزاینده‌ای برای جایگزینی آن‌ها با رنگ‌های با منشأ طبیعی به وجود آمده است. اثرات جانبی متعددی از قبیل اثرات آلرژیک، اثرات عصبی و رفتاری (مانند بیش‌فعالی) و هم‌چنین سمیت ناشی از مصرف رنگ‌های مصنوعی در طولانی مدت مشاهده شده است. این درحالی است که رنگ‌های مشتق شده از منابع طبیعی، علاوه بر این که دارای کیفیت، کارایی و ویژگی‌های حسی مناسبی هستند، دارای اثرات دارویی متعددی از قبیل اثرات ضد سرطانی، ضد التهابی، ضد کلسترول و دیابت نیز می‌باشند و بنابراین نقش مهمی در ارتقاء سلامتی انسان برعهده دارند [۲]. کلروفیل‌ها متداول‌ترین رنگدانه سبز طبیعی هستند که در گیاهان یافت می‌شوند. از آن جایی که کلروفیل یک بخش جدایی‌ناپذیر غذاهای گیاهی می‌باشد،

در طول تاریخ به عنوان یک جزء رژیم غذایی انسان بوده است [۳]. این رنگدانه طبیعی با استفاده از حلال‌های آلی از برخی از گیاهان سبز خوراکی مانند علف، یونجه، گزنه، اسفناج، برگ برخی از گیاهان مانند توت، شاتوت، چغندرقد و غیره استخراج می‌شود [۳]. بنابراین ماده اولیه لازم جهت استخراج این محصول گران‌قیمت، بسیار ارزان است. حساس بودن کلروفیل به عوامل مختلف باعث می‌شود پایداری کلروفیل کاهش یابد. در سال‌های اخیر از متالو-کلروفیل‌ها به عنوان جایگزین کلروفیل‌ها استفاده شده است که بعد از استخراج و جداسازی کلروفیل با جایگزینی Mg^{2+} دو یون H^+ با یون‌های فلزی که بیشتر کاتیون‌های دو ظرفیتی مانند Cu^{2+} و Zn^{2+} و Fe^{2+} هستند به کمپلکس متالوکلروفیل تبدیل می‌شوند که با توجه به بالا رفتن قدرت رنگ و ثبات بیشتر در برابر حرارت، اسیدهای رقیق و عوامل اکسیداتیو، استفاده آنها افزایش یافته است. این ترکیبات نه تنها به عنوان یک رنگ دهنده غذایی عمل می‌کنند، بلکه به عنوان یک ترکیب بالقوه زیست‌فعال، فعالیت‌های ضد جهش‌زایی، ضد سرطانی و آنتی‌اکسیدانی دارند [۴، ۵]. کلروفیل جهت رنگ کردن فراورده‌های لبنی، روغن‌های خوراکی، کیک، نوشیدنی‌ها، آب میوه، ژله‌ها، پاستا، فرمولاسیون غذای کودک، آدامس، شکر و محصولات قنادی و هم‌چنین در حفظ رنگ سبزی‌های منجمد و یا کنسرو شده کاربرد دارد. به دلیل اثرات سلامتی بخش کلروفیل، بسیاری از محصولات محتوی آن از قبیل مکمل‌ها و آب میوه‌های غذایی مورد استقبال قرار گرفته‌اند. تولیدکنندگان این محصولات مدعی هستند که تشابه شیمیایی بین کلروفیل و گروه پروستتیک (هم) هموگلوبین ممکن است مسئول محافظت بدن انسان در برابر چندین بیماری باشد. برخی از حقیقت‌های فعالیت آنتی‌اکسیدانی کلروفیل را تایید کردند که در نهایت پتانسیل پیشگیری از بیماری‌های مزمن را نیز به همراه خواهد داشت. هم‌چنین این ترکیب، مستعد فعالیت‌های ضد سرطانی در بدن انسان می‌باشد [۵].

سهولت استفاده به عنوان جزء افزودنی اشاره کرد [۱۱]. طی فرآیند خشک‌کن پاششی، هوای گرم با دمای ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در اتاقک خشک‌کن دمیده شده و با مایع ورودی که توسط دستگاه پودر کننده به صورت ذرات ریز در آمده، تماس می‌یابد. پودر خشک شده توسط هوا نهایتاً توسط سیکلون حمل شده و در آنجا ذرات ریز از جریان هوا جدا می‌گردند. به‌طور کلی سامانه خشک‌کن پاششی طوری طراحی می‌شود که از زمان ماند کوتاه و طولانی پودر در محفظه خشک‌کن اجتناب گردد [۱۲].

در این تحقیق استخراج کلروفیل و تولید پودر کلروفیل از ضایعات سبزیجات و سپس، بررسی ویژگی‌های فیزیکی و آنتی‌اکسیدانی پودر کلروفیل تولیدی انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات

مواد اولیه مورد استفاده در تحقیق شامل ضایعات سبزیجات و مواد شیمیایی مانند حلال‌ها (ان هگزان-اتانول)، استون، بافر ۴ و بافر ۷، ۲ و ۲ دی فیل ۱-۱ پیکریل هیدرازین و (از شرکت سیگما و مرک آلمان) بودند. تجهیزات استفاده شده در آزمون شامل: آون هوای داغ (JKA, RV10, آلمان)، دستگاه خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی (DORSA TECH, ایران)، دستگاه خشک‌کن انجمادی (زیست فرآیند تجهیز سهند SBPE، ایران)، اسپکتروفتومتر (Lambda 35 UV/VIS Spectrometer، آمریکا) بود.

۲-۲- روش‌ها

نمونه‌های ضایعات سبزیجات از واحد تولیدی سبزیجات بسته بندی شده با برند پینار در قزوین تهیه شد و پس از شستشو، در آون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت به مدت ۳۰ ساعت خشک شدند. نمونه‌های خشک شده با استفاده از آسیاب خانگی پودر شده و از الک با مش ۵۰ عبور داده شدند و تا زمان انجام آزمون، در شیشه‌های تیره در دمای اتاق نگهداری شدند. استون و اتانول با درجه آزمایشگاهی تهیه شدند. شرایط استخراج شامل نسبت

با توجه به کاربردهای متعدد رنگ خوراکی کلروفیل استخراج آن از گیاهان مورد توجه واقع شده است. برای تولید کلروفیل دو عامل مهم از جمله استفاده از گیاهان حاوی مقدار زیاد کلروفیل و روش استخراج کارآمد ضروری می‌باشد [۶]. جهت یافتن روش‌های استخراج دوست‌دار محیط زیست، کاهش مصرف حلال، کوتاه کردن زمان استخراج و افزایش بازده، فناوری‌های جدیدی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که از جمله روش استخراج، استفاده از فناوری‌های فراصوت، استخراج با حلال فوق بحرانی و هم چنین استخراج به کمک مایکروویو می‌باشد [۷]. از میان این روش‌ها، روش فراصوت به عنوان یک روش جایگزین کارآمد، ارزان قیمت و ساده نسبت به فناوری‌های استخراج متداول شناخته شده است که برای استخراج رنگدانه‌های گیاهان، ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدان‌ها به کار گرفته شده است [۸]. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای خشک کردن مواد مؤثره گیاهان دارویی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به خشک کردن انجمادی، خشک کردن در سایه و آفتاب، خشک کردن در آون و خشک‌کن پاششی اشاره کرد که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. انتخاب روش، مقدار دما و زمان مناسب خشک کردن با توجه به نوع ماده مؤثره متفاوت می‌باشد [۹]. به همین دلیل استفاده از روشی مناسب که سبب حفظ خواص فیزیکی و شیمیایی کلروفیل گردد، مورد نیاز است. خشک کردن انجمادی روشی کارا و توجیه پذیر جهت خشک کردن محصولات اقتصادی و فصلی می‌باشد. این روش جهت توسعه شیر، آب پنیر، تخم مرغ، قهوه و سایر نوشیدنی‌ها، محصولات فانتزی و عصاره و اسانس‌ها به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. محصولات تولیدی نه تنها از ویژگی‌های تغذیه‌ای ممتازی برخوردار هستند، بلکه به دلیل حفظ شرایط بهداشتی و ایمنی بالا، جایگاه مطلوبی جهت جلب رضایت مشتری به خود اختصاص داده‌اند [۱۰]. از جمله مزایای پودرهای تولیدی در فرآیند خشک‌کن انجمادی می‌توان به کاهش حجم و یا وزن محصول، سهولت در بسته‌بندی، جابه‌جایی آسان‌تر، افزایش زمان ماندگاری به دلیل پایداری فیزیکی بالا و همچنین

نمونه‌ها در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۵۴ نانومتر توسط

دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد [۱۳].

۲-۳-۲- اندازه‌گیری شاخص‌های رنگی

با استفاده از روش عکس‌برداری پردازش تصویر^۱ (version 1.42e, USA) سه پارامتر a^* ، b^* و L^* تعیین شد. معرف میزان روشنی نمونه و دامنه آن از صفر شاخص سیاه (خالص) تا ۱۰۰ سفید (خالص) متغیر است. شاخص a^* میزان نزدیکی رنگ نمونه به سبز و قرمز را نشان می‌دهد و دامنه آن از ۱۲۰- سبز (خالص) تا ۱۲۰+ قرمز (خالص) متغیر است. شاخص b^* میزان نزدیکی رنگ نمونه به آبی و زرد را نشان می‌دهد و دامنه آن از ۱۲۰- آبی (خالص) تا ۱۲۰+ زرد (خالص) متغیر است [۱۴].

۲-۳-۳- اندازه‌گیری بریکس و pH

اندازه‌گیری pH بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۴۹ انجام شد. بریکس نیز طبق استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۴۹ اندازه‌گیری شد [۱۵].

۲-۳-۴- تعیین فعالیت آنتی‌اکسیدانی

برای تعیین فعالیت آنتی‌اکسیدانی ابتدا محلول ۰/۰۰۶ درصد رادیکال آزاد DPPH در متانول تهیه شد. سپس به لوله‌های آزمایش دارای یک میلی‌لیتر محلول متانولی نمونه با غلظت‌های مختلف (بسته به قدرت مهارکنندگی رادیکال آزاد)، یک میلی‌لیتر از محلول فوق اضافه شد. لوله‌های آزمایش بعد از هم‌زدن به مدت یک ساعت در جای تاریک نگهداری شدند و سپس جذب آن در طول موج ۵۱۲ نانومتر در برابر شاهد قرائت گردید. درصد مهارکنندگی رادیکال آزاد طبق رابطه زیر محاسبه شد: [۱۶].

$100 \times \left[\frac{\text{جذب شاهد}}{\text{جذب نمونه}} - \text{جذب شاهد} \right] = \text{درصد}$

مهار رادیکال آزاد DPPH

حلال به ماده جامد (ابه ۴)، دمای استخراج (۳۰ درجه- سانتی‌گراد) در طی زمان (۱۰ دقیقه) بود. جهت بهینه‌سازی استخراج از حلال اتانول ۹۰٪ استفاده شد. همه آزمون‌های استخراج تا حد امکان در شرایط نور کم انجام شد. پروب دستگاه فراصوت داخل نمونه (یک سانتی‌متر بالاتر از کف سلول) قرار گرفت و تیمار فراصوت اعمال شد. باتوجه به این که طی فرایند اعمال فراصوت، دمای نمونه‌ها افزایش می‌یابد، جهت تنظیم دما از سیرکولاتور آب استفاده شد. نمونه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و دور ۸۰۰۰ rpm

برای مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شده و سپس مایع رویی جمع‌آوری شد. آزمون‌ها در دو تکرار انجام شدند [۱۳]. محلول کلروفیل استخراج شده به مدت ۴۵ دقیقه در محیط آزمایشگاهی روی همزن مغناطیسی مخلوط گردید و سپس با خشک‌کن پاششی (DORSA TECH، ایران) مجهز به محفظه خشک‌کن با طول ۱۵۰ سانتی‌متر و قطر ۸۰ سانتی‌متر با سرعت خوراک‌دهی ثابت در دمای ورودی ۱۵۰ درجه- سانتی‌گراد، خشک‌کن انجام‌دهی (مدل SPBE، ساخت ایران) (که در ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد در فریزر قرار داده شد؛ سپس توسط خشک‌کن انجام‌دهی به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد) و آون (در دمان ۶۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوا ۱ m/s و زمان ۲۶ ساعت) خشک گردید [۱۴].

۲-۳-۲- آزمون‌های عصاره کلروفیل استخراج شده

۲-۳-۱- تعیین مقدار کلروفیل a و b

تعیین مقدار کلروفیل a و b به روش Ahmadi و

همکاران (۲۰۲۲) برای عصاره و پودر تولیدی انجام شد.

نمونه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و دور ۸۰۰۰ rpm برای مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شده و سپس مایع رویی به دست آمده، با استفاده از استون ۸۰٪ رقیق شد و جذب

از نسبت جرم پودر به حجم اشغال شده در استوانه به دست آمد [۱۷].

$$P_b = m/v$$

در این رابطه m نشان‌دهنده جرم پودر بر حسب گرم، v حجم نمونه بر حسب میلی‌لیتر است.

۲-۴-۵- اندازه‌گیری دانسیته ضربه

برای به دست آوردن دانسیته ضربه، بعد از تعیین دانسیته توده، ضربات مداومی بر استوانه مدرج وارد شد تا زمانی که تغییرات حجم پودر در استوانه متوقف می‌شود. در نهایت نسبت جرم پودر به حجم محاسبه و دانسیته ضربه به دست آمد [۱۶].

۲-۴-۶- ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی

از پودر های تولیدی عصاره تهیه شد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی پودر های مذکور به روش انجام شده برای عصاره تعیین شد [۱۶، ۱۸].

۲-۴-۷- اندازه‌گیری ترکیبات فنولی کل

روش انجام شده برای عصاره جهت تعیین ترکیبات فنولی پودر تولیدی به کار گرفته شد [۱۶].

۲-۵- طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل داده های به دست آمده از آزمایشات انجام شده با حداقل سه تکرار، از نرم افزار آماری SPSS نسخه ۱۹ استفاده گردید. برای تعیین معنی‌دار بودن اختلاف بین میانگین های حاصل از روش آنالیز واریانس یک طرفه روش دانکن در سطح احتمال ۰.۵٪ استفاده شد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- نتایج آنالیز عصاره

نتایج آنالیز عصاره در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۳-۵- تعیین ترکیبات فنولی کل

برای اندازه‌گیری ترکیبات فنولی کل، ۱ گرم از پودر کلروفیل با ۲۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۶٪ در مدت ۵ ساعت در دمای اتاق همزده شد. پس از صاف کردن به نسبت یک به ده رقیق گردید. ۲۵۰ میکرولیتر از عصاره صاف شده با ۱ سی‌سی معرف فولین ۱۰ برابر رقیق شده و یک سی‌سی کربنات سدیم ۱۰٪ مخلوط گردید و بعد از ۱۵ دقیقه جذب آن در ۷۵۰ نانومتر در دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. جهت رسم منحنی استاندارد از اسید گالیک در غلظت‌های ۵۰ تا ۳۰۰ بر g ۱۰ اسید گالیک استفاده شد [۱۶].

۲-۴-۲- آزمون‌های پودر کلروفیل

۲-۴-۱- آزمون فعالیت آبی

جهت اندازه‌گیری فعالیت آبی پودر کلروفیل از دستگاه aw متر در دمای محیط (حدوداً ۳۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده گردید [۱۷].

۲-۴-۲- حلالیت پودر

یک گرم از پودر تهیه شده به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده شد و بر روی همزن مغناطیسی با دور ۶۰۰ به مدت ۵ دقیقه هم زده شد. سپس پودر پخش شده در آب در لوله‌های دستگاه سانتریفیوژ ریخته شد و با سرعت دور g ۴۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. مایع رویی جدا شده از لوله سانتریفیوژ در ظروف شیشه‌ای با وزن ثابت ریخته شد و در دمای ۱۰۵ درجه‌سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. درصد حلالیت پودر از تفاوت وزن ماده خشک اولیه و ثانویه محاسبه شد [۱۷].

۲-۴-۳- اندازه‌گیری شاخص های رنگی

پارامتر های رنگی عصاره خشک شده با استفاده از روش عکس‌برداری پردازش تصویر تعیین شد [۱۴].

۲-۴-۴- اندازه‌گیری دانسیته توده

مقدار ۲ گرم پودر در یک استوانه مدرج ۱۰ میلی‌لیتر به آرامی ریخته شد و استوانه کمی تکان داده شد تا سطح پودر داخل استوانه صاف شود. در نهایت دانسیته توده مطابق رابطه زیر

Table 1. Analysis results of chlorophyll extract.

Extract results		
1	brix	9
2	pH	2.6
3	chlorophyll a (mg / g)	6.38
4	Chlorophyll b (mg / g)	8.59
5	Antioxidant Activity (%)	45.71
6	Total polyphenolic contents (mg GA/mL)	75.844
7	a*	-9.579
8	b*	27.759
9	L*	35.896

۲-۳ نتایج آنالیز پودر کلروفیل

۱-۲-۳- مقدار کلروفیل a و b

غلظت کلروفیل‌های a و b استخراج شده استفاده از روش - های انجمادی، پاششی و هوای داغ برحسب میلی گرم بر گرم وزن خشک در جدول ۲ قابل مشاهده است. غلظت کلروفیل a کمتر از غلظت کلروفیل b، بوده و در روش خشک کن انجمادی نیز مقادیر کلروفیل بیشتری استخراج گردید و اختلاف معنی دار با دو تیمار دیگر داشت ($p \leq 0.05$). Ahmadi و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعات خود بر روی گیاه یونجه نشان دادند که مقادیر کلروفیل a بیشتر از کلروفیل b می‌باشد [۱۳]. همچنین، نتایج تحقیقات Dias و همکاران (۲۰۱۴)، که بر روی برگ کاهو انجام دادند، نشان داد که مقادیر کلروفیل a بیشتر از کلروفیل b بوده است [۱۹].

۲-۲-۳- آزمون فعالیت آبی

فعالیت آبی شاخص مهمی برای پودرهای خشک شده به روش‌های مختلف خشک کردن مانند پاششی و انجمادی است، زیرا عمر انبارمانی^۲ پودرهای تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور کلی در مواد غذایی با فعالیت آبی کمتر از ۰/۶ که از نظر میکروبیولوژیکی پایدار هستند، کاهش و

کنترل فعالیت‌های آب روش بسیار مؤثری برای افزایش زمان ماندگاری و جلوگیری از واکنش‌های نامطلوب در مواد غذایی می‌باشد [۲۰]. جدول ۲ تاثیر روش‌های خشک کردن پاششی، انجمادی و هوای داغ را بر میزان فعالیت آبی پودر کلروفیل نشان می‌دهد. بیشترین میزان فعالیت آبی در تیمار کلروفیل خشک شده با خشک کن پاششی مشاهده شد که ۰/۱۶ بود و کمترین میزان فعالیت آبی در تیمارهای کلروفیل خشک شده به روش انجمادی بود که ۰/۰۷ به دست آمد و اختلاف معنی دار با دو تیمار دیگر داشت ($p \leq 0.05$). Krasaekoopt و Bhatia (۲۰۱۲)، در پژوهش خود بر روی تولید پودر ماست با استفاده از خشک کردن انجمادی به نتایج مشابهی دست یافتند [۲۱]. همچنین ملکی زاده و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهش خود با عنوان اثر غلظت‌های مختلف مالتودکسترین و دماهای مختلف خشک کردن پاششی بر ویژگی‌های پودر عصاره ریزپوشانی شده سماق، فعالیت آبی پودر خشک شده با خشک کن پاششی را ۰/۳ به دست آوردند [۲۲].

بررسی‌های دیگر توسط سایر محققین بیانگر آن است که افزایش دمای هوای ورودی در خشک کن پاششی منجر به افزایش اندازه ذرات پودر، بالا رفتن زمان حلالیت و افزایش ذرات نامحلول خواهد شد. همچنین این امر موجب کاهش دانسیته توده و محتوای رطوبتی پودر نهایی خواهد شد [۲۴]. نتایج بررسی‌ها بیانگر آن است که افزایش دمای هوای ورودی در جهت خشک نمودن محلول با کاهش رطوبت نهایی پودر در ارتباط است که منجر به افزایش زمان حلالیت پودر می‌گردد. در دماهای بالاتر مربوط به هوای ورودی خشک کن لایه سخت بر روی ذرات پودری تشکیل شده و هنگام حل شدن بسته به شدت اثر مانع از ورود رطوبت به قسمت درونی ذرات پودر خواهد شد. در حالت کلی تر دمای هوای ورودی دارای تاثیراتی بر روی مورفولوژی ذرات پودر و قسمت‌های حل‌شونده ذرات پودر خواهد بود که در مورد پودر آب پنیر نیز این امر نشان داده شده است [۲۵]. محققین دیگر نیز بیان کرده‌اند که با استفاده از دمای هوای ورودی و خروجی خشک کن انجمادی می‌توان مورفولوژی و اندازه ذرات پودری و در نتیجه میزان حلالیت ذرات پودری را کنترل نمود [۲۶].

۳-۲-۳- حلالیت پودر
 باز جذب آب شامل فرآیندهای مختلفی است که به طور همزمان در حال وقوع هستند. این فرآیندها شامل نفوذ آب به درون ذرات جامد، انتقال مایع از حفرات و نفوذ به ماتریکس جامد، تورم ذرات جامد و در نهایت پخش شدن ذرات به درون مایع می‌باشد. بازجذب آب در مورد پودرها یک فرآیند مهم تلقی می‌گردد، زیرا اکثر پودرها قبل از مصرف در آب یا یک سیستم آبی حل می‌شوند. خصوصیات مطلوب در بازجذب آب پودر منجر به تر شدن و پخش شدن سریعتر پودر می‌گردد. بازجذب آب ضعیف پودر برای تولیدکنندگان منجر به افزایش زمان فرآوری، هزینه‌های تولید و کیفیت پایین محصول می‌گردد [۲۳]. جدول ۲ تاثیر روش‌های خشک کردن پاششی، انجمادی و هوای داغ را بر میزان حلالیت پودر کلروفیل نشان می‌دهد. بیشترین میزان حلالیت مربوط به نمونه کلروفیل خشک شده به روش خشک کن انجمادی می‌باشد که حدوداً ۲۷ درصد بودن و بعد از آن حلالیت کلروفیل خشک شده به روش پاششی با ۲۵ درصد به دست آمد که از حلالیت پودر خشک شده به روش هوای داغ بیشتر بودند؛ اختلاف معنی دار با دو تیمار دیگر نیز داشت ($p \leq 0.05$).

Table 2. Chlorophyll a, chlorophyll b, water activity, and water solubility of powders obtained by different drying methods.

Treatments	Chlorophyll a (mg/g)	Chlorophyll b (mg/g)	Water activity	Water solubility (%)
Hot air	4.28 ± 0.10 ^b	6.68 ± 0.12 ^b	0.129 ± 0.002 ^b	21.93 ± 0.21 ^c
Freeze-drying	6.03 ± 0.16 ^a	8.52 ± 0.15 ^a	0.071 ± 0.005 ^c	28.41 ± 0.13 ^a
Spray-drying	3.08 ± 0.09 ^c	5.44 ± 0.17 ^c	0.167 ± 0.004 ^a	25.86 ± 0.19 ^b

Values are expressed as mean ± standard deviation. Different superscript letters within each column indicate significant differences at the 95% confidence level ($p < 0.05$).

توده‌ای مواد پودری از نظر حمل و نقل، انبارداری و بسته‌بندی در صنعت حائز اهمیت است. جدول ۳ تاثیر روش‌های خشک کردن پاششی، انجمادی و هوای داغ را بر میزان دانسیته توده در پودر کلروفیل نشان می‌دهد. کمترین دانسیته توده در پودر کلروفیل خشک شده با خشک کن انجمادی

۳-۲-۴- اندازه‌گیری دانسیته توده
 در مورد پودرها تولید محصولی با میزان دانسیته توده پایین به معنی پودرهایی با ساختار متخلخل‌تر و دارای ساختاری با چروکیدگی کمتر و ساختار کروی می‌باشد که مطلوب تکنولوژی تولید پودرهای غذایی است. همچنین دانسیته

بود که 0.19 g/m^3 به دست آمد و اختلاف معنی دار با دو تیمار دیگر نداشت ($p>0.05$). با اختلاف کم در مقدار دانسیته توده، کلروفیل خشک شده به روش هوای داغ و خشک کن پاششی نیز 0.195 g/m^3 به دست آمد.

به نظر می‌رسد که افزایش دمای هوای ورودی منجر به بالا رفتن نرخ خشک شدن قطرات شده و منجر به تولید پودرهایی با خواص متخلخل‌تر شده و احتمالاً میزان چروکیدگی پودرها نیز کاهش پیدا کرده است و در نتیجه نسبت وزن به حجم پودرها کاهش پیدا کرده است. نتایج به دست آمده از تحقیقات سایر محققین نیز بیانگر آن است که افزایش دمای هوای ورودی و خروجی خشک کن پاششی منجر به افزایش اندازه ذرات پودر خواهد شد. در نتیجه این امر موجب کاهش دانسیته توده و محتوای رطوبتی پودر نهایی خواهد شد [۲۷]. در کل محصولاتی که با جریان هوای گرم خشک می‌شوند در مقایسه با روش‌های دیگر خشک کردن دارای تخلخل کمتر و چگالی بالاتر هستند [۲۸].

۳-۲-۵- اندازه‌گیری دانسیته ضربه

دلایل اقتصادی و عملگرایی مانند شرایط بسته‌بندی، حمل و نقل، نگهداری، کاربرد در فرمولاسیون‌ها، موجب افزایش اهمیت دانسیته به عنوان یک ویژگی فیزیکی مهم می‌گردند. طبق نتایج جدول ۳ کمترین میزان دانسیته ضربه در پودر کلروفیل خشک شده به روش خشک کن انجمادی بود که مقدار آن حدوداً 0.19 g/m^3 به دست آمد و اختلاف معنی دار با دو تیمار دیگر نداشت ($p\leq 0.05$). بیشترین مقدار دانسیته ضربه حدوداً 0.2 g/m^3 و مربوط به نمونه خشک شده به روش خشک کن هوای داغ بود.

به طور کلی، دانسیته ضربه به اندازه، شکل و توزیع اندازه ذرات، رطوبت، ترکیب شیمیایی، میزان هوای محبوس شده در داخل ذره بستگی دارد، که این عوامل به ویژگی‌های خوراک، میزان هوای ورودی، درجه حرارت و زمان خشک کردن، عملیات فرآوری و حمل و نقل دارد [۲۹]. همچنین دانسیته ضربه نیز تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات قرار می‌گیرد.

اندازه ذره عامل مؤثر در دانسیته ضربه‌ای می‌باشد، اگر اندازه ذرات درشت‌تر باشد در اثر ضربه حجم تغییر زیادی پیدا نمی‌کند، بنابراین دانسیته ضربه کوچک‌تر می‌شود. هرچه اندازه ذرات ریزتر باشد چون ذرات ریز می‌توانند در منافذ بین ذرات قرار گیرند، در نتیجه خلل و فرج کاهش یافته و حجم نیز متناسب با آن کاهش می‌یابد و دانسیته ضربه بیشتر می‌شود. به طور مثال، در صورتیکه درصد ذرات درشت موجود در پودر بیشتر باشد در اثر ضربه حجم تغییر زیادی پیدا نمی‌کند. بنابراین دانسیته ضربه‌ای کوچک‌تر می‌شود. اما اگر علاوه بر ذرات درشت، ذرات ریز هم با نسبت مشابه در پودر وجود داشته باشد، در اثر ضربه، ذرات ریز فضای بین ذرات درشت را اشغال کرده و در نتیجه تغییر حجم، زیاد بوده و دانسیته ضربه بیشتر می‌شود [۳۰]. این نتایج در تطابق با یافته‌های سایر محققین است که گزارش کردند افزایش دما موجب کاهش دانسیته توده پودرهای پیگمان آمارانتوس [۳۱]، آب پرتقال [۳۲]، پودر آکایی [۳۳] و کنسانتره آب چغندر قند [۳۴] گردید.

۳-۲-۶- ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی

فعالیت مهارکنندگی رادیکالی یک ویژگی مهم به دلیل ممانعت از فعالیت رادیکال‌های آزاد در مواد غذایی و سیستم‌های بیولوژیکی بوده و نشان دهنده ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌باشد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی به صورت مهار فعالیت رادیکال‌های آزاد DPPH تعریف می‌شود. افزایش مهار فعالیت رادیکال‌های آزاد باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود. توانایی فعالیت آنتی‌اکسیدانی پلی‌فنول‌ها عمدتاً به دلیل گروه‌های هیدروکسیل آنها می‌باشد که از طریق پایدارسازی رادیکال‌های آزاد، موجب ممانعت از اکسیداسیون لیپیدها، پروتئینها و DNA شده، بنابراین منجر به کاهش تأثیرات مخرب اکسیداسیون می‌گردد [۳۵]. طبق جدول ۳ بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی ۸۰ درصد و مربوط به نمونه کلروفیل خشک شده با خشک کن انجمادی بود که اختلاف معنی دار با دو تیمار دیگر نداشت ($p\leq 0.05$).

طرف دیگر، ممکن است برخی از آنتی اکسیدان‌های درونی در یک نمونه با اعمال حرارت و افزایش دما تخریب شده و از بین بروند [۳۷].

۳-۲-۷- اندازه‌گیری ترکیبات فنولی کل
نتایج مربوط به میزان ترکیبات فنولی کل براساس میلی گرم اسیدگالیک در گرم وزن خشک پودر کلروفیل خشک شده به روش پاششی، انجمادی و هوای داغ است. طبق جدول ۳ بیشترین میزان ترکیبات فنولی کل ۳۵۰ mg GA/mL و مربوط به نمونه کلروفیل خشک شده با خشک کن انجمادی بود و اختلاف معنی‌دار با دو تیمار دیگر داشت ($p \leq 0.05$). کمترین مقدار ترکیبات فنولی کل مربوط به نمونه کلروفیل خشک شده با خشک کن پاششی بود.

کمترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز حدوداً ۵۵ درصد و در نمونه‌های خشک شده با خشک‌کن پاششی به دست آمد. بالا بودن میزان مهار رادیکال آزاد DPPH در این روش‌ها به میزان بالاتر ترکیبات فنولی و توکوفرولی برمی‌گردد. قدرت مهارکنندگی عصاره‌های مختلف به میزان زیادی به تعداد و موقعیت گروه‌های هیدروکسیل و وزن مولکولی ترکیبات فنولی بستگی دارد. نتایج این بررسی همانند سایر پژوهش‌ها نشان داده است که تیمارهایی که ترکیبات فنولی بالاتری دارند، فعالیت ضد رادیکالی بیشتری را نشان می‌دهند [۳۶]. بر اساس نتایج دیمیرکول و همکاران (۲۰۱۸) مرحله انجماد باعث ایجاد بلورهای یخ و پاره شدن ساختارهای سلولی از جمله دیواره‌های سلولی شده و باعث آزاد شدن ترکیبات آنتی‌اکسیدان از شبکه سلولی می‌شود. از

Table 3. Comparison of bulk density, tapped density, total phenolic content, and antioxidant activity of powders obtained by different drying methods

Treatments	Bulk density (g/cm ³)	Tapped density (g/cm ³)	Total phenolic content (mg GA/mL)	Antioxidant activity (%)
Hot air	0.194 ± 0.001 ^a	0.204 ± 0.003 ^a	312.37 ± 3.14 ^b	65.95 ± 1.42 ^b
Freeze-drying	0.191 ± 0.003 ^a	0.193 ± 0.003 ^b	347.02 ± 5.83 ^a	82.19 ± 1.59 ^a
Spray-drying	0.195 ± 0.001 ^a	0.196 ± 0.001 ^b	288.54 ± 4.08 ^c	58.41 ± 1.13 ^c

Values are expressed as mean ± standard deviation. Different superscript letters within each column indicate significant differences at the 95% confidence level ($p < 0.05$).

ی خشک شده در خشک کن انجمادی بود و اختلاف معنی‌دار با دو تیمار دیگر داشت ($p \leq 0.05$). نمونه‌های خشک شده در خشک‌کن پاششی و تحت هوای داغ بیشترین میزان ^b را داشتند. کمترین میزان ^{L*} متعلق به نمونه ی خشک شده در خشک کن انجمادی بود و اختلاف معنی‌دار با دو تیمار دیگر داشت ($p \leq 0.05$). نمونه‌های خشک شده در خشک‌کن پاششی بیشترین میزان ^{L*} را داشتند.

طبق نتایج پایین‌ترین میزان مؤلفه رنگی مربوط به نمونه خشک شده با خشک کن انجمادی بود. کاهش این مؤلفه رنگی به معنی تیره شدن رنگ نمونه‌ها می‌باشد. پارامتر ^{L*} تحت تأثیر اندازه ذرات نیز می‌باشد و با کاهش اندازه ذرات، پارامتر ^{L*} افزایش یافت. افزایش روشنایی پودرها در اثر

۳-۲-۸- بررسی پارامترهای رنگی

رنگ از اولین و مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی پودر می‌باشد که به طور مستقیم بیانگر شرایط اعمال شده به هنگام خشک کردن و کیفیت محصول نهایی است. کلروفیل یک ترکیب زیست فعال بسیار ناپایدار مخصوصاً در شرایط نور، حرارت، اسید و قلیا است که با افزودن یون روی یا مس پایدار می‌شود و به طور گسترده در صنعت غذا کاربرد دارد. شاخص‌های رنگی نمونه‌های خشک شده در جدول ۴ آورده شده است. بیشترین میزان ^{a*} متعلق به نمونه ی خشک شده در خشک کن انجمادی بود و اختلاف معنی‌دار با دو تیمار دیگر داشت ($p \leq 0.05$). نمونه‌های خشک شده در خشک‌کن پاششی کمترین میزان ^{a*} را داشتند. کمترین میزان ^{b*} متعلق به نمونه

همچنین افزایش دما موجب واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی و کاراملیزاسیون قندها می‌شود که موجب کاهش مؤلفه‌ی رنگی می‌شود [۳۸].

افزایش دما به دلیل افزایش اکسیداسیون رنگدانه‌های حساس به حرارت بود [۳۵]. از طرف دیگر طبق یافته‌های برخی پژوهشگران افزایش دما با افزایش خروج آب از نمونه، موجب تغلیظ پیگمان‌های رنگی در نمونه می‌گردد.

Table 4. Comparison of color parameters (L*, a*, b*) of powders obtained by different drying methods

Treatments	L* (Lightness)	a* (Red/Green)	b* (Yellow/Blue)
Hot air	41.61 ± 1.02 ^b	-1.02 ± 0.10 ^b	37.27 ± 0.31 ^a
Freeze-drying	26.49 ± 1.52 ^c	-0.21 ± 0.05 ^a	19.45 ± 0.28 ^b
Spray-drying	50.52 ± 0.83 ^a	-9.05 ± 0.14 ^c	36.65 ± 0.55 ^a

Values are expressed as mean ± standard deviation. Different superscript letters within each column indicate significant differences at the 95% confidence level ($p < 0.05$).

۴- نتیجه‌گیری کلی

انجمادی بودند. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش خشک‌کن انجمادی برای حفظ ویژگی‌های فیزیوشیمیایی کلروفیل و روش خشک‌کن پاششی برای بهبود ویژگی‌های کیفی توصیه می‌شود. ترکیب این دو فناوری می‌تواند منجر به تولید پودری با خواص شیمیایی و حسی مطلوب گردد.

رضایت‌نامه کتبی

رضایت‌نامه کتبی و آگاهانه از تمامی شرکت‌کنندگان در مطالعه اخذ شد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

بیانیه دسترسی‌ها

داده‌های پژوهش به اشتراک گذاشته نمی‌شوند.

۵- منابع

[1] Hesar Khizrlou, Arzoo and Ehsani, Ali and Zulfiqari, Hajar. 2021. Fruit and vegetable waste as biological resources for the production of bioactive compounds, International Congress of Food Sciences and Public Health, Tehran, <https://civilica.com/doc/1314462>.

در این پژوهش، بهینه‌سازی استخراج کلروفیل از ضایعات سبزیجات و تولید رنگ خوراکی پایدار بر پایه آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت کلروفیل **a** کمتر از کلروفیل **b** بود و در روش خشک‌کردن انجمادی، بیشترین مقادیر کلروفیل استخراج گردید. بالاترین میزان فعالیت آبی در تیمار پودر کلروفیل حاصل از خشک‌کردن پاششی مشاهده شد، در حالی که پایین‌ترین میزان آن به روش خشک‌کردن انجمادی تعلق داشت. بیشترین حلالیت در آب نیز به نمونه خشک‌شده با خشک‌کن انجمادی اختصاص یافت. از نظر ویژگی‌های فیزیکی، کمترین دانسیته توده و دانسیته ضربه هر دو در پودر کلروفیل تولیدشده توسط روش انجمادی به دست آمد. علاوه بر این، بالاترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی و بیشترین مقدار ترکیبات فنولی کل نیز در همین روش مشاهده شد. ارزیابی شاخص‌های رنگی نشان داد که بالاترین مقدار **a***، کمترین مقدار **b*** و کمترین مقدار **L*** مربوط به نمونه‌های خشک‌شده در خشک‌کن

[2] Martins, N., Roriz, C. L., Morales, P., Barros, L., & Ferreira, I. C. (2016). Food colorants: Challenges, opportunities and current desires of agro-industries to ensure consumer expectations and regulatory practices. *Trends in food science & technology*, 52, 1-15.

[3] Pérez-Gálvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2020). Carotenoids and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants*, 9(6), 505.

- [4] Bagheri, Seyedah Leila and Radi, Mohsen and Amiri, Sediqeh, 2013, investigation of the chemical structure and stability of chlorophyll as a natural pigment, 21st National Congress of Food Sciences and Industries of Iran, Shiraz, <https://civilica.com/doc/234819>.
- [5] Ghosh, S., Sarkar, T., Das, A., & Chakraborty, R. (2022). Natural colorants from plant pigments and their encapsulation: An emerging window for the food industry. *LWT*, 153, 112527.
- [6] Munawaroh, H. S. H., Fathur, R. M., Gumilar, G., Aisyah, S., Yuliani, G., Mudzakir, A., & Wulandari, A. P. (2019, November). Characterization and physicochemical properties of chlorophyll extract from *Spirulina* sp. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1280, No. 2, p. 022013). IOP Publishing.
- [7] Kwartiningsih, E., Ramadhani, A. N., Putri, N. G. A., & Damara, V. C. J. (2021, April). Chlorophyll Extraction Methods Review and Chlorophyll Stability of Katuk Leaves (*Sauropus androgynous*). In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1858, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- [8] Zulfarnain, A., Durrani, A. I., Saleem, H., & Rubab, S. (2021). Development of an ultrasonic-assisted extraction technique for the extraction of natural coloring substance chlorophyll from leaves of carica papaya. *Journal of Oleo Science*, 70(10), 1367-1372.
- [9] Navarro-Flores, M. J., Ventura-Canseco, L. M. C., Meza-Gordillo, R., Ayora-Talavera, T. D. R., & Abud-Archila, M. (2020). Spray drying encapsulation of a native plant extract rich in phenolic compounds with combinations of maltodextrin and non-conventional wall materials. *Journal of Food Science and Technology*, 57(11), 4111-4122.
- [10] Kaveh, S., Sadeghi Mahonek, A., Sarabandi, K., Graili, Z. (2017). Spray drying of stevia extract: evaluation of physicochemical, functional and microstructural properties. *New Food Technologies*, 5(4), 637 650.
- [11] Feng, Y., Xu, B., Yagoub, A. E. A., Ma, H., Sun, Y., Xu, X., ... & Zhou, C. (2021). Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic. *Food Chemistry*, 343, 128404.
- [12] Castro-López, C., Espinoza-González, C., Ramos-González, R., Boone-Villa, V. D., Aguilar-González, M. A., Martínez-Ávila, G. C., ... & Ventura-Sobrevilla, J. M. (2021). Spray-drying encapsulation of microwave-assisted extracted polyphenols from *Moringa oleifera*: Influence of tragacanth, locust bean, and carboxymethyl-cellulose formulations. *Food Research International*, 144, 110291.
- [13] Ahmadi A, Shahidi SA, Safari R, Motamedzadegan A, Ghorbani-HasanSaracai A. Evaluation of stability and antibacterial properties of extracted chlorophyll from alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Food and Chemical Toxicology*. 2022 May 1;163:112980.
- [14] Hajiaghaei, M. & Sharifi, A. (2022). Physicochemical properties of red beetroot and quince fruit extracts instant beverage powder: Effect of drying method and maltodextrin concentration. *Journal of Food Quality*, 2022, 7499994.
- [15] Iran Institute of Standards and Industrial Research. (2013). Carbonated drinks - chemical test methods. National Standard of Iran, No. 1249, first revision
- [16] Hisarinejad, M.A., Abdulahi Moghadam, M.H., Jafarzadeh, M., Rezaei Oghazi, M. (2021). Investigating the physicochemical and antioxidant properties of purslane microcoated aqueous extract powder by spray drying method. *New technologies in food industry*, 8(3), 325 335.
- [17] Haji Aghaei, Marzieh, and Sharifi, Akram. (2019). Investigating some physical characteristics of instant drink powder based on red beetroot extract, coated by hot air and freezing methods. *Iran Food Science and Industry*, 17(107), 67-80. SID. <https://sid.ir/paper/399413/fa>.
- [18] Hassanzadeh, Kianoosh, Hemti, Khodiar, and Mehdipour, Mojdeh. (2017). The effect of different drying methods (natural and oven) on drying time and some secondary metabolites of the medicinal plant *Melissa officinalis* L. *Plant Production Research (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 25(1), 137 143. SID. <https://sid.ir/paper/155921/fa>.
- [19] Dias, M. C., Figueiredo, P., Duarte, I. F., Gil, A. M., & Santos, C. (2014). Different responses of young and expanded lettuce leaves to fungicide Mancozeb: chlorophyll fluorescence, lipid peroxidation, pigments and proline content. *Photosynthetica*, 52(1), 148-151.
- [20] Azizpour, M., Mohebbi, M., & Khodaparast, M. H. H. (2016). Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder. *Innovative food science & emerging technologies*, 34, 122-126.
- [21] Krasaekoopt, W., & Bhatia, S. (2012). Production of yogurt powder using foam-mat drying. *AU Journal of Technology*, 15(3).
- [22] Malekizadeh, N., Peighambari, S. H., Oladghaffari, A., & Sarabandi, K. (2018). Effects of different concentrations of maltodextrin and drying temperatures of spray drying process on physicochemical properties of encapsulated Sumac extract. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(2), 321-334. doi: 10.22067/ifstrj.v0i0.61209
- [23] Alami, Mehran, Shirmohammadi, Majid, Maqsoodlou, Yahya, and Khamari, Morteza. (2022). The effect of spray drying conditions on the physical, functional and production efficiency of yogurt powder. *Innovation in Food Science and*

- Technology (Food Science and Technology), 14(2), 93-108. SID. <https://sid.ir/paper/1066860/fa>.
- [24] Anandharamakrishnan, C., Rielly, C. D., & Stapley, A. G. (2007). Loss of solubility of α -lactalbumin and β -lactoglobulin during the spray drying of whey proteins. *LWT-Food Science and Technology*, 41(2), 270-277.
- [25] Thybo, P., Pedersen, B. L., Hovgaard, L., Holm, R., & Müllertz, A. (2008). Characterization and physical stability of spray dried solid dispersions of probucol and PVP-K30. *Pharmaceutical development and technology*, 13(5), 375-386.
- [26] Liapis, A. I., & Bruttini, R. (2020). Freeze drying. In *Handbook of industrial drying* (pp. 309-343). CRC press.
- [27] Janiszewska, E., Witrowa-Rajchert, D., Kidoń, M., & Czapski, J. (2013). Effect of the applied drying method on the physical properties of purple carrot pomace. *International Agrophysics*, 27(2).
- [28] Russo, E. T., Biggerstaff, G., Hoekstra, R. M., Meyer, S., Patel, N., Miller, B., & Quick, R. (2013). A recurrent, multistate outbreak of Salmonella serotype Agona infections associated with dry, unsweetened cereal consumption, United States, 2008. *Journal of Food Protection*, 76(2), 227-230.
- [29] Abdullah, E. C., & Geldart, D. (1999). The use of bulk density measurements as flowability indicators. *Powder technology*, 102(2), 151-165.
- [30] Adhikari, B. R., Dummer, J., Gordon, K. C., & Das, S. C. (2022). An expert opinion on respiratory delivery of high dose powders for lung infections. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 19(7), 795-813.
- [31] 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(3), 661-673.
- [32] Cai, Y. Z., & Corke, H. (2000). Production and properties of spray-dried Amaranthus betacyanin pigments. *Journal of food science*, 65(7), 1248-1252.
- [33] Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (Euterpe oleraceae Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of food engineering*, 88(3), 411-418.
- [34] Bazaria, B., & Kumar, P. (2016). Effect of whey protein concentrate as drying aid and drying parameters on physicochemical and functional properties of spray dried beetroot juice concentrate. *Food bioscience*, 14, 21-27.
- [35] Mishra, A., Kumar, S., Bhargava, A., Sharma, B., & Pandey, A. K. (2011). Studies on in vitro antioxidant and antistaphylococcal activities of some important medicinal plants. *Cellular and Molecular Biology*, 57(1), 16-25.
- [36] Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Barros, L., & Ferreira, I. C. (2018). A comparison of the phenolic profile and antioxidant activity of different Cichorium spinosum L. ecotypes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(1), 183-189.
- [37] Demirkol, M., & Tarakci, Z. (2018). Effect of grape (Vitis labrusca L.) pomace dried by different methods on physicochemical, microbiological and bioactive properties of yoghurt. *Lwt*, 97, 770-777.
- [38] Nadeem, H. Ş., Torun, M., & Özdemir, F. (2011). Spray drying of the mountain tea (Sideritis stricta) water extract by using different hydrocolloid carriers. *LWT-Food science and technology*, 44(7), 1626-1635.



Scientific Research

Investigation of the characteristics of chlorophyll extracted from vegetable wastes and its application as a stable natural food colorant

Hadi Madadi Barough¹, Akram Sharifi^{1*}

¹Department of Food Science and Technology, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Article History:</p> <p>Received: 2025/09/22</p> <p>Review: 2025/12/05</p> <p>Accepted: 2025/12/07</p> <p>Keywords:</p> <p>Extraction, Chlorophyll, Vegetable Waste, Spray Dryer, Freeze Dryer.</p>	<p>Nowadays, natural pigments are widely used in the food, cosmetic, and pharmaceutical industries, and in recent years, numerous studies have been conducted on their extraction methods and functional properties. The aim of this study was to optimize the extraction of chlorophyll from vegetable wastes and to produce a stable food colorant using spray drying, freeze-drying, and hot air-drying methods. After extracting the pigment from vegetable residues, the contents of chlorophyll <i>a</i> and <i>b</i>, total phenolic compounds, and antioxidant activity were determined. The extracts were then converted into powder using the three drying techniques. The produced powders were analyzed for water activity, solubility, bulk density, tapped density, antioxidant activity, total phenolic content, and color parameters. The results showed that freeze-dried samples contained higher amounts of chlorophyll <i>a</i> (6.03 mg/g) and <i>b</i> (8.52 mg/g), antioxidant activity (82.19%), and total phenolic compounds (347.02 mg GA/mL). Freeze-drying also influenced the physical properties of the powders, leading to significantly higher water activity, solubility, bulk density, and tapped density compared to the other methods. In terms of color parameters, spray-dried samples exhibited superior scores. Overall, the findings indicated that freeze-drying can produce powders with desirable physicochemical properties, making them suitable for application as natural food colorants.</p>
<p>DOI: 10.48311/fsct.2026.116513.1001</p> <p>*Corresponding Author E- asharifi@iau.ac.ir</p>	