



## مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: [www.fsct.modares.ac.ir](http://www.fsct.modares.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

### خشک کردن حامل‌های لیپیدی نانوساختار (NLC) با استفاده از خشک‌کن پاششی و با کمک مالتودکستری

شهرام مظفر<sup>۱</sup>، محسن رادی<sup>۲،\*</sup>، صدیقه امیری<sup>۲،\*</sup>

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

۲- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

#### اطلاعات مقاله

#### چکیده

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲

کلمات کلیدی:

حامل‌های لیپیدی نانوساختار، NLC

نانوذرات چربی،

خشک‌کن پاششی،

مالتودکستری،

ریزپوشانی.

DOI: 10.52547/fsct.18.116. 1

\* مسئول مکاتبات:

m.radi@iauyasooj.ac.ir

s.amiri@iauyasooj.ac.ir

حامل‌های لیپیدی نانوساختار (NLC) حامل‌های قوی برای ترکیبات چربی‌دوست هستند. در این تحقیق، محلول مالتودکستری (۶:۱۰) در دمای ورودی ۱۱۰ یا ۱۸۰ درجه سلسیوس و سرعت جریان خوراک ۵ یا ۱۵ میلی‌لیتر در دقیقه توسط خشک‌کن پاششی خشک شده و ویژگی‌های پودرها مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که پودر تولید شده از ذرات کروی شکل توخالی با سطوح صاف تشکیل شده‌اند. بیشینه بازده تولید پودر حدود ۶۶ درصد بود. اندازه ذرات NLC پس از حل کردن مجدد پودرهای به دست آمده افزایش یافت [از ۵۷/۳ نانومتر (در بزرگ‌ترین اندازه قبل از خشک کردن) به ۹۳/۷ نانومتر (در بزرگ‌ترین اندازه بعد از خشک کردن)]، اما در تمام تیمارها کمتر از حد اندازه قابل قبول سیستم‌های NLC بود. اندازه‌گیری شاخص‌های جریان‌پذیری مانند شاخص تراکم‌پذیری (متوسط ۱۶/۲۱)، نسبت هائوسنر (متوسط ۱/۲۰) و زاویه قرار (۳۱ تا ۴۲ درجه) نشان داد که نمونه‌ها به عنوان پودرهایی با قابلیت جریان‌پذیری خوب دسته‌بندی می‌شوند. نتایج این مطالعه نشان داد که سیستم‌های NLC را می‌توان با استفاده از ماده مالتودکستری به عنوان ماده کمکی بدون هیچ گونه تغییر شدید در اندازه ذرات، با خشک‌کن پاششی خشک کرد.

## ۱- مقدمه

بسیاری از ترکیبات زیست فعال به منظور بهبود دسترسی زیستی، پراکنده شدن در سامانه‌های آبی و محافظت در برابر شرایط محیطی مخرب بایستی ریزپوشانی شوند [۵-۱]. از سامانه‌های پراکنده کلوییدی مبتنی بر لیپیدها مانند امولسیون‌ها، میکروامولسیون‌ها، نانوامولسیون‌ها، نانوذرات چربی جامد (SLN) و حامل‌های چربی نانو ساختار (NLC) برای ریزپوشانی ترکیبات آبریز استفاده شده است [۶، ۷]. حامل‌های چربی نانو ساختار مخلوط لیپیدهای جامد و مایع می‌باشند که دارای ساختار نیمه بلوری هستند، در حالی که نانوذرات چربی جامد، کاملاً جامد و متبلور هستند [۴، ۶]. بررسی در مورد کاربردهای NLC برای ریزپوشانی ترکیبات فعال در فرآورده‌های غذایی، دارویی و آرایشی در منابع موجود است [۶، ۸، ۹]. در میان آنها، برخی از کاربردهای غذایی از جمله ریزپوشانی کوئرستین و روغن بذر کتان [۱۰]، روتین [۱۱]، کورکومین [۱۲]، ویتامین د [۱۳] و اسانس روغنی دارچین [۱۴] گزارش شده است که در همه این تحقیقات، پتانسیل بالای سیستم‌های NLC برای ریزپوشانی ترکیبات فعال تأیید شده است.

یکی از مشکلات سامانه‌های NLC، محیط آبی آنهاست که نگهداری طولانی مدت آنها را با مشکل مواجه می‌کند. علاوه بر این، هزینه‌های اضافی ذخیره‌سازی و حمل و نقل، ماندگاری محدود به دلیل بی‌ثباتی فیزیکی، تغییرات شیمیایی نامطلوب مانند واکنش‌های آبکافت یا نشت ترکیب بارگذاری شده و همچنین آلودگی میکروبی نیز محتمل است [۱۵، ۱۶]. کامپوس و همکاران [۱۷] نشان دادند که پایداری تکنولوژیکی یک سیستم SLN مایع بارگذاری شده با ترکیبات پلی فنولیک از ۳ ماه به ۱ سال پس از خشک کردن افزایش یافته است. بنابراین، افزایش ماندگاری این سامانه‌ها بسیار مورد توجه بوده است و تلاش‌های زیادی توسط محققان برای حذف آب و خشک کردن آب SLN ها و NLC ها انجام شده است. بر این اساس، خشک کردن انجمادی محبوب‌ترین روش بوده است. پژوهشگران، سامانه‌های متنوع SLN یا NLC بارگذاری شده با طیف گسترده‌ای از ترکیبات زیست-فعال و حاوی ترکیبات محافظ انجمادی<sup>۱</sup> را با این روش

خشک کرده‌اند [۱۹-۱۷]. در این راستا، تغییرات شدید در پایداری سیستم‌ها، از جمله تجمع ذرات، رشد و افزایش میزان شاخص پراکندگی نمونه‌های یخ زده گزارش شده است [۱۵، ۱۶] و بر تأثیر محافظ‌های انجمادی و بهینه‌سازی فرآیند تأکید شده است [۲۰]. همچنین، استفاده از برخی روش‌های مرتبط، مانند خشک کردن پاششی-انجمادی<sup>۲</sup> نیز گزارش شده است [۱۵].

خشک کردن پاششی یک روش کاملاً پرکاربرد برای خشک کردن مواد در زمینه‌های مختلف صنعتی مانند صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی است [۲۱، ۲۲]. سرعت خشک شدن و تولید بالا، اتوماسیون بالا، تکرارپذیری، قابلیت افزایش مقیاس تولید، عملکرد پیوسته، انعطاف پذیری در ترکیب خوراک، ساختار و مشخصات محصول از مزایای این روش است [۲۲، ۲۳]. علاوه بر این، خشک کردن پاششی یک روش مهم برای ریزپوشانی ترکیبات زیست-فعال یا فراسودمند است [۲۴، ۲۵]. بعلاوه، به دلیل زمان تماس بسیار کوتاه با هوای گرم، استفاده از این روش برای ریزپوشانی ترکیبات حساس توصیه شده است [۲۶].

هزینه تولید یک عامل کلیدی در صنایع غذایی است، زیرا حتی مواد غذایی غنی شده نیز نباید زیاد گران باشند. گفته شده است که خشک کردن پاششی ۴-۷ برابر مقرون به صرفه‌تر از خشک کردن انجمادی است [۲۳، ۲۷]. با این وجود، دستیابی به فرمولاسیون‌ها و شرایط عملیاتی مناسب برای خشک شدن SLN و NLC برای محققان و صنعت یک مسئله چالش برانگیز است. گزارش‌های زیادی در مورد خشک شدن پاششی SLN یا NLC در دسترس نیست. برخی از اولین گزارش‌ها نشان می‌دهد که این فرآیند چالش برانگیز است، جایی که خشک شدن موفقیت آمیز

SLN با استفاده از قند ترهالوز و فقط در یک نسبت ترهالوز به SLN بسیار بالا (۲۵:۱) حاصل شد [۲۸]. یک تغییر شدید در اندازه و ناپایداری نانوذرات چربی پس از خشک شدن پاششی بدون استفاده از مواد افزودنی توسط محققین گزارش شده است [۲۹]. آنها برای تثبیت نانوذرات چربی از گلوکز، ترهالوز، لاکتوز، ساکارز، مانیتول و لوسین استفاده کردند و بیان کردند که لوسین بهترین عملکرد را نشان داده و اندازه اولیه نانوذرات چربی را حفظ می‌کند [۲۹]. پیش-پوشش‌دهی نانوذرات لیپیدی با

2. Spray-freeze drying

1. Cryo-protectant

سیگما-آلد ریچ خریداری شدند. ایزوپروپانل، استون و تویین ۸۰ با درجه آزمایشگاهی و از شرکت مرک آلمان تهیه شدند.

## ۲-۲- ساخت حامل‌های چربی نانوساختار (NLC)

حامل‌های چربی نانوساختار با روش انتشار حلال طبق روش لو و همکاران (۲۰۱۵) [۳۹] با تغییرات جزئی تولید شد. به طور خلاصه، چربی (روغن پالم) و امولسیفایر (تویین ۸۰) به ترتیب در غلظت‌های ۱۰ و ۳/۳۳ درصد در استون حل شدند. برای اطمینان از انحلال چربی و امولسیفایر در استون، این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سلسیوس بهم زده شد. سپس محلول فاز آلی (۳۰۰ میلی لیتر) با استفاده از یک هموژنایزر با سرعت بالا (IKA, UltraTurrax T18) در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه به شدت با محلول آبی ۲٪ تویین ۸۰ (۱ لیتر) مخلوط شد. سپس استون با استفاده از تبخیرکننده چرخان تحت خلأ (IKA, RV10 control) ساخت آلمان) در دمای ۵۰ درجه سلسیوس تبخیر شد. پس از آن، سیستم با استفاده از حمام آب یخ در حالی که در دور ۵۰۰ دور در دقیقه بهم زده می‌شد تا ۲۵ درجه سلسیوس سرد شد. سیستم NLC حاوی ۳٪ لیپید و ۳٪ تویین ۸۰ (مجموعاً ۶۰ گرم در لیتر) بود.

## ۲-۳- خشک کردن NLC با استفاده از خشک‌کن پاششی

برای خشک کردن محلول NLC-مالتودکسترین، از یک خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی (دورسا، ایران) با محفظه‌ای ۱۵ سانتی متری و مجهز به یک نازل دو کاناله (۰/۷ میلی متر) استفاده شد. یک سری آزمایشات غربالگری برای یافتن بهترین شرایط عملیاتی برای تزریق خوراک (غلظت NLC و محلول مالتودکسترین، سرعت جریان خوراک) و شرایط عملیاتی خشک‌کن (دما، میزان جریان هوای ورودی و سرعت جریان هوای اتمایز کننده در محفظه) انجام شد. در فرآیند انتخاب، عواملی چون کارایی خشک کردن، عدم تشکیل کلوخه و عدم چسبندگی به دیواره محفظه در نظر گرفته شد (آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند). در نهایت، غلظت ثابت ۶۰ گرم بر لیتر برای NLC و ۱۰۰ گرم بر لیتر برای مالتودکسترین انتخاب

بیوپلیمرهایی مانند پاپائین، کازئین و پکتین نیز از دیگر استراتژی‌هایی است که محققان با موفقیت در خشک کردن پاششی SLN یا NLC از آن استفاده کرده‌اند [۳۰، ۳۱]. مالتودکسترین‌ها مشتقات نشاسته‌ای هستند که با آبکافت محدود توسط آنزیم‌ها یا اسیدها تولید می‌شوند. آنها بی‌مزه تا کمی شیرین، نیمه محلول تا کاملاً محلول در آب بوده و با توجه به وزن مولکولی می‌توانند گرانیروی را افزایش دهند [۳۲]. مالتودکسترین‌ها به عنوان ماده کمکی در خشک کردن محصولاتی مانند آب میوه‌ها به منظور افزایش دمای انتقال شیشه‌ای سیستم و در نتیجه کاهش چسبندگی و افزایش قابلیت جریان یافتن محصول و بهبود خصوصیات پودر در خشک کردن پاششی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. گزارش‌هایی در مورد خشک شدن آب هندوانه [۳۳]، عصاره سماق [۳۴] و آب انبه [۳۵] و ... در منابع موجود است. کاربرد دیگر مالتودکسترین‌ها استفاده از آنها به عنوان ماده دیواره برای ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال، امولسیون‌ها و سیستم‌های پراکنده است که در آن‌ها حفظ ویژگی‌های اولیه سیستم مهم است. به عنوان مثال ریزپوشانی نارینگین [۳۶]، روغن غنی از اسیدهای چرب چند غیر اشباع و امولسیون لیمونن [۳۷] و ترکیبات طعمی آبگریز امولسیون شده [۳۸] گزارش شده‌اند.

با توجه به پتانسیل‌های ذکر شده در مورد سیستم‌های NLC برای ریزپوشانی بسیاری از ترکیبات چربی‌دوست و ایمنی و کاربرد وسیع مالتودکسترین‌ها، هدف از این مطالعه ارزیابی امکان استفاده از مالتودکسترین به عنوان ماده کمکی در خشک کردن پاششی یک سیستم NLC با درجه غذایی و بررسی تأثیر برخی از شرایط عملیاتی خشک کردن پاششی و فرمولاسیون خوراک بر مشخصات محصول می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد مورد استفاده

روغن پالم هیدروژنه (اسید میریستیک ۰/۹٪، اسید استئاریک ۹۹/۶٪، اسید پالمیتیک ۴۷/۳٪، اسید لینولئیک ۱/۴٪ و اسید لینولنیک ۰/۳٪) و مالتودکسترین با معادل دکستروز ۷ از شرکت

تبخیر کامل حلال در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به صورت وزنی برآورد شده و بصورت درصد در ماده خشک طبق معادله زیر محاسبه و گزارش شد.

= درصد نانو ذرات چربی در پودر

۲۰۰ × (جرم نمونه پودر / مقدار جرم باقیمانده پس از تبخیر حلال)

## ۶-۲- ریز ساختار و مورفولوژی پودر

ریز ساختار پودر توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۳</sup> (MIRA3, TESCAN) ساخت جمهوری چک) در ولتاژ ۵ کیلوولت بررسی شد. قبل از آنالیز، نمونه‌ها روی یک صفحه آلومینیومی توسط چسب دوطرفه تثبیت شدند و سپس یک لایه نازک طلا پوشش داده شدند.

## ۷-۲- توزیع اندازه ذرات حامل‌های چربی نانو ساختار

اندازه ذرات NLC قبل و بعد از خشک کردن اندازه‌گیری شد تا تأثیر خشک کردن پاششی بر توزیع اندازه ذرات مشخص شود. بنابراین، سوسپانسیون نانو ذرات اولیه مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین، نانو ذرات موجود در پودر، پس از حل کردن ۱ گرم از هر پودر در آب یون‌زدایی شده در دمای ۲۵ درجه سلسیوس توسط همزن مغناطیسی با دور ۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفتند. در هر دو حالت، به منظور جلوگیری از ایجاد خطای اثر تفرق نور چندگانه<sup>۴</sup>، محلول مورد ارزیابی ۵۰ برابر در آب یون‌زدایی شده رقیق‌سازی شد و سپس توسط دستگاه پراکنش نوری پویا<sup>۵</sup> توزیع اندازه ذرات اندازه‌گیری شد (DLS, BI-200SM, Brookhaven Instruments Corp., Holtsville, NY, USA). دستگاه توسط لیزر هلیوم-نئون با طول موج ۶۳۳ نانومتر و زاویه اندازه‌گیری ۹۰ درجه کار می‌کرد.

## ۸-۲- اندازه‌گیری درصد رطوبت

از روش آون هوای داغ به منظور اندازه‌گیری درصد رطوبت پودرها استفاده شد. برای این منظور ۳-۵ گرم از پودر در آون (Memmert, ساخت آلمان) در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تا

گردید و خوراک خشک‌کن با حل کردن مستقیم مالتودکسترین در محلول NLC (به گونه‌ای که درصد NLC در ماده خشک معادل ۳۷/۵ درصد باشد) تهیه گردید. با در نظر گرفتن حداقل دما و سرعت جریان خوراک که عملیاتی بوده و فرآیند غربالگری را پشت سر گذاشته بودند، چهار شرایط برای خشک کردن انتخاب شدند (دمای ورودی ۱۱۰ و ۱۸۰ درجه سلسیوس و سرعت خوراک‌دهی ۵ و ۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه). دیگر شرایط فرایند خشک کردن مانند جریان ورودی هوای گرم (۲۴ متر مکعب بر ساعت) و سرعت جریان هوای اتمایز کننده (۷ متر مکعب بر ساعت) ثابت در نظر گرفته شد. در نهایت، پودرهای NLC تولید شده جمع‌آوری شد و در ظروف شیشه‌ای تیره سربسته و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. به این ترتیب تیمارهای این تحقیق به شکل زیر بودند:

- دمای ورودی ۱۱۰ درجه سلسیوس، دمای خروجی ۷۶ درجه و سرعت خوراک ۵ میلی‌لیتر بر دقیقه: کد ۱۱۰-۵
- دمای ورودی ۱۱۰ درجه سلسیوس، دمای خروجی ۶۲ درجه و سرعت خوراک ۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه: کد ۱۱۰-۱۵
- دمای ورودی ۱۸۰ درجه سلسیوس، دمای خروجی ۱۱۶ درجه و سرعت خوراک ۵ میلی‌لیتر بر دقیقه: کد ۱۸۰-۵
- دمای ورودی ۱۸۰ درجه سلسیوس، دمای خروجی ۹۸ درجه و سرعت خوراک ۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه: کد ۱۸۰-۱۵

## ۹-۲- بازدهی تولید پودر

بازدهی تولید پودر بصورت نسبت جرمی محصول جمع‌آوری شده نسبت به کل جرم ماده جامد موجود در خوراک محاسبه شد و به صورت درصد بیان گردید.

## ۱۰-۲- تعیین میزان کل NLC در پودر

درصد نانو ذرات چربی در پودر با ریختن پودر در ایزوپروپانول به عنوان یک حلال خوب برای تری گلیسیرید و توین ۸۰ تعیین شد. به طور خلاصه حدود ۲ گرم از پودر در یک لوله آزمایش شیشه‌ای سرپیچ دار وزن شد و دقیقاً ۲۰/۰ میلی‌لیتر ایزوپروپانول ۶۰ درجه سلسیوس اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه توسط همزن ستاره‌ای بهم زده شد. پس از آن، لوله به مدت ۵ دقیقه در ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شد. سپس ۱۰/۰ میلی‌لیتر از رومانل خارج شد و میزان ماده محلول در ایزوپروپانل (NLC) پس از

3. Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

4. Multiple Scattering Effect

5. Dynamic Light Scattering (DLS)

## ۲-۱۰- تحلیل آماری

در این تحقیق از طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. هر آزمایش حداقل با سه تکرار انجام شد و داده‌ها با روش آنالیز واریانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. پس از آن برای مشخص کردن تفاوت میانگین‌ها از آزمون تکمیلی دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ استفاده شد. برای انجام آنالیز از نرم‌افزار SPSS ویرایش ۱۶ استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- محتوای NLC پودرها

محتوای کل NLC نمونه‌های خشک شده با خشک‌کن پاششی در جدول ۱ ارائه شده است. حداکثر محتوای نانوذرات چربی در پودرها ۳۳/۷ و ۳۲/۵٪ بود که به ترتیب در نمونه‌های خشک شده در سرعت خوراک‌دهی بالاتر (۱۱۰-۱۵ و ۱۸۰-۱۵) مشاهده شد؛ درحالی‌که اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت (۰/۰۵  $p \geq$ ). مقادیر کمتر به ترتیب در نمونه‌های ۱۱۰-۵ و ۱۸۰-۵ با ۲۷/۶ درصد و ۲۳/۸ درصد محتوای کل NLC اندازه‌گیری شد (۰/۰۵  $p <$ ). دلیل بالاتر بودن میزان نانوذرات در پودرهای خشک شده در سرعت خوراک بالاتر احتمالاً به دلیل حجم بیشتر قطرات پاشش شده و عدم فرصت کافی نانوذرات برای فرار از ماتریس مالتودکسترین می‌باشد. برعکس، در سرعت جرمی خوراک کم، به دلیل دوری بیشتر قطرات، فرصت برای فرار نانوذرات چربی در جریان هوای خشک‌کن بیشتر فراهم است.

### ۳-۲- ریزساختار پودر

از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای توصیف مورفولوژی پودرهای تولید شده در شرایط مختلف خشک کردن پاششی استفاده شد (شکل ۱). کلیه نمونه‌ها از ذرات کروی توخالی با سطح صاف تشکیل شده بودند. به نظر می‌رسد که هر دو عامل میزان جریان خوراک و دمای خشک شدن، از عوامل موثر بر مورفولوژی پودرها بودند. هر دو نمونه خشک شده در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس متشکل از ذرات جدا از هم بود، در حالی که هر دو نمونه خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس متشکل از ذراتی بودند که به هم چسبیده بودند. این موضوع می‌تواند مربوط

رسیدن به وزن ثابت نگهداری شد [۴۰]. از رابطه زیر برای اندازه‌گیری درصد رطوبت استفاده شد:

$$\text{درصد رطوبت} = \frac{100 \times (\text{وزن نمونه بعد از خشک شدن} - \text{وزن نمونه قبل از خشک شدن})}{100 \times \text{وزن نمونه قبل از خشک شدن}}$$

### ۲-۹- خصوصیات فیزیکی

چگالی توده‌ای و چگالی ضربه‌ای طبق روش احمد و همکاران (۲۰۱۶) اندازه‌گیری شد [۴۱]. به منظور اندازه‌گیری چگالی توده‌ای دقیقاً ۲/۰۰ گرم از پودر وزن و به آرامی در یک استوانه مدرج ۱۰ میلی‌لیتری ریخته شده و حجم پودر قرائت شد. به منظور اندازه‌گیری چگالی ضربه‌ای همان استوانه مورد استفاده در آزمایش قبل چندین بار از ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متری روی یک سطح سخت زده شد تا به حجم ثابت برسد. این دو نوع چگالی از رابطه‌های زیر محاسبه شدند:

$$\begin{aligned} \text{ای چگالی توده} &= \frac{\text{حجم اشغال شده توسط توده پودر}}{\text{وزن پودر}} \\ \text{ای چگالی ضربه} &= \frac{\text{حجم اشغال شده توسط پودر پس از ضربه}}{\text{وزن پودر}} \\ \text{شاخص‌های نسبت هاوسنر ۶ و شاخص فشردگی کار ۷ نیز طبق روابط زیر محاسبه شدند:} \end{aligned}$$

$$\text{ای چگالی توده} \div \text{ای چگالی ضربه} = \text{نسبت هاوسنر}$$

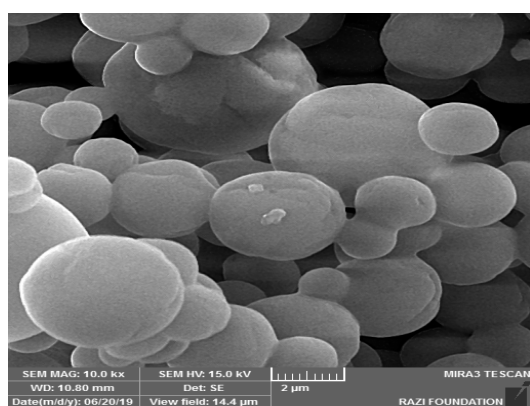
$$\begin{aligned} \text{شاخص فشردگی کار} &= \frac{100 \times ((\text{ای چگالی ضربه} \div \text{ای چگالی توده}) - 1)}{\text{زاویه قرار}^{\wedge} \text{ توسط روش قیف ثابت و طبق روش ذکر شده توسط عزتی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۵) اندازه‌گیری شد [۴۲]. بر این اساس، نمونه پودر از یک قیف (نصب شده با فاصله خروجی ۲ سانتی‌متر از سطح) روی یک سطح هموار ریخته شد تا جایی که ارتفاع توده پودر به انتهای خروجی قیف برسد. ارتفاع (۲ سانتی‌متر) و شعاع توده پودر اندازه‌گیری و زاویه قرار طبق رابطه زیر محاسبه شد:} \end{aligned}$$

$$\text{شعاع توده پودر} / \text{ارتفاع توده پودر} = \tan^{-1} = \text{زاویه قرار}$$

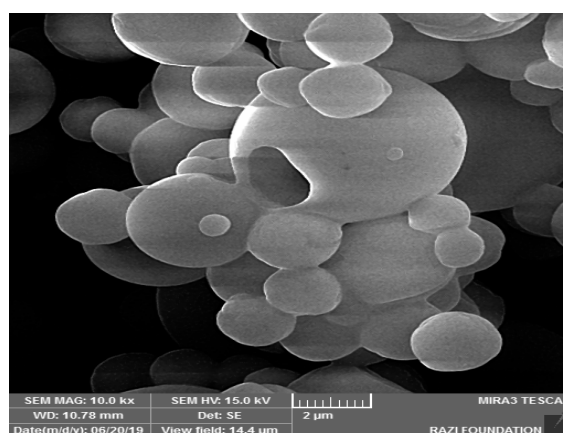
6. Hausner ratio  
7. Carr's compressibility index  
8. Angle of repose

مخلوط کلرید سدیم و کلرید پتاسیم خشک شده با پاشش توسط Chindapan و همکاران (۲۰۱۸) و مظفر و همکاران گزارش شده است [۴۰، ۴۳]. مشخص شده است که ذرات کروی توخالی هنگامی به وجود می‌آیند که سرعت تبخیر زیاد حلال در حین خشک شدن حاصل شود [۴، ۴۵]. سرعت زیاد خشک شدن باعث غلظت بالای مواد در سطح قطره کروی در حال کوچک شدن می‌شود که به نوبه خود منجر به غلظت بالای مواد تا حد اشباع می‌گردد [۴۵].

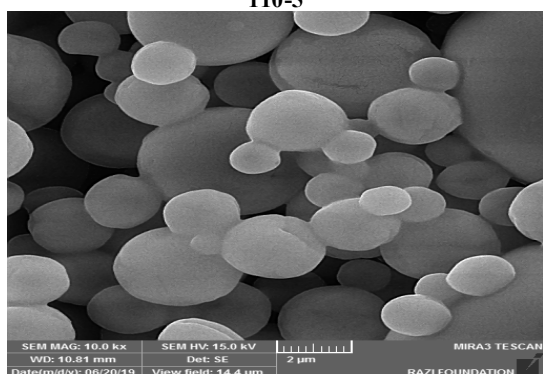
به سرعت کمتر خشک شدن در دمای پایین‌تر باشد که به قطرات زمان کافی برای خشک شدن می‌دهد تا هنگام برخورد به هم بچسبند، در حالی که این زمان در دمای بالاتر بسیار کوتاه‌تر است و بنابراین چسبندگی کمتری اتفاق می‌افتد. میزان جریان خوراک نیز بر اندازه ذرات پودرها تأثیر گذاشت، بطوری‌که سرعت خوراک بالاتر منجر به اندازه متوسط بالاتر ذرات شد. این امر در پودرهای خشک شده در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس بیشتر به چشم می‌خورد. سرعت خوراک بالاتر به طور کلی باعث بزرگتر شدن قطرات پاشش شده می‌شود. تشکیل ذرات کروی توخالی



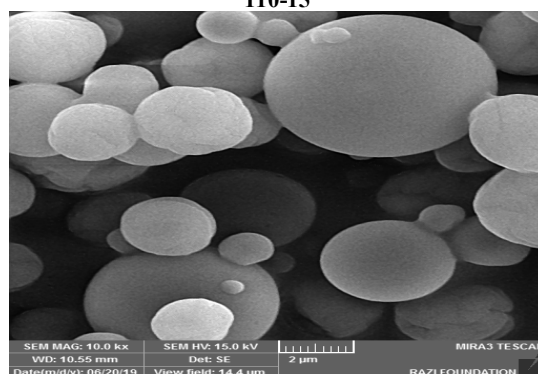
110-5



110-15



180-5



180-15

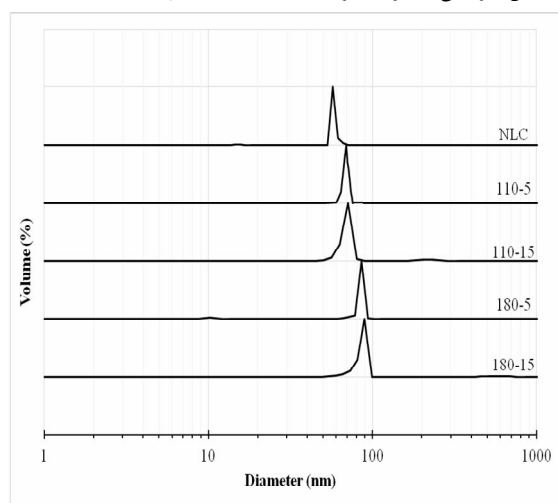
**Fig 1** The scanning electron micrographs of the NLC-Maltodextrin powders produced under different spray-drying operating conditions. The codes are representing the following conditions: **110-5** for  $T_{in}$ : 110 °C,  $T_{out}$ : 76 °C, FFR (feed flow-rate): 5 mL/min; **110-15** for  $T_{in}$ : 110 °C,  $T_{out}$ : 62 °C, FFR: 15 mL/min; **180-5** for  $T_{in}$ : 180 °C,  $T_{out}$ : 116 °C, FFR: 5 mL/min; **180-15**:  $T_{in}$ : 180 °C,  $T_{out}$ : 98 °C, FFR: 15 mL/min.

بنابراین، هدف اصلی این مطالعه خشک کردن محلول NLC با حفظ محدوده اندازه اولیه بود. از روش پراکنش نور پویا برای مشاهده هرگونه تغییر در شعاع هیدرودینامیکی ذرات قبل و بعد از خشک شدن استفاده شد. باید تأکید کرد که پودرها پس از خشک شدن برای اندازه‌گیری اندازه ذرات آنها دوباره در آب حل

### ۳-۳- توزیع اندازه NLC در پودرها

چالش اصلی در خشک کردن نانوذرات چربی، افزایش اندازه ذرات نانو در هنگام خشک شدن در نتیجه بهم‌پیوستگی و تجمع ذرات در اثر انتقال فاز ناشی از تنش گرمایی است [۱۶، ۲۹].

خشک کردن پاششی تأثیر مهمی بر اندازه و خصوصیات فیزیکوشیمیایی پودر SLN دارند [۲۹، ۴۶]. به نظر می‌رسد که سرعت خشک شدن، با افزایش اندازه و توزیع اندازه ذرات NLC، جایی که کمترین پراکندگی در نمونه ۵-۱۸۰ مشاهده شد، ارتباط زیادی دارد. خشک شدن با سرعت کم خوراک منجر به سرعت خشک شدن بالاتر می‌شود که به نوبه خود باعث سرعت بالاتر تشکیل مالتودکسترین جامد می‌گردد. ماده جامد تشکیل شده مانع از تماس ذرات چربی می‌شود و اندازه اولیه ذرات چربی را حفظ می‌کند. سرعت بالاتر خشک شدن منجر به جلوگیری از برخورد زودتر بین ذرات NLC می‌شود؛ بنابراین مکانیسم موثرتر خواهد بود. افزایش اندازه ذرات کمتر و شاخص پراکندگی کمتر در نمونه ۵-۱۱۰ در مقایسه با نمونه ۵-۱۱۰، نشان‌دهنده ارتباط سرعت خشک شدن و افزایش اندازه ذرات NLC است. مقایسه نمونه‌های ۵-۱۸۰ و ۵-۱۸۰ نیز به وضوح این رابطه را نشان می‌دهد. همچنین، هنگام مقایسه نمونه‌های ۵-۱۱۰ و ۵-۱۸۰، تأثیر مثبت دمای خشک شدن پایین و تنش گرمایی کمتر آن بر ذرات NLC مشهود است.



**Fig 2** The size distribution of NLC particles in the redispersed spray-dried NLC-Maltodextrin powders, in comparison with the original NLC dispersion. The codes are representing the following conditions:

110-5 for  $T_{in}$ : 110 °C,  $T_{out}$ : 76 °C, FFR (feed flow-rate): 5 mL/min; 110-15 for  $T_{in}$ : 110 °C,  $T_{out}$ : 62 °C, FFR: 15 mL/min; 180-5 for  $T_{in}$ : 180 °C,  $T_{out}$ : 116 °C, FFR: 5 mL/min; 180-15:  $T_{in}$ : 180 °C,  $T_{out}$ : 98 °C, FFR: 15 mL/min.

شدند. ماده دیواره‌ای مالتودکسترین بود که در آب قابل حل است و می‌تواند ذرات NLC محبوس شده را در آب آزاد کند. توزیع اندازه پودرهای محلول در شکل ۲ ارائه شده است. محلول NLC قبل از خشک کردن دو پیک مجزا را نشان داد: یک پیک کوچک با اندازه ۱۶/۴ نانومتر و یک پیک بزرگ با بیشینه ۵۷/۳ نانومتر و در بازه ۵۳-۸۲ نانومتر. پس از خشک شدن و پراکندگی مجدد، افزایش قابل توجهی در اندازه نانوذرات چربی در همه نمونه‌ها رخ داد. کمترین افزایش در نمونه ۵-۱۱۰ مشاهده شد، جایی که پیک اصلی به ۷۱/۲ نانومتر منتقل شد (در محدوده ۶۰-۸۰ نانومتر). سرعت جریان خوراک بالاتر در همان دما (۱۱۰-۱۵) منجر به افزایش بیشتر اندازه و افزایش بازه پیک اصلی شد (بیشینه ۷۱/۱ نانومتر؛ در بازه ۴۴-۱۰۱ نانومتر). افزایش دمای هوای ورودی از ۱۱۰ به ۱۸۰ درجه سلسیوس به طور قابل توجهی اندازه ذرات پودر را در نمونه‌های تغذیه شده در خشک‌کن با سرعت ورودی ۵ میلی‌لیتر در دقیقه (بیشینه ۸۹/۹ نانومتر، در بازه اندازه ۷۸-۹۴ نانومتر) یا ۱۵ میلی‌لیتر در دقیقه را افزایش داد (بیشینه ۹۳/۷ نانومتر، در بازه اندازه ۷۳-۹۹ نانومتر). به عنوان یک نتیجه‌گیری، می‌توان خاطر نشان کرد که افزایش دمای خشک‌کن به طور کلی اندازه را افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش سرعت جریان خوراک باعث افزایش پراکندگی ذرات NLC می‌شود. افزایش اندازه ذرات SLN یا NLC توسط خشک کردن پاششی در دمای بالا توسط محققین گزارش شده است [۱۶، ۲۹]. در کل، می‌توان تأکید کرد که با وجود افزایش اندازه، اندازه‌ها کاملاً کمتر از محدوده قابل قبول برای سیستم‌های SLN و یا NLC گزارش شده در منابع بود [۱۵، ۱۶، ۲۸، ۲۹]. از مواد کمک‌کننده خشک کردن برای جلوگیری از تجمع نانوذرات چربی با اشغال فضای بینابینی و جلوگیری از برخورد بین ذرات استفاده شده است [۱۱]. در میان چند مطالعه در مورد خشک کردن پاششی نانوذرات لیپیدی، استفاده موفقیت آمیز از اسید آمینه لوسین [۲۹] به عنوان ماده کمکی گزارش شده است، در حالی که بسیاری از مواد کمک‌کننده مانند مانیتول، لاکتوز، مالتوز، ساکارز و گلوکز به طور موثری از افزایش اندازه ذرات در هنگام خشک شدن جلوگیری نکردند [۲۹، ۴۲، ۴۶]. گزارش شده است که ترکیب مواد، روش آماده‌سازی و پارامترهای عملیاتی

## ۳-۴- بازده تولید پودر

بازده تولید پودر در جدول ۱ ذکر شده است. کمترین بازده (۶۷/۳٪ و ۷۲/۴٪) برای نمونه‌های خشک شده در دمای بالاتر (۱۸۰-۱۵ و ۱۸۰-۵) مشاهده شد. بین بازده و چگالی پودرها رابطه مستقیم وجود دارد. پودرهای خشک شده در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس از ذرات توخالی گسسته با تراکم کم تشکیل شده‌اند که به طور کارآمد توسط جدا کننده سیکلونی جدا نشده و در جریان هوای خشک‌کننده معلق مانده‌اند. از طرف دیگر، بیشترین بازده برای نمونه ۱۱۰-۱۵ (۶۶/۳٪) مشاهده شد که از ذرات جمع شده نسبتاً بزرگ با تراکم نسبتاً بالاتر تشکیل شده بود (بیشترین چگالی). بازده متوسط برای نمونه ۱۱۰-۵ (۵۱/۶٪) با

تراکم متوسط بدست آمد. اندازه ذرات، شکل و چگالی ذرات خشک شده توسط خشک‌کن‌های پاششی متغیرهای یک جدا کننده سیکلونی تعریف شده است که تحت شرایط عملیاتی ثابت کار می‌کند [۴۷]. بازده به دست آمده در این مطالعه تقریباً نزدیک به بالاترین مقادیر گزارش شده در منابع بود. یو و همکاران (۲۰۱۸) بازدهی بین ۲۹-۵۲ درصد را برای نانوذرات چربی جامد خشک شده با خشک‌کن پاششی را با استفاده از قندهای مختلف و اسیدآمینه لوسین به عنوان مواد کمکی گزارش کردند [۲۹]. گزارشات دیگر در بازه کمتر از ۱۰-۴۵ درصد نیز در مورد خشک کردن پاششی سیستم‌های نانوذرات چربی موجود است [۲۸].

**Table 1** The powder production yield, total NLC content, moisture content, and some physical properties of the powders spray dried at different operating conditions.

Spray drying condition	Moisture content (%)	Yield (%)	Total NLC in powder (%)	Bulk Density (g/mL)	Tapped Density (g/mL)	Angle of Repose (°)	Hausner Ratio (Dt/Db)	Carr's index (%)
<b>110-5**</b>	3.9 ± 0.02 <sup>c*</sup>	51.6 ± 3.4 <sup>c</sup>	27.6 ± 1.1 <sup>b</sup>	0.35 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.42 ± 0.01 <sup>c</sup>	31.5 ± 0.1 <sup>a</sup>	1.19 ± 0.01 <sup>a</sup>	16.00 ± 1.26 <sup>a</sup>
<b>110-15</b>	4.1 ± 0.04 <sup>d</sup>	66.3 ± 2.8 <sup>d</sup>	32.5 ± 1.3 <sup>c</sup>	0.38 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.45 ± 0.00 <sup>d</sup>	42.0 ± 2.1 <sup>b</sup>	1.19 ± 0.02 <sup>a</sup>	16.09 ± 1.12 <sup>a</sup>
<b>180-5</b>	2.6 ± 0.03 <sup>a</sup>	42.4 ± 3.9 <sup>a</sup>	23.8 ± 0.7 <sup>a</sup>	0.24 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>a</sup>	31.0 ± 1.3 <sup>a</sup>	1.21 ± 0.02 <sup>a</sup>	17.14 ± 1.84 <sup>a</sup>
<b>180-15</b>	2.9 ± 0.01 <sup>b</sup>	46.3 ± 3.3 <sup>b</sup>	33.7 ± 1.5 <sup>c</sup>	0.31 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.37 ± 0.01 <sup>b</sup>	39.0 ± 0.4 <sup>b</sup>	1.19 ± 0.01 <sup>a</sup>	15.63 ± 1.36 <sup>a</sup>

\* Values with different letters in each column indicate significant difference ( $p < 0.05$ ). The values represent the mean of at least three replicates ± standard deviation.

\*\* The codes are representing the following conditions of the spray drier operation:

110-5 for  $T_{in}$ : 110 °C,  $T_{out}$ : 76 °C, FFR (feed flow-rate): 5 mL/min; 110-15 for  $T_{in}$ : 110 °C,  $T_{out}$ : 62 °C, FFR: 15 mL/min; 180-5 for  $T_{in}$ : 180 °C,  $T_{out}$ : 116 °C, FFR: 5 mL/min; 180-15:  $T_{in}$ : 180 °C,  $T_{out}$ : 98 °C, FFR: 15 mL/min.

## ۳-۵- محتوای رطوبت پودرها

تأثیر دمای هوای ورودی و میزان جریان خوراک بر میزان رطوبت پودرها در جدول ۱ ذکر شده است که از ۲/۶ تا ۴/۱ درصد متغیر بود. با افزایش دمای هوای ورودی از ۱۱۰ به ۱۸۰ درجه سلسیوس، میزان رطوبت از ۳/۹ به ۲/۶ درصد (در ۵ میلی‌لیتر در دقیقه جریان خوراک) و از ۴/۱ به ۲/۹ درصد (در میزان ۱۵ میلی‌لیتر در دقیقه جریان خوراک) کاهش یافت. محتوای رطوبت پودرها با افزایش دما کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش سرعت جریان خوراک از ۵ به ۱۵ میلی‌لیتر در دقیقه باعث افزایش رطوبت پودرها شد ( $p < 0.05$ ; جدول ۱). نتایج مشابه توسط محققین در مورد افزایش دمای هوای ورودی (از ۱۴۰ به ۱۸۰ درجه سلسیوس) و میزان جریان خوراک (از ۳ به ۹ میلی‌لیتر در دقیقه) برای پودرهای نمکی خشک شده با خشک‌کن

پاششی گزارش شده است [۴۰]. افزایش دمای ورودی باعث ایجاد اختلاف دمای بالاتر بین هوای خشک کننده و خوراک می‌شود. این امر انرژی بیشتر و نیروی محرکه بیشتری برای تبخیر رطوبت فراهم می‌کند که منجر به کاهش سریعتر و بیشتر آب و در نتیجه رطوبت کمتر باقیمانده در محصول می‌شود [۴۸]. همچنین، افزایش دمای ورودی منجر به گرانی‌تر پائین‌تر قطرات سیال در مقایسه با نمونه‌های تحت دمای ورودی پائین‌تر می‌شود. گرانی‌تر پائین‌تر قطرات سیال باعث ایجاد قطره‌های کوچکتر و خشک شدن سریعتر و در نتیجه رطوبت کمتری می‌شود [۴۰].

سرعت جریان بالاتر خوراک به طور کلی تولید ذراتی با رطوبت بالاتر می‌شود، زیرا سرعت جریان خوراک بالاتر به معنی افزایش میزان آب ورودی به خشک‌کن می‌باشد، که به نوبه خود به انرژی بیشتری برای تبخیر نیاز دارد [۴۰]. بنابراین، زمان تماس کوتاه‌تری بین هوای خشک کننده و خوراک رخ می‌دهد که نتیجه



مطالعه تا ۱۷/۱۴ درصد بود که اختلاف آماری معنی داری بین مقادیر مشاهده نشد ( $p > 0/05$ ). این عدد نشان دهنده جریان پذیری خوب برای همه پودرهای تولید شده در دمای ورودی متفاوت یا سرعت جریان خوراک است.

نسبت هاوسنر پارامتر دیگری است که جریان پذیری یک پودر را نشان می‌دهد و با تقسیم چگالی ضربه‌ای بر چگالی توده‌ای محاسبه می‌شود. دامنه‌های نسبت هاوسنر به شرح زیر است: ۱/۰۰-۱/۱۱ (جریان پذیری عالی)، ۱/۱۲-۱/۱۸ (جریان پذیری خوب)، ۱/۱۹-۱/۲۵ (جریان پذیری متوسط)، ۱/۲۶-۱/۳۴ (ممکن)، ۱/۳۵-۱/۴۵ (ضعیف) و ۱/۴۶-۱/۵۹ (جریان پذیری بسیار ضعیف) [۵۰]. با توجه به مقادیر نشان داده شده در جدول ۱، تفاوت معنی‌داری بین تمام پودرهای مالتودکسترین NLC مشاهده نشد و همه نمونه‌ها جریان‌پذیری مناسبی را نشان دادند.

زاویه قرار بیانگر خصوصیات جریان یک پودر است و به عنوان زاویه‌ای تعریف می‌شود که توده مخروطی شکل پودر بوجود آمده در اثر ریخته شدن تحت نیروی جاذبه، با خط افق ایجاد می‌کند. زاویه قرار به اصطکاک بین ذرات یا مقاومت در برابر حرکت بین ذرات مربوط است [۵۱]. در مطالعه حاضر، زاویه قرار اندازه‌گیری شده ۳۱ درجه تا ۴۲ درجه بود. اندازه ذرات، شکل، تخلخل، انسجام، سیالیت، سطح و تراکم فله خصوصیات هستند که می‌توانند بر زاویه قرار یک پودر تأثیر بگذارد [۵۱]. پودرهایی با قابلیت جریان پذیری آزاد دارای زاویه‌قرار کمتر از ۳۵ درجه هستند، درحالی‌که زاویه‌های ۳۵-۴۵ درجه کاهش جریان پذیری چسبندگی را نشان می‌دهد، ۴۵-۵۵ درجه کاهش جریان پذیری آزاد یا چسبندگی بیشتر را نشان می‌دهد و زاویه‌های بیشتر از ۵۵ درجه جریان صفر (چسبندگی بسیار بالا) را نشان می‌دهد [۴۷]. بر اساس این طبقه بندی، نمونه‌های مشخص شده در این مطالعه در دسته پودرهای با قابلیت جریان آزاد (۵-۱۱۰ و ۵-۱۸۰) تا پودرهای تا حدی چسبنده (۱۱۰-۱۵ و ۱۵-۱۸۰) قرار می‌گیرند.

#### ۴- نتیجه گیری کلی

پودرهای NLC خشک شده با خشک‌کن پاششی با استفاده از مالتودکسترین با موفقیت و بازده قابل قبول تولید شدند. کارایی محافظتی بسیار خوب مالتودکسترین در برابر جلوگیری از

آن راندمان پایین‌تر انتقال گرما و کاهش تبخیر آب است [۴۰]. رطوبت باقیمانده در پودر بر بسیاری از خصوصیات تکنولوژیکی پودر مانند چگالی، حلالیت و خیس شوندگی تأثیر می‌گذارد [۴۸].

#### ۳-۶- خصوصیات فیزیکی

چگالی توده‌ای و چگالی ضربه‌ای نمونه‌های خشک شده با خشک‌کن پاششی در جدول ۱ ارائه شده است که به ترتیب از ۰/۲۴ تا ۰/۴۳ و از ۰/۲۹ تا ۰/۴۵ گرم در میلی‌لیتر متغیر بودند. افزایش سرعت خوراک‌دهی باعث افزایش چگالی شد، در حالی‌که افزایش دما باعث کاهش تراکم پودرها گردید. مشخص شده است که چگالی توده‌ای پودرها تحت تأثیر حجم کل فضاهای خالی است که تابعی از شکل هندسی ذرات، اندازه ذرات، و توزیع اندازه ذرات می‌باشد [۴۹]. تغییر در مقدار چگالی ضربه‌ای مربوط به بازآرایی ذرات پودر است. با ضربه زدن به پودر، ذرات خود را مرتب کرده و فضای خالی موجود در بستر پودر را پر می‌کنند و در نتیجه نزدیکی بیشتر ذرات انجام می‌شود [۴۹]. مشخص شده است که ذرات کروی توخالی هنگامی به وجود می‌آیند که سرعت تبخیر زیاد حلال در حین خشک شدن حاصل شود [۴۴، ۴۵]. سرعت خشک شدن زیاد باعث غلظت بالای مواد در سطح قطره کروی در حال خشک شدن می‌شود. احتمالاً ذرات تشکیل شده در دمای بالاتر به دلیل خشک شدن سریع‌تر، دیواره‌ای نازک‌تر اما فشرده‌تر نسبت به ذرات تشکیل شده در دماهای پایین‌تر دارند.

مقادیر شاخص فشرده‌سازی کار و نسبت هاوسنر در جدول ۱ مشخص شده است. شاخص کار تمایل یک پودر به متراکم و کلوخه شدن را نشان می‌دهد. هنگامی که مقادیر چگالی توده‌ای و ضربه‌ای نزدیک باشند، مقادیر کوچکی برای این شاخص بدست می‌آید و این بدان معنی است که جریان پذیری پودرها خوب است. اما مقادیر بزرگتر شاخص کار در پودرهای با قابلیت جریان‌پذیری کم و در نتیجه اختلاف بیشتر بین چگالی توده‌ای و ضربه‌ای پودر بدست می‌آید. طبق نظر لوئیس (۱۹۹۶) [۵۰]، محدوده‌های شاخص کار مرتبط با جریان‌پذیری پودرها به این صورت دسته‌بندی می‌گردد: ۰-۱۰ (جریان پذیری عالی)، ۱۵-۱۰ (خوب)، ۲۰-۱۶ (متوسط)، ۲۱-۲۵ (ممکن)، و ۲۶-۳۱ (جریان پذیری ضعیف). مقادیر بدست آمده برای شاخص کار در این

- using lipid based delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*, 23(1): 13-27.
- [7] Mishra, V., Bansal, K. K., Verma, A., Yadav, N., Thakur, S., Sudhakar, K., Rosenholm, J. M. 2018. Solid Lipid Nanoparticles: Emerging Colloidal Nano Drug Delivery Systems. *Pharmaceutics*, 10(4): 1-21.
- [8] Tamjidi, F., Shahedi, M., Varshosaz, J., Nasirpour, A. 2013. Nanostructured lipid carriers (NLC): A potential delivery system for bioactive food molecules. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19: 29-43.
- [9] Salvi, V. R., Pawar, P. 2019. Nanostructured lipid carriers (NLC) system: A novel drug targeting carrier. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 51: 255-267.
- [10] Huang, J., Wang, Q., Li, T., Xia, N., Xia, Q. 2017. Nanostructured lipid carrier (NLC) as a strategy for encapsulation of quercetin and linseed oil: Preparation and in vitro characterization studies. *Journal of Food Engineering*, 215: 1-12.
- [11] Babazadeh, A., Ghanbarzadeh, B., Hamishehkar, H. 2016. Novel nanostructured lipid carriers as a promising food grade delivery system for rutin. *Journal of Functional Foods*, 26: 167-175.
- [12] Kharat, M., McClements, D. J. 2019. Recent advances in colloidal delivery systems for nutraceuticals: A case study – Delivery by Design of curcumin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 557: 506-518.
- [13] Rabelo, R. S., Oliveira, I. F., da Silva, V. M., Prata, A. S., Hubinger, M. D. 2018. Chitosan coated nanostructured lipid carriers (NLCs) for loading Vitamin D: A physical stability study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119: 902-912.
- [14] Bashiri, S., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A., Dehghannya, J., Ehsani, A. 2020. Preparation and characterization of chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CH-NLC) containing cinnamon essential oil for enriching milk and anti-oxidant activity. *LWT*, 119: 108836.
- [15] Ali, M. E., Lamprecht, A. 2017. Spray freeze drying as an alternative technique for lyophilization of polymeric and lipid-based nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 516(1): 170-177.

بهم پیوستگی و تجمع ذرات NLC در طی خشک شدن پاششی مشاهده شد و اندازه‌ها کاملاً کمتر از حد اندازه قابل قبول سیستم‌های NLC یا SLN بودند. مالتودکسترین به عنوان حاملی کارآمد برای ذرات NLC عمل کرد، بطوریکه پودرها حاوی حدود ۳۳٪ NLC بودند. علاوه بر این، پودرها جریان پذیری خوبی از خود نشان دادند که کاربرد آنها را تسهیل می‌کند. با توجه به ایمنی و کاربرد متنوع مالتودکسترین‌ها و پتانسیل بالای سیستم‌های NLC برای بارگذاری و ریزپوشانی ترکیبات چربی‌دوست در زمینه‌های مختلف، نتایج این مطالعه پتانسیل خوبی برای تولید پودر NLC حاوی ترکیبات مختلف را نشان می‌دهد.

## ۵- تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل از قسمتی از نتایج به‌دست آمده از رساله دکتری انجام شده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج می‌باشد.

## ۶- منابع

- [1] Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S., Bugarski, B. 2011. An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia Food Science*, 1: 1806-1815.
- [2] McClements, D. J. 2017. Designing biopolymer microgels to encapsulate, protect and deliver bioactive components: Physicochemical aspects. *Advances in Colloid and Interface Science*, 240: 31-59.
- [3] McClements, D. J. 2018. Encapsulation, protection, and delivery of bioactive proteins and peptides using nanoparticle and microparticle systems: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 253: 1-22.
- [4] Kharat, M., McClements, D. J. 2019. Fabrication and characterization of nanostructured lipid carriers (NLC) using a plant-based emulsifier: Quillaja saponin. *Food Research International*, 126: 108601.
- [5] Steiner, B. M., McClements, D. J., Davidov-Pardo, G. 2018. Encapsulation systems for lutein: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 82: 71-81.
- [6] Fathi, M., Mozafari, M. R., Mohebbi, M. 201. Nanoencapsulation of food ingredients

- [25] Anandharamakrishnan, C., Ishwarya, P., Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation, John Wiley & Sons, Ltd 2015.
- [26] Bayram, Ö. A., Bayram, M., Tekin, A. R. 2005. Spray drying of sumac flavour using sodium chloride, sucrose, glucose and starch as carriers. *Journal of Food Engineering*, 69(2): 253-260.
- [27] Chávez, B. E., Ledebøer, A. M. 2007. Drying of Probiotics: Optimization of Formulation and Process to Enhance Storage Survival. *Drying Technology*, 25(7-8): 1193-1201.
- [28] Freitas, C., Müller, R. H. 1998. Spray-drying of solid lipid nanoparticles (SLNTM). *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 46(2): 145-151.
- [29] Yue-Xing, C., Fei-Fei, Y., Han, W., Tao-Tao, F., Chun-Yu, L., Li-Hui, Q., Yong-Hong, L. 2018. The effect of l-leucine on the stabilization and inhalability of spray-dried solid lipid nanoparticles for pulmonary drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 46: 474-481.
- [30] Wang, T., Hu, Q., Zhou, M., Xia, Y., Nieh, M. P., Luo, Y. 2016. Development of "all natural" layer-by-layer redispersible solid lipid nanoparticles by nano spray drying technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 107: 273-285.
- [31] Gaspar, D. P., Serra, C., Lino, P. R., Goncalves, L., Taboada, P., Remunan-Lopez, C., Almeida, A. J. 2017. Microencapsulated SLN: An innovative strategy for pulmonary protein delivery. *International Journal of Pharmaceutics*, 516(1-2): 231-246.
- [32] DeMan, J. M., Principles of Food Chemistry, Springer 1999.
- [33] Oberoi, D. P. S., Sogi, D. S. 2015. Effect of drying methods and maltodextrin concentration on pigment content of watermelon juice powder. *Journal of Food Engineering*, 165: 172-178.
- [34] Caliskan, G., Nur Dirim, S. 2013. The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. *Food and Bioprocess Processing*, 91(4): 539-548.
- [35] Fongin, S., Alvino Granados, A. E., Harnkarnsujarit, N., Hagura, Y., Kawai, K. 2019. Effects of maltodextrin and pulp on the water sorption, glass transition, and caking
- [16] Salminen, H., Ankenbrand, J., Zeeb, B., Badolato Bonisch, G., Schafer, C., Kohlus, R., Weiss, J. 2019. Influence of spray drying on the stability of food-grade solid lipid nanoparticles. *Food Research International*, 119: 741-750.
- [17] Campos, D. A., Madureira, A. R., Sarmiento, B., Pintado, M. M., Gomes, A. M. 2017. Technological stability of solid lipid nanoparticles loaded with phenolic compounds: Drying process and stability along storage. *Journal of Food Engineering*, 196: 1-10.
- [18] Schwarz, C., Mehnert, W. 1997. Freeze-drying of drug-free and drug-loaded solid lipid nanoparticles (SLN). *International Journal of Pharmaceutics*, 157(2): 1.۱۷۹-۷۱
- [19] Shahgaldian, P., Gualbert, J., Aïssa, K. s., Coleman, A. W. 2003. A study of the freeze-drying conditions of calixarene based solid lipid nanoparticles. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 55(2): 181-184.
- [20] Zimmermann, E., Müller, R. H., Mäder, K. 2000. Influence of different parameters on reconstitution of lyophilized SLN. *International Journal of Pharmaceutics*, 196(2): 211-213.
- [21] Olufemi, B., G.O, P., Towobola, O., Olanrewaju, A. 2012. Operational characterization of a spray dryer for drying water, caustic soda and sodium chloride solutions. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(2): 222-227.
- [22] Selvamuthukumar, M., Tranchant, C., Shi, J., Spraying drying concept, application, and its recent advances in food processing in: M. Selvamuthukumar (Ed.) *Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries*, CRC Press, Boca Raton, 2019.
- [23] Haque, M. A., Timilsena, Y. P., Adhikari, B., Spray drying, in: P.K. Nema, B.P. Kaur, A.S. Mujumdar (Eds.) *Drying Technologies for Foods: Fundamentals & Applications*, New India Publishing Agency, India, 2015, pp. 79-106.
- [24] Fang, Z., Bhandari, B., Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation, in: N. Garti, D.J. McClements (Eds.) *Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals*, Woodhead Publishing 2012, pp. 73-109.

- spray-drying and using sodium chloride as the excipient. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*: 102212.
- [44] Hadinoto, K., Phanapavudhikul, P., Kewu, Z., Tan, R. B. 2007. Dry powder aerosol delivery of large hollow nanoparticulate aggregates as prospective carriers of nanoparticulate drugs: effects of phospholipids. *International Journal of Pharmaceutics*, 333(1-2): 187-198.
- [45] Vehring, R. ۲۰۰۸ Pharmaceutical particle engineering via spray drying. *Pharmaceutical Research*, 25(5): 999-1022.
- [46] Nemati, E., Mokhtarzadeh, A., Panahi-Azar, V., Mohammadi, A., Hamishehkar, H., Mesgari-Abbasi, M., Ezzati Nazhad Dolatabadi, J., de la Guardia, M. 2019. Ethambutol-Loaded Solid Lipid Nanoparticles as Dry Powder Inhalable Formulation for Tuberculosis Therapy. *AAPS PharmSciTech*, 20(3): 120.
- [47] Grandison, A. S., Lewis, M. J., Separation processes - An overview, in: A.S. Grandison, M.J. Lewis (Eds.) *Separation Processes in the Food and Biotechnology Industries*, Woodhead Publishing 1996, pp. 1-16.
- [48] Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi-Ashtari, A., Omid, M. 2012. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 90: 667-675.
- [49] Saw, H. Y., Davies, C., Paterson, A., Jones, J., The influence of particle size distribution and tapping on the bulk density of milled lactose powders, *ChemecaBrisbane*, Australia, 2013.
- [50] Lewis, M. J., Solids separation processes, in: A.S. Grandison, M.J. Lewis (Eds.) *Separation Processes in the Food and Biotechnology Industries*, Woodhead Publishing 1996, pp. 243-286.
- [51] Zatloukal, Z., Šklubalová, Z. 2008. Drained Angle of Free-Flowable Powders. *Particulate Science and Technology*, 26(6): 595-607.
- properties of freeze-dried mango powder. *Journal of Food Engineering*, 247: 95-103.
- [36] Pai, D. A., Vangala, V. R., Ng, J. W., Ng, W. K., Tan, R. B. H. 2015. Resistant maltodextrin as a shell material for encapsulation of naringin: Production and physicochemical characterization. *Journal of Food Engineering*, 161: 68-74.
- [37] Vélez-Erazo, E. M., Consoli, L., Hubinger, M. D. 2020. Spray drying of mono- and double-layer emulsions of PUFA-rich vegetable oil homogenized by ultrasound. *Drying Technology*: 1-14.
- [38] Liu, X.-D., Atarashi, T., Furuta, T., Yoshii, H., Aishima, S., Ohkawara, M., Linko, P. 2001. Microencapsulation of emulsified hydrophobic flavors by spray drying. *Drying Technology*, 19(7): 1361-1374.
- [39] Luo, Y., Teng, Z., Li, Y., Wang, Q. 2015. Solid lipid nanoparticles for oral drug delivery: Chitosan coating improves stability, controlled delivery, muco adhesion and cellular uptake *Carbohydrate Polymers*, 122 221-229.
- [40] Chindapan, N., Niamnuy, C., Devahastin, S. 2018. Physical properties, morphology and saltiness of salt particles as affected by spray drying conditions and potassium chloride substitution. *Powder Technology*, 326: 265-271.
- [41] Ahmad, Z., Nurul Nadhirah, R., Rozyanty, A. R., Nawawi, W. I., Norhanani, A. 2016. Crystallinity, Tapping and Bulk Density of Microcrystalline Cellulose (MCC) Isolated from Rice Husk (RH). *Applied Mechanics and Materials*, 835: 272-276.
- [42] Ezzati Nazhad Dolatabadi, J., Hamishehkar, H., Valizadeh, H. 2015. Development of dry powder inhaler formulation loaded with alendronate solid lipid nanoparticles: solid-state characterization and aerosol dispersion performance. *Drug Delivery and Industrial Pharmacy*, 41(9): 1431-1437.
- [43] Mozaffar, S., Radi, M., Amiri, S., McClements, D. J. 2020. A new approach for drying of nanostructured lipid carriers (NLC) by



## The spray-drying of nanostructured lipid carriers (NLC) using maltodextrin as the excipient

Mozaffar, Sh.<sup>1</sup>, Radi, M.<sup>1,2\*</sup>, Amiri, S.<sup>1,2\*</sup>

1. Department of Food Science and Technology, Yasooj Branch, Islamic Azad University, Yasooj, Iran.  
2. Young Researchers and Elite Club, Yasooj Branch, Islamic Azad University, Yasooj, Iran.

### ABSTRACT

The NLCs are potent carriers for lipophilic bioactive compounds. In this study, the NLC:maltodextrin (6:10) solution at the inlet temperatures of 110 or 180 °C, and the feed flow rate of 5 or 15 mL/min was spray-dried and the powders characteristics were evaluated. The SEM micrographs showed the particle morphologies of hollow spheroids with smooth surfaces. The powder production yields as high as 66% was achieved. The sizes of NLC particles after the redispersion of the spray-dried powders shifted to higher amounts [from 57.3 nm (in the biggest size before drying) to 93.7 nm (in the biggest size after drying)], but were below the acceptable size of NLC systems. The measurement of flowability indices such as Carr's compressibility index (in average 16.21), Hausner ratio (in average 1.20), and angle of repose (31-42°) showed that the samples were categorized as the powders with good flowability. The results of this study revealed that NLC systems can be successfully spray-dried by using maltodextrin as the excipient without any drastic changes in the particle size.

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2021/03/02  
Accepted 2021/05/02

#### Keywords:

Nanostructured lipid carrier, NLC, Spray-drying, Maltodextrin, Lipid nanoparticles, Encapsulation.

**DOI: 10.52547/fst.18.116.1**

\*Corresponding Author E-Mail:  
[m.radi@iauyasooj.ac.ir](mailto:m.radi@iauyasooj.ac.ir)  
[s.amiri@iauyasooj.ac.ir](mailto:s.amiri@iauyasooj.ac.ir)