

Enrichment of Milk powder with encapsulated conjugated linoleic acid (CLA) by Spray dryer and evaluation of its properties

Bahram Fathi-Achachlouei^{1✉}, Hakimeh Rezaei jafarloo², Hossein Abdi-Benemar³, Rezvan Shaddel¹

¹Professor and Associate Professor, respectively, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

²MSc of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

³Professor, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture and Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

✉ Corresponding author: b_fathi@uma.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article history:

Received:

January 17, 2024

Accepted:

December 22, 2024

Published:

Jan 4, 2025

Keywords:

Conjugated linoleic acid, Milk Powder, Spray Dryer, Xanthan gum, Whey protein and Maltodextrin

ABSTRACT

Background: Encapsulation serves as a technique for the delivery of bioactive compounds while enhancing their sensory attributes. For instance, the encapsulation of delicate oils within thin layers effectively inhibits oxidation resulting from moisture, metal ions, oxygen, and heat exposure. Additionally, a range of methods is employed in the encapsulation of fatty acids, such as conjugated linoleic acid. Two commercial processes used in this field are the use of spray drying technique and combined coacervation. Additional methodologies include extrusion coating and encapsulation within nanoliposomes. A critical factor influencing each of these processes is the selection of wall material.

Aims: The objective of this study is to develop nanocapsules utilizing various wall materials for conjugated linoleic acid, subsequently incorporating these nanocapsules into milk powder, and assessing the properties of the enriched milk powder.

Methods: In this research, 4 different treatments including: 1- xanthan gum and maltodextrin, 2- xanthan gum and whey protein, 3- guar gum and maltodextrin, and 4- guar gum and whey protein were used as wall materials. After drying the primary emulsions and milk (1/5% Fat) separately, the milk powder was enriched with nanocapsules powder. Some physicochemical characteristics of enriched milk powder including protein, fat, moisture, solubility and morphology were evaluated.

Results: The results showed that the performance of the spray dryer was about 50%. The highest CLA content and encapsulation efficiency were related to the xanthan-whey protein (19.21%). The results of the evaluation of particle size and morphology indicated that in all treatments, the particle size was within the nanometer range, and the form of the nanocapsules was spherical and their surface had some cracks. The results of evaluating the characteristics of milk powder enriched with CLA showed that the samples of enriched milk powder were not significantly different from each other in terms of solubility (99%) and moisture content (2.33- 2.98%). However, there was a significant difference in the amount of fat and protein. The highest amount of protein was related to the treatment of CLA encapsulated in whey protein-xanthan (12.83%). Also, the treatment containing xanthan-whey protein had the highest amount of fat among all treatments.

Conclusion: According to the tests examined in this research, it can be concluded that all treatments had good performance and can be used for the encapsulating of fatty acids, vitamins, oils and flavors, but the xanthan-whey protein had better characteristics than the other treatments and was more suitable for encapsulation.



Extended Abstract

Introduction: Encapsulation is a process to entrap active agents within a carrier material and it is a useful tool to improve the delivery of bioactive molecules and living cells into foods. Materials used for the design of the protective shell of encapsulates must be food-grade, biodegradable and able to form a barrier between the internal phase and its surroundings. Among all materials, the most widely used for encapsulation in food applications are polysaccharides. Proteins and lipids are also appropriate for encapsulation (Nedovic et al., 2011). The health benefits of omega-3 fatty acids are substantiated through extensive and rigorous in vivo studies. A wide range of investigations indicate that omega-3 fatty acids are essential not only for normal growth and development but also for their positive effects on the heart, brain, eyes, joints, skin, mood and behavior (Kaushik et al., 2015). Omega-3 fatty acids are also implicated in the prevention of coronary artery disease, hypertension, diabetes, arthritis, other inflammatory and autoimmune disorders, and cancer. Many studies encourage the adequate intake of omega-3 fatty acids by pregnant and lactating women to support overall health of fetus and the healthy development of the retina and brain in the fetus (Kaushik et al., 2015). Some studies argue that the claimed health benefits of omega-3 fatty acids are inconclusive, particularly with regard to cardiovascular events, cancer, cognitive health and slowing down age-related macular degeneration (AMD). Desired levels of omega-3 fatty acids in diets can be achieved by including various foods enriched with omega-3 PUFA. Although a variety of food products enriched with omega-3 fatty acids are available in the market, there are technical challenges in their production, transportation, storage, bioavailability and sensory acceptability (Kaushik et al., 2015). The physical and chemical characteristics of omega-3 oils limit their application as a potential food ingredient. Due to the highly unsaturated nature of omega-3 fatty acids such as CLA, these are susceptible to oxidation and readily produce hydroperoxides, off-flavours and odours,

which are deemed undesirable by consumers. To overcome the above-mentioned problems, the use of microencapsulation technology has been explored by various researchers (Kaushik et al., 2015). Omega-3 fatty acids have been microencapsulated using different encapsulation techniques. So far, spray drying, complex coacervation and extrusion are the most commonly used commercial techniques for microencapsulation of omega-3 fatty acids. Spray drying offers many advantages over other drying methods such as freeze drying, including low operational cost, the ability to handle heat-sensitive materials, readily available machinery and reliable operation, and the ability to control the mean particle size of the powders for spray dried emulsions. However, only limited numbers of wall materials are compatible with this technology (Kaushik et al., 2015). The spray drying technique is considered an immobilization technology rather than an encapsulation technology because some bioactive compounds can be exposed superficially on microparticles. In addition to the simplicity of spray drying, this technique is also convenient for encapsulating heat-sensitive materials because the exposure time to elevated temperatures is short (5–30 s) (Rigolon et al. 2024). For the microcapsules to be formed, there is a need to use encapsulating materials, with polysaccharides being the most used for this purpose. The polysaccharides used have desirable properties such as low viscosity, high solid content, good solubility, and are readily available, biocompatible, and can form bonds with flavor compounds, exist in great diversity, have low cost and low toxicity (Rigolon et al. 2024). In a recent study, the potential of a maltodextrin combination with different wall materials (starch, whey protein concentrate, and gum arabic) for the microencapsulation of flaxseed oil through spray drying was evaluated. Results indicated that maltodextrin (MD) in combination with modified starches gave the best encapsulation efficiency in comparison to a gum arabic and whey protein concentrate (WPC) combination, whereas the best emulsion stability and oxidation

protection was observed in the MD–WPC combination (Kaushik et al., 2015). The results of Gohari et al., (2024) indicated that nanocomplexes (NCs) were synthesized based on the principles of electrostatic complexation, utilizing sodium caseinate (NaCa), gum Arabic (GA), and gum exudates from *Prunus armeniaca* L. (PAGE) to encapsulate conjugated linoleic acid (CLA). The encapsulation process was optimized by varying the concentrations of NaCa (0.1%–0.5%), GA/PAGE (0.1%–0.9%), and CLA (1%–5%), with a central composite design (CCD) applied for numerical optimization. The optimal formulation for the nanocomplex containing gum Arabic (NCGA) was determined to be 0.336%, 0.437%, and 3.10% for NaCa, GA/PAGE, and CLA, respectively. In contrast, the optimal formulation for the nanocomplex containing PAGE (NCPAGE) was found to be 0.403%, 0.730%, and 4.177% for NaCa, GA/PAGE, and CLA, respectively. The encapsulation efficiency (EE) and particle size were measured at 92.46% and 52.89 nm for NCGA, while NCPAGE exhibited an EE of 88.23% and a particle size of 54.76 nm. The conjugated linoleic acid (CLA) present in NCGA-CLA and NCPAGE-CLA demonstrated superior oxidative stability compared to free CLA over a 30-day storage period, with no significant differences observed in the oxidative stability test results for the nanocarriers. The Azari et al., (2024) in a recent research were focused on the development of enriched buttermilk characterized by stable physicochemical properties through the process of complex coacervation. To mitigate the natural instability of oils within liquid matrices, microcapsules were formulated utilizing sodium alginate and xanthan gum, with optimization conducted via the response surface methodology (RSM). The buttermilk was enriched at optimal concentrations of 0%, 0.04%, 0.07%, and 0.1%, followed by incubation at 48 °C for a duration of 42 days. The optimized conditions revealed that the selection and amount of gums employed for enrichment had a significant impact on the properties of the enriched buttermilk. Notably,

a reduction in pH accompanied by an increase in acidity resulted in improved viscosity of the buttermilk. The flow characteristics of the buttermilk displayed pseudoplastic behavior. Enrichment led to an increase in particle size, while only slight alterations were observed in odor, taste, and color, with the buttermilk remaining free from protein aggregates. Chromatographic analysis indicated a rise in unsaturated fatty acids post-enrichment. In conclusion, this study illustrates the potential for producing nutritionally enhanced buttermilk that possesses high stability and favorable sensory attributes. Spray drying is the most extensively applied encapsulation technique in the food industry because it is flexible, continuous, but more important an economical operation. The purpose of this research is to investigate the production of nanocapsules containing different wall materials for conjugated linoleic acid, and then enrich milk powder with them and evaluation of its properties.

Material and methods: In this research, 4 different treatments including: 1- xanthan gum and maltodextrin, 2- xanthan gum and whey protein, 3- guar gum and maltodextrin, and 4- guar gum and whey protein were used as wall materials. After drying the primary emulsions and milk (1/5% Fat) separately, the milk powder was enriched with nanocapsules powder. Some physicochemical characteristics of enriched milk powder including protein, fat, moisture, solubility and morphology were evaluated.

Results and discussion: The results showed that the performance of the spray dryer was about 50%. The highest CLA content and encapsulation efficiency were related to the xanthan- whey protein (19.21%). The results of the evaluation of particle size and morphology indicated that in all treatments, the particle size was within the nanometer range, and the form of the nanocapsules was spherical and their surface had some cracks. The results of evaluating the characteristics of milk powder enriched with CLA showed that the samples of enriched milk powder were not significantly different from each other in terms of solubility (99%) and moisture content (2.33-

2.98%). However, there was a significant difference in the amount of fat and protein. The highest amount of protein was related to the treatment of CLA encapsulated in whey protein-xanthan (12.83%). Also, the treatment containing xanthan-whey protein had the highest amount of fat among all treatments. The results of fatty acid profile indicated that the fattiest acids detected in enriched milk powder were saturated, monounsaturated and polyunsaturated fatty acids, respectively. Linoleic acid and α -linolenic acid are recognized as the sole essential fatty acids (EFAs) required by the human body. The omega-6 and omega-3 fatty acids are derived from linoleic acid and α -linolenic acid, respectively, through biological processes such as elongation and desaturation. In dietary patterns characterized by low fish intake or vegetarianism, these fatty acids are vital for supplying two important fatty acids—docosahexaenoic acid and arachidonic acid—necessary for the maintenance of essential bodily functions. However, these polyunsaturated fatty acids are particularly prone to oxidation, which negatively impacts the storage stability of oils that contain them. The recent study explores encapsulation as a promising strategy to enhance the stability of EFAs. It is identified five primary encapsulation techniques: (i) spray drying, (ii) freeze drying, (iii) emulsification, (iv) liposomal entrapment, and (v) various other methods, including electrospinning/spraying and complex coacervation. Among these techniques, spray drying emerged as the most commonly utilized method for EFA encapsulation, closely followed by freeze drying. Furthermore, maltodextrin and gum Arabic were identified as the predominant wall materials used in carriers. Future research should focus on the industrial scalability and cost-effectiveness of these encapsulation methods (Nejatian et al., 2024). The advantages of omega-3 fatty acids, including conjugated linoleic acid (CLA), are supported by comprehensive and methodologically sound in vivo research. Numerous studies demonstrate that omega-3 fatty acids play a crucial role not only in promoting normal

growth and development but also in contributing positively to the health of the heart, brain, eyes, joints, skin, as well as influencing mood and behavior (Kaushik et al., 2015).

Conclusion: According to the tests examined in this research, it can be concluded that all treatments had good performance and can be used for the encapsulating of fatty acids, vitamins, oils and flavors, but the xanthan-whey protein had better characteristics than the other treatments and was more suitable for encapsulation.

غنی سازی پودر شیر با اسید لینولئیک کونژوگه (CLA) ریزپوشانی شده با استفاده از خشک کن پاششی و بررسی ویژگی‌های آن

بهرام فتحی آچاچلویی^۱ ✉، حکیمه رضائی جعفرلو^۲، حسین عبدی بنمار^۳، رضوان شاددل^۱

^۱ به ترتیب استاد و دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۳ استاد گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

✉ مسئول مکاتبه: b_fathi@uma.ac.ir

چکیده

مشخصات مقاله

نوع مقاله:

علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲

انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

کلید واژه:

اسید لینولئیک کونژوگه (CLA)، پودر شیر، خشک کن پاششی، صمغ زانتان، آب پنیر و مالتودکسترین

زمینه مطالعاتی: ریزپوشانی، می‌تواند برای رسانش ترکیبات زیست فعال و بهبود خواص حسی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. دو فرآیند تجاری مورد استفاده در این زمینه استفاده از تکنیک خشک کردن پاششی و کوآسرواسیون ترکیبی هستند. دیگر روش‌های مورد استفاده شامل پوشش اکستروژن و محصور کردن در نانولیپوزوم‌ها هستند. پارامترهای کلیدی در هر یک از این فرآیندها، انتخاب مواد دیواره است.

هدف: هدف از این پژوهش بررسی تولید نانوپوشینه‌های حاوی مواد دیواره مختلف برای اسیدلینولئیک کونژوگه و سپس غنی سازی شیرخشک با آن و بررسی ویژگی‌های آن بود.

روش کار: در این پژوهش از چهار ترکیب مختلف به عنوان ماده دیواره شامل: ۱- صمغ زانتان و مالتودکسترین، ۲- صمغ زانتان و آب پنیر، ۳- صمغ گوار و مالتودکسترین و ۴- صمغ گوار و آب پنیر به عنوان مواد دیواره استفاده شد. پس از خشک کردن امولسیون‌های اولیه و شیر ۱/۵ درصد چربی به صورت جداگانه، پودر شیر با پودر نانوپوشینه‌ها غنی سازی شد و برخی از ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی پودر شیر غنی‌سازی شده از جمله میزان پروتئین، چربی، رطوبت، حالیت و مورفولوژی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که عملکرد خشک‌کن پاششی در حدود ۵۰ درصد بود. بیشترین محتوای CLA و بالاترین کارایی ریزپوشانی مربوط به تیمار نانوحامل زانتان- آب پنیر (۱۹/۲۱ درصد) بود. شکل نانوپوشینه‌ها به صورت کروی و سطح آن‌ها دارای ترک خوردگی‌هایی بودند. نتایج ارزیابی ویژگی‌های پودر شیر غنی‌سازی شده با CLA نشان داد که نمونه‌های پودر شیر غنی سازی شده از نظر میزان حالیت (۹۹٪) و رطوبت (۲/۹۸-۲/۳۳ درصد) تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. اما از نظر میزان چربی و پروتئین اختلاف معنی‌داری داشتند (P<۰/۰۵). بیشترین میزان پروتئین مربوط به تیمار CLA ریزپوشانی شده در درون زانتان- آب پنیر (۱۲/۸۳ درصد) بود. همچنین میزان چربی شیر و پودر شیر غنی شده با CLA- زانتان- آب پنیر نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود.

نتیجه گیری: تمام نانوحامل‌های استفاده شده در این تحقیق، کارایی خوبی داشته و می‌توانند برای ریزپوشانی اسیدهای چرب، ویتامین‌ها، روغن‌ها و مواد طعم دهنده مورد استفاده قرار بگیرند، اما نانوحامل زانتان- آب پنیر نسبت به سه نانوحامل دیگر ویژگی‌های بهتری داشته و برای ریزپوشانی مناسب‌تر بود.

مقدمه

فواید سلامتی استفاده از اسیدهای چرب امگا ۳ به ویژه اسید لینولئیک کونژوگه (CLA) از طریق مطالعات گسترده و معتبر اثبات شده است. نتایج تحقیقات گسترده نشان می دهد که اسیدهای چرب امگا ۳ نه تنها برای توسعه و رشد و نمو عادی بدن بلکه به خاطر اثرات مثبت آنها روی قلب، مغز، چشم ها، مفاصل، پوست، خلق و خوی و رفتار انسانی ضروری می باشد (کوشیک و همکاران ۲۰۱۵). به طور کلی اسید لینولئیک کونژوگه (CLA) به تمام ایزومرهای فضایی و موقعیتی لینولئیک اسید اطلاق می شود که باندهای دوگانه در آن مزدوج هستند. باندهای دوگانه در CLA در موقعیت های ۹ و ۱۱، ۱۰ و ۱۲، ۱۱ و ۱۳ در طول زنجیره کربنی قرار دارند (مک دونالد ۲۰۰۳). اسید لینولئیک کونژوگه نوعی لیپید زیست فعال است که مزایای سلامتی زیادی دارد و برای سلامت انسان حیاتی می باشد. با این حال این اسید چرب در بدن سنتز نمی شود و باید از طریق رژیم غذایی به دست آید. CLA اثرات مثبتی در پیشگیری و درمان بیماری های مزمن مختلف دارد. این اسید چرب از ترکیبات اساسی یک رژیم غذایی سالم است و اثرات بسیاری از جمله اثرات ضد افسردگی، بهبود بیماری های قلبی-عروقی و بیماری های عصبی دارد (یلدز و همکاران ۲۰۱۸). همچنین اسید لینولئیک کونژوگه دارای خواص مفیدی مانند حفظ عملکرد طبیعی مغز و کاهش خطر ابتلا به سرطان می باشد (ولز و همکاران ۲۰۱۷). همچنین گزارش شده است که اسید لینولئیک کونژوگه دارای عملکردهای مختلف فیزیولوژیکی قوی مانند اثرات ضد التهابی، ضد دیابتی، ضد چربی و ضد فشار خون و ضد سرطان نیز می باشد (فرناندز و همکاران ۲۰۱۷). به دلیل همین ویژگی ها، امروزه کاربرد CLA در رژیم غذایی و غنی سازی مواد غذایی با CLA مورد توجه زیادی قرار گرفته است (نصرآبادی و همکاران ۲۰۱۶). با وجود تمام مزایایی که CLA دارد، این ترکیب حلالیت ضعیفی در آب داشته و نیز در برابر اکسیداسیون حساسیت بالایی دارد که همین امر منجر به از دست دادن فعالیت زیستی آن می شود (یانگ و همکاران ۲۰۲۰). علاوه بر این، CLA عملتا در روده کوچک انسان

جذب می شود، اما فعالیت فیزیولوژیکی آن همیشه قبل از ورود به روده کوچک کاهش می یابد یا از بین می رود. از این رو، استفاده از یک سیستم حامل برای محصور کردن CLA و ریزپوشانی آن در درون یک دیواره یا نانوحامل منجر به افزایش پایداری، حفظ فعالیت زیستی و همچنین افزایش حلالیت آن می گردد (سیو و همکاران ۲۰۱۶).

در ریزپوشانی اسیدهای چرب از جمله اسید لینولئیک کونژوگه نیز از روش های مختلفی استفاده می شود. دو فرآیند تجاری مورد استفاده در این زمینه استفاده از تکنیک خشک کردن پاششی و کوآسرواسیون ترکیبی هستند. دیگر روش های مورد استفاده شامل اکستروژن و محصور کردن در نانولیپوزوم ها هستند. پارامترهای کلیدی در هر یک از این فرآیندها، انتخاب مواد دیواره است (کوشیک و همکاران ۲۰۱۵).

در بین روش های مختلف ریزپوشانی، خشک کردن پاششی به عنوان یکی از رایج ترین و متداول ترین روش های ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال و افزایش پایداری این ترکیبات شناخته شده است (باجاج و همکاران ۲۰۲۱). این روش دارای مزایای زیادی از جمله هزینه عملیاتی پایین، کیفیت بالای پوشینه ها، بازده خوب، اندازه کوچک، حلالیت و پایداری بالای پوشینه ها می باشد (داروچا و همکاران ۲۰۲۰). همچنین این روش گاهی اوقات عملکرد ترکیبات زیست فعال را نیز افزایش می دهد (باجاج و همکاران ۲۰۲۱). از مزایای دیگر ریزپوشانی به روش خشک کردن پاششی می توان به حفاظت ماده غذایی در برابر رطوبت، گرما، اکسیژن و سایر شرایط نامطلوب اشاره کرد (تونتول و توپوز ۲۰۱۴). با انجام ریزپوشانی به روش خشک کردن پاششی، انتشار کنترل شده طعم دهنده ها و مواد کاربردی تحت شرایط محیطی خاص امکان پذیر است که این تکنیک را برای آزادسازی کنترل شده و پایدار CLA ایده آل می کند (هی و همکاران ۲۰۱۶). گزارش شده است که استفاده از روش خشک کردن پاششی منجر به افزایش راندمان ریزپوشانی CLA محصور شده می شود (کوستا و همکاران ۲۰۱۵).

نانوپوشینه‌های تهیه شده به شیر اضافه شده و در نهایت از روش خشک کردن پاششی برای تولید پودر شیر استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

مواد مصرفی

تمام مواد شیمیایی و حلال‌های مورد استفاده در این پژوهش از نمایندگی شرکت مرک آلمان خریداری شدند و بدون انجام خالص سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند.

آماده‌سازی نمونه‌ها

مواد پوشش دهنده به صورت جداگانه با آب مقطر ترکیب شدند و تا رسیدن به محتوای ۹ درصد مواد جامد و هیدراتاسیون به مدت ۲ ساعت هم زده شدند (تولون و همکاران ۲۰۲۰). برای تهیه محلول‌های مواد دیواره، صمغ‌های گوار و زانتان، مالتودکسترین و پروتئین‌های آب پنیر با نسبت‌های معینی با هم مخلوط شدند این مخلوط به مدت یک شب در یخچال و در دمای ۵ درجه نگهداری شد تا هیدراتاسیون کامل حاصل شود. سپس محلول‌های تهیه شده از مواد دیواره با اسید لینولئیک کنژوگه ترکیب شدند تا امولسیون ایجاد شود. سپس این مخلوط با دستگاه سانتریفوژ به مدت ۵ دقیقه با دور ۷۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ گردید تا مخلوط همگنی به دست آید (رجبی و همکاران ۲۰۱۹). نمونه‌های شاهد برای مقایسه با نمونه‌های اصلی بدون افزودن هیچ گونه ماده دیواره‌ای تهیه شدند.

ریزپوشانی CLA

تیمارهای آزمایشی در این پژوهش شامل نسبت‌های ترکیبی صمغ‌های زانتان، گوار، مالتودکسترین و پروتئین‌های آب پنیر طبق جدول ۱ بود. به این صورت که در تمامی تیمارها، برای ریزپوشانی CLA از صمغ‌های گوار و زانتان در سطح ۰/۳ گرم و از پروتئین‌های آب پنیر و مالتودکسترین نیز به عنوان پوشش دهنده در سطح ۸ گرم استفاده گردید. مقدار مواد هسته یا CLA در همه چهار ترکیب مختلف به عنوان ماده دیواره ۴ درصد بود.

در انکپسولاسیون به روش خشک کردن پاششی، انتخاب مواد دیواره مناسب برای دستیابی به سرعت آزادسازی مطلوب و راندمان پوشینه‌سازی بالای ترکیبات زیست‌فعال ضروری می‌باشد. مواد محصور کننده یا مواد دیواره مورد استفاده برای خشک کردن پاششی باید دارای ظرفیت تشکیل امولسیون خوب، توانایی تشکیل فیلم و ویسکوزیته کم باشند. از این‌رو، هیدروکلوئیدهای محلول در آب مانند صمغ‌ها، مالتودکسترین و نشاسته‌های اصلاح شده رایج‌ترین مواد پوشینه‌کننده در روش خشک کردن پاششی هستند (باجاج و همکاران ۲۰۲۱). فتحی آچاچلوئی و همکاران (۲۰۲۴) تاثیر غلظت‌های مختلف لسیترین-کسترویل را بر پایداری درون پوشانی نانولیپوزوم‌های حامل بتا کاروتن را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که افزودن کسترویل به لسیترین در ساختار نانولیپوزوم منجر می‌شود که در بازه زمانی ۶۰ روز کارایی درون پوشانی بتا کاروتن نسبت به ساختار نانولیپوزوم فاقد کسترویل پایداری بیشتری داشته باشد.

گوهری و همکاران (۲۰۲۴) از نانوکمپلکس کازئینات سدیم، صمغ درخت زردآلو و صمغ عربی برای ریزپوشانی CLA استفاده کردند و نتایج خوبی را جهت محصور کردن و محافظت از ترکیبات مغذی-دارویی نظیر CLA بدست آوردند.

آذری و همکاران (۲۰۲۴) تاثیر میکروانکپسولاسیون روغن میکروبی محتوی CLA و بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و حسی آن در کره را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که تولید کره غنی شده با CLA با پایداری بالا و خصوصیات حسی مطلوب با استفاده از ریزپوشانی با مواد دیواره مثل آلژینات سدیم و صمغ گزانتان امکان پذیر است.

هدف از این پژوهش، غنی‌سازی پودر شیر با اسید لینولئیک کنژوگه (CLA) ریزپوشانی شده و بررسی ویژگی‌های آن بود. در این پژوهش از نانوحامل‌های مالتودکسترین، صمغ‌های گوار و زانتان و پروتئین آب پنیر برای ریزپوشانی اسید لینولئیک کنژوگه استفاده شد. بطوری که به همین منظور، ابتدا CLA در درون مواد نانوحامل مالتودکسترین، صمغ‌های گوار و زانتان و پروتئین آب پنیر ریزپوشانی شدند و سپس

پودر خشک شده با روش خشک کردن پاششی با ۲۰ میلی لیتر پتروئوم در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ دقیقه بدون تخریب و آسیب زدن به میکروکپسول ها مخلوط شد. سپس CLA موجود در پودر خشک شده به روش خشک کردن پاششی با چندین بار تکان دادن ملایم بشر استخراج گردید و با استفاده از قیف شیشه ای عمل صاف کردن انجام شد و بعد نمونه باقی مانده دوبار با ۱۰ میلی لیتر پتروئوم شسته شد. در مرحله بعد حلال تبخیر شده و CLA باقیمانده در دستگاه آون با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا به وزن ثابت برسد. در نهایت CLA توزین شده و وزن آن یادداشت گردید. درصد کارایی انکپسولاسیون (EE%) با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (یانگ و همکاران ۲۰۲۰، هی و همکاران ۲۰۱۶).

$$EE = 100 \times \frac{\text{جرم اسید لینولئیک کونژوگه کپسوله نشده}}{\text{جرم اسید لینولئیک کونژوگه کل}}$$

روش جرم سنجی برای تعیین کارایی انکپسولاسیون CLA با استناد به نتایج و گزارش تحقیقات (هی و همکاران ۲۰۱۶)، چوی و همکاران (۲۰۱۰)، جیمز و همکاران (۲۰۰۶) انتخاب شد. این محققین گزارش کردند که روش جرم سنجی روشی دقیق و موثر برای تعیین CLA محصور شده است.

تعیین اندازه ذرات

قطر معادل و شاخص اسپن نانوپوشینه های CLA ریزپوشانی شده از روی توزیع اندازه ذرات در دستگاه اندازه گیری ذرات (مدل SZ-100 شرکت Horiba ژاپن) اندازه گیری شد که از روش پراکندگی نور دینامیکی یا DLS برای اندازه گیری اندازه ذرات در محلول استفاده می کند، تعیین شدند. این دستگاه بر اساس پراکنش نور لیزر عمل می کند. تعیین اندازه ذرات پس از گذشت ۲۴ ساعت از تولید و نگهداری نمونه در دمای محیط یعنی ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شد. متوسط اندازه ذرات بر اساس میانگین قطر حجمی تعیین گردید (همیشه کار و همکاران، ۲۰۰۹).

$$\bar{D}[4,3] = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3}$$

$$\text{Span} = \frac{D(90\%) - D(10\%)}{D(50\%)}$$

Table1. Used treatments for Encapsulation

Treatments	Control	T1	T2	T3	T4
Xanthan gum	-	0.3 %	0.3 %	-	-
Guar gum	-	-	-	0.3 %	0.3 %
Maltodextrin	-	8 %	-	8 %	-
Whey protein	-	-	8 %	-	8 %

خشک کردن به روش پاششی

مخلوط اسید لینولئیک کونژوگه، مالتودکسترین، صمغ های گوار و زانتان، پروتئین آب پنیر با دستگاه خشک کن پاششی خشک شدند. خشک کردن تحت شرایط با دمای هوای ورودی ۱۶۰ درجه سانتی گراد و دمای هوای خروجی ۸۰ درجه سانتی گراد انجام گرفت و بازدهی خشک کن پاششی با فرمول زیر محاسبه گردید (فاضلی و همکاران ۲۰۱۲).

جرم کل محلول ورودی (گرم) / جرم نانوکپسول ها (گرم) = بازدهی (درصد)

تعیین خصوصیات CLA ریزپوشانی شده

محتوای کل CLA در درون میکروکپسول ها

تعیین محتوای کل CLA به روش هی و همکاران (۲۰۱۶) انجام شد. در این روش، محتوای کل CLA میکروکپسول ها به روش استخراج با سوکسله انجام گرفت. نمونه هایی با وزن ۰/۵ گرم با محلول هگزان به مدت ۸ ساعت در دستگاه سوکسله استخراج شدند. سپس محصول استخراج شده وزن شده و پس از تبخیر هگزان، جرم کل CLA ثبت شد. در نهایت محتوای CLA با استفاده از معادله زیر تعیین گردید (هی و همکاران ۲۰۱۶).

$$CLA \text{ (درصد)} = \frac{\text{اسید لینولئیک کل}}{\text{وزن میکروکپسول ها}} \times 100$$

کارایی درون پوشانی

کارایی انکپسولاسیون از طریق نسبت بین جرم CLA که باید محصور شود و جرم کل آن در پودر نهایی خشک شده با خشک کن پاششی به عنوان راندمان انکپسولاسیون تعریف می شود. برای تعیین کارایی انکپسولاسیون، ۱/۵ گرم از نمونه

(90%) D: قطری که حجم ذرات کوچک‌تر از آن ۹۰٪ حجم

کل ذرات موجود در سیستم را تشکیل می‌دهد.

(50%) D: قطری که حجم ذرات کوچک‌تر از آن ۵۰٪ حجم

کل ذرات موجود در سیستم را تشکیل می‌دهد.

(10%) D: قطری که حجم ذرات کوچک‌تر از آن ۱۰٪ حجم

کل ذرات موجود در سیستم را تشکیل می‌دهد.

غنی‌سازی شیر با CLA ریزپوشانی شده

برای غنی‌سازی شیر با CLA، به شیر ۱/۵ درصد چربی،

CLA ریزپوشانی شده با نسبت ۲/۵ میلی گرم اضافه گردید.

تیمار شاهد نیز شامل پودر شیر دارای CLA غیرکپسوله بود.

تولید پودر شیر غنی‌سازی شده

ابتدا شیر ۱/۵ درصد چربی با استفاده از دستگاه خشک‌کن

پاششی خشک شده و به پودر شیر تبدیل گردید. سپس به پودر

شیر تولید شده، از CLA ریزپوشانی شده در غلظت ۲/۵ میلی

گرم افزوده شد.

بررسی ویژگی‌های پودر شیر غنی‌سازی شده با CLA

ریزپوشانی شده

تعیین مقدار رطوبت

مقدار رطوبت پودرهای تولیدی با استفاده از روش مرجع آون

تا رسیدن به وزن ثابت و سپس اندازه‌گیری مقدار افت وزن

محاسبه گردید (استاندارد ملی ایران، ۲۰۱۲).

تعیین مقدار پروتئین

مقدار پروتئین نمونه‌ها با سیستم کلدال اتوماتیک و ضریب

تبدیل ۶/۳۷ اندازه‌گیری شد (استاندارد ملی ایران، ۲۰۱۲).

تعیین مقدار چربی

برای اندازه‌گیری چربی، مقدار ۱ گرم پودر در فلاسک موژونیر

توزین شده و ۹ میلی لیتر آب مقطر گرم به آن اضافه شد. پس

از هم زدن و افزودن ۱/۲۵ میلی لیتر محلول آمونیاک، خوب

تکان داده شده و مطابق روش رزگوتلیب عمل گردید

(استاندارد ملی ایران، ۲۰۱۲).

ارزیابی میزان حلالیت

به منظور انجام آزمون اندیس حلالیت، به ۲۰ گرم نمونه پودر

شیر، ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر با دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد اضافه

شد و با استفاده از دستگاه مخلوط کن با سرعت ۳۰۰۰ دور در

دقیقه، پودر شیر به خوبی در آب حل گردید. پس از مخلوط

کردن و حل کردن پودر شیر، محلول به دست آمده داخل

فالكون ۵۰ میلی لیتری ریخته شده و در دستگاه سانتریفیوژ با

سرعت ۸۷۰ دور در دقیقه، به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد.

پس از انجام عمل سانتریفیوژ، مایع فوقانی تا ۵ میلی لیتری سطح

رسوب، دور ریخته شد. در مرحله بعد، مجدداً ۲۵ میلی لیتر آب

مقطر به محتوی فالكون اضافه شده و سپس به آرامی مخلوط

گردید. در ادامه فالكون‌ها تا خط نشان ۵۰ میلی لیتر با آب مقطر

پر شده و مجدداً به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس با قرار

دادن لوله‌ها به شکل عمودی و در برابر نور، سطح رسوب از

قسمت مدرج لوله خوانده شد (استاندارد ملی ایران، شماره

۲۰۱۲).

میکروسکوپ الکترونیکی روبشی انتشار میدانی (FE-SEM)

(SEM)

بمنظور بررسی ریزساختار و مورفولوژی و تایید اندازه ذرات

CLA پوشینه شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی

(SEM) استفاده شد.

در این تحقیق از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی انتشار

میدانی MIRA3 ساخت شرکت TESCAN کشور چک

استفاده شد. برای آماده سازی یک ذره از نمونه ریزپوشانی شده

حاوی CLA روی لام آزمایشگاهی گذاشته می‌شود و در دمای

محیط، تحت فشار خلا به مدت یکساعت خشک می‌شود. در

نهایت نمونه با لایه‌ای از طلا توسط دستگاه اسپاترینگ پوشانده

شد و با بزرگنمایی در محدوده ۵۰-۳۰ هزار برابر تصویربرداری

انجام گرفت (سوری و همکاران ۲۰۲۱).

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌های مستخرج از آزمایش در قالب طرح

کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۴ انجام

پذیرفت و تفاوت میان تیمارها با یکدیگر، توسط آزمون آماری

دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، آنالیز واریانس یک‌طرفه

(One-way ANOVA) ارزیابی شد. همچنین، تمامی

آزمون‌ها در ۳ تکرار انجام گردید.

نتایج و بحث

بازدهی خشک کن پاششی

در پژوهش حاضر، عملکرد دستگاه خشک کن پاششی در خشک کردن CLA انکپسوله شده در مواد دیواره مختلف ارزیابی شد. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که استفاده از مواد دیواره مختلف برای انکپسولاسیون CLA تاثیر معنی داری بر روی کارایی خشک کن پاششی نداشتند و تفاوت معنی داری بین عملکرد دستگاه خشک کن پاششی در تیمارهای مورد آزمایش مشاهده نشد ($P > 0.05$). کارایی دستگاه خشک کن پاششی در خشک کردن تیمارهای مختلف CLA ریزپوشانی شده در حامل زانتان- مالتودکسترین، CLA ریزپوشانی شده در گوار- مالتودکسترین، گوار و آب پنیر حاوی CLA و همچنین زانتان و آب پنیر حاوی CLA به ترتیب ۸/۹۱٪، ۵۰/۷۴، ۵۰/۱۷ و ۵۰/۷۹ درصد بود.

با افزایش ویسکوزیته اتمایز کردن ذرات سخت تر شده و به دنبال آن اندازه ذرات ایجاد شده بزرگتر خواهد شد و رطوبت بیشتری درون ذره باقی می ماند. رطوبت بیشتر باعث چسبندگی بیشتر پودرها به دیواره خشک کن می شود و در نتیجه کارایی دستگاه خشک کن پاششی کم می شود (سانتانا و همکاران ۲۰۱۳). در پژوهش حاضر نیز، کارایی دستگاه خشک کن زمانی که از ترکیب صمغ زانتان و مالتودکسترین به عنوان ماده دیواره استفاده شد نسبت به سایر تیمارها کمتر بود اما تفاوت معنی دار نبود ($P > 0.05$).

از عوامل موثر بر کارایی دستگاه خشک کن پاششی می توان به اندازه ذرات، رطوبت، دمای انتقال شیشه ای و چسبندگی پودرها اشاره کرد. اثر متغیرهای فرآیند بر عملکرد دستگاه تحت تاثیر اندازه قطرات اتمایز شده می باشد و معمولا با افزایش خوراک ورودی یا ویسکوزیته، اندازه ذرات افزایش یافته و کارایی خشک کن کاهش پیدا می کند (گولا و آداموپولوس ۲۰۱۲). نجاتیان و همکاران (۲۰۲۴) بیان کردند که از روش های ریز پوشانی مختلف برای بهبود نگهداری و پایداری اکسیداسیونی اسیدهای چرب ضروری استفاده می گردد که از مهمترین روشهای ریزپوشانی می توان به استفاده از خشک کردن پاششی، خشک کردن انجمادی، امولسیون سازی، محصور

کردن و به دام انداختن لیپوزومی و سایر روشها اشاره کرد که در بین این روشها خشک کردن پاششی از متداولترین روش رایج برای ریزپوشانی اسیدهای چرب فرار بوده و نیز صمغ عربی و مالتودکسترین از مهمترین مواد دیواره استفاده شده در حامل ها می باشد.

تعیین خصوصیات CLA ریزپوشانی شده

تعیین محتوای کل CLA در درون نانوپوشینه ها

نتایج مربوط به ارزیابی میزان CLA موجود در درون نانوپوشینه ها در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، مشاهده می شود که ترکیب های مختلف به عنوان مواد دیواره از نظر محتوای CLA تفاوت معنی داری با یکدیگر داشتند ($P < 0.05$). به عبارت دیگر، استفاده از مواد دیواره مختلف برای انکپسولاسیون CLA بر روی محتوای CLA نانوپوشینه ها تاثیرگذار بود. بیشترین محتوای CLA (۱۹/۲۱ درصد) مربوط به تیمار CLA انکپسوله شده در درون ترکیب زانتان- آب پنیر بود. همچنین نمونه ریزپوشانی شده در گوار- آب پنیر ۱۱/۶۳ درصد کمترین محتوای CLA را داشت. نتایج نشان می دهد که تمامی تیمارهای آزمایشی از نظر محتوای CLA اختلاف معنی داری دارند. این امر بیانگر کارایی خوب انکپسولاسیون می باشد و نشان می دهد که CLA به خوبی در درون مواد دیواره مختلف زانتان، مالتودکسترین، گوار و آب پنیر ریزپوشانی شده است. ریزپوشانی CLA در درون مواد دیواره مختلف مورد آزمایش منجر به حفظ و افزایش محتوای CLA شد.

در پژوهشی مشابه جیمنز (۲۰۰۶)، از سه نوع ماده دیواره پروتئین آب پنیر، صمغ عربی، ترکیب پروتئین آب پنیر- مالتودکسترین برای ریزپوشانی CLA استفاده کردند. این محققین بیان کردند که از نظر حفظ CLA، مواد دیواره صمغ عربی و ترکیب پروتئین آب پنیر- مالتودکسترین عملکرد مشابه باهم داشتند و کارایی انکپسولاسیون آنها به ترتیب ۵۶/۲ و ۵۷/۲ درصد بود. اما این مواد در مقایسه با پروتئین آب پنیر به تنهایی، توانایی انکپسوله کردن کمتری داشتند. این محققین بیان کردند که زمانی که از ترکیب مالتودکسترین- پروتئین آب پنیر به عنوان حامل استفاده شد، حفظ CLA و کارایی

Table3. Effect of different wall materials in CLA Microcapsulation on Encapsulation Efficiency

Treatments	Encapsulation Efficiency (%)
Xanthan-Maltodextrin-CLA	86.33± 2.08 ^a
Xanthan-whey protein-CLA	88.66± 2.51 ^a
Guar -Maltodextrin-CLA	85.66± 1.15 ^a
Guar-whey protein-CLA	78.66± 2.51 ^b

با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که تیمارهای آزمایشی از نظر کارایی انکپسولاسیون تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند ($P>0/05$) و فقط تیمار CLA ریزپوشانی شده در درون مواد دیواره گوار- آب پنیر از نظر آماری با سایر تیمارها تفاوت داشت ($P<0/05$). میزان کارایی انکپسولاسیون در تیمارهای مختلف زانتان-مالتودکسترین-CLA، گوار- مالتودکسترین-CLA، گوار-آب‌پنیر-CLA و زانتان-آب‌پنیر-CLA به ترتیب ۸۶/۳۳، ۸۵/۶۶، ۷۸/۶۶ و ۸۸/۶۶ درصد بود. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین کارایی انکپسولاسیون (۸۸/۶۶ درصد) مربوط به تیمار CLA ریزپوشانی شده در درون زانتان- آب پنیر و همچنین کمترین کارایی (۷۸/۶۶ درصد) مربوط به CLA انکپسوله شده در درون مواد دیواره گوار- آب پنیر بود. در تحقیقی که بجاج و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی که بر روی انکپسولاسیون ویتامین‌های B12 و D3 با استفاده از سه نوع ماده دیواره صمغ افاقیا، مالتودکسترین و Hi-cap 100 به روش خشک‌کن پاششی انجام دادند، نتیجه گرفتند که نوع ماده دیواره بر روی کارایی انکپسولاسیون تاثیرگذار می‌باشد. این محققین نشان دادند که صمغ افاقیا کارایی انکپسولاسیون بالاتری نسبت به مالتودکسترین و نشاسته اصلاح شده Hi-cap دارد. همچنین، یانگ و همکاران (۲۰۲۰)، در تحقیقی که بر روی ریزپوشانی CLA با استفاده از حامل‌های زانتان و نشاسته اصلاح شده اکتیل سوکسینیک انیدرید (OSA) انجام دادند، نتیجه گرفتند که راندمان انکپسولاسیون با استفاده از سطوح مختلف نشاسته OSA و صمغ زانتان، تفاوت

انکپسولاسیون کمتر شد. احتمالاً دلیل این امر به عوامل موثر بر روی حفظ ماده هسته مربوط می‌شود. حفظ مواد هسته تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند ماهیت شیمیایی CLA، وزن مولکولی، عملکرد شیمیایی، قطبیت نسبی و نسبت ماده دیواره به هسته است. مهم‌ترین معیار در انتخاب مواد دیواره یا حامل خوب، توانایی آن در نگهداری و حفظ مواد هسته در طول فرآیند و ذخیره سازی است (جیمز ۲۰۰۶).

در پژوهش حاضر، با مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری محتوی CLA نانوپوشینه‌ها و نتایج مربوط به کارایی انکپسولاسیون مشاهده می‌شود که تیمار زانتان- آب پنیر کارایی انکپسولاسیون بیشتری داشته است از این رو محتوی CLA آن نیز باید بالا باشد. ثابت شده است که زمانی که از کربوهیدرات به عنوان مواد دیواره استفاده شود منجر به بهبود فرآیند خشک کردن و در نتیجه بهبود ریزپوشانی می‌شوند (جیمز ۲۰۰۶).

Table2. CLA content of prepared Microcapsulations with different wall materials

Treatments	CLA content (%)
Xanthan-Maltodextrin-CLA	12.14± 0.21 ^c
Xanthan -whey protein-CLA	19.21± 0.03 ^a
Guar-Maltodextrin-CLA	13.32± 0.01 ^b
Guar-wheyprotein-CLA Milk Powder	11.63± 0.05 ^d 4.36± 0.02 ^e

تعیین کارایی انکپسولاسیون

نتایج مربوط به اندازه‌گیری کارایی انکپسولاسیون در جدول ۳ آورده شده است.

معنی داری با نمونه شاهد (نمونه بدون صمغ زانتان) نداشت. کارایی انکپسولاسیون تمامی نانوذرات بالای ۹۷ درصد بود. نتایج این محققین حاکی از آن بود که مقدار ماده نانوحامل زانتان هیچ تاثیر قابل توجهی بر روی کارایی انکپسولاسیون ندارد و با افزودن صمغ زانتان، بهبود قابل توجهی در راندمان انکپسولاسیون مشاهده نشد. یلدز و همکاران (۲۰۱۸)، نیز پژوهشی بر روی انکپسولاسیون دوکوزاهگزانوئیک اسید به وسیله ۴ ماده نانوحامل پروتئین ایزوله نخود، کمپلکس نشاسته اصلاح شده با پروتئین نخود، توئین ۲۰ و سدیم دودوسیل سولفات انجام دادند و بیان کردند که نوع ماده نانوحامل تاثیر معنی داری بر روی کارایی انکپسولاسیون داشت و زمانی که از مواد دیواری مختلف برای ریزپوشانی روغن حاوی DHA استفاده شد میزان کارایی انکپسولاسیون متفاوت بود. این محققین میزان کارایی انکپسولاسیون را در محدوده ۸۴/۱ تا ۹۲/۲ درصد گزارش نمودند که تا حدودی به نتایج کسب شده در پژوهش حاضر نزدیک است. در تحقیقی دیگر، پورعاشوری و همکاران (۱۳۹۱) از چند نوع ماده دیواره مختلف نظیر ژلاتین، کیتوزان، ژلاتین- کیتوزان و ژلاتین- گلوتامیناز برای ریزپوشانی روغن ماهی و اسیدهای چرب امگا- ۳ استفاده کردند و نتیجه گرفتند که تفاوت معنی داری بین کارایی ریزپوشانی پودرهای تولیدی وجود دارد. نتایج آنها نشان داد که نوع ماده دیواره و همچنین نوع هسته بر درصد کارایی انکپسولاسیون تاثیرگذار بود. بیشترین کارایی انکپسولاسیون مربوط به تیمار ژلاتین- ترانس گلوتامیناز و کمترین کارایی مربوط به کیتوزان بود. میزان کارایی انکپسولاسیون از ۶۷ تا ۸۸ درصد متفاوت بود. لوناگوارا و همکاران (۲۰۱۷) نیز در تحقیقی که بر روی ریزپوشانی روغن مغزیجات با صمغ عربی، مالتودکسترین و ژلاتین انجام دادند به این نتیجه رسیدند که کارایی انکپسولاسیون تحت تاثیر مقدار ماده هسته قرار داد و با افزایش مقدار ماده هسته، کارایی کم خواهد شد. همچنین فراسکارلی و همکاران (۲۰۱۲) روغن قهوه را با استفاده از صمغ عربی و به روش خشک کن پاششی ریزپوشانی کردند و عنوان کردند که کمترین راندمان ریزپوشانی مربوط به تیمار دارای بیشترین روغن قهوه بود. آن‌ها علت این موضوع را به کم بودن

صمغ عربی نسبت به مواد هسته‌ای مربوط دانستند. گولا و همکاران (۲۰۱۲)، روغن هسته انار را توسط پودر آب پنیر انکپسوله کردند و گزارش کردند که افزایش ماده جامد در ترکیب امولسیون منجر به افزایش کارایی انکپسولاسیون می‌شود. افزایش ماده جامد موجب کاهش زمان لازم برای تشکیل غشا روی سطح قطرات می‌شود. شکل‌گیری سریع سطح جامد می‌تواند با کاهش مقدار روغن سطحی همراه باشد زیرا در این صورت فرصت کمتری برای انتشار مواد هسته‌ای به سطح ذرات وجود دارد. افزایش مقدار ماده جامد موجب افزایش ویسکوزیته امولسیون شده و به پایداری بیشتر آن کمک می‌کند (گولا و همکاران ۲۰۱۲). با بررسی نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر، مشاهده می‌شود که در تیمارهای حاوی صمغ زانتان، کارایی انکپسولاسیون نسبت به تیمارهای حاوی صمغ گوار کمی بیشتر بود که البته این افزایش راندمان به صورت جزئی هست. راندمان ریزپوشانی تحت تاثیر محتوای ماده جامد کل، غلظت ماده هسته‌ای (اسید لینولئیک) و دمای هوای ورودی قرار دارد. افزایش ماده جامد کل در خوراک ورودی دستگاه خشک‌کن پاششی باعث افزایش ویسکوزیته امولسیون و تسریع روند خشک شدن شده و در نهایت منجر به افزایش کارایی انکپسولاسیون می‌شود (فراسکارلی و همکاران، ۲۰۱۲).

تعیین اندازه ذرات

در جدول ۴، نتایج مربوط به ارزیابی اندازه ذرات ترکیب‌های مختلف به عنوان مواد دیواره نشان داده شده است. با توجه به جدول فوق، مشاهده می‌شود که ترکیب‌های مختلف به عنوان ماده دیواره از نظر اندازه ذرات تفاوت معنی داری با یکدیگر داشتند ($P < 0.05$). پودر شیر غنی شده با CLA انکپسوله شده در زانتان- مالتودکسترین، دارای بزرگترین اندازه ذرات بود. از نظر شاخص اسپن، بیشترین پراکندگی ذرات مربوط به تیمار CLA+ زانتان- آب پنیر بود. با مقایسه چهار نمونه نانوپوشینه های حاوی CLA تهیه شده با مواد دیواره مختلف مشخص شد که تیمار CLA ریزپوشانی شده در درون زانتان- آب پنیر در مقایسه با سه نانوحامل دیگر اندازه ذرات بزرگتری داشت (۵۷۶/۸ نانومتر) که این نتایج با نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز مطابقت داشت. همچنین

ریزپوشانی مشخص نشده است (فانگ و همکاران ۲۰۰۵). تولید ذرات بزرگتر در ریزپوشانی، سبب افزایش نگهداری مواد هسته مانند روغن‌ها و CLA و کاهش مقدار روغن سطحی در طی خشک کردن پاششی می‌شود (فانگ و همکاران ۲۰۰۵).

بررسی ویژگی‌های پودر شیر غنی‌سازی شده با CLA

ریزپوشانی شده

رطوبت

نتایج حاصل از ارزیابی رطوبت پودر شیرهای غنی‌سازی شده با CLA انکپسوله شده در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که میزان رطوبت پودر شیرهای غنی‌سازی شده با CLA انکپسوله شده نسبت به نمونه شاهد بالاتر بود. اما افزایش میزان رطوبت پودرهای غنی‌سازی شده در مقایسه با نمونه شاهد بسیار جزئی بود. در بین تیمارهای مختلف آزمایشی، بیشترین درصد رطوبت (۲/۹۸ درصد) مربوط به نمونه پودر شیر غنی‌سازی شده با CLA انکپسوله شده در درون زانتان و مالتودکستین بود. همچنین نمونه شاهد (پودر شیر) با میزان رطوبت ۲/۳۳ درصد کمترین میزان رطوبت را داشت. رطوبت نمونه‌های پودر شیر غنی‌سازی شده با CLA ریزپوشانی شده در گوار- مالتودکستین، گوار- آب پنیر و زانتان- آب پنیر نیز به ترتیب ۲/۴۸، ۲/۹۱ و ۲/۴۰ درصد بود. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر حاکی از آن است که نمونه شاهد یعنی پودر شیر در مقایسه با سایر تیمارها بهتر خشک شده بود. با مقایسه پودرهای حاوی CLA انکپسوله شده با مواد دیواره مختلف نیز مشخص است که CLA انکپسوله شده با نانوحامل‌های زانتان- آب پنیر در مقایسه با سایر نانوحامل‌ها به خوبی خشک شده است و رطوبت پایینی دارد. همسو با این نتایج، یلدیز و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی که بر روی انکپسولاسیون دوکوزاهگزانوئیک اسید به وسیله ۴ ماده نانوحامل پروتئین ایزوله نخود، کمپلکس نشاسته اصلاح شده با پروتئین نخود، توئین ۲۰ و سدیم دودوسیل سولفات انجام دادند گزارش کردند که تیمارهای آزمایشی از نظر میزان رطوبت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. میزان رطوبت DHA انکپسوله شده با کمپلکس نشاسته اصلاح شده-پروتئین نخود

نانوپوشینه های CLA- زانتان- مالتودکستین با اندازه ذرات ۲۴۸/۱ نانومتر کوچکترین ذرات را در بین چهار تیمار نانوپوشینه های تهیه شده با مواد دیواره مختلف داشتند. با مقایسه نتایج حاصل از دستگاه DLS و SEM مشاهده می‌شود که نتایج با هم همخوانی دارند. همسو با این نتایج، پورعاشوری و همکاران (۱۳۹۱) از چند نوع نانوحامل ژلاتین، کیتوزان، ژلاتین- کیتوزان و ژلاتین- گلوتامیناز برای ریزپوشانی روغن ماهی و اسیدهای چرب امگا-۳ استفاده کردند و گزارش کردند که نوع مواد دیواره به کار رفته بر توزیع اندازه ذرات پودرها تاثیرگذار می‌باشد. در تحقیق آن‌ها، تیمار ژلاتین- ترانس گلوتامیناز و ژلاتین با اندازه ذرات ۳۶ میکرومتر دارای محدوده اندازه ذرات بزرگتری بودند و تیمار کیتوزان و ژلاتین- کیتوزان با توزیع ذرات در محدوده زیر ۳۲/۵۶ و ۳۳ میکرومتر، کوچکترین محدوده اندازه ذرات را داشتند. همچنین فرزادینا و پزشکی نجف آبادی (۱۳۹۷)، بر روی تولید حامل های لیپیدی نانوساختار حامل اسید لینولئیک کونژوگه و غنی سازی شیر کم چرب با آن ها پژوهشی انجام دادند و گزارش نمودند که میانگین قطر حجمی ذرات ۸۱ نانومتر و شاخص اسپن ۰/۸۳ بود. نتایج آن ها نشان دهنده اندازه ذرات در مقیاس نانو با توزیع مناسب و یکنواختی پراکندگی ذرات بود. همچنین فرید و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیق خود با عنوان تولید نانوحامل حاوی اسید لینولئیک کونژوگه، پزشکی و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی با عنوان تولید نانوحامل حاوی ویتامین A، محمدی و همکاران (۲۰۱۷) در تولید نانوحامل حاوی ویتامین D3 نتایج مشابهی را کسب کردند و عنوان کردند اندازه ذرات در مقیاس نانو و زیر ۱۰۰ نانومتر بوده و توزیع یکنواختی دارد. اندازه ذرات پودرهای تولیدی تحت تاثیر دمای خشک کردن و ویژگی امولسیون ورودی می‌باشد. اندازه ذرات پودرهای ریزپوشانی شده، در ابتدا با توجه به امولسیون ورودی، پارامترهای اتمیزاسیون مانند سرعت صفحه چرخشی و قطر چرخ در اتمیزاسیون سانتریفوژی و قطر نازل و میزان فشار در اتمیزاسیون با نازل، تعیین می‌شوند. در عمل با توجه به طراحی دستگاه خشک کن پاششی، می‌توان اندازه ذرات را طبق موارد ذکر شده کنترل نمود. تاثیر اندازه ذرات پودرها بر کارایی

پنیر، بیشتر بودن میزان پروتئین در این تیمار منطقی به نظر می‌رسد.

فرناندز آویلا و همکاران (۲۰۱۷)، در تحقیقی که بر روی غنی سازی شیر UHT با CLA امولسیون شده توسط هموژنیزاسیون انجام دادند گزارش نمودند که میزان پروتئین شیر ۳/۳ درصد بوده است. این محققین عنوان کردند که تفاوت معنی داری بین میزان پروتئین شیر غنی سازی شده با CLA همگن شده با هموژنایزر فشار بالا و هموژنایزر معمولی وجود نداشت.

چربی

نتایج مربوط به اندازه گیری میزان چربی نمونه های شیر و پودر شیر غنی سازی شده با CLA انکپسوله شده در جدول ۵ ارائه شده است. در پژوهش حاضر، ابتدا CLA ریزپوشانی شده به شیر ۱/۵ درصد چربی اضافه شد و شیر با نمونه های CLA انکپسوله شده در مواد دیواره مختلف غنی سازی شد. سپس شیر با استفاده از خشک کن پاششی خشک شده و به پودر شیر تبدیل شد. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تیمارهای مختلف آزمایشی از نظر میزان چربی تفاوت معنی داری با یکدیگر دارند ($P < 0.05$). با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که میزان چربی نمونه های شیر و شیر غنی سازی شده با CLA انکپسوله شده در مقایسه با نمونه های پودر شیر، بیشتر است. به طوری که بیشترین درصد چربی (۳ درصد) مربوط به نمونه شیر غنی سازی شده با CLA انکپسوله شده در درون زانتان و آب پنیر و کمترین درصد چربی نیز مربوط به نمونه پودر شیر با ۱ درصد چربی بود. با مقایسه تیمارهای مختلف مشخص است که میزان چربی شیر با خشک شدن آن کاهش پیدا کرده است. علت این امر ممکن است به شرایط خشک کردن شیر در خشک کن پاششی مربوط باشد. فرناندز آویلا و همکاران (۲۰۱۷)، در تحقیق خود بر روی غنی سازی شیر UHT با CLA امولسیون شده توسط هموژنیزاسیون عنوان کردند که میزان چربی شیر غنی سازی شده ۱/۷ درصد بود و تفاوت معنی داری بین میزان چربی شیر غنی سازی شده با CLA همگن شده با هموژنایزر فشار بالا و هموژنایزر معمولی وجود نداشت.

و DHA انکپسوله شده با توئین ۲۰ هر دو ۲/۰۳ درصد بود. همچنین میزان رطوبت DHA ریزپوشانی شده در نانوحامل های پروتئین نخود و سدیم دودوسیل بنزوات نیز به ترتیب ۲/۱۸ و ۲/۱۴ درصد بود. نتایج کسب شده در پژوهش حاضر تا حدودی با نتایج یلدیز و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت داشت. طبق گزارش این محققین نوع ماده حامل تاثیر معنی داری بر روی میزان رطوبت پودرهای تولید شده ندارد که نتایج پژوهش ما نیز این امر را تایید می‌کند. همچنین، پورعاشوری و همکاران (۱۳۹۱)، در تحقیقی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و پایداری اکسایشی میکروپوشینه های حاوی روغن ماهی و اسیدهای چرب امگا-۳ را بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق خود از چند نوع ماده دیواره ژلاتین، کیتوزان، ژلاتین-کیتوزان و ژلاتین-گلوتامیناز استفاده کردند و بر خلاف نتایج ما، گزارش کردند که نوع ماده دیواره میکروکپسول‌ها، بر میزان رطوبت پودرهای خشک شده با خشک کن پاششی تاثیرگذار می‌باشد. در حالی که نوع هسته بر روی رطوبت اثر قابل توجهی نداشت. هوگان و همکاران (۲۰۰۱) نیز گزارش دادند که انواع مواد دیواره بر مقدار رطوبت پودرهای تولیدی تاثیرگذار نیستند که نتایج پژوهش حاضر با نتایج آن‌ها مطابقت دارد.

پروتئین

نتایج مربوط به اندازه گیری میزان پروتئین تیمارهای مختلف آزمایشی در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که تیمارهای آزمایشی از نظر میزان پروتئین تفاوت معنی داری با یکدیگر داشتند ($P < 0.05$). نمونه های پودر شیر غنی سازی شده با CLA انکپسوله شده در مقایسه با نمونه شاهد میزان پروتئین بیشتری داشتند. بیشترین میزان پروتئین (۱۲/۸۳ درصد) مربوط به نمونه پودر شیر غنی شده با CLA ریزپوشانی شده در درون زانتان-آب پنیر بود. کمترین درصد پروتئین نیز مربوط به نمونه شاهد با میزان پروتئین ۶/۱۲ درصد بود. همچنین میزان پروتئین تیمارهای مختلف پودر شیر غنی سازی شده با CLA ریزپوشانی شده در درون زانتان-مالتودکستریز، گوار-مالتودکستریز و زانتان-آب پنیر نیز به ترتیب ۸/۱۶، ۱۱/۸۱ و ۹/۱۸ درصد بود. با توجه به حضور پروتئین آب پنیر در تیمار CLA انکپسوله شده در زانتان-آب

حالات

حالات پودر تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر خوراک ورودی به خشک کن، نوع ماده دیواره، سرعت جریان هوای فشرده و دبی خوراک ورودی قرار دارد. حالات، رابطه مستقیمی با آمورف بودن و دانسیته توده‌ای پودر دارد؛ اما با رطوبت، فعالیت آبی و چسبندگی رابطه معکوسی دارد (جایاسوندر و همکاران ۲۰۱۱). نتایج ارزیابی میزان حالات در آب پودر شیر غنی سازی شده با CLA ریزپوشانی شده، در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که نمونه‌های مختلف پودر شیر از نظر حالات تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند ($P > 0.05$). نتایج کسب شده حاکی از آن است که میزان حالات پودر شیرهای تولیدی بسیار بالا و همگی بالای ۹۹ درصد بوده است. همسو با نتایج پژوهش حاضر، جعفری و همکاران (۲۰۱۷) به خشک کردن آب انار با نسبت‌های مختلف مالتودکستین به روش خشک کردن پاششی پرداختند و بیان کردند که نمونه‌های پودر با مقادیر مختلف مالتودکستین از نظر حالات تفاوت قابل توجهی با یکدیگر نداشتند. در تحقیقی دیگر، محمدی و همکاران (۲۰۱۷)، به ریزپوشانی روغن سیاهدانه با استفاده از مالتودکستین پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش غلظت ماده هسته (روغن)، حالات پودر به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. در تحقیقی دیگر، پورعاشوری و همکاران (۱۳۹۱)، از چند نوع ماده دیواره مختلف نظیر ژلاتین، کیتوزان، ژلاتین-کیتوزان و ژلاتین-گلوتامیناز برای ریزپوشانی روغن ماهی و اسیدهای چرب امگا-۳ استفاده کردند و نتیجه گرفتند که نوع ماده دیواره میکروپوشینه‌ها، بر میزان حالات در آب پودرهای خشک شده با خشک‌کن پاششی تأثیر دارد. اما نوع هسته انتخابی بر میزان حالات پودرها تأثیر معنی‌داری ندارد. حالات در آب میکروپوشینه‌ها از دیدگاه رهائش پایدار و کنترل شده هسته در محیط آبی دارای اهمیت زیادی است. چو و همکاران (۲۰۰۳)، معتقدند که طراحی میکروپوشینه‌ها باید به گونه‌ای باشد که حالات کمی داشته باشند یا با تأخیر در آب حل شوند. نیلسن (۱۹۹۷)، عنوان کرد که فاکتور حالات به عنوان عامل کنترل کننده رهائش مواد هسته می‌باشد. وجود پیوندهای عرضی کووالانسی لیزین در شبکه پروتئینی

سبب تغییر وزن مولکولی پروتئین شده و رهائش پروتئین را محدود می‌کند.

بررسی مورفولوژی نانو پوشینه های CLA با میکروسکوپ الکترونیکی روبشی انتشار میدانی (FE-SEM)

در پژوهش حاضر، برای بررسی مورفولوژی نانو پوشینه های CLA، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نمونه‌های مختلف CLA ریزپوشانی شده در نانوحامل‌های زانتان-مالتودکستین، گوار-مالتودکستین، گوار-آب پنیر و زانتان-آب پنیر توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری شدند و تصاویر حاصل در شکل ۱ نشان داده شده است. تصاویر A، B، C و D به ترتیب مربوط به نمونه CLA ریزپوشانی شده با زانتان-مالتودکستین، گوار-مالتودکستین، گوار-آب پنیر و زانتان-آب پنیر هستند. با توجه به تصاویر فوق، مشاهده می‌شود که نمونه‌های CLA ریزپوشانی شده با مواد دیواری مختلف، عمدتاً اندازه ذرات متفاوتی دارند. در تمامی تصاویر اندازه ذرات در حد نانومتر بود. اندازه ذرات تیمار زانتان-آب پنیر در مقایسه با سایر تیمارها کمی بزرگتر بود و ذرات شناسایی شده دارای اندازه ۱۳۴ و ۱۶۴ نانومتر بودند. در حالی که تیمار گوار-مالتودکستین اندازه ذرات کوچکتری داشتند. اندازه ذرات شناسایی شده در این تیمار، در حدود ۶۴ و ۸۳ نانومتر بود. به طور کلی، در تصاویر SEM، اندازه ذرات نسبت به نتایج حاصل از دستگاه DLS کوچک‌تر بود. زیرا در طی خشک کردن فرآیند آب اندازی رخ داده و موجب کاهش اندازه ذرات کمپلکس شده است. تقریباً تمامی ذرات به شکل کروی دیده می‌شوند. همچنین در تمامی تیمارهای آزمایشی سطح ذرات دارای ترک خوردگی و شکستگی‌هایی است که علت آن به شرایط اتمیزاسیون و خشک شدن نامناسب ذرات مربوط می‌باشد. در تصویر مربوط به CLA ریزپوشانی شده در زانتان-آب پنیر ترک خوردگی کمتر است. به طور کلی، صمغ زانتان به دلیل ایجاد ویسکوزیته زیاد در محلول باعث تولید ذرات درشت‌تر و نگهداری رطوبت بیشتر می‌شود. در نتیجه زمان خشک شدن طولانی شده و ذرات برای مدت طولانی‌تری دارای پوسته انعطاف‌پذیر هستند و کمتر دچار ترک خوردگی

و شکستگی می‌شوند (یکدانه و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین ذرات ریزپوشانی شده با آب پنیر (تصویر C و D) مورفولوژی همگن بسیار خوبی از خود نشان دادند. ذرات ریزپوشانی شده با پروتئین آب پنیر کروی شکل هستند و سطح صافی دارند و بدون شکاف و تخلخل قابل مشاهده هستند. قبلاً گزارش شده است که پروتئین‌های آب پنیر روغن و اسیدهای چرب را از اکسیداسیون محافظت می‌کنند (جیمز ۲۰۰۶). در تیمارهایی که حاوی مالتودکسترین بودند (تصویر A و B)، میزان ترک خوردگی و شکستگی نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود. علت آن ممکن است به ویژگی‌های مالتودکسترین مربوط باشد. مالتودکسترین‌ها، خواص خشک کردن ماتریس دیواره را با افزایش تشکیل پوسته‌ای خشک در اطراف ذرات خشک شده بهبود می‌دهند (شیو و روزنبرگ ۱۹۹۵).

عدم وجود شکستگی و ترک خوردگی در ذرات میکروپوشینه، مزیتی است که باعث می‌شود نفوذپذیری میکروپوشینه‌ها کاهش پیدا کرده و محافظت از مواد هسته افزایش یابد. در مورفولوژی ذرات، دمای خشک کردن بسیار موثر است. در حین فرآیند خشک شدن، بلافاصله پس از تشکیل پوسته، تعداد زیادی حباب هوا درون ذره ایجاد می‌شود به طوری که اگر دمای ذره بیشتر از نقطه جوش باشد فشار داخل ذره از فشار هوای بیرون بیشتر شده و حباب‌های هوا متورم می‌شوند. اگر دمای خشک کن بالا باشد رطوبت به سرعت تبخیر شده و پوسته سفت و سختی تشکیل می‌شود از این رو حباب هوا نمی‌تواند از ذرات خارج شود و زمانی که در منطقه سردتر قرار می‌گیرد، در صورت کندانس شدن بخار در داخل ذره، باز هم پوسته ساختار سفت و مستحکم خود را حفظ کرده و دچار فرورفتگی نمی‌شود. اما اگر دمای هوا پایین باشد مقدار کمی رطوبت در پوسته باقی مانده و پوسته برای مدت طولانی‌تری انعطاف‌پذیر و نرم است و در منطقه سردتر در صورت خارج شدن یا کندانس شدن بخارات، ذرات به دلیل داشتن پوسته انعطاف‌پذیر دچار چروکیدگی یا فرورفتگی می‌شوند (ساحین نادیم و همکاران ۲۰۱۴). در پژوهش‌هایی مشابه با پژوهش حاضر، هی و همکاران (۲۰۱۶)، بر روی ریزپوشانی CLA با استفاده از نشاسته اصلاح شده اکنتیل سوکسینیک انیدرید و

صمغ زانتان به روش خشک کردن پاششی کار کردند گزارش نمودند که اکثر میکروپوشینه های تولید شده مورفولوژی سطحی فاقد ترک و شکستگی داشتند که نشان دهنده خواص ویسکوالاستیک قوی مواد دیواره در طول انبساط در مراحل نهایی خشک کردن پاششی است. با این حال چین و چروک‌هایی در سطح اکثر میکروپوشینه‌ها مشاهده شد که این چین و چروک‌ها ناشی از خشک شدن نامناسب است. این محققین همچنین گزارش کردند که ساختار میکروپوشینه های CLA ریزپوشانی شده با استفاده از زانتان- نشاسته اصلاح شده، مورفولوژی مشابهی با میکروپوشینه های CLA ریزپوشانی شده با نشاسته اصلاح شده به تنهایی دارد. بنابراین میزان صمغ زانتان تاثیر قابل توجهی بر روی مورفولوژی میکروپوشینه‌ها نداشته است. همچنین جیمز و همکاران (۲۰۰۶)، در پژوهش خود از سه ماده نانوحامل پروتئین آب پنیر، صمغ عربی و ترکیب پروتئین آب پنیر- مالتودکسترین برای انکپسولاسیون CLA استفاده کردند و گزارش نمودند که در تصاویر SEM، سطح میکروپوشینه های تولید شده دارای فرورفتگی‌های سطحی بود که این فرورفتگی‌ها ممکن است به دلیل انقباض نامناسب و ناهموار در طول خشک شدن و سرد شدن و همچنین به دلیل محتوای پروتئین بالا باشد. تیمار CLA انکپسوله شده با پروتئین آب پنیر- مالتودکسترین دارای ذراتی کروی شکل و با سطح صاف بود که اندازه ذرات بسیار متفاوت بود. همچنین شکاف‌ها و منافذ کوچکی در سطح ذرات دیده شد.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد خشک‌کن پاششی در حدود ۵۰ درصد بود. بیشترین محتوای CLA و بالاترین کارایی ریزپوشانی مربوط به تیمار نانوحامل زانتان- آب پنیر بود. نتایج ارزیابی اندازه ذرات و مورفولوژی حاکی از آن بود که در همه نانوپوشینه های تهیه شده، اندازه ذرات در حد نانومتر بودند و شکل نانوپوشینه‌ها به صورت کروی و سطح آن‌ها دارای ترک خوردگی‌هایی بودند. همچنین نتایج ارزیابی ویژگی‌های پودر شیر غنی‌سازی شده با CLA نشان داد که

بیانگر کارایی بالای نانوحامل زانتان- آب پنیر نسبت به سایر مواد دیواره استفاده شده برای ریزپوشانی بود. به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تمام نانوحامل‌های استفاده شده در این تحقیق، کارایی خوبی داشته و می‌توانند برای ریزپوشانی اسیدهای چرب، ویتامین‌ها، روغن‌ها و مواد طعم دهنده مورد استفاده قرار بگیرند. در کل نانوحامل زانتان- آب پنیر نسبت به سه نانوحامل دیگر استفاده شده در این تحقیق دارای ویژگی‌های بهتری بوده و برای ریزپوشانی CLA مناسب‌تر بود.

نمونه‌های پودر شیر غنی سازی شده از نظر میزان حلالیت و رطوبت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند ($P>0/05$)، اما از نظر میزان چربی و پروتئین دارای اختلاف معنی‌داری بودند ($P<0/05$)، بطوری که بیشترین میزان پروتئین مربوط به تیمار CLA ریزپوشانی شده در درون زانتان- آب پنیر (۱۲/۸۳ درصد) بود. محتوای CLA بالا در کمپلکس زانتان- آب پنیر نشان دهنده ریزپوشانی مناسب و کارایی ریزپوشانی بالا در این تیمار است. نتایج ارزیابی کارایی انکپسولاسیون نیز

Table4. Particle size(nm) and particle size distribution in the different used treatments as wall materials

Treatments	Mean of Particle size(nm)	Span index (particle size distribution)
X-MD-CLA	248.1 ± 33.5 ^e	0.34± 0.12 ^c
X-WP-CLA	576.8 ± 38.8 ^{cd}	2.02± 0.72 ^a
G-MD-CLA	228.8 ± 4.53 ^e	0.31± 0.05 ^c
G-WP-CLA	410.6 ± 11.69 ^{cd}	1.07± 0.34 ^{ab}
MP	315.6 ± 12.20 ^e	0.46± 0.07 ^c
MP-X-MD-CLA	1233.4 ± 32.87 ^a	1.21± 0.09 ^{ab}
MP-X-WP-CLA	751.1 ± 53.9 ^c	0.59± 0.03 ^c
MP-G-MD-CLA	534.5 ± 83.19 ^{cd}	0.68± 0.07 ^c
MP-G-WP-CLA	1181.3 ± 50.29 ^{ab}	1.21± 0.04 ^{ab}

Mean ± Standard deviation

MP(Milk Powder), X (Xanthan gum), MD(Maltodextrin), WP(Whey protein), G(Guar gum)

Different lowercases within a column indicate significant differences ($p<0.05$) among treatments.

Table5. Mean contents some of milk powder properties enriched with encapsulated CLA in different wall materials

Treatment*	Moisture (%)	Protein (%)	Fat (%)	Solubility (%)
MP	2.33 ± 0.28 ^b	6.12± 1.02 ^c	1 ± 0.4 ^b	99 ± 0.1 ^a
MP+X+MD+CLA	2.98 ± 0.04 ^a	8.16 ± 0.98 ^{bc}	1.50 ± 0.5 ^{ab}	99.12 ± 0.2 ^a
MP+X+WP+CLA	2.4 ± 0.19 ^b	12.83 ± 1.03 ^a	1.80 ± 0.5 ^a	99.09 ± 0.07 ^a
MP+G+MD+CLA	2.48 ± 0.37 ^b	9.18 ± 1.04 ^b	1.60± 0.37 ^{ab}	99.10± 0.2 ^a
MP+G+WP+CLA	2.91 ± 0.03 ^a	11.81 ± 1.02 ^a	1.20 ± 0.21 ^b	99 ± 0.4 ^a

Mean ± Standard deviation

MP(Milk Powder), X (Xanthan gum), MD(Maltodextrin), WP(Whey protein), G(Guar gum)

Different lowercases within a column indicate significant differences ($p<0.05$) among treatments.

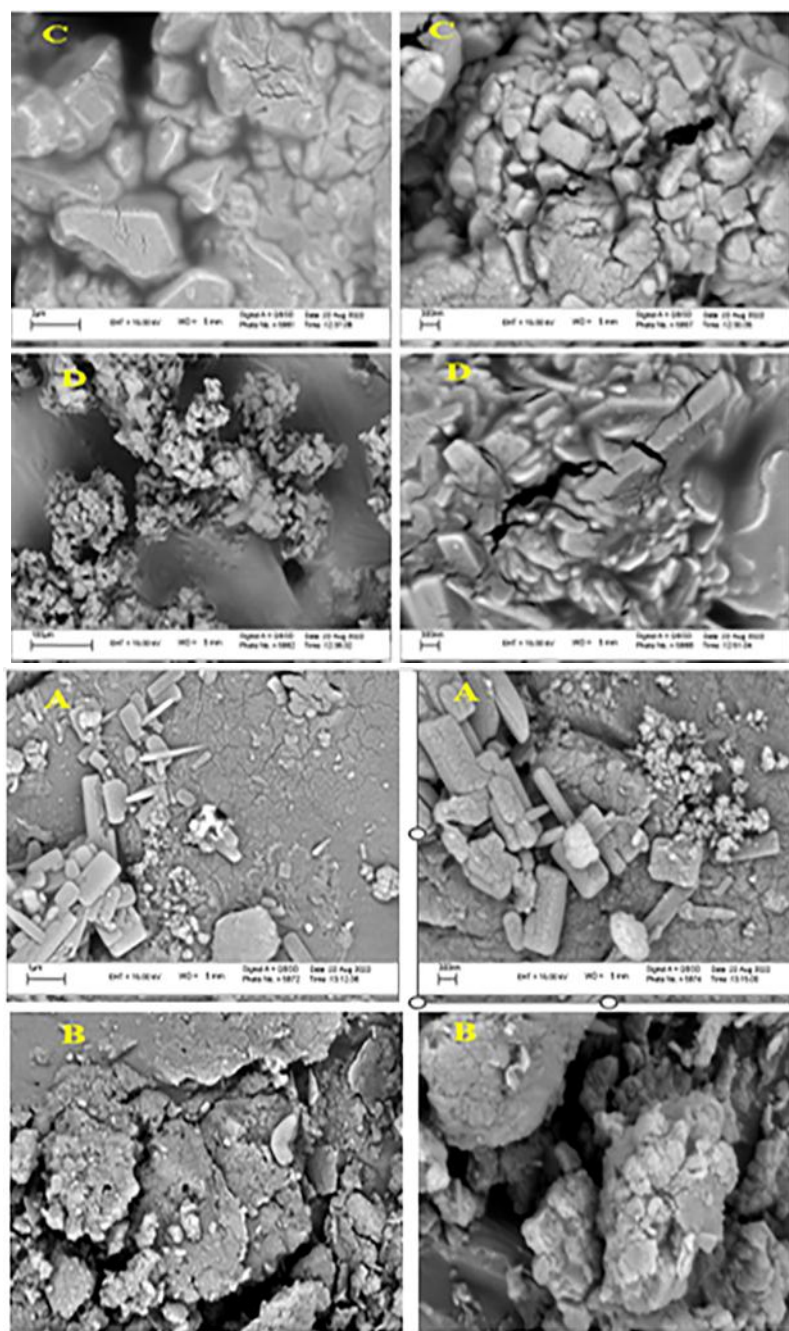


Figure1. Electron microscope images of CLA microcapsules, A) encapsulated CLA with Xanthan – Maltodextrin, B) encapsulated CLA with Guar –Maltodextrin, C) encapsulated CLA with Guar–whey protein D), encapsulated CLA with Xanthan –whey protein

References

- Anonymous. 2018. Iranian National Standard No. 2012. Milk powder-characteristics. Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
- Azari SR, Hojjatoleslami M, Mousavi ZE, Kiani H, Jalali SM. 2024. The effect of microencapsulation of microbial oil containing CLA by the complex coacervation on the physicochemical and sensory characteristics of buttermilk. *Food Chemistry Advances*. 5:100757.
- Bajaj SR, Marathe SJ, & Singhal RS. 2021. Co-encapsulation of vitamins B12 and D3 using spray drying: Wall material optimization, product characterization, and release kinetics. *Food Chemistry* 335: 127642.
- Cho YH, Shim HK, & Park J. 2003. Encapsulation of fish oil by an enzymatic gelation process using transglutaminase cross-linked proteins. *Journal of Food Science*, 68(9), 2717-2723.
- Choi KO, Ryu J, Kwak HS, & KoS. 2010. Spray-dried conjugated linoleic acid encapsulated with Maillard reaction products of whey proteins and maltodextrin. *Food Science and Biotechnology* 19(4):957-965.
- Costa AM, Nunes JC, Lima BNB, Pedrosa C, Calado V, Torres AG, & Pierucci APTR. 2015. Effective stabilization of CLA by microencapsulation in pea protein. *Food Chemistry* 168: 157-166.
- Da Rocha CB, & Noreña CPZ. 2020. Microencapsulation and controlled release of bioactive compounds from grape pomace. *Drying Technology* 1-15.
- Fang X, Shima M, & Adachi S. 2005. Effects of drying conditions on the oxidation of linoleic acid encapsulated with gum arabic by spray-drying. *Food Science and Technology Research* 11(4): 380-384.
- Farid AS, GHanbarzadeh B, & Hamishekar H. 2015. Conjugated linoleic acid loaded nanostructured lipid carriers (NLC): Optimization of particle size by response surface methodology.
- Farzadnia F. and Pezeshky Najafabadi A. 2018. Production of conjugated linoleic acid nano lipid carrier (NLC) for enrichment of low-fat pasteurized milk by it. *Innovative Food Technologies* 5(4): pp.651-662.
- Fathi-Achachlouei B, Namvar S, Shaddel R. 2024. The effect of different ratios of lecithin-cholesterol on the encapsulation stability of beta-carotene loaded nanoliposomes. *Food Research Journal* 33(4):131-49.
- Fazaeli M, Emam-Djomeh Z, Ashtari AK, 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.
- Fernandez-Avila C, Gutierrez-Merida C, & Trujillo AJ. 2017. Physicochemical and sensory characteristics of a UHT milk-based product enriched with conjugated linoleic acid emulsified by Ultra-High Pressure Homogenization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 39:275-283
- Frascareli EC, Silva, VM, Tonon RV, & Hubinger MD. 2012. Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. *Food and bioproducts processing* 90(3): 413-424.
- Gohari AS, Nateghi L, Rashidi L, Berenji S. 2024. Preparation and characterization of sodium caseinate-apricot tree gum/gum Arabic nanocomplex for encapsulation of conjugated linoleic acid (CLA). *International Journal of Biological Macromolecules*. 261:129773.
- Goula AM, & Adamopoulos KG. 2012. A method for pomegranate seed application in food industries: seed oil encapsulation. *Food and bioproducts processing* 90(4): 639-652.
- Hamishehkar H, Emami J, Najafabadi AR, Gilani K, Minaiyan M, Mahdavi H, & Nokhodchi A. 2009. The effect of formulation variables on the characteristics of insulin-loaded poly (lactic-co-glycolic acid) microspheres prepared by a single-phase oil in oil solvent evaporation method. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 74(1):340-349.
- He H, Hong Y, Gu Z, Liu G, Cheng L, & Li Z. 2016. Improved stability and controlled release of CLA with spray-dried microcapsules of OSA-modified starch and xanthan gum. *Carbohydrate polymers* 147:243-250.
- Hogan SA, McNamee BF, O'Riordan ED, & O'Sullivan M. 2001. Emulsification and microencapsulation properties of sodium caseinate/carbohydrate blends. *International Dairy Journal* 11(3): 137-144.
- Jafari SM, Ghalehnoei MG, & Dehnad D. 2017. Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder technology* 311: 59-65.

- Jayasundera, M., Adhikari, B., Howes, T., & Aldred, P. (2011). Surface protein coverage and its implications on spray-drying of model sugar-rich foods: Solubility, powder production and characterisation. *Food Chemistry* 128(4): 1003-1016.
- Jimenez M, Garcia HS, & Beristain CI. 2006. Spray-dried encapsulation of conjugated linoleic acid (CLA) with polymeric matrices. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86(14):2431-2437.
- Kaushik P, Dowling K, Barrow CJ, & Adhikari B. 2015. Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of functional foods* 19:868-881.
- Luna-Guevara JJ, Ochoa-Velasco CE, Hernández-Carranza P, & Guerrero-Beltrán JA. 2017. Microencapsulation of walnut, peanut and pecan oils by spray drying. *Food structure* 12: 26-32.
- MacDonald H. 2003. Conjugated Linoleic acid and its association with Disease Prevention. *Journal of the American College of Nutrition* 19(2):111-117.
- Mohammadi M, Pezeshki A, Abbasi MM, Ghanbarzadeh B, & Hamishehkar H. 2017. Vitamin D3-loaded nanostructured lipid carriers as a potential approach for fortifying food beverages; in vitro and in vivo evaluation. *Advanced pharmaceutical bulletin* 7(1):61.
- Nasrabadi MN, & Goli SAH. 2016. Stability assessment of conjugated linoleic acid (CLA) oil-in-water beverage emulsion formulated with acacia and xanthan gums. *Food Chemistry* 199: 258-264.
- Nejatian M, Yazdi AP, Fattahi R, Saberian H, Bazsefidpar N, Assadpour E, Jafari SM. 2024. Improving the storage and oxidative stability of essential fatty acids by different encapsulation methods; a review. *International Journal of Biological Macromolecules*.129548.
- Nielsen PM. 1997. Functionality of protein hydrolysates. *Food Science and Technology-New Yourk-Marcel Dekker* 443-472.
- Pezeshki A, Ghanbarzadeh B, Mohammadi M, Fathollahi I, & Hamishehkar H. 2014. Encapsulation of vitamin A palmitate in nanostructured lipid carrier (NLC)-effect of surfactant concentration on the formulation properties. *Advanced Pharmaceutical Bulletin* 4(Suppl 2): 563.
- Pourashouri P, shabanpour B, razavi SH, jafari SM, and shabani A. 1391. Physicochemical properties and oxidative stability of microcapsules containing fish oil and omega-3 fatty acids. Ph.D. thesis. Department of Seafood Processing, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
- Rajabi H, Jafari SM, Rajabzadeh G, Sarfarazi M, & Sedaghati S. 2019. Chitosan-gum Arabic complex nanocarriers for encapsulation of saffron bioactive components. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 578:123644.
- Rigolon TC, Silva RR, de Oliveira TV, Nascimento AL, de Barros FA, Martins E, Campelo PH, Stringheta PC. 2024. Exploring anthocyanins-polysaccharide synergies in microcapsule wall materials via spray drying: Interaction characterization and evaluation of particle stability. *Measurement: Food*. 13:100126.
- Sahin-Nadeem H, & Afşin Özen M. 2014. Physical properties and fatty acid composition of pomegranate seed oil microcapsules prepared by using starch derivatives/whey protein blends. *European journal of lipid science and technology* 116(7): 847-856.
- Santana AA, Kurozawa LE, de Oliveira RA, & Park KJ. 2013. Influence of process conditions on the physicochemical properties of pequi powder produced by spray drying. *Drying Technology* 31(7):825-836.
- Seo TR, Kim HY, & Lim ST. 2016. Preparation and characterization of aqueous dispersions of high amylose starch and conjugated linoleic acid complex. *Food chemistry* 211:530-537.
- Sheu TY, & Rosenberg M. 1995. Microencapsulation by spray drying ethyl caprylate in whey protein and carbohydrate wall systems. *Journal of food science* 60(1): 98-103.
- Souri J, Almasi H, Hamishehkar H, and Amjadi S. 2021. Sodium caseinate-coated and β -cyclodextrin/vitamin E inclusion complex-loaded nanoliposomes: A novel stabilized nanocarrier. *Lwt* 151: 112-124.
- Tolun A, Artik N, & Altintas Z. 2020. Effect of different microencapsulating materials and relative humidities on storage stability of microencapsulated grape pomace extract. *Food chemistry* 302: 125347.
- Tontul I, & Topuz A. 2014. Influence of emulsion composition and ultrasonication time on flaxseed oil powder properties. *Powder technology* 264: 54-60.

- Vélez MA, Perotti MC, Zanel P, Hynes ER, & Gennaro AM. 2017. Soy PC liposomes as CLA carriers for food applications: Preparation and physicochemical characterization. *Journal of Food Engineering* 212:174-180.
- Yang J, He H, Gu Z, Cheng L, Li C, Li Z, & Hong Y. 2020. Conjugated linoleic acid loaded starch-based emulsion nanoparticles: In vivo gastrointestinal controlled release. *Food Hydrocolloids* 101:105477.
- Yekdane N and Hossein Goli SA. 1397. Microencapsulation of pomegranate seed oil using spray dryer and its stability improvement with pomegranate juice. Master of Food Science and Technology thesis at Isfahan University of Technology.
- Yildiz G, Ding J, Gaur S, Andrade J, Engeseth NE, & Feng H. 2018. Microencapsulation of docosahexaenoic acid (DHA) with four wall materials including pea protein-modified starch complex. *International Journal of Biological Macromolecules* 114: 935-941.